

154599

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜK BİLEŞENLERİNİN STATİK VE DİNAMİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN GERİLİM KARARLILIĞINA
ETKİSİ

Elektrik Müh. İsmail Devrim KILINÇARSLAN

F.B.E Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Mühendisliği Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR
Doç. Dr. Halim İsmail

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜÇ SİSTEM KARARLILIĞINI TANIMLAMA ve SINIFLAMA	4
2.1 Güç Sistem Kararlılığının Sınıflandırılması	6
2.1.1 Rotor Açısı Kararlılığı	7
2.1.1.1 Küçük Bozucu Etki (veya Küçük Sinyal) Rotor Açısı Kararlılığı	8
2.1.1.2 Büyük Bozucu Etki Rotor Açısı Kararlılığı veya Geçici Kararlılık	8
2.1.2 Gerilim Kararlılığı	9
2.1.2.1 Büyük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı.....	11
2.1.2.2 Küçük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı.....	12
2.1.3 Frekans Kararlılığı	13
2.2 Gerilim Kararlılığı ile Rotor Açısı Kararlılığı Arasındaki İlişki	14
2.3 Güvenilirlik, Güvenlik ve Kararlılık Aarasındaki İlişki	15
3. GÜÇ SİSTEM GERİLİM KARARLILIĞI	17
3.1 Yük Karakteristikleri	17
3.1.1 Sabit Empedanslı Yükler	17
3.1.2 Sabit Akımlı Yükler.....	18
3.1.3 Sabit Güçlü Yükler	18
3.2 İletim Hatları	19
3.2.1 Kısa İletim Hatları	19
3.2.2 Orta Uzunluktaki İletim Hatları	20
3.2.3 Uzun İletim Hatları	21
3.3 Gerilim Kararlılığı Analizleri: P-V Eğrileri.....	24
3.3.1 Radyal Bir İletim Hattı için P-V Eğrilerinin Elde Edilmesi	25
3.4 Kritik Değerlerin Elde Edilmesi	26
3.5 Gerilim Kararlılığının Radyal Sistemler için İrdelenmesi	29
4. YÜK BİLEŞENLERİNİN STATİK VE DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİ ...	33

4.1	Gerilimin Azalması.....	34
4.2	Gerilim Azalmasına Karşı Genel Yük Cevabı.....	35
4.3	Çeşitli Yük Bileşenleri.....	36
4.3.1	Aydınlatma.....	36
4.3.2	Asenkron Motorlar.....	36
4.3.2.1	Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi.....	38
4.3.2.2	Asenkron Motor Karakteristikleri.....	39
4.3.2.2.1	Güç-Kayma Karakteristiği.....	39
4.3.2.2.2	Aktif Güç-Gerilim Karakteristiği.....	40
4.3.2.2.3	Reaktif Güç-Gerilim Karakteristiği.....	42
4.3.2.2.4	Motor Korumanın ve Starter Kontrolünün Etkisi.....	44
4.3.2.3	Asenkron Motor Dinamikleri.....	45
4.3.3	Havalandırma ve Isı Pompaları.....	48
4.3.3.1	Havalandırıcı Karakteristikleri.....	48
4.3.4	Ayarlı Hız Uygulamaları.....	50
4.3.5	Senkron Motorlar.....	51
4.3.5.1	Senkron Motorun Özellikleri.....	51
4.3.5.1.1	Senkron Motorun V Eğrileri.....	51
4.3.5.2	Senkron Motorun Eşdeğer Devreleri.....	54
4.3.6	Elektronik Güç Kaynakları.....	55
4.3.7	Sabit Enerji Yükleri ve Yük Diversitesi.....	55
4.3.7.1	Termostat Kontrollü Yük Düzeltimi.....	55
4.3.8	Yük Alanında Üretim (Kojenerasyon).....	58
4.4	Yük Sınıflama.....	59
4.5	Yük Modelleme.....	60
4.5.1	Statik Yük Modelleri.....	62
4.5.1.1	Üstel Yük Modeli.....	62
4.5.1.2	Polinom Yük Modeli.....	64
4.5.1.3	Üstel ve Polinom Modellerinin Karşılaştırılması.....	65
4.5.2	Dinamik Yük Modelleri.....	65
4.6	Karma Yükün Statik Karakteristikleri.....	68
5.	SAYISAL UYGULAMA.....	70
5.1	Çeşitli Yük Bileşenleri için Yapılan Statik Analizler.....	77
5.2	P-V Eğrisinin Elde Edilmesi.....	87
5.3	Dinamik Analiz.....	88
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	95
	KAYNAKLAR.....	98
	EK.....	100
	Ek 1 Asenkron motorun dinamik denkleminin hareket denkleminden türetilmesi.....	101
	ÖZGEÇMİŞ.....	102

SİMGE LİSTESİ

A, B, C, D	İletim hattının genelleştirilmiş devre sabitleri
C	km. başına faz-nötr kapasitesi
$\cos \varphi$	Güç faktörü
D	Damping katsayısı
D_p	p.u. cinsinden aktif güç frekans damping katsayısı
D_q	p.u. cinsinden reaktif güç frekans damping katsayısı
E'	Geçici iç gerilim
Δf	p.u. cinsinden frekans değişimi
g	km. başına faz şönt kondüktansı
G	Kondüktans
G_k	k. bileşenin kondüktansı
G_{maksimum}	Maksimum kondüktans
I	Akım
I_m	Asenkron motorun atalet momenti
I_r	Alıcı uç akımı
I_s	Gönderici uç akımı
I_u	Uyartım akımı
I_y	Yük akımı
k	Güç faktörüne bağlı olarak değişen bir sabit
ℓ	Hat uzunluğu
M	Generatör atalet momenti
N_m	Yükün motor olan kısmı
P	Aktif güç
P_0	Sabit güç
ΔP	Aktif güçteki değişim
P_e	Elektriksel aktif güç
pf	Güç faktörü
pf_{mm}	Yükün motor olmayan kısmının güç faktörü
P_k	k. bileşenin istenilen aktif gücü
P_{KAYIP}	Kayıp güç
P_m	Asenkron motor mekanik gücü
P_M	Generatör mekanik gücü
P_{maksimum}	Maksimum aktif güç
P_r	Alıcı uç aktif gücü
P_{kritik}	Kritik güç
P_{sc}	Kısa devre gücü
P_u	p.u. cinsinden aktif güç
$P_{\text{yük}}$	Yükün aktif gücü
Q	Reaktif güç
Q_M	Motorun mıknatıslanma reaktansından kaynaklanan reaktif güç
Q_s	Motorun yükünden kaynaklanan reaktif güç

Q_u	p.u. cinsinden reaktif güç
R	Direnç
R_r	Rotor direnci
R_s	Stator direnci
s	Kayma
S	Kompleks güç
S_r	Alıcı ucun kompleks gücü
s_{kritik}	Kritik kayma
ΔT	Sıcaklık farkı
$\tan \alpha$	Hat kayıp faktörü
$T_{\text{çökme}}$	Gerilimin çökme süresi
t_{devrede}	Termostat kontrollü yükün devrede olduğu süre
$t_{\text{devredisi}}$	Termostat kontrollü yükün devrede olmadığı süre
$T_{\text{gerçek}}$	Gerçek sıcaklık
T_L	Yükün zaman sabiti
T_m	Mekanik moment
V	Yük gerilimi
ΔV	Gerilimdeki değişim
V_{durdurma}	Durdurma gerilimi
V_{faz}	Faz-nötr gerilimi
V_N	Nominal gerilim
V_r	Alıcı uç gerilimi
V_{kritik}	Kritik gerilim
V_s	Gönderici uç gerilimi
X	Reaktans
X'	Kilitli rotor kısa devre reaktansı
X_M	Mıknatıslanma reaktansı
X_r	Rotor kaçak reaktansı
X_s	Stator kaçak reaktansı
w	Asenkron hız
w_s	Senkron hız
ω	Açısal hız
y	km. başına hat şönt admittansı
Y	Toplam şönt admittans
z	km. başına hat empedansı
Z	Empedans
Z_c	Karakteristik empedans
α_f	Aktif gücün frekansa bağlı üsteli
α_{fmm}	Yükün motor olmayan kısmı için aktif gücün frekansa bağlı üsteli
α_v	Aktif gücün gerilime bağlı üsteli
α_{vmm}	Yükün motor olmayan kısmı için aktif gücün gerilime bağlı üsteli
β_f	reaktif gücün frekansa bağlı üsteli

β_{fmm}	Yükün motor olmayan kısmı için reaktif gücün frekansa bağlı üsteli
β_v	reaktif gücün gerilime bağlı üsteli
β_{vmm}	Yükün motor olmayan kısmı için reaktif gücün gerilime bağlı üsteli
f_k	Görev çevrim parametresi
δ	Açısal yer değiştirme
δ_{kritik}	Kritik açı
$\Delta\tau$	Motor momentindeki değişim
$\tau_{\text{gerçek}}$	Gerçek motor momenti
τ_{nominal}	Nominal motor momenti



KISALTMA LİSTESİ

A.A.	Alternatif Akım
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Btu	British Thermal Unit
D.A.	Doğru Akım
D.İ.E.	Devlet İstatistik Enstitüsü
EHV	Çok Yüksek Gerilimli (Extra High Voltage)
HP	Beygir Gücü (Horse Power)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (ABD)
NERC	North American Electric Reliability Council
pf	Güç Faktörü (Power Factor)
SIL	Karakteristik Empedans Yüklenmesi (Surge Impedance Loading)
YGDA	Yüksek Gerilim Doğru Akım



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Güç sistem kararlılığının sınıflandırılması	6
Şekil 2.2: Farklı kararlılık tipleri	14
Şekil 3.1: İletim hattının iki uçlu gösterimi	19
Şekil 3.2: Kısa hat modeli.....	20
Şekil 3.3: Orta uzunluktaki iletim hattı için nominal π modeli	20
Şekil 3.4 Uzun iletim hattı için eşdeğer π modeli.....	23
Şekil 3.5: Radyal iletim hattına ilişkin P-V eğrisi	23
Şekil 3.6: Rezistif yük ve reaktans iletim hattı için gerilim, akım ve güç ilişkileri.....	25
Şekil 4.1: Genel yük cevabı	35
Şekil 4.2: Gerilim karakteristikleri a) Akkor flâmanlı lamba b) Deşarj aydınlatması.....	36
Şekil 4.3: 230V, 20HP, üç fazlı bir asenkron motor için statik aktif (koyu çizgiler) ve reaktif güç (kesikli çizgiler)/gerilim eğrileri.....	37
Şekil 4.4: Asenkron motorun sürekli hal eşdeğer devresi	38
Şekil 4.5: Asenkron motorun basitleştirilmiş sürekli hal eşdeğer devresi	39
Şekil 4.6: Asenkron motorun a) V geriliminin farklı değerlerindeki $P_e(s)$ karakteristiği b) sabit momentle yüklenmiş motorun $P_e(V)$ karakteristiği.....	40
Şekil 4.7: Asenkron motorun reaktif güç-gerilim karakteristiği.....	43
Şekil:4.8: Starter kontrollü bir asenkron motorun karakteristikleri a) ağır kalkış yüklü durumda b) hafif kalkış yüklü durumda	44
Şekil 4.9: Asenkron motorun geçici hal eşdeğer devresi.....	45
Şekil 4.10: Örneğe ait eşdeğer devre	46
Şekil 4.11: Gerilimdeki azalma sonucu kaymadaki azalmaya ait moment-hız eğrisi	46
Şekil 4.12: Kondansatörün enerjilenmesi ile ilk andaki A ve B anlarındaki çalışmanın C noktasındaki son çalışma anına ait P-V eğrisi	47
Şekil 4.13: 208/230V, 119000BTU'da üç fazlı merkezi havalandırma için statik aktif ve reaktif gücün gerilime göre değişim eğrileri.....	48
Şekil 4.14: 46000 Btu/hr havalandırıcı için ani talep-çevre sıcaklığı ilişkisi	49
Şekil 4.15: a) Yük akımının b) Güç faktörünün uyartım akımı ile değişim eğrileri	52
Şekil 4.16: Senkron motorun çeşitli yüklerdeki V eğrileri	53
Şekil 4.17: Senkron motorun çeşitli yüklerde güç faktörü eğrileri.....	53
Şekil 4.18: Senkron motorun sürekli hal eşdeğer devresi.....	54
Şekil 4.19: Senkron motorun geçici hal eşdeğer devresi	54
Şekil 4.20: Paralel bağlı termostat kontrollü cihazkar	56
Şekil 4:21: Termostat görev çevrimi	56
Şekil 4.22: Sabit güç yükünün adım cevabı.....	66
Şekil 4.23: a) Geniş ağır yükli asenkron motorların gerilim karakteristiği b) Isıtma ve aydınlatmadan oluşan bir yükün gerilim karakteristiği	68
Şekil 5.1: Gerilimde yaşanan %10'luk düşüş.....	70
Şekil 5.2: Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, sabit empedans yükünün cevabı.....	71
Şekil 5.3: Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, sabit akım yükünün cevabı.....	71
Şekil 5.4: Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, sabit güç yükünün cevabı	72
Şekil 5.5: Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, sabit güç yükü kondüktansının cevabı	72
Şekil 5.6: Sabit empedans yükünün MATLAB&Simulink programındaki modeli	73
Şekil 5.7: Sabit akım yükünün MATLAB&Simulink programındaki modeli	73
Şekil 5.8: Sabit güç yükünün MATLAB&Simulink programındaki modeli.....	73
Şekil 5.9: Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, %50 sabit güç, %50 sabit empedans yükünden oluşan karma yükün zamana göre değişimi	74
Şekil 5.10: Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, %50 sabit güç, %50 sabit akım yükünden oluşan karma yükün zamana göre değişimi	74

Şekil 5.11: Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, %50 sabit güç, %25 sabit akım, %25 sabit empedans yükünden oluşan karma yükün zamana göre değişimi	75
Şekil 5.12: %50 sabit güç, %50 sabit empedans yükünden oluşan karma yükün MATLAB&Simulink programındaki modeli	75
Şekil 5.13: %50 sabit güç, %50 sabit akım yükünden oluşan karma yükün MATLAB&Simulink programındaki modeli	76
Şekil 5.14: %50 sabit güç, %25 sabit akım, %25 sabit empedans yükünden oluşan karma yükün MATLAB&Simulink programındaki modeli	76
Şekil 5.15: Rampa fonksiyonu biçiminde azalan bir gerilim değişimi.....	77
Şekil 5.16: Rampa fonksiyonu biçiminde artan bir gerilim değişimi.....	78
Şekil 5.17: Akkor flamanlı lamba için azalan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.....	78
Şekil 5.18: Akkor flamanlı lamba için artan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.....	79
Şekil 5.19: Üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu için azalan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim	80
Şekil 5.20: Üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu için artan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim	80
Şekil 5.21: Üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu için azalan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim	81
Şekil 5.22: Üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu için artan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim	81
Şekil 5.23: Büyük bir endüstriyel motor için azalan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim	82
Şekil 5.24: Büyük bir endüstriyel motor için artan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim	83
Şekil 5.25: Büyük bir endüstriyel motor için azalan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim	83
Şekil 5.26: Büyük bir endüstriyel motor için artan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim	84
Şekil 5.27: Ticari amaçlı merkezi bir havakandırıcı için azalan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim	85
Şekil 5.28: Ticari amaçlı merkezi bir havakandırıcı için artan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim	85
Şekil 5.29: Ticari amaçlı merkezi bir havakandırıcı için azalan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim.....	86
Şekil 5.30: Yapılan statik analizler için MATLAB&Simulink programındaki genel model ...	86
Şekil 5.31: Analiz için örnek sistem	87
Şekil 5.32: Örnek sistem için çeşitli güç faktörü değerlerinde P-V eğrileri	87
Şekil 5.33: Dinamik analiz için kullanılan MATLAB&Simulink modeli.....	91
Şekil 5.34: Yük geriliminin zamana göre değişimi	91
Şekil 5.35: Açısal hızın zamana göre değişimi.....	92
Şekil 5.36: Açısal yer değiştirmenin zamana göre değişimi.....	92
Şekil 5.37: Yük gücünün zamana göre değişimi	93
Şekil 5.38: Yük kondüktansının zamana göre değişimi	93

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1: Gerilimdeki azalmaya karşılık bazı enerji sistemlerindeki güç talebinin değişimi	34
Çizelge 4.2: Kullanım yerlerine göre elektrik tüketimi 2001-2002.....	59
Çizelge 4.3: Tipik yük bileşenlerinin statik modelleri.....	61
Çizelge 4.4: Statik yüklerin gerilim ve frekans bağımlılıklarını gösteren parametreler.....	63
Çizelge 4.5: Statik yük frekans damping karakteristikleri.....	65
Çizelge 5.1: Örnek olarak kullanılan yük bileşenlerinin değerleri	77
Çizelge 5.2: Örnek olarak kullanılan yük bileşenlerinin değerleri	82
Çizelge 5.3: Yük, şebeke ve generatör parametreleri	90
Çizelge 5.4: Farklı zaman sabitlerine sahip yükler için gerilim çökme süreleri.....	94



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, farklı karakteristiklere sahip yüklerin güç sistem kararlılığı üzerindeki etkileri ele alınmıştır.

Tez çalışmam süresince, bilgilerinden yararlandığım ve benden her konuda yardımını esirgemeyen tez danışmanım sayın danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos, 2004, İsmail Devrim KILINÇARSLAN



ÖZET

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın giderek arttığı günümüzde, daha güvenilir ve kaliteli bir enerjinin sunulabilmesi için elektrik güç sisteminin planlanması, işletilmesi ve kontrol edilmesinde güç sistem kararlılığının dikkate alınması gerekmektedir. Elektrik güç sisteminde kararlılığa etki eden çeşitli parametreler vardır. Bunlardan biri de yük bileşenlerinin karakteristikleridir.

Bu çalışmada, güç sistem kararlılığına etki eden, farklı karakteristiklere sahip yük bileşenleri ele alınmıştır. Öncelikle farklı yük bileşenlerinin yük gerilimlerine verdikleri cevaplar analiz edilmiştir. Daha sonra ise örnek bir güç sistemi üzerinde farklı zaman sabitlerine sahip yükler için gerilim çökmesini gösteren bir dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yük bileşenleri, yük karakteristikleri, gerilim kararlılığı güç sistemi, gerilim çökmesi.

ABSTRACT

Today, as the energy necessity increases day by day, it is required to take into consideration the stability of the power system at the planning, operating and controlling of an electrical power system for serving more reliable and more qualified energy. There are various parameters affecting the stability in the electrical power system. One of them is the characteristics of load components.

In this study, load components which have different characteristics are examined which affect the power system stability. Firstly, the responses of different load components after a voltage decrease are analyzed. After this, a dynamic analysis which illustrates voltage collapse for loads which have different time constants is realized on a sample power system.

Key words: Load components, load characteristics, voltage stability, power system, voltage collapse.



1. GİRİŞ

Nüfus ve teknolojiadaki gelişmeler ile elektrik enerjisi tüketim merkezleri büyümektedir. Bu durum, elektrik enerjisinin tüketim yerlerinden oldukça uzak mesafelerde ve büyük güçlü merkezlerde üretilip, enerji iletim hatları ile çeşitli bölgelere dağıtılmasını gerektirmektedir (Padıyar, 1995). Dolayısı ile güç kalitesi ile ilgili sorunlar da günümüzde daha etkin bir biçimde ortaya çıkmaktadır.

Daha güvenilir ve kaliteli bir enerji için elektrik güç sisteminin planlanması, işletimi ve kontrolünde, güç sisteminin kararlılığı önemli bir etken olarak karşımıza çıkar. Güç sistemlerinde kararlılık, bozucu bir etkiye maruz kalan bir sistemin, bozucu etki sonrası tekrar, bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönme yeteneğidir. Bir başka deyişle, güç sisteminin normal çalışma koşulları altında çalıştığı denge durumunu koruması ve bozucu bir etkiye maruz kaldıktan sonra yeniden kabul edilebilir bir denge durumu kazanmasıdır (Uzunoğlu, 2000). Aynı zamanda kararlılık için şu tanım da yapılabilir; denge halini sürdürebilmek için, onarıcı etkilerin, bozucu etkilere eşit veya daha fazla olmasını sağlayan, güç sisteminin doğal yeteneğine kararlılık denir (Saadat, 1999).

Elektrik enerjisinin üretiminde güç sistemleri, senkron makinelere bağlı olduğundan, sistemin kararlı çalışmasını sağlamak için gerekli koşul, tüm senkron makinelerin eşzamanlı (senkron) kalma yeteneğidir (Uzunoğlu, 2000). Yani makinelerin birbiri ile eşzamanlı olarak çalışmalarını sağlayan etkiler, bozucu etkileri engelleyecek kadar güçlü ise, sistem eşzamanlıdır ve kararlılığını koruyor demektir (Saadat, 1999). Bu kararlılık düşüncesi, generatör rotor açıları ve güç açıları ile ifade edilebilir ve bundan dolayı rotor açısı kararlılığı olarak da anılır (Uzunoğlu, 2000).

Gerilim kararlılığı, bir enerji sisteminin gerek normal koşullarda ve gerekse bozucu bir etki yaşandıktan sonra da, sistemdeki tüm baraların kabul edilebilir sınırlardaki gerilim değerlerini koruyabilme yeteneği olarak tanımlanabilir (Savaşan, 1996). Ekonomik ve çevre ile ilgili nedenler yüzünden elektrik enerjisinin uzun mesafelere iletimi söz konusu olduğu ve gerilim kararsızlığı çok sayıda şebeke çökmesine neden olduğu için, gerilim kararlılığı son yıllarda büyük bir önem kazanmıştır (Uzunoğlu, 2000; Padıyar, 1995).

Birçok gerilim çökmesi, gerilimdeki periyodik yavaşça azalmanın ardından aniden hızlanarak ani bir çökme oluşması şeklinde meydana gelir. Gerilim çökmesi, enterkonnekte taşıyıcı güç sistemlerinin ekonomik ve çevresel etkenler dolayısı ile karmaşık bir sistemden oluşması sonucu işletme sırasında gerilim kararlılık limitlerinin zorlanması ile gerçekleşmektedir.

Gerilim kararsızlığı genel olarak, güç sisteminin tasarlanandan daha çok yüklenmesi ile oluşur. Bununla birlikte gerilim çökmesinde, sistemde meydana gelen bozucu etki, kısa devre ve reaktif güç yetersizliği gibi durumlar da meydana gelir (Chiang, Dobson, Thomas, Thorp, Fekih-Ahmed, 1990). Son yıllarda, gerilim kararsızlığı, çoğu ciddi ana şebeke çökmelerine neden olmuştur. Bazı önemli olaylar şu şekilde sıralanabilir:

- 22 Eylül 1970 tarihinde New York Power Pool, ABD
- 28 Aralık 1982 ve 17 Mayıs 1985 tarihlerinde Florida, ABD
- 19 Aralık 1978 ve 12 Ocak 1987 tarihlerinde FRANSA
- 4 Ağustos 1982 tarihinde KUZEY BELÇİKA
- 27 Aralık 1983 tarihinde İSVEÇ
- 23 Temmuz 1987 tarihinde JAPONYA (Savaşan, 1996; Taylor, 1992).

Son olarak 14 Ağustos 2003'te ABD'nin kuzeyinde yaşanan gerilim çökmesi, günümüzde güç sistem mühendisliği açısından gerilim kararlılığının ne derece önemli bir konu olduğunu bir kere daha göstermiştir.

Gerilim kararsızlığı ve gerilim çökmesi sorunlarında en temel faktörlerden biri yüklerdir. Özellikle sabit güç çekme karakteristiğine sahip yükler, gerilim kararsızlığı sorunlarına neden olabilirler. Örneğin, bozucu bir etkiye cevaben, yüklerin tükettiği güçler, motorun kayma ayarı, dağıtım gerilim regülatörleri, kademe değiştirme transformatörleri ve termostat hareketleri ile düzelmeye meyillidirler. Güç talebindeki düzelme biçimindeki bu davranış, reaktif güç tüketimini ve gerilimdeki azalmayı artırarak yüksek gerilim hattının stresinin artmasına neden olur. Bunun sonucunda ise, gerilim kararsızlığı ve hatta gerilim çökmesi ile karşılaşılabilir. Dolayısıyla, güç sistemlerinde gerilim kararlılığı ile ilgili herhangi bir analiz yapılmadan önce, yük bileşenlerini ve bu bileşenlerin kendilerine özgü statik ve dinamik karakteristiklerini incelemek gerekmektedir. Gerilim kararlılık analizi ancak, yüklerin statik ve dinamik karakteristikleri iyice algılandıktan sonra yapılacak doğru yük modellemeleri ile gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmanın gelişim planı aşağıda açıklandığı gibidir:

İkinci bölümde, elektrik güç sistem kararlılığının tanımlanması ve sınıflandırılması ile kararlılık, güvenlik ve güvenilirlik arasındaki ilişki açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, yük karakteristikleri, iletim hatları, P-V eğrileri ve gerilim kararlılığı açısından kritik değerlerin elde edilmesi açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, gerilim kararlılığı açısından çeşitli yük bileşenlerinin statik ve dinamik karakteristikleri, yük sınıflama ve yük modelleme

açıklanmıştır. Beşinci bölümde, statik ve dinamik sayısal uygulamaya yer verilmiştir. Öncelikle, farklı yük bileşenleri için statik analiz gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, örnek bir sistem üzerinde P-V eğrileri elde edilip, dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

Ek 1'de ise, asenkron motorun dinamik denkleminin hareket denkleminde türetilmesi verilmiştir.



2. GÜÇ SİSTEM KARARLILIĞINI TANIMLAMA VE SINIFLAMA

Güç sistem kararlılığı, 1920'lerden bu yana güvenli bir sistem çalışması için önemli bir sorun olmaktadır. Güç sistem kararsızlığından kaynaklanan bazı büyük elektrik kesintileri bu konunun önemini göstermektedir. Yeni teknolojilerin ve kontrol mekanizmalarının kullanımı ile enterkonnekte uygulamalardaki artışın devamı ile birlikte güç sistemlerindeki gelişme ve yüksek stresli koşullarda çalışmanın artması ile sistem kararsızlığının değişik şekilleri ortaya çıkmıştır. Bu durum, güç sistem kararlılığının yeniden tanımlanıp sınıflandırılmasını bir ihtiyaç haline getirmiştir. Güç sistemlerinin tatmin edici tasarımı ve çalışması için farklı tipteki kararsızlıkların açıkça anlaşılması ve aralarındaki ilişkinin nasıl olduğunun belirlenmesine ihtiyaç vardır. Keza, sistem dizaynı ile çalışma kriteri, standart analitik gereçler ve çalışma prosedürlerini geliştirmek için tutarlı bir terminolojinin kullanımına ihtiyaç vardır.

Güç sistem kararlılığı, herhangi bir dinamik sistemin kararlılığı ile benzerdir ve matematiksel temele dayanır. Kararlılık ile ilgili açık tanımlar, dinamik sistemlerin kararlılığının karmaşık matematiksel teorisi ile ilgili literatürden bulunabilir.

Sistem değişkenleri sınırlandırılmış iken, verilen bir ilk çalışma koşulu için bir elektrik güç sisteminin fiziksel bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra, bütün sistem zarar görmeden dengede çalışma halini yeniden kazanabilme yeteneğine "güç sistem kararlılığı" denir (Kundur, Paserba, Ajjarapu vd, 2004).

Verilen bu tanım, enterkonnekte bir güç sisteminin tamamına uygulanır. Ancak genellikle, aynı zamanda özel bir generatörün veya bir grup generatörün kararlılığının ele alınması gerekir. Ana sistemin tamamını kararsız hale getirmeden, uzaktaki bir generatör kararlılığını (eşzamanlılığını) kaybedebilir. Benzer şekilde, özel yükler ve yük alanları incelenebilir; ana sistemin tamamı kararsız hale gelmeden, motor kararlılığını kaybedebilir (yavaşlayıp durabilir).

Güç sistemi, sürekli olarak değişen yükler, generatör çıkışları ve işletim parametrelerinden oluşan yüksek mertebeden nonlinear bir sistemdir. Bozucu bir etkiye maruz kaldığında sistemin kararlılığı, ilk çalışma koşulları kadar bozucu etkinin doğasına da bağlıdır.

Böylece bir elektrik güç sisteminin kararlılığı, bir denge ayarı etrafında (yani ilk çalışma koşulu) sistem hareketinin bir özelliğidir. Denge ayarında, sistemde bulunan farklı zıt güçler anlık olarak veya bir çevrim süresince eşittir.

Güç sistemleri, küçük ve büyük olmak üzere büyük çeşitlilik gösteren bozucu etkilere maruz kalırlar. Yük değişimleri biçimindeki küçük bozucu etkiler sürekli olarak meydana gelirler; sistem değişen koşullara kendini ayarlayabilmeli ve tatmin edici bir biçimde çalışabilmelidir. Aynı zamanda, iletim hattındaki bir kısa devre veya büyük bir generatörün kaybı gibi sert bozucu etkilerden sonra ayakta kalabilmelidir. Hataya uğrayan elemanlardaki izolasyondan dolayı büyük bir bozucu etki, yapısal değişimlere neden olabilir.

Bir denge ayarında güç sistemi, verilen büyük bir fiziksel bozucu etkiden sonra kararlı, bir diğerinden sonra ise kararsız olabilir. Güç sistemlerini olası her bozucu etki sonrasında kararlı olacak şekilde tasarlamak hem ekonomik hem de pratik değildir. Meydana gelme olasılığı yüksek durumlara göre dizayn olasılıkları belirlenir. Böylece, büyük bozucu etki kararlılığı, her zaman için özel bir bozucu etki senaryosuna aittir. Böylelikle kararlı bir denge durumunda sonlu bir çekim bölgesi vardır. Çekim bölgesi ne kadar büyükse, büyük bozucu etkilere karşı sistem o kadar dayanıklıdır. Çekim bölgesi, güç sisteminin çalışma koşulu ile değişir.

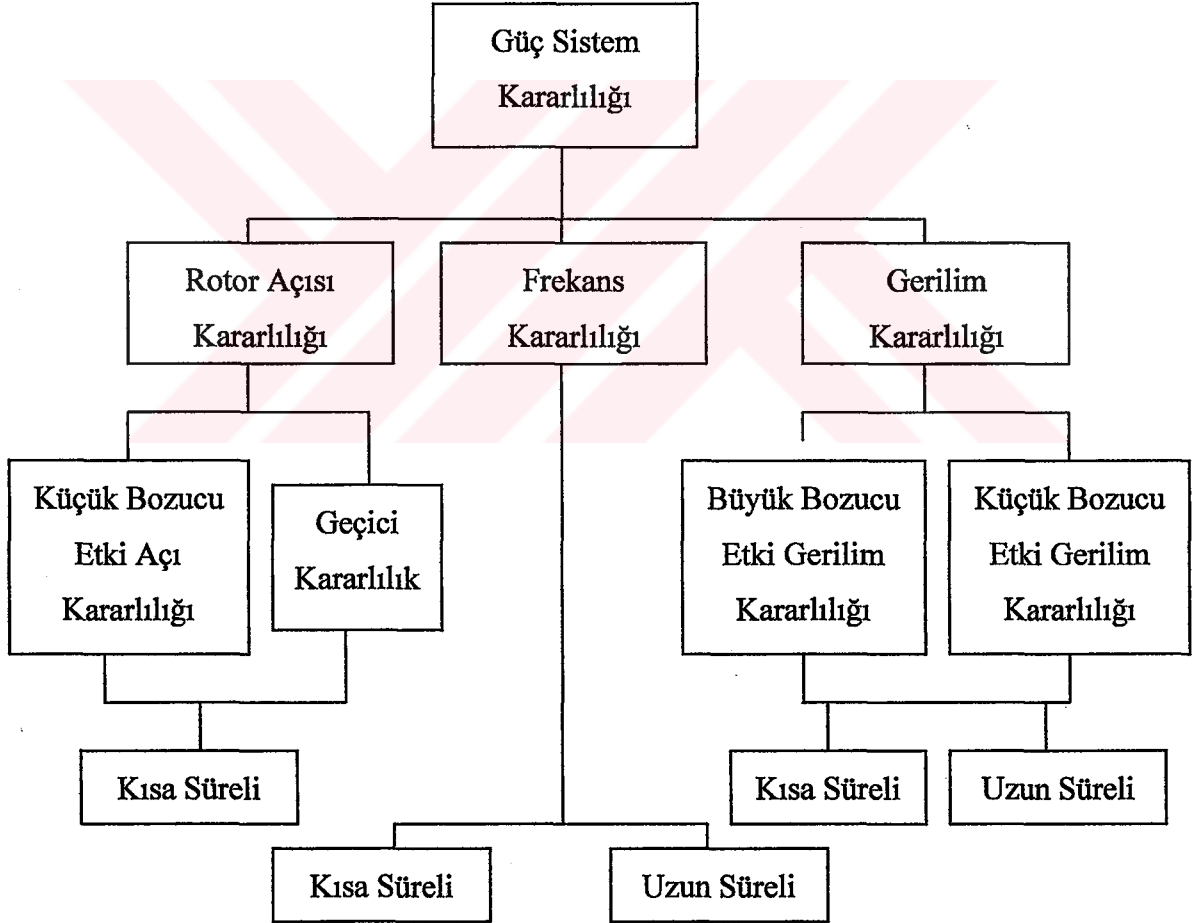
Bir bozucu etkiye güç sisteminin cevabı pek çok elemanı içerir. Örneğin, koruyucu röleler ile izole edilen kritik elemandaki bir hata, yük çıkışlarında, bara gerilimlerinde ve makine rotor hızlarında değişimlere neden olur. Gerilim değişimleri, hem generatör hem de iletim hattı gerilim regülatörlerini harekete geçirir. Generatör hız değişimleri, mekanik regülatörleri harekete geçirir ve böylece gerilim ve frekans değişimleri kendi özel karakteristiklerine göre sistem yüklerinin derecesini etkiler. Dahası, bazı elemanları korumak için kullanılan cihazlar, sistem değişkenlerindeki değişimlere cevap verebilirler ve elemanı devre dışı bırakabilirler. O suretle sistem zayıflar ve olası bir kararsızlığa gidebilir.

Eğer bir bozucu etki sonrası güç sistemi kararlı ise, sistem bütünlüğü bozulmadan bir denge haline ulaşmış demektir. Bu durumda pratik olarak, tek bir iletim hattı üzerinden bütün generatörler ve yükler birbirine bağlanmıştır. Hatalı elemanın izolasyonu veya bütün sistemin sürekli çalışmasını korumak için bazı generatörler ve yükler bağlanmamıştır. Büyük bozucu etkiler için enterkonnekte sistemler, üretim ve yükleri mümkün olduğu kadar koruyabilmek amacıyla iki veya daha fazla "bölgeye (adaya)" ayrılırlar. Otomatik kontrol cihazlarının ve olası insan operatörlerin hareketleri sonucunda sistem normal hale döner. Diğer taraftan, sistem kararsızsa, sistem yavaşlama veya durma durumuna gider. Bu durumda, örneğin generatör rotorları arasındaki açılal yer değiştirmenin gittikçe artması veya bara gerilimlerinin gittikçe azalması söz konusu olur. Kararsız sistem durumu, güç sisteminin büyük bir bölümünde kesintiye neden olabilir.

2.1 Güç Sistem Kararlılığının Sınıflandırılması

Güç sistem kararlılığı esasında tek bir problemdir, ancak bir güç sisteminin maruz kaldığı çeşitli kararsızlık şekilleri tam olarak anlaşılammakta ve verimli bir biçimde ele alınmamaktadır. Kararlılık sorunlarının çok boyutlu ve kompleks olmasından dolayı, uygun analitik tekniklerin seçilmesi ve detaylı sistemlerin belli bir mertebeye kadar olan kısmının ele alınması bu tip problemlerin analizlerinde çeşitli kabullerle basitleştirme yoluna gitmeye imkan tanır. Kararsızlığa yardımcı olan anahtar faktörleri tanımlayan ve kararlı çalışmayı geliştirmek için tasarlanmış metotları içeren kararlılık analizi, kararlılığın uygun kategoriler biçiminde sınıflandırılması ile büyük oranda kolaylaşır.

Şekil 2.1, güç sistem kararlılık sorununun kategorilerini ve alt kategorilerini gösteren bir şekildir. Aşağıda kararlılık olayının şekilleri ile ilgili tanımlar verilmiştir.



Şekil 2.1. Güç sistem kararlılığının sınıflandırılması.

2.1.1 Rotor Açısı Kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı, enterkonnekte bir güç sisteminde, bozucu bir etkiye maruz kaldıktan sonra senkron makinelerin eşzamanlılığını koruyabilme kabiliyeti ile ilgilidir. Rotor açısı kararlılığı, sistemdeki her bir senkron makinenin elektromanyetik momenti ile mekanik momenti arasında dengeyi sürdürme veya yeniden sağlayabilme yeteneğine bağlıdır. Bazı generatörlerde açısal salınımların artması biçiminde oluşan kararsızlık, bu generatörlerin diğer generatörlerle eşzamanlılığını kaybetmesine neden olur.

Rotor açısı kararlılığı sorunu, güç sistemlerinin doğasında var olan elektromanyetik osilasyonların çalışmasını içerir. Bu sorundaki temel bir faktör, senkron makinelerin güç çıkışlarının rotor açı değişimi ile değişmesidir. Sürekli hal durumları altında, her bir generatörün giriş mekanik momenti ile çıkış elektromanyetik momenti arasında bir denge vardır ve hız sabittir. Eğer sistem rahatsız edilirse bu denge bozulur ve sonuçta dönen bir cismin hareketi kanunlarına göre makinelerin rotorları hızlanır veya yavaşlar. Bir generatör, diğerine oranla geçici olarak daha hızlı hareket ediyorsa bu generatörün rotor açısal pozisyonu, yavaş makineye oranla ilerler. Oluşan bu açısal fark, güç-açı ilişkisine bağlı olarak yükün bir kısmının, yavaş olan makineden hızlı olan makineye geçmesini sağlar. Bu durum, hız farkını ve böylece açısal ayrılmayı azaltmaya yöneliktir. Güç-açı ilişkisi, büyük oranda nonlineerdir. Belirli bir limitin ötesinde, açısal ayırmadaki bir artış, açısal ayrılmadaki artışın daha da devam etmesi ile güç transferinde bir azalmayı beraberinde getirir. Eğer sistem, bu rotor açı farklarından oluşan kinetik enerjiyi ememezse kararsızlık oluşur. Verilen herhangi bir durum için, rotorların açısal pozisyonlarındaki ayrılmaların olup olmamasına bağlı olan sistem kararlılığı, yeterli düzeltici momentler ile sağlanır. Eşzamanlılığın kaybı, bir makine ile sistemin geri kalanı arasında veya makine grupları arasında oluşabilir, her bir grubun birbirinden ayrılması ile her bir grup içindeki eşzamanlılık sürdürülür.

Bozucu bir etki sonrası senkron bir makinenin elektromanyetik momentindeki değişim, iki bileşen ile ortadan kaldırılır.

- Eşzamanlılık moment bileşeni, faz başına rotor açı yer değiştirmesi,
- Azaltıcı (Damping) moment bileşeni, faz başına rotor hız yer değiştirmesi.

Sistem kararlılığı, her senkron makinenin, her iki moment bileşeninin de var olmasına bağlıdır. Yeterli eşzamanlılık momentinin olmayışı, aperiodyk veya salınımsal olmayan kararsızlık ile sonuçlanırken, azaltıcı momentin olmayışı, salınımsal kararsızlık ile sonuçlanır.

Analizin uygunluğu ve kararlılık sorunlarının doğasına yararlı bir bakış için, rotor açı

kararlılığını aşağıdaki iki alt kategori cinsinden karakterize etmek yararlıdır:

2.1.1.1 Küçük Bozucu Etki (veya Küçük Sinyal) Rotor Açısı Kararlılığı

Küçük bozucu etki rotor açısı kararlılığı, küçük bozucu etkiler altında güç sisteminin eşzamanlılığını sürdürebilme kabiliyeti ile ilgilenir. Bu bozucu etkiler, sistem denklemlerini analiz etme amaçlı lineerleştirmeye müsaade edecek kadar küçüktürler.

Küçük bozucu etki kararlılığı, sistemin ilk çalışma haline bağlıdır. Kararsızlık iki şekilde oluşabilir: (i) eşzamanlılık momentinin olmayışından kaynaklı olarak rotor açısında salınımsal olmayan veya aperiodyk modda bir artış veya (ii) yeterli azaltıcı momentin olmayışından dolayı rotor salınımlarının büyüklüğünün artması.

Günümüz güç sistemlerinde, küçük bozucu etki rotor açısı kararlılığı sorunu genellikle salınımlardaki yetersiz azaltıcı moment ile ilişkilendirilir. Sürekli hareket eden generatör gerilim regülatörleri ile aperiodyk kararsızlık sorunu büyük oranda ortadan kaldırılmıştır. Ancak bu sorun, generatörler sabit uyarım ile çalışırken uyarım sınırlayıcılarının (alan akım sınırlayıcıları) hareketlerine maruz kaldığında hâla oluşabilmektedir.

Küçük bozucu etki rotor açısı kararlılık sorunları, yerel veya küresel olabilir. Yerel sorunlar, güç sisteminin küçük bir kısmını içerir ve genellikle güç sisteminin geri kalanına oranla tek bir güç santralindeki rotor salınımları ile ilgilidir. Bu salınımlara “yerel santral modu salınımlar” denir. Bu salınımların kararlılığı, iletim hattının sağlamlığına, generatör uyarım kontrol sistemlerine ve güç santrali çıkışına bağlıdır.

Küresel sorunlar ise, büyük generatör gruplarının karşılıklı etkileşimlerinden oluşurlar ve çok geniş etkilere sahiptirler. Küresel boyuttaki sorunlar, bir alanda salınan bir grup generatörün salınımlarına karşın diğer bir alanda başka bir grup generatör salınımlarını içerir. Bu salınımlara “karşılıklı alan modu salınımları” denir. Bunların karakteristikleri çok karmaşıktır ve yerel santral modu salınımlarından önemli derecede ayrılırlar. Özellikle yük karakteristikleri, karşılıklı alan modlarının kararlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler.

Küçük bozucu etki kararlılık çalışmalarının zaman aralığı, bozucu etkiyi takiben 10 ila 20 saniye mertebeleridir.

2.1.1.2 Büyük Bozucu Etki Rotor Açısı Kararlılığı veya Geçici Kararlılık

Genelde olduğu gibi büyük bozucu etki rotor açısı kararlılığı, bir iletim hattı üzerinde kısa devre meydana gelmesi gibi ciddi bir bozucu etkiye maruz kalan güç sisteminin

eşzamanlılığını sürdürebilme yeteneği ile ilgilenir. Sonuçta oluşan sistem cevabı, generatör rotor açılarındaki büyük gelişigüzel hareketleri içerir ve nonlinear güç-açı ilişkisinden etkilenir.

Geçici kararlılık, hem sistemin ilk çalışma hali hem de bozucu etkinin şiddeti ile ilgilidir. Kararsızlık genellikle, eşzamanlılık momentinden dolayı aperiyodik açısal ayrılma biçimindedir ki bu da ilk salınım kararsızlığını gösterir. Buna karşılık, büyük güç sistemlerinde geçici kararlılık her zaman tek bir modla ilgili kararsızlık biçiminde olmaz. Rotor açısında ilk salınımın ötesinde büyük bir gelişigüzel harekete neden olan yavaş bir karşılıklı alan modu ve yerel bir santral salınım modunun süperpozisyonu ile de sonuçlanabilir. Aynı zamanda, ilk salınımın ötesinde kararsızlığa neden olan ve tek bir modu etkileyen nonlinear etkilerin bir sonucu da olabilir.

Geçici kararlılık çalışmalarında zaman süresi genellikle, bozucu etkiyi takip eden 3 ila 5 saniye civarındadır. Bu süre, çok geniş sistemlerdeki baskın nitelikteki karşılıklı alan salınımları için 10 ila 20 saniyeye kadar uzatılabilir.

Şekil 2.1’de belirtildiği gibi, hem küçük bozucu etki rotor açı kararlılığı hem de geçici kararlılık, kısa süreli olaylar olarak kategorize edilmiştir.

Literatürde aynı zamanda, rotor açı kararlılığının bir sınıfı olarak “**dinamik kararlılık**” terimi mevcuttur. Buna karşılık bu terim, değişik yazarlar tarafından değişik olayları göstermek için kullanılmıştır. Kuzey Amerika literatüründe bu terim, generatör kontrolleri olmayan klasik sürekli hal kararlılığından ayırmak için otomatik kontrollerin (özellikle üretim uyarım kontrolleri) kullanıldığı küçük bozucu etki kararlılığını göstermek için kullanılır. Avrupa literatüründe dinamik kararlılık çoğunlukla, geçici kararlılığı göstermek için kullanılmıştır. Dinamik kararlılık teriminin kullanımı ile ilgili pek çok kafa karışıklığı oluşmasından dolayı bu terimin kullanılmaması önerilir.

2.1.2 Gerilim Kararlılığı

Gerilim kararlılığı, verilen bir ilk çalışma koşulunda, yaşanan bir bozucu etki sonrasında güç sistemindeki bütün baraların sürekli gerilimlerini sürdürebilme kabiliyeti ile ilişkilidir. Gerilim kararlılığı, yük talebi ile güç sisteminin sağladığı yük arasında dengeyi sürdürebilme veya yeniden kazanabilme kabiliyetine bağlıdır. Oluşan kararsızlık, bazı baraların gerilimlerinde gittikçe artan bir artış veya azalma biçiminde oluşur. Gerilim kararsızlığının olası sonucu, bir alandaki yük kaybı veya sistemin bütününde kesintilere neden olan, iletim

hattının ve koruyucu sistemleri ile birlikte diğer elemanların devre dışı kalmasıdır. Bu kesintiler veya alan akım limitlerini ihlâl eden çalışma koşullarının sonucunda bazı generatörlerde eşzamanlılık kaybı görülebilir.

Bara gerilimlerdeki gittikçe artan düşüş aynı zamanda rotor açısı kararsızlığı ile de ilişkilidir. Örneğin, iki makine grubu arasındaki rotor açıları 180°'ye varması durumunda oluşan makineler arası eşzamanlılığın kaybı durumunda, elektrik merkezine yakın ara noktaların gerilimlerinde hızlı düşüşler görülür. Normal olarak, koruyucu sistemler iki makine grubunu ayırmaya çalışırlar ve ayırma sonrası koşullara bağlı olarak gerilimler eski seviyelerine geri dönerler. Ancak eğer, sistem yeteri kadar ayrılmamışsa, elektrik merkezine yakın gerilimler, iki makine grubu arasında tekrarlayan “kutup kayması” sonucunda hızlı bir biçimde büyük ve küçük değerler arasında salınırlar. Buna karşılık, gerilim kararsızlığı ile ilişkilendirilen gerilimdeki düşüş tipi, yükleri içerir ve rotor açısı kararlılığının sorun olmadığı yerlerde oluşabilir.

Aynı zamanda “gerilim çökmesi” terimi sıkça kullanılmaktadır. Bu terim, karartma veya güç sisteminin önemli bir kısmında anormal düşük gerilimler ile sonuçlanan ve gerilim kararsızlığına eşlik eden bir sıra olaylar sürecidir. Düşük gerilimde sürekli kararlı çalışma, yükün bir kısmının kasti ve/veya kasti olmadan devre dışı bırakılması ve transformatör kademe değiştiricilerinin üst limitine ulaşması ile sürdürülebilir. Devrede kalan yükler gerilime duyarlıdır ve nominal gerilimdeki taleple karşılaşılmaz.

Gerilim kararsızlığına sürükleyici güç genellikle yüklerdir. Bozucu etkiye cevaben yüklerin tükettiği güçler, motorun kayma ayarı, dağıtım gerilim regülatörleri, kademe değiştirme transformatörleri ve termostat hareketleri ile düzelmeye meyillidirler. Düzeltici yükler, reaktif güç tüketimini ve gerilimdeki azalmayı arttırarak yüksek gerilim hattının stresini arttırırlar. Gerilim kararsızlığına neden olan durma hali, yük dinamikleri, iletim hattı ve bağlı olan üretim kapasitesinin üzerinde düzeltmeye kalkıştığı zaman oluşur.

İletim hattının endüktif reaktansı üzerinden aktif ve reaktif güç akarken oluşan gerilim düşümü, gerilim kararsızlığına yardımcı önemli bir faktördür. Bu durumda, iletim hattının güç transferi ve gerilim desteği sınırlanır. Bazı generatörler kendi alan veya armatür akım- zaman aşırı yük limitlerine ulaştığında güç transferi ve gerilim desteği daha da sınırlandırılmış olur. Bir bozucu etki, reaktif güç talebini, mevcut reaktif güç kaynaklarının sürdürülebilir kapasitesi üzerinde arttırdığında, gerilim kararlılığı tehdit altındadır.

Gerilim kararsızlığının en sık görülen şekli bara gerilimlerinde gittikçe artan düşüş olmasına

rağmen, aynı zamanda, aşırı gerilim kararsızlığı riski de mevcuttur. Böyle bir durum, hattın kapasitif davranışı (çok yüksek gerilimli (EHV) iletim hatları karakteristik empedans yüklenmesi (SIL) altında çalışırken) ile yetersiz uyarım sınırlamasının, generatör ve/veya senkron kompanzatorlarının aşırı reaktif gücü bertaraf etmelerini engellemesi yüzünden meydana gelebilir. Bu durumda kararsızlık, bağlı olan üretim ve iletim sisteminin belirli yük seviyesinin altında çalışmasından kaynaklanmaktadır. Yük gücünü düzeltmek için yapılan müdahalede, kademe değiştirme transformatörü uzun zaman gerilim kararsızlığına neden olmuştur.

Gerilim kararlılık sorunları aynı zamanda, uzun mesafe veya geriye dönüş uygulamalarında kullanılan “Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA)” hatlarının kutuplarında da meydana gelebilir. Bu tip sorunlar genellikle, zayıf alternatif akım (a.a.) sistemlere bağlanan YGDA hatları ile ilgilidir ve doğrultucu veya inverter istasyonlarında meydana gelirler ve konverterlerin elverişsiz reaktif güç-yük karakteristiklerinden kaynaklanırlar. YGDA hat kontrol stratejilerinin bu sorunlar üzerinde çok önemli bir etkisi vardır, alternatif akım/doğru akım (d.a.) kavşağındaki aktif ve reaktif güç, bu kontrollerle belirlenir. A.A. iletimde sonuçta oluşan yüklenme, kapasitenin üzerinde ise, gerilim kararsızlığı oluşur. Gerilim kararsızlığı, bir saniye veya daha kısa sürede olacak kadar hızlıdır. Gerilim kararsızlığı aynı zamanda, daha yavaş bir olay olan konverter transformatör kademe değiştirme kontrol hareketleri ile ilgilidir. YGDA teknolojisindeki son gelişmeler (gerilim kaynağı konverterleri ve kapasitör komütasyonlu konverterler), zayıf sistemlerde YGDA hatlarının kararlı çalışması için limitleri, hat komütasyonlu konverterlere oranla büyük oranda artırmıştır.

Gerilim kararlılık sorununun bir şekli olan kontrol edilemeyen aşırı gerilimler, senkron makinelerin kendiliğinden uyarılmasından kaynaklanır. Senkron makinenin kapasitif yükü çok büyükse bu durum daha da gelişebilir. Kendiliğinden uyarımı başlatan aşırı kapasitif yükün örnekleri, açık uçlu yüksek gerilim hatları, şönt kapasitörler ve YGDA istasyonları için filtre bankalarıdır.

Rotor açılı kararlılığında olduğu gibi, gerilim kararlılığını da alt kategorilere ayırmak gerekir.

2.1.2.1 Büyük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı

Arızalar, üretim kaybı veya tesadüfi devre olayları gibi büyük bozucu etkilerden sonra sistemin sürekli gerilimlerini sürdürebilme yeteneğine “büyük bozucu etki gerilim kararlılığı” denir. Bu yetenek, sistem ve yük karakteristikleri ile sürekli ve süresiz kontrol ve koruma elemanlarının her ikisinin de karşılıklı etkileşimleri ile belirlenir. Büyük bozucu

etki gerilim kararlılığının belirlenmesi için, motorlar, yük altında kademe değiştiren transformatörler ve generatör alan akım sınırlayıcıları gibi bazı cihazların karşılıklı etkileşimlerini ve performansını yakalamada için yeterli bir zaman periyodu üzerinde güç sisteminin nonlinear cevabına gereksinim vardır. İlgilenilen çalışma süresi, birkaç saniyeden onlarca dakikaya kadar olabilir.

2.1.2.2 Küçük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı

Sistem yükündeki değişimler gibi küçük bozucu etkilerden sonra sistemin sürekli gerilimleri sürdürebilme yeteneğine “küçük bozucu etki gerilim kararlılığı” denir. Bu biçimdeki kararlılık, verilen andaki yükler ile sürekli ve süreksiz kontrol cihazlarının karakteristiklerinden etkilenir. Bu kavram, herhangi bir anda, sistem gerilimlerinin küçük sistem değişimlerine nasıl cevap vereceğini belirlemede gereklidir. Uygun varsayımlarla, analiz amaçlı olarak, sistem denklemleri lineerleştirilebilir ve o suretle kararlılığı etkileyen faktörlerin önemli duyarlılık bilgisinin hesaplanmasına izin verilir. Buna karşılık bu lineerleştirme, kademe değiştirici kontrolleri gibi nonlinear etkileri hesaba katmaz. Böylelikle tamamlayıcı bir usûlde, lineer ve nonlinear analizlerin bir kombinasyonu kullanılır.

Yukarıda belirtildiği gibi, gerilim kararlılığı sorunlarında ilgilenilen süre birkaç saniye ile onlarca dakika arasında değişebilir. Böylece, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi gerilim kararlılığı, kısa süreli veya uzun süreli bir olay olabilir.

Kısa süreli gerilim kararlılığı, asenkron motorlar, elektronik olarak kontrol edilen yükler ve YGDA konverterleri gibi hızlı hareket eden yük bileşenlerinin dinamiklerini içerir. Çalışma süresi birkaç saniye mertebesinde ve analiz, sistem diferansiyel denklemlerinin çözümünü gerektirir. Bu analiz, rotor açısı kararlılık analizi ile benzerdir. Yüklerin dinamik modellenmesi genellikle zorunludur. Ancak burada, rotor açısı kararlılığına ters olarak, yüklere yakın kısa devreler önem arz eder.

Uzun süreli gerilim kararlılığı, kademe değiştiren transformatörler, termostat kontrollü yükler ve generatör akım sınırlayıcıları gibi yavaş hareket eden ekipmanı içerir. Çalışma periyodu birkaç dakikaya kadar uzatılabilir. Çünkü sistemin dinamik performansının analizi için uzun süreli simülasyonlara ihtiyaç vardır. Kararlılık genellikle, ilk bozucu etkinin şiddetinden ziyade ekipmanın enerjisinin kesilip kesilmemesi ile belirlenir. Kararsızlık, dengenin kaybindan kaynaklanır. Örneğin yükler kendi güçlerini, sistem kapasitesinin üzerinde düzeltmeye çalıştıklarında bozucu etki sonrası sürekli hal çalışma noktası, kararsız olur veya bozucu etki sonrası kararlı dengeye doğru çekim söz konusu değildir. Bozucu etki aynı

zamanda, yük artımı biçiminde olabilir (örneğin, sabah saatlerinde yaşanan yük artışı). Bazı durumlarda, kararlılık sınırlarını ve kararlılığı etkileyen faktörleri belirleyebilmek ve sistem koşullarının çoğu ile çok sayıda senaryoyu görebilmek için statik analiz kullanılabilir. Kontrol hareketlerinin zamanlamasının önemli olduğu yerlerde, bu durum, yarı sürekli hal zaman domenli simülasyonlarla tümlenebilir.

2.1.3 Frekans Kararlılığı

“**Frekans kararlılığı**”, üretim ile yük arasında önemli bir dengesizlikle sonuçlanan, ciddi bir sistem bozucu etkisini takiben, güç sisteminin sürekli frekansı sürdürebilme kabiliyetidir. Bu durum, yükteki minimum kasıtsız kayıpla, sistem üretimi ile yük arasındaki dengeyi sürdürebilme veya yeniden kazanabilme kabiliyetine dayanır. Oluşan kararsızlık, üretim üniteleri ve/veya yükleri devre dışı bırakacak olan frekans salınımları biçiminde oluşur.

Büyük sistem bozucu etkileri genellikle, frekans, güç akışları, gerilim ve diğer sistem değişkenleri üzerinde büyük gelişigüzel hareketlere neden olur. O suretle, alelâde geçici kararlılık ve gerilim kararlılık çalışmalarında modellenmemiş süreçler, kontrol ve koruyucu ekipmanlarının etkilerine neden olurlar. Bu süreçler, buhar kazanı dinamiklerinde olduğu gibi yavaş olabilir ya da generatörleri devre dışı bırakan gerilim/frekans koruması gibi en uç sistem koşullarında harekete geçebilirler. Büyük enterkonnekte güç sistemlerinde, bu durum çoğunlukla, sistemleri bölgelere (adalara) böldükten sonraki koşullarla ilgilidir. Bu durumda kararlılık için soru, minimal kasıtsız yük kaybı ile her bir bölgenin dengede çalışma haline ulaşip ulaşamadığıdır. Bu ise, makinelerin hareketlerine oranla frekansı kanıt olarak bölgenin tümünün cevabından belirlenir. Genel olarak frekans kararlılığı sorunları, ekipman cevaplarının yetersizliği, kontrol ve koruma ekipmanlarının zayıf koordinasyonu veya yetersiz üretim rezervi ile ilgilidir. İzole edilmiş bölge sistemlerinde frekans kararlılığı, yük veya üretimde önemli bir kayba neden olan herhangi bir bozucu etki ile ilgilidir.

Gelişigüzel frekans hareketleri süresince, harekete geçen mekanizma ve cihazların karakteristik zamanları, frekans altında yük atımı ve generatör kontrolörleri ile koruyucu cihazlar gibi cihazların cevabına bağlı olarak saniyeler mertebesinde, mekanik enerji kaynağı sistemleri ve yük gerilim regülatörleri gibi cihazların cevabına bağlı olarak birkaç dakika mertebesinde olabilir. Böylelikle, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi frekans kararlılığı, kısa süreli veya uzun süreli bir olay olabilir. Kısa süreli frekans kararsızlığına bir örnek olarak, üretim altındaki bir bölgede yetersiz miktarda, frekans altında yük atımı olduğunda, frekans hızlıca düşer ve birkaç saniye içerisinde bölgede karartma yaşanır. Diğer taraftan frekans

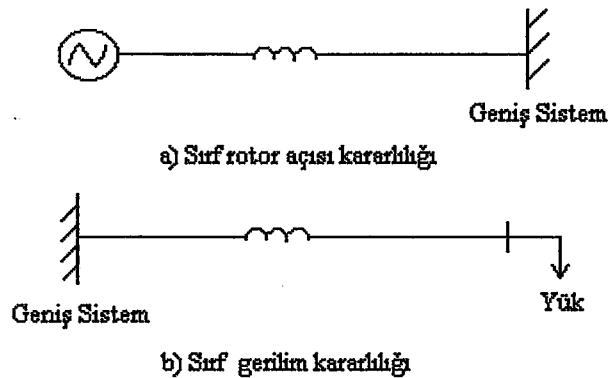
kararsızlığının yaşandığı daha karmaşık durumlar, buhar türbin aşırı hız kontrolörleri veya buhar kazanı/reaktör koruması ve kontrolleri, ilgilenilen zaman süresine göre 10 saniye mertebesinde birkaç dakika mertebesine kadar değişen uzun süreli olaylardır.

Gelişigüzel frekans hareketleri süresince, özellikle, sistemi yüksüzleştiren frekans altında yük atımı biçimindeki bölgelere ayırma koşullarında gerilim büyüklükleri önemli oranda değişebilirler. Gerilim büyüklüğündeki değişim, frekans değişiminin yüzdesinden daha fazla değişebilir ki bu durum, yük-üretim dengesizliğini etkiler. Aşırı gerilim, uyarım rölelerinin veya gerilim/frekans rölelerinin kaybı olacak şekilde zayıf tasarlanması veya koordinasyon zafiyeti yüzünden generatörün devre dışı kalması gibi istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Aşırı yüklü bir sistemde, düşük gerilim, empedans rölelerinin arzu edilmeyen çalışmasına neden olabilir (Kundur, Paserba, Ajjarapu vd, 2004).

2.2 Gerilim Kararlılığı ile Rotor Açısı Kararlılığı Arasındaki İlişki

Gerilim kararlılığı ile rotor açısı kararlılığı birbiriyle az ya da çok karşılıklı bağlantı içindedir. Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı sıkça geçici rotor açısı kararlılığı ile, gerilim kararlılığının daha yavaş formları da, sürekli hal rotor açısı kararlılığı ile ilişkilidir.

Uzaktaki senkron bir generatörün iletim hattıyla geniş bir sisteme bağlandığı durum (sırf açı kararlılığı, tek makine-sonsuz bara problemi) ile senkron bir generatör ya da geniş bir sistemin iletim hattı ile yüke bağlandığı durum (sırf gerilim kararlılığı) Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2 Farklı kararlılık tipleri.

Rotor açısı kararlılığı da gerilim kararlılığı gibi reaktif güç kontrolünden etkilenir. Özellikle monoton olarak artan açıların görüldüğü sürekli hal kararsızlığı, otomatik generatör gerilim regülatörleri gelişmeden önceki temel bir problemdir. Şimdi ise sürekli hal rotor açısı

kararlılığı ile uzun süreli gerilim kararlılığı arasında şu bağlantı görülmektedir: Buna göre generatör akımını sınırlama, normal otomatik gerilim regülasyonunu önlemektedir. Dolayısıyla generatör akımını sınırlama her iki çeşit kararlılık için de zararlıdır.

Gerilim kararlılığı, yük bölgeleri ve yük karakteristikleri ile ilgilidir. Rotor açısı kararlılığı için ise temel olan, uzaktaki enerji santrallerinin iletim hatlarıyla geniş sisteme bağlanmasıdır. Basitçe, gerilim kararlılığı yük kararlılığıdır, rotor açısı kararlılığı ise generatör kararlılığıdır.

Büyük enterkonnekte sistemlerde bir yük bölgesinin gerilim çökmesi, herhangi bir generatörün senkronizma kaybı olmaksızın mümkündür.

Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı genelde geçici hal rotor açısı kararlılığı ile oldukça yakından ilişkilidir. Buna karşılık küçük bozucu etki gerilim kararlılığı, rotor açısı kararlılığı ile daha az ilişkilidir.

Eğer iletim sisteminde yükten uzak bir noktada gerilim çöktüyse, bunun bir rotor açısı kararsızlığı problemi olduğu söylenebilir. Eğer gerilim, bir yük bölgesinde düşüyorsa, bu temel olarak bir gerilim kararsızlığı problemidir (Taylor, 1992; Uyaroglu, 2002).

Yapılan bu sınıflandırmaya karşılık, verilen herhangi bir durumda, kararsızlığın bir çeşidi saf bir biçimde oluşmaz. Bu durum özellikle, yüksek stresli sistemler için geçerlidir. Sistemler kararsızlığın bir çeşidine maruz kalınca eninde sonunda diğer şekle de neden olurlar.

Kararlılık olayına bütün yönleri ile bakmak gereklidir ve her yöne birden fazla bakış açısı ile bakmak gerekir.

2.3 Güvenilirlik, Güvenlik ve Kararlılık Arasındaki ilişki

Bir güç sisteminin güvenilirliği, uzun bir çalışmadan sonra güç sisteminin memnun edici çalışma olasılığıdır. "Güvenilirlik", uzunca bir zaman süreci sonunda birkaç kesinti ile, nerdeyse sürekli yeterli elektrik enerjisi sağlama yeteneği anlamına gelir.

Bir güç sisteminin güvenliği, tüketim bölgesinde herhangi bir kesinti olmaksızın, olası bozucu etkilere (olasılıklarına) dayanabilme kabiliyetinin risk derecesidir. Güvenlik, olası bozucu etkilere karşı sistemin sağlamlığı ile ilgilidir ve böylece sistem çalışma koşulu ile bozucu etkilerin olma olasılığına bağlıdır.

Bir güç sisteminin kararlılığı, daha önceden de belirtildiği gibi, bozucu bir etkiyi takiben zarar görmeden çalışmanın sürekliliğini sağlamaktır. Kararlılık, çalışma koşuluna ve fiziksel

bozucu etkiye bağlıdır.

Güç sistem performansının bu üç görünümü arasındaki mantıksal farklar şunlardır:

- 1) Güvenilirlik, güç sisteminin tasarımı ve çalışması için tam bir hedeftir. Güvenilir olmak için, güç sistemi, zamanın çoğunda güvenli olmalıdır. Güvenli olmak için sistem, yalnızca kararlı değil aynı zamanda kablodaki patlama, buz yükü veya sabotaj yüzünden iletim kulelerinin çökmesi, malzemede oluşacak zararlar gibi kararlılık sorunlarında sınıflandırılmamış bazı olasılıklara karşı da güvenli olmalıdır. Bazen, sistem kararlı olabilir, ancak ekipmanın aşırı yüklenmesi veya gerilimdeki değişimlerle sonuçlanan bozucu etki sonrası, sistem koşullarından dolayı güvensiz olabilir.
- 2) Sonuçlar bakımından sistem güvenliği, kararlılıktan daha da ayrılabilir. Örneğin; aynı kararlılık sınırlarına sahip iki sistemden biri, kararsızlık sonuçlarının daha az ciddi olmasından dolayı daha güvenli olabilir.
- 3) Güvenlik ve kararlılık, özel koşullar altında güç sisteminin performansına göre karara varılan ve zamanla değişen özelliklerdir. Diğer taraftan güvenilirlik, güç sisteminin zaman ile ortalama performansının bir fonksiyonudur ve yalnızca karar verilen bir zaman periyodu üzerinde sistemin davranışı ele alınarak güvenilirlikle ilgili bir karar verilebilir.

Kuzey Amerika Elektrik Güvenilirlik Konseyi (NERC), güç sistem güvenilirliğini şu şekilde tanımlamıştır:

Büyük bir güç sisteminde “**güvenilirlik**”, tüketicilere, kabul edilen standartlar ve istenilen oranda gücü dağıtan sistemin elemanlarının performansının derecesidir. Güvenilirliğin derecesi, frekans, süreklilik ve tüketici üzerindeki zararlı etkilerin büyüklüğünden belirlenebilir.

Güvenilirlik, güç sistemlerinin iki temel fonksiyonel görünümü hesaba katılarak bulunur:

- **Yeterlilik:** Sistem bileşenlerindeki programlanmış veya programlanmamış kesintiler dikkate alınarak, güç sisteminin her zaman için tüketiciye, karma elektrik gücünü ve enerji gereksinimlerini sağlayabilme yeteneğidir.
- **Güvenlik:** Güç sisteminin, elektrik kısa devreleri veya sistem bileşenlerinin beklenmeyen kaybı gibi ani bozucu etkilere dayanabilme yeteneğidir.

Kararlılık analizi, sistemin güvenlik ve güvenilirlik değerlendirmesinin tamamlayıcı bir bileşenidir (Kundur, Paserba, Ajjarapu vd, 2004).

3. GÜÇ SİSTEM GERİLİM KARARLILIĞI

Gerilim kararlılığı, normal işletme şartlarındaki bir güç sisteminin, bozucu bir etki sonrasında bütün bara gerilimlerinin kabul edilebilir sürekli değerlerde tutulabilmesi olarak tanımlanabilir. Sistem durumundaki herhangi bir değişiklik, bazen gerilimde kontrol edilemeyen bir düşüşe neden olur ki, bu durumda sistem için gerilim kararsızlığı söz konusu olur.

Gerilim kararlılığı problemleri genellikle güç sisteminin aşırı yüklenmesi sonucunda ortaya çıkar. Gerilimin aşırı düşmesi olarak bilinen ve gerilim çökmesi olarak adlandırılan bu hale neden olan başlıca etken, güç iletim sınırlarıdır. Ayrıca generatör reaktif güç kontrol sınırları, yük karakteristikleri, reaktif güç kompanzasyon cihazlarının karakteristikleri ve yük altında kademe değiştiren transformatörler gibi gerilim kontrol cihazlarının davranışları bu etkenlere ilave edilebilir.

Gerilim kararlılığı, temel olarak yük kararlılığının bir parçasıdır. Bir güç sisteminde işletim gerilimleri, gerilim kararlılığı sınırlarıyla yakından ilişkilidir. Düşük gerilimlerde yüksek miktarda enerji üretmek için, büyük değerlerde akımlar çekmek gerekir. Güç katsayısı birden küçük olan yükler için yükteki küçük bir değişim, gerilim düşümlerine neden olabilir ve bunun sonucunda gerilim kararsızlığı meydana gelebilir.

Gerilim çöküşü yükün niteliğine bağlıdır. Örneğin, asenkron motor gibi bir yük, gerilim çöküşünü hızlandırırken, sabit empedans karakteristikli bir ısıtıcı yükü gerilim çöküşünü engeller (Taylor, 1992; Uzunoğlu, 2000).

3.1 Yük Karakteristikleri

Gerilim kararlılığı açısından yük karakteristikleri son derece önemlidir. Gerilim değişimlerine göre davranışları bakımından yükler,

- Sabit empedanslı yükler,
- Sabit akımlı yükler,
- Sabit güçlü yükler

olarak üç ana gruba ayrılarak incelemeler yapılabilir.

3.1.1 Sabit Empedanslı Yükler

Ark ocakları, aydınlatma ve ısıtma elemanları, sabit empedanslı yükler olarak kabul edilebilir.

Bu yükler genellikle omik karakteristiklidirler. Kompleks gücün

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{V} \cdot \dot{I}^* = \dot{V} \left(\frac{\dot{V}}{Z} \right)^* = \frac{|\dot{V}|^2}{(Z)^*} = \frac{|\dot{V}|^2}{(R - jX)} = |\dot{V}|^2 \frac{(R + jX)}{(R^2 + X^2)} \quad (3.1)$$

şeklindeki gerilime bağlı ifadesinden, aktif güç;

$$P = |\dot{V}|^2 \frac{R}{(R^2 + X^2)} \quad (3.2)$$

olarak bulunur. Gerilimdeki küçük bir değişim için aktif güçteki değişim

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} \cong \frac{\partial P}{\partial V} = 2|\dot{V}| \frac{R}{(R^2 + X^2)} = \frac{2}{V} P \Rightarrow \frac{\Delta P}{P} \cong 2 \frac{\Delta |V|}{|V|} \quad (3.3)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlikten de görüldüğü gibi gerilimdeki küçük değişimler için güç değişimi, gerilimdeki değişimin yaklaşık iki katı olmaktadır.

3.1.2 Sabit Akımlı Yükler

Genellikle, metalürji ve elektro-kimya alanlarında, elektroliz, metal parlatma gibi uygulamalar, sabit akım tekniğine bağlıdır. Akım sabit kabul edilerek aktif güç

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.4)$$

ifadesinden, gerilimdeki küçük bir değişim için aktif güçteki değişim

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} \cong \frac{\partial P}{\partial V} = I \cdot \cos \varphi = \frac{P}{V} \Rightarrow \frac{\Delta P}{P} \cong \frac{\Delta V}{V} \quad (3.5)$$

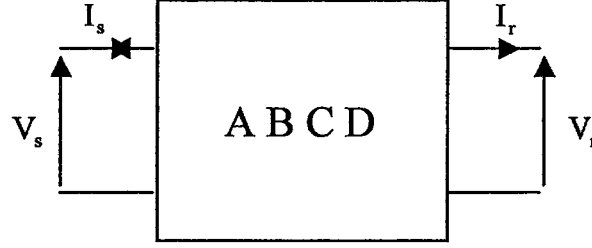
olarak elde edilir. Görüldüğü gibi gerilimdeki küçük değişimler için güç değişimi yaklaşık olarak aynı oranda olmaktadır.

3.1.3 Sabit Güçlü Yükler

Kontrollü empedans yükleri ve asenkron motorlar bu gruba girmektedirler. Asenkron motor yüklerinin gerilim değişimlerine karşı cevapları, çektikleri aktif gücün, gerilimin değişimini artarak veya azalarak izleyip, daha sonra başlangıç değerine dönmeye çalışması şeklindedir. Buna göre, gerilimin ani olarak azalması ile aktif ve reaktif güçte ani olarak bir azalma olduktan sonra, aktif güç nominal değerine dönmeye çalışırken, reaktif güç nominal değerinin üstüne çıkmaktadır. Eğer nominal gerilim değerine geri dönlürse, her iki gücün de nominal değerlerine geri döndükleri görülmektedir (Uzunoğlu, 2000; Yalçın, 1995).

3.2 İletim Hatları

İletim hatları, gerilim kararlılığı açısından büyük öneme sahiptir. İletim hatları iki uçlu bir ağla gösterilebilirler. Şekil 3.1’de, böyle bir gösterim verilmiştir. Buradaki ABCD sabitleri genelleştirilmiş devre sabitlerini göstermektedir.



Şekil 3.1. İletim hattının iki uçlu gösterimi.

Gerilim ve akım ifadeleri,

$$V_s = A.V_r + B.I_r \quad (3.6)$$

$$I_s = C.V_r + D.I_r \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

biçimindedir. İletim hatları, uzunluklarına bağlı olarak kısa, orta ve uzun iletim hatları olarak sınıflandırılır.

3.2.1 Kısa İletim Hatları

80 km (veya 50 mil) uzunluğa kadar olan hatlara “**kısa iletim hatları**” denir. Bu hatlarda kapasitif süseptans ihmal edilecek kadar küçüktür ve dolayısıyla da hesaplamalarda ihmal edilir.

Kısa iletim hattının faz başına modeli Şekil 3.2’de verilmiştir. Burada V_s , I_s , V_r ve I_r sırasıyla gönderici uç ile alıcı uç faz gerilim ve akım değerlerini göstermektedir. Buna göre faz başına gönderici uç gerilimi,

$$V_s = V_r + Z.I_r \quad (3.9)$$

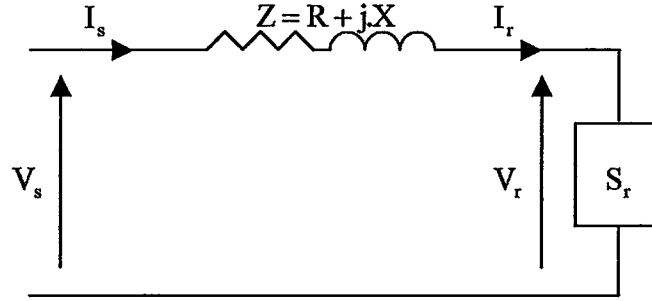
ve gönderici uç akımı,

$$I_s = I_r \quad (3.10)$$

olur. Böylelikle;

$$A=1, B=Z, C=0 \text{ ve } D=1 \quad (3.11)$$

olur.



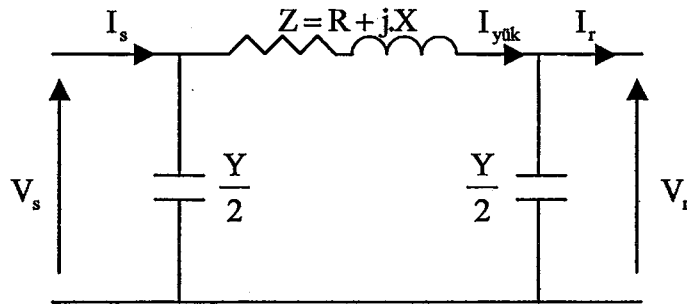
Şekil 3.2. Kısa hat modeli.

3.2.2 Orta Uzunluktaki İletim Hatları

Hattın uzunluğu arttıkça şönt kapasitesi de artar. 80 km ile 250 km (150 mil) arasındaki hatlara “orta uzunluktaki iletim hatları” denir. Orta uzunluktaki iletim hatları için şönt kapasitenin yarısı bir uçta diğer yarısı ise öbür uçta gösterilir. Bu şekildeki gösterime “nominal π modeli” denir. Orta uzunluktaki bir iletim hattının nominal π devresi Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Burada Y;

$$Y = (g + j.\omega.C).l \quad (3.12)$$

ile belirlenen toplam şönt admittanstır.



Şekil 3.3. Orta uzunluktaki iletim hattı için nominal π modeli.

Normal koşullar altında, izolatörlerdeki kaçak akımı gösteren faz başına şönt kondüktans ihmal edilebilir ve g sıfır varsayılır. C, km başına faz-nötr kapasitansdır ve l ise hat uzunluğunu göstermektedir.

Nominal π devresi için gönderici uç gerilim ve akımı;

$$V_s = \left(1 + \frac{Z.Y}{2}\right)V_r + Z.I_r \quad (3.13)$$

$$I_s = Y.\left(1 + \frac{Z.Y}{4}\right).V_r + \left(1 + \frac{Z.Y}{2}\right).I_r \quad (3.14)$$

ile elde edilir. Böylelikle,

$$A = \left(1 + \frac{Z.Y}{2}\right) \quad B = Z \quad (3.15)$$

$$C = Y.\left(1 + \frac{Z.Y}{4}\right) \quad D = \left(1 + \frac{Z.Y}{2}\right) \quad (3.16)$$

olur.

Genelde, ABCD sabitleri komplekstir ve nominal π modeli simetrik iki uçlu bir ağ olduğundan $A=D$ 'dir. üstelik iletim matrisinin determinantı 1'e eşittir.

$$A.D - B.C = 1 \quad (3.17)$$

Böylelikle,

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

biçiminde alıcı uç değerleri belirlenebilir.

3.2.3 Uzun İletim Hatları

Kısa ve orta uzunluktaki iletim hatları için hat parametreleri bir yığın biçiminde varsayılmıştı. 250 km (150 mil) ve daha uzun iletim hatlarına “uzun iletim hatları” denir. Uzun iletim hatları için dağıtılmış parametrelerin gerçek çözümlerini bulmak için hat parametreleri, hattın her bölgesine eşit oranda dağıtılmış varsayılır. Böylelikle, uzun iletim hattı için, bu temele dayanan bir π modeli kullanılır.

Nominal π modeli için;

$$V_s = \left(1 + \frac{Z' \cdot Y'}{2}\right) V_r + Z' \cdot I_r \quad (3.19)$$

$$I_s = Y' \cdot \left(1 + \frac{Z' \cdot Y'}{4}\right) \cdot V_r + \left(1 + \frac{Z' \cdot Y'}{2}\right) \cdot I_r \quad (3.20)$$

denklemleri yazılır. Buradaki hat parametreleri ise,

$$Z' = Z_c \cdot \sinh \gamma \ell = Z_c \cdot \frac{\sinh \gamma \ell}{\gamma \ell} \quad (3.21)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh \frac{\gamma \ell}{2} = \frac{Y \tanh \gamma \ell / 2}{\gamma \ell / 2} \quad (3.22)$$

biçiminde elde edilir. Burada kullanılan γ ve Z_c ifadeleri ise;

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y} \quad (3.23)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (3.24)$$

biçiminde bulunur. Z_c ifadesi “**karakteristik empedans**” olarak bilinir.

$$\tanh \frac{\gamma \ell}{2} = \frac{\cosh \gamma \ell - 1}{\sinh \gamma \ell} \quad (3.25)$$

denklemleri kullanılarak hat başı gerilim ve akım ifadeleri,

$$V_s = \cosh \gamma \ell \cdot V_r + Z_c \cdot \sinh \gamma \ell \cdot I_r \quad (3.26)$$

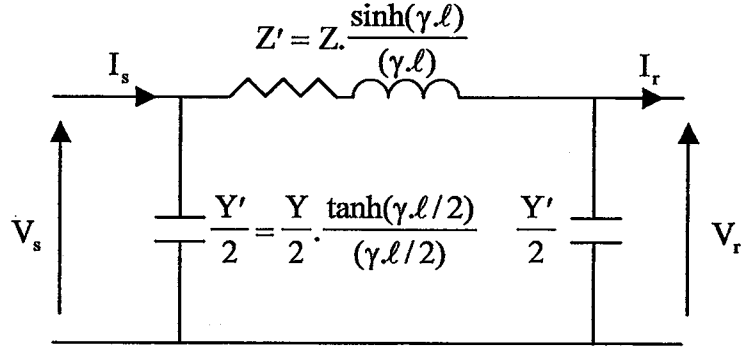
$$I_s = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma \ell \cdot V_r + \cosh \gamma \ell \cdot I_r \quad (3.27)$$

elde edilir. Böylece, ABCD sabitleri;

$$A = \cosh \gamma \ell \quad B = Z_c \cdot \sinh \gamma \ell \quad (3.28)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma \ell \quad D = \cosh \gamma \ell \quad (3.29)$$

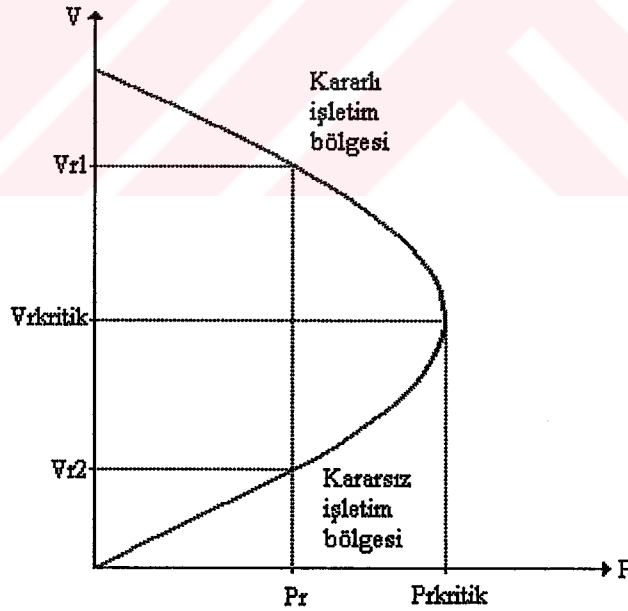
şeklinde olur. Uzun iletim hattı için eşdeğer π modeli Şekil 3.4’te verilmiştir (Saadat, 1999).



Şekil 3.4. Uzun iletim hattı için eşdeğer π modeli.

Enerji iletim sistemlerinde orta uzunluktaki hatlar ile uzun iletim hatlarının kararlılık analizi mutlaka yapılmalıdır ve gerilim kararlılığı açısından uzun iletim hatları büyük önem arz etmektedir.

Gerçekte gerilim kararlılığı, aktif güç (P), reaktif güç (Q) ve gerilim (V) arasındaki ilişkilere bağlıdır. Bu ilişkileri gösteren karakteristikler radyal (iki baralı) sistem için analitik olarak elde edilebilirken, çok baralı sistemler için güç akış analizi sonunda belirlenebilir.



Şekil 3.5. Radyal iletim hattına ilişkin P-V eğrisi.

Radyal bir iletim hattına ilişkin P-V eğrisi Şekil 3.5'te görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi her bir sabit alıcı gücüne (P_r), V_{r1} ve V_{r2} gibi iki farklı gerilim karşılık düşmektedir. Sadece bir noktada belirli bir güç için tek bir gerilim söz konusudur. Bu nokta, gerilim

kararlılığı açısından taşınabilecek maksimum güç sınırını ve buna karşılık gelen kritik gerilim değerini gösterdiğinden bu noktadaki güç değerine “kritik güç” (P_{kritik}) ve gerilim değerine de “kritik gerilim” (V_{kritik}) adı verilir. P-V eğrisinin üst kısmı kararlı (normal) çalışma bölgesini, alt kısmı ise kararsız çalışma bölgesini göstermektedir. Güç sistemine bağlanacak kritik güçten daha büyük bir güç olması durumunda, yük gerilimi kararsız olacak ve sistemin kararsız bölgeye kaymasına yol açacaktır (Uzunoğlu, 2000).

3.3 Gerilim Kararlılığı Analizleri: P-V Eğrileri

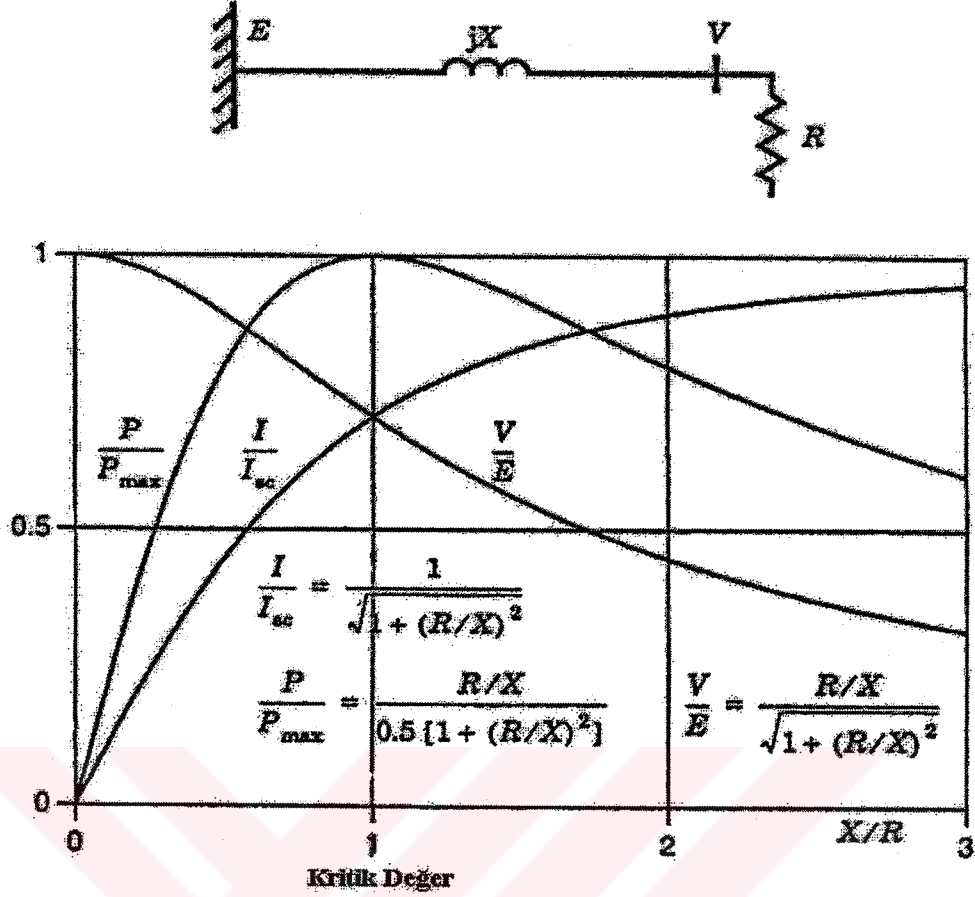
Yavaş karakteristikli gerilim kararsızlığı genellikle sürekli hal problemleri gibi analiz edilir. Bu durum için güç akış simülasyonu birinci çalışma metodudur. Bu sistemde, herhangi bir yük artışı veya başka bir olay için o anki sistemin durumu bulunur. Bu bozucu etki sonrası, başta P-V eğrileri olmak üzere güç akış tabanlı metotlar kullanılır. Bu metot, gerilim kararlılığı ile bağlantılı olabilecek sürekli hal yüklenebilirlik sınırlarını belirler. Bunu sağlamak için özel bir yazılım gerekli değildir, sıradan güç akışı simülasyonları ile elde edilebilir.

P-V eğrileri, gerilim kararlılığının kavramsal analizleri ve radyal sistem çalışmaları için yararlıdır. Bu metot, büyük gözlü şebekeler için de kullanılabilir. Bu metodun dezavantajı, güç akış simülasyonunun, eğrideki maksimum güç noktasının yakınında uzaklaşmasıdır. Diğer bir dezavantaj da bölge yükünün her arttığı durumda, enerji üretimi için tekrar çözüm yapılması zorunluluğunun olmasıdır.

Kavramsal analizler için, yük karakteristikleri, gerilimin bir fonksiyonu olarak analiz edilirse

P-V eğrileri ile çalışmak uygundur. Örneğin, rezistif bir yükün eğrisi $P_{\text{yük}} = \frac{V^2}{R}$ formülü ile belirlenmiş olabilir. Rezistif bir yük için gerilim, güç ve akım arasındaki değişimler, Şekil 3.6’da görülmektedir.

Yük empedansının değeri, kaynak empedansının değerine eşit olduğunda, maksimum güç iletiminin sağlandığı bilinmektedir. Daha büyük yük empedansları için (yani daha küçük admitanslar için) yüksek gerilim, düşük akımlı çalışma noktaları söz konusudur. Yüksek admitanslar içinse, bu durumun tersine, düşük gerilim, büyük akım değerleriyedir. Belirtildiği gibi maksimum güç transferi, kaynak ve yük empedansları eşit olduğunda meydana gelir. Bu maksimum güç değerindeki gerilim ise, kritik gerilim olarak adlandırılır (Uyaroğlu, 2002).



Şekil 3.6. Rezistif yük ve reaktans iletim hattı için gerilim, akım ve güç ilişkileri. $I_{sc} = E/X$ kısa devre akımıdır.

3.3.1 Radyal İletim Hattı İçin P-V Eğrilerinin Analitik Olarak Elde Edilmesi

İki baralı bir sistem için gerilim kararlılığının statik yönden incelenmesinde, hat sonu geriliminin genliği ile hat sonundan çekilen aktif güç arasındaki ilişkiyi, hat başı geriliminin genliği ($|V_s|$), iletim hattının sabitleri ve hat sonu güç faktörü cinsinden analitik olarak elde edebiliriz. Böylelikle, hat sonu için P-V eğrilerini elde etmek mümkündür.

Genelleştirilmiş devre sabitlerini kartezyen formda $\dot{A} = a_1 + ja_2$, $\dot{B} = b_1 + jb_2$, $\dot{C} = c_1 + jc_2$ ve $\dot{D} = d_1 + jd_2$ şeklinde yazılır ve endüktif yük için hat sonu akımı,

$$\dot{I}_r = \frac{P_r - jQ_r}{\dot{V}_r} \quad (3.30)$$

denklemini ile elde edilir. Daha sonra da bu eşitlik, denklem (3.6)'de yerine konulursa,

$$\dot{V}_s = (a_1 + ja_2)\dot{V}_r + (b_1 + jb_2) \cdot \left(\frac{P_r - jQ_r}{\dot{V}_r} \right) \quad (3.31)$$

bulunur ve düzenleme yapılırsa,

$$\dot{V}_s \cdot \dot{V}_r = (a_1 V_r^2 + b_1 P_r + b_2 Q_r) + j(a_2 V_r^2 + b_2 P_r - b_1 Q_r) \quad (3.32)$$

elde edilir ve eşitliğin her iki tarafı eşleniği ile çarpılırsa,

$$V_s^2 \cdot V_r^2 = (a_1 V_r^2 + b_1 P_r + b_2 Q_r)^2 + (a_2 V_r^2 + b_2 P_r - b_1 Q_r)^2 \quad (3.33)$$

elde edilir. Bu eşitliğin kareleri alınarak düzenlenirse,

$$(a_1 + ja_2)V_r^4 + [2P_r(a_1 b_1 + a_2 b_2) + 2Q_r(a_1 b_2 - a_2 b_1) - V_s^2]V_r^2 + (b_1^2 + b_2^2)(P_r^2 + Q_r^2) = 0 \quad (3.34)$$

denklemini bulunur. Bu denklem, $x = V_r^2$ dönüşümü ile

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (3.35)$$

biçiminde ikinci dereceden bir denkleme dönüştürülür. Buradan

$$V_{r1,2} = \pm \sqrt{x_{1,2}} \quad (3.36)$$

şeklinde gerilime ait gerçek kökler belirlenmiş olur. Bu analitik ifadede hat başı gerilimi (V_s) sabit tutularak, sabit güç faktörü altında, hat sonundan çekilen gücün sıfırdan itibaren arttırılmak suretiyle değişimine karşılık, hat sonu geriliminin sürekli değişimden elde edilen P-V eğrisi olarak adlandırılan ve kararlılık analizlerinde kullanılan Şekil 3.5'teki gibi bir eğri elde edilmiş olur.

3.4 Kritik Değerlerin Elde Edilmesi

Bir sistemin gerilim kararlılığı açısından kritik değerlerinin P-V eğrilerinden elde edilmesi güç sisteminin karmaşık yapısı sebebiyle daima kolay şekilde mümkün olmaz. Kritik değerlerin doğrudan hızlı bir şekilde bulunması güç akışının Jakobiyen matrisinin tekillğe ulaştığı noktalar belirlenerek gerçekleştirilebilir.

Bu noktadan sonra hat başı gerilimi $\dot{V}_s = V_s \angle 0$, hat sonu gerilimi $\dot{V}_r = V_r \angle -\delta$ ve genelleştirilmiş devre sabitleri $\dot{A} = a_1 + ja_2$ ve $\dot{B} = b_1 + jb_2$ şeklinde alınıp \dot{I}_r akımının ifadesinde yerine yazılırsa,

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{V}_s - \dot{A} \cdot \dot{V}_r}{\dot{B}} = \frac{V_s - (a_1 + ja_2) \cdot V_r \cdot (\cos\delta - j\sin\delta)}{b_1 + jb_2} \quad (3.37)$$

bulunur. Bunun eşleniği,

$$\dot{I}_r = \frac{V_s - (a_1 - ja_2) \cdot V_r \cdot (\cos\delta + j\sin\delta)}{b_1 - jb_2} \quad (3.38)$$

şeklindedir. Bu akım, kompleks güç

$$\dot{S}_r = \dot{V}_r \cdot \dot{I}_r \quad (3.39)$$

ifadesinde yerine konulursa,

$$\dot{S}_r = \frac{V_s \cdot V_r \cdot (\cos\delta - j\sin\delta) - (a_1 - ja_2) \cdot V_r^2}{b_1 - jb_2} \quad (3.40)$$

elde edilir. Gerekli düzenlemelerle,

$$\begin{aligned} \dot{S}_r &= \frac{V_s \cdot V_r \cdot (\cos\delta - j\sin\delta) \cdot (b_1 + jb_2) - (a_1 - ja_2) \cdot (b_1 + jb_2) \cdot V_r^2}{b_1^2 + jb_2^2} \\ &= \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_1 \cdot \cos\delta + b_2 \cdot \sin\delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2) \cdot V_r^2}{b_1^2 + jb_2^2} \\ &= j \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_2 \cdot \cos\delta - b_1 \cdot \sin\delta) - (a_1 b_2 - a_2 b_1) \cdot V_r^2}{b_1^2 + jb_2^2} \end{aligned} \quad (3.41)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikteki reel ve imajiner kısımlar sırasıyla aktif ve reaktif güçlerdir.

$$P_r = \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_1 \cdot \cos\delta + b_2 \cdot \sin\delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2) \cdot V_r^2}{b_1^2 + jb_2^2} \quad (3.42)$$

$$Q_r = j \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_2 \cdot \cos\delta - b_1 \cdot \sin\delta) - (a_1 b_2 - a_2 b_1) \cdot V_r^2}{b_1^2 + jb_2^2} \quad (3.43)$$

Bu değerler ortaya konduktan sonra iki baralı bir sistem için Newton-Raphson güç akışındaki Jakobiyen matrisin tekiliğinden yararlanılarak kritik değerler belirlenir. Bunun için iki fonksiyon,

$$f_1(V_s, V_r, \delta) = P_r - \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_1 \cdot \cos\delta + b_2 \cdot \sin\delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2) \cdot V_r^2}{b_1^2 + j b_2^2} \quad (3.44)$$

$$f_2(V_s, V_r, \delta) = Q_r - \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_2 \cdot \cos\delta - b_1 \cdot \sin\delta) - (a_1 b_2 - a_2 b_1) \cdot V_r^2}{b_1^2 + j b_2^2} \quad (3.45)$$

olarak tanımlanır. Matrisel formda Jakobiyen matrisi elde etmek için bu eşitlikler düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} \Delta P_r \\ \Delta Q_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial V_r} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \delta} & \frac{\partial f_2}{\partial V_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V_r \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

şeklinde yazılabilir. Jakobiyen matrisin tekil olma şartı, denklemin determinantının sıfır olmasıdır. Buna göre,

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial V_r} - \frac{\partial f_2}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial V_r} = 0 \quad (3.47)$$

olmalıdır. Buradaki her bir terim

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta} = \frac{V_s \cdot V_r \cdot (-b_1 \cdot \sin\delta + b_2 \cdot \cos\delta)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial V_r} = \frac{V_s \cdot (b_2 \cdot \cos\delta - b_1 \cdot \sin\delta) + (a_1 b_2 - a_2 b_1) \cdot 2V_r}{b_1^2 + b_2^2} \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \delta} = \frac{V_s \cdot V_r \cdot (-b_2 \cdot \sin\delta - b_1 \cdot \cos\delta)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial V_r} = \frac{V_s \cdot (b_1 \cdot \cos\delta + b_2 \cdot \sin\delta) + (a_1 b_2 - a_2 b_1) \cdot 2V_r}{b_1^2 + b_2^2} \quad (3.51)$$

eşitlikleri ile bulunduktan sonra denklem (3.47)'de yerine yazılırsa

$$V_s = 2V_r \cdot (a_1 \cdot \cos\delta + a_2 \cdot \sin\delta) \quad (3.52)$$

ile verilen kritik noktada iletim hattının hat sonu ve hat başı gerilimleri arasındaki eşitlik elde edilir. Kritik iletim (yük) açısını belirlemek için, güç ifadelerinde V_s yerine V_r ve δ 'ya bağlı ifadeler yazılır. Ayrıca aktif ve reaktif güç arasındaki

$$Q_r = P_r \cdot \tan\varphi \quad (3.53)$$

bağıntısı kullanılarak kritik iletim açısının öncelikle,

$$\tan(2\delta) = \frac{a_1 \cdot (b_2 - b_1 \cdot \tan\varphi) + a_2 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan\varphi)}{a_1 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan\varphi) + a_2 \cdot (-b_2 + b_1 \cdot \tan\varphi)} \quad (3.54)$$

değeri bulunur. Daha sonra,

$$K_1 = a_1 \cdot (b_2 - b_1 \cdot \tan\varphi) + a_2 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan\varphi) \quad (3.55)$$

$$K_2 = a_1 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan\varphi) + a_2 \cdot (-b_2 + b_1 \cdot \tan\varphi) \quad (3.56)$$

kısaltmaları yapılarak kritik iletim (yük) açısı,

$$\delta_{\text{kritik}} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{K_2}{K_1} \right) \quad (3.57)$$

olarak bulunur. Bu eşitlik denklem (3.52)'de yerine yazılırsa,

$$V_{r\text{kritik}} = \frac{V_s}{2 \cdot (a_1 \cdot \cos\delta_{\text{kritik}} + a_2 \cdot \sin\delta_{\text{kritik}})} \quad (3.58)$$

elde edilir. (3.52) ve (3.57) eşitliklerinin, (3.42) denkleminde yerine yazılması ve

$$K_3 = b_1 \cdot \cos\delta_{\text{kritik}} + b_2 \cdot \sin\delta_{\text{kritik}} \quad (3.59)$$

$$K_4 = a_1 \cdot \cos\delta_{\text{kritik}} + a_2 \cdot \sin\delta_{\text{kritik}} \quad (3.60)$$

kısaltmaları ile hat sonundan çekilebilecek kritik güç değeri

$$P_{r\text{kritik}} = \frac{V_s^2 \cdot (2 \cdot K_3 \cdot K_4 - (a_1 b_1 + a_2 b_2))}{(b_1^2 + b_2^2) \cdot 4K_4^2} \quad (3.61)$$

olarak bulunur (Indulkar vd., 1989; Uzunoğlu, 2000; Yalçın, 1995).

3.5 Gerilim Kararlılığının Radyal Sistemler için İncelenmesi

Radyal bir iletim hattına ilişkin P-V eğrileri elde edilirken, bazı büyüklüklerin gerilim

kararlılığına etkilerini incelemek mümkündür. Bu etkiler, güç faktörü, hat uzunluğu, hat başı gerilimi, paralel hat sayısı, hatların çalışma modları, seri ve şönt kompanzasyon tesisleri şeklinde ele alınabilir. Bu etkiler aşağıda kısaca incelenmiştir.

- a) **Güç Faktörünün Etkisi:** Güç faktörü endüktif (geri) durumundan kapasitif (ileri) duruma gittikçe, gerilim kararlılığı açısından güç sınırının arttığı gözlenmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere, enerji iletiminde güç faktörünün birim değere yakın olması gerilim kararlılığı açısından gereklidir.
- b) **Hat Uzunluğunun Etkisi:** Örnek bir sistem üzerinde direnç, endüktans ve admittans değerleri aynı ve güç faktörü sabit tutularak yapılan incelemelerde, gerilim kararlılığının, iletim hattı uzunluğu ne kadar az olursa o kadar iyi olduğu görülmüştür.
- c) **Hat Kayıp Faktörünün Etkisi:** Kayıp faktörü, hattın geometrisinden doğan hattın omik direnci (r) ve endüktif reaktansı (ωL) arasındaki orandır ($\tan \alpha = \frac{r}{\omega L}$). Gerilim kararlılığı, kayıp faktörü oranının büyümesi ile olumsuz yönde etkilenmektedir.
- d) **Hat Başı Geriliminin Etkisi:** Hat başı geriliminin genliğinin artırılması, gerilim kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir. Gerilimin azalması durumunda yük altında kademe değiştiren transformatörlerin kademelerinin artırılması, hat sonu geriliminin daha da azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, hızlı değişen dinamik durumlarda, kademe değiştiricilerin yavaş cevabı, gerilim kararlılığını sağlamada yetersiz kalmaktadır.
- e) **Paralel Hat Sayısının Etkisi:** Büyük miktarlardaki güç iletiminde, kararlılık, güvenilirlik, işletme zorunlulukları gibi çeşitli nedenlerden dolayı, üretim ve tüketim merkezleri arasında iki ya da daha fazla paralel hat tesis etmek zorunlu olmaktadır. Paralel çalışan hatlardan birinin devre dışı olması durumunda, sistemin toplam reaktansı ($Z/2$)'den Z 'ye çıkar ve normal olarak, güç faktörünü iyileştiren kapasite ($2.C$)'den C 'ye düşer. Böylelikle artan hat kayıpları yanında, şönt kapasitelerin ürettiği reaktif gücün azalması durumunda toplam gerilim düşümü önemli ölçüde artar ve gerilim kararsızlığı meydana gelebilir. Hat sonundaki kritik gerilimin değeri pek fazla değişmezken, kritik gücün değeri ise yaklaşık olarak yarıya düşer.
- f) **Hat Sonunda Kullanılan Şönt Kapasitenin Etkisi:** Yük tarafına yakın olan kompanzasyon, güç faktörünün iyileştirilmesi, gerilimin ayarlanması ve yük dengelemesi için yapılmaktadır. Farklı grup yüklerinin gerilim değişimlerine karşı reaktif güç talepleri farklı olmaktadır. Hat sonunda kullanılan şönt kapasiteler, gerilim kararlılığı açısından olumlu bir rol oynamaktadırlar.

g) Seri Kompanzasyonun Etkisi: Bir alternatif akım devresine bağlı kayıpsız bir kondansatörün uçlarındaki gerilim, içinden geçen akımdan 90° geri, endüktif reaktansın uçlarındaki gerilim ise, içinden geçen akımdan 90° ileri fazda olduğu bilinen bir gerçektir. Buna göre, endüktif bir reaktansın hat gerilimine etkisi, seri bağlanacak olan bir kondansatör ile kısmen veya tamamen kompanze edilebilir. Bu tür bir kompanzasyonla, taşınabilecek maksimum güç değeri arttırılabilir veya belli bir güç transferi için iletim açısı küçültülebilir. Böylelikle hattın doğal gücü arttırılabilmektedir. Bunun yanında, hat reaktansı etkili bir biçimde azaltıldığından, hat aynı sistem yükünde daha az kapasitif reaktif güç çekecektir. Dolayısıyla, boşta çalışmada ihtiyaç duyulan şönt endüktif kompanzasyon derecesi de kısmen azaltılacaktır.

Seri kompanzasyon yapıldığında, kompanzasyon oranı için üst sınır değeri %80'dir. Kompanzasyonun %100 yapılması durumunda, en küçük bozucu bir etkide bile çok büyük genlikli arıza akımları akacaktır. Ayrıca devre, temel frekansta seri rezonansa da girebileceğinden, geçici gerilim ve akımlarını kontrol etmek oldukça güçleşecektir. Seri kompanzasyon ile, paralel çalışan iletim hatlarının yük kısmının dengelenmesi, değişken büyük güçlerin neden olduğu gerilim dalgalanmalarının azaltılması ve paralel bağlı kondansatörlere oranla daha düşük bir oranda da olsa güç faktörünün düzeltilmesi gerçekleştirilmektedir. Seri kompanzasyon oranı yüzdesinin arttırılması, gerilim kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir.

h) Şönt Kompanzasyonun Etkisi: Büyük miktarlardaki elektrik enerjisinin ekonomik olarak uzak mesafelere iletilebilmesi için çok yüksek gerilimler seçilmektedir. Böylece iletim akımı küçültülerek hat kayıpları azaltılmaktadır. Ancak, iletim hatlarının toprak kapasiteleri nedeniyle akacak olan kapasitif akımlar, endüktif karakterli olan seri hat empedansı nedeniyle gerilim yükselmesine neden olacaktır.

Eğer iletim hattının ucuna karakteristik bir empedans bağlanırsa, hat endüktansındaki reaktif kayıplar, hat kapasitesinin ürettiği reaktif güç ile tam olarak karşılanır ve bu durumda hat reaktif güç alışverişi yapmaz.

İletim hattı üzerinde şönt kompanzasyon yapılmaması durumunda, özellikle alıcı uç noktasına bir yük bağlı iken hat sonu gerilimi kararlı halde en yüksek değerine çıkar. Ayrıca, açma-kapama olaylarında aşırı gerilimler ortaya çıkar ve kapasitif akımlar ilave aktif kayıplar oluştururlar.

Buna karşılık, gerilim kararlılığı, şönt kompanzasyon yapılması ile olumsuz yönde de etkilenebilmektedir.

Bütün bu etkileri özetleyecek olursak; güç faktörünün endüktiften kapasitife yönelmesi, aynı devre parametrelerine sahip hatlardan daha kısa olanları, kayıp faktörünün küçültülmesi, seri kompanzasyon yüzdesinin artırılması, genellikle statik gerilim kararlılığını olumlu yöne etkilemektedir. Ancak, şönt kompanzasyonun etkisi, hattın modellenmesine göre değişebilmektedir (Uzunoğlu, 2000).



4. YÜK BİLEŞENLERİNİN STATİK VE DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİ

1930'lara kadar Rus mühendislerin gerilim kararlılığı (onlara göre yük kararlılığı) üzerindeki çalışmaları pek fazla dikkate alınmamıştır. Gerilim kararlılığının basit kriteri periyodik olmayan sürekli hal kararlılığının genel analizi olarak ortaya çıkmıştır (Hill, 1993).

Daha büyük hat yüklenmelerinde görülen sürekli artış, reaktif güç yönetimine olan ihtiyacı artırmakta bu da gerilim kararsızlığı ve çökmelerin olma olasılığını artırmaktadır. Gerilim çökmeleri ve kararsızlığı hususları, hadisenin daha iyi anlaşılması ve böylece sorunlara etkin, verimli ve ekonomik çözümler üretilmesi için çalışmaların başlatılmasına yol açmıştır (Pal, 1992).

Güç sistemlerindeki gerilim kararlılık analizi konusu, araştırmacıların düşüncelerinin iskeletini görebileceği bir noktaya göre yapılır. Ortak bir terminoloji yoktur fakat pek çok büyük gelişmeler açıklanmıştır. Örneğin bugün gerilim kararsızlığının dinamik olaydan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Dahası problem, statik yük akış hesaplarında tahmin edilemeyen durumları doğurur. Statik-dinamik aralık için daha çok sayıda araştırma yapılmaktadır çünkü yeni dinamik analiz yöntemlerine ihtiyaç vardır (Hill, 1993).

Gerilim kararlılık analizi yapabilmek için yüklerin statik ve dinamik hallerde doğru modellenmesi gerekmektedir. Bunun için de yüklerin karakteristiklerini iyi algılamak gerekmektedir.

Şimdi yükleri ve onların toplam karakteristiklerini inceleyeceğiz. Yüklerin gerilim hassasiyetini inceleyeceğiz (Bazı yükler, frekansa duyarlıdır ve genellikle gerilim, frekanstan çok daha fazla değişir. Aynı zamanda frekansa duyarlılığın gerilim kararlılığı ile doğrudan ilişkisi yoktur.).

Gerilim düzeyini birkaç dakikadan daha fazla süre ile değiştiren yükler gerilim kararlılığını etkilerler. Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı ve gerilim çöküşüne neden olan düşük gerilim seviyeleri için yüklerin dinamik karakteristikleri (örneğin asenkron motorun) önemlidir.

Gerilim kararsızlığının yavaş şekillerinde kritik soru; güç akış simülasyonlarında gerilimden bağımsız sabit güçlü yük modeli uygun mudur değil midir? Bazı sistemlerde yükleri sabit tutan yeterli miktarda kontrol cihazı vardır ve kontrol sınırlarına kadar yük karakteristikleri önemsizdir. Yükün yeterli oranda bir kısmı motor ise (örneğin yaz aylarında havalandırma) yaklaşık statik analiz ile sabit güç yük modelleme uygun düzeydedir. Sabit güç yük modellerine alternatif olarak gerilime duyarlı yükler ve regülatörler (örneğin kademe

değiştiriciler) vardır.

4.1 Gerilimin Azalması

Geçmişte üretim-iletim kapasitesi sıkıntısından dolayı yük azalmasını içeren kasti gerilim azalması yapılmıştır. 1970'lerdeki petrol ambargosunda, düzenleyici acentaların baskısından sonra enerjiyi saklamak için gerilim düşümüne gidilmiştir. Bazı acentalar da gerilim kararlılığını geliştirmek için acil ölçüm amacıyla gerilimi düşürmüşlerdir. Örneğin, 1988'de Kuzey Amerika Elektrik Emniyeti Şurası'nda (NERC) Sistem Karışıklık Raporu'nda 1988'de yaz ayları boyunca doğu Amerika'da 8 günlük bir gerilim düşümüne gidilmesi kararlaştırılmıştır.

Gerilimin azalması, kademe değiştirme transformatörleri ve dağıtım gerilim regülatörleri ile yapılır.

Gerilimin azalmasının verimliliği üzerine yapılan bazı ölçümler literatürde yer almaktadır. Buna örnek olarak Çizelge 4.1'de, gerilimde %1'lik düşüş meydana geldiğinde talepteki yüzde olarak azalma gösterilmiştir (Taylor, 1992).

Çizelge 4.1. Gerilimdeki azalmaya karşılık bazı enerji sistemlerindeki güç talebinin değişimi

Şirket	Bina Tipi %	Ticari %
American Electric Power 1	0,80	0,78
American Electric Power 2	0,90	0,86
Consumers Power Company	0,83	1,38
San Diego Gas & Electric Co.	1,14	0,08

Gerilimi azaltmak gerilim kararlılığını geliştirmek için bir araçtır. Kritik ağır yük periyotlarındaki faydaları değerlendirebilmek için yük karakteristiklerine ihtiyaç vardır. Genellikle yükteki yüzdesel reaktif güç azalması, aktif güçtekenden çok daha fazladır. Çünkü dağıtım transformatörleri ve bazı motorlar gerilim altında manyetik doyumda çalışırlar. Gerilim azalmasında, termostat ve elle kontrolden dolayı birkaç dakikadan sonra sabit enerji eğiliminden dolayı aktif yük eski değerine gelir.

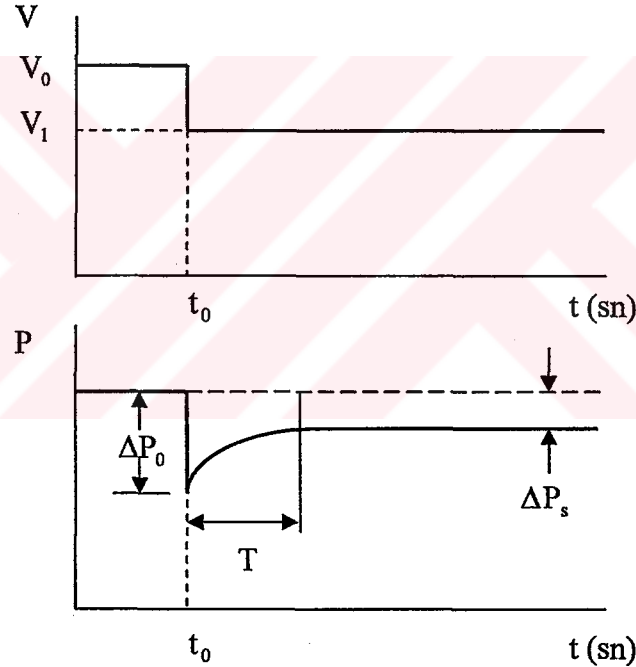
Burada açıklanan küçük gerilim değişimleri için aktif ve reaktif gücün gerilim duyarlılıklarıdır. Gerilim kararlılığı için aynı zamanda, çok küçük gerilimli sabit yüklerin performansı da önemlidir (Taylor, 1992).

4.2 Gerilim Azalmasına Karşı Genel Yük Cevabı

Laboratuar ve güç sistem baralarında yapılan deneyler, tipik bir yükün V gerilimindeki değişmeye verdiği aktif güç cevabının Şekil 4.1'deki gibi olduğunu gösterir.

Aktif ve reaktif gücün cevapları niteliksel olarak benzerdir. V gerilimindeki kademe değişmesi istenen P gücünde de bir kademe değişmesine neden olur. Bunu takip eden bir süre içerisinde güç değeri, sürekli sabit bir değere ulaşır. T 'yi iyileşme zamanı olarak alırız.

Gerilim kademesi değiştirilirken, asenkron motorun kayması değişmez böylece toplam asenkron motor yükü sabit kalır ancak gerilimdeki değişme, çekilen toplam güçte değişmeye neden olur. Uzun süreli çalışmada düşük gerilim kademe değiştiriciler ve diğer kontrol cihazları gerilimi ve dolayısıyla yükleri eski seviyesine getirmeye çalışırlar. Gerçekte, dağıtım seviyesindeki düzelmenin toplam etkisi yükün sınırı aşmasına neden olur.



Şekil 4.1. Genel yük cevabı.

Birkaç saniyelik T düzelme süresi ile, bu davranış asenkron motor davranışı gibi olur. Birkaç dakikalık sürede ise, kademe değiştiricilerin ve diğer kontrol cihazlarının rolü görülebilir. Saatler sonra yük düzelmesi ve muhtemel sınırı aşma, termostat kontrollü ısıtma yükünden dolayı ortaya çıkabilir.

Şekil 4.1'deki genel cevabı veren yük modellerinin önemi, yük gücündeki geçici değişimlerin gerilim çöküşü sürecini esasen etkilediğini gösteren bir kanıttır (Hill, 1993).

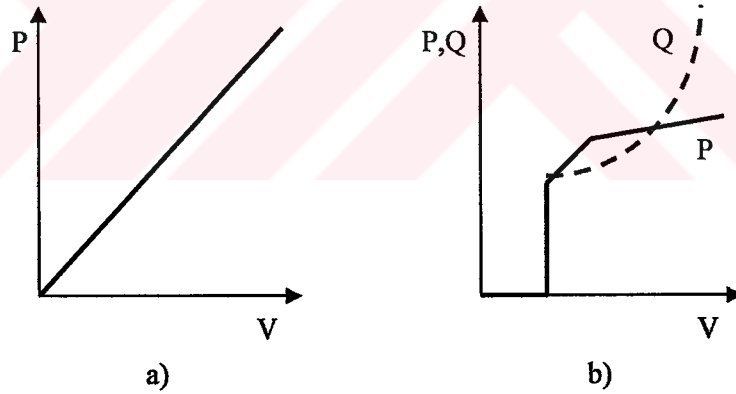
4.3 Çeşitli Yük Bileşenleri

4.3.1 Aydınlatma

Elektrik tüketiminin üçte biri aydınlatma ve ısıtmaya gitmektedir. Ticari ve endüstriyel tesislerde deşarj aydınlatması (flüoresan, civa buharlı ve sodyum buharlı lambalar) kullanılırken konutlarda ise akkor flâmanlı lambalar kullanılmaktadır.

Akkor flamanlı lambalar, reaktif güç harcamamaları ve talep gücünün frekanstan bağımsız olmasına rağmen, ampulün içindeki telin sıcaklığı gerilim ile değiştiğinden akkor flamanlı lamba, sabit empedans gibi davranmaz. Şekil 4.2.a'da bununla ilgili karakteristik görülmektedir.

Flüoresan ve diğer deşarj aydınlatmaları, uygulanan gerilime bağlıdır. Gerilim nominal değerinin %65'i ile %80'i arasında ise flüoresan ve diğer deşarj aydınlatmaları sönerler ve ancak gerilim, sönmeye değerinin üzerine çıktığında histerisiz karakteristiği ile bir iki saniye gecikmeli olarak tekrar harekete geçerler. Şekil 4.2.b'de gösterildiği gibi gerilim, sönmeye değerinin üzerinde olduğunda aktif ve reaktif güç, gerilimler ile lineer olmayan bir şekilde değişir (Machowski, 1997).



Şekil 4.2. Gerilim Karakteristikleri (a) Akkor flamanlı lamba (b) Deşarj aydınlatması.

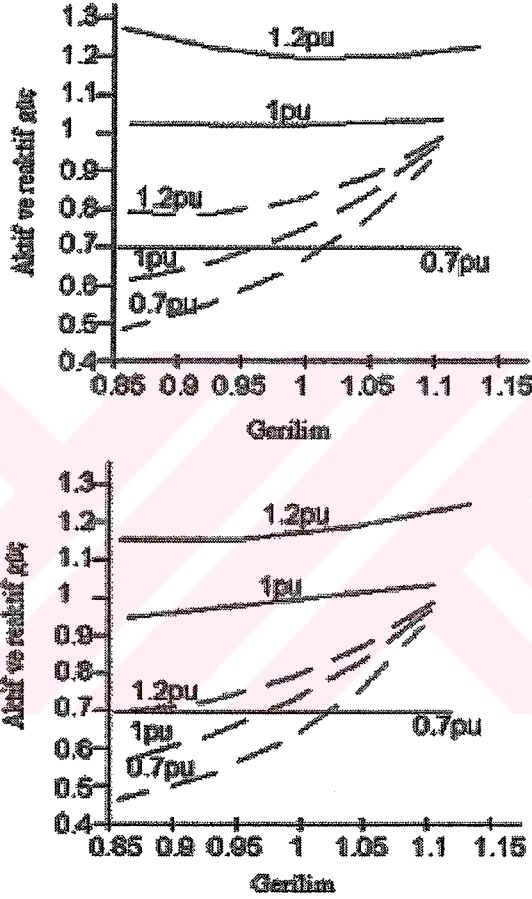
Deşarj aydınlatmaları iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler (Uzunoğlu, 2000).

4.3.2 Asenkron Motorlar

Günümüzde elektrik enerjisi tüketiminin büyük bir çoğunluğunu motorlar harcamaktadır. Örneğin, A.B.D.'deki elektrik tüketiminin %57'sini, çoğunlukla güç motorları olmak üzere tamamı beygir güçlü üç fazlı asenkron motorlar çekerler. Endüstriyel enerjinin %78'i, bina

yüklerinin %37'si ve ticari yüklerin %43'ü motorlardır. Asenkron motorlar toplam motor enerjisinin %90'ını harcarlar (Taylor, 1992).

Bina ve ticari motor yüklerinin çoğunluğu havalandırma ve soğutma şeklindeki kompresör yükleridir. Kompresör yükleri her hız değeri için sabit momenti gerektirir ve kararlılık noktası için en çok gerekli olan yüklerdir. Pompalar, fanlar ve kompresörler endüstriyel motor uygulamalarının yarısından fazlasını oluştururlar.



Şekil 4.3. 230V, 20HP, üç fazlı bir asenkron motor için statik aktif (koyu çizgiler) ve reaktif güç (kesikli çizgiler)/gerilim eğrileri. Üstteki eğriler sabit moment için, alttaki eğriler hızın karesiyle orantılı olan moment içindir.

Yapılan araştırmalara göre motorlar genellikle normalden büyük boyda yapılırlar ve belki de bu yüzden beygir güçlü motorların yarısı nominal yükünün %60'ından daha azında çalışabilirler. Büyük endüstriyel motorlar ve cihazların içindeki motorlar normal boyutta olurlar.

Yüksek miktarda motor yükünü içeren havalandırmaların çok miktarda kullanılmasını gerektiren yaz dönemlerinde enerji tüketimi fazladır. Örneğin, Florida'da enerji tüketiminin

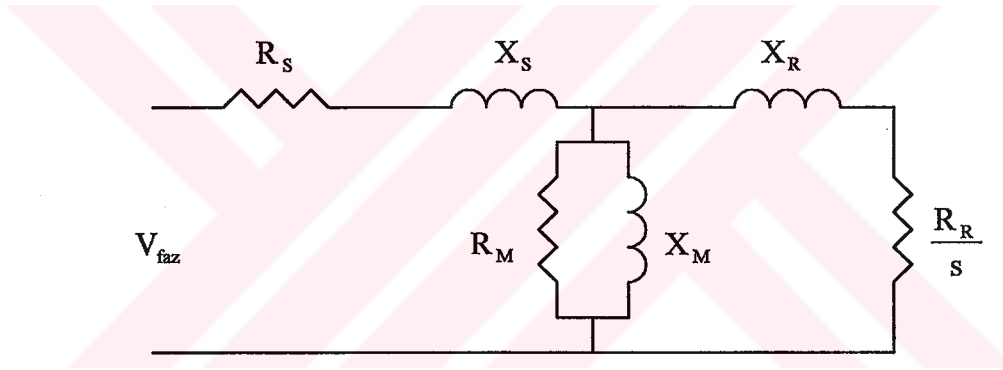
%30'u havalandırmadan kaynaklanır.

Motorlar tarafından çekilen sürekli haldeki aktif güç, motorun durdurulduğu ana kadar gerilimden hemen hemen bağımsızdır. Motorun reaktif gücü, gerilim kademeleri ve diğer etkilere karşı daha duyarlıdır. Gerilim düştükçe; ilk önce reaktif güç de düşer fakat daha sonra gerilim düşümü devam ederse reaktif güç artar. Reaktif gücün gerilim duyarlılığı yüklenme arttıkça azalır.

Şekil 4.3'te, 20 HP'lik bir motorun tipik sonuçları verilmiştir. Önceden de tahmin edildiği gibi eğriler, sabit moment yüklerinin ve ağır yüklenmelerin gerilim kararlılığı açısından zor işler olduğunu gösterir (Taylor, 1992).

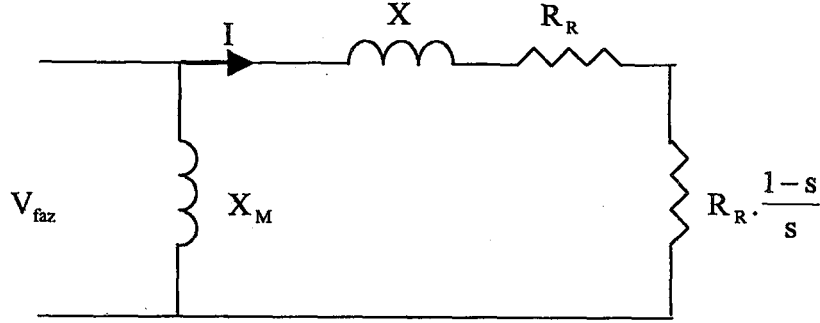
4.3.2.1 Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi

Asenkron motorun performans karakteristiklerinin belirlenmesinde eşdeğer devre metodu kullanılır. Şekil 4.4'te tek kafesli bir asenkron motorun eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 4.4. Asenkron motorun sürekli hal eşdeğer devresi (Gürdal, 2001).

Şekil 4.4, stator referans alınarak bir asenkron motorun sürekli hal eşdeğer devresini gösterir. Bu eşdeğer devrede R_s ve X_s sırasıyla statorun direnci ve kaçak reaktansını, X_r rotor kaçak reaktansını, X_m mıknatıslanma reaktansını ve s de $s = (w_s - w) / w_s$ olmak üzere motorun kaymasını gösterir. R_s küçük ve $X_m \gg X_s$ olduğundan eşdeğer devre Şekil 4.5'teki gibi basitleştirilebilir. Burada X , stator ve rotor sargılarındaki eşdeğer reaktansı ($X = X_r + X_s$) gösterir. R_r/s değeri genellikle iki bileşene ayrılır. R_r 'nin kendisi rotor direncinde kaybolan gücü ve $R_r \cdot (1 - s) / s$ terimi ise mekanik gücü simgeler.



Şekil 4.5. Asenkron motorun basitleştirilmiş sürekli hal eşdeğer devresi (Machowski, 1997).

4.3.2.2 Asenkron Motor Karakteristikleri

4.3.2.2.1 Güç–Kayma Karakteristiği

Şekil 4.5'te seri koldan akan akımın karesi $I^2 = V^2 / [X^2 + (R_R / s)^2]$ olup burada V uygulanan gerilimdir. Bu akımdan kaynaklanan aktif güç gereksinimi ise;

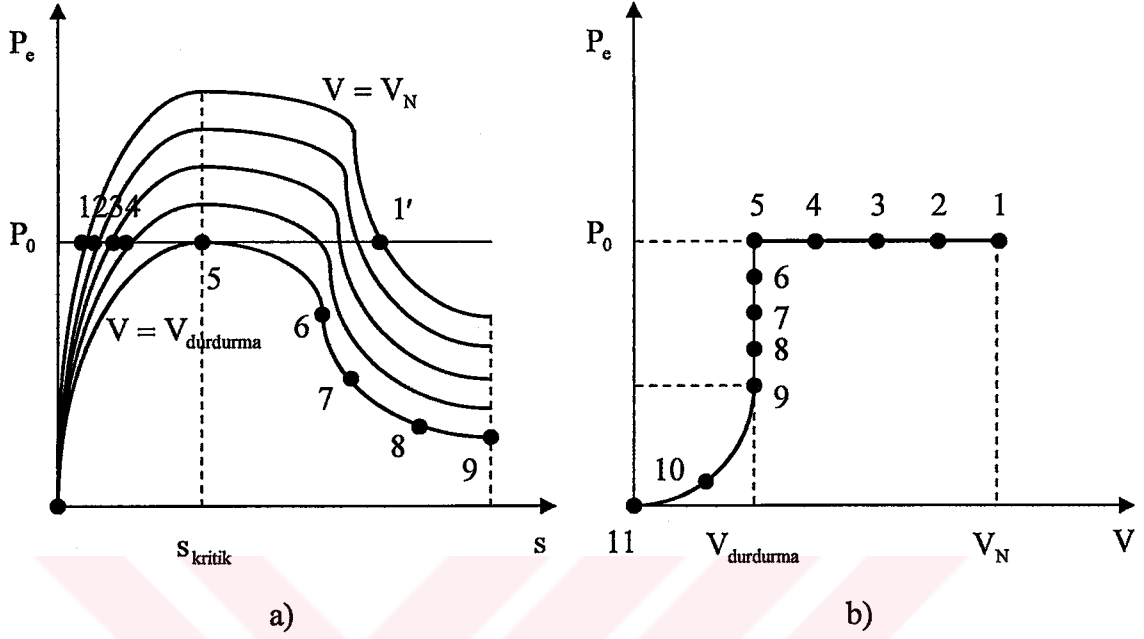
$$P_e = I^2 \frac{R_R}{s} = V^2 \frac{R_R \cdot s}{R_R^2 + (X \cdot s)^2} \quad (4.1)$$

şeklindedir.

Şekil 4.6a'daki koyu çizgiler gerilimin farklı değerlerinde P_e 'nin kaymaya bağlı değişimini gösterir. Güç ifadesini değiştirerek, $s = s_{\text{kritik}} = R_R / X$ kritik kayma değerinde maksimum yüklenme, $P_{\text{maksimum}} = V^2 / 2 \cdot X$ değeri elde edilir. s_{kritik} 'in gerilime bağlı olmadığına dikkat ediniz.

Asenkron motor karakteristiğindeki kararlı çalışma bölgesi tepe değerinin sol tarafıdır. Burada $s < s_{\text{kritik}}$ 'dir. Tepe değerinin sağ tarafındaki $1'$ noktasının en yüksek karakteristiğe sahip olduğu kanıtlanmıştır. Bir anlığına bütün kayıpları ihmal edersek, $1'$ noktası denge noktası olur ki bu durumda uygulanan P_e elektriksel gücü, P_m mekanik gücüne eşit olur. Bu durum diyagramda P_0 ile gösterilmiştir. Şimdi kaymada bir düşüşe (yani hızda bir artışa) neden olan bir olayın meydana geldiğini varsayalım. Bu durum, uygulanan elektrik gücünde artışa neden olur. P_m 'in sabit kaldığını düşünürsek motor, yükün absorbe edeceği güçten daha fazlasını çeker ($P_e > P_m$) ve bu fazla güç, rotoru hızlandırır ve hız daha da artar. Hızdaki bu artış çalışma noktasının $1'$ noktasından sola kaymasına neden olur. Şimdi ise kaymada artışa

(yani hızda azalmaya) neden olan ani bir olayın meydana geldiğini varsayalım. Bu durum, P_e 'de ve güçte azalmaya ve rotorun yavaşlamasına neden olur. Böylece kayma artar ve sonuçta $s = 1$ olup, motor durur.



Şekil 4.6. Asenkron motorun (a) V geriliminin farklı değerlerindeki $P_e(s)$ karakteristiği (b) sabit momentle yüklenmiş motorun $P_e(V)$ karakteristiği.

Bu durum, kararlı denge noktası $1'$ 'de tam tersine döner. Bu noktada kaymada azalmaya (yani hızda artışa) neden olacak herhangi bir olay, motora uygulanan güçte azalmaya neden olur. Güçteki bu açık ($P_e < P_m$), motorun 1 noktasına geri dönecek kadar yavaşlamasına (yani kaymanın artmasına) neden olur. Benzer şekilde, kaymada artışa neden olan bir olay meydana geldiğinde motor yeniden 1 noktasına geri döner.

4.3.2.2.2 Aktif Güç–Gerilim Karakteristiği

Motorun çalışma noktası, $P_m(s)$ mekanik yük karakteristiği ile $P_e(s)$ motor karakteristiğinin kesişme noktasıdır. Mekanik yükler, kolay kaldırılan (kalkışta sıfır momentli) ve zor kaldırılan (kalkışta sıfırdan farklı momentli) yükler olarak sınıflandırılabilir. Bu tip yükler, motorun gerilim karakteristiklerinden türetilir. Bu karakteristikler daha sonra diğer mekanik yükleri içermek için genişletilir.

T_m mekanik momenti sabitse, motorun mekanik gücü $P_m = T_m \cdot \omega = T_m \cdot \omega_s \cdot (1-s) = P_0 \cdot (1-s)$ olur. Burada $P_0 = T_m \cdot \omega_s$ 'dir. Mekanik güç ise eşdeğer devredeki $R_R \cdot (1-s)/s$ direncindeki

güç kaybıdır. Motorun toplam talep gücü P , P_m ile rotor direncinde kaybolan $P_{KAYIP} = I^2 \cdot R_R$ 'nin toplanmasıyla elde edilir.

$$P = P_m + P_{KAYIP} = P_0 \cdot (1 - s) + I^2 \cdot R_R = P_0 \cdot (1 - s) + \frac{V^2 \cdot R_R \cdot s^2}{(X \cdot s)^2 + R_R^2} \quad (4.2)$$

Çalışılan noktadaki kayma değeri, $P_e(s)$ ve $P(s)$ karakteristiklerinin kesişme noktasıdır.

$P_e(s) = P(s)$ denklemi;

$$\frac{V^2 \cdot R_R \cdot s}{(X \cdot s)^2 + R_R^2} = P_0 \cdot (1 - s) + \frac{V^2 \cdot R_R \cdot s^2}{(X \cdot s)^2 + R_R^2} \quad (4.3)$$

eşitliğini verir.

Bu sonuç motorun durmaması ($s \neq 1$ olması) durumu için geçerlidir. Basit bir cebir hesabıyla,

$$s^2 - 2 \cdot a \cdot s_{kritik} \cdot s + s_{kritik}^2 = 0 \quad (4.4)$$

Burada $a = V^2 / [2 \cdot P_0 \cdot X]$ ve $s_{kritik} = R_R / X$ 'dir. Bu denklemin kökleri;

$$s_{1,2} = s_{kritik} \cdot \left[a \pm \sqrt{a^2 - 1} \right] \quad (4.5)$$

olarak bulunur.

Kökler ancak $|a| \geq 1$ olmasıyla reel olur ve bu da ancak $V \geq \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot X}$ ile gerçekleşir. Yani motor hareket halindeyken uygulanacak minimum $V_{durdurma} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot X}$ gerilimine durdurma gerilimi denir. $V > V_{durdurma}$ ise s_1 ve s_2 diye iki farklı kök mevcuttur. Küçük olan kök, kararlı çalışma noktasını (yani karakteristiğin tepe değerinin solundaki kısmını) verir. Bu kökü (4.1) denklemi ile değiştirirsek;

$$P_{e|s=s_{1,2}} = V^2 \cdot \frac{R_R \cdot s_{kritik} \cdot \left[a \pm \sqrt{a^2 - 1} \right]}{R_R^2 + X^2 \cdot s_{kritik}^2 \cdot \left[a \pm \sqrt{a^2 - 1} \right]^2} = \frac{V^2}{X} \cdot \frac{\left[a \pm \sqrt{a^2 - 1} \right]}{1 + \left[a \pm \sqrt{a^2 - 1} \right]^2} = \frac{V^2}{2 \cdot a \cdot X} = P_0 \quad (4.6)$$

denklemi elde edilir.

Bu durum, T_m 'nin sabit olduğu büyük bir yükte, aktif güç talebinin uygulanan gerilim ve kaymadan bağımsız olduğunu gösterir. Bu durum, Şekil 4.6a'da $P = P_0$ yatay çizgisiyle gösterilmiştir. Şekil 4.6b ise $P_e(V)$ karakteristiğini benzer şekilde göstermektedir.

Motorun nominal gerilim ($V = V_N$) ile çalıştığını varsayalım. Denge noktası olan 1, karakteristiğin tepe noktasında olur. Uygulanan gerilimdeki bir düşüş, güç-kayma karakteristiğini azaltır ve (çalışma noktasını) sağa doğru kaydırır (Şekil 4.6a'da 2, 3 ve 4 noktaları). Aktif güç talebi sabittir, $P_e(V)$ karakteristiği 1, 2, 3 ve 4 noktaları için Şekil 4.6b'de gösterildiği gibi yataydır. Şekil 4.6a'daki en düşük karakteristik, $V = V_{\text{durdurma}}$ durma gerilimi karakteristiğidir. Çalışma noktası 5 noktası olup, kayma $s = s_{\text{kritik}}$ 'tir. Bu noktadan sonra gerilimde çok ufak bir düşüşün olması, daha düşük karakteristiğe sahip 6, 7, 8 noktalarına kadar kaymanın artmasına neden olur. Sonuçta 9 noktasında motor durur ($s = 1$). Motor, durma karakteristiği göstermeye başladığında, gerilim sabit olmasına rağmen aktif güç azalır ve kayma artar. Sonuç olarak Şekil 4.6b'de verildiği gibi 6, 7, 8 noktaları için $P_e(V)$ karakteristiği dikeydir. 9 noktasında kayma 1'dir ve motor kendi kısa devre gücünü harcar ($P_{sc} = V^2 \cdot R_R / (X^2 + R_R^2)$). Gerilimdeki azalma devam ederse aktif güç talebi daha da azalır ve (4.1) denkleminde;

$$P_e(s)|_{s=1} = \frac{V^2 \cdot R_R}{X^2 + R_R^2} \quad (4.7)$$

aktif güç talebi bulunur. Bu durum, Şekil 4.6b'de 9, 10, 11 arasında parabolik bir eğri olarak verilmiştir.

4.3.2.2.3 Reaktif Güç–Gerilim Karakteristiği

Motorun her bir fazında harcanan reaktif gücünün, iki adet paralel koldan harcanan güç olarak iki bileşeni vardır (Şekil 4.5).

$$Q_M = \frac{V^2}{X_M} \quad \text{ve} \quad Q_s = I^2 \cdot X = \frac{P_e \cdot s}{R_R} \cdot X = P_e \cdot \frac{s}{s_{\text{kritik}}} \quad (4.8)$$

Q_M , motorun mıknatıslanma reaktansından, Q_s ise motor yükünden dolayı oluşur. T_m 'nin sabit olduğu ve aktif güç talebi $P_e = P_0$ olan aşırı yüklü bir motorda, kararlı çalışma noktasında kayma $s = s_{\text{kritik}} = [a - \sqrt{a^2 - 1}]$ 'dir. (4.5) denklemine göre bu değerleri Q_s ifadesini elde etmek için değiştirirsek $V > V_{\text{durdurma}}$ için;

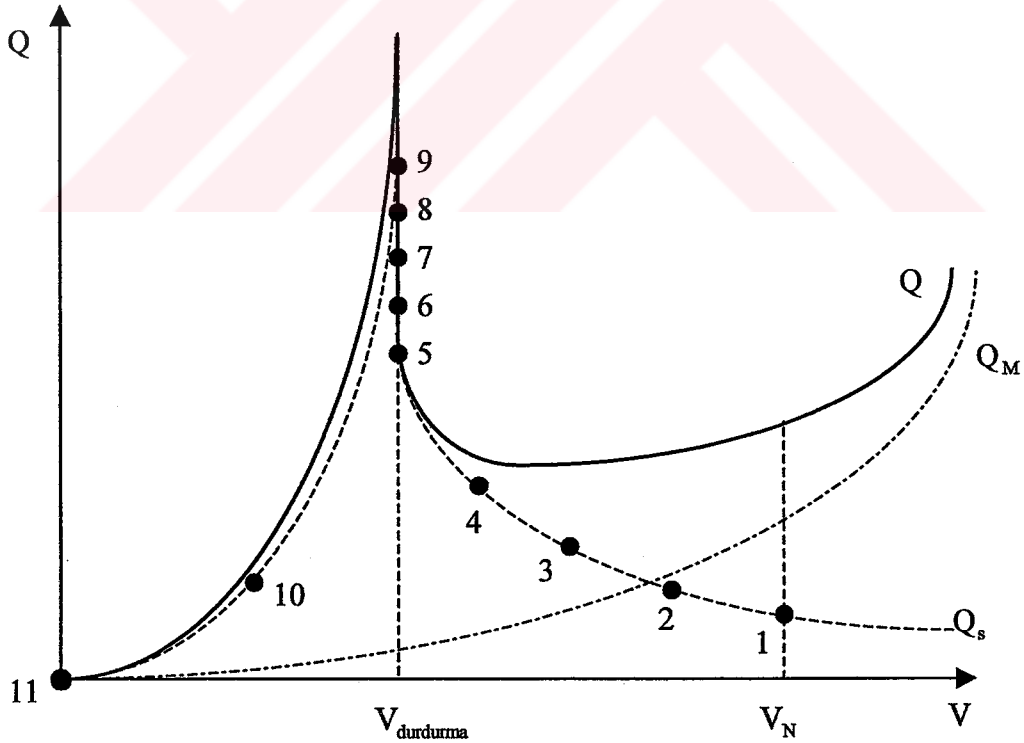
$$Q_s = \frac{V^2}{2 \cdot X} - \sqrt{\left(\frac{V^2}{2 \cdot X}\right)^2 - P_0^2} \quad (4.9)$$

ifadesi elde edilir.

Şekil 4.7, her bir gerilime bağlı olmak üzere Q_M , Q_s , ve $Q = Q_M + Q_s$ şekillerini verir. $Q_M(V)$ eğrisi, orijinden başlayıp sonsuza doğru giden bir parabol şeklindedir. $Q_s(V)$ bileşeni $V = \infty$ 'da 0 olur. V azalınca $Q_s(V)$ artar ve 5 noktasında $V = V_{\text{durdurma}}$ iken bir değer alır. Gerilimdeki düşüş devam ederse $Q_s(V)$, kararsız bölge olan 5, 6, 7, 8, 9 dikey çizgisi boyunca hareket eder. 9 noktasında motor durur. Gerilimde daha da büyük bir düşüş meydana gelirse $Q_s(V)$ kısa devre karakteristiği olarak tanımlanan ($s = 1$ için denklem (4.8)) 9, 10, 11 parabolü boyunca azalır.

Sonuçta ortaya çıkan $Q(V) = Q_s(V) + Q_M(V)$ karakteristiği Şekil 4.7'de kalın çizgilerle verilmiştir. Bu karakteristik incelendiğinde şu sonuçlara varılır.

- Gerilim, V_N nominal gerilimine yaklaştıkça, karakteristiğin eğimi pozitif oluyor.
- Gerilim azaldıkça, karakteristik ilk başta düzeliyor (azalan gerilime karşı duyarlılık gösteriyor) ve sonra gerilimdeki azalma devam edince reaktif güç motor durana dek çok hızlı bir biçimde düşüyor.



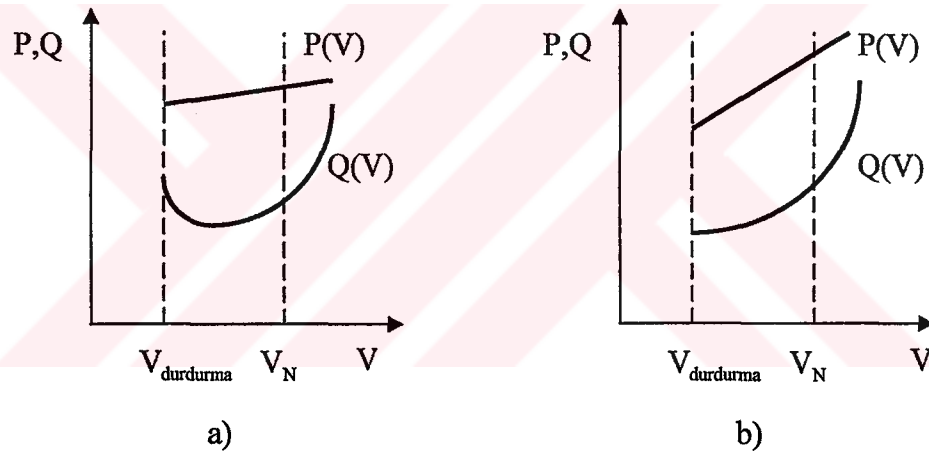
Şekil 4.7. Asenkron motorun reaktif güç-gerilim karakteristiği.

Burada ağır yüklü kalkış incelenmiştir. Oysaki gerçek durma gerilimi, motor tarafından

işletilen mekanik yükün tipine bağlıdır. Ağır yüklü motorlarda, ağır yüklü kalkış çalışmada durma gerilimi, nominal gerilimdeki ile hemen hemen aynıdır. Hafif yüklü motorlarda, özellikle basit kalkışlı mekanik yüklerde, durma gerilimi oldukça küçüktür.

4.3.2.2.4 Motor Korumann ve Starter Kontrolünün Etkisi

Yukarıda yapılan yorumlar, motor koruma ve starter kontrolü için geçerli değildir. Bazı sanayi motorları, A.C. kontaktörler içeren elektromekanik starter kontrolüne sahiptir. Gerilim çok düşükse kontaktörler ani olarak motor girişini anahtarlayarak durdururlar. Durdurma gerilimi 0,3 ile 0,7 p.u. arasındadır. Bunun etkisi Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, durdurma geriliminden daha düşük gerilimlerde sıfır aktif ve reaktif güç talebi olarak modellenenir. Şekil 4.8a'da gösterildiği üzere, yalnızca ağır yüklü motorlarda durdurma geriliminin üzerinde bir gerilimde motor durabilir ve reaktif güç talebinde büyük bir artış meydana gelebilir. Şekil 4.8b'de görüldüğü gibi durma gerilimi, durdurma geriliminden düşükse, motor durmaz veya reaktif güç talebinde hızlı bir artış meydana gelmez.



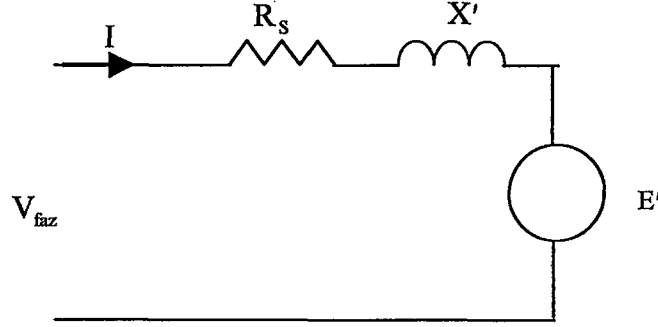
Şekil 4.8. Starter kontrollü bir asenkron motorun karakteristikleri (a) ağır kalkış yüklü durumda (b) hafif kalkış yüklü durumda.

Düşük gerilimle çalışırken motor aynı zamanda aşırı akım korumasından dolayı dengeyi kaybeder. Bu genellikle belli bir zaman gecikmesini içerir.

Konutlarda ve ticarethanelerde kullanılan motorlar, genellikle normalden büyük boyludur ve nominal gücünün % 60'ının da altında çalışırlar. Böylece, bunların karakteristikleri Şekil 4.8b'deki gibi olur. Buna karşılık büyük sanayi motorları tam olması gereken değerde üretilip ağır mekanik yüklü kalkışlarda ise Şekil 4.8a'daki gibi bir karakteristik gösterirler (Machowski, 1997).

4.3.2.3 Asenkron Motor Dinamikleri

Statordaki geçici olaylar ihmal edilirse rotor devresinin her bir ekseninde oluşan elektriksel geçici olaylar belirlenir. Şekil 4.9, geçici empedansın arkasında oluşan bir gerilimi içeren geçici hal eşdeğer devresini gösterir.



Şekil 4.9. Asenkron motorun geçici hal eşdeğer devresi.

Burada X' aşağıdaki gibi bulunur:

$$X' = X_s + \frac{X_M \cdot X_R}{X_M + X_R} \quad (\text{Kilitli rotor kısa devre reaktansı}) \quad (4.10)$$

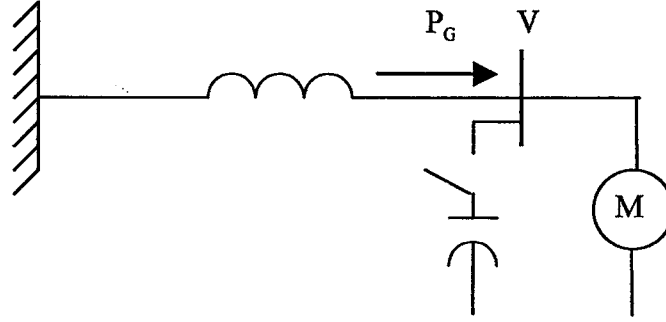
Gerilim 0,9 p.u.'nun altına indiğinde motorun dinamik karakteristikleri çok önemli hale gelir. 0,7 p.u. ile 0,9 p.u. arasındaki gerilimlerde bazı motorlar durur ve büyük miktarlarda reaktif güç çekerler. Bir motorun durması yakınındaki diğer motorların da durmasına neden olabilir. Bununla ilgili bir diğer sorun da duran motorun kaldırılmasıdır.

Şekil 4.5'teki asenkron motor eşdeğer devresini ele alalım. Bozucu etkiden sonra motor, ilk önce empedans yükü gibi davranır. Kayma (s) ani olarak değişmez ancak birkaç 10 saniyelik sabit dinamiklerden sonra değişir.

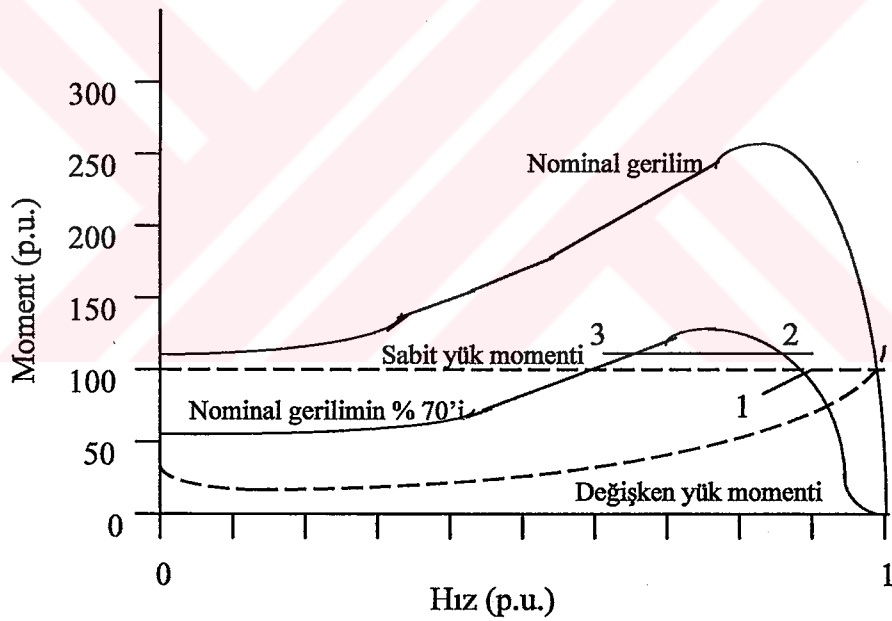
Örnek : Zayıf bir güç sisteminden beslenen bir asenkron motorun P-V eğrisini ele alalım. Motorun (1) normal çalışma noktasında, (2) P-V eğrisinin alt kısmında geçici olarak olduğunu varsayalım. Motoru stabilize etmek için kullanılan bir kondansatörün enerjilenmesinin etkisini analiz edelim. Gerilim artar mı azalır mı? Son çalışma noktası neresi olur?

Çözüm : Şekil 4.10'da bu örneğe ait eşdeğer devre görülüyor. Şekil 4.11, düşük gerilimin kaymada artışa neden olduğunu gösterir. Şekil 4.12 ise, statik (sabit motor gücü) P-V eğrilerini ve motorun sabit kayma rezistans karakteristiklerini gösterir. A noktası normal koşullar altında ilk andaki çalışma noktasını, B noktası da geçici çalışma noktasını (Geçici

çalışma noktasındaki güç mekanik güce eşit) gösterir. İlk andaki empedans cevabından dolayı, kondansatörün enerjilenmesi A'dan A'ne veya B'den B'ne doğru ani bir değişime neden olur. Bir başka deyişle elektriksel moment (veya güç), mekanik momentten büyük olur. Motor, kaymayı azaltıp C noktasına ulaşınca çalışır.



Şekil 4.10. Örneğe ait eşdeğer devre.

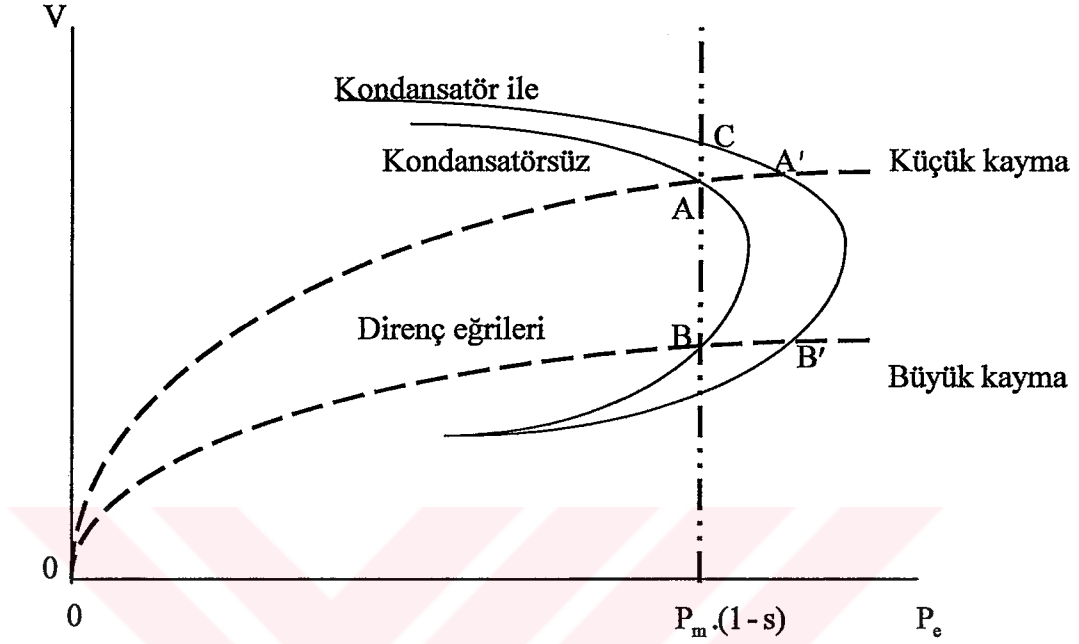


Şekil 4.11. Gerilimdeki azalmaya sonucu kaymadaki azalmaya ait moment-hız eğrisi.

Gerilim B'den daha aşağı değere düşerse ve B'deki (kondansatör bağlandıktan sonraki) güç ilk andaki güçten daha küçük olursa motor yavaşlar, durur ve sonunda gerilim çökmesi yaşanır.

Şekil 4.11'e bakarak motorun kararlılığını inceleyelim. Düşük gerilim ve sabit moment yükündeki 1 noktasını ele alalım. Mekanik yükteki küçük bir artış, motorun yavaşlayıp yeni

bir 2 noktasında çalışmasını sağlar. Maksimum momentin oluştuğu kaymadan daha küçük bir kaymada (3 noktası) mekanik momentteki küçük bir artıştan dolayı oluşan yavaşlama sonunda motoru durdurur. Ani çalışma noktası 3, bir arızadan (örneğin kısa devre) dolayı oluşan yavaşlamadan dolayı oluşabilir.



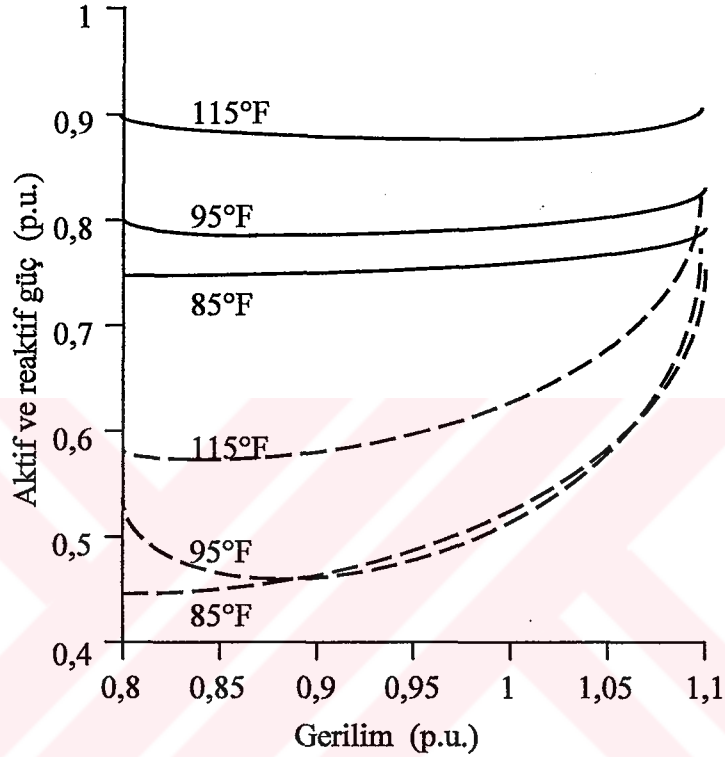
Şekil 4.12. Kondansatörün enerjilenmesi ile ilk andaki A ve B noktalarındaki çalışmanın C noktasındaki son çalışma anına ait P-V eğrisi.

Yine Şekil 4.11'e bakarak, motorun maksimum momentinin mekanik yük karakteristiği ile kesişemeyeceği bir değere düştüğünde, motor kararsızlığı ve gerilim azalmasından dolayı durma görülür. Motor kararsızlığı ve durma, gerilim çöküşüne neden olabilir (Taylor, 1992).

Bir asenkron motor durduğu halde hâla güç sistemine bağlı ise, motor, yüksek akım çeken saf bir empedans yükü haline dönüşür. Bu durumda motordan yüksek miktarda reaktif güç çekilir. Motorun termal aşırı yük korumasından dolayı, duran motorlar belki devreden ayrılabilirler. Motorun durduğu süreçte, sistem gerilimi nominal değerinin çok altındadır ve gerilim duran motor devre dışına alınmadıkça düzelmez. Buna karşılık, diğer bir durumda, güç sisteminde duran motorlardan dolayı oluşan yüksek akım düşük gerilim durumu sonucunda iletim hattındaki mesafe rölesi harekete geçer, hatları devre dışı bırakır, gerilim profilini daha da kötüleştirir ve sonuçta koruma alanındaki bütün yükleri devre dışı bırakmış olur (Liu, 1994).

4.3.3 Havalandırma ve Isı Pompaları

Çok büyük yük seviyelerindeki gerilim kararsızlığı, aşırı sıcaklıklardan dolayı oluşabilir. Örneğin gelişmiş ülkelerde yazın yükün büyük bir kısmı havalandırmadır. Şekil 4.13'de tipik bir havalandırıcının sıcaklık ve gerilime bağlı statik performansı gösterilmiştir. Isı pompaları çok düşük derecelerdeki soğutma modu hariç benzer özelliklere sahiptir. Ek rezistans ısıtması baskın olabilir.



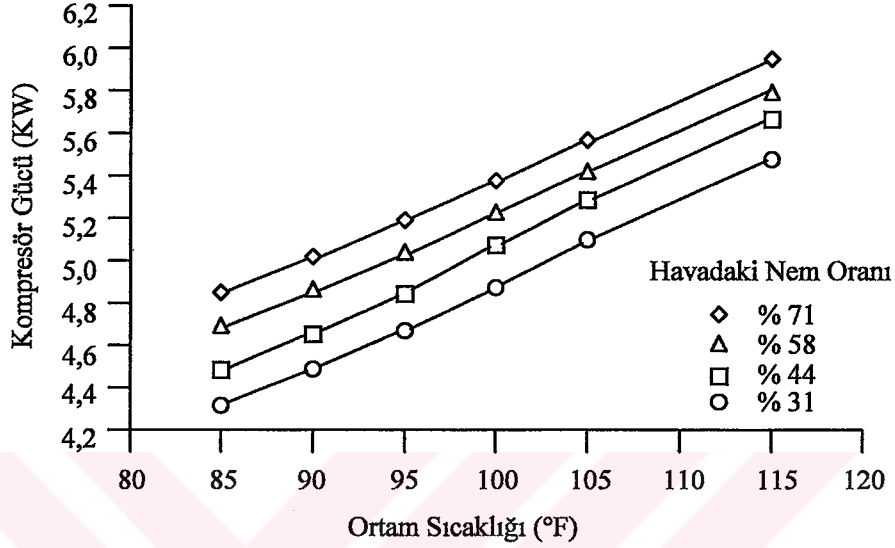
Şekil 4.13. 208/230V, 119000BTU'da üç fazlı merkezi havalandırma için statik aktif ve reaktif gücün gerilime göre değişim eğrileri

Yapılan deneyler, havalandırıcıların beş çevrim veya daha fazla süre boyunca nominal geriliminin %60'ının altında bir gerilimle beslendiğinde durduğunu göstermiştir. Havalandırıcılar yüksek gerilimlerde de dururlar. Kaynak gerilimi normal değerine döndüğünde duran motorlar, kompresör basıncı düşene kadar çalışmazlar. Termal aşırı yük koruması, havalandırıcının bağlantısını 3 saniye ile 30 saniye arasında keser. Büyük ticari havalandırmalar düşük gerilim rölelerine sahiptirler. Gerilim %70'in altına düştüğünde beş çevrim boyunca üniteleri serbest bırakır (Taylor, 1992).

4.3.3.1 Havalandırıcı Karakteristikleri

Çoğu küçük havalandırma sistemlerinde güç gereksinimleri, çevre sıcaklığı ve nem ile değişir.

Tipik havalandırıcıların ani kompresör güç gereksinimleri, Şekil 4.14'te dört farklı nem oranı için gösterilmiştir. Bu sıcaklık-güç gereksinimi ilişkisi, soğutucunun basınç-sıcaklık özelliklerinden kaynaklanır. Örneğin, çevre sıcaklığı artarsa, yoğunlaştırıcı (kondenser) içindeki soğutucunun sıcaklığı artar ve basınçta artış görülür. Sonra, yüksek basınçtan dolayı, motoru çalıştıran kompresör daha sert çalışır (daha fazla kW harcar).



Şekil 4.14. 46000 Btu/hr havalandırıcı için ani talep-çevre sıcaklığı ilişkisi.

95°F çevre sıcaklığında örnek olarak verilen havalandırıcı ünitesinde, 46000 Btu/hr toplam net kuru batarya kapasitesine sahiptir. Bu ünite için kapı içi fan gücü 580 Watt, kapı dışı fan gücü 340 Watt ve kompresör yükü 5010 Watt'tır.

Havalandırıcının ani talebi, cihazın çalışma süresinin uzunluğuna bağlı değildir. Şekil 4.14'teki 46000 Btu/hr'luk havalandırıcı, tam çevrimde 95°F çevre sıcaklığında bir saat için 5,2 kWh enerji harcar. Böylece, bu koşullar altında ani talep 5,2 kW'tır. Çevre sıcaklığı 105°F'a çıkarsa, tam çevrimde bu ünitenin bir saatlik talebi 5,6 kWh olur yani güç gereksiniminde %8'lik bir artış olur. Çevre sıcaklığı çevrim veya frekanstan değil de yük artışından sorumludur.

Termostat ayarı, çevre sıcaklığı, güneş ısı kazanımı ve diğer değişkenlere bağlı, çalışmama (%0) ile %100 (tam çevrim) arasında değişen bir zaman periyodu içerisinde doğal bir frekans uygulaması ile bir binanın belirli bir hacmini soğutmak için havalandırıcılar yerleştirilir. Eğer doğal frekans veya termostat kontrollü çevrim %80 ise, zaman periyodu içindeki ortalama talep, Şekil 4.14'te gösterilen çevre sıcaklığındaki ani talebin %80'i olur. Yani, çalışan

herhangi bir özel havalandırıcı ünitesinin ortalama talebi, hem uygulamanın frekansına hem de ani talebe bağlıdır.

Çevre sıcaklığı, kapı içi fan büyüklüğü, borular ve kanal çekme gibi havalandırıcının ani talebini etkileyen bazı değişkenler vardır.

Havalandırıcının toplam kaldırdığı ısı, fark edilir ısı ile gizli olarak kaldırılan ısının toplamıdır. Fark edilir ısının kaldırılması, sıcaklığı azaltmayı (soğutmayı) gerektirir ve termostat ile kontrol edilir. Kaldırılan gizli ısı gerçekte, kaldırılan nem (nemliliği kaldırma) ve nemi azaltma (yoğunlaşma) ile ilgili enerjidir. Kaldırılan gizli ısı ile sıcaklık değişimi olmaz, yalnızca nem azaltılır.

İçerdeki hava, su buharı içermiyor ise, görünür kapasite, havalandırıcının toplam sınıf kapasitesine eşittir (Örnekte 46000 Btu/hr). Buna kuru batarya durumu denir. Buna karşılık, her zaman için havada nem olduğundan dolayı, toplam sınıf kapasitesi, su buharı yoğunlaştırma (gizli) ile sıcaklık azaltma (fark edilir) arasında ayrılır.

Şekil 4.14, sırasıyla %31, %44, %58, %71'lik nem değerlerine ait dört adet doğruyu göstermektedir. Azaltılmış gizli yükten dolayı iç havada düşük miktarda su buharı olması durumunda daha düşük kompresör gücü gerekir böylece toplam yük azalır. İçerdeki nemin artması ve çevre sıcaklığının artması koşulları ani kompresör talebini artırır. Önceden belirttiğimiz gibi, çevre sıcaklığının 95°F'tan 105°F'a çıkması, ani talepte %8'lik artışa ve iç hava ıslak termometre sıcaklığının 59°F'tan 67°F'a çıkması, ani kompresör talebinde yaklaşık %7'lik bir artışa neden olur.

Havalandırıcının ani talebini bazı faktörler etkiler. Çevre sıcaklığı, bunlar içerisinde en önemlisidir. Aynı zamanda nem, ani talebi etkiler ancak daha önemlisi görünür kapasiteyi etkiler. Görünür kapasitenin, çalışma zamanı ve çevrim frekansı üzerinde önemli bir etkisi vardır (Gustaffson vd., 1993).

4.3.4 Ayarlı Hız Uygulamaları

Güç elektroniğindeki motorların değişik hız kontrollerinde kullanılması yaygınlaşmıştır. Eğer kontrollü doğrultucular kullanılıyorsa, D.A. gerilimi sürdürmek için tetikleme açısı düşürülerek düşük gerilimde güç faktörü iyileştirilir. Deneyler sonucunda ayarlı hız uygulamalarında hattın gerilimi %90'ına kadar düşer.

4.3.5 Senkron Motorlar

Senkron motorlar, yüksek güç (megawatt mertebelerinde) uygulamalarında kullanılırlar. Asenkron motorlara oranla daha karmaşık ve pahalı olmalarına karşın daha verimlidirler. Gerilim kararlılığındaki istenen karakteristikleri elde etmek için gerilimi sabitlemede uyarma kontrolü kullanılır (Taylor, 1992).

4.3.5.1 Senkron Motorun Özellikleri

Senkron motorlarda devir sayısı yüküyle değişmez. Bununla birlikte yük arttıkça senkron motor şebekeden daha çok akım çeker. Yükün çok fazla artması sonucu, stator ve rotor kutupları arasındaki kilitleme bozulur. Kilitlemenin bozulduğu bu yüke eşzamanlılıktan çıkış yükü, bu andaki momente de kopma momenti denir.

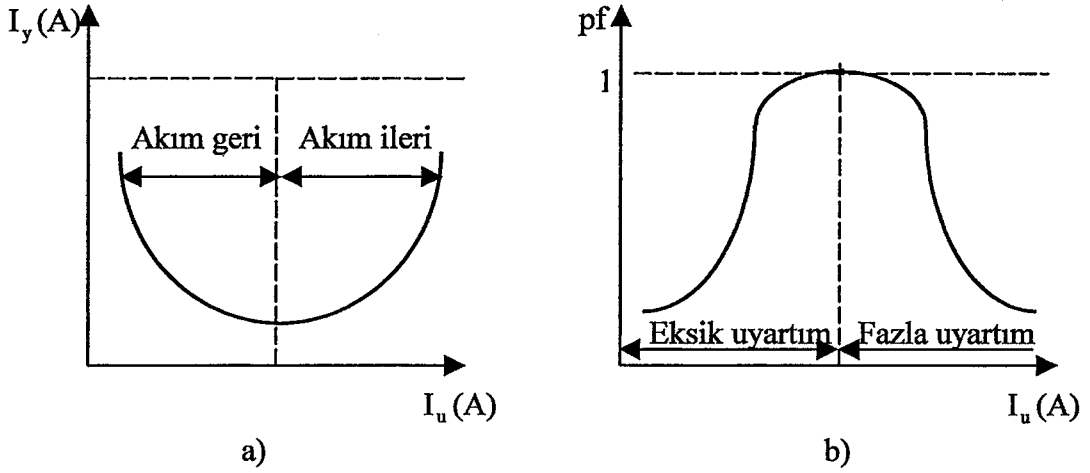
Senkron motorlarda kopma yükü, anma yükünün %150'si ile %300'ü arasında değişir. Ancak anma yükünden daha büyük yüklerde motorun çalışma süresi azalır ve kısa bir süre sonra motor durur. Motorun durması ile şebekeden çok büyük miktarda bir akım çekilir. Buna engel olmak için motor devresine sigorta, röle, kontaktör, kesici vb. gibi gerekli devre elemanları konmalıdır.

Senkron motorlarda yük sabit tutulup uyarım akımı değiştirilecek olursa, motorun çalışma durumu, endüktif, omik veya kapasitif olarak değiştirilebilir. Yani uyarım akımı ayarlanarak, senkron motorun şebekeden çektiği akım ve güç faktörü değiştirilebilir. Uyarım akımı fazla ise motor, kapasitif, az ise endüktif çalışır. Omik çalışmada güç faktörü 1'dir. Buna göre omik çalışmada senkron motorun şebekeden çektiği akım en küçük değerindedir. Çalışma şekli ne olursa olsun, yük değişmedikçe senkron motorun şebekeden çektiği akımın aktif bileşeni sabit kalır. Reaktif bileşen ise uyarıma göre değişir (Peşint, 1996).

4.3.5.1.1 Senkron Motorun V Eğrileri

Çeşitli yük durumları için motorun alan gereksinimlerini görmenin kullanışlı bir yolu, V eğrileri ile yapılır. Bu eğriler, sıfır güçten istenildiği kadar yüksek güçlere ve sıfır geri güç faktöründen sıfır ileri güç faktörleri arasındaki güç faktörlerinde, anma geriliminde motorun uyarım gereksinimlerinin hesaplanmasının bir sonucudur (Gürdal, 2001).

Sabit yük ve sabit gerilimde çalıştırılan bir senkron motorun uyarım akımı ile yük akımı arasındaki bağıntıyı veren eğrilere V eğrileri denir ($I_y = f(I_u)$). Uyarım akımı değiştirildikçe yük akımının değişmesi "V" harfine benzediğinden bu eğrilere V eğrileri denilmiştir. Yük akımı ile güç faktörünün değişmesi ise ters orantılıdır.



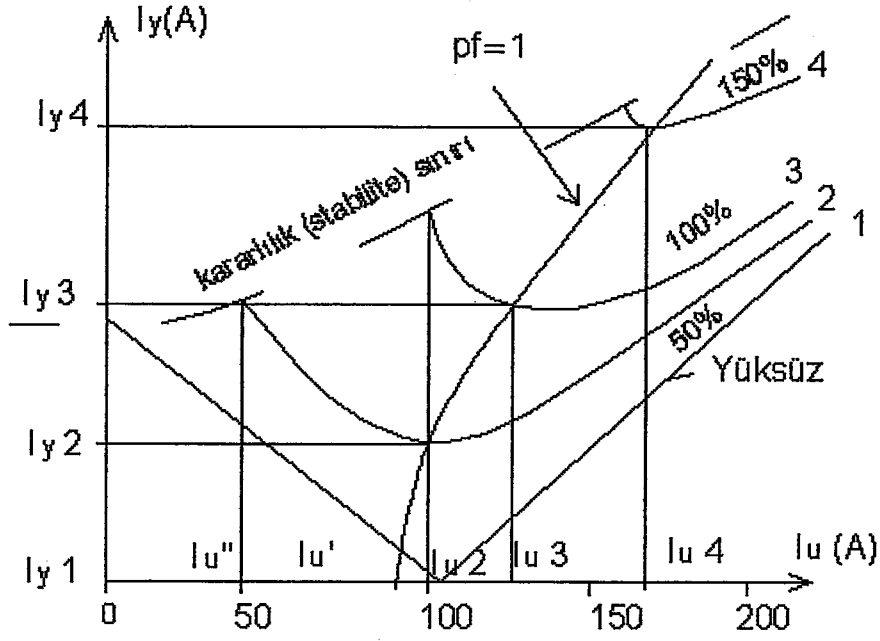
Şekil 4.15. (a) Yük akımının (b) Güç faktörünün uyartım akımı ile değişim eğrileri

Belirli bir yükte en küçük yük akımını oluşturan uyartım akımından daha küçük uyartım akımlarında ise senkron motor kapasitif çalışır. Şekil 4.15'te yük akımının ve güç faktörünün (pf) uyartım akımı ile değişim eğrileri görülmektedir.

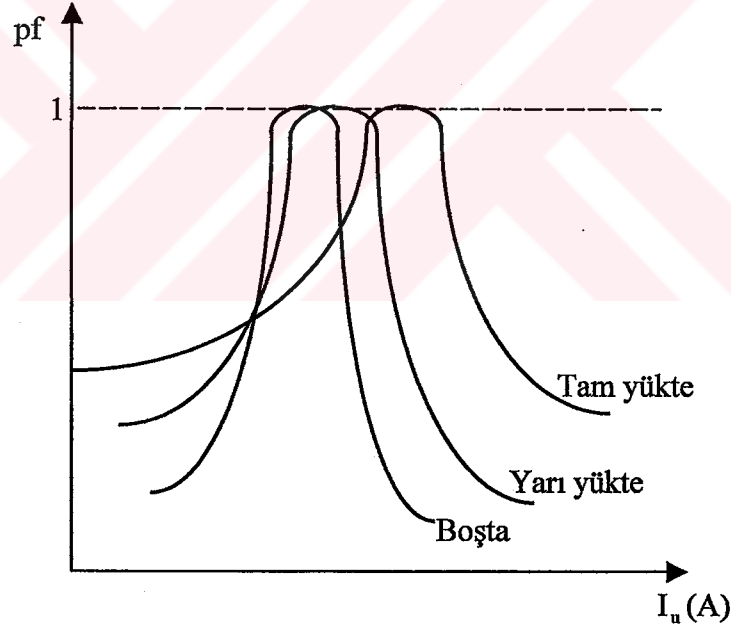
V eğrileri motorun boşa çalışma ve çeşitli yüklerde çalışma durumlarında elde edilir. Şekil 4.16'da görüldüğü gibi, uyartım eğrileri yatay, yük akımları ise düşey eksenle işaretlenerek V eğrileri çizilir. $pf = f(I)$ eğrileri de aynı eksene veya başka eksene çizilebilir. Şekil 4.17'de güç faktörünün uyartım akımı ile değişim eğrileri görülmektedir.

Şekil 4.16'da, 1 numaralı eğri, ideal V eğrisidir. Bu eğri motorun kayıplarının olmadığı durum için geçerlidir. 2 numaralı eğri, yarı yükte, 3 numaralı eğri tam yükte, 4 numaralı eğri ise %150 yükte elde edilmiştir. Eğrilerin $pf = 1$ değerindeki en küçük yük akımları I_{y1} , I_{y2} , I_{y3} , ve I_{y4} olarak işaretlenmiştir. Bu noktalar birleştirilecek olursa başka bir yükte $pf = 1$ için gerekli uyartım akımı hesaplanabilir.

Senkron motor belirli bir yükte çalışırken uyartım akımı sıfır yapılamaz. Yoksa senkron motor eşzamanlılıktan kopar ve durur. Şekil 4.16'da görülen kararlılık sınırı, herhangi bir yük için en küçük uyartım akımlarının bulunmasına yardımcı olur (Bazı senkron motorlarda 0 ile %40 arasındaki yüklerde, uyartım sıfır yapıldığında motor eşzamanlılıktan kopmaktadır.). Herhangi bir yük için çizilen V eğrisinin kararlılık sınırını kestiği yerden yataya inilen dikmenin I_u uyartım akımı eksenini kestiği yerdeki uyartım, o yük için gerekli olan en küçük uyartım akımını verir. Bu yükte, o uyartımdan daha küçük bir uyartım akımı uygulanamaz. Yoksa senkron motor eşzamanlılıktan kopar.



Şekil 4.16. Senkron motorun çeşitli yüklerdeki V eğrileri.



Şekil 4.17. Senkron motorun çeşitli yüklerde güç faktörü eğrileri.

Eğrilerde görüldüğü gibi her yükte $pf = 1$ için gerekli uyarım akımı değişiktir. Motor yükü arttıkça, eğriler sağa kaymaktadır. Çünkü, çeşitli yüklerde endüvi reaksiyonu ve doyma farklıdır. Uyarım akımının değiştirilmesi ile yük akımı da değiştiğinden endüvi sargılarında $I_y^2 \cdot R_s$ şeklindeki bakır kaybı da değişir. Bu bakımdan güçte de buna uygun küçük

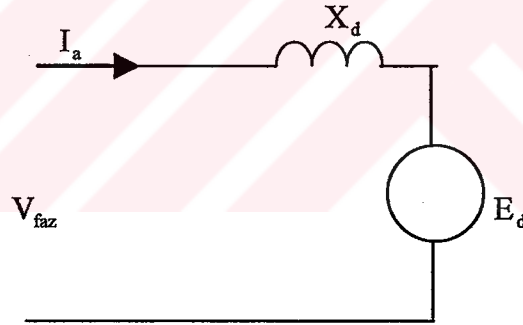
değişmeler olmaktadır.

Şekil 4.17’de ise çeşitli yüklerdeki pf eğrilerinin tepe noktalarının, aynı yüklerdeki V eğrilerine uygun olarak sağa kaydığını görüyoruz. Uyarım akımlarının değiştirilmesi ile pf ’nin değişimi boşa çalışmada çok fazladır. Yük arttıkça pf ’nin uyarım akımı ile değişimi de azalmaktadır.

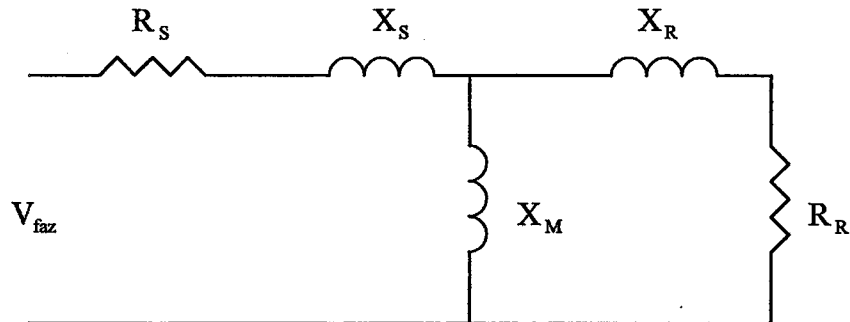
V eğrileri kullanılarak, bilinen senkron motorlar yardımı ile şebekelerin, fabrika, işyeri vb.lerinin güç faktörleri kolayca ayarlanabilir. V eğrileri, senkron makinenin alternatör olarak çalışma durumunda da çıkarılabilir (Peşint, 1996).

4.3.5.2 Senkron Motorun Eşdeğer Devreleri

Şekil 4.18’de senkron motorun sürekli hal eşdeğer devresi gösterilmiştir. Şekil 4.19’da ise senkron motorun geçici hal eşdeğer devresi verilmiştir. Görüldüğü gibi sürekli hal eşdeğer devre, basitçe gerilim kaynağına seri bağlı bir reaktanstır. Bu devre stator kutuplarına bakan faz başına eşdeğeri ve faz-nötr arası devre parametrelerini temsil etmektedir. Gerilim kaynağı, döner alan kutupları tarafından rotor sargısında üretilen gerilimdir.



Şekil 4.18. Senkron motorun sürekli hal eşdeğer devresi.



Şekil 4.19. Senkron motorun geçici hal eşdeğer devresi (Gürdal, 2000).

4.3.6 Elektronik Güç Kaynakları

Modern elektronik ünitelerin çoğunda anahtarlanabilir güç kaynakları kullanılmaktadır. Modern elektronik ünitelerde, eski ünitelerden farklı olarak, geleneksel indirici transformatör ve redresör yerine bir kapasitör bataryasını doldurarak, istenilen çıkış gerilim ve akım değerlerine uygun gücü üreten bir doğrultucu bulunmaktadır.

Bilgisayar ve diğer elektronik cihazlardaki regüle edilmiş bu tip güç kaynakları gerilimin %90'ı olan bir sabit doğru akım gerilimi sağlarlar. Bu gerilimin altında, güç düşer ve cihaz düzgün çalışmayabilir.

4.3.7 Sabit Enerji Yükleri ve Yük Diversitesi

Alan ısıtması, su ısıtması, endüstriyel proses ısıtması ve havalandırıcı gibi yükler termostatlar tarafından kontrol edilen sabit enerjili yüklerdir. Isıtma yüklerinde, ferdi yükler uzun süre çalıştığında yük diversitesindeki kayıp, gerilimde düşüş ile sonuçlanır. Uzun bir zaman zarfında toplam yük, rezistiften sabit güce doğru değişir.

Soğuk havalarda elektrikli alan ısıtmalarında yük büyük olabilir. Diversite kaybındaki verimli zaman sabiti; sıcaklık, rüzgar ve binanın termal zaman sabitlerine bağlı olarak soğuk havalarda küçülür. Isıtıcının çalışma periyodu uzar, çalışmama aralığı azalır (Taylor, 1992).

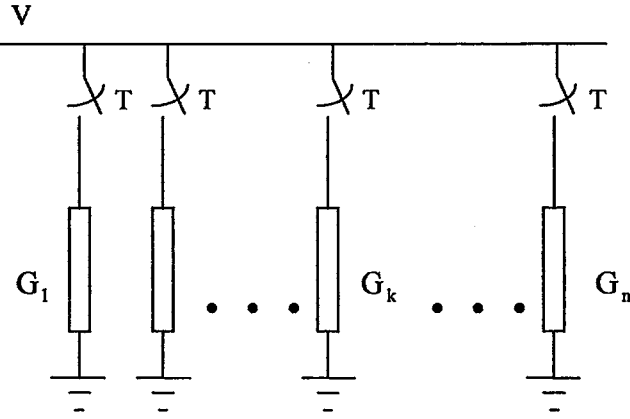
4.3.7.1 Termostat Kontrollü Yük Düzeltimi

Daha önceden de belirtildiği gibi gerilime bağımlı yük, bazen zamanla değişen bir güç düzeltim eğilimi gösterir. Kendiliğinden düzelen yüklerin bir çeşidi de termostat kontrollü cihazlardır. Bu cihazlar su ısıtma, alan ısıtma, endüstriyel ısıtma gibi her türlü ısıtmada kullanılırlar.

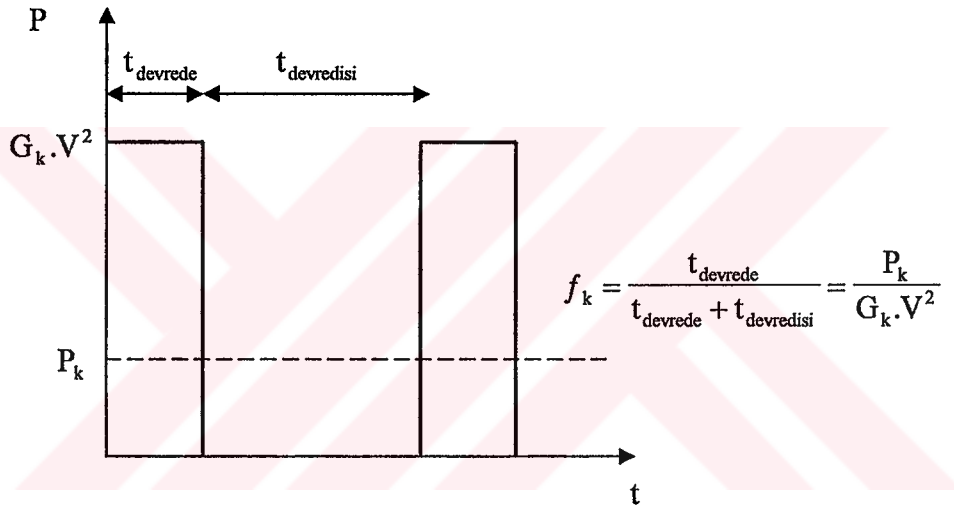
Şekil 4.20'deki gibi birbirine paralel bağlı termostatlar tarafından kontrol edilen ve güç faktörü 1 olan n adet sabit kondüktanslı cihazı ele alalım. Her anahtar, tipik olarak birkaç dakika süren, cihazın yük çevrimini belirler. Her çevrim için tüketilen ortalama güç, verilen hava koşullarında istenilen sıcaklığı korumak için gereken güçtür. k. bileşenin istenilen gücü P_k ile gösterilirse;

$$P_k = f_k \cdot G_k \cdot V^2 \quad (4.11)$$

olur. Burada, $0 < f_k < 1$, "görev çevrim parametresidir" yani bir çevrim süresince cihazın devrede olduğu yüzdendir. Görev çevrimi Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Paralel bağlı termostat kontrollü cihazlar



Şekil 4.21. Termostat görev çevrimi

İstenilen güç, V gerilimi altında cihazın başarabileceği gücü aşmadığında yani

$$P_k \leq G_k \cdot V^2 \quad (4.12)$$

koşulunda (4.11) denklemi uygulanır.

Cihaz, $f_k = 1$ (yani tam görev çevrimi) ile çalışırken gerilimdeki önemli bir düşüş sonrasında yukarıdaki koşul bozulur.

f_k görev çevrim parametresi aynı zamanda herhangi bir özel zaman için k. cihazın devrede olma olasılığını gösterir. Böylelikle "t" anında bütün cihazların tükettiği ortalama güç,

$$P_t(V) = \sum_{k=1}^n f_k(t).G_k.V^2 \quad (4.13)$$

biçimindeki geçici yük gerilim karakteristiğinden bulunur. V_0 ilk gerilimi için, (4.12)'ye göre bütün cihazlar tarafından çekilen toplam güç,

$$P_0 = \sum_{k=1}^n P_k = \sum_{k=1}^n f_k(t).G_k.V^2 \quad (4.14)$$

olur. Burada, bütün k 'lar için $f_{k0} < 1$ 'dir.

$t = 0$ anında uygulanan gerilim, V_0 'dan V 'ye düşerse, bozucu etki anında devrede olan bütün cihazların tükettiği ortalama güçte ani bir azalma olur. Buna karşılık, zaman geçtikçe cihazlar, devrede daha uzun kalmaya devam ederler. $f_k(t)$ ise, (4.11)'i sağlayana dek ya da 1, maksimum değerine ulaşana kadar artar.

$$\Gamma(V) = \{ k, P_k > G_k.V^2 \}$$

koşulu için uygulanan gerilim, V 'ye eşit olduğunda, cihazlar, güç taleplerini düzeltemeyeceği indisleri içerirler. Bütün cihazların sürekli halde ortalama toplam güç tüketimi yani bütün cihazların görev çevrimleri yeni gerilime adapte olduktan sonra,

$$P_s(V) = \sum_{k=1}^n f_k(\infty).G_k.V^2 = \sum_{k \in \Gamma} P_k + V^2 \cdot \sum_{k \in \Gamma} G_k \quad (4.15)$$

şeklinde olur. Açıkça görülüyor ki; cihazlardan en az biri güç ihtiyacını düzeltemezse, bu güç P_0 'dan küçük olur. Gerilim düştükçe, yeterli büyüklükteki bir gerilim düşüşüne kadar daha fazla cihaz bütün süre boyunca devrede kalır ve böylece sürekli halde saf bir empedans yük karakteristiği oluşur.

Karma termostat kontrollü yükün dinamik cevabı, zamanla değişen eşdeğer bir kondüktans ile verilir.

$$T_L \cdot \frac{\partial G}{\partial t} = P_0 - V^2 \cdot G \quad (4.16)$$

Burada T_L , termostat kontrollü yük düzeltim zaman sabitidir. Bu değer genellikle birkaç dakika büyüklüğündedir. Yukarıda verilen diferansiyel denkleme $G \leq G_{\text{maksimum}}(V)$ sınırlaması getirilir. Burada,

$$G_{\text{maksimum}}(V) = \frac{P_s(V)}{V^2} = \sum_{k=1}^n f_k(\infty) \cdot G_k$$

olup, tam görev çevrimindeki cihaz sayısına bağlıdır bu da V gerilim seviyesine bağlıdır. G_{maksimum} 'un bütün kondüktanslara eşit olması yani bütün cihazların tam görev çevriminde olması durumunda, $G_{\text{maksimum}}(V)$ uç değerine ulaşılır. Genelde,

$$G_{\text{maksimum}}(V) \leq \sum_{k=1}^n G_k$$

biçimindedir.

Veri eksikliğinden dolayı literatürde G_{maksimum} 'un V'ye bağımlılığı ihmal edilir. Herhangi bir andaki toplam yük gücü,

$$P = G \cdot V^2 \quad (4.17)$$

ile bulunur.

Gerçekte, eski bimetalik termostatlarda, oda sıcaklığındaki değişimleri önceden tahmin eden hızlanma ve kompanzasyon elemanları vardır. Bu elemanların ürettikleri ısı, uygulanan gerilimdeki değişimlerden etkilenir ve böylece aynı zamanda termostatın görev çevrimi de etkilenmiş olur. Örneğin, gerilim azaldığında ısıtıcı cihazlar, çalışma sürelerini uzatmak suretiyle yükü daha hızlı bir biçimde düzeltirler. Bu durum, zaman sabitlerinin, termal atalet gerecinden hesaplanan değerden neden daha küçük olduğunu açıklar. Modern elektronik termostatlar, uygulanan gerilimdeki değişimlerden daha az etkilenirler (Van Cutsem, Vournas, 1998).

4.3.8 Yük Alanında Üretim (Kojenerasyon)

Yük alanında üretim yapılabilir. Otomatik gerilim regülatörlerine sahip senkron generatörler (ve senkron motorlar) gerilim kararlılığına yardımcı olurlar. Dağıtım şebekelerine bağlanmış küçük senkron generatörlerdeki uyarma kontrolü gerilim regülasyonunun etkileşimini önlemek için güç faktörünü düzeltmeye çalışabilirler.

Bazı kojeneratörler, şönt kondansatörle kompanze edilmiş asenkron generatörlerdir. Performansı asenkron motorlara yakındır.

Asenkron generatörler basit ve ucuzdurlar. Buna rağmen senkron generatörler daha verimli olup, büyük güç oranlarında kullanılırlar (Taylor, 1992).

4.4 Yük Sınıflama

Elektrik yüklerini sınıflandırmada, elektrik dağıtım şirketlerinin kullandığı en temel yöntem faturalama kategorileridir. Bu sınıflama, konutsal, ticari, endüstriyel vb. kategorileri içerir. Bu kategorilemeye ait yıllık tüketim miktarları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir (TSE, 2002).

Çizelge 4.2. Kullanım yerlerine göre elektrik tüketimi 2001-2002.

Kullanım Alanları	2001		2002	
	Miktar kWh	%	Miktar KWh	%
Resmi Daire	5 774 661 334	5,70	5 379 393 362	5,02
Sanayi+Otoprodüktör	49 195 314 150	48,52	52 568 685 577	49,05
Ticarethaneler	8 998 347 854	8,88	10 415 279 817	9,72
Meskenler	22 712 525 733	22,40	23 375 970 128	21,81
Tarımsal Sulama	2 514 407 716	2,48	2 626 127 393	2,45
Şantiyeler	1 101 083 664	1,09	1 297 578 821	1,21
Sokak Aydınlatması	4 371 325 415	4,31	4 112 813 864	3,84
Diğer+EÜAŞ Direkt Satışı	6 712 091 377	6,62	7 389 882 018	6,90
Toplam	101 399 757 243	100.00	107 167 730 980	100.00

Bu yük sınıflarının yaygın bir biçimde kullanılmasına karşın, güç sistem çalışmalarındaki bazı yük tiplerinin tanımlanmasında genellikle yetersiz kalmaktadırlar. Örneğin, bazı kuruluşlar, apartmanları ferdi konut tüketicileri olarak ölçerken, diğerleri bütün apartman kompleksini ticari bir tüketici olarak ölçerler. Böylelikle, bir sınıftaki tüketici karakteristiklerinin aynı sınıftaki diğer tüketicilerle aynı olmadığı için bu temel sınıflandırma kendi kendisiyle çelişir. Bu nedenden dolayı, bazı kuruluşlar, bu temel sınıfları daha detaylı alt sınıflara ayırmaya çalışmaktadırlar.

Yükleri sınıflamak için geçerli bir yaklaşım da yük bileşenlerini tek tek ele almaktır. Bu süreç, bütün bu sınıflar arası ayrımı ortadan kaldırır ve bazı uygulamalarda kullanılan bir teknik haline gelmiştir. Her bir yük bileşeni tek tek tanımlanıp modellenir. Daha sonra da bu yük bileşenleri birleştirilip karma bir yük elde edilerek güç sistem analizleri yapılır.

4.5 Yük Modelleme

Yük modellemede iki ayrı metot kullanılır. Bunlar, statik modelleme ve dinamik modellemedir. Statik modeller, hattın güç akış gösterimindeki sürekli hal metoduna dayanırlar. Böylece statik yük modelleri, yükü, gerilim büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak gösterir. Diğer taraftan, dinamik modeller ise, sürekli hal güç akış çözümü ve elektromekanik davranışı tanımlayan diferansiyel denklemlerin zaman domenli çözümünü içerir.

Bazı tipik yük bileşenleri için statik yük modelleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Bu yük bileşenleri, p.u. aktif ve reaktif güçleri, artan p.u. gerilim ve/veya sıcaklık ve/veya momentin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Kullanılan artış şekli ve değişkenlerle ilgili tanım aşağıda verilmiştir.

$$\Delta V = V_{\text{gerçek}} - 1,0 \quad (\text{p.u. cinsinden gerilimdeki artış})$$

$$\Delta T = T_{\text{gerçek}} - 95^{\circ}\text{F}^{\circ} \quad (\text{havalandırma modeli için sıcaklıktaki artış})$$

$$\Delta T = T_{\text{gerçek}} - 47^{\circ}\text{F}^{\circ} \quad (\text{ısı pompası modeli için sıcaklıktaki artış})$$

$$\Delta \tau = \tau_{\text{gerçek}} - \tau_{\text{no min al}} \quad (\text{p.u. cinsinden motor momentindeki artış}) \quad (4.18)$$

Eğer ortam sıcaklığı biliniyorsa, uygun modeller için kullanılabilir. Eğer bilinmiyorsa, sıcaklık farkı ΔT , sifira ayarlanır. Benzer şekilde, eğer motor momentini biliniyorsa, uygun modeller için kullanılabilir. Ancak moment bilinmiyorsa moment farkı $\Delta \tau$, sifira ayarlanır.

Çizelge 4.3'teki yük bileşenlerinin aktif ve reaktif güç modellerine bakıldığında reaktif güç modelleri ile ilgili aşağıda belirtilen yorumlar çok daha fazla önem arz etmektedir.

- Aynı bileşen için, reaktif güç modelleri üreticiden üreticiye büyük oranda değişir. Örneğin, tek fazlı merkezi havalandırıcıların dört farklı modeli için Q/P oranı gerilimin 1,0 p.u. olduğu durum için, 0 ilâ 0,5 arasında değişir. Gerilim değiştiğinde, her bir ünitenin $\Delta Q / \Delta P$ oranı değişik olmaktadır. Aynı durum buzdolapları, derin dondurucular, flüoresan lambalar vs. gibi diğer bütün bileşenler için geçerlidir.
- Flüoresan lambaların reaktif güç karakteristiklerinin yalnızca üreticiden üreticiye değişmeyip aynı zamanda, eski veya yeni olmasına, uzun veya kısa tüplü olmasına veya uygulanan gerilim ve frekansa bağlı olarak kapasitif veya endüktif çalışmaya bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu değişim, karma sistemin hem doğru bir biçimde modellenmesini hem de $\Delta Q / \Delta V$ karakteristiğinin tahminini zorlaştırmaktadır.

- Reaktif güç ile gerilim arasındaki ilişkinin, aktif güç ile gerilim arasındaki ilişkidenden daha da fazla oranda nonlineer olmasından dolayı Q'yu tahmin etmek P'yi tahmin etmekten daha zor olmaktadır.

Çizelge 4.3. Tipik yük bileşenlerinin statik modelleri (Grigsby, 2001).

Yük Bileşeni	Statik Bileşen Modeli
Rezistif Isıtma	$P = 1,0 + 2 * \Delta V + \Delta V^2$ $Q = 0,0$
Tek Fazlı Merkezi Havalandırıcı	$P = 1,0 + 0,4311\Delta V + 0,9507\Delta T + 2,070\Delta V^2 + 2,388\Delta T^2 - 0,9\Delta V * \Delta T$ $Q = 0,3152 + 0,6636\Delta V + 0,543\Delta V^2 + 5,422\Delta V^3 + 0,839\Delta T^2 - 1,455\Delta V * \Delta T$
Üç Fazlı Merkezi Havalandırıcı	$P = 1,0 + 0,2693\Delta V + 0,4879\Delta T + 1,005\Delta V^2 - 0,188\Delta T^2 - 0,154\Delta V * \Delta T$ $Q = 0,6957 + 2,3717\Delta V + 0,0585\Delta T + 5,81\Delta V^2 + 0,199\Delta T^2 - 0,597\Delta V * \Delta T$
Akkor Flamanlı Aydınlatma	$P = 1,0 + 1,5209\Delta V + 0,223\Delta V^2$ $Q = 0,0$
Flüoresan Aydınlatma	$P = 1,0 + 0,6534\Delta V - 1,65\Delta V^2$ $Q = -0,1535 - 0,0403\Delta V + 2,734\Delta V^2$
Televizyon	$P = 1,0 + 1,2471\Delta V + 0,562\Delta V^2$ $Q = 0,2431 + 0,9830\Delta V + 1,647\Delta V^2$
Buzdolabı	$P = 1,0 + 1,3958\Delta V + 9,881\Delta V^2 + 84,72\Delta V^3 + 293\Delta V^4$ $Q = 1,2507 + 4,387\Delta V + 23,801\Delta V^2 + 1540\Delta V^3 + 555\Delta V^4$
Derin Dondurucu	$P = 1,0 + 1,3286\Delta V + 12,616\Delta V^2 + 133,6\Delta V^3 + 380\Delta V^4$ $Q = 1,3810 + 4,6702\Delta V + 27,276\Delta V^2 + 293\Delta V^3 + 995\Delta V^4$
Su Isıtıcısı	$P = 1,0 + 0,3769\Delta V + 2,003\Delta V^2$ $Q = 0,0$
Oda Havalandırıcı (208/230V nominal gerilim)	$P = 1,0 + 0,5953\Delta V + 0,5601\Delta T + 2,021\Delta V^2 + 0,145\Delta T^2 - 0,491\Delta V * \Delta T$ $Q = 0,4968 + 2,4456\Delta V + 0,0737\Delta T + 8,604\Delta V^2 - 0,125\Delta T^2 - 1,293\Delta V * \Delta T$
Üç Fazlı Isı Pompası (Isıtma Modu)	$P = 1,0 + 0,4539\Delta V + 0,286\Delta T + 1,314\Delta V^2 - 0,024\Delta V * \Delta T$ $Q = 0,9399 + 3,013\Delta V - 0,1501\Delta T + 7,46\Delta V^2 - 0,312\Delta T^2 - 0,216\Delta V * \Delta T$
Üç Fazlı Isı Pompası (Soğutma Modu)	$P = 1,0 + 0,2333\Delta V + 0,5915\Delta T + 1,362\Delta V^2 + 0,075\Delta T^2 - 0,093\Delta V * \Delta T$ $Q = 0,8456 + 2,3404\Delta V - 0,1806\Delta T + 6,896\Delta V^2 + 0,029\Delta T^2 - 0,836\Delta V * \Delta T$
Üç Fazlı Motor (10 HP ve üstü) Sabit Moment	$P = 1,0 + 0,0199\Delta V + 1,0463\Delta \tau + 0,341\Delta V^2 + 0,116\Delta \tau^2 - 0,457\Delta V * \Delta \tau$ $Q = 0,6577 + 1,2078\Delta V + 0,3391\Delta \tau + 4,097\Delta V^2 + 0,289\Delta \tau^2 - 1,477\Delta V * \Delta \tau$
Üç Fazlı Motor (10 HP ve üstü) Değişken Moment	$P = 1,0 + 0,1628\Delta V + 1,0514\Delta \tau + 0,099\Delta V^2 + 0,107\Delta \tau^2 + 0,061\Delta V * \Delta \tau$ $Q = 0,6569 + 1,2467\Delta V + 0,3354\Delta \tau + 3,685\Delta V^2 + 0,258\Delta \tau^2 - 1,235\Delta V * \Delta \tau$

- Bazı ekipman veya cihazlar için, nominal çalışma geriliminde istenilen Q miktarı çok düşük olmasına karşılık gerilim değiştiğinde, Q'daki değişim çok büyük olabilmektedir.
- Bazı dağıtım sistemleri, anahtarlanabilir kapasitör ünitelerine sahiptirler. Bunlar, ya dağıtım transformatörlerinde ya da fiderlerde olurlar. Dağıtım fiderinin karma Q karakteristiği, bu ünitelerdeki anahtarlama enerjisinden etkilenir.

4.5.1 Statik Yük Modelleri

Çizelge 4.3'teki bileşen modellerini sentez etmek için yeni ve daha uygun modeller geliştirilmiştir. Bu modeller; üstel ve polinom yük modelleri olarak ikiye ayrılırlar.

4.5.1.1 Üstel Yük Modeli

İlk koşullar veya baz değerlere bağlı aktif ve reaktif güçlerin üstel biçimdeki gösterimleri gerilim ve frekansın birer fonksiyonu olarak (4.19) ve (4.20)'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, bu denklemlerde ne sıcaklık ne de moment ifadeleri mevcuttur. Sıcaklık ve/veya moment değerleri için bazı varsayımlar yapılarak bu üstel yük modelleri elde edilmiştir.

$$P = P_0 \left[\frac{V}{V_0} \right]^{\alpha_v} \left[\frac{f}{f_0} \right]^{\alpha_f} \quad (4.19)$$

$$Q = Q_0 \left[\frac{V}{V_0} \right]^{\beta_v} \left[\frac{f}{f_0} \right]^{\beta_f} \quad (4.20)$$

Yukarıdaki denklemler p.u. cinsinden

$$P_u = \frac{P}{P_0} = \left[\frac{V}{V_0} \right]^{\alpha_v} \left[\frac{f}{f_0} \right]^{\alpha_f} \quad (4.21)$$

$$Q_u = \frac{Q}{P_0} = \frac{Q_0}{P_0} \left[\frac{V}{V_0} \right]^{\beta_v} \left[\frac{f}{f_0} \right]^{\beta_f} \quad (4.22)$$

Q_0 / P_0 oranı, güç faktörü cinsinden

$$h = \frac{Q_0}{P_0} = \pm \sqrt{\frac{1}{pf^2} - 1} \quad (4.23)$$

biçiminde gösterilebilir. Burada “pf”, güç faktörünü göstermektedir ve “+” işareti geri, “-” işareti ise ileri güç faktörünü belirtmektedir.

“h” yi, Q_0 / P_0 olarak kullanırsak, (4.23) denklemi;

$$Q_u = h \left[\frac{V}{V_0} \right]^{\beta_v} \left[\frac{f}{f_0} \right]^{\beta_f} \quad (4.24)$$

biçimine dönüştür.

Bu denklemler gerilimdeki $\pm \%10$ ve frekanstaki $\pm \%2,5$ 'luk değişimler için geçerlidir. Bu deney seviyeleri dışında bu modeller geçerli olamazlar. Buna karşılık, dikkat edilmesi gereken önemli bir faktör de gerilim sıfıra yaklaşırken hem P hem de Q'nun sıfıra gitmesidir.

Çizelge 4.4. Statik yüklerin gerilim ve frekans bağımlılıklarını gösteren parametreler.

Yük Bileşeni	Parametreler										
	pf	α_v	α_f	β_v	β_f	N_m	pf_{nm}	α_{vnm}	α_{fnn}	β_{vnm}	β_{fnn}
Rezistif Isıtma	1	2	0	0	0	0	-	-	-	-	-
Su ısıtıcısı	1	2	0	0	0	0	-	-	-	-	-
Akkor Flamanlı Aydınlatma	1	1,54	0	0	0	0	-	-	-	-	-
Flüoresan Aydınlatma	0,9	0,08	1	3	-2,8	0	-	-	-	-	-
Televizyon	0,77	2	0	5,2	-4,6	0	-	-	-	-	-
Büyük Endüstriyel Motorlar	0,89	0,05	1,9	0,5	1,2	1	-	-	-	-	-
Buzdolabı ve Derin Dondurucu	0,84	0,8	0,5	2,5	-1,4	0,8	1	2	0	0	0
Isı Pompası Alan Isıtıcı	0,84	0,2	0,9	2,5	-1,3	0,9	1	2	0	0	0
Ticari Amaçlı Merkezi Havalandırma	0,75	0,1	1	2,5	-1,3	1	-	-	-	-	-
Oda Havalandırma	0,75	0,5	0,6	2,5	-2,8	1	-	-	-	-	-
Isı Pompası / Merkezi Havalandırma	0,81	0,2	0,9	2,5	-2,7	1	-	-	-	-	-
Ticari Isı Pompası	0,84	0,1	1	2,5	-1,3	0,9	1	2	0	0	0

Çizelge 4.4'te, bazı yük bileşenlerinin üstel yük modeli ile ilgili parametreleri verilmiştir (Grigsby, 2001). Bu çizelgede 11 adet parametre mevcuttur. İlk altı parametre genel yük

modelleri ile ilgilidir ve bazıları motorları içerir. Diğer beş parametre ise motor olmayan kısımlarla ilgilidir. İlk parametre güç faktörünü (pf) göstermektedir. Soldan sağa, sonraki dört parametre aktif ve reaktif güçle ilgili gerilim ve frekansa bağlı üstelleri göstermektedir. N_m yükün motor olan kısmını göstermektedir. Örneğin, hem buzdolabı hem de derin dondurucunun %80'i motor yükünden oluşmaktadır. Daha sonraki güç faktörü (pf_{mm}) ile gerilim ve frekans parametreleri ise yükün motor olmayan kısmı ile ilgili parametrelerdir. Böylelikle, hem buzdolabı hem de dondurucunun %80'i motor yükü (yani $N_m = 0,8$), %20'si ise motor olmayan yükten oluşmaktadır.

4.5.1.2 Polinom Yük Modeli

Polinom yük modeli genellikle geçici kararlılık programında kullanılır. Modelin gerilim bağımlılık oranı ikinci mertebededir. Eğer, yükün gerilimle ilgili nonlineer doğası önemli ise, mertebe artırılabilir. Frekans oranı, birinci mertebeden varsayılır. Model şu şekilde gösterilir:

$$P = P_0 \left[a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] [1 + D_p \cdot \Delta f] \quad (4.25)$$

$$Q = Q_0 \left[b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] [1 + D_q \cdot \Delta f] \quad (4.26)$$

Burada;

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1$$

$$b_0 + b_1 + b_2 = 1$$

D_p = p.u. cinsinden aktif güç frekans damping katsayısını,

D_q = p.u. cinsinden reaktif güç frekans damping katsayısını,

Δf = p.u. cinsinden frekans değişimini göstermektedir.

Bu iki denklem p.u. cinsinden yazılacak olursa;

$$P_u = \frac{P}{P_0} = \left[a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] [1 + D_p \cdot \Delta f] \quad (4.27)$$

$$Q_u = \frac{Q}{P_0} = \frac{Q_0}{P_0} \left[b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] [1 + D_q \Delta f] \quad (4.28)$$

elde edilir.

Bazı yük bileşenleri için statik yük frekans damping katsayıları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Statik yük frekans damping karakteristikleri.

Yük Bileşeni	Frekans Parametreleri	
	D_p	D_q
Üç Fazlı Merkezi Havalandırıcı	1,09818	-0,663828
Tek Fazlı Merkezi Havalandırıcı	0,994208	-0,307989
Su Isıtıcısı	0	0
Buzdolabı	0,664158	-1,10252
Akkor Flamanlı Aydınlatma	0	0
Flüoresan Aydınlatma	0,887964	-1,16844
Asenkron Motor Yükleri	1,6	-0,6

4.5.1.3 Üstel ve Polinom Modellerinin Karşılaştırılması

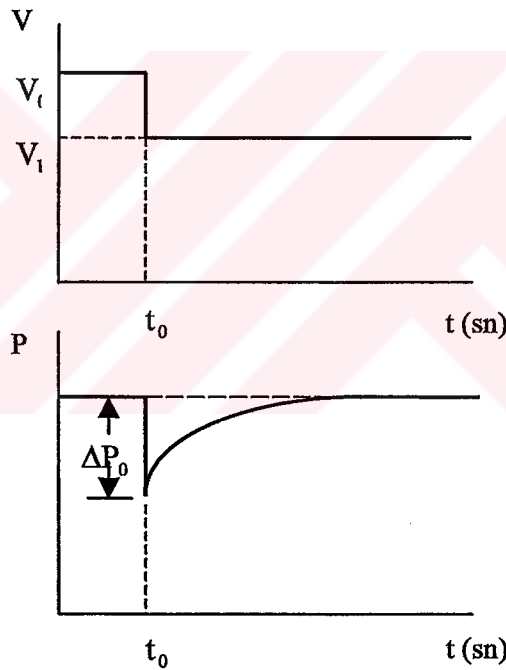
Her iki model de nominal gerilim civarında iyi birer gösterim biçimindedirler. Özellikle üstellerin 1'den büyük olduğu durumlar için, gerilim, nominal değerini önemli bir oranda aştığında, üstel biçimdeki modelin doğruluğu bozulmaya uğrar. a_0 katsayısının sıfırdan farklı olduğu durumlar için, gerilim, nominal değerinden önemli bir oranda düştüğünde, polinom biçimindeki modelin doğruluğu bozulmaya uğrar. a_0 katsayısının sıfırdan farklı olması yükün bir kısmının sabit güç çektiğini gösterir. Pratikte kullanılan genel şema, polinom şeklindeki modeldir ancak gerilimin önceden tahmin edilmeyen bir değer altına düşmesi durumunda üstel şekildeki model tercih edilir (Grigsby, 2001).

4.5.2 Dinamik Yük Modelleri

Sürekli hal gerilim kararlılığı analizleri, çeşitli işletme koşulları altında, iletilen güç ile hat sonu geriliminin değişimini ve kritik değerlerin (P_{kritik} , V_{kritik}) bu işletme koşullarıyla etkileşimlerini belirlemek ve P-V eğrileri yardımıyla bu değişimleri açıkça izlemek açısından oldukça yararlı olmasına karşılık, yüklerin dinamiğine bağlı olarak hızlı değişen olayların açıklanmasında yetersiz kalmaktadır. Zira statik analizlerde P-V eğrilerini karakterize eden olayların, dakikalardan saatler mertebesine uzanan geniş periyotlar içinde olduğu

öngörülmektedir. Oysa ki, paralel çalışan iletim hatlarının birinin devre dışı olması ve hat sonundaki yüklerin ağırlıklı olarak sabit güç çekme eğilimli asenkron motor yüklerinden oluşması durumunda, bu tür yüklerin hızlı geçici karakteristikleri nedeniyle, yerel olarak ani gerilim çökmeleri görülebilecektir. Buna paralel olarak, koruma düzenlerinin de hızlı değişen böyle olaylara cevap verebilecek nitelikte olması gerekecektir.

Klasik yük akışı analizlerinde, her yük düğümündeki aktif ve reaktif güçlerin sabit olduğu kabul edilmektedir. Oysa ki gerçek bir sistemde, bu yükler zamanla değişmektedirler. Bu değişim, normal yük artımı veya azalması biçiminde olabileceği gibi, Şekil 4.22'den de görüleceği üzere, bir baradaki gerilim azalmasını aynı şekilde izleyen ve daha sonra yaklaşık olarak başlangıç değerine erişen bir güç değişimi, özellikle dinamik simülasyon için tipik bir örnektir. Daha önceki bölümlerde yükler incelenirken, yüklerin karakteristikleri bakımından; sabit güç, sabit akım ve sabit empedans yükleri olarak üç ana gruba ayırdıkları belirtilmişti.



Şekil 4.22. Sabit güç yükünün adım cevabı.

Şekil 4.22'de, ilk anda gerilimin azalması ile azalan yük, tipik bir sabit empedans yükünü göstermektedir. Bunun nedeni, motorun kütle ataleti veya kontrolör cevabının gecikmesi olabilir. Daha sonra ise, mekanik motor yükünün öz-kontrollü sabit güç karakteristiği veya kontrolörün sabit güç karakteristiği nedeniyle yük, sabit gücüne dönmektedir.

Sabit empedans yükleri, gerilim kararlılığı bakımından, paralel hatlardan birinin devre dışı

olması gibi büyük bir bozucu etki altında dahi olası bir gerilim kararsızlığına yol açmazlar. Daha önceden de açıklandığı gibi, gerilim değerindeki bir birim azalma, güç değerinde yaklaşık olarak iki kat azalmaya neden olmaktadır. Bunun sonucunda kritik güç değeri azaldığı halde, yükün çektiği güç bu değer altında kaldığı için, sabit empedans yükleri kararsızlığa yol açmadıkları gibi, sabit güç yükleri ile karma yükler oluşturmaları durumunda gerilim kararlılığını olumlu yönde etkilemektedirler.

Yük, statik bileşenleri içerdiği zaman, kararlılık limitleri son derece geniştir. Bu gibi yükler için tam ve doğru kararlılık sınırı, yükün statik bileşenini uygun bir şekilde göz önüne alan bir güç akış modelinden elde edilebilir. Ancak bazı özel durumlarda, bütün sistem bileşenlerinin detaylı bir dinamik modelini de ele alarak sistemi incelemek gerekebilir.

Tipik bir güç sisteminde, gerilim kararsızlığı ve çökmesinin detaylı bir dinamik analizi gereksizdir. Karma yükün karakteristiği ele alındığı zaman, hem küçük hem de büyük bozucu etkilerini içeren gerilim kararlılığı, sürekli hal gerilim kararlılığı analizinde kullanılan standart güç akış modelinden temin edilebilmektedir (Pal, 1992; Uzunoğlu, 2000; Yalçın, 1995).

Dinamik yük elemanları ise iki grupta toplanabilir. Motorların geçici karakteristikleri hızlı olmasına karşılık, kontrollü omik yükler veya yük altında kademe değiştiriciler daha yavaş geçici karakteristiklere sahiptirler. Başlangıç olarak, kontrollü omik yükün dinamiğini tanıtmak, statik ve dinamik yaklaşımlar arasında bir geçiş sağlaması açısından faydalı gözükmektedir. Buna göre, örnek iletim hattının sonuna, kontrollü bir omik yük bağlandığı varsayalım. Bu yükün dinamiği (4.16) denklemi biçimindeki birinci mertebeden bir gecikme modeli ile gösterilebilir. Bu denklemde;

$$T_L \cdot \frac{\partial G}{\partial t} = P_0 - V^2 \cdot G$$

T_L : yükün zaman sabiti,

V : yük gerilimi,

G : sabit güce ayarlanabilen yükün kondüktansı,

P_0 : sabit gücü ifade etmektedir.

Eğer dinamik yük bir asenkron motor ise, buna ait dinamik denklem Ek 1'de gösterildiği gibi, hareket denkleminde türetilir. Bu denklem, kaymanın fonksiyonu olarak şu şekilde elde edilmiştir:

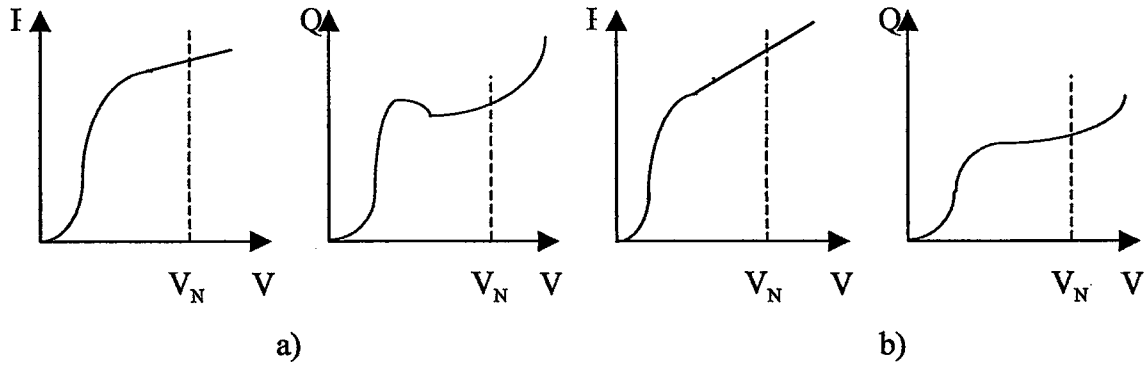
$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{I_m \cdot \omega_s^2} \left(\frac{P_m}{1-s} - P_e \right) \quad (4.29)$$

Burada I_m , asenkron motorun atalet momentini göstermektedir (Hill, 1993; Yalçın, 1995).

4.6 Karma Yükün Statik Karakteristikleri

Karma yükün karakteristiği, yükün bileşenlerinin karakteristiklerine bağlıdır. Kaba bir tahminle fider transformatörünün orta gerilim tarafından görülebilen karma karakteristik, yük karakteristiklerinin toplamını içerir. Şekil 4.23, bu teknikle elde edilen iki adet yük karakteristiğini göstermektedir. Şekil 4.23a, ağır yüklü asenkron motorlar ve deşarj aydınlatmasından oluşan bir sanayi yükünün karakteristiğini göstermektedir. Nominal çalışma noktası (gerilim V_N) yakınında $P(V)$ eğrisi düz iken $Q(V)$ eğrisi pozitif bir ivmeyle dikleşiyor. Gerilim azalınca $Q(V)$ eğrisi düzleşir ve duran motorların reaktif güç talebi arttığından dolayı bir artış meydana gelir. Eğer gerilim 0,7 p.u.'nun altına düşerse, asenkron motorların dengelerini kaybetmesi ve deşarj aydınlatmalarının sönmelerinden dolayı $P(V)$ ve $Q(V)$ eğrileri hızla azalır.

Şekil 4.23b'de ise ampul aydınlatması ve ısıtma yükünden oluşan bir konutsal / ticari yük ele alınmıştır. Nominal gerilim civarında hem $P(V)$ hem de $Q(V)$ eğrileri dikleşiyor. Aynı şekilde 0,7 p.u. gerilimde aktif ve reaktif güç talepleri hızlıca düşüyor.



Şekil 4.23. (a) Geniş ağır yüklü asenkron motorların gerilim karakteristiği (b) ısıtma ve aydınlatmadan oluşan bir yükün gerilim karakteristiği.

Şekil 4.23'teki eğriler, bir yük gerilim karakteristiğinin şekli hakkında yalnızca bir gösterge olabilir. Bu eğriler genel durumu göstermez. Kısmi yükün karakteristiği farklı olabilir. Örneğin reaktif güç kompanzasyonu, $Q(V)$ eğrisinde nominal gerilim civarında

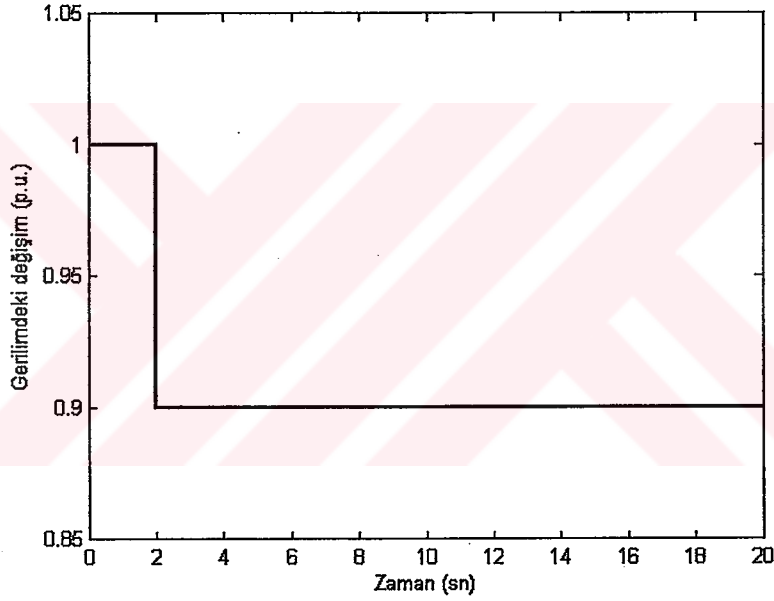
yataylaşmaya neden olabilir. Aynı zamanda kısmen küçük, yararlı olmayan, yük bölgesindeki üretim uygulamaları da yük karakteristiğini önemli bir biçimde etkiler,



5. SAYISAL UYGULAMA

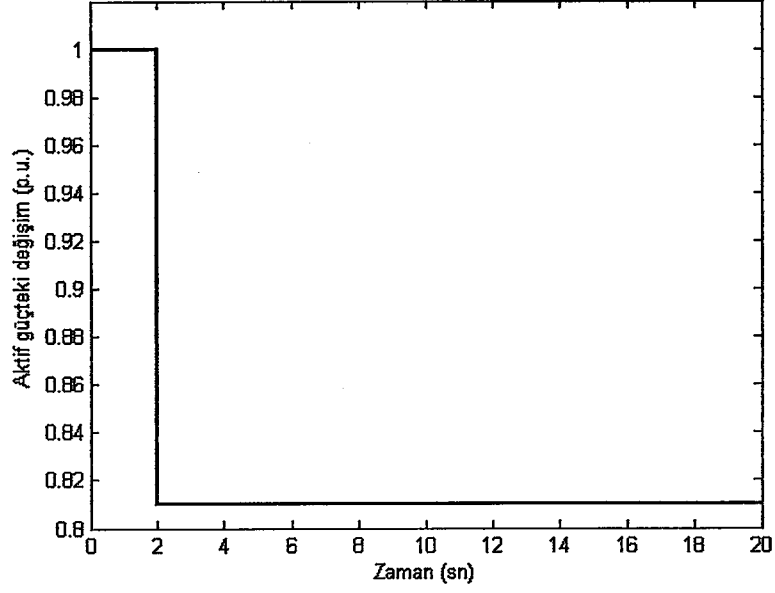
Bu bölümde, öncelikle, üç temel yük bileşeni (yani sabit empedans, sabit akım ve sabit güç) ve bu yük bileşenlerinin çeşitli karma formlarında gerilimdeki %10'luk düşüş için bu yük bileşenlerinin cevabı incelenmiştir. Daha sonra ise, kendine özgü karakteristikleri Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilen bazı yük bileşenlerinin gerilimdeki \pm %10'luk değişime karşı verdikleri cevapları incelenmiştir.

Bu özellikler inceledikten sonra, örnek bir sistem için P-V eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra ise, bu örnek sistemin kritik değerleri hesaplanıp, bu değerler ışığında örnek sistemi çeşitli diferansiyel denklemler vasıtasıyla modelleyip dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün analizler, MATLAB&Simulink programı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

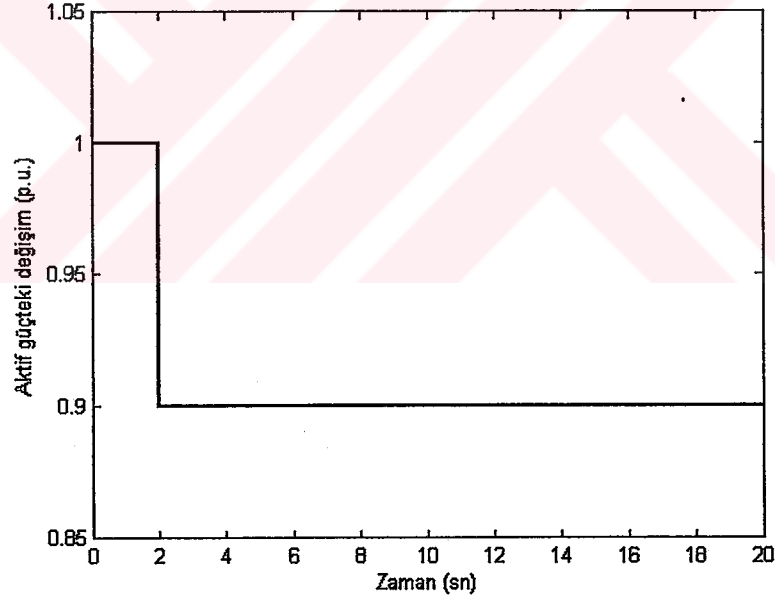


Şekil 5.1. Gerilimde yaşanan %10'luk düşüş.

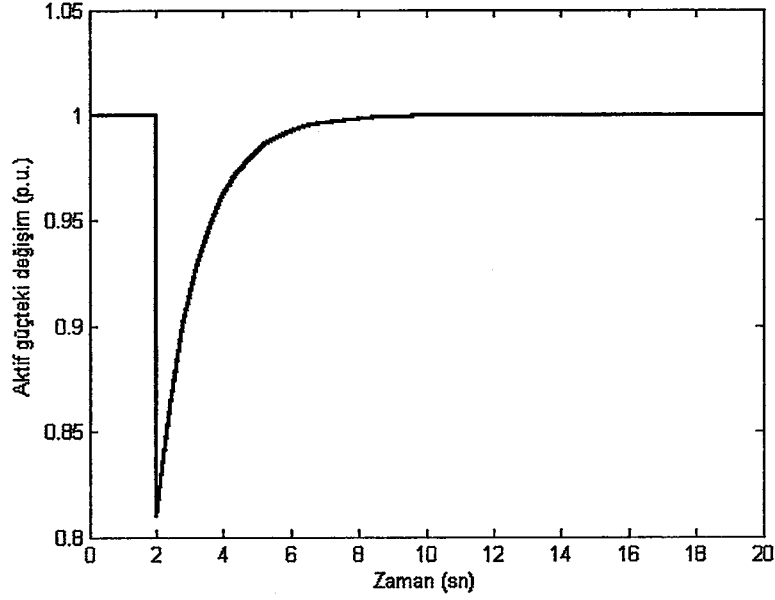
Şekil 5.1'de, gerilimde yaşanan %10'luk düşüşü göstermektedir. Sabit empedans, sabit akım ve sabit güç yüklerinin aktif güç taleplerinin bu gerilim düşümüne cevapları sırasıyla Şekil 5.2 - 5.4'te verilmiştir.



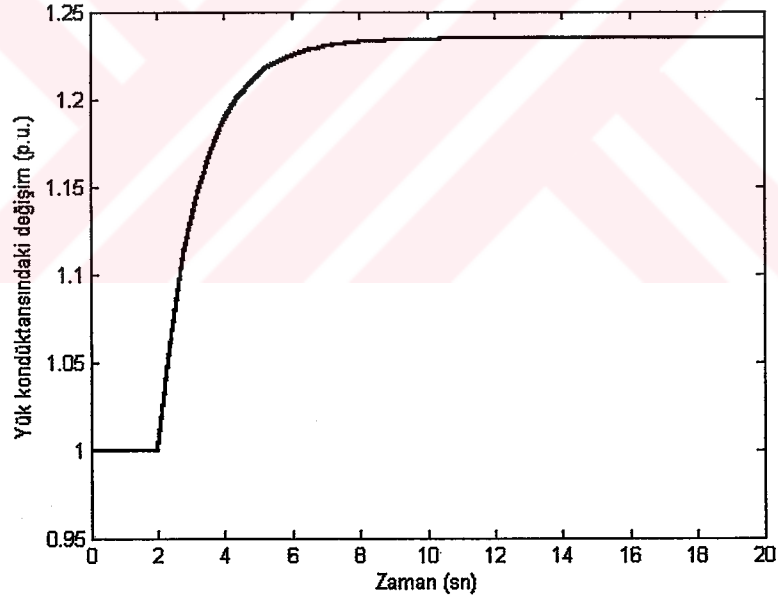
Şekil 5.2. Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, sabit empedans yükünün cevabı.



Şekil 5.3. Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, sabit akım yükünün cevabı.



Şekil 5.4. Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, sabit güç yükünün cevabı.



Şekil 5.5. Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, sabit güç yükü kondüktansının cevabı.

Burada kullanılan sabit güç yükü;

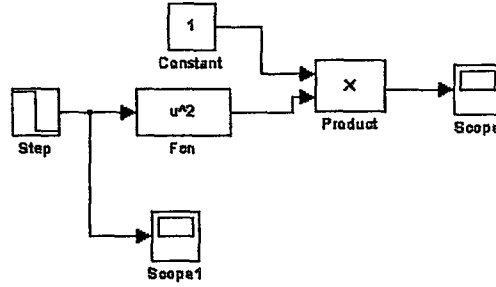
$$T_L \cdot \frac{\partial G}{\partial t} = P_0 - V^2 \cdot G$$

biçimindeki (4.16) denklemi ile gösterilen bir yük olarak modellenmiştir. Burada

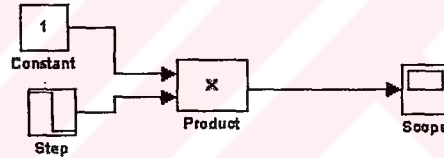
$T_L = 1$ saniye olarak ele alınmıştır. Buna göre, bu sabit güç yükü kondüktansının gerilimdeki değişime verdiği cevap Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

Özellikle Şekil 5.4'teki grafiğe dikkatli bir biçimde bakıldığında, sabit güç yükünün gerilimin değiştiği anda, dinamik yük modelleri bölümünde belirtildiği gibi, sabit empedans karakteristiği gösterdiği görülmektedir.

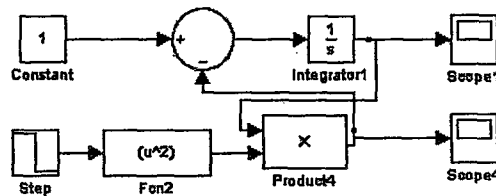
Şekil 5.6 - 5.8'de sırasıyla sabit empedans, sabit akım ve sabit güç yüklerinin MATLAB&Simulink programındaki modelleri gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Sabit empedans yükünün MATLAB&Simulink programındaki modeli.



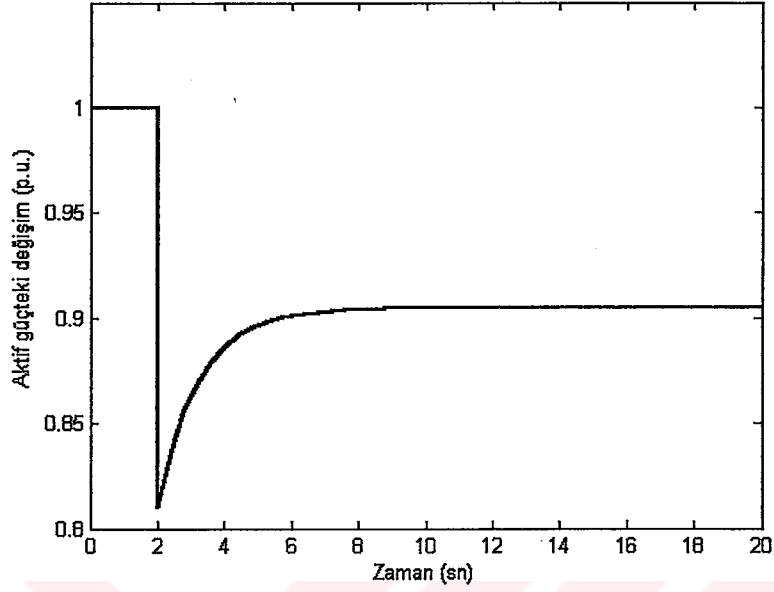
Şekil 5.7. Sabit akım yükünün MATLAB&Simulink programındaki modeli.



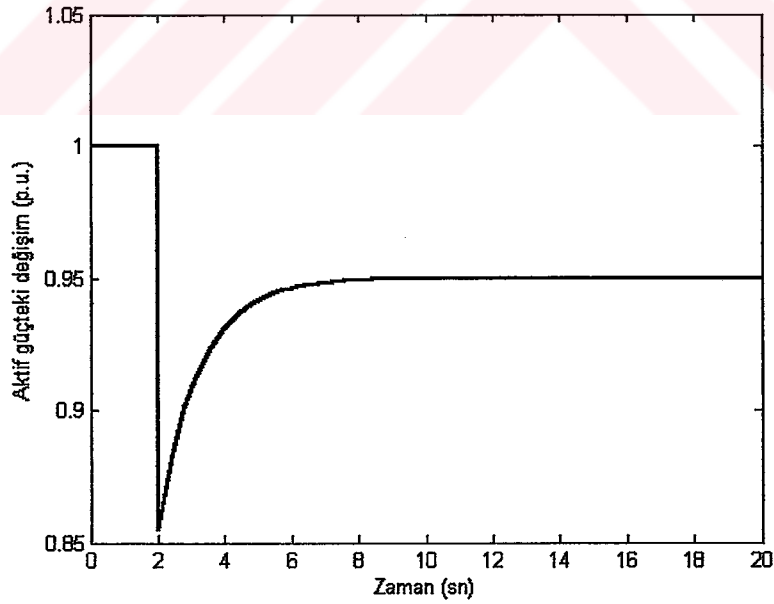
Şekil 5.8. Sabit güç yükünün MATLAB&Simulink programındaki modeli.

Şekil 5.9 - 5.11'de çeşitli karma yüklerin gerilimdeki değişime cevapları verilmiştir. Şekil 5.9'da, %50 sabit güç yükü ve %50 sabit empedans yükünden oluşan bir karma yük ele alınmıştır. Şekil 5.10'da, %50 sabit güç yükü ve %50 sabit akım yükünden oluşan bir karma yük ele alınmıştır. Şekil 5.11'de ise, %50 sabit güç yükü, %25 sabit empedans yükü ve %25

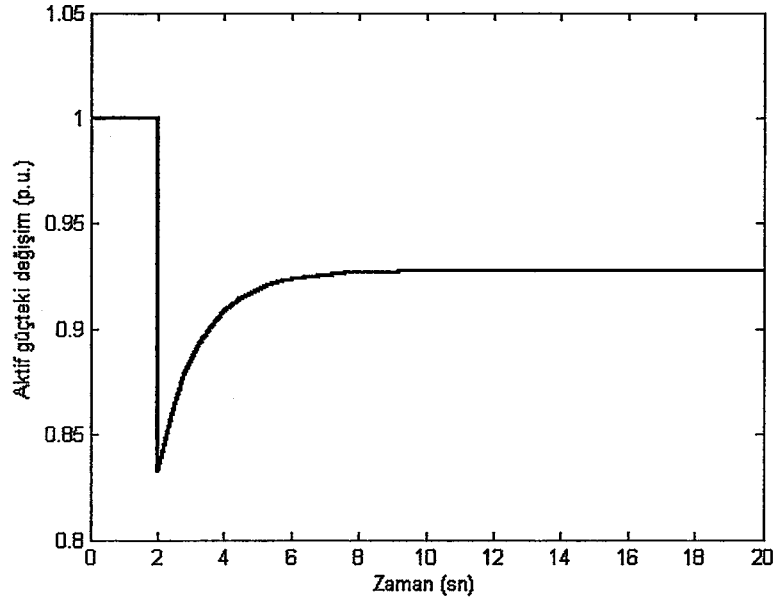
sabit akım yükünden oluşan bir karma yük ele alınmıştır. Bu üç şekilden de görüleceği gibi, karma yükün cevabı Şekil 4.1 ile benzerdir.



Şekil 5.9. Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, %50 sabit güç, %50 sabit empedans yükünden oluşan karma yükün zamana göre değişimi.

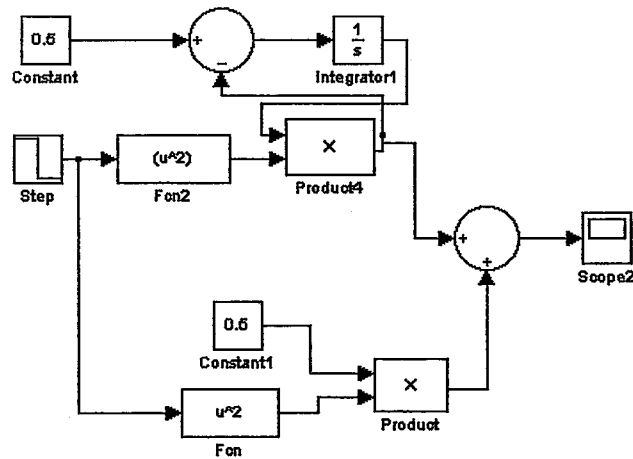


Şekil 5.10. Gerilimde yaşanan %10'luk düşüşe, %50 sabit güç, %50 sabit akım yükünden oluşan karma yükün zamana göre değişimi.

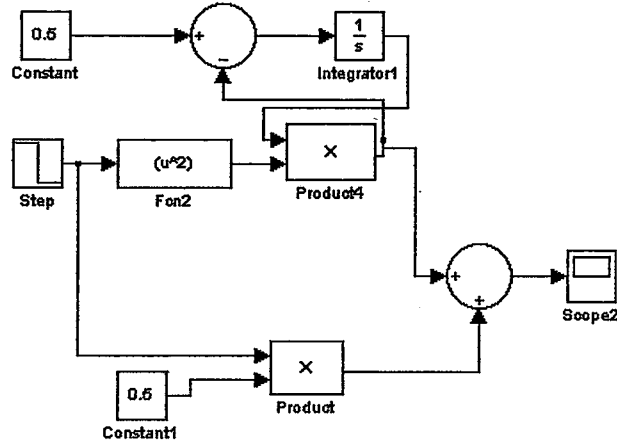


Şekil 5.11. Gerilimde yaşanan %10'luk düşüğe, %50 sabit güç, %25 sabit akım, %25 sabit empedans yükünden oluşan karma yükün zamana göre değişimi.

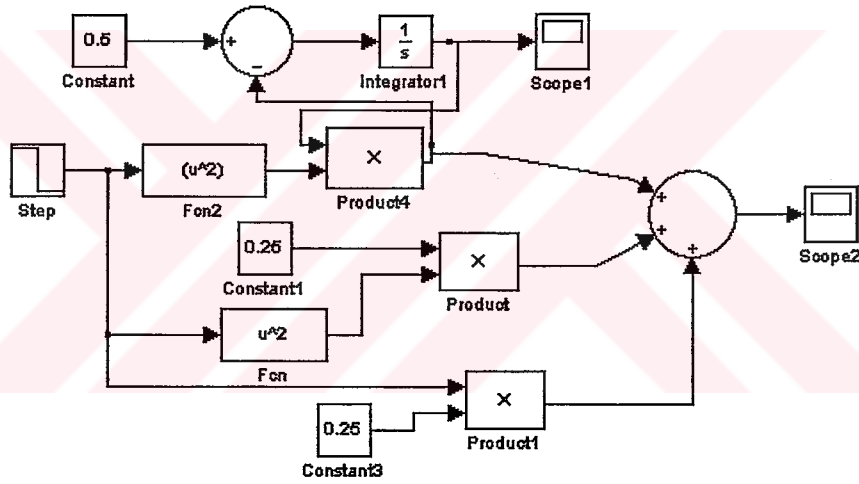
Bu üç karma yüke ait MATLAB&Simulink modelleri Şekil 5.12 - 5.14'te verilmiştir. Şekil 5.12, %50 sabit güç yükü ve %50 sabit empedans yükünden oluşan karma yükün modelini, Şekil 5.13, %50 sabit güç yükü %50 sabit akım yükünden oluşan karma yükün modelini ve Şekil 5.14 ise, %50 sabit güç yükü, %25 sabit empedans yükü %25 sabit akım yükünden oluşan karma yükün modelini göstermektedir.



Şekil 5.12. %50 sabit güç yükü ve %50 sabit empedans yükünden oluşan karma yükün MATLAB&Simulink programındaki modeli.



Şekil 5.13. %50 sabit güç yükü ve %50 sabit akım yükünden oluşan karma yükün MATLAB&Simulink programındaki modeli.



Şekil 5.14. %50 sabit güç yükü, %25 sabit akım yükü ve %25 sabit empedans yükünden oluşan karma yükün MATLAB&Simulink programındaki modeli.

5.1 Çeşitli Yük Bileşenleri için Yapılan Statik Analizler

Bu bölümde, statik karakteristikleri Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiş olan bazı yük bileşenleri için verilen bu statik karakteristiklere göre gerilim değişimine bağlı olarak statik analizler gerçekleştirilmiştir.

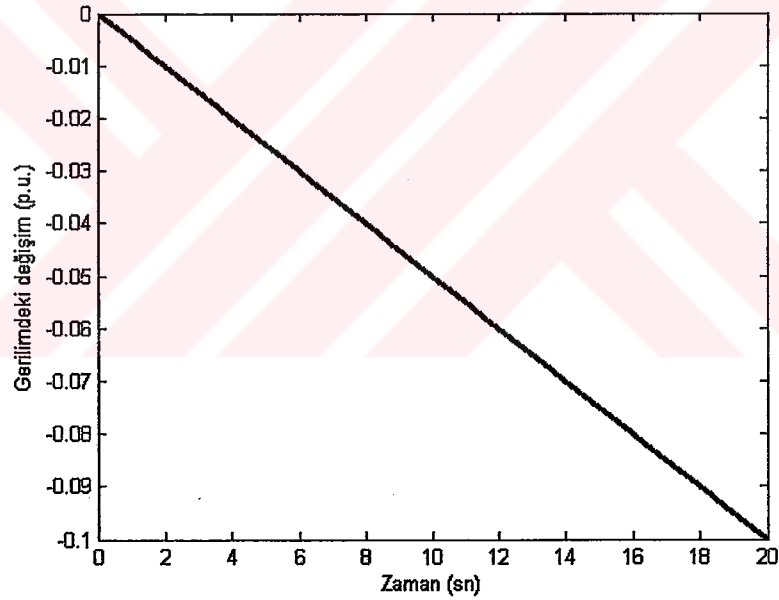
Çizelge 4.3'ten alınarak örnek olarak kullanılan yük bileşenlerinin değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Örnek olarak kullanılan yük bileşenlerinin değerleri.

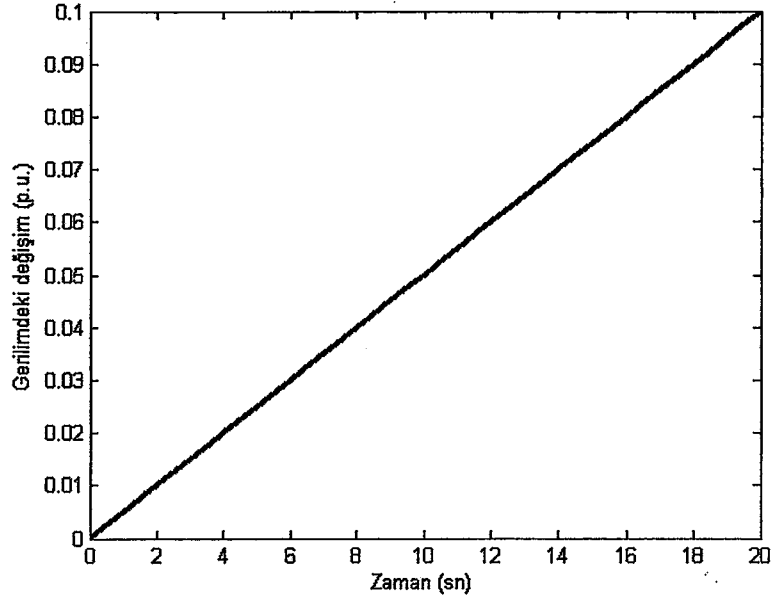
Akkor Flamanlı Aydınlatma	$P = 1,0 + 1,5209\Delta V + 0,223\Delta V^2$ $Q = 0,0$
Üç Fazlı Isı Pompası (Isıtma Modu)	$P = 1,0 + 0,4539\Delta V + 0,286\Delta T + 1,314\Delta V^2 - 0,024\Delta V * \Delta T$ $Q = 0,9399 + 3,013\Delta V - 0,1501\Delta T + 7,46\Delta V^2 - 0,312\Delta T^2 - 0,216\Delta V * \Delta T$

Burada $\Delta V = \pm\%10$ biçimindeki, gerek basamak ve gerekse rampa fonksiyonu şeklindeki, değişim için yukarıda belirtilen iki yük bileşeninin aktif ve reaktif güçlerinin değişimi incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken sıcaklıkta herhangi bir değişim olmadığı varsayılmıştır ($\Delta T = 0$).

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16, sırasıyla rampa fonksiyonu biçiminde azalan ve artan gerilim değişimlerini göstermektedirler. Bu grafiklerdeki değişim ΔV 'yi göstermektedir.

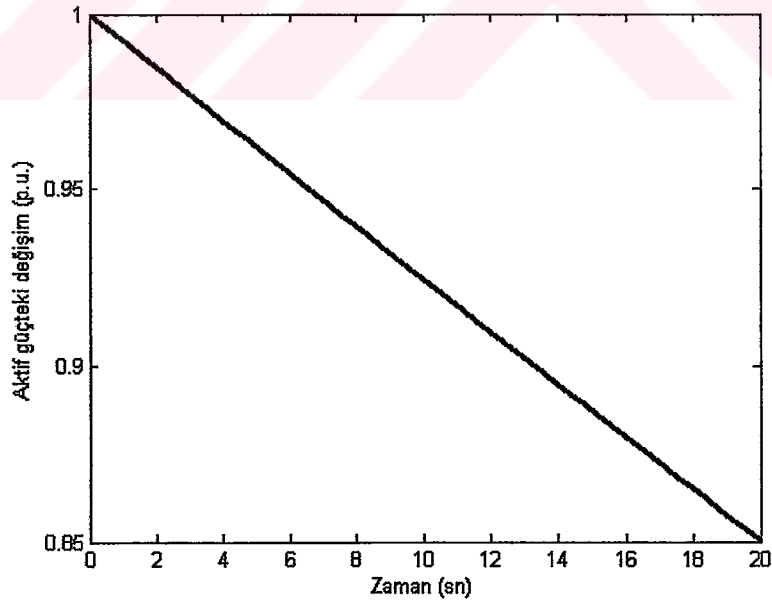


Şekil 5.15. Rampa fonksiyonu biçiminde azalan bir gerilim değişimi.

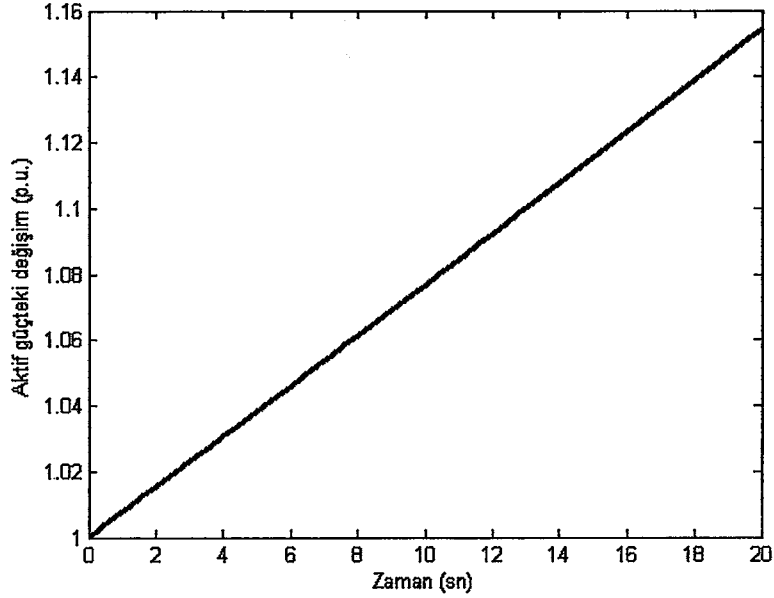


Şekil 5.16. Rampa fonksiyonu biçiminde artan bir gerilim değişimi.

Yukarıdaki grafiklerde gösterilen bu iki fonksiyonu sırasıyla akkor flamanlı aydınlatma ve üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu için kullanılması durumunda Şekil 5.17 - 5.22 elde edilmiştir.



Şekil 5.17. Akkor flamanlı lamba için azalan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.



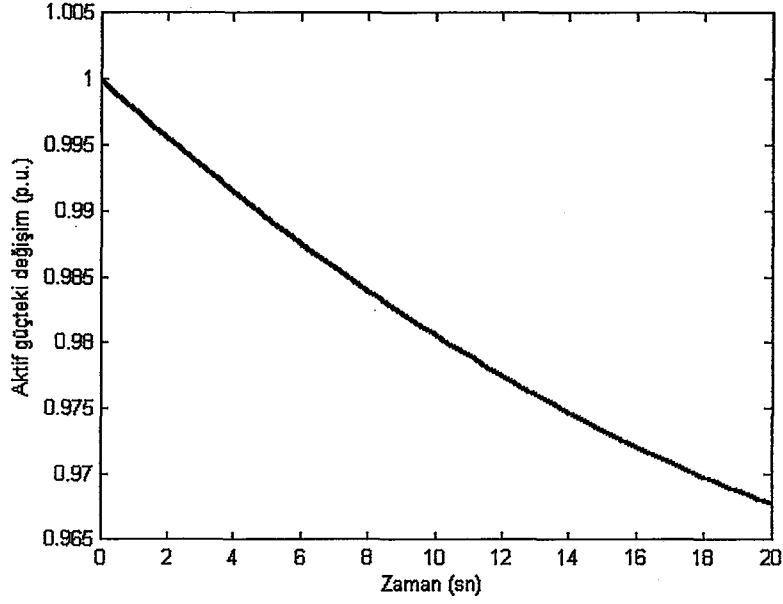
Şekil 5.18. Akkor flamanlı lamba için artan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.

Şekil 5.17, azalan rampa fonksiyonu için akkor flamanlı lambanın aktif güç talebindeki değişimini ve Şekil 5.18, artan rampa fonksiyonu için akkor flamanlı lambanın aktif güç talebindeki değişimini göstermektedir.

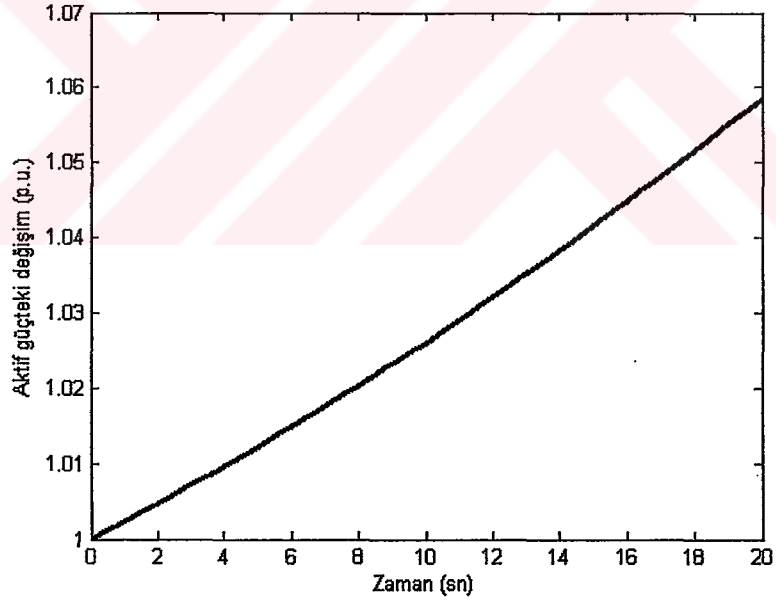
Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 dikkatli bir biçimde incelendiğinde, tıpkı aydınlatma bölümünde belirtildiği gibi, akkor flamanlı lambaların sabit empedans karakteristiği göstermediği açıkça görülmektedir. Akkor flamanlı lambalar eğer sabit empedans karakteristiği göstermiş olsaydı,

$P_{yük} = \frac{V^2}{R}$ biçimindeki aktif güç, gerilimin azalmasını veya artmasını bir parabol biçiminde takip ederdi. Bunun sonucunda ise, gerilimin 0.9 p.u. olduğu durum için aktif güç talebi yaklaşık olarak $0.9 \times 0.9 = 0.81$ p.u., gerilimin 1.1 p.u. olduğu durum için ise $1.1 \times 1.1 = 1.21$ p.u. değerini alırdı. Oysaki gerilimin 0.9 p.u. olduğu durum için aktif güç talebi 0.85 p.u. ve yine gerilimin 1.1 p.u. olduğu durum için aktif güç talebi 1.15 p.u.'dir.

Akkor flamanlı lambadan sonra ısıtma modunda çalışan üç fazlı bir ısı pompasının statik davranışı incelenmiştir. Şekil 5.19, azalan rampa fonksiyonu için üç fazlı ısı pompasının ısıtma modundaki aktif güç talebindeki değişimini ve Şekil 5.20, artan rampa fonksiyonu için üç fazlı ısı pompasının ısıtma modundaki aktif güç talebindeki değişimini göstermektedir.



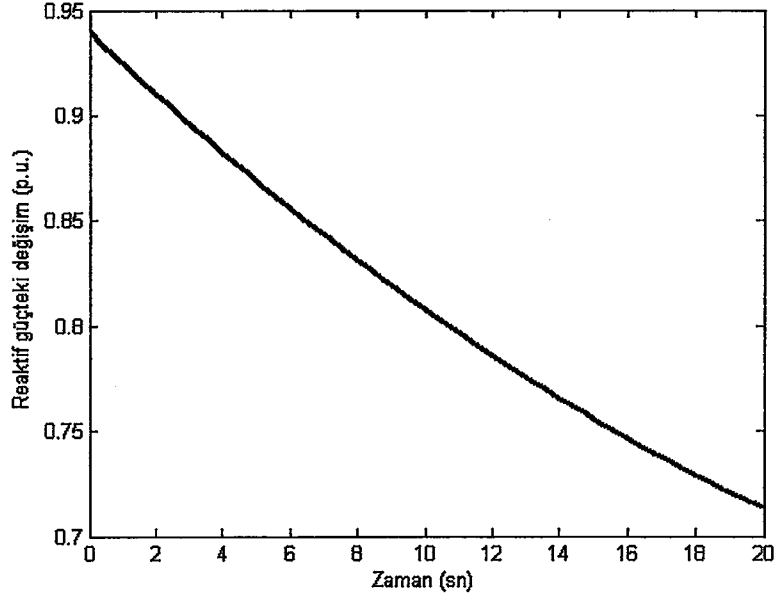
Şekil 5.19. Üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu için azalan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.



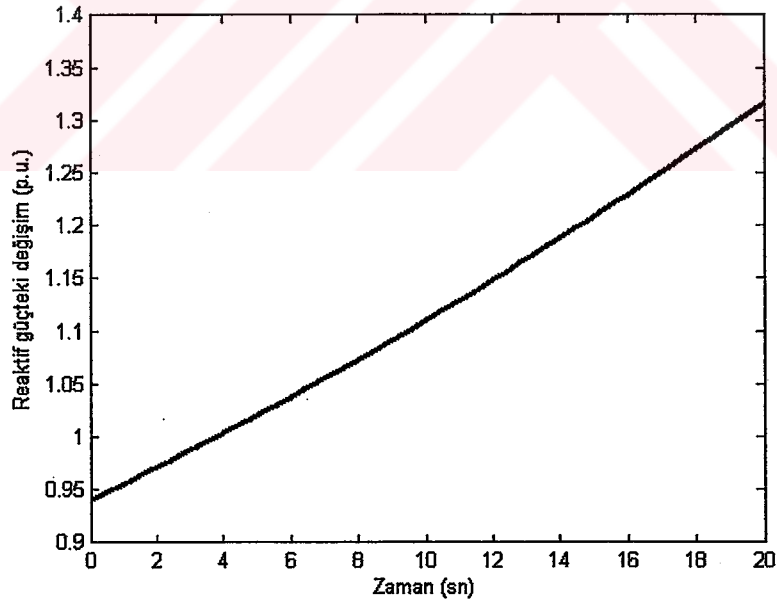
Şekil 5.20. Üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu için artan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.

Üç fazlı ısı pompasının ısıtma modundaki reaktif güç talebindeki değişimler ise Şekil 5.21 - 5.22'de verilmiştir. Şekil 5.21, azalan rampa fonksiyonu için talebindeki değişimini ve Şekil 5.22, artan rampa fonksiyonu için üç fazlı ısı pompasının ısıtma modundaki reaktif güç

talebindeki değişimini göstermektedir.



Şekil 5.21. Üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu için azalan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim.



Şekil 5.22. Üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu için artan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim.

Çizelge 4.3'teki değerlere göre yukarıdaki analizler gerçekleştirildikten sonra, Çizelge 4.4'te verilen bazı yük bileşen değerleri kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.4'ten

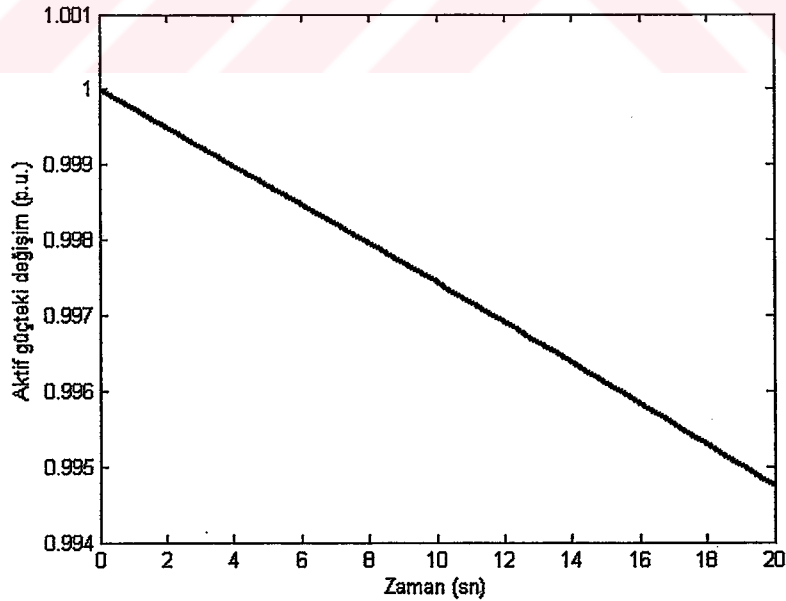
alınarak örnek olarak kullanılan yük bileşenlerinin değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Örnek olarak kullanılan yük bileşenlerinin değerleri.

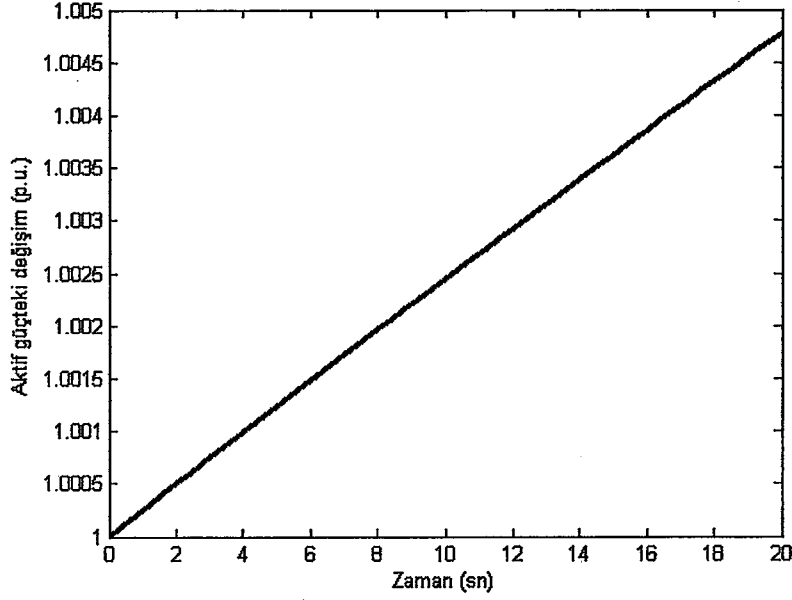
Yük Bileşeni	Parametreler										
	pf	α_v	α_f	β_v	β_f	N_m	pf _{nn}	α_{vnm}	α_{fnn}	β_{vnm}	β_{fnn}
Büyük Endüstriyel Motorlar	0,89	0,05	1,9	0,5	1,2	1	-	-	-	-	-
Ticari Amaçlı Merkezi Havalandırma	0,75	0,1	1	2,5	-1,3	1	-	-	-	-	-

Azalan ve artan rampa fonksiyonları sırasıyla büyük endüstriyel motor ve ticari merkezi havalandırıcı uygulandığında aşağıdaki şekiller elde edilmiştir. Bu şekiller elde edilirken frekansta herhangi bir değişim olmadığı varsayılmıştır.

Şekil 5.23, azalan rampa fonksiyonu için büyük bir endüstriyel motorun aktif güç talebindeki değişimini ve Şekil 5.24, artan rampa fonksiyonu için büyük bir endüstriyel motorun aktif güç talebindeki değişimini göstermektedir.

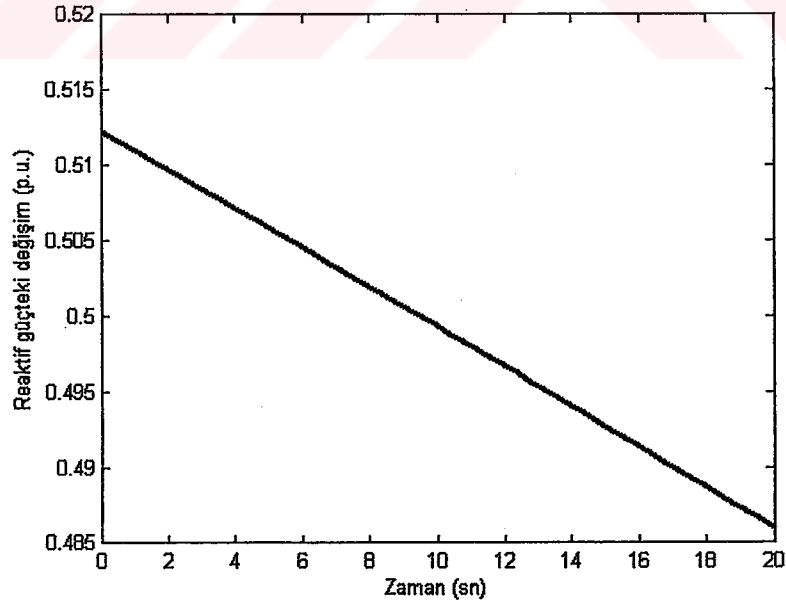


Şekil 5.23. Büyük bir endüstriyel motor için azalan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.

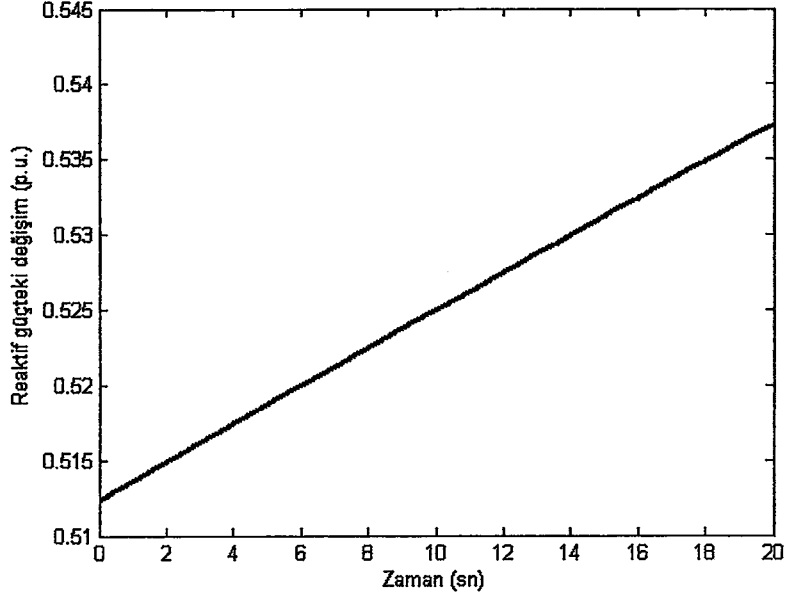


Şekil 5.24. Büyük bir endüstriyel motor için artan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'ten de açıkça görüleceği gibi, endüstriyel motorun aktif güç tüketimi, gerilim değişimleri ile çok fazla etkilenmemiştir. Bu özellik ise, endüstride kullanılan (asenكرون) motorların sabit aktif güç çekme karakteristikli olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.25. Büyük bir endüstriyel motor için azalan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim.

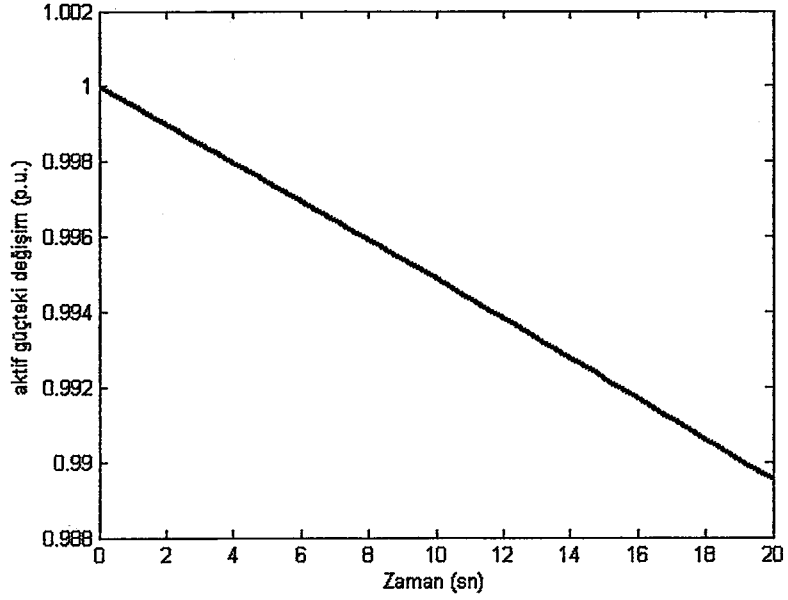


Şekil 5.26. Büyük bir endüstriyel motor için artan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim.

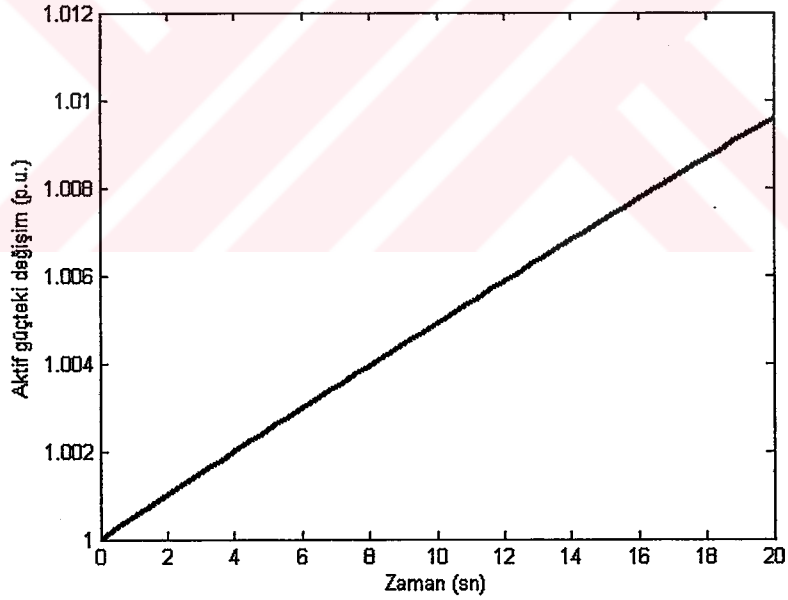
Aynı motorun reaktif güç talebindeki değişimi, Şekil 5.25 - 5.26'da verilmiştir. Şekil 5.25, azalan rampa fonksiyonu için ve Şekil 5.26, artan rampa fonksiyonu için motorun reaktif güç talebindeki değişimini göstermektedir.

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'dan da görüleceği gibi, reaktif güç talebinin gerilim değişimine tepkisi, aktif gücün tepkisinden daha şiddetli olmuştur. Reaktif gücün değişimi, Şekil 4.7'dekine benzerdir.

Şekil 5.27, azalan rampa fonksiyonu için ticari amaçlı merkezi bir havalandırıcının aktif güç talebindeki değişimini ve Şekil 5.28, artan rampa fonksiyonu için ticari amaçlı merkezi bir havalandırıcının aktif güç talebindeki değişimini göstermektedir.

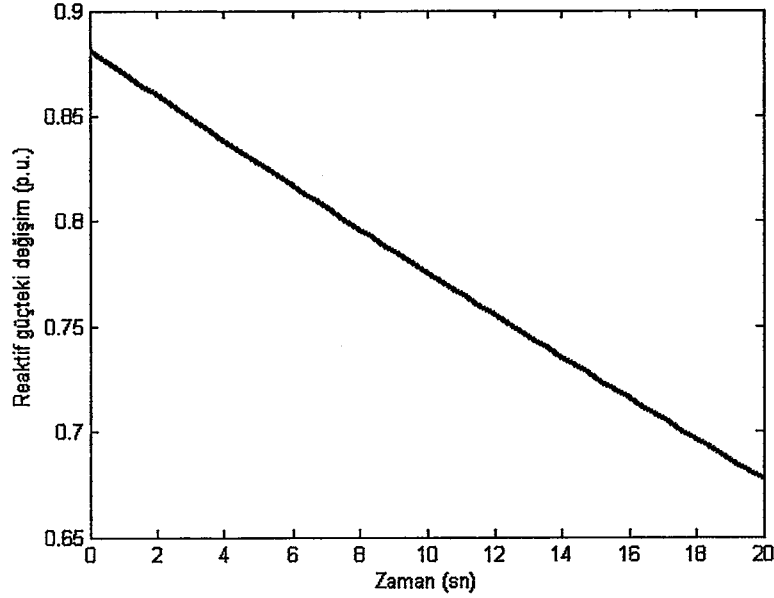


Şekil 5.27. Ticari amaçlı merkezi bir havalandırıcı için azalan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.



Şekil 5.28. Ticari amaçlı merkezi bir havalandırıcı için artan rampa fonksiyonu sonrası aktif güç talebindeki değişim.

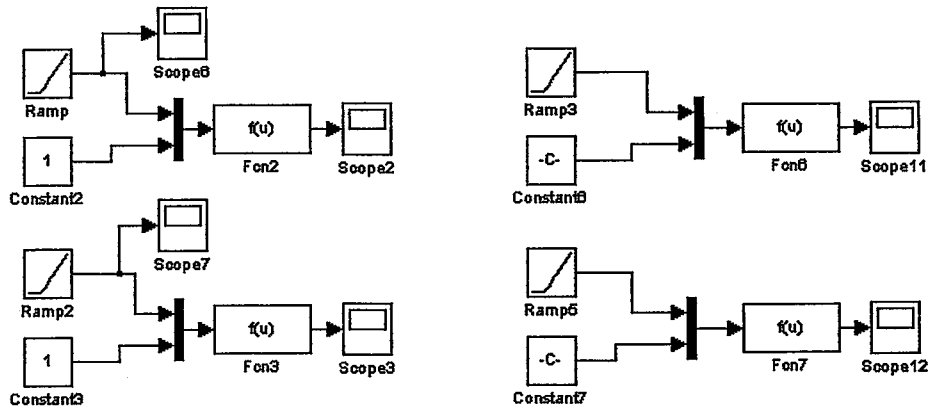
Aynı havalandırıcının reaktif güç talebindeki değişimi, Şekil 5.29'da gösterilmiştir.



Şekil 5.29. Ticari amaçlı merkezi bir havalandırıcı için azalan rampa fonksiyonu sonrası reaktif güç talebindeki değişim.

Dikkat edilirse, reaktif güç için, artan rampa fonksiyonu kullanılmamıştır. Çünkü, üstel ve polinom modellerinin karşılaştırılması bölümünde değinildiği gibi, üstel değerler 1'den büyük olduğunda ve gerilim nominal değerini aştığında, yük bileşeninin aktif ve reaktif güç denklemleri gerçekliliğini yitirmektedir. Çizelge 5.2'den de görüldüğü gibi ticari amaçlı merkezi havalandırıcı için, $\beta_v = 2,5$ olup 1'den büyüktür. Dolayısı ile, ticari amaçlı merkezi havalandırıcı için artan rampa fonksiyonuna bağlı olarak analiz gerçekleştirilmemiştir.

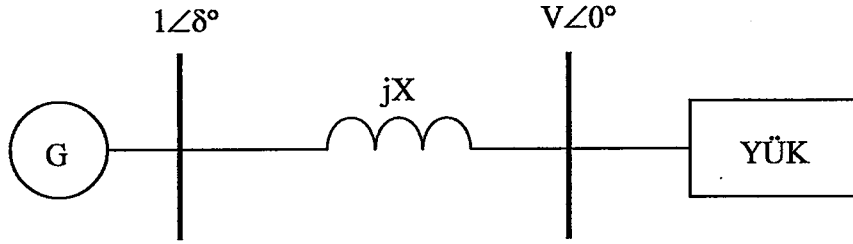
Gerek Çizelge 5.1 ve gerekse Tablo 5.2'ye dayanarak yapılan analizler için kullanılan MATLAB&Simulink programındaki genel model, Şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5.30. Yapılan statik analizler için MATLAB&Simulink programındaki genel model.

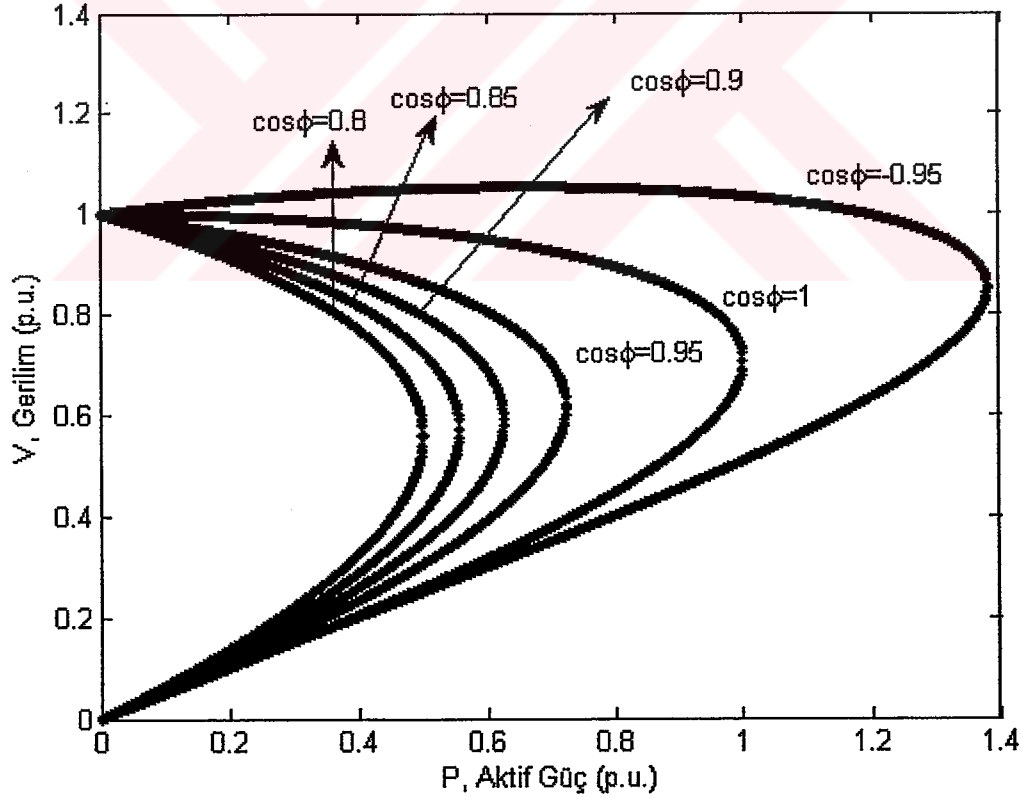
5.2 P-V Eğrisinin Elde Edilmesi

Sayısal uygulamamızda kullanacağımız örnek sistem Şekil 5.31’de gösterilmiştir. Şimdi bu örnek sistem için P-V eğrilerini elde etmeye çalışacağız.



Şekil 5.31. Analiz için örnek sistem.

P-V eğrilerinin analitik olarak nasıl elde edilebileceği 3. bölümde ele alınmıştır. Burada ise, çeşitli güç faktörleri için, örnek sisteme ait P-V eğrileri elde edilmiştir. Bu sayede, güç faktörünün gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri de incelenmiştir.



Şekil 5.32. Örnek sistem için çeşitli güç faktörü değerlerinde P-V eğrileri.

Bu P-V eğrileri çizdirilirken V_s ve genelleştirilmiş devre sabitleri A ve B'ye ihtiyaç vardır.

Burada;

$V_s = 1$, $A = 1$ ve $B = Z = jX = 0,5$ olarak ele alınmıştır.

Örnek sistem için çeşitli güç faktörü değerlerindeki P-V eğrileri Şekil 5.32'de verilmiştir. Bu eğrilerden de görüleceği üzere, güç faktörü büyüdükçe, hem hattın taşıyabileceği maksimum aktif güç artıyor hem de bu maksimum güçteki kritik gerilim değeri artıyor. Aynı zamanda güç faktörü endüktiften kapasitife doğru geçtikçe hattın taşıyabileceği maksimum (kritik) güç artış gösteriyor. Ancak 0,95 kapasitif güç faktörü için kritik güç değeri istenilen düzeyde büyük olmasına rağmen kritik gerilim değerinin de çok yüksek olması, olası bir bozucu etki sonrası sistemin, kararsızlık sorunu ile karşılaşabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla yükün uygun bir değerde kompanze edilmesi gerekmektedir.

5.3 Dinamik Analiz

Elektrik güç sistemlerinde yaşanan kararsızlık sorunları, sistem dinamikleri ile ilgilidir. Dolayısıyla, elektrik güç sistemlerinde kararsızlık sorunu ile ilgili dinamik analiz yapmak bir zorunluluk gibi gözükmemektedir. Üretim kaynağı, iletim hattı ve yükten oluşan ve Şekil 5.31'de gösterilen örnek sistemde yaşanan bir dinamik olayı gösterebilmek için sistemi yöneten durum denklemlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Bu örnek sistemde, zaman sabitleri farklı olan çeşitli yük bileşenleri için gerilim çökmesini gösteren dinamik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Daha önceden de bahsedildiği gibi gerilim çökmesi, yük talebinin, üretim ve iletim kapasitesinden fazla olduğu durumlarda meydana gelir. Dolayısıyla, böyle bir dinamik analizi gerçekleştirebilmek için öncelikle örnek sistemin kritik değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Örnek sistemin güç faktörü, $\cos\phi = 0,8$ 'tir. Buna göre $\tan\phi = 0,75$ olmaktadır. Bu değer, (3.55) ve (3.56) denklemlerinde yerine konursa;

$$K_1 = a_1 \cdot (b_2 - b_1 \cdot \tan\phi) + a_2 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan\phi)$$

$$K_1 = 1 \cdot (0,5) = 0,5 \quad (5.1)$$

$$K_2 = a_1 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan\phi) + a_2 \cdot (-b_2 + b_1 \cdot \tan\phi)$$

$$K_2 = 1 \cdot (0,5 \cdot 0,75) = 0,375 \quad (5.2)$$

değerleri elde edilir. Bu değerleri de (3.57) denkleminde yerine koyarsak kritik iletim (yük) açısı;

$$\delta_{\text{kritik}} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{K_2}{K_1} \right)$$

$$\delta_{\text{kritik}} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{0,375}{0,5} \right) = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} (36,87) = 26,565^\circ \quad (5.3)$$

olarak bulunur. $V_s = 1$ p.u. değeri ile birlikte, bu eşitlik denklem (3.52)'de yerine yazılırsa,

$$V_{\text{rkritik}} = \frac{V_s}{2.(a_1.\cos\delta_{\text{kritik}} + a_2.\sin\delta_{\text{kritik}})}$$

$$V_{\text{rkritik}} = \frac{1}{2.(1.\cos(26,565))} = 0,56 \text{ p.u.} \quad (5.4)$$

olarak elde edilmiş olur.

$$K_3 = b_1.\cos\delta_{\text{kritik}} + b_2.\sin\delta_{\text{kritik}}$$

$$K_3 = 0,5.\sin(26,565) = 0,2236 \quad (5.5)$$

$$K_4 = a_1.\cos\delta_{\text{kritik}} + a_2.\sin\delta_{\text{kritik}}$$

$$K_4 = 1.\cos(26,565) = 0,8944 \quad (5.6)$$

kısaltmaları ile hat sonundan çekilebilecek kritik güç değeri,

$$P_{\text{rkritik}} = \frac{V_s^2 . (2.K_3.K_4 - (a_1.b_1 + a_2.b_2))}{(b_1^2 + b_2^2).4K_4^2}$$

$$P_{\text{rkritik}} = \frac{1^2.(2.(0,2236).(0,8944))}{(0,5^2).4.(0,8944)^2} = 0,5 \text{ p.u.} \quad (5.7)$$

olarak bulunur.

Bu kritik değerler hesaplandıktan sonra, dinamik analiz için gerekli olan sistem denklemlerine ihtiyaç vardır. Bu denklemler diferansiyel denklemler olup, (Canizares, 1995)'ten alınmıştır.

Dinamik analizde kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\dot{\delta} = \omega \quad (5.8)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} \left[P_M - \frac{V}{X} \sin(\delta) - D \cdot \omega \right] \quad (5.9)$$

$$\dot{V} = \frac{1}{T_L} \left[-k \cdot P_M - \frac{V^2}{X} + \frac{V}{X} \cdot \cos(\delta) \right] \quad (5.10)$$

biçimindedir. Buradaki üstü noktalı ifadeler zamana göre kısmi türevi göstermektedirler. Bu denklemlerde, δ , rotorun açısal yer değiştirmesini, ω , rotorun açısal hızını ve V de yük gerilimini göstermekte olup, bu üç değişken, örnek sistemin değişkenleridir. Bu üç sistem değişkeni için başlangıç değerleri olarak hesaplanan kritik değerler kullanılmıştır.

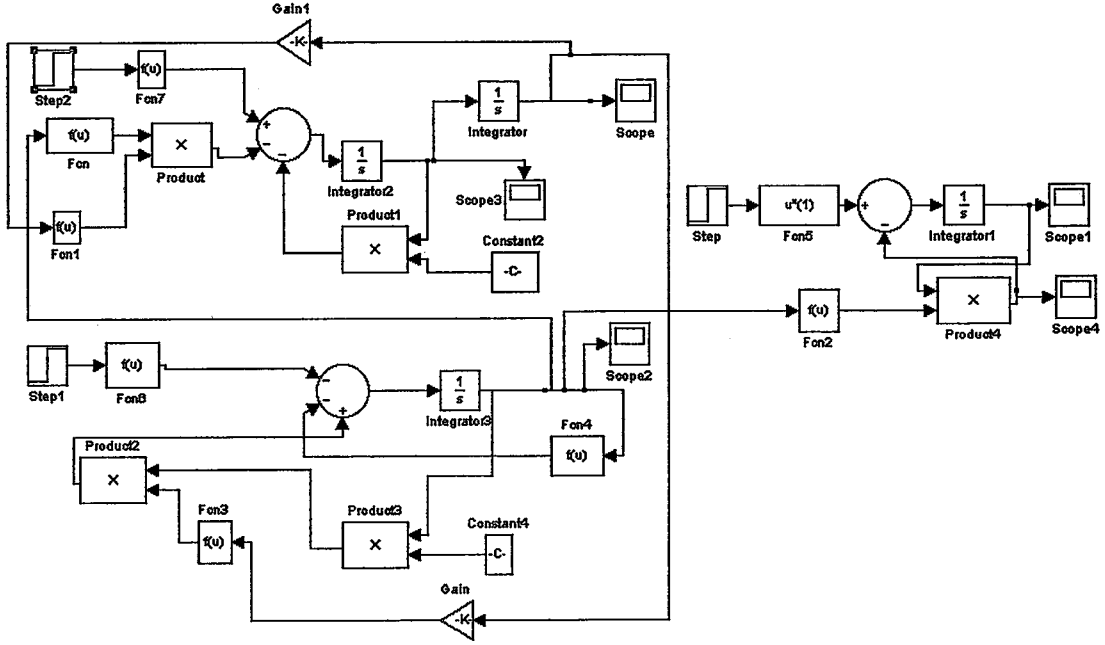
İlk iki denklem generatör dinamiklerini, son denklem ise yük dinamiklerini simgeler. Bu denklemlerde M , generatör atalet momentini, D , damping katsayısını, P_M , generatör mekanik gücünü, T_L , yükün zaman sabitini ve k da, güç faktörüne bağlı olarak değişen bir sabiti göstermektedir. Bütün bu değerler Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Yük, şebeke ve generatör parametreleri.

$M = 0,2$	$D = 0,1$
$P_M = 0,75$	$X = 0,5$
$T_L = 1$	$k = 0,5$

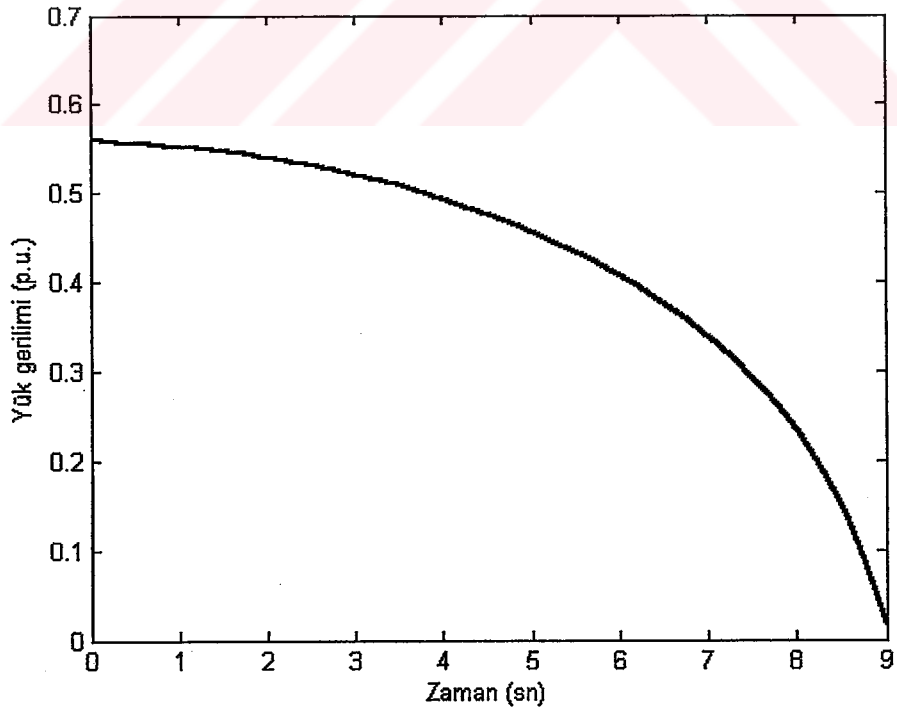
Burada, k , sabit ve T_L saniye cinsinden olup, diğer bütün değerler p.u. cinsindedir.

Yukarıda verilen diferansiyel denklemlerin MATLAB&Simulink programındaki modeli Şekil 5.33'de verilmiştir.

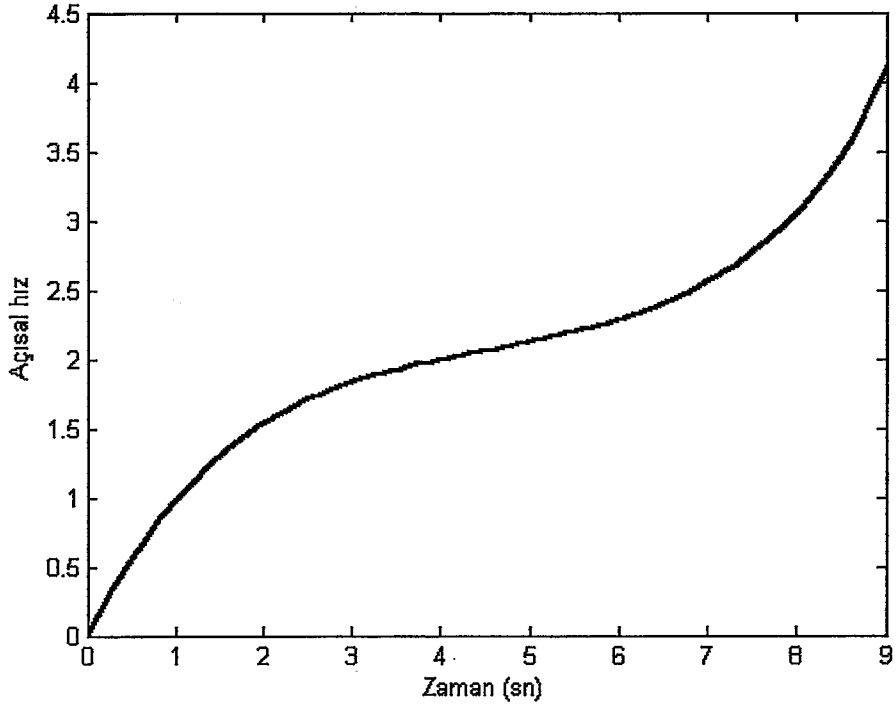


Şekil 5.33. Dinamik analiz için kullanılan MATLAB&Simulink modeli.

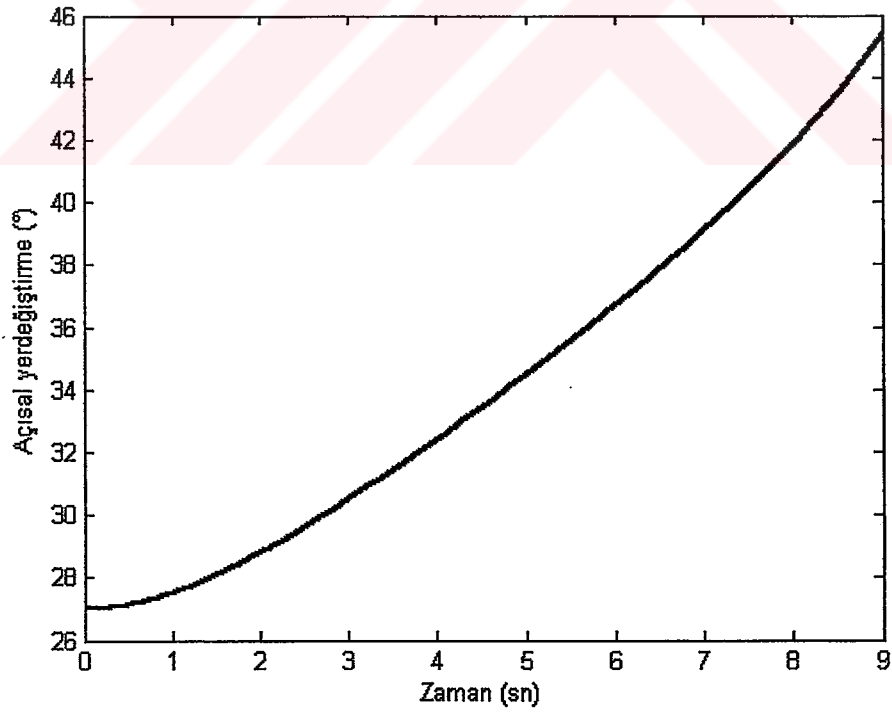
Bu değerler göz önüne alındığında, yapılan dinamik analiz ile ilgili grafikler Şekil 5.34 - 5.38'de verilmiştir.



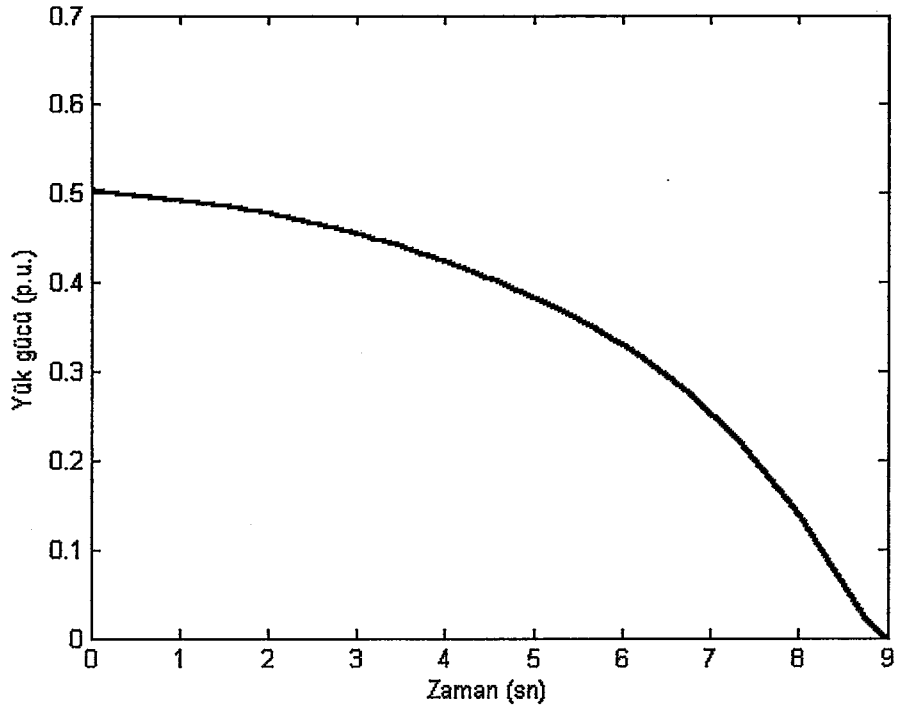
Şekil 5.34. Yük geriliminin zamana göre değişimi.



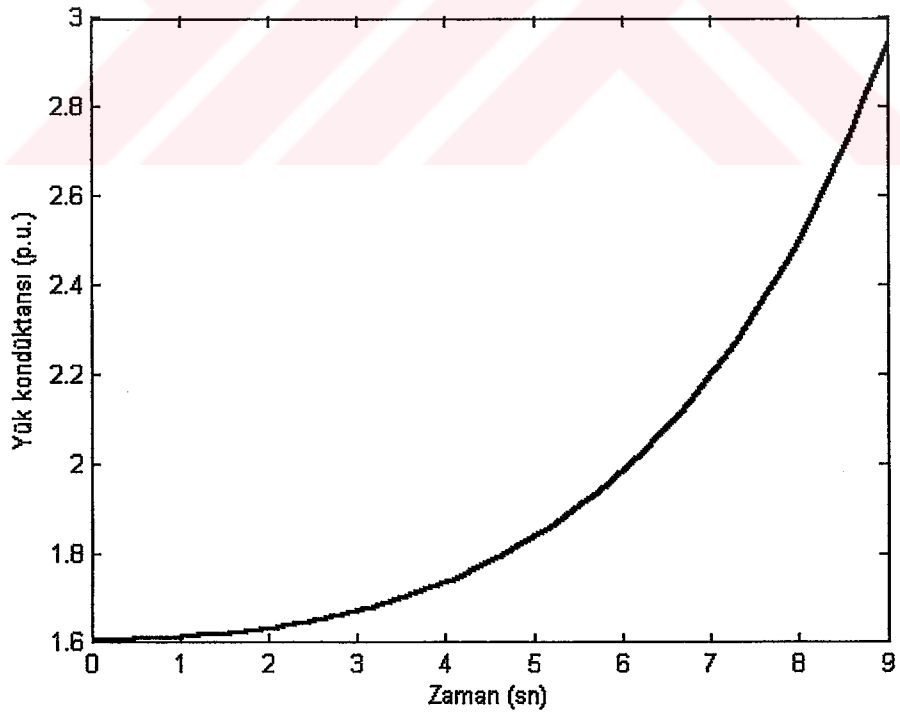
Şekil 5.35. Açısal hızın zamana göre değişimi.



Şekil 5.36. Açısal yer değiştirmenin zamana göre değişimi.



Şekil 5.37. Yük gücünün zamana göre değişimi.



Şekil 5.38. Yük kondüktansının zamana göre değişimi.

Bu eğrilerden de görüleceği gibi, kritik yüklenmenin ötesinde bir değer için gerilim, çökmeye maruz kalmıştır. Buna karşılık bu süreçte açılı kararlılığı için henüz çökme gerçekleşmemiştir.

Aynı örnek sistem için, T_L yük zaman sabitini değiştirerek, sistemdeki değişimlere farklı sürelerde cevap veren değişik yükler için yük geriliminin çökme süreleri belirlenebilir. Böylelikle farklı yük bileşenlerinin gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri belirlenebilir. Örnek sistemdeki farklı T_L yük zaman sabitleri için gerilim çökme süreleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Farklı zaman sabitlerine sahip yükler için gerilim çökme süreleri.

T_L (saniye)	$T_{\text{çökme}}$ (saniye)
0,001	2,4344
0,005	2,5801
0,01	2,7091
0,05	3,3631
0,1	3,9346
0,5	6,7148
1	9,0425
2	12,6218
5	20,6508
10	31,165
20	48,6573
50	92,695
100	165,251
200	315,591
500	760,6156
1000	1500

Bu çizelgeden de görüleceği gibi gerilim çökmesi, çok hızlı bir olay olabileceği gibi çok yavaş bir olay da olabilir. Gerilim çökmesinin hızlı mı yavaş mı gerçekleşeceğini belirleyen ana faktör yükün zaman sabiti dolayısıyla da yükün çeşididir. Gerilim çökmesi, asenkron motor gibi hızlı dinamiklere sahip bir yük için çok hızlı bir biçimde gerçekleşirken, termostat kontrollü yükler için çok yavaş gerçekleşmektedir.

6. SONUÇLAR

Nüfus ve teknolojideki gelişmeler ile elektrik enerjisi tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum, elektrik enerjisinin tüketim merkezlerinden oldukça uzak mesafelerde ve büyük güçlü merkezlerde üretilip, enerji iletim hatları vasıtasıyla çeşitli bölgelere dağıtılmasını gerektirmektedir. Dolayısıyla güç kalitesi ile ilgili sorunlar da günümüzde daha etkin bir biçimde ortaya çıkmaktadır.

Daha güvenilir ve kaliteli bir enerji için elektrik güç sisteminin planlanması, işletimi ve kontrolünde, güç sisteminin kararlılığı önemli bir etken olarak karşımıza çıkar. Güç sistem kararlılığı, sistem değişkenleri sınırlandırılmış iken, verilen bir ilk çalışma koşulu için bir elektrik güç sisteminin fiziksel bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra, bütün sistem zarar görmeden dengede çalışma halini yeniden kazanabilme yeteneğidir.

Güç sistem kararlılığı çeşitli alt kategorilerle sınıflandırılabilir. Bunlardan biri de gerilim kararlılığıdır. Gerilim kararlılığı, verilen bir ilk çalışma koşulunda, yaşanan bir bozucu etki sonrasında güç sistemindeki bütün baraların sürekli gerilimlerini sürdürebilme kabiliyeti ile ilgilidir.

Gerilim kararlılığı temel olarak büyük ve küçük bozucu etki gerilim kararlılığı olarak iki sınıfta tanımlanabilir. Büyük güç sistemlerinde, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerini içeren gerilim kararlılığı hakkında en önemli konu yük karakteristikleridir. Sistemin davranışında yük karakteristikleri birinci derecede rol oynar.

Yükler, karakteristikleri bakımından sabit empedanslı, sabit akımlı ve sabit güçlü yükler olarak üç sınıfta toplanabilirler. Bunlardan gerilim kararlılığı açısından en önemlisi sabit güçlü yüklerdir. Asenkron motorlar ve empedans kontrollü yükler gibi sabit güç çekme eğiliminde olan yüklerin güç talepleri, gerilimde yaşanan bozucu bir etkiyi takiben önce sabit empedans karakteristiği gösterip azalır daha sonra ise tekrardan eski seviyelerine geri gelir. İşte bu özellik, gerilim kararlılığı açısından çok önemlidir. Eğer sabit güçlü yük, güç talebini üretim ve iletim sistemlerinin kapasitesinden daha fazla arttırmaya çalışırsa bu durumda gerilim çökmesi dediğimiz kararsızlık olayı ile karşılaşılır.

Bu çalışmada, çeşitli yük bileşenlerinin gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlk olarak, sabit empedans, sabit akım, sabit güç ve karma yüklerin gerilim değişimine verdikleri cevaplar incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, sabit güç yükünün gerilim değişimine verdiği cevaba bakarak bu tip yüklerin gerilim kararlılığı üzerinde ne derece

önemli olduğu bir kez daha anlaşılmıştır.

İkinci olarak, bazı yük bileşenlerinin gerilim değişimine verdikleri cevaplar incelenmiştir. Burada sırasıyla, akkor flamanlı lamba, üç fazlı ısı pompasının ısıtma modu, büyük bir endüstriyel motor ve ticari amaçlı kullanılan merkezi bir havalandırma için gerilimde yaşanan azalan ve artan rampa fonksiyonları için statik analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu güne kadar yapılan çalışmalarda akkor flamanlı lamba hep sabit empedans karakteristikli olarak gösterilmişti. Oysa ki akkor flamanlı lambanın, sanıldığı gibi, sabit empedans karakteristikli olmadığı Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'deki grafiklerle açıkça ortaya konmuştur. Bunda etken faktör, lamba içindeki telin sıcaklığının gerilimle değişmesidir.

Üç fazlı ısıtma pompasının ısıtma modu için yapılan analizlerde, aktif güç talebindeki değişimin reaktif güç talebindeki değişimden çok daha az olduğu açıkça görülmektedir.

Büyük bir endüstriyel motor için yapılan analizlerde, motorun aktif güçteki talebinin gerilim değişiminden pek fazla etkilenmediği görülmektedir. Buna karşılık, reaktif güç talebinde görülen değişim daha belirgin bir biçimde olmaktadır. Bu özelliğinden dolayı büyük bir endüstriyel motorun sabit aktif güç çektiği, buna karşılık reaktif enerji talebinin gerilime daha fazla duyarlı olduğu söylenebilir.

Ticari amaçlı kullanılan merkezi bir havalandırma için yapılan analizler sonucunda endüstriyel motor ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu statik analizler gerçekleştirildikten sonra, üretim, iletim hattı ve yükten oluşan iki baralı bir sistem için gerilim çökmesine dayalı dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz gerçekleştirilmeden önce bu örnek sistemin P-V eğrileri elde edilmiş ve bu eğrilere dayanarak yükün uygun bir biçimde kompanze edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

P-V eğrileri elde edildikten sonra örnek sistemin kritik değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra ise, sistem denklemleri üzerinde, elde edilen bu kritik değerlere göre çökme durumu incelenmiştir. Yükün zaman sabiti 1 saniye olarak seçildiği durum için gerilim çökmesinin yaklaşık olarak 9 saniyede oluştuğu görülmüştür. Aynı sistem için farklı yük zaman sabitleri için yeniden analizler yapılmış ve elde edilen değerler bir çizelge halinde verilmiştir (Çizelge 5.4).

Çizelgeden 5.4'ten de görüleceği gibi, gerilim çökmesi sanıldığı aksine her zaman hızlı bir biçimde gerçekleşmez. Gerilim çökmesinin ne kadar bir süre içerisinde gerçekleşeceğine

yükün zaman sabiti ve dolayısıyla da yük karar vermiş olur. Eğer sistemdeki baskın yük asenkron motor gibi hızlı dinamikleri olan bir yük ise gerilim çökmesi çok hızlı bir biçimde gerçekleşebilir. Ancak eğer sistemdeki baskın yük termostat kontrollü bir yük ise bu durumda gerilim çökmesi çok daha yavaş gerçekleşecektir.



KAYNAKLAR

Brucoli, M., La Scala, M., Sbrizzai, R., Trovato, M., (1993), "Voltage Stability Analysis of Electric Power Systems with Frequency Dependent Loads", IEE Proceedings-C, 140(1): 1-7.

Canizares, C.A., (1995), "On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modelling" IEEE Transactions on Pow, Power System Dynamics and Stability, John Willey & Sons. er Systems, 10(1): 512-522.

Chiang, H.D., Dobson, I., Thomas, R.J., Thorp, J.S., Fekih-Ahmed, L., (1990), "On Voltage Collapse in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, 5(2): 601-611.

D.İ.E., (2002), Elektrik Üretim ve Dağıtım Anketi Sonuçları, Ankara.

Dunga Prasad, G., Al-Mulhim, M.A., (1997), "Performance Evaluation of Dynamic Load Models for Voltage Stability Analysis", Elsevier Electrical Power & Energy Systems, 19(8): 533-540.

Dunga Prasad, G., Al-Mulhim, M.A., Ray, G.D., Gopichand, B., (1997), "Comparative Assessment of the Effect of Dynamic Load Models on Voltage Stability", Elsevier Electrical Power & Energy Systems, 19(5): 305-309.

Grigsby, L.L., (2001), The Electrical Power Engineering Handbook, IEEE Pres, U.S.A.

Gustafson, M.W., Baylor, J.S., Epstein, G., (1993), "Estimating Air Conditioning Load Control Effectiveness Using An Engineering Model", IEEE Transactions on Power Systems, 8(3), 972-978.

Gürdal, O., (2001), Elektrik Makinalarının Tasarımı, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.

Hill, D.J., (1993), "Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Satbility Studies", IEEE Transactions on Power Systems, 8(1): 166-176.

Indulkar, C.S., Viswanathan, B., Venkata, S.S., (1989), "Maximum Power Transfer Limited by Voltage Stability in Series and Shunt Compansated Schemes for AC Transmission Systems", IEEE Transactions on Delivery, 2(4):1246-1252.

Kundur, P., (1994), Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc.

Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Tatlor, C., Van Cutsem, T., Vittal, V., (2004), "Definition and Classification of Power System Stability", IEEE Transactions on Power Systems, 1-7.

Liu, Y.H., (1994), "Voltage Stability Study with Emphasis on Load Characteristics", PhD Thesis, University of Texas, Arlington.

Machowski, J., Bialek, J.W., Bumby, J.R., (1997), Power System Dynamics and Stability, John Willey & Sons.

Morison, G.K., Gao, B., Kundur, P., (1993), "Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches", IEEE Transactions on Power Systems, 8(3): 1159-1171.

Padiyar, K.R., (1995), Power System Dynamics Stability and Control, John Willey & Sons.

Pal, M.K., (1992), "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", IEEE Transactions on Power Systems, 1(5): 250-256.

- Peşint, M.A., (1996), Orta Dereceli Endüstriyel Teknik Öğretim Okulları Elektrik Makinaları 4 Senkron Makinalar ve Alternatif Akımın Doğrultulması Temel Ders Kitabı, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul.
- Rosehart, W.D., Canizares, C.A., (1999), “Bifurcation Analysis of Various Power System Models”, Elsevier Electrical Power & Energy Systems, 21: 171-182.
- Saadat, H., (1999), Power System Analysis, McGraw-Hill, Inc.
- Savaşan, M., (1996), “Gerilim Kararlılığı Güvenilirliğinin Ekspert Sistemlerle İncelenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Taylor, C.W., (1992), Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, Inc.
- Uyaroğlu, Y., (2002), “Elektrik Güç Sistemlerinde Çatallaşma Analizi ile Kaotik Olayların İncelenmesi”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Uzunoğlu, M., (2000), “Nonlineer Yükler İçeren Elektrik Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılık Analizi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uzunoğlu, M., Kızıl, A., Onar, Ö.Ç., (2003), Her Yönü ile Matlab Genişletilmiş 2. Baskı, Türkmen Kitabevi, İstanbul.
- Van Cutsem, T., Vournas, C., (1998), Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers.
- Yalçın, M.A., (1995), “Enerji İletim Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yorino, N., Sasaki, H., Masuda, Y., Tamura, Y., Kitagawa, M., Oshima, A., (1992), “An Investigation of Voltage Instability Problems”, IEEE Transactions on Power Systems, 2(7): 600-611.

EK

Ek 1

Asenkron motorun dinamik denkleminin hareket denkleminden türetilmesi

Ek 1 Asenkron motorun dinamik denkleminin hareket denkleminde türetilmesi

P_e : Elektriksel giriş gücü,

P_m : Mekanik çıkış gücü,

T_e : Rotoru etkileyen elektriksel moment,

T_m : Mekanik yük momentini,

w : Rotor açısal hızı,

w_s : Senkron açısal hız,

s : Kayma.

$$I_m \cdot \frac{dw}{dt} = T_e - T_m \quad (\text{hareket denkleminde}) \quad (\text{E.1})$$

$$s = \frac{w_s - w}{w_s} \quad , \quad w = w_s \cdot (1 - s) \quad , \quad \frac{dw}{dt} = -w_s \cdot \frac{ds}{dt}$$

$$-I_m \cdot w_s \cdot \frac{ds}{dt} = T_e - T_m \quad I_m \cdot w_s \cdot \frac{ds}{dt} = T_m - T_e$$

Sürekli halde;

$$P_e \cdot (1 - s) - P_m = 0 \quad , \quad P_e \cdot \frac{w}{w_s} - P_m = 0 \quad , \quad \frac{P_e}{w_s} - \frac{P_m}{w} = 0 \quad , \quad T_m - T_e = 0$$

$$I_m \cdot w_s \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{P_m}{w} - \frac{P_e}{w_s} \quad , \quad \frac{ds}{dt} = \frac{P_m}{I_m \cdot w_s^2 \cdot (1 - s)} - \frac{P_e}{I_m \cdot w_s^2}$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{I_m \cdot w_s^2} \left(\frac{P_m}{(1 - s)} - P_e \right) \quad (\text{E.2})$$

şeklinde motorun dinamik denkleminde elde edilir.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	26.10.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1993-1996	Vefa Anadolu Lisesi
Lisans	1996-2000	Yıldız Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Müh. Bölümü
Yüksek Lisans	2000-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Müh. Programı

