

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Modern Elek. Ula. Sist. Ene,
Dön. Düz. İnc.

Yüksek Lisans Tezi

Özeyir Akca

1989

2152
132

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ—FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Modern Elektrikli Ulaşım Sistemlerinin
Enerji Dönüştürücü Düzenlerinin İncelenmesi**

(Yüksek Lisans Tezi)

Müh. Özeyir AKCA

İSTANBUL — 1989

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot : R 152
132

Alındığı Yer : FEN. BİL. ENS.

Tarih : 17.04.1992

Fatura : - - - - -

Fiyatı : 20.000. TL.

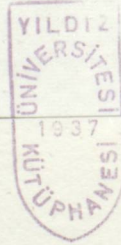
Ayniyat No : 1/2

Kayıt No : 48343

UDC : 621.3 378.242

Ek :

4



Modern Elektrikli Ulaşım Sistemlerinin Enerji Dönüştürücü Düzenlerinin İncelenmesi

(Yüksek Lisans Tezi)

Müh. Özeyir AKCA



Ö N S Ö Z

Günlük hayatta ulaşımın çok önemli bir yeri vardır. Bu bakımdan, elektrikli ulaşım sistemlerinin sürekli yenilenmesi ve gelişmesi sözkonusudur.

Elektrikli ulaşım sistemleri ortaya çıkışından günümüze kadar gelişme göstermiş ve gelişen teknolojiyle sürekli yenilenmiştir. Gelişmelerin sonucu olarak modern elektrikli ulaşım, mühendisleri ve teknik adamları ilgilendiren birçok araştırma, tasarım, proje ve mühendislik hizmetlerinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, elektrikli ulaşımındaki gelişmeler gözönünde tutularak incelemeler yapılmıştır. Modern Elektrikli Ulaşım Mühendisliğine ilk adımım olarak nitelenebileceğim bu tez çalışmasına vesile olan Sayın Hocam Prof. Dr. Atıf URAL'a sonsuz teşekkürü bir borç biliyorum.

Ocak, 1989

Üzeyir AKÇA

İ Ç İ N D E K İ L E R

1.	GİRİŞ	1
1.1.	Cer taşıtı tahrikinin elektronik düzenleri ...	1
1.2.	Cer taşıtlarındaki elektronik düzenlerden beklenenler	2
1.3.	Cer taşıtları ve tahrik sistemlerinin sınıflandırılması.....	7
1.4.	Modern cer taşıtlarında güç elektroniği.....	9
2.	Modern elektrikli ulaşım sistemlerinde kullanılan enerji dönüştürücü tahrik kontrol elemanları.....	10
2.1.	Kıyıcı.....	10
2.1.1.	DC kıyıcının avantajları.....	10
2.1.2.	DC kıyıcının çalışma prensibi.....	12
2.1.3.	DC kıyıcı ana devresinin çalışması.....	18
2.1.4.	Otomatik alan zayıflama için ekstansiyon.....	20
2.2.	Statik Konverterler (Dönüştürücüler).....	22
2.3.	İnverter (Evirici).....	23
3.	Rejeneratif (faydalı) frenler kullanılan cer sistemleri için invert edilen (ters çevrilen) ara (yardımcı) istasyonlarla yapılan DC enerji besleme sistemi.....	24
3.1.	Genel Tanıtım.....	25
3.2.	Ters çevrilen ara-istasyonun yeri ve kapasitesi	27
3.2.1.	Genel kavram.....	27
3.3.	İnverterin karakteristikleri.....	31
3.3.1.	İnverterin DC karakteristikleri.....	31
3.3.2.	İnverterin alternatif gerilimi.....	35
3.4.	İnverterin kontrolü	36

3.4.1.	Doğrultucu ve inverter arasındaki değişim kontrolü.....	36
3.4.2.	Doğru gerilimin kontrolü.....	40
3.5.	Baz gücün AC karakteristikleri.....	42
3.6.	İnverterli harmonik durumu.....	43
3.6.1.	Alternatif hat akımındaki harmonikler.....	43
3.6.2.	Doğru gerilimdeki harmonikler.....	45
3.6.3.	Harmoniklerle mücadele.....	46
3.7.	İnverter sisteminin koruması.....	47
3.8.	Kobe metrosunun inverterlerle enerji besleme sisteminin tesisi.....	48
3.8.1.	Sistemin taslağı.....	48
3.8.2.	Enerji besleme sistemi.....	48
3.8.2.1.	AC sistemi.....	48
3.8.2.2.	DC sistem.....	49
3.8.2.3.	AC sistemlerdeki harmonikler üzerine tasarım kriterleri.....	51
3.8.3.	Tutma freninin daha güvenli çalışması için tasarım.....	52
3.8.4.	Servis operasyonu ve alan testlerinin sonuçları	53
3.8.4.1.	Performans testleri.....	53
3.8.4.2.	Geri besleme enerjisi.....	55
3.8.4.3.	AC sistemdeki harmonikler.....	56
4.	Aplikasyonlar.....	59
4.1.	Şehiriçi ulaşımda kullanılan DC tahrikli taşıtlar.....	59
4.1.1.1.	GTO kıyıcılı tramvayın tahrik donanımı.....	59
4.1.1.2	GTO kıyıcı (tramvayda).....	62
4.1.2.	Generatör grubu destekli ve rejeneratif (faydalı) frenli trolleybüs.....	62

4.1.3.	Körüklü trolleybüs.....	66
4.2.	Üç-faz asenkron motor tahrikli sistemler....	68
4.2.1.	Genel tanıtım.....	68
4.2.2.	Üç-faz tahrikli AC cer taşıtları.....	69
4.2.2.1.	Şehirler-arası toplu taşımada kullanılan hızlı tren (Ice-Intercity experimental).....	72
4.2.2.1.1.	Ice'nin güç devreleri.....	73
4.2.2.1.2.	Ice'nin güç konverteri.....	75
4.2.2.2.	Elektrikli Manevra lokomotifleri.....	76
4.2.2.3.	Üç-faz tahrikli ana hat lokomotifleri.....	78
4.2.3.	Üç-faz tahrikli DC cer taşıtları.....	82
4.2.3.1.	Metrolar.....	84
4.3.	Magnetik raylı sistemler.....	88
4.3.1.	M-bahn (maglev tren).....	89
4.3.1.1.	Tahrik ve enerji beslemesi.....	91
4.3.1.2.	Merkezi otomatik tren operasyonu ile otomatik tren kumandası ve güvenlik sistemi.....	92
4.3.2.	Üyet üst yollu elektrikli taşıt H-Bahn.....	94
4.3.2.1.	Üyet'in genel tanıtımı.....	94
4.3.2.2.	Üyet tahrik kontrol sistemleri.....	95
4.3.2.2.1.1.	D.A. motorunun elektrik kumanda devreleri	97
4.3.2.2.2.	Lineer motoru ile yapılan tahrik sistemleri	102
4.3.2.2.2.1.	Lineer asenkron motorun yapısı.....	103
4.3.2.2.2.2.	Lineer asenkron motorun elektrik kumanda devreleri.....	103
4.3.2.3.	Üyet'in Yardımcı işletmeleri.....	106
4.3.2.3.1.	Enerji sağlama tesisi.....	106
5.	Sonuç.....	109
	Yararlanılan Kaynaklar.....	110

Ö Z E T

Bu tezde, gelişen elektrikli ulaşım sistemlerinin enerji dönüştürme donanımları incelenmiştir. Birinci bölümde, elektronik cer donanımları anlatılmış ve cer taşıtlarının tahrik sistemleriyle birlikte sınıflandırılması yapılmıştır. İkinci bölümde, modern elektrikli ulaşım sistemlerinde kullanılan enerji dönüştürücü donanımlar özellikleriyle birlikte anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, tristör inverterli ters çevrilebilir DC enerji besleme sistemleri tanıtılmış, bu tip bir sistemle karşılaşılan teknik zorluklar, tasarım prensiplerinin uygulanabilirliği tartışılmıştır. Uygulamaya örnek olarak bir metronun enerji besleme sistemi tasarım prensipleri, bazı işletme sonuçları ve teknik zorluklar üzerine benimsenen çözümleriyle birlikte ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölümde modern cer taşıtları ve uygulamaları tanıtılmış, enerji dönüştürücü düzenleri incelenmiştir. Elektrikli ulaşım sistemlerinin modernizasyonuna örnek olarak magnetik yollu sistemler anlatılmıştır. Sonuç olarak demiryolu sistemlerinde modernizasyon için üç-faz tahrik sistemleri önerilmiştir.

their energy converting equipments are discussed. As examples to modernized of electrically transportation systems, the magnetic guideway systems are described. Finally, the three-phase propulsion systems are proposed for modernized in railway systems.

A B S T R A C T

In this thesis, the energy converting equipments of developed electric traction systems are searched. In the first chapter, the electronic traction equipments are discussed and the classification of electric traction vehicles together with drive systems are made. In the second chapter, the energy converting equipments used in modern electrically transportation systems are described, together with properties. In the third chapter, reversible DC power-supply systems with thyristor inverters are described. Design principles applicable to and technical difficulties encountered by the reversible DC power-supply system are discussed. To give an example of application, the power-supply system of a metro is described in detail, together with principal designs, solutions adopted to overcome the technical difficulties and some operational results. In the fourth chapter, the modern electric traction vehicles and applications are described. And their energy converting equipments are discussed. As examples to modernized of electrically transportation systems, the magnetic guideway systems are described. Finally, the three-phase propulsion systems are purposed for modernized in railway systems.

1. GİRİŞ

1.1. CER TAŞITI TAHRİKİNİN ELEKTRONİK DÜZENLERİ

Elektrikli ve dizel-elektrikli cer sistemleri, güç elektroniğinin son yıllarda da kompüter kontrolunun gelişmesi ve yayılmasıyla önemli ölçüde ilerlemeler kaydetmiştir. Her geçen yıl daha hızlı ve daha güvenli taşıt ve sistemler geliştirilmekte ve işletmeye alınmaktadır.

Elektrikli cer taşıtlarında, gittikçe artan bir düzeyde tesis edilen elektronik donanımın iki ana fonksiyonu vardır:

- 1- Elektronik bilgi-işlem donanımı, otomasyon ve kontrol sistemleriyle işaret toplama ve işleme.
- 2- Statik elemanlarla (güç elektroniği) enerji dönüşümü.

Taşıttın tahriki açısından elektronik düzenler göz önüne alındığı zaman "cer elektroniği" diye adlandırabiliriz. Yolcu kompartımanlarında (yolcu konforu açısından) ısıtma, havalandırma ve aydınlatma kontrolü için de bu düzenlere ihtiyaç vardır.

Tahrik problemleri cer tekniğinde önemli bir yer teşkil eder. Cer kuvveti ve elektrikselsel frenleme kuvvetinin düzgün sürekli bir şekilde değiştirilmesi amacıyla elektronik düzenler özellikle ve öncelikle tercih edilir.

Günümüzde ileri düzeydeki çalışmalar sonucu ortaya çıkan modern sistemlerde taşıt hızı otomatik olarak kontrol edilmektedir.

Gelişmeler göstermektedir ki, mekanik şalt elemanlarının minumuma doğru giderek azalması ve hatta birçok alanda kullanılmaması söz konusudur.

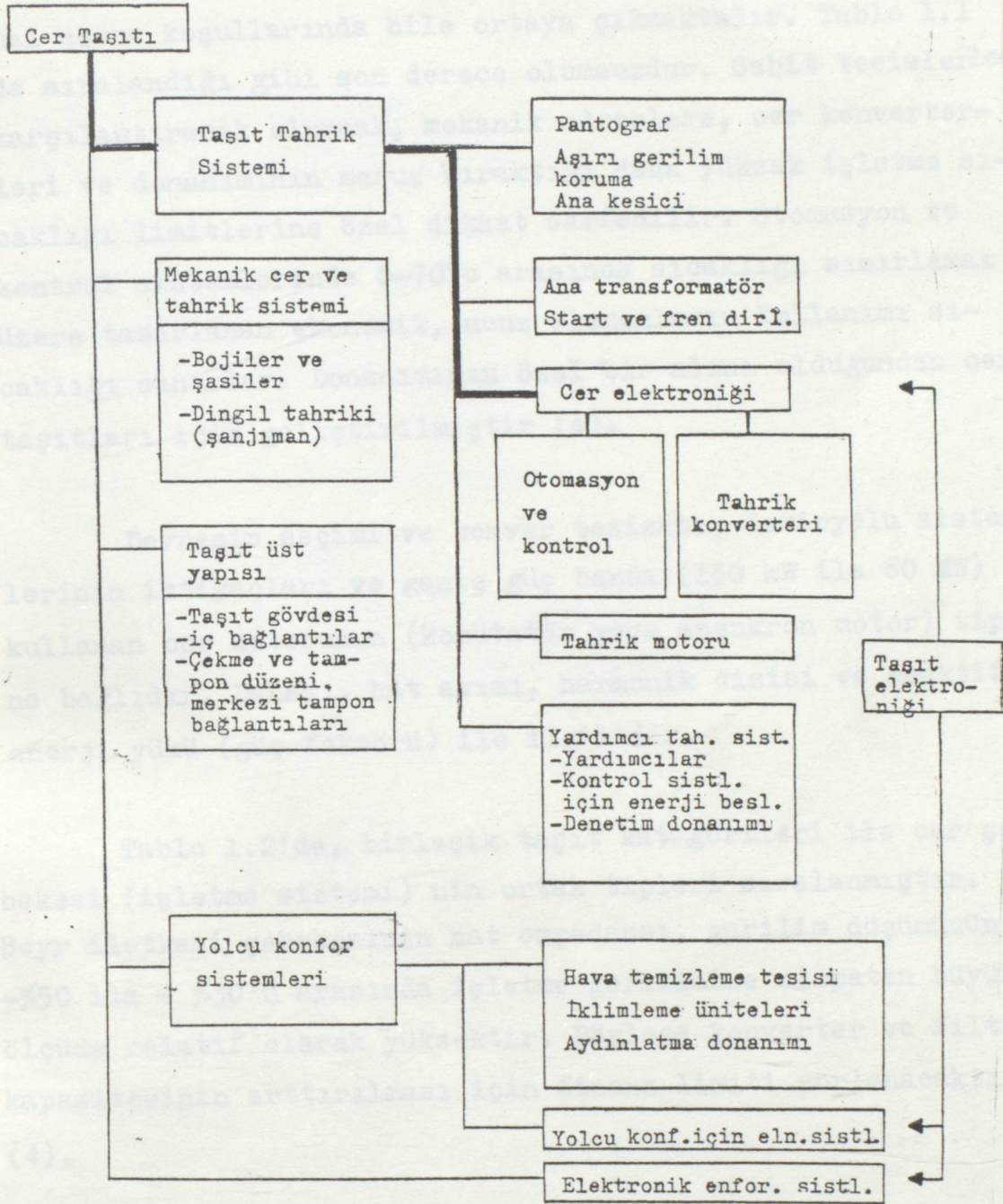
Şekil 1.1'de görüldüğü üzere "taşıt tahriki", "cer taşıtı"nın özel bir bölümünü teşkil ederek ana transformator, tahrik motorları, şalt düzenleri vs. ve yukarıda bahsedilen elektronik cer donanımını ihtiva eder (4).

1.2. CER TAŞITLARINDAKİ ELEKTRONİK DÜZENLERDEN BEKLENENLER

Elektronik sistemin seçimi, boyutlandırılması, imalatı, kalite güvencesi ve dökümantasyonu gibi unsurları arasında cer taşıtlarının etkisiyle karşılaşılan, operasyonel ve teknik yapıya bağlı olan ihtiyaçlar:

- Yarı-otomatik veya tam-otomatik demiryolları operasyonları (mesela, manevra hizmetleri) için iyi kontrol edilebilirlik.
- Tahrik donanımının düşük ağırlık ve hacmi, ve sonuç olarak yüksek bir öz taşıma kapasitesi.
- Verilen geometrik koşulların uygunluğu (taşıt boyutları ve ray yükleri)
- Bağlı özelliklerin iyi kullanımı.
- Ekonomiklik (düşük yatırım maliyetleri).
- Duraklar arası iyi işletme durumu ve donanım için optimum servis ömrü.
- Sistemin bütünü için yüksek güvence

dir. (4).



Şekil 1.1. Bir cer taşıtı sisteminin genel blok diyagramı (konvansiyonel)

Kullanıcıyla ilgili olan istenmeyen özellikler, normal çevre koşullarında bile ortaya çıkmaktadır. Tablo 1.1 de sıralandığı gibi son derece olumsuzdur. Sabit tesislerle karşılaştıracak olursak, mekanik streslere, cer konverterleri ve donanımının maruz bıraktığı daha yüksek işletme sıcaklığı limitlerine özel dikkat sarfedilir. Otomasyon ve kontrol sistemlerinde 0-70°C arasında sıcaklığı sınırlamak üzere tasarlanan ekonomik, ucuz elemanların kullanımı sıcaklığı sınırlar. Donanımının özel bir alanı olduğundan cer taşıtları için geliştirilmiştir (4).

Devrenin seçimi ve konver tesisatı, demiryolu sistemlerinin ihtiyaçları ve geniş güç bandı (150 kW ila 60 MW) kullanan cer motorunun (komütatör veya asenkron motor) tipine bağlıdır. Dahası, hat akımı, harmonik dizisi ve reaktif enerji yükü (güç faktörü) ile ilgilidir.

Tablo 1.2'de, birleşik taşıt katagorileri ile cer şebekesi (işletme sistemi) nin ortak tipleri sıralanmıştır. Seyr iletkeni şebekesinin hat empedansı, gerilim düşümünün -%50 ila + %30'u arasında işletme gerilimine nispeten büyük ölçüde relatif olarak yüksektir. Böylece konverter ve filtre kapasitesinin arttırılması için finans limiti zorlanacaktır (4).

Bu şartlar altında, sistemin standart bir şekil alması mümkün değildir. Her bir münferit aplikasyonun kendisine ait dikkatli ve dengeli çözümü gereklidir (4)

Günümüze kadar gelen çalışmalar bu problemlerin bir kısmını gidermiştir ve çalışmalar devam etmektedir.

TABLO 1.1: Elektrikli Taşıt Donanımını Çevreleyen koşullar(4)

Grup A: Klimatik koşullar

- Termo şok sıcaklığında sık ve hızlı değişmelerle oluşan geniş sıcaklık bandı
- Su püskürtme
- Karlanma, buzlanma
- Toz, metalik toz ve aşındırıcı elementlerle kirlenen atmosfer
- Kaymalı ve basınçlı dalgalanmalar.

Grup B: Mekanik stres

- Titreşimler; Tekerlek-ray sisteminde kendi kendine uyarılmış (örneğin savrulmayla neden olunan) ve ayrı ayrı uyarılmış.
- Bağlantı manevraları ve diğer operasyonel işlemlerle neden olunan tampon darbesi.
- Tahrik takımına taş atma.

Grup C: Elektriksel stres

- Güç sistemiyle ilgili distorbanslar (Harmoniklerinden dolayı şebekenin etkisi)
 - Şebekedeki şalt operasyonları, kısa devreler, seyr iletkeninin ölü bölgeleri, akım kollektörünün sıçraması ve yıldırım darbeleriyle neden olunan geçici rejimler.
 - Sabit ve portatif transmisyon birimleriyle neden olunan parazit.
 - Hat akımındaki değişimler ve hat empedansı yüzünden şebekedeki gerilim dalgalanmaları.
-

TABLO 1.2: Demir yolu sistemi ve Taşıt Usulleri (4)

İşletme tipi	Taşıt Usulü	
Akım tipi	Gerilim bandı	
Doğru akım (x)	600-1000 V DC	Trolleybüs, Tramvay hatları, şehir hatları, Metro hatları, Bölgesel hatlar
	1000-1500 V DC	Banliyö hatları, Bölgesel hatlar, Dişli raylı hatlar, Ana hatlar (Şehir hatları ve tali hatlar dahil)
	300 V DC	Ana hatlar (Şehir hatları ve tali hatlar dahil)
Tek-faz alternatif akım		
-Demiryolu frekansı	10-15kV/16 ² /3 Hz	Ana hatlar (Şehir hatları dahil)
-Endüstriyel frekans	15-25kV/50-60 Hz	Ana hatlar (Şehir hatları dahil)
	50 kV/50 Hz	Ana hatlar (birinci derece endüstriyel hatlar)
Üç-fazlı alternatif akım	750-1125V/50 Hz	Dişli raylı hatlar.

(x) Dizel-elektrik cer taşıtları, ana hatlar, endüstriyel ve dişli raylı demiryolları için de kullanılır.

(Bu kriterler 1982 yılına aittir. 1988'e kadar üç-faz tahrikin çok yönlü gelişmesi hemen her alanda kullanılmasını sağlamıştır. Bu gün için bu tablo tam referans olmayabilir).

1.3. CER TAŞITLARI VE TAHRİK SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

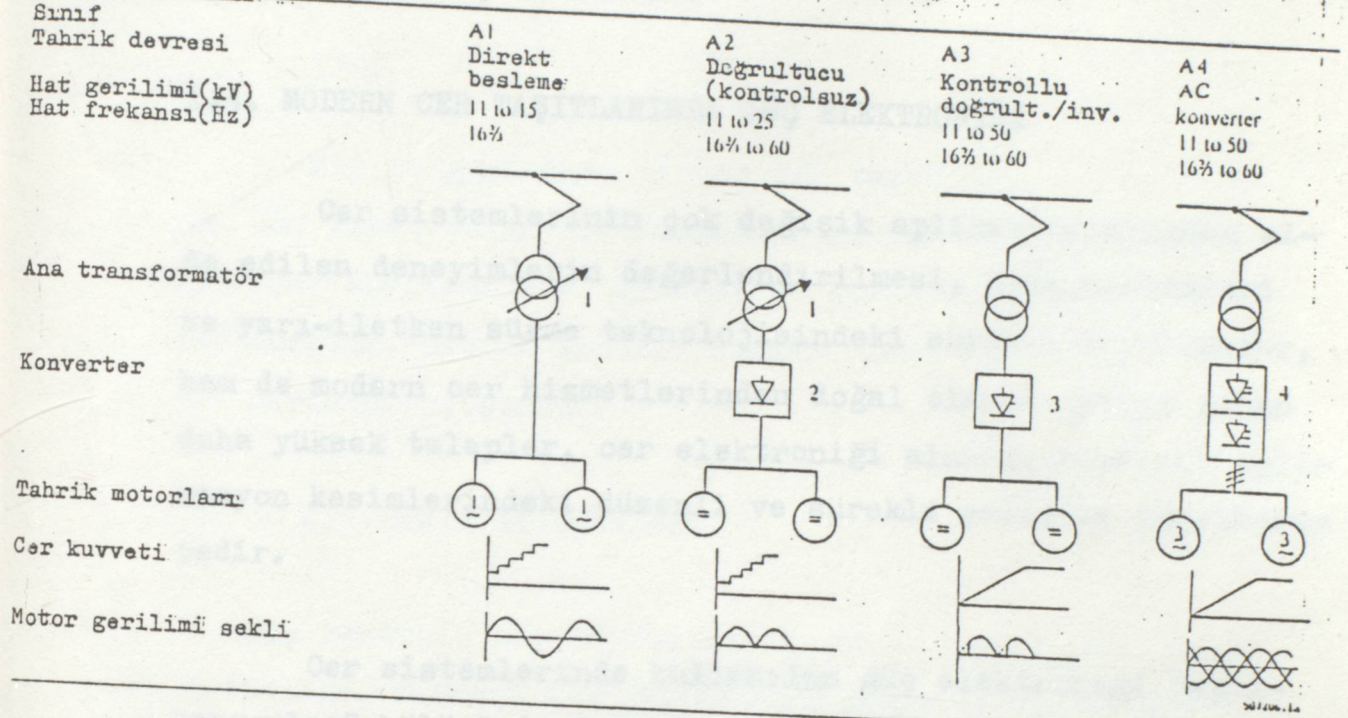
Tahrik sisteminin seçimindeki en önemli faktörler, besleme sistemi (işletme sistemi, seyr iletkeni şebekesi) ve tahrik makinası (cer motoru) dır. Şekil 1.2 de bu faktörler sembolize edilerek taşıtlar sınıflandırılmıştır. Hatta karşılaştırma yapmak amacı ile eski sistemleri bile içermektedir.

Enerji sistemi gerilimi transforme edilebildiğinden rahat bir şekilde A.C. cer sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu nedenle AC cer taşıtlarında kullanılan motorlar, optimum gerilim değerlerinde çalıştırılır. Şekil 1.2 de görülen A3 sistemi yakın geçmişte kullanılmış, fakat A4 sisteminin ortaya çıkışıyla terkedilmeye yüz tutmuştur. A4'ün kullanımı gittikçe artmakta ve yayılmaktadır. Bunun nedeni, sürekli cer kuvveti için daha uygun esas sağlandığı içindir. Sonuç olarak, düzelen bağıl özelliklerin yararlı kullanımı sözkonusudur. A4, motor ağırlığı azaltılan üç-faz asenkron motor yüzünden ilave avantajlara sahiptir. Bojiler (tahrik mekanizmalı-makinalı çift-dingil düzenleri) daha hafif konstrüksiyona sahip olduğundan komütatör de terkedilir.

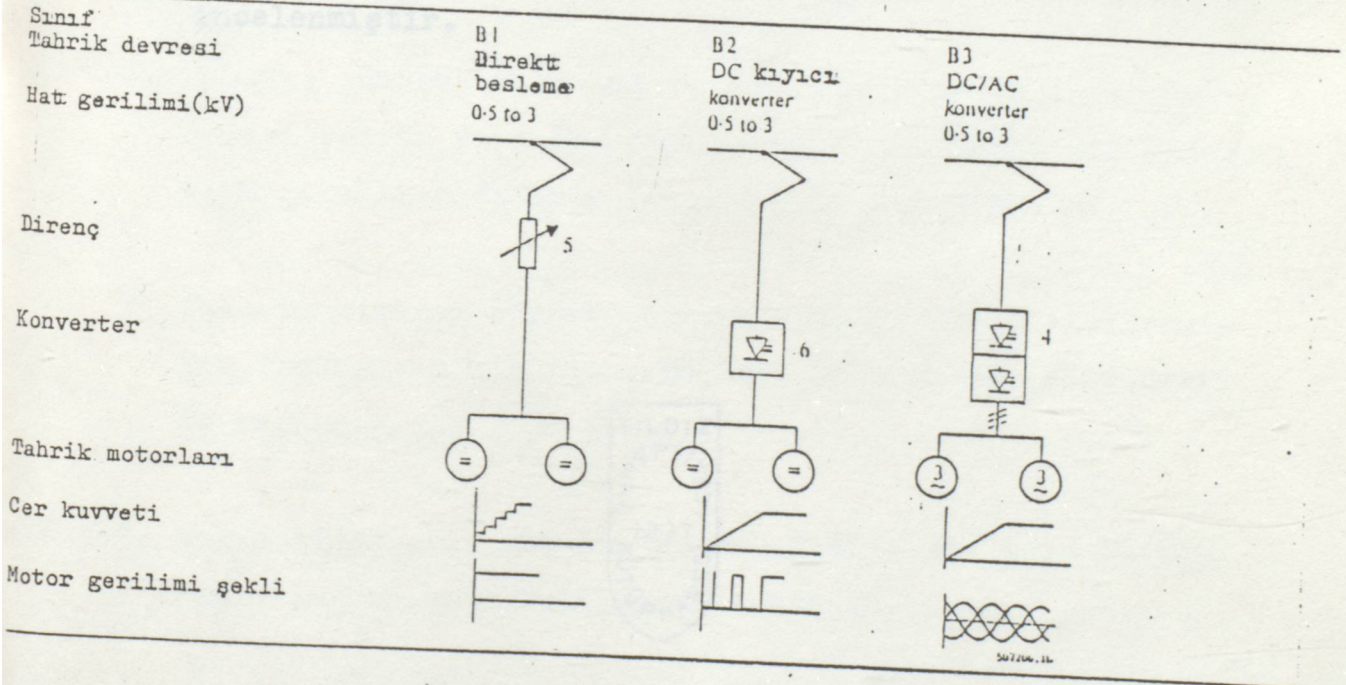
DC cer taşıtlarının B2 ve B3 tahrik tipleri, sürekli cer kuvvetinin avantajlarından da yararlanır. Ayarlanabilir kalkınma direncinin ihmal edilmesiyle, kalkınma sırasında düşünülebilir daha yüksek verim de görülür.

Etkin faydalı frenleme tüm hız aralığında dolaylı olarak mümkündür. Bunlar, ilk safhada DC kıyıcı tahriki formundaki DC taşıtları için benimsenen statik konverterli çözüm

A. AC TAHRİK SİSTEMLERİ



B. DC TAHRİK SİSTEMLERİ



Şekil 1.2. Cer tahrik sistemlerinin sınıflandırılması

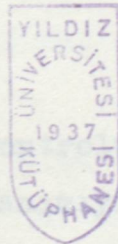
- 1 = Kademe değiştiricili
 2 = Kontrolsüz doğrultucu
 3 = Kontrollü doğrultucu/inv.
 4 = Statik konverter
 5 = Adım kontaktörleri ile
 6 = DC kıyıcı

için bilinen düşüncelerdir.

1.4. MODERN CER TAŞITLARINDA GÜÇ ELEKTRONİĞİ

Cer sistemlerinin çok değişik aplikasyonlarından elde edilen deneyimlerin değerlendirilmesi, data sistemleri ve yarı-iletken sürme teknolojisindeki sürekli ilerlemeler, hem de modern cer hizmetlerinden doğal olarak ortaya çıkan daha yüksek talepler, cer elektroniği alanını münferit aplikasyon kesimlerindeki düzenli ve sürekli gelişime yöneltmektedir.

Cer sistemlerinde kullanılan güç elektroniği "aplikasyonlar" bölümünde detaylı olarak her bir aplikasyon için incelenmiştir.



2. MODERN ELEKTRİKLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ENERJİ DÖNÜŞTÜRÜCÜ TAHRİK KONTROL ELEMANLARI

2.1. DC KIYICI

DC Kıyıcı günümüzde birçok cer taşıtında kullanılmaktadır. Güç elektroniği elemanlarının gelişmesi ve özellikle elektrikselsel boyutlarının büyümesi DC kıyıcıların gelişmesini sağlamıştır. Tahrik kontrol düzenlerinde en önemli bölümlerden birisini oluşturur.

2.1.1. DC KIYICININ AVANTAJLARI

Güç kontrolü, bir DC kıyıcının ana elemanlarıyla gerçekleştirilir. Dirençlerle yapılan kalkınma ve frenlemeye nazaran DC kıyıcı teknolojisi şu avantajları sağlamaktadır:

1. Düzgün, yumuşak kalkınma ve frenleme kolaylıklarından dolayı tahrik veya frenleme kuvveti, herhangi bir hız için gerekli olduğunda ideal bir kullanım sağlar.
2. Tekerin kayarak dönmesi durumu azalır. Çünkü elektroniğin reaksiyonu hızlıdır. Böylece daha yüksek sürtünmeyi de sağlar.
3. Bakım giderleri, güç kontrolü bağlantıları için statik yarı-iletkenlerin kullanımıyla azalır.
4. Kalkınmadaki direnç kayıplarının tamamı kaldırılır. Hat akımı güçle orantılı, fakat momentle orantılı değildir. Birçok taşıt aynı anda harekete geçtiğinde hattaki yük bu orantıyı azaltır.

5. % 30'a kadar (hatta en düşük hızlara kadar) enerji tasarrufu, rejeneratif (faydalı) frenin ana elemanlarıyla frenleme enerjisinin şebekeye geri beslenmesi suretiyle mümkündür (9).

DC kıyıcının konstrüksiyonu basit ve nettir. Son zamanlarda geliştirilen modern bir kıyıcı klasik devrelere dayanır ve şu avantajlara sahiptir:

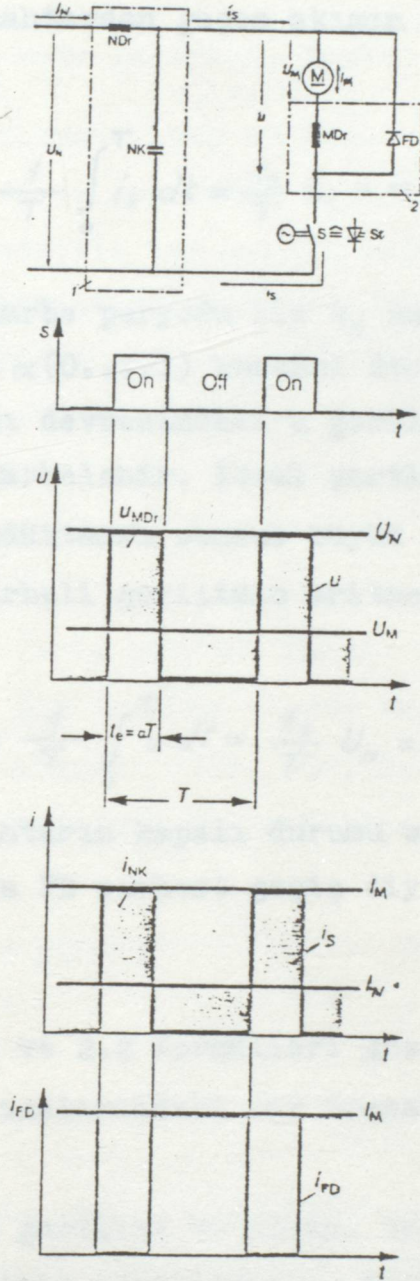
1. Tristörler üzerinde düğün maksimum ters gerilim, hat gerilimini hiç geçmez. Yalnız serbest geçiş diyodu, hat geriliminin iki katına maruz kalır.
2. Reset devresinin maliyetinin azalması, optimal tekrara iletime geçme süreli tristörlerin tedarik edilebilmesini mümkün kılar.
3. Tristörlerdeki kritik gerilim yükselme hızı ($du/dt = 20$ V/ μ s) düşüktür. Bu, yüksek blokaaj frekansında çalışan tristörler için faydalıdır ve tekrar iletime geçme süresi, kritik gerilim yükselme hızıyla artar ki, aşırı derecede yüksek kritik gerilim yükselme hızları tehlike arzeder. Büyük bir ihtimalle tristör yanacaktır.
4. Yüksek motor akımları olan bir sisteme kolay uyum sağlar. Bunun için uygun sayıda ana tristörlere ve belki paralel bağlanacak serbest geçiş diyotlarına ihtiyaç vardır (9).

Özet olarak modern bir DC kıyıcının avantajları:

1. Tristörlerde maksimum gerilim düşümü hat gerilimidir.
2. Tristörlerin optimal tekrar ilettime geçme süresi, reset devresinin karmaşıklığını ve maliyetini azaltır.
3. Tristörlerdeki ters gerilim oranı düşüktür.
4. Anahtarlama elemanları minimum sayıdadır.
5. Tahrik ve frenleme için otomatik olan zayıflatma devresi kapsayabilir.
6. Kıyıciya paralel bağlı R_B frenleme direnci, hatlarla dirençli fren arasında sabit dönüşümü sağlar.
7. Bütün elektronik elemanlar tozdan korunmuş bir bölme içerisine yerleştirilmiştir. Soğutma havası, sadece soğutucular arasından geçtiğinden filtre edilmeden kullanılabilir.
8. Aktif elemanların değiştirilmesi kolaydır.
9. Soğutucular bara şeklinde düzenlendiğinden güç kablolarının sayısı azalır (9).

2.1.2. DC KIYICININ ÇALIŞMA PRENSİBİ

DC Kıyıcı, motor güç devresini periyodik olarak açıp kapayan bir elektronik bağlantı prensibi (Şekil 2.1). Darbeli DC akımı i_s , anahtardan geçer ve anahtar kapalı iken t_e periyodu esnasında I_m motor akımına eşit olur. Hat filt-



1 Hat filtre düzeni Hat reaktörü NDr, hat kapasitörü NK

2. Motor kesimindeki filtre düzeni. Motor reaktörü MDr, serbest geçiş diyodu FD

S Periyodik çalışan anahtar (DC Kıyıcı St)

M Motor (Seri bağlı rotor ve alan sargısı)

I_{FD} Serbest geçiş diyodu akımı

I_M Motor akımı

I_N Hat akımı

I_{NK} Hat kapasitörü akımı

I_S S anahtarı üzerinden geçen akım

u Yük devresindeki gerilim

U_m Motor gerilimi

U_{MDr} Motor reaktörü gerilimi

U_N Hat gerilimi

T Periyot

t_e Anahtarın kapalı kalma süresi $t_e = \alpha T$

α S anahtarının yada DC Kıyıcı St'nin kontrol açısı

Şekil 2.1. DC kıyıcının prensibi (devresi ve idealize karakteristikleri)

resi darbeleri akımı yumuşatır. Öyle ki, hat akımı I_N ideal şartlar altında saf DC akımdır. Hat akımı, bir T darbe periyodunda anahtardan geçen akımın aritmetik ortalama değerine denk olur.

$$I_N = \frac{1}{T} \int_0^T i_s dt = \frac{t_e}{T} I_M = \alpha I_M \quad (2.1)$$

T darbe periyodu ile t_e kapalı-anahtar süresi arasındaki oran, $\alpha(0 \dots 1)$ kontrol derecesi olarak adlandırılır. Motor akımı devresindeki u gerilimi, 0 ile hat gerilimi U_N arasında darbelenir. İdeal şartlarda, yani motor reaktörü MDr'nin endüktansı sonsuz büyük olduğu durumda motor gerilimi, u darbeleri gerilimin aritmetik ortalama değerine eşit olur.

$$U_M = \frac{1}{T} \int_0^T u dt = \frac{t_e}{T} U_N = \alpha U_N \quad (2.2)$$

Anahtarın kapalı durumu esnasında motor akımı, motor reaktörü ve FD serbest geçiş diyodu üzerinden devresini tamamlar.

2.1 ve 2.2 formülleri göstermektedirki, DC kıyıcı AC akım uygulamalarındaki bir transformator gibi davranır (9).

Hat gerilimi ve akımı, transformatorün primer akım ve geriliminin karşılığıdır. Motor akımı ve gerilimi de transformatorün sekonder büyüklüklerinin karşılığıdır. Transformatorün \bar{u} dönüştürme oranı ($\bar{u}=0 \dots 1$), DC kıyıcının kontrol derecesi α nin karşılığıdır. AC güç uygulamalarındaki bir transformator gibi DC kıyıcı düşük-kayıp gerilimi ayarını içerir. Hat gücü P_N ve motor gücü P_M eşitlenir.

$$P_N = U_N I_N = \alpha U_N I_M = U_M I_M = P_M \quad (2.3)$$

Harekete geçerken, kıyıcı motor gerilimini azaltır.

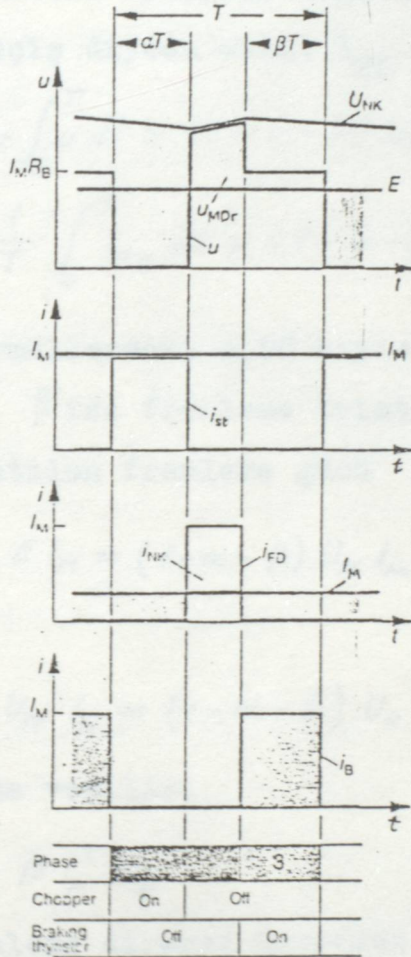
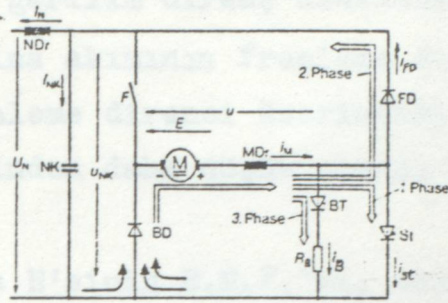
Frenlemede, hiç değilse de en düşük hızlarda, makinanın (DC motorun generatör hali) E gerilimi, geri-beslenen frenleme enerjili hat geriliminden daha düşüktür. Onun için kıyıcının makina gerilimini artırması gerekir. Bu amaçla makina kıyıcıya paralel bağlanmalıdır. Beslemeden bir enerji uygulanmadığı zaman güçlü bir frenleme için R_B frenleme direnci, BT frenleme tristörü yardımıyla St kıyıcısına paralel bağlanır (Şekil 2.2.).

Bir darbe peryodu içinde üç farklı durum vardır: Kıyıcı ideal bir anahtar olarak düşünülür. Motor ve hat reaktörü endüktansları (M_{Dr} , N_{Dr}) nın sonsuza gittiği varsayılır. Hat kapasitörünün kapasitesi ise sınırlıdır.

1.durum: Kıyıcı ilettime geçer, makina güç devresi kısa devre edilir, makina akımı I_M kıyıcıdan geçer.

2. durum: Kıyıcı kesime gider. Motor reaktörü M_{Dr} , NK hat kapasitörüne serbest geçiş diyodu üzerinden hat gerilimine rağmen akım verir. Eğer frenleme enerjisi hat tarafından alınamıyorsa, hat kapasitörü gerilimi U_{NK} izin verilebilen maksimum değerine çıkacaktır.

3.durum: Hat kapasitörü gerilimi U_{NK} , izin verilen maksimum değeri olan hat gerilimine ulaşmıştır. Bu, frenleme tristörü BT'nin tetiklenmesi için bir kriterdir. Makina akımı I_M (sonra) frenleme direncine yöneltilir. Makinanın güç



- MDr Motor reaktörü
 NK Hat kapasitörü
 NDr Hat reaktörü
 St Kiyıcı
 F Hareket kontaktörü
 FD Serbest geçiş diyodu
 BD Frenleme diyodu
 BT Frenleme Tristörü
 I_m, i_m Motor akımı
 i_{st} Kiyıcı akımı
 i_{FD} Serbest geçiş diyodu
 i_B Frenleme tristörü akımı
 I_N Hat akımı
 I_{NK} Hat kapasitörü akımı
 U_N Hat gerilimi
 U_{NK} Hat kapasitör gerilimi
 U Motor devresi (motor ve motor reaktörü)'ndeki gerilim
 U_{MDr} Motor reaktöründeki gerilim
 E Motorun E.M.F'si
 β Frenleme tristörünün kontrol açısı
 α Kiyıcının kontrol derecesi
 T darbe periyodu

Şekil 2.2. DC kiyıcı darbe periyodunun üç farklı durumu (frenleme hali)

devresindeki gerilim direnç üzerindeki gerilime eşittir:

$U = I_M \cdot R_B$ Makina akımının frenleme direncine yöneltilebilmesi için, frenleme direnci üzerindeki $I_M \cdot R_B$ geriliminin besleme geriliminden daha düşük olması gerekir.

Makina E'sinin E.M.F.'si, makina güç devresi gerilimi u 'nun aritmetik ortalama değerine eşittir. Hat akımı I_N de serbest geçiş diyodu akımı I_{FD} ye eşittir.

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T u dt = (1 - \alpha - \beta) U_N + \beta I_M R_B \quad (2.4)$$

$$I_N = \frac{1}{T} \int_0^T i_{FD} dt = (1 - \alpha - \beta) I_M \quad (2.5)$$

Bu formüllerdeki α , DC kıyıcının kontrol derecesi dir.

β ise frenleme tristörünün kontrol derecesidir.

Makinayla üretilen frenleme gücü

$$P_M = E I_M = (1 - \alpha - \beta) U_N I_M + \beta I_M R_B \quad (2.6)$$

olup

$$P_N = U_N I_N = (1 - \alpha - \beta) U_N I_M \quad (2.7)$$

oranında hatta verilir.

$$P_R = \beta I_M^2 R_B \quad (2.8)$$

oranında frenleme direnci üzerinde ısıya dönüştürülür. Frenleme tristörünün β kontrol derecesi, sadece hat tarafından alınmayan çok fazla enerjinin frenleme direncinde dönüştürülmesi şeklindeki kontrollerle belirlenir ($\beta = 0$: saf faydalı fren $\beta = 1 - \alpha$: saf dirençli fren) (9).

Formül 2.4 göstermektedirki, stabil (kararlı) bir çalışma için makina E sinin E.M.F.'si, U_N hat geriliminden ve-

ya frenleme direnci üzerindeki $I_M \cdot R_B$ geriliminden daha düşük olmalıdır (9).

2.1.3. DC KIIYICI ANA DEVRESİNİN ÇALIŞMASI

Bir darbe peryodu içinde şu işlemler gerçekleşir:

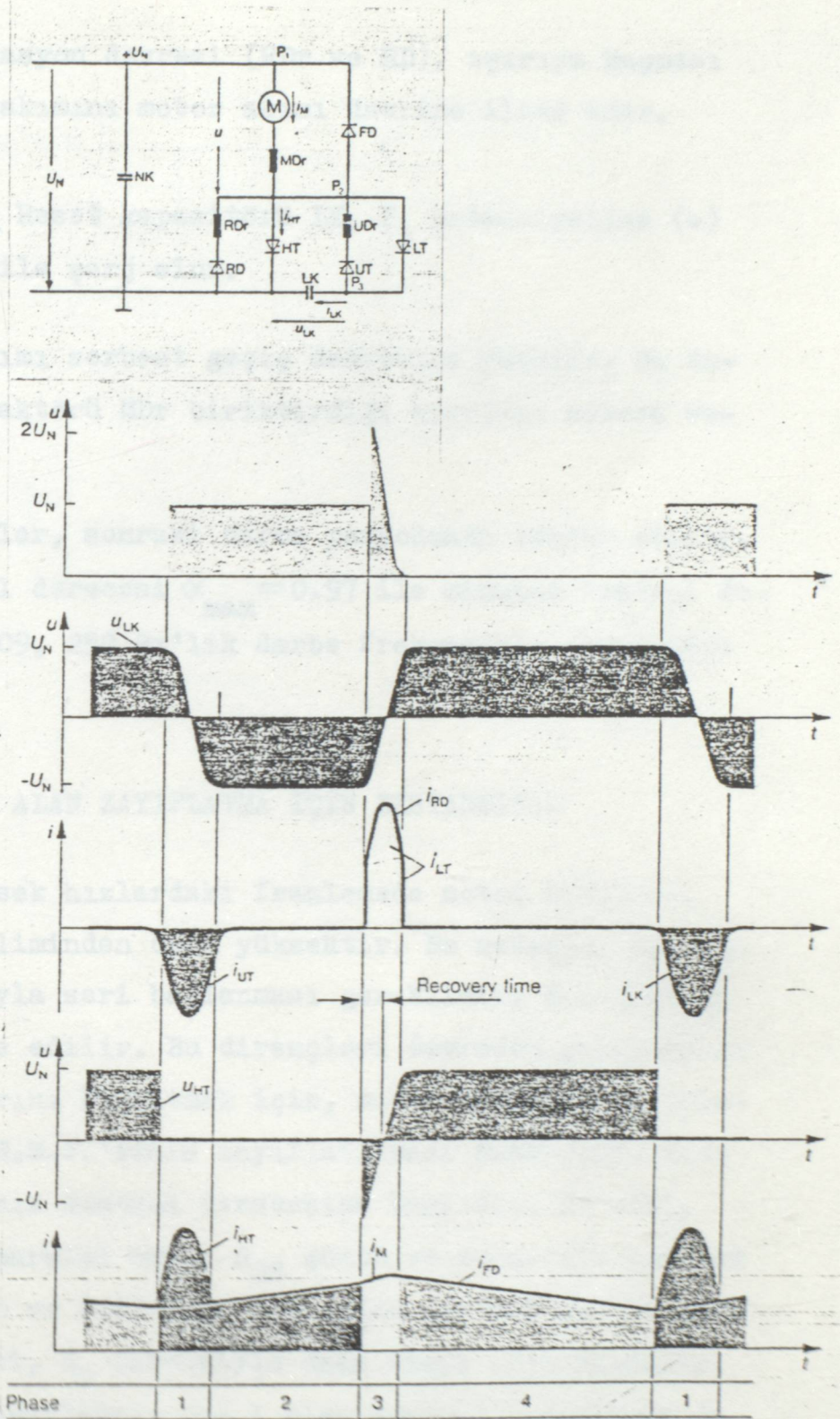
Ana tristör başlangıçta bloke edilir. LK reset kapasitörü pozitif gerilime şarj edilir. Yani, önce reset işlemiyle P3 potansiyeline ($U_{LK} = U_N$) (+) kutuplanır. I_M motor akımı serbest geçiş diyodu devresinde dolaşır (Şek. 2.3).

1.durum: HT ana tristör ve UT yardımcı (komütasyon) tristör tetiklenir. Motor akımı I_M ana tristöre yönelir. Reset kapasitörü gerilimi, P₃ potansiyeline (-) kutuplu negatif gerilime yardımcı tristör üzerinden değişir. Reset kapasitörü gerilimi U_{LK} , dolayısıyla ana tristörün reseti için gerekli polariteye sahiptir.

2.durum: Komütasyon biter. Kapasitörün deşarjı komütasyon tristörü ile önlenir. Motor akımı daha sonra ana tristör üzerinden geçer. Hat gerilimi U_N , M motoru ve MDr motor reaktöründen oluşan yük devresi üzerinde görülür.

3.durum: Reset tristörü LT tetiklenir. Bu da, anodu (-), katodu (+) kutuplu ana tristöre reset kapasitörü LK'nın gerilimini uygular. Ana tristör bloke edilir (tikanır). Motor akımı, de şarj edilen reset kapasitörü yardımıyla yön değiştirir. Çok düşük motor akımında bile deşarj garantisine sahip kapasitörün deşarjını hızlandıran

- M Motor (seri bağılı rotor) -
 MDr Motor reaktörü
 NK Hat kapasitörü
 HT Hat tristörü
 LT Reset tristörü
 UT Komütasyon tristörü
 FD Serbest geçiş diyodu
 RD Tekrar diyodu
 LK Reset kapasitörü
 UDr Komütasyon reaktörü
 RDr Tekrar reaktörü
 i_M Motor akımı
 i_{HT} Ana tristör akımı
 i_{LK} Reset kapasitör akımı
 i_{UT} Komütasyon tristörü akımı
 i_{LT} Reset tristörü akımı
 i_{RD} Tekrar diyodu akımı
 i_{FD} Serbest geçiş diyodu akımı
 U_{HT} Ana tristör gerilimi
 U_N Hat gerilimi
 u Motor devresindeki (serbest geçiş diyodu) gerilimi
 U_{LK} Reset kapasitörü gerilimi
 $P_{1,2,3}$ Potansiyeller



Şekil 2.3. DC kıyıcının temel devresi ve anahtarlama karakteristikleri

geri-dönüş osilasyon devresi (RDr ve RD), aşırıya kaçması durumunda şarj akımını motor akımı üzerine ilave eder.

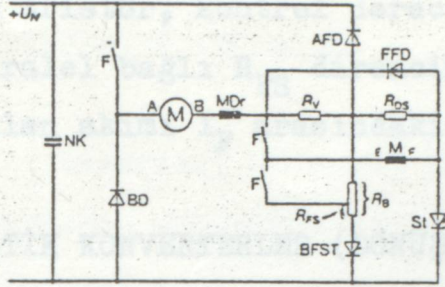
4.durum: Reset kapasitörü LK, P_3 potansiyeline (+) kutuplu $U_{LK}=U_N$ ile şarj olur.

Motor akımı serbest geçiş devresine yönelir. Bu durumda, motor reaktörü MDr biriktirdiği enerjiyi motora verir.

Bu işlemler, sonraki darbe periyodunda tekrar edilir. Maksimum kontrol derecesi $\alpha_{max}=0.97$ ile minimum kontrol derecesi $\alpha_{min}=0.09$, 250 Hz'lik darbe frekansıyla sağlanabilir (9).

2.1.4. OTOMATİK ALAN ZAYIFLATMA İÇİN EKSTANSİYON

Daha yüksek hızlardaki frenlemede motor E.M.F'si, normal hat geriliminden daha yüksektir. Bu nedenle, dirençlerin BD diyoduyla seri bağlanması gereklidir. Hız düştüğü zaman kısa devre edilir. Bu dirençleri devreden çıkarmak en azından boyutlarını küçültmek için, motor alanının ve dolayısıyla makina E.M.F.'sinin zayıflatılması mümkündür. Alan zayıflatması yalnız kontrol derecesine bağlıdır. Bu etki, alan sargısına paralel bağlı R_{DS} şöntü ve rotor ile serbest geçiş diyot (AFD ve FFD) ları üzerinden meydana gelir. Alan zayıflatma etkisi, R_V direnciyle daha fazla artırılabilir. Bu devre, alan zayıflatması $\alpha = 1$ olan kontrolü sağlamada da kullanılabilir. Bu amaçla frenleme direnci R_B kısa-devre edilecek şekilde gruplanır. Frenleme tristörü bundan sonra alan zayıflatma tristörü olarak (Şekil 2.4'teki BFST) çalış-



MDr Motor reaktörü

NK Hat kapasitörü

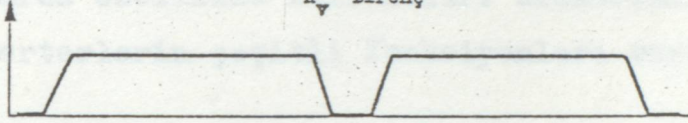
st Kılıcı

F Hareket kontaktörü

AFD Rotor serbest geçiş diyodu

FFD Alan serbest geçiş diyodu

BD Frenleme diyodu

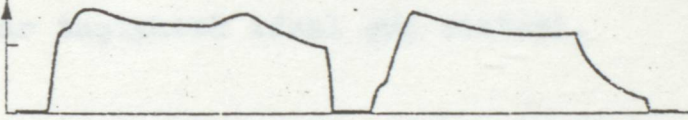
BFD Frenleme ve alan zayıflatma
tristörü R_B Frenleme direnci R_{FS} Tahrik için alan zayıflatma
dirençleri, R_B frenleme
dirençinin parçası R_{DS} daimi şönt R_v DirençReferans
moment

Moment



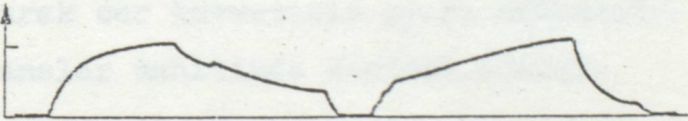
rotor akımı

300 A

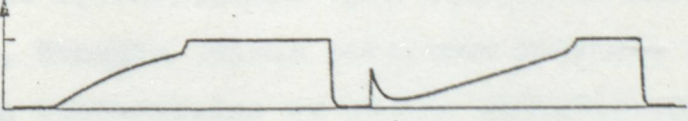


Alan akımı

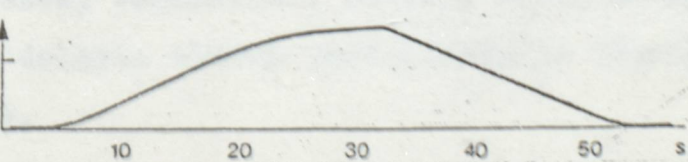
300 A



Kontrol gerilimi

10V $\alpha = 1$ 

Hız

1000 min⁻¹

10 20 30 40 50 s

t

Şekil 2.4. DC kılıcılı tahrik (otomatik alan zayıflatmalı tahrik) karakteristikleri

şır. Bu tristör, kontrol derecesi alanı artırmasıyla, geriye kalan paralel bağlı R_{FS} direncini bağlar. Bu da, rotor akımı I_A ile alan akımı I_F arasındaki oranı azaltır.

2.2. STATİK KONVERTERLER (DÖNÜŞTÜRÜCÜLER)

Statik konverterler, doğrultma düzenleri yardımıyla elektrik enerjisini dönüştürürler. Günümüzde yarı-iletkenler elektrikli taşıtlarda özellikle kullanılır. Elektrikli cer taşıtlarında konverterlerin çeşitli fonksiyonları vardır:

1. Demir yolu şebekesinde kullanılan besleme gerilimi sisteminin değişimi ile tahrik sistemine sağlanan avantajlar. Diğer bir deyişle, tahrik edilen tren için en iyi cer sistemine bağlı seyr iletkenindeki elektrik enerjisini uzun mesafelere kadar taşıyacak ideal güç sistemi.
2. Tahrik motoru geriliminin düzgün, sürekli ve hızlı değişimi. Sürekli olarak cer kuvvetinin ayarı mümkündür. Ayrıca hız, dar toleranslar dahilinde kontrol edilir.
3. Tekrarlanan şalt operasyonları için kullanılan mekanik şalt düzenleri, örneğin tahrik motorunun kademeli değişimi için kullanılan kontaktörler ve kademe değiştiriciler uzun süre ihtiyaca cevap veremezler. Düzenli bakım maliyetinden ve yerleşimden dolayı olarak yarı-iletkenli düzenlerin avantajları (3).

Statik konverterler diğer kısımlarda, kullanım alanı ve amaçlarına göre değerlendirilerek incelenmiştir.

2.3. İNVERTER (EVİRİCİ)

İnverter, DC akımı AC akıma dönüştüren bir enerji dönüştürücü düzendir. Üç-fazlı tahrikin cer sistemlerinde kullanımıyla çok önem kazanmıştır.

Yarı-iletkenlerin gelişmesiyle gittikçe gelişen inverter, cer sistemlerinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

Diğer bölümlerde kullanım amaçları ile birlikte detaylı olarak incelenmiştir.

3. REJENERATİF (FAYDALI) FRENLER KULLANILAN CER SİSTEMLERİ İÇİN İNVERT EDİLEN (TERS ÇEVİRİLEN) ARA (YARDIMCI) İSTASYONLARLA YAPILAN DC ENERJİ-BESLEME SİSTEMİ

(Bu bölümde, tristörlü inverterlerle yapılan tersine çevrilebilir DC enerji-besleme sistemleri anlatılmıştır. Dizeyn prensiplerinin uygulanabilirliği ve tersine-çevrilebilir DC enerji-besleme sistemiyle karşılaşılan teknik zorluklar gözden geçirilmiştir. Aplikasyona (uygulamaya) örnek olması bakımından Japonya'da kurulu Kobe Metrosu enerji-besleme sistemi, bazı operasyonel sonuçlar ve teknik zorluklar üzerine benimsenen çözümleri ve başlıca tasarımlarıyla birlikte detaylı olarak anlatılmıştır)

Bu bölümde kullanılan Semboller:

C_F = kıyıcı filtresi kapasitansı

E_a = inverter üzerinde düşen gerilim

E_c = C_F kapasitörü üzerindeki gerilim

E_{do} = doğrultucunun boştaki gerilimi

E_i = İnverterin DC gerilimi

E_p = Pantograf gerilimi

ΔE_1 = Hat üzerinde düşen gerilim

I_b = trenin frenleme akımı

I_{CH} = kıyıcının akımı

I_i = inverterin DC akımı

I_n = n dizisinin harmonik akımı

L_F = kıyıcı filtresinin endüktansı

L_1 = İnverterin DC reaktörünün ve DC hattın endüktansı

P = konverterin darbe sayısı

P_a = Yardımcı düzeneklerle harcanan güç

P_{INV} = inverterin AC tarafındaki güç

- P_{sr} = ara-istasyonun reaktif gücü
 P_{sa} = ara-istasyonun aktif gücü
 W_r = inverter transformatörünün bakır kaybı
 X_c = komütasyon reaktansı
 n = harmonik dizisi
 u = komütasyon bindirme açısı
 β = inverter kontrolü avans açısı

3.1. GENEL TANITIM

Rejeneratif (faydalı)-frenleme sistemleri, metrolarda veya uzun eğimli demiryollarıda kullanıldığı zaman daha verimli olur.

Uzun eğimli demiryollarında, bir elektriksel frenleme kullanımı güvenlik açısından önemlidir. Buralarda uzun mesafeler bulunduğundan pünomatik frenleme kullanılması zordur. Bir başka önemli konu da, bu sistemle eğimlerde düz yollardakinden çok daha fazla enerji geri alınabileceğidir.

Bir metroda, faydalı frenleme enerjisiyle enerji tasarrufu sağlayan bu sistem, iklimleme veya havalandırma donanımında sarfedilen enerjinin minimize edilmesi ve tuneldeki ısı artışının önlenmesi bakımından son derece yararlıdır.

Hızlı taşıma sistemlerinin çoğunda, DC sisteme geri besli frenleme enerjisi, enerji alan diğer trenler tarafından öncelikle absorbe edilir. Bununla birlikte, yakınlarda enerji alan tren bulunmayabilir ya da frenleme akımı, yakınlardaki trenler tarafından çekilen akımın çok üzerinde olabilir. Ters çevrilen ara-istasyonun amacı, bu durumla başa

çıkmak için stabil (kararlı) rejeneratif (faydalı) frenleme sağlamak ve maksimum frenleme enerjisi elde etmektir ki, tren rejenere edilebilsin.

Ters-çevirme sistemi tasarımında teknik ve ekonomik görüşler vardır. Şöyleki;

- a) Fiyat etkinliğinin değerlendirilmesi
- b) Çevirme sistemine mahsus konuların araştırılması.

Fiyat etkinliği değerlendirmesinin,

- i) İnverterlerle elde edilen enerji tasarrufu
- ii) Frenleme pabuçlarının bakım maliyeti
- iii) Metro durumunda iklimleme donanımının işletme maliyeti.
- iv) Uzun eğimlerde frenleme güvencesi

esasları üzerine yapılması gereklidir. (ii), (iii) ve (iv)'te farklı bir şekilde kullanılan inverterin faydasının tamamen önceden belirtilmesi zordur. Fakat (i) için, kompüter simülasyonu yardımıyla, enerji tasarrufu miktarının önceden belirtilmesi ve enerji-besleme sistemi analizi bugün için mümkündür.

Bunların yanında, ters-çevrilen ara-istasyon sisteminin karakteristikleri olan özellikler de vardır. Araştırılması gereken bu özellikler şunlardır (6):

a) Minimum inverterle maksimum kazanç. Yer ve kapasite nedeniyle ters-çevrilen ara-istasyonun optimum dizaynı.

b) İnverterin karakteristikleri ve kontrolü. İnverterin karakteristikleri ve kontrolü sistemin alma yeteneğine sıkı sıkıya bağlıdır (Karakteristikler; AC sistemdeki güç faktörü ve harmonikler, doğrultucularla inverterler arasın-

daki sirkülasyon akımları).

c) Enerji-besleme sistemindeki harmonikler. Doğrultucu ve inverterler, AC ve DC tarafın her ikisinde de harmonik üretir. Bu durum, diyotlu doğrultucu için sözkonusu değildir. Tristörlü inverter faz-kontroluyla çalıştığından AC ve DC tarafta harmonikleri artırır.

d) AC tarafında talep edilen yükün elde edilebilirliği. Geri-besleme enerjisi, demiryolu sisteminin AC yükü tarafından absorbe edildiğinden arzu edilir.

e) Koruma. Sistem, ters-çevirmesiz bir ara istasyon tipinde de tecrübe edilmemiş aşağıdaki hatalara karşı korunmuştur.

i) İnverterin komütasyon başarısızlığı.

ii) Operasyonun rejeneratif hali altındaki DC hatası ki, yükün normal değişimlerinden hızlı bir şekilde ayrılması gerekir.

3.2. TERS ÇEVİRİLEN ARA-İSTASYONUN YERİ VE KAPASİTESİ

3.2.1. GENEL KAVRAM

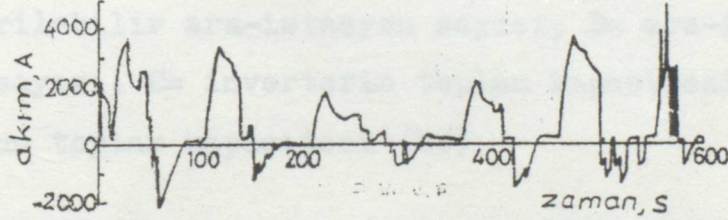
Her ne kadar elde edilebilir rejeneratif gücün kesin miktarı özel demiryolu sistemine bağlı ise de, %30'a kadar bir enerji azaltma, düz yollu cer sisteminde kıyıcı-kontrolü taşıtlarla elde edilebilir (6). Hızlı bir taşıma sistemi genellikle yüksek cer kesafetine sahiptir. Bu yüzden rejeneratif enerji, trenler arası enerji transferi ile yutulacaktır. Dolayısıyla inverterin absorbe etmesi gereken güç küçüktür. Komputer simülasyonlu çalışmalar sonucu doğrultuculardan ge-

çirilen enerjinin %10-20'si, inverterlerle tekrar elde edilecektir.

Bir sistemdeki gerçek ölçümlerle bu hesaplama desteklenmiştir. Örneğin Japonya'daki Sapporo Doğu-Batı hattında %8'lik bir enerji tasarrufu elde edilmiştir. Bununla birlikte inverter donanımı için ihtiyaç duyulan gerçek kapasite, ortalama tasarruflama oranından daha büyüktür. Çünkü:

a) İnverter akımının biçimi, birbirini izleyen darbelerdir. Şekil 3.1, ters-döndürülebilir ara istasyonun hesaplanan tipik akım biçimine bir örnektir (burada, maksimum tepe değerin, ortalama değere oranı 12 dir).

b) Yarı-iletkenlerin küçük termal sabiti ve transformatorün komütasyon reaktansındaki zorlamadan dolayı inverter ve birleşik transformatorün hacmini, izin verilen değerdeki tepe akımı etkiler.



Şekil 3.1. Ters-döndürülebilir bir ara-istasyonda hesaplanan akım.

Eğer her doğrultucu ara-istasyonu inverterle donatılmışsa, herhangi bir anda tam emiş olması besleme sistemi için kolaydır. Bu düzenleme maliyet açısından, gerçek boyutlarda gerekli değildir. Çünkü:

a) Tren formasyonu, genellikle motor ve cer dingillerinin bir karışımıdır. Frenleme akımı, besleme akımından kü-

çüktür ve hatta yayılan diğler trenler tarafından absorbe edilir. Dolayısıyla, ters-çevrilebilir iki ara-istasyon arasındaki mesafe, besleme-tarzı esası üzerine dizayn edilenden daha uzun olabilir.

b) Trenler arasında transfer edilecek olan enerji, inverterle donatılan tüm ara istasyonlar yardımıyla (ara-istasyonlara) geri akıtılabilir.

TABLO 3.1. Ters çevrilebilir ara-istasyonun sayı ve kapasitesine örnekler (6).

Demiryolu	Hat uzunluğu(km)	A/B	C/D	Güzergah
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

A= ters çevrilebilir ara-istasyon sayısı, B= ara-istasyonların toplam sayısı, C= inverterin toplam kapasitesi(MW) D= doğrultucunun toplam kapasitesi (MW)

Tablo 3.1. de, Japonya'da kurulu bulunan hızlı taşıma sistemleri için ters-çevrilebilir ara-istasyonların sayı ve kapasitelerine örnekler verilmiştir. Veriler göstermektedir ki, gerekli olan ters-çevrilebilir ara-istasyon sayısı, düz-yol sistemli ara-istasyonların toplam sayısının yarısının üçte ikisidir. İnverter kapasitesine gelince C/D oranı 1/13 ila 1/8.3 arasında değişir. İnverter kapasitesi söz konusu olduğundan şunlara dikkat edilmelidir (6):

a) İverter kapasitesi konusunda, düzyollu sistemlerin fazladan bir ihtiyacı yoktur. Çünkü inverterin başarısızlığı normal servisin sürekliliğine engel değildir.

b) Tüm sistem doğrultucularının toplam kapasitesi, ara-istasyonların herhangi birinin servis dışı olması halinde normal servisin devamı için geniş toleransa sahiptir. Bu gerçekler ışığında Tablo 3.1. göstermektedir ki, düz yollu bir sistem inverterin toplam kapasitesi, sistemin gerçekten ihtiyacı olan doğrultucu kapasitesinin %10-20'si arasındadır.

Uzun eğimli bir sistem için yukarıda bahsedilen analizler, inverter-sistemi dizaynın güvenlik üzerinde yoğunlaşması gerektiği için uygulanmayabilir. Tutma frenlemesi için sistem alma yeteneği herhangi bir anda %100 olmalıdır ve sistem fazladan bir inverteri içermelidir. Tablo 3.1'deki Metro I, bu tip sistemin bir örneğidir (3.8'de bu tip bir sistem detaylı olarak anlatılmıştır.

3.3. İNVERTERİN KARAKTERİSTİKLERİ

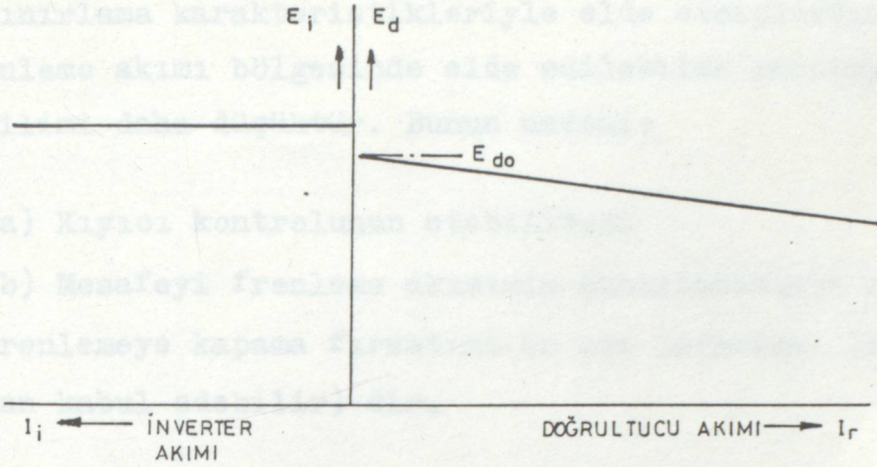
3.3.1. İNVERTERİN DC KARAKTERİSTİKLERİ

Ters-çevrilebilir ara-istasyonun DC karakteristikleri (tipik olarak), şekil 3.2'de görülmektedir.

Doğrultucular ve inverterler arasındaki sirkülasyon miktarının minimize edilmesi istendiğinde inverterin DC gerilimi, doğrultucunun boştaki gerilimi E_{do} 'ın üzerine çıkarılır. 3 fazlı bir köprü bağlantı için inverterin DC karakteristikleri örneğin,

$$E_i = E_{i0} \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_c I_i + \frac{w_r}{I_i} + E_a \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 3.2. Ters-çevrilebilir bir ara-istasyonun karakteristikleri.

Eğer kontrol açısı β iyileştirilirse, inverter akımı I_i 'nin artması gibi inverter gerilimi E_i yükselir. Seyr iletkenindeki gerilim, inverter geriliminden büyük ölçüde etkilenir, ve sistemin yüksek alma yeteneğini korumak için, boştaki doğrultucu gerilimi E_{do} dan biraz daha yüksek ayar değerinden başlamak suretiyle sabit gerilim kontrolu uygulaması daha iyidir. Böyle bir kontrolla, ters akım arttığı gibi, daha çok reaktif güç inverterle üretilir. Her ne kadar bu değer sistemin tasarımına bağlı ise de, Tablo 3.1'de sıralanan demiryolları için inverterlerin güç faktörü 0.7-0.8 arasında olması tasarlanmıştır.

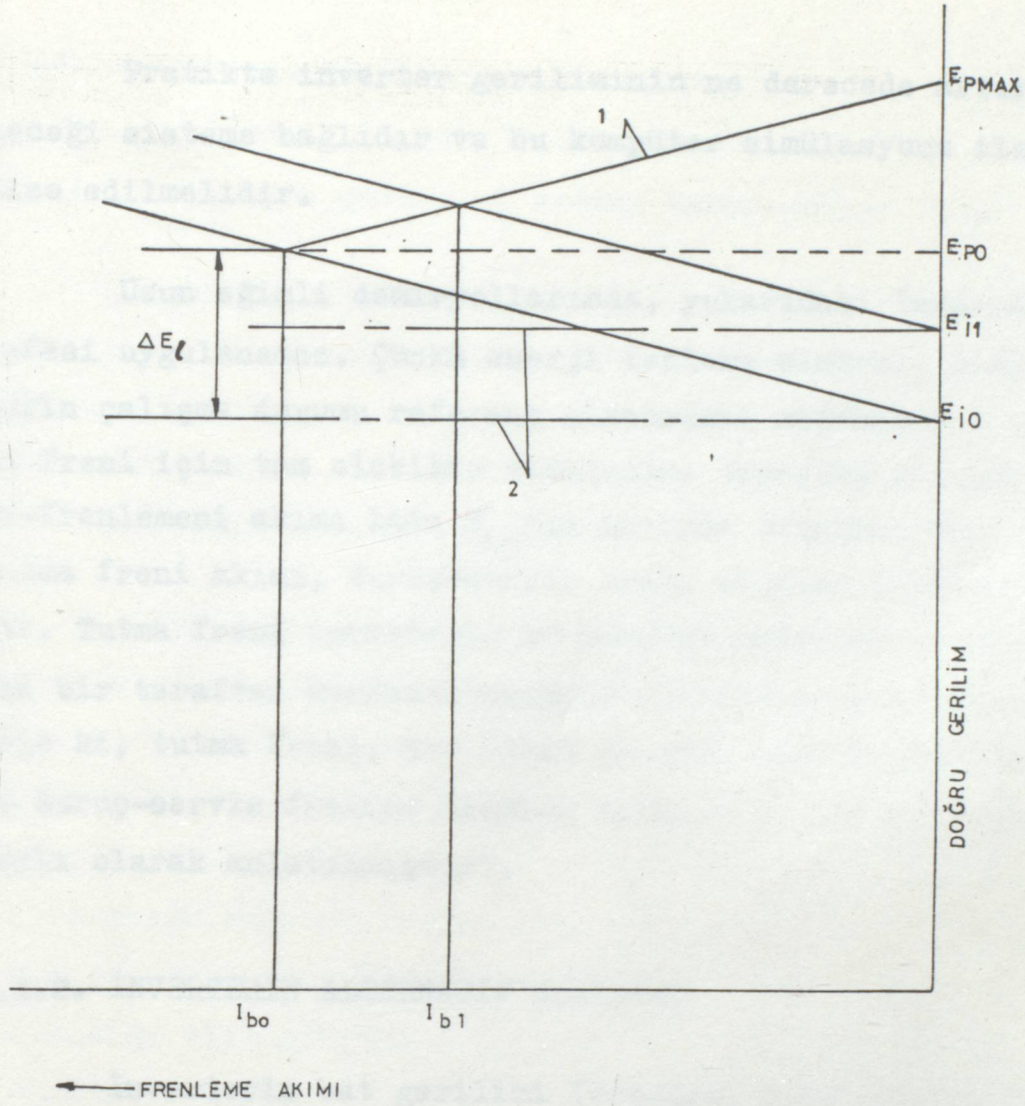
Kıyıcı-kontrollu bir taşıtın frenleme hali için tipik bir akım-gerilim karakteristiği Şekil 3.3'te görülmektedir. frenleme enerjisini beslemeye geri döndürmek için maksimum taşıt gücü elde edilebilirliği amacıyla, nominal ara-istasyon gerilimi kabulüyle mümkünse ki, yüksek kuvvet gerilimine sahip frenleme yapan taşıtlar daha iyidir. Fakat Tablo 3.1

deki sistem için kısıyıcı taşıtlar, şekil 3.3'te görülen gerilim-sınırlama karakteristikleriyle elde etmişlerdir. Yüksek frenleme akımı bölgesinde elde edilebilen maksimum kuvvet gerilimi daha düşüktür. Bunun nedeni:

a) Kısıyıcı kontrolunun stabilitesi

b) Mesafeyi frenleme akımının sınırlamasıyla rejeneratif frenlemeye kapama fırsatını en aza indirmesi (ki, sistem heran kabul edebilir) dir.

Gözönüne alınan frenleme yapan trenle ters-çevrilebilir ara-istasyon arasındaki hattın maksimum gerilim düşümü ΔE_1 , inverter gerilimi E_{i0} kadar iken tam olabilir olacak besleme sisteminin altındadır (Şekil 3.3). Eğer inverter gerilimi E_{i1} 'e kalibre edilirse, $I_{b0} - I_{b1}$ akımına karşı gelen frenleme kuvveti, pünomatik frenlemeye nakledilir. Onun için tercih edilen frenleme gerilimi E_{d0} ile E_{i0} arasındadır. Ara istasyonlar genellikle, gerilim kontrolü olmayan slikon doğrultucularla donatılmıştır. Boştaki doğrultucu gerilimi E_{d0} , alternatif gerilimdeki değişmeye karşılık değişir. Göz önüne alınan bu gerilim değişimi nedeniyle, inverter operasyonu için geçerli gerilim aralığına rastlanması bazı durumlarda zor olabilir. Trenler arasındaki doğrudan enerji transferinden dolayı inverter ihtiyacı her zaman gerekli değildir. Enerji tasarrufu açısından inverter, boştaki doğrultucu geriliminin değişmelerine kalibre edildiği zaman bile yeter derecede avantajlıdır. Bununla birlikte, bir yük-kademe değiştirici yardımıyla, alternatif besleme geriliminin değişiminin tercihen ve mümkün olduğu kadar * 2-3 civarında tutulması tavsiye edilmektedir (8).



Şekil 3.3. Kılıyıcı ve inverterin karakteristikleri

1=kılıyıcı, 2=inverter, ΔE_l =hattaki gerilim düşümü

Tablo 3.1'deki enerji besleme sistemleri, konunun baş tarafında anlatılan hat boyunca tasarlanmış ve aşağıdaki tipik değerler bilgisayar simülasyonu ile elde edilmiştir:

nominal DC sistem gerilimi	1500 V
boştaki doğrultucu gerilimi E_{do}	1580-1590 V
inverter doğru gerilimi E_i	1600-1650 V
sınır akımı (kılıyıcı) startında olan gerilim E_{po} (Şek.3.3)	1650-1700 V

Pratikte inverter geriliminin ne derecede artırılabilceği sisteme bağlıdır ve bu kompüter simülasyonu ile optimize edilmelidir.

Uzun eğimli demiryollarında, yukarıdaki tasarım felsefesi uygulanamaz. Çünkü enerji besleme sistemi, diğer trenlerin çalışma durumu referans olmaksızın rejeneratif bir tutma freni için tam olabilir olmalıdır. İnverter gerilimi tutma-frenlemesi akımı için E_{i0} 'ın altında tutulmalıdır. Zira tutma freni akımı, duruş-servis freni akımına kıyasen küçüktür. Tutma freni inverterin DC karakteristiklerini zorlamaz. Ama bir taraftan karakteristiklerin tasarımı verilmelidir. Öyle ki, tutma freni, her ikisi de aynı anda gerekli olduğunda duruş-servis frenine öncelik vermelidir (Bu 3.8.3'te detaylı olarak anlatılmıştır).

3.3.2. İNVERTERİN ALTERNATİF GERİLİMİ

İnverterin hat gerilimi (örneğin, transformatörün sekonder gerilimi), komütasyon ve sirkülasyon akımı yönünden optimize edilmiştir. Gerilim yeteri kadar yüksek değilse tamamlanan komütasyon tam başarılı olamayacağından alternatif gerilimin seçimi özel bir dikkat gerektirir. Komütasyon konusunda, sistem distorbanslarıyla neden olunan anormal alternatif gerilimlerle başa çıkma olayı, alternatif gerilimin seçimini geniş ölçüde etkiler. Çözüm, sistemin güvenilirliğine bağlıdır. Sistem distorbansları nadiren görülmüş ise de, yüksek hızlı bir DC kesicinin, başarısız komütasyonla neden olunan hata akımını açması esasına dayalı alternatif bir alt gerilim rölesi kullanmak gibi bir koruma çözüm olarak önerilmektedir. Sistemdeki distorbanslar, %10-20'lik gerilim

düşümlerinde sık görülmüştür. İnverter transformatörünün sekonder geriliminin bu gibi sistem distorbanslarına karşı başarılı komütasyon garantisi yeteri kadar yüksek olmalıdır.

Sirkülasyon akımı bir diğer faktördür ki, alternatif gerilim seçiminde önemlidir. Alternatif gerilim yeteri kadar yüksek olmalıdır, öyleki, doğrultuculardan sirkülasyon akımı önlenmesi, normal servis altında görülen minimum sistem gerilimi için doğru gerilimi inverter muhafaza edebilsin.

Sirkülasyon akımı, reaktif güce neden olur, donanımdaki kayıpları arttırır ve tepe yükte başarısız komütasyon tehlikesini ortaya çıkarır. Genellikle, aynı ara istasyondaki donanımlar arasında (düzenler arasında) bu sirkülasyon akımıyla problem olmayacaktır. Çünkü doğrultucu ve inverter aynı kaynağa bağlıdır. Elverişli bir dizayn yapılmamışsa bitişik (komşu) ara-istasyonlarda, farklı kaynak sisteminden beslendiği veya gerilimler yük altında kademe değiştiriciyle birbirinden bağımsız kontrol edildiği zaman sirkülasyon akımı beklenmelidir.

Bütün bunlarla beraber, anılması gerekir ki, başarılı komütasyon garantisinin veya sirkülasyon akımının sınırlandırmasının cezası, normal serviste güç faktörünün düşmesidir. İleri faz açısı nedeniyle, aynı sebepten AC sistemde harmonik akımın artışı ve yüksek sekonder gerilimi nedeniyle inverter transformatörünün kapasitesinin artması sözkonusudur.

3.4. İNVERTERİN KONTROLU

3.4.1. DOĞRULTUCU VE İNVERTER ARASINDAKİ DEĞİŞİM KONTROLÜ

Doğrultucu ve inverter arasındaki değişim, yükün işletme tarzına uygun olarak gerçekleştirilmelidir. Yoğun bir hızlı taşıma sisteminde sık sık değişim gerekli olacaktır. Özel olarak da, aşırı gerilim meydana gelmesi yüzünden kapalı (kesik) regeneratif frenlemeden sakınmak için doğrultucudan invertere hızlı bir geçiş önemlidir.

Doğrultucudan invertere dönüşümde takip edilen şu iki durum, uygulamaların tipik olanlarıdır:

a) Enerjilenen trenin devre dışı kalmasıyla (ayrılmasıyla) start edilen çalışmanın inverter hali; frenleme akımı enerjilenen tren vasıtasıyla ilk önce absorbe edileceğinden inverter yardımıyla bu anda alınmalıdır. Çünkü, akım kontrol fonksiyonu ve kıyıcı kontrollu trendeki reaktör serileri frenleme akımını muhafaza ederler. Öncelikle, yalnız doğru akım sifıra indirilir, doğrultucu yüksüz (boştaki) geriliminin üstüne çıkış, doğru geriliminde meydana gelir. Bu geçiş esnasında frenleme akımının muhafaza edilmesi için çalışma şekli olarak, doğrultucu akımının sifıra indirilmesinden önce inverterin işletimde olması istenir.

b) Regeneratif frenleme, absorbe edilebilir enerjiyi veren trenlerle başlar. Bu durumda inverter uygun bir şekilde harekete geçirilmezse frenlenen tren Şekil 3.4 ve 3.5'te görüldüğü gibi çalışır:

(i) Frenleme başladığında, maksimum kıyıcı iletim oranıyla motor akımı yükselir. Motor akımı spesifik (öz) değerine ulaştığında, kıyıcı iletim oranı minimuma indirilir. Kontrol gecikmesi nedeniyle, motor akımı hafifçe yukarı çı-

kacaktır. Sonuçta kıyıcı akımı I_{CH} , hafif çıkışından sonra minimum değeri ile sınırlanır.

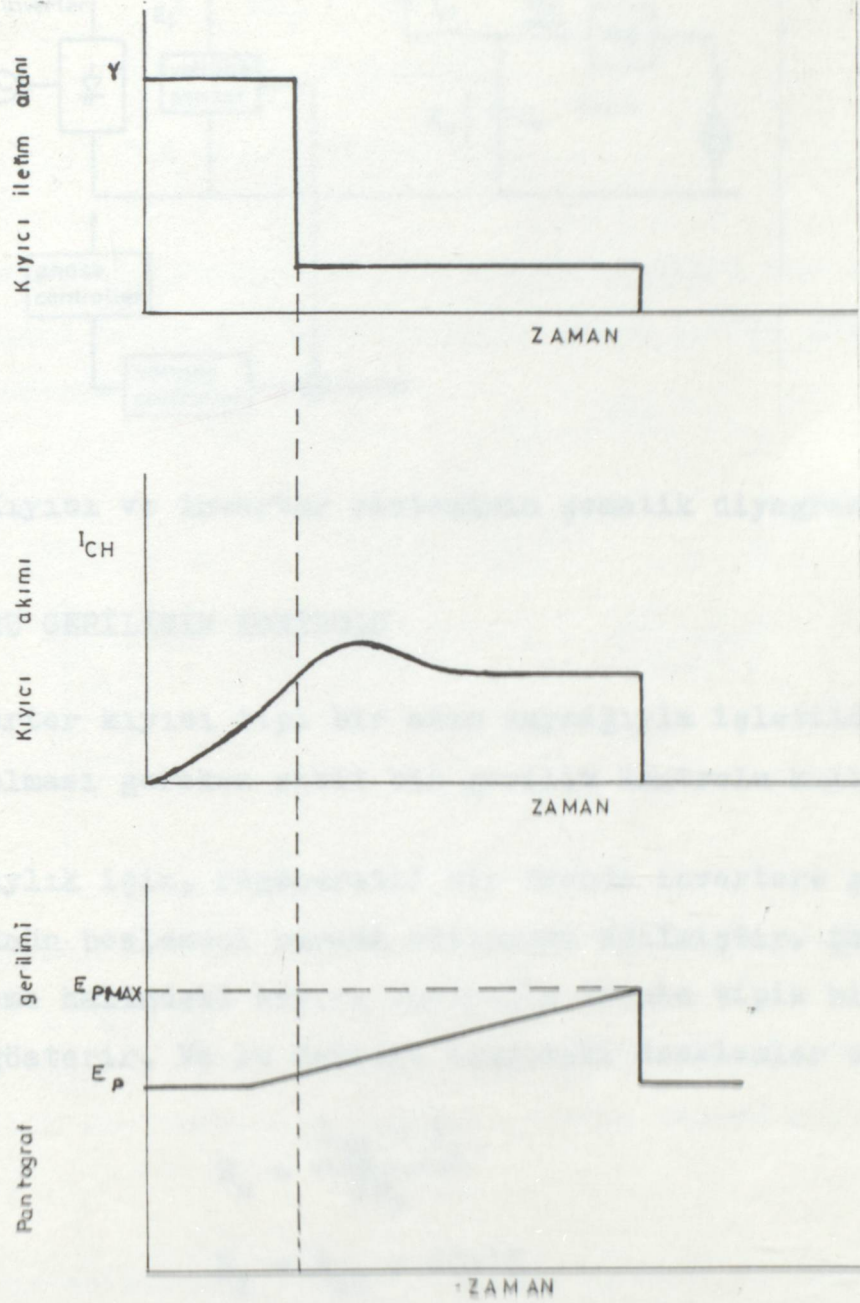
(ii) Kıyıcı akımı I_{CH} , trenin yardımcı donanımı ile (yardımıyla) ilk önce absorbe edilir ve kıyıcı akımının fazlalığı, filtreleme için, C_F ana kondansatörüne akar. Bu da kapasitör geriliminin artışı ortaya koyar.

(iii) Kapasitör geriliminin kabul edilebilir maksimum değeri E_{pmax} , (Şekil 3.3) arttığında, regeneratif frenleme, pünomatik frenleme (mekanik frenleme) ile yer değiştirir.

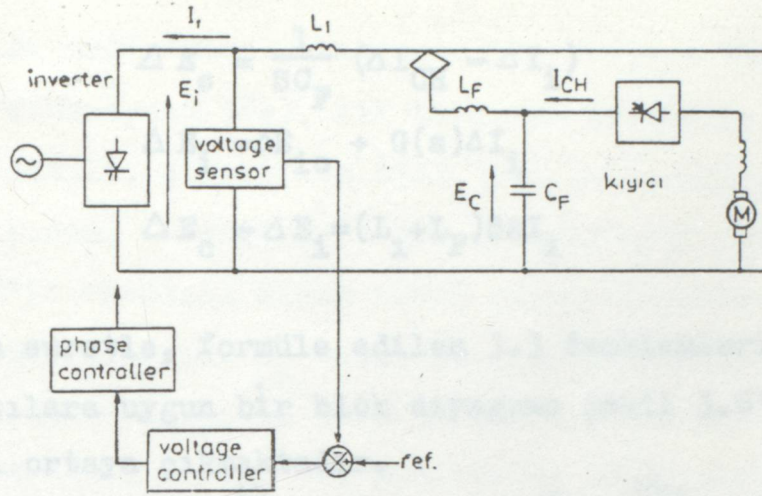
Bu durumda, DC sistem gerilimi artış oranı, kıyıcı donanımlarının projelendirilmesine (tasarımına) bağlıdır. Genel olarak, bir periyotta, kesme geriliminin 10-50 ms. arasında olabilmesi için DC sistem gerilimi, yüksüz doğrultucu geriliminin üstüne çıkar. Bu zaman aralığı içinde inverter işletmeye alınabiliyorsa, sistem yapılan operasyonda tam başarılı olacaktır.

Pratikte, sirkülasyon akımının minimuma indirilmesiyle, her an inverterin çalışma tekniğinin korunması, yukarıda bahsedilen (a) ve (b) durumlarının her ikisine çözüm olarak uygulanabilir.

Şekil 3.4. Absorbasiz yükli hareket kontrolü ile frenleme başlangıcındaki gerilim karakteristiği



Şekil 3.4. Absorbesiz yüklü kıyıcı kontrollü frenleme başlangıcının geçiş karakteristikleri



Şekil 3.5 Kıyıcı ve inverter sisteminin şematik diyagramı.

3.4.2. DOĞRU GERİLİMİN KONTROLU

İnverter kıyıcı tipi bir akım kaynağıyla işletildiğinde stabil olması gereken sabit bir gerilim kontrolü kullanır.

Kolaylık için, regeneratif bir trende invertere geri akımın tümünün beslemesi burada sözkonusu edilmiştir. Şekil 3.5, frenleme halindeki kıyıcı kontrollü trenin tipik bir devresini gösterir. Ve bu devreye aşağıdaki denklemler uygulanır.

$$E_c = \frac{I_{CH} - I_i}{SC_F}$$

$$E_i = E_{i0} + G(s)I_i$$

$$E_c - E_i = (L_1 + L_F)SI_i \quad (3.2)$$

E_c, E_i, I_{CH} ve I_i terimlerinde sadece küçük değişimlerin gözönüne alınmasıyla 3.2 denklemleri aşağıdaki denklemlere dönüştürülür.

len bu gibi değişimlerin başlamasıyla analize edilebilir. Transfer fonksiyonu $G(s)$, iki kısımdan ibarettir. Birisi ΔI_1 'ye orantılı, diğeri ise $d(\Delta I_1)/dt$ ye orantılıdır. ΔI_1 'ye orantılı kısım, inverterin tabii (doğal) doğru gerilimidir. $d(\Delta I_1)/dt$ 'ye orantılı kısım ihmal edilir derecede küçüktür, çünkü DC devresindeki L_1 endüktansı ve trenin filtreleme reaktörü L_F , inverterin AC tarafındakilere oranla büyüktür. Ve sonuç olarak, $d(\Delta I_1)/dt$, inverterin doğru gerilimindeki düşüşe neden olmayacak kadar küçüktür.

Nihayet, İnverterin stabilitesi, inverter gerilim kontrol çevrimi stabilitesi analiziyle önceden belirtilebilir, ve şu sebeplerden dolayı tren işletme durumuyla ilgili olan distorbans faktörleri göz ardı edilebilir:

(i) İnverterin DC regülasyonuna uygun, $G(s)$ transfer fonksiyonu kararlı küçüktür.

(ii) Gerilim kontrol çevriminin cevabı, ΔI_1 akımındaki değişimin hızına oranla daha hızlıdır.

3.5 BAZ GÜCÜN AC KARAKTERİSTİKLERİ

Tren-galığıyla belirlenen duruma bağlı bir akım elde edildiğinden inverter bir akım kaynağıdır. Diğer yardımcı yüklerin aktif gücü inverterin (ters bağlantısıyla) elde edilen aktif gücü kullanmaya yetecek kadar büyük ise, 0 zaman demiryolu sisteminden faydalı sisteme güç-aktif sıkıkonu su olmaz. Diğer taraftan, yardımcı yükler nedeniyle inverterin aktif gücü limiti aşarsa, fazla aktif akım, faydalı sisteme transfer edilir. Şekil 3.7, bahsedilen bu iki durum

için invert etme (geri verme) ara-istasyonun vektör diyagramını gösterir. İnverter, komütasyon ve faz kontrolu ihtiyaçları için AC sistemden sağlanan reaktif güce muhtaçtır. Onun için operasyondaki inverter ve yardımcı yükleri içeren ara-istasyonun P_{sr} reaktif gücü

$$P_{sr} = |P_a| \sin \phi_a + |P_{INV}| \sin \phi_{INV} \quad (4)$$

ifadesiyle verilmiştir.

Bu demektir ki, ara-istasyonun güç faktörü inverter operasyonu ile azalır.

3.6. İNVERTERLİ HARMONİK DURUMU

İnverter doğru gerilimde ve alternatif hat akımında harmonik üretir. Cer ara-istasyonlarının inverterleriyle üretilen harmoniklerin esas mahiyetinin tartışılması gereklidir.

3.6.1. ALTERNATİF HAT AKIMINDAKİ HARMONİKLER

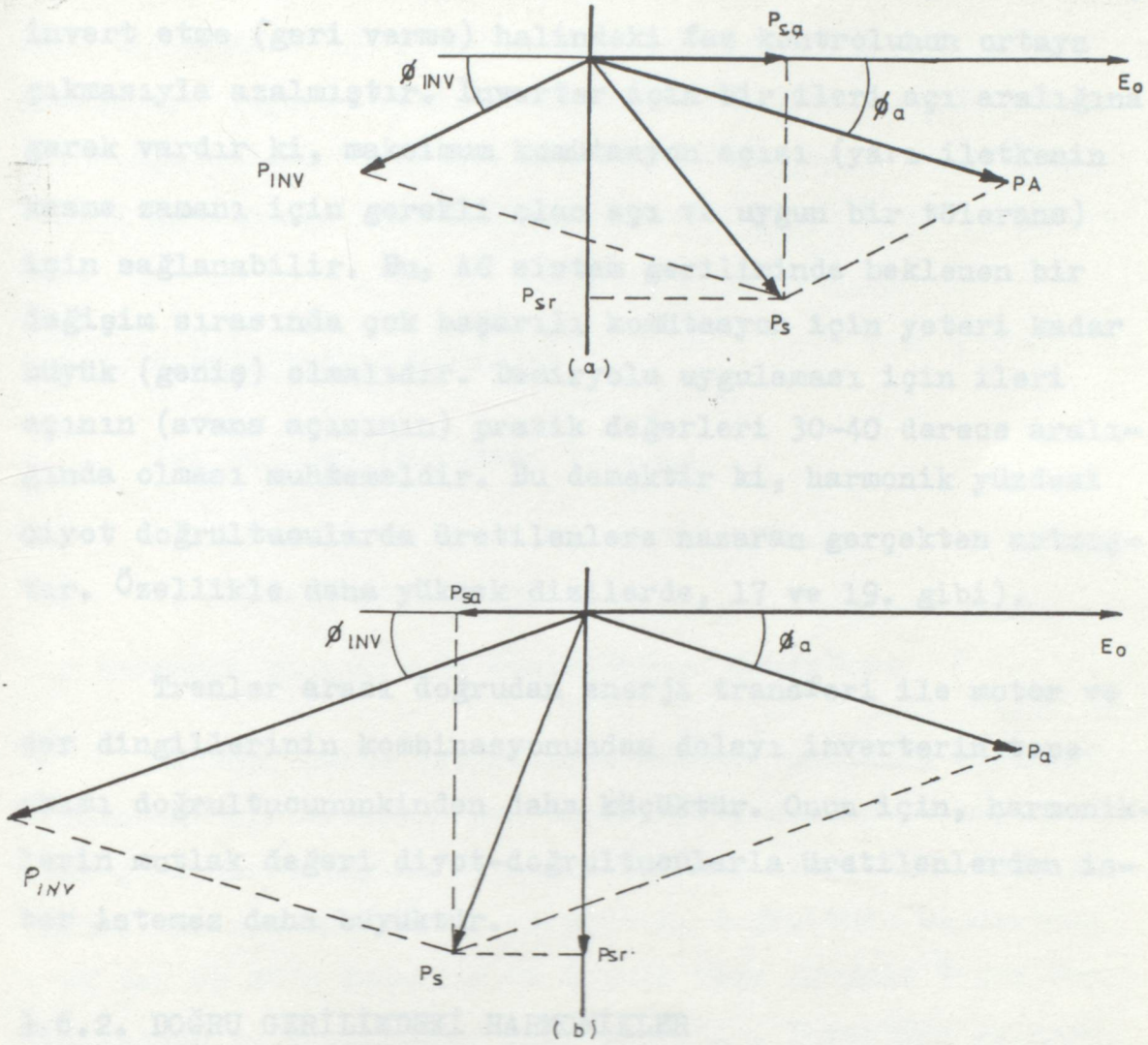
İyi bilinmelidir ki, hat akımında $n=kp \pm 1$ dizisi harmonikleri vardır.

Burada p darbe sayısı k ise 1,2,3... tamsayılarıdır. Bir sıfır komütasyon açısı için harmoniklerin büyüklüğü

$$I_n = I_1/n \quad (3.5)$$

dir. Burada; $I_n = n$ dizisinin harmonik akımı

$$I_1 = \text{esas akım.}$$



Şekil 3.7. İnverter operasyonu esnasında ara-istasyonun vektör diyagramı.

P_a = yardımcı imkanlar, P_{INV} = inverterler P_s = ara-istasyon

$$a) P_{INV} \cos \phi_{INV} < P_a \cos \phi_a$$

$$b) P_{INV} \cos \phi_{INV} > P_a \cos \phi_a$$

3.5 denklemleri bir kare dalga için teorik değerler verir. Pratik devrelerde endüktans vardır ki, komütasyon açıların sıfır olmamasına neden olur ve distorsiyon yüzdesinin

azalmasını netice verir. Bununla birlikte, bu faydalı durum, invert etme (geri verme) halindeki faz kontrolunun ortaya çıkmasıyla azalmıştır. İnverter için bir ileri açı aralığına gerek vardır ki, maksimum komütasyon açısı (yarı iletkenin kesme zamanı için gerekli olan açı ve uygun bir tolerans) için sağlanabilir. Bu, AC sistem geriliminde beklenen bir değişim sırasında çok başarılı komütasyon için yeteri kadar büyük (geniş) olmalıdır. Demiryolu uygulaması için ileri açının (avans açısının) pratik değerleri 30-40 derece aralığında olması muhtemeldir. Bu demektir ki, harmonik yüzdesi diyot doğrultucularda üretilenlere nazaran gerçekten artmıştır. Özellikle daha yüksek dizilerde, 17 ve 19. gibi).

Trenler arası doğrudan enerji transferi ile motor ve cer dingillerinin kombinasyonundan dolayı inverterin tepe akımı doğrultucunununkinden daha küçüktür. Onun için, harmoniklerin mutlak değeri diyot-doğrultucularla üretilenlerden ister istemez daha büyüktür.

3.6.2. DOĞRU GERİLİMDEKİ HARMONİKLER

Doğru gerilimdeki hafif dalga parçaları dizisi $n=kp$ ile ifade edilir. Burada, n =harmonik dizisi k =herhangi bir tamsayı (1,2,3,... gibi), p =darbe sayısıdır.

Dalgalı doğru gerilimin genliği, β kontrol açısı ve u komütasyon açısına oranla değişik ve Lineer değildir. Fakat $\beta-u$ açısı, ki cer inverterinin pratik çalışmasında belirir. Ortaya çıkar ve 10-30 dereceli bölgededir. ($\beta-u$ açısının artışı gibi distorsiyon yüzdesinin artışından dolayı)

Koruma amacıyla, inverterle birleştirilen DC reaktör

DC hatlardaki harmonik akımı sınırlamada etkilidir. DC hat-daki distorsiyon yüzdeleri, haberleşme donanımından dolayı müdahaleyi doğuracaktır. Ancak modern demiryolundaki haberleşme sisteminde blendajlı kablolar kullanılır ve bunlar enerji hattındaki harmoniklerden hemen hemen hiç etkilenmezler.

3.6.3. HARMONİKLERLE MÜCADELE

İyi bilinen (yakından tanınan

- a) Konvertörün darbe sayısının artması
- b) Filtrelerin tesisi

ile harmonik olaylarının sınırlanması demektir.

Mademki darbe sayısındaki artış, (donanım) fiyat ve hacmindeki bir artışa neden olabiliyor, donanımın kapasitesine göre darbe sayısı optimize edilmiş olmalıdır. Çoğu hal-lerde, bir ara-istasyonda servisteki doğrultucu kapasitesi 1 MW dan 60 MW'a kadardır ve 6 puls veya 12-puls doğrultma-benimsenen bu kapasiteler için geneldir. İnvertere gelince, 6 veya 12 puls seçimi düşünülebilir. Çünkü harmoniklerin gen-likleri, mevcut, diyodlu ara-istasyonlara oranla neden ola-cağı yeni problemler o kadar büyük değildir.

Eğer faydalı sistem, harmonikleri absorbe edilmesi için yeteri kadar katı (sert, dinamik) değilse, veya harmonik frekansında bir paralel rezonans faydalı sistemde beklenen bir şey ise, harmonik filtreler ara-istasyonlarda tavsiye edilir.

Şayet filtreler, hem harmonik akımların akışını ve hem de birim güç faktörüne yakın bir çalışmayı muhafaza etmek için reaktif güç sağlanması kontrolleri için dizayn edilmiş

ise, faydalıdırlar. Gerçek yeraltı sisteminde, örneğin yardımcı güç kaynağından beslenen yükün güç faktörü düşüktür. Çünkü yük, havalandırma, iklimleme ve yürüyen merdivenler için birçok döner makina ihtiva eder. İnverterin çalışması ara-istasyonun güç faktöründe daha fazla azalmaya neden olur. Böyle bir durum için, yukarıda bahsedilen (tasarıma) sahip harmonik filtreleri, reaktif güç için faydalı değerlerin asgariye indirilmesinde işe yarar.

3.7. İNVERTER SİSTEMİNİN KORUMASI

Aşırı yük, ısı artışı ve bataryanın başarısızlığı gibi sorunlardan inverterin korunması konularında doğrultucular için kullanılanlara benzeyen (tasarım) Esasları uygulanabilir. (regeneratif olmayan) sistemden ayrı olarak inverterli regeneratif sistem aşağıdaki karakteristik başarısızlıkları ihtiva eder.

a) Komütasyon başarısızlığı; İnverter içinde bir DC kısa-devrede tam başarılı olmayan komütasyon sonucuna varılır. Zira AC sistem geriliminin düşüşü ve aşırı yükte ortaya çıkan, bu duruma karşı, bir aşırı akım rölesi ve bir düşük gerilim rölesi, önleyici vasıtalar olarak başarılıdır. Komütasyon başarısızlığı ile ortaya çıkan kısa devre akımı, invertere yerleştirilen yüksek hızlı bir DC kesici ile ortadan kaldırılır. DC kesici ile birlikte çalışacak bir DC reaktör, kısa devre akımını sınırlar ve diğer DC hatalardan iyi bir ayırımı, ara-istasyonda öteki DC kesiciler sağlar.

b) Regeneratif halde DC hatası: DC besleyici devreler normalde hat arıza dedektörüyle donatılmıştır. ki, hata akımlarını normal cer akımlarından ayırt eder. Eğer sistemin ça-

lişması regeneratif halde iken DC hat hatası söz konusu olursa, hata akımı tren ile ara-istasyonun her ikisinden beslenir. Besleyici akımın, başlangıçtaki yükseliş oranı, regenerasyon dışındakinden farklı olacaktır. Bu durumla başa çıkmak için, trenlerin bir düşük gerilim rölesiyle techiz edilmesiyle, regeneratif frenlemenin kesilmesi önerilir. İyi koruma koordinasyonu, kıyıcı kontrollu trene yerleştirilen bir ani düşük gerilim rölesiyle elde edilebilir. Hatalı durumların, normal DC salınımlardan ayrılması ara-istasyonu güçlü kılar.

3.8. KOBE METROSUNUN İNVERTERLERLE ENERJİ BESLEME SİSTEMİNİN TESİSİ

Sistem, önceki konuda anlatıldığı gibi geri-çevirmeli ara-istasyonlar ve kıyıcı kontrollu trenler ihtiva eder. Sistemin tanıtımı, operasyonel sonuçların bazısıyla birlikte gerçekleştirilen sistemde karşılaşılan problemler ve dizayn özelliklerinin benimsenen bir anlatımıdır.

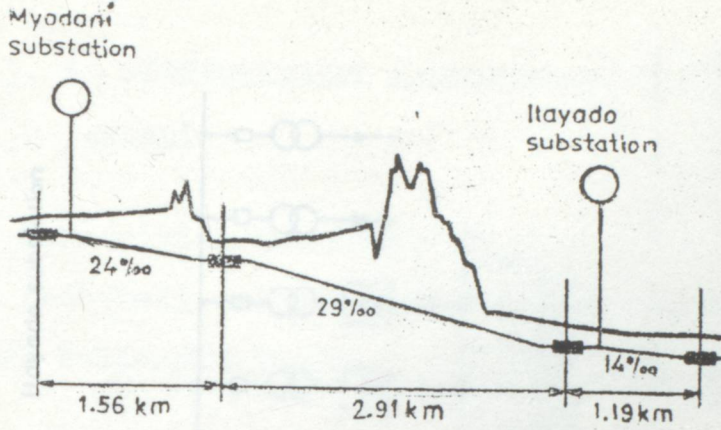
3.8.1. SİSTEMİN TASLAĞI

Şekil 3.8 ara-istasyonların yerleşim hattını göstermektedir. Regeneratif sistemin tasarımı, uzun eğim bölgesinde regeneratif tutma frenlemesi temin edilmesiyle güvenlik ve enerji tasarrufu üzerinde yoğunlaşmıştır. Ters çevirmeli ara istasyonlar Miyodani ve İtayado'da ya yerleştirilmiştir.

3.8.2. ENERJİ BESLEME SİSTEMİ

3.8.2.1. AC SİSTEMİ

Şekil 3.9 enerji-besleme sistemini tanıtmaktadır. Gü-

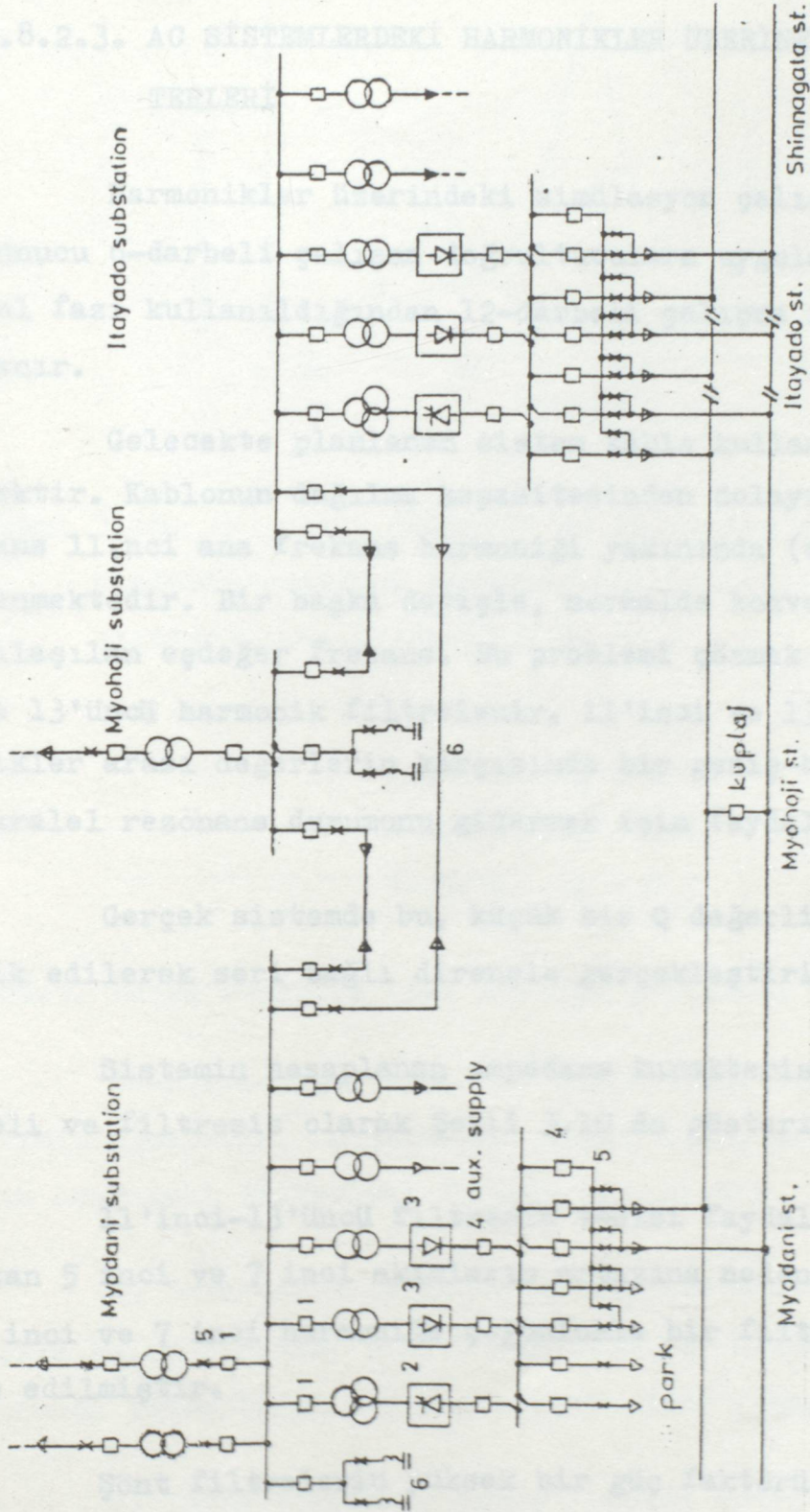


Şekil 3.8 Kobe metro-hattı

venliği yüksek bir seviyeye çıkarmak için sistem, Myodani s/s ve Myhozi s/s de bağımsız 77 kV'luk iki faydalı sistemden enerji alarak gerilimin demiryolu sistemi beslemesi için 33 kV'a transforme edilmiştir. Normal çalışmada iki korverter ara-istasyonu (Mydani s/s ve İtayado s/s) sırasıyla Myodani s/s ve Myhozi s/s ten beslenmiştir. İki korverter ara-istasyonu, 33 kV'luk hatla birbirine bağlanmıştır. Böylece, 77 kV luk sistemin başarısızlığı halinde sistem normal servise devam eder. Geri besleme enerjisi, yardımcı sistem (ki enerji absorbe edebilmesi mümkün yeteri kadar büyük yüklerdir) de tekrar kullanılması tasarlanmıştır.

3.8.2.2. DC SİSTEM

Yüksek akımlı sistem elde etmek için Myodani s/s ve İtayado s/s de iki inverter normal işletmeye alınmış, fakat sistem servis dışı bir inverterle normal servise devam edebilecek şekilde düzenlenmiştir. Bununla birlikte bu durumla, sistem duruş-servis frenlemesi için tam akımlı değildir. Yukarı ve aşağı yollarda seyreden trenler arasında enerji transferini düzenlemek için Myhozi de bir ara bağ postası kurul-



Şekil 3.9. Metro enerji-besleme sisteminin şematik diyagramı

muştur.

3.8.2.3. AC SİSTEMLERDEKİ HARMONİKLER ÜZERİNE TASARIM KRİTERLERİ

Harmonikler üzerindeki simülasyon çalışmalarının bir sonucu 6-darbeli çalışan doğrultuculara uygulanmıştır. Kontrol fazı kullanıldığından 12-darbeli çalışma invertere uygulanır.

Gelecekte planlanan sistem kablo kullanarak beslenecektir. Kablonun dağılma kapasitesinden dolayı paralel rezonans 11'inci ana frekans harmoniği yakınında (civarında) beklenmektedir. Bir başka deyişle, normalde konverterlerle karşılaşılan eşdeğer frekans. Bu problemi çözmek için 11'inci ve 13'üncü harmonik filtrelendir. 11'inci ve 13'üncü harmonikler arası değerlerin karşısında bir geniş-band filtresi, paralel rezonans durumunu gidermek için faydalıdır.

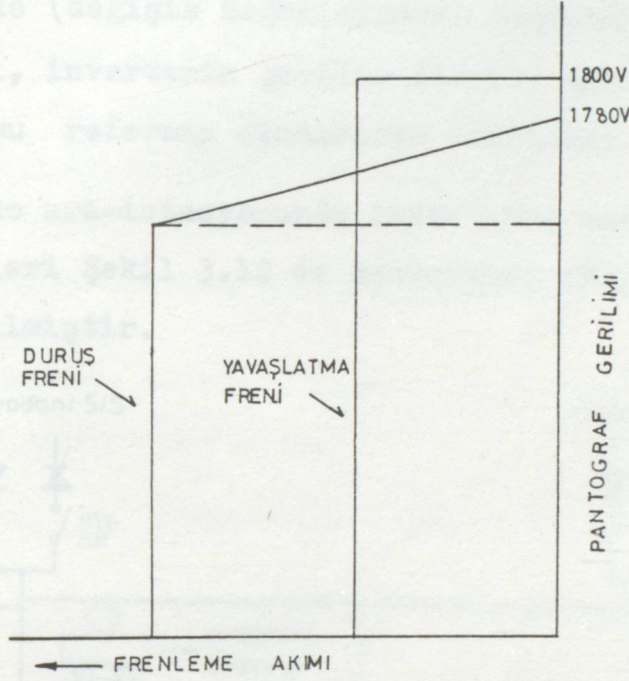
Gerçek sistemde bu, küçük bir Q değerli filtre tedarik edilerek seri bağlı dirençle gerçekleştirilmiştir.

Sistemin hesaplanan empedans karakteristikleri, filtreli ve filtresiz olarak Şekil 3.10 da gösterilmektedir.

11'inci-13'üncü filtrenin tesisi faydalı sisteme akan 5 inci ve 7 inci akımların artışına neden olduğundan 5 inci ve 7 inci harmoniğe çoğunlukla bir filtre etkisi ilave edilmiştir.

Şönt filtrelerin yüksek bir güç faktörü sağlaması için, 600 kVA'nın reaktif gücünü sağlaması da tasarlanmıştır.

teristikleriyle elde etmişlerdir. Toplam geri besleme akımı haddini aşarken, güç kaynağının kabul edilebilir Limiti, DC hat gerilimi 1680 V tan yukarı çıkar, ve sonra duruş freni akımı, kabul edilebilir bir değere ilk sınırlanandır. DC hat geriliminin 1800 V'a çıkmaması halinde tespit frenlemesi tesir etmiştir.



Şekil 3.11 Tutma ve duruş frenlerinin akım/gerilim karakteristikleri

3.8.4. SERVİS OPERASYONU VE ALAN TESTLERİNİN SONUÇLARI

3.8.4.1 PERFORMANS TESTLERİ

Performans testleri, işletilen yoldaki taşıtlarla gerçekleştirilmiştir. Bu testler şu alanlarda teorik olarak doğrulanmıştır.

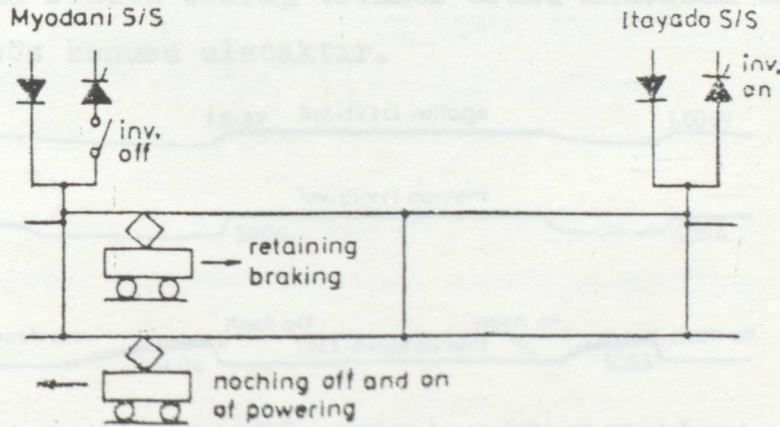
a) Doğru gerilim kontrolünün statik karakteristikleri ve stabilitesi.

b) Frenleme için güç alınmasından, taşıtların çalışma yönünün değişimine ara-istasyonların cevabı, ve tersi.

c) Tutma freni için enerji-besleme sisteminin alma yeteneği.

Doğru akım karakteristikleri, inverter akımlarının değişimlerinde (değişik değerlerinde) ölçülmüştür. ve ispat edilmiştir ki, inverterin gerilim kontrol çevrimi trenlerin çalışma durumu referans olmaksızın stabildir.

İtayado ara-istasyonunda inverterin sinyal karakteristiği testleri Şekil 3.12 de gösterilen çalışma haliyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12 Ters-çevrilebilir ara-istasyonun DC sinyal karakteristiğinin denetimi için çalışma durumu.

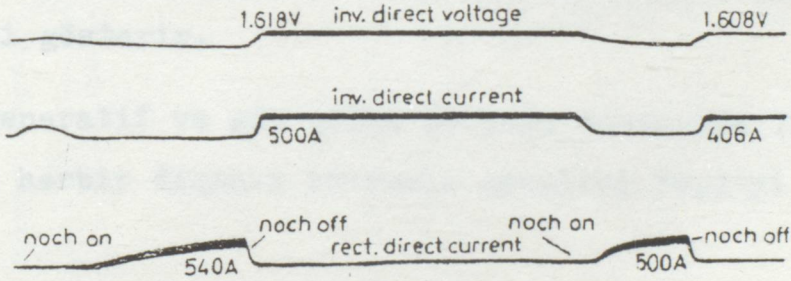
Testler göstermektedir ki, ara-istasyonun çalışma yönü, doğrultucu çalışmadan inverter çalışmaya düzgün ve rahat bir şekilde değişir. Tersine, yük durumuna cevapta (Şekil 3.13) aynı anda frenleme yapan tren etki etmemektedir. Frenleme testi, şekil 3.14'te görülen durumlarla, önce durdurma freni karakteristiklerinin saptanması üzerine yürümüştür. Durdurma freni kullanan tren, duruş freni yapan trenle etki-

leşmemektedir ve test göstermiştir ki anlatılan tasarım durdurma freni duruş frenine öncelik vermesi yararlı olacaktır.

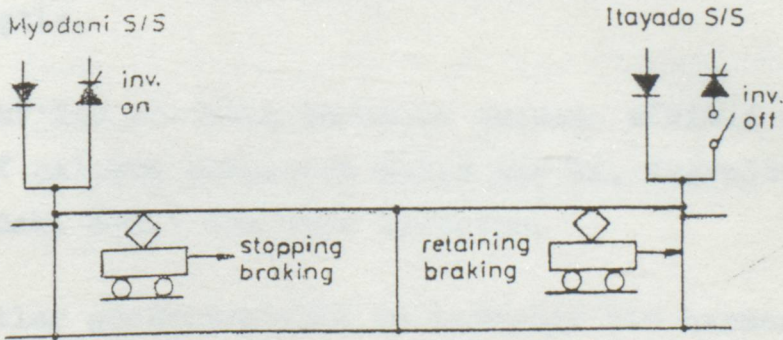
3.8.4.2. GERİ BESLEME ENERJİSİ

Ölçümler ticari servisteki her iki ara-istasyonda yapılmaktadır. Şekil 3.15, heriki ara-istasyonda kaydedilen yükselmeler toplam geri-besleme enerjisini göstermektedir. Akşam trafiğin en yoğun olduğu saatte yaklaşık 7,5 ila 10 dk, zarfında günlük iş programı esnasında yaklaşık 15 ila 20 dk dır. Aşağı ve yukarı yoldaki trenler her iki terminal istasyonunda eşzamanlı hareket üzere sıralanmıştır.

Bunun sonucu olarak trenler arası maksimum enerji transferi söz konusu olacaktır.



Şekil 3.13 Ara-istasyon DC geçiş karakteristikleri



Şekil 3.14 Tutma freninin denetim önceliği için çalışma durumu.

Doğrultucudan beslenen enerjinin %22'si inverter vasıtasıyla 33 kV'luk sisteme geri verilir. Geri-besleme enerjisi, demiryolunun havalandırma iklimleme (air-conditioning), yürüyen merdiven ve aydınlatma gibi sistemin yardımcı yükleri tarafından harcanır. Bu yardımcı yüklerde harcanan enerji ortalama geri-besleme enerjisinin yaklaşık altı katıdır. Faydalı sisteme ters enerji akışı hemen hemen hiç kaydedilmemiştir.

3.8.4.3. AC SİSTEMDEKİ HARMONİKLER

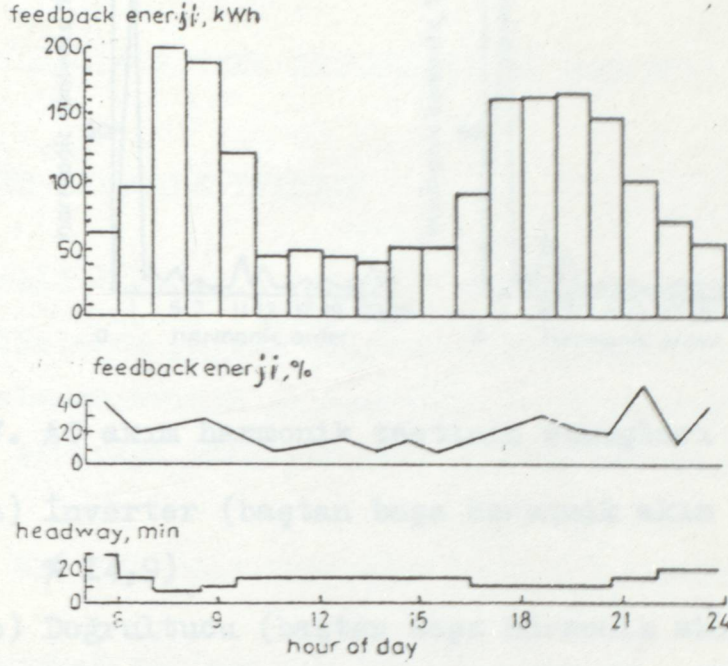
4 motorlu vagon formasyonunda %200'lük bir yolcu yüküyle iki istasyon arasında bir gidiş-dönüş çalışma yapılmıştır. Şekil 3.16 ve 3.17, maksimum tepe akımı kaydedilmişken Myodani ara-istasyonunda ölçüler 77 kV'luk sistemdeki distorsiyon yüzdelerini gösterir.

Regeneratif ve güç çekme periyodu esnasında 77 kV'luk sistemdeki her bir dizinin harmonik gerilimi %0,2'yi aşmamaktadır.

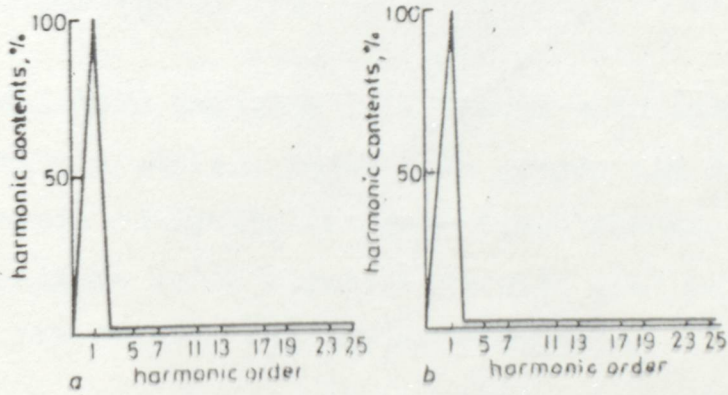
Baştan başa gerilim distorsiyon faktörlerinin %0,37'si regenerasyon esnasında, %0,34'ü güç çekme periyodu esnasında kaydedilmiştir.

77 kV'luk sistemin harmonik akımının efektif değeri, rejeneratif çalışma esnasında %14,9 dur ki, doğrultucu-çalışma esnasındaki %20,7 den daha düşüktür.

Testler göstermektedir ki inverter bir harmonik problem sebebidir. (Yani, doğrultucu tarafından üretilen harmoniklerin absorbe edilmesi kifayeti yeteri kadar katı olması durumunda).

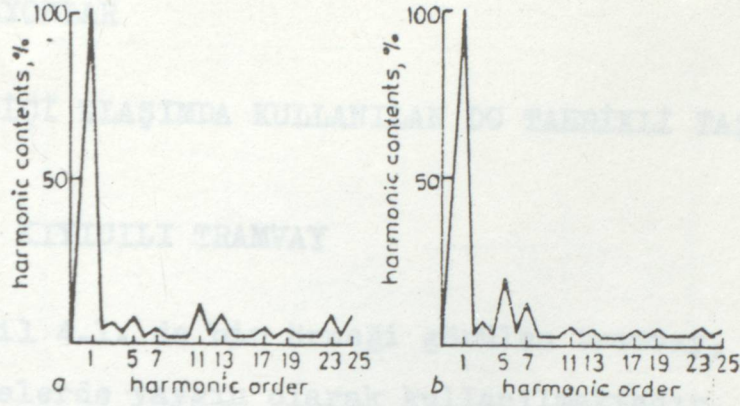


Şekil 3.15 Günlük geri-besleme enerjisi



Şekil 3.16. Alternatif gerilim harmonik testinin sonuçları.

- a) İnverter (baştan başa gerilim distorsiyon faktörü %0,37)
- b) Doğrultucu (baştan başa gerilim distorsiyon faktörü %0,34).



Şekil 3.17. AC akım harmonik testinin sonuçları

a) İnverter (baştan başa harmonik akım RMS değeri % 14,9)

b) Doğrultucu (baştan başa harmonik akım RMS değeri % 20,7).

4. APLİKASYONLAR

4.1. ŞEHİRİÇİ ULAŞIMDA KULLANILAN DC TAHRIKLİ TAŞITLAR

4.1.1. GTO KİYİCİLİ TRAMVAY

Şekil 4.1. de bir örneği görülen tramvay, özellikle batılı ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç elektroniği elemanlarının gelişmesiyle modernizasyonu ilerleyen bu taşıt şehiriçi ulaşımda daha iyi hizmetler vermektedir.

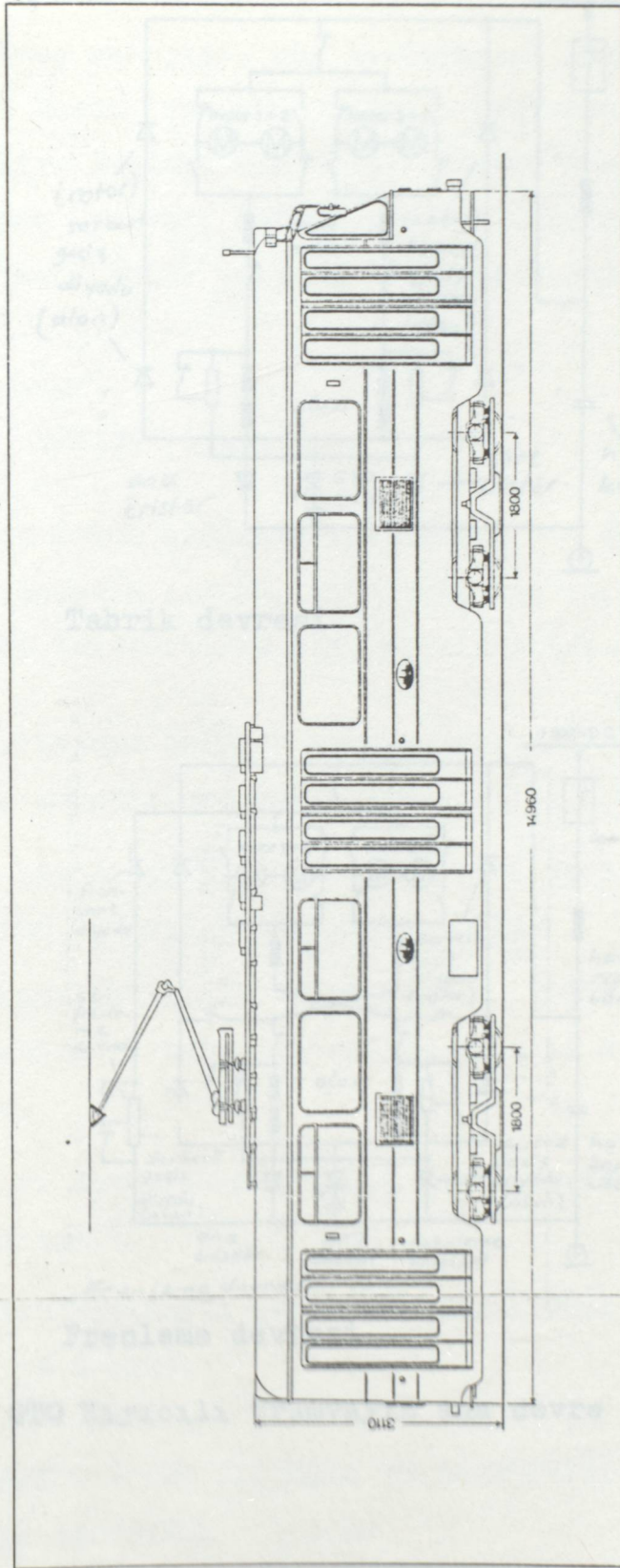
4.1.1.1. GTO KİYİCİLİ TRAMVAYIN TAHRIK DONANIMI

Hareket ve frenleme için kullanılan 4 adet tahrik motoru, 500 Hz'lik frekansla kontrol edilen DC kıyııcıya bağlı olarak çalışır (Şekil 4.2).

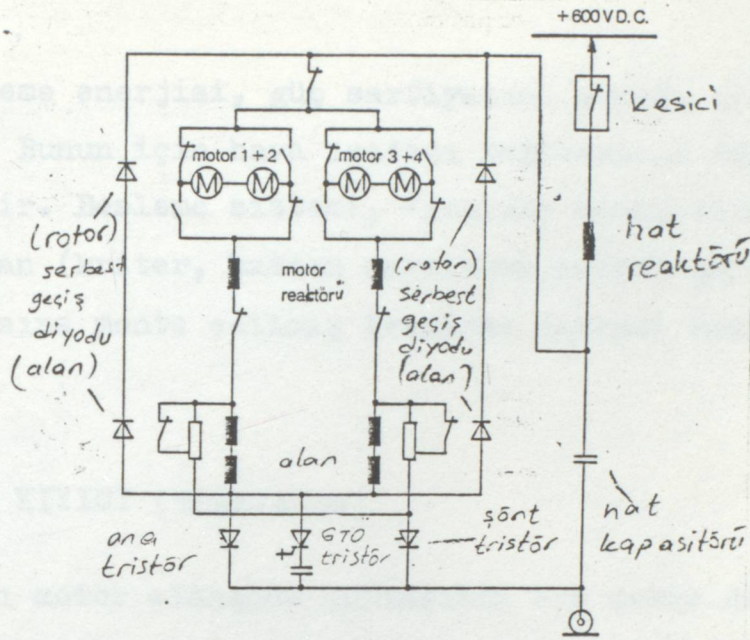
Frenlemeyi sağlamak için tahrik motorlarının tümüne aynı güç tatbik edilir. Bunun için çapraz tip frenleme bağlantısı tercih edilmektedir. Buna ilave olarak, hareket ve frenleme halinde motor alanının sürekli alan zayıflaması için özel bir tristör bağlantısı uygulanır.

Kalkınmada, motor gerilimi sıfırdan hat gerilimine kadar DC kıyııcı yoluyla sürekli yükselir. Alan zayıflaması ek dirençli tristör vasıtasıyla elde edilir. Bu tristör alan sargısına paralel bağlıdır.

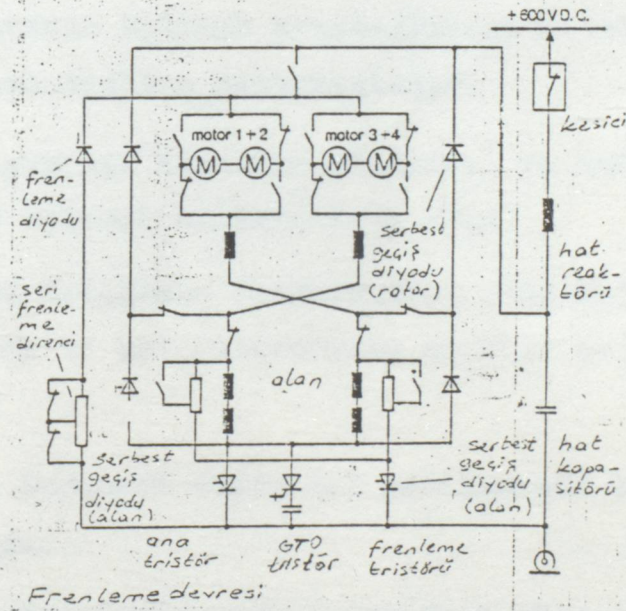
Frenleme faydalı ve dinamik olabilir. Faydalı frenleme besleme sistemine geri-beslenen frenleme enerji olarak düşünülmektedir. Dinamik frenleme ise, hat geriliminden bağımsızdır (bu iki frenleme, tüm elektrikli ulaşım araçların-



Şekil 4.1. Tramvay



Tahrik devresi



Frenleme devresi

Şekil 4.2. GTO Kiyıcılı tramvayın ana devre diyagramları

da aynıdır).

Frenleme enerjisi, güç sarfiyatını mümkün olduğu kadar azaltır. Bunun için hava ısıtıcı beslemesine de kısmen kullanılabilir. Besleme sistemi, frenleme enerjisini kabul etmediği zaman (kriter, hattın maksimumu normal gerilimidir) taşıtın çatısına monte edilmiş frenleme direnci üzerinde harcanır.

4.1.1.2. GTO KİYİCİ (TRAMVAYDA)

Kıyıcı motor alanında kullanılan bir devre düzenidir. Frenlemede otomatik olarak, harekette ise sürekli ve kontrollu olarak GTO tristörlerle alan zayıflatılır.

DC kıyıcının bilinen avantajlarına ek olarak bu yeni teknoloji şu avantajları sağlamaktadır:

- DC kıyıcının hacminin küçülmesi ve hafiflemesi (söndürme devresi kaldırıldığı için)
- Yüksek tetikleme frekansından (500 Hz) dolayı motor reatörü ve hat filtresinin ağırlık ve hacminin azalması.
- Aşırı derecede düşük hat geriliminde bile mükemmel çalışma.
- sabit frekansta gerilim kontrol yüzdesinin genişliği (% 0-100).

4.1.2. GENERATÖR GRUBU DESTEKLİ VE REJENERATİF (FAYDALI)

FRENLİ TROLEYBÜS

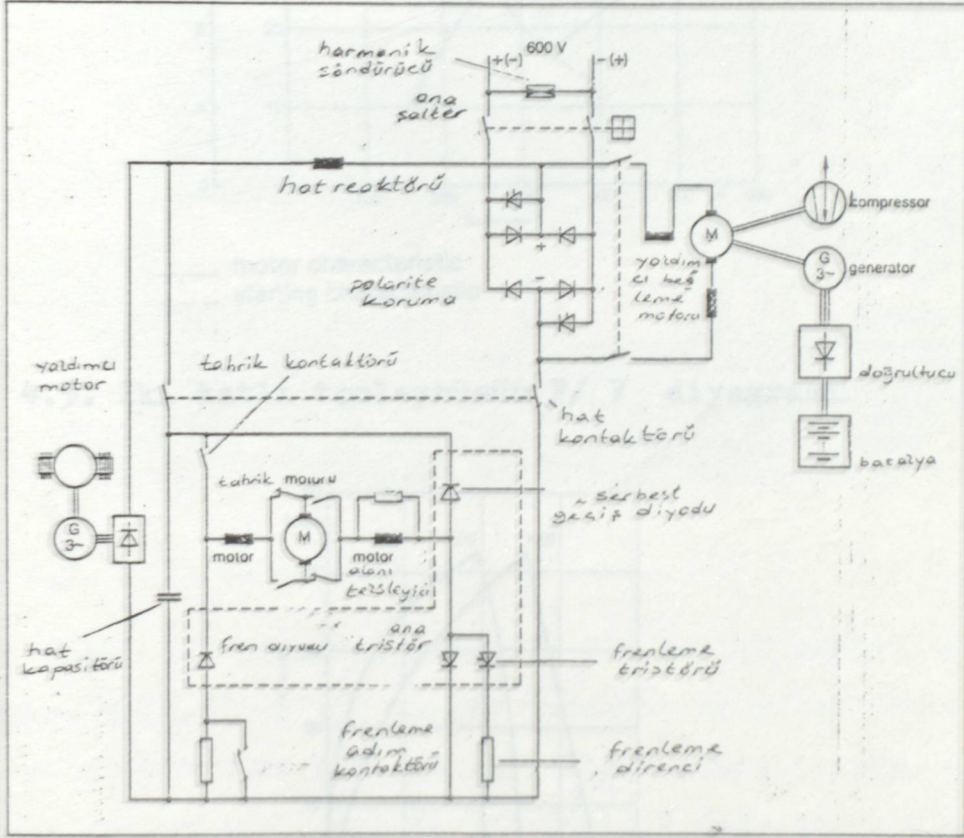
Şekil 4.3'te gelişen teknolojinin yeni ürünlerinden



Şekil 4.3. Şehiriçi elektrikli taşıtlarından iki katlı Trolleybüs.

iki katlı trolleybüs görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, iki trolley yardımıyla enerji beslemesi yapılır. Taşıtın ana-devre diyagramı Şekil 4.4'te görülmektedir. Ana-devrede görüldüğü gibi taşıt, çift kutuplu bir ana şalter, ters paralel bağlı tristörlerden oluşan diyot köprülü polarite koruma ve polaritebelirleme sistemine sahiptir. Değişken hat polaritesine rağmen polarite koruma sistemi, seyahat esnasında sabit güç akış yönünü sağlar ve frenleme enerjisinin geri

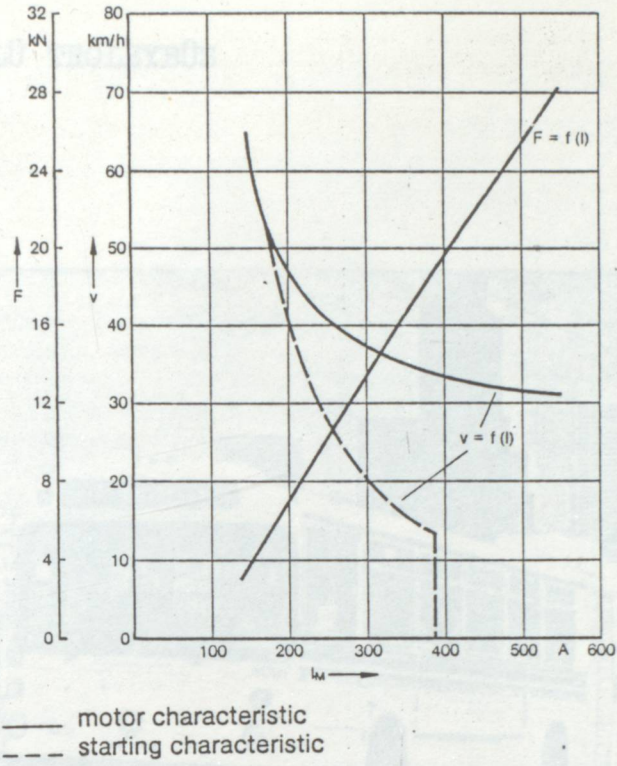
beslenmesine izin verir. Polarite belirleme sistemi, hat polaritesini ölçer ve faydalı frenleme esnasında verilen kriterlere uygun diyot köprüsüne ters-paralel bağlı tristörleri tetikler.



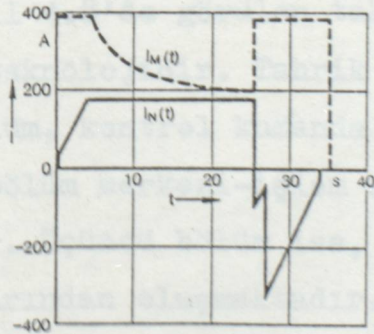
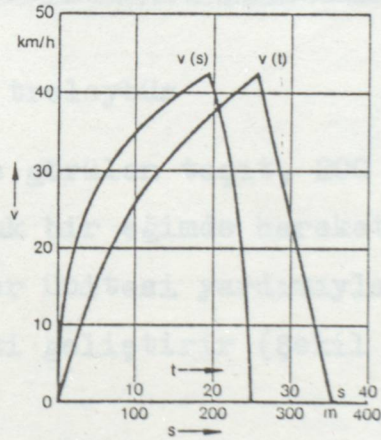
Şekil 4.4. İki katlı trolleybüsün Ana-Devre diyagramı.

Kıyıcı diğer birçok elektrikli taşıtta olduğu gibi 500 Hz'lik frekansla çalışır ve 2.1 de anlatılan bir tarzda olup aynı ve benzer avantajlara sahiptir.

Taşıtan, hız-zer diyagramı Şekil 4.5 te, eğimli bir yolda 250 m.lık tipik yol alması da Şekil 4.6 da görülmektedir.



Şekil 4.5. İki katlı trolleybüsün F/ V diyagramı



Şekil 4.6. İki katlı trolleybüsün eğimli bir yolda 250 m lik tipik yol alması

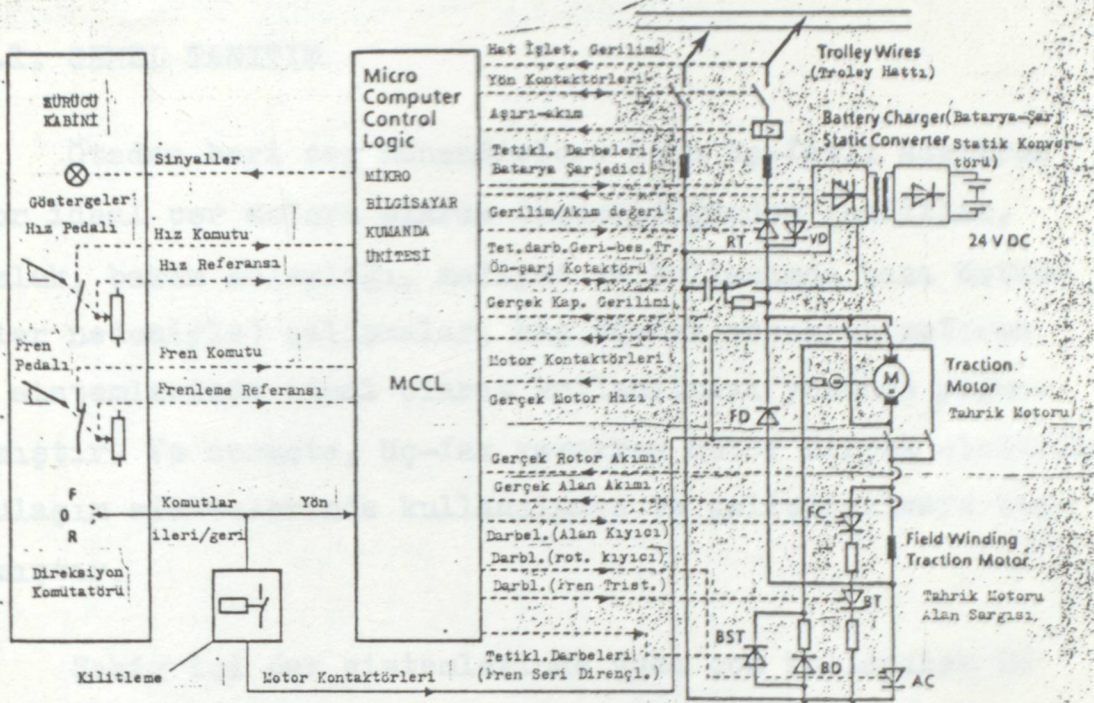
4.1.3. KÖRÜKLÜ TROLEYBÜS



Şekil 4.7. Körüklü trolleybüs

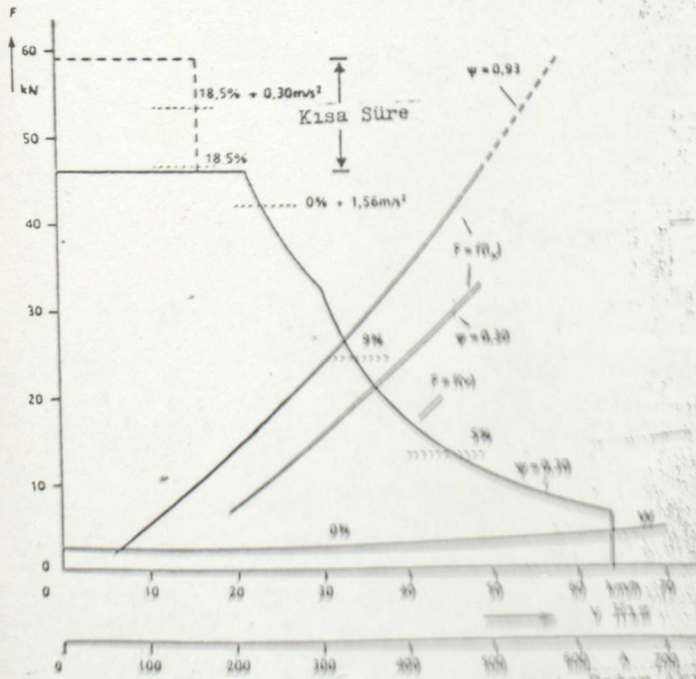
Şekil 4.7 de görülen taşıt, 200 kW'lık sürekli güce sahiptir. % 18.5'luk bir eğimde harekete geçerken tahrik motoru, mikro-kompüter ünitesi yardımıyla (kısa sürede) artan bir kalkınma momenti geliştirir (Şekil 4.9 da görüldüğü gibi).

Taşıtın Şekil 4.8'de görülen tahrik sistemi ileri seviyede bir modern teknolojidir. Tahrik sistemi üç bölümden oluşur. Birinci bölüm, kontrol kumanda bölümü olarak sürücü kabinidir. İkinci bölüm merkezi-işlem ünitesi olarak mikro-kompüter ünitesidir. Üçüncü bölüm ise, tahrik makinası ve ana tahrik elemanlarından oluşmaktadır.

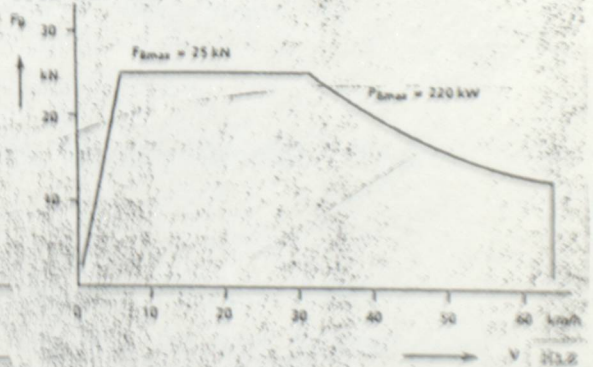


Şekil 4.8. Körüklü trolleybüsün tahrik sisteminin blok diyagramı.

Özer Kuvveti



Elektriksel Fren Kuvveti



Şekil 4.9. Körüklü trolleybüsün performans eğrileri.

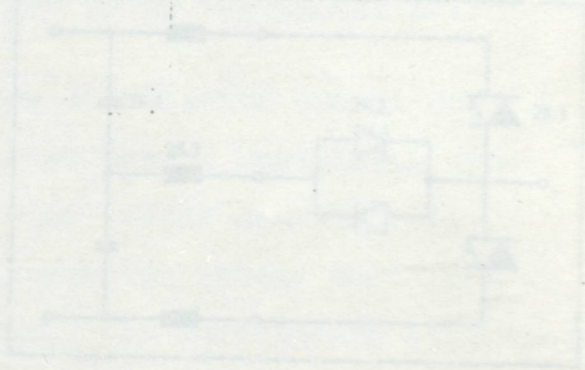
4.2. ÜÇ-FAZ ASENKRON MOTOR TAHRIKLİ SİSTEMLER

4.2.1. GENEL TANITIM

Öteden beri cer mühendisleri için üç-fazlı asenkron motor ideal cer motoru olarak düşünüldüğünden (hafiflik, ucuzluk, bakım kolaylığı, maliyet ve kullanımda bazı üstünlükler nedeniyle) çalışmalar, hep üç-faz asenkron motorun cer sistemlerinde ideal olarak kullanılması yönünde yoğunlaşmıştır. Ve sonuçta, üç-faz asenkron motor birçok elektrikli ulaşım sistemlerinde kullanılmaya ve geliştirilmeye başlanmıştır.

Şehir içi cer sistemlerinde daha çok kullanılan DC beslemeli cer taşıtları olarak iki ana grupta incelenirler.

Üç-faz asenkron motorun cer taşıtlarında yaygın olarak kullanılmasında, güç elektroniğinin gelişmesinin rolü çok büyüktür.

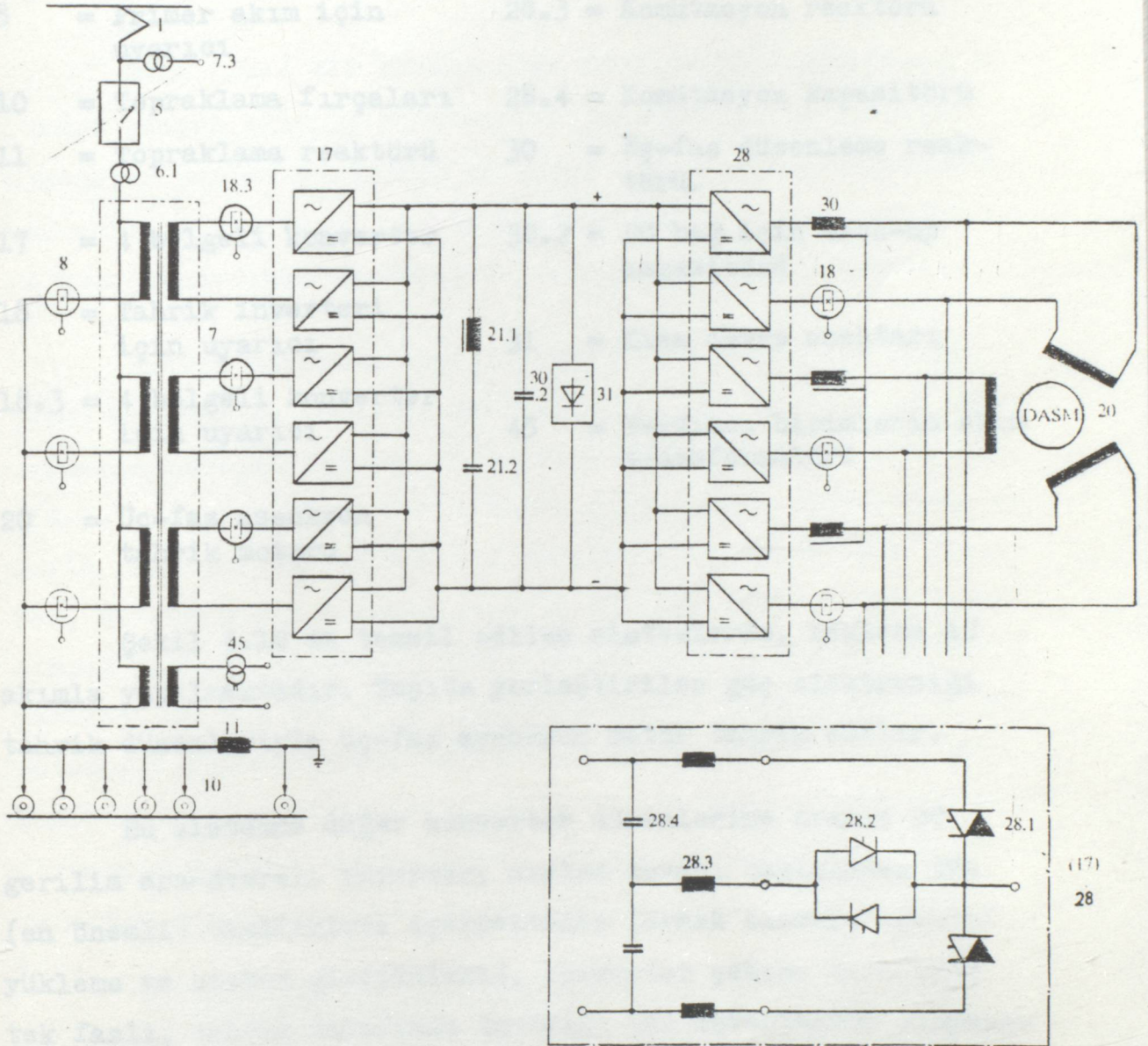


Şekil 4.20. AC cer taşıtları için DC beslemeli üç-faz tahrik ana devresi.

- 1 - Ana kollektör
- 5 - Tuzaklı ana kollektör
- 6.1 - Filtre ana transformatörü

- 21.1 - Filtre reaktörü
- 21.2 - Filtre kapasitörü
- 23 - Bölümlü tahrik invertörü

4.2.2. ÜÇ-FAZ TAHRİKLİ AC CER TAŞITLARI



Şekil 4.10. AC cer taşıtları için DC ara-devreli üç-faz tahrikin ana devresi.

- 1 = Akım kollektörü
 5 = Yüksek hızlı havallı kesici
 6.1 = Primer akım transformatorü

- 21.1.= Filtre reaktörü
 21.2 = Filtre kapasitörü
 28 = Darbeli tahrik inverteri.

7	= Ana transformatör	28.1	= Ana tristör (RCT)
7.3	= Primer gerilim transformatörü	28.2	= Komütasyon tristörü
8	= Primer akım için uyarıcı	28.3	= Komütasyon reaktörü
10	= Topraklama fırçaları	28.4	= Komütasyon kapasitörü
11	= Topraklama reaktörü	30	= Eş-faz düzenleme reaktörü.
17	= 4 bölgeli konverter	30.2	= DC bağ için back-up kapasitörü
18	= Tahrik inverteri için uyarıcı	31	= Kısa devre anahtarı
18.3	= 4 bölgeli konverter için uyarıcı	45	= Yardımcı birimlerin akım transformatörü
20	= Üç-faz asenkron tahrik motoru		

Şekil 4.10 da temsil edilen sistemlerde, besleme AC akımla yapılmaktadır. Taşıta yerleştirilen güç elektroniği tahrik düzenleriyle üç-faz asenkron motor tahrik edilir.

Bu sistemde diğer konverter düzenlerine oranla DC gerilim ara-devreli inverter, sistem cevabı bakımından tüm (en önemli) özellikleri içermektedir (örnek olarak, reaktif yükleme ve sistem girişimleri). Konverter şebeke tarafında tek fazlı, tahrik tarafında üç-fazlı iki inverterden oluşmuştur. Bu iki birim ara-devre kapasitörlü seri rezonans filtre devresi ile birbirine bağlanmıştır. Her iki inverter, herhangi bir anahtarlama gerektirmeden motor çalışmadan, faydalı frenlemeye geçişte esneklik sağlar. 4-bölgeli konverter(ana inverter taşıt ile şebeke temel bileşeninin aynı fazda akım alış-verişini sağlar. Ana transformatör için gerekli olan reaktif güç, ana konverterden bir ara devre ile sağlanır.

Şebeke inverterinin tetiklenmesi değiştirilmek suretiyle ekonomik olarak düşük seviyeli harmonik bastırma da sağlanabilir (Şekil 4.10) (3).

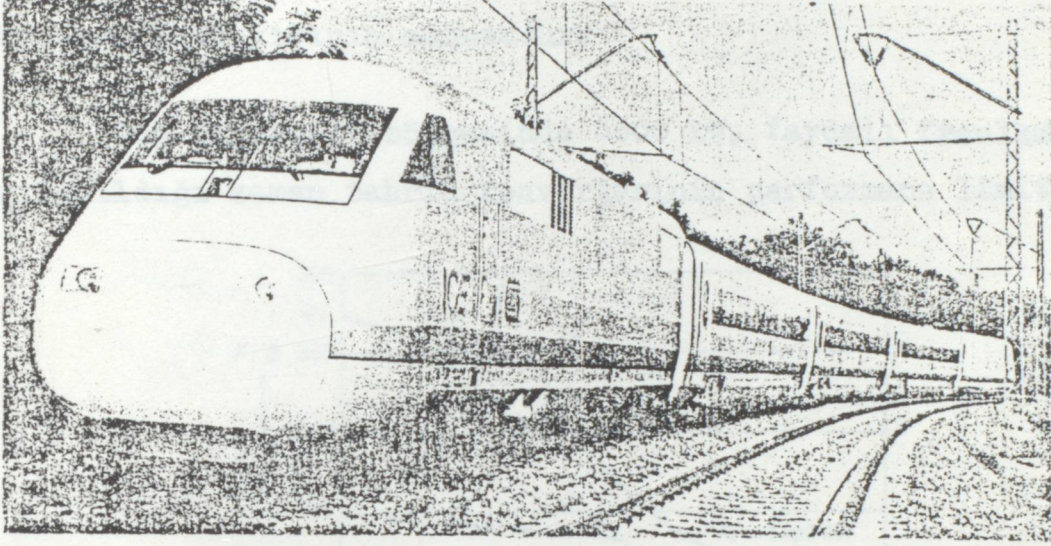
Daha ideal bir çözüme göre ideal şebeke davranışının ikinci planda kaldığı endüstriyel lokomotiflerde 4-bölgeli konverter yerine kontrollu ve doğal komutasyonlu doğrultucu kullanılabilir. Dizel elektrik lokomotiflerde ise ara devreye güç, kontrolsüz üç-fazlı doğrultucu üzerinden sağlanır.

Tahrik motoruna enerji vermek için 4-bölgeli konverterde kullanılan inverter devresi aynen kullanılabilir. İnverterin buradaki görevi, ara-devre gerilimini (+) yada (-) olarak kutuplamaktır. Sabit doğru gerilimden, tahrik frekansı ile orantılı bir alternatif gerilim elde etmek için inverter, alt-harmonik modunda kontrol edilir. Böylece basit bir sincap kafesli asenkron motor, tahrik motoru olarak kullanılabilir. Bu tip bir motor (aynı karakteri vermek üzere), komütatörlü konvensiyonel tahrik motorundan büyük ölçüde daha hafiftir. Uygun tasarlanmış hafif bir bojiyle bu yüksek performanslı motorun kullanılması, raylara yapılan Baskıda ve tekerlek yıpranmalarında büyük ölçüde azalma sağlar (3).

İsteğe göre iki yada tek darbeli inverter devreleri kullanılabilir. Frenleme esnasında inverter, duruşa kadar motor akımını sık-sık fren ve motor durumuna geçerek iletir.

Endüstriyel ve manevra lokomotiflerinde diğer tahrik sistemleri yerine üç-faz tahrik sistemi kullanılmasının üstünlüğü, ihtiyaç duyulan tahrik gücünün dizel motor tarafından karşılanmasıdır. Maksimum cer kuvvetlerinde bile dizel motor düşük devir bölgesinde çalışmaktadır. Bu yolla önemli ölçüde yakıt tasarrufu sağlanır.

4.2.2.1. ŞEHİRLER-ARASI TOPLU TAŞIMADA KULLANILAN HIZLI TREN (ICE-INTERCITY EXPERİMENTAL)



Şekil 4.12. Şehirlerarası hızlı tren-ICE

Raylı sistemlerin ileri bir teknolojisi olan ICE (Inter-city), Şekil 4.12 de görüldüğü gibi yüksek hızlı olması nedeniyle aerodinamik bir konstrüksiyona sahiptir, ve 350 km/h'lik hız yapabilmektedir.

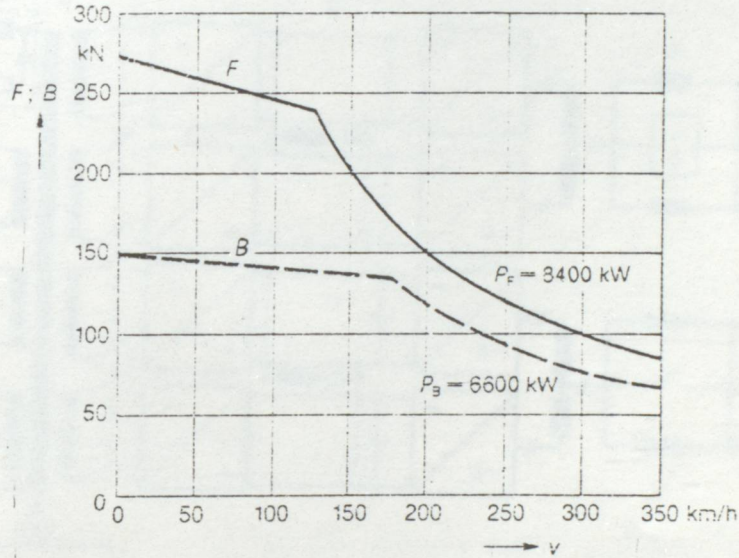
Şekil 4.13'te görülen cer kuvveti/frenleme kuvveti-hız diyagramları, test çalışma için öngörülen karakteristiklerin sonuçlarıdır. Sözkonusu karakteristikler; $1,2 \text{ m/s}^2$ lik yüksek kalkış ivmesi, 350 km/h lik hızla 30 s'lik sürekli çalışma ve $0,7 \text{ m/s}^2$ lik normal servis-frenlemesi (lineer indüksiyon akımıyla faydalı frenlemeden tam yararlanma) dir (7).

Kalkış anında 270 kN olan cer kuvveti, 125 km/h hızdan sonra 8400 kW'lık maksimum motor gücüyle hiperbolik bir

değişim gösterir.

Düşük hız bölgesindeki frenleme kuvveti eğrisi, genellikle kötü ray koşullarında gerçekleşen 0,12 değerindeki sürtünme katsayısının sonucudur.

Güç hiperbolü bölgesinde 6600 kW, faydalı frenleme kullanıldığı zaman tahrik konverterinin performans limitidir.



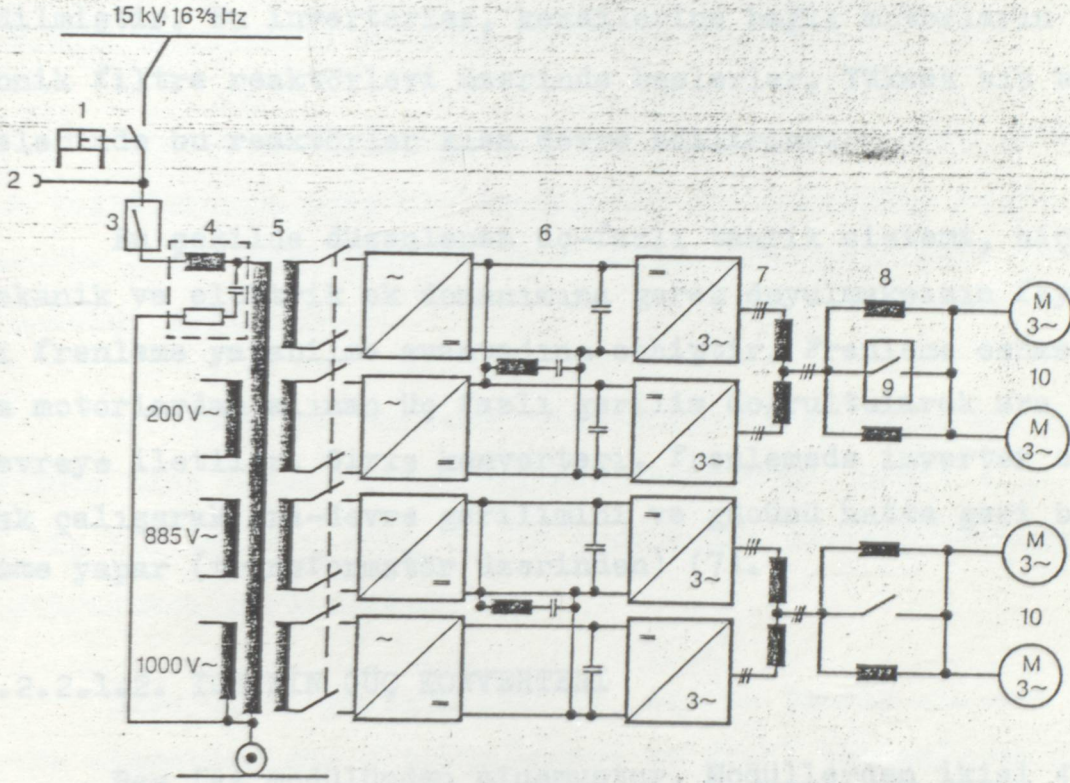
Şekil 4.13 ICE'nin Cer kuvveti/Fren kuvveti-hız diyagramları

V=Hız, F=Cer kuvveti, B=Frenleme kuvveti, P_F =Tahrik gücü P_B =Frenleme gücü

4.2.2.1.1. ICE'NİN GÜÇ DEVRELERİ

Şekil 4.13 te taşıtın güç devresi görülmektedir. Tek faz enerji 15 kV, $16^2/3$ Hz'lik seyr iletkeninden elde edilmektedir. Bu enerji, havalı kesici ve yüksek gerilim filtresi yoluyla ana transformatöre verilir. Herbir transformatör sekonder tahrik sargısında boştaki gerilim, 15 kV'luk besleme geriliminde 1430 V'tur.

Giriş konverteri, herhangi bir yükte DC ara-devreye 2800 V'luk sabit DC gerilim sağlayan ve hareket esnasında doğrultucu olarak



Şekil 4.14. ICE'nin güç devreleri

- | | |
|----------------------|-------------------------------|
| 1= Kesici | 6= Ara-devreli güç konverteri |
| 2= HV link | 7= Kuplaj reaktörleri |
| 3= Havalı kesici | 8= Motor reaktörleri |
| 4= Ana filtre | 9= Köprüleme kontaktörü |
| 5= Ana transformatör | 10= Asenkron tahrik motorları |

çalışan 4-bölgeli güç konverteridir. Kapasitörler ara-devre geriliminin düzgünlüğünü sağlar. 33 1/3 Hz.lik akım bileşeni, L-C filtreleri ile kısa devre edilir. Ara devre gerilimi inverterler ile asenkron motorların besleneceği üç-fazlı alternatif gerilime dönüştürülür. Gerilim ve frekans, fren

ve cer kuvvetlerinin en verimli olduğu noktalarda çalışma sağlayacak şekilde belirlenirler.

Her bojiye düşen iki inverter, reaktörlerle akuple edilmiştir. Bu inverterler, kendilerine bağlı motorların harmonik filtre reaktörleri üzerinde beslerler. Yüksek hız bölgelerinde bu reaktörler kısa devre edilirler.

Bu şekilde düzenlenen üç-fazlı tahrik sistemi, hiçbir mekanik ve elektrik ek donanımına gerek duyulmaksızın faydalı frenleme yapabilme avantajına sahiptir. Frenleme esnasında motorlardan alınan üç fazlı gerilim doğrultularak ara devreye iletilir. Giriş konverteri, frenlemede inverter olarak çalışarak ara-devre gerilimini ve gücünü hatta geri besleme yapar (transformatör üzerinden) (7).

4.2.2.1.2. ICE'NİN GÜÇ KONVERTERİ

Beş faz modülünden oluşmuştur. Modüllerden ikisi 4-bölgeli giriş konverterine, üçü de invertere aittir.

Her faz modülü, ana ve yardımcı (komütasyon) tristörler, diyotlar, RC bastırma devreleri, tetikleme transformatörleri ve soğutma elemanlarından oluşmuştur. Tristörler kısa kesim zamanlı, hızlı tipte ve maksimum tutma gerilimleri 1400 V tur 2800 luk yüksek ara-devre geriliminden dolayı 4 adet geri anahtarlama elaman kullanılmıştır.

Yarı iletken elemanlar, yağ soğutmali soğutucular üzerinden üst üste paketlenmişlerdir. Yağ ile soğutma düşük ağırlık ve hacim sağladığı gibi kirlenmeyi de önler.

Faz-faz gerilimi 0-2200 V ve çıkış akımı 0-600 A arasındadır. Çıkış frekans aralığı 0-130 Hz arasında değişir ve yağ ile birlikte 1950 kg ağırlığındadır (7).

4.2.2.2. ELEKTRİKLİ MANEVRA LOKOMOTİFLERİ

Daha önce de anlaşıldığı gibi üç-faz asenkron motorun cer taşıtlarında (güç elektroniğinin gelişmesiyle) kullanımı, manevra hizmetleri amacıyla kullanılan Lokomotiflerin de gelişmesini sağlamıştır.

Geliştirilen manevra lokomotiflerinden çetin kış şartlarında bile hizmet vermeleri beklenmektedir. Şekil 4.15 de bu tip bir taşıtın eski tipine oranla ana devresinin karşılaştırılması görülmektedir.

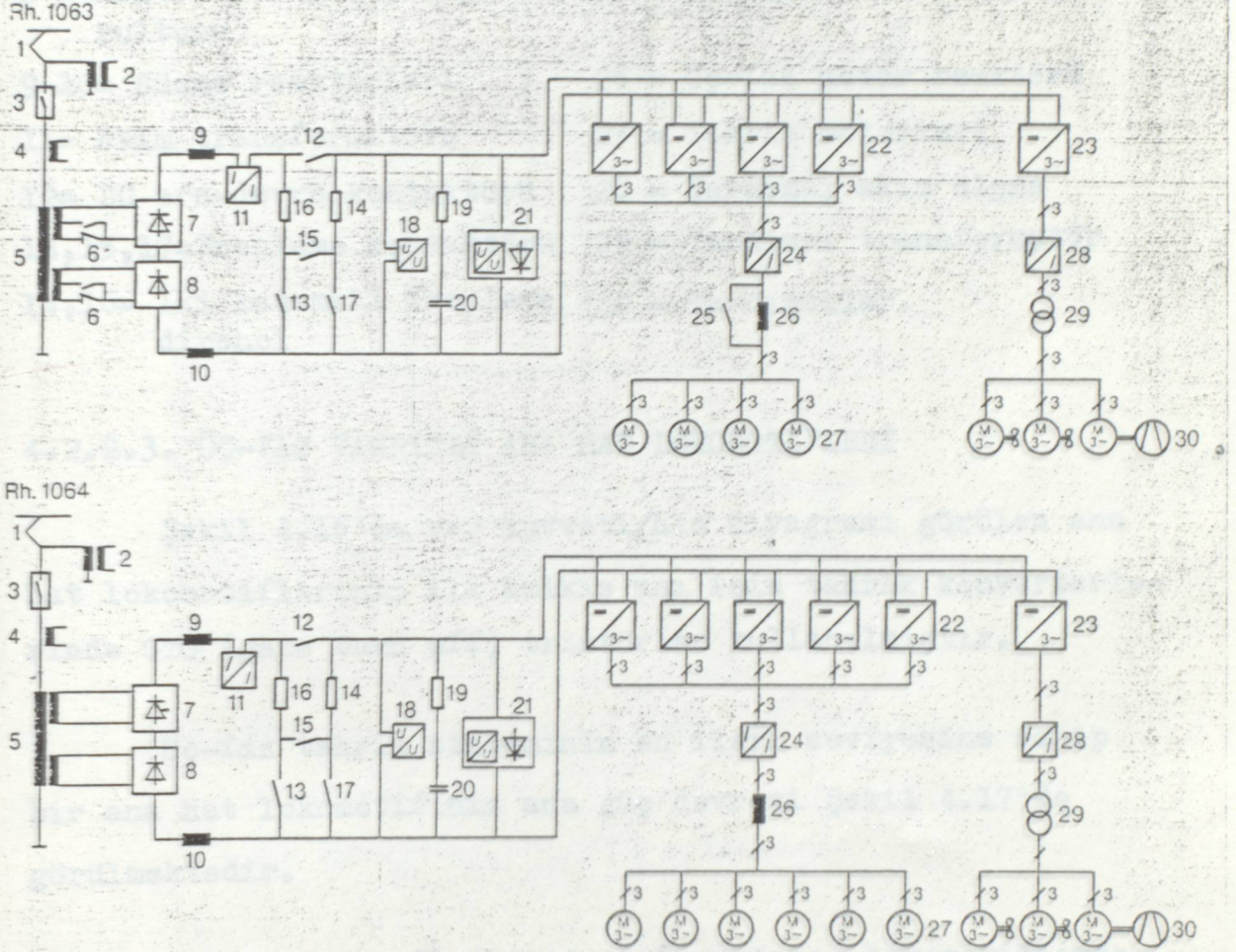
Deneyimler göstermiştir ki, üç-faz tahrik sistemi manevra hizmetlerinde oldukça hassas ve ideal bir çalışma sağlamıştır. Sisteme uygun tarzda uzaktan kumanda için, mikro bilgisayar kontrolü ilavesi yapılmıştır.

Manevra hizmetlerinde, düşük hız aralığındaki yüksek cer kuvvetleri yüksek performanstan daha önemlidir. Bu amaçla güç menzilineki diyagramlar arasında tam bir uyum vardır (5).

Bu lokomotiflerle kazanılan çok olumlu işletme tecrübesi, asenkron cer motorunun avantajlarını doğrulamaktadır.

Manevra hizmetleri için kullanılan sistem, sürekli hızların en düşüğüne bile izin verir. Çoklu sistem uygulamalarındaki genişletme programlarında olduğu gibi yüksek hız

kesitlerindeki uygulama için elverişlidir.(5).



Şekil 4.15 Elektrikli manevra lokomotiflerinin güç donanımı
(R1063 ve R1064 sınıfının karşılaştırılması).

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 = Akım kollektörü | 18 = DC ana-devrede gerilim ölçme |
| 2 = Gerilim transformatörü | 19 = Tampon direnci |
| 3 = Ana kesici | 20 = Back-up kapasitörleri |
| 4 = Akı transformatörü | 21 = İnverter koruma |
| 5 = Ana transformör | 22 = Tahrik inverteri |
| 6 = Kademe değiştirme anahtarı | 23 = Yardımcı inverter |

7 = Yarı kontrollu giriş doğrultucu	24 = Tahrik akımı ölçümü
8 = Kontrolsuz giriş doğrultucu	25 = Köprüleme kontaktörü
9-10= Süzme reaktörleri	26 = Üç-faz motor reaktörü
11= Akım transformatörü	27 = Tahrik motorları
12= DC ara-devre kontaktörü	28 = Yardımcı akım ölçme
13,15,17=Frenleme kontaktörü	29 = Yardımcı transformatör
14,16= İki kademeli frenleme direnci	30 = Yardımcılar.

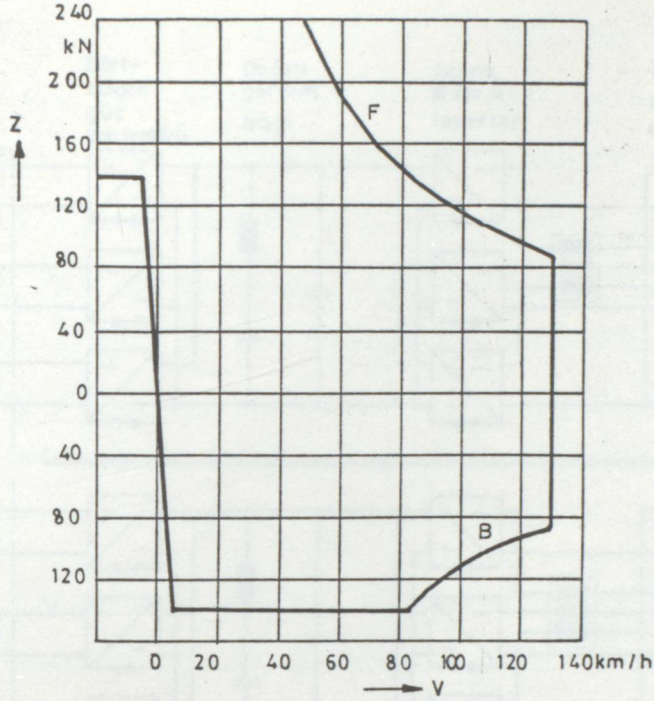
4.2.2.3. ÜÇ-FAZ TAHRIKLİ ANA HAT LOKOMOTİFLERİ

Şekil 4.16'da cer kuvveti/hız diyagramı görülen ana hat lokomotiflerinin ilk kalkış anı için tahrik konverterlerinde GTO (gate turn off) tristörler kullanılmıştır.

Üç-faz tahrik sisteminin en ileri seviyesine sahip bir ana hat lokomotifinin ana güç devresi Şekil 4.17'de görülmektedir.

Araştırma ve fizibilite çalışmaları, lokomotiflerdeki proje mühendislik çalışmalarından önce gelmiştir. Zamanlamadaki hassasiyet açısından ilk önce, konvansiyonel hızlı anahtarlama yarı-iletken elemanların kullanımı planlanmıştır.

Güç yarı-iletkenin sektöründeki çarpıcı ilerlemelerle birlikte, 1983'te yeni taşıtlar GTO tristörlerle donatılmaya başlanmıştır. Aynı zamanda genel cer elektronigi için mikro kompüterden yararlanma yoluna gidilmiştir. Bu gibi yenilikler konverterli taşıtların yeni üretim dönemine girmeye zorlanmıştır. (2).

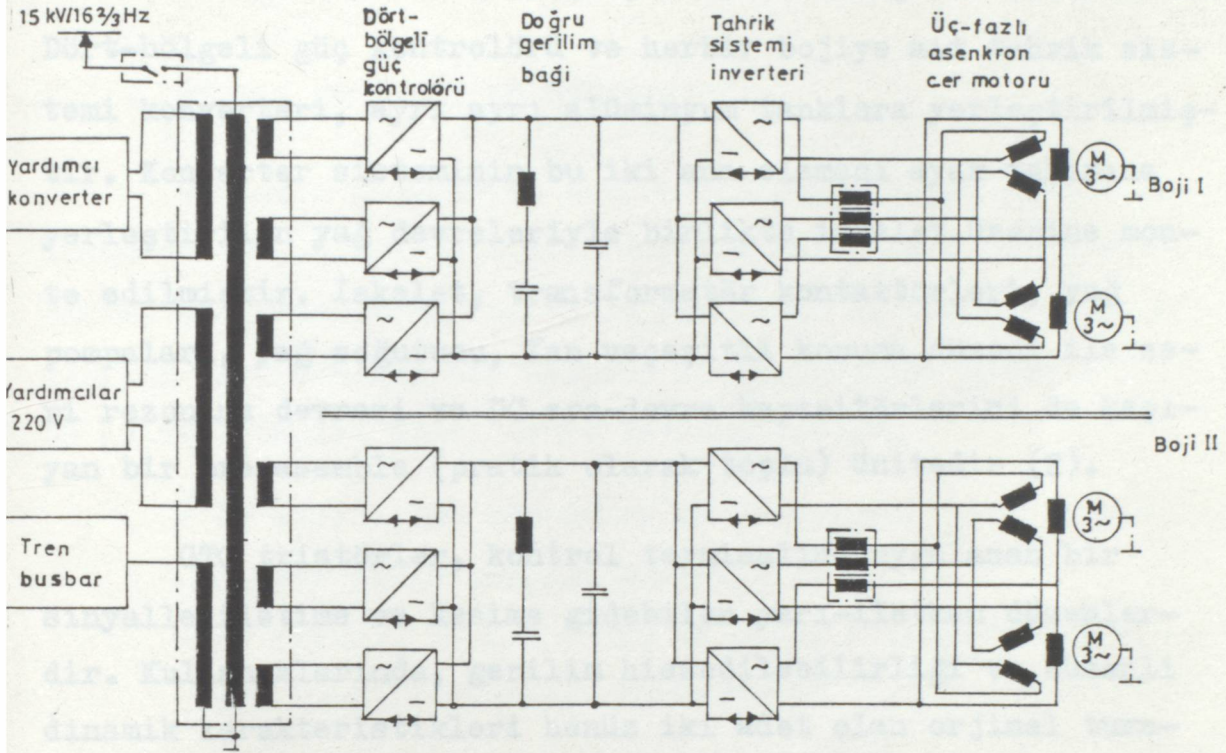


Şekil 4.16. Bir ana hat lokomotifinin cer kuvveti/hız (z-v) diyagramı.

F = Hareket, B = Frenleme

Şekil 4.17 deki ana devre şemasından görüleceği üzere her bir boji için 3'er adet 4-bölgeli güç kontrolörü vardır. Bu güç kontrolörlerinin herbiri, parazitleri azaltan zikzak anahtarlama sahiptir.

Zayıf kontak temaslı konverter çalışması hareket ve frenleme için mümkündür. Her iki boji konverterlerinin senkronize darbelenmesi, transformatör tarafında darbe frekansı oniki (12)'de meydana gelir. Böylece, şebekede minimum parazit sağlanır. Psöfometrik akımı azaltmak için bir yüksek gerilim filtresi, dolayısıyla gerekli değildir. Normal çalışma



Şekil 4.17. R_e 4/4 sınıfı konverterli ana hat lokomotifinin ana-güç devresi.

esnasında ölçülen psöfometrik parazit akımı, tipik olarak 450 mA'dir. (yalnız bir boji ile 1.35 A) (2). Dört-bölgeli güç kontrolörlerinin herbiri, transformator sekonder gerilimine uygun r.m.s. değerli, darbe genlik modülasyonlu gerilim üretir. Asıl frekans, ayarlandığı değere ana frekansla sürekli senkronize edilir. Gerektiğinde şebeke gerilimi ile şebeke akımı arasında faz açısının ayarı mümkündür. Örneğin, hareket esnasında 0° 'a, frenleme esnasında 180° 'ye ayarlanır. Çapraz darbelemeyle neden olunan harmoniklerin azaltılması ve akım ve gerilim arasındaki faz çakışma sayesinde toplam güç faktörü , pratik olarak nominal gücün yarısından yukarıdaki güç

bölgesine girer.

Tahrik konverteri yağ içine batırılmış bir tasarımdır. Dört-bölgeli güç kontrolörü ve herbir bojiye ait tahrik sistemi konverteri, ayrı ayrı alüminyum tanklara yerleştirilmiştir. Konverter sisteminin bu iki ana elamanı ayak takımına yerleştirilen yağ devreleriyle birlikte iskelet üzerine monte edilmiştir. İskelet, transformator kontaktörleri, yağ pompaları, yağ soğutucu, fan ve çeşitli koruma düzeni ile seri rezonans devresi ve DC ara-devre kapasitörlerini de taşıyan bir pre-assembly (pratik olarak toplu) ünedir (2).

GTO tristörler, kontrol terminaline uygulanan bir sinyalle iletme ve kesime gidebilen yarı-iletken düzenlerdir. Kullanımlarında, gerilim hissedilebilirliği ve düzenli dinamik karakteristikleri henüz iki adet olan orjinal turn-off devreleri ile bazı avantajları vardır. 1800 A'lık bir turn-off yeteneği, gerekli olan tahmini gücün ortaya çıkması için gerekli akım iken 2,5 kV'luk blokaj gerilimi 1500 V luk ara-devre gerilimi gerektirir. GTO tristörler tankların üzerine (dışına) monte edilirler. Kontrol elektroniğinden alınan sinyaller akım darbelerine optik fiberler ile dönüşür. ki sonra yarı-iletkenlere koaksiyel kablolar ile iletilir. Böylece, elektromanyetik uyum ve ana-devre ile kontrol elektroniği arasında gerekli galvanik izolasyonun ortaya çıkması mümkündür.

Tahrik sistemiyle ihtiyaç duyulan güç ile şebekeden alınan güç arasındaki fark, DC ara-devrede biriktirilir. Ara-devrenin DC gerilimi, tahrik sistemi konverteri ile değişken frekanslı üç-faz değişken çıkış gerilimine dönüştürü-

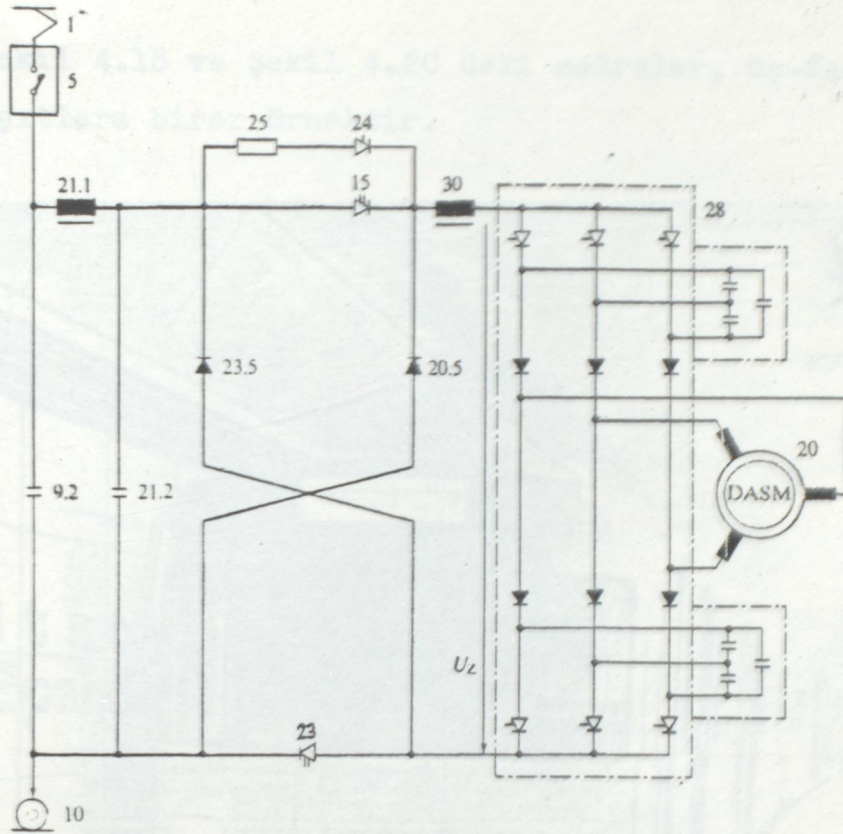
lür. Darbe genlik modülasyonu veya üç orta darbeleri temel tarzdan biri frekans aralığına bağlı olarak kullanılır.

4.2.3. ÜÇ-FAZ TAHRIKLİ DC CER TAŞITLARI

Üç-fazlı indüksiyon motoru kullanımı doğru akımla çalışan cer taşıtları için de oldukça elverişlidir. Bu taşıtlarda, şebekeden elde edilen DC gerilimin üç-fazlı değişken gerilim ve frekansta bir sisteme dönüştürülmesi gereklidir. Bu işlem için iki temel devre kavramı vardır.

- DC kıyıcı, DC ara-devre ve faz-sıralı inverterden oluşan "akım kaynağı konverteri"
- DC kıyıcı, DC ara-devre ve darbeleri inverterden oluşan "gerilim kaynağı konverteri"

Gerilim kaynağı konverterinde, ara-devredeki büyük kapasitanslarla gerilim sabit tutulurken akım kaynağı konverterinde değişken bağlantı akımı sağlanır (3).



Şekil 4.11 DC cer taşıtlarında DC ara-devreli üç-faz tahrik için temel devre

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 = Akım kollektörü | 21.1. = Filtre reaktörü |
| 5 = Yüksek-hızlı DC kesici | 21.2 = Filtre kapasitörü |
| 9.2=Giriş kapasitörü | 23 = Elektronik anahtar |
| 10= Topraklama fırçası | 23.5 = Ters-akım diyodu |
| 15= DC konverter | 24 = Frenleme tristörü |
| 20= Üç-faz asenkron tahrik motoru | 25 = Frenleme direnci |
| 20.5= Motor serbestgeçiş diyodu | 28 = Faz-sıralı tahrik inverteri |
| | 30 = DC bağlantı reaktörü |
| | U_z = Ara-devre gerilimi |

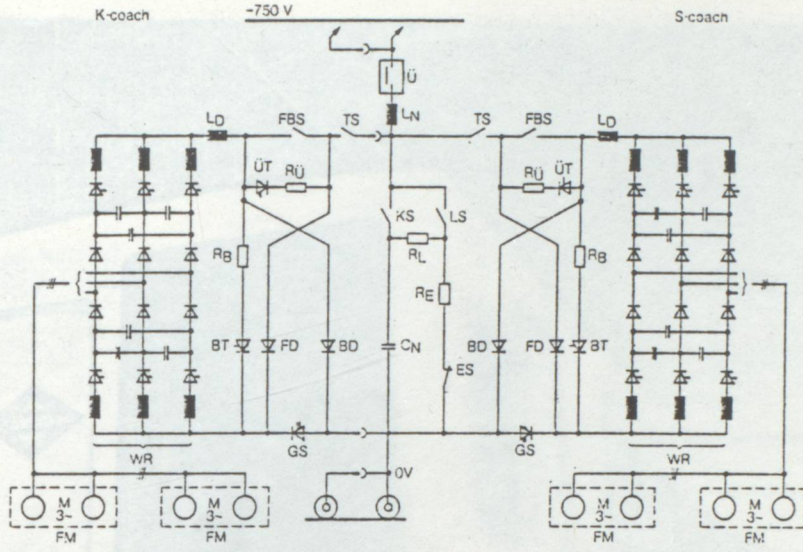
4.2.3.1. METROLAR

Şekil 4.18 ve Şekil 4.20 deki metrolar, üç-faz tahrikli DC taşıtlara birer örnektir.



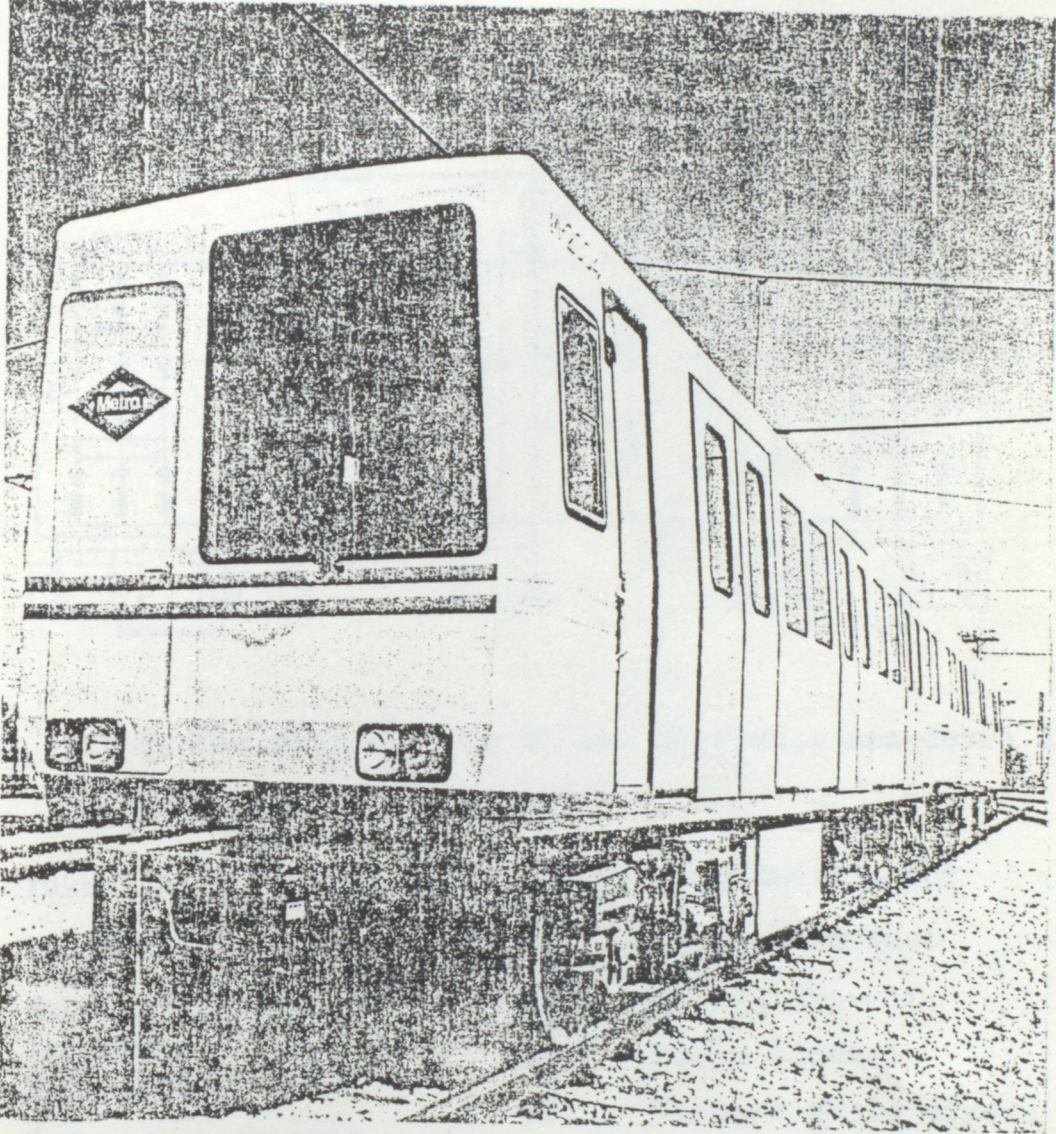
Şekil 4.18. Üç-faz tahrikli DC cer taşıtına bir örnek (Berlin metrosu)

Şekil 4.18'deki metronun Şekil 4.19'daki ana-devre diyagramından görüleceği üzere taşıt çift kombinasyonludur ve inverterlerle donatılmıştır.



Şekil 4.19 Üç-faz tahrikli bir DC cer taşıtının (Berlin met-
rosu) ana-devre diyagramı

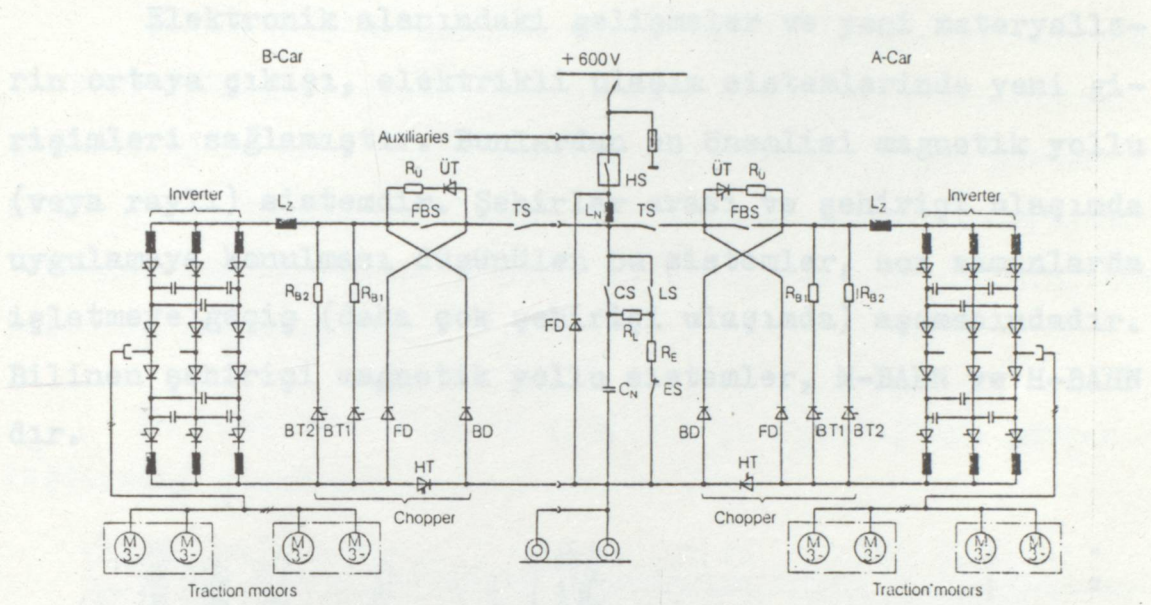
- | | |
|-------------------------------------|--|
| B_D - Frenleme diyodu | L_D - Link reaktörü |
| B_T - Frenleme tristörü | L_N - Hat reaktörü |
| C_N - Hat kapasitörü | L_S - Şarj kontaktörü |
| E_S - Kapasitör deşarj kontaktörü | R_B - Frenleme direnci |
| FBS - Hareket/Frenleme kontaktörü | R_E - Deşarj direnci |
| FM - Çift tahrik motoru 1-4 | R_L - Şarj direnci |
| FD - Serbest geçiş diyodu | $R_{\dot{U}}$ - By-pass direnci |
| GS - DC kıyıcı | TS - Yalıtma direnci |
| KS - Kapasitör kontaktörü | \dot{U} - Otomatik aşırı akım kesici |
| | $\dot{U}T$ - By-pass tristörü |
| | WR - Faz-sıralı inverter |



Şekil 4.20 Üç-faz tahrikli DC cer taşıtına bir örnek (Madrid metrosu).

Şekil 4.20 deki üç-faz tahrikli DC cer taşıtının Şekil 4.21 deki ana-devre diyagramı da benzerlerinin yaklaşık aynıdır.

4.3. MAGNETİK RAYLI SİSTEMLER

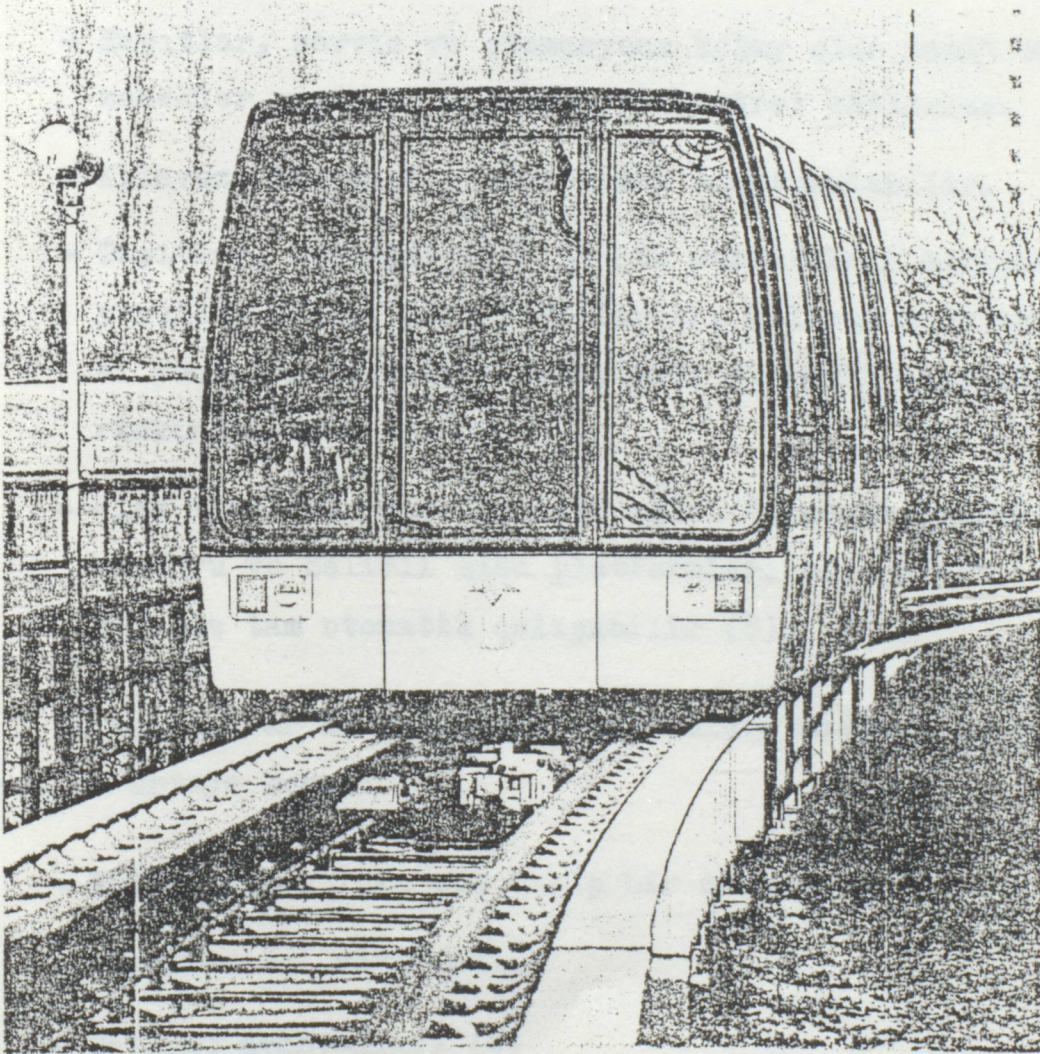


Şekil 4.21 Üç-faz tahrikli bir DC cer taşıtının ana-devre diyagramı (Madrid metrosu).

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| HS - Yüksek-hızlı kesici | $R_{B1,2}$ - Frenleme direnci |
| TS - Yalıtma kontaktörü | R_L - Ön şarj direnci |
| FBS- Tahrik/Frenleme kontaktörü | R_E - Deşarj direnci |
| CS - Kapasitör kontaktörü | R_U - Geçiş direnci |
| LS - Ön şarj kontaktörü | FD - Serbest geçiş diyodu |
| ES - Deşarj kontaktörü | BD - Frenleme diyodu |
| L_N - Hat reaktörü | BT1,2- Frenleme tristörü |
| L_Z - Link reaktörü | ÜT - By-pass tristörü |
| C_N - Hat kapasitörü | HT - Ana tristör |

4.3. MAGNETİK RAYLI SİSTEMLER

Elektronik alanındaki gelişmeler ve yeni materyallerin ortaya çıkışı, elektrikli ulaşım sistemlerinde yeni girişimleri sağlamıştır. Bunlardan en önemlisi magnetik yollu (veya raylı) sistemdir. Şehirler arası ve şehiriçi ulaşımda uygulamaya konulması düşünülen bu sistemler, son zamanlarda işletmeye geçiş (daha çok şehiriçi ulaşımda) aşamasındadır. Bilinen şehiriçi magnetik yollu sistemler, M-BAHN ve H-BAHN dır.



Şekil 4.22 M-BAHN (Maglev tren)

4.3.1. M-BAHN (MAGLEV TREN)

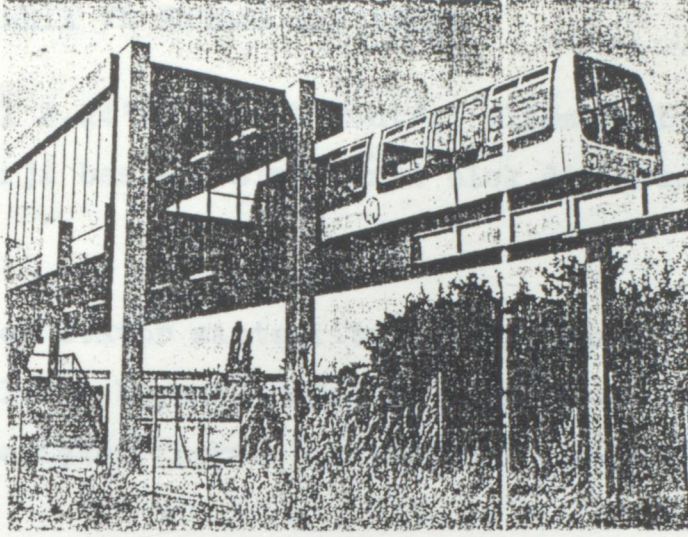
Şekil 4.22'de görülen taşıt Maglev (Magnetik kaldırma iletme) tekniğine dayalı olarak Avrupa'da geliştirilmiştir. Şekil 4.23'te daha ileri düzeyde gelişen bir pilot sistemin genel görünümü görülmektedir. Gelişmeler, taşıt konforu, cer tekniği, lineer stator tahriki ve otomasyon sistemi üzerinde yoğunluk kazanmıştır.

Bu yeni teknolojinin şimdilik şu avantajları gerçekleştirmesi mümkündür.

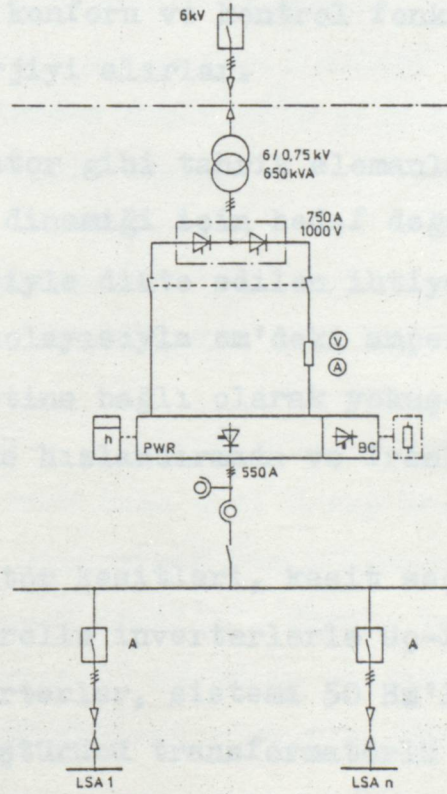
- Taşıtlar, servis ve otomasyonu kolay olan sabit düzenekler yardımıyla tahrik ve kontrol edilirler.
- Kılavuz, standart elemanlardan oluşturulabilir.
- Taşıtlar, konvansiyonel tahrik donanımının eliminasyonundan dolayı daha hafiftirler. Kılavuz üzerindeki yüklerin dağılımı, tekerlekli ve raylı sistemlerinkinden daha iyidir.
- Kısa trenler, yolcular için aşırı derecede yüksek konforu ve belirli kısa platformları olan hızlı katarlarda tam otomatik çalışabilir (8).

Bu avantajlar konvansiyonel sistemlere nazaran şu sonuçları da ortaya koyar:

- Kullanıcılar için çok cazip bir sistem.
- Düşük enerji sarfiyatı.
- Maliyet avantajları (8)



Şekil 4.23. M-Bahn'ın genel görünüşü



Şekil 4.24. M-Bahn'ın enerji besleme sistemi.

A Kesit anahtarı
BC Fren kıyıcısı

LSA Lineer stator kesiti
PWR Darbe kontrollü inverter

4.3.1.1. TAHİRİK VE ENERJİ BESLEMESİ

Şekil 4.24'te tahrik kontrol elemanlı birimleri ihtiya eden enerji besleme sisteminin blok diyagramı görülmektedir.

Lineer stator sistemi tarzında, tahrik edilen aktif kısımlar kılavuz boyunca dağılmış olup, kesitler halinde bölünmüş ve değişken frekans ve gerilimli üç-fazlı akımla beslenmiştir.

Taşıtlar, koruyucu muhafaza içindeki kılavuzda birbirine uygun ve ekonomik olarak boyutlandırılmış olan iletken raylardan, yolcu konforu ve kontrol fonksiyonları panosu için gereken enerjiyi alırlar.

Lineer stator gibi tahrik elemanlarının elektriksel dizaynı, seyahat dinamiği için hedef değerler takımını ve rotanın topolojisiyle dikte edilen ihtiyaçları benimser. Sargıların sayısı, dolayısıyla cm'deki amper-sarımlar, ihtiyaç duyulan cer kuvvetine bağlı olarak yokuş-yukarı ve yokuş-aşağı olan kesimlerde hızlandırmada ve frenlemede arttırılır.

Lineer stator kesitleri, kesit seçim anahtarları yoluyla, darbe kontrollu inverterlerle üç-faz tahrik akımıyla beslenirler. İverterler, sistemi 50 Hz'lik bir orta gerilim şebekesinden dönüştürücü transformatorlü bir kontrollu doğrultucuyla elde edilen DC gerilimli bir ana devre yoluyla besler. Şekil 4.24'te görülen örnek sistemin darbe kontrollu inverteri, 550 A'lik maksimum çıkış akımı ve 1000 V'luk DC ara-devre gerilimi için tasarlanmıştır (8).

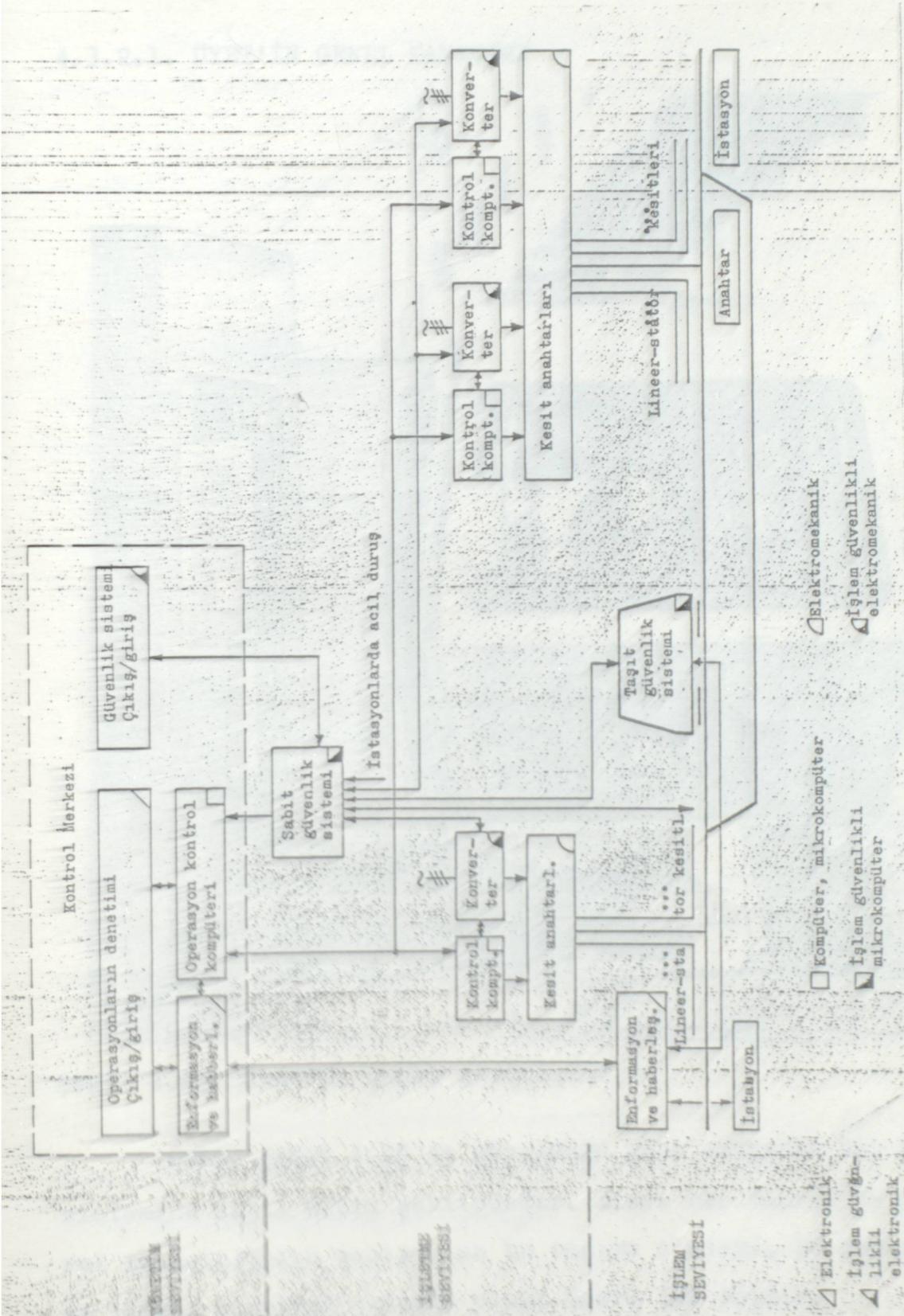
Konverter kontrollu senkron motora benzer bir hareket için darbe-kontrollu inverterler, gerekli olan cer kuvvetine uygun akımın ve taşıt mıknatıslarının kutup pozisyonuna uygun fazın büyüklüğüne benzerlik kontrolü yapmalıdır. Her bir konverter için bu çalışma, dijital çalışan bir motor kontrol ünitesiyle sağlanır. Bir kutup pozisyonu transdüserinden elde edilen sinyallerin analiziyle, doğru kutup pozisyonu öğrenilir. Her bir taşıt böyle bir transdüserle donatılmıştır. Böylece seyyar alanın faz pozisyonu, motor çalışma ve frenlemesi için kutup pozisyonu, her zaman optimal olarak sağlanır.

Taşıt hızının gerçek ve referans değerleri, motor kontrol ünitesi için giriş değişkenleri olarak alınır. Hız, karakteristik referans değerlerle uyum içindeki cer kuvveti yoluyla böylece regüle edilir.

4.3.1.2. MERKEZİ OTOMATİK TREN OPERASYONU İLE OTOMATİK TREN KUMANDASI VE GÜVENLİK SİSTEMİ:

Tam anlamıyla denilebilirki, kontrol-kumanda fonksiyonları, maglev treni için özel öneme sahip bir alanda, merkezi tren kontrol sisteminin bir bölümüdür. Tam otomatik tren operasyonu söz konusu değildir. Fakat, bağımsız "hata emniyet (arızaya karşı güvence)" güvenlik sistemi, yani her hangi bir operasyon durumunda emniyet garantisi vardır (8).

Merkezi tren kontrol sistemi, Şekil 4.25'teki diyagramda görüldüğü gibi hiyerarşik bir yapıdadır.



Şekil 4.25. M-Bahn'ın merkezi tren kontrol sistemi (fonksiyonel diyagram)

4.3.2. ÜYET ÜST YOLLU ELEKTRİKLİ TAŞIT(H-BAHN)

4.3.2.1. ÜYET'İN GENEL TANITIMI



Şekil 4.26. Üyet'in genel görünüşü

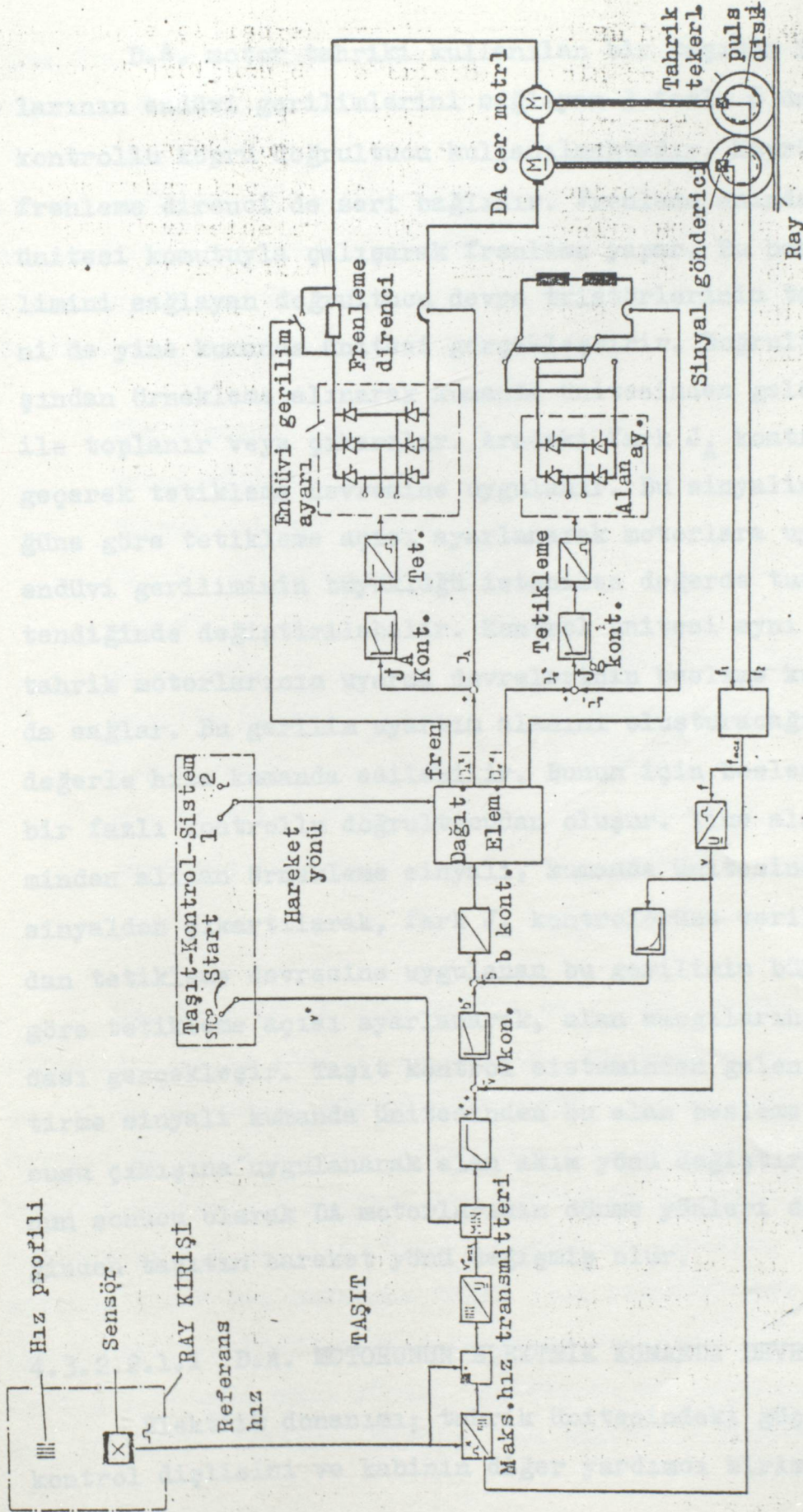
ÜYET, Şekil 4.26 da görüldüğü gibi manyetik bir ray sistemine asılı kabin şeklindedir. İleri bir tahrik ve kontrol teknolojisine sahip olan bu taşıma sistemi, DC motorlu ve lineer asenkron motorlu olmak üzere iki tiptir.

4.3.2.2 ÜYET TAHİRİK KONTROL SİSTEMLERİ

Taşıtın diğeri kontrol sistemleri gibi tahrik kontrol sistemi de merkezi kumanda ile gerçekleştirilmektedir.

4.3.2.2.1 DA MOTORU İLE YAPILAN TAHİRİK SİSTEMLERİ

Blok diyagramda (şekil 4.29) görüldüğü gibi taşıtın hareketi, hızı ve frenleme durumu geri beslemeli ve otomatik olarak yapılmaktadır. Hat kirişinde bulunan bir göndericiden referans bir hız alınarak, hız transmitterinde maksimum bir sinyale dönüştürülür. Hız transmitteri taşıtın kontrol sisteminin içindedir. V_{maks} şeklinde yükseltilerek doğrultulmuş bu referans hız sinyali değerlendirme karşılaştırıcısından geçerek V-kontrolörüne verilir. Bu komparatörde, aynı zamanda taşıtın çalışma veya durmasına ait olan sinyal de beraber işlem görür. Bu iki sinyalin birleşmesinden oluşan V sinyali ile yine taşıt tekerleğinden bir transmitterle alınarak impuls'a (darbeye) dönüştürülmüş ve daha sonra yine bir D.A. sinyali şekline dönüştürülen sinyalle toplanarak v-kontrolörüne verilir. Kontrolörden b ile gösterilmiş bir sinyal çıkar. Bu sinyal yine tekerlek transmitterinden alınarak b türü bir sinyale dönüştürülen sinyalle toplanarak b-kontrolörüne verilir. Kontrolör çıkışı, kontrol elemanlarına hareket komutu veren ve aynı zamanda tristör tetikleme devrelerini besleyen kumanda ünitesine verilir. Bu üniteye aynı zamanda taşıt hareket yönünü belirleyen sinyal de verilerek taşıtın yönü tayin edilir.



Şekil 4.27 ÜYET kontrol sisteminin blok diyagramı

D.A. motor tahriki kullanılan bir taşıtta D.A. motorlarının endüvi gerilimlerini sağlayan 3 fazlı 6 darbeli bir kontrollü köprü doğrultucu kullanılmaktadır. Köprü çıkışında frenleme direnci de seri bağlıdır. Frenleme anında kumanda ünitesi komutuyla çalışarak frenleme yapar. Bu besleme gerilimini sağlayan doğrultucu devre tristörlerinin tetiklemesini de yine kumanda ünitesi gerçekleştirir. Doğrultucu çıkışından örnekleme alınarak kumanda ünitesinden gelen sinyal ile toplanır veya çıkarılır. Aradaki fark J_A kontrolöründen geçerek tetikleme devresine uygulanır. Bu sinyalin büyüklüğüne göre tetikleme açısı ayarlanarak motorlara uygulanan endüvi geriliminin büyüklüğü istenilen değerde tutulur. İstendiğinde değiştirilebilir. Kontrol ünitesi aynı zamanda tahrik motorlarının uyarma devrelerinin besleme kumandasını da sağlar. Bu gerilim uyarım alanını oluşturacağından, bu değerle hıza kumanda edilebilir. Bunun için besleme devresi bir fazlı kontrollü doğrultucudan oluşur. Yine alan geriliminden alınan örnekleme sinyali, kumanda ünitesinden gelen sinyalden çıkartılarak, fark J_e kontrolörüne verilir. Buradan tetikleme devresine uygulanan bu gerilimin büyüklüğüne göre tetikleme açısı ayarlanarak, alan sargılarının kumandası gerçekleşir. Taşıt kontrol sisteminden gelen yön değiştirme sinyali kumanda ünitesinden bu alan besleme doğrultucusu çıkışına uygulanarak alan akım yönü değiştirilir. Bunun sonucu olarak DA motorlarının dönme yönleri değişeceğinden taşıtın hareket yönü değişmiş olur.

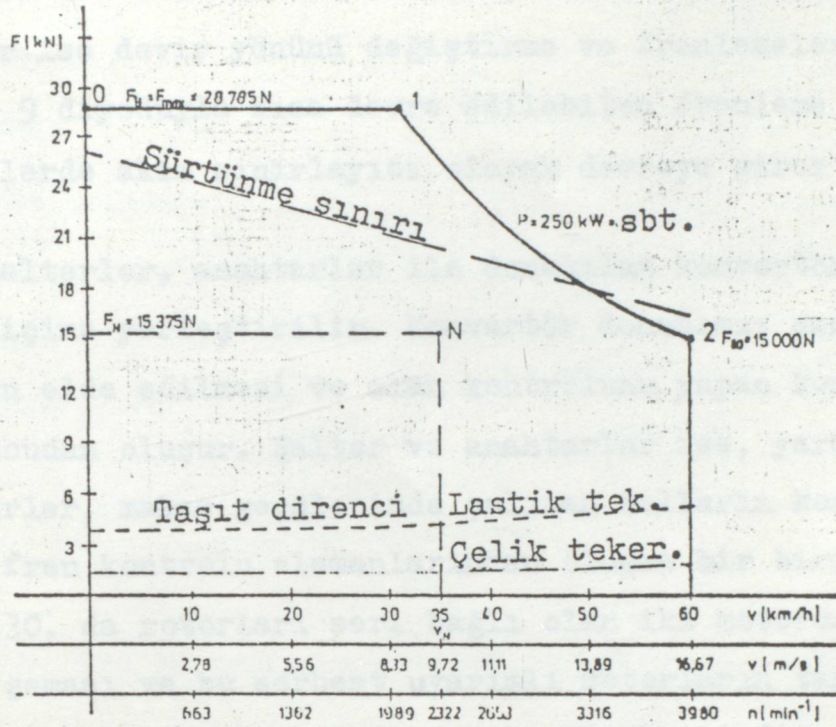
4.3.2.2.1.1 D.A. MOTORUNUN ELEKTRİK KUMANDA DEVRELERİ

Elektrik donanımı; tahrik ünitesindeki güç donanımı, kontrol dişlisini ve kabinin diğer yardımcı birimlerini

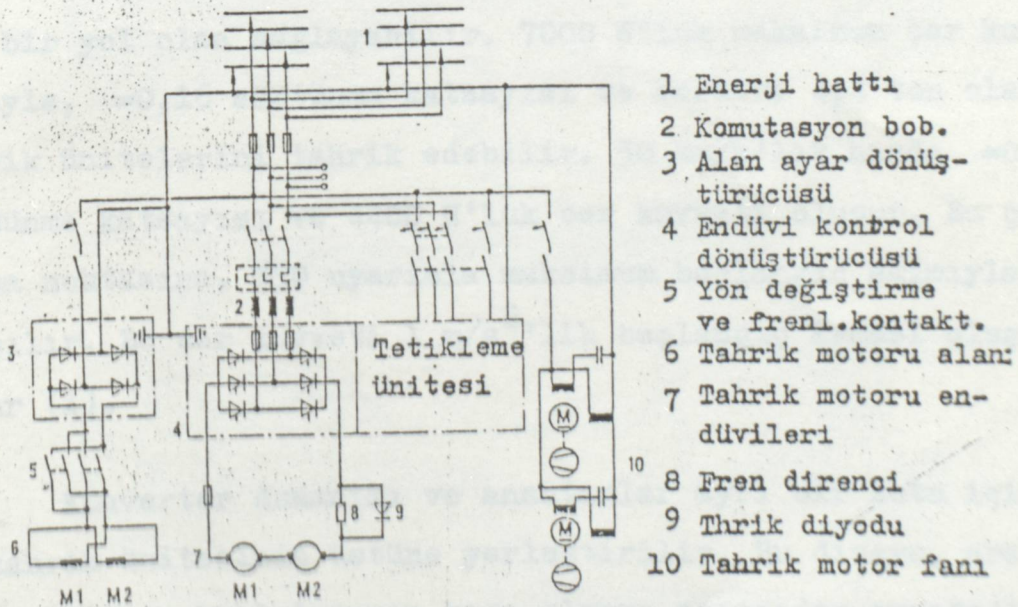
içerir. Tahrik, doğru akım serbest uyarımlı motorla yapıldığından % 7 eğimli yola kadar olan eğimlerde kontrollü doğrultuculara gerek duyulmaz. Kontrolsüz diyotlu doğrultucular ile de kıyıcılar üzerinden beslenirler. (1) Şekil 4.28 deki cer kuvveti diyagramı bu tahrik sistemleri için çıkartılmış diyagramı bu tahrik sistemleri için çıkartılmış diyagramdır. Bu diyagram, aşağıdaki niteliklerdeki bir taşıt içindir.

Tip dizaynı	4/4
Taşıt ağırlığı	12,8 t
Tahrik ünitesi sayısı	3
Tahrik ünitesindeki motor sayısı	2
Motor tipi	Doğru akım motoru
Gerilim kademesi (anma)	440 V=/motor
Dişli oranı	1/9,6
Ana tereklek çapı (yeni)	d = 520 mm.
sürtünme katsayısı	$v=0 = 0,16$ $v=50 = 0,10$

Tahrik için gerekli enerji akım raylarından akım toplayıcıları (akım alıcı) ile alınır. Ana sigortalar ve ana kontaktör üzerinden güç bölümüne geçer. Şekil 4.29 da güç devresi görülmekte olan, rotorları seri bağlı iki D.A. motorunun kumandası, 6 darbeli tam kontrollü üç fazlı köprü doğrultucular ile yapılır. Rotora uygulanan gerilim, faz kesme metoduyla 0 V'dan maksimum değer olan yaklaşık 440 V'a kadar ayarlanabilir. Uyarım sargıları ise tek fazla yarı kontrollü doğrultucuyla akım yönünü değiştiren kontaktörler üzerinden beslenir. Frenleme anında, tam kontrollü tristörlü bu



Şekil 4.28. 4/4 tipinde DC motorlu bir taşıtın cer kuvveti diyagramı

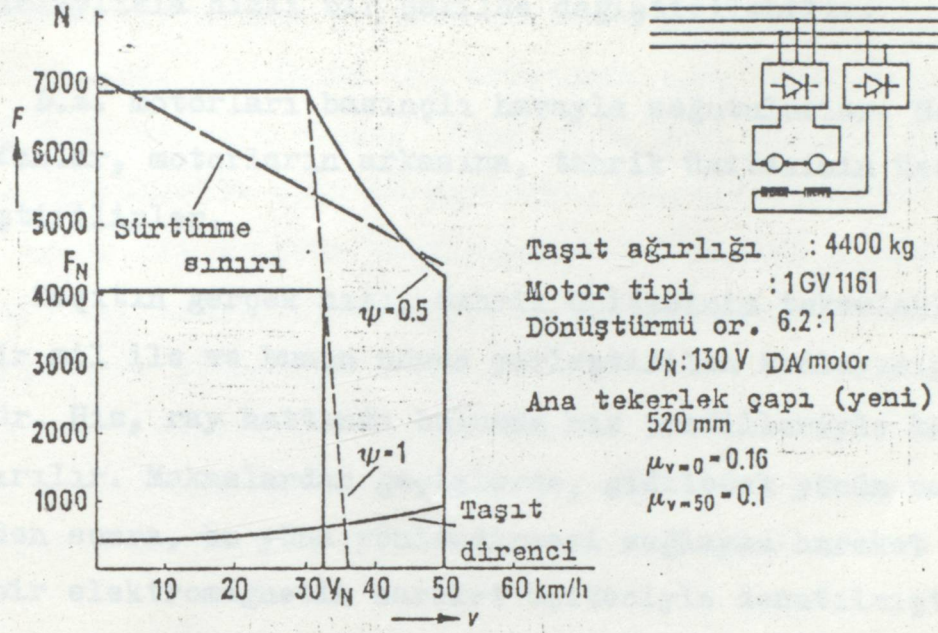


Şekil 4.29. DC motorun statik kumanda devresi

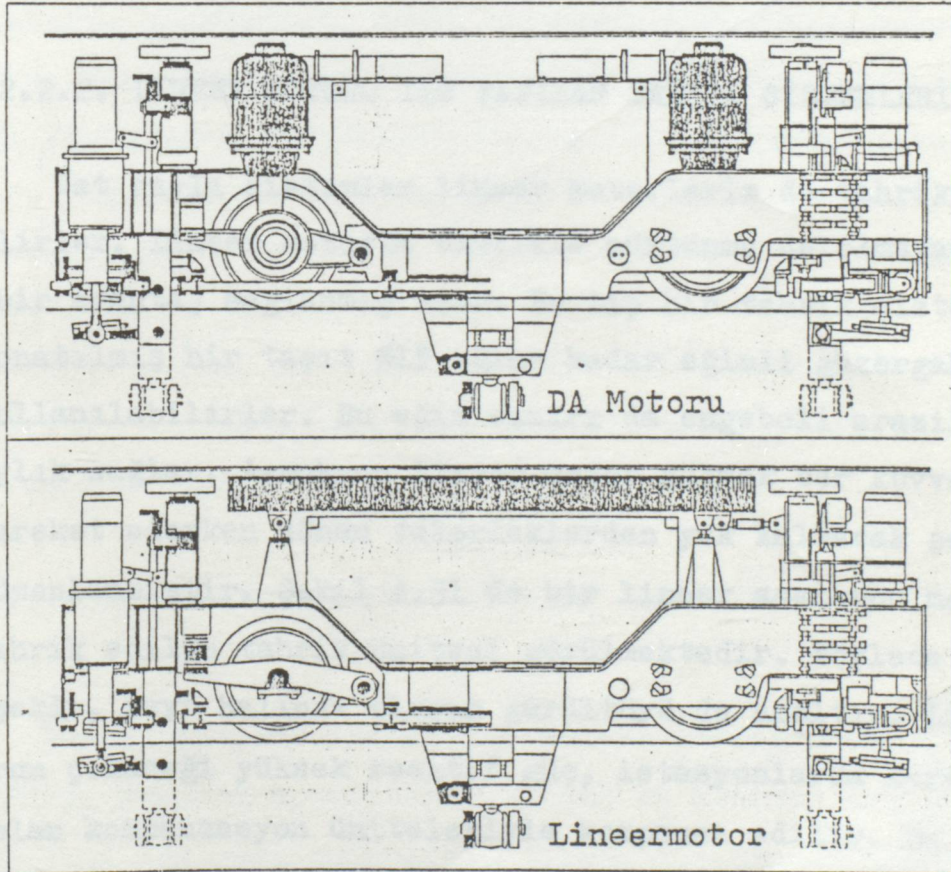
doğrultucu ünitesi evirici olarak çalışır. Yön değiştiren kontaktör ise devir yönünü değiştirme ve frenlemelerde kullanılır. 9 diyoduyla kısa devre edilebilen frenleme direnci, frenlemelerde akım sınırlayıcı olarak devreye girer (1).

Şalterler, anahtarlar ile donatılan konvertör, tahrik ünitesi içine yerleştirilir. Konvertör donanımı; endüvi geriliminin elde edilmesi ve alan kontrolünü yapan kontrollü doğrultucudan oluşur. Şalter ve anahtarlar ise, yardımcı kontaktörler, makas geçişlerinde çalışan kolların kontrolü ve acil fren kontrolü elemanlarından oluşan bir birimdir. Şekil 4.30. da rotorları seri bağlı olan iki motorun prensip güç şeması ve bu serbest uyarımlı motorların tahrik ettiği taşıta ait cer kuvvet diyagramı görülmektedir. Birleşik kabinlerle oluşturulan taşıt 3 adet tahrik ünitesine sahiptir. Başlangıçta 1 m/s^2 'lik bir yol alma ivmesiyle hareket eder. Bu ivme lineer motor ile tahrik şeklindeki sistemden iyi olmamakla beraber seyr direncini yenebilecek kadar iyi bir yol olma sağlayabilir. 7000 N'luk maksimum cer kuvvetiyle, $\mu=0,16$ sürtünme katsayısı ve herbiri 4,4 ton olan tahrik ünitelerini tahrik edebilir. 50 km/h'lık hızda $\mu=0,1$ sürtünme katsayısı ve 4400 N'luk cer kuvveti oluşur. Bu çalışma noktasına, %50 uyarımla maksimum başlangıç akımıyla ulaşılır. Bu cer kuvveti 1 m/s^2 'lik başlangıç ivmesi oluşturur (1).

Konverter donanımı ve anahtarlar ayrı bir kutu içinde tahrik ünitesinin üstüne yerleştirilir. Bu dizayn, aradaki bağlantı kablolarının kısa olması açısından avantajlıdır. Bu elektrikli donanım kutusu tamir ve bakım işlemleri



Şekil 4.30. İki DC motorlu taşıtın cer kuvveti diyagramı



Şekil 4.31. Aynı tahrik ünitelerinde DC ve lineer motorun tahrik durumu

için kolaylıkla hızlı bir şekilde değiştirilebilir.

D.A. motorları basınçlı havayla soğutulurlar. Soğutucu fanlar, motorların arkasına, tahrik ünitesinin üstüne yerleştirilirler.

Taşıtın gerçek hızı, tahrik ünitesinin tekerleklerinden bir mil ile ve bunun ucuna yerleştirilen kodlayıcıyla ölçülür. Hız, ray hattında bulunan hız profilleriyle kabine ulaştırılır. Makaslardan geçişlerde, gidilecek yönün seçilmesinden sonra, bu yöne yönlendirmeyi sağlayan hareket kolları bir elektromagnetik hareket ünitesiyle donatılmıştır. Bütün tahrik ünitelerindeki bu klavuz kolların pozisyonları bir sinyalle sürücüye bildirilmektedir. Sürücü bu sinyalle taşıtın hangi yöne gitmekte olduğunu izleyebilir.

4.3.2.2.2. LINEER MOTORU İLE YAPILAN TAHİRİK SİSTEMLERİ

Üst raylı sistemler lineer motorlarla da tahrik edilebilirler. Lineer motorla tahrikte sürtünme de olmayacağından bir avantaj sağlanmış olur. Bu tip bir tahrik sistemiyle donatılmış bir taşıt %15 eğime kadar eğimli güzergahlarda kullanılabilirler. Bu eğim sınırı da engebeli arazilerde kolaylık sağlar. Asenkron lineer motor yüksek cer kuvvetiyle hareket ederken dönen tekerleklerden yük kalkacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 4.31 de bir lineer asenkron motorla tahrik edilen tahrik ünitesi görülmektedir. Böylece tahrik şekli, seyr halinde oluşan gürültüyü de azaltır. Lineer motorun çekeceği yüksek reaktif güç, istasyonlarda kurulacak olan kompanzasyon üniteleriyle kompanze edilir. Bu tip tahrik sisteminde asenkron lineer motor kontrolü, 3 fazlı

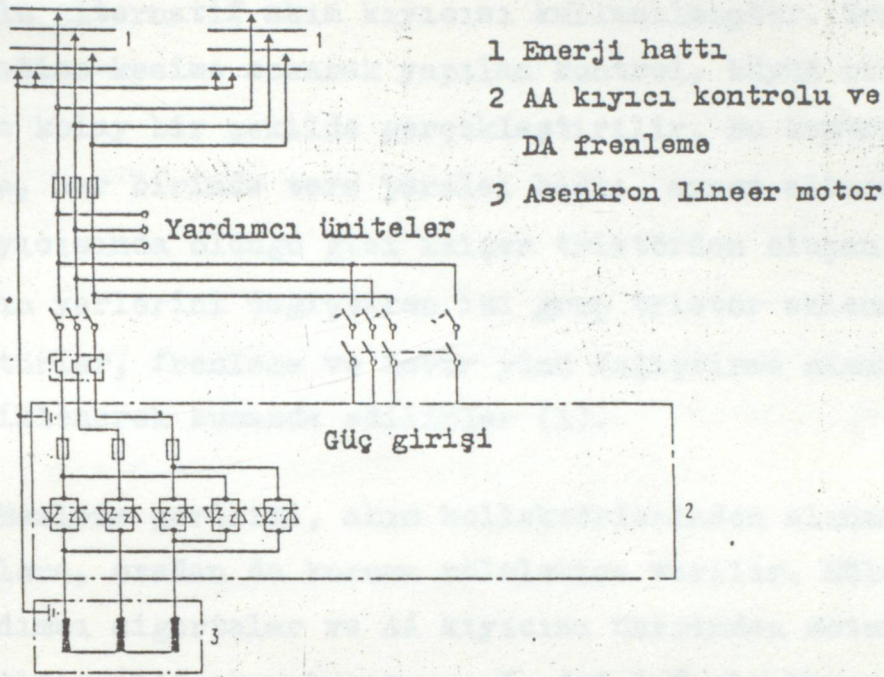
alternatif kıyıcısıyla gerilim kontrolü şeklinde yapılır. 3 fazlı kıyıcı; her fazda iki tristörün ters paralel bağlanmasıyla 6 tristörden oluşur. Şekil 4.32 deki prensip güç şemasından görülmekte olan bu kıyıcıya, iki ayrı tristör grubundan (yine iki tristör ters paralel bağlanarak alternatif akım kıyıcısı oluşturulmuştur) oluşan ve dinamik frenleme durumuyla ters yönde dönmeyi sağlayacak faz yerlerini değiştirme devresi eklenmiştir. Bu devredeki tristör tetiklenerek ilettime geçirildiğinde iki fazın yerlerini değiştirmiş olurlar. Böylece asenkron motorun devir yönü değiştirilmiş olur.

4.3.2.2.2.1. LİNEER ASENKRON MOTORUN YAPISI

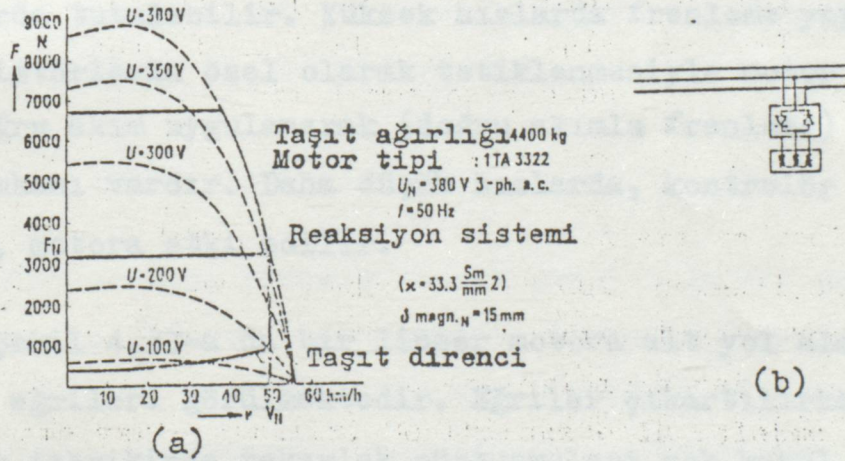
Lineer asenkron motorlar diğer elektrik motorları gibi elektrik enerjisini, dönme hareketi sonucunda, mekanik enerjiye dönüştürmezler. Bunlar öteleme hareketi yaparak enerji dönüşümünü gerçekleştirirler. Dolayısıyla lineer motorlar, doğrusal hareket yapan elektrik makinalarıdır. Lineer asenkron motor da diğer normal asenkron motorları gibi hareket eden ve duran; rotor ve statordan oluşmuştur. Yalnız lineer motorlarda, motor çapı sonsuz olduğundan dönme hareketi yerine doğrusal hareket yaparlar. Lineer motorlar segman motoruna benzerler.

4.3.2.2.2.2. LİNEER ASENKRON MOTORUN ELEKTRİK KUMANDA DEVRELERİ

Lineer motorla tahrik sisteminin birçok mekanik üstünlüğünün yanında elektrikselsel olarak da avantajları vardır. Şekil. 4.32 den görüldüğü gibi, Lineer Asenkron motor direkt olarak, akım rayından alınan 3 fazlı alternatif gerilimle



Şekil 4.32. Lineer motorun statik kumanda devresi



Şekil 4.33. Lineer motor tahrikli ünitenin cer kuvveti diyagramı (a) ve prensip bağlama şeması (b)

beslenir. Motor gerilimini kontrol için 6 tristörlü 3 fazlı kontrollu alternatif akım kıyıcısı kullanılmıştır. Tristörleri iletme-kesime sokarak yapılan kontrol, büyük bir aralıkta ve kolay bir şekilde gerçekleştirilir. Bu kontrollu kıyıcıya, her birinde ters paralel bağlı, aynen alternatif akım kıyıcısında olduğu gibi ikişer tristörden oluşan ve iki fazın yerlerini değiştiren iki grup tristör eklenmiştir. Bu tristörler, frenleme ve devir yönü değiştirme zamanlarında, tetiklenerek kumanda edilirler (1).

Besleme gerilimi, akım kollektörlerinden alınarak ana sigortalara, oradan da koruma rölelerine verilir. Röle çıkışı, yardımcı sigortalar ve AA kıyıcısı üzerinden motora uygulanır. Alternatif akım kıyıcısı, 5 adet 1 fazlı kıyıcıdan oluşmuştur. Bu gruplardan ikisi sürekli tıkamadadır. Biri de sürekli iletimdedir. Hangi uç grup tristörün tetikleneceği, gideceği yön ve frenleme durumuna göre belirlenir. Ayrıca tristör kumandasına göre lineer motor gerilim değeri belli sınırlarda tutulabilir. Yüksek hızlarda frenleme yapabilmek için tristörlerin özel olarak tetiklenmesiyle motor sargılarına doğru akım uygulanarak (doğru akımla frenleme) frenleme yapma imkanı vardır. Daha düşük hızlarda, kontrolör tıkama yaparak, motora etki edilir.

Şekil 4.33-a da bir lineer motora ait yol alma cer kuvveti eğrileri görülmektedir. Eğriler çıkartılırken lineer motor tahrikinde tekerlek sürtünmeleri yok kabul edilmiş olup, sürtünmeden bağımsız çalışacağı için, yalnız yolcu seyahat konforu düşünülerek başlangıç yol alma ivmesi $1,25 \text{ m/s}^2$ alınmıştır. Her bir tahrik ünitesi 4400 kg ağırlığındadır. motorun senkron hızı ise 55 km/h olarak alın-

mıştır. 50 km/h maksimum hızda yaklaşık 3000 N'luk cer kuvveti sağlanmış olur.

Şekil 4.33 b'de görülen Linear Asenkron motorun prensip bağlama devresinde, motor ile hat arasına konan tristör ünitesi; linear motorun kumandasını sağlayan, yani; yol alma, frenleme, hız ayarı ve devir yönü değişimi gibi fonksiyonları yerine getiren, alternatif akım kıyıcılarından oluşan devredir. Bu ünite ile linear asenkron motorun gerilimi, çok geniş bir alanda kontrol edilebilir (1).

4.3.2.3. ÜYET'İN YARDIMCI İŞLETMELERİ

Bu tesislerin başında enerji sağlama tesisi gelir. Bu işletme, besleme şekline ve tipine göre enerjiyi taşıtlara en uygun şekilde ulaştırır. Bu işletmeye bir anlamda, sistemin güç kaynakları denebilir. Bunun dışında; sistemin işletmede olmayan taşıt ve kabinlerinin konulabileceği depolar, tamir ve bakımının yapılacağı tamir ve bakım atelyeleri gibi tesislere de ihtiyaç vardır.

4.3.2.3.1. ENERJİ SAĞLAMA TESİSİ

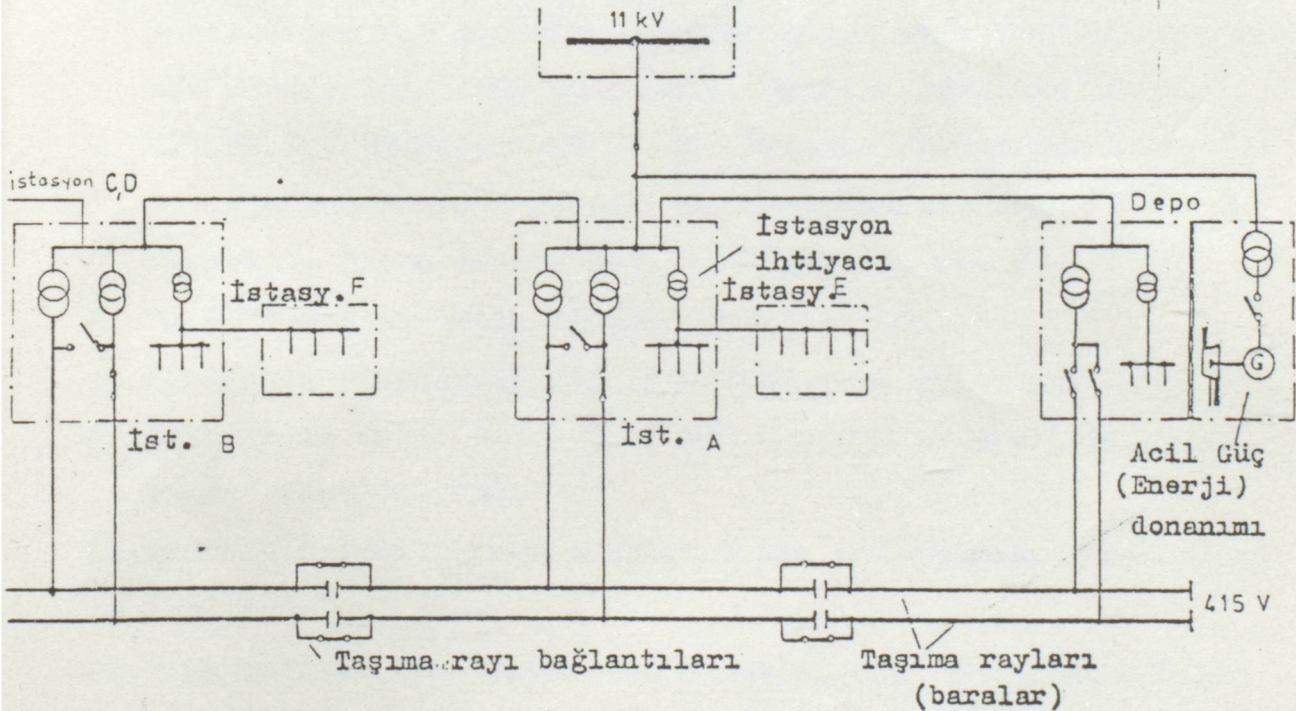
ÜYET sistemi prensip olarak Şekil 4.34'den görüldüğü gibi mevcut şebekeden beslenebilir. Sistemin kurulacağı bölge veya yerleşim alanında, örneğin şekildeki gibi 11 kV'luk bir şebeke varsa, buradan sistem için enerji sağlamak mümkündür. Sistemin alt istasyonlarını beslemek için hat boyunca bir ring kablo bulunur. Herbir alt istasyonda rahatlamayı sağlamak için, istasyon kapasitesi iki transformator arasında bölünmüştür. Böylece bir istasyonda, arızadan veya başka nedenden dolayı, enerji kesilmesi durumunda ring hattıyla

diğer alt istasyondan beslenmiş olur. İstasyon ve ray hatlarına güç sağlamak için gerekli donatım, istasyon binasına yerleştirilir. Normal şebekeden izole olduğundan, bu şebeke ayrı olarak güvenli bir şekilde kullanılabilir. Bu besleme şebekesinden herhangi bir kesinti anında acil güç kaynağı devreye girer. Besleme buradan devam eder.

Taşıtlar, 3 fazlı bir alternatif akım şebekesinden dört (R,S,T,M_p) akım rayı ile beslenirler. Tahrik Lineer Asenkron Motor ile yapılacaksa, gerilim sadece kumanda için alternatif akım kıyıcısı üzerinden motora uygulanır. Şayet doğru akım motoruyla tahrik yapılacaksa, gerilim tam kontrollu bir alternatif akım köprüsüyle doğrultularak motora uygulanır. Kontrollu doğrultucuyla motor gerilimi, hızı ve devir yönü kontrol edilir. Bu motorlara akımı veren akım rayları, istasyonlara yerleştirilmiş orta gerilim şebekesine bağlı tali besleme istasyonlarından beslenirler. Bu istasyonlar kendi aralarında bağımsız olarak sistemi besleyebilecekleri gibi, bir ring şebekesi kurarak beraber beslemeye yapabilirler. Enerji kesilmeleri ve devreye taşıtların girip çıkmalarında oluşacak olumsuz etkiler gözönüne alınır-sa, ring şebekesinin ÜYET'i beslemesi daha avantajlı olur. Böyle bir besleme şeklinde, ulaşım sisteminin bir noktadan beslenmesi yerine birkaç noktadan beslenmesi için normal şebekeye bağlanması uygun olur. Bu bağlantı noktaları, tali transformatör istasyonları olur. Bunlar da istasyon binaları içindedir. Tali besleme merkezlerinde transformatör uçlarında ring şebeke için yük ayırıcı anahtarlar konur. Ulaşım sisteminin kendisine ait olan ring şebekesi, ring kablunun taşıyıcı direkler üzerinde taşınmasıyla oluşur. Yerde yapılması gereken birşey yoktur.

Şekil 4.34'den görüldüğü gibi, ring şebekedeki tali istasyonda, hattı besleyen transformatorlerden başka iki transformator daha vardır. Bunlar, her hangi bir anda enerji kesilmesi durumunda, ring şebekenin diğer bölümlerinden bu istasyonu beslerler.

Akım rayları, istasyonlarda besleme merkezlerinden ayrılmışlardır. Böylece, oluşturulan besleme alanı tali santrallerle iki taraflı beslenir. Bir tali merkezin devre dışı kalmasında, buna ait besleme bölümlerinin akım ihtiyacı, her iki komşu tali santral arasında bulunan istasyonda ki ilave akım rayı yoluyla karşılanır. Bu raylar ek ayırma yerleriyle ayrılmıştır. Normal durumda bu ilave ayırma yerleri, bağlama şalterleriyle köprülenmiştir. Üst raylı sistemin beslenmesi dışardan etkilenmeyecek şekilde, kendi içinde güvenli bir biçimde yapılmış olur.



Şekil 4.34. ÜYET sisteminin prensip besleme şebekesi

5. SONUÇ

Görüldüğü gibi, modern elektrikli ulaşım sistemleri sürekli ve hızlı bir şekilde gelişme göstermektedir. Güç elektroniği elemanlarının gelişmesi, cer sistemlerindeki problemlerin çözümüne önemli ölçüde yardımcı olmakta ve önemli bir yer tutmaktadır. Aplikasyonlar bölümünde incelendiği gibi modern cer taşıtlarının gelişimi, üç-faz asenkron motor tahriki kullanımıyla yoğunlaşmaktadır. Raylı sistemlerde, üç faz tahrikin bundan sonra da ekonomik kriterler doğrultusunda önemli bir yer tutacağı ve DC tahrik sistemlerine oranla daha çok alanda kullanılacağı sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bundan sonra raylı sistemler üzerine yapılacak araştırma ve çalışmaların, ideale yakın olması nedeniyle üç-faz tahrik sistemleri üzerine olacağı bir gerçektir.

5. T. Suzuki, M. Tachibana: "DC Power Supply System with Inverting substations for traction systems using regenerative brakes" IEE PROC., Vol. 129, Pt. 2, No. 2, JANUARY 1982, pp. 21-25.
7. WUNDER, R.: "Three-Phase Drive Systems Used From Inverter for the Intercity Experimental Trainset of German Federal Railway". Brown Boveri Rev., 12-1984, pp. 630-634.
8. "M. BAHN Maglev Train Berlin" Katalog, IBB.
9. "SBB-FURS DC Chopper for City Transport Systems".
10. "Four-Axis Motor Coach with GTO Chopper of A/S Gule Svervaler" Katalog, IBB.
11. "M. BAHN with regenerative brake and standby generating set" Katalog, IBB.
12. "Articulated Trolleybus for Seattle, USA" Katalog, IBB.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

1. ABUT, Nurettin: "Türkiye'de Kentsel Elektrikli Ulaşımın ÜYET'in Kullanılabilirlik Araştırması". Doktora Tezi. Yıldız Üniversitesi-İstanbul-1988. SS.35-106.
2. BALZARINI, G.; HALLER B.: "New Class Re 4/4 Main-Line Locomotives for Private Railways in Switzerland" Brown Boveri Rev., 12-1987, ss.653-659.
3. BRECHBUHLER, M.; SKRABO, B.: "The static Converters as Modern Power Controller". Brown Boveri Rev., 12-1982, ss.448-450.
4. ETTE, P.: "electronic Systems for Traction Vehicle Drives" Brown Boveri Rev., 12-1982, ss.437-440.
5. KUHRER, F.: "The Three-Phase Electric Locomotives of Austrian Federal Rail ways". Brown Boveri Rev., 12-1987, ss.653-659.
6. T.Suzuki, B.Tech.: "DC Power-Supply System with inverting substations for traction systems using regenerative brakes" IEE PROC., Vol. 129, Pt.B, No.1, JANUARY 1982, ss.18-26.
7. WINDEN, R.: "Three-Phase Drive Systems from Brown Boveri for the Intercity Experimental Trainset of German Federal Railway". Brown Boveri Rev., 12-1986, ss.680-684.
8. "M.BAHN Maglev Train Berlin" Katalog, AEG.
9. "SEMIPULS DC Chopper for City Transport Systems".
10. "Four-Axle Motor Coach with GTO Chopper of A/s Oslo Sporveier" Katalog, AEG.
11. "Trolleybus with regenerative brake and standby generating set" Katalog, AEG.
12. "Articulated Trolleybus for Seattle, USA" Katalog, SIEMENS

13. "Berlin Underground Series F .84/F 87 Two-Car Units with Tree-Phase Drive,".Katalog, AEG.
14. "Madrid Metro Series 2000-1 Undergraund Two-Car Unit with Three-Phase Propulsion Technology". Katalog AEG.
15. URAL,Atıf: "Modern Elektrikli Ulaşım Sistemleri". Ders Notları, Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987.
16. URAL,Atıf: "İleri Tahrik" Ders Notları, Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987.
17. HALICI, Kemal: "Lineer Kontrol Sistemleri". Ders Notları Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987.
18. YÜKSELER, Nusret: "Enerji Sistemleri Hesap Yöntemleri". Ders Notları, Y.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987.
19. ABUT-Nurettin; AKCA, Üzeyir: "GTO (Gate Turn-off: Kapıdan Söndürmeli) Tristörlerin Kullanıldığı Güç Anahtarlarının Bugünü ve Geleceği". Elektrik Mühendisliği, 353-1988, ss.105-107.
20. ABUT,Nurettin: "Çağdaş Üst Yollu Elektrikli Toplu Taşıma Sistemlerindeki Gelişmeler (Magnetik Trenler)". Konferans Y.Ü.Kocaeli Mühendislik Fakültesi, 14 Aralık 1987.

Ö Z G E Ç M İ Ş

Üzeyir AKCA, 1963 yılında Salihli'de doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Salihli'de yaptı. 1980 yılında Salihli Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünden mezun olarak 1982 yılı sonuna kadar (iki yıl) Sümerbank Salihli Palamut ve Valeks Sanayiinde Elektrik Bakım Teknisyeni olarak çalıştı. 1986 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünden mezun oldu ve Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı.



