

26790

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNDE
ENERJİ DÜZENLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI
ve DEĞERLENDİRİLMESİ**

Elek.Yük.Müh. **İbrahim ŞENOL**

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 27 Kasım 1992
Tez Danışmanı : Prof.Dr. Atıf URAL (Y.T.Ü.)
Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Nusret YÜKSELER (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Nesrin TARKAN (İ.T.Ü.)

İSTANBUL, Kasım 1992

Önsöz

"Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Enerji Düzenlerinin Karşılaştırılması, Değerlendirilmesi" konulu Doktora Tez çalışmamın yürütülüp tamamlanmasında güven ve sabırlarını yitirmeyen, değerli öneri ve yapıcı eleştirileriyle tezin bu durumunu kazanmasını sağlayan Sayın Prof.Dr.Atıf URAL'a ve bu düzey'e gelmede değerli katkılarını gördüğüm Sayın Prof.Oktay AYBAR'a,

Ayrıca Yıldız Teknik Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversite Kütüphane yöneticilerine, T.C.D.D. Mühendislerine, şekillerin çizilmesinde ve kontrollerinde yardımlarını esirgemeyen Taner DEMİRCİ ve Murat ÇİFTİÇİ'ye içtenlikle teşekkür ederim.

İbrahim ŞENOL

T.C. MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI
YÜKSEKÖĞRETİM GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Doktora Tezleri Komisyonu

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	i
SUMMARY	ii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN TANIMI VE SİNİFLANDIRILMASI	2
2.1. Konvansiyonel Sistemler	2
2.1.1. Büyük Mesafelerde	2
2.1.2. Küçük Mesafelerde	2
2.2. Konvansiyonel Olmayan Sistemler	2
2.3. Taşıtların Genel Sınıflandırılması	3
2.3.1. Elektrik Enerjisini Dışarıdan Bir Akım Alıcısıyla Alan Taşıtlar	3
2.3.2. Enerjilerini Enerji Depolarında Beraberle- rinde Taşıyan Taşıtlar	3
2.4. Elektrikli Taşıtların Yapım Şekillerine Göre Sınıflandırılması	3
BÖLÜM 3. ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMİNİ OLUŞTURAN DEVRELERİN TANITIMI	6
3.1. Enerji Devre Donanımı	6
3.2. Yönetme Devresi Donanımı	6
3.3. Enformasyon Elektronik Devre Donanımı	6
3.4. Güç Elektronik Devre Donanımı	6
3.5. Yardımcı Devre Donanımı	7
3.6. Tahrik Devresi Donanımı	10
BÖLÜM 4. ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA GEREKLİ ENERJİNİN CİNSİ VE SAĞLAMA YÖNTEMLERİ	12
4.1. Elektrikli Taşıtlardaki Gerekli Enerji Cinsleri	12
4.1.1. Doğru Akım	12
4.1.2. Alternatif Akım	12
4.2. Enerjinin Sağlama Yöntemleri	13
4.2.1. Enerjilerini Kendi Üzerinde Taşıyan Sistemler	13
4.2.2. Enerjilerini Dışarıdan Sağlıyarak Çalışan Sistemler	14

4.3. Enerjinin Alınış Şekli	22
4.4. Farklı Nitelikteki Taşıtların İncelenmesi, Enerji Bakımından Değerlendirilmesi	26
4.4.1. D.C. ile Çalışan Ana Hat Lokomotifi	26
4.4.2. Bir Fazlı A.C ile Çalışan Ana Hat Lokomotifi	32
4.4.3. Üç Fazlı A.C ile Çalışan Ana Hat Lokomotifi	40
4.4.4. Elektrikli Otomobiller	44
BÖLÜM 5. ENERJİ İLETİM HATLARININ GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ	51
5.1. Kompanzasyon Tesislerinde Yüksek Harmonik Rezonans Olayları	51
5.1.1. Tanım	51
5.1.2. Yüksek Harmoniklerin Üretilmesi	51
5.1.3. Yüksek Harmoniklerin Tesiri	53
5.1.4. Yüksek Harmonik Rezonansına Karşı Tedbirler	54
5.2. Yüksek Gerilim İletim Hatlarında Ferrerezonans	55
5.2.1. Ferrerezonans	55
5.2.2. İletim Sisteminin Tanımı ve Sistem Modeli	56
5.2.3. Sonuç	58
5.3. Elektrikli Tren Hatlarının Yan Etkileri	60
5.3.1. Doğru Akım Trenlerinin Etkileri	60
5.4. Demiryolu Akımının Sağlanması ve Koruma Teknikleri	69
5.4.1. Genel Bilgiler	69
5.4.2. Generatör Koruması	69
5.4.3. Gerilim Değiştirici Koruması	70
5.4.4. 110 kV'luk İletim Hattının Koruması	70
5.4.5. Kısa Devre Yönlendirme Rölesi	73
5.4.6. Frekans Rölesi	73
5.4.7. 15 kV'luk Hava Hattının Koruması	73
5.4.8. Tali İstasyonlardaki Yüksek Öncelikli 15 kV'luk Koruma Mekanizması	75
BÖLÜM 6. BİR ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMİNİN BESLENMESİNDE TALİ İSTASYONLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	77
6.1. Doğru Akım Demiryolu Tali İstasyonlarıyla İlgili Genel Bilgiler ve Sistemin Analiz Esasları	77
6.1.1. Temel Bağlantılar	77

	Sayfa No
6.1.2. Yapısal Düzenleme	80
6.1.3. Bir Tali İstasyonun Ortaya Konulduğu ve En Önemli Tesis Bölümleri	81
6.2. Doğru Akımlı Cer Sistemlerinin Güç Besleme Sistem Analizi	84
6.2.1. İşletme ve Amacı	84
6.2.2. İşlemler ve Sonuçlar	86
6.2.3. Gerekli Verilerin Kaydedilmesi	93
6.2.4. Doğru Akım Cer Sistemli Besleme Şebekele- rinin Hesabı için Giriş Verileri	94
6.3. Faydalı Frenleme Kullanan Cer Sistemleri için Eviricili Tali İstasyonlu D.C.Güç Besleme Sistemi	99
6.3.1. Giriş	99
6.3.2. Eviricili Bir Ara İstasyonun Kapasitesi ve Yeri	101
6.3.3. Evirici Karakteristikleri	103
6.3.4. Eviricinin Kontrolü	107
6.3.5. Temel Gücün A.C Karakteristikleri	111
6.3.6. Evirici Kullanıldığında Harmonik Durum	112
6.3.7. Evirici Sistemin Korunması	114
6.3.8. Kobe Metrosu için Eviricili Güç Besleme Sisteminin Kurulması	115
6.3.9. Eviricinin Diğer Demiryollarındaki Çalışma Tecrübesi	122
6.3.10.Sonuçlar	122
6.4. Alternatif Gerilim Şebekesindeki Akım Ayarlamalı Tahrik Araçlarındaki Şebeke Filtrelerinin Hesaplanmasındaki Teorik Noktalar	123
6.4.1. Giriş	123
6.4.2. Alternatif Gerilim Şebekesinde Akım Doğrultuculu Tahrik Araçları	123
6.4.3. Akım Doğrultuculu Tahrik Araçlarındaki Şebeke Filtrelerinin Konumu ve Tertiplenmeleri	127
6.4.4. Şebeke Filtresi Bileşenlerinin Tesbit Edilmesi	127
6.4.5. Bir Şebeke Filtresi Boyutlandırma İşlemine Ait Örnek	130

6.5. T.C.D.D.Sirkeci Halkalı Hattının Beslenmesi	132
6.5.1. Sistemin Nitelikleri	133
6.5.2. Seyr Teli Kesiti ve Demiryolu Beslenmesi	133
6.6. İstanbul Hafif Metro Sistemi	134
6.6.1. Besleme ve Havai Kablo Sistemi	134
6.6.2. Sistemin Simülasyonu	136
6.6.3. Güç Devre Doğrultucuları	137
BÖLÜM 7. 1x25 kV VE 2x25 kV ENTERKONNEKTE ŞEBEKEDEN BESLENEN ELEKTRİKLİ ULAŞIM DÜZENLERİNİN GENEL KARŞILAŞTIRILMASI	138
7.1. Giriş	138
7.1.1. 1x25 kV'luk Tali İstasyon Tekniği	138
7.1.2. 2x25 kV'luk Tali İstasyon Tekniği	140
7.1.3. Karşılaştırma	142
BÖLÜM 8. SONUÇLAR	144
8.1. Elektrikli Ulaşım Düzenlerine Elektrik Enerjisi Sağlayan Sistemlerden Beklenenler	145
8.2. Elektrikli Ulaşım Düzenlerinin Besleme Sistemlerinin Karşılaştırılması ve Bilgisayar Programı	147
EKLER	152
KAYNAKLAR	231
SEMBOLLER	238
ÖZGEÇMİŞ	240

ÖZET

Nüfusun artması, dolayısıyla ulaşım ve taşıma problemlerinin gün geçtikçe büyüyen boyutlarda karşımıza çıkması nedeniyle toplu taşımaya yönelme tüm dünya ülkelerinde gözlenmektedir.

Çevre şartları ve teknik imkânlarımızı göz önünde bulundurursak, raylı taşıma sistemlerinin her açıdan çok avantajlı olduğunu görürüz. Çünkü bu sistemler yüksek hız, yolculuk konforu ve çevre şartlarına en iyi uyumu sağlamaktadır. Ülkemizde ihmal edilen elektrikli toplu taşıma sistemlerinde, enerji düzenleri açısından bir boşluğu doldurmak maksadıyla hazırlanan bu tezde;

Bölüm 1'de giriş yapıldıktan sonra, Bölüm 2'de, elektrikli ulaşım sistemlerinin sınıflandırılması kısaca yapıp, elektrikli taşıtların yapım şekillerine göre örnekleri verilmiştir. Bölüm 3'de, elektrikli ulaşım sistemini oluşturan devreler tanıtılıp, tahrik devresi donanımları, Dünya'da kullanılan sistemlerden örneklerle ele alınmıştır. Bölüm 4'de elektrikli taşıtlar için gerekli enerji cinsleri ele alınmış ve farklı nitelikteki taşıtlara örnekler verilip onların bütün nitelikleri çok genel olarak açıklanmıştır. Bölüm 5'de, enerji iletim hatlarının genel değerlendirilmesinde, kompanzasyon tesislerindeki rezonans olaylarına kısaca değinilip, demiryolu akımının sağlanmasında koruma teknikleri konusu verilmiştir. Bölüm 6'da, doğru akımlı cer sistemlerinin güç besleme sistem analizi yapıp, ülkemizde çeşitli hatlarda kullanılan sistemlere örnekler verilmiştir. Bölüm 7'de 1x25 kV ve 2x25 kV enterkonnekte şebeke-den beslenen elektrikli ulaşım düzenlerinin genel karşılaştırılması yapılmıştır. Bütün bunlardan sonra sonuç kısmı olan Bölüm 8'de, elektrikli ulaşım düzenlerine, elektrik enerjisi sağlayan sistemlerden beklenenler açıklandıktan sonra çeşitli ulaşım düzenlerinin besleme sistemleri karşılaştırılmıştır.

SUMMARY

All world countries have been inclined to collective transportation because of increasing population and transportation problems.

If we take into account environmental conditions and technical possibilities, railed transportations systems have a lot of advantages. These systems are the best adaptable to circumstances conditions and have high speed and travelling comfort. Electrified transportation systems have been neglected in our country. This thesis is intended to discuss the advantages of these systems in terms of energy configurations.

In chapter 1, brief knowledge about these systems has given. In chapter 2, electrified transportation systems have been classified by construction forms of electrical vehicles and then some examples are presented. In chapter 3, electrical circuits of transportation systems are introduced, driving circuit hardware is examined. Some examples of systems used all over the world are showed.

In chapter 4, energy sorts required for electrical vehicles have been studied and qualities of different vehicles are couphly explained.

In chapter 5, energy transmission lines are evaluated generally and resonance events at compensation equipments and profection techniques of railway current are presented.

In chapter 6, power supplying system of direct current driver systems are analysed. A number of examples of various systems which are used in our different kind of electrification systems are given.

In chapter 7, electrified transportation configurations which are fed from interconnected network of 1x25 kV and 2x25 kV are generally compared each other. After all in the last chapter what we expect in future about these systems that supply electrical energy to electrified transportation systems are explained. Then the feeding systems of various transportation configurations are compared.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

2000'li yıllara giderken daha da önem ve değer kazanan "Elektrikli Toplu Taşıma Düzenleri" çağdaş elektrik ve elektronik teknolojilerin en yaygın uygulama alanlarından biri olacaktır. Elektrikli Enerji Besleme Sistemleri de bir bütün olan bu düzenin bir ünitesidir.

Çalışmamızda bu ünite, bileşenleri, karakteristikleri ve problemleriyle ortaya konulmuş ve bu arada genel enterkonnekte elektrik enerji sistemleri de, bu sistemden ayrılamaz olduğu nedeniyle ana nitelikleriyle ele alınmıştır.

Farklı Elektrikli Toplu Taşıma Düzenleri bulunması, doğal olarak, birbirinden farklı Elektrik Enerji Besleme Sistemleri olmasını gerektirdiğinden sistem her yönüyle analiz edilmiştir.

Elektrik Mühendisliğinin Elektrikli Ulaşım Bilim Dalında Elektrikli Toplu Taşıma Düzenleri bugüne dek, genellikle Elektrikli Tahrir Üniteleri olarak sistem bileşenleri, kumanda ve ayar teknikleriyle ayrıntılı olarak incelenmiş fakat bunların Besleme Sistemleri genel olarak fazlasıyla incelenip değerlendirilmemiştir.

Bu tez, bu boşluğu biraz da olsun dolduracak bir teknik ve bilimsel çalışmadır.

BÖLÜM 2

ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI

Elektrikle ulaşım ve taşıma, belli bir ağırlığın, belli bir uzaklığa, istenen süre ve koşullarda elektrik motoru kapsayan düzenlerle taşınmasıdır.

Elektrikli ulaşım ve taşımaya "Elektrikli Cer" denir. Kullanıldığı yerleri şöyle sıralayabiliriz (1).

2.1. Konvansiyonel sistemler

2.1.1. Büyük mesafelerde

2.1.1.1. Ray üzerinde yapılan cer: Demiryolları, yeraltı taşıtları (metro), tramvaylar (hızlı tramvaylar) gibi,

2.1.1.2. Yol üzerinde yapılan cer: Dizel elektrikli otobüs, trolley-büs, akümülatörlü taşıtlar gibi,

2.1.1.3. Deniz üzerinde uygulanan cer: Kıyı boyunca gemi çeken traktör, elektrikle tahrik pervaneli şilepler gibi, 1.1 ve 1.2'deki cer çeşitlerine karşı gelen uzunluk bütün dünya için yaklaşık 210.000 km'dir (2).

2.1.2. Küçük mesafelerde

2.1.2.1. Havai taşıyıcılar: Teleferik gibi,

2.1.2.2. Dağ demiryolları,

2.1.2.3. Asansörler, insan ve yük kaldırma makinaları,

2.1.2.4. Tröyler, transbordörler, gemi yükleme, boşaltma işini yapan makinalar gibi,

2.2. Konvansiyonel olmayan sistemler

2.2.1. Transrapid magnetik yastıklı, lineer elektrik motorlu taşıma sistemi uzak mesafeler için.

2.2.2. Transurban magnetik yastıklı, lineer elektrik motorlu taşıma sistemi yakın mesafeler için. Denendi, bırakıldı.

2.2.3. H.Bahn üst yolda hareket eden, doğru akım seri motor veya lineer motor tahrikli. Bu üç sistem magnetik veya hava yastıklı lineer motorlu taşıtlardandır.

2.2.4. Rail Jet

2.2.5. Elektrikli otomobil

2.2.6. Yürtüyen elektrikli kaldırım. Bu alanda bugün ikiyüz'e yakın öneri vardır. En son kullanılan M.Bahn sistemidir. Almanya'da Berlin'de deneme seferlerine başlamıştır.

2.3. Taşıtların genel sınıflandırılması:

2.3.1. Elektrik enerjisini dışarıdan bir akım alıcısıyla (seyr iletkeni veya akım rayı) alan taşıtlar. Taşıtların çalışma alanı akım alıcıların çalışma bölgelerine bağlıdır.

2.3.2. Enerjilerini, enerji depolarında beraberlerinde taşıyan taşıtlar için, taşıtların çalışma alanı enerji deposunun kapasitesine bağlıdır. Bu depo:

2.3.2.1. Bir akümülatör bataryası (akümülatörlü taşıtlar) olabilir. 2.durumda termik motor, bir dizel motoru, bir buhar türbini veya bir gaz türbini olabilir. Buna göre:

2.3.2.1.1. Dizelelektrikli taşıtlar,

2.3.2.2. Buhar türbinli elektrikli,

2.3.2.2.3. Gaz türbinli elektrikli, sınıflara ayrılırlar. Burada termik motor, bir elektrik generatörünü tahrik etmekte, bunun sonucunda oluşan gerilim de elektrik motorunu beslemektedir.

2.4. Elektrikli taşıtların yapım şekillerine göre sınıflandırılması;

2.4.1. Tek demiryolu taşıtı olarak ray üzerinde giden elektrikli taşıtlar;

Bunlarda;

2.4.1.1. Lokomotifler yalnız makina bölümlerini, gerektiğinde de ayrıca bir yük bölümü kapsarlar. Bu da aralarında bölünür;

2.4.1.1.1. Akım girişlerine göre,

2.4.1.1.1.1. Dışarıdan akım girişi olan lokomotifler,

2.4.1.1.1.2. Kendi enerji kaynağı olan lokomotifler (akümülatörlü-dizel elektrikli veya gaz türbinli lokomotifler)

2.4.1.1.2. Kullanılma amacına göre,

2.4.1.1.2.1. Uzak mesafe demiryolu lokomotifleri (dışarıdan akım girişli veya kendi enerji kaynaklı),

2.4.1.1.2.2. Yakın mesafe demiryolu lokomotifleri (dışarıdan akım girişli veya kendi enerji kaynaklı),

2.4.1.1.2.3. Dağ demiryolu lokomotifleri (hemen hemen hepsinde dışarıdan akım girişli, bazı kere de kendi enerji kaynaklı),

2.4.1.1.2.4. Yer altında veya üstünde çalışan endüstri ve maden ocakları lokomotifleri (dışarıdan akım girişli, akümülatörler veya dizelelektrikli),

2.4.1.2. Ototrenler (otomotas) bunlarda makine bölümlerinden çok yolcu kompartümanları ve bazen de posta, yük taşımaya yarayan bölümleri bulunmaktadır.

2.4.1.2.1. Bunlarda akım girişlerine göre;

2.4.1.2.1.1. Dışarıdan akım alıcı ototren,

2.4.1.2.1.2. Kendi enerji kaynaklı ototren (akümülatörlü benzinli veya dizelelektrikli).

2.4.1.2.2. Kullanılma amacına göre,

2.4.1.2.2.1. Uzak mesafe ototrenleri (dışarıdan akım girişli veya kendi enerji kaynaklı),

2.4.1.2.2.2. Yakın mesafe ototrenleri (dışarıdan akım girişli veya kendi enerji kaynaklı),

2.4.1.2.2.3. Şehir yolları için ototrenler (üst ve alt yollu (metro) demiryolu sistemleri), (daima akımın girişi dışarıdan),

2.4.1.2.2.4. Tramvaylar için ototrenler (dışarıdan akım girişli veya nadiren akümülatörlü),

2.4.1.2.2.5. Dağ demiryolları için ototrenler (çoğunlukla dışarıdan akım girişli, bazen kendine özgü enerji kaynaklı).

2.4.2. Yoldan yararlanan, yani ray üzerinde gitmeyen elektrikli taşıtlar.

Bunlar da sırasıyla;

2.4.2.1. Akümülatörlü taşıtlar: Elektrikli otomobiller insan taşımacılığında, elektrikli kariyerler ise yük taşımacılığında kullanılırlar.

2.4.2.2. Dizel elektrikli otobüsler veya ağır yük kamyonları,

2.4.2.3. Trolleybüs: Bir akım alıcısına bağlı olmakla beraber, bazen akübataryalı veya dizel elektrikli olabilen tipleri mevcuttur.

2.4.3. Üçüncü ve son bir ayırında akım cinsine göre olur.

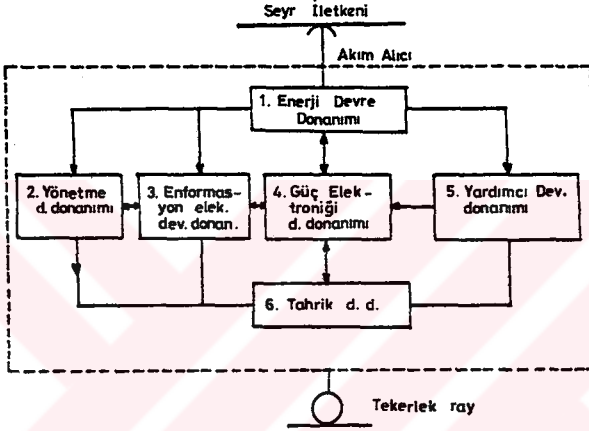
2.4.3.1. Doğru akımla beslenen elektrikli taşıtlar,

2.4.3.2. Tek fazlı değişken akımla, elektrikli taşıtları,

2.4.3.3. Üç fazlı değişken akımla, elektrikli taşıtlar. 2.4.3.1. ve 2.4.3.2 'deki akım cinsleriyle beslenip taşıt üzerinde akımın cinsinin değiştirildiği durumlar da vardır.

BÖLÜM 3

ELEKTRİKİ ULAŞIM SİSTEMİNİ OLUŞTURAN DEVRELERİN TANITIMI



Şekil 3.1. Taşıt donanımı.

3.1. Enerji devre donanımı, taşıtın güç sistemi ile bağlantısını sağlayan devredir. Bazı durumlarda transformatör, bazılarında koruma devresi dahil olmak üzere doğrultucular bulunur. Bu devrenin içinde paratonerler de bulunabilir.

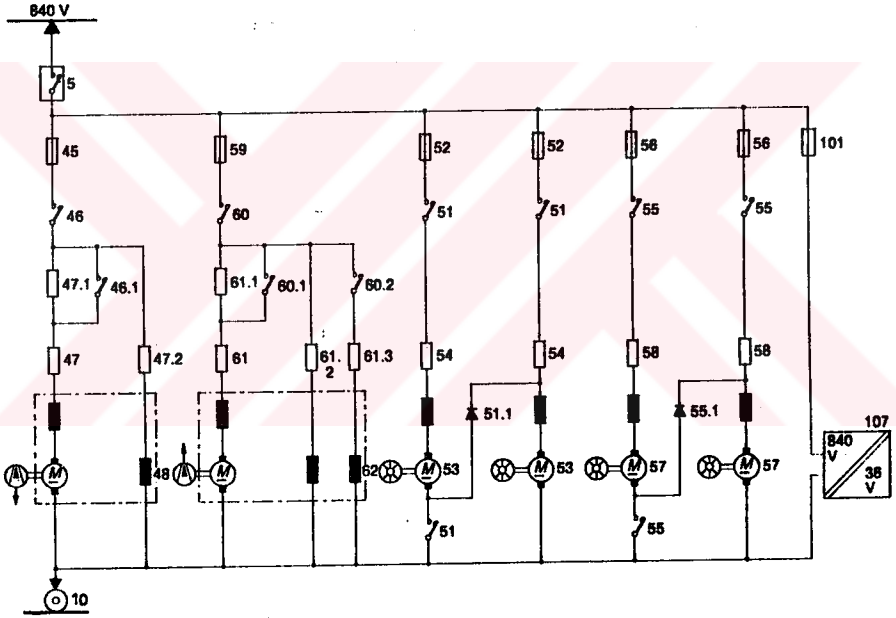
3.2. Yönetme devresi donanımı, taşıtın hareketinin sağlandığı ve kumanda edildiği devredir. Yani taşıtın yol alma ve frenleme olaylarının gerçekleştiği devredir ki, bu da $V = f(t)$ (Hız-zaman diyagramı) eğrisini sağlar.

3.3. Enformasyon elektronik devre donanımında devredeki yarı iletkenlerin, kumanda edildiği (tristörlerin tetiklenmesini sağlayan) devreler vardır. Yani motor devrelerinin dışında sistemin sinyalizasyon ve haberleşmeleri ve buna dahil devrelere de kumanda eder.

3.4. Güç elektroniği devre donanımında, motorların rotor ve uyarma devrelerinin kontrolünü yapan değerler vardır.

3.5. Yardımcı devre donanımına da, taşıtın aydınlatılması, ısıtılması, kapıların basınçlı şekilde kontrolü, akım alıcısının seyr iletkinine olan uzaklığının ayarlanması gibi değerler girer. Bunlar ayrı birer devredir. Bu devrenin gerilimlerini sağlamak için ya taşıt içindeki aküler, ya da seyr iletkeninden alınan gerilim belli bir değere indirgenerek kullanılır.

Aşağıdaki şekilde GDe 4/4 Multi-Purpose tipi DC kıyıcı ana hat lokomotifinin (Montreux - Oberland Bernois arasında çalışan) yardımcı donanımlarının temel elektrik devreleri görülmektedir (Şekil 3.5.1)



Şekil 3.5.1. Temel elektrik devresi (3)

- 5 : Yüksek hız DC devresi kesicisi,
- 45 : Kompresör motorunun sigortası,
- 46 } : Kompresör motorunun kontaktörü,
- 46.1 }
- 47 } : Kompresör motoru seri direnci,
- 47.1 }
- 47.2 }
- 10 : Topraklama fırçası,

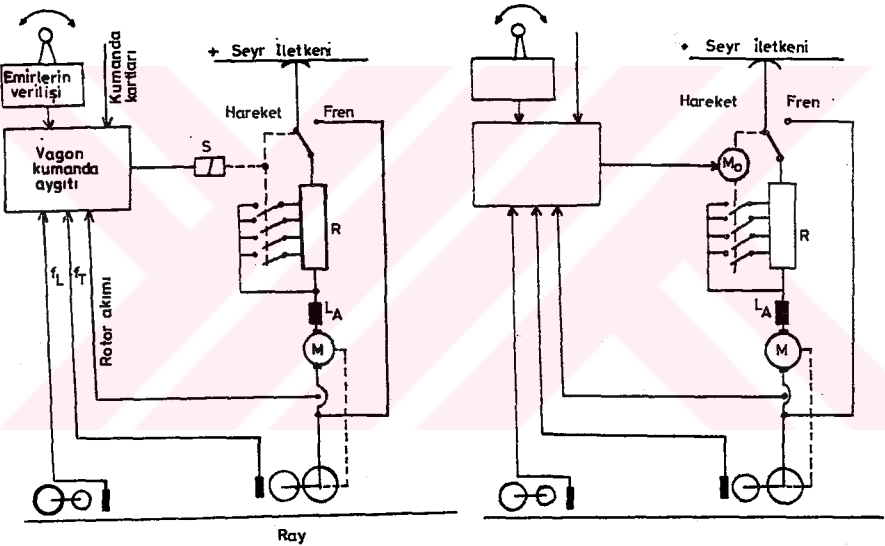
[illegible]

Şekil 3.5.2. Temel elektrik devresi (4).

- 1 : (Seyr iletkeniyle temaslı) akım alıcısı,
- 5 : Ana kesici,
- 7 : Ana transformatör,
- 10 : Topraklama fırçası,
- 31 : Tren ısıtma sistemi bağlantısı,
- 39 : Air condition ünitesi için ısıtıcı unsur,
- 41.1 : Kompresör motor için ısı düzenleyici,
- 41.2 : Pervane motorları için ısı düzenleyici,
- 41.4 : Yağ dolastırıcı pompaların ısı düzenleyicileri,
- 41.9 : Yolcu bölümünün ısı düzenleyicileri,
- 47 : Pervaneli tip kompresör için üç fazlı sincap kafesli indüksiyon motoru,
- 50 : Statik, yardımcı donanım çeviricisi,
- 53 : Çekme motor pervanesi için üç fazlı sincap kafesli indüksiyon motoru,
- 51 : Pervaneli motor için kontaktör,
- 58 : Yağ soğutucu pervane için üç fazlı sincap kafesli indüksiyon motoru,
- 60.1 : Yağ dolastırıcı pompa transformatörlerinin üç fazlı sincap kafesli indüksiyon motoru,
- 60.2 : Yağ dolastırıcı pompa çeviricilerinin üç fazlı sincap kafesli indüksiyon motoru,
- 68 : Soket (priz), 220 V tek kutuplu,
- 69.1 : Sıcak hava pervaneleri için kutup değiştirmeli üç fazlı sincap kafesli indüksiyon motoru,
- 69.2 : İlave hava veren pervaneler için, kutup değiştirmeli üç fazlı sincap kafesli indüksiyon motoru,
- 70 : Sürücü bölümündeki soğutucu ünite için üç fazlı sincap kafesli indüksiyon motoru,
- 101 : Yüksek voltaj sigortası (107 için),
- 107 : Statik batarya şarj edici,
- HBS : Yardımcı donanım servisleri bağlama çubuğu,
- BM 69D : Yolcu vagonu motoru,
- BS 69D : Sürücü bölümünün motoru,

3.6. Tahrir devresi donanımı, elektrik motorlarının dişli düzenlerinin ve dingillerin bulunduğu bölümdür. - Akımın sabit tutulması için gerekli ayarlamalar, - Kontaktör, tristör gibi elemanların kumandası, - Yol alma ve frenleme ivmelerinin sabit tutulması, - Hız ayarı, - Kayma ve patinaja karşı koruma, - Otomatik hedef ayarlanması, - En az enerji tüketiminin sağlanması bu donanımın görevleri arasındadır.

Aşağıda 4 temel tahrik sistemi görülmektedir:



Şekil 3.6.1.a.Kontaktörlü dirençler.

M : motor,

S : kontaktör,

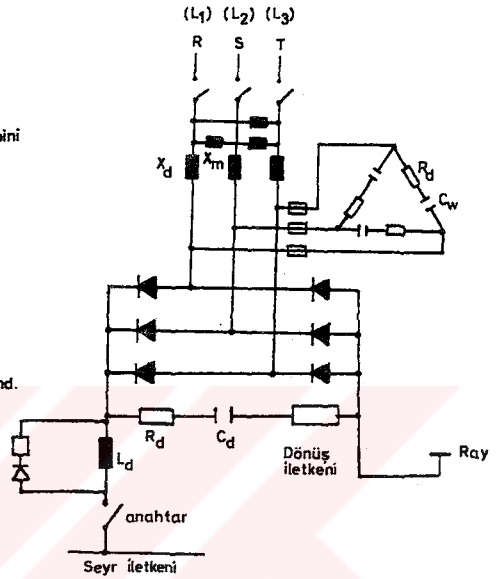
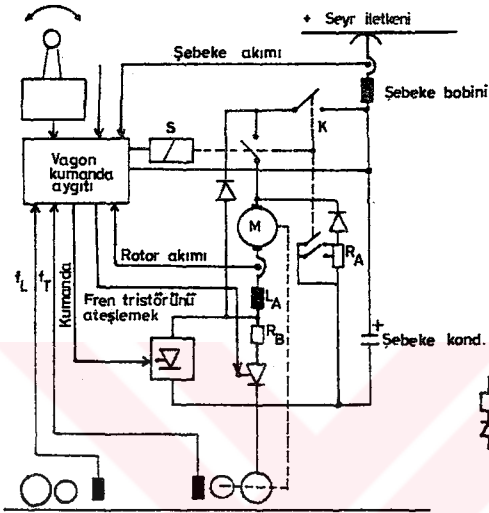
L_A : rotor devresi endüktivesi,

R : yol alma - fren direnci,

Şekil 3.6.1.b.Bağlantı silindirli (motor tahrikli dirençler).

f_L : boştaki dingil milinin frekansı (devir sayısı),

f_T : tahrik dingil milinin frekansı (devir sayısı),



Şekil 3.6.1.c.Doğru akım kıyıcılığı.

 R_B : ön direnç , R_A : diyot ön direnci,

Şekil 3.6.1.d.Köprü bağlamalı bir d.a
doğrultucu postası.

(aşırı gerilimlere karşı korunmuş)

R_d, C_w : koruma bağlaması elemanları,

C_d, L_d : doğru akım koruma
bağlaması elemanları,

X_m : doğrultmaç trafosunun öz reaktansı,

X_d : doğrultmaç trafosunun kaçak reaktansı,

BÖLÜM 4

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA GEREKLİ ENERJİNİN CİNSİ VE SAĞLANMA YÖNTEMLERİ

4.1. Elektrikli Taşıtlardaki Gerekli Enerji Cinsleri

Söyle sıralanabilir :

4.1.1. Doğru Akım: Genellikle 1500, 3000 V'dur. Bu tip eskiden büyük hatlarda kullanılan tek sistemdi. Trolleybüs, tramvay ve metrolarda bugün de kullanılmaktadır. Gerilim değeri 500-600-750 voltur. Bu değer banliyö hatlarında 600-800-1500-3000 volt olabilmektedir. 1914-1918 den sonra doğru akımın kabul edilmesi, yol almada arzulanan büyük yol alma momenti gösteren seri motorların olanaklarından ileri gelmektedir (5).

Doğru akım aynı zamanda yalnız 2 iletkene gerek gösterir. Bunun biri ray da olabilir. Doğru akım uzak mesafe taşıtları İtalya'da 5400, 5000 V' dur. 750 V, 1500 V İngiltere'de, 6000 V da Amerika'da kullanılır.

Yeraltı maden ocaklarında veya endüstri lokomotiflerde gerilim 220 V, yer üstünde 1000, 1200, 1500 V'dur. Cer için kullanılan doğru gerilim, motorların izolman olanaklarıyla sınırlandırmıştır. Dolayısıyla hattaki kayıpları azaltmak ve hız kullanılma alanını kolaylaştırmak için gerilimi yükseltmek gereklidir.

4.1.2. Alternatif akım

4.1.2.1. Üç fazlı akım (trifaze), üç fazlı akım asenkron motorlarla donatılmış makinelerde büyük bir işletme stabilitesi sağladığı için Kuzey İtalya'da kullanılmıştır. Fakat 3 iletken (2 hava, 1 ray iletkeni) gerek göstermesi sakıncası vardır. Bu bakımdan 2 demiryolu hattının kesiştiği yerlerde çok zorlanılır. Dolayısıyla yenisi yapılmamaktadır. Üzerinde çalışanlar vardır. En son 1974 yılından beri Alman demiryolları ile Brown-Boveri firması bu konuda ortaklaşa çalışmaktadırlar.

4.1.2.2. Tek fazlı akım (Monofaze),

4.1.2.2.1. Direk motorlu sistem. Kollektörlü alternatif akım tek fazlı motor, doğru akım motorunun bütün olanaklarını gösterir. Fakat devamlı

monofaze motorun kullanılması komitasyon problemlerini ortaya koyar ki, bu olay frekans arttıkça daha da zorlaşır. Çünkü komitasyon sargısının reaktansı (kısa devredeki) frekansla orantılıdır. Bu bakımdan $16.2/3$ veya 25 Hz lik frekanslara düşülmüştür.

Monofaze; doğru akım gibi 2 iletkene gerek gösterir ve 50 Hz, 60 Hz gibi endüstride kullanılan frekanslarla aynı olanakları gösterir. Onun için 15000 ila 25000 V gibi oldukça yüksek bir gerilim altında 50 Hz'lik monofaze akım kullanılmaktadır. Enerji nakil hatları genellikle üç fazlı olarak yapıldığına göre, monofaze bir fazı kullanmakla veya Scott bağlamalarıyla elde edilir. Gerilim yükselmesi yardımcı elektrik santrallerinin oldukça azalmasını sağlar.

4.1.2.2.2. Tek üç fazlı (Mono-Trifaze) sistem

Üç fazın avantajlarından, üç fazlı motorları, tek fazlı beslemeli olacak şekilde donatmak için yeni düzenler aramaya yöneltmiştir. Monofaze sistemlerde dönen bir konvertisör, monofazeyi motorlara dağıtılan üç fazlıya çevirir.

4.1.2.2.3. Tek fazlı doğru sistem

Üç fazlıda olduğu gibi, doğru akımın avantajları, doğru akım motorlu çözümler aramaya yöneltir, fakat yine de besleme monofazedir. Bu durumda sistem döner veya statik doğrultmaçlarla donatılmıştır.

4.2. Enerjinin Sağlama Yöntemleri

4.2.1. Enerjilerini kendi üzerinde taşıyan sistemler

Enerjilerini kendi üzerinde taşıyan sistemlerde enerji iki şekilde depo edilmektedir;

- a) Bir akümülatör bataryası ile,
- b) Bir ısı motorunu beslemek üzere ısı yakıt deposu ile,

Elektrikli tahrik sistemi yanında ısı motoru da içeren araçlara, hibrit elektrikli araçlar denir. Bunlar daha çok büyük güçlü elektrikli araçlarında kullanılır. Isı motorunun tahrik ettiği generatörde üretilen elektrik enerjisi, kontrol edilerek elektrikli tahrik motorunda kullanılmaktadır.

Enerji deposu olarak akümülatör bataryaları kullanılan araçlarda, enerji, bataryalarda kimyasal enerjiye dönüştürülerek saklanmaktadır. Ayrıca daha ileri bir teknoloji ile de yakıtlı piller, hatta atom pilleri taşınabilir enerji kaynakları olarak söz konusu olabilecektir. Bizim burada üzerinde durduğumuz enerjilerini doğrudan elektrik enerjisi olarak depolayan veya üreten, belli bir güzergaha bağlı olmadan, serbestçe dolaşabilen, bireysel kullanıma olanak tanıyan elektrikli otomobillerdir. İleride elektrikli otomobillerin yapısı incelenecektir.

4.2.2. Enerjilerini dışarıdan sağlayarak çalışan sistemler

Bu sistemleri de akım cinslerine göre şöyle sınıflandırabiliriz:

- a) Doğru akımla beslenen elektrikli taşıtlar,
- b) Tek fazlı değişken akımla beslenen elektrik taşıtları,
- c) Üç fazlı değişken akımla beslenen elektrik taşıtlardır ki, a ve b'deki akım cinsleri ile beslenip taşıt üzerinde akımın cinsinin değişti-rildiği durumlar da vardır.

Yukarıda bahsedilen enerji şekillerinin elde edilişi, elektrikli işletmeler için;

1. Sabit tesisler bakımından :

- 1.1. Santraller,
- 1.2. Enerji iletim hatları,
- 1.3. Yardımcı elektrik santralleri,
- 1.4. Seyir iletkenlerinden oluşmuştur.

2. Seyir iletkeninden geçen akım bakımından:

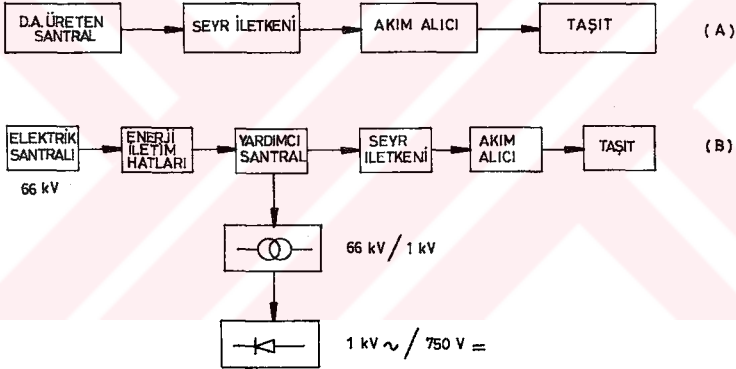
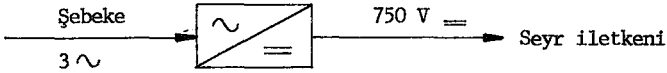
- 2.1. Doğru akım (santralda üretilmez),
- 2.1.a. Motor-generatör,
- 2.1.b. Doğrultmaç düzenleriyle elde edilir.

Bugün en çok bu sistem üzerinde durulmaktadır (2.1)

- 2.2. Tek fazlı alternatif akım,
- 2.2.1. Düşük frekanslı tek fazlı alternatif akım veren özel yardımcı santraller,
- 2.2.2. Normal şebeke frekanslı alternatif gerilim veren yardımcı santraller .

4.2.2.1. Elektrikli Ulaşım Sistemlerinin Doğru Akımla Beslenmesi

Bu yöntem 1914-1918 yılları arasında kullanılmaya başlanmıştır. Bu sebeple elektrikli ulaşım sistemlerinde kullanılan en eski besleme şeklidir. Bu beslemede kullanılan gerilim değeri genellikle 500-600-750 Volt'tur. Besleme şekli basitçe aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Buradaki yardımcı santralin görevi;

- AA-DA dönüştürme yapar,
- Gerilim seviyesini değiştirir,
- Seyr iletkenin gerilimini sabit tutar,
- Hattaki kayıpların (RI^2) çok olmasını engeller.

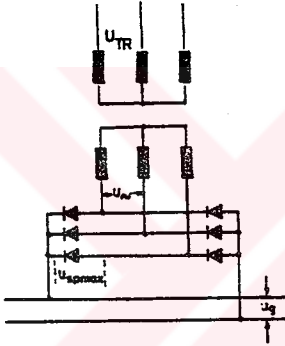
Taşıta gerekli elektrik gücü uygun noktalardan beslenen seyr iletkeni veya akım rayı vasıtasıyla sağlanır. Tramvaylarda seyr iletkeni olarak bir hat kullanılır. Ray da, dönüş iletkeni görevini yapar. Trolley-büslerde ise lastikleri nedeniyle 2 havai hat kullanılır.

Doğru akım sistemlerinde, doğru akım üretilmesinin mümkün olduğu çok kısa mesafeli ulaşım sistemleri hariç olmak üzere genellikle enerji

üç fazlı yüksek gerilim hatlarından yardımcı santraller yoluyla sağlanır. Yardımcı santrallerden gelen yüksek gerilimi düşüren bir transformatör ve doğrultucular bulunur. Günümüzde yardımcı santrallerin hemen hepsi güç elektroniği devreleriyle donanımlı olduklarından, uzaktan kumanda edilebilen ve sürekli bakım gerektirmeyen tiptendirler.

Kent içi ve kentler arası ulaşımında doğru akım sistemi pek çok ülkede örneğin; Fransa, İtalya, İngiltere ve Belçika'da kentler arası, Almanya'da ise kentiçi ulaşımında kullanılmaktadır.

Yardımcı santraller için 3 fazlı doğrultucu bağlantıları;

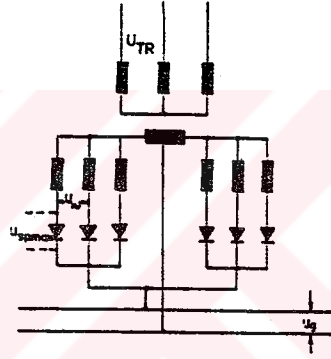


Şekil 4.2.2.1.a. Köprü bağlantısı

$$U_g = 1,35 U_n \text{ (Altı darbeli)}$$

$$U_{gmax} = 1,05 U_g$$

$$P_{TR} = 1,05 P_g$$

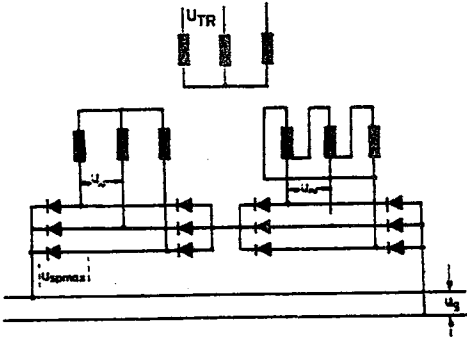


Şekil 4.2.2.1.b. Boğucu bobin bağlantısı.

$$U_g = 1,17 U_n \text{ (Altı darbeli)}$$

$$U_{gmax} = 2,09 U_g$$

$$P_{TR} = 1,34 P_g$$



Şekil 4.2.2.1.c. Köprü seri bağlantısı.

$$U_g = \text{Doğru gerilim ortalama değeri,}$$

$$U_{gmax} = \text{Tıkama geriliminin en yüksek değeri,}$$

$$P_{TR} = \text{Trafonun tip gücü,}$$

$$P_g = \text{Doğru akım gücü.}$$

$$U_g = 1,35 U \text{ (12 darbeli)}$$

$$U_{gmax} = 1,05 U_g$$

4.2.2.2. Elektrikli Ulaşım Sistemlerinin Alternatif Akımla Beslenmesi

4.2.2.2.1. Tek fazlı alternatif akımla besleme

Santralardan alınan üç fazlı gerilim yardımcı istasyonlarda tek fazlı 25 kV gerilime indirilip seyr iletkenine verilir. Taşıtın içindeki şu kullanım şekillerine rastlanır.

a) Direk motorlu sistem; seyr iletkeninden alınan tek fazlı alternatif akım, kollektörlü seri motorda kullanılır.

b) Tek üç fazlı sistem; seyr iletkeninden alınan tek fazlı alternatif akım, üç fazlı alternatif akıma dönüştürülerek üç fazlı alternatif akım motorunda kullanılır.

c) Tek fazlı AA-DA Sistemi; seyr iletkeninden alınan tek fazlı alternatif akım doğrultucular yardımıyla doğrultularak bir doğru akım motorunda kullanılır.

En yaygın olanı 3.şıktaki durumdur. Günümüzde de elektrikli taşımacılıkta en çok kullanılanı doğru akım seri motoru olup, bunu besleyen tek fazlı alternatif akım sistemi de en modern sistemdir. Besleme 25 kV-50 Hz değerindedir. Bu değer taşıt içinde 0,7 kV'a düşürülerek ve doğrultularak doğru akım seri motor beslenmektedir. Doğru akım seri motorun ideal bir devir sayısı moment eğrisi vardır. Bu eğriye göre düşük hızlarda yüksek moment sağlanmakta ve motor nominal gücünün iki katına kadar yüklenebilmektedir.

Tek Fazlı alternatif akımda 16.2/3 Hz ile besleme:

16.2/3 Hz tek fazlı alternatif akım sistemlerinde cer motorları, tek fazlı kollektörlü alternatif akım seri motordur. Taşıttaki bir transformator yardımıyla seyr iletkenindeki gerilimin değeri düşürülür. Düşük frekanslı tek fazlı alternatif akım sistemi Amerika'da 25 Hz olarak pek az kullanılmasına rağmen, İsviçre, Almanya, Avusturya ve İskandinav ülkelerinde 16.2/3 Hz değeri büyük uygulama alanları bulmuştur. Bugün artık zorunlu olmadıkça kullanılmamaktadır.

- 50 Hz ile besleme:

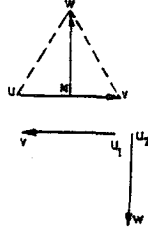
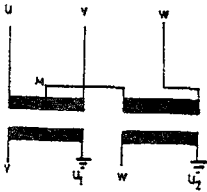
50 Hz frekanslı, tek fazlı alternatif akım sistemi ise Türkiye, Fransa, Rusya ve Japonya'da ve bilhassa yeni yapımı planlanan elektrikli ulaşım sistemlerinde büyük gelişme kaydetmiştir. Bugünün olduğu kadar yarının da sistemi olarak görülmektedir.

4.2.2.2.2. Üç fazlı alternatif akımla besleme

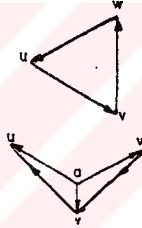
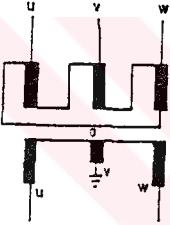
Üç fazlı alternatif akım sisteminde taşıtlar için gerekli enerji, santraldan doğrudan doğruya, ya da yüksek gerilim enerji sisteminden alınarak yardımcı santralda bulunan bir trafo üzerinden sağlanır. Burada kullanılan cer motorları (genellikle üç fazlı asenkron motorlardır) orta gerilimlerde ekonomik olarak yapılabilmeleri ve verimlerinin yüksek olması nedeniyle bir üstünlük sağlarlar. Taşıtın yokuş aşağı hareketinde senkron hızın üstünde bir çalışma gerçekleştiğinden motorun generatör olarak çalışması sonucu besleme hattına enerji vermesiyle enerji kazancı da sağlar (faydalı frenleme).

Üç fazlı alternatif akım sistemi bugün artık özel çalışmalar dışında kullanılmamaktadır.

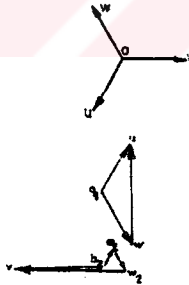
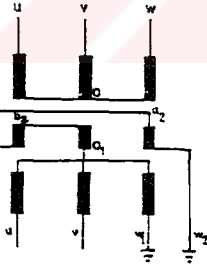
Demiryolu işletmelerine enerji sağlanmasındaki temel bağlantılar şöyledir :



Scott bağlantısı



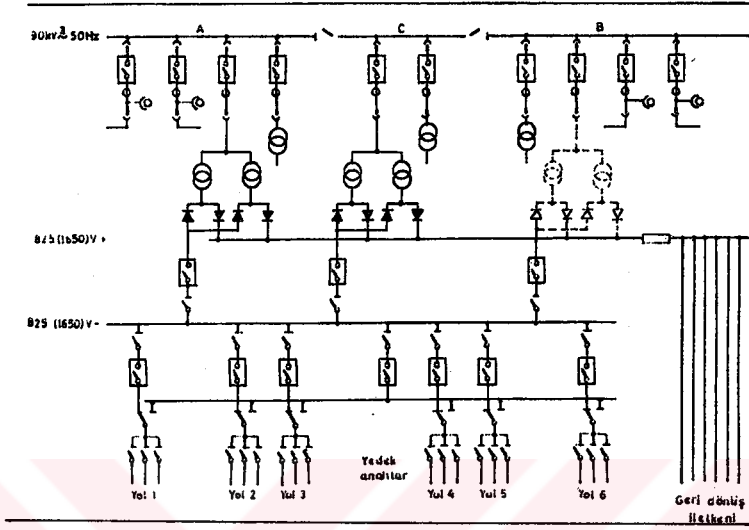
Üç-iki fazlı bağlantı



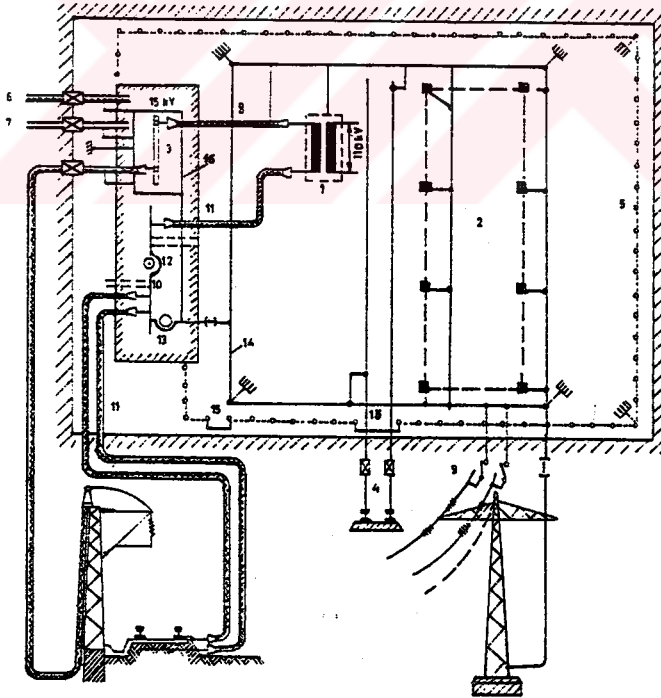
Leblanc bağlantısı

Şekil 4.2.2.2. 50 Hz'lik tek fazlı alternatif akım beslemeli demiryolu işletmelerinin enerji sağlanmasındaki temel bağlantıları.

Aşağıdaki şekillerde de, alternatif akımlı yardımcı istasyon bağlantı şeması ve topraklama şemaları görülmektedir;



Şekil 4.2.2.3. Yardımcı istasyon bağlantı şeması.



Şekil 4.2.2.4. Alternatif akım yardımcı santralının topraklama şeması.



Yardımcı santral arazisi,



Yardımcı santral binası 15 kV-Tesisi,

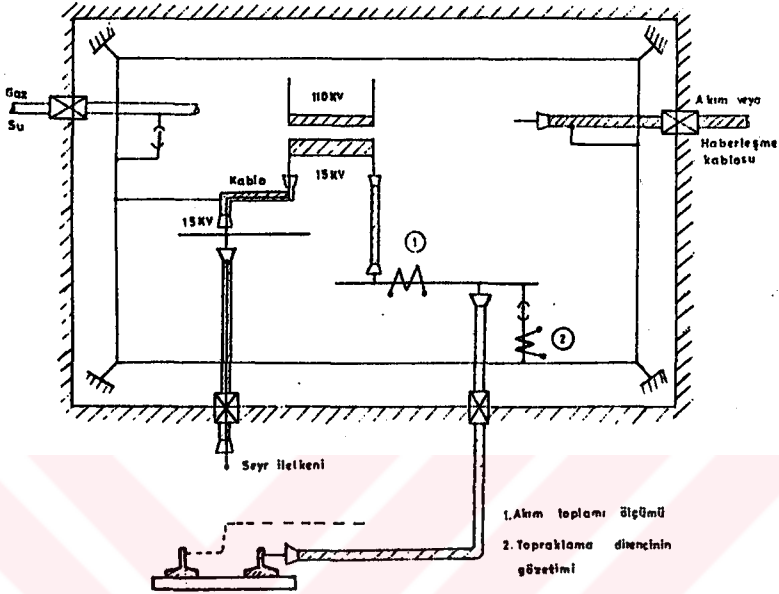


İzolasyon parçaları,



Su topraklaması,

1. Trafo 110/15 kV,
2. 110 kV-Açık hava bağlantı tesisi,
3. 15 kV-Oda içi bağlantı tesisi,
4. Bağlantı yolu,
5. Çit,
6. Zayıf akım,
7. Su borusu,
8. 15 kV-kablo (besleme kablosu),
9. Topraklama anahtarı,
10. Sıfır rayları,
11. 1 kV-kablo (geri dönüş kablosu),
12. Toplam ölçüm için gerilim trafosu,
13. Topraklama direncinin gözetimi için akım trafosu,
14. 110 kV-tesis-ring toprak kablosu,
15. Çit kapısı köprülermesi,
16. 15 kV-tesis topraklama kablosu,



Şekil 4.2.2.5. Bir yardımcı santralin şematik topraklama şeması.

4.3. Enerjinin Alınış Şekli

Elektrikli ulaşım veya taşıma aracı için gerekli akımı üzerinde bulunduran iletkene seyr iletkeni denir. Araç bu akımı, iletkenle temas halinde bulunarak alır.

Seyr iletkeninin tesisi için havai hat veya iletici ray olmak üzere iki sistem kullanılır:

1- İletici ray : Banliyö hatları ile Chambrey-Modane hattı üzerinde kullanılan ilk sistem bu oldu. İletici ray yer yer izole edilen bloklar üzerinde normal traversten biraz daha uzun olan cari hat traverslerine oturur.

Hattın üzerinde gidip gelen personelin elektrik kazalarından korunması için de icap eden yerlerde iletici ray ahsap bir sandıkla kapatılmış olup, sürtücü teması için bu sandığın bir yanında bir aralık bırakılmıştır.

Demiryolu donanımı,hemzemin geçitler v.s. gibi yerlerde iletici ray yer yer kesintiye uğramak zorundadır. Eğer boşluk uzunluğu fazlaca ise,

mümkün olduğu kadar karşı tarafa diğer bir iletici ray konur. Bundan dolayı izolasyonlarda çok defa küçük boyda iletici raylar tekrarlanır. Bir rayın diğeri ile akım iletme bakımından sürekliliği 400 mm^2 kesitli izole kablolarla temin edilir. Üçüncü ray vasıtası ile temas hattı tesisi oldukça pahalıdır ve ayrıca daha önce de bahsedildiği gibi personelin, hatların içinden gidiş gelışı için tehlike arz eder. Buna mukabil, katenlerin büyük fırtına ve hava bombardımanı sırasında hasıl olan hava basıncı tesiri ile kolayca tahrip olmalarına karşın üçüncü ray daha az tahribata uğrar.

2- Katener: Elektrikleme için kullanılan diğer bir sistem de katener olup, demiryolu üzerine asılmış bulunan bir temas hattı ile yol ekseninde hassas bir şekilde yatay olarak tutulan bir taşıyıcı kablo sisteminden teşekkül eder. Muhtelif katener sistemleri mevcut olmasına karşın burada üzerinde durulan kompund katener sistemidir. Sistemde genelde şu kısımlar mevcuttur;

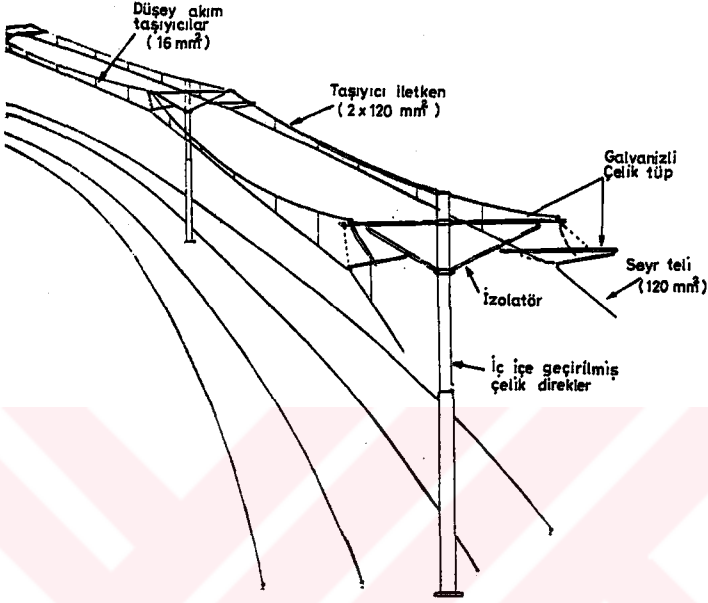
a) Konsollar veya pandüller ihtiva eden, direkler vasıtasıyla taşınan esas taşıyıcı kablo olup, çelik-alüminyumdan yapılır.

b) Yardımcı taşıyıcı kablo denen bir kablo olup sabit düzey çubuklar vasıtası ile (pandüller) esas taşıyıcı kabloya asılmıştır ve alüminyum-çelikten yapılır.

c) Yardımcı taşıyıcı kabloya asılan temas hattı, kompund katenlerde, bilhassa büyük hızlarda, lokomotif ve otomotrislerin pantografları ile iyi bir temas temin etmek ve ısınma tesirini yok etmek için çift yapılmıştır.

Aşağıda örnek olarak İstanbul hafif metrosunda kullanılan Katener hattından bir kesit ve genel boyutları verilmiştir (Şekil 4.3.1).

Katener hattının genel boyutları: $3 \times 120 \text{ mm}^2$ kesitli bakır iletkenlerden oluşan, iki taşıyıcı ve bir iletkenlerden oluşmuştur. Yaklaşık her 1000-1200 m aralıkta, katener hattına dengeleme balans üniteleri yerleştirilmiştir. Bu üniteler vasıtasıyla temas telinin gergi düzeni ayarlanmaktadır.



Şekil 4.3.1. Katener hattından bir kesit.

Döşenen Katener Sistemi Boyutları:

Taşıyıcı iletken bakır teli uzunluğu : 40 km

Seyr teli uzunluğu : 26 km

Kenar tip katener direği : 220 adet

(Sadece tek hattı besler)

Orta tip katener direği : 52 adet

(İki hattı da besler)

Workshop alanındaki katener direkleri: 191 adet

Tünel içinde boru tipli katener direkleri kullanılmıştır.

Aşağıda genel bir örnek olarak; İstanbul Hafif Metrosunun katener enerjisinin sağlanması için gerekli yardımcı santralin trafoları ve trafo istasyonlarındaki doğrultucu üniteleri ele alınmıştır.

Katener enerjisi :

Hattın normal gerilimi	750 V D.C
Hattın maksimum gerilimi	825 V D.C
Hattın minimum gerilimi	500 V D.C

Hattın akımı	386 A D.C
Elektro dinamik frenlemedeki hattın gerilimi	900 V D.C

Bu katener enerjisinin sağlanması için tali istasyon olarak beş adet trafo merkezi 34,5 kV'luk besleme girişlerinden köprülenerek birbirine bağlanmıştır. Yani 34,5 kV'luk enerjiyi, kesiciler vasıtasıyla diğer istasyonlara aktarmak mümkündür.

Trafo merkezlerinden dört adedi, Katener enerjisini ve istasyon aydınlatması için gerekli enerjiyi sağlar. Beşinci trafo merkezi, sadece workshop alanının aydınlatma ve yardımcı servislerinin elektrik enerjisini sağlamada kullanılır (380/220 V)

Trafo merkezlerinin yerleri ve değerleri:

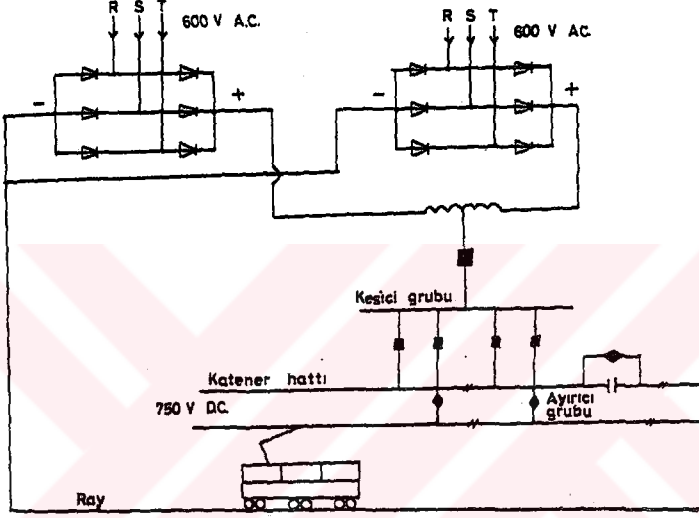
Aksaray trafo merkezi	: 34,5/2 x 0,6 kV	S= 2,4 MVA
Ulubatlı trafo merkezi	: 34,5/2 x 0,6 kV	S= 2,4 MVA
Sağmalcılar trafo merkezi	: 34,5/2 x 0,6 kV	S= 2,4 MVA
Otogar trafo merkezi	: 34,5/2 x 0,6 kV	S= 2,4 MVA
Ferhatpaşa (merkez) trafo m.:	34,5/0,4 kV	S= 1250 kVA

Herbir trafo merkezinde, ikişer adet kuru tipte güç trafosu mevcuttur. Bunlara ilaveten Ferhatpaşa trafo merkezi hariç, diğerlerinde birer adet yağlı tip yardımcı servis trafoları bulunmaktadır. Bu trafolar, istasyonların enerji sistemini beslemekte kullanılır. İstasyondaki yardımcı servis trafolarının değerleri:

Aksaray trafo merkezindeki	: 500 kVA	34,5/0,4 kV
Ulubatlı "	: 315 kVA	34,5/0,4 kV
Sağmalcılar "	: 100 kVA	34,5/0,4 kV
Otogar "	: 315 kVA	34,5/0,4 kV

Doğrultucunun arma değerleri 2,4 MVA, 2 x 0,58 kV AC/0,75 kVDC'dir. Bu doğrultucu Ünitesinden, her trafo merkezinde iki adet bulunmaktadır. Kesici ve ayırıcılar 750 V D.C uç gerilimine ve 4000 A açma akımına sahiptir. Kesicilerin kısa devre akımları 200 kA dir. Çıkış kesicileri, doğru akım kesicileridir. Kesiciler motorlu olarak, ayırıcılar elle kumandalı olarak kontrol edilirler. Bütün trafo merkezleri, TEK'ten enerji alabilecek

şekilde düzenlenmiştir. Fakat yalnızca Ulubatlı ve Sağmalcılar istasyonları TEK'ten direk beslenirler. Trafo istasyonlarındaki doğrultucu ünitesinin devresi şöyledir :



Şekil 4.3.2. Trafo istasyonlarındaki doğrultucu ünitesi.

4.4. Farklı Nitelikteki Taşıtların İncelenmesi ve Enerji Bakımından Değerlendirilmesi

4.4.1. D.C ile çalışan ana hat lokomotifinin ettüdü

DC çekim sisteminde önceleri 600 V'luk bir gerilim kullanılırdı. Zamanla doğru akım motorlarında elde edilen gelişmeler sayesinde her motorun 1500 V'luk gerilimle çalışması sağlanmıştır ve seri olarak iki motor bağlamak sureti ile gerilim 3000 V'a, Amerika'da 5000 V'a ve İtalya'da 4500 V'a kadar çıkarılmak sureti ile daha yüksek gerilimlerde tecrübe edilmiştir. Bugün umumiyetle doğru akımlı sistemde tatbik olunan gerilimi üçe ayırmak mümkündür; 600-750-800 V'luk alçak gerilim, kısa mesafeli banliyö hatlarında kullanılır. İkincisi 1500 V'luk gerilimin ve nihayet üçüncüsü 3000 V'luk ve üstündeki gerilimdir.

Doğru akım sistemli işletmeler son senelere gelinceye kadar daha çok Fransa'da, Amerika'nın önemli bir kaç hattında ve İtalya'da kullanılmıştır. Doğru akımlı taşıtlar D.C seri motorlarla donatılmıştır. Yol alma ve

frenleme cer kuvveti dirençlerle veya doğru akım kıyıcısı ile düzenlenir. Kontaktörler veya motorla tahrik edilen sistemler direnci değiştirirler. D.C ile çalışan lokomotiflere örnek olarak Chemin de fer Montreux-Oberland Bernois ve Chemins de fer Fribourgeois Gruyere-Fribourg-Morat hatlarında çalışan GDe 4/4 tipi, D.C kıyıcılı ana hat lokomotifi ele alınmıştır.

GDe 4/4 Multi-Purpose tipi, D.C Kıyıcılı Lokomotif:

Montreux-Oberland Bernois (MOB) demiryolları Montreux'tan Cenova gölü üzerinden Zweisimmen ve Lenk'den geçerek Simmental vadisinden geçen yolu takip ederek ünlü turist merkezi Château-d'Oex ve Gstaad'a gider. Geçen yıllar içinde buralara gelen turist sayısında inanılmaz bir artış oldu. Tabii ki trenle gelen turistler, trenlerin işlerini yoğunlaştırdı. Bunun sonucu olarak ACMV (Ateliers de Constructions Mecaniques de Vevey) sistemi tanıtıldı.

1981 Ağustosunda MOB, Brown Boveri Şirketinden ve SLM (Swiss locomotive and Machine Works, Winterthur)'den elektrik ve mekanik donanımı oldukça iyi olan GDe 4/4 Multi-Purpose tipi ana hat lokomotifleri (Nos:6001-6004) (Bo'Bo' ardaşık dingilli) sipariş etti. Bu siparişin hemen ardından GFM (Gruyere-Fribourg-Morat)'de 1982'nin başında 2 adet aynı taşıma araçından sipariş etti. Bu siparişin ardından Nos.101-102 nolu taşıtlar teslim edildi ve 1983 ortasında işletmeye alındılar. Aşağıdaki tabloda MOB ve GFM ulaşım hattında çalışan GDe 4/4 Multi-Purpose tipi ana hat lokomotifinin hatlarının verileri gösterilmiştir.

GDe 4/4 Multi-Purpose tipi lokomotifin motoru hava soğutmalıdır ve çok önemli olmak üzere rotasında yol alırken mühim sayılabilecek eğim ve kavisleri düz yollar kadar iyi geçer. Bu da yüksek hız istenen, çabuk varılması istenen yerler için çok ehemmiyetlidir. Ayrıca bu tip lokomotiflerin ağır yük taşımacılığında ve kısa yol taşımacılığında da önemli bir yeri vardır.

Güçün,D.C kıyıcıları ile kontrolünün bir sonucu olacak bu tip trenler seçilmeye başlandı. Bunun sonucu olarak 4 dingilli çeviricili lokomotifler daha ağır yüke nazaran daha dayanıklı daha kullanışlıydılar. Daha sonra, 4 dingilin yetmediğinde ise 6 dingilli ve 8 dingilli çekme araçları da yapıldı.

EBAT	MOB	GFM
Baştan başa hattın uzunluğu	75,3 km	48,9 km
Çalışma şekli	DC	DC
Ray açıklığı çubuğu	1000 mm	1000 mm
Max.dingil yükü	13 ton	13 ton
Kontak teli DC gerilimi		
-Nominal gerilim	840 V	900 V
-Max.gerilim	600-1050 V'a kadar	650-1000 V'a kadar
Min.eğim çapı	45 m	90 m
Max.hız	80 km/h	80 km/h
Deniz seviyesinden en yüksek nokta	1275 m	858 m
Deniz seviyesinden en alçak nokta	395 m	668 m

Tablo 4.4.1.1. MOB ve GFM ulaşım hattında çalışan lokomotiflerin hat bilgileri (6).

Eğim	Çekme Yüğü	Hız
% 3	300 ton	40 km/h
% 7	110 ton	40 km/h

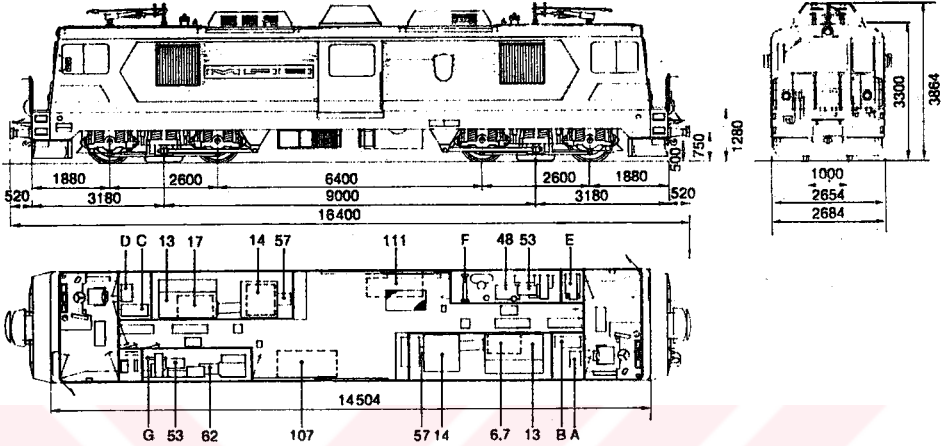
Tablo 4.4.1.2. Cer Bilgileri.

Çekicinin Elektrik Devresi:

Aşağıdaki tablo GDe 4/4 Multi-Purpose tipi ana hat kıyıcılı, MOB'de kullanılan Nos.6001-6004 ve GFM'de kullanılan Nos.101-102 lokomotiflerinin teknik bilgilerini göstermektedir.

Ray açıklığı çubuğu	1000 m
Kontak teli dc gerilimi	
- Nominal değeri	840 V
- Limit değeri	600-1050 V'a kadar
Dingil (mil) düzeni	Bo' Bo'
Tamponlar arası mesafe	16400 mm
Mil ekseni arası mesafe	9000 mm
Tekerlek eksenleri arası mesafe	2600 mm
Çalışırken müsaade edilen ağırlık	48,5 ton
Elektriksel donanımın ağırlığı (Çarklı takımı hariç)	14,5 ton
Net yükleme	1,5 ton
Çekme motoru çapı:	
Yeni	1070 mm
Yarı yıpranmış	1035 mm
Çekme motoru sayısı	4
Ulaşım oranı	1:6
Mildeki bir saatlik değer	1068 kW
- Tekerlekteki çekme kuvveti	86,5 kN
- Uygun hız	44,2 km/h
Tekerlekteki max. çekme kuvveti	170 kN
Tekerlekteki max. motor fren kuvveti	140 kN
Max. Hız	100 km/h

Tablo 4.4.1.3.GDe 4/4 Multi-Purpose'nin teknik bilgileri (7).

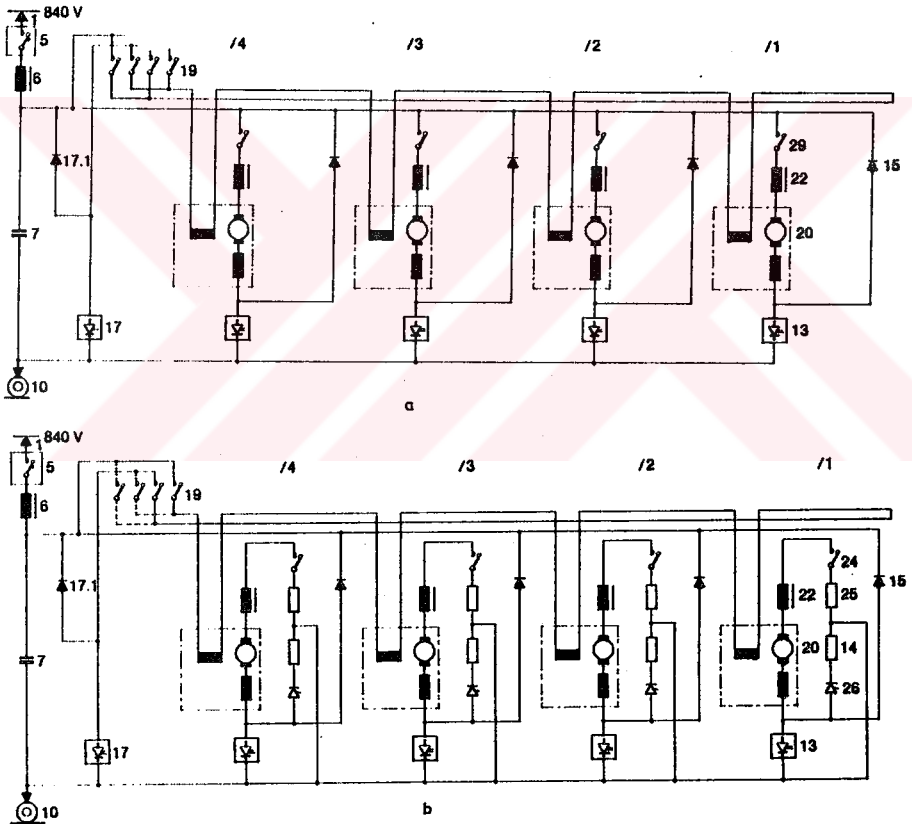


Şekil 4.4.1.1. GDe 4/4 tipi Bo' Bo' dingil düzenine haiz MOB'de çalışan lokomotifin donanım düzeni (8).

- 6 : Giriş reaktörü,
- 7 : Giriş kapasitesi,
- 13 : Alan kıyıcıları (2 tahrik motoru için),
- 14 : Frenleme direnci,
- 17 : Uyarma kıyıcısı,
- 48 : Kompresör için motor,
- 53 : Tahrik motorunun fanı için motor,
- 57 : Kıyıcı ve fren direnci fanları için motor,
- 62 : Vakum pompası için motor,
- 107 : Batarya şarj edicisi,
- 111 : Batarya,
- A : Kontrol donanımı,
- B : Kontrol donanımı,
- C : Yardımcı donanım,
- D : Yardımcı donanım,
- E : Otomasyon ve kontrol ünitesi,
- F : Basınç tablosu I,
- G : Basınç tablosu II,

Motor çalışmada elektriksel tahrik devresi ve elektriksel aydınlatma devresi paralel olarak aldığı elektrik enerjisi ile çalışır. Kontrol sistemi tahrik akımı ile orantılı olan akımı sağlar. Bunun bir sonucu olarak da çekme motorunun davranışı seri makinalarının ki gibidir.

Fren sırasında 4 çekme motoru birleşerek paralel çalışır. Enerji veren tahrik generatörleri ayrı ayrı çalışır, etkili frenleme kullanılır.



Şekil 4.4.1.2. MOB'de çalışan Bo' Bo' tipi, GDe 4/4 sınıfı lokomotifin temel elektrik devresi diyagramları (9).

- a- Motor çalışmada (Normal harekette),
b- Fren çalışmada .

- 1 : Akım kollektörü,
- 5 : Yüksek hızlı d.c devre kesici,
- 6 : Giriş reaktörü,
- 7 : Giriş kapasitesi,
- 10 : Topraklama fırçası,
- 13 : Endüti kıyıcısı,
- 14 : Fren direnci,
- 15 : Endüti serbest geçiş diyodu,
- 17 : Uyarma kıyıcısı,
- 17.1 : Alan serbest geçiş diyodu,
- 19 : Ters çevirici kontaktör,
- 20 : Çekme motoru,
- 22 : Düzenleyici reaktör,
- 24 : Frenleme kontaktörü,
- 25 : Sabit tutucu direnç,
- 26 : Dinamik frenleme için tristör,
- 29 : Motor çalışma kontaktörü,

Tahrik Motoru:

Hava soğutmalı çekme motorunun tipi K serisinden 4 FRO 3238 olup 4 kutuplu, dengeli olmayan değişken akımlıdır.

	Devamlı Çalışma	1 saatlik Çalışma	Max. Değerler
Terminal dc gerilimi	750 V	750 V	1000 V
Endüti akımı	360 A	380 A	650 A
Uyarma akımı	76 A	80 A	150 A
Mil gücü	254 kW	267 kW	
Mildeki moment	1783 N.m	1911 N.m	3760 N.m
Devir	1358 d/d	1333 d/d	3072 d/d

Tablo 4.4.1.4. 4 FRO 3238 tip motorun teknik bilgileri (10).

4.4.2. Bir fazlı A.C ile çalışan ana hat lokomotifinin etüdü

Monofaze akımlı çekim ilk zamanlar otomatrislerin işledikleri hatlarda kullanılıyordu. Almanya'da Dessau-Bitterfeld ve Wiesenthal hatlarında 1000 V kullanıldı, 1907'de New Haven ve Hardford demiryollarında 11000 V

denendi ve alınan neticeden sonra gelişmeye başladı. Bundan sonra 1911'de Fransa'da 12000 V giney demiryolunda, 1913'de İsviçre'de 15000 V Loetschberg hattına tatbik olundu. Bütün bunlarda gerilim bizzat lokomotifte bulunan bir transformatörde motora elverişli alçak gerilime (400 V civarı) düşürülmekte idi. Bugün monofaze akımlı çekimde çoğunlukla kullanılan gerilim 11000-25000 voltuttur. Kullanılan frekansta 15, 16, 16.2/3 , 25 Hz gibi alçak frekanslardır. Monofaze akımlı çekimde temas hattı bir iletken telden ibarettir, toprak hattı vazifesini genelde raylar görmektedir. Enerji, genelde hususi surette tesis edilmiş tali santrallerden alınır. Enerjinin bu tali santrallerden alınması halinde bu santrallerde aynı cinsten akım istihsal edilir. Memleketin enerji şebekesinden faydalanması halinde tali santrallerde aynı zamanda frekans değiştirici cihazlara ihtiyaç vardır. Bu şekilde kullanan ilk İsveç'tir.

İkinci Dünya Savaşından önce Macar Devlet Demiryolları Budapeşte-Hegyherhalon ve Alman Demiryollarında Hollenthal hatlarında 50 Hz frekanslı monofaze akım ilk defa kullanıldı. Burada örnek olarak iki ayrı ülkede işletmede olan iki ayrı tip bir fazlı ana hat lokomotifi ele alınmıştır.

El-1 tipi ana hat lokomotifi (Zimbabve Devlet Demiryollarında 50 Hz ve 25 kV üzerinden çalışıyor):

El-1 tipi ana hat lokomotifi komplike ve modern bir sistemdir. Bilhassa elektrikli kısımların yapıları muazzam güzeldir.

Avrupa'da bu tip lokomotifle ulaşım projeleri vardır. El-1 tipinin çok çeşitli üstünlükleri vardır. Bunlar;

- Kullanılan modern dönüştürücü teknolojisi,
- Denermiş elektronik kontrol sistemi,
- Tahrik motorlarının sağlam yalıtım sistemleri,
- Bakımı kolay, performansı yüksek kesiciler,
- Değerini ispatlamış yüksek gerilim donanımı,
- Güç elektroniği ihtiyacına tam cevap veren transformatörler.

Aşağıdaki tabloda bu lokomotifin teknik bilgileri verilmiştir.

Ray açıklığı	1067 mm
Minumum kavis çapı	100 m
Güç sağlama sistemi	1 fazlı A.C 50 Hz
Kontak noktasındaki gerilim:	
- Nominal değer	25 kV
- Max. çalışma gerilimi	27,5 kV
- Max. çalışma gerilimi (kısa zaman için)	28,5 kV
- Min. çalışma gerilimi	19 kV
- Min. çalışma gerilimi (kısa zaman için)	17,5 kV
Mil düzeni	Co' Co'
Tamponlar üzerinden toplam uzunluk	19040 mm
Boji milleri arasındaki mesafe	10200 mm
Boji seviyesi	1900 + 2400 mm
Servis ağırlığı = yapışma ağırlığı	114 ton
Elektriksel donanım ağırlığı	39,5 ton
Mekanik donanım ağırlığı	74,5 ton
Çekme tekerleği çapı :	
- Yeni	1050 mm
- Yarı aşınmış	974 mm
Tahrik motoru sayısı	6
İletim oranı	19:89 (1:4,684)
Motor milindeki sürekli nominal güç	2490 kW
- Tekerlekteki çekme kuvveti	260 kN
- Uygun hız	32 km/h
Tekerlekteki kalkış çekme kuvveti	358 kN
- Bu kuvvetteki hız bandı	0-28 km/h
Sürekli fren nominal gücü	1900 kW
- Bu güçteki hız bandı	30-100 km/h

Max fren kuvveti

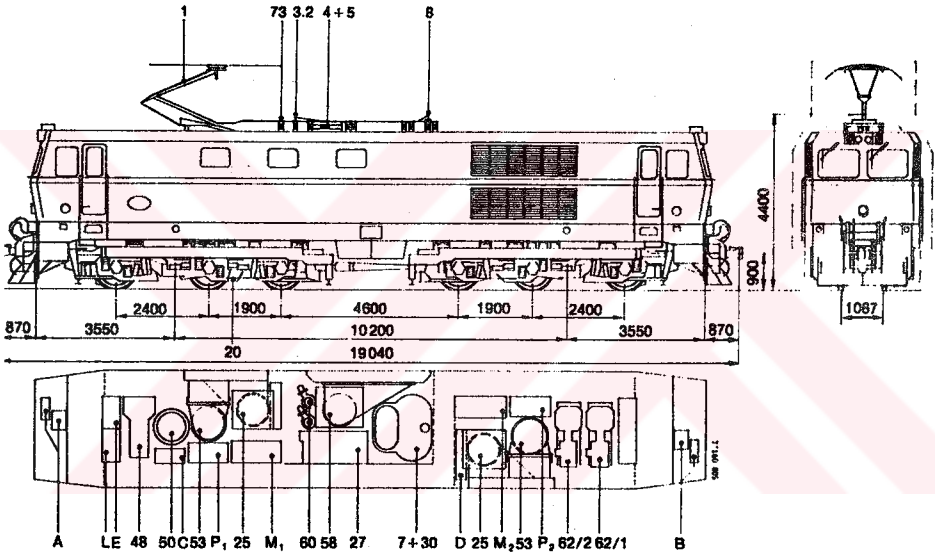
244 kN

Max hız

110 km/h

Not: Max.hız genelde 90 km/h olup, verilen tüm çekme kuvvetleri yarı aşınmış tekerlek bandajı içindir.

Tablo 4.4.2.1. NRZ'nin E1-1 ana hat lokomotifinin teknik verileri (11).



Şekil 4.4.2.1. NRZ'nin E1-1 tipi ana hat lokomotifinin taslak çizimi (12).

- 1 : Akım kollektörü,
- 3.2 : Aşırı gerilim tutucu,
- 4 : Toprak ayırıcısı,
- 5 : Ana devre açıcı,
- 7+30 : Düzeltme reaktörü ile ana trafo,
- 8 : Buşing tip akım trafosu,
- 20 : Çekme motoru,
- 25 : Fren direnci,
- 27 : Ana dönüştürücü,
- 48 : Kompresör,
- 49 : Kontaktör,

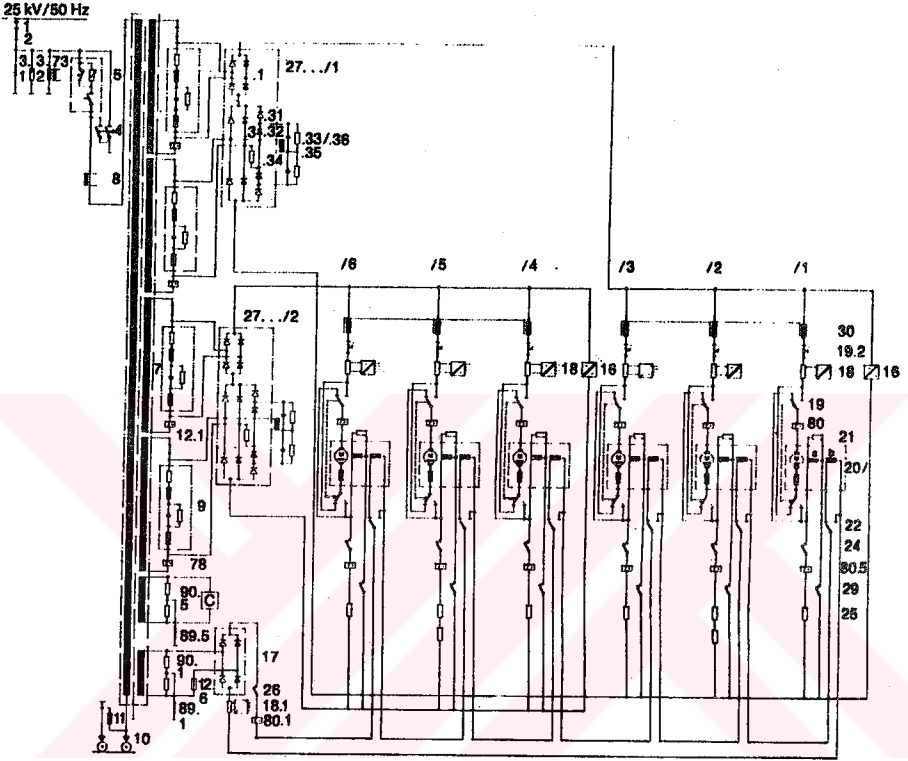
- 50 : Arno döner konverter,
- 53 : Çekme motor fanı,
- 58 : Yağ soğutucu fan,
- 60 : Motor yağ pompası,
- 62 : Egzos,
- 73 : Primer gerilim trafosu,
- A : Sürücü paneli 1.yan,
- B : Sürücü paneli 2.yan,
- C : Yardımcı donanım ünitesi,
- D : D.C yardımcı donanım ünitesi,
- E : Kontrol donanım ünitesi,
- L : Elektronik kontrol ünitesi,
- P 1/2 : Pnömatik donanım ünitesi,
- M 1/2 : Tahrir motoru kesicisi.

Ana devredeki bileşenlerin çalışma modu ve özellikleri:

Aşağıdaki şekil motor çalışma için seçilen tahrir devresini göstermektedir. Alışılmış primer devrede yalnızca havalı devre açıcı ve yüksek gerilim donanımını topraklamak için kullanılan iki kutuplu anahtarlardan özellikle söz etmek gerekir. Emniyetli anahtar iç kilitleme sistemi de dikkate değerdir, öyle ki, ancak tüm teçhizat topraklandığında ana devre bileşenlerine erişilebilmektedir.

Her biri bir bojiye yerleştirilmiş ve biri diğerinden galvanik olarak ayrılmış iki tahrir motor devresi aynı devre düzenlemesine sahiptir ve biri diğerinden bağımsız olarak çalıştırılabilir. Tahrir motorları (üçü her durumda paralel bağlı), iki tane seri bağlı kontrollü doğrultucu köprüler vasıtasıyla aynı trafo sargılarından enerjilerini çekerler.

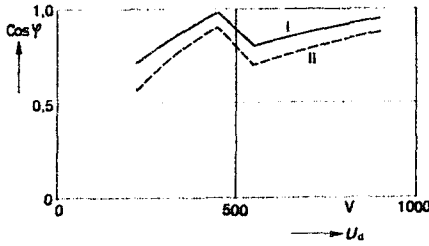
İki asimetrik yarı kontrollü doğrultucu köprülerden biri, bir açma kapasitesi ile donatılmıştır. Bu köprü, bu nedenle ikinci köprü kapalı değilken sector (şebeke) kontrollü olabilir ve anahtarlanabilir (13). Tam ateşleme açısı ile kontrol edildiği zaman, her köprü aynı yüksek çıkış gerilimine erişebilir. Bunu takiben, açma (turn-off) kapasiteli köprünün çıkış gerilimi anahtarlanmış köprüye aktarılır. Tam ateşleme açılı kontrolün yönündeki açma kapasiteli köprü gerilimi, anahtarlı köprünün sabit çıkış gerilimine eklenir. Bu yolla devre ve kontrol için çok az miktardaki bir harcama ile sector kontrolün tüm avantajlarına sahip bir ardışıl devre elde edilir.



Şekil 4.4.2.2. Temel devre diyagramı (14).

- 1 : Akım kollektörü,
- 2 : Akım kollektörü izolatörü,
- 3.1. : Primer gerilim sınırlayıcı,
- 3.2. : Aşırı gerilim tutucu,
- 4 : Toprak ayırıcısı,
- 5 : Yüksek hızlı havalı devre açısı,
- 6 : Yüksek gerilim beslemesi,
- 7 : Ana trafo,
- 8 : Buşing tip primer akım trafosu,
- 9 : Dönüştürücü için giriş filtresi,
- 10 : Toprak fırçası,
- 11 : Toprak reaktörü,
- 12.1 : Ana dönüştürücü için izolatör,
- 12.6 : Uyarıcı dönüştürücü için sigorta,

- 16 : Tahrik motoru gerilimi için gerilim trafosu,
- 17 : Uyarma dönüştürücüsü,
- 18 : Tahrik motoru endüvi akımı için akım trafosu,
- 18.1 : Uyarma akımı için trafo,
- 19 : Enversör anahtar ,
- 19.2 : Tahrik motoru için izolatör,
- 20 : Tahrik motoru,
- 21 : Ana kutup şöntü,
- 22 : Fren uyarması için enversör anahtarı,
- 24 : Fren kontaktörü,
- 25 : Fren direnci,
- 26 : Ayrı uyarma için kontaktör,
- 27/1/2: Ana dönüştürücü,
- 27.1 : Anahtarlı dönüştürücü köprüsü,
- 27.3 : Şebeke kontrollü dönüştürücü köprüsü,
- 27.31 : Açma tristörü,
- 27.32 : Ayırma diyodları,
- 27.33 : Söndürme kondansatörü,
- 27.34 : Yük dirençleri,
- 27.35 : Komütasyon reaktörü,
- 27.36 : Deşarj direnci,
- 29 : Motor çalışma kontaktörü,
- 30 : Düzeltici reaktör,
- 73 : Primer gerilim trafosu,
- 78 : Dönüştürücünün a.c tarafı için primer akım rölesi,
- 80 : Tahrik motoru endüvi akımı için primer akım rölesi,
- 80.1 : Tahrik motorunun ayrı uyarma akımı için primer akım rölesi,
- 80.5 : Fren akımı için primer akım rölesi,
- 89.1 : Uyarma dönüştürücüsü için toprak arıza göstericisi,
- 89.5 : Yardımcı devreler için toprak arıza göstericisi,
- 90.1 : 89.1 için gerilim bölücü,
- 90.5 : 89.5 için gerilim bölücü,



Şekil 4.4.2.3. NRZ'nin El 1 Lokomotifinin şebeke kontrolüyle güç faktörü (15).

I = Şebeke kontrolü,

II = Faz açısı kontrolü,

U_d = Dönüştürücünün çıkış gerilimi

İki kademeli ardışıl devrede şebeke (sector) kontrolüyle elde edilen güç faktörü, dönüştürücünün faz açısı kontrolü ile elde edilenden daha gelişmiştir. Bu 50 Hz demiryolu ağlarında (çok az makas bağlantısı var) özellikle değerli bir avantajdır.

Tahrik motoru (Kompund motor) : Tip M 6560 adı ile anılan bu motor, 4 kutuplu ve dengesiz kompund makinadır, çünkü makina % 70 yabancı uyarmalı (şönt sargı) % 30 seri alan (aşağı kompund) sargılıdır. Akım dalgalanmalarının etkisini azaltmak için seri sargı devamlı olarak şönt sargıya paralel bağlanmıştır. Motorun teknik bilgileri; nominal gerilim ve $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ hava soğutma oranı için şöyledir;

	Sürekli Çalışma Durumu	1 saatlik Çalışma Dur.	Kalkış değ. ilk 10 dak.	Max.(1) Değerleri
Uç gerilimi (V)	775	775	775	850
Ana alan akımı (A)	566	590	720	735
Dış alan akımı (A)	290	290	350	375 (3)
Mil gücü (kW)	415	429	520	-
Moment (Nm)	4619	4832	6295	-
Hız (d/d)	834	825	789	2455 (2)
Dişli düzensiz ağırlık (kg)	-	-	2360	-

(1): Uygun senkronlama yok, (2): 2701 d/d aşırı sürat, (3): Motor fren yaptığı zaman: 330 A

Tablo 4.4.2.2. MG 560 tip tahrik motorunun teknik bilgileri (16).

Dört karbon fırça tutucu, herbiri de takviye olarak ayrıca 2 fırçaya sahiptir ki, bunlar motorun idaresini kolayca sağlamak için bir dönebilir boyundurluğa monte edilmiştir. Bobin izolasyonunun, izolasyon sınıfı "H" dir. Ayrıca rotorda vakumla doldurulmuş H sınıfı reçine, stator ise F sınıfı epoxy reçine (iki ayrı maddenin karışımından meydana gelen dayanıklı bir tutkal) ile doludur.

Statorun bir yüzü nose-bearing ismi verilen montaj için özel hazırlanmış bir madde ile kaplıdır. Öbür yüzünde ise, motoru geçici olarak devreden çıkarmak için çelik/kauçuk diskler ihtiva eden çıkarılıp takılan portatif konsollar vardır. Motorun süspansiyon sistemi esnektr.

4.4.3. Üç fazlı A.C ile çalışan ana hat lokomotifinin etüdü

Alternatif sistemlerden biri olan trifaze (üç fazlı) akımlı çekim sistemi 1986 yılında Lugano tramvaylarında kullanılıyordu. Bundan iki sene sonra İsviçre'de Zermatt-Yungfrav demiryolunda, daha sonra hızlı trenlerin işlediği Prusya devlet demiryolunda çalışan Marienfilde-Zossen hattında kullanıldı. Yüksek gerilimli trifaze akım ilk defa demiryolu deneyecek bir hatta tatbiki olarak 1902 yılında Valterlina-Lecco hattında kullanıldı. Gerilim 3000 V'tu. O tarihlerde monofaze akımlı motorlar mevcut olmadığı ve 600 V'tan daha yüksek gerilimli doğru akımlı motorlar da yapılmadığı için bu çekim sistemi uygulaması yerinde görülmüştür. Trifaze akımlı çekim sisteminde sabit tesisler D.C 'ninkine benzer, şu farkla ki, tali santrallerinde akım değişimini sağlayacak ek tesise ihtiyaç olmadığı gibi, temas hattı birbirine ve yere izole edilmiş iki nakil telden ve lokomotiflerin akım alıcı cihazları da birbirine izole edilmiş iki sürtücüden ibarettir. Toprak hattını raylar oluşturur (17).

Bu sistemde de gerilim zamanla arttırıldı. İtalya'nın kuzeyinde elektriklenen hatlar 4500 V'luktu. İspanya'nın güney şebekesinde (Santa-fe) hattında 5500 voltluk ve Amerika'da (Great-Northem) demiryolunda 6000 V'luk trifaze akım kullanılmıştır. Motor konstrüksiyonu ve telekomünikasyon şebekesi üzerindeki tesiri bakımından, bu alternatif akımda 16.2/3 Hz frekans seçilmiştir. Frekanslar, genellikle 50 Hz olarak uygulanan sanayi şebekesinin frekansından farklı olduğu için enerjinin bu şebekeden alınması halinde tali santrallerde frekans dönüştürücilerine ihtiyaç vardır. Yahut ayrı üretim merkezlerinin tesisini gerektirir.

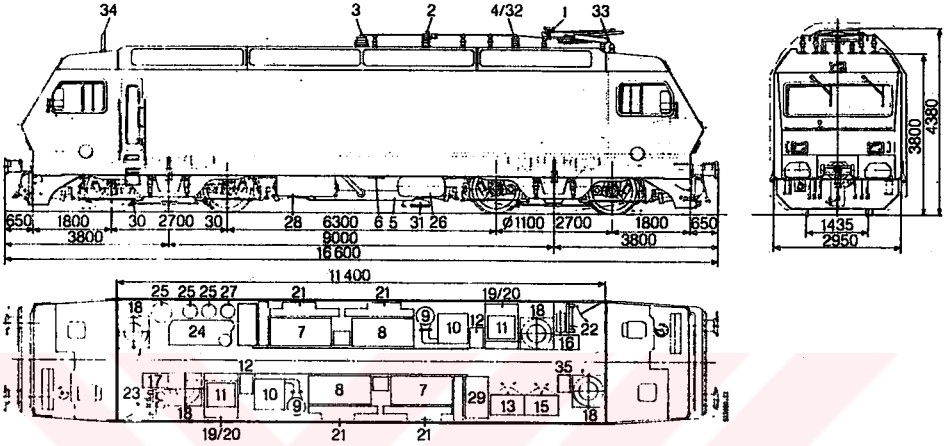
İsviçre'deki Özel Demiryolları için Yeni Tip Re 4/4 Ana Hat
Lokomotifinin Etüdü:

İsviçre'deki 5000 km'lik toplam demiryolu hattının yaklaşık % 40'ı özel demiryolu şirketlerince işletilmektedir. Bu özel şirketlerin çalıştırdığı hatların çoğu 15 kV, 16.2/3 Hz üzerinden çalıştırılmaktadır. 1982 yılında İsviçre Ulaştırma Bakanlığı, bazı özel demiryollarının Multi-Purpose lokomotiflerine gereksinimleri olduğu kararına vardı.

İsviçre'de Be 4/4, Am 6/6 ve Ee 6/6 tipi lokomotifler ilk üç fazlı lokomotiflerdi. Re 4/4 tipi lokomotifler çeviriciye sahip ve servis imkanları daha çok olan geliştirilmiş bir modeldir, 1983 'de araçlar Brown Boveri tarafından GTO tristörleri ile donatıldı. Aşağıdaki tabloda Re 4/4 tipi ana hat lokomotifinin teknik bilgileri verilmiştir.

Dingil düzeni	Bo' Bo'
Ray açıklığı	1435 mm
Lokomotifin ağırlığı	69 t
Mekanik donanım ağırlığı	32 t
Elektrik donanım ağırlığı	37 t
Dingil yükü	169 kN
Dişli oranı	1:6,055
Kalkış çekme gücü	240 kN
Motor milindeki bir saatlik oran	3000 kW
Tekerlekteki maksimum oran	3200 kW
Maksimum fren gücü	140 kN
Maksimum hız	130 km/h
% 5 eğimde maksimum çekme yükü	250 t
Hat gerilimi	15 kV, 16.2/3 Hz
Tamponlar arası mesafe	16600 mm
Boji merkezleri arası mesafe	9000 mm
Bojinin mil merkezi	2700 mm
Manevra tekerleği çapı;	
Yeni	1100 mm
Yarı aşınmış	1070 mm
Ön genişliği	2950 mm
Raydan toplam yüksekliği	4380 mm
Makina bölümünün uzunluğu	11400 mm
Koridor genişliği	600 mm

Tablo 4.4.3.1. Re 4/4 tipi lokomotifin teknik bilgileri (18).

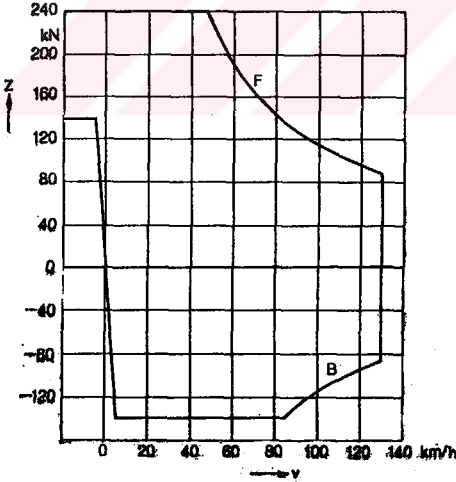


Şekil 4.4.3.1.Re 4/4 tipi lokomotifin dış hat diyagramı (19).

1. Akım kollektörü,
2. Ana topraklama anahtarı,
3. İlk gerilim transformatörü,
4. Parafadur,
5. Transformatör,
6. Transformatör için yağ pompası,
7. Dört kadranlı güç kontrolörü,
8. Inverter,
9. Konvertör için yağ pompası,
10. Fan ve yağ için ısı değiştirici,
11. Yardımcı konvertör,
12. Elbise ve alet dolabı,
13. Kombine elektronik arıza arama sistemi,
14. Yardımcı cihaz birimi,
15. Elektronik kontrol,
16. Merkezi bağlantı tablosu 1
17. Merkezi bağlantı tablosu 2
18. Cer motoru fanı,
19. Sesi absorbe eden devre reaktörü,
20. Faz reaktörü,
21. Doğru gerilim kondansatörler bağlantısı,

22. Pnömatik kontrol için ölçü tablosu 1
23. Pnömatik kontrol için ölçü tablosu 2
24. Vidalı tip kompresör,
25. Ana hava deposu,
26. Yedek hava deposu,
27. Hava yenileme tankı,
28. Akü,
29. Akü şarj cihazı,
30. Cer motoru,
31. Tren emniyet freni,
32. Yüksek gerilim izolatörü,
33. Döğük,
34. Radyo anteni,
35. Akım kontrol birimi,

Aşağıdaki şekilde ise lokomotifin Cer kuvveti/hız diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.4.3.2. Cer kuvveti/hız (Z-v) diyagramı (20).

F : Motor çalışma,

B : Fren çalışma

Transformatör: Transformatör yardımıyla, trenin çeşitli bölümleri için gerekli olan gerilimler elde edilmiştir. Transformatörün tipi LOT 3200 'dür. Yağ soğutmalıdır ve ağırlığı 7900 kg'dır. Transformatör; iki parçalı disk sargılı olup alüminyum tankın içine yatay olarak yerleştirilmiştir.

Cer motoru: 4FRA-3454 tipi indüksiyon motoru kullanılmıştır. 4 kutpludur. Teknik bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Uç gerilimi	0-1305 V
Maksimum akım	450 A
Mildeki nominal güç	750 kW
48 km/h'deki motor hızı	1407 dev/dak.
Soğutma	Cebri basınçlı soğutma
Soğutma havası	1,1 m ² /s
Ağırlık	1646 kg
Yalıtım dizaynı	C sınıfı

Tablo 4.4.3.2. 4 FRA 3454 tip cer motorunun teknik bilgileri (21).

4.4.4. Elektrikli Otomobiller

Elektrik enerjisini dışarıdan sağlayan taşıtlar, akım taşıyıcılarının izin verdiği bölgelerde çalışmak zorundadırlar. Bu nedenle kullanımları sınırlı bölgeler içinde kalır. Enerji depolarını bünyelerinde bulunduran taşıtlar için böyle bir sorun olmamakla birlikte ulaşım alanı bu kez depo edilebilen enerji miktarına bağlı olarak sınırlandırılmaktadır. Bu tür elektrikli araçlarda enerji iki şekilde depo edilmektedir;

- a- Bir akümülatör bataryası ile,
- b- Bir ısı motorunu beslemek üzere ısı yakıt deposu ile.

Elektrikli tahrik sistemi yanında ısı motoru da içeren araçlara hibrit elektrikli araçlar denir. Bunlar daha çok büyük güçlü elektrikli araçlarda kullanılır. Isı motorunun tahrik ettiği generatörde üretilen elektrik enerjisi, kontrol edilerek elektrikli tahrik motorunda kullanılmaktadır.

Enerji deposu olarak akümülatör bataryaları kullanılan araçlarda, enerji, bataryalarda kimyasal enerjiye dönüştürülerek saklanmaktadır.

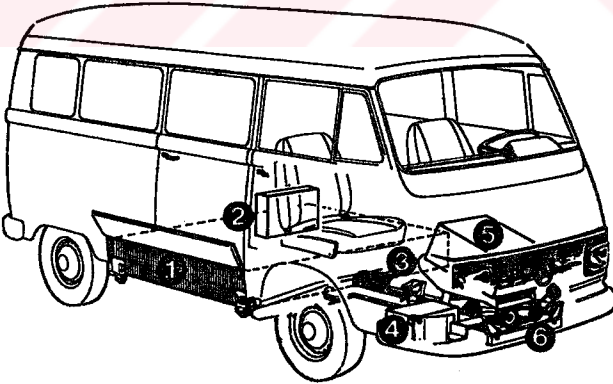
Bizim konumuz içine giren elektrikli taşıt araçları enerjilerini doğrudan elektrik enerjisi olarak depolayan veya üreten, belli bir güzergaha bağlı olmadan serbestçe dolaşabilen ve bireysel kullanıma olanak tanıyan elektrikli otomobillerdir.

4.4.4.1. Elektrikli Otomobillerin Yapısı

Elektrikli ulaşım araçları çeşitli amaçlarla ve çeşitli şekillerde tasarlanmakta, üretilmektedir. Buna rağmen hepsinde ortak olan bir tahrik motoru, motora kumanda eden sistem ve motorda üretilen hareketi tekerleklere ileten mekanik bir hareket iletim elemanı mevcuttur. Özel olarak, bir elektrikli otomobilde yer alan elemanlar:

- Enerji depolama birimi,
- Tahrik motoru,
- Kontrol birimi,
- Şarj birimi,
- Moment değiştirici ve debriyaj 'dır.

Aşağıda üretilmekte olan elektrikli bir minibüs ve ana elemanları gösterilmiştir.



- 1- Tahrik bataryası,
- 2- Yardımcı batarya için şarj devresi,
- 3- Tahrik motoru,
- 4- Ek endüi kontrol devresi,
- 5- Elektronik kontrol devresi,
- 6- Fren ve dümen sistemi için servomotor.

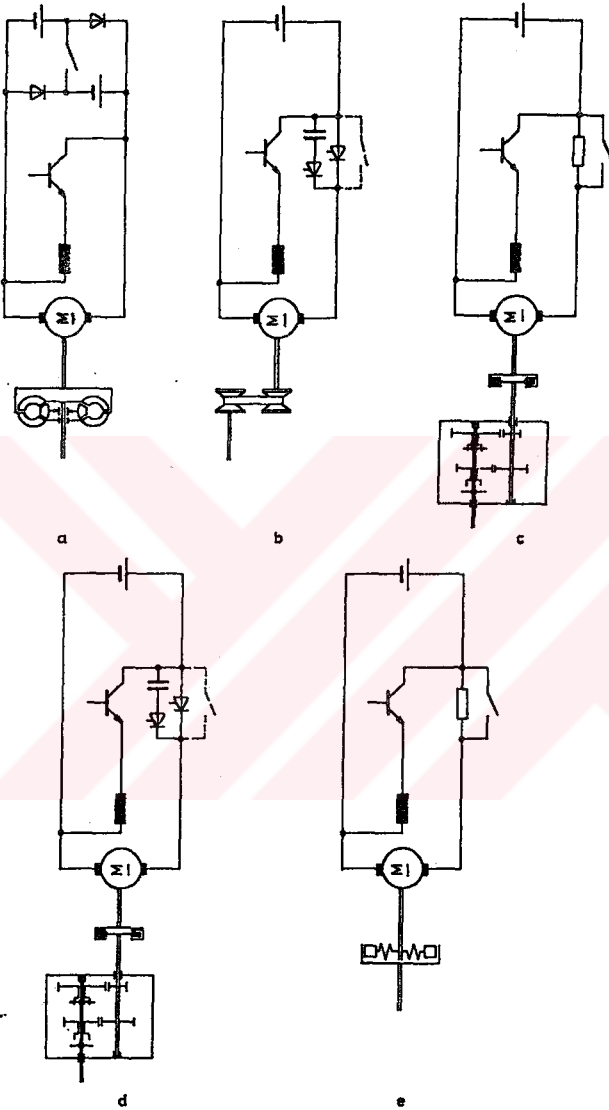
Şekil 4.4.4.1. Elektrikli minibüs ve ana elemanları (22).

4.4.4.2. Elektrikli Otomobillerde Güç İletim Elemanları

Batarya çıkışındaki doğru gerilim, bir çevirici yardımıyla üç fazlı alternatif akıma çevrilerek motora uygulanmaktadır. Motorun devir sayısı, evirici frekansı ayarlanarak değiştirilirken, yol almada gerilim de ayarlanabilmektedir.

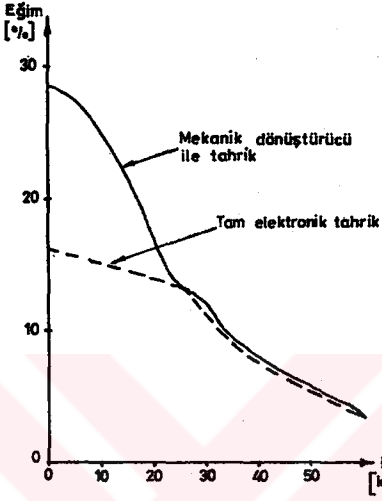
Aşağıdaki şekilde çeşitli güç iletim sistemleri görülmektedir. Şekil 4.4.4.2.a'da görülen sistemde hız ayarı için uyarma alanı kullanılmakta, hidrodinamik çevirici de kalkışta gerekli moment ayarlamasını yapmaktadır. Batarya grupları ikiye ayrılmıştır ve bunlar seri ya da paralel bağlanarak hız sınırlarını değiştirme olanağı tanınmıştır. Kalkış koşullarını iyileştirmek için diğer bir seçenek, mekanik sistem yanında bir endüti akım kıyıcısı da kullanılmaktadır. (Şekil 4.4.4.2.b ve d) 'de buna ilişkin sistemler verilmiştir. Yüksek tahrik verimi için, el kumandalı bir vites kutusunun kullanımı da uygun olabilir. Böylece, motorun veriminin en yüksek olduğu sınırlar içinde alan zayıflatılması ile hız ayarı yapılabilir. (Şekil 4.4.4.2.c ve d). Diğer bir hareket iletim sisteminde ise merkezkaç kuvveti ile çalışan bir debriyaj sistemi, yol alma için kullanılabilir. Hız ayarı, uyarma alanı zayıflatılarak yapılır. Kalkış akımını sınırlandırmak amacıyla endüti devresine seri, bir direnç bulundurulur ve yol alma işlemi sonunda kısa devre edilerek devreden çıkarılır (Şekil 4.4.4.2.e). Uyarma alanının kontrolü ile elde edilebilen hızlar arasındaki oran, $1/7$ ile $1/8$ dolaylarındadır. Bu oran arttırılıp, kontrol edilebilen hız sınırları genişletilerek, mekanik güç aktarım organları, çevirme organları azaltılıp basitleştirilebilir.

Elektrikli otomobillerde, kalkış için gerekli en iyi koşulları sağlamak ve hız sınırlarını genişletmek için kullanılan mekanik güç iletim elemanları, neden oldukları enerji kaybı ile getirdikleri ek ağırlık olmasına karşın, kullanımı gerekli olan organlardır. Elektrik motorunun kalkışta gereksinim duyduğu enerjiyi azaltarak, kayıplara ve motorun yıpranmasına olumlu yönde etkide bulunur. Şekil 4.4.4.3 ve Şekil 4.4.4.4'de hareketin tekerleklerle iletimi için hiç bir ara mekanik eleman bulundurmayan, tümüyle elektronik kontrollü bir tahrik sistemi ile, elektronik kontrol yanında hidrolik moment çevirici de içeren bir sisteme ilişkin, hıza bağlı olarak bağlı enerji tüketimi ve yine hıza bağlı olarak rampa

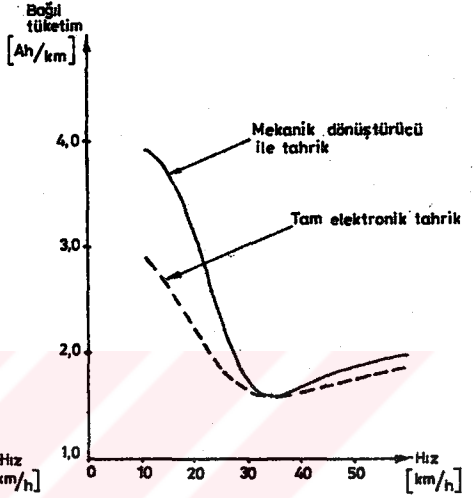


Şekil 4.4.4.2. Elektrikli araçlarda güç iletim elemanları.

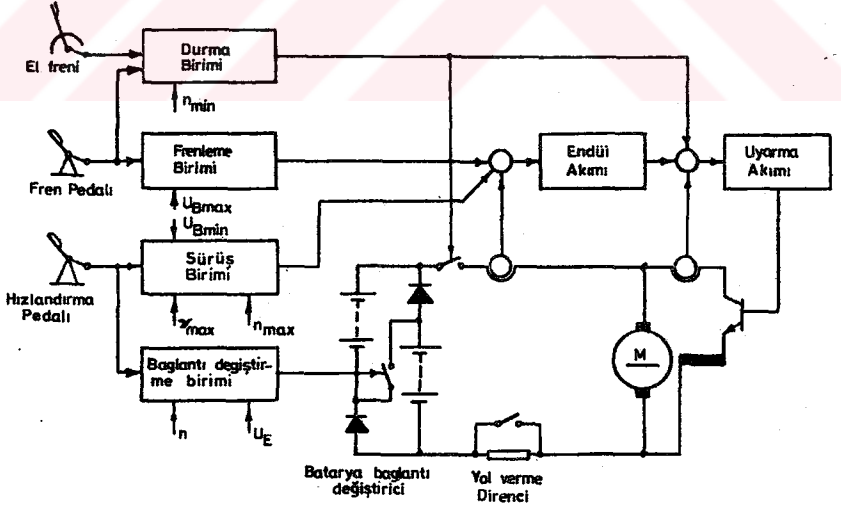
çıkabilme özelliklerini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, hidrolik bir moment çeviricinin kullanılması aracın tırmanma yeteneğini arttırdığı gibi özellikle düşük hızlardaki enerji tüketimini de azaltmaktadır.



Şekil 4.4.4.3. Yokuş çıkabilme özellikleri (23).

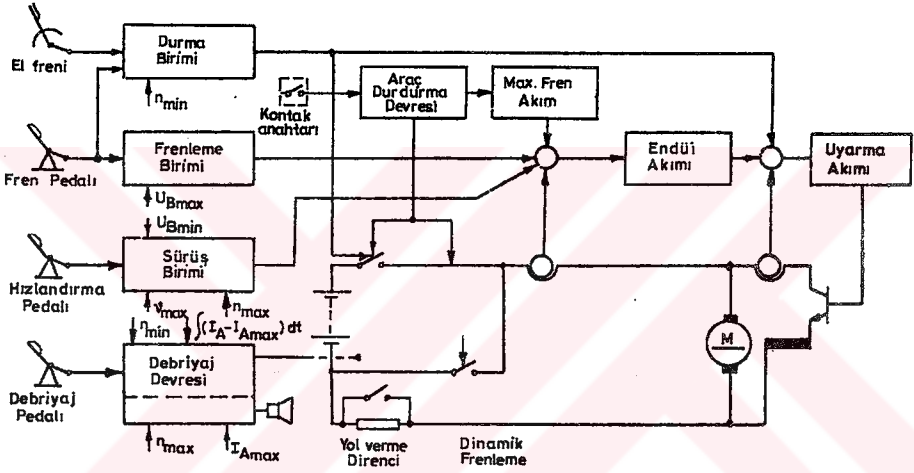


Şekil 4.4.4.4. Bağlı enerji tüketim özellikleri.



Şekil 4.4.4.5. Batarya gerilimi değiştiricili, hidrolik moment dönüştürücülü tahrik sisteminin kontrolü.

Daha çok şehir içi ulaşımında kullanılan otomobillerin bu trafikteki dur-kalk işleminin çokluğu ve sıklığı düşütülerek, düşük hızlardaki enerji tüketiminin az oluşunun ve her kalkışta söz konusu olan sistem zorlanmasının ortadan kaldırılmış ya da azaltılmış olmasının ne derece önemli olduğu ortaya çıkar. Şekil 4.4.4.5. ve Şekil 4.4.4.6 'da bu iki sisteme ilişkin blok diyagramları verilmiştir.



Şekil 4.4.4.6. El kumandalı vites ve klasik debriyaj sistemlerini içeren tahrik sisteminin kontrolü (24).

Herhangi bir otomobil için gerekli tahrik kuvveti aşağıdaki formülle hesaplanabilir (25);

$$F = W \left(R_0 + \frac{R_1}{P} \cdot V + \frac{R_2}{P} \cdot V^2 \right) + \frac{1}{2} h \cdot V^2 \cdot D \cdot A + W \left(\sin y + \frac{a}{g} \right)$$

F : Aracın hareketi için gerekli kuvvet (N)

W : Aracın ağırlığı (N)

P : Lastiklerin sürtünme kuvveti (N.m/s)

R_0 : Statik lastik direnç katsayısı (Birimsiz)

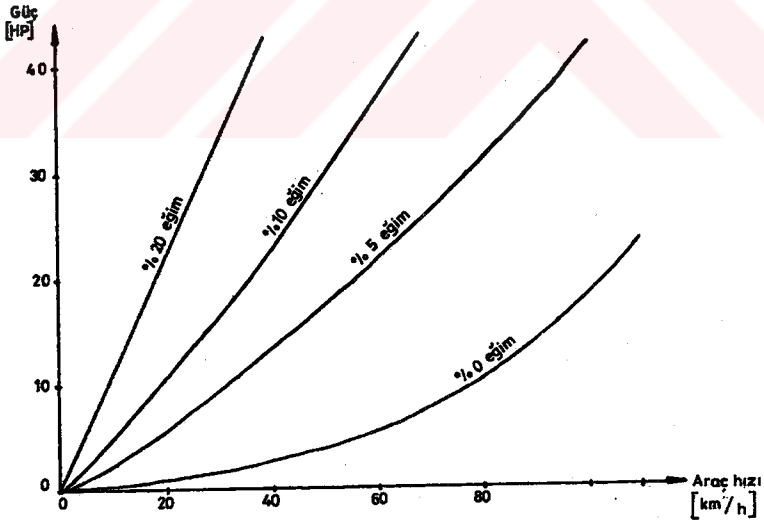
R_1 : Lastik sürtünme direnci katsayısı (N)

R_2 : Dinamik lastik direnç katsayısı (Ns/m)

V : Araç hızı (m/s)

h : Hava sürtünme etkisi	(N/m^3)
D : Aerodinamik sürtünme katsayısı	(s^2/m)
A : Ön yüzey alanı	(m^2)
γ : Yerin eğimi	$(Derece)$
a : Araçtan istenen hızlanma	(m/s^2)
g : Yerçekimi sabiti	(m/s^2)

Görüldüğü gibi aracın tahrik kuvvetini etkileyen etkenler oldukça karmaşıktır. Enerji depolama sorunu olan bugünkü elektrikli otomobillerde tüm bu etkenlerin en aza indirilmesi gerektiği için yapılan araştırma ve geliştirme çabaları bu amaca yönelik olarak yürütülmektedir. Aşağıdaki şekilde (4.4.4.7) 1350 kg ağırlığında ve $1,75 m^2$ lik ön yüzey alanına sahip bir aracın, yer eğimine bağlı olarak hız-güç eğrileri verilmiştir. Görüldüğü gibi eğriler, farklı yer eğimleri için verilmiştir. Ancak buradaki güçler verilen değerler için ivmesiz olarak hareket eden aracın gereksinim duyduğu güçler olup, hızlandırma için ayrıca ek bir güce gereksinim vardır.



Şekil 4.4.4.7. Aracın güç sistemi (26).

BÖLÜM 5

ENERJİ İLETİM HATLARININ GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Kompanzasyon Tesislerinde Yüksek Harmonik Rezonans Olayları

5.1.1. Tanım

Reaktif güç kompanzasyonunun yapıldığı elektrik tesislerinde, yüksek harmoniklerin mevcudiyeti halinde rezonans olayları meydana gelir. Bunun sonunda meydana büyük akımlar veya gerilimler kompanzasyon tesislerini zorlayarak çeşitli arızalara yol açabilirler. Diğer taraftan şebekelerde birçok sebeplerle çeşitli mertebelerden yüksek harmoniklerin meydana gelmesi beklenebilir. Onun için kompanzasyon tesislerinin rezonans açısından da incelenmesi, hangi hallerde rezonansın meydana gelebileceğinin araştırılması ve buna göre alınabilecek tedbirlerin tesbiti gerekir.

5.1.2. Yüksek Harmoniklerin Üretilmesi

Şebekelerde ve sanayi kuruluşlarında kompanzasyon maksadıyla kondansatörler yerleştirilirken şebeke geriliminin sinüs şeklinde olduğu, yani sadece birinci temel harmoniğin tesir ettiği, şebeke frekansı olarak $f = 50$ Hz, yahut dairesel frekans olarak $\omega = 2\pi f = 314$ 1/s kabulü genelde doğrudur ve geçerlidir. Fakat bazı özel hallerde şebeke geriliminde yüksek harmonikler meydana gelebilirler. Bunlar sadece kondansatörlerin zorlanmaları ile kalmayıp geri kalan şebeke kısmının endüktif direnci ile kondansatör kapasitesi arasında rezonansa yol açarlar ve böylece hem kondansatörlerin hem de şebekelerin aşırı yüklenmelerine sebep olurlar.

Simetrik yüklü üç fazlı alternatif akım şebekelerinde stasyonier durumda birinci temel harmoniklerden başka yine sinüs şeklinde ve sadece tek sayılı 3., 5., 7., 9., n. mertebeden yüksek harmonikler beklenebilirler. 3. ve üçün katı olan harmonikler simetri sebebi ile ihmal edilebilirler.

Absis eksenine göre simetrik olan gerilim eğrileri içinde çift mertebeli harmonikler söz konusu olmazlar. Bundan dolayı en çok 5. ve 7. harmonikler göz önünde bulundurulurlar. Eğer 1. harmoniğin amplitüdü $a_1 = \% 100$ ise 3.harmoniğin amplitüdü $a_3 = \% 40$, 5.harmoniğin amplitüdü $a_5 = \% 10,1$ ve 7.harmoniğin amplitüdü $a_7 = \% 3,46$ dır. Daha yüksek harmoniklerde mertebe yükseldikçe amplitüd değeri düştüğünden bunlar artık dikkate alınmazlar.

Söz konusu yüksek harmonikler, kuvvetli akım tesislerinde aşırı doymuş transformatörler, aşırı reaktans bobinleri, ark fırınları, ark kaynak makineleri, özellikle civa buharlı redresörler gibi arkları çalışan cihazlar redresörler ve elektrik makineleri tarafından üretilirler. Üç ana gruba ayrılabilen bu yüksek harmonik üreticileri hakkında şu açıklamaları yapabiliriz:

Transformatörlerde ve reaktans bobinlerinde yüksek harmoniklerin meydana gelmesindeki başlıca sebep, mıknatıslanma karakteristiği yüzünden doyma sebebi ile mıknatıslanma akımının yüksek harmonikleri ihtiva etmesidir. Ancak günümüzde soğuk haddelenmiş sac kullanarak transformatörlerin ve reaktans bobinlerinin mıknatıslanma akımlarında bu yüksek harmonikler çok azaltıldıklarından harmonik üreticisi olarak transformatörler daha az önem taşımaktadırlar.

Ark ile çalışan cihazlarda akım ile gerilim arasında sabit bir orantı yoktur ve bunlar için ohm kanunu geçerli değildir. Bu yüzden bu gibi cihazlarda akımlar tam sinüs şeklinde olmayıp yüksek harmonikler ihtiva ederler. Bu nevi yüksek harmonik üreticileri arasında en önemlisi redresörlerdir. Geçmiş yıllarda redresörler bir transformatör üzerinden orta gerilim şebekesine bağlandıklarından yüksek harmonikler yalnız orta gerilim şebekelerinde kalırlardı. Bugün çeviriciler ve tristorlar tarafından kontrol edilen ayarlayıcılar daha ziyade alçak gerilim şebekesine bağlanırlar. Ayrıca tristor kumandalı çeviriciler şebekeden büyük reaktif güçler çektiklerinde alçak gerilim şebekelerinde kompanzasyona büyük ihtiyaç duyulur.

Üçüncü grup yüksek harmonik üreticisi olan elektrik makineleri olarak kollektörlü alternatif akım makineleri ile senkron generatörler ve motorlar söz konusudur. Bu makinelerde alan bozulması ve olukların veya kollektörün titreşmesi, yüksek harmoniklerin meydana gelmesine sebep olur. Fakat modern senkron generatörlerde uygulanan sargı tekniği ve kutup şekli sayesinde boşta çalışmada sinüs şeklindeki birinci harmonikten en fazla % 5 kadar fark meydana getiren EMK endüklendir. Ayrıca modern generatörler amortisman sargıları ile donatıldıklarından, hem stasyonere yükte hem de arıza hallerinde yüksek harmoniklerin önemli kısmı amortisörler de söndürülürler.

5.1.3. Yüksek Harmoniklerin Tesiri

Şebeke geriliminin sinüs şeklinde olmaması yani yüksek harmonikler ihtiva etmesi, şebekeye bağlı tüketiciler üzerine zararlı bir şekilde tesir yapar. Bu durumda böyle bir şebekeye paralel bağlı yüksek harmonik üretmeyen modern generatörler, şebekenin yüksek harmoniklerinden etkilendiği gibi enerji nakil hatlarında ve motorlarda ilave ısı kayıpları meydana gelir. Yüksek harmoniklerin bulunduğu bir şebekede toprak kısa devresi akımlarda daha büyük efektif değerlere yükselirler. Bunların dışında şebekedeki yüksek harmoniklerin en şiddetli şekilde tesir ettikleri tesis elemanı kondansatörlerdir, bunlar böyle bir şebekeden yüksek harmonikli akım çekerler ve aşırı yüklenebilirler.

Yüksek harmonikleri olan bir şebekeden tüketicinin çektiği P aktif gücü hiç değişmez. Buna karşılık birinci harmonikte Q_L olan endüktif reaktif güç, yüksek harmoniklerin tesiri ile $Q_{Ln} = Q_L/n$ değerlerini ve birinci harmonikte Q_C olan kapasitif güç, yüksek harmoniklerin tesiri ile $Q_{cn} = n Q_C$ değerini alır. Burada n, harmoniğin mertebesi olup söz konusu harmonik frekansının, normal şebeke frekansının kaç katı olduğunu gösterir. Gerilimin frekansı arttıkça endüktif reaktif güç azaldığı halde kapasitif güç artar.

Bir gerilimin uygulandığı kondansatörden ve bobinden meydana gelen bir devreye titreşim devresi denir. R, L, C elemanlarının bağlantı tarzına göre çeşitli titreşim devreleri elde olunur, bunların en önemlileri paralel ve seri titreşim devreleridir. Burada L transformatör veya motor sargılarının selfi, C kompanzasyon kondansatörünün kapasitesi ve R de bobinin demir kayıpları ile kondansatörün dielektrik kayıplarına tekabül eder.

5.1.4. Yüksek Harmonik Rezonansına Karşı Tedbirler

Rezonansın elektrik tesislerinde meydana getirebileceği zararları önlemek maksadı ile, yüksek harmoniklerin bulunduğu, yani rezonansa eğilimi olan şebekeler tarafından beslenen kompanzasyon tesislerinde bazı tedbirler alınabilir. Rezonansı önlemek için alınabilecek tedbirlerin fiziki esasları şu denklemlerle verilebilir:

$$\omega_r C - \frac{1}{\omega_r L} = 0 \quad (5.1.4.1)$$

(5.1.4.1) denklemi rezonans frekansıdır, burada frekansın belirli bir $\omega_r = n\omega$ değerinde endüktif ve kapasitif reaktanslar birbirine eşit olurlar ve bunlar birbirlerine ters yönde tesir ettiklerinden toplamı sıfır olur. Rezonans frekansı R,L,C karakteristik değerlerine bağlı olduğundan aynı zamanda devrenin öz frekansı;

$$\omega_0 = \omega \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (5.1.4.2)$$

olur, şu halde rezonans şartı ;

$$\omega_r = \omega_0 \quad (5.1.4.3)$$

dür.

Buna göre kompanzasyon tesisinin öz frekansını rezonansa yol açabilecek olan şebeke frekansının altında tutmak gerekir. Bunu sağlamak için en önemli tedbirler şöyle açıklanabilir :

1) Kompanzasyon için gerekli olmayan kondansatör bataryaları devreden çıkarılmalıdır. Çünkü tesisin yükünün düşük olduğu saatlerde, tesisi besleyen transformatör ile kompanzasyon için öngörülen kondansatörlerin tamamı devrede kalırsa, aşırı kompanzasyon sebebi ile gerilim yükselir ve transformatör doyma bölgesinde çalışmaya başlar. Bu durumda da transformatörün mıknatıslama akımının şekli bozulacağından bir yüksek harmonik üreticisi gibi çalışır ve bunun sonunda da yüksek harmonik rezonansı baş gösterir. Bu durumda kondansatör gücünü kompanzasyon ihtiyacına göre ayarlamak gerekir ki, tesisin otomatik cos regülatörü ile donatılması uygun olur.

2) Devreye ohmik direnç yerleştirmek, teorik bakımdan yüksek harmonik akımlarını amortize edebilir, fakat ;

Paralel rezonans devresine göre (27) :

$$i = i_R + i_L + i_C = U \left[\frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{L} \right) \right] \quad (5.1.4.4)$$

(i_R : Ohmik akım bileşeni, i_L : Endüktif akım bileşeni, i_C : Kapasitif akım bileşeni, U: şebeke gerilimidir, i: devrenin şebekeden çektiği akım)

(5.1.4.4) denkleminde;

Seri rezonans devresine göre;

$$U = i \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] \quad (5.1.4.5)$$

(5.1.4.5) denkleminde, devredeki her ilave direnç kayıplara yol ağtığından, mümkün olduğu kadar suni bir direnç arttırmayoluna gidilmez. Buna karşılık tabii yoldan devrede belirli bir ohmik direncin bulunmasını sağlamak maksadı ile kompanzasyon tesisleri bir veya birkaç paralel kablo üzerinden baraya bağlanırlar.

3) Öz frekansı düşütmek maksadı ile kondansatöre bir self bobini seri bağlanır. Bobinin ısı kaybı çok düşük olduğundan, bu tedbir aynı zamanda ekonomiktir. Bobinin gerekli reaktif direncini hesaplamak için kondansatörün bağlı bulunduğu yerden santrale kadar bütün şebekenin direncini göz önünde tutmak gerekir. Ancak kondansatöre bir self bobini- nin seri bağlanması halinde kondansatör gerilimi yükselir, bu gerilim yükselmesi % 10'u geçmemelidir.

5.2. Yüksek Gerilim İletim Hatlarında Ferrorezonansı Olayı

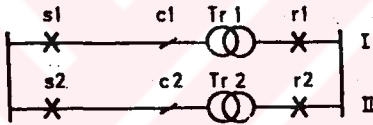
5.2.1. Ferrorezonans

Elektrik enerjisi iletiminde kullanılan ve aynı direği paylaşan çift devreli hatlardan birisi sistemden ayrılarak enerji iletimine, diğeri üzerinden devam edildiği durumlarda, tek bir birim olarak anahtar- lanan hat ve transformatörün enerjisini kesme işleminde sonra geçici

bir zaman aralığında normal olmayan akım ve gerilimler meydana gelir. Bu şekilde anahtarlama sonucu ortaya çıkan kalıcı ferrorezonans olayında meydana gelen salınımlar sistem sıklığında veya sistem sıklığının bir altharmonisinde olabilir, en yaygın ve tehlikeli olanı üçüncü altharmoniktir (28).

5.2.2. İletim Sisteminin Tanımı ve Sistem Modeli

Yüksek gerilimde elektrik enerjisi iletimi genellikle aynı direği paylaşan çift devreli hatlarda olmaktadır. Bu sistem, iletim hattı transformatör birimleri buna bağlı kesici ve ayırıcı gruplarından meydana gelir (5.2.2.1).



Şekil 5.2.2.1: Çift devreli iletim sisteminin tek hat şeması.

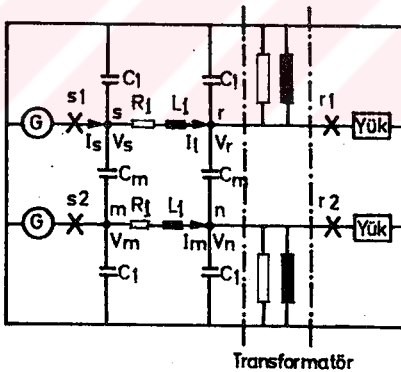
Kesiciler, iletim hattı transformatör birimini sistemden devre dışı etmekte, ayırıcı ise gerekli durumlarda iletim hattını transformatörden ayırmakta kullanılmaktadır. Aynı direği paylaşan çift devreli hatlardan birisi, arıza, bakım vs. gibi durumlarda sistemden ayrılarak enerji iletimine diğeri ile devam edilebilir. Böyle bir iletim hattı ve hat sonuna bağlanmış transformatör sık sık bir birim olarak anahtarlanırlar.

Bir iletim hattı-transformatör birimi sistemden ayrıldığı zaman hat ile toprak arasındaki kapasitansın elektrik alanında depolanmış enerji, transformatör sargılarına boşalarak manyetik alana dönüşür. Bu sırada, transformatör nüvesi doyuma girerken sargılardan yüksek değerli bir darbe akımı akar ve transformatördeki manyetik alanda depolanmış enerji ise hat-toprak kapasitansını zıt yönde yükler. Bu olay devre kayıplarından dolayı hat transformatör döngüsünde bir kaç dönemde sıfıra doğru azalarak düşen bir salınımla sonuçlanır. Devrenin kayıpları bir dış kaynaktan sağlanacak olursa, bir süre sonra salınımlar geliş-

rek kalıcı ferrerezonansa kilitlenebilirler. Anılan sistemde kayıpları karşılayan bu enerji, aynı direği paylaşan enerjili iletim hattı ile enerjisi kesilmiş iletim hattı arasındaki kapasitansta depolanan enerjidir (29). Ferrerezonans çalışma koşulları altında transformatör-deki akı, özellikle kaçak akı yollarında yüksek değerlere ulaşabilen bölgesel aşırı ısınmalara neden olmaktadır (30). Kalıcı ferrerezonansın salınım sıklığı, 50 Hz, 16,67 Hz veya 10 Hz olabilir (31).

Sistem çözümü için gerekli model, sistemin olaya tepkisini uygun bir şekilde yansıtan π eşdeğer devresi kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 5.2.2.2).

Sistemin çalışması iki bölüm şeklinde ele alınmıştır. Birinci bölümde devre kesicileri devreyi sistemden ayırmadan önceki yani s1 ve r1 kesicileri kapalıyken "statik -durum çalışması", ikinci bölümde ise kesiciler devreyi sistemden ayırdıktan sonra statik -durumla sonuçlanan "geçici durum çalışması" dır.



Şekil 5.2.2.2. Çift devreli iletim sisteminin tek fazlı eşdeğer devresi (32).

İletim hattı-transformatör birimi, c1 ayırıcısı kapalı olarak s1 ve r1 devre kesicilerinin açılması ile sistemden ayrılır, s2 ve r2 kesicileri ile c2 ayırıcısı sürekli kapalı durumdadır. I nolu devre-nin sistemden ayrılmasından sonra, ayrılan bölümde depolarmış enerji, kesicilerin açıldığı anda çalışma geriliminin fazlara düşen değer-

leri ile belirlenir. Bu enerjinin büyük bölümü hat kapasitanslarında depolanır ve bu hat transformatör döngüsünde harcanan sönümlü bir salınım oluşturur. Bu salınımlar normal olarak II nolu devre ile durgun durum koşullarına ulaşırlar. Statik -durum koşulları sönümlü olabileceği gibi bir sürelik değişimden sonra kalıcı ferreazonans durumuna ulaşabilirler. Bu durumda harcanan kayıplar II nolu devre tarafından iki hat kapasitans aracılığı ile karşılanır. Burada r1 kesicisinin veya s1 kesicisinin üç kutbunun da aynı anda açıldığı varsayılarak sistem çözümü yapılmıştır. Sistemde kullanılan transformatörler üç adet tek fazlı, üç faz üç bacaklı veya üç faz beş bacaklı olabilirler-se de, verilen sonuçlar üç adet tek-fazlı transformatör için elde edilmiştir. Transformatörün matematiksel modeli mıknatıslanma eğrisinin doğrusal olmayan karakteristiği akı (λ) ve akım (i) cinsinden:

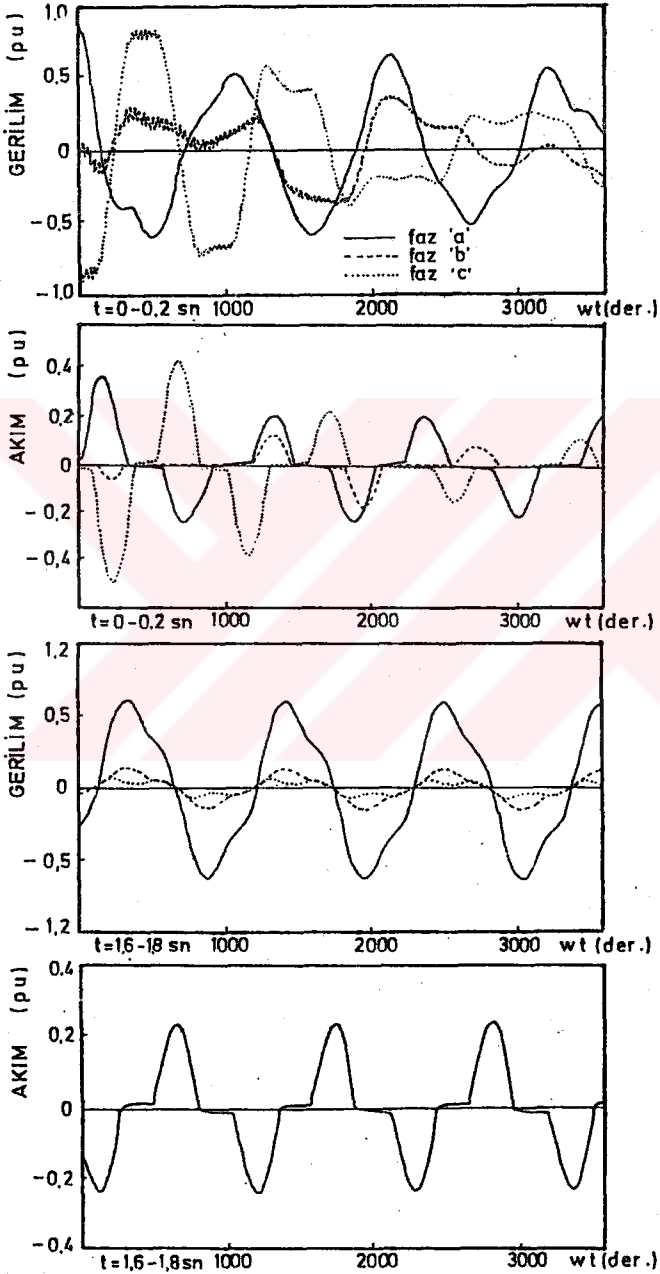
$$\lambda(i) = A_1 \cdot i + A_2 \tanh(A_3 \cdot i) \quad (5.2.2.1)$$

bağıntısı ile verilmiştir. Burada A_1 , A_2 ve A_3 hesaplanabilen birer sabit sayıdır (33).

5.2.3. Sonuç

Örnek olarak seçilen 500 MVA'lık transformatör ünitesi ile sonlandırılmış 100 mil uzunluğunda 400 kv'luk çift devre iletim hattı incelenmiş ve bilgisayardan elde edilen sonuçlar ferreazonans olasılığı açısından değerlendirilmiştir. Üç adet tek-fazlı transformatör ile sonlandırılmış iletim hattı modeli için yapılan geçici durum çözümlerinden ferreazonans ile sonuçlanan bir durum Şekil 5.2.3.1 görülmektedir. Burada gönderme ucu gerilimi olarak 1.0 p.u ve kesicilerin açılması için 'b' fazının geriliminin 'sıfır' olması durumu seçilmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ferreazonansı etkileyen temel faktörlerin devre parametreleri, kayıplar, devreye uygulanan gerilim kesicilerin incelenen hattı sistemden ayırmaları anındaki fazların durumu olduğu gözlenmiştir. Elde edilen önemli sonuçlardan birisi de, fazlardan yalnızca birisinin, hatta en fazla kapasitif etkileşim gösteren fazın yaklaşık 0,5 saniyelik bir geçici durumdan sonra ferreazonansa gittiğidir. Diğer iki fazın gerilimleri, transformatör tipine göre değişiklik göstermektedirler. Eldeki tüm ferreazonans salınımlar, incelenen hattın doğal sıklığının sistem sıklığından az olması nedeniyle bir alt harmonik olan 16,67 Hz'de oluşmaktadır.



Şekil 5.2.3.1. Transformör ünitesi terminallerinde oluşan ferrerezonans ve akım dalga şekilleri (34).

5.3. Elektrikli Tren Hatlarının Yan Etkileri

Havai iletim hattı + ray + toprak sistemine yönelik araştırmalar, her bir iletken ve bunun gibi iletken sistemleri arasındaki uygun empedans bağlantılarını gösterir. İletken ve raylar arasındaki bu bağlantılar; galvanik, endüktif ve kapasitif türden olabilirler. Böylece iletkenler ve söz konusu iletken devreleri arasında saf galvanik, endüktif ve kapasitif veya birleştirilmiş bağlantılar ortaya çıkar.

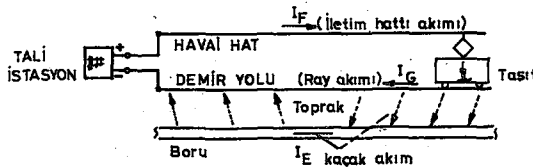
5.3.1. Doğru Akım Trenlerinin Etkileri

5.3.1.1. Kaçak Akımlardan Oluşan Elektrokimyasal Korozyon

Raylar, üzerinden sadece demiryolu araçlarının geçtiği yollar değildir. Aynı zamanda bir akım iletkeni olup, tesisin akım devresinin bir parçasıdır. Raylar, tesis akımının bir bölümünü, ray-toprak arasında mevcut olan geçiş direnci üzerinden topraktaki metallere (boru, kablo) aktarırlar. İşte topraktaki metallerde bu akımların değdiği bölgelerde elektrokimyasal korozyon başlar ve toprak elektrolit iletken görevini üzerine alır. Raylardan sızan bu akımlara da "kaçak akım" denir.

Buradaki söz konusu akım bir doğru akımdır. Ancak 50 Hz veya 16.2/3 Hz'lik bir alternatif akım şebekesinin toprak akımının korozyonunda, çelik metal, kurşun ve alüminyumda farklı davranışları söz konusudur. Bunların dışında frekansın da rolü vardır. Frekanslar pozitif yarım dalgaya eşdeğer olsalardı, korozyon hızı daha küçük olurdu. Çelik ve kurşundaki alternatif korozyon "doğru akım" yanında önemsizdir.

Doğru akım trenleri dışında, iş ve endüstri trenleri, tramvaylar, metrolar, hafif metrolar ve benzeri diğer tesisler, kaçak akım üreticisi olarak ortaya çıkarlar.



Şekil 5.3.1.1. Kaçak akım.

Korozyon bu işletmede bir yılda büyük maliyet kayıplarına neden olur. Dünyadaki korozyon kayıpları Rus araştırmacılara göre yılda yaklaşık 40 Trilyon ton olup, Eski Sovyetler Birliğinde yıllık metal kayıpları 9 Milyon ton civarındadır. Bu kayıp metal tutarı bazı ülkelerin toplam metal üretimine eşittir.

5.3.1.2. Korozyona karşı Katodik Korumanın Temel Esasları

Korozyon ekseriyetle kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyon tarafından metallerde meydana gelen bir aşınma (bozulma) olarak tanımlanır. korozyonun çeşitli cinsleri vardır fakat biz sadece elektrokimyasal korozyonların üzerinde duracağız. Metaller, elektriksel iletken olarak 1.sınıf, elektrolit çözelti olarak 2.sınıf iletken olarak gösterilebilirler. İkisi arasındaki kimyasal reaksiyonlar, elektrik yüklü parçacıkların taşınmasına bağlıdır. Metalin çözülmesiyle başlayan topraktaki ve sudaki korozyon olayı her zaman bir elektrokimyasal olaydır. Metalik korozyon yerel pilin oluşmasıyla açıklanabilir. Çözelti içinde bulunan iki ayrı metal bir devre ile bağlanırsa pil oluşur. Daha az soy olan metal çözeltiye geçer. Yerel pilin anodunda metalin çözeltiye geçmesi için katot vazifesi gören daha az soy olan metal, saf olmadığından hidrojen çıkışı olur. Metal yükseltgenirken hidrojen indirgenir.

Elektrolit bir çözeltide bulunan her metalin bir çözünürlük basıncı olduğu kabul edilmiştir. Bu çözünürlük basıncı osmatik basınca karşılıktır. Çözelti basıncı ile pozitif iyonlar geriye çözeltiye geçer. ve metalde serbest iyonlar geriye kalır. Bunun yanında metal-elektrolit sınırlarında eş potansiyelli elektriki çift tabaka oluşur. Eğer metalin çözelti basıncı ile elektrolitin osmatik basıncı arasında bir denge söz konusu ise, o zaman metalin çözülmesi son bulur. Korozyonda bu denge elektriki çift tabakanın bileşenlerine ayrılmasıyla bozulur. Bu tahribat hidrojen veya asitin etkisiyle meydana gelebilir. Elektriki çift tabaka dışarıdaki kaçak akımlardan dolayı da bozulabilir. Elektrokimyasal korozyonda anodik ve katodik reaksiyonlar birbirine paralel hareket eder. Burada anodik reaksiyona örnek demirin çözülmesi gösterilmiştir (35);



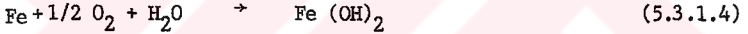
Katodik reaksiyon için $\text{pH} > 4$ durumunda oksijen indirgenmesi;



$\text{pH} < 4$ içinde hidrojen oluşur.



Topraktaki korozyon sürekli oksijen etkisi altında oluşur. Eğer (5.3.1.1) ve (5.3.1.2) eşitlikleri toplanırsa korozyondaki toplam reaksiyon elde edilir.



Çıkış bölümündeki demirhidroksit, demir, oksijen ve sudan oluşmaktadır.

Metal çözülmesinden; anot akımı I_1 metalden elektrolite akar. İndirgenme olayına eşdeğer bir katodik akım büyüklüğü I_2 ise, elektrolitten metale akar. Akımların yönü birbirine zıt olduğundan ve dışarıdan bir akım tesiri olmadan oluşan toplam akım sıfır olur.

$$I_1 + (-I_2) = I_g = 0 \quad (5.3.1.5)$$

Dışarıdan bir akım tesiri olduğunda, o taraftaki akım yönünü ve buna bağlı olarak o noktadaki reaksiyonu ya hızlandırır, ya da yavaşlatır. Eğer toplam akım $I_g > 0$ ise anodik reaksiyon hızlanmaya başlar ve metal aşınması hızlanır ki, bu olay topraktaki metal tesislerden ayrılan kaçak akımlarına eşdeğerdir. Buna karşı $I_g < 0$ ise incelenen metal yüzeyine dışarıdan bir akım akar ve katodik reaksiyon kuvvetlenir, anodik reaksiyon zayıflar. Korunan metalde anodik reaksiyonun başlamasına izin verilmez. Bu katodik korumanın bir prensibidir.

Bu sistem üzerinde etki eden dış akım toplamı ile metal yüzeylerindeki ayarlı potansiyel ve elektrolit arasında kesin bir ilişki vardır. Bu ilişki, akım şiddeti- potansiyel eğrisi ile gösterilir.

Burada toprak içindeki herhangi bir yerde (tesiste) akım şiddeti ölçümü zordur. Oysa akım-gerilim eğrisinde gösterilen potansiyelin akım şiddeti ile olan değişimi, korozyona karşı korunma ölçümleri için büyük önem taşır. Metalin elektrotta karşı olan potansiyeli tesisin tehlikede olup olmadığı hususu için bir kıstas olarak, veya katodik korumanın etkisi olarak kullanılır. Teorik ve pratik çalışmalar şunu ispatlamıştır; eğer korunacak tesise göre toprakta 850 mV potansiyel varsa bu durumda topraktaki çelik korozyona karşı korunmuş olur. Ölçümler bakır-bakır sülfad elektroduna karşı yapılmıştır.

Katodik korumada önemli olan bu potansiyele koruyucu potansiyel adı verilir. Kurşun için bu değer -550 mV dur.

Farklı metallerin koruyucu potansiyelleri aşağıdaki tabloda verilmiştir:

	Demir	Kurşun	Bakır	Nerede Ölçüldüğü
Gerilim sırası (Normal potansiyel)	-0,44	-0,12	+0,34	(V) Normal hidrojen elektrodu
Toprak içindeki potansiyel (toprak cinsine göre)	-0,6	-0,5	+0,1	(V) Cu, CuSO ₄ elektroduna karşı
Toprak içindeki katodik koruyucu potansiyeli	-0,85-1,6	0,55-1,6	-0,1	(V) Cu-CuSO ₄ elektroduna karşı
Amper ve yıl başına çözünen madde	9,1	33,4	10,4	(kg)

Tablo 5.3.1.1. Farklı metallerin koruyucu potansiyelleri (36).

5.3.1.3. Kaçak Akım Üzerine Etki Eden Faktörler

Kaçak akım büyüklüğüne değişik faktörler etki eder. Bu faktörler aşağıda incelenmiştir :

5.3.1.3.1. Bir Demiryolu Hattının Toplam Akımı

Trenlerin hareketi için belli bir elektrik gücü gereklidir. Aynı güçte, daha büyük bir gerilim seçilirse raylarda akan toplam akım ve kaçak akım azaltılabilir. Kaçak akımı azaltmak için uygun olan, havai hat şebekesinin birçok yerden beslenmesidir. Bunun yanında birkaç büyük besleme istasyonu yerine birçok küçük besleme istasyonlarının olması daha iyidir. Böylece dönüş hattı için ray akım ve uzunluğu daha küçülmüş olur. Ray akımını azaltmak için diğer olanaklar çift taraflı besleme ve bir yedek dönüş hattı kablosu yerleştirmektir. Burada rayların enine kesidi kablodan daha büyük olduğu için, yedek dönüş hattından önemli miktarda bir akım gelmeyecektir.

5.3.1.3.2. Demiryollarının Kondüktansı

Kaçak akım büyüklüğüne etki eden en önemli faktör, rayların toprağa göre kondüktansıdır. (Ray ve toprak arasında geçiş direncinin tersi). Bu büyüklük üst yapı türüne ve üst yapı konumuna göre çok farklı olabilir. Kırma taş yatağı üzerindeki rayların admitansı, cadde üzerindeki tramvay hattına göre daha azdır.

5.3.1.3.3. Demiryolumun Ray Uzunluk Direnci

Yer üzerindeki çeşitli demiryollarında farklı ray profilleri kullanılır. Bununla farklı ray uzunluk dirençleri elde edilir. S 49 tipindeki kırık olmayan bir ray için uzunluk direnci $0,032 \Omega/\text{km}$ ve iki demiryolu hattında $0,008 \Omega/\text{km}$ değerini alır (37).

Doğru akım trenlerinde ek bağlantı yerlerindeki direnç yükselmesi, kollara ayrılmayan (düzgün ilerleyen) bir rayın direnç değerinin % 15'ine kadar müsaade edilir. Ek yerleri ray bağlantı elemanları tara-

fından köprülenir. Eğer izin verilen direnç yükselmesi (ek yerinde) dikkate alınır, bağlantılarla beraber bir demiryolumun uzunluk direnci $0,02 \Omega/\text{km}$ ve ikili hattın uzunluk direnci $0,01 \Omega/\text{km}$ olarak elde edilir. Direnç yükselmesine yetersiz bağlantılar veya ray kırılmaları da sebep olur. Devamlı bir demiryolu rayları arasında en az her 100 metrede bir iletkenle enine bağlantılar yapılır. Demiryolları arasında en az her 250 metrede bir enine iletken bir bağlantı yapılması gereklidir. İzoleli raylarda ve demiryolu sinyalizasyon tesislerinde istisnai olarak bu bağlantılar yapılmaz.

5.3.1.3.4. Raylardaki Akımın Dönüş Hattı Uzunluğu

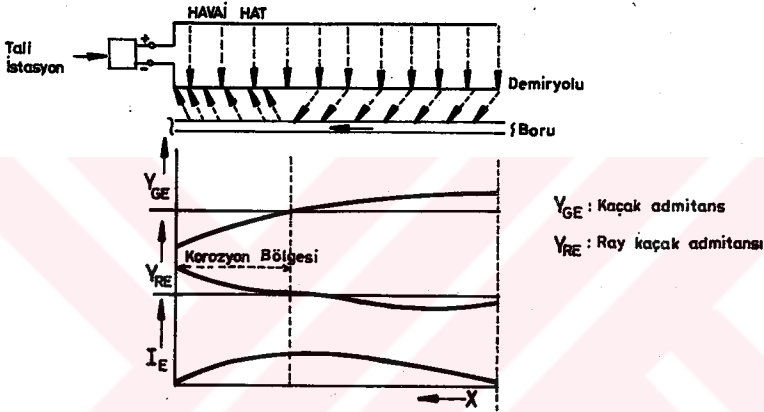
Raylardaki akımın dönüş yolu uzunluğu kaçak akım büyüklüğüne etki yapar. Önceden alınacak önlemlerle dönüş yolu uzunluğu kısaltılır. Bununla kaçak akım azaltılabilir. Kaçak akımlara ve topraktaki metalik iletkenlerin korozyonuna etki eden faktörlerden hareket ederek, doğru akım trenlerinde kaçak akımların sınırlandırılmasına ilişkin yeni bir logaritmik sistem ortaya atılmıştır. Önerinin sahibi Hampel'dir (38). Türetilen büyüklük ($\alpha.L$) bu sistemdeki kıstasdır. Türetilen sabitlerle demiryolumun admitans ve km. başına uzunluk dirençleri elde edilir. Bundan sonra demiryolumun α 'ya bağımlı olarak izin verilen dönüş hattı uzunluğu ve km. başına amper olarak hat yükü diyagramdan çıkarılabilir.

5.3.1.4. Havai Hat ve Ray Polaritesinin Korozyon Dağılışı Üzerine Etkisi

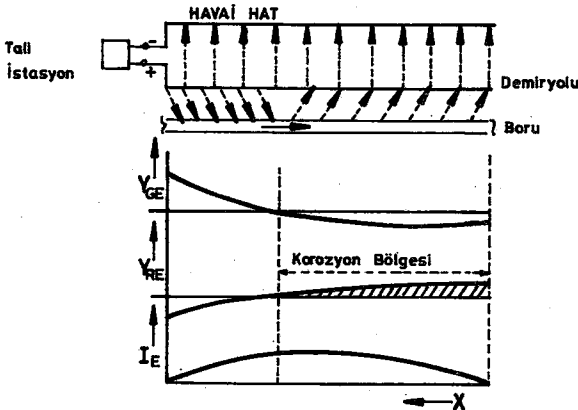
Doğru akım trenlerinde havai hat için pozitif polarite seçilebildiği gibi negatif polaritede de seçilebilir. Rayların ve havai hattın polaritesine göre topraktaki metal iletkenlerde korozyon bölgelerinin farklı olduğu görülür. Hattın kabul edilen uygun yükünde ve demiryolumun pozitif polariteye sahip olması durumunda korozyon bölgeleri hattın sonunda yer alır ve uzunluğu yarısına kadar uzanır. Orada yayılan bir korozyon söz konusudur.

Negatif ray polaritesinde ray potansiyeli dönüş hattı noktası yanındadır. Burada, toprak içindeki metalik parçaların pozitif potan-

siyele sahip oldukları kabul edilir ve bunlar aşınırlar. Korozyon bölgesi rayların küçük bir bölümü üzerinde sınırlanır. Korozyon yoğunluğu diğer faktörlerin yanında (iletkenin izolasyonu, uygun toprak direnci) aynı zamanda ray-toprak arasındaki potansiyel farka ve ray-toprak içindeki iletkenler arasındaki potansiyel farka da bağlıdır.



Şekil 5.3.1.2. Korozyon bölgesinin havaî hattın pozitif polarite-
sindeki durumu.



Şekil 5.3.1.3. Havaî hattın negatif polaritesindeki korozyon
bölgesinin durumu.

Toprak içindeki metalik iletkenlerdeki kaçak akım korozyonu, kaçak akım admitansları tarafından önemli ölçüde azaltılabilir veya engellenebilir. Bu kaçak akım admitansları için koşulan şart, raylarda yeterli büyüklükte negatif polariteye sahip bir noktanın var olmasıdır. Havai hattın negatif polaritesinde, yük değişimine kuvvetle bağlı olan ve hat sonunda meydana gelen bir negatif ray potansiyeli oluşur. Havai hattın pozitif polaritesine karşılık raylarda dönmüş hattı noktasında yüksek negatif potansiyel vardır. Havai hattın pozitif polarite seçiminde, korozyon alanının az genişlemesi ve aynı zamanda yüksek negatif ray potansiyelinden dolayı kaçak akım admitansları için uygun şartlar mevcuttur.

Toprak içindeki metal iletkenlerin korozyonunu azaltacak aktif karşı koruma önlemlerinin uygulanmasında, havai hat için pozitif polariteye gereksinme vardır. Eğer teknik ve ekonomik nedenlerden bir değişiklik gerekiyorsa, istisna olarak var olan tesislerde hava hattı negatif polarite olabilir.

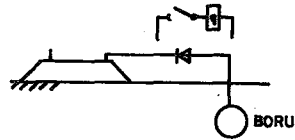
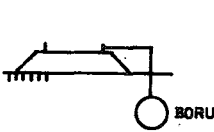
5.3.1.5. Korozyona Karşı Korunma Önlemleri

Korozyon için koşullar değiştirilebiliyorsa veya metal yüzeylerine etki eden elemanlar bir ayrılabilen tabaka tarafından uzak tutulabiliyorsa, buna göre aktif ve pasif korozyona karşı koruma yöntemlerini birbirinden ayırabiliriz. Pasif koruma önlemlerine şunlar dahildir. Boyama, vernikleme, metal kılıflar (kalaylama), metal iletkenleri izoleli bir tabaka ile saran elemanlar (boru, PVC) gibi. Elektrokimyasal koruma (anodik ve katodik koruma) da korozyona karşı aktif koruma tedbirleridir.

Her iki türden kombinasyonların bir çok durumlarda büyük yararları vardır. Pasif koruma korunan tabaka içindeki boşluklardan dolayı her zaman yeterli değildir. Özellikle kaçak akımların etkisiyle büyük korozyon tehlikesi oluşur. Parlak metallerdeki katodik koruma, yüksek koruma akımına gereksinme gösterir. Eğer her iki yöntemi beraber kullanırsak önemli ölçüde korozyondan korunmuş olur.

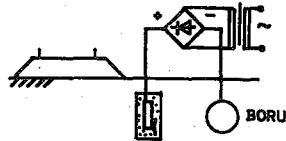
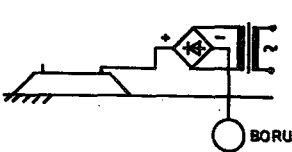
Korozyona karşı aktif koruma yöntemleri iki şekilde uygulanabilir. Demiryolu tesislerinde; kaçak akımın, admitans yardımıyla azaltılmasında ve katodik koruma yöntemlerinden oluşur. Her iki koruma çeşidinin, ekonomiklik göz önüne alınarak bir arada kullanılması en uygun olan şeklidir.

Kaçak akım aralarında hiç bir iletken parça olmasa dahi, toprak içindeki metal tesislerden türeyerek demiryoluna doğru akabilir. Elektrolit iletken (toprak) bir metal iletken yerine konulabilir. Kaçak akım türemesinin en basit çeşiti direk akan kaçak akımdır (Şekil 5.3.1.4). Bu akım demiryolumun toprağa karşı yeterli negatif potansiyele sahip olduğu ve bağlantı iletkenlerinde akım yönü değişikliğinin mümkün olmadığı yerde uygulanabilir. Toprak içindeki iletkenlerdeki potansiyel düşümü ve katodik koruma ray aralarındaki bağlantılarda etkili olurlar. Eğer potansiyel negatif olursa, o zaman bağlantı iletkenlerindeki dirençlerden dolayı türetilen akımın azalması mümkündür. Kaçak akım döngüsünün olduğu yerde kaçak akım-türetimi var ise orada bir doğrultulmuş akım uygulanabilir. Bir doğrultucu veya uyarılan bir röle tarafından kaçak akımın bağlantı iletkenler üzerinden korunan tesise akması engellenir (Şekil 5.3.1.5). Yeterli katodik korumanın olmasına gerek yoktur. Çünkü küçük potansiyel farklarından dolayı oluşan akım küçüktür. Böylece doğru akım kaynaklarından bağlantıya yüksek bir akımın akması zorlanabilir (Şekil 5.3.1.6). Bunu "kaçak akım emilmesi" olarak tarif edebiliriz.



Şekil 5.3.1.4. Direkt kaçak akım.

Şekil 5.3.1.5. Doğrultulmuş kaçak akım.



Şekil 5.3.1.6. Kaçak akımın emilmesi için devre.

Şekil 5.3.1.7. Anotlu katodik koruma.

Demiryolundan uzak mesafelere konulan iletkenlerle yapılan bağlantı, iletkenlerinin kesitleri büyük olması gerektiği için ekonomik olmayabilir. Böyle durumlarda anotlu katodik korumanın (5.3.1.7) uygulanması gerekir. Koruyan iletkendeki akım doğrultucu üzerinden anoda oradan da toprak üzerinden demiryoluna geçer. Kaçak akım anotta metalik aşınma meydana getirir. Koruyan iletkenindeki korozyon, anoda doğru yer değiştirmiştir. Şebekeye gelen akım doğrultularak anot üzerinden topraktan geçerek boruya geri akar. Borudaki gerilim düşümü ile katodik koruma hedefine ulaşır.

5.4. Demiryolu Akımının Sağlanmasında Koruma Teknikleri

5.4.1. Genel Bilgiler

Koruma gereçlerinin görevi, birdenbire ortaya çıkan hatalarda ya da izin verilemeyecek derecedeki aşırı yüklenmelerde zarar gören veya tehlikeye maruz kalan işletim birimlerini devre dışı bırakmaktır. Bazı hallerde bir uyarı sinyali de yeterli olmaktadır. Generatör ve trafoların yüksek gerilim sargılarındaki dahili bozukluklarında ve 110 kV'luk hatlardaki ve 15 kV'luk havai hatlardaki kısa devre durumlarında akımın mümkün olduğunca çabuk biçimde kesilmesi gerekmektedir. Koruma donanımının seçici olarak çalışması gerekir, yani arıza durumunda yalnızca tesisin bozulan kısımları işletim devresinden ayrılmalıdır. Ancak bunların koruma donanımları da işlemez ise, diğer tesis bölümlerinin de devreden çıkarılması söz konusu olabilir. Bu ise, öncelik zaman kademelerine ayrılmış ilgili rölelerin yardımı ile sağlanır.

5.4.2. Generatör Koruması

Generatörlerin destek sarımları dahili arızalara karşı geri dönüş Watt'ı rölesi (Rückwatt schutz), destek toprak bağlantısı, ayrıca enine kıyaslama ve diferansiyel (fark) koruma yöntemleri ile korunur (39). Bu donanım 110 kV'luk güç anahtarına ve durdurma devresine anında etki eder. Harici arıza ve aşırı yüklenmelere karşı yüksek değerlere karşı hassas olarak ayarlanmış aşırı akım zaman koruması kullanılır. (6 sn süreyle makinenin arıza akımının yaklaşık 1,6 katı akıtılır.) Yer toprak bağlantısı koruması ve sıcaklık denetimi yalnızca uyarı durumunda çalıştırılır.

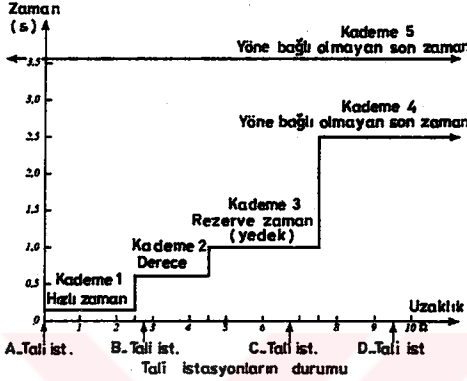
5.4.3. Gerilim Değiştirici Koruması

Elektrik ve dönüştürücü santrallerindeki gerilim değiştiricileri dahili arızalara karşı Buckholz ve diferansiyel (fark) röleleri ile korunurlar (40). Harici arızalara ve aşırı yüklemelere karşı bir aşırı akım zaman koruması sisteme yerleştirilebilir. Gerilim değiştiricinin yağının sıcaklık denetimi ve kağıt hamuru korumasının ilk aşaması (gaz oluşumu) sadece ihbar üzerine devreye girmektedir. Kağıt hamuru korumasının ikinci aşaması (yağda basınç oluşumu) ve diferansiyel koruma sistemleri anında devreye sokulmaktadır. Diferansiyel koruma, faz akımları ile yüksek ve alçak gerilim tarafları arasındaki farklar sırasında kullanılır. Diferansiyel koruma ilk açıştaki gerilim sıçramasına karşı stabilize edilmiştir (41). Bu sistem, yüksek ve alçak gerilim tarafındaki akım dönüştürücülerinin arasındaki tüm arızaları bulmaktadır. Bu şekilde trafonun iç ve dış iletimleri ve geçiş korunmuş olur. Alt santral gerilim değiştiricisinin aşırı akım zaman rölesi gerilim değiştiricisinin anma akımının 2 ilâ 3 katına ayarlanır. Açma süresi 110 kV tarafında 1,5 saniye, 15 kV tarafında ise 1 saniye tutmaktadır.

Gerilim değiştirici koruması, bunların dışında hazne koruması ve dönüş gücü koruması olarak adlandırılan sistemlerle de takviye edilir. Hazne korumasında bir akım dönüştürücü aşırı akım rölesi ile birlikte, gerilim değiştiricisinin haznesinin bağlantı hattında 110 kV'luk koruma toprağına yerleştirilir.

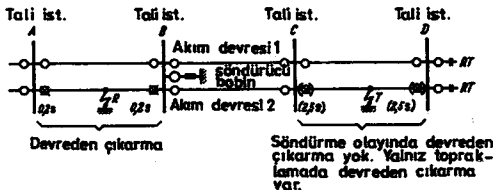
5.4.4. 110 kV'luk İletim Hattının Koruması

110 kV'luk demiryolu akım iletim hatları iki fazlı uzak mesafe röleleri ile empedans sistemine göre korunur. Röleler, anahtarın kısa devre ya da çift kısa devre durumunda devreyi açmasını sağlarlar. Yeni röleler beş kademeli bir direnç-zaman skalasına sahiptir. Ayarlanabilen direnç kademeleri, hızlı kademesi, derece kademesi, yedek kademe ve ayarlı ya da ayarsız olan bitiş sürelerine ait zaman kademeleridir. Eski rölelerde yedek kademesinin yerinde sabit bir skala bulunurdu (Şekil 5.4.4.1).



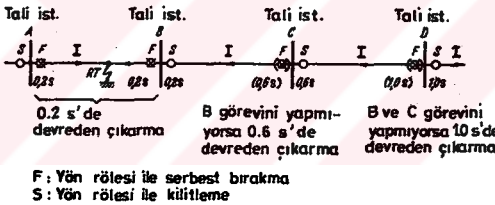
Şekil 5.4.4.1. 110 kV'luk demiryolu enerji iletim şebekesinin korumasının planı.

Hızlı kadememesinin komut süresi 35 ms ile 60 ms arasındadır. R fazı tercih edilen bir faz olarak işlem görür. Kısa devreler ve çift kısa devre noktaları bu fazda kademeli zaman skalasına göre çabucak devre dışı bırakılırlar. T fazının korunması için gereken harekete geçme süresi sabit olarak 2,5 saniyeye ayarlanmıştır. T fazında oluşabilecek bir ışık yayı hatası da böylece birbirinden ayrı dip noktalarında ortaya çıkan bir çift kısa devre sırasında R dip noktasının devre dışı bırakılmasından sonra genel olarak bobinlerin yardımı ile ortadan kalkar. Eğer T fazındaki arıza 2,5 saniye sonra hala mevcutsa; T dip noktalı iletim kısmı da seçmeli olarak devre dışı kalır (Şekil 5.4.4.2).



Şekil 5.4.4.2. Çift topraklamada 110 kV'luk hat korumasının etkisi.

Arıza akımları toplayıcı raylardan dışarı akıyorsa yön elemanı koruma işlemini başlatır. Aynı işlemin ters yönde yapılması engellenmiştir. Zaman kademelendirilmesi, rölelerin arıza mevkiinden uzaklıkları arttıkça daha uzun zaman kademelerinin etkin olmasını sağlayacak biçimde yapılmıştır. Bunu koruma mekanizmasının empedans ölçüm elemanları sağlar. $Z = U/I$ oranına göre çalışırlar. Kısa devre mahalline olan uzaklık arttıkça U gerilimi de artar. İletim hattının empedans hattın uzunluğu ile orantılıdır. Buna göre Şekil (5.4.4.1)'de yatay koordinat ekseninde empedans ölçeği Ω değeri olarak gösterilmiştir. Hızlı kademesi, bir sonraki tevzi levhasına olan iletim hattı uzunluğunun % 95'ine ayarlanır. Devre kademesi, komşu bölgenin % 40'ına kadar ulaşır ve yedek kademesi de komşu bölgenin % 110'una kadar ayarlanır. Verilen bir iletim hattındaki koruma mekanizmasının harekete geçmesini sağlayan koşullar şekil 5.4.4.3'den çıkartılabilir.



Şekil 5.4.4.3. Bir akım devreli bir hat üzerindeki kısa devrede 110 kV'luk koruma hattının etkisi.

Alman Demiryolları'nın bir alçak gerilim santralında, sürekli kısa devre durumunda yapay bir çifte kısa devre yaratan bir otomatik düzenek oluşturulmuştur. Bu arada kısa devresiz faz birkaç saniye sonra kısa süreli olarak tek kutuplu bir güç anahtarı üzerinden toprağa bağlanmaktadır. Bu yolla tek fazlı sürekli kısa devre durumlarında da seçici olarak akımı kesmek mümkün olmaktadır. Kopuk akım hatlarının özellikle kuru ve kumlu zemine ya da kalın kar tabakaları üzerine düşmesi halinde toprak geçiş direnci çok yüksek olmaktadır. Çifte kısa devre akımı bu durumda koruma mekanizmasını harekete geçirmeye yetmez.

5.4.5. Kısa Devre Yönlendirme Rölesi

İşletme açısından, iletim hattının koruma mekanizması tarafından yok edilemeyen şebekedeki sürekli kısa devrelerin ve kısa devre yok edicilerinin durumlarının saptanması önem taşımaktadır. Bu amaçla tevzi levhalarına kısa devre yok edici röleler yerleştirilmiştir. Bunlar iletim hattının her dalının iki fazına birden bağlanmıştır. Gerilim nakli sırasında oluşan yük aktarma gücüne ait ortaya çıkan enerjinin yönlendirilmesini sağlarlar. Yön göstergeleri etki mesafesi uzun bir tesis üzerinden 110 kV'luk sevk kumanda mevkilerinin şebeke denetleme tablolarındaki ışıklı sinyal mekanizmalarına aktarılır. Arızalı iletim hattı, her iki uçtaki kırmızı sinyal lambaları ile belirtilir. Yok edicilerin belirli iletim hattı kesimlerinde lokal olarak yığılması durumunda, bakım ünitesi tarafından bir yeni yoklama-denetim düzenlemesi sağlanır.

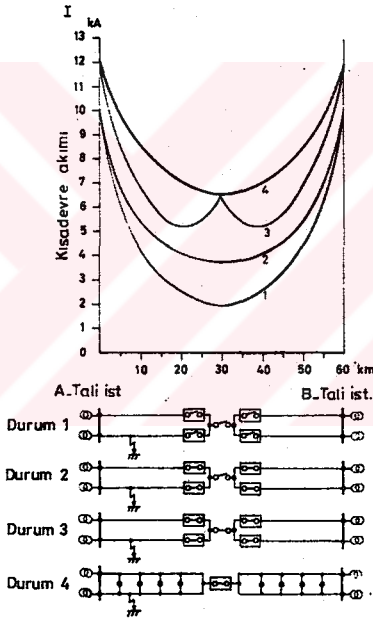
5.4.6. Frekans Rölesi

Almanya'da bazı alçak gerilim santrallerinde belirli iletim hattı ayrımlarında frekans 16,3 - 16,45 Hz değerlerine düştüğünde akım kesen frekans röleleri monte edilmiştir. Elektrik santralindeki ani kesintilerde ve beklenmedik derecedeki yüksek güç sıçramaları ortaya çıktığında, şebeke işletmesi büyük tehlikelere maruz kalır. Frekans röleleri bu tür durumlarda gereken yük boşaltımını sağlarlar. Bir şebeke arızası ile bağlantılı olarak röleler ilk kez çalıştıktan sonra, yaklaşık 3 dakika içinde besleme bölümleri yeniden devreye sokulmalıdır. Frekans rölesi, kondansatörün dolup boşalma usulüne göre çalışır.

5.4.7. 15 kV'luk Havai Hattın Korunması

Alman Demiryolları'nın elektrikli hatlarını besleyen 15 kV'luk havai hatların korunması için çok özel kriterler konmuştur. Havai hat şebekesi oldukça karmaşıktır. Özellikle alçak gerilim santralının yakınlarında 35 kA değerini bile aşan çok yüksek kısa devre akımları ortaya çıkmaktadır. Havai iletim hattı şebekesinin karmaşıklığından dolayı, gereken seçici kısa devre müdahalesi (devre dışı bırakma işlemi) sadece

yönlendirilmiş bir çok kademeli empedans koruma mekanizması ile sağlanabilir. Burada gerekli olan yön belirlenmesi ve empedans ölçümü; rölenin harekete geçme süresini uzatır. Şekil (5.4.7.1)'de olduğu gibi, kısa devre akım değeri alçak gerilim elektrik santrallerinin yakınında çok yükselir. Tren yoğunluğunun yüksek olduğu havai hat şebekelerinden akan aşırı akımlara müdahale, trenlerin beslemesi olmayan havai hat kısımlarına sokulma ihtimali arttığından ve böylece hat ayrılma işleminde



Şekil 5.4.7.1. Şebekenin çeşitli bağlama durumlarında ve kısa devre yerinin tali istasyondan olan farklı mesafelerinde kısa devre akımının değişimi (42).

kontakt ya da hat ayırıcılarda arızalar oluşacağından, arzu edilmez. Bu yüzden, koruma mekanizmasında yavaş gerçekleşen akım artışında müdahale süresini işletme akımının tepe değeri yavaş yavaş yok olana kadar uzatan bir akım artışını ölçme sistemi öngörülmektedir. Orta ve düşük kısa devre akımları bölgesindeki koruma görevini aşırı akım zaman rölesi üstlenmektedir.

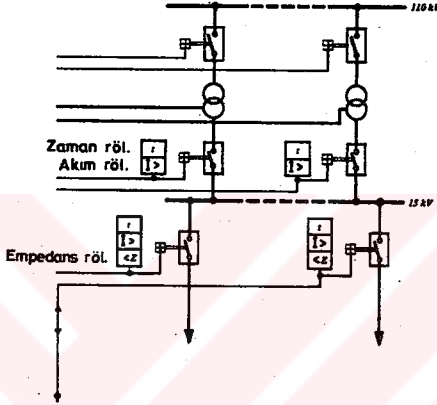
Son olarak, termik görüntü prensibine dayanan ve ilgili çevre sıcaklığını da göz önüne alan bir aşırı yük koruma mekanizması öngörülmektedir. Bu mekanizma, havai hattın izin verilebilecek derecelerinin üstünde ısınmasını engellemek durumundadır. Seyr telinin bakırı aşırı ısınma ile aşınabilir ya da havai hattın şekli, aşırı ısınma sonucu oluşan genleşme ile bozulabilir ki, bu yolla da akım alıcının raydan fırlaması söz konusudur.

Havai hat koruma mekanizmasının bahsedilen görev alanları bütün de birçok tali istasyonda bulunan özel kılıflı ayırık koruma röleleri tarafından üstlenilmiştir. Burada değinilmiş olanlar SDB-empedans koruma mekanizması, tam elektronik aşırı akım rölesi R S By, aşırı akım zaman rölesi RA 20 X ve aşırı akım zaman koruma mekanizması RN 51 idi. Bu arada havai hat koruma mekanizmasının tüm fonksiyon gruplarının tam otomatik şekilde inşaatı konusunda da yerleştirme tekniği kullanılarak başarıya ulaşılmıştır. Komple havai hat koruma sistemi geçme kılıflara ya da normlandırılmış dolaplara yerleştirilebilmektedir. AEG Telefunken ve Siemens AG firmaları modern havai hat koruma mekanizmaları olarak, eleman ve etki açısından belirgin farklar göstermeyen SDB 15 ve 7 SL 16 fonksiyon sistemlerini geliştirmişlerdir (43).

5.4.8. Tali İstasyonlardaki Yüksek Öncelikli 15 kV'luk Koruma Mekanizması

Akım baralarındaki kısa devreler, çok seyrek olmalarına rağmen tehlikeli sonuçlar doğuran olaylardır. Buna bağlı olarak, böyle bir anda tevzi istasyonunda bulunan insanlar için büyük bir tehlike oluşturlar. Baradaki bir kısa devre sonrası tüm tesis, en azından önemli bir kısmı, işletim dışı kalır. Bu yüzden bir kaç yıl önce Alman Demiryolları'na baraları koruma mekanizması getirilmiştir. Tek kutuplu 15 kV'luk tevzi tesislerinde her bara arızasında işletme barası ile topraklı tevzi istasyonu arasında yüksek akımlı bir kısa devre oluşur. Bu toprak ucuna bilinen bir iskele akımı dönüştürücü (Şekil 5.4.8.1) devreye sonra giren bir aşırı akım rölesine ilgili kriterleri gönderir. Kontakların çoğaltılması ile tüm 15 kV'luk güç anahtarları gecikmesiz olarak devreyi açar. Bara koruma mekanizmasının güvenilirliği açısından önemli

olan, iskele akımı dönüştürücü üzerinden sağlanan bağlantının dışında tevzi iskelesi ile sıfır rayı arasında herhangi bir yan bağlantının olmamasıdır.



Şekil 5.4.8.1. Tali istasyonlarda 15 kV'luk korumanın düzenlenmiş şekli.

Tali istasyonlardaki yüksek akımlı kısa devre durumlarında, bunların yakın çevrede olabileceği gibi, toplam akım dönüştürücüsünün aynı şekilde belli bir zaman gecikmesi ile kontakların çoğaltılmasını etkileyen ek bir kriteri de türetilir.

BÖLÜM 6

BİR ELEKTRİKİ ULAŞIM SİSTEMİNİN BESLENMESİNDE TALİ İSTASYON-
LARIN DEĞERLENDİRİLMESİ6.1. Doğru Akım Demiryolu Tali İstasyonlarıyla ilgili Genel
Bilgiler ve Sistemin Analiz Esasları

6.1.1. Temel Bağlantılar

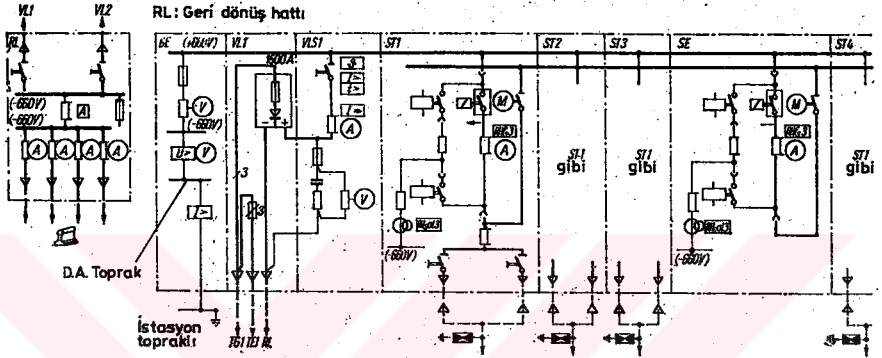
Doğru akım-demiryolu tali istasyonları normal orta gerilim istasyonlarından bazı hususlarda farklılık gösterirler.

Ana parametrelerin kullanım alanlarına göre, büyüklük dereceleri Tablo 6.1.1.1'de görülmektedir. Burada silisyumlu doğrultuculu tali istasyonlar ele alınmaktadır.

Kullanıldığı Yer	Gerilim düzeyleri (v)	Her tali istasyon başına güç (MW)	Doğrultucu birimlerinin sayısı
Yeraltı ocakları	220 ve 500	0,5 1	2 3
Yakın mesafe trafiği	600	2 3	2 3
Hafif metro ve metro	750 ... 1500	5 10	2 4
Endüstri demir- yolları	600		
Maden ocakları santraller	1200 ve 1500		
Çimento fabrikaları	2400 ve 3000	6 9	2 3
Demiryolları	1500 ve 3000	5 9	2 3

Tablo 6.1.1.1. Doğru akım-demiryolu tali istasyonlarının kullanım alanlarına göre ana parametreleri (44).

Bu tali istasyonların temel bağlantısı Şekil 6.1.1.1'de görülmektedir.

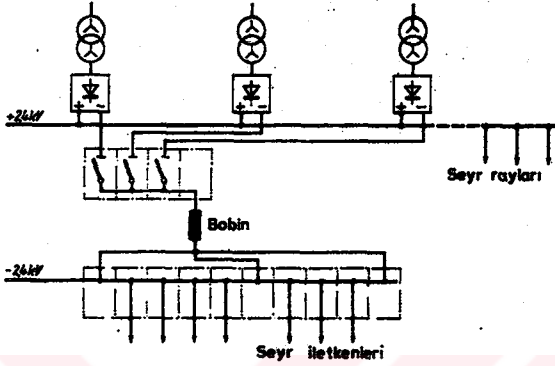


Şekil 6.1.1.1. Doğru akımla demiryollarının enerji sağlanmasında kullanılan bir tali istasyonun prensip bağlama şeması.

Burada tramvay ve trolleybüs hatları için enerji sağlayan bir tali istasyon söz konusudur. Burada karakteristik olan, kısa devre akımlarının etkilerinin azaltılması amacıyla, doğru akım şalt tesisinin pozitif-negatif dağılımının ortam olarak ayrılmış düzenidir.

Orta gerilim şalt tesisi işletme güvencesi nedenlerinden en az 2 besleme yerinde, mümkün ise enerji sağlama şebekesinin çeşitli istasyonlarından beslenmelidir. Bu esaslardan işletme koşullarına bağlı olarak bazı ayrıntılarda değişme yapılabilir.

Çok büyük tali istasyonlar, işletmenin çalışmasının kesilmesi olmaksızın bir bakım gerçekleştirilmesi ve orta gerilim şalt tesisinin işletme güvencesinin yükseltilmesi için çift akım bara sistemli yapılırlar. Aynı nedenle iki de özel ihtiyaç transformatörü öngörülmüştür. 1500 V dan büyük nominal gerilimlerde kısa devre akımlarının artışının sınırlandırılması için doğru akım tarafına bobinler yerleştirilir (Şekil 6.1.1.2).

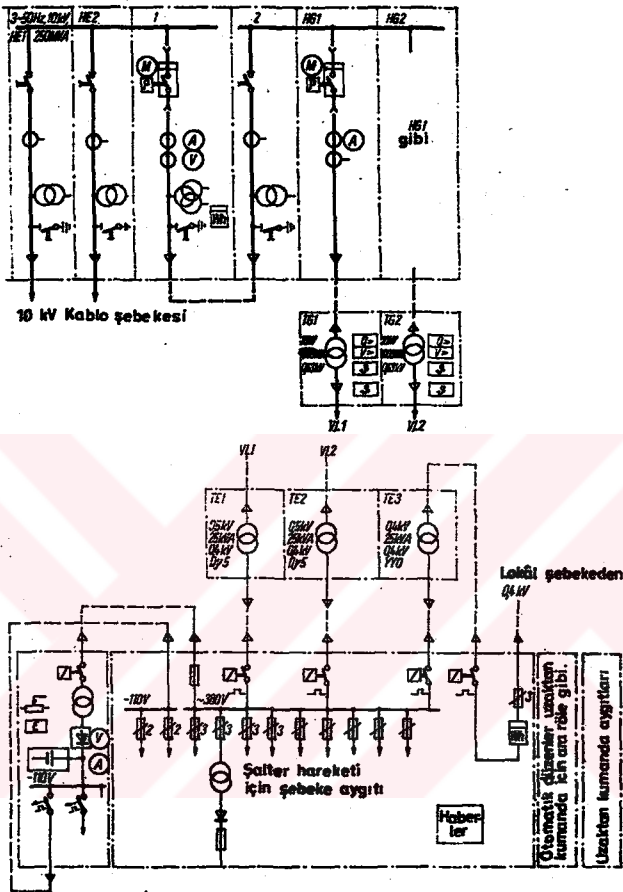


Şekil 6.1.1.2. Kısa devre akımının artışını sınırlayıcı bobinin bağlantı şeması.

Aynı şekilde büyük güçlü silisyumlu anahtar düzenleri de doğru akım şalt tesisinden ayrı yerleştirilmelidir. Demiryolu tesisinin kutuplanmasına göre doğru akım şalt tesisi (gerilimi taşıyan kutup, yani seyr iletken kutbu) pozitif veya negatif kutup olur. Doğru akım şalt tesisinin içindeki toplayıcı raylar (akım baraları), kısa devre akımlarının sınırlandırılması veya diğer işletmesel nedenlerden dolayı uzun ayırıcı şalterle seksiyonlara bölünebilirler.

Trolleybus işletmesinde izole edilmiş şekildeki her iki seyr iletkeninde dönmüş iletken kolunda ayırıcı şalter konulması zorunludur.

Şekil 6.1.1.3 'den de görülür ki, her bir tesis bölümü "Blok" olarak yapılmıştır. Bu şekilde önceden fabrikada hazırlanmış blok üniteler yerinde monte edilir ve devreye bağlanırlar.



Şekil 6.1.1.3. Tesislerin blok olarak gösterilişi.

6.1.2. Yapısal Düzenleme

Esas olarak duran ve hareketli tali istasyonlar vardır. Duranlar sabit binalardır, diğerleri ise;

- Ray üzerinde taşınan hareketli tali istasyonlar,
- Yol üzerinde taşınan hareketli tali istasyonlar,
- Açıktaki işletmelerde olduğu gibi, durağın yerinin değiştirilmesi için kullanılan kızaklar üzerindeki tali istasyonlar,
- Konteynır gibi taşınabilir depolardaki tali istasyonlar.

Stasyonlar talii istasyonlar daha çok kullanım alanına sahiptirler. Hareketli talii istasyonlar işletmedeki arıza durumlarında, zaman bakımından sınırlı en yüksek noktaların desteklenmesinde, yeni kurulan yollarda stasyonlar (duran) istasyonlar hazırlanana kadar, enerjinin sağlanmasında kullanılırlar.

6.1.3. Bir Talii İstasyonun Orta Konuluşu ve En Önemli Tesis Bölümleri

Bir talii istasyonun ortaya konulmasında göz önüne alınan hususlar en basit şekliyle bir çalışma programından ele alınabilir. Talii istasyon ısmarlayanın isteklerine uyan bir talii istasyonun ortaya konulmasında, ısmarlayanın bir istek formlerini doldurması gerekir. En önemli veriler (Tablo 6.1.3.1)'de gösterilmektedir.

No	Formüllerin ortaya konuluşu ile ilgili bölümler	Açıklamalar ve diğer kullanım
1	Kurulacak yer (Deniz seviyesinden yükseklik, dışardaki iklim ve sıcaklık durumları, yeni yapı veya bir yapının onarımı, mevcut tesislerin genişletilmesi).	Yapısal bölüm termik tesis koşulları.
2	Kullanım amacı (Ana demiryolu, maden demiryolu, endüstri demiryolu, tramvay, trolleybüs...).	Geçerli yönetmelik ve standartlara dikkat etmek. Genel işletme koşulları.
3	Doğrultucunun doğru gerilimi (talii istasyonun besleme gerilimi).	Ana parametreler.
4	Doğrultucunun sayısı ve nominal akımı yüklenme sınıfı.	Ana parametreler, genel olarak yalnızca aynı güçteki doğrultucular paralel bağlanırlar.
5	Doğrultucu transformatörlerinin bağlantı gerilimi, (orta gerilim toplayıcı ray/akım barası) gerilim frekansı, gerilim ve frekans toleransları.	Ana parametreler, tesisin işletilmesindeki toleranslara önem vermek.

- | | | |
|----|---|--|
| 6 | Orta gerilim şalt tesisinin kısa devre durumları (Başlangıç kısa devre tek fazlı değişken akım gücü S_K , darbe faktörü X , en mümkün olan darbe kısa devre akımı I_s ve açma gücü S_a). | Ana parametreler; tali istasyondaki donanımların kısa devre akımlarının hesaplanmasındaki esaslar. |
| 7 | İlk düzenlenen orta gerilim şebekesinde mevcut aşırı akım ve aşırı gerilim düzenleri (Cinsi ve kurulduğu yer). | Selektivite ve koruma için gözönüne alınanlar, tali istasyonun aşırı gerilim korumaları. |
| 8 | Tali istasyondaki orta gerilim şebekesinden beslemelerin cinsi (Ring veya rastgele iletkenler). | Enerji akışı, yükler, koruma ve selektive ile ilgili fikirler. |
| 9 | Enerji sağlama girişimcisi (Elektrik idaresi) ile demiryolu işletmesi arasındaki geçiş koşulları. | Geçiş şalteri, geçiş ölçümü ve sayımı, geçiş koruma düzenleri. |
| 10 | Önceden düzenlenen orta gerilim şebekesinin cinsi (Havai hat, kablolu veya her ikisinden). | Aşırı gerilim koruması. |
| 11 | Tali istasyonun doğru akım tesisindeki gerekli koruma önlemleri (Genellikle koruma topraklaması kullanılır). | Ana parametre, toprak kısa devre ve temas gerilimi koruması düzenleri donanımlarının aşırı akım talepleri. Topraklama tesisinin yapılması, önlemler. |
| 12 | Tali istasyonun orta gerilim tesisinde ve lokal ihtiyaç şebekesinde gerekli koruma önlemi (Genellikle koruma topraklaması kullanılır). | Topraklama şebekesinin düzenmesi, önlemler. |

- | | | |
|----|---|---|
| 13 | İstasyonun koruma topraklayıcısının muhtemelen bununla bağlı kablo mantosu, boru vs dahil toprak geçiş direnci. | Topraklama şebekesinin döşemesi donanımlarının aşırı akım talepleri. |
| 14 | Seyr iletkeninin ve seyr raylarının polaritesi. | Akım raylarının rengi, bağlantı koşulları, kablo döşemesi. |
| 15 | Doğrultucu ve şalt tesisleri birimlerinde gerekli ve mevcut sıcaklık durumları, giriş-çıkış havalandırma, ısıtma ve yapım yerindeki kuvvetli hava kirlenmesinden dolayı hava filtrelenmesi ile ilgili istekler. | Donanımların termik esasa göre döşemesi (yıkılma) ısıtma ve soğutmanın döşemesi, bunun için gerekli yapısal önlemler. |
| 16 | Ortagerilim şalt tesisinin kollarının sayısı, donanımı ve nominal akım şiddetleri. | Döşemesi ve ısmarlanması. |
| 17 | Doğru akım şalt tesisinin döntüş iletkeni dağılımı dahil, sayısı donanımı ve nominal akım şiddetleri. | Döşemesi ve ısmarlanması (Hızlı şalter döşemesine dikkat etmek). |
| 18 | Yol hızlı şalterinin kısa devre açmasının arzu edilen ayarı ve yol kollarının aşırı yük koruması. | Yol durumlarına uygunluğu, kısa devre durumlarıyla muhtabakata getirmek, hızlı şalter tespiti. |
| 19 | Her bir yol kısımlarının müsaade edilen kalıcı akımı. | Yol kontrol düzeninin yol durumlarına uygunluğu. |
| 20 | Değişen demiryolu yükü nedeniyle doğrultucunun ve doğru akım şalt tesisinin eş zamanlık faktörü | Donanımların ve kabloların optimum termik döşemesi. |
- $$K_{\text{eş zaman fak}} = \frac{24 \text{ saatlik tali istasyonun ortalama yükü}}{\text{Tali istasyonun kurulu gücü}}$$

21	Yol durumu, yolların besleme ve dönüş iletkenlerinin uzunlukları ve kesitleri (Kablo, havai hatlar veya ikisi), havai hatların sayısı her bir yol kısmı başına besleme ve dönüş iletkenlerinin arasındaki mesafeler.	Kısa devre akımının hesabı doğru akım tarafındaki direnç ve reaktansların tayini aşırı gerilim koruma önlemleri yüklenme koşulları.
22	Doğru akım yol besleme şebekesinde aşırı gerilim korumasının cinsi ve yapılacak yeri.	Tali istasyonun donanımlarının aşırı gerilim koruması.
23	Lokal ihtiyaç tesisiyle ilgili istekler (Aki, lokal ihtiyaç transformatorlerinin tasarımı, tali istasyonun dışındaki tüketicilerin enerji ihtiyacı oradaki şebeke bağlantısı).	Lokal ihtiyaç tesisinin tasarımı koruma önlemi, enerji bilançosu.
24	Koruma, gözetim ve otomatik uzaktan kullanım düzenleriyle ilgili istekler.	Düzenlerin tasarımı işletme idari şekli.
25	Tali istasyonun işletme idare şekli (personel yok, tam otomatik veya uzaktan etkileşim düzenleriyle uzaktan kumandalı veya yerinden personel ile).	Ekonomik nedenleri gözönüne almak, kazayı önlemek.

Tablo 6.1.3.1. Bir demiryolu tali istasyonunun ortaya konuluşunun çerçeve programı.

6.2. Doğru Akımlı Cer Sistemlerinin Güç Besleme Sistem Analizi

6.2.1. İşletme ve Amacı

Yeni hafif raylı taşıma sisteminin optimal olarak planlanması bölgenin özelliklerinin mümkün olduğu kadar doğru bilinmesine bağlıdır. Trafik sayımları ve trafik akışının ortalamasının tespitiyle yakın taşıma şebekeleri

oluşturulur ve gereken garlar ile ara durak yerleri belirlenir. Bu yeni hattın işletiminde standart özellikteki taşıt araçları kullanılabilir veya gereken ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilebilirler. Bu hatlarda işletmeye alınacak tali istasyonların gücü ve boyutları birçok verilere bağlıdır.

A- Tren yada taşıt aracının bilgileri :

- Örneğin : - Toplam ağırlığı,
- Karakteristiği,
- Kumanda tarzı.

B- Hat değerleri :

- Örneğin : - Trenlerin çalışma programları,
- Duruş zamanı,
- Rötarlı ya da rötarsız.

C- Güzergah değerleri :

- Örneğin : - Ara durakların yerleri ve aralarındaki uzaklıklar,
- Yolum aşağı veya yukarı doğru eğimleri,
- 3.ray sistemine bağlantı şekli.

Güç gereksiniminin, bilgisayar yardımı olmaksızın ortaya çıkarılması büyük bilimsel kolaylıklara rağmen yine de birkaç haftaya ihtiyaç göstermektedir. Bunun için de personele bağlı nedenlerden dolayı şebeke hesaplarının yapılmasının uzamasına şaşmamak gerekir.

Geliştirdiğimiz yöntem gerçeğe yakın sonuçları görülebilir diyagramlar halinde ortaya çıkarmaktadır. Bilgisayar yardımıyla veri işlenmesinde giriş değerlerinin değiştirilerek en uygun çözümün hesaplanmasında zaman ve maliyetten büyük tasarruf sağlanmaktadır.

Bu yöntem halen kullanılmakta olan enerji tesisatlarında, örneğin, yeni yüksek verimli lokomotiflerin kullanılması için gereken hesapların yapılmasında büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Şebeke hesaplarının gayesi sadece zamana bağlı olarak meydana gelecek maksimum gerilim düşümlerini ya da akım yüklenmelerini hesaplamak değildir.

Örneğin; işletme arızalarından sonra tesisin tekrar işletmeye alınabilmesi için gereken süreyi de hesaplayabilmektedir.

Arıza basit olarak gerçekçi varsayımlarla örneğin; Rampada kalan bir taşıt aracının tekrar yol almasını sağlayacak yol alma akımlarının dikkate alınması gibi, bu tür hesapların yapılması çok kısa zaman almasına rağmen geniş bir mühendislik tecrübesine gerek duymaktadır. Bu bilgisayar programı yardımıyla uzun zaman alan diyagram hesaplamaları, yol güzergahının kalkış akımları, istasyon sayıları, istasyonlar arasındaki mesafeler, duruş ve kalkış süreleriyle birlikte rampa ve inişler dikkate alınarak yapıldığından büyük zaman tasarrufu sağlamaktadır.

Bu nedenle programın gayesi :

- Tali istasyonların montajı sonunda elde edilen osiloskop grafiğinden olduğu gibi, bir eğriyi elde etmek için, ani ve efektif akımları minimum olan en doğru zaman ölçümü ile kaydedilir.

- Düzenli işletme halindeki maksimum gerilim düşümlerinin (ortalamalarının) eldesi.

a) Üçüncü raydaki (temas gerilimi) gerilimi,
b) Tüm hat; Havai hat, 3.ray ve enerji dönüş iletkeni ile tamamlanır. (izin verilen maksimum alt gerilim değeri)

- Eğer gerekli olursa, birbirini izleyen tali istasyonların, komşu istasyonlarının devre dışı kalması halinde aşırı yüklenebilme durumlarının hesaplanması.

6.2.2. İşlemler ve Sonuçlar

6.2.2.1. Servis Karakteristikleri

Bilgisayar her bir hattın iki istasyonu arasında (Gidiş ve dönüş için) seyahat direncini, yolun eğimini gerekli hallerde araçlar için öngörülen hız sınırlarını, şebeke akımlarını ve gerekli olan seyahat zamanını araçların özelliklerinden hesaplayabilmektedir. Her bilgi girişinden sonra servis karakteristiği, rotarlı (geriye dönüş zamanının dahil edilmiş haliyle) MTR veya rotarsız zamanlı OTR şeklinde elde edileceği dikkate alınır.

Örneğin; % 5'lik rotanın anlamı hareketin daha önceden kesilme zorunluluğudur ve buna göre OTR iki istasyon arasındaki yol alma zamanı % 5 artmış olmaktadır.

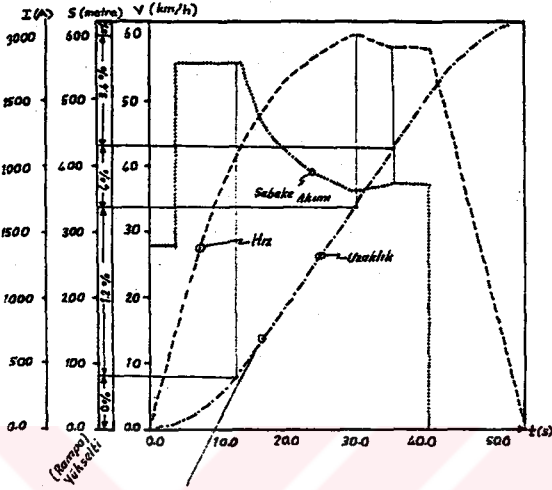
Bilgisayar hafızasında bulunan sayılar referans diyagramını verir. Şekil 6.2.2.1'de bilgisayar tarafından yol güzergahının iniş ve çıkışlarına göre çizdirilen servis karakteristiği görülmektedir.

6.2.2.2. Hareket Planı (Zaman Cetveli)

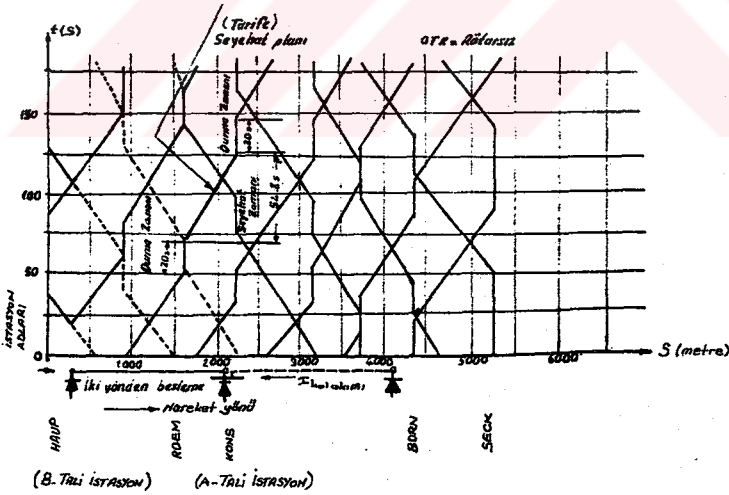
Yol şebekesi birbirini kesen ya da birbirine değen pek çok hattan meydana gelir. Aynı yol kısımlarını kullanan hatlar, tüm şebeke boyunca uyumlu çalışmaları sağlamak için senkronlayıcı noktalardan bilgi alma ihtiyacını ortaya çıkartırlar. Her bir hatta ait servis karakteristiği, verilen duruş süresiyle birlikte bu hat servis karakteristiğinde dikkate alınmıştır.

Bilgisayarda yüklü bulunan hareket planı grafik olarak bastırılabilir. Tipik bir hareket planı açıklamalarla birlikte Şekil 6.2.2.2'de gösterilmiştir.

Burada Şekil 6.2.2.1 de verilen servis karakteristiğinin basitleştirilmiş hali görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 6.2.2.2'de seyahat planının apsisinde istasyon isimleri uzaklıklarla birlikte belirtilmiştir. Ordinatinada (2 trenin birbirini izleme süresi) zaman elde edilmektedir. Sol alt kenardan sağ üst kenara uzanan çizgi Haup-Seck olarak, sağ alt kenardan sol üst kenara olan hat ise Seck-Haup olarak seyahat yönünü göstermektedir.



Şekil 6.2.2.1. Hat Roem-Kons arası OTR (Rötersiz) servis karakteristiği (45).



Şekil 6.2.2.2. Hareket planı (46).

6.2.2.3. Kol Akımları

Bağlantı şartları:

- Tali istasyonların durumu, besleme ve kesim noktaları,

- Havai hattın, 3. rayın, dönüş iletkeninin ve besleme iletkeninin dirençleri bilgisayara yüklenmiştir. Servis karakteristiğinde belirlenen (sınırlanan) besleme sınırlarına ve zamanlara uygun olarak hareket planında şebeke akımlarının toplanması sağlamaktadır. Her iki yönden yapılan beslemede her iki tali istasyonun akım dağılışı dikkate alınmaktadır.

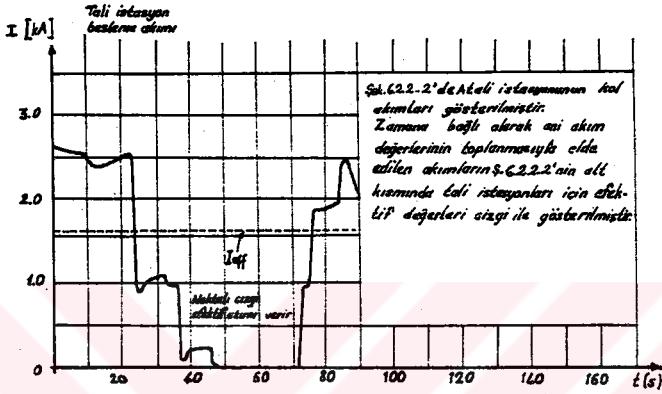
Şekil 6.2.2.3'deki kesik çizgi hattaki efektif akımı vermektedir. Maksimum ve efektif akımlar hattın devre kesicisinin seçiminde baz değer olarak alınırlar.

6.2.2.4. Tali İstasyonların Toplam Akımı

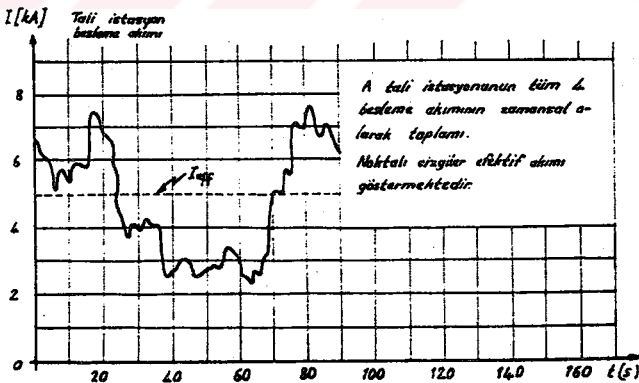
Bir tali istasyonun kollarındaki ani akım değerleri ansal olarak, bilgisayar tarafından toplanmakta ve sonuçlar çizdirilmektedir.

Şekil 6.2.2.4 Kons tali istasyonunun akım diyagramını gösterir.

Besleme alanı Şekil 6.2.2.2'de belirtilmiştir ve her iki hareket doğrultusunda Haup'tan Born'a erişmektedir. Diyagramdaki kesik çizgi efektif akımı vermektedir. Maksimum ve efektif akımları doğrultucu ve transformatörlerin tertipinde esas olduğu gibi aynı şekilde tali istasyonların verebileceği güçlerin de esasını oluştururlar.



Şekil 6.2.2.3. Hattaki efektif akım (47).



Şekil 6.2.2.4. Kons tali istasyonunun akım diyagramı (48).

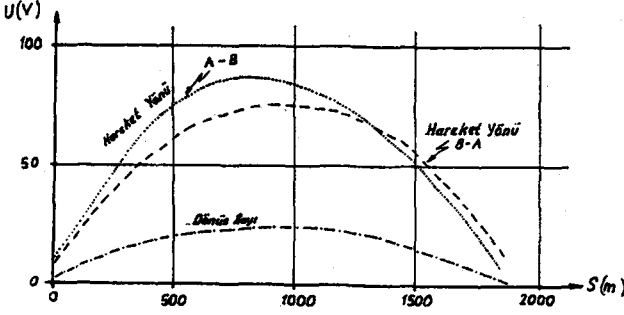
6.2.2.5. Gerilim Düşümleri

Her bir besleme bölgesi için bilgisayar düzenli olarak tünel toprak, su-toprak ve tren yolu toprak arasındaki maksimum gerilim düşümlerini, kararlaştırılan gerilim değerleri ve potansiyel farkları için hesaplamakta ve bunları güzergah üzerinde işaretlemektedir. Sonuçlar bilgisayar tarafından besleme bölgesi için çizdirilmektedir. Şekil 6.2.2.5 'teki diyagram Şekil 6.2.2.2'deki açık alanın gösterdiği besleme bölgesi için çizilmiştir. Bütün dönüş rayları birbirleriyle bağlı olduğundan her iki doğrultudaki dönüş ray sistemi için tek bir karakteristik verilmiştir. Toplam gerilim düşümleri (Besleme ve geri dönüş hatları) bölünmüş hareket doğrultuları nedeniyle kesik çizgilerle gösterilmiştir.

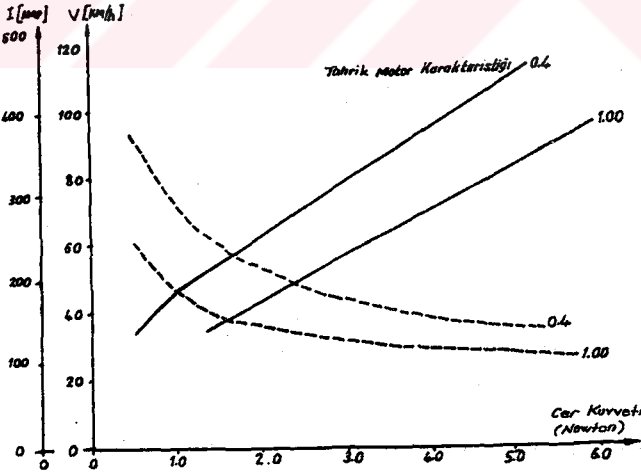
6.2.2.6. Tali İstasyonların Devre Dışı Kalması

Pek çok durumda tali istasyonların bazılarının tamamen devre dışı kalması gibi aşırı işletme durumlarının dikkate alınması gerekir.

Arızalı tali istasyona ait olan besleme bölgesine ait hatların, diğer hatlarla bağlantılarının kesildiği (ayrıldığı) noktalar kısa devre edilir ve böylece komşu tali istasyonların buradaki yükü üzerlerine almaları sağlanmış olup, bu arıza durumu bilgisayar tarafından yapılan program sayesinde kısa sürede hesaplanır. Bununla birlikte dönüşümlü olarak tali istasyonların her biri için tamamen devre dışı kalmaları halindeki yeni yük değerleri ve kol akımları hesaplanabilmektedir. Normal şartlar için hesaplanan hareket planları (tarifeler) ve servis karakteristikleri temel çıkışlar olarak elde edilebilmektedir. Yeni şartlar için elde edilen kol akımları ve tali istasyonların toplam akımları açıklama olarak gösterilmiştir. Tali istasyonların devre dışı kalmalarıyla meydana gelebilecek uzun taşıma hatları ve aşırı yüklemeler bilgisayar tarafından hesaplanan ve çizilen diyagramlardan gerilim düşümlerinin çok yüksek değerler aldığı görülmektedir. Şekil 6.2.2.6'da da motor karakteristiğine ait eğriler verilmiştir.



Şekil 6.2.2.5. 3.Rayla elektrikli bağlantının maksimum gerilim düşümü ve 3.Raydaki ve dönüş rayındaki maksimum gerilim düşümleri (Her iki hareket yönü için) (49).



Şekil 6.2.2.6. Motor karakteristiğine ait kontrol eğrileri (50).

6.2.3. Gerekli Verilerin Kaydedilmesi

(A) bölümü başlığı, taşıt aracının karşılaştığı tüm hareket (sürtünme) dirençlerini içerir.

A2 bölümü tahrik aracının ya da motorun karakteristiklerini içermektedir. Son olarak işletme tarzı ve tahrik tekerleğinin yarıçapı gereklidir. Yol alma değerleri bilgisayar tarafından maksimum ivmelenme (A8) ve maksimum besleme gerilimi (A7) değerlerini motorun karakteristiklerine göre hesaplamaktadır. Akım ayarlı taşıt araçlarında tırmanışlardaki ivmelendirmelerde pratik olarak akım ayarı önem kazanmaktadır. Bu tür kumanda tarzı için gereken maksimum kalkış akımları A7'de gösterilmiştir. Yokuş aşağı gidişlerde A8'de verilen ivme değerlerini aracın aşmaması gerekir.

Düzenli yol alma halinde taşıt aracının ivmelenme değerleriyle birlikte gereken düzeltme faktörleri A8'de verilmiştir. Bu yöntemle yol alma akımına rampanın eğimine göre gereken düzeltme sağlanabilmektedir. Eğimli rampalarda motorlar aşırı yüklenmemelidir. İzin verilen maksimum akım değerleri A7'de verilmiştir. A9'da verilen işletme frenleme büyüklükleri tarifelerdeki hareket sürelerinin çıkartılmasında etkili olmaktadır. A10'da kuvvetli akım donanımı dikkate alınmıştır. Pek çok imkanlardan sadece iki tanesi tercih edilmiştir :

a1 : Modern tristör kumanda tekniğini kullanan taşıt araçları için,

a2 : Seri-paralel bağlantılı tahrik motorlarını kullanan günümüz taşıt araçları için, Kısım B'de hat için gerekli kararlı hal değerleri verilmiştir. Eğer sadece bir hat için hesap yapılacaksa B1 ve B2 kısımları da dahil edilmelidir. C kısmında yolun topografisine ait bilgiler, devre bağlantı konfigürasyonları ve direnç değerleriyle birlikte belirtilmiştir. Bu şekilde mümkün olan tüm bilgilerin çizimi ya da eksiksiz şekilde sunulması amaçlanmıştır :

- Açık çizimleriyle şebeke planlarının,
- Rampaların profil kesitleriyle mesafe ve yükseklik hız limitleri ve istasyonların yerleşimleri var olan şebekelerin yeniden hesaplanmasında ya da geliştirilme çalışmaları sırasında genel olarak tali istasyon-

ların yerleri, besleme hattının devresi ve uzunluğu bellidir ya da değişik sebeplerden dolayı önceden belirlenmiştir. Yeni bir şebekenin planlanmasında ısmarlayıcının istekleriyle birlikte, binaların yerleşim alanlarının durumları da pratikte etkilidir. Sabit tali istasyonların yerleri yol ayırıcılar ve besleme noktaları güzergah kesiti üzerinde mesafeleriyle birlikte belirtilmelidir.

6.2.3.1. Maliyet Analizine Yönelik Olarak Geliştirilen Yöntem

Ön hazırlıklar ve şebekeye ait çalışmaların temel maliyetteki payları, hesaplama masrafları, detaylara ve çizilen çizimlere bağlıdır. Bir teklif için işlem yapılabilmesi için aşağıdaki bilgilere ihtiyaç vardır :

- 1- Tüm şebekede toplam durma noktaları,
- 2- Tali istasyon sayıları,
- 3- Herbir tali istasyona güzergah boyunca düşen besleme bölgesi,
- 4- Rötarlı ya da rötarsız zaman,
- 5- Tali istasyonların devre dışı kalma ihtimalleri.

6.2.4. Doğru Akım Cer Sistemli Besleme Şebekelerinin Hesabı için Giriş Verileri :

6.2.4.1. Giriş Bilgilerinin Belirtimi

A) Tren veya otomobil verisi,

A1) Taşıt ağırlığı: Boş

t)

Yolcu yüklü

t)⁺

Sistem analizinin prensibi

t

A2 Motorlu araç karakteristiği: (Aynı zamanda işleme esnasında kullanılan hareket verici oranlar)

Çekme gücü karakteristiği : $F = f(v)$; $F = f(J_{mot})$

Tahrik motoru karakteristiği: $M = f(n)$; $M = f(J_{mot})$

Dişli oranı : $u =$

Tekerlek çapı : $D_m =$

A3 Taşıttaki motor devrelerinin sayısı = Tahrik edilen vagon başına motor devreleri sayısı x Tren başına tahrik edilen vagon 1)..... x Motor devreleri sayısı

A4 Kütle dönüştürücü faktör: (Eğer belirlenmemişse % 10 kabul edilir.

A5 Siemens el kitabına göre seyr direnci (51)

- 1) Toplam kaynak gerilimi için, 1 tahrik motoruna 1 motor devresi kullanılır.
Kaynak geriliminin yarısı için 2 tahrik motoruna 1 motor devresi kullanılır.

Dingil ile ilgili;

Sürtücü dingil sayısı :..... dingil yükü..... (t)

Düz dingil sayısı :..... dingil yükü..... (t)

Dingil yatağı tipi:.....

Dişli tipi :.....

Ray ölçüsü :.....

A6 Taşıt nominal gerilimi :..... V

A7 Motor başına maksimum yol alma akımı :

(Ortalama akım)

(Akımı ayarlanan kumandalarda giriş büyüklüğü olarak A

A8 Yol alma esnasında max ivme m/s²

(İvmesi ayarlanan kumandalarda giriş büyüklüğü olarak)

A9 İşlemsel yavaşlama (A1'e göre toplam ağırlık için) m/s²

A10 Kontrol sistem :

a1- Tristör kıyıcı kontrol

1. Motor karakteristiklerine uygun

(Yüksek çekme gücü karakteristiği) *

Motor başına maksimum güç kW

2. Kullanılmakta olan tahrik motorları ve

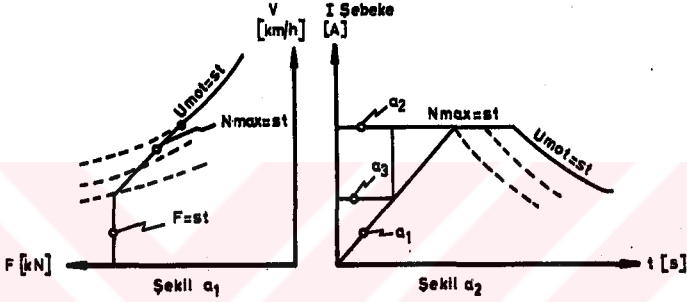
alan zayıflatılması için gönt kademeler

(sabit güç kabul edilerek belirlenmiştir) *

a2- Dirençli yol alma, şönt kademeleri sabit güç kabulü ile basitleştirilmiştir.

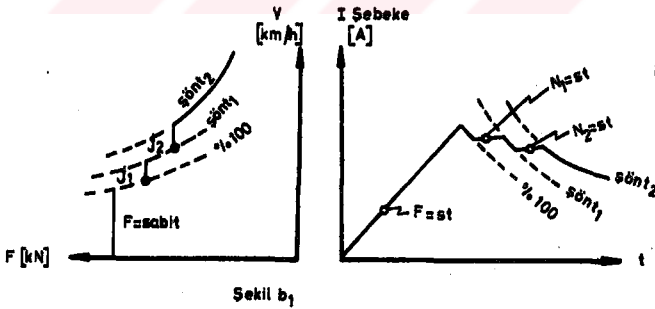
1. Seri/paralel dönüşümü dışında,
2. Seri/paralel dönüşümü içeren

	*
	*



b1- Konvansiyonel motorlu tristör kumandası, kademeli hıza bağlı alan zayıflatılması. Sabit güçte şönt kademelerine geçiş tristör kumandası ile olmaktadır.

	*
--	---



Şönt kademeleri bağlantısı

J _{mot 1}		A	*
J _{mot 2}		A	*
J _{mot 3}		A	*
J _{mot 4}		A	*

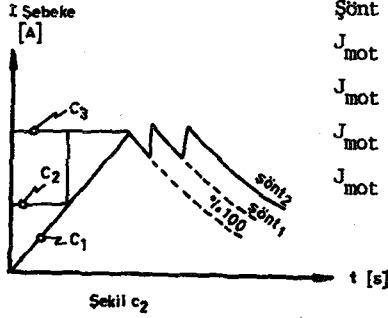
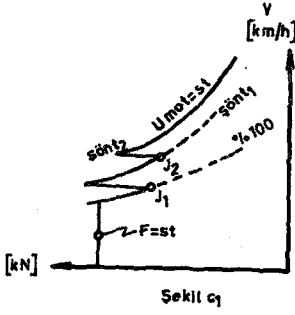
c1- Şönt kademelerine geçiş aynı dirençle yol vermedeki gibi olur.

	*
--	---

c2- Dirençle yol alma, alan zayıflatılmasında basitleştirme yok.

- 1- Seri paralel dönüşümü dışında
- 2- Seri paralel dönüşümü içeren

	*
	*



Şönt kademeleri bağlantısı

$J_{mot 1} =$	A	*
$J_{mot 2} =$	A	*
$J_{mot 3} =$	A	*
$J_{mot 4} =$	A	*

B) Hat ve Devre Verileri

Tanım :

1. Kesişen ve dokunan bir çok hat bir eğri olarak hesap edilir.
2. Her hat için ayrı zaman cetvelleri hesaplanacaktır.
3. Seyr planlarının aralarında zamana bağlı olarak senkronizasyonun senkron noktalarındaki zaman kaymasının verilmesi ile bulunur.
4. Temas eden hatların zaman kaymalarının tesbitinde ortaklaşa yararlanılan hat tesisinin varlığı dikkate alınmalıdır.

B1 Senkronizasyon noktası durma noktasıdır.

B2 Hat listeleri, tren programları ve senkronizasyon noktasındaki zaman sapmaları.

No	Hat ismi	Tren tarifeleri	Senkronizasyon noktasındaki zaman sapması.
1		s	s
2		s	s
3		s	s
4		s	s
5		s	s
6		s	s

- B3 Kusursuz maksimum hız km/h
- B4 a) Zaman rezervi dışında (OTR) *
- b) Zaman rezervi dahil (MTR) *
- c) Zaman rezervi içeren ve içermiyen (MTR+OTR) *
- b) veya c) işaretlendiyse:
- İki durak arası yüzde olarak seyahat zamanı %
- B5 Durma zamanları : a) bütün durma zamanları eşit s
- b) farklı duraklarda durma zamanları
(hat tarifesinde belirtilmeli) *
- C) Güzergah verileri :
- C1 Hat haritası, kılavuz yol hatlarını içerir.
- C2 Hatlar, duraklar arası mesafeler metre cinsinden olmak üzere verilmiştir ve her hat şu bilgileri içerir:
- a) % olarak üst meyil ve alt meyil,
- b) Hattaki hız sınırı,
- c) Bir uçtan kaynağa bölüm izalatörlerinin yerleşimi,
- d) Kaynak noktaları,
- e) Tali istasyonların tesbit ve yerleşimi,
- C3 a) Tek taraflı besleme *
- b) İki taraflı besleme *
- C4 Akım rayları seyir iletken kesiti kuvvetlendirme hattı dahil Fe mm² Cu mm² *
- C5 Seyir raylarının tipi Fe mm² Cu mm² *
- C6 Tali istasyonun devre dışı olmaksızın hesaplama *
- devredeyken hesaplama *
- C7 Seyir rayları paralel bağlanmış evet hayır **
- C8 Akım rayları (seyir iletkenleri) paralel bağlanmış evet hayır **
- * ilgili olanları işaretleyin,
- ** ilgili olmayanı çiz,

6.3. Faydalı Frenleme Kullanan Cer Sistemleri İçin Eviricili Tali İstasyonlu D.C Güç Besleme Sistemi

Tristörlü eviriciler kullanan tersine çevrilebilir DC güç besleme sistemlerini tanıtmaya çalışacağız. Tersine çevrilebilir DC güç kaynağı sisteminde karşılaşılan teknik zorluklar, uygulanabilir tasarım prensipleri gözden geçirilmiştir. Uygulama olarak Kobe metrosunun (52) güç kaynağı sistemi detaylı olarak verilmiştir. Ek olarak, tasarım prensipleri, teknik güçlükleri çözmek için uygulanan çözümler ve bazı işletme sonuçları da açıklanmıştır.

6.3.1. Giriş

Faydalı frenleme sistemleri; özellikle uzun eğimli demiryollarında veya metrolarda verimlidir.

Uzun eğimli demiryollarında, uzun mesafeler boyunca hava basıncılı frenlemenin zor olduğu yerlerde elektriksel frenleme kullanmak emniyet açısından önemlidir. Bu sistemle, eğimli yollarda düz yollara nazaran çok daha fazla enerji geri alınabilir. Bir metro treninde frenleme enerjisinin tekrar kullanılmasıyla sağlanan tasarruf yanında, tünel içi ısının yükselmesi önlenir, hava soğutma ve havalandırma cihazlarının enerji tüketimi minimuma indirilir.

Hızlı transit sistemlerin pek çoğunda DC sisteme geri verilen frenleme gücü başka güçlü trenler tarafından absorbe edilir. Bununla beraber o anda yakında hiç bir güçlü tren bulunmayabilir veya frenleme akımı aşırı olup, yakınlardaki güçlü trenler tarafından çekilir. Evirici kullanan bir ara istasyonun amacı bu gibi durumları gidermek, tir. Bu istasyonlar trenin üretebileceği maksimum frenleme enerjisini sistemden çekerek dengeli bir faydalı frenleme sağlarlar.

Evirici sistem tasarımının aşağıda belirtilen ekonomik ve teknik konuları dikkate alması gereklidir :

- a- Evirici kullanmanın maliyet üzerindeki etkisi,
- b- Eviricili sistem ile ilgili teknik konuların araştırılması.

Evirici kullanmanın maliyet üzerindeki etkisi aşağıdaki komular temel alınarak hesaplanır;

- (i) Evirici kullanımıyla sağlanan enerji tasarrufu,
- (ii) Kesici ayaklarının bakım maliyeti,
- (iii) Metrolarda, hava soğutma elemanlarının işletme maliyeti,
- (iv) Uzun yokuşlarda frenlemenin emniyeti.

Belirli bir model için yukarıdaki dört konuyu da dikkate alarak eviricinin faydasını kesinlikle tahmin etmek mümkün değildir. Fakat (i) için, bilgisayar simülasyonu yardımıyla güç sistemini analiz etmek ve enerji tasarrufu miktarını tahmin etmek mümkündür. Bunlardan başka, evirici kullanan ara istasyonlu sistemin incelenmesi gereken teknik özellikleri de vardır. Bu özellikler aşağıda açıklanmıştır;

a) Minimum sayıda eviriciyle maksimum enerji transferini sağlayabilmek için, yer ve kapasite olarak eviricili ara istasyonların optimum tasarımı,

b) Eviricilerin kontrolü ve karakteristikleri: Bunlar, DC sistemin enerji alma kapasitesi, AC sistemin güç faktörü ve harmonikleri, doğrultucular ve eviriciler arasındaki dolaşım akımlarıyla yakından ilgilidirler.

c) Güç besleme sistemindeki harmonikler; Eviriciler ve doğrultucular, AC ve DC taraf üzerinde harmonik üretilmesine neden olurlar. Fakat bir diyotlu doğrultucudan farklı olarak, tristörlü eviriciler faz kontrolü ile çalışırlar ve bu da AC ve DC taraftaki harmonikleri arttırır.

d) AC tarafta yük talebinin var olması: Geri beslenen enerjinin tamamının demiryolu sisteminin AC yükü tarafından kullanılması arzu edilen bir durumdur.

e) Koruma: Evirici kullanmayan sistemlerden farklı arıza tiplerine karşı sistem korunmalıdır. Arıza tipleri şunlardır :

- (i) Eviricilerin komütasyon arızası,
- (ii) Faydalı fren çalışma durumunda DC arıza ki, bu durum normal yük salınımlarından hemen ayırt edilebilmelidir. Burada bir örnek olarak

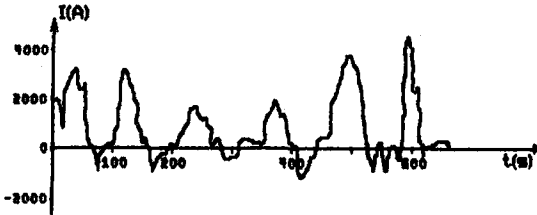
Kobe Belediyesi Ulaşım Bürosu tarafından kurulan bir eviricili ara istasyonun tasarım prensipleri ve teknik özellikleri incelenmiştir.

6.3.2. Eviricili Bir Ara İstasyonun Kapasitesi ve Yeri

6.3.2.1. Genel Kavramlar

Sağlanabilecek faydalı (regeneratif) gücün miktarı demiryolu sisteminin özelliklerine bağlıdır. Buna rağmen düz bir demiryolunda chopper (kıyıcı) kontrolü ile % 30 civarında bir enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Hızlı bir transit sistemde ise trafik yoğunluğunun yüksekliği nedeniyle faydalı enerjinin büyük kısmı trenler arasındaki transferler ile tüketilir. Bu nedenle eviriciler tarafından alınması gereken ortalama güç düşük olmalıdır. Bilgisayar simülasyonu ile yaptığımız çalışmaların sonucunda, doğrultucular tarafından sisteme verilen enerjinin % 10-20 kadarının, eviriciler tarafından geri alındığı hesaplanmıştır. Bu tahmin gerçek sistemlerde yapılan ölçümlerle de desteklenmektedir. Sapporo Doğu-Batı hattında % 8'lik tasarruf ölçülmüştür. Fakat eviricinin gerçek kapasitesi ortalama tasarrufu bir kaç kat üstünde olmalıdır. Bunun nedenleri aşağıda açıklanmıştır :

(a) Eviricinin dalga şekli art-arada gelen darbelerden oluşmaktadır. Şekil 6.3.2.1 'de maksimum tepe değerinin ortalama değere oranının 12 olduğu eviricili bir tali-istasyonun tipik bir dalga şekli gösterilmiştir.



Şekil 6.3.2.1. Eviricili bir tali istasyonda hesaplanan akım (53).

(b) Maksimum tepe akımı, evirici ve transformatörün kapasitesini önemli ölçüde etkiler. Bunun nedeni, yarı iletkenlerin küçük termal sabiti ve transformatörün komütasyon reaktansı üzerindeki sınırlamadır.

T.C. YATIRIM MENKUL DEĞERLER A.Ş.
DOKÜMANTASYON BİREKİMİ

Her tali istasyonda evirici varsa, herhangi bir anda sistemin enerji alır duruma getirilmesi mümkündür. Fakat bu düzenleme maliyet açısından gerçekçi değildir, çünkü ;

(a) Trenin yapısında, dingillerin bir kısmı motorlu, bir kısmı motorsuz olduğundan, frenleme akımı hızlanma akımından daha küçüktür. Frenleme akımının bir kısmı aynı hat üzerindeki diğer trenler tarafından kullanılır. Bu nedenle, evirici kullanan tali istasyonlar arasındaki mesafe, hızlanma modu temel alınarak tasarlanandan daha uzun olabilir.

(b) Tali istasyonların tümü eviricilerle gerçekleştirilen sistemlerde, trenler tarafından üretilecek frenleme enerjisinin yine tali istasyonlara geri verilmesi mümkündür. Ancak burada bazı ek kayıplarda ortaya çıkar, bu yüzden evirici donanımının daha büyük ölçülerde kurulması gerekir.

Tablo 6.3.2.1, Japonya'da şu anda kullanımda olan hızlı transit sistemlerde kullanılan eviricili tali istasyonların sayı ve kapasite örnekleri verilmektedir. Düz yollarda eviricili tali istasyonların toplam istasyonlara oranının $1/2 - 2/3$ arasında değiştiği görülmektedir. Evirici kapasitesine göre C/D oranı $1/8,3 - 1/13$ arasında değişmektedir.

Demiryolları	Hat uzunluğu (km)	A/B	C/D	Özellikler
Metro I	6	2/2	4/12	Eğimli yol
Metro II	10	2/3	2/26	Düz yol
Metro III	10	2/3	4/33	Düz yol
Metro IV	8	1/2	1/12	Düz yol

Tablo 6.3.2.1. Eviricili tali istasyonların sayı ve kapasite örnekleri.

A = Eviricili tali istasyonların sayısı,

B = Tali istasyonların toplam sayısı,

C = Eviricilerin toplam kapasitesi (MW)

D = Doğrultucuların toplam kapasitesi (MW)

Evirici kapasitesi dikkate alındığında aşağıdaki konular incelenmelidir;

(a) Düz yollarda yedek evirici kapasitesi gerekmemektedir, çünkü eviricilerden birinin devre dışı kalması işletmede hayati bir aksamaya yol açmamaktadır.

(b) Sistem doğrultucularının toplam kapasitesinin ise, tali istasyonların devre dışı kalması durumunda bunu karşılayacak yeterli yedek kapasiteye sahip olması gerekmektedir.

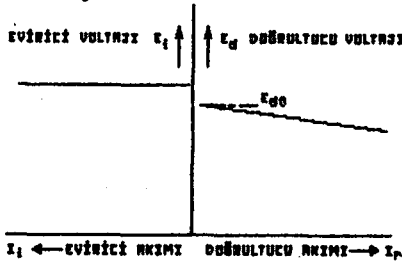
Bu gerçekler dikkate alındığında, Tablo 6.3.2.1'deki örnekler düz bir yol için evirici kapasitesinin, sistemin gerçekten ihtiyacı olan toplam doğrultucu kapasitesinin % 10-20'si arasında olması gerektiğini göstermektedir.

Uzun eğimli bir sistem için yukarıda anlatılan analiz uygulanamaz, çünkü evirici sistemi tasarımında emniyet en önemli faktördür. Raydalı frenleme için, herhangi bir anda sistemin enerji alma kapasitesi % 100 olmalıdır ve sistemde bir miktar yedek evirici kapasitesi bulunmalıdır. Tablo 6.3.2.1'de Metro I bu tip bir sisteme örnektir ve ayrıntılı olarak diğer bölümlerde anlatılmıştır.

6.3.3. Evirici Karakteristikleri

6.3.3.1. Eviricinin DC Karakteristikleri

Eviricili bir tali istasyonun tipik DC karakteristikleri Şekil 6.3.3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3.3.1. Evirici kullanan bir tali istasyonun karakteristikleri.

Doğrultucular ve eviriciler arasındaki dolaşım akımını minimuma indirebilmek için, eviricinin DC voltaşı, doğrultucunun yüksüz voltaşı E_{do} 'ın üzerinde bir değere ayarlanır. 3 fazlı köprü bağlantısı için eviricinin DC karakteristikleri aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir :

$$E_i = E_{do} \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_c I_i + \frac{W_r}{I_i} + E_a \quad (6.3.3.1)$$

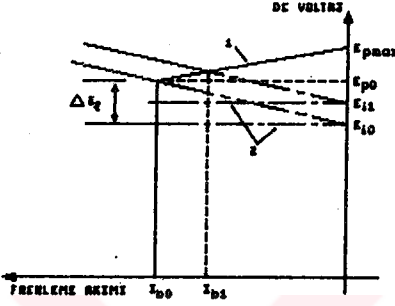
Kontrol açısı β sabit ise, evirici voltaşı E_i , evirici akımı I_i artarken yükselir. Bağlantı kablosu üzerindeki gerilim, evirici gerilimi tarafından büyük ölçüde etkilenir. Sistemi yüksek derecede enerji alabilecek kapasitede tutabilmek için sabit gerilim kontrolü uygulaması tercih edilir. Bu kontrolde DC evirici gerilimi doğrultucunun yüksüz gerilimi E_{do} 'nın biraz üstüne ayarlanır. Bu tip kontrolde ters akım artarken, evirici tarafından daha fazla reaktif güç üretilir. Güç faktörünün değeri sistem tasarımına bağlıdır. Tablo 6.3.2.1'de adı geçen bütün demiryollarında eviricilerin güç faktörleri 0,7 - 0,8 arasında tasarlanmıştır.

Kıyıcı kontrollu bir trenin, frenleme modundaki gerilim akım karakteristikleri Şekil 6.3.3.2'de gösterilmiştir. Frenleme yapan trenin maksimum frenleme enerjisinin güç kaynağına geri verilebilmesi için, trenin uç geriliminin nominal tali istasyon gerilimine göre mümkün olduğu kadar yüksek olması gerekmektedir. Fakat Tablo 6.3.2.1'de gösterilen sistemlerde, kıyıcı kontrollu trenler, Şekil 6.3.3.2'de gösterilen gerilim sınırlayıcı karakteristiklere sahiptirler.

Burada yüksek frenleme akımı bölgesinde, maksimum uç gerilimi düşürülmüştür. Nedenleri aşağıda açıklanmıştır ;

(a) Kıyıcı kontrolünün stabil olması,

(b) Frenleme akımını sınırlayarak, sistemin o anda kabul edebileceği akımın üstüne çıkarak regeneratif frenlemenin devre dışı kalması olasılığını minimuma indirmek.



Şekil 6.3.3.2. Kıyıcı ve evirici karakteristikleri.

1: Kıyıcı, 2: Evirici, ΔE_0 : Hat üzerindeki gerilim düşümü.

Frenliyen tren ile, eviricili tali istasyon arasındaki maksimum gerilim düşümünün ΔE_0 olduğunu düşüncüyle evirici gerilimi E_{10} 'ın altında olduğu sürece besleme sistemi tamamen alıcı olacaktır. (Şekil 6.3.3.2). Evirici gerilimi E_{11} 'e ayarlanmışsa, $I_{b0} - I_{b1}$ 'e karşı gelen frenleme gücü basınçlı frenlemeye transfer edilir. Tali istasyonlar, genellikle gerilim kontrolü olmayan silikonlu doğrultucularla donatıldıklarından, yüküz doğrultucu gerilimi E_{d0} , AC güç kaynağındaki gerilime bağlı olarak değişir. Bu gerilim değişimi dikkate alındığında, bazı durumlarda, eviricinin çalışması için gerekli gerilim aralığını bulmak zor olabilir. Gerçek bir sistemde, trenler arasındaki doğrudan enerji transferi nedeniyle, eviricinin gerekli gerilim aralığına tamamıyla uyması gerekmez. Enerji tasarrufu açısından düşünüldüğünde, evirici DC geriliminin, doğrultucu yüküz gerilimindeki değişimleri karşılayacak bir şekilde ayarlanması yeterlidir.

Yük altında kademe değiştiren transformatörler kullanarak AC besleme gerilimindeki değişimleri % 2-3 arasında mümkün olduğu kadar küçük tutmak tavsiye edilir. Bu tasarım aynı zamanda, demiryolu sistemi için kullanılan doğrultucuların ve yardımcı güç kaynaklarının gerilimlerinin dengelenmesini sağlar. Tablo 6.3.2.1'de gösterilen güç besleme sistemleri aşağıdaki tipik değerlere sahiptirler;

Nominal DC sistem gerilimi : 1500 V

Doğrultucunun yüksüz gerilimi (E_{do}) : 1580 - 1590 V

DC evirici gerilimi (E_1) : 1600 - 1650 V

Kıyıcının akım sınırlandırmasına başladığı gerilim(E_{po}): 1650-1700 V
(Şekil 6.3.3.2).

Pratikte evirici geriliminin ne kadar yükseltilebileceği sisteme bağlıdır ve bilgisayar simülasyonu ile optimize edilmelidir. Uzun eğimli demiryolları için yukarıdaki tasarım uygulanamaz çünkü güç-sistemi diğer trenlerin çalışma durumuna bağlı olmaksızın, tamamıyla alıcı durumda olmalıdır. Evirici gerilimi, frenleme akımının alınabilmesi için E_{10} değerinin altında tutulmalıdır. (Şekil 6.3.2.1) Yokuş aşağı inerken yapılan yavaşlama freni akımı, duruş freni akımı ile kıyaslandığında küçüktür. Bu nedenle yavaşlama freni eviricinin DC karakteristikleri üzerinde bir sınırlamaya neden olmaz. Fakat karakteristiklerin tasarımı sırasında yavaşlama ve durma frenleri birlikte gerekiyorsa, öncelik yavaşlama freninindir (54).

6.3.3.2. Eviricinin AC Voltajı

Eviricinin AC hat gerilimi (Evirici transformatörünün sekonder gerilimi) komütasyon ve dolaşım akımı dikkate alınarak optimize edilmelidir. AC geriliminin seçiminde dikkatli olunmalıdır, çünkü komütasyon başarıyla tamamlanmıyorsa, gerilim komütasyon için yeteri kadar yüksek değildir. Sistem arızaları nedeniyle meydana gelen anormal AC gerilim düşümleri, AC geriliminin seçimini büyük ölçüde etkiler. Çözüm, sistemin güvenilirliğine bağlıdır. Sistem arızaları seyrek meydana geliyorsa koruma kullanan çözüm önerilir. Bu yöntem, başarısız komütasyon nedeniyle oluşan arıza akımını ortadan kaldırmak için, bir DC, hızlı çalışan kesici ile birlikte bir AC düşük gerilim rölesi kullanır. % 10-20 gerilim düşümüne neden olan sistem arızaları sık sık görülüyorsa, evirici transformatörünün sekonder gerilimi bu gibi durumlarda bile başarılı komütasyonu garanti edebilecek kadar yüksek olmalıdır.

Dolaşım (Sirkülasyon) akımı, A.C gerilimin seçiminde diğer önemli faktördür. AC gerilim, doğrultucular arasında sirkülasyon akımını önlemek için minimum çalışma gerilimi (sistem A.C) altında bile yeterli

D.C voltajı üretecek kadar yüksek olmalıdır.

Sirkülasyon akımı, reaktif güç tüketimine neden olur, kayıpları arttırır ve maksimum yükte komütasyonun başarısız olması tehlikesini ortaya çıkarır. Genellikle, aynı tali istasyondaki donanımlar arasındaki sirkülasyon akımı problem yaratmaz. Çünkü doğrultucular ve eviriciler aynı güç kaynağına bağlanmışlardır. Tasarım iyi yapılmamışsa komşu tali istasyonlar arasında bile sirkülasyon akımları ortaya çıkar. Bu durumda güç, farklı kaynaklardan veya bağımsız olarak kontrol edilen kademeli transformatörlerden elde edilir.

Normal çalışma koşullarında, başarılı komütasyonun veya sınırlı sirkülasyon akımının garanti edilmesi güç faktörünün düşmesine neden olur. Büyük sönmeye açısı nedeniyle A.C sistemde harmonik akım artar ve yüksek sekonder gerilimi, evirici transformatörünün kapasitesinin artmasına neden olur.

6.3.4. Eviricinin Kontrolü

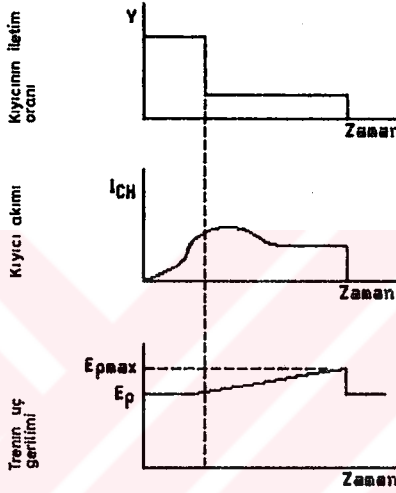
6.3.4.1. Doğrultucu ve Evirici Arasında Kontrol Değişim Modu

Doğrultucu ve evirici arasında değiştirme, yükün çalışma moduna göre yapılmalıdır. Yüksek tren yoğunluğundaki bir hızlı transit sistemde, sık değiştirme gereklidir. Özellikle, tespit edilen aşırı gerilim nedeniyle regeneratif frenlemenin devre dışı kalmaması için, doğrultucudan eviriciye hızlı geçiş önemlidir.

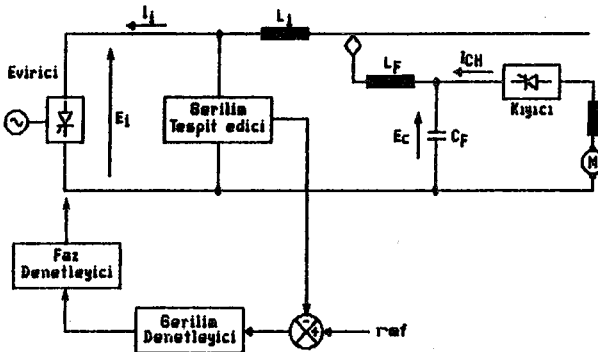
Aşağıdaki iki durum, doğrultucudan eviriciye geçişin meydana geldiği tipik olaylardır.

a) Güç kullanan trenin devre dışı kalmasıyla evirici çalışmasının başlaması, başlangıçta tren tarafından kullanılan frenleme akımı, tren devreden çıkınca evirici tarafından alınmalıdır. Çünkü kıyıcı kontrollü trenin seri reaktörü ve akım kontrolü fonksiyonu nedeniyle, frenleme akımı devam etmektedir. Başlangıçta d.c gerilimin, doğrultucu yüksüz gerilimin üstüne çıkmasıyla, doğrultucu akımı sıfırlanmıştır. Bu geçiş durumu süresince frenleme akımının sürdürülebilmesi için eviricinin doğrultucu akımı sıfırlamadan devreye girmesi gerekir.

b) Regeneratif frenleme, üretilen enerjiyi kullanacak başka bir tren bulunmadığı sırada başlar. Bu durumda evirici gerektiği şekilde devreye girmezse, frenliyen tren aşağıda anlatıldığı gibi çalışır (Şekil 6.3.4.1 ve Şekil 6.3.4.2).



Şekil 6.3.4.1. Frenleme akımını kullanan başka bir tren yokken başlayan kıyıcı kontrollü frenlemenin geçiş karakteristikleri.



Şekil 6.3.4.2. Kıyıcı ve evirici sistemin şematik gösterilişi.

i) Frenleme başladığında, motor akımı kıyıcının iletim oranının maksimumu tarafından belirlenen değere ulaşır. Motor akımı gerekli değere ulaştığında, kıyıcının iletim oranı minimuma iner. Kontroldeki gecikme nedeniyle motor akımı hafifçe artacaktır. Sonuçta, kıyıcı akımı hafif bir yükselmeden sonra minimum bir değerle sınırlanır.

ii) Kıyıcı akımı I_{CH} , ilk olarak trenin yardımcı teçhizatı tarafından yutulur. Fazla kıyıcı akımı, filtreleme için ana kondansatör C_F 'ye akar ve kondansatör geriliminin artmasına neden olur.

iii) Kondansatör gerilimi, en yüksek değer olan E_{pmax} 'a ulaştığında, regeneratif frenleme basınçlı frenleme ile yer değiştirir (Şekil 6.3.3.2)

Bu durumda, DC sistem geriliminin yükselme hızı, kıyıcı teçhizatının tasarımına bağlıdır. Genellikle, DC sistem geriliminin, doğrultucu yükstüz geriliminden, kesim gerilimine yükselme zamanı 10-50 ms arasında olabilir. Evirici bu zaman aralığında devreye sokulabilirse sistem başarıyla çalışacaktır.

Pratikte, yukarıda açıklanan (a) ve (b) durumlarının her ikisi için de şu çözüm uygulanabilir: Evirici en aza indirilmiş bir sirkülasyon akımıyla iletimde tutulmalıdır.

6.3.4.2. D.C Gerilimin Kontrolü

Akım kaynağı tipinde bir kıyıcı ile birlikte çalıştırıldığında, evirici dengeli olması gereken bir sabit gerilim kontrolü uygular. Basitlik için burada regeneratif frenleme yapan trenin bütün akımının eviriciye geri gittiği durum tartışılmıştır. Şekil 6.3.4.2'de frenleyen kıyıcı kontrollü bir trenin, tipik bir devresi gösterilmiştir. Bu tren için aşağıdaki eşitlikler uygulanır :

$$E_C = \frac{I_{CH} - I_1}{s C_F}$$

(6.3.4.1)

$$E_1 = E_{10} + G(s) I_1$$

$$E_C - E_1 = (L_\ell + L_F) s I_1$$

olarak düşünülebilir. Pratik sistemde trenin çalışması zamanla değişir. Fakat evirici kontrol sistemi analiz edilirken, bu gibi değişimler, $G(s)$. ΔI_1 bozucu fonksiyonları evirici gerilim-kontrol sistemine girmiş gibi düşünülebilir. Transfer fonksiyonu $G(s)$ 'in iki bileşeni vardır. Bileşenlerden biri ΔI_1 ve diğeri $d(\Delta I_1)/dt$ ile orantılıdır. ΔI_1 ile orantılı olan bileşen var olan DC gerilim regülasyonudur. $d(\Delta I_1)/dt$ ile orantılı olan bileşen ihmal edilecek kadar küçüktür. Çünkü, DC devredeki L endüktansı ve trenin filtre reaktöründeki L_F endüktansı, eviricinin AC tarafındaki ile kıyaslandıklarında çok küçüktürler. Sonuçta $d(\Delta I_1)/dt$, eviricinin DC voltajında düşmeye neden olmayacak kadar küçüktür. Son olarak, eviricinin kararlılığı, evirici gerilimi-kontrol çevriminin kararlılığı analiz edilerek tahmin edilebilir. Aşağıdaki nedenler dolayısıyla, trenin çalışma durumuyla ilgili bozucu faktörler hesaba katılmaz :

(i) $G(s)$ transfer fonksiyonunun kazancı (eviricinin DC regülasyonuna karşı gelir) küçüktür.

(ii) Gerilim-kontrol çevriminin cevabı, ΔI_D akımının değişme hızına oranla, daha hızlıdır.

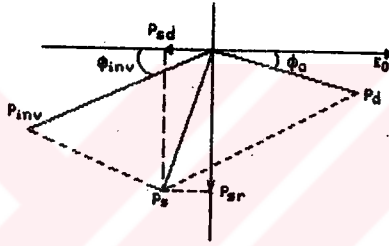
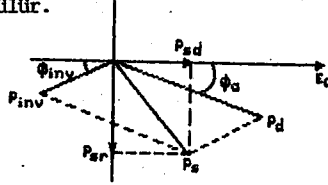
6.3.5. Temel Gücün A.C Karakteristikleri

Evirici, trenin çalışma durumuna bağımlı bir akım üreten bir akım kaynağıdır. Demiryolu sisteminin AC yardımcı yükleri eviriciden gelen enerjiyi tüketecek kadar büyükse, enterkonnekte sisteme enerji geri verilmez. Diğer taraftan, evirici tarafından sağlanan AC güç yardımcı yüklerinkini aşıyorsa, fazla enerji geri verilir. Şekil 6.3.5.1'de yukarıda açıklanan iki durum için eviricili ara istasyonun fazör diyagramı çizilmiştir.

Evirici, komütasyon ve faz-kontrol ihtiyaçları için AC sistem tarafından sağlanan reaktif güce ihtiyaç duyar. Böylece, evirici ve yardımcı yüklerin ara istasyondaki reaktif gücü P_{sr} denklem 6.3.5.1 ile verilir.

$$P_{sr} = P_d / \sin \phi_a + P_{inv} / \sin \phi_{inv} \quad (6.3.5.1)$$

Bu denklemden eviricinin çalışmasıyla, tali istasyonun güç faktörünün azalacağı görülmüştür.



Şekil 6.3.5.1. Tali istasyonun evirici çalıştığı süredeki fazör şeması.

P_d = Yardımcı üniteler,

P_{inv} = Eviriciler,

P_s = Tali istasyon

a) $P_{inv} \cos \phi_{inv} < P_d \cos \phi_a$

b) $P_{inv} \cos \phi_{inv} > P_d \cos \phi_a$

6.3.6. Evirici Kullanıldığında Harmonik Durum

Eviriciler, A.C hat akımında ve DC voltajda harmoniklere neden olurlar. Tali istasyonlarda, eviriciler tarafından üretilen harmoniklerin temel özelliklerini tartışmak zorunludur.

6.3.6.1. A.C Hat Akımındaki Harmonikler

Hat akımında $n = kp + 1$ derecesindeki harmoniklerin varlığı iyi bilinmektedir. Burada, p darbe sayısı, k ise 1,2,3 gibi tam sayılardır. Sıfır komütasyon açısı için harmonik büyüklüğü şöyledir :

$$I_n = I_1/n \quad (6.3.6.1)$$

I_n : n inci dereceden harmonik akım,

I_1 : Temel akım.

Denklem (6.3.6.1) kare dalga için teorik değerler verir. Pratikte devreler, sıfırdan farklı komütasyon açısına neden olan endüktansa sahiptirler ve bu da harmonik miktarının azalmasına neden olur. Fakat, eviricilerde faz kontrolünün kullanılmasıyla bu olayın etkisi azalır. Evirici, maksimum komütasyon açısı için, bu açığı sağlayan bir sönme açısı aralığı gerektirir. Sönme açısı, yarı iletken sönme zamanı ve uygun bir kesim zamanı için gerekli olan açıdır. Bu açı, AC sistem geriliminde beklenen herhangi bir değişimde bile başarılı komütasyonu sağlayacak kadar büyük olmalıdır. Bu açının demiryolu uygulamalarındaki pratik değeri 30-40 derece arasındadır. Bu da gösterir ki, diyotlu doğrultucularla kıyaslandığında, harmonik miktarı özellikle 17 inci ve 19 uncu gibi yüksek derecelerde önemli miktarda artmıştır.

Trenler arasındaki doğrudan enerji transferi ve trenin dingillerinin yalnızca bir kısmında motor bulunması nedeniyle evirici akımının tepe değeri doğrultucumunkinden küçüktür. Bu nedenle harmoniklerin mutlak değerleri, diyotlu doğrultucu tarafından üretilenden daha büyük değildir.

6.3.6.2. D.C Gerilimdeki Harmonikler

D.C gerilimdeki salınım bileşenlerinin derecesi $n = kp$ ile ifade edilir. Burada n = harmonik derecesi, $k = 1,2,3 \dots$ gibi tamsayı, p = darbe sayısıdır.

Salınım geriliminin genliği, kontrol açısı β ve komütasyon açısı u ile değişir. ve doğrusal bir değişim göstermez. Pratik uygulamada görülen β -u açısı 10-30 derece arasında değişir. Harmoniklerin miktarı artarken β -u açısı da artar. Eviriciyle birlikte koruma amacıyla kullanılan D.C reaktör, D.C hattaki harmonik akımın sınırlandırmasında etkilidir. D.C hattaki harmonikler, güç hattı çevresindeki haberleşme cihazlarında parazite neden olurlar. Fakat, modern bir demiryolu sisteminde haberleşme sistemi için ekranlı kablolar kullanılır. Bu kablolar, güç hattındaki harmoniklerden nadiren etkilenirler.

6.3.6.3. Harmoniklerden Kurtulma

Harmonik etkilerini sınırlamanın yaygın yolları şunlardır :

- a) Çeviricilerin darbe sayısını arttırmak,
- b) Filtrelerin kurulması,

Darbe sayısının arttırılması maliyeti ve cihazın boyutlarını arttırdığından, kullanılan darbe sayısı cihazın kapasitesine göre seçilmelidir. 1-6 MW arasındaki güçlerdeki doğrultucularda, 6 veya 12 darbeli doğrultucuların herhangi biri seçilebilir. Eviriciler içinde 6 veya 12 darbe seçilebilir, çünkü mevcut diyotlu doğrultucularla kıyaslandığında harmonik genlikleri yeni problemler yaratacak kadar büyük değildir.

AC besleme sistemi, harmonikleri yutacak kadar güçlü değilse veya harmonik frekansında A.C sistemde paralel rezonans bekleniyorsa, tali istasyonda harmonik filtreler kullanılması tavsiye edilir.

Filtreler harmonik akımların akışının kontrolü ve çalışmayı bire yakın bir güç faktöründe devam ettirebilecek reaktif gücü sağlanması amaçlarıyla tasarlanırsa yararlı olurlar. Gerçek bir metro sisteminde yardımcı yüklerin güç faktörü düşüktür. Çünkü bu yükler, yitiren merdivenler, hava soğutma ve değiştirme donanımındaki çok sayıda motordan oluşur. Eviricinin çalışması da güç faktöründe daha fazla düşmeye neden olur. Bu gibi bir durumda, yukarıda açıklanan filtre tasarımı reaktif güç maliyetini en aza indirmede yararlı olur.

6.3.7. Evirici Sisteminin Korunması

Eviricinin korunması, aşırı yüklenme, sıcaklık yükselmesi, tristör bozulması konularını dikkate alır ve diyotlu doğrultucularına benzer tasarım prensipleri uygulanır. Eviricili regeneratif sistemin, aşağıda açıklanan karakteristik arızaları vardır :

(a) Komütasyon arızası: Başarısız komütasyon, sonuçta evirici kolları arasında D.C kısa devreye yol açar. Bu olay, AC sistemin aşırı yüklenmesine ve gerilimin düşmesine neden olur. Bir aşırı akım ve bir düşük gerilim rölesi etkili koruyuculardır. Komütasyon hatasıyla ortaya

ıkan kısa devre akımı hızlı bir D.C devre kesicisi ile temizlenmelidir. DC kesici ile birlikte kullanılan bir DC reaktör kısa devre akımını sınırlar ve tali istasyonda bulunan diğ er DC kesicilerin, diğ er DC arızaları iyi bir biçimde ayırt etmesini sağlar.

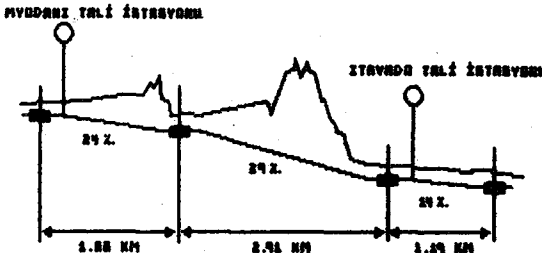
(b) Regeneratif modda DC arıza: DC besleme devreleri, normalde yük akımlarıyla arıza akımlarını ayırt eden hat-arıza bulucuları ile donatılmışlardır. DC hat arızası, sistem regeneratif modda iken meydana gelirse, arıza akımı tali istasyonlar ve trenlerden gelir. Besleyici ünite akımının başlangıçtaki yükselme hızı regenerasyon olmayan durumdan farklıdır. Bu durumu gidermek için, trenlerin regeneratif frenlemeyi kesen düşük gerilim röleleri ile donatılmaları tavsiye edilir. İyi bir koruma koordinasyonu, kıyıcı-kontrollü trenlere konulan ani-açmalı düşük gerilim röleleri ile elde edilir. Bu da tali istasyonların normal DC salınımlarla, arıza durumlarını ayırt etmelerini sağlar.

6.3.8. Kobe Metrosu için Eviricili Güç Besleme Sisteminin Kurulması

Kobe Belediyesi Ulaşım Bürosu tarafından servise açılan Kobe Metro sunun Seishin hattında, daha önce açıklanan kıyıcı-kontrollü trenler ve eviricili tali istasyonlar bulunmaktadır. Burada bazı işletme sonuçlarıyla birlikte, tasarım özellikleri ve sistemin gerçekleştirilmesinde karşılaşılan sonuçlar anlatılmaktadır.

6.3.8.1. Sistemin Özeti

Şekil 6.3.8.1'de hat, tali istasyonların yerleriyle birlikte görülmektedir. Regeneratif sistemin tasarımı, enerji tasarrufu ve emniyeti dikkate alınarak yapılmıştır. Uzun eğimli bölümde regeneratif yavaşlama frenlemesi kesinlikle mümkün kılınmıştır. Eviricili tali istasyonlar Myodani ve Itayado'da kurulmuştur.

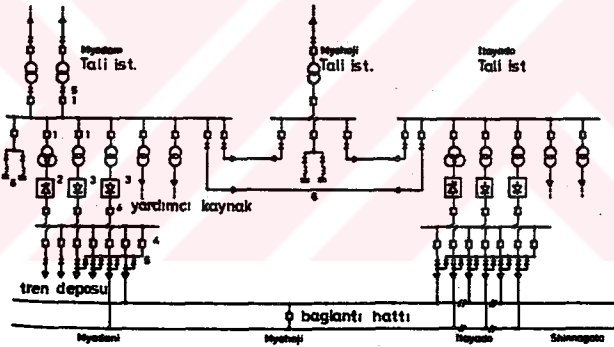


Şekil 6.3.8.1. Kobe yeraltı demiryolu hattı (55).

6.3.8.2. Güç Besleme Sistemi

6.3.8.2.1. AC Sistem

Şekil 6.3.8.2'de güç besleme sistemi gösterilmiştir. Yüksek derecede güvenilirlik sağlayabilmek için sistem Myodani ve Myohoji tali istasyonlarındaki bağımsız iki 77 kV'luk hattan beslenmiştir. Bu istasyonlarda gerilim demiryolu sisteminin beslemesi için 33 kV'a düşürülür. Normal çalışmada iki çevirici tali-istasyon, Myodani ve Itayado, Myodani ve Myohoji tali istasyonlarından beslenirler. İki çevirici tali istasyon birbirlerine 3 kV'luk bir hat ile bağlanmışlardır. Böylece 77 kV'luk hatlardan birinin bozulması durumunda bile sistem normal çalışır. Geri alınan enerjinin yardımcı ünitelerde kullanılması tasarlanmıştır. Yardımcı üniteler verilen enerjiyi kullanacak güce sahiptirler.



Şekil 6.3.8.2. Güç besleme sisteminin şematik gösterilimi

1= AC devre kesici, 2 = Evirici, 3 = Doğrultucular,

4= DC devre kesici, 5 = İzolatörler, 6 = Harmonik filtre.

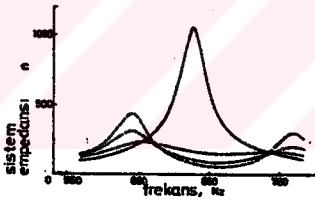
6.3.8.2.2. D.C Sistem

Sistemin geri alma kapasitesini arttırabilmek için Myodani ve Itayado tali istasyonlarındaki eviriciler sürekli devrede tutulmaktadır. Eviricilerden biri devre dışı kaldığında sistem normal çalışmasına devam eder. Fakat bu durumda sistem, durma frenlemesi için tamamen alıcı değildir. Yukarı ve aşağı yollardaki trenler arasındaki enerji transferini arttırabilmek için, Myohoji istasyonunda bir ara bağlantı kurulmuştur.

6.3.8.2.3. A.C Sistemdeki Harmonikler için Tasarım Kriterleri

Simülasyon çalışmalarının harmonikler üzerinde yapılmasıyla 6 darbeli doğrultucu seçilmiştir. Faz kontrolünün kullanılması nedeniyle, 12 darbeli evirici seçilmiştir.

Elektrik şirketinin, gelecekte sistemini kablolar kullanarak genişletme planları vardır. Kablo kapasitansı nedeniyle 11 nci harmonik civarında paralel rezonans beklenmektedir. (Çeviricilerde eşdeğer frekanslara normalde rastlanılmaktadır). Bu problemin çözümü için doğrultucu ve evirici tarafından üretilen 11 ve 13 üncü harmoniklerin süzülmesi için gerekli filtreler tasarlanmıştır. Maliyet açısından düşünüldüğünde 11 ve 13 üncü harmonik için kullanılabilen geniş bantlı tek bir filtre yararlı olacaktır. Gerçek sistemde bu, küçük Q değerli bir filtre oluşturan seri bir dirençle gerçekleştirilmiştir. Filtresiz ve filtreli hesaplanan sistem empedans karakteristikleri Şekil 6.3.8.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3.8.3. Güç besleme sisteminin empedans karakteristikleri (56). 11 ve 13 üncü harmonikler üzerinde etkili filtre varken ve yokken ayrı ayrı çizilmişlerdir (Temel frekans 60 Hz).

- filtersiz
- - - - - filtreli (Q= 20)
- . - . - - filtreli (Q= 10)
- - - - - filtreli (Q= 5)

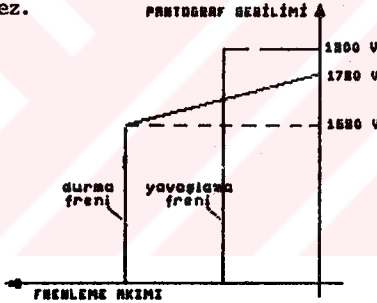
11 ve 13 üncü harmonikler için filtre konulması 5 ve 7 nci harmonik akımlarının artmasına neden olduğundan, bu harmonikler için ek bir filtre konulmuştur. 600 kVA reaktif güç sağlayarak yüksek güç faktörünün elde edilmesini mümkün kılan paralel filtreler de tasarlanmıştır.

6.3.8.3. Yavaşlama Freninin Daha Emniyetli Çalışması için Tasarım

Yavaşlama frenlemesi için güç sistemi herhangi bir anda tamamen alıcı olmalıdır. Bu problemi çözmek için aşağıdaki konular formüle edilmiştir.

a) Eviricilerden biri devre dışı kalırsa, diğeri normal çalışma sırasındaki yavaşlama frenlemesi akımını tamamen yetabilmelidir.

b) Yavaşlama frenine, durma frenine göre öncelik verilmiştir. Bunu gerçekleştirebilmek için Şekil 6.3.8.4'de gösterilen frenleme karakteristiklerine sahip trenler sağlanmıştır. Toplam geri-besleme akımı, güç kaynağının alabileceği sınırı aştığında, DC hat gerilimi 1680 V'ın üzerine çıkar. Bu sırada, durma freninin akımı kabul edilebilir bir değere ayarlanır. Yavaşlama freni ise etkilenmez, böylece DC hat gerilimi 1800 V'a yükselmez.



Şekil 6.3.8.4. Durma ve yavaşlama frenlerinin gerilim akım karakteristikleri (57).

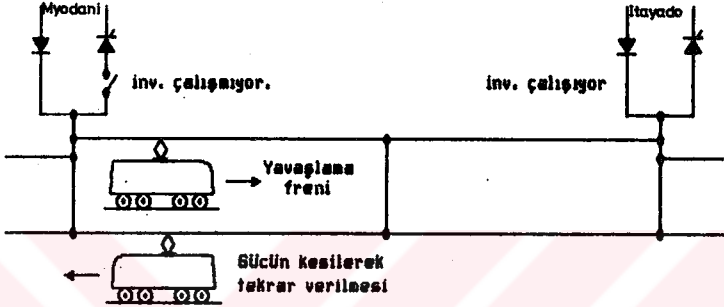
6.3.8.4. Alan Testlerinin ve Servis Çalışmasının Sonuçları

6.3.8.4.1. Performans Testleri

Teorik tahminlerin doğruluğunu denemek için, yol üzerinde trenleri kullanarak aşağıdaki performans testleri yapılmıştır.

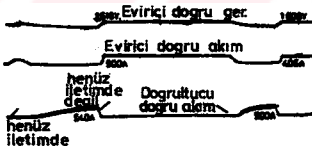
- a) DC gerilim kontrolünün dengesi ve statik karakteristikleri,
- b) Hızlanmadan, frenlemeye ve vs. gibi çalışma modu değişimlerine tali istasyonların cevapları,
- c) Yavaşlama freni için güç sisteminin akım alma kapasitesi,

DC gerilim/akım karakteristikleri, değişik evirici akımlarında ölçülmüştür. Bu ölçümler, eviricinin gerilim kontrol çevriminin, trenlerin çalışma moduna bağlı olmaksızın kararlı olduğunu göstermiştir.



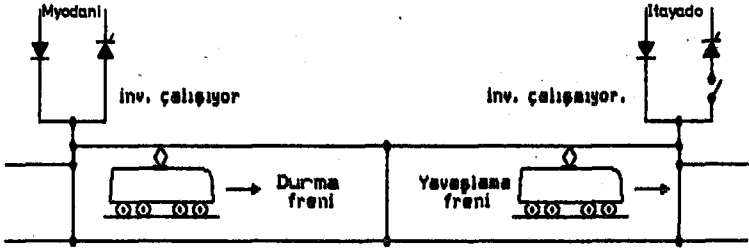
Şekil 6.3.8.5. Eviricili tali istasyonun DC geçici cevabının denemesi için koşulları.

Eviricinin geçici cevabı, Itayado istasyonunda Şekil 6.3.8.5'de gösterilen çalışma koşullarında denenmiştir. Yapılan testler, yük durumuna bağlı olarak tali-istasyonun doğrultucu çalışmasından, evirici moduna düzgün bir şekilde geçtiğini göstermiştir. (Şekil 6.3.8.6) Aynı anda frenliyen tren etkilenmemiştir.



Şekil 6.3.8.6. Tali-İstasyonun DC geçici karakteristikleri (58).

Şekil 6.3.8.7'de gösterilen koşullarda, yavaşlama freninin önceliği denenmiştir. Yavaşlama freni yapan tren, durma freni yapan trenden etkilenmemiştir. Test, yavaşlama frenine, durma frenine göre öncelik verildiğini kanıtlamıştır.



Şekil 6.3.8.7. Yavaşlama frenlemesinin önceliğinin denemesi için çalışma koşulları.

6.3.8.4.2. Geri besleme Enerjisi

Ölçümler ticari servis sırasında her iki tali-istasyonda yapılmıştır. Şekil 6.3.8.8'de her iki istasyonda kaydedilen toplam geri besleme enerjisi gösterilmiştir.

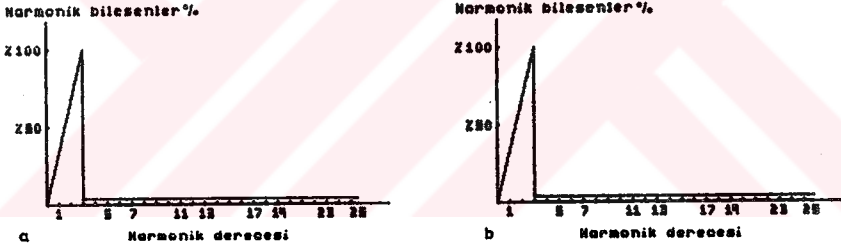


Şekil 6.3.8.8. Gün başına geri besleme enerjisi (59).

Trenler arasındaki zaman, kalabalık saatlerde 7,5 - 10 dakika akşam saatlerinde 15-20 dakika arasındadır. Yukarı ve aşağı yollardaki trenler uç istasyonlardan aynı anda kalkmışlardır. Böylece trenler arasında maksimum enerji transferi meydana gelmiştir. Doğrultucu tarafından sağlanan enerjinin % 22'si, evirici aracılığıyla 33 kV'luk sisteme geri verilmiştir. Bu enerji, demiryolunun yardımcı yükleri tarafından kullanılmıştır. (Havalandırma, soğutma, yürüten merdivenler ve aydınlatma) Yardımcı yüklerin enerji tüketimi, ortalama geri besleme enerjisinin altı katıdır. A.C sisteme enerji akışı çok ender kaydedilmiştir.

6.3.8.4.3. A.C Sistemdeki Harmonikler

Uç istasyonlar arasında % 200 yolcu yükü ile gidiş-geliş seferleri yapılmıştır. Vagonlardan 4'ü motorlu, 1'i motorsuzdur. Harmonik miktarı, Myodani tali istasyonunda maksimum akım kaydedildiğinde ölçülmüştür.

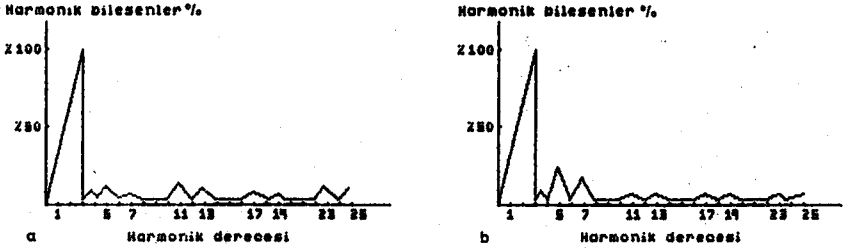


Şekil 6.3.8.9. A.C gerilim harmonik testi sonuçları (60).

a- Evirici (toplam gerilim bozulma faktörü % 0,37).

b- Doğrultucu (toplam gerilim bozulma faktörü % 0,34).

77 kV sistemdeki harmonik gerilim, frenleme ve hızlanma periyotlarının her ikisinde de % 0,2'yi geçmemiştir. Frenleme sırasında % 0,37 lik, hızlanma sırasında % 0,34 lük toplam gerilim bozulma faktörleri kaydedilmiştir.



Şekil 6.3.8.10.A.C akım harmonik testi sonuçları.

a- Evirici (toplam harmonik akımının efektif değeri % 14,9).

b- Doğrultucu (toplam harmonik akımının efektif değeri % 20,7).

77 kV sistemdeki harmonik akımın RMS değeri, regeneratif çalışma sırasında % 14,9 ve doğrultucu çalışması sırasında % 20,7 dir. Testler eviricinin herhangi bir harmonik problemi yaratmadığını, çünkü A.C sistemin doğrultucu tarafından üretilen harmonikleri yok edecek güçte olduğunu göstermiştir (61).

6.3.9. Eviricinin Diğer Demiryollarındaki Çalışma Tecrübesi

Burada anlatılan eviriciler, Japonya'da bir çok demiryolu tarafından kurulmuş olup, başarıyla kullanılmaktadırlar. Bu demiryolları şunlardır; Sapporo Belediyesi Ulaşım Bürosu, Fukuoka Şehri Hızlı Ulaşım Bürosu ve Kyoto Belediyesi Ulaşım Bürosu. Üç demiryolu da düz hatlı yollardır. Bu demiryollarındaki test sonuçları da bu yazıda belirtilen tasarım prensipleri ve çözümlerin yeterli olduğunu göstermiştir.

6.3.10. Sonuçlar

Bu bölümde D.C ile beslenen regeneratif frenleme kullanan bir tahrik sisteminde, evirici sisteminin kullanıldığı ve başarılı sonuçlar alındığı gösterilmiştir. Tasarım prensiplerinin ve uygulanan çözümlerin bir çoğu tartışılmıştır. Enerji tüketimi azaltılmış olup, dengeli frenleme yapılabilmektedir. Diğer performans karakteristikleri mükemmeldir.

Tren kontrolünde modern enerji durumu ile başa çıkabilmek için artan miktarlarda kıyıcı-kontrolü kullanıldığından, eviricilere olan talep de artacaktır.

6.4. Alternatif Gerilim Şebekesindeki Akım Ayarlamalı Tahrik Araçlarındaki Şebeke Filtrelerinin Hesaplanması Teorik Noktalar

6.4.1. Giriş

Akım doğrultuculu tahrik araçlarının tren şebekesinde kullanılması esnasında her zaman için şebeke geri etkilerinin hesaba katılması gereklidir. Emniyet ve haberleşme tesislerin müsaade edilmeyen bir derecede etkilenmesini önlemek için bu tip raylı araçlarda şebeke filtrelerinin monte edilmesi gerekebilir. Şebeke filtresi bileşenlerinin boyutlandırılması, şebeke davranışını genel olarak tarif eden parametrelerin tayini ile mümkün olmaktadır. Bununla birlikte seçilmiş bulunan filtre devresinin etki şekli, projelendirme aşamasında bile tahmin edilebilmektedir.

Modern raylı araçların tahrik sistemleri akım doğrultucu tekniğinin uygulanması ile karakterize edilmektedir. Bunun dışında üç fazlı tahrik motorları ile donatılmış bulunan tahrik araçlarının (Tfz) sayısı sürekli olarak artış göstermektedir.

Çalıştırıcı için akım doğrultuculu tahrik sistemlerinin belirgin özelliklerini tüm çerçevede faydalı hale getirmek için, uygun akım doğrultuculu devrelerin projelendirilmesi esnasında bunların prensip bakımından aranan özelliklerine de azami bir dikkat gösterilmelidir. Bu esnada özellikle akım doğrultucu ile, besleyen şebeke arasındaki ilişkinin iyi tanınması büyük anlam taşımaktadır. Akım doğrultucular lineer olmayan (non-linear) tüketicileri teşkil ettiğinden, bunlar komşu alçak akım teknikli tertibatları etkilemekte olan aşırı dalgalanmalara (üst salınımlara) neden olabilmektedir (62),(63),(64).

6.4.2. Alternatif Gerilim Şebekesinde Akım Doğrultuculu Tahrik Araçları

Besleyen alternatif gerilim şebekesiyle ilgili olarak bir Tfz'nin davranışı genelde toplam güç faktörünün belirtilmesi ile tarif edilebilmektedir (65).

$$\lambda = g_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (6.4.2.1)$$

g_1 ile şebeke akımının temel dalgalarına miktarı, $\cos \varphi_1$ şebeke gerilimine göre, şebeke akımının temel dalgasının faz kaymasını, λ güç faktörü alınan aktif güç P ile görünen güç S arasındaki oranı belirtmektedir ($\lambda = P/S$) Enerji iletim sistemini olabildiğince ekonomik bir biçimde çalıştırabilmek için, güç faktörü mümkün olduğu derecede 1 değerine yakın olmalıdır.

Buna göre, prensip bakımından λ güç faktörünü, Tfz'nin o anki konumuna göre مناسب bir şekilde etkilemenin iki tane olasılığı vardır :

- Şebeke akımının temel dalgalarının ve şebeke gerilimi arasındaki faz kaymasını mümkün olduğunca küçük tutmak,
- Şebeke akımının düşük üst salınım miktarlarından ibaret olmasıdır.

$\cos \varphi_1$, temelde Tfz üzerine monte edilen yutma devreleri ile veya ray araçlarının akım doğrultucularının özel kontrol işlemleri sayesinde düzeltilebilir. Alman demiryollarında (şebekenin bulunduğu yerde) 9,5 kHz ile 14 kHz temel ses frekans bölgesinde çalışan 42 Hz ve 100 Hz'lik hat akımlı devreler ve benzer şekilde güvenlik tesisleri dikkate alınmaktadır.

Genellikle 300 Hz ile 3400 Hz arasındaki frekans bölgesini kullanan haberleşme tertibatlarının elektromagnetik etkilenmesinin tesbit edilmesi için üst salınım spektrumunun tek tek her bir genişliği değerlendirilmektedir. Buradan akım doğrultuculu araçların haberleşmeye olan rahatsız edebilirliği olarak amperik olarak değerlendirilen gürtülü akımı I_{pe} türetilmektedir (66). Şebeke filtrelerinin monte edilmesiyle birlikte bu rahatsız edici akım müsaade edilen sınırlar dahilinde tutulabilmektedir.

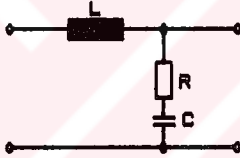
6.4.3. Akım Doğrultuculu Tahrik Araçlarındaki Şebeke Filtrelerinin Konumu ve Tertiplenmeleri

Bir şebeke filtresi, temel itibarıyla aşağıdaki şartları sağlaması gereklidir:

- Tfz 'nin akım doğrultucu devresi tarafından meydana getirilen yüksek dereceden akım üst dalgalarını seyr iletkeni şebekesinden uzak tutmak,

- Şebeke akımının temel dalgalanmasını mümkün olduğu ölçüde etkilenmemiş olarak T_{fz}'ye ulaştırmak.

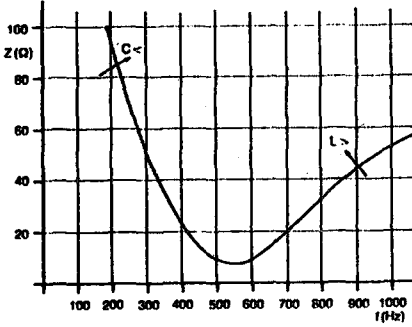
Uygun şebeke filtre devresinin seçimi esnasında, besleyen alternatif gerilim şebekesinin davranışına özel dikkat sarf edilmesi gereklidir. T_{fz} çoğu zaman değişen şebeke şartlarından etkilenmektedir. Bu nedenle bir filtre devresi en azından ilgili T_{fz} için tanımlanmış olan şartları alternatif akım şebekesi doğrultusunda yaratmak için uygun olmalıdır. Bu bir kapasite ve endüktans ile meydana gelmiş bir tertip ile mümkün olmaktadır. Bu da şebeke tarafından bakıldığında, tanımlanmış olan davranışa sahip olan bir alçak geçiren filtredir. Şekil 6.4.3.1 مناسب filtre devresini göstermektedir.



ALÇAK GEÇİREN DAVRANIŞA SAHİP ŞEBEKE FİLTRESİ

Şekil 6.4.3.1. Alçak geçiren davranışa sahip şebeke filtresi.

Bobin bu esnada şebekede duruma göre mevcut olan yüksek frekans-taki üst dalgalanmaları bloke etmektedir. Filtrenin rezonans frekansının tesbit edilmesi esnasında, filtreye ek bir yük yüklenmemesi için bunun yüksek şebeke akımı üst salınım kısmına sahip olan bölgede bulunmamasına dikkat edilmelidir. Diğer bakımdan filtrenin kapasite ve sönümlenme direnci, özellikle ses frekans bölgesindeki frekanslar için şebekeye karşın çok düşük olan bir empedansı meydana getirmesi gereklidir, çünkü ancak bu şekilde yüksek frekanstaki rahatsız edici akımların seyriletkenine akması önlenmektedir. Örneğin Şekil 6.4.3.2 bu şekildeki bir filtrenin boşa çalışma giriş empedansını göstermektedir.

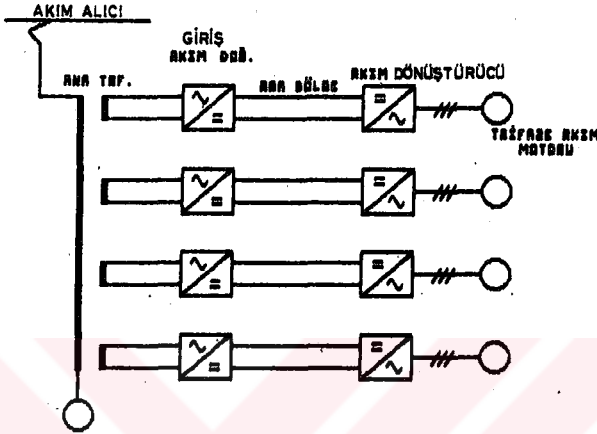


Şekil 6.4.3.2. Bir L-R-C filtresinin boşa çalışma giriş empedansı (67).

Tfz'nin tahrik sistemlerinin eklenip ayrılmasından, akım doğrultucuları tarafından üretilen üst salınım gerilimlerinin spektrumunun oluşumu değişkendir. Fakat eğer şebeke filtresinin bileşenlerinin değerleri Şekil 6.4.3.1'e göre bir kez tesbit edilmiş ise, bu durumda filtre karakteristiği bundan başka, daha uyumlu olamaz. Bu filtrenin boyutlandırılmasında dikkate alınmalıdır.

Şebeke filtreleri, temelde Tfz tahrik aracının ana transformatörünün önüne yani yüksek gerilim tarafına bağlanabildiği gibi, bunun sekonder tarafına da tertiplenebilir. Fakat genelde şebeke filtrelerinde cihaz masraflarının minimum tutulması istenildiğinden, tahrik aracında tahrik akım devresinin birden fazla bulunması durumunda şebeke filtresinin yüksek gerilim tarafında tertiplenmesi söz konusu olmaktadır. Şekil 6.4.3.3'e uygun bir ana akım devresinin incelenmesinde bu açıkça görülmektedir. Alçak gerilim tarafında dört tane şebeke filtresine karşı, transformatörün yüksek gerilim tarafında sadece bir tane filtreye ihtiyaç duyulmaktadır.

Bunun dışında, girişteki akım doğrultucularının tetiklenmesiyle, ilk başta oluşan üst salınımları azaltmak veya tamamen ortadan kaldırılması söz konusu olduğundan 15 kV tren şebekelerinde arıza akım filtresinin yüksek gerilim tarafında tertiplenmesine öncelik tanınmalıdır. Fakat burada direkt olarak seyr iletkenine bağlı olan kondansatör bakımından özel koruma önlemleri alınmalıdır.



Şekil 6.4.3.3. Dört tahrik devreli bir akım doğrultuculu taşıtın ana akım şeması.

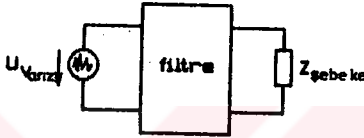
6.4.4. Şebeke Filtresi Bileşenlerinin Tesbit Edilmesi

Genel olarak incelenirse bir şebeke filtresinin elektriksel değerlerinin tesbitinde iki büyüklüğün bilinmesi veya tahmin edilmesi yeterlidir :

- Tahrik aracı tarafından üretilen üst salınım gerilimlerinin spektrumu (grafığı), $U_{V_{arıza}} = F(f)$ şeklinde ifade edilmiş olarak,
- Şebekeyi araç seyr iletkeni, yardımcı istasyonu tarif eden yedek empedans $Z_{şebeke}$

Belirlenecek olan şebeke filtreleriyle birlikte bu büyüklükler Şekil 6.4.4.1'de gösterilen yedek devre şemasıyla tarif edilebilmektedir. Buradan açıkça görülmektedir ki, seçime bağlı her bir filtre devresi için $U_{V_{arıza}}$ ve $Z_{şebeke}$ 'ye sahip olan i_{pe} akımı, şebeke analizinin genelde geçerli olan kurallarıyla tesbit edilebileceği görülmektedir. Şebeke filtresi bileşenlerinin elektriksel değerlerinin adım adım değiştirilmesiyle minimum arıza akımı verilen şartlarda tesbit edilebilmektedir.

Üst gerilim salınımlarının spektrumu (grafiki) akım doğrultuculu tahrik sistemi tarafından oluşturulan simülasyon hesaplarıyla seçilen evirici devresine bağlı olarak önceden belirlenebilir ve biliniyor olarak kabul edilebilir.



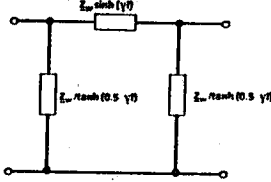
Şekil 6.4.4.1. Şebeke filtrelerin boyutlandırılması için basitleştirilmiş yedek devre şeması.

$Z_{\text{Şebeke}}$ kompleks empedans sadece bir hesaplama yardımcı olmaktadır ve aşağıdaki bölümleri temsil etmektedir :

- Besleyen tali istasyonların yedek verileri,
- Tahrik aracının bir anlık konumu ile tali istasyon arasındaki seyr iletkeni kısmının elektriksel değerleri,
- Tahrik aracı ana transformatörünün yedek büyüklükleri,

Bunun dışında yedek empedans $Z_{\text{Şebeke}}$ 'nin uygun seçilmesiyle aynı yol parçasında başka Tfz'lerin bulunması simüle edilebilmektedir.

Tali istasyonların, $Z_{\text{Şebeke}}$ empedanslarına olan etkisi, orada tesis edilmiş olan transformatörler ve bununla birlikte bunların kısa devre empedansları $Z_{\text{UW}} = R_{\text{K(UW)}} + j\omega L_{\text{K(UW)}}$ tarafından yeterince doğru olarak tarif edilmektedir. Aynıısı Tfz ana transformatörü içinde geçerli olmaktadır. Bu Tfz ana transformatörü içinde, kısa devre direnci R_{K} ve endüktans L_{K} 'nın verilmesiyle $Z_{\text{T}} = R_{\text{K(Tfz)}} + j\omega L_{\text{K(Tfz)}}$ olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 6.4.4.2. Homojen bir hattın eşdeğer devre şeması.

Seyr iletkeni örneğin homojen hatlar için π eşdeğer devresiyle tarif edilmektedir. (Şekil 6.4.4.2 'de gösterildiği gibi), Z_W dalga direnci ve yayılma hızı γ aşağıdaki gibi bulunabilir :

$$Z_W = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (6.4.4.1)$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} \quad (6.4.4.2)$$

R' , L' , G' , ve C' büyüklükleri uzunluğa bağlı olan parametrelerdir ki, bu durumda eşdeğer devre empedansları

$$Z_{FLL} = Z_W \cdot \sinh(\gamma \cdot l) \quad \text{ve} \quad Z_{FLQ} = Z_W \cdot l / \tanh(0,5 \gamma \cdot l) \quad (6.4.4.3)$$

incelenen akım doğrultuculu aracın tali istasyondan olan uzunluğuna bağlı olmaktadır. Alternatif gerilim tren şebekelerinde yapılan ölçümler frekansa bağlı olan direnç ve endüktans değerleri R' ve L' için (seyr iletkeninin) farklı değerler oluşturmaktadır. Çünkü seyr iletkeninin şebekeye değişik bağlama olanakları birbirleri arasında çok kuvvetli bir etki meydana getirir bu yüzden çoğu şebekede, şebeke rezonans noktası diye tanımlanan noktalar mevcuttur. Genelde geçerli olan direnç ve endüktans değerlerinin bulunmasındaki zorluklara karşın, literatürde seyr iletkeninin kapasite değerleri hakkında nisbeten birbirine benzeyen bilgiler mevcuttur. Böylece iki seyr iletkeni ile donatılmış olan çift yönlü demiryolu mesafesi için 18 nF/km civarında olan bir kapasite değeri kabul edilebilir.

6.4.5. Bir Şebeke Filtresinin Boyutlandırma İşlemine Ait Örnek

Tarif edilen ilişkilerin uygulaması, tren tahrik aracı Alman Intercity Experimental ile açıklanacaktır (Tfz BR 410) (68).

Yapı sınıfı 410 olan her iki tahrik aracı da akım doğrultuculu bir tahrik tesisini içermektedir. Doğrultuculu bu tahrik sistemi Şekil 6.4.3.3'te gösterilmiş olan şemaya uymaktadır. Girişteki akım doğrultucularla özel tetikleme yöntemleri sayesinde $\cos \varphi_1 = 1$ 'e ulaşmak mümkündür ve üst salınım arıza spektrumu tamamen yok edilebilse de, her bir tahrik aracı için yüksek gerilim tarafında bir şebeke filtresi öngörülmesi mecburidir. Ancak bu sayede tüm tren için yani Tfz BR 410 için belirtilen aşağıdaki sınır değerlerin aşılmaması sağlanır.

$$I_{100 \text{ Hz}} \leq 2A (0,5 \text{ s})$$

$$I_{9,5 \dots 14,5 \text{ kHz}} < 20 \text{ mA}$$

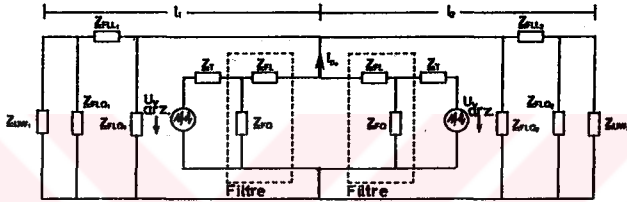
$$I_{pe} \leq 1 \text{ A (strekli)}$$

Tüm tren için yani Tfz BR 410 için bu sınır değerlerin aşılmaması için burada L-R-C 'li seri rezonans devresi seçilmiştir. Şebeke filtreleri tarif edilmiş olan prensip gidiş yolu ile ölçülendirilmiştir. Bu somut örnek için bu sayede Şekil 6.4.5.1 'de gösterilmekte olan eşdeğer devre elde edilmiştir. Bu şekilde gösterilmekte olan kompleks empedanslar şu anlamları taşımaktadırlar :

$Z_{UW_{1/2}}$: Üç tane paralel olarak 15 kV seyir iletkenini besleyen 15 MW'lık transformatörlerinin 15 kV bazındaki ortaya çıkan kısa devre empedanslarıdır. Bunların her biri tali istasyon 1 ve tali istasyon 2'de montaj edilmiştir :

$$Z_{UW} = R_{K(UW)} + j\omega L_{K(UW)}$$

$Z_{FLO_{1/2}}$ ve $Z_{FLL_{1/2}}$: 1 ve 2 nolu havai hat bölümlerinin dördüncü kısmına uygun boyuna-enine empedanslarını gösterir. Burada
 $R' = F(f)$ ve $L' = F(f)$ frekansın fonksiyonudur.
 $C' = 18 \text{ nF/km}$
 $l_1 + l_2 = 50 \text{ km}$



Şekil 6.4.5.1. Şebeke filtresi bileşenlerinin hesaplanması için (BR 410)'un eşdeğer devre şeması.

Z_T : TK ana transformatörünün 15 kV bazında meydana gelen empedansı

$$Z_T = R_{K(Tfz)} + j\omega L_{K(Tfz)}$$

Z_{FQ} : Şebeke filtresinin enine empedansı

$$Z_{FQ} = R_Q + 1/j\omega C$$

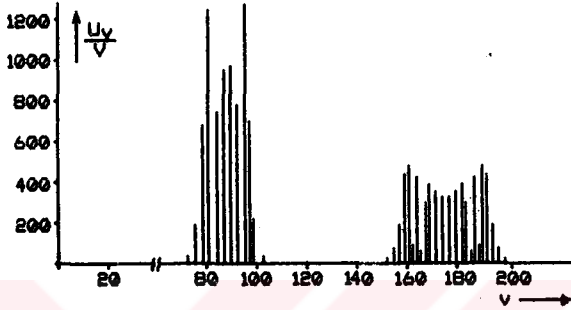
Z_{FL} : Şebeke filtresinin boyuna empedansı,

$$Z_{FL} = R_L + j\omega L. \text{ Burada } R_L \text{ şebeke empedansının omik kısmıdır.}$$

Her iki akım doğrultuculu tesisinin üst salınım spektrumu arıza gerilim kaynakları tarafından temsil edilmektedir. Bunlar

$$U_V \text{ arıza } 1/2 \text{ dir.}$$

Titreşim gerilimleri frekansın ve işletmede bulunan devrelerin bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkar. Eğer T.K (ana transformatör) transformatörünün titreşimleri, üzerlerindeki yükten bağımsızsa seçilmiş giriş akımı doğrultucusu sayesinde gerçeğe uygun bir biçimde ortaya koyulur. Bir T.K transformatörün titreşim spektrumu Şekil 6.4.5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.4.5.2. BR 410 taşıtının harmonik gerilim değişimleri
(2 dingil devrededir).

Uygun bir hesaplama programının çıkarılmasından sonra giriş verilerinin değiştirilmesi sayesinde Z_{FQ} ve Z_{FL} bölüm 6.4.4'de tarif edilen yol ile filtre bileşenleri optimum ölçülenebilir ve elektriki verileri aşağıdaki gibi buluruz:

$$L = 12 \text{ mH}$$

$$C = 7.5 \text{ } \mu\text{F}$$

$$R = 5,4 \text{ } \Omega \text{ dur.}$$

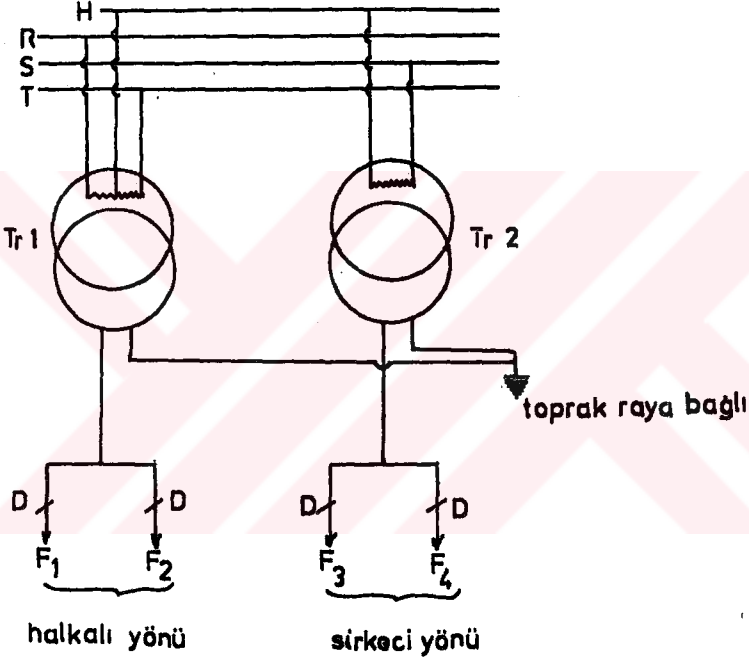
Tasarım bakımından şebeke filtresi, yağ soğutmalı bobin, direnç birimi ve bir dışarıda bulunan tek fazlı elektrolit kondansatör (içinde bir boşalma direnci mevcut) olarak tasarlanmıştır (69).

6.5. T.C.D.D Sirkeci Halkalı Hattının Beslenmesi

Trafo merkezi (Veliefendi) şu şekilde beslenmektedir: T.E.K. 'e ait 835 nolu trafo merkezine, yeraltı kablosu olarak 2 defa 150 mm^2 kesitli 35 kV'luk gerilim ile R,S,T fazları girmektedir. Bu girişler HJ13 yağlı tip ve 4 s'lik 420 A'lik disjöntörler ile korunmaktadır. Ve ayrıca özel bir bağlama şekli olan Scott tip trafo bağlantısı ile oluşturulmuştur.

6.5.1. Sistemin Nitelikleri

T.E.K. 'den 3 fazlı olarak alınan 35 kV 'luk ve 7000 kVA'lık 2 adet trafonun gerilimi Scott bağlanması sonucunda 25 kV gerilime dönüştürülerek monofaze sisteme çevrilmektedir. Trafonun bir ucu raya bir ucu da havai hatta (katenere) verilmektedir.



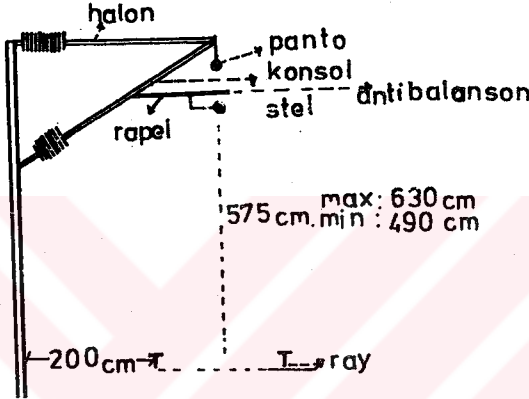
Şekil 6.5.1.1. Scott bağlama şeması.

Veliefendi besleme trafo merkezi, tek besleme merkezi olmak üzere 1 defa Sirkeci istikametine, 1 defa da Halkalı istikametine olmak üzere 2 besleme yapar. Bu 2 besleme noktaları arasında nötr hat diye tabir edilen hat mevcuttur.

6.5.2. Seyr Teli Kesiti ve Demiryolunun Beslenmesi

Tel kesiti 107 mm^2 'lik elektrolitik bakırdır. Normal gerilme 1000 kg 'dır. - 20°C de gerilme 1700 kg 'a kadar çıkabilir. Portör (taşıyıcı) için

(65 mm² lık) bronz tel kullanılmaktadır. Bunun gerilmesi de - 20°C'de 1300 kg'a kadar çıkar. Seyr teli ile taşıyıcı arasındaki mesafe 140 cm'dir.



Şekil 6.5.2.1. Direk ve techizatı.

Demiryolu besleme; hat 25 kV, 50 HZ ile beslenmektedir. Dönüş akımı raydandır. Çekilen akım pantografla (akım alıcılar) vasıtası ile araca girer.

6.6. İstanbul Hafif Metro Sistemi

6.6.1. Besleme ve Havai Kablo Sistemi

34,5 kV'luk bir enerji T.E.K'den alınıp bir kaç noktadan metro sistemi-ne verilmiştir. 34 kV'luk enerji doğrultuculu trafoların arasında dağıtılmıştır. Bu trafo merkezleri hat boyunca yaklaşık 2,5 km aralıklarla yerleştirilmiştir. 34 kV'un birkaç değişik noktadan alınması ve dahili şebeke içerisinde dağıtılması metro sistemi içerisinde yüksek kullanım imkanı sağlamaktadır. Herbir doğrultucu-trafo sistemi (tali istasyon), sistemin maksimum doğru gerilimini 750 V D.C ile sağlayan 2 adet doğrultucu trafodan oluşur. 12 darbeli tip doğrultucular, 750 V D.C lik düşük harmonikli bileşenler verip, 35 kV'luk sistem üzerinde ise düşük değerli bir harmonik bozumuna neden olur.

biliniyorsa değişik katodik koruma yöntemleri uygulanabilir. Şehirlerde bu genellikle olamayacağı için raylar çok iyi bir şekilde topraklanmalıdır. Bu İstanbul metrosu içinde yapılmıştır. Havai kablo sistemi üzerindeki bir telin düşmesi ile meydana gelebilecek gerilim değişimlerine karşı koruma için her bir trafo alanında bir toprak kaçak rölesi bulunur.

6.6.2. Sistemin Simülasyonu

Araca giden veya araçtan gelen enerji hattın topografisine ve çalışma şekline (hızlanma, frenleme ve yavaşlama) bağlı olarak değişir. Bu enerji besleme trafolarından araçlara doğru gider ve araçlar arasında dağılır. İstanbul metrosunda D.C tahrik sisteminin değişik bölümlerini incelemek ve trenlerin değişik pozisyonlarından dolayı, havai kablo sistemi ve tali istasyon üzerindeki yüklerin etkilenmelerini etüd etmek için dinamik simülasyon modelleri yapılmıştır. Bu modeller aşağıdaki bilgileri içerir:

- Hattın topografisini ve eğim durumunu,
- Tali istasyonun elektriksel fonksiyonları ve pozisyonları,
- Havai kablo sisteminin elektriksel fonksiyonları,
- Araçların mekanik ve elektriki fonksiyonları,
- Trenlerin çalışma periyodları.

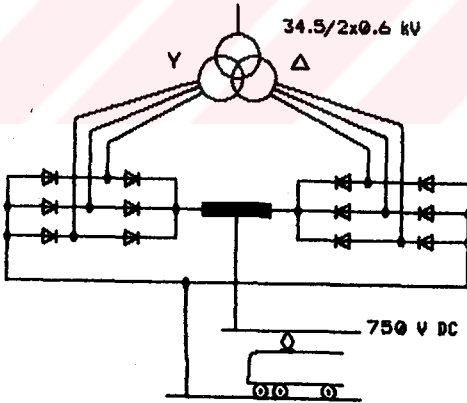
Model, herbir zaman adımında trenlerin ve D.C tahrik sisteminin değişik pozisyonlarındaki akım ve gerilimleri hesaplar ve sistemdeki parametreleri değiştirerek en uygununu araştırır.

Genelde hızlanmakta olan trenlerde havai kablo sistemindeki gerilim düşümleri nedeniyle kontak teli üzerindeki gerilim düşer ve aynı sebepten frenlemedeki tren ise gerilimin yükselmesine neden olur. Eğer gerilim düşümleri belli bir limitin altına düşerse trenin hızlanması yavaşlar ve gerilim düşümü belli bir limiti geçerse faydalı frenleme işlemi sınırlandırılmış olur. Modeldeki açık çevrim gerilimi en iyi çözümü bulmak, yüksek bir faydalı frenleme oranı elde etmek, iletim kayıplarını daha düşük tutmak ve verimli bir tren performansı elde etmek için değişik değerlerde denenmiştir. Simülasyonu dayanılarak yapılan incelemede bir doğrultucunun devre dışı kalması halinde diğer doğrultucu ve trafo sistemleri normal sürekli çalışma değerlerini korumaktadır.

6.6.3. Güç Devre Doğrultucuları

Her trafo merkezinde 2 doğrultucu bulunmaktadır. Bu doğrultucular 12 darbeli tiptendir. Doğrultucu trafosu 6 darbeli doğrultuculara bağlı olan biri Y diğeri Δ sekonder sarımlardan oluşur. 6 darbeli doğrultucuların D.C çıkışları bir self içinden birbirine bağlıdır. Ani gerilim değişimlerinde doğacak dengesizlik self tarafından önlenir. Trafonun primeri üzerindeki A.C aşırı gerilim kesicisi, gerilimi düşürünceye kadar, diyodlar D.C bara üzerindeki kısa devreye dayanabilmektedir; yani doğrultucular kısa devre yapmayacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Bu dizayn, sigorta ve D.C ayırıcıların doğrultucu diyodlarını koruması için kullanıldığı sıradan sistemlerden daha üstündür ve daha az bir bakım gerektirir. 12 darbeli doğrultucu ünitelerinin her biri 45 cm^2 lik diyodlardan oluşup karakteristik değerleri ;

sürekli çalışma için 2800 A,
2 saat için 4200 A,
1 saat için 5600 A şeklindedir.



Şekil 6.6.3.1. Doğrultucu trafosu ve doğrultucu.

BÖLÜM 7

1x25 kV VE 2x25 kV ENTERKONNEKTE ŞEBEKEDEN BESLENEN ELEKTRİK Lİ ULAŞIM DÜZENLERİNİN GENEL KARŞILAŞTIRILMASI

7.1. Giriş

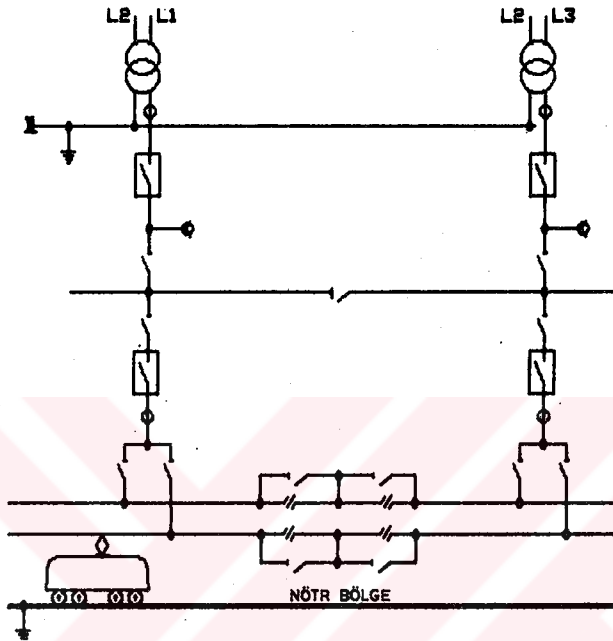
Enterkonnekte A.C. şebekesinden beslenen elektrikli ulaşım akım sistemlerinde seyr iletkeni gerilimi genelde 25 kV, frekans ise şebeke durumuna göre 50 veya 60 Hz'dir. Güç gereksinmesi, konulacak taşıtların sayısına arzulanan trafik yoğunluğuna bağlı olarak modern hızlı trenlerde, tren birimi başına 12-15 MW'a erişir. Bu güce 300 km/h hızların üstünde ulaşılır. Teknik taleplerin yanında tüm sistemin ekonomikliğı de ön plandadır. Modern yüksek güçlü trafiğın enerjisinin sağlanması :

- a) Dönüş iletkenli 1x25 kV'luk,
- b) Ototransformatörlü 2x25 kV'luk sistemlerle olur.

1x25 kV'luk sistemde ilave geri dönüş iletkeni olmaz ise ulaşım sistemi ile paralel giden sinyalizasyon hatlarında müsaade edilmeyen etkiler ortaya çıkar. Buna, toprak üstünden tali istasyona geri akan cer akımı neden olur. İşte bu geri dönüş akımının azaltılması için transformatörlerle seri olarak bağlanan bir geri dönüş iletkeni vardır. Böylece tali istasyona geri akan cer akımı aynı zamanda geri dönüş iletkeninde de akacaktır. Seyr iletkeninde işletme akımının artmasıyla hat boyunca ortaya çıkan gerilim düşümü oldukça yükseilir. Her iki temel sistemin karşılaştırılmasında, enterkonnekte şebekeden beslemede gerekli olan faz ayırma yerlerinin tali istasyon bölgesinde bulunduğu var sayılmıştır. Bu durumda tali istasyon transformatörleri besleyici 3 fazlı şebekeye bağlanmışlardır, böylece enterkonnekte A.C. şebekesinin simetrik olmayan yükü azaltılabilecektir. Nötr bölgeler amaca uygun olarak genelde 2 tali istasyon arasında serbest yol üzerinde bulunurlar.

7.1.1. 1x25 kV'luk Tali İstasyon Tekniğı

Şekil 7.1.1.1'de basitleştirilmiş 1x25 kV'luk bir ulaşım tali istasyonunun genel şeması verilmiştir.



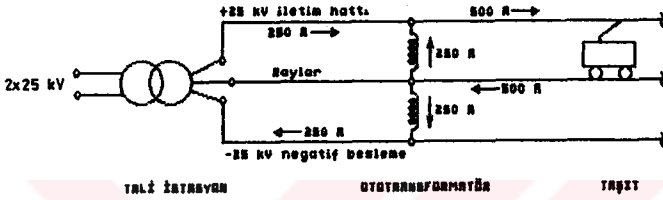
Şekil 7.1.1.1. 1 x 25 kV'lık cer tali istasyonu.

Yüksek gerilim şebekesinden besleme 2 tali istasyon transformatörü üzerinden olmaktadır. Bu transformatörler bir akım barasını beslemektedirler. Normal çalışmada boyuna ayırım açıktır. Seyr iletken bölümleri güç anahtarı üzerinden beslenir. Cer işletmesinde topraklama nedeni ile olan hata sayısı genel enerji sağlamasındakinden oldukça büyük olduğundan bugün hep vakumlu güç anahtarları kullanılmaktadır. Bunlarda yüksek kısa devre açıp kapama sayısı oldukça iyidir. Tali istasyon binası içinde ayrıca diğer ihtiyaçlar, koruma, kumanda ve uzaktan kumanda düzenleri vardır. 66 m x 48 m yer gereksinmesi de oldukça küçüktür.

Burada ayrıca diğer bir seyr iletken çıkışı da vardır. Bundan; istasyon bölgesini beslemede veya duruma göre, arıza durumunda yedek hat olarak yararlanılır.

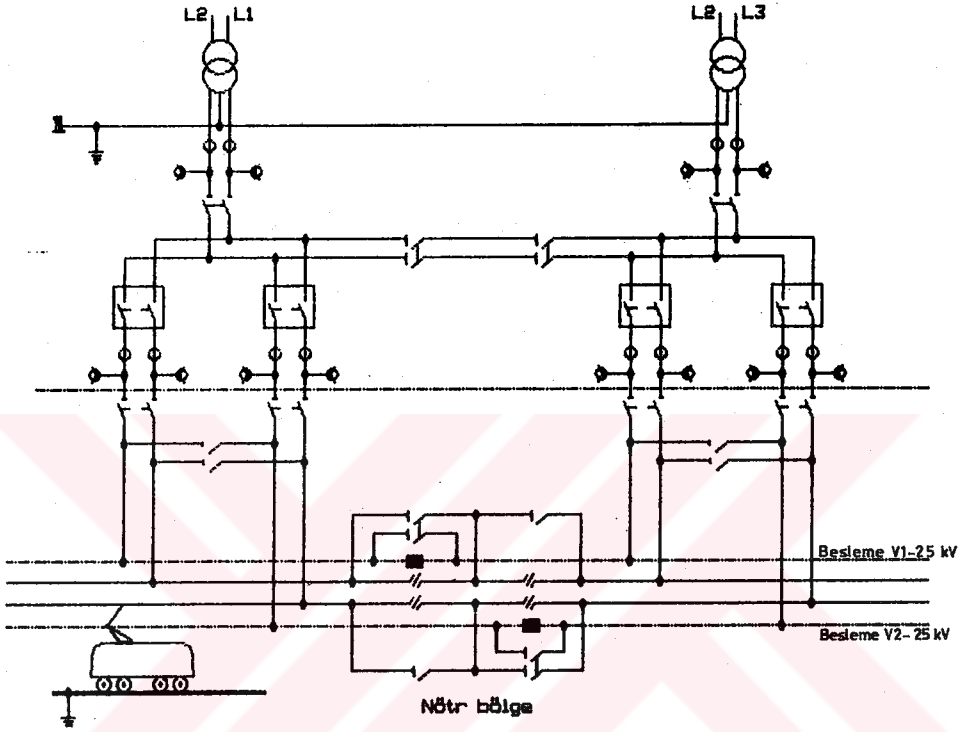
7.1.2. 2 x 25 kV'luk Tali İstasyon Tekniği

2 x 25 kV'luk sistem enerjiyi 50 kV üzerinden taşıma imkanı sağlar. Şekil 7.1.2.1'de ototransformatör bağlantısının prensibi gösterilmiştir.

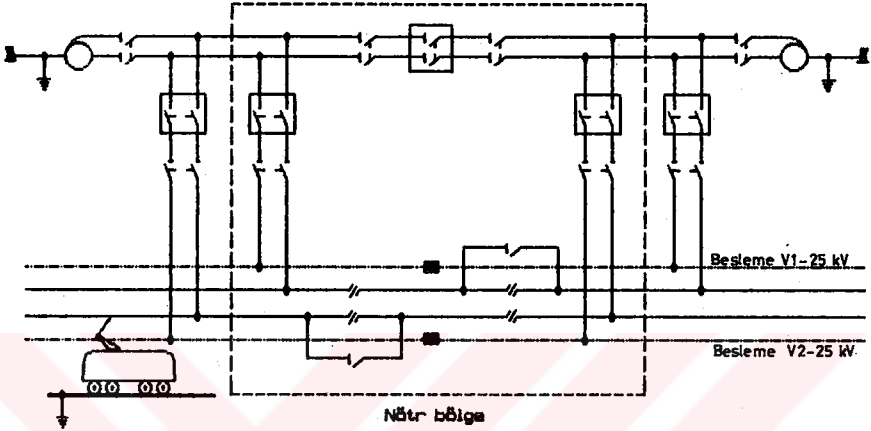


Şekil 7.1.2.1. Ototransformatör bağlantısı.

Şekilde gösterilen akım dağılışı, yolda yalnız tek bir taşıtın bulunduğu durumdur. Birçok taşıtın farklı yol bölümlerinde bulunmasında akımların dağılışını göstermek oldukça zordur. Çünkü bu akımlar taşıtların hareketi ile sürekli değişirler. Bu bağlantının en önemli bir yanı, taşıt üzerinden akan dönmüş akımının negatif besleme kablosundan akmasıdır. Bu yalnızca bir ototransformatör istasyonu ile taşıttan ayrılan yol bölümleri için geçerlidir. 2 x 25 kV'luk cer tali istasyonunun genel şeması şekil 7.1.2.2'de gösterilmiştir. Bağlantı tesisi bütünü ile 2 kutuplu olarak yapılmıştır. Yer gereksinmesi 1x25 kV'luk bağlantı tesisinin 2 katı kadardır. Bu sistemde tali istasyon mesafesi 60-65 km'dir. 2 x 25 kV'luk sistemde tali istasyonların yanında ayrıca ototransformatör istasyonları da gereklidir ki, bunlar yol boyunca 10 km'de bir yerleştirilir. 2 komşu tali istasyonun birinden birinin devre dışı kalması durumunda boyuna ayırım (hat) kapatılır ve sınırlı bir yol bölümü beslenir. Bütün ototransformatör istasyonları 2 kutuplu olarak inşa edilirler ve açık hava tesisi olarak gerçekleştirilirler.



Şekil 7.1.2.2. 2 x 25 kV'luk cer tali istasyonu.



Şekil 7.1.2.3. Boyuna ve çapraz bağlantılı ototransformatör istasyonu.

7.1.3. Karşılaştırma

Her iki ulaşım sisteminin, akım sağlama sisteminin tali istasyonlarının tekniğinin karşılaştırılmasında aynı sistem verilerinden hareket edilir. 2 hatlı bir yol (gidiş-dönüş), yüksek hızlı trafik (max hız 300 km) ve maksimum 40 km uzunluğundaki bölümlerde 4 tren birimi gözönüne alınmıştır.

1 tren biriminin gücü, klima ve diğer yardımcı işletmelerde dahil 15 MW ve $\cos \phi$ 'si 0,98 dir. 1 x 25 kV'luk sistemde tali istasyonlar arası yaklaşık 40 km, 2 x 25 kV'luk sistemde bu mesafe 60-65 km dir ve burada tali istasyonlar arasında yaklaşık 10 km'de bir ototransformatör istasyonu bulunur. Tablo 7.1.3.1'de 400 km'lik yüksek hızlı bir yol için en önemli veriler toplu olarak verilmiştir.

Tablodan görüldüğü gibi 1 x 25 kV'luk sistemde daha fazla tali istasyon gereklidir ama 2 x 25 kV'luk sistemde transformatörlü bağlantı tesislerinin toplam sayısı daha yüksektir. 1 x 25 kV'luk sistemde topraklanmış bir geri dönüş iletkeninin devreye sokulmasıyla, geri dönüş akımı yaklaşık % 15 düşürülmüştür.

	1 x 25 kV	2 x 25 kV
Tali istasyon sayısı	10	6
AT istasyon sayısı (Ototransformatör istasyonu)	-	20
Tali istasyonlar arası mesafe	40 km	65 km
AT istasyonları arasındaki mesafe	-	10-15 km
İstasyon başına kurulu güç	2x30 MVA	2x60 MVA
Primer gerilim	110 kV	110 kV
	50 (60) Hz	50 (60) Hz
Sekonder Gerilim	1 x 25 kV	2 x 25 kV
	50 (60) Hz	50 (60) Hz
25 kV'luk bağlantı tesisi,		
Tali istasyon için	1 kutuplu, kapalı sistem (bina içi)	2 kutuplu, açık sistem (bina dışı)
AT istasyonu için	-	2 kutuplu, açık sistem (bina dışı)

Tablo 7.1.3.1. Sistemlerin karşılaştırılması.

Sonuç olarak 2 x 25 kV'luk sistem tekniği daha pahalıdır ve daha fazla yer gerektirir, dolayısıyla her yerde kullanılmaz fakat enterkonnekte şebekenin, zayıf olduğu veya zor gidildiği bölgelerde avantajlar sağlar. 1 x 25 kV'luk sistem daha basittir ve bakımı daha azdır.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR

Gün geçtikçe önemi anlaşılan ve değeri artan Elektrikli Toplu Taşıma Sistemleri tüm bileşenleriyle incelenip değerlendirildiğinde bu sistemlerin elektrikli enerji düzenlerinin de mühendislik bakımından son gelişmelerin ışığı altında etüd edilmesinin gerekliliği kaçınılmaz olmuştur.

Böyle çok yönlü, çok içerikli bir çalışmada önce sistem ana hatlarıyla tanıtılmış daha sonra uygulama alanları örnekleriyle verilmiştir. Sistem ortaya konulduktan sonra esas inceleme ve araştırma konusu olan sistem hareketini sağlayan elektrik enerjisi, kaynağından itibaren genel bir değerlendirmeye alınmıştır. Bu arada enerji iletim hatlarında statik stabilite, frekans, frekans-güç ayarı, gerilim ayarı konuları ana çizgileriyle ortaya konulmuştur (Ek 1). Çünkü bir elektrikli ulaşım düzenini besleyen enerji hatları, genel enerji sisteminin veya genel durumuyla enterkonnekte şebekelerin ayrılmaz bir parçasıdır. Genel anlamda tali istasyonlar 380, 132, 66 kV vb. gibi yüksek gerilimleri istenilen 25 veya 50 kV'a dönüştürecek ünitelerdir. Kullanılan elektrikli toplu taşıma düzenleri şayet elektrikli yakın mesafe düzenleri ise, bu durumda ayrıca doğrultucu istasyonlara da gerek duyulacaktır. Bu arada elektrikli enerji iletim sistemleri olarak seyriletken hatlarının yan etkileri de önemi gereği incelenmiştir.

Daha sonra genel bir değerlendirmeye alınan tali istasyonlar enerji cinsine göre doğru akım ve alternatif akım tali istasyonlar olarak değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir. Böyle geniş kapsamlı bir çalışma, teknik literatürde şimdiye kadar yapılmamıştır. Bu tip bir çalışma tali istasyon dizaynı ve projelendirilmesinde büyük katkı sağlayacaktır.

Bu tip enerji besleme istasyon besleme istasyonlarının ülkemizdeki örnekleri olarak, T.C.D.D. Haydarpaşa-Arifiye (Ek 2), Sirkeci-Halkalı, Aksaray-Esenler hatlarında kullanılan tali istasyonları ele alınmıştır.

Böylece Elektrikli Toplu Taşıma Düzenlerinin Enerji Besleme Sistemleri içindeki yeri, sistem karakteristikleri bakımından ve uygulamalarındaki yeri ve önemi yönlerinden teknik ve bilimsel olarak değerlendirilmiştir. Bu arada enterkonnekte şebekelerdeki frekans, frekans güç ayarı, gerilim ayarı gibi her biri birer temel konu olan kısımlarda doğal olarak ayrıntıya girilememiştir.

Çalışmanın sonunda :

8.1. Elektrikli ulaşım düzenlerine elektrik enerjisi sağlayan sistemlerden beklenenler genel bir araştırma sonucunda ortaya konulmuş,

Sonra da;

8.2. Elektrikli ulaşım düzenlerinin besleme sistemlerinin karşılaştırılması sayısal örneklerle verilip, bu karşılaştırmaya ilaveten hat kayıplarını da hesaplayan bilgisayar programı hazırlanmıştır.

Bunları inceleyelim :

8.1. Elektrikli Ulaşım Düzenlerine Elektrik Enerjisi Sağlayan Sistemlerden Beklenenler

Dizelli ve akülü sistemler, genel enerji sistemlerinden bağımsız elektrikli ulaşım düzenleri olarak değerlendirilir. Bunların dışındaki elektrikli ulaşım düzenleri genelde tümüyle elektrik enerji sistemlerine bağlıdırlar. Elektrikli ulaşım düzenlerinin elektrik enerji sistemlerine bağlı olması bir dezavantaj olarak değerlendirilirse de genel anlamda sağladığı faydalar yanında bu sakınca önemsizdir. Bunun nedenleri kısaca sıralanırsa :

1. Büyük santrallerde elektrik enerjisinin üretimi düşük maliyet giderlerinde ve büyük verimde gerçekleştirilmektedir.

2. Atom santrallerinde üretilen elektrik enerjisi ulaşım amaçları için kullanılmaktadır.

3. Faydalı frenlemenin kullanılmasıyla elektrik enerjisinin geri kazanılması olanağı doğmaktadır.

4. Çok büyük güçler elektrikli ulaşım taşıtlarına yerleştirilebilmektedir. Böylece yalnızca tekerlekle ray arasındaki sürtünme katsayısı ile sınırlı olan büyük seyr hızları ve ivmelerine erişilebilmektedir.

5. Elektriksel olarak tahrik edilen ulaşım sistemleri çevreyi en az kirlüten ve etkileyen ulaşım sistemleridir.

6. Gelişen teknoloji nedeniyle özellikle otomasyon için elektrikli ulaşım sistemi en uygun sistem olmaktadır.

7. Aynı dingil düzenli elektrikli taşıtlar dizellilere göre daha az güç gerektirmektedirler.

8. Bakım onarım giderleri diğer sistemlere göre daha azdır.

Burada şu hususlar da önem kazanmaktadır :

1. Elektrikli ulaşım düzenlerine enerjinin, dışarıdan enerji besleme sistemlerinden girişinin kesintisiz olması sağlanmalıdır.

2. Elektrikli ulaşım taşıtlarına verilen elektrik enerjisi belli bir kalitede olmalıdır. (Gerilimin değeri, gerilim salınımları, frekans salınımları dikkate alınmalı).

3. Elektrikli ulaşım sistemlerine enerji verecek yardımcı istasyon gibi elektriksel tesislerin büyük yük puantlarında zarar görmemesi sağlanmalıdır.

4. Bu tesisler ekonomik işletme koşullarını sağlamalıdır, yani nominal yüke göre boyutlandırılmalıdır.

5. Elektrik enerji besleme düzenlerindeki iletim kayıpları en az olmalıdır.

6. Besleyen şebekeye enerjinin geri verilmesi (geri beslemedeki) sırasındaki etkiler ve taşıtlara enerjinin dışarıdan girişinde dış ortamda ulaşabilecek arıza edilemiyen etkiler (kaçak akım korozyonu, endüktif etki) önceden verilen sınır değerlerini aşmamalıdır.

8.2. Elektrikli Ulaşım Düzenlerinin Besleme Sistemlerinin Karşılaştırılması ve Bilgisayar Programı

Örnek alınan düzenler; 3 kV luk DC sistemle besleme, 15 kV'luk, 25 kV'luk ve 50 kV'luk A.C sistemle beslemedir.

Tek taraftan beslenen bir yol güzergahı dikkate alınmıştır. Elektrikli taşıt tali istasyondan 10 km mesafede bulunmaktadır ve 1000 t'luk bir yük katarını % 5 lik eğimli bir yolda 70 km/h hızla hareket ettirebilmek için 2000 kW'luk bir güç gerekmektedir. U_n ile nominal gerilimi gösterirsek, $\cos \phi$ 'de ortalama güç faktörü olarak alınırsa seyr iletkenindeki akımlar şu şekilde bulunur :

$$I = P / U_n \cos \phi$$

$$I_3 = 2000 \text{ kW} / 3 \text{ kV} \cdot 1 = 667 \text{ A}$$

$$I_{15} = 2000 \text{ kW} / 15 \text{ kV} \cdot 0,83 = 160 \text{ A}$$

$$I_{25} = 2000 \text{ kW} / 25 \text{ kV} \cdot 0,76 = 105 \text{ A}$$

$$I_{50} = 2000 \text{ kW} / 50 \text{ kV} \cdot 0,7 = 57 \text{ A}$$

Bu akımlarla, gerilim düşümleri genellikle şöyle bulunabilir :

$$\Delta U = I \cdot l (r \cos \phi + x \sin \phi)$$

Seyr iletkeninin km'lik empedansı şu şekilde kabul edilebilir.

$$r_3 = 0,07 \text{ } \Omega / \text{km} \quad (2 \text{ seyr iletkeni } 100 \text{ mm}^2 \text{ bakır, taşıyıcı tel } 100 \text{ mm}^2 \text{ Bronz})$$

$$Z_{15} = (0,17 + j0,17) \text{ } \Omega / \text{km} \quad (\text{seyr iletkeni } 1000 \text{ mm}^2 \text{ bakır, } \text{çelik taşıyıcı tel } 50 \text{ mm}^2)$$

$$Z_{25} = (0,19 + 0,43j) \text{ } \Omega / \text{km} \quad (\text{seyr iletkeni } 100 \text{ mm}^2 \text{ bakır, } \text{çelik taşıyıcı tel } 50 \text{ mm}^2)$$

$$Z_{50} = (0,21 + j0,50) \text{ } \Omega / \text{km} \quad (\text{seyr iletkeni } 100 \text{ mm}^2 \text{ bakır, } \text{çelik taşıyıcı tel } 50 \text{ mm}^2)$$

Bu dört sistemde; tali istasyondan 10 km mesafedeki elektrikli taşıta kadar olan gerilim düşümleri hesap edilirse şu değerler bulunur.

$$\Delta U_3 = 667A \cdot 10 \text{ km} \cdot 0,07 \Omega/\text{km} = 467 \text{ V} = \text{Nominal gerilimin } \% 15,6 \text{ sı}$$

$$\Delta U_{15} = 160 A \cdot 10 \text{ km} \cdot (0,17 \cdot 0,83 + 0,17 \cdot 0,54) \Omega/\text{km}$$

$$\Delta U_{15} = 373 \text{ V} = \text{Nominal gerilimin } \% 2,5'i$$

$$\Delta U_{25} = 105 A \cdot 10 \text{ km} (0,19 \cdot 0,76 + 0,43 \cdot 0,64) \Omega/\text{km}$$

$$\Delta U_{25} = 440 \text{ V} = \text{Nominal gerilimin } \% 1,8'i$$

$$\Delta U_{50} = 57 A \cdot 10 \text{ km} (0,21 \cdot 0,7 + 0,5 \cdot 0,71) \Omega/\text{km}$$

$$\Delta U_{50} = 286 \text{ V} = \text{Nominal gerilimin } \% 0,6'sı$$

Böylece en genel sonuç olarak, Elektrikli Toplu Taşıma Düzenlerine İlişkin Enerji Besleme Sistemleri, mühendislik açısından temel yönle-riyle incelenmiş, değerlendirilmiştir.

Çok geniş kapsamlı olan bu çalışmada bazı bölümler incelenememiştir. Örneğin, ferrozonans olayı, harmoniklerin etkisi ve önleme yöntemleri ve düzenekleri, enerji sistemlerinin optimum dizaynı vb. gibi herbiri bir tez çalışmasının konusu olan bu problemlerin de incelenip değeri-lendirilmesi bu sistemlerin verimini ve kalitesini arttıracaktır.

Çalışma bu şekliyle daha önce de belirtildiği gibi bu tip sistemleri etüd edenlere, dizaynında çalışacaklara teknik faydalar sağlayacaktır.

**Elektrikli Ulaşım Düzenlerinin Besleme Sistemlerinin
Karşılaştırılmasını Ve Hat Kayıplarını Veren
Bilgisayar Programı.**

Örnek alınan düzenler ; 3 KV 'luk DC sistemle besleme, 15 KV 'luk ,
25 KV 'luk ve 50 KV 'luk AC sistemle beslemedir.

Tektaraftan beslenen bir yol güzergahı araştırılacaktır. Elektrikli taşıt tali istasyondan 10 Km mesafede bulunmaktadır ve 1000 t luk bir yük katarını % 0.5 lik eğimli bir yolda 70 Km/h hızla hareket ettirebilmek için 2000 Kw lik bir güç gerekmektedir. Un ile nominal gerilimi gösterirsek $\cos(\phi)$ de ortalama güç faktörü olarak alınırsa seyir iletkenindeki akımların, gerilim düşümlerinin, yüzde gerilim düşümlerinin ve hat kayıplarının bulunmasında aşağıdaki program kullanılmıştır.

```

}
{ Bu Program TURBO PASCAL 5.5 Derleyicisinde hazırlanmıştır. }

Uses Crt;
Var
    P, T : Integer;
    Rad, Z : Real;
    I, DeltaU, u, Pk : Array[1..4] of Real;
Const
    L : Integer = 10; { Km. }
    Un : Array[1..4] of Real = ( 3 , 15 , 25 , 50 ); { KVolt. }
    Fi : Array[1..4] of Real = (0 , 33.9 , 40.536 , 45.57); { Derece. }
    R : Array[1..4] of Real = (0.07 , 0.17 , 0.19 , 0.21); { /Km. }
    Xl : Array[1..4] of Real = (0 , 0.17 , 0.43 , 0.50); { /Km. }

Procedure Yaz(X, Y: Integer; S:String;
    Ya:Real ;s1:String; Basamak:integer);
Var
    Yazı : String;
begin
    Str(Ya:7:Basamak, yazı);
    gotoXY(x,y);
    WriteLn(S,yazı,s1);
end;

Begin { Ana program başlangıcı }
    ClrScr;
    Write('Sistemi için gerekli güç...P(KWatt)=');
    ReadLn(p);
    ClrScr;
    WriteLn(' HESAPLANAN DEĞERLER ');
    WriteLn;
    WriteLn;
    Write(' Besleme G. I DeltaU');
    WriteLn(' Xu R*I² ');
    Write(' ----- ');
    WriteLn(' ----- ');

```

```
For T := 1 To 4 Do
```

```
  Begin
```

```
    Rad := (Fi[T]*Pi/180);
```

```
    I[T] := P/(Un[T]*Cos(Rad));
```

```
    Yaz(15, T+5, '', I[T], ' Amper', 3);
```

```
    Yaz(1, T+5, '', Un[T], ' KV.', 0);
```

```
  end;
```

```
For T := 1 To 4 Do
```

```
  begin
```

```
    Rad := (Fi[T] * Pi / 180);
```

```
    DeltaU[T] := I[T]*L*( R[T]*Cos(Rad) + Xl[T]*Sin(Rad) );
```

```
    Pk[T] := (I[T] * I[T] * L * R[T]*Cos(Rad))/ 1000;
```

```
    u[T] := (DeltaU[T]*100)/(Un[T]*1000);
```

```
    Yaz(30, T+5, '', DeltaU[T], ' Volt' ,3);
```

```
    Yaz(45, T+5, '', u[T], ' Volt.' ,3);
```

```
    Yaz(60, T+5, '', Pk[T], ' KWatt' ,3);
```

```
  end;
```

```
Yaz(39, 11, 'Verilen Sistem Gücü ', P, ' KWatt.', 0);
```

```
Readln;
```

```
end.
```

HESAPLANAN DEGERLER

Besleme G.	I	DeltaU	%u	$R \cdot I^2$
3 KV.	666.667 Amper	466.667 Volt	15.556 Volt.	311.111 KWatt
15 KV.	166.667 Amper	378.980 Volt	2.527 Volt.	36.412 KWatt
25 KV.	105.263 Amper	446.178 Volt	1.785 Volt.	16.000 KWatt
50 KV.	57.140 Amper	288.019 Volt	0.576 Volt.	4.800 KWatt
Verilen Sistem Gücü				2000 KWatt.

EKLER

EK 1. ENERJİ İLETİM HATLARININ STABİLİTESİ

1. Statik Stabilite

1.1. Kavramlar ve Tanımlar

Şimdiye kadarki düşüncelerde, elektrik enerji-iletim sisteminin stasyonier işletme durumunda bulunduğu koşulundan yola çıkılarak hareket edilmisti. Yani sistemi tanımlamada kullanılan bütün büyüklükler sabit büyüklükler olarak ele alınmişti.

Hatalı akım hesabı, elektrik devre tesislerinin koruma donanımlarının ölçülendirilmesi için kullanıldığı sürece, her hangi bir zamandaki bir defalık tetkik tamamıyla uygundur. Eğer aynı zamanda bütün sistemin zamansal davranımı araştırılmak zorundaysa bütün hata durumları için, senkron işletmenin sağlandığına bakılmalıdır. Bu durumda, ω_0 açısal frekansını ω_m mekanik devir sayısını ve p kutup sayısını gösterirse yani $\omega_0 = p \omega_m$ verilmişse, senkron generatör diğer generatörlerle bir şebeke üzerinden bağlanmışsa şebekeyle ve diğer makinalarla senkron işletmede bulunmaktadır. Tüketici generatörlerinin senkronizasyonunun sağlanması, kesintisiz enerji temini için şarttır. Eğer diğer bütün senkronize bağlı generatörler aynı elektrik açısıyla işletilirse, buradan enerji temin eden sistem senkronize işletmededir. Pratik düşüncede senkronize makina, eğer endüi kayması ortaya çıkmazsa senkronizesini muhafaza etmektedir. İletim sisteminin senkronizeyi koruma özelliği stabilite olarak tanımlanır. Tabii bu arada aşğıdaki iki tanım arasındaki fark ayırtedilmektedir: Eğer küçük bir arızadan sonra diğer sabit çıkış durumundaki geçişte aynılık veya ona yakınlık gösterirse, elektrik enerji iletim sistemi statik stabilite durumundadır. Ufak arıza olarak sistemin zamanla değışikliği (mesela; yükün rampa biçiminde değışikliği) ya da ufak salınımların meydana gelmesi gibi etkiler tanımlanabilir. Bu durumda sistemi tanımlayan denklemler lineerdir. Buna göre statik stabilite; bir yandan türbinlerin tahrik

momentiyle, diğer taraftan sistem yükünün karşı momenti arasındaki denge-
nin araştırılmasında ortaya çıkar.

İleriki düşünceler için, P elektrik gücüyle, M_e mil momenti arasındaki
orantıdan yola çıkılabilir. İlişikteki bağıntıda ω_o sabit olduğu için:

$$M_e = \frac{P}{(\omega_o/P)} = \frac{P}{\omega_m} \quad \text{yazılır.} \quad (1.1.1)$$

Sadece yavaş ve ufak arızalar incelendiği sürece ω_o sabit açısal hızı-
nın hipotezi iyi bir tahminle geçerlidir. Eğer bu hata takibi sabit senk-
ronize işletmenin durumunu takip ederse, bir elektrik enerji-iletim
sistemi; geçici stabilite durumundadır.

Geçici stabilitenin araştırılması için, enerji temin sisteminin
başlangıçtaki işletme durumu ve hata takibi, bunlara ek olarak şebeke
ağının bütün topoloji değişimleri tamamen tanımlanmış olması gerekir.

Bu noktada statik stabilitenin kontrolü için senkron generatörün
(bir de tahrik makinasının) kontrol donanımının dikkate alınmadığına
işaret etmek gerekir. Başka bir deyişle şu şart konulabilir; Küçük arı-
zalar, sabit tahrik gücü ve sabit endüel geriliminde ortaya çıkarlar.
Böylece tabii stabilite sınırı elde edilir (71).

1.2. Stabilite İncelemesinin Tanımı

Büyük bir şebekeyi besleyen senkron generatörün statik stabilite
sınırı (senkronize kaybolmadan) maksimum nakledilebilir güce denktir.
En basit sistem, büyük bir şebekede sabit gerilimle besleme yapan bir
şebekeden oluşmaktadır. Sabit gerilimden; faz durumunda incelenen
senkron generatörün beslenmesinden etkilenmemesi anlaşılmalıdır. Bun-
dan başka sabit şebekenin frekansı, incelenmiş olan senkron generatör
tarafından etkilenmemektedir. Bu durum eğer sabit şebekenin generatör-
lerinin toplam gücü; incelenen generatörün gücüne göre fazla ise geçer-
lidir. Burada, senkron generatör adı altında sadece tek bir makina akla
getirilmemelidir. Doğrudan ya da dolaylı olarak paralel bağlanmış senk-
ron generatörler, ek makinalarla ilgili toplam güçle biraraya getirile-
bilirler. Eğer sabit şebekenin bu şartı yerine getirilmezse,

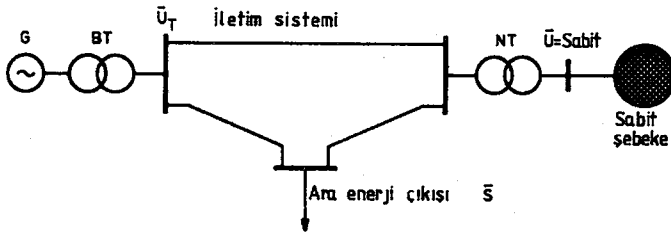
geçici stabilite araştırmaları yerine getirilmelidir. Büyük güçlerin uzak mesafelere naklinde bu durum birbirinden uzak yapılmış şebekeler için büyük önem teşkil eder. Modern güç merkezi tesislerinin büyük güçleri aracılığıyla (İlgili nakil problemleri şartına bağlı) geçici stabilite genelde büyükten bir değer kazanır. Bu arada analitik beyanlar (bununla beraber pratik stabilite araştırmaları için ilerleyen simülasyon metodları kurulmak zorundadır) belirli sınırlara oturtulmaktadır.

1.3. Elektrik Güç Merkezinin Statik Stabilitesi

1.3.1. Sistem Yapısı

Şekil 1.3.1 arada bulunan şebeke üzerinden üretim sistemine sabit gerilimle besleme yapan elektrik besleme merkezini göstermektedir. Statik stabilitenin incelenmesi için besleme yapan generatörün M_a mekanik işletme momenti ile şebekenin sebep olduğu yüklerle meydana gelen elektrik momenti M_e arasında, ilgili işletme durumunda denklik incelenmelidir. Daha ileri düşünceler için moment ve güç arasındaki ilişkiler yararlı olacaktır. Şebekeyi besleyen P gücü; generatörün $\bar{E}$ endüj gerilimine ve sabit şebekenin uç gerilimi U 'ya ve aynı zamanda bu iki gerilim arasındaki δ faz açısına bağlıdır. Referans ekseni olarak U sabit geriliminin yönü seçilir.

Eğer şebeke yükü büyütülürse generatörün gücü P artar. Bu sayede δ faz açısının değeri, endüj bir ya da daha fazla kayma gösterinceye kadar çıkmaktadır. Bu sayede makina temposunu değiştirir ve bu arada stabilite sınırı aşılır.



G:Generatör BT:Blok Transformator NT:Şebeke Transformator

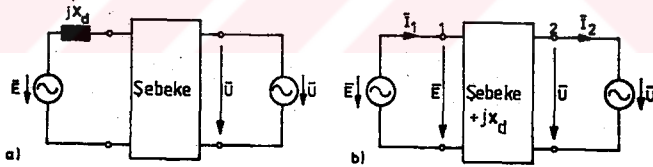
Şekil 1.3.1. Enerji besleme sisteminin sistem şeması.

Bu düşünceler aşağıdaki sistematik ilerlemelere götürür. İlk olarak bölüm 1.3.2'de generatör tarafından verilen P gücü, bir yandan endü ve uç geriliminin fonksiyonu olarak diğer taraftan da faz açısına bağlı olarak belirlenir. Maksimum olarak verilen güç bölüm 1.3.3 te bulunan olaydaki stabilite kriterini formülize yoluna götürmektedir. Nihayet bölüm 1.4'te işletme şartlarının kontrolü altında maksimum nakil gücünün elektrik besleme ünitesi için sabit bir şebekede belirlenebileceğini göstermektedir. Bölüm 1.5'te de iki elektrik besleme ünitesinin statik stabiliteleri, sonuçların genellendirilmesi için incelenmiştir.

1.3.2. Besleme Gücü

Şekil 1.3.1'de verilen generatörün P etki gücü aşağıdaki düşünceyle hesaplanabilir. Stasyonel durumdaki senkron generatör için Şekil

1.3.2 söz konusudur, eşdeğer devre jX_d senkron boyuna reaktans ve E gerilim kaynağından oluşmaktadır. Generatör ve sabit şebeke bulunan nakil sistemini dört kutuptan oluşacak şekilde tasvir edersek eşdeğer devre Şekil 1.3.2.a'daki gibi olur. jX_d 'yi iletim şebekesiyle dört kutupta bir araya getirirsek Şekil 1.3.2.b'yi elde ederiz.



Şekil 1.3.2. Şekil 1.3.1'deki enerji iletim sisteminin tek fazlı eşdeğer devre şeması.

- 1 ve 2 uçları arasında, 4 kutup enerji iletim sistemi elemanlarını kapsar,
- 1 ve 2 uçları arasında, şebekenin yanında ayrıca senkron generatörün jX_d boyuna reaktansını da içerir.

Generatörden, nakil şebekesi üzerinden sabit şebekeye akan P gücü, dört uçlu şekliyle akım ve gerilim yönünün dikkate alınmasıyla hesaplanır. Generatör akımı $\bar{I}_1$, şebeke akımı $\bar{I}_2$ için dört kutup empe-

dansıyla ve şekil (1.3.2)'de seçilen akım yönü için aşağıdakiler geçerlidir :

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{\bar{Z}_{11}} \bar{E} - \frac{1}{\bar{Z}_{12}} \bar{U} \quad (1.3.1)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{\bar{Z}_{21}} \bar{E} - \frac{1}{\bar{Z}_{22}} \bar{U}$$

$\bar{Z}_{11}$ 'den $\bar{Z}_{22}$ 'ye kadar olan dört empedans değerinin belirlenmesi, güç hesaplanması durumunda ele alınacaktır. Generatörün üç fazlı P gücü (72) :

$$P = \operatorname{Re} \{ \bar{S} \} = 3 \operatorname{Re} \{ \bar{E} \bar{I}_1^* \} = 3 \left(E^2 \operatorname{Re} \{ 1/\bar{Z}_{11}^* \} - \operatorname{Re} \{ \bar{E} \bar{U}^* \frac{1}{\bar{Z}_{12}} \} \right) \quad (1.3.2)$$

ile verilmiştir.

Kutup koordinatlarının düzeniyle kompleks dört kutup empedansı için:

$$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_{11}/\phi_{11}, \quad \bar{Z}_{22} = \bar{Z}_{22}/\phi_{22}, \quad \bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{12}/\phi_{12}, \quad \bar{Z}_{21} = \bar{Z}_{21}/\phi_{21} \quad (1.3.3)$$

(1.3.2) eşitliğiyle güç (P) için şu sonuç çıkar:

$$P = 3 \left(\frac{E^2}{Z_{11}} \cos \phi_{11} - \frac{EU}{Z_{12}} \cos (\delta + \phi_{12}) \right) \quad (1.3.4)$$

Bu arada δ açısı; $\bar{E}$ endüj gerilimi ve çıkış eksenini tanımlayan U sabit gerilimi arasında tanımlıdır. Senkron makinanın teorisinde endüj açısı altında normalde generatörün endüj gerilimi ve bağlantı ucu gerilimi arasındaki açının anlaşıldığına işaret etmek gerekir.Yine de, δ faz açısını endüj açısı olarak değil de, endüj gerilimiyle ve sabit gerilim arasındaki açı olduğunu tanımlamakta yarar vardır.Yani,

$$\delta = \angle \bar{E} - \angle \bar{U} \quad (1.3.5)$$

(1.3.4) eşitliği herhangi bir generatörün güç diyagramı için genel bir ifadedir. (Burada generatör herhangi bir şebeke üzerinden sabit bir şebekeyi beslemektedir.)

Senkron makina tarafından beslenen P gücü δ açısına bağlıdır. Bu güç, maksimum değer olan $P_{\max}$ 'a kadar çıkarılabilir. Eğer (1.3.4) eşitliğinde açı değeri $(\delta + \phi_{12}) = 180^\circ$ olursa bu güce varılmış olur. Yani;

$$P_{\max} = 3 \left(\frac{E^2}{Z_{11}} \cos \phi_{11} + \frac{E \cdot U}{Z_{12}} \right) \quad (1.3.6)$$

olur.

Stabilite incelemelerinde çoğu zaman generatör ve sabit şebeke arasındaki nakil elemanlarının ohmik dirençleri ihmal edilebilir. Şu şart koşulursa; dört uçlunun empedansları saf imajiner büyüklüklerdir. Yani açılar $\phi_{11} = \phi_{12} = 90^\circ$ dir. Bununla bu olayda P verilen gücü için $Z_{12} = j X_{12}$ ile ilgili eşitlik (1.3.4) geçerlidir.

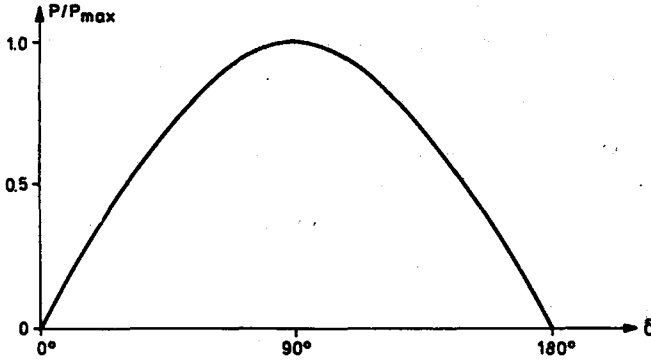
$$P = 3 \cdot \frac{EU}{X_{12}} \sin \delta \quad (1.3.7)$$

olur.

(1.3.7) eşitliği, sabit bir şebekede kayıpsız nakil sistemi üzerinden ara alıntı olmaksızın etki gücünün güç diyagramıdır. Generatör tarafından beslenen P gücü, δ açısıyla sinüs biçiminde değişerek ve $\delta = 90^\circ$ değerinde maksimum değerine ulaşır.

$$P_{\max} = 3 \frac{EU}{X_{12}} \quad (1.3.8)$$

Şekil 1.3.3'teki güç diyagramı eşitlik 1.3.7'ye göre çizilmiştir. Bu arada P gücü 1.3.8 eşitliğiyle verilen, $P_{\max}$ değerine dayanmaktadır.



Şekil 1.3.3. Kayıpsız ve ara enerji çıkışı olmaksızın, bir enerji iletim sistemi üzerinden sabit bir şebekenin sant-ral beslemesinin güç eğrisi.

Statik stabilitenin belirlenmesi için güç diyagramı kullanmadan önce P 'nin belirlenişi için kullanılan $\bar{Z}_{11}$ ve $\bar{Z}_{12}$ dört kutup empedansı ayrıntılı olarak incelenmelidir. Şekil 1.3.2.b dört kutup sağ taraftan kısa devre yapılırsa (bu durum sabit şebekeye uygundur) yani $U = 0$ konursa (1.3.1) eşitliğiyle $\bar{E}/\bar{I}_1$ ve $\bar{E}/\bar{I}_2$ bölümleri hesap edilebilir. Bunlar da doğrudan aranan empedansları gösterir.

$$\left. \bar{E}/\bar{I}_1 \right|_{U=0} = \bar{Z}_{11} \quad \text{ve} \quad \left. \bar{E}/\bar{I}_2 \right|_{U=0} = \bar{Z}_{12} \quad (1.3.9)$$

Yukarıdakilerin hesaplanmasında nakil sistemini generatör ile sabit şebeke arasında tek fazlı eşdeğer devreyle göstermekte yarar vardır. $\bar{Z}$ ve $\bar{\lambda}$ yardımcı büyüklükleri kullanılırsa (73);

$$\bar{E} = \bar{Z} \bar{I}_2 \quad \text{ve} \quad \bar{I}_1 = \bar{\lambda} \bar{I}_2 \quad (1.3.10)$$

olur.

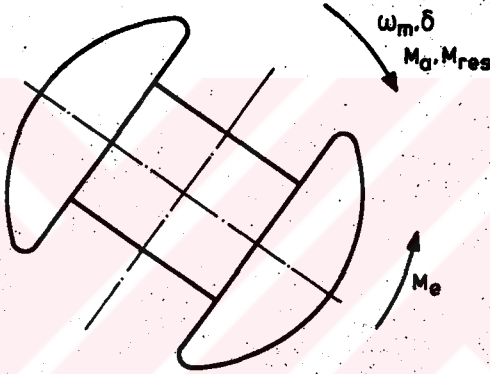
Böylece aranan empedanslar, (1.3.4)'ten (1.3.8)'e kadar olan denklemlerin değerini bulmak için

$$\bar{Z}_{12} = \left. \bar{E}/\bar{I}_2 \right|_{U=0} = \bar{Z} \quad \text{ve} \quad \bar{Z}_{11} = \left. \bar{E}/\bar{I}_1 \right|_{U=0} = \bar{Z}/\bar{\lambda} \quad (1.3.11)$$

aracılığıyla verilmiştir.

1.3.3. Statik Stabilite Kriteri

Daha önce de belirtildiği gibi senkron makinanın endüisinin durumu şebekenin U sabit gerilimine göre statik stabilite kriterinin tanımı için büyük bir önem teşkil etmektedir. Şekil 1.3.4 $p = 1$ olan iki kutuplu senkron makinanın endüisini, aç ve dönme momentleriyle göstermektedir.



Şekil 1.3.4. Çıkık kutuplu senkron makina açılarının ve döndürme momentlerinin yerlerinin tesbiti.

Üstel indeks "o" aşağıda stasyoner çıkış durumunu tanımlamaktadır. Dönme momenti ve gücü arasındaki ilişki için (1.1.1) eşitliği geçerlidir. Kayıpsız bir iletimde M_e^o elektrik dönme momenti için (1.3.7)'deki eşitlikle aşağıdaki ilişki geçerlidir:

$$M_e^o(\delta^o) = P^o / \omega_m^o = (P_{max} / \omega_m^o) \sin \delta^o \quad (1.3.12)$$

Mekanik işletme momenti M_a değişmeksizin, beklenilmeyen bir arızayla endüi açısı δ^o dan $\Delta\delta$ 'ya kadar artar. Bu yüzden elektrik momenti M_e^o de ΔM kadar değişme olur. Denge şartından dolayı arızadan önce sabit durumda

$$M_{res}^o = M_a^o - M_e^o(\delta^o) = 0 \quad (1.3.13)$$

sonucu $\Delta\delta > 0$ aç değişikliği, moment değişimi hali için

$$\Delta M_{res} = M_a^0 - (M_e^0 + \Delta M_e) = -\Delta M_e \quad (1.3.14)$$

dir. Statik stabilitenin sınırları içinde sadece ufak açı değişimleri $\Delta\delta$ incelendiği için, (1.3.14) eşitliği lineerleştirilebilir.

$$\Delta M_e = \frac{\partial M_e}{\partial \delta} \Big|_{\delta = \delta^0} \Delta\delta = c\Delta\delta \quad (1.3.15)$$

$$\text{ile } c = (P_{max}/\omega_m^0) \cos\delta^0 \quad (1.3.16)$$

Böylece netice veren ΔM_{res} momenti (1.3.14'le ilgili) bir arızadan sonra aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\Delta M_{res} = -c\Delta\delta \quad (1.3.17)$$

(1.3.16) eşitliği, c orantı sabitinin, $\Delta\delta$ açı değişimiyle sonuç ΔM_{res} dönme momenti arasında sadece $0 \leq \delta^0 \leq 90^\circ$ arasında pozitif olduğunu gösteriyor.

Senkron generatörün, pozitif $\Delta\delta > 0$ açı değişimi (endüinin hızlanması) denkleğinde statik stabil işletme için nihai ΔM_{res} momenti negatif olmak zorundadır. Yani endüi frenlemelidir. Şayet açı değişimi $\Delta\delta < 0$ ise, yani makina ek yüklerle yüklenirse, endüi ilk önce frenlenir. Statik stabilitenin sabit tutulması için şimdi de nihai momentin $\Delta M_{res} > 0$ olmak zorundadır. (1.3.16) ve (1.3.17) denklemlerinden bu iki şart sadece;

$$0 \leq \delta^0 \leq 90^\circ \quad (1.3.18)$$

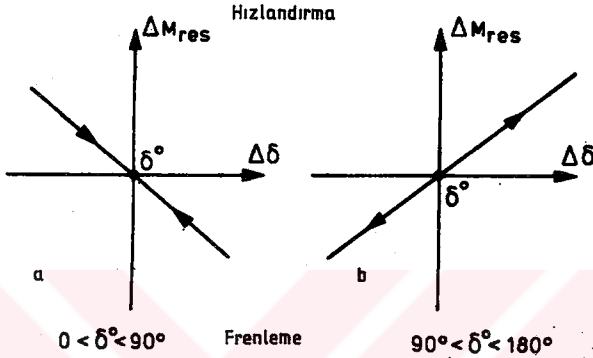
aralığında yerine getirilmektedir. Bu aralık (1.3.18) statik stabil işletme aralığı olarak tanımlanır. Stabil olmayan işletme aralığı:

$$90^\circ \leq \delta^0 \leq 180^\circ \quad (1.3.19)$$

arasındadır. Bu menzilde c (δ^0) negatiftir. Bununla ΔM_{res} nihai momenti endüinin ilk durumuna dönememesi için ana arızanın şiddetinin artmasına neden olur (ilk durum δ^0 dir).

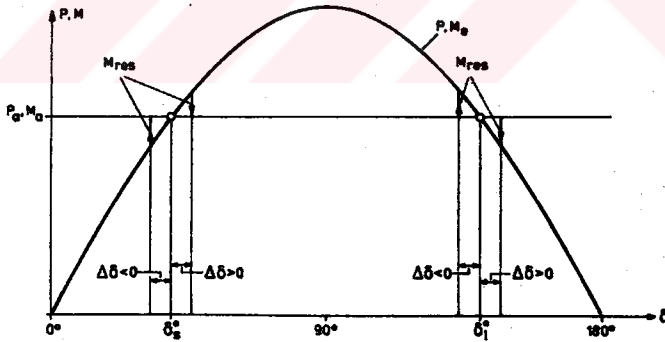
Örnek: Arıza $\Delta\delta > 0$ ise yani endüiyi hızlandırıyorrsa nihai moment $\Delta M_{res} > 0$ olacaktır. Bu sayede endüi artan bir şekilde hızlanacaktır. Bu durumda statik stabilite mevcut değildir. Şekil 1.3.5 statik senk-

ronize ΔM_{res} dönme momenti ilişkilerini göstermektir. a) Stabil denklik durumu için, b) Stabil olmayan denklik durumu için.



Şekil 1.3.5. Stabil ve stabil olmayan bir bölgede statik senkronize moment.

Şekil 1.3.6 kayıpsız iletimin momentlerini ya da güç diyagramını gösterir.



Şekil 1.3.6. Sabit bir şebekede santral beslemesinin stabil ve stabil olmayan işletme noktası.

M_a işletme moment sabiti, P_a işletme gücü için denge şartını yerine getiren δ_s^0 ve δ_1^0 olmak üzere iki olası işletme noktası ortaya çıkar.

Önceki düşüncelere bağlı olarak δ_s^0 'da statik stabil denge, δ_1^0 'da stabil olmayan denge söz konusudur. Kısaca güç merkezi beslemesinin statik stabil menzilli sabit bir şebekede (1.3.18) dengesiyle verilir. Bu arada statik stabilite aralığı :

$$\left. \frac{dP}{d\delta} \right|_{\delta=\delta^0} > 0 \quad (1.3.20)$$

geçerlidir. Stabil olmayan denge ise

$$\left. \frac{dP}{d\delta} \right|_{\delta=\delta^0} < 0 \quad (1.3.21)$$

şartıyla belirtilmiştir.

1.4. Güç Merkezi Beslemesinin Sınır Gücü

1.4.1. İşletme Sınır Şartları

Generatör ile sabit şebeke arasındaki iletim sistemi alınır (uygun şekil 1.3.1) generatörden alınan maksimum $P_{\max}$ gücü (1.3.6) eşitliğiyle belirtilir. 1.3. bölümünde bu denklemden yola çıkarak statik stabilite aralığı : $\bar{E}$ endüj gerilimi ve sabit U şebeke gerilimi arasındaki açı $0 < \delta < 90^\circ$ olarak tesbit edilmiştir. $P_{\max}$ sınır gücü kayıpsız durum için (uygun eşitlik 1.3.8) $E_{\max}$ maksimum endüj gerilimiyle verilmiştir.

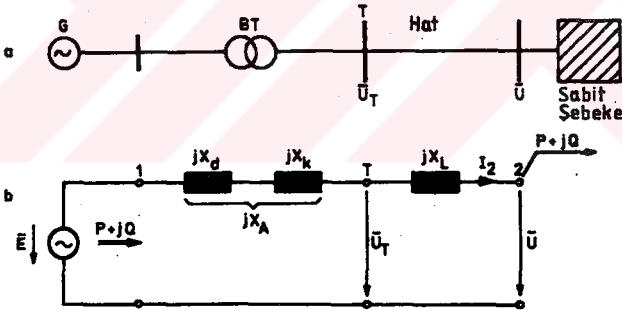
Bu bölümde iletim şebekesinde, gerilim sınırlamalarının $P_{\max}$ sınır gücünü etkileyip etkilemediğini ve nasıl olduğu sorularına cevap aranır. Sabit U geriliminden yola çıkılırsa aşağıdaki konu kontrol edilmelidir. Eğer iletim şebekesinde düğüm gerilimleri belirtilen gerilim sınırlamalarıyla verilirse, $\bar{E}$ endüj geriliminin değerini $\bar{E}_{\max}$ 'a çıkarılıp çıkarılamayacağı diğer bir deyişle ileriki düşüncelerde aşağıdaki sorular yöneltilecektir: Hangi şartlar altında statik stabilite sınırı ve bununla $P_{\max}$ sınır gücünün $E_{\max}$ maksimum tahrik gerilimiyle verildiği iddiası ve hangi durumlarda $P_{\max}$ sınır gücü iletim şebekesinin gerilim şartlarıyla yani $E < E_{\max}$ $\delta = 90^\circ$ de verildiğidir.

Diğer düşünceler için şekil 1.3.1'de gösterilen şebekeden hareket edilmektedir. İşletme sebeplerinden dolayı burada sekonder transformatörün uç gerilimi U_T 'nin değeri sabit U geriliminin değeriyle aynı olmak

zorundadır. Bununla; sekonder uç gerilimi izolasyon sebeplerinden dolayı U sabit gerilimini geçmemesi işletme şartıdır. Yani: $U_T = U$ (1.4.1) şartının gösterilmesi $P_{\max}$ sınır gücünün artık her durumda senkron generatörün $E_{\max}$ maksimum gerilimle verilmediği, aksine $\delta = 90^\circ$ şartıyla sınırlandırılmıştır. Başka bir deyişle hangi şartlar altında $P_{\max} = f(\delta, E)$ sınır gücü $\delta = 90^\circ$ ile ya da $E = E_{\max}$ ile sınırlanması ve izolasyon koordinesi gerilimi sebeplerinden dolayı da iletim şebekesinde sınırlanmak zorunluluğu araştırılmalıdır.

1.4.2. Statik Stabilité Sınırı ve Gerilim Şartları

(Şekil 1.4.1.a)'da bir senkron makina blok transformatör ve nakil hattı üzerinden $\bar{S} = P + jQ$ gücünü sabit bir şebekeye U uç gerilimiyle beslemektedir. Şekil 1.4.1.b'de bu şebeke düzenine ait tek fazlı eşdeğer devre şeklini göstermektedir. $P_{\max}$ sınır gücü, işletme şartının tam uyulması (1.4.1) halinde belirlenmelidir (74).



Şekil 1.4.1. $U = U_T$ işletme koşullu sabit bir şebekede santral beslemesi.

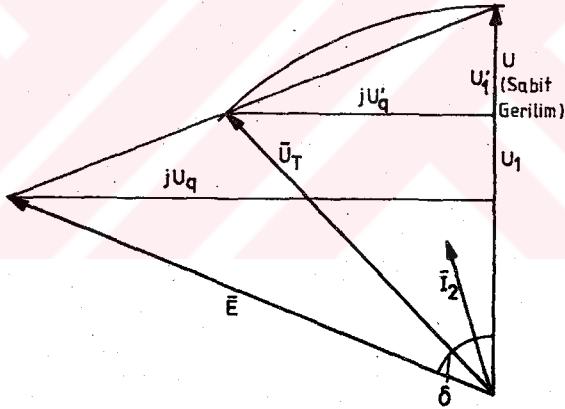
Matematiksel ifadelerde basitlik sağlayabilmek için generatörle sabit şebeke arasındaki ohmik kayıplar ihmal edilmektedir. Bu yüzden generatörden verilen P gücü ve sabit şebekeyi besleyen güç eşittir. Bundan başka iletim hattının admitansı ihmal edilmektedir. Şebekeyi besleyen Q gücü isteğe göre seçilemediği aksine P gücünün fonksiyonu olarak tayin edilmek zorunda olduğu için (1.4.1)'deki gerilim şartı etkisini göstermektedir.

$Q = Q(P)$ (1.4.2) fonksiyonunu belirleme Şekil 1.4.1.b deki 1 ve 2 nolu uçlar arasında $\Delta \bar{U}$ gerilim düşümünü hesaplamakla olur. İlk adımda blok transformatörün T sekonder ucuyla sabit şebeke arasındaki $\Delta \bar{U}'$ voltaj düşümünü hesaplamak gerekir. $\Delta U'$ nin boyuna ve enine gerilim olarak ayrımında

$$\Delta \bar{U}' = U_1' + j U_q' = j X_L \bar{I}_2 \quad (1.4.3)$$

şeklinde, fazör diyagramı Şekil 1.4.2'ye göre işletme şartının dik-kate alınmasıyla (1.4.1) şematize edilir. Bundan da şu şart ortaya çıkar:

$$(U + U_1')^2 + (U_q')^2 = U_T^2 = U^2 \quad (1.4.4)$$



Şekil 1.4.2. 1 ve 2 uçları arasındaki gerilim düşümünün hesaplanmasındaki fazör diyagramı.

U_1' işareti bütün işaretlerin genellemesinin etkisi olmaksızın pozitif varsayılmaktadır. Bu ifade U sabit gerilimin değeriyle normlandırılmasından sonra şu hali alır:

$$1 = (1 + u_1')^2 + (u_q')^2 \quad (1.4.5)$$

normlandırılmış büyüklükler tanıma uygun şekilde kullanılmıştır.

$$\Delta \bar{u}' = \Delta \bar{U}' / U = U_1' / U + j U_q' / U = u_1' + j u_q' \quad (1.4.6)$$

dır.

(1.4.3) eşitliğindeki $\bar{I}_2$ akımını $P + j Q$ gücüyle yerine koyabilmek için $\bar{E}$ endüti gerilimiyle U sabit şebeke gerilimi arasındaki toplam gerilim düşümünü hesap etmek gerekir. $X = X_A + X_L$ ile,

$$\Delta \bar{U} = \bar{E} - \bar{U} = j X \bar{I}_2 = \frac{jX}{3U} (P - j Q) \quad (1.4.7)$$

geçerlidir. $\bar{I}_2$ akımı üç fazlı belirtilen $\bar{S}$ gücüne uygun olarak verildiği için

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{S}^*}{3U} = \frac{1}{3} \frac{P - j Q}{U} \quad (1.4.8)$$

(1.4.8) eşitliği (1.4.7)'de yerine koyup U ile normlondırırsak;

$$\frac{\bar{E}}{U} - 1 = \bar{e} - 1 = \frac{\Delta \bar{U}}{U} = u_1 + j u_q = \frac{XQ}{3U^2} + j \frac{XP}{3U^2} \quad (1.4.9)$$

Gerilim bölümü özelliğinin kullanımıyla β reaktif oranında

$$\beta = X_L / (X_A + X_L) = X_L / X \quad (1.4.10)$$

geçerlidir. Normlondırılmış gerilim düşümü için aşağıdaki ilişki geçerlidir.

$$u_1' = \beta \cdot u_1 \quad \text{ve} \quad u_q' = \beta u_q \quad (1.4.11)$$

ve sonuçta (1.4.11) ile (1.4.10) eşitliklerini (1.4.5)'te yerine yazarsak normlondırılmış gerilim düşümü için aşağıdaki ilişki geçerlidir:

$$1 = (1 + \beta u_1)^2 + (\beta u_q)^2 \quad (1.4.12)$$

Bu ilişki u_1 boyuna gerilim düşümüne göre çözümlirse;

$$u_1 = (1/\beta) (-1 \pm \sqrt{1 - (\beta u_q)^2}) \quad (1.4.13)$$

elde edilir. Bu da reaktif güç için aranan fonksiyonu izah eder, çünkü eşitlik (1.4.9) normlondırılmış boyuna gerilim düşümü için geçerlidir.

$$u_1 = (XQ)/(3 U^2) \quad (1.4.14)$$

Normlandırılmış enine gerilim düşümü içinde

$$u_q = (XP)/(3 U^2) \quad (1.4.15)$$

geçerlidir.

Statik stabiliteyi veren δ gerilim açısı (Şekil 1.4.2)

$$\delta = \arctan \frac{u_q}{1+u_1} = \frac{u_q}{1+(1/\beta)(-1 \pm \sqrt{1-(\beta u_q)^2})} \quad (1.4.16)$$

ilişkisiyle verilmiştir. Bu denklem P gücüyle δ gerilim açısı arasındaki, gerilim şartının oluşturulması ilişkisini gösterir (1.4.1) Şekil 1.4.3'de u_q enine gerilim düşümünün aynı zamanda u_1 boyuna gerilim düşümünün grafiğini δ endüi açısının fonksiyonu olarak izah eder. Burada reaktans oranı için $\beta = 0,35$ olarak seçilmiştir. Bundan başka şekil 1.4.3 'de $e = E/U$ normlandırılmış endüi gerilimi, δ 'nın fonksiyonu olarak (uygun eşitlik 1.4.9) çizilmiştir.

Eğer (1.4.13) eşitliğindeki karekök sıfıra eşitse u_q 'nın maksimumu ve bununla P maksimum taşınabilir güç ortaya çıkar. Buradan da enine gerilim düşümü için aşağıdaki şart ortaya çıkar :

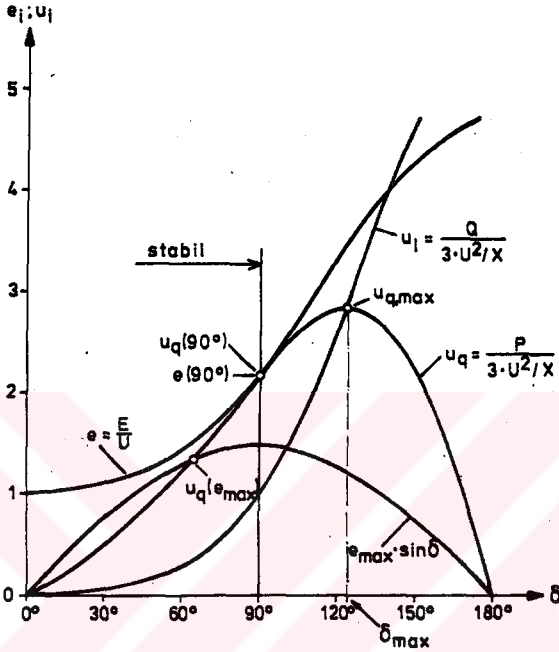
$$u_{q,max} = 1/\beta \quad (1.4.17)$$

ve (1.4.15) eşitliğinden dolayı maksimum iletilebilir güç için de

$$P_{max} = \frac{3 U^2}{X} u_{q,max} = \frac{3 U^2}{X \beta} = \frac{3 U^2}{X_L} \quad (1.4.18)$$

elde edilir. Bu ilişki şu anlama gelir:

(1.4.1) işletme şartına uyulması halinde maksimum olarak bu güç taşınabilir. Yine de U_T ile sabit U gerilimi arasındaki açı bu durumda 90° , statik stabiliteyi E ve U arasında tanımlayan gerilim açısı da 90° den büyüktür. $\beta = 0,35$ değeriyle $\delta = 123^\circ$ elde edilir (Şekil 1.4.3)



Şekil 1.4.3. δ endüi açısının fonksiyonu olarak $e = E/U$ normalize edilmiş endüi geriliminin ve taşınan aktif ve reaktif güçler için enine ve boyuna gerilim düşümünün bir ölçek olarak ele alınışı; β reaktans oranı için; $\beta = 0,35$ seçilmiştir. $e_{\max}$ sin δ nın değişimi, $3 U^2/X$ e indirgenmiş max uyarmalı güç eğrileri bölgesinde gösterilmiştir (75).

Statik stabilite sınırı $\delta = 90^\circ$ bulunduğundan, şimdi de bu açıda olabilecek $P_{\max}$ maksimum taşınabilir güç sorusu ortaya çıkmaktadır. $\tan(90^\circ) = \infty$ ilişkisi geçerli olduğundan (1.4.16) eşitliğindeki kesirin sağındaki kısım sıfır olmalıdır. Böylece;

$$1 + (1/\beta)(-1 \pm \sqrt{1 - (\beta u_q)^2}) = 0 \quad (1.4.19)$$

şartından ve kısa bir değiştirmeden $u_q(90^\circ)$ normlandırılmış enine gerilim düşümü için;

$$u_q(90^\circ) = \sqrt{(2/\delta) - 1} = \sqrt{1 + 2(X_A/X_L)} \quad (1.4.20)$$

elde edilir. Buna ait P gücü de (1.4.15) eşitliğinden

$$P(90^\circ) = \frac{3 U^2}{X} \sqrt{1 + 2(X_A/X_L)} \quad (1.4.21)$$

elde edilir.

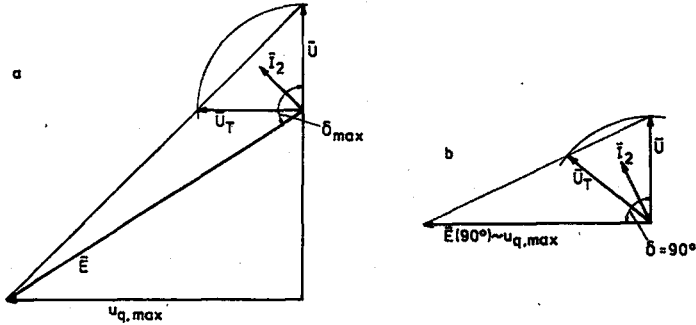
Bu gücü iletilebilmek için normlandırılmış endüj gerilimi;

$$e(90^\circ) = E/U = u_q(90^\circ) \quad (1.4.22)$$

değerine ayarlanmalıdır. (1.4.20)'deki eşitliği kısaca toplayacak olursak, (1.4.1)'deki gerilim şartı ilk önce maksimum taşınabilir $P_{\max}$ gücünü (uygun eşitlik 1.4.18) verir. Şekil 1.4.4.a da ilgili ifadeyi gösterir. Buradan da şu sonucu yazabiliriz; bu işletme durumuna $\delta_{\max} = 123^\circ$ de ulaşılmaktadır. Bununla statik stabilite sınırı geçildiği için şimdi de stabil olmayan denge durumu söz konusudur. Eğer senkron generatörün E tahrik gerilimi $E_{\max}$ değerine çıkarılabilirse sınır gücü $E_{\max}$ ile değil, bilakis $\delta = 90^\circ$ stabilite sınırıyla verilmektedir. Başka bir deyişle

$$P_{\max} = P(90^\circ) \quad (1.4.23)$$

ilişkisi geçerlidir. İlgili olay şekil 1.4.4.b'de izah edilmiştir.



Şekil 1.4.4. Şekil 1.4.1'e göre taşınmanın fazör diyagramı.

a) $P = P_{\max}$, $\delta = 123^\circ$ (stabil olmayan işletme noktası)

b) $P = P(90^\circ)$ ve $E(90^\circ) < E_{\max}$

Bu arada E endüi gerilimi $E(90^\circ) < E_{\max}$ değerine ulaşıyor. Şayet şimdi de maksimum uygun endüi gerilimi $E_{\max}$, $E(90^\circ)$ gerilim değerinden küçük ise maksimum taşınabilir güç $\delta = 90^\circ$ statik stabilite sınırıyla değil bilhassa $E_{\max}$ gerilim değeriyle sınırlanmaktadır.

$$P_{\max} = P(E_{\max}) \quad (1.4.24)$$

Bu kısmı bitirirken (1.4.24) ilişkisi geliştirilmelidir. Bu arada $P(E_{\max})$ orantılı enine gerilim düştümlü eşitlik 1.4.15'te kullanılmaktadır. (1.4.9) eşitliğinden normlandırılmış

$$e^2 = (1+u_1)^2 + u_q^2 \quad (1.4.25)$$

ilişkisi çıkar. (1.4.13) eşitliğinin yardımıyla u_1 yok edilirse, $e = e_{\max} = E_{\max}/U$ için kısa bir değişiklikle

$$u_q^2(e_{\max}) = \frac{e_{\max}^2 - 1}{2/\beta - 2} \left(\frac{2}{\beta} - \frac{e_{\max}^2 - 1}{2/\beta - 2} \right) \quad (1.4.26)$$

elde edilir. Şekil 1.4.4'te bu değer endüi gerilimi $E_{\max} < E(90^\circ)$ ya da $e_{\max} < e(90^\circ)$ de çizilmiştir. İlgili eşitlik (1.4.24)'ten $P_{\max}$, (1.4.26) eşitliğinin (1.4.15)'te yerine konmasından hesap edilir.

$$P_{\max} = u_q(e_{\max}) \frac{3 U^2}{X} \quad (1.4.27)$$

olur.

Bu konuda dikkat edilmesi gereken husus; şimdiye kadarki statik stabilite incelemelerinde kontrol düzeninin etkileri dikkate alınmamıştır. Yani işletme gücü (türbin ayarı) ve endüi gerilimi (uyarım ayarı) sabit olarak varsayılmıştır. Hızlı çalışan ayarlayıcının dikkate alınmasıyla statik stabilite sahası oldukça büyütülebilir. Eğer uygun ayarlayıcı mevcut ise, o takdirde burada işlenen statik stabilitenin yerine şartlı stabilite söz konusu olur.

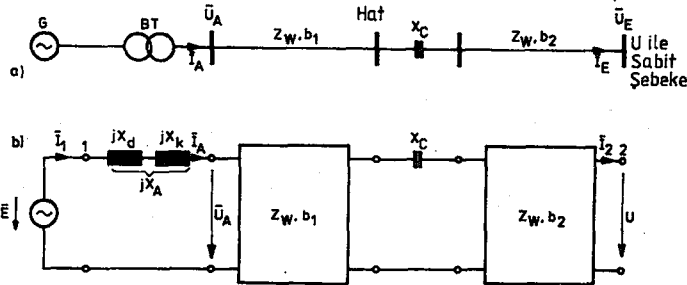
Şartlı stabilitenin incelenmesi ileride dinamik modellerle araştırılmıştır. Bu aşamadan sonra pek çok güç merkezi beslemelerinin ilerlemiş modelleri mümkün olduğundan, bu konunun sınırları içinde, araştırmada bir

ya da iki güç merkezi beslemesi daha çok statik stabilite için uygundur. Şartlı statik stabilitenin araştırılmasında kontrol düzeneğinin tam bir eşdeğerine ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu durumda modelin kompleksitesi artar yani bu bölümdeki analitik ilaveler genel durum için geliştirilemez. Simülasyon metodlarıyla stabilitenin araştırılması analitik stabilite araştırmasından genel durumda daha güvenilir ve tam sonuçlar verir.

1.4.3. İletim Hattının Eşdeğeri

Bu bölümde $P_{\max}$ iletilebilir gücünün statik stabilitenin uygulanması halinde büyütme imkanı, hattın eşdeğerinde kondansatörlerin seri ya da paralel bağlanmasıyla işlenecektir. Daha önceden, $P_{\max}$ maksimum nakledilir gücünün endüji geriliminin yükselmesiyle nasıl etkilendiği ele alınmıştı, şimdi de hat reaktansı küçültülerek, kondansatörlerin montajı ile bu gücü nasıl etkilediği gösterilecektir.

Etki gücünün ara alıntısı olmadan kayıpsız bir iletimde (ilgili eşitlik 1.3.8) 1 ve 2 nolu uçlar arasında, nakil şebekesini tanımlayan dört kutbun X_{12} boyuna reaktansı, $P_{\max}$ maksimum nakledilebilir gücü için önemli faktördür. Bu reaktans, generatörün X_d senkron reaktansından yapısal olarak ve ferdi nakil elemanlarının boyuna reaktanslarından meydana gelir. Herhangi seri kondansatörün araya konmasıyla kondansatörün X_c negatif reaktansı ile nihai boyuna reaktans küçültülebilir. Şekil 1.4.5'te generatör, transformator ve X_c reaktansı ile, seri kondansatörle kompanse edilen kayıpsız bir iletim hattı gösterilmiştir.



Şekil 1.4.5. Bir generatör ile sabit bir şebeke arasındaki kayıpsız iletim hattının reaktansı üzerine seri bir kondansatörün etkisi.

a) Hattın seri bir kondansatörün bağlandığı durum,

b) Hattın Z_w dalga direnci ve b sönüm oranı ile gösterildiği durumdaki tek fazlı eşdeğer devre şeması.

Konuya bağlı olarak kondansatörle kompanzasyon sadece uzun hatlarda yapıldığından şekil 1.4.5.b; eşdeğer devre için seçilmiş uygun elemanlarla oluşan π eşdeğer devre şeklini hattın Z_W dalga direnciyle ve $\bar{b}$ sönüm oranı ile göstermiştir.

Uzun taşıma hatları teorisinde Z_W dalga direnci

$$Z_W = \sqrt{L'/C'} \quad (1.4.28)$$

ilişkisi ile verilir. L' ve C' hattın endüktansı ve kapasitesidir. Sönüm oranı $\bar{b}$ için de;

$$\bar{b} = j\omega \sqrt{L'C'} \ell \quad (1.4.29)$$

geçerlidir. Burada $\omega = 2\pi f$, $f = 50$ Hz ve ℓ (km) hat uzunluğudur. Akım ve gerilim bağlantıları için hattın başlangıcında ve bitiminde X_C reaktanslı kondansatörsüz hat teorisinden bilinen

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{U}_E \cos b + j Z_W \bar{I}_E \sin b \\ \bar{I}_A &= \bar{I}_E \cos b + j \bar{U}_E / Z_W \sin b \end{aligned} \quad (1.4.30)$$

ilişkileri geçerlidir.

1 ve 2 nolu uçlar arasındaki X_{12} boyuna reaktans hesabı için (Şekil 1.4.5) 2 nolu uç çifti kısa devre olmalıdır. Böylece $\bar{E}/\bar{I}_2$ bölümü $U = U_e = 0$ için oluşturulabilir. Aranacak boyuna reaktans $\bar{Z}_{12} = j X_{12}$ ile benzerlik gösterir. $b = b_1 + b_2$ ile aranan reaktans için;

$$X_{12} = Z_W \sin b + X_A \cos b - X_C \cos b_2 (\cos b_1 - (X_A/Z_W) \sin b_1) \quad (1.4.31)$$

geçerlidir. Kondansatörsüz yani $X_C = 0$ ile X_{12} boyuna reaktansı için;

$$X_{12} = Z_W \sin b + X_A \cos b \quad (1.4.32)$$

geçerlidir.

Eğer (1.4.31)'deki eşitlikte parantez içindeki ifade sıfırdan büyükse X_{12} reaktansının azalması seri kondansatör sayesinde ortaya çıkmaktadır.

Belirli kapasitede kondansatörle, kuplaj reaktansının mümkün olan en büyük azaltılmasını yapabilmek için seri kondansatörün montaj yeri çok iyi seçilmelidir. $P_{\max}$ maksimum nakledilebilir güç, (ilgili eşitlik 1.3.8) X_{12} kuplaj reaktansının azaltılmasıyla, yükseltilir. Bu yükseltmeden dolayı aynı nakil açısında seri kondansatör olmaksızın büyük bir güç nakledilebilir. Aynı güçte ufak bir nakil açısı çıkar ve bununla statik stabilitenin iyi bir duruma getirilmesi mümkündür. Seri kondansatörün uygun seçimiyle Z_{12} kuplaj empedansını ohmik dirençlere kadar azaltma imkanı mümkün olacaktır. Akımın kısa devresinde ohmik dirençler sınırlı olacağından, bu şekilde kuplaj empedansının azaltılması hiçbir zaman istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle sadece statik stabilite için gerektiği kadar kompanze edilir. Kuplaj reaktansının benzer şekilde azaltılması, devreye paralel kondansatörün diğer adıyla tampon kondansatörünün ilavesiyle elde edilir. Bu arada X_C kondansatörü, Şekil 1.4.5 'teki gibi boyuna değil aksine enine kondansatör olarak monte edilir. X_{12} kuplaj reaktansı bölüm 1.3.2'deki düşüncelerle

$$X_{12} = Z_W \sin b + X_A \cos b - (Z_W^2 / X_C) \cos b_2 (\sin b_1 + (X_A / Z_W) \cos b_1) \quad (1.4.33)$$

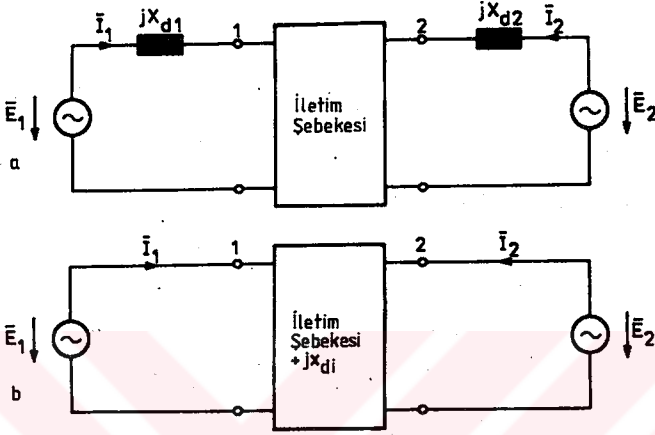
şeklinde ortaya çıkar.

Paralel kondansatörsüz kuplaj reaktansı negatif toplamda büyük olarak ortaya çıkardı. (1.4.33) eşitliğinden anlaşıldığına göre $X_D = -X_C$ bobinin devreye bağlanması, kuplaj reaktansını büyültür. Dikkat edilmesi gereken bir husus ta, BT blok transformatörünün yüksek gerilim kısmına bu bobinin konulmasıyla iletimin statik stabilitesi daha iyi duruma getirilebilir. Bu durumda endüj geriliminin yükseltilmesi U_T transformatör geriliminin değişimine sebebiyet vermemektedir (Şekil 1.4.1).

1.5. İkili Güç Merkezi Beslemesinde Stabilite

1.5.1. Sistemin Yapısı

Bu iletim sisteminin statik stabilite araştırmasında (Şekil 1.5.1.a) oldukça basit analitik stabilite kriterleri çıkarmak mümkündür. Bu da iki makina tarafından beslenen P_1 ve P_2 güçleri sadece bir değişkene bağlı olduğu düşüncesine dayanmaktadır. Hangi şartlar altında böyle bir sistem statik stabildir ?



Şekil 1.5.1. Bir pasif şebekede 2 santraldan beslemeli bir enerji besleme sisteminin tek fazlı eşdeğer devre şeması.

(Bu sistemde iki senkron generatör $\bar{E}_1$ ve $\bar{E}_2$ endüj gerilimiyle sabit bir şebekeyi beslemektedir.)

1.5.2. İkili Besleme için Stabilité Kriterleri

Şekil (1.5.1.a)'da her iki generatör için eşdeğer devre olarak gerilim kaynağı X_d boyuna reaktansından önce seçilmiştir. İletim sistemi, dört kutuplu olarak izah edilmektedir. Şekil (1.5.1.b)'de her iki makina reaktansı şebeke dört kutuplu olarak dikkate alınmaktadır.

Stabilité kriterinin ortaya çıkarılması için makinanın 1. ve 2. tarafından beslenen P_1 ve P_2 güçlerinin bulunması gereklidir. Bu etki güçlerinin hesabı bölüm 1.3.2'de çıkartılan senkron makinanın etki güçleri gibi bulunabilir. Şekil 1.3.2 ve 1.5.1'in karşılaştırılmasında açıkça görüldüğü gibi bölüm 1.3'deki problemin aynısı söz konusudur. 1.3.1 denkligindeki eşitlikten şekil 1.3.2'ye kıyasla dört kutup izahı için $\bar{I}_2$ 'nin zıt vektörel değeri burada geçerlidir.

$$\bar{I}_1 = \bar{E}_1 / \bar{Z}_{11} - \bar{E}_2 / \bar{Z}_{12}$$

$$\bar{I}_2 = -\bar{E}_1 / \bar{Z}_{21} + \bar{E}_2 / \bar{Z}_{22}$$

(1.5.1)

Buradan hareketle her iki makinanın gücü için 1.3.4 eşitliğinden;

$$P_1 = 3 \left(\frac{E_1^2}{Z_{11}} \cos \phi_{11} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos (\delta_1 - \delta_2 + \phi_{12}) \right)$$

$$P_2 = 3 \left(\frac{E_2^2}{Z_{22}} \cos \phi_{22} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos (\delta_1 - \delta_2 - \phi_{12}) \right) \quad (1.5.2)$$

çıkar.

1.5.2. eşitliğinden doğrudan beslenen güçlerin her iki makinanın belirli bir referans ekseninden hesaplanan endüi açısının farkı, $\bar{E}$ endüi gerilimiyle sabit şebekenin stabilite araştırmasında U gerilimi arasındaki (bölüm 1.3)'teki δ açısına denktir. Bu yüzden (1.3.5) eşitliğinden hareketle δ açı farkı, tek sistem değişkeni olarak tanımlanmaktadır.

$$\delta_1 - \delta_2 = \delta \quad (1.5.3)$$

Bununla (1.5.2) eşitliği doğrudan basitleştirilebilir. P_1 ve P_2 güçleri için;

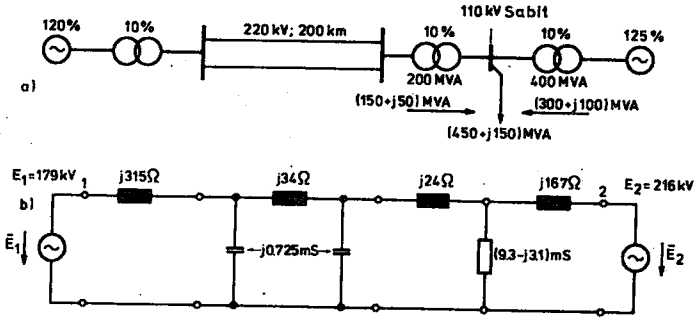
$$P_1 = 3 \left(\frac{E_1^2}{Z_{11}} \cos \phi_{11} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos (\delta + \phi_{12}) \right)$$

$$P_2 = 3 \left(\frac{E_2^2}{Z_{22}} \cos \phi_{22} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos (\delta - \phi_{12}) \right) \quad (1.5.4)$$

geçerlidir.

Şekil 1.5.2 iki güç merkezi beslemeli enerji sistemi için muhtemel bir örneği göstermektedir. 220 kV referans gerilimli ve empedanslı tek fazlı eşdeğer devre Şekil 1.5.2.b'de verilmiştir.

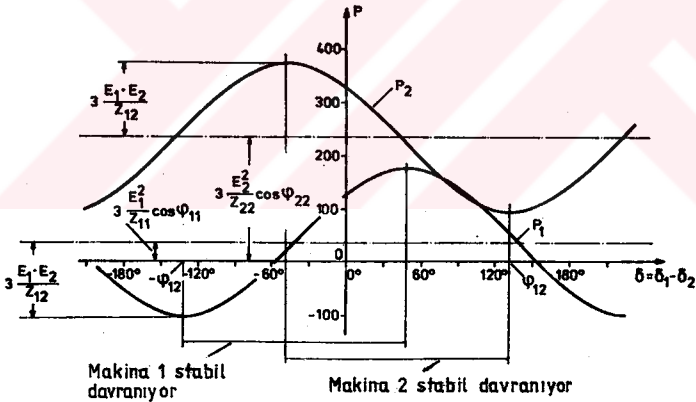
Şekil 1.5.2'de verilen değerler için her iki generatörün güç diyagramı (1.5.4) eşitliğinin yardımıyla hesap edilebilir. Şekil 1.5.3; $P_1(\delta)$ ve $P_2(\delta)$ eğrilerini δ açı farkının fonksiyonu olarak göstermektedir.



Şekil 1.5.2. İki senkron generatörün kayıpsız bir şebekeyi beslediği enerji besleme sistemi (76).

a) Bağlama şeması,

b) 220 kV'a indirgenmiş tek fazlı eşdeğer şema.

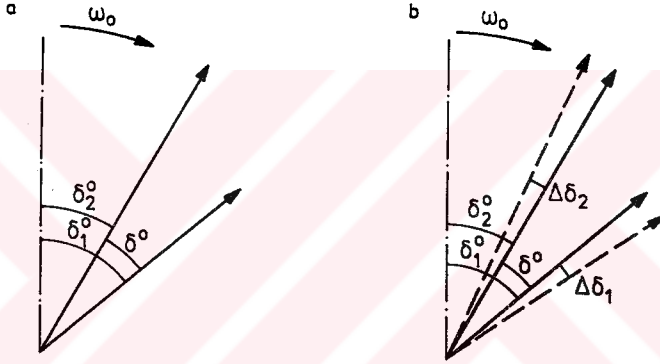


Şekil 1.5.3. Şekil 1.5.2'ye göre iletimin güç eğrileri

İki makinada, P_1 ve P_2 etki güçleri δ endüti açısının farkına bağlı olduğu için belli bir işletme durumu sadece δ işaretiyle belirtilmiştir. Bir işletme noktasında statik stabilitenin kontrollü için (açı farkı δ^0 olarak) δ^0 açı farkı endütinin $\Delta\delta_1$ ve $\Delta\delta_2$ kadar küçük açıda herhangi bir yönde yerinden oynatılmasıyla $\Delta\delta = \Delta\delta_1 - \Delta\delta_2$ değeri kadar değiştirilir. Bu değişiklik için her iki makinanın endütilerini etkileyen nihai momentler ya da güçler belli olmak zorundadır.

Her iki makinanın nihai momentleri şu şekilde yönlendirilirse; $\Delta\delta_1$ ya da $\Delta\delta_2$ açı farklarının tahmini değişikliklerini küçültür ve bununla δ^0 ile tanımlanan ilk işletme durumuna tekrar sebebiyet verilirse işte o zaman bütün nakil statik stabildir.

Şekil 1.5.4 a'da her iki makinanın endüi gerilimlerinin grafikleri tekrar verilmiştir. Bu arada sonuç olarak makina 1'in makina 2'ye göre önde gittiği gibi önemli olmayan düşünceye varılmıştır.



Şekil 1.5.4. İki senkron generatörün stabilite kriterinin çıkarılmasında fazör diyagramı.

Faz farkı δ^0 dir. Bu açı M_{a1} ve M_{a2} işletme momentlerinin dengede olduğu işletme durumuna denktir. Açı, dönme momentleri ve ilgili güçler Şekil 1.5.4'de verilen dönme yönünde pozitif sayılır.

Şekil 1.5.4.b'de, makina 1'in $\Delta\delta_1 > 0$ açısında hızlanırken aynı zamanda makina 2'nin $\Delta\delta_2 < 0$ açısında gecikmesi bir arıza olarak varsayılmaktadır. Bununla arıza her iki endüinin durumunu birbirine göre $\Delta\delta$ değeri civarında değiştirmektedir. Arızanın bu tanımı, son sonuca göre genel geçerliliği için bir sınırlama değildir.

$\delta + \Delta\delta$ yeni işletme noktasında nihai momentlere denk güçler aşağıdaki lineerite ile hesaplanır:

$$P_{1res}(\delta^0 + \Delta\delta) = - \frac{\partial P_1}{\partial \delta} \bigg|_{\delta = \delta^0} \Delta\delta \quad (1.5.5)$$

$$P_{2res}(\delta^0 + \Delta\delta) = - \frac{\partial P_2}{\partial \delta} \bigg|_{\delta = \delta^0} \Delta\delta$$

Makina 2'nin makina 1'in arkasından çalışması şeklinde belirtilen tahmini durum için $\delta_1^0 < \delta_2^0$ ilişkisi geçerlidir. Eğer, nihai momentin azaltılması yardımıyla δ 'nın büyütülüp ve böylece fark açısı küçültülürse makina 1 bundan sonra stabil tavır alır. Bunun için dönme yönünün aksine etki gösteren nihai moment gereklidir. Eğer $\Delta\delta_1 > 0$ için, δ^0 işletme noktası, $P_1(\delta)$ güç diyagramının yükselen kısmında bulunuyorsa (bu şart 1.5.5 eşitliğine göre) yani;

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta} \bigg|_{\delta = \delta^0} > 0 \quad (1.5.6)$$

Şekil 1.5.3'de bu işletme aralığı makina 1 için çizilmiştir. Eğer makina 2, δ 'nin büyütülmesiyle kendini etkileyen, nihai momentin pozitif yönünde hızlanırsa statik stabil tavır alır. Bu durumda fark açısı aynı zamanda küçültülür. Bunun içinde dönme yönünde etkileyen nihai moment gereklidir. Böylece (1.5.5) eşitliğine göre; $\Delta\delta_2 < 0$ için δ^0 işletme noktası, $P_2(\delta)$ güç diyagramının azalan kısmında bulunmalıdır.

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta} \bigg|_{\delta = \delta^0} < 0 \quad (1.5.7)$$

Her iki makinanın statik stabil tavır aldığı işletme noktasında, hem (1.5.6), hem de (1.5.7) eşitliği yerine getirildiğinde, tabii ki bütün sistem stabildir. Diğer şartlarda stabil olmayan denge söz konusudur.

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta} \bigg|_{\delta = \delta^0} < 0 \quad (1.5.8)$$

ve

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta} \bigg|_{\delta = \delta^0} > 0 \quad (1.5.9)$$

şartları yerine getirilirse bu durumdan sonra makinalar stabil olmayan tavır gösterir.

1.5.3. Stabilite Kriterinin Genişletilmesi

Makinalardan biri bile, statik stabil davranırsa, bu durumda da iletim tamamen stabil olabilir. Farz edelim, önden giden makina 1, δ^0 işletme noktasında stabil olmayan, arkadan çalışan makinada stabilite ve δ 'nın büyümesi söz konusu ise nihai moment etkili olmaya başlar ve bununla 1 pozitif yönde hızlanır. Makina 2'de nihai momente sebebiyet verir (bu aynı zamanda pozitif yönde etki gösterir) ve bu yönde hızlanır. Bu sayede de açı farkı yine küçülür. Eğer makina 2'nin hızlanması makina 1'den büyükse makina 2 ilk δ açı farkını tekrar ortaya çıkarır. Yani ilk işletme durumu tekrar sağlanır.

Genelleme yapılacak olursa;

Eğer sadece bir makina stabil davranırsa bu makina δ 'nın herhangi bir değişimiyle büyük hızlanmaya maruz kalırsa, nakil bundan sonra da tamamen stabildir. İki ya da daha fazla makinadan oluşan stabilite araştırması için, güç diyagramının yanısıra endüilerinin hızlanma durumlarının da incelenmesi zorunluluğu vardır. Dönen kütlelerin hareketi için

$$J \frac{d^2(\delta/p)}{dt^2} = M_{res} \quad (1.5.10)$$

ilişkisi geçerlidir.

Burada J rotor ve işletme makinasının atalet momentini, δ endüi açısını, p rotor çift kutup sayısını, M_{res} dönen kütleyi etkileyen nihai momenti göstermektedir. Sönmenin ihmalıyla ve 1.1.1 ilişkisindeki P gücünün çözümüyle;

$$P = M_e (\omega_0/p) \quad (1.5.11)$$

olur ve rotorun hareket diferansiyel denklemi

$$\frac{J \omega_0}{p^2} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a - P = P_{res} \quad (1.5.12)$$

verilebilir. Burada P_a türbinin işletme gücünü göstermektedir. J atalet momenti normalde T_A hareket zaman sabitesiyle yerine konmaktadır. Bu

sabite; eğer M_N nominal momentle tahrik edilirse herhangi bir yükleme ve sönme olmaksızın durma pozisyonundan senkron dönme sayısına varabilmek için senkron makinanın ihtiyaç duyduğu zaman olarak tanımlanmaktadır. Makinanın M_N nominal momenti, S_N nominal sanal güçle aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$M_N = \frac{S_N}{\omega_o/p} \quad (1.5.13)$$

Bu tanımdan; sabit işletme momentinde zorlamaksızın ve sönme-sönme açısı zamanla lineer büyür (1.5.10 diferansiyel denkleminin bir defalık integraliyle) kabulünün yapılmasıyla;

$$\frac{J \omega_o}{P} = \frac{S_N}{\omega_o/p} T_A \quad (1.5.14)$$

T_A hareket zaman sabitesinin ya da J atalet momentinin çözülmesiyle;

$$T_A = \frac{\omega_o^2}{P^2 S_N} J \quad \text{ya da} \quad J = \frac{P^2 S_N}{\omega_o^2} T_A \quad (1.5.15)$$

elde edilir. Bununla (1.5.12) diferansiyel denklemini aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_{res}}{S_N} \frac{\omega_o}{T_A} \quad (1.5.16)$$

Böylece iki makınadan oluşan stabilite araştırması bitirilebilir. Önde çalışan makina 1 ile, stabil olmadan ve arkadan çalışan makina 2, stabil dengedeysen şu ana kadarki düşünceler toplam sistemin statik stabil işletme noktasında olduğunu gösterir. (Şayet makina 2'nin büyük hızlanması makina 1'i telafi edebilirse).

Buna göre hızlanma için;

$$\frac{d^2 \delta_2}{dt^2} > \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} \quad (1.5.17)$$

şartı geçerli olmak zorundadır (1.5.16) hızlanma eşitliğinin yerine konmasıyla ve (1.5.5) eşitliğinin, nihai moment, P_{1res} ve P_{2res} güçleri için kullanımıyla, stabilite şartı olarak;

$$-\frac{\omega_o}{S_{N2}T_{A2}} \frac{dP_2}{d\delta} + \frac{\omega_o}{S_{N1}T_{A1}} \frac{dP_1}{d\delta} > 0 \quad (1.5.18)$$

geçerlidir.

Güç diyagramının δ^0 işletme noktasında diferansiyeli alınmalıdır. Bu stabilite kriterinden iki senkron generatör için aşağıdaki sonuç çıkmaktadır. Eğer makinalardan biri stabil çalışmaya bile sistem statik stabil olabilir. Yani, eğer bir besleme yapan sistem inceleniyorsa $P(\delta)$ güç diyagramının yükselmesinin ön şartı stabilite menziline tayini için ölçü değildir. İki'den fazla besleme yapan bir sistemin statik stabilite kriterinin formülize edilmesi analitik olarak basit yollarla mümkün değildir. Besleme güçleri sadece bir değişkene bağlı değildir ve genel bir stabilite araştırması için çok değişkenli bir denklem sistemi çözülmelidir. Bundan dolayı sayısal hesaplama ile enerji nakil sisteminin stabilitesini kontrol edebilmek için simülasyon tekniği için modeller incelenmektedir.

2. Enterkonnekte Şebekede Frekans Ayarı

2.1. Giriş

2.1.1. Problem

Bir ve iki santral beslemeli sistemlerin doğal ve statik stabilitesi bölüm 1'de bahsedilmiştir. Bu düşünceler, ayar donatımının tesirlerinin denetlenmiş olması gereken şartlı stabilitenin incelenmesine nazaran daha çok pratik anlamlı idi. Daha iyi anlaşılması açısından bu bölümde enterkonnekte şebekenin orta zaman dinamikliği incelenecektir. Orta zaman aralığı olarak (77) 0-60 sn arasındaki zaman davranışı anlaşılmalıdır. Bu zaman aralığında, enterkonnekte şebekesindeki frekans ayarı şartlı stabilite ile belirlenir. Enterkonnekte şebekesi olarak öyle bir sistem tanımlanmalıdır ki, büyüklüğü sınırlı ve komşu iş yerlerine temas halinde bir iletkeni olmamalıdır. Tipik bir enterkonnekte sistem, Berlin'deki enerji besleme sistemidir (78).

Devreye sokulan ve devre dışı kalan tüketiciler grupları, üretilen ve tüketilen gücün dengesinin nasıl bozulduğu, orta zaman stabilitesine ve şebeke frekansına ortaya çıkan dengesizliğin nasıl etkisi olduğu enterkonnekte şebekesindeki frekans ayarında incelenmelidir. Tam anlamıyla söylemek gerekirse, aşağıdaki iki önemli şartla stabilite incelenmesi yapılır :

- Aktif gücün dengesizliği reaktif gücün dengesizliğine hiç bir etkisi olmadığından, şebeke düğümlerindeki gerilime onun etkisi incelenmez. Aşağıdaki düşünceler tamamen aktif güçle frekans modeli için geçerlidir. Burada gerilim sabit bir değer olarak kabul edilir.

- Aşağıda modelize edilen ve hesaplanan enterkonnekte şebeke sınırlandırılmıştır. Bu kolaylık şalt durumlarının iyi anlaşılması için gerekli ve geçerlidir.

Bu bölümdaki düşüncelerin amacı aşağıdaki gibi bir araya toplanabilir :

- Orta zaman aralığında stabilite incelenmesi için dinamik model olarak şebeke frekansı ile aktif gücün dengesizliği arasında nasıl bir bağıntı vardır ?

- Şalt tedbirlerine ve ani yüklenmeye göre şebeke frekansı için hangi fiziksel açıklama yapılabilir ?

- Hangi imkanlarla şebeke frekansının yükselmesi veya düşmesi önlenir. Yani frekans ayarı nasıl yapılmaktadır ?

- Şebekenin işletiminde ne tip ayarlar yapılır ve orta zaman aralığında stabiliteyi sağlamak için hangi imkanlarla bu işlemler çözümlenebilir ?

2.1.2. Güç Dengesi

Elektrik enerjisi depolanmadığından tüketici topluluğu ile besleme yapan bütün santrallerdeki hazır enerji arasında devamlı bir denge sağlanmalıdır. Tüketicinin durumu kararsız olduğundan yüklenme durumunda, bu durum mümkün mertebe kısa zamanda ve tam ilave edilmelidir. Anlık güç yükselmeleri ve düşmeleri şebekedeki bütün döner kütlelerin kinetik ener-

jilerinin değişmesiyle dengelenir. Böylece istenmeyen frekans sapmaları ortaya çıkar.

Orta zaman işletimindeki şartlı stabilite için anlık yüklenmeler şeklindeki arızaların enerji besleme sistemine olan tesirleri dikkate alınacaktır. Orta zaman aralığındaki stabilite, olabildiğince primer ve sekonder ayarının tesiriyle türbinlerin momentinin tam değişimini vermelidir. Generatörlerin hızlı sönen endüti dalgalanmalarını ve güç dalgalanmalarını dikkate almayıp tüm sisteme ait bir özel frekans belirlenebilir. Enterkonnekte şebekelerindeki frekans ayarına bağlı geçici durumlar orta zaman aralığıdır. Bu şebekedeki frekans ayarı çok önem taşımaktadır.

2.1.3. Amaç

Aşağıdaki düşüncelerle orta zaman stabilitesinin denenmesi daha çok anlam kazanır.

- Modern santrallerin hızlı gelişmesi ve santral yerlerindeki yayılma, şebeke yüküne oranla güç kesimi ihtimalini arttırmıştır.
- Sınır güç bloklarının teknik ve ekonomik açıdan frekans ayarına katkıları olmadığından ek güç yüzde olarak azalmaktadır.
- Santral ve şebeke rezervlerinin, gücün artmasıyla ihtiyaca uyum sağlayamama tehlikesini bilinen güçlüklerden dolayı arttırmaktadır.

2.1.4. Sistem Yapısı

Stabilite incelemesine uygun orta zaman modeli (P-f Modeli) için Şekil 2.1.1'de verilen sistemden yola çıkılmıştır. Bu 50 Hz'lik sabit işletmede $P_L = P_{50}$ yükünü karşılayabilecek santral grupları KW1 ve KW2'den oluşmaktadır.

Şekil 2.1.1'de S şalteri kapanmadan önceki durum için geçerli olan güç dengesi;

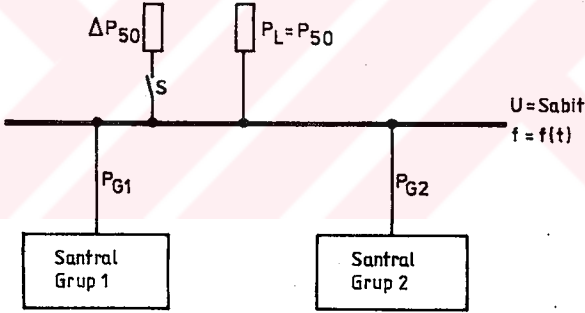
$$P_{G1} + P_{G2} = P_L = P_{50} \quad (2.1.1)$$

P_{G1} santral KWL'in ve P_{G2} 'de KW2'nin beslemesini göstermektedir. 50 Hz'deki yük $P_L = P_{50}$ olarak gösterilmiştir. Şalt anında yani $t = 0$ 'da S şalterinin kapanması dolayısıyla ek bir yük ΔP_{50} , toplam yüke eklenir. Bu durum aşağıdaki yorumları yaptırır:

1) $t = 0$ anında, tüketici tarafından ani yük çekilmesiyle ΔP_{50} kadar bir yük yükselmesi olur.

2) $t = 0$ anında, besleme gücü ΔP_{50} olan, enerji besleme sistemindeki bir generatör devre dışı kalır.

Stabilite incelenmesi, şebeke yükünün ΔP_{50} kadar azalmasından dolayı bu halde sınırlanmıştır. Yüzde büyüklük olarak % 5 ile % 10 arasında bir yük değişimi düşünülebilir.



Şekil 2.1.1. ΔP_{50} aktif güç değişimine göre $f(t)$ frekans davranışının araştırılmasında enerji besleme sisteminin ring şebeke olarak kurulması.

2.2. Şebeke Modeli

Bu kısımda mekanik güç P_m ile frekans sapması Δf arasında bir bağıntı formülize edilecektir. Genelde açısal hızın zaman değişimi dönme momenti ile doğru orantılıdır. Kutup sayısı $p = 1$ olan bir makinede ;

$$\dot{\omega} = \frac{M(t)}{J} \quad (2.2.1)$$

j burada bütün döner alanların atalet momentini gösterir. Bunlar senkron generatörün rotoru ve bütün diğer şebekede bulunan döner makinelerdir. Döner moment $M(t)$ ile tahrik gücü $P_a(t)$ arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$M(t) = \frac{P_a(t)}{\omega(t)} = \frac{P_a(t)}{\omega_0} \quad (2.2.2)$$

Frekans sapmaları çok küçük değerlerde incelendiğinde açısal hızı $\omega(t)$, sabit bir değer olarak ω_0 alınabilir. Buradan

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega_0} = \frac{\dot{f}}{f_0} = \frac{1}{j} \frac{P_0}{\omega_0^2} \frac{P_a(t)}{P_0} = \frac{1}{T_A} \frac{P_a(t)}{P_0} \quad (2.2.3)$$

Kalkış zaman sabiti T_A bölüm 1'de tanımlanmıştır;

$$T_A = \frac{j \omega_0^2}{P_0} \quad (2.2.4)$$

$P_a(t)$ gücü üretilen ve tüketilen güç arasındaki denge bozulmasından ortaya çıkan hızlanma ya da frenleme gücüdür. Bu güç iki kısımdan oluşur:

- Şebekedeki bütün enerji beslemesindeki mekanik güçlerin toplamı olan P_{mi} ile şebeke frekansı 50 Hz'deki tüketiciler tarafından harcanan gücün farkı;

$$P_{a50}(t) = \sum_i P_{mi} - P_{50} \quad (2.2.5)$$

- Değişik tüketiciler $f(t) \neq f_0$ da daha fazla ya da az enerji tükettiğinden

$$P_f = V_L \Delta f \quad (2.2.6)$$

P_f burada güç açığını gösterir. Aynı zamanda burada Δf negatif olduğundan tüketici gücü P_f de negatiftir. Bu durumda toplam mekanik güç;

$$P_a(t) = P_{a50}(t) - P_f = \sum_i P_{mi} - P_{50} - P_f \quad (2.2.7)$$

dir. Bununla şekil 2.2.1.a elde edilir, bundan da Şekil 2.2.1.b'de gösterilen şalt şekli elde edilir. Şekil 2.2.1.c'de tüketicinin statik diyagramını (eğim) gösterir.

Yükün frekans değişimi V_L , 2.2.6 eşitliğine göre birimi MW/Hz'dir. Birimsiz değer olarak primer yükseltici (V'_L) faktöründe olduğu gibi; $V'_L = V_L(f_o/P_o)$ elde edilir. Yükün frekansa olan bağımlılığını göstermek için parametre olarak α :

$$\alpha = V'_L/f_o \quad \% \text{ Hz olarak} \quad (2.2.8)$$

Yükün taşıma fonksiyonu $G_N(s)$ de;

$$G_N(s) = \frac{K'_L}{1+sT_N} \quad (2.2.9)$$

olur.

Burada güçler şebeke gücü P_o 'la ve frekans ise şebeke frekansı $f_o = 50$ Hz ile normlandırılmıştır. Birimsiz yükseltici faktörü K'_L ;

$$K'_L = 1/V'_L \quad (2.2.10)$$

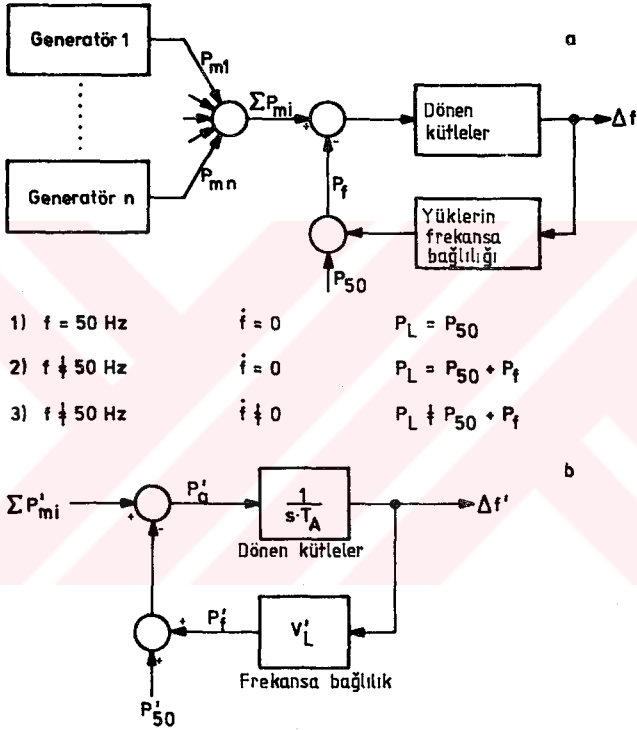
Burada K'_L birimsizdir, aksi halde; $V_L = \frac{1}{K'_L} \frac{P_o}{f_o}$ ifadesiyle;

$$K_L = \frac{1}{V_L} = K'_L \frac{f_o}{P_o} = \frac{1}{V'_L} \frac{f_o}{P_o} \quad (2.2.11)$$

elde edilir ki, V_L 'nin birimi MW/Hz olduğundan, K_L nin birimi de Hz/MW olarak verilir. 2.2.9 eşitliğindeki şebeke zaman sabiti T_N nin blok devresi deşifre edildiğinde,

$$T_N = T_A \cdot K'_L \quad (2.2.12)$$

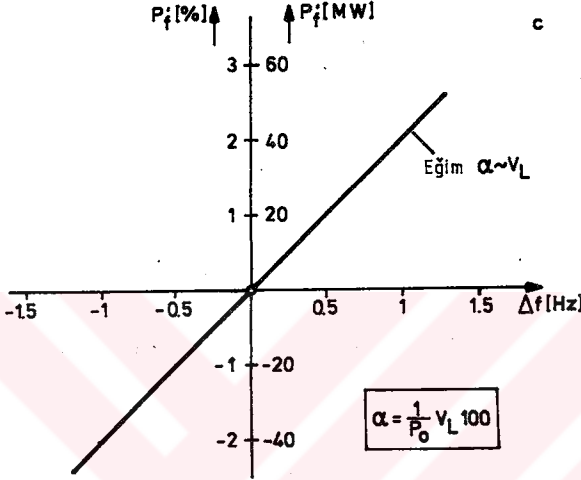
olduğu görülmüştür.



Şekil 2.2.1. Tüketici ve şebekenin modeli (79).

a) Santral modellenli tesis şekili,

b) Normal gösterimde bağlama şeması,



Şekil 2.2.1. Tüketici ve şebekenin modeli.

c) Bir statik (eğim) diyagramda yüklerin frekansa bağımlılığının gösterilişi.

2.3. Örnek

Şimdiye kadar olan düşünceler Şekil 2.1.1'de gösterilen örnek şebeke içindi. Tablo 2.1'de de bu şekildeki santrallerin (KW1 ve KW2) tanımı için gerekli parametreler vardır. Çoğu kez atalet momenti değil de, savrulma momenti GD^2 verildiğinden aşağıdaki bağıntıda dikkate alınmalıdır:

$$J = \frac{GD^2}{4g} \quad (2.3.1)$$

Pratikte türbin generatör setinin atalet momenti lineerdir. Fakat tüketiciden beklenen kısımlar tahmin edilmelidir. Tabloda kalın çizgili kısımdaki parametre değerleri kabul edilen değerlerdir. Bu değerlerden esas istenen değerler olan sistemin güç ve frekans davranışı bulunabilir.

Tabloya göre iki durum incelenmelidir :

Durum 1: KW2 kaygan basınçlı işletimle çalışırsa sadece KW1'in primer ayarlayıcısında katkısı olur. Bundan dolayı KW2'nin statijği (eğim) $s = \infty$ olur.

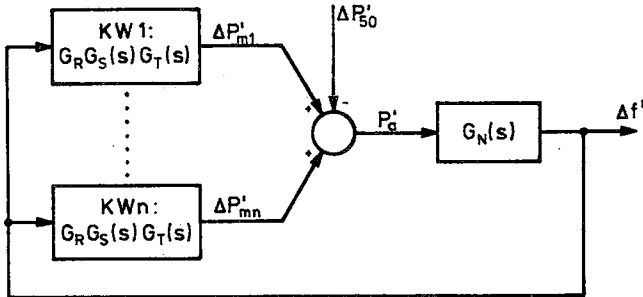
Durum 2: KW1 ve KW2 'nin de primer ayarında katkıları vardır. Bu durumda $s = \% 5$ 'dir.

	Güç MW	GD^2 10^3 kp/ m^2	J 10^3 kg/ m^2	T_A s	Ayar % Türbin statijği				V MW/Hz	V'
					Ayar elemanı T_T (s)	T_T (s)	Durum1	Durum2		
KW1	$P_{N1} = 1200$	350	87,5	4,3	0,2	1,5	5	5	$V_R = 480$	$V'_R = 12$
KW2	$P_{N2} = 800$	400	100	4,93	0,3	2,5	∞	5	$V_R = 0/320$	$V'_R = 0/8$
Şebeke yükü (50 Hz)	$P_{50} = 1000$	150	37,5	1,85	—	—	50	50	$V_L = 40$	$V'_L = 1$
Sistemin nominal gücü	$P_0 = 2000$	900	225	11,1	—	—	3,85	2,38	$V_N = 520$ $V_N = 840$	$V'_N = 13$ $V'_N = 21$

Tablo 2.1. Örnek şebekenin tanımlanması için parametre değerleri (80).

Şekil 2.3.1'de tam olarak normlanmış blok devre gösterilmiştir.

Bu modelle frekans saptasının $\Delta f(t)$ eğrisi, mekanik güçler P_{m1} ve P_{m2} elektriksel güçler $P_{e1}(t)$, $P_{e2}(t)$ ve $P_L(t)$ hesaplanır. Bu hesap tetkiki $t=0$ anında yükün ani şekilde $\Delta P_L(t) = 100 \text{ MW}$ 'a yükselmesi durumunda geçerlidir.



Şekil 2.3.1. Primer ayarın etkisinde (devir sayısı ayarı)

ΔP_{50} yük sıçramasına göre geçici davranışın belirlenmesinde dinamik (devamlı değişen sistem) şebeke ve santral modelleri. Örnekte $n = 2$ 'dir.

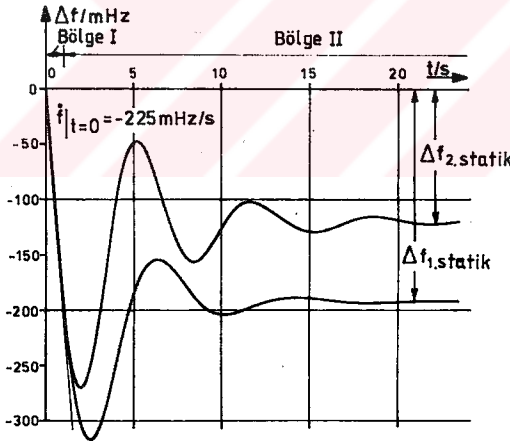
% 10'luk güç yükselmesinde şebekenin dinamik davranışının, anlık toplam yüklenme $P_{50} = 1000 \text{ MW}$ 'a göre incelenmesi, $P_0 = 2000 \text{ MW}$ şebeke gücünde $\Delta P_{50} = \% 5$ lik bir güç yükselmesine eşittir.

Şekil 2.3.2, Şekil 2.3.1'e göre simüle edilmiş bir programla hesaplanan frekans sapması $\Delta f(t)$ yi her iki halde göstermektedir.

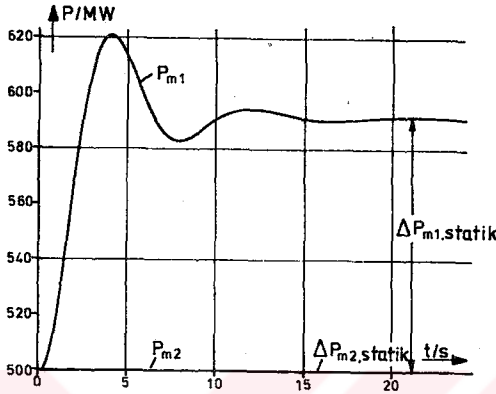
I. frekans alanında bir arıza sonrası frekans kesilmesi tesbit edilebilir.

En büyük frekans sapmasına arızanın çıkmasından 2 ile 3 saniye içinde ulaşılır. Hız ayarında bunun buhar geçiş ventilini açmasıyla türbindeki buhar akımını daha da arttırır. Dolayısıyla mekanik tahrik gücünde (P_m 'de) artış olur. Durum bir de sadece KWL'in hız ayarında katkısı olduğundan, sabit frekans sapması Δf_{stat} durum 2'den daha büyüktür.

Şekil 2.3.3 mekanik gücün ΔP_{m1} zamansal değişimini, mekanik güçlere göre gösterir.

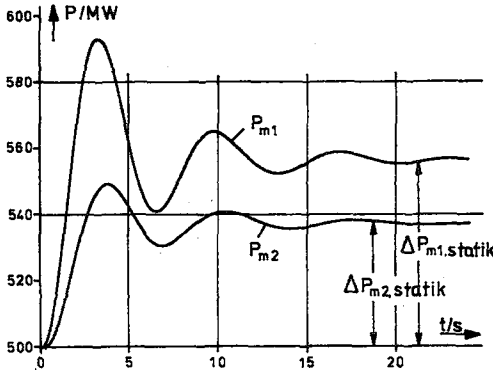


Şekil 2.3.2. 1 ve 2 numaralı durumlar için bir yük sıçramasına göre $\Delta f(t)$ frekans sapması. $\Delta f_{1,\text{stat}}$, $\Delta f_{2,\text{stat}}$ frekans sapmaları primer ayarın p-karakteristiği nedeniyle ayarlanamamaktadırlar.



Şekil 2.3.3. 1 numaralı durum için 1 nolu santralin mekanik gücünün zamana göre değişimi (Burada 2 nolu santral temel yük santrali olarak primere ayara katılmaktadır.) (81).

$t < 0$ için yük gücü $P_L = 1000$ MW, eşit olarak her iki santrale 500 MW olarak dağıtıldı. Durum 1'de santral 2. devrede olduğundan $t > 0$ için $P_{m2}(t) = 500$ MW'ta kalır. Ayarlama santrali olarak kullanılan KWL bütün ek gücü üzerine alır. Yüklemin frekansa bağımlılığından dolayı $\Delta P_{m1,stat} = 92$ MW olur. Eğer durum 2 söz konusu olursa yükselen güç her iki santrale dağılır (Şekil 2.3.4).



Şekil 2.3.4. 2 Nolu durum için P_{m1} ve P_{m2} mekanik güçlerin zamana göre değişimleri. (Burada iki santral de primer ayara katılmaktadırlar.)

2.4. Primer Ayarın Analizi

Frekans sapmasının $\Delta f(t)$ zamansal davranışını, ani yüklenme $\Delta P'_{50}$ ye göre analitik olarak incelemek için; ani yüklenme ile frekans sapması arasındaki transfer fonksiyonunu yazmak gerekir.

Genel olarak n adet santral grubu olması durumunda;

$$\frac{\Delta F'(s)}{\Delta P'_{50}} = \frac{G_N(s)}{1 + G_N(s) [\sum G_{Ri}(s) G_{Si}(s) G_{Ti}(s)]} \quad (2.4.1)$$

olur. Primer ayarlamadaki santrallerin toplamı $i = 1, 2, \dots, n$ dir. Primer ayarın $G_{Ri}(s)$, ayar kısmının $G_{Si}(s)$ ve türbinin $G_{Ti}(s)$ taşıma fonksiyonları her santral grubunu "i" indisi ile gösterir. Tam analitik değerlendirme çok büyük yükte yapılabilir. Orta zaman stabilitesinin belirlenmesinde pratik çalışma için, simülasyon metodlarından yararlanmalıdır. Önce tüketici tarafından istenilen güç ΔP_{50} nereden karşılanmalıdır sorusu açıklığa kavuşmalıdır. Şekil 2.1.1 'deki şalter S 'in kapanmasından bir kaç milisaniye sonrasına kadar frekansta büyük bir değişiklik olmaz. Yani bu esnada (zaman alanı I) bütün yük ΔP_{50} , döner kitlelerin kinetik enerjisinden karşılanabilir. Bundan dolayı kinetik enerji azalır ve bu azalma frekans düşümüne neden olur.

Maksimum frekans değişimi $f(t)$ $t=0$ için eşitlik 2.2.3'e göre;

$$\dot{f} \Big|_{t=0} = \frac{f_o}{T_A} \frac{P_a(t)}{P_o} = \frac{f_o}{T_A} \Delta P'_{50} \quad (2.4.2)$$

olur.

Bir önceki örnekte frekans değişimi $t=0$ için;

$f(t=0) = -0,225$ Hz/s, toplam kalkış zaman sabiti $T_A = 11,1$ s ve normlanmış güç $\Delta P'_{50} = 100/2000 = 0,05$ dir. $t=0$ için frekans düşümü primer ayarından bağımsız olduğundan bu değer her iki durumda da aynı büyüklüktedir.

Zaman alanı I'de hızla artan frekans sapması ayar kısmının türbin ventilini açar. Böylece daha çok buhar türbine hareket eder. Bununla türbinlerin milinin mekanik gücü $P_m(t)$ artar. Akibinde güç açığı azalır,

yani frekans düştümlü frenlenir ve sonunda sabit bir frekans sapması (Δf_{stat}) ayarlanır. Durum 1'de sadece santral 1 aktif olduğundan güç açığını tek başına yüklenir. Durum 2'de toplam ve ek yük P_{50} değil sadece güç açığı $\Delta P_{50} + V_L \Delta f_{\text{stat}}$ karşılanmalıdır. Zaman alanı II'nin sonunda ulaşılan yeni sabit işletim durumu, analitik olarak son değer teoremi ile ve de 2.4.1 eşitliği ile hesaplanabilir.

$$\Delta f'_{\text{stat}} = \lim_{s \rightarrow 0} |s f(s)| = \frac{K'_L}{1 + V'_R K'_L} \Delta P'_{50} = \frac{1}{V'_R + V'_L} \Delta P'_{50} \quad (2.4.3)$$

Bir şebekenin güç sayısı V_N primer ayarın kuvvetlendirici faktörü ve yükün frekans değişimi ile verilir.

$$V_N = \frac{\Delta P_{50}}{\Delta f_{\text{stat}}} = V_L + V_R \quad \text{MW/Hz} \quad \text{olarak} \quad (2.4.4)$$

Literatürde güç sayısı V_N daha çok K_N olarak adlandırılır. Güç sayısının tersi şebeke sabitidir, S_N normlaştırmış değer olarak verilir.

$$S_N = \frac{1}{V_N} \frac{P_{50}}{f_o} \quad (2.4.5)$$

Eşitlik (2.4.3)'den sabit frekans sapmasının hesabı :

$$\Delta f_{\text{stat}} = \frac{\Delta P_L}{V_L + V_R} = \frac{\Delta P_L}{V_N} \quad (2.4.6)$$

ile olur. Burada ΔP_L MW olarak, V_L ve V_R MW/Hz olarak eşitliğe konulduğunda Δf_{stat} Hz cinsinden olur.

Ani yüklenme $\Delta P_L = 100$ MW olduğunda eşitlik (2.4.3) ile durum 1'deki frekans sapması $\Delta f_1 = 0,192$ Hz (Şekil 2.3.2). Durum 2'deki frekans sapması $\Delta f_2 = 0,119$ Hz dir. Buradan her iki santralin güç değerleri hesaplanır. Durum 1 için $\Delta P_m = 92,2$ MW olur ki yükün frekans-tan bağımlılığı 7,8 MW'lık yük azalmasına sebep olur. Durum 2'de ani

yüklerme her iki santrale aşağıdaki gibi dağılır. KW1, $\Delta P_{m1} = 57,1$ MW'lık bir gücü ve KW2'de $\Delta P_{m2} = 38,1$ MW'lık bir gücü üzerine alır. Durum 2'deki örnekte sabit frekansın düşümü ile 4,8 MW'lık bir yük azalması meydana gelir.

2.5. Orta Zaman Modeli

Şimdiye kadar elde edilen orta zaman modelini tamamlamak için generatörlerden alınan elektrik enerjisini belirlemek gerekmektedir. Bunun için 2.3.1 'deki blok devre daha geliştirilmelidir. Santral 2'den alınan normlanmış elektrik gücü P'_{ei} , mekanik güç $P'_{mi}(t)$ ile tahrik gücü $P'_a(t)$ nin farkıdır.

$$P'_{ei}(t) = P'_{mi}(t) - P'_a(t) \quad (2.5.1)$$

Tahrik gücü için;

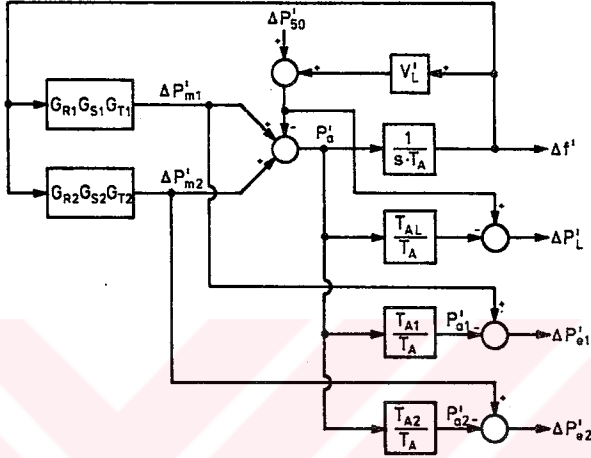
$$\frac{P'_{ai}(t)}{P'_a(t)} = \frac{T_{Ai}}{T_A} \quad (2.5.2)$$

Burada T_{Ai} , i inci santralin kalkış zaman sabiti ve T_A ise bütün kalkış zaman sabitlerinin toplamıdır. Bu 2.5.1 eşitliğine uygulandığında;

$$P'_{ei}(t) = P'_{mi}(t) - (T_{Ai}/T_A) P'_a(t) \quad (2.5.3)$$

olur. Şekil 2.5.1 de iki santralli şebeke için tam orta zaman modeli gösterilmiştir.

Orta zaman alanında birleşik sistem davranışından dolayı elektrik gücü $P_e(t)$ cebirsel eşitlikle çözülebilir. Toplam elektriksel aktif yük üç kısımdan meydana gelir. Birinci ve en önemlisi şebeke frekansındaki ($f_0 = 50$ Hz'de) aktif yüküdür. Yükle frekansa bağımlılığından $P'_f = V_L \Delta f$ ortaya çıkar. Üçüncü olarak döner yükleri göz önüne alabiliriz. Bunlardan elektrik yükünün dinamik davranışı :



Şekil 2.5.1. İki santralli ring şebeke için tam orta zaman modeli.

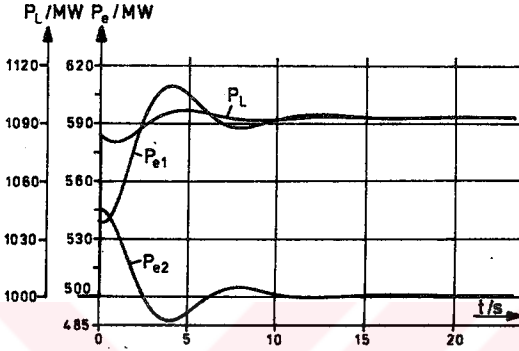
$$\Delta P'_L(t) = \Delta P'_{50} + V'_L \Delta f' - \frac{T_{AL}}{T_A} P'_a \quad (2.5.4)$$

yazılır.

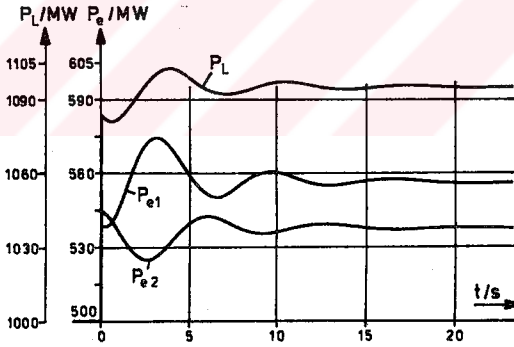
Şekil 2.5.2 elektrik gücünün davranışını gösterir. Burada ani yüklenmeden önce her iki santralin eşit olarak (500 MW) yükün karşılamasına katkıları vardır. $t = 0$ anında KW1'in elektrik gücü $P_{e1}(t)$, $\Delta P_{e1}(t=0) = (4,3/11,1) \cdot 100 = 38,7$ MW kadar yükselir. KW2'nin aktif gücü $P_{e2}(t)$, $t = 0$ anında $\Delta P_{e2}(t=0) = (4,93/11,1) \cdot 100 = 44,5$ MW kadar yükselir. Yükin ani yükselmesi $P_L(t)$ ise,

$\Delta P_L(t=0) = [1 - (1,85/11,1)] \cdot 100 = 83,2$ MW olur. Burada daha sonra KW1'den alınan elektrik gücü $P_{e1}(t)$ ile yük $P_L(t)$ arasında denge ayarlanır.

Şekil 2.3.3 ile bir kıyaslama yapıldığında, orta zaman aralığında mekanik güç ile elektriki güç arasında büyük fark ortaya çıkar. Burada dikkati gerektiren husus elektrik gücünün ani değişimi birleşik sistem davranışının direkt olarak kabuldür. Şekil 2.5.3 durum 2 için elektrik gücünün zamansal davranışını gösterir. $t = 0$ anında Şekil 2.5.2'de görüldüğü gibi güç yükselmeleri ortaya çıkar (82).



Şekil 2.5.2. 1 numaralı durum için KW1 ve KW2'nin elektriksel güçleri ve yük davranışları.



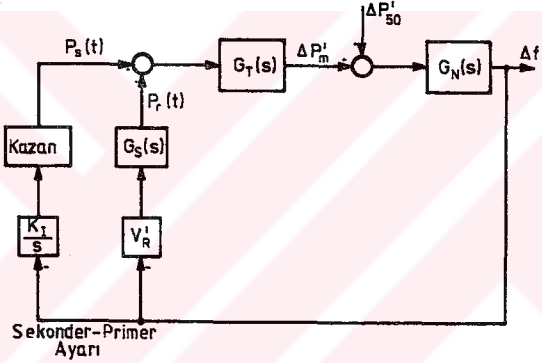
Şekil 2.5.3. 2 numaralı durum için KW1 ve KW2'nin elektriksel güçleri ve yük davranışları.

2.6. Sekonder Ayarı

2.6.1. Sekonder ayarlamamanın görevleri

Sekonder ayarlayıcının görevi primer ayarlayıcının sebep olduğu sabit frekans sapmasını sıfıra ayarlamaktır. Bundan dolayı da sekonder

ayarlayıcının etkisi bir integral ayarlayıcısı olmalıdır. Dinamik santral ve şebeke modeli şimdi Şekil 2.6.1'e göre daha geliştirilmiştir. Bunun içinde primer ayarlayıcı ve ayar kısmının taşıma fonksiyonu $G_S(s)$ ile türbinin taşıma fonksiyonu $G_T(s)$ ayrı ayrı çizilmiştir. Sekonder ayarlanmanın integral davranışı kazana etki eder. Burada incelenen orta zaman aralığında kazan için dinamik modele girilmeyecektir. Sekonder ayarlanmanın integral sabiti K_I büyük seçilir ve böylece sekonder ayarlama yavaş yavaş etki gösterir. Bu etkinin sınırı 1 ile 2 dakika olarak kabul edilebilir. Bu zaman aralığında kazan



Şekil 2.6.1. Sekonder ayarın santralin orta zaman modeli üzerine olan etkisi.

için taşıma fonksiyonu $G_K(s) = 1$ yeterlidir. Sekonder ayarlayıcı, ani yüklenme karşısında yakıt girişini çoğaltır ve böylece istenilen yeni güç hazır olur. Benzer şekilde frekans sapması sıfıra gider. Böylece buhar geçiş ventili eski konumuna geri döner. Toplam ek güç sekonder ayarlayıcı üzerinden anında hazır olur. Yani sekonder ayarlayıcı toplam ani yük ΔP_{50} 'yi hazır bulundurmalıdır.

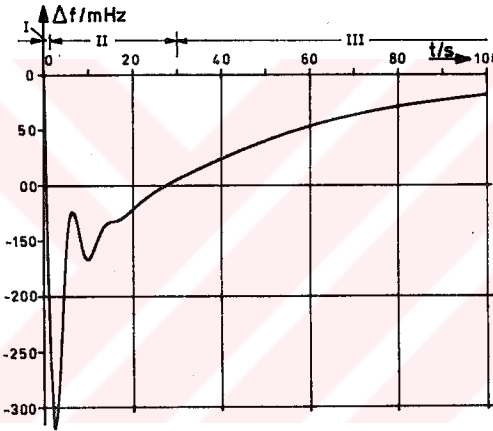
2.6.2. Sekonder Ayarlanmasının Gerçekleşmesi

Matematiksel olarak sekonder ayarlama aşağıdaki eşitlik gibi integral ayarlayıcı ile yazılır.

$$\Delta P_S = -K_I \int \Delta f(t) dt \quad (2.6.1)$$

Bu eşitlikteki eksi işareti negatif frekans sapma durumunda ΔP_s 'in pozitifliğini gösterir. Ayar parametresi K_I yeterli derecede küçük seçilmelidir ki, sekonder ayarlayıcı küçük frekans sapmalarına karşı reaksiyon göstermesin.

Şekil 2.6.2 durum 1 için frekans eğrisini gösterir. II.kısımda kısa süreli bir frekans saptması görülmektedir. III.kısımda da bunun yavaş yavaş sıfıra gittiği görülür.

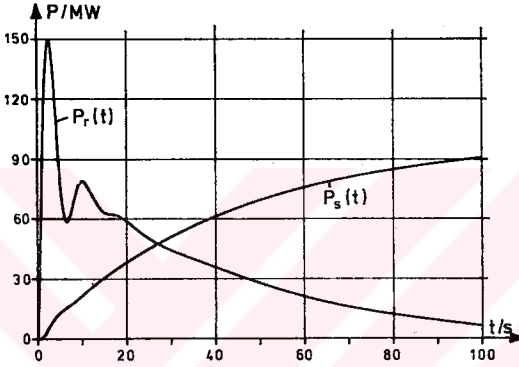


Şekil 2.6.2. $K_I = 12 \text{ MW/s.Hz}$ olduğu sekonder ayarı dikkate alarak 1.durum için yük sıçramasına göre frekansın davranımı (83).

Sekonder ayarlayıcıya iki değişik şekilde çalışan santral bloklarının katkısı vardır. Bundan dolayı Şekil 2.6.1'de primer ayarlamaya katkısı olan bütün santrallar için bir taşıma fonksiyonu çizilmiştir. Katkı faktörünün seçimi ile hangi santral blokunun primer ayarlamada katkısı olduğu belirlenir.

Şekil 2.6.3 primer ayar gücü $P_r(t)$ ve sekonder ayar gücü $P_s(t)$ eğrisini göstermektedir. Seçilen örnekte, ani yüklemeye $\Delta P_L(t) = 100 \text{ MW}$ 'da durum 1'de primer ayarlayıcının gücü $\Delta P_r = 93,2 \text{ MW}$ çıkar. Sekonder ayarlayıcı toplam yüklenmeyi kompanse etmelidir. Çünkü III.kısımın sonunda

tekrar şebeke frekansına ulaşılmalıdır. Yükleme kompanzesi için $t = 100$ s de primer ayarlayıcı $P_r = 10$ MW ve sekonder ayarlayıcı $P_s = 90$ MW değerindedir.



Şekil 5.2.6.3. Yük sıçraması $\Delta P = 100$ MW olmasındaki ayar için, $P_r(t)$ primer ayar gücüyle $P_s(t)$ sekonder ayar gücünün davranış eğrileri.

3. Enterkonnekte Şebekede Frekans-Güç Ayarı

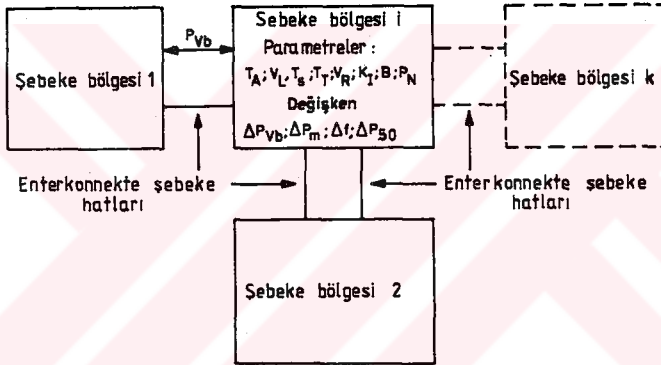
3.1. Giriş

Geçtiğimiz bölümde belirtildiği gibi ring şebekedeki frekans ayarlamasından yola çıkarak şimdi de ortalama zaman domeninde enterkonnekte şebekenin modelini çıkarma ele alınacaktır. Buradan hareketle frekans-güç ayarı elde edilecektir. Burada bölüm 2'de ele alınan devir sayısı ayarına ek olarak $\Delta f(t)$ frekans farkının $f_0 = 50$ Hz nominal frekansta aynı zamanda ayarı ve enterkonnekte ögeler arasındaki alış-veriş yapılmış verim söz konusudur. Bunlar iki taraf arasında daha önceden saptandığından nazari değerin verim farklılığı hızlı bir şekilde ayarlanmalıdır, bu da otomatik frekans-güç ayarıyla elde edilmek zorundadır.

3.2. Enterkonnekte Şebekenin Yapısı

3.2.1. Enterkonnekte Şebekenin Yapı Şekli

Şekil 3.2.1 pek çok şebeke sahasından oluşan enterkonnekte sistemin yapısını gösterir. Her bir şebeke sahası ring şebekesi olarak bölüm 2'deki sonuçlarla modelize edilebilir. Şekil 3.2.1'deki parametrelerin anlamı, Bölüm 2'den bilinmektedir. "i" indeksi uygun parametrelerin "i" deki şebeke sahasını ilgilendirdiğini gösterir.



Şekil 3.2.1. Birçok şebeke bölgesinden oluşan enterkonnekte şebekenin yapısı.

- T_A : Bütün dönen ağırlıkların adı geçen şebeke sahasındaki yol alma zaman sabiti.
 V_L : Yüklerin frekans bağımlılığı faktörü,
 T_S : Türbin giriş vanası için kol ayarının zaman sabiti,
 T_T : Türbin zaman sabiti,
 V_R : Primer ayarlayıcının kuvvetlendirme faktörü,
 K_1 : Sekonder ayarının entegre sabiti,
 B : Frekans farklılığı için ağırlık faktörü (Bak. 3.3.2)
 P_N : Şebeke sahasının nominal gücü.

Hesaplanan sistem değişkenlerini, $\Delta f(t)$ frekans farkı ve aşağıdaki güç değişiklikleri oluşturmaktadır:

ΔP_m : Mekanik tahrik gücü,

ΔP_e : Generatörün elektrik güç üretimi,

ΔP_L : Frekansa bağlı olarak yük değişimi,

ΔP_{vb} : Şebeke sahaları arasında değiştirilen enterkonnekte güç.

Parametre takımının her bir şebeke sahası için ifadesi, sadece bir güç merkezi beslemesi bir şebeke sahasını tanımladığı anlamına gelir. Bu da şebeke sahası i'de meydana gelen güç merkezi beslemesinin yorumu olarak değerlendirilir. Diğer taraftan her bir tek besleme bölüm 2'de gösterildiği gibi şebeke sahası i'de modelize edilebilir. Bu durumda Şekil 3.2.1'deki parametreler her bir güç merkezi için tek tek verilmelidir.

Milli ve milletlerarası enterkonnekte işletme, işletme açısından bakıldığında gözle görülür avantajlar sunmaktadır. Enterkonnekte işletmenin kökeni ve geliştirilmesi, farklı üretim imkanlarına ve alıcıların bölgesel farklılık gösteren tüketici ilişkilerine dayanmaktadır. Özellikle güç merkezlerinin beraber işlemleri sonucu asgari, orta ve azami yükün karşılanmasına dikkat çekmek gerekir. Böylece yüksek verimli depolayıcı güç merkezinden (bunların arasında dağların su gücünün kullanılır hale getirildiği) yüksek oranda günlük enerji kazanılabilir. Esas ve orta yük sahasında tercih edilen büyük enerji miktarını sağlayan düzen konvansiyonel termik güç merkezi ve nükleer güç merkeziyle hazırlanmaktadır. Birleşik çeşitli işletmelerde daha iyi bir işbirliği için frekans dar sınırlar içinde ayarlanmalıdır. Buna ilaveten önceden belirtilen enerji değiştirilmesine normal düştüğe riayet edilmelidir. Bir makinanın devre dışı kalması gibi arızalar; rezervdeki gücün hazır tutulmasıyla enterkonnekte işletmede pek önemli değildir. Frekans-güç ayarının amacı; nominal frekansta güç alış verişini takip etmek ve şebeke sahasındaki ortaya çıkan ani yüklemeleri tek tek kontrol etmekten ibarettir. Avrupa'da; Almanya, Fransa, İtalya, Benelux, Avusturya ve İsviçre gibi enerji üretici firmalar ortak çalışmaktadırlar.

3.2.2. Enterkonnekte Sistemde İşletme Bilançosu

Eğer bir şebeke sahasında $\Delta P_{50,1} > 0$ yönünde bir yük değişikliği olursa, enterkonnekte sistemde elde edilen tüm güç, türbin ayarlayıcı-

sının müdahalesiyle ΔP_{mi} artar. i şebeke sahasındaki güç fazlalığı ise bu durumda $\Delta P_{mi} - \Delta P_{50,i}$ dir. Bu güç dengesizliği bütün sistem tarafından şu üç şekilde karşılanmaktadır.

1. i şebeke sahasının bütün kitlelerinin devrini hızlandırarak,

2. i şebeke sahasının P_L yükünün değiştirilmesiyle (zaten bu da frekansa bağlı (3.3.6)'daki eşitliğe uygun olarak değişir),

3. Enterkonnekte üzerinden dağıtımı yapılan güç $\Delta P_{vb,i}$ 'yi bütletmekle i şebeke sahasında $\Delta P_{50,i}$ güç sıçramasına göre işletme değişikliği ilişkileri elde edilmiş olur.

$$\Delta P_{mi} - \Delta P_{50,i} = P_{ai} + P_{fi} + \Delta P_{vb,i} \quad (3.2.1)$$

$\Delta P_{vb,i}$ gücünün artması, birleşik işletme kablolarında komşu şebekelere göre bütün yük değişikliklerinin toplamına eşittir.

$$\Delta P_{vb,i} = \sum_j \Delta P_{vb,ij} \quad (3.2.2)$$

Bununla birlikte bu toplam i şebeke sahasını diğer karma şebekelere bağlayan bütün enterkonnekte hatlarına erişir.

3.2.3. Dağıtım Gücünün Hesaplanması

Omik iletme kaybı ihmal edilirse her bir dağıtım gücünün değişimi için i ve j şebeke sahaları arasındaki bağıntı

$$\Delta P_{vb,ij} = T_{ij} (\Delta \delta_i - \Delta \delta_j) \quad (3.2.3)$$

dür.

Buradaki açı farkı; gerilim açısıyla birleşik hattın başlangıç ve bitişteki farkını gösterir. Senkronize sayı T_{ij} aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$T_{ij} = \frac{d P_{vb,ij}}{d (\delta_i - \delta_j)} \quad (3.2.4)$$

Birleşik hattaki akan güç :

$$P_{vb,ij} = P_{vb,ij}^{\max} \sin (\delta_i - \delta_j) \quad (3.2.5)$$

olarak verilmiş ve buradan birleşik hattaki ilgili senkronize sayı hesap edilebilir;

$$T_{ij} = P_{vb,ij}^{\max} \cos (\delta_i - \delta_j) \quad (3.2.6)$$

Burada $P_{vb,ij}^{\max}$ şebekede i ve j arasındaki maksimal statik stabil aktarılabilir gücü göstermektedir. Birleşik hattın, başlangıç ve bitişteki gerilim miktarlarını U_i ve U_j ve sanal reaktansı X_{ij} olarak tanımlarsak maksimal aktarılabilir güç için,

$$P_{vb,ij}^{\max} = 3 \frac{U_i U_j}{X_{ij}} \quad (3.2.7)$$

dir.

Birleştirilmiş iki komşu şebeke sahasındaki farklı gerilim açısı değişimleri $\Delta \delta_i$ ve $\Delta \delta_j$ uygun fazda $\Delta P_{50,i}$ yük sıçramasından sonra her iki şebeke sahasında frekans farklılığı ortaya çıkması anlamına gelir. Bu şekilde her bir şebeke sahası birleşik grup olarak görülebilir. Fakat iki farklı şebeke sahası ilk aşamada birleşik grup oluşturmaz ve böylece ilgili fazda güç değişimine neden olurlar. Diğer bir deyişle, güç sıçramasıyla doğrudan her iki şebeke sahasında güç salınımları meydana gelmektedir. Güç salınımlarını formüle edebilmek için i şebeke sahasındaki Δf_i frekans sapması ve gerilim açısının değişiminin

$$\Delta f_i = (1/2\pi) \frac{d}{dt} \Delta \delta_i \quad (3.2.8)$$

ilişkisiyle verildiğine dikkat edilmelidir. Bu da $\Delta\delta_i$ açısının zamansal değişimidir. Aynı zamanda açı hızının değişimi $\Delta\omega_i = 2\pi\Delta f_i$ dir. Bununla (3.2.3) eşitliği $\Delta P_{vb,ij}$ birleşik gücün değişimi için, $\Delta f_i(t)$ ve $\Delta f_j(t)$ frekans sapmalarının fonksiyonu olarak yazılabilir (84).

$$\Delta P_{vb,ij} = 2\pi T_{ij} (\int \Delta f_i(t) dt - \int \Delta f_j(t) dt) \quad (3.2.9)$$

i düğümlerindeki birleşik gücün toplam değişimi böylece bütün birleşik hatların toplamı olarak (3.2.2 'deki eşitlik)

$$\Delta P_{vb,i} = 2\pi \sum_j T_{ij} (\int \Delta f_i(t) dt - \int \Delta f_j(t) dt) \quad (3.2.10)$$

verilir.

Şebeke sahasının blok diyagramının çıkartılması için (3.2.1)'deki eşitlikten yola çıkılır. (2.2.3) ve (2.2.6)'daki eşitliklerin kullanılmasıyla ve normlandırılmış büyüklüklerin ifadesiyle güç denkliği için (3.2.1'deki)

$$\Delta P'_{mi} - \Delta P'_{50,i} = T_{Ai} \frac{d}{dt} (\Delta f'_i) + V'_{Li} \Delta f'_i + \Delta P'_{vb,i} \quad (3.2.11)$$

ifadesi yazılır.

Normlandırılmış güçler, karma sistemin nominal gücüyle normlandırılmış frekans sapmaları, nominal frekans $f = 50$ Hz ile hesap edilmelidir. Normlandırılmış büyüklükler "'" işaretiyle tanımlanır. Normlandırılmış ifadeler:

$$\Delta P' = \Delta P / P_N \quad (3.2.12)$$

P_N birleşik sistemin nominal gücüdür.

$$\Delta f'_i = \Delta f_i / f_0 \quad (3.2.13)$$

$f_o = 50$ Hz'dir. i şebeke sahasındaki yüklerin frekans bağımlılığında kullanılan (3.2.11'deki) V'_{Li} de normlandırılmış büyüklük olarak kullanılır. Bu da;

$$V'_{Li} = V_{Li} (f_o/P_N) \quad (3.2.14)$$

dür.

(3.2.10) 'daki denkleme Laplace transformasyonunu uygularsak $\Delta P'_{vb,i}(s)$ birleşik gücü için;

$$\Delta P'_{vb,i}(s) = \frac{2\pi}{s} \sum_j T'_{ij} (\Delta F'_i(s) - \Delta F'_j(s)) \quad (3.2.15)$$

yazılır.

(3.2.11) 'deki eşitlikten dolayı $\Delta F'_i(s)$ frekans sapması için

$$\Delta F'_i(s) = G_{Ni}(s) [\Delta P'_{mi}(s) - \Delta P'_{50,i}(s) - \Delta P'_{vb,i}(s)] \quad (3.2.16)$$

geçerlidir. Normlandırılmış senkronize birimi T'_{ij} için;

$$T'_{ij} = T_{ij} (f_o/P_N) \quad (3.2.17)$$

verilir.

$G_{Ni}(s)$ nakil fonksiyonu, i şebeke sahasının tanımı için (daha önceki bölümde belirtilmiştir).

$$G_{Ni}(s) = \frac{K'_{Li}}{1+sT_{Ni}} \quad (3.2.18)$$

verilir.

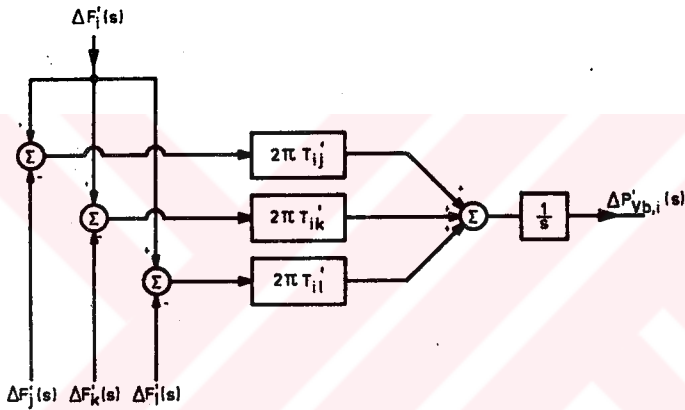
Şebeke zaman sabiti T_{Ni} ise;

$$T_{Ni} = \frac{T_{Ai}}{V'_{Li}} \quad (3.2.19)$$

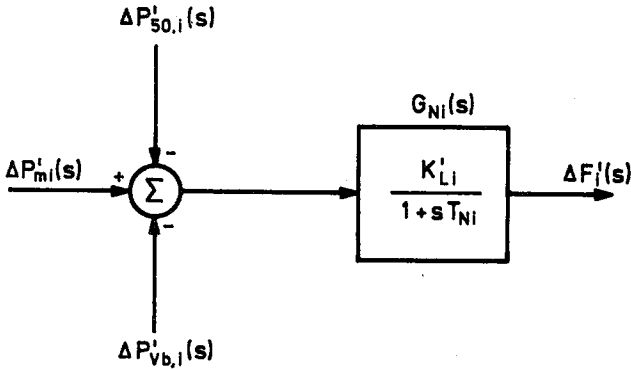
ile verilir. T_{Ai} yol alma zaman sabitidir. i şebeke sahasının güç sayısı K'_{Li} ;

$$K'_{Li} = 1/V'_{Li} \quad (3.2.20)$$

ile verilir. V'_{Li} yüklerin frekans sapmasıdır. (3.2.15) ve (3.2.16) ifadeleriyle şekil 3.2.2 ve Şekil 3.2.3'deki blok diyagramları çizilir.



Şekil 3.2.2. Enterkonnekte güç değişimi üzerine frekans sapmalarının etkisi.



Şekil 3.2.3. $G_{Ni}(s)$ transfer fonksiyonlu i şebeke bölgesinin gösterilişi.

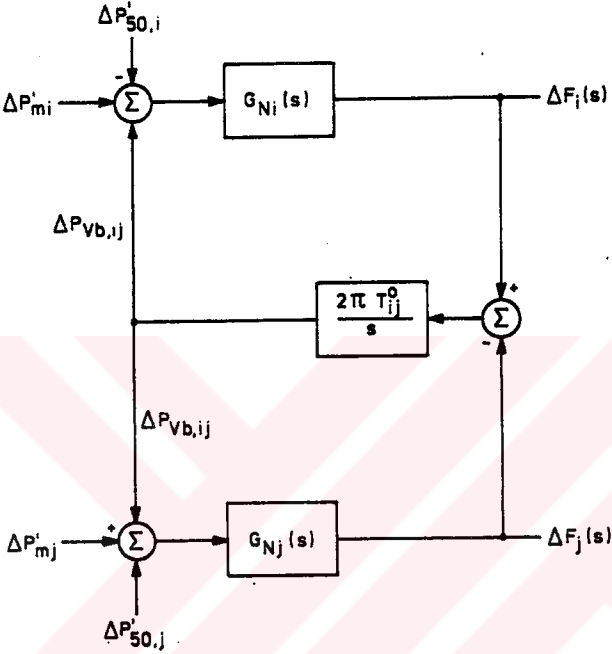
3.2.4. Birleşik Sistemin Dinamik Davranımı

Enterkonnekte hatta bağlanmış aynı nominal güce sahip iki şebeke sahası değerlendirilecek olursa Şekil 3.2.4'de gösterilen gücün dinamik davranımının hesabı için blok şeması çıkarılabilir. Şekil 3.2.2 ve şekil 3.2.3 'deki şekil kombinasyonlarından $i=1$ ve $j=2$ sonucu çıkar.

Blok şemasının iyi bir analizi sonucu, şebeke iletim fonksiyonu $G_{N1}(s)$ de ortaya çıkan yüklerin frekans sapmasını ifade eden V_{L1}^1 faktörü, sistemde üçüncü düzeni oluşturan tek kesici faktör olduğunu gösterir. Burada enterkonnekte şebeke sahalarının birbirine karşı salınımları söz konusudur. Şayet her bir şebeke sahası için sadece bir generatör devrede olursa her iki makinanın birbirine karşı kutup salınımlarını araştırmak gerekir. Bunun için iki senkron generatöre ait kesme davranımının ayrıntıları ile bilinmesi gerekir. Söz konusu modelde, generatörler sadece atalet momentiyile oluşturulmaktadır. Eğer çabuk zayıflatılmış kutup salınımı ihmal edilirse farklı frekans sapmalarının sebep olduğu $\Delta P_{vb,i}$ birleşik sistemdeki denkleme katkısı, frekans-güç ayarlamasının işlemi için ihmal edilebilir.

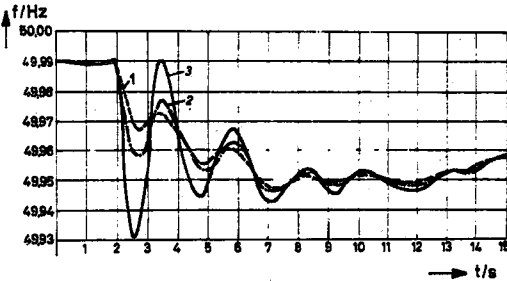
Bütün birleşik sistemin, enterkonnekte sistem davranımına geçici senkron makina salınımlarının ani değerlerinin ihmal edilmesi anlamına gelir. Önce şebeke sahalarının salınımlarını, zayıf karma hatlı büyük sistemlerde aynı modellerin yardımıyla araştırmak gerekir. Bu arada gerilim ayarı neticeleri dikkate alınmalıdır. Eğer zamana bağlı büyüklükler doğrudan arızanın ortaya çıkmasından hemen sonra incelenecek olursa münferit frekans sapmaları ayrıca ele alınır. Bunun için dinamik stabilitenin incelenmesi için kısa zaman modelleri tavsiye edilir.

Şekil 3.2.5 60 MW'lık güç merkezi bloğunun kayıplardan sonraki ölçülmüş frekans davranımını göstermektedir. Şebeke sahaları 1 ve 2 birbirinden uzakta bulunan şebeke kısımlarını içerdiği sırada, üçüncü saha, devre dışı kalmış blokun çevresindeki şebekeyi gösterecek şekilde, bütün birleşik şebekeyi üç şebeke sahasına ayırırsak frekans ölçümüne dayanarak üç şebekede de arızadan sonra doğrudan birbirine göre sapmalar gösteren $f_1(t)$ frekansları ortaya çıktığı tesbit edilir. Sınırlı bir bölge ile



Şekil 3.2.4. 2 şebeke bölgesi arasında güç salınıminin hesaplanmasındaki blok diyagramı.

ilgili frekans farklılıkları çok çabuk söndürülebilmektedir. Böylece 3 ila 5 s arasında enterkonnekte frekans davranımı tesbit edilmektedir.



Şekil 3.2.5. 280 km (eğri 1), 210 km (eğri 2) ve 60 km (eğri 3) mesafelerde 660 MW'lık bir blokun-devre dışı kalmasından sonra Alman enterkonnekte şebekesinin frekans davranışı (85).

$\Delta f_i(t)$ 'nin kendi aralarındaki k münferit frekans sapmalarının çabuk sönmesi Şekil 3.2.4'deki tanımlanan modelde tanımlanmamıştır. Bunun için generatörler ve hat davranışları tek tek dikkate alınmalıdır. Frekans güç ayarlamasının incelenmesi için münferit frekans sapmaları ihmal edilmelidir. Bu basite indirgemeye dayanan karma sistemin dinamik modeli, tamamen orta zaman sahasında yani arızanın ortaya çıkmasından 3 ila 60 saniye gibi bir zaman dilimi için geçerlidir. Bu zaman diliminde frekans güç ayarı aktif olarak kontrol altındadır.

Birleşik sistemin dinamik modeli için bu tezin önemli sonuçları vardır. Birleşik şebekelerde kısa saniyeler sonunda enterkonnekte bir davranıma ulaşıldığı için, frekans güç ayarı incelemesinde güç kutuplaşmaları 1 ila 3 saniye sonra gerçekleşeceği için ihmal edilebilir. Burada başlangıçtan itibaren sadece bir frekans değişimi hesap edilmektedir.

3.3. Şebeke Kontrolünün Gerçekleşmesi

3.3.1. Orta Zaman Modeli

Bazı yaklaşımlardan sonra tek bir $\Delta f(t)$ frekans saptmasıyla oluşturulacak birleşik sistemin modelizesi ve bunun sonuçlarından hareket ederek; birleşik güç sapmalarını $\Delta P_{vb,i}$, i şebeke sahasındaki elektrik gücünün farkını ΔP_{Li} olarak ele alıp frekans-güç-ayarının etkilerini ele alacağız. Bunun birleşik sistemdeki görevi şöyle tanımlanır :

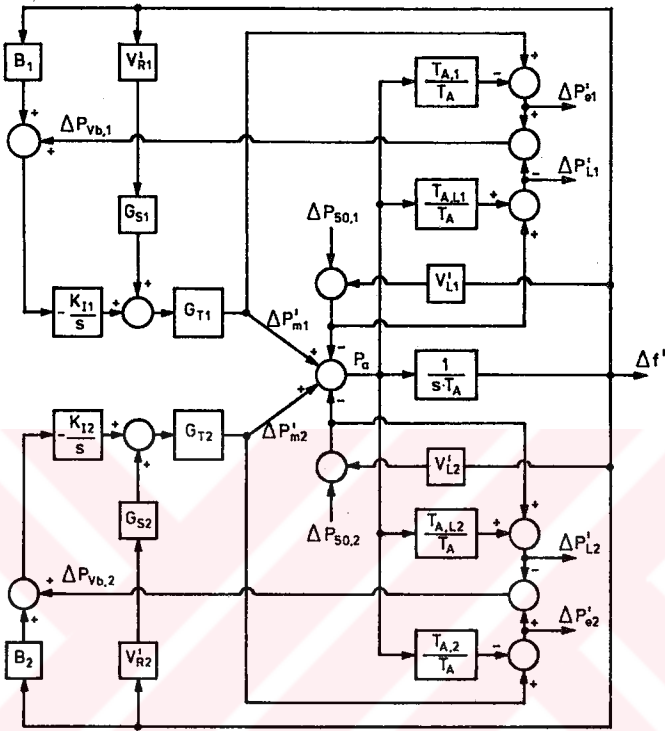
1. Normal çalışma şartlarında birleşik sistemin her bir elemanı kendi şebekesinde yükü karşılamaya çalışmaktadır. İstisna yükler dağıtım gücünü oluşturur.

2. Birleşik sistemin her bir elemanı, şebeke sahasında aniden ortaya çıkabilecek ek güç değişikliği durumu için, kısa zamanlı kontrol gücü (saniyelik rezerv) ile yükseltilmiş güç ihtiyacını karşılayacak durumda olmalıdır. Uygun fazın akışından sonra yükseltilmiş güç ihtiyacı duyulan şebeke sahasında bu güç hazır bulundurulmalıdır. Daha detaylı bir araştırma için iki şebeke sahasından oluşan karma sistemin modeli çıkarılmalıdır. Burada, her iki şebeke sahasının da Tablo 2.1'deki parametrelerle tanımlandığı farz edilmektedir.

Bu incelemelerde KW2; şebeke sahası 2'deki bütün güç merkezi modellerini, KW1'de şebeke sahası 1'deki eşdeğer güç merkezi modelini tanımlar.

Birleşik şebekenin dinamik davranımını araştırabilmek için bölüm 3.2'deki komuların modelizesine el atmak gerekir. 3.2.5'deki şekille benzer, 2 şebeke sahasında 3 saniyelik bir zaman periyodunda farklı frekans saptamaları $\Delta f_1(t)$ ve $\Delta f_2(t)$ ortaya çıkmaktadır. Birleşik sistemin frekans-güç ayarının ifade edilebilmesi için, enterkonnekte sistemin ortak frekans davranımlı olması şartı yeterlidir. Yük değişikliğinin ortaya çıkmasından sonraki ilk saniyelerde frekans farklılıklarının ihmalı, karma sistem birbirine yakın bağlanmışsa kontrol üzerine etkisi azdır. Şebeke 1 de arıza olarak yük sıçraması daima $\Delta P_{50,1} = 100 \text{ MW}$ olarak ele alınmalıdır. Birleşik sistemin dinamik davranımının ifade edilebilmesi için Şekil 2.3.1'de gösterilen modelin tekrar gözden geçirilmesi gerekir. Çünkü birleşik sistemin gücünün zamansal değişimi, Şekil 3.2.4'de gösterilen kısa zaman dinamiğinin parça modeliyle ifade edilememektedir. Şimdi de iki şebeke sahası arasındaki frekans saptamasının yanısıra dağıtım gücünün ayarlanması da zorunlu olduğu için Şekil 2.3.1 ve 2.3.2 elektrik gücünün hesabı için dikkate alınmalıdır. Bunlarla da frekans-güç kontrolünün modelizesi için, Şekil 3.3.1 deki orta zaman modeli elde edilir.

Tek tek iletme fonksiyonlarının açıklaması bölüm 2'de izah edilmektedir. Şebeke sahası 1 ve 2 de yük sıçramalarının ortaya çıkacağı ihtimali Şekil 3.3.1 de göz önüne alınmıştır ki, bunlar blok bağlantısında giriş büyüklüğü olarak $\Delta P_{50,1}$, $\Delta P_{50,2}$ ile tanımlanmıştır. Toplam birleşik sistemdeki $\Delta f(t)$ birimsel frekans saptamalarının hesaplanabilmesi için, toplam birleşik sahanın T_A yol alma sabitinin bloğa ilave edilmesi gerekir. Aynı zamanda şebeke sahası 1 ve 2 deki bütün tüketicilerin frekans bağımlılıkları norm büyüklük V_{11}' ve V_{12}' yle verilmiştir. $P_a(t)$ hızlanma gücünden, $\Delta P_{ei}(t)$ elektrik gücünün değişiklikleri T_{A1}/T_A yol alma sabitlerinin davranımıyla $i = 1, 2$ olarak verilmiştir. Bu arada T_{A1} zaman sabitleri i şebeke sahasındaki türbin generatör takımının dönen kısımlarının miktarını içerir. $\Delta P_{11}'$ yük değişikliği; T_{A11}/T_A zaman sabit miktarının davranımıyla verilmektedir. T_{A11} zaman sabiti, i şebeke sahasındaki devir sayısı ayarlan-



Şekil 3.3.1. Frekans güç ayarının zamana bağlı değişimlerinin hesabında orta zaman modeli (86).

mamış dönen yük makinalarıyla tanımlanmıştır. $\Delta P'_{ei}$ elektrik gücünün değişikliği ve $\Delta P'_{Li}$ yük değişikliğinin arasındaki fark $\Delta P'_{vb,i}$ birleşik sistemin gücünün değişikliğini verir.

$$\Delta P'_{vb,i} = \Delta P'_{ei}(t) - \Delta P'_{Li}(t) \quad (3.3.1)$$

ve normlandırılmış büyüklükleriyle ifade edilir.

Bahiste, enterkonnekte hatla birleştirilmiş iki şebeke sahası incelenecek olursa; $\Delta P'_{vb,1} = -\Delta P'_{vb,2}$ tanımı geçerli olmak zorundadır. Yani şebeke 1'den çıkan güç, şebeke 2'ye giren güce eşittir. Her şebeke sahasının kendine mahsus ve daha ileride incelenecek şebeke ayarlayıcısı

vardır. i şebeke ayarlayıcısı, giriş büyüklüğü olarak $\Delta f'(t)$ frekans sapmasına ve aynı zamanda $\Delta P'_{vb,i}$ birleşik güç değişikliğine sahiptir.

3.3.2. Primer Kontrol

Şebeke kontrolü sadece primer kontrolüne dayandığı hipotezinden yola çıkılırsa bölüm 2'de devir sayısının orantılı kontrolü bulunmaktadır. Burada giriş sinyali $\Delta f(t)$ frekans sapması, çıkış sinyali $P_r(t)$ primer kontrol gücüdür.

Sabit işletme durumunda, uygun faza geçildikten sonra frekans ve geçiş güçlerindeki değişiklikler, primer kontrolü güçlendirici faktör V'_{Ri} ile verilmektedir. Şekil 3.3.1'den hareketle $i = 1$ ve $i = 2$ ile;

$$\Delta P'_{mi,stat} = -V'_{Ri} \Delta f'_{stat} \quad (3.3.2)$$

olur.

Sabit işletme durumunda ayrıca frekans değişimi için $df/dt = 0$ ve güç hesabı için her şebeke sahasındaki yük sıçramaları $\Delta P'_{50,1}$ ve $\Delta P'_{50,2}$ kabulü ile;

$$-V'_{Ri} \Delta f'_{stat} - \Delta P'_{50,i} - V'_{Li} \Delta f'_{stat} = \Delta P'_{vb,istat} \quad i = 1,2 \text{ için} \quad (3.3.3)$$

olur.

$\Delta f'_{stat}$ ve $\Delta P'_{vb,1stat} = -\Delta P'_{vb,2stat}$ aranılan büyüklüklerin çözülmesi frekans sapmasını verir.

$$\Delta f'_{stat} = - \frac{\Delta P'_{50,2} + \Delta P'_{50,1}}{V'_{N1} + V'_{N2}} \quad (3.3.4)$$

Birleşik hattın güç değişikliği aşağıdaki sonuçla verilir.

$$\Delta P'_{vb,1stat} = \frac{-V'_{N1} \Delta P'_{50,1} + V'_{N2} \Delta P'_{50,2}}{V'_{N1} + V'_{N2}} \quad (3.3.5)$$

(3.3.4) ve (3.3.5)'deki denklemlerde bölüm 2'de tanıtılan V'_{Ni} şebeke sabitleri kullanılmıştır. Bunlar şöyle tanımlanmıştır :

$$V'_{N1} = V'_{L1} + V'_{R1} \quad V'_{N1} = 12,5 \quad \text{ve} \quad V'_{N2} = 8,5 \quad \text{ile} \quad (3.3.6)$$

Şebeke sahası 1'deki $\Delta P'_{50,1}$ yük sıçramasının basitçe durumu incelenecek olursa (3.3.4) ve (3.3.5) deki denklemler şu sonuçlara varır:

$$\Delta f'_{stat} = - \frac{\Delta P'_{50,1}}{V'_N} \quad \text{ile} \quad V'_N = V'_{N1} + V'_{N2} = 21 \quad (3.3.4.a)$$

$$\Delta P'_{vb,1stat} = - \frac{V'_{N1} \Delta P'_{50,1}}{V'_N} \quad (3.3.5.a)$$

Tablo 2.1 de 2 nolu durumda verilen model parametreleriyle (3.3.4.a) denkleminde işletme durumunda frekans sapmaları (3.3.5.a) denkleminde birleşik hattın güç değişimi ortaya çıkar.

$$\Delta f_{stat} = -0,119 \text{ Hz} \quad (3.3.7)$$

$$\Delta P_{vb,1stat} = - 41 \text{ MW}$$

İki şebeke sahasından oluşan birleşik hattın uygun davranımı Şekil 3.3.2 'de gösterilmiştir.

Enterkonnekte şebeke davranımının seçilmiş orta zaman modeliyle izahı yapılamadığı tezinden ve güç salınımların kısa bir zaman dilimi için ortaya çıkmalarından dolayı, 3.3.1 'deki şekle bağlı olarak $\Delta P'_{vb,1}$

birleşik güç değişimi $t = 0$ kapama anında, sıçrama biçiminde kendini gösterir. 3.3.7'deki eşitliğe uygun olarak primer kontrolün etkisiyle bölüm 2'ye göre statik Δf_{stat} frekans sapması elde edilir. Şebeke sahası 2 sabit işletme durumunda bile $\Delta P_{50,1} = 100$ MW'lık ilave güç ihtiyacının karşılanmasına ortak olmaktadır. Burada şebeke sahası 2'den, şebeke sahası 1'e 40 MW'lık bir güç aktarılmaktadır. Mevcut örnekte $\Delta P_{vb,1} = -\Delta P_{vb,2}$ dir.

3.3.3. Sekonder Kontrolü

Primer kontrolün analizinden anlaşıldığı gibi ylık sıçramasından sonra nazari değerlerle frekans dağıtım gücü sapmalarının hemen sıfır olması için birleşik şebekede, integral kontrol olarak sekonder kontrolün hesaba katılması zorunludur. Yani sabit işletme durumunda her şebeke sahası kendi yükünü karşılayacak durumdadır. Bütün bu düşüncelerden sonra Şekil 3.3.1'deki düzenleme sinyali frekans-dağıtım gücü sapmalarından oluşan bir kombinasyondan meydana geldiği sonucuna erişilir. Düzenleme sinyali i şebeke kontrolü için aşağıdaki formüle sahiptir:

$$u_i(t) = \Delta P_{vb,i} + B_i \Delta f \quad (3.3.8)$$

$\Delta f(t)$ frekans sapması için, B_i denge faktörü MW/Hz boyutuna sahiptir. Buradan da;

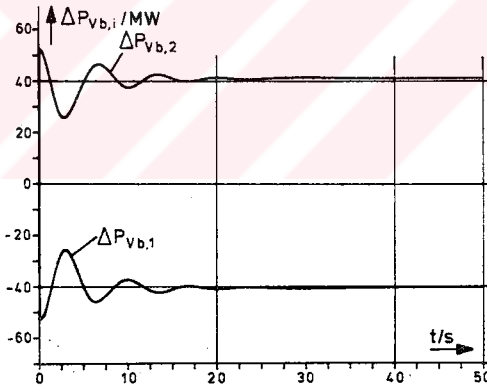
$$\Delta P_{si} = -K_{ii} \int (\Delta P_{vb,i} + B_i \Delta f) dt \quad (3.3.9)$$

yazılır. Buradaki eksi işareti, eğer Δf ve $\Delta P_{vb,i}$ eksi olursa verimin arttığını meydana çıkarır. B_i denge faktörü, V_N şebeke statığında yerine konursa sekonder kontrolü şebeke diyagram metoduna göre çalışır. Burada şebeke 2, herhangi bir $\Delta P_{L2} \neq 0$ arızasının durumunu tasvir edebilmek için incelenir.

$$\Delta P_i(t) = -V_{N1} \Delta f(t) \quad (3.3.10)$$

Şebeke 2'den gelen ΔP_1 gücü birleşik hat sayesinde muhafaza edilmektedir. Yani $\Delta P_1(t) = \Delta P_{vb,1}$ dir. (3.3.10) eşitliğini $B_1 = V_{N1}$ ile (3.3.9) 'da yerine yazarsak şebeke 1'de $\Delta P_s(t) = 0$ özelliğine doğrudan varılır. Yani 1 nolu şebeke sahasının sekonder kontrolünün şebeke sahası 2'de meydana gelen ek ΔP_{L2} yükünün muhafazası için faydası olmaz. Şebeke 2'de $\Delta P_2(t) = -V_{N2} \Delta f(t)$ ve $\Delta P_{vb,2} = -\Delta P_{vb,1}$ ile (3.3.9) eşitliğine uygun olarak $B_2 = V_{N2}$ ile sekonder kontrolü için; $\Delta P_{S2} = \Delta P_{L2}$ olduğu geçerlidir.

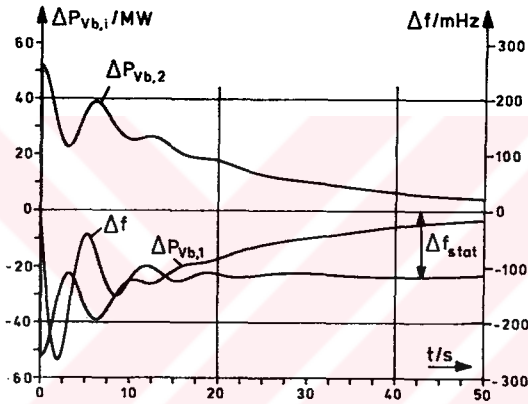
Frekans güç kontrolünün dinamik davranışını açıklamak için şimdi de iki şebeke sahasından oluşan birleşik şebeke incelenecektir. Burada da yine şebekenin tanımı için tablo 2.1'deki parametreler kullanılacaktır. $\Delta P_{50,1} = 100$ MW arızası şebeke sahası 1'de ortaya çıkmaktadır. Örnek şebekenin simülasyonu için şekil 3.3.1 uygundur.



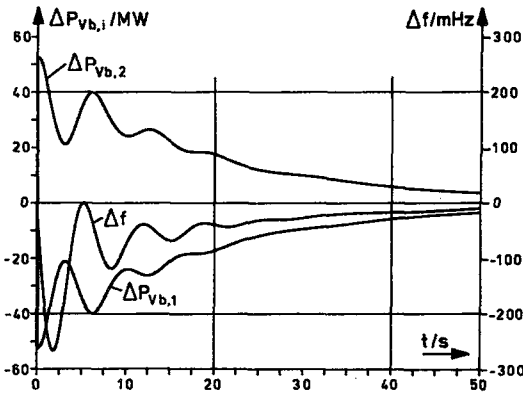
Şekil 3.3.2. Primer ayar ile enterkonnekte güç değişiminin değişimi (87).

Düzenleme davranımı için, 3.3.8 'deki eşitlikten sekonder düzen sinyalinin oluşumu için ihtiyaç duyulan B_1 ve B_2 sayılarının hemen sıfır olduğunu göstermek için şekil 3.3.3 'deki durum incelenir. Diğer bir ifadeyle $\Delta f(t)$ frekans sapması, sekonder kontrolün integral ayarlayıcısında dikkate alınmamaktadır. Bu durumda sabit iş-

letme frekans sapması, $\Delta f_{\text{stat}} \neq 0$ olur. Diğer yünden $\Delta P_{vb,1}$ birleşik hatların sapmaları, sekonder kontrolüyle tamamen ayarlanabilmektedir. Pratikte, B_1 sayısı, frekans sapmasını yoğunlaştıracak şekilde i şebeke sahasının 2.4.4 eşitliğinde tanımlanan güç sayısı V_{N1} 'de yerine koyarak seçilmektedir. Bu durumda sekonder kontrolün şebeke vektörel davranımı söz konusudur. Şekil 3.3.4 'de parametre ayarında birleşik sistemin dinamik davranımını açıklamaktadır. Böylece sadece $\Delta P_{vb,i}$ dağı-



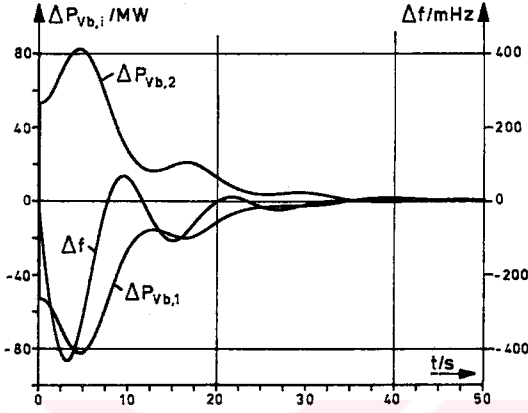
Şekil 3.3.3. $B_1 = B_2 = 0$ 'da enterkonnekte güçlerin ve frekansın zamana göre değişimi (88).



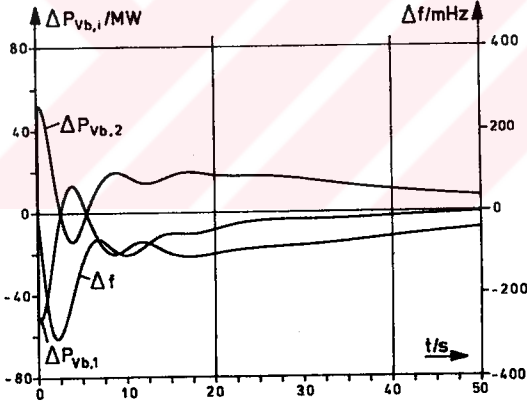
Şekil 3.3.4 Şebeke eğrileri yöntemine göre enterkonnekte sistemin ayarları.

tım gücünün değil, $\Delta f(t)$ frekans sapmasının da tamamen ayarlandığı tesbit edilmektedir. Doğrudan arızanın çıkmasından sonra şebeke sahası 2, $\Delta P_{vb,2}$ rezerv gücüyle ilave yük talebinin muhafazasına iştirak eder. Fakat şebeke 2'den şebeke 1'e olan bu güç yardımı sınırlı bir zaman içindir. Sekonder kontrolünün oluşumundan sonra $\Delta P_{vb,2}$ karma gücünün değişimi sıfıra ayarlanır. İlave yükü $\Delta P_{50,1} = 100$ MW yalnız güç merkezleri tarafından şebeke 1'de hazır hale getirilmektedir. Hatta iki şebeke sahasının davranımı, farklı düzen davranımıdır. Şebeke sahası 1'de, sadece sekonder kontrolün , şebeke sahası 2'de primer ve sekonder kontrolün bulunduğu bir düzen davranımı izah edilir.

$\Delta P_{50,1} = 100$ MW arızası sekonder kontrolla ayarlanmış şebeke 1'de ortaya çıkarsa, ilk olarak $\Delta P_{vb,2}$ rezerv gücü birleşik hat ve şebeke sahası 2'den şebeke sahası 1'e getirilmelidir. Şebeke sahası 1'de primer kontrolü bulunmadığı için $\Delta P_{50,1}$ 'in ayarlanma imkanı olmamaktadır. Bu yüzden asgari değeri $\Delta f_{\min} = -430$ mHz olan oldukça kuvvetli bir frekans sönmesi ortaya çıkmaktadır. Primer kontrolü, şebeke 2'deki frekans kesilmesini önlemeye çalışırken, şebeke 1'de kısa süreli dağıtım gücü fazlalığı ortaya çıkar. Bu yüzden $f(t)$ frekansı kısa bir süre için 50 Hz'in üstüne çıkar. Yük sıçraması $\Delta P_{50,1}$ oldukça büyük güç ve frekans değişiklikleri meydana getirir. Bunun tezatı olan şekil 3.3.6'da izah edilen durum incelemelidir. Burada, şebeke sahası 1'de hem sekonder hem de primer kontrol olduğu halde $\Delta P_{50,1} = 100$ MW lık yük sıçramasının ortaya çıktığı varsayılmaktadır. Diğer yönden şebeke sahası 2 için sadece bir sekonder kontrolü olduğu farz edilmektedir. Uygun davranım Şekil 3.3.6'da izah edilmiştir. Şekil 3.3.5 oldukça az frekans ve dağıtım gücü sapmalarını gösterir. Bu iyileştirilmiş durumun sebebi, primer kontrolün şebeke 1'deki $\Delta P_{50,1}$ yük değişimine derhal reaksiyon gösterebilmesindendir. Tabii bu durumda birleşik hattın güç salınımı $\Delta P_{vb,1}$ $2,5 < t < 5,0$ lık zaman aralığında giriş sinyalinin değişimiyle iletim yönünde değişir.



Şekil 3.3.5. Enterkonnekte sistemin dinamik davranışı; 1 nolu şebeke bölgesinde yalnızca sekonder, 2 nolu şebeke bölgesinde hem primer hem de sekonder ayarlanıyor.



Şekil 3.3.6. Enterkonnekte sistemin dinamik davranışı; 1 nolu şebeke bölgesinde hem primer hem sekonder, 2 nolu şebeke bölgesinde yalnızca sekonder ayarı yapılıyor (89).

3.4. Sonuç

Orta zaman modelinde tek şebeke sahalarının $\Delta f_1(t)$ frekans sapmaları ihmal edilebilir. Yani enterkonnekte sistem için uygun bir frekans davranımı şart koşulmaktadır. Kısa zaman modelinde olayların simülasyonu

0 ila 3 saniye, orta zaman modelinde ise olayların simülasyonu 3 ila 60 saniye arasında olur.

4. Gerilim Ayarı

4.1. Giriş

İki denge durumu arasındaki geçiş davranışı göstermek için orta zaman modeli geliştirildi. Bu model primer ve sekonder ayarlamayı göstermek için gayet kullanışlıdır. Burada, elektriksel yük değişimi ΔP_{50} giriş olarak ve şebeke frekansı $f = 50$ Hz den sapma Δf çıkış olarak bir fonksiyon oluşur. Bu şebeke ya da santralin taşıma fonksiyonudur. Enterkomekte şebekelerde orta zaman stabilitesi frekans davranışı, elektriksel yük değişimine göre olur (90). Bunun yanında küçük bir frekans sapmasında aktif güç dengesi mümkün mertebe kısa zamanda primer ayarlayıcı tarafından sağlanmalıdır. Sekonder ayarlayıcıda frekans sapmasını sıfıra indirir. Birleşik şebekede, frekansın yanında şebeke kısımları arasındaki dağıtım gücü de ayarlanmalıdır.

Şebeke eşitliklerinin analitik incelenmesinde, aktif gücün daha çok gerilim açısına ve az da olsa gerilim yüksekliğine bağımlı olduğu gösterildi. (Bölüm 2 ve 3) Diğer taraftan reaktif güç ise daha çok gerilim yüksekliğine ve biraz da gerilim açısına bağlıdır. Bu fiziksel kopukluk sadece sabit işletim durumunda geçerlidir. Şimdiye kadar anlatılan modellerde aktif güç ile frekans bağımlılığı dikkate alındı ve gerilim değeri sabit bir değer kabul edildi.

Bu bölümde ise, reaktif güç-gerilim ayarlamasının dinamik durumları incelenecektir. İnceleme kısa zaman aralığında olacaktır. Gerilim ayarında aşağıdaki düşünceler vardır :

- Gerilim ayarı için reaktif güç üretilmesi aktif güce göre çok büyük bir masraf gerektirmez.

- İşletim açısından ve mecburiyetten gerilimi belirli sınırlar içinde tutma şartı yoktur.

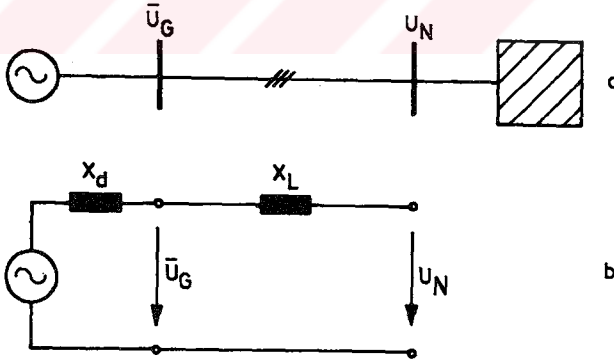
- Bir enerji besleme sisteminde gerilim ayarı için konulan talimatlar ani yükleme esnasında ve normal yükleme durumunda farklıdır.

Bunlardan gerilim ayarının aşağıdaki yapısı ortaya çıkar :

- Şebekenin gerilim profili önceden öyle seçilmelidir ki, işletimin önemli şartları zedelenmemelidir.
- Gerilim ayarı merkezi değildir. Her generatör, uyarım ayarlama üzerinden ya da blok transformatörünün kademeleri üzerinden ayarlanır.
- Bütün şebekenin gerilim profili değişik şekilde olabilecek yüklenmelere uymalıdır.

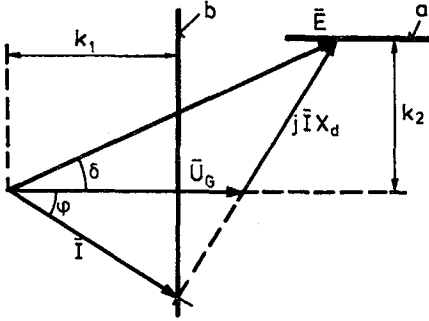
4.2. Gerilim Ayarının Basitleştirilmiş Gösterilişi

Sabit bir dönme momenti ile tahrik edilen senkron generatörün uyarım yoluyla U_G uç gerilimi, yüklenme açısı ϕ ve generatör akımının değeri değiştirilebilir. Gerilim ayarlamasını açıklamak için bir senkron makinenin Şekil 4.2.1'de gösterilen eşdeğer devresi incelenecektir. Burada uyarımın, endüj gerilimi $\bar{E}$ yi $\bar{E}'$ değerine yükselttiği kabul edilir. Aynı zamanda referans vektörü olarak alınan uç gerilimi U_G sabittir. Aranılan değerler, endüj gerilimindeki generatör akımı $\bar{I}'$, yüklenme



Şekil 4.2.1. Santral beslemesi.

açısı ϕ' ve kutupsal açı δ' için sabit değerlerdir. Yani ilk anda geçiş davranışları incelenmeyecektir. Son durum Şekil 4.2.2 çizilmiştir.



Şekil 4.2.2. Sabit işletim durumu için fazör diyagramı.

Generatörden elde edilen aktif güç iki şekilde ifade edilir.

I uç akımının uç gerilimi U_G nin ve yüklenme açısı ϕ (güç faktörü) nin kullanılmasıyla

$$P = 3 U_G I \cos \phi \quad (4.2.1)$$

Diğer taraftan omik kayıpların ihmalı ve kutupsal açı δ nın devreye konulmasıyla bir turbo rotorda;

$$P = \frac{3 E U_G}{X_d} \sin \delta \quad (4.2.2)$$

olur.

Önceki durumda alınan güç P ve uç gerilimi U_G sabit kabul edildiğinden eşitlik (4.2.1) ile

$$I \cos \phi = k_1 = \text{Sabit} \quad (4.2.3)$$

Aynı kabulden dolayı eşitlik (4.2.2) ile

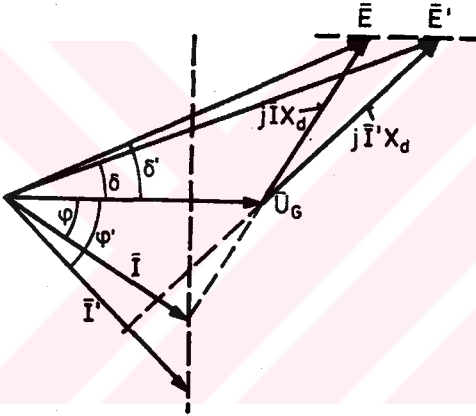
$$E \sin \delta = k_2 = \text{Sabit} \quad (4.2.4)$$

olur.

Şekil 4.2.2 'de k_1 ve k_2 sabitleri çizilmiştir.

Endüi gerilimi $\bar{E}$ yükseltildiğinde $\bar{E}$ gösterilişi a ile, generatör akımı I ise b doğrusu ile gösterilir. Makine reaktansı X_d üzerindeki gerilim düşümü generatör akımının sabit olması gerçeğiyle Şekil 4.2.3'de gösterilen diyagram her iki işletim durumunu gösterebilir.

Şekil 4.2.3'de yeni işletim durumunda endüi gerilimi E' , endüi açısı δ' 'nin ilk durumdan daha küçük olduğu görülür. Fakat akım I' ve yüklenme açısı ϕ' yeni durumda ilk durumdan daha büyüktür. Ön şarta göre uç gerilimi U_G ve alınan güç P sabit kalır. Daha sonraki bölümlerde dinamik geçiş davranışları incelenecektir. Böylece uç gerilimi U_G ayarlanan bir değer olarak kullanılacaktır.



Şekil 4.2.3. İki sabit işletim durumunun karşılaştırılması, ($I' > I$ ve $P' = P$) için.

4.3. Gerilim Ayarının Yapısı

Şekil 4.3.1 bir senkron generatörün gerilim ayarının şematik olarak basitleştirilmiş yapısını gösterir. Burada endüi ile gerilim hatası arasındaki trafo ilk etapta dikkate alınmadı. Gerilim hatası e (yani, generatörün gerçek uç gerilimi ile istenilen referans gerilim U_{ref} arasındaki ayarlama sapması) generatörün uç gerilimi U_G ile sabit ayarlanmış referans ya da olması gereken değerdeki gerilim olan U_{ref} arasındaki farktan elde edilir.

$$e = U_{\text{ref}} - U_G = \Delta U \quad (4.3.1)$$

İlk etapta gerilim ayarı için e faktörü yükseltilir. Amplifikatör, zaman sabiti T_A ve yükseltici faktörü K_A olan birinci dereceden bir denklem olarak tanımlanır. T_A 'nın değeri 100 ms den azdır.

Transfer fonksiyonu :

$$\frac{u_2(s)}{u_1(s)} = \frac{K_A}{1 + s T_A} \quad (4.3.2)$$

Yükselticiden sonra bağlanan uyartım motoru senkron generatörün endüi sargısı için uyartım gerilimi verir. Birçok uyartım düzeneklerinde doğru akım generatörü kullanılır. Dinamik davranışı birinci dereceden bir denklem olarak tasvir edilebilir. Transfer fonksiyonu;

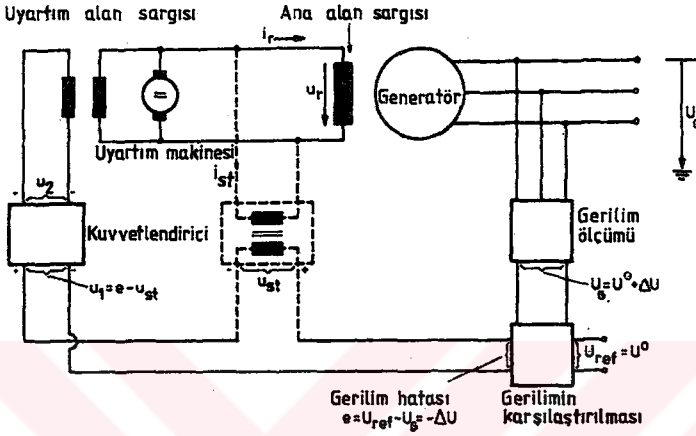
$$\frac{u_r(s)}{u_2(s)} = \frac{K_E}{1 + s T_E} \quad (4.3.3)$$

Burada yükseltici faktör K_E ve zaman sabiti T_E , uyartım alan sargısından elde edilir. T_E nin değeri 1 saniye civarındadır.

Bir sonraki adım olarak uyartım gerilimi u_r ile generatör uç gerilimi U_G arasındaki transfer fonksiyonunu elde etmek olacaktır. Bu fonksiyon generatörün işletim durumuna bağlıdır. En basit durum generatörün boşa incelenmesidir. Bu durumda stator akımının rotora tesiri ihmal edilebilir. Endüi sargısının omik direncini R_r ve endüktansını L_r ile gösterirsek;

$$u_r = R_r i_r + L_r \frac{di_r}{dt} \quad (4.3.4)$$

Boşa çalışmada (yani $I = 0$) endüi gerilimi E uç gerilimi U_G ye eşittir. Endüi gerilimi rotor ile stator arasındaki karşıt endüktans L den elde edilir.



Şekil 4.3.1. Bir senkron generatörde gerilim ayarının temel yapısı.

Uyartım akımı i_r doğru akım olduğundan gerilim değerini hesaplariken $1/\sqrt{2}$ faktörü dikkate alınmalıdır. Bu durumda endü gerilimi için;

$$E = U_G = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega L i_r \quad (4.3.5)$$

yazılır. U_G gerilimi U_G ile uyartım gerilimi u_r arasındaki transfer fonksiyonu

$$\frac{U_G(s)}{u_r(s)} = \frac{\omega L}{\sqrt{2}(R_r + sL_r)} = \frac{K_r}{1 + sT_r} \quad (4.3.6)$$

olur. Generatörün boşa çalışması incelendiğinde transfer fonksiyonu birinci dereceden olduğu görülür. K_r faktörünün değeri makine parametrelerinden elde edilir.

$$K_r = \frac{\omega L}{\sqrt{2} R_r} \quad (4.3.7)$$

Zaman sabiti T_r , endüi endüktansı L_r nin endüi direnci R_r e oranıdır.

$$T_r = L_r / R_r \quad (4.3.8)$$

Zaman sabiti bir kaç saniye civarındadır.

4.4. Gerilim Ayarının Simülasyonu

4.4.1. Modeli

Açık çevrim transfer fonksiyonunu $G(s)$ ile gösterirsek, gerilim ayarının transfer fonksiyonu

$$\frac{U_G}{U_{ref}} = \frac{G(s)}{1+G(s)} \quad (4.4.1)$$

olur.

Burada;

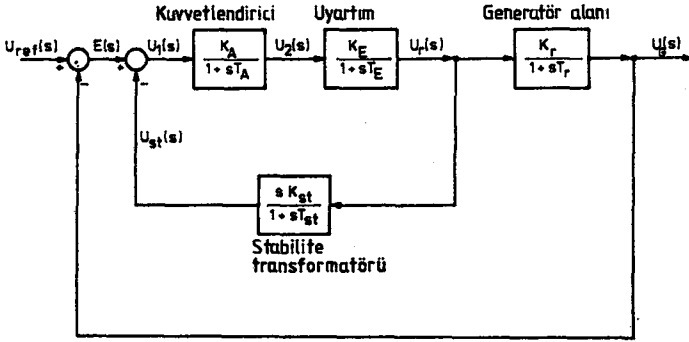
$$G(s) = \frac{K_A}{1+sT_A} \cdot \frac{K_E}{1+sT_E} \cdot \frac{K_r}{1+sT_r} \quad (4.4.2)$$

dir.

Böylece transfer fonksiyonu üçüncü dereceden bir fonksiyon olur.

$$\frac{U_G(s)}{U_{ref}} = \frac{K_A \cdot K_E \cdot K_r}{(1+sT_A)(1+sT_E)(1+sT_r) + K_A K_E K_r} \quad (4.4.3)$$

Blok diyagramı Şekil 4.4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4.1. Gerilim ayarının blok diyagram gösterilişi.

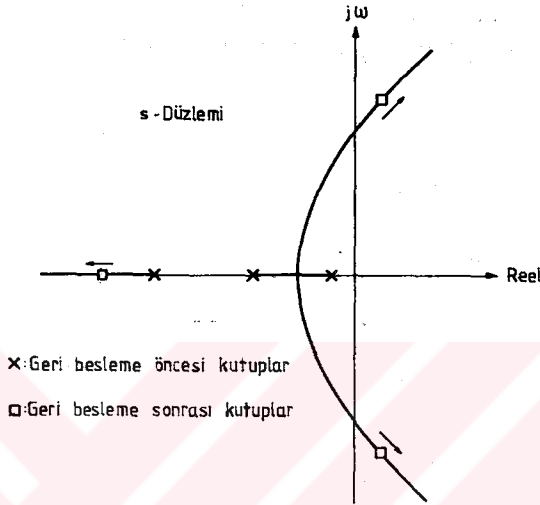
4.4.2. Stabilite İncelenmesi:

Şekil 4.4.2 eşitlik 4.4.3 'e göre gerilim ayarının kök-yer eğrisini gösterir. Burada K_A, K_E kuvvetlendirici faktörü herhangi bir sayı olarak seçilemez. Çünkü yüksek değerler transfer fonksiyonunun kutuplarını düzlemin sağına kaydırır. Bu da stabilitenin bozulması demektir.

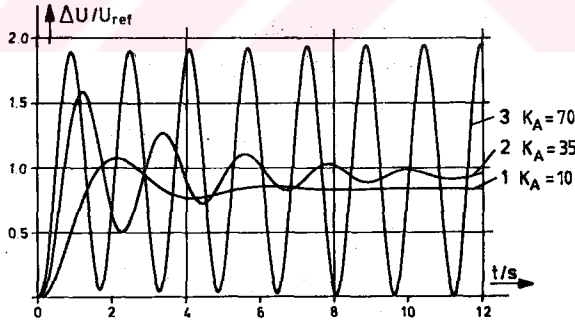
Şekil 4.4.3 generatör uç geriliminin eğrisidir. Burada referans gerilimi $\Delta U_{ref} = 1,0$ aniden değişmektedir. Simülasyon hesabı için tablo 4.1 deki verilen parametreler kullanılır.

$T_A = 0,1 \text{ s}$	$K_A = 10 \text{ için, } 35 \text{ için, } 70 \text{ için}$
$T_E = 1,0 \text{ s}$	$K_E = 0,5$
$T_r = 2,0 \text{ s}$	$K_r = 1,0$

Tablo 4.1. Gerilim ayarının stabilite araştırması için parametreler (91).



Şekil 4.4.2. Eşitlik 4.4.3'e göre gerilim ayarının kök-yer eğrisi.



Şekil 4.4.3. Referans geriliminin 1,0 lık ani şekilde değişimi sonrası, $\Delta U / \Delta U_{ref}$ nin zamana göre değişimi.

Şekil 4.4.3'deki eğrilerde, küçük kuvvetlendirici faktör K_A ile, giriş geriliminin U_{ref} değişimine, gerilim değişimi çok yavaş uyum sağlayabilmektedir. Küçük değerdeki kuvvetlendirici faktör K_A ,

sabit işletimde çok büyük ayar hatasına sebep olur. Diğer yandan K_A 'yı büyütmeyle ($K_A > 70$) gerilim ayarında stabilitenin bozulduğu ortaya çıkar. Son değer teoremine göre normlandırılmış gerilimler :

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_{\text{ref}}} = \frac{K_A \cdot K_E \cdot K_r}{1 + K_A \cdot K_E \cdot K_r} = 0,833 \quad K_A = 10 \text{ için,}$$

$$= 0,946 \quad K_A = 35 \text{ için,}$$

$K_A = 70$ için gerilim ayarı stabil olmadığından hiç bir sabit son değer yoktur.

4.4.3. Stabilite Önlemleri

Şimdiye kadarki düşüncelerden K_A için büyük değerler seçildiğinde gerilim ayarlama menziline stabil olmadığı görülmüştür. Ayar sisteminde değişik şekilde stabilite sağlanır. Şekil 4.4.1 stabilite trafosu yardımıyla nasıl bir u_{st} gerilimi elde edildiğini gösterir. u_{st} , uyarım gerilimi u_r ile doğru orantılıdır. Stabilite trafosunun sekonder gerilimi :

$$u_{st} = M \frac{d_{ist}}{dt} \quad (4.4.4)$$

dir.

Burada M , karşılıklı endüktanstır. Bu trafonun primer tarafından

$$u_r = R i_{st} + L \frac{d_{ist}}{dt} \quad (4.4.5)$$

yazılır. İki eşitliğin bölümünden, stabilite gerilimi ile uyarım gerilimi arasındaki transfer fonksiyonu elde edilir.

$$\frac{u_{st}(s)}{u_r(s)} = \frac{sM}{R+sL} = \frac{s K_{st}}{1+s T_{st}} \quad (4.4.6)$$

Burada K_{st} stabilite trafosunun parametresidir.

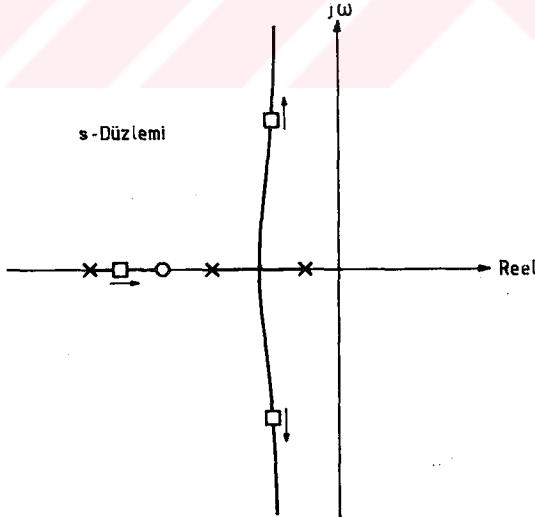
$$K_{st} = M/R \quad (4.4.7)$$

ve zaman sabiti;

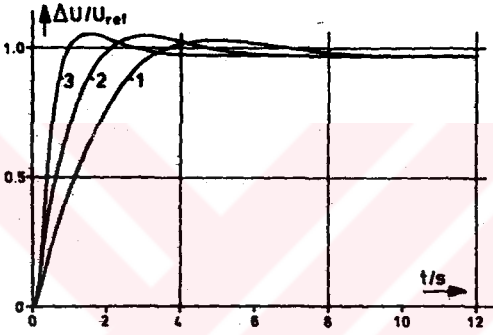
$$T_{st} = L/R \quad (4.4.8)$$

Konstrüksiyon önlemler ile bu iki parametrenin değeri değiştirilebilir. Eğer eşitlik (4.4.6)'da $T_{st} = 0$ konursa kök yer eğrisi kompleks düzleme kayar (Şekil 4.4.4) ve kapalı çevrim transfer fonksiyonu için U/U_{ref} (Şekil 4.4.1) bir sıfır noktası ortaya çıkar.

Şekil 4.4.5 generatör uç gerilimi U_G nin zamana göre fonksiyonudur. Burada $K_A = 70$ dir. Bu şekilden anlaşıldığı gibi K_{st} ve T_{st} seçimi ayar davranışını önemli şekilde değiştirmektedir. Burada 3 nolu eğri ile $K_{st} = 0,2$ ve $T_{st} = 1,0$ 'da hem hızlı yükselme zamanı hem de küçük harmonikler gerçekleşir.



Şekil 4.4.4. Stabil olmuş gerilim ayarının kök-yer eğrisi.



Şekil 4.4.5. Referans geriliminin 0,1 lik ani bir değişim sonrası $\Delta U/U_{ref}$ 'nın zamana göre değişimi (92).

Eğri 1: $K_{st}=1,0$ Eğri 2: $K_{st}=0,5$ Eğri 3: $K_{st}=0,2$
 $T_{st}=1,0$ $T_{st}=1,0$ $T_{st}=1,0$

EK - 2 :

230 \

T.C.D.D. Haydarpaşa - Arifiye Arasındaki Tali İstasyonların Tek Hat Şeması

	154 kV TOPRAKLAMA BİÇAKLARI İLE KOMPLE SEKSİYONER 154 kV Line disconnecting switch with earthing blade operating mechanism
	KESİCİ Circuit breaker with spring charging motor operating mechanism
	YÜK AYIRICI Leading switch with motor operating mechanism
	MOTOR KUMANDALI AYIRICI Disconnecting switch with motor operating mechanism
	MAHALLİNDE ELLE KUMANDALI AYIRICI Disconnecting switch with hand operating mechanism
	HAVA ARALIKLI AYIRMA Air vord switch
	GÜÇ TRANSFORMATÖRÜ Power transformer
	GERİLİM TRANSFORMATÖRÜ Potential transformer
	YARDIMCI SERVİS TRANSFORMATÖRÜ Auxiliary transformer
	AKIM TRANSFORMATÖRÜ Circuit transformer
	SİGORTA Fuse
	PRAFUDR Surge arresters
	ELEKTRİKLİ HAT Electrical line
	TOPRAKLAMA Earthing

S E M B O L

İ S İ M

ÖLÇEK	HAYDARPAŞA ARİFİYE TEKHAT ŞEMASI				TARİH	
					YAPAN	
					ÇİZEN	
					KONTROL	
İŞARET	Ortalama birim ağırlık	Malzeme	Teknik sartname	Standart	GRUP MÜDÜRÜ	DAİRE BAŞKANI
MODEL						
ŞİKLİKLER					T C D D GENEL MÜDÜRLÜĞÜ ELEKTRİFİKASYON GRUP MÜDÜRLÜĞÜ	

KAYNAKLAR

- 1) A,Ural.: Modern Elektrikli Ulaşım Sistemleri,
Y.T.Ü.Kocaeli Müh.Fak., Şubat 1991.
- 2) A,Ural.: Demiryolu Taşımacılığında Teknolojik Gelişmeler, Toplu
Taşıma Elektrik Sempozyumu Bildirisi, 1990.
- 3) B,Skrabo. X,Vogel.: Switching Devices and Structure of Modern
Converters for Traction Vehicles,Brown Boveri Rev. 69, 1982 (12)
453-459.
- 4) R,Amstutz.: Air-conditioning and Warm Air Heating Equipment in
Passenger Coaches for Express and Suburban Trains of the Norwegian
State Railways, Brown Boveri Rev.69, 1982 (12) 506-511.
- 5) A,Ural. : Doğru Akım Motoruyla Tahrik, EMO Kocaeli İl Temsilciliği
Yayınları, 1991.
- 6) Z,Filipovic.: The Bo'Bo' Thyristor Locomotives Class Ge 4/4 III of
the Furka-Oberalp Railway, Brown Boveri Rev.65, 1979 (12) 778-787,
- 7) W,Steinacher.: Elektrische Adhasionslokomotiven Ge 4/4 III für die
Furka-Oberalp-Bahn. SLM Technische Mitteilungen 1980 (12) 3-8.
B,Lamparter.: Elektrische Zahnradtriebwagen Deh 4/4 für die Furka-
Oberalp-Bahn.SLM Technische Mitteilungen 1980 (12) 9-16.
- 8) R,Rüegg.O Class RBDe 4/4 Motorcoaches for Shuttle-Service Trains of
Swiss Standard Gauge Railways, Brown Boveri Rev. 69, 1982 (1/2) 15-26.
- 9) R,Zwahlen. M,Brechbühler.: Automation and Control Systems for Traction
Vehicles, Brown Boveri Rev. 69, 1982 (12) 460-469.
- 10) H,Haas.: Commutator Traction Motors for Local Transport Services,
Brown Boveri Rev. 65, 1978 (127 786-794.
- 11) R,Zwahlen. W,Wehrle.: Designing Automation and Control Equipment
for Traction Vehicles, Brown Boveri Rev. 69, 1982 (12) 470-476.
- 12) W.U,Bohli.: Ge 4/4 II Thyristor Locomotives Nos. 611 to 620 of
Rhaetion Railways, Brown Boveri Rev. 60, 1973 (12) 526-538.
- 13) A,Jager. R,Zwahlen.: Suburban Trains of Norwegian State Railways (NSB)
for the Oslo Area, Brown Boveri Rev. 60, 1973 (12) 559-566.

- 14) M,Brechbühler. B,Skrabo.: The Static Converter as Modern Power Controller, Brown Boveri Rev, 69, 1982 (12) 441-452.
- 15) A,Jager. U,Baechler. R,Brom.: Measures for improving the Grid Response of Thyristor-Controlled Traction Vehicles, Brown Boveri Rev. 60, 1973 (12) 501-525.
- 16) U,Meyer. K,Tapavica.: Static Converters for Compressors in Airconditioned Passenger Trains, Brown Boveri Rev.69, 1982 (12) 512-516.
- 17) H,Kehrmann. W,Lienau. R,Nill.: Vierquadrantensteller, Einspeisung für Triebfahrzeuge mit Drehstromantrieb Elektrische Bahnen 45, 1974. No.6.
- 18) J,Körber.: Die Entwicklung der Drehstrom-Antriebstechnik für die Hochleistungs-Lokomotive E.120 BBC-Nachr 63, 1981 No.5/6.
- 19) R,Frösch. W,Haag. T,Seeger. R,Zwahlen. W,Ruggli.: Microcomputers Assist Control of Traction Vehicles and Passenger Coaches, Brown Boveri Rev.71, 1984 (12) 535-544.
- 20) X,Vogel.: Oil-cooled Traction Converters, Brown Boveri Rev. 60, 1973 (12) 551-558.
- 21) M,Roffler.O Class Ee 6/6 II Converter Locomotives of the Swiss Federal Railways, Brown Boveri Rev.66, 1979 (12) 764,777.
- 22) M,Şanal. İ,Şenol.: Elektrikli Ulaşım Sistemlerinin Sınıflandırılması ve Elektrikli Otomobillerin Yeri, Elek.Müh. 3.Ulusal Kongresi (3/1). 25-30 Eylül 1989 s.202-204.
- 23) IEEE Transactions on Vehicular Technology (p.p 123-134), May 1977.
- 24) IEEE Transactions on Vehicular Technology (p.p 132-137), Aug 1978.
- 25) IEEE Transactions on Vehicular Technology (p.p 3-6, 21-41, 51-61, 82-97), Feb 1983.
- 26) IEEE Transactions on Vehicular Technology (p.p 1023-1029) Aug 1985.
- 27) M,Bayram.: Elektroteknik Mecmuası, İ.T.Ü.Yayınları Mart 1977, s.27-40.
- 28) B,Ercan.: Study of Ferroresonance in Large Power Transformers, Ph.D. Thesis, Univ. of Wales, 1979.

- 29) E.J,Dolan. D.A,Fillies. E.W,Kimbark.: Ferroresonance in a Transformer Switched with an EHV line, IEEE.PAS-91 (pp.1273-1280), 1972.
- 30) E.J.R,Hardy.: Ferroresonance on the 275 kV and 400 kV Systems, 11 th Univ. Power Eng. Conf. Southampton Univ. England, 1976.
- 31) I.A, Wright. K,Morsztyn.: Subharmonic Oscillation in Power Systems-Theory and Practice, IEEE PAS-89 (pp.1805-1815), 1970.
- 32) G.W, Swift.: Power Transformer Core Behaviour Under Transient Conditions, IEEE.PAS-90. (pp.2206-2209), 1971.
- 33) I.A,Wright.: Three-phase Subharmonic Oscillations in Symmetrical Power Systems, IEEE PAS-90 (pp.1295-1304) 1971.
- 34) R,Rudenberg.: Transient Performance of Electric Power Systems, The M.I.T.Press. 1970.
- 35) İ,Hakdiyen.: Genel Kimya, Y.T.Ü.Yayınları, 1975.
- 36) W,Fischer.: Ein führung der Drehstromenergieversorgung in Reisezugwagen. ZEV-Glasers Annalen 108 (1984), H.11, 321-325.
- 37) H.J, Philipp.: Korrosionsschutz in der DDR. Energietechnik 15 (1965) 3, 98-102.
- 38) K,Schwabe.: Volkswirtschaftliche Bedeutung der Korrosion und des Korrosionsschutzes. Chemische Technik 13 (1961) 5, 249-252.
- 39) H,Rieger.: Der Freileitungsbau, Springer Verlag, Berlin Göttingen, Heidelberg 1960.
- 40) H,Neugebauer.: Selektivschutz, Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1958.
- 41) E,Bornitz.: Leistungskondensatoren und Blindleistungsmaschinen, Verlag R.Oldenburg, München/Wien 1965.
- 42) R,Richter.: Die Transformatoren, Verlag birkhauser, Basel/Stuttgart 1963.
- 43) W,Hemming.: Die Fernwirktechnik im Dienste der Elektrizitätsversorgung, Verlag R.Oldenburg, München 1968.

- 44) G, Müller. I.F, Primus.: Leichbeton-Komplett-Stationen.
ETZ-B 24 (1972) 14, 354-355.
- 45) G, Altman. H, Feyertag.: Stromrichtertransformatoren für grobe drehzahlveränderbare Antriebe, Siemens Energie und Automation 9 (1987).
- 46) G, Nimphius.: Schutzfragen und Schutztechnik, aus: Energieversorgung von Gleichstrom - Nebenverkehrsbahnen, Essen 1989, VDE-Verlag, Berlin
- 47) H, Böhm.: Erstes transportables Gleichrichterwerk der Berliner Verkehrs-Betriebe (BVG), Verkehr und Technik 12 (1985).
- 48) P, Schmidt.: Energieversorgung elektrischer Bahnen, Transpress VEB-Verlag für Verkehrswesen, Berlin 1988.
- 49) Trafo-Union.: Geafol-Gießharz transformatoren 50 bis 2500 kVA, Technische Liste der Trafo-Union, Nürnberg 1988.
- 50) K, Halıcı.: Elektrik Motoru ile Tahrik, Y.T.Ü.Yayınları, Kutulmuş Matbaası, İstanbul 1977.
- 51) Simens Handbook. Power Engineering, Third Printing, pp.628.
- 52) T, Suzuki. B, Tech.: D.C Power-Supply System with Inverting Substations for Traction Systems Using Regenerative Brakes, IEEE Proc.Vol.129, pt.B. No.1 January 1982.
- 53) E, Kilb.: Die Elektrifizierung der Hüllentalbahn als Vorläufer der neuzeitlichen Bahnelektrifizierung mit 50 Hz, Glas.Arm 31 (1960), 537, 543.
- 54) G, Careglio. M, Cavagnaro. L, Lanzavecchia.: Indagine Analitica su Modelle di Elettrificaziane Ferroviaria a 3 kVcc con Feeder a -3, -6 e - 12 kVcc, Ingegneria Ferroviaria, 45 (1983), 665-672.
- 55) C, Attaianes. E, Pagano.: Microprocessorized Anti-Skidding Control System for Electrical Engines, IEE IAS-Japan'91, Sapporo, Japan.
- 56) W, Leohnard.: Regelung in der Elektrischen Antriebs-Technik, Teubner Verlag, Stuttgart, 1973.
- 57) S, Saadate. R, Le Doeuff. R, Periot.: Design of a High Voltage GTO chopper for Traction Drive IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.IE-38, No.1, Feb.1991.

- 58) H,Ohashi.: Snubber Circuit for High Power Gate-Turn-Off Thyristors
IEEE, Transactions on Industry Applications, vol. IA-19, No.4, 1983.
- 59) T,Kanzaki, T,Yama. F,Moriya.: High Power GTO Thyristor Application to
Power Electronic Equipment Used on Railway Vehicles, Toshiba Review,
No.147, 1984.
- 60) Jmv, Whiting.: GTO thyristors Poised to take Control of D.C traction
Railway Gazette International, 1986.
- 61) M,Depenbrock.: Direct Self-Control (DSC) of Inverter-fed Induction
Machine IEEE, Transactions on Power Electronics, Vol.3, No.4, Oct.1988.
- 62) H,Brutscher. G,Lekkas.: Laboratoriumsmodell zur Untersuchung der
Ausbreitung und superposition von Oberschwingungen im Bahnnetz,
Elektrische Bahnen 49 (1978), H.2, 65-72.
- 63) R,Buckel.: Elektromagnetische Umweltbeeinflussungen Durch
Thyristorfahrzeuge, ZEV-Glasers Annalen 97 (1973), Nr.2/3,1973.
- 64) R,Buckel.: Oberschwingungen im Fahrleitungsnetz von Wechselstrombahnen,
ETZ-A 88 (1967), H.17, 429-436.
- 65) G,Möltgen.: Der Leistungsfaktor bei Stromrichtern auf
Fahrdratgespeisten Schienenfahrzeugen, Elektrische Bahnen 46
(1975), H.9, 207-213.
- 66) DIN 57228/VDE 0228, Teil 1.: Maßnahmen bei Beeinflussung von
Fernmeldeanlagen Durch Starkstromanlagen, Allgemeine Grundlagen.
- 67) H,Kehrmann. W,Lienau. R,Nill.: Vierquadrantenstellereine Netzfremdlche
Einspeisung für Triebfahrzeuge mit Drehstromantrieb, Elektrische
Bahnen 45 (1974), H.6, 135-141.
- 68) ORE FRAGE A122.: Schwingungsvorgänge im Traktionsstromkreis, ORE
Technisches Dokument DT 92 (A122), Utrecht, 1979.
- 69) P,Falk. W,Löbel. R,Winden.: Die Elektrische Ausrüstung der ICE-
Triebköpfe, Elektrische Bahnen 83 (1985), H.10, 319-334
- 70) L,Gunnarsson. K,Wahiberg.: Istanbul's New Metro Line, ABB Review,
March 1989.
- 71) A,Fouad. p.M,Anderson.: Power System Control and Stability, Iowa
State University Press, 1977

- 72) W.D,Stevenson.: Elements of Power System Analysis, Mc Graw Hill, 1975.
- 73) B.M,Weedy.: Electric Power Systems, Wiley, 1972.
- 74) A.J,Wood and B.F,Wollenberg.: Power Generation, Operation and Control, Wiley, New York, 1984.
- 75) C.A,Gross.: Power System Analysis, Wiley, new York, 1979.
- 76) R,Zurmühl.: Matrizen, Springer Verlag, 1964.
- 77) O.I,Elgerd.: Electric Energy Systems Theory: An Introduction, Mc Graw Hill, 1972.
- 78) G,Funk.: Symmetrische Komponenten, Elitera Verlag, 1963.
- 79) H,Schaefer.: Elektrische Kraftwerkstechnik, Springer Verlag, 1979.
- 80) G,Schwikardi.: Elektroenergietechnik (3bande), Fachschriftenverlag, Aargauer Tagblatt, 1975.
- 81) J,Zaborszky. J,Rittenhouse.: Electric Power Transmission, RPI Bookstore, 1969.
- 82) J.R,Neuenschwander.: Modern Power Systems, Harper-Row, 1971.
- 83) W,Leonhard.: Regelung in der Elektrischen Energieversorgung, Teubner-Studienbücher, 1980.
- 84) U.G,Knight.: Power Systems Engineering and Mathematics, Pergamon Press, 1972.
- 85) P,Denzel.: Grund Lagen der Übertragung Elektrischer Energie, Springer Verlag, 1966.
- 86) P.M, Anderson.: Analysis of Faulted Power Systems, Iowa State University Press, 1973.
- 87) Th,Bohn. W,Bitterlich.: Handbuchreihe Energie (17 Bände), Technischer Verlag Resch, Verlag TÜV Rheinland, 1982.
- 88) H,Edelmann.: Berechnung Elektrischer Verbundnetze, Springer Verlag, 1963.
- 89) G, Hosemann. W,Boeck.: Grundlagen der Elektrischen Energietechnik, Springer Verlag, 1979.

- 90) A.T,Starr.: Generation, Transmission and Utilization of Electric Power, Pitmann Publishing Company, 1973.
 - 91) A,Hochrainer.: Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen, Springer Verlag, 1957.
 - 92) E,Handschin.: Real-Time Control of Electric Power Systems, Elsevier Publishing Company, 1972.
- 

SEMBOLLER

p	()	Rotor çift kutup sayısı.
M _{res}	N.m	Dönen kütleyi etkileyen nihai moment.
J	kgm ²	Rotor ve işletme makinasının atalet moment.
δ	()	Endüi açısı.
P _a	(MW)	Türbinin işletme gücü.
g	(m/s ²)	Yerçekimi ivmesi.
T _A	()	Bütün dönen ağırlıkların adı geçen şebeke sahasındaki yol alma zaman sabiti.
V _L	()	Yüklerin frekans bağımlılığı.
T _T	()	Türbin zaman sabiti.
V _R	()	Primer ayarlayıcının kuvvetlendirme faktörü.
K ₁	()	Sekonder ayarın integral sabiti
B	()	Frekans farklılığı için ağırlık faktörü.
P _d	W	Yardımcı düzenler tarafından tüketilen güç.
C _F	F	Kıyıcı filtresinin kapasitesi.
E _a	V	Evirici gerilim düşümü.
E _c	V	C _F kapasitesi üzerindeki gerilim.
E _{do}	V	Yükstüz doğrultucu gerilimi.
E _i	V	Evirici D.C gerilimi.
E _p	V	Pantograf (akım alıcı) gerilimi.
I _b	A	Aracın frenleme akımı.
I _{CH}	A	Kıyıcı akımı.
I _i	A	Evirici D.C akımı.
I _n	A	n. dereceden harmonik akım.
L _f	H	Kıyıcı filtresinin endüktansı.
P _{INV}	W	Eviricinin A.C tarafındaki gücü.

P_{sr}	VAR	Ara istasyonun reaktif gücü.
u	()	Komütasyon açısı.
X_c	ohm	Komütasyon reaktansı.
P_{sd}	W	Ara istasyonun aktif gücü.
n	()	Harmonik derecesi.
β	()	Evirici kontrol açısı.
ΔE_l	()	Hattın gerilim düşümü.
L_l	H	Evirici D.C reaktör ve hattın endüktansı.
W_r	W	Evirici transformatörün bakır kaybı.

Y.Ö. YÜKSELİŞİN KURULU
DOKÜMAN KONTROL MERKEZİ

ÖZGEÇMİŞ

14.03.1961'de Ankara'da doğdu. Sırasıyla, İstanbul Bağlarbaşı İlkokulu (1972), İstanbul Cumhuriyet Lisesi (1978), Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü (1984), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Anabilim Dalı Yüksek Lisans'dan (1987) mezun oldu. Aynı yıl kazandığı Doktora öğrenimini sürdürmektedir. 1985'den beri, Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.