

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİNİN ENDÜSTRİYEL
DAĞITIM SİSTEMLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

729128

DOKTORA TEZİ

Elektrik Yük. Müh. Ahmet Serdar YILMAZ

128128

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK MÜH.

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ertan YANIKOĞLU

Bu tez 11/07/2002 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Hüseyin ÇAKIR (YTÜ)
Jüri Başkanı

Doç.Dr. Ertan YANIKOĞLU (SAÜ)
Jüri Üyesi

Doç.Dr.M. Ali YALÇIN (SAÜ)
Jüri Üyesi

Doç.Dr. Nurettin UMURKAN (YTÜ)
Jüri Üyesi

Doç.Dr. Şerafettin ÖZBEY (SAÜ)
Jüri Üyesi

ÖNSÖZ

Bu tezde kısa süreli gerilim düşümlerinin yerel elektrik santrallerine etkisi, ve dağıtım sisteminde meydana gelen kararlılığı etkileyen problemler incelenmiştir. Günümüzde gerek ülkemizde ve gerekse gelişmiş batı ülkelerinde yerinde üretim ve yerinde tüketim anlayışının yaygınlaşması sonucu yerel santrallerin sayısında önemli artışlar yaşanmaktadır. Ele alınan gerilim düşümü problemi son yıllarda üzerinde yoğun şekilde araştırmaların olduğu bir konudur. Pek çok üniversite gerilim düşümleri ve yerel santraller konusunda devam eden tez ve projeler bulunmaktadır. Bu tezde sadece bilgisayar simülasyonları yapılmıştır. Gerçek sistemler üzerinde böyle bir çalışma yapmanın zorluğu bizi sadece bilgisayar ortamında benzetimler yapmaya mecbur bırakmıştır. Ancak kullanılan yazılımın güçlü ve doğru sonuçlar vermesi, elde edilen sonuçların gerçekçi olacağını göstermektedir.

Bu tezin hazırlanması sırasında sağladığı destek ve yardımlardan dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Ertan YANIKOĞLU'na, tez dönemi boyunca bilgi ve literatür desteği sağlayan Y.Doç.Dr. Mehmet BAYRAK'a, kullandığım SIMPOW yazılımını bölümümüze hibe eden ABB firmasına ve SIMPOW konusunda son iki yıldan beri sürekli destek sağlayan, gerek gönderdiği çok önemli bilgiler içeren teknik raporlar ve gerekse sorduğum sorulara verdiği faydalı cevaplardan dolayı her zaman minnettar kalacağım, İsveç Kraliyet Teknoloji Enstitüsü doktora öğrencisi Jonas PERSSON'a en içten ve samimi teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, üzerimdeki haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim anneme, babama, gösterdiği fedakarlıklardan dolayı eşim Zişan'a ve manevi desteklerinden dolayı eşimin ailesine sonsuz şükranlarımı sunarım. Bu tezin bundan sonraki çalışmalarda faydalı olmasını temenni ederim.

Haziran 2002 / Sapanca

Ahmet Serdar YILMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER LİSTESİ	vi
KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xvii
ÖZET	xviii
SUMMARY	xix

BÖLÜM 1

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2

KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİ ve KESİLMELERİ	7
2.1 Temel Tanımlar	7
2.2 Gerilim Düşümlerinin Oluşma Sebepleri ve Sıklıkları	9
2.3 Gerilim Düşümlerinin Çeşitli Hassas Yükler Üzerine Etkisi	11
2.4 Simetrik Gerilim Düşümü Hesaplama Yöntemleri	13
2.4.1 Radyal dağıtım şebekelerinde dengeli gerilim düşümü hesabı	13
2.4.2 Ağ dağıtım şebekelerinde simetrik gerilim düşümü hesabı	17
2.5 Radyal Şebekelerde Asimetrik Kısa Devreler Sonucu Oluşan KSGD'leri	19
2.6 Büyük Güçlü Motorlara Yolverilmesi Sırasında Oluşan Gerilim Düşümleri	25

BÖLÜM 3

KSGD'LERİNİN ENDÜSTRİYEL DAĞITIM SİSTEMLERİNE ETKİSİ	28
3.1 Endüstriyel Dağıtım Sistemleri	28
3.2 Asenkron Motorların Modellenmesi	31
3.2.1 Sürekli Hal Modeli	31
3.2.2 Geçici Hal Modeli	34
3.3 Arıza Yerinin ve Arıza Türünün Etkisi	36
3.3.1 Üç faz simetrik kısa devresi	36
3.3.2 Bir faz toprak kısa devresi sonucu oluşan KSGD'lerinin etkisi	40

3.3.3 Faz faz ve iki faz toprak kısa devreleri sonucu oluşan KSGD'lerinin etkisi	43
3.4 Mekanik Yük Moment Karakteristiklerinin Etkisi	49
3.5 Dinamik/Statik Yük Oranının Etkisi	55
3.6 Motor Yüklenme Oranının Etkisi	57
3.7 H-Atalet Sabitinin Etkisi	58

BÖLÜM 4

YEREL ELEKTRİK SANTRALLERİNİN KSGD'LERİNE ETKİSİ	60
4.1 Yerel Elektrik Santralleri	60
4.2 Yerel Elektrik Santrallerinin Sınıflandırılması	62
4.2.1 Kullanım amacına göre sınıflandırma	62
4.2.2 Dağıtım sistemi ile arasındaki bağlantı şekline göre sınıflandırma	63
4.2.3 Kurulu güçlerine göre sınıflandırma	65
4.2.4 Kullanılan yakıt ve teknoloji türüne göre sınıflandırma	66
4.3 Yerel Elektrik Santrallerinde Enerji Üretimi ve Generatörler	68
4.4 Senkron Generatör Modeli	69
4.4.1 Salınım denklemi	70
4.4.2 Sürekli ve geçici halde güç bağıntıları	70
4.4.3 Türbin-regülatör ve uyarma sistemi modeli	74
4.5 Yerel Generatörlerin Kısa Süreli Gerilim Düşümlerine Etkisi	76
4.6 Şebeke ile Paralel Çalışma Durumunda YES'nin Gerilim Düşümüne E.	79
4.6.1 Güç faktörünün etkisi	79
4.6.2 Pg/Py oranının etkisi	81
4.6.3 Farklı arıza türlerinde YES'in etkisi	83
4.6.4 Uyarma sisteminin KSGD'lerine etkisi	88
4.6.5 Generatörün anma yüküne göre yüklenmesinin etkisi	88
4.6.6 Büyük güçlü motorlara yol verilmesinin gerilim düşümlerine e.	92
4.6.7 Yerel generatörlerin asenkron motorların hızlanmasına ve arıza sonrası davranışına etkisi	93

BÖLÜM 5

KSGD LERİNİN YEREL SANTRALLERE VE DAĞITIM SİSTEMİ

KARARLILIĞINA ETKİSİ	95
5.1 Giriş	95
5.2 YES/Dağıtım Sistemi Bağlantı Ara Yüzü ve Gerilim Düşümü İlişkisi	98
5.3 Yük Karakteristiklerinin Generatör Davranışına Etkisi	101
5.4 Arıza Yerinin Generatör Davranışına Etkisi	103
5.5 Arıza Türlerinin Yerel Generatörlerin Davranışına Etkisi	105
5.5.1 Uç gerilimi, rotor açısı ve hız değişimleri	105
5.5.2 Moment ve güç değişimleri	114
5.6 Arıza Temizleme Zamanının Generatörlere Etkisi	118
5.7 İki Farklı Yerel Generatörün Bulunduğu Dağıtım Sisteminde Dinamik Kararlılık Problemleri	121
5.7.1 Arıza temizleme zamanının generatör davranışına etkisi	121
5.7.2 Arıza yerinin generatör davranışına etkisi	124
5.7.3 Arıza türünün generatörler üzerine etkisi	127

5.7.4 Küçük generatörün sabit uyarmaya sahip olması durumu	132
5.8. Büyük Güçlü Motorlara Yol Verilmesi Sonucu	
Oluşan KSGD'lerinin Yerel Generatörlere Etkisi	134

BÖLÜM 6	
SONUÇLAR	137

BÖLÜM 7	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER	144

KAYNAKLAR	145
------------------------	-----

EKLER	
EK-A	152
EK-B	155
ÖZGEÇMİŞ	161



SİMGELER LİSTESİ

β	Motorlarda yol alma akımı ile anma akımı arasındaki oran
L	Hat uzunluğu
L_{krit}	Kritik uzaklık
p	Hat parçası
p_{krit}	Kritik hat parçası
S_{KD}	Kaynak (Şebeke) Kısa Devre Gücü
S_M	Motor anma gücü
$V_{a\Delta}, V_{a\Sigma}$	Basitleştirilmiş simetrik bileşenler
V_a, V_b, V_c	Faz gerilimleri
V_{a1}, V_{a2}, V_{a0}	Simetrik bileşen gerilimleri (sırasıyla doğru, ters ve sıfır bileşen)
V_{krit}	Kritik gerilim
V_{maks}	Maksimum gerilim
V_{sag}	Gerilim düşümü genliği
z	Hat birim karakteristik empedansı
Z_i	Empedans (i indisi kullanıldığı yere göre değişmektedir.)
X_s	Stator reaktansı
X_r	Rotor reaktansı
X_m	Magnetik reaktansı
X_e	Thevenin eşdeğer reaktansı
X	Rotor açık devre reaktansı
ω_s	Stator Döner Alanı Açısal Hızı (radyan/saniye)
ω_r	Rotor hızı (radyan/saniye)
V_s	Stator gerilimi
V_e	Thevenin eşdeğer gerilimi
T'_O	Geçici hal açık devre zaman sabiti
s	Kayma
R_s	Stator direnci
R_r	Rotor direnci
R_r	Rotor direnci
R_e	Thevenin eşdeğer direnci
P_{ag}	Statordan hava aralığı üzerinden rotora aktarılan güç
n_s	Senkron Hız (Stator Döner Alan Hızı)
n_r	Rotor mili dönme hızı
M_{yO}	Anma yük momenti.
M_y	Yük Momenti
M_e	Elektromagnetik Moment
i_{qs}	Stator akımı q-bileşeni
i_{ds}	Stator akımı d- bileşeni

I_r	Rotor akımı
H	Eylemsizlik sabiti
f_s	Stator gerilimi frekansı (50 Hz)
A, B	Durum denklemi matrisleri
α	Mekanik yük karakteristiğini belirleyen üstel ifade
X'_s	Bloke rotor açık devre reaktansı
V'	Geçici empedans arkası gerilim
V'_d	V' nin d- bileşeni
V'_q	V' nin q- bileşeni
$\frac{d}{dt}$	Zamana göre türev operatörü
H	Senkron generatör eylemsizlik sabiti
X'_d	Geçici reaktans d-bileşeni
X'_q	Geçici reaktans q-bileşeni
X_d	Senkron reaktans d- bileşeni
X_q	Senkron reaktans q-bileşeni
P_E, Q_E	Sürekli hal aktif ve reaktif güç ifadesi
P_E, Q_E	Geçici hal aktif ve reaktif güç ifadesi

KISALTMALAR LİSTESİ

1FT	Bir Faz Toprak
2F	İki Faz
2FT	İki Faz Toprak
3F	Üç Faz
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ANSI	Amerikan Ulusal Standart Enstitüsü
CBEMA	Computer Business Equipment Manufacturers Associations
Hz	Hertz (1/saniye)
IEC	Uluslar arası Elektroteknik Komisyonu
IEEE	Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
ITIC	Information Technology Industry Council
KSGD	Kısa Süreli Gerilim Düşümü
ms	Milisaniye
OBN	Ortak Bağlantı Noktası
PLC	Programlanabilir Lojik Kontrolör
PNF	Pozitif Negatif Faktör
pu	Birim değer (per unit)
RCV	Kalan kompleks gerilim
Ref	Referans
rms	Etkin değer (gerilim yada akım için)
s	Saniye
Std	Standart

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Enerji kalitesinin sınıflandırılması.....	2
Şekil 2.1	Tipik bir gerilim düşümü dalga şekli.....	7
Şekil 2.2	Dağıtım sistemlerinde KSGD'ne yol açan arızaların oluşma yerlerine göre dağılımı.....	10
Şekil 2.3	İstatistiksel verilerden elde edilmiş düşüm genliği oranları.....	10
Şekil 2.4	CBEMA'nın güç kabuledilebilirlik eğrisi.....	12
Şekil 2.5	ITIC'in güç kabuledilebilirlik eğrisi.....	12
Şekil 2.6	Tipik bir radyal dağıtım sistemi prensip şeması.....	14
Şekil 2.7	Basitleştirilmiş radyal dağıtım sistemi (gerilim bölücü devre).....	14
Şekil 2.8	Arıza yeri ile gerilim düşümü değişimi.....	16
Şekil 2.9	Hat kesiti ile gerilim düşümü değişimi.....	16
Şekil 2.10	Tipik bir ağ şebeke örneği.....	17
Şekil 2.11	Genelleştirilmiş ağ (halka) şebeke.....	18
Şekil 2.12	Halka Şebekede Kritik Parça (p_{krit}) ile düşme genliği değişimi....	18
Şekil 2.13	Gerilim bölücü devre için basitleştirilmiş bileşen devresi (tek-faz toprak).....	20
Şekil 2.14	Gerilim bölücü devre için basitleştirilmiş bileşen devresi (iki-faz toprak).....	21
Şekil 2.15	Dengesiz gerilim düşümü tipleri fazör diyagramı.....	24
Şekil 2.16	Motor yol verme olayı için gerilim bölücü devre.....	26
Şekil 2.17	Asenkron motorlara yol verilmesi sırasında oluşan gerilim düşümü.....	27
Şekil 3.1	Örnek sistem tek hat şeması.....	30
Şekil 3.2	Asenkron makine sürekli hal eşdeğer devresi.....	32
Şekil 3.3	Moment-kayma değişimi için eşdeğer devre.....	33

Şekil 3.4	Asenkron makinanın moment-kayma değişimi.....	34
Şekil 3.5	Asenkron makinaların geçici hal eşdeğer devresi.....	35
Şekil 3.6	İletim sistemindeki arıza asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi).....	38
Şekil 3.7	Dağıtım sistemindeki arızanın asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi).....	38
Şekil 3.8	B1_11 barasındaki arızanın asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi).....	39
Şekil 3.9	B3_6.3 barasındaki arızanın asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi)	39
Şekil 3.10	C2_0.4 barasındaki arızanın asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi)	40
Şekil 3.11	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (1FT, İletim sistemi arızası)	41
Şekil 3.12	Motor uç gerilimleri (1FT, Dağıtım sistemi arızası).....	41
Şekil 3.13	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (1FT, B1_11 barasında kısa devre)	42
Şekil 3.14	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (1FT, B3_6.3 barasında kısa devre)	42
Şekil 3.15	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (1FT, C2_0.4 barasında kısa devre)	43
Şekil 3.16	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, İletim sistemi arızası)..	44
Şekil 3.17	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, Dağıtım sistemi arızası)	44
Şekil 3.18	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, B1_11 barasında kısa devre)	45
Şekil 3.19	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, B3_6.3 barasında kısa devre)	45
Şekil 3.20	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, C2_0.4 barasında kısa devre)..	46

Şekil 3.21	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, İletim sistemi arızası).....	46
Şekil 3.22	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, Dağıtım sistemi arızası)	47
Şekil 3.23	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, B1_11 barasında kısa devre)	47
Şekil 3.24	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, B3_6.3 barasında kısa devre)	48
Şekil 3.25	Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, C2_0.4 barasında kısa devre)	48
Şekil 3.26	Yük momenti-kayma değişimi (3.tip karakteristik).....	51
Şekil 3.27	Yük momenti-kayma değişimi (4.tip karakteristik).....	51
Şekil 3.28	Motor terminalindeki kısa devre sırasında gerilim ve hız değişimi.....	52
Şekil 3.29	Motor terminalinde kısa devre sırasında moment değişimleri.....	52
Şekil 3.30	İletim sistemi arızası sırasında gerilim ve hız değişimleri.....	53
Şekil 3.31	İletim sistemi arızası sırasında moment değişimleri.....	53
Şekil 3.32	B2_11 barasındaki kısa devre sırasında gerilim ve hız değişimi...	54
Şekil 3.33	B2_11 barasındaki kısa devre sırasında moment değişimleri.....	54
Şekil 3.34	OBN_11 barası etkin faz-faz gerilimi değişimi (İletim arızası)...	56
Şekil 3.35	OBN_11 barası etkin faz-faz gerilim değişimi (Dağıtım sistemi arızası)	56
Şekil 3.36	OBN_11 barası etkin faz-faz gerilimi değişimi (arıza yeri : B2_11)	57
Şekil 3.37	Farklı yüklenme oranlarında 400 V'luk motorun uç gerilimi değişimi.....	58
Şekil 3.38	Farklı atalet sabitlerinin gerilim düşümüne etkisi (11 kV motor için)	59
Şekil 4.1	Bir yerel santralin enterkonnekte sistem içerisindeki yeri.....	61
Şekil 4.2	Yerel santraller ile enerji üretimi.....	63
Şekil 4.3	Bağlantı şekli Tip 1.....	63
Şekil 4.4	Bağlantı şekli Tip 2.....	64

Şekil 4.5	Bağlantı şekli Tip 3.....	64
Şekil 4.6	Bağlantı şekli Tip 4.....	65
Şekil 4.7	Türkiye’de Yerel Elektrik Santrallerinin Sektörlere Göre Dağılımı.....	67
Şekil 4.8	Türkiye’de Yerel Elektrik Santrallerinin Kullanılan Yakıta Göre Dağılımı.....	67
Şekil 4.9	Dağıtım şebekesine bağlı yerel generatör tek hat şeması.....	68
Şekil 4.10	Sürekli çalışma koşullarındaki senkron makinanın fazör diyagramı.....	69
Şekil 4.11	Geçici halde senkron makinanın fazör diyagramı.....	70
Şekil 4.12	Tek ön ısıtmalı buhar türbini yaklaşık modeli.....	73
Şekil 4.13	Hız regülatörü blok diyagramı.....	73
Şekil 4.14	Uyarma sistemi modeli.....	74
Şekil 4.15	Yerel santralin bulunduğu sistemin eşdeğer devresi.....	75
Şekil 4.16	YES’nin gerilim düşümüne etkisi.....	77
Şekil 4.17	YES’in dağıtım sistemine bağlantısı.....	78
Şekil 4.18	Farklı güç faktörleri için YES’in KSGD’lerine etkisi.....	79
Şekil 4.19	Aktif güç kaybı.....	79
Şekil 4.20	Reaktif güç kaybı.....	80
Şekil 4.21	Pg/Py oranının etkisi.....	80
Şekil 4.22	Aktif güç kaybı.....	81
Şekil 4.23	Reaktif güç kaybı.....	81
Şekil 4.24	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (3F).....	82
Şekil 4.25	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (1F, Arızalı A-Fazı)	83
Şekil 4.26	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (1F, Arızasız B-Fazı)	83
Şekil 4.27	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (1F, Arızasız C-Fazı)	83
Şekil 4.28	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2F, Arızalı A-Fazı)	84

Şekil 4.29	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2F, Arızalı B-Fazı)	84
Şekil 4.30	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2F, Arızalı B-Fazı)	85
Şekil 4.31	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2FT, Arızalı A-Fazı)	85
Şekil 4.32	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2FT, Arızalı B-Fazı)	85
Şekil 4.33	Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2FT, Arızasız C-Fazı)	86
Şekil 4.34	Uyarma sisteminin gerilim düşümüne etkisi (kırmızı regülatörlü uyarma sistemi, mavi sabit uyarma sistemi).....	87
Şekil 4.35	Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (iletim sistemi arızasında)	88
Şekil 4.36	Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (dağıtım sistemi arızasında)	88
Şekil 4.37	Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (B1_11 barasında kısa devre)	88
Şekil 4.38	Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (B3_6.3 barasında kısa devre)	89
Şekil 4.39	Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (C2_0.4 barasında kısa devre)	89
Şekil 4.40	Yüklenme oranı generatör barası gerilimi değişimi.....	90
Şekil 4.41	Yüklenme oranı motor hızı değişimi.....	90
Şekil 4.42	Motorlara yol verilmesi sırasında oluşan gerilim düşümleri.....	92
Şekil 4.43	Motor hız değişimleri (B3_6.3 barasında 3FT ve 1FT arızası).....	93
Şekil 4.44	Motor hız değişimleri (B3_6.3 barasında 2F ve 2FT arızası).....	94
Şekil 4.45	Motor hız değişimleri (B1_11 barasında 3FT ve 1FT arızası).....	95
Şekil 4.46	Motor hız değişimleri (B1_11 barasında 2F ve 2FT arızası).....	95
Şekil 5.1	Direkt bağlantı durumu.....	98
Şekil 5.2	Transformatör üzerinden bağlantı.....	99
Şekil 5.3	Üç fazlı dengeli kısa devre durumu.....	99

Şekil 5.4	Bir faz toprak kısa devresi durumu.....	100
Şekil 5.5	İki faz kısa devresi durumu.....	100
Şekil 5.6	İki faz toprak kısa devresi durumu.....	100
Şekil 5.7	Yük karakteristiklerinin generatör barası gerilimine etkisi.....	101
Şekil 5.8	Generatör rotor açısı değişimleri.....	102
Şekil 5.9	Generatör hız değişimleri.....	102
Şekil 5.10	Farklı yerlerdeki arızalarda generatör barası gerilim düşümleri....	104
Şekil 5.11	Rotor açısı değişimi.....	104
Şekil 5.12	Hız değişimi.....	105
Şekil 5.13	Dağıtım sistemi arızasının generatöre etkisi (3FT, 200 ms).....	106
Şekil 5.14	D_11 barasındaki arızanın generatöre etkisi (3FT, 400 ms).....	106
Şekil 5.15	Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (Dağıtım sistemi arızası, 1FT, 200 ms).....	107
Şekil 5.16	Rotor açısı ve hız değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 1FT, 200 ms).....	108
Şekil 5.17	Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (D_11 barası arızası, 1FT, 400 ms)	108
Şekil 5.18	Rotor açısı ve hız değişimleri (D_11 barası arızası, 1FT, 400 ms)	109
Şekil 5.19	Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (Dağıtım sistemi arızası, 2F, 200 ms)	110
Şekil 5.20	Rotor açısı ve hız değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 2F, 200 ms)	110
Şekil 5.21	Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (D_11 barası arızası, 2F, 400 ms)	111
Şekil 5.22	Rotor açısı ve hız değişimleri (D_11 barası arızası, 2F, 400 ms)..	111
Şekil 5.23	Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (Dağıtım sistemi arızası, 2FT, 200 ms).....	112
Şekil 5.24	Rotor açısı ve hız değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 2FT, 200 ms)	113
Şekil 5.25	Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (D_11 barası arızası, 2FT, 400 ms)	113

Şekil 5.26	Rotor açısı ve hız değişimleri (D_11 barası arızası, 2FT, 400 ms)	114
Şekil 5.27	Aktif güç değişimi (Dağıtım sistemi arızası, 3FT 1FT, 2F, 2FT, 200 ms).....	115
Şekil 5.28	Reaktif güç değişimi (Dağıtım sistemi arızası, 3FT 1FT, 2F, 2FT, 200 ms)	115
Şekil 5.29	Moment değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 3FT, 1FT, 2F, 2FT)	116
Şekil 5.30	Aktif güç değişimi (D_11 barası arızası, 3FT 1FT, 2F, 2FT, 400 ms)	116
Şekil 5.31	Reaktif güç değişimi (D_11 barası arızası, 3FT 1FT, 2F, 2FT, 400 ms)	117
Şekil 5.32	Moment değişimleri (D_11 barası arızası, 3FT 1FT, 2F, 2FT, 400 ms)	117
Şekil 5.33	Arıza temizleme zamanı gerilim düşümü değişimi.....	118
Şekil 5.34	Farklı arıza süreleri için rotor açıları değişimi (İletim, 3FT).....	119
Şekil 5.35	Farklı arıza süreleri için açısal hız değişimi (İletim, 3FT).....	119
Şekil 5.36	Farklı arıza süreleri için rotor açıları değişimi (D_11, 3FT).....	120
Şekil 5.37	Farklı arıza süreleri için açısal hız değişimi (D_11, 3FT).....	121
Şekil 5.38	Düzenlenmiş örnek sistem tek hat şeması.....	122
Şekil 5.39	Gen1'in uç gerilimi, açı ve hız değişimi.....	123
Şekil 5.40	Gen2'in uç gerilimi, açı ve hız değişimi.....	123
Şekil 5.41	Gerilim, açı ve hız değişimleri (İletim sistemi arızası, 3FT, 250 ms)	124
Şekil 5.42	Gerilim, açı ve hız değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 3FT, 400 ms)....	125
Şekil 5.43	Gerilim, açı ve hız değişimleri (OBN_11 barasındaki arıza, 3FT, 400 ms)	125
Şekil 5.44	Gerilim, açı ve hız değişimleri (B1_11 barasındaki arıza, 3FT, 350 ms)	126
Şekil 5.45	Gerilim, açı ve hız değişimleri (D_11 barasındaki arıza, 3FT, 400 ms)	126

Şekil 5.46	Gerilim, açı ve hız değişimleri (B3_6.3 barasındaki arıza, 3FT, 400 ms)	127
Şekil 5.47	Şebeke kaynaklı üç faz arızasının yerel generatörlere etkisi.....	128
Şekil 5.48	Şebeke kaynaklı 1 faz toprak arızasının yerel generatörlere etkisi	129
Şekil 5.49	Şebeke kaynaklı faz faz arızasının yerel generatörlere etkisi.....	129
Şekil 5.50	Şebeke kaynaklı iki faz toprak arızasının yerel generatörlere etkisi	130
Şekil 5.51	D_11 barasındaki üç faz arızasının yerel generatörlere etkisi.....	130
Şekil 5.52	D_11 barasındaki tek faz toprak arızasının yerel generatörlere etkisi	131
Şekil 5.53	D_11 barasındaki faz faz arızasının yerel generatörlere etkisi.....	131
Şekil 5.54	D_11 barasındaki iki faz toprak arızasının yerel generatörlere etkisi	132
Şekil 5.55	Rotor açısı ve hız değişimi (Gen1).....	133
Şekil 5.56	Rotor açısı ve hız değişimi (Gen3)	133
Şekil 5.57	Gen1 ve Gen3 açı ve hız değişimleri.....	134
Şekil 5.58	Tek generatörlü örnek sistemde generatör davranışı.....	135
Şekil 5.59	İki generatörlü örnek sistemde generatör 1 in davranışı.....	136
Şekil 5.60	İki generatörlü örnek sistemde generatör 3 ün davranışı.....	136
Şekil A.1	Gen3 için hız regülatörü modeli.....	153
Şekil A.2	Gen 3 için türbin modeli.....	154
Şekil B.1	Asenkron motor eşdeğer devresi.....	158
Şekil B.2	Asenkron motor geçici hal eşdeğer devresi.....	160

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1	Kısa Süreli Gerilim Değişmeleri.....	2
Tablo 2.1	Arıza temizleme cihazları çalışma zamanları.....	10
Tablo 2.2	Farklı güç ve gerilim seviyelerinde ait kritik uzaklıklar.....	17
Tablo 2.3	Dengesiz gerilim düşümlerinin oluşum nedenleri.....	23
Tablo 2.4	Transformatör bağlantı gruplarının gerilim düşümü tipine etkisi.....	23
Tablo 2.5	Üç faz, TFT, FF kısa devreleri sonucu oluşan dengesiz düşüm türleri.....	23
Tablo 4.1	Kurulu güce göre sınıflandırma.....	65
Tablo 4.2	Yerel santraller için ulaşılan teknoloji.....	66
Tablo 4.3	Tipik senkron makine reaktans değerleri.....	71
Tablo A.1	Hat parametreleri.....	152
Tablo A.2	Transformatör parametreleri.....	152
Tablo A.3	Asenkron motor parametreleri.....	152
Tablo A.4	Statik yükler (sabit güç).....	153
Tablo A.5	Asenkron motorların mekanik yük tipleri.....	153
Tablo A.6	Generatör parametreleri.....	153
Tablo A.7	Uyarma sistemi parametreleri.....	154

ÖZET

Anahtar Kelimeler : Kısa Süreli Gerilim Düşümleri, Yerel Elektrik Santralleri, Enerji Kalitesi, Dağıtım Sistemleri.

Bu tez çalışması yapı itibariyle altı bölümden oluşmaktadır. Yapılanların yer aldığı üç ana kısım bulunmaktadır. Giriş bölümünde konuyla ilgili kısa bir tanıtımın ardından literatür incelemesi yapılmış ve tezde incelenen olaylardan söz edilmiştir. İkinci bölümde ise kısa süreli gerilim düşümleri ile ilgili teorik altyapı ve matematiksel bağıntılar ile hesaplamada kullanılan yöntemler verilmiştir.

Üçüncü bölümde ağırlıklı olarak asenkron motorların oluşturduğu örnek bir endüstriyel dağıtım sisteminde kısa süreli gerilim düşümlerinin etkisi incelenmiştir. Bu bölümde farklı koşullarda motorların davranışı ortaya çıkarılmıştır. Bu bölümde yerel elektrik santrallerinin olmadığı durumlara ait benzetimler gerçekleştirilmiştir. Asenkron motorlar uygun modeller ile modellenmiş olup, farklı yerlerdeki arızaların etkisi, mekanik yük moment tiplerinin etkisi ve arıza türlerinin etkisi incelenmiştir.

Dördüncü bölümde ise aynı sistem üzerinde yerel generatörlerin kullanılması ile meydana gelecek gerilim düşümlerinin genliğinin değişimi ele alınmıştır. Farklı koşullarda benzetimler gerçekleştirilmiştir. Generatör ile şebeke arasındaki değişik yük alış verişlerinde gerilim düşümü miktarları hesaplanmıştır. Yine bu bölümde de farklı arıza türleri ve yerlerinin etkisi ile generatör yüklenme koşullarının etkisi gösterilmiştir. Motorlara yol verme olayının yol açtığı gerilim düşümleri de incelenmiştir.

Son olarak, şebeke ve iç kaynaklı arızalar ile motor yol verme kaynaklı gerilim düşümlerinin tek ve çift taraflı besleme durumlarında generatörlere etkisi ve kararsızlık problemleri incelenmiştir. Yine önceki bölümlerde ele alınan benzetim koşulları dikkate alınarak generatör davranışı ve generatörlerde meydana gelen elektromekanik salınımlar araştırılmıştır. Yapılan bilgisayar benzetimlerinde Simpow yazılımı kullanılmıştır.

INVESTIGATION OF EFFECTS OF SHORT DURATION VOLTAGE SAGS ON INDUSTRIAL DISTRIBUTION SYSTEMS

SUMMARY

Keywords : Short duration voltage sags. Embedded generators. Power quality. Distribution systems.

This thesis consists of six chapters. There are three main sections that include investigations. In first chapter, it is given a literature study after a short introduction and then investigated phenomena are presented. In second chapter, a detailed theoretical background, mathematical equations and methods used in the analysis are given.

In chapter three, influences of short duration voltage sags on a sample industrial system that include mostly induction motors are investigated. In this chapter, it is presented that the behavior of induction motors during the different operating conditions and simulations are realized in an industrial system without any embedded generation system. Inductions motors are modeled by using suitable equivalent circuits and effects of fault location, fault types and mechanical load torque are investigated.

In chapter four, an embedded generation plant is added in the sample system used in previous chapter and it is investigated that effects of embedded generators on voltage sags. In the simulations, different loading condition between generators and networks are considered. Effects of fault location, fault types and mechanical load torque are investigated. Also effects of embedded generators on voltage sag due to voltage starting of large induction motors are investigated.

In final chapter, effects of voltage sags caused by faults occurred both in external network and internal networks and starting of large motors on behavior of embedded generators. It is investigated that behavior of embedded generators during and after the sag conditions in previous chapters. In the computer simulations, Simpow package are used.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

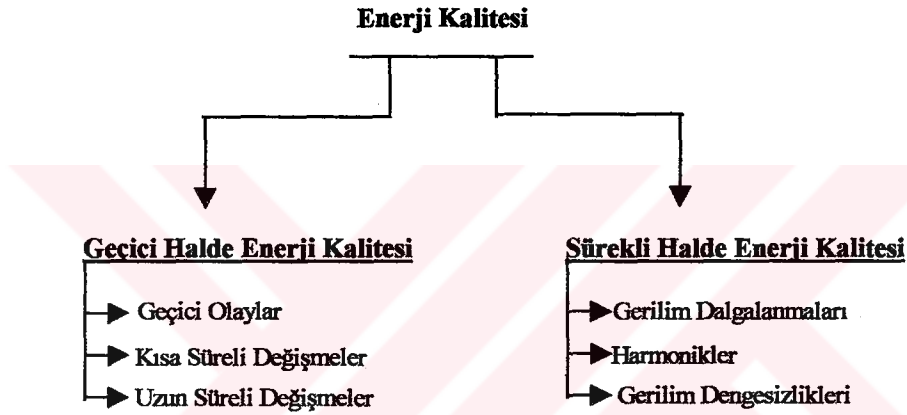
Enerji (Güç) kalitesi, hızlı gelişen ve rekabete dayalı enerji piyasasında tüketiciyi olduğu kadar, üretici ve dağıtıcı şirketleri de ilgilendiren bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımında meydana gelen problemler, müşteriye verilen enerjinin istenen normlara uygunluğunu bozmakta ve bunun sonucu olarak ta maddi kayıplar oluşmaktadır. Tüketicinin hassas cihazları, akım, gerilim ve frekansta meydana gelen değişikliklerden olumsuz yönde etkilenmektedir. Satın alınan enerjinin normlara uygun olmaması sonucunda ürün ve iş gücü kaybının yanı sıra ürün kalitesindeki azalmalar, endüstride karşılaşılan enerji kalitesi kaynaklı sorunların en belirgin olanlarıdır. Petrokimya tesisleri, rafineriler, kağıt fabrikaları, demir-çelik tesisleri enerji kalitesizliğinden etkilenen tesislerin başında gelmektedir.

Alternatif enerji sistemlerinde, sağlanması gereken bazı şartlar vardır. Akım ve gerilimin saf sinüs dalga şekline sahip olması, frekansın nominal değerinde sabit kalması (50 Hz veya 60 Hz gibi) ve yük üzerindeki gerilimin efektif olarak anma değerinde olması (yada kabul edilebilir sınırlar içinde olması) istenen kalite şartlarının basitçe ifade edilmiş şeklidir. Enerji kalitesi, bu zorunlulukların her koşulda sağlanması ile orantılıdır.

Elektrik enerjisinin kalitesi, endüstriyel tesislerdeki üretim kalitesini ve verimliliğini de etkilemektedir. Cihazlar kesintili veya sağlanması zorunlu değerlerden farklı değerlerdeki enerji ile beslendiklerinde istenen performansı veremez. Kalitesiz enerji, sadece sanayide değil, elektrikli ev aletleri ve elektronik cihazlarda da sorunlara yol açabilir. Bilgisayarlar, televizyonlar, vb hassas cihazlar özellikle gerilim ve frekans değişimlerinden etkilenirler. Aşırı ve düşük gerilimler ile harmonikler en sık rastlanılan sorunların başında gelmektedir.

İşte bu nedenlerden dolayı; enerji kalitesi, elektrik enerjisinin tüketildiği her yerde ve her türlü gerilim seviyesinde önemini arttırmaktadır. Genel olarak enerji kalitesi kavramı; tüketici cihazlarının yanlış çalışması yada arızalanması ile sonuçlanabilen, akım, gerilim ve/veya frekansta meydana gelen değişimler şeklinde kendini gösteren her türlü problem olarak tanımlanmaktadır [1].

Enerji kalitesi, 1980'lerden beri özellikle endüstriyel dağıtım sistemlerinde kullanılan bir terimdir. Pek çok alt tanım ve olayı içerisinde bulundurmaktadır. Şekil 1.1'de yaygın olarak kabul edilmiş bir sınıflandırma şekli görülmektedir.



Şekil 1.1 Enerji kalitesinin sınıflandırılması

Gerilim düşümleri, kısa süreli değişimler başlığı içerisinde. Tablo 1.1'de kısa süreli değişimler maddesinin içeriği görülmektedir.

Tablo 1.1 Kısa Süreli Gerilim Değişimleri

	Süre	Genlik
1.Anlık Değişimler		
Gerilim Kesilmeleri	0.5 – 30 periyot	<0.1 pu
Gerilim Düşümleri	0.5 – 30 periyot	0.1 – 0.9 pu
Gerilim Yükselmeleri	0.5 – 30 periyot	1.1 – 1.8 pu
2.Anı Değişimler		
Gerilim Kesilmeleri	30 periyot – 3 saniye	<0.1 pu
Gerilim Düşümleri	30 periyot – 3 saniye	0.1 – 0.9 pu
Gerilim Yükselmeleri	30 periyot – 3 saniye	1.1 – 1.4 pu
3.Geçici Değişimler		
Gerilim Kesilmeleri	3 saniye – 1 dakika	<0.1 pu
Gerilim Düşümleri	3 saniye – 1 dakika	0.1 – 0.9 pu
Gerilim Yükselmeleri	3 saniye – 1 dakika	1.1 – 1.2 pu

Bu tezde ilgilenilmekte olan kısa süreli gerilim düşümleri ve gerilim kesilmeleri kavramları, genellikle birlikte değerlendirilen ve teorik yapısı aynı olan bir enerji kalitesi olayıdır. Özellikle sistem güvenilirliğine etkisi küçümsenemez. Son 15 yıl içerisinde kısa süreli gerilim düşümleri ve kesilmeleri konusunda yapılmış pek çok inceleme ve araştırma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar genelde iki grup içerisinde toplanabilmektedir. Birinci grup içerisinde gerilim düşümlerinin genel karakteristik özellikleri yer alırken, ikinci grup içerisinde etkilerinin azaltılması amacıyla yapılan çalışmalar yer almaktadır.

Kısa süreli gerilim düşümlerinin (KSGSD) endüstriyel dağıtım sistemlerindeki hassas yüklere etkisinin ilk incelendiği çalışmalarda [2] genel olarak bir teorik altyapı verilmemiş, yaşanan olayların sonuçları değerlendirilerek, koruma sistemin etkisi ve bu olaya sebep olan faktörler ortaya konulmuştur. Ayrıca arıza yeri ile değişik transformatör bağlama gruplarının gerilim düşümü genliğine etkisi de incelenmiştir. Bunların yanı sıra hassas cihazlar için kabul edilebilir bir gerilim değerleri eğrisi verilmiştir. Bu makale daha sonraki pek çok araştırma için önemli bir başlangıç noktası olmuştur.

Kısa süreli gerilim düşümlerinin teorisi ve hesaplanması ile ilgili ilk çalışmalarda radyal ve halka şebeke modelleri üzerinde gerilim düşümü hesaplama yöntemleri verilerek [3], kritik uzaklık ve genlik hesabına ilişkin bağıntıların yardımıyla farklı gerilim seviyelerinde ve arıza yerlerinde genlik hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen veriler, dağıtım sistemlerindeki gerilim düşümlerinin karakteristikleri hakkında bilgi veren önemli sonuçlar olup, sadece dengeli arızalar ve dengeli gerilim düşümleri dikkate alınarak yapılmıştır. Dengesiz arızaların yol açtığı dengesiz gerilim düşümlerinin hesaplandığı [4] çalışmada ise dengesiz KSGD tipleri, pozitif negatif faktörünün tek faz toprak ve iki faz toprak arızası için hesabı yapılarak dengesiz gerilim düşüm düşümlerinin şebeke içerisinde yayını bir uygulama ile gösterilmiştir.

Gerilim düşümlerinin, endüstriyel dağıtım şebekelerine etkisinin incelenmesinde yüklerin etkisinin dikkate alınmaması büyük bir eksikliktir. Bu nedenle özellikle teorik çalışmalar devam ederken, diğer taraftan ise yüklerin, özellikle asenkron

motorların etkisi 90'ların ilgi alanlarından biri olmuştur. Yapılan ilk çalışmalarda [5] asenkron ve senkron motorların gerilim düşümlerinden etkilenme biçimleri ve özellikle motor mekanik yük karakteristiklerinin etkisi olduğu sonuçları çıkarılmıştır. Ancak bu çalışmada mekanik yüklerin etkisine yönelik yüzeysel incelemelere ait ilk sonuçlar verilmiştir.

Asenkron motorun kısa süreli gerilim düşümleri ve enerji kalitesi açısından oldukça riskli bir yük olması, bu motorların gerilim düşümüne etkisi ve davranışı ile ilgili pek çok çalışmanın yapılmasını sağlamıştır. Motorların arıza temizlendikten sonra yeniden hızlanıp nominal hız ve momentine ulaşmasına kadar geçen sürede yaşanan arıza sonrası kısa süreli gerilim düşümü olayının, özellikle büyük güçlü motorlarda şebeke gerilimini etkilediği ve diğer yükler için daha tehlikeli bir sürecin arıza sonrasında da devam edebileceği yönünde sonuçlar ortaya konulmuştur [6]. Daha sonraki çalışmalarda arıza sonrası gerilim düşümleri için motor modeli ortaya konularak, stokastik değerlendirmeler ile güvenilirlik ilişkisi incelenmiştir [7]. Gerilim düşümlerinin stokastik değerlendirmesinde kritik uzaklığın kullanılması [8] ile radyal ve ağ şebekede hem dengeli ve hem de dengesiz koşullarda enerji kalitesi güvenilirlik ilişkisi bir sonraki adımda incelenen konular olmuştur.

İletim ve dağıtım sistemi arızalarının yol açtığı gerilim düşümlerinin büyük endüstriyel yüklere etkisi [9] ve motorların gerilim düşümüne etkisinin bilinmesi [10], dağıtım sistemlerindeki kısa süreli gerilim düşümlerinin karakteristik özellikleri hakkında önemli kolaylıklar sağlamaktadır.

Şebekenin herhangi bir yerinde meydana gelen kısa devre sonucunda, şebeke genelindeki yükler üzerinde bir miktar gerilim düşümü meydana gelir. Bunu önlemek mümkün değildir. Ancak etki alanının daraltılması yada kısmen alınan önlemler ile belirli bir yük bölgesinde gerilimi yükseltici çözümler üretilmektedir.

Dağıtım sistemlerinde kullanılan gerilim arttırıcı cihazların kritik yüklerde gerilim düşümünün etkisinin azaltılmasında önemli rolü olduğu bilinmektedir. Statik VAR Kompanzatorları [11], Akım Sınırlayıcılar [12] ve Dinamik Gerilim Düzenleyicileri [13] önerilen belirli cihazlardan belli başlı olanlarıdır.

Büyük endüstriyel tesislerde gerilim düşümlerinin azaltılmasında önemli bir katkısı olan önlemlerden biri de yerel elektrik santrallerinin kullanılmasıdır. Yerel elektrik santralleri sadece gerilim düşümünü kurtarmak amacıyla kurulmaz. Büyük tesislerde, enerji üretiminin bir kısmı yada tamamını karşılamak amacıyla ve başka nedenlerle kurulan yerel santrallerin enerji kalitesinin iyileştirilmesinde önemli katkıları olduğu ortaya çıkmıştır. Bu konuyla ilgili çalışmalar oldukça yenidir. Yerel santrallerin dağıtım şebekesine gerilim düşümleri açısından katkısının incelendiği çalışmalarda [14,15] farklı koşullarda gerilim düşümü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bu tezde endüstriyel dağıtım sistemlerinde kısa süreli gerilim düşümlerinin azaltılmasında yerel elektrik santralının kullanılması incelenmiştir. Ayrıca meydana gelen kısa süreli gerilim düşümlerinin yerel santral içeren dağıtım sistemlerinde yol açtığı kararlılık ve şebekeden ayrılma problemlerine etkisi, generatörlerin davranışı ve buna etki eden faktörler tezin kapsamına girmektedir.

İkinci bölümde gerilim düşümlerinin karakteristik özellikleri verilerek konuyla ilgili teorik altyapı belirtilmiştir. Üçüncü bölümde ise endüstriyel sistemlerde gerilim düşümünün etkileri incelenmiştir. Burada asenkron motorların davranışları ön plana çıkmıştır. Bu incelemeler sırasında dört farklı yük momenti karakteristiği kullanılarak, mekanik yük tiplerinin motor davranışına etkisi, dengeli ve dengesiz arızaların etkisi, atalet sabiti ve yüklenme miktarının motorların kısa süreli gerilim düşümü sırasında ve sonrasındaki davranışına etkisi incelenmiştir.

Dördüncü bölümde ise ele alınan bir örnek sistem üzerinde, yerel elektrik santrallerinin gerilim düşümü oranlarına etkisi irdelenmiştir. Şebekeden ayrılma problemine de yol açan, yakın ve şiddetli arızaların neden olduğu gerilim düşümleri sırasında generatörlü dağıtım sistemindeki gerilim değişimleri ve motorların davranışı incelenmiştir. Ayrıca bir başka gerilim düşümü sebebi olan büyük güçlü asenkron motorlara doğrudan yol verilmesinin şebekede meydana getirdiği sorunlar ve yerel santrallerin probleme katkısı ele alınmıştır.

Beşinci bölümde ise kısa süreli gerilim düşümlerinin yerel santraller üzerindeki etkisi incelenmiştir. Özellikle dağıtım sistemi içerisindeki bir kısa devre, yerel generatörler

tarafından beslendiğinden generatörlerin aşırı yüklenmeleri gibi problemler meydana gelebilmektedir. Yine bu tür durumlarda karşılaşılan bir başka problem ise güç adası olayıdır. Yerel santrallerin güç adası oluşumundan korunması gerekmektedir. Ayrıca senkronizasyonun kaybolması, kararsızlık problemleri karşılaşılan sorunlardan başlıcalarıdır. Bu bölümde ilk olarak generatörlerin şebekeye bağlanma şekilleri ile gerilim düşümü arasındaki ilişki, arıza temizleme zamanının etkisi ve yük karakteristiklerinin etkisi gösterilmiştir. Ayrıca dengeli ve dengesiz arızalarda yerel generatörlerin güç, açı, hız ve moment değişimleri elde edilmiştir.

Ayrıca aynı endüstriyel dağıtım sistemine güç temin etmek üzere iki farklı noktadan sisteme bağlı, farklı özellikteki iki generatörün bulunması durumu dikkate alınmıştır. Yine çeşitli arızaların yol açtığı gerilim düşmeleri sonucu generatörlerde meydana gelen elektromekanik salınımlar ve bunların sonucunda kararsızlığa gitme durumları benzetimler yardımıyla ortaya konulmuştur.

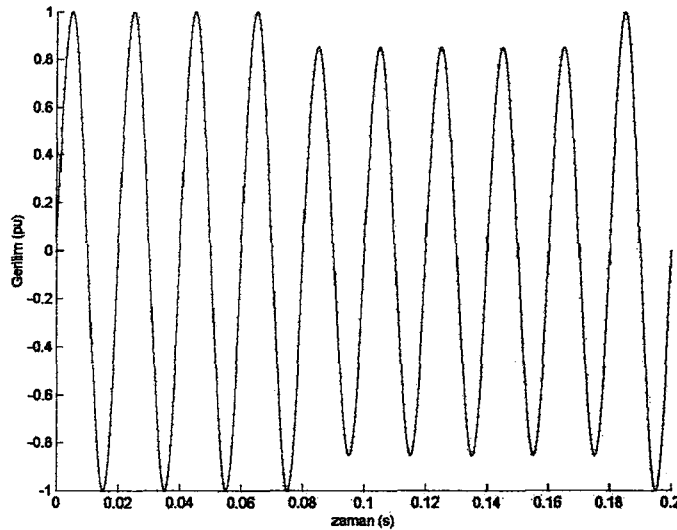
Tezde incelenen örnek sistem içerisinde, orta ve alçak gerilim asenkron motorların yanı sıra statik olarak modellenmiş yüklerde bulunmaktadır. Kullanılan matematiksel modeller, ilgili bölümlerde ayrıntılı olarak verilmektedir. Yapılan benzetimlerde Simpow [16] yazılımı kullanılmıştır.

BÖLÜM 2. KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİ ve KESİLMELERİ

2.1.Temel Tanımlar

Gerilimin genliğinde meydana gelen kısa süreli azalmalar (Şekil.2.1), gerilim düşümü olarak tanımlanır [17]. IEEE Std 1159-1995 [18] 'e göre; gerilim düşümü nominal gerilimin %10'u ile %90'ı arasında olmakta ve düşüm süresi yarım periyottan bir dakikaya kadar değişebilmektedir.

Enerji kalitesi konularında çalışan bilimsel topluluklarca kısa süreli gerilim düşümleri için İngilizce “*sag*” terimi kullanılmıştır. Bu terim resmen tanımlanıp kabul edilmemiş olmasına rağmen artan oranda kabul görmüştür. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından bu olay için “*dip*” terimi öngörülmüştür. Her iki terimde birbiri yerine kullanılabilir şekilde dikkate alınmaktadır. Genellikle “*sag*” terimi ABD'deki enerji kalitesi çalışma gruplarınca tercih edilmektedir [1].



Şekil 2.1 Tipik bir gerilim düşümü dalga şekli

Yine aynı kaynaklarda gerilimin, düşüm sırasındaki genliğinin nominal değerin %10'undan daha aşağıya düşmesi durumuna gerilim kesilmesi denilmektedir ve bu durumda cihazların kesintiye maruz kaldığı öngörülmektedir. Genel olarak gerilim düşümü ve gerilim kesilmeleri birbiriyle yakından ilgili konular olduğundan beraber incelenmektedir.

Prensip olarak, her türlü gerilim düşümünün temel sebebi olarak akımda meydana gelen kısa süreli artışlar gösterilmektedir. Buna göre akım artışına yol açan her olay gerilim düşümlerinin sebepleri arasında yer alabilmektedir. Bu akım artışına en önemli üç neden olarak büyük güçlü motorların yol alması, transformatörlerin enerjilendirilmesi ve şebekede meydana gelen kısa devreler gösterilebilir [17,19].

Söz konusu sebeplerden, kısa devrelerin neden olduğu gerilim düşümleri hem iletim ve dağıtım sistemi ve hem de tüketiciler açısından kesintilere ve ciddi problemlere yol açmaktadır. Bunun yanı sıra endüstriyel tüketicilerin bünyesinde bulunan büyük güçlü motorlara yol verilmesi sırasında yaşanan gerilim düşümleri de o endüstriyel tesis içindeki cihaz ve yüklerde bir takım sorunlara yol açabilmektedir. Ne var ki motorların yol alması önceden bilinen ve önlem alınması mümkün olan bir olaydır ve etkileri azaltmak mümkündür. Asenkron motorlara yol verilmesi sırasında oluşan gerilim düşümlerinin süresi genellikle daha uzundur, fakat neden olduğu gerilim düşümü küçük ve tüketiciler için çok ciddi bir problem kaynağı değildir. Bununla birlikte kısa devre sonucu oluşan kısa süreli gerilim düşümleri hem beklenmedik ve hem de şiddetli olabilmektedir. Kısa devre kaynaklı gerilim düşümleri tüketiciler için önemli sorunlara yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra iletim ve dağıtım sisteminde bulunan koruma sisteminin performansı ve koordinasyonu ile orantılı olarak arıza temizleme zamanının kısa olması sonucu olarak kısa devrelerin yol açtığı gerilim düşümleri daha kısa süre için sistemi ve tüketicileri etkilemektedir [20].

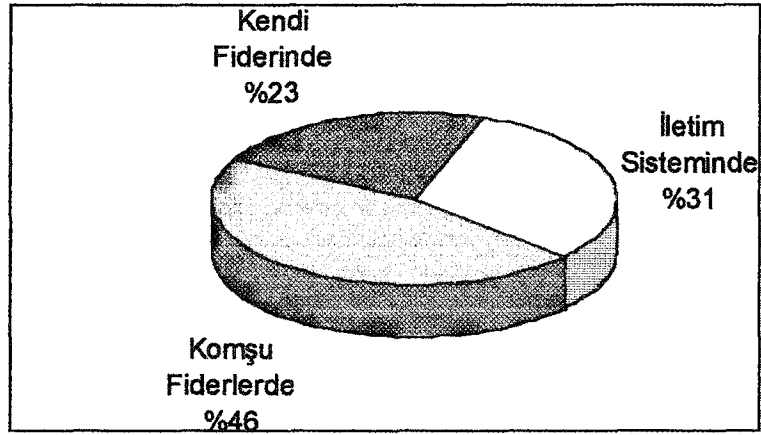
Genlik ve süre, kısa süreli gerilim düşümlerinin iki önemli karakteristik özelliğidir. Gerilim düşümü genliği, yüzde olarak yada sistem nominal gerilimin birim değeri (pu) şeklindeki net etkin (rms) gerilimdir ve %10'u (0.1 pu) ile %90'ı (0.9 pu) arasında değişir [21].

2.2. Gerilim Düşümlerinin Oluşma Sebepleri ve Sıklıkları

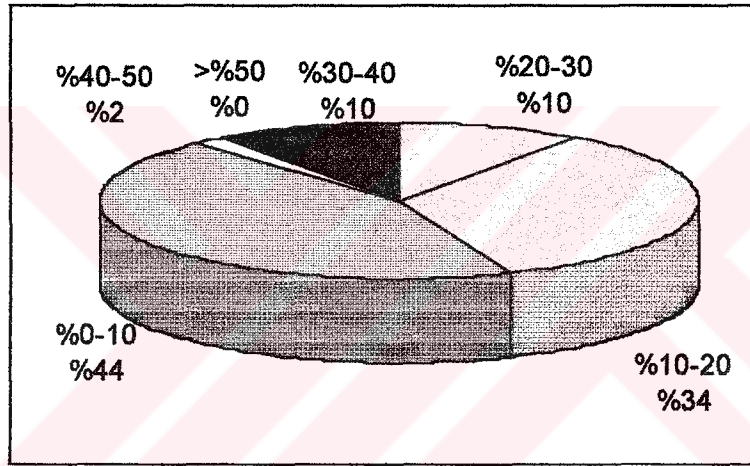
Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi, gerilim düşümlerinin oluşumunda genellikle üç ana sebep gösterilmektedir. Bunların en çok rastlanılanı kısa devreler yada kabaca sistemde meydana gelen arızalar, diğeri ise büyük güçlü motorların yol alması ve transformatörlerin enerjilendirilmesi sırasında çekilen yüksek akımdan dolayı oluşan gerilim düşmeleridir. Dağıtım şebekelerinde herhangi bir noktada meydana gelen arıza sonucu bu noktaya komşu tüm noktalarda gerilim düşmesi yaşanır ve bu düşme arıza yerine olan uzaklığa bağlıdır. Motor yol verme olayında ise kısa devredeki kadar olmasa da ilk anda çekilen büyük akım sonucu bir süre motor barasında ve ona komşu noktalarda düşme yaşanır. Arıza durumlarında arıza olduğu yani kısa devre akımı aktığı sürece gerilim azalması yaşanır. Devre kesicilerin arıza akımının akmasını engellemek için devreyi açması ile son bulur. Arızalar, meydana geldiği noktadan kilometrelerce uzaklıktaki sistemlerde bile gerilim düşümüne yol açabilmektedir [1].

KSGD'lerin ne sıklıkta olduğunun saptanması için, çalışma alanına ait eşdeğer bir empedans diyagramı ve komşu tesislerde bulunan cihazlar hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Bunun yanı sıra gerilim seviyesi de gerilim düşümlerinin oluşmasında önemli bir etkidir. Şekil 2.2 ve 2.3'te çeşitli endüstriyel tesislerde rapor edilen verilerden yola çıkılarak oluşturulmuş, bazı gerilim düşümü istatistikleri görülmektedir [22,23]

Bir diğer konu ise KSGDlerin genliğinin arıza noktasının konumuna bağlı olmasıdır. Asıl önemli noktalardan biri ise bütün olası arızaların ve arıza empedanslarının bulunması gerekliliğidir. Arıza temizleme işlemi şebekedeki KSGD'lerinin değerinin belirlenmesinde önem kazanmaktadır. Arıza olduktan sonra devre kesicilerinin devreyi kesme deki hızı cihazların daha az etkilenmesine ve KSGD'lerinin daha kısa sürede sonuçlanmasına yol açacaktır. Tablo 2.1'deki arıza temizleme amacıyla kullanılan cihazların performansları karşılaştırmalı olarak verilmektedir [22].



Şekil 2.2 Dağıtım sistemlerinde KSGD'ne yol açan arızaların oluşma yerlerine göre dağılımı



Şekil 2.3 İstatistiksel verilerden elde edilmiş düşüm genliği oranları

Tablo 2.1 Arıza temizleme cihazları çalışma zamanları

Cihaz türleri	Temizleme Zamanı (periyot)		Mümkün tekrar kapama sayısı
	Tipik minimum	Tipik gecikme zamanı	
Eriyen telli sigorta	0.5	0.5-120	Yok
Akım sınırlayıcı sigorta	0.25 yada daha az	0.25-6	Yok
Elektronik tekrar kapayıcı	3	1-30	0-4
Yağlı kesici	6	1-60	0-4
SF-6 vakumlu kesici	2-3	1-60	0-4

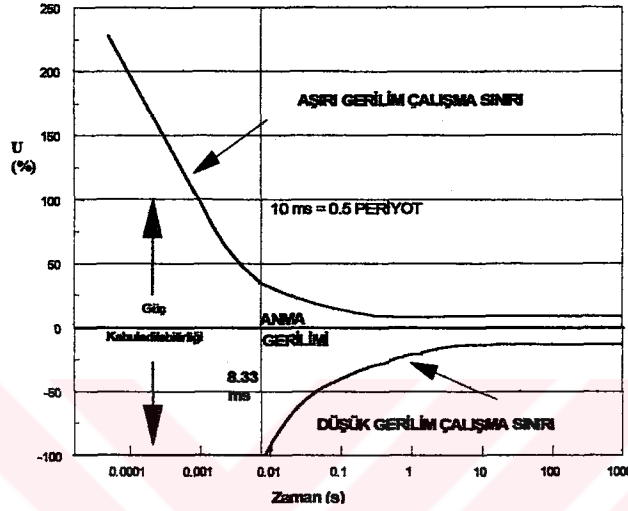
2.3. Gerilim Düşümlerinin Çeşitli Hassas Yükler Üzerine Etkisi

Günümüz modern cihazları, bu tür şebeke değişimlerinde oldukça duyarlıdır. Bazı raporlara göre anma geriliminin %85-90 ı civarındaki KSGD'leri 16 milisaniyeden kısa sürse dahi bu duyarlılıktaki cihazlar olumsuz etkilenmektedirler. Doğru akım motorları, boya baskı tesisleri, mikroçip test cihazları, vb yükler üzerinde birtakım olumsuz etkileri söz konusudur. Örneğin, mikroçip test edicileri gerilim değişmelerine karşı oldukça hassastırlar ve herhangi bir değişimde reset olacağından tekrar başlatılması yapısındaki karmaşıklıktan dolayı zordur. Yeniden start edilmesi için 30 dakika yada daha fazla zaman gerekir. Buna ilave olarak çiple ilgili test prosesinde tahrip yada bozulmalar meydana gelebilir. Arızadan çok sonraları bile iç elektronik devre kartlarında arızalar olabilir. Cip test cihazı elektronik yük, bilgisayar, yazıcı, ekran vb malzemelerin birleşiminden oluşur. Eğer bu paketteki elemanlardan biri bile bozulsa test işlemi yarım kalır. Bu test cihazları 50 kVA ve daha büyük güçlü olabilir [23]. Bunun yanısıra yaygın olarak kullanılan PLC'ler de bu durumdan etkilenmektedir. Bunu azaltmak için kesintisiz güç kaynakları üzerinden besleme yapılmaktadır.

Bir diğer gerilime duyarlı cihaz olan doğru akım motorları, özellikle matbaa makineleri ve plastik imalat sanayi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Gerilim düşümü esnasında bunlara ait denetleyiciler yanılabilir ve görev yapamaz. Bunun sonucunda üretim hataları, devre dışı kalma, bozulma, yeniden devre alma gibi maliyeti arttıran sonuçlarla karşılaşmak mümkündür. Nominalin %88 inde bu cihazlarda arızalar baş gösterebilir. Arızanın kaynağı kilometrelerce uzakta olsa bile %88'lik düşüme yol açıyorsa sonuç gene belirtildiği gibi olur [23].

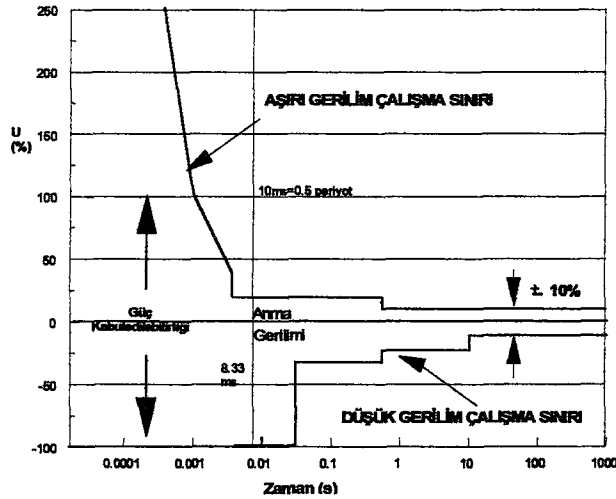
Yüklerin türüne göre düşümlerden etkilenmeleri farklıdır. Bunun için bir takım standartlar geliştirilmiştir. ANSI, CBEMA, NEMA gibi standart geliştiren kuruluşlarca yapılan araştırmalar sonucu cihazların dayanma noktaları belirlenmiştir. Örneğin ANSI Standart C84.1'e göre 600 Volt'a kadar olan şebeke gerilimleri için bu değişim nominalin $\pm$ %5'i kadar olmalıdır. Kısa süreli değişmelerde ise en fazla %5.8'e kadar gerilim artmasına ve %8.3'e kadar gerilim azalmasına izin verilebilir [24].

Yukarıdaki paragrafta adı geçen standart yapıcı kurumlarca hassas yüklerin gerilim değişimlerine dayanımları ile ilgili güç kabul edilebilirlik eğrileri önerilmiştir. 1970'lerde CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Associations) tarafından Şekil 2.4'teki ilk eğri ortaya çıkarılmıştır. Bu eğri yarı iletken elemanlara, bilgisayarlara, flüoresan lambalara ve hız sürücülerine uygulanmıştır. [25,26]



Şekil 2.4 CBEMA'nın güç kabul edilebilirlik eğrisi

CBEMA'nın daha sonraki yıllarda isim değiştirmesi ile ITIC (Information Technology Industry Council) adıyla söz konusu eğri revize edilerek, 1996'ta Şekil 2.5'teki hale getirilmiştir [25,26].



Şekil 2.5 ITIC'in güç kabul edilebilirlik eğrisi

Bunun yanı sıra asenkron motorlar yaşanan gerilim düşümü karşısında aniden durma veya yavaşlama gösterebilirler. Genlik eski konumuna gelmediği takdirde motor döndürdüğü yükü tekrar ivmelendiremez. Hız kaybı olur. Gerilim düşümü motorun momentini, uç geriliminin karesiyle orantılı olarak azaltır ve kayma artar [5].

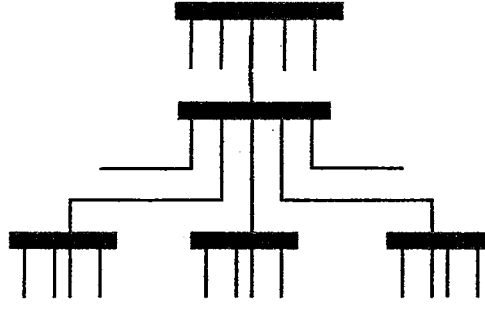
Senkron generatörlerde ise kısa devre sonucu oluşan kısa süreli gerilim düşümleri uç geriliminde, momentte salınımlara yol açmaktadır. Ref.[27] 'de yapılan çalışmada bu etkilenmeler incelenerek şönt kapasitörün KSGD'lerinin genliğini ve momentteki salınımları azalttığı görülmüştür.

2.4. Simetrik Gerilim Düşümü Hesaplama Yöntemleri

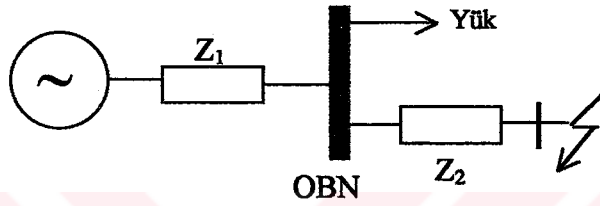
Bazı zamanlarda, sistemdeki hassas cihazları etkileyen kısa süreli gerilim düşümlerini hesaplamak için basit ve hızlı yöntemlere ihtiyaç duyulur. Bu yöntemlerdeki esas amaç kısa süreli gerilim düşümünün genliğinin ve aktif olma süresinin belirlenmesidir. 3 faz simetrik kısa devresi ve motorlara yol verilmesi sırasında meydana gelen düşümler dengeli gerilim düşümleri sınıfına dahildir. Bu bölümde, hesaplamada kullanılan hızlı bir yöntemle değinilecektir. Radyal ve ağ (halka) şebeke için ayrı ayrı hesaplamalar yapılacaktır.

2.4.1. Radyal dağıtım şebekelerinde dengeli gerilim düşümü hesabı

Özellikle dağıtım sistemlerinde kullanılan radyal şebekelerde tek bir kaynaktan çeşitli kollar ve alt kolları ayrılan bir şebeke modeli (Şekil 2.6) kullanılmaktadır. Bu durumda sadece üretici ve tüketici arasındaki hatta meydana gelen kısa devre sonucu, beslenen tüketicide enerji kesintisi olurken, komşu tüketicilerde kesinti yerine gerilimde kısa süreli düşmeler yaşanacaktır. Dağıtım sisteminin herhangi bir yerinde arıza anında oluşacak olan kısa süreli gerilim düşümünü hesaplayabilmek için, kaynak ve yük arasında bir ortak bağlantı noktası (OBN) belirlemek gerekir [3]. Şekil 2.7'te gerilim bölücü devre olarak basitleştirilmiş bir radyal sistem için OBN görülmektedir.



Şekil 2.6 Tipik bir radyal dağıtım sistemi prensip şeması



Şekil 2.7 Basitleştirilmiş radyal dağıtım sistemi (gerilim bölücü devre)

Z_1 empedansı kaynak ile OBN arasında kısa devre empedansını, Z_2 ise OBN ile arıza noktası arasındaki empedans değerini göstermektedir. Eğer arıza akımının nominal yük akımından çok yüksek olduğunu kabul edersek, bu durumda OBN noktasında oluşacak olan kısa süreli gerilim düşümünün yüzde olarak değeri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$V_{\text{sag}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)'deki gerilim düşümü formülü ve genelleştirilmiş devrede (bkz Şekil 2.7) 165 mm² kesitli, 13.8 kV anma gerilimli hatta meydana gelen kısa devre için, OBN den farklı uzaklıklarda (Z_2 in farklı değerleri için) KSGD değişimi Şekil 2.8'de verilmiştir. Şekildeki üç eğri yukarıdan aşağıya şebekenin kısa devre gücünün 150 MVA, 75 MVA ,30 MVA ve 10 MVA olması durumlarını göstermektedir. Ayrıca Şekil 2.8'de yukarıdaki sistem için kısa devre gücü 100 MVA iken ve hat kesiti 165 mm² iken farklı gerilim seviyelerinde düşüm genliğinin uzaklık ile değişimi de verilmiştir. Hat kesiti ile meydana gelecek düşme arasındaki ilişki, farklı güç seviyeleri için Şekil 2.9'da verilmiştir. Bu eğrilerde, genelleştirilmiş radyal sistem

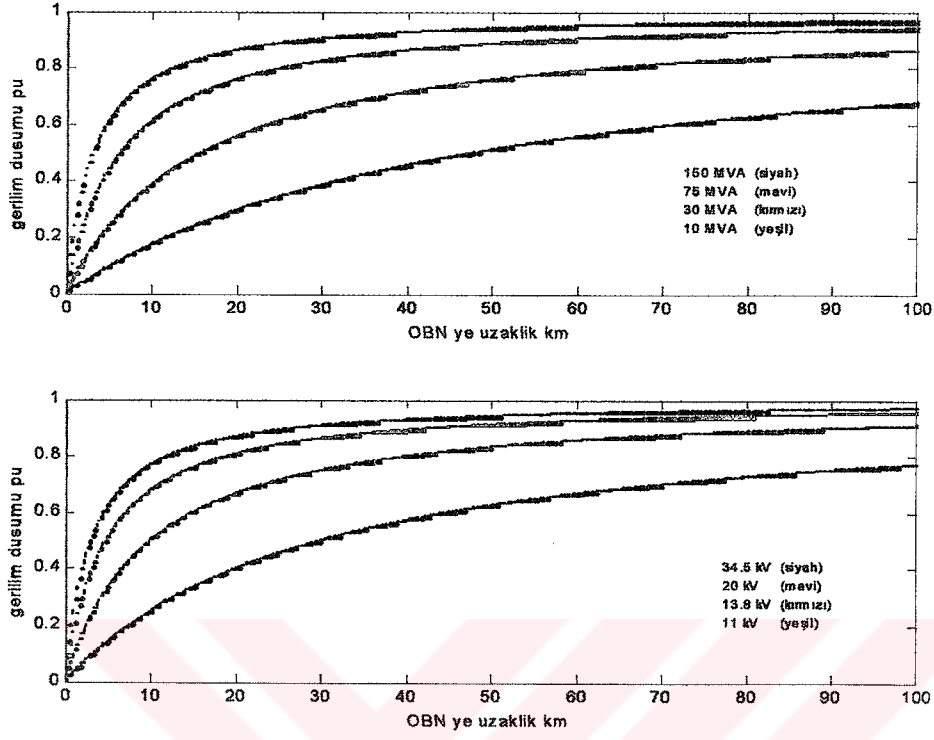
için (bkz Şekil 2.7) iletken kesitinin 33 mm²'den 330 mm²'ye kadar değişmesi ile gerilim düşümü arasındaki değişim incelenmektedir. OBN noktasında kısa devre gücü sırasıyla 150 MVA, 75 MVA 30 MVA ve 10 MVA olup, anma gerilimi 13.8 kV'dur. Kesit ile gerilim düşümü arasındaki ilişkiyi farklı gerilim seviyelerinde gösteren grafikler ise aynı örnek sistem için Şekil 2.9'da verilmektedir. Kısa süreli gerilim düşmelerinden çok fazla etkilenmekte olan hassas cihazların yaygınlaşması sonucu bunların KSGD'lerine dayanımları önem kazanmaktadır. Bu durumda bu cihazların kısa süreli bir gerilim düşümünden etkilenmeyeceği (yada etkilenecekleri) kritik bir gerilim değeri olmalıdır. Bu değer üretim aşamasında belirlenir. Bununla birlikte birçok cihazın hassasiyeti maksimum süre ve minimum gerilimle karakterize edilmektedir. Buna göre aşağıda bağıntı ile kritik gerilimin saptanmaktadır.

$$\left| \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right| < V_{\text{krit}} \quad (2.2)$$

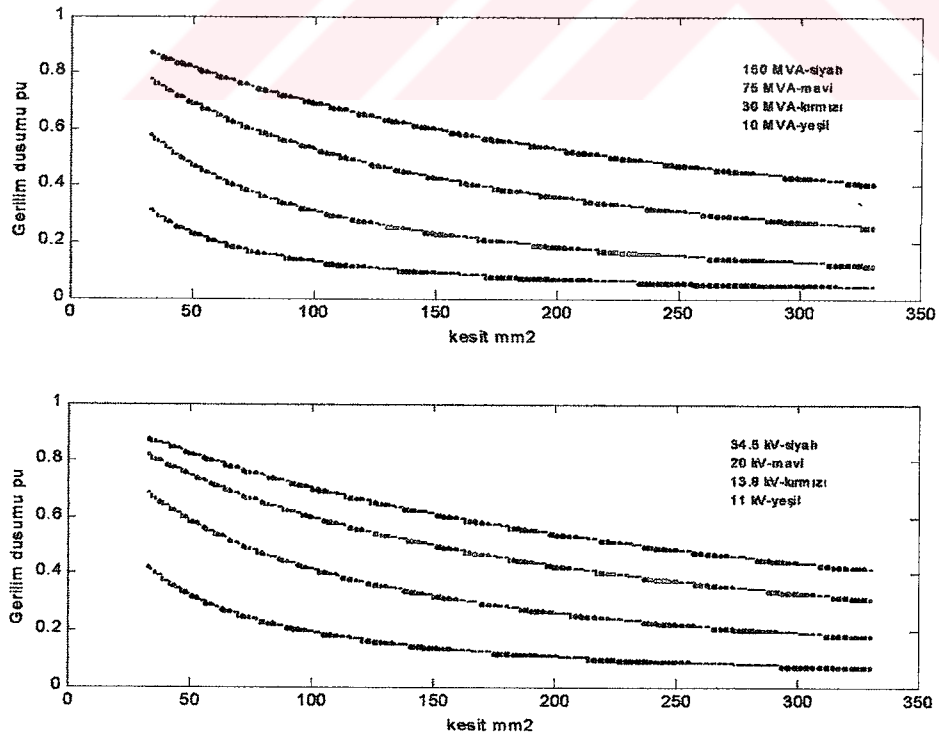
$Z_2=L.z$ formülü esas alınır, z hattın kilometre başına karakteristik empedansını, L ise OBN ile arıza noktası arasındaki uzaklığı ifade eder. Z_1 ve Z_2 empedansları eşit olarak kabul edilirse, kritik uzunluk aşağıdaki gibi bulunur.

$$L_{\text{krit}} = \frac{Z_1}{z} \times \frac{V_{\text{krit}}}{1 - V_{\text{krit}}} \quad (2.3)$$

Kritik uzaklıktan büyük olan mesafelerde gerilim düşümü kritik seviyelere ulaşmaktadır. Kritik uzaklığın artışıyla kritik gerilimin çok hızlı arttığı görülür. Tablo 2.2'de 0.4 Ω/km'lik karakteristik empedansa sahip bir hat için (bkz Şekil 2.7) gerilim düşmelerine karşı gelen kritik uzaklıkları verilmektedir. Bu tabloda 9 farklı kısa devre gücü ve 3 farklı gerilim seviyesi için hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 2.8 Arıza yeri ile gerilim düşümü değişimi



Şekil 2.9 Hat kesiti ile gerilim düşümü değişimi

Tablo 2.2 Farklı güç ve gerilim seviyelerinde ait kritik uzaklıklar

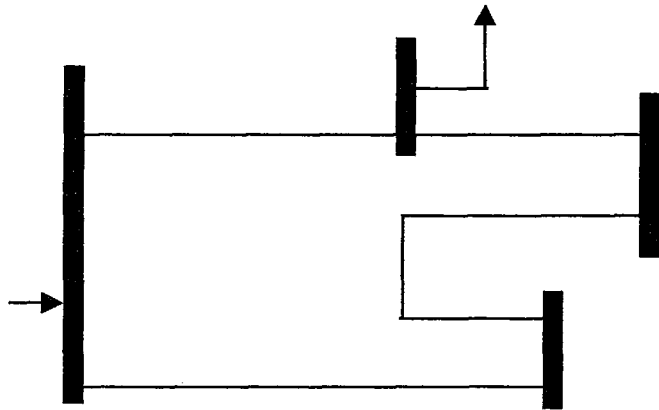
% düşme	380 V			6.3 kV			34.5 kV			66 Kv		
	1 MVA	5 MVA	25 MVA	40 MVA	75 MVA	100 MVA	120 MVA	500 MVA	1000 MVA	500 MVA	1000 MVA	2000 MVA
30	0.154	0.031	0.006	1.06	0.56	0.425	10.62	2.6	1.27	9.3	4.7	2.33
40	0.240	0.048	0.009	1.654	0.88	0.661	16.53	3.96	1.98	14.5	7.26	3.63
50	0.361	0.072	0.014	2.48	1.32	0.992	24.8	5.9	2.97	21.8	10.9	5.45
60	0.541	0.108	0.021	3.72	1.985	1.48	37.2	8.9	4.46	32.7	16.3	8.16
70	0.842	0.168	0.033	5.78	3.08	2.31	57.86	13.8	6.95	50.8	25.4	12.7
80	1.444	0.288	0.057	9.93	5.3	3.97	99.2	23.8	11.9	87.1	43.56	21.78
90	3.249	0.649	0.130	22.32	11.9	8.93	223.1	53.56	26.8	196	98	49

NOT : Kritik uzaklıklar km olarak verilmiştir.

Belli bir yük noktasında oluşması beklenen KSGD'lerinin sayısını saptayabilmek için bütün OBN noktalarının kritik uzaklığı dikkate alınmalıdır. Bu ise kritik alanı verir. Bu kritik alan içerisinde, belirli bir süreyi aşacak olan bütün hata durumları kritik KSGD'ne yol açacaktır. Bu durumda kritik alan içerisinde olması beklenen arızaların toplamı, oluşabilecek olan kritik KSGD'lerinin sayısı hakkında bilgi verecektir.

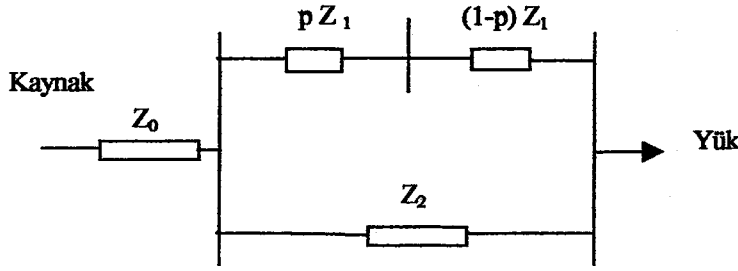
2.4.2. Ağ (halka) dağıtım şebekelerinde simetrik gerilim düşümü hesabı

Halka şebeke seviyeleri radyal şebekeden farklı olarak çok sayıda kapalı sistem içerebilir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, yük aynı besleme kaynağından çıkan iki ayrı hat ile beslenmektedir. Böyle sistemlerde oluşacak kesintilerin, büyük ölçüde önüne geçilmiş olur.



Şekil 2.10 Tipik bir ağ şebeke örneği

Yukarıdaki örnek ağ şebeke geliştirilerek Şekil 2.11'deki ağ şebeke elde edilir.

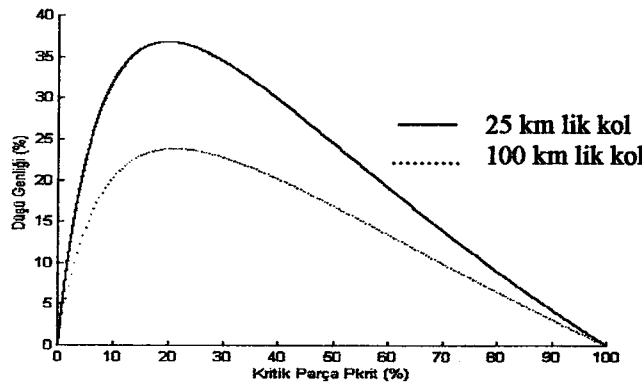


Şekil 2.11 Genelleştirilmiş ağ (halka) şebeke

Şekilde görüldüğü gibi kaynak ile yük baraları arasında Z_2 ve Z_1 empedanslarına sahip iki hat vardır. Z_0 kaynak empedansıdır. Arıza 1 nci hatta ve kaynaktan toplam uzunluğun p katı kadar uzakta meydana gelmektedir. Radyal şebekedeki kabuller yapıldığında yük noktası gerilimi aşağıdaki ifadesindeki gibi olur [3].

$$V_{sag} = \frac{p(1-p).Z_1^2}{Z_0.(Z_1 + Z_2) + p.Z_1.Z_2 + p.(1+p).Z_1^2} \quad (2.4)$$

Şekil 2.11'teki genelleştirilmiş ağ (halka) şebeke için hatların birim empedansının $0.3 \Omega/\text{km}$, uzun hattın 100 km ve kısa hattın uzunluğu ise 25 km dir. Kaynak 5000 MVA kısa devre gücü ve 132 kV ' anma gerilimine sahiptir. Her iki kolda meydana gelen arızaların meydana geldiği yer ile yük barasındaki yüzde gerilim düşümünün değişimi Şekil 2.12'deki gibi olacaktır.



Şekil 2.12 Halka Şebekede Kritik Parça (p_{krit}) ile düşme genliği değişimi

Halka şebekede kritik uzaklık hesabı yapmak mümkündür. (2.4) eşitliğinden $V_{sag} = V_{krit}$ çözümü ile kritik parça (*critical fraction* - p_{krit}) elde edilebilir. Bu hat parçasında arızaların sebep olduğu kritik gerilim düşümü yaşanır. Maksimum

gerilimin üzerindeki kritik gerilimlerde tüm arızalar kritik düşmeye yol açacaktır. Kritik uzaklık/kesir hesabını basitleştirmek için hat boyunca gerilim profili aşağıdaki gibi yaklaşık olarak verilebilir [4].

$$V_{\text{sag}} = 4V_{\text{maks}} \cdot p \cdot (1-p) \quad (2.5)$$

Burada V_{maks} maksimum gerilim düşümünü verir. Eşitlik (2.5) 'ten kritik kesir/parça aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$p_{\text{krit}} \approx 1 - \sqrt{1 - \frac{V_{\text{krit}}}{V_{\text{maks}}}}, \quad V_{\text{krit}} \leq V_{\text{maks}} \quad (2.6)$$

(2.6) 'daki yaklaşık ifade sadece V_{maks} ın bilindiği durumlarda kullanılır.

2.5. Radyal Şebekelerde Asimetrik Kısa Devreler Sonucu Oluşan KSGD'leri

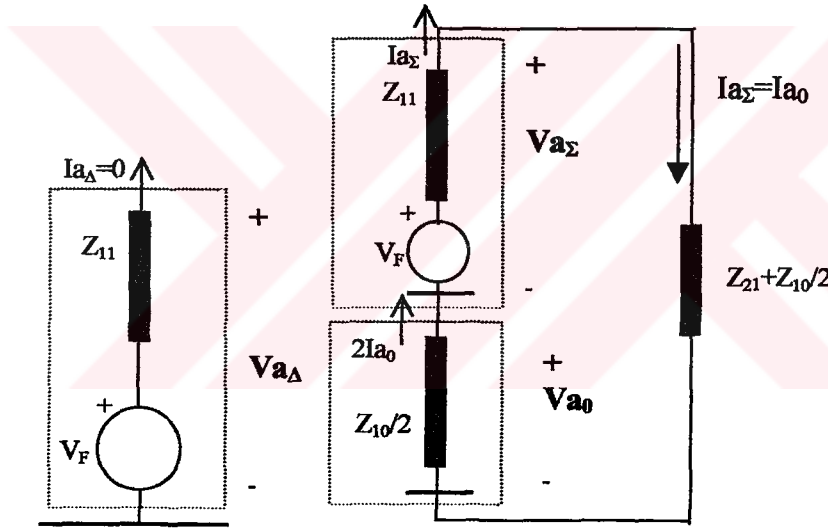
Simetrik olmayan (dengesiz) kısa devrelerin çözümünde simetrik bileşenler kullanılmaktadır. Bu analizlerde yapılan bir ön kabul vardır. Bu kabul ters ve doğru bileşen empedanslarının eşit olduğudur. Bu kabul, transformatörler ve iletim hatları gibi statik devre elemanlarının modellenmesinde doğru olur. Ancak asenkron ve senkron motor için doğru bir kabul değildir. Ne var ki; kaynak empedanslarında döner makinelerin etkisi genellikle küçük olduğundan, gerçekte doğru ve ters bileşenler birbirine yaklaşık olarak eşit olabilirler. Basitleştirilmiş simetrik bileşenler yöntemi ile, üç faz gerilimi için analitik denklemler matrissel formda şu şekilde verilebilir [5].

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{a_0} \\ \bar{V}_{a_\Sigma} \\ \bar{V}_{a_\Delta} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\bar{V}_{a_\Sigma} = \bar{V}_{a_1} + \bar{V}_{a_2} \text{ ve } \bar{V}_{a_\Delta} = \bar{V}_{a_1} - \bar{V}_{a_2} \text{ 'dir.}$$

Burada $\bar{V}_{a_0}$, $\bar{V}_{a_1}$ ve $\bar{V}_{a_2}$ sırasıyla sıfır, doğru ve ters bileşenler gerilimleri temsil etmektedir. $Z_{11}=Z_{12}$ kabulü (Şekil 2.7) doğrultusunda $\bar{V}_{a_1}$ ve $\bar{V}_{a_2}$ 'nin her ikisi de doğru bileşen büyüklüğü gibi davranır. Buna sıfır bileşen gerilimi de eklenerek, dengesiz gerilim düşümleri (*unbalanced dip-sag*) üç kompleks faz gerilimleri, üç simetrik bileşen yada $\bar{V}_{a_1}$, $\bar{V}_{a_2}$ ve $\bar{V}_{a_0}$ ile karakterize etmek mümkündür [4,28].

Sıfır bileşen gerilimleri, normalde cihaz terminallerinde sıfıra eşit olmasından dolayı ihmal edildiğinde, gerilim düşümü (*dip*) iki fazör ile temsil edilebilir. Bu fazörler ya $\bar{V}_{a_1}$ ve $\bar{V}_{a_2}$ ya da $\bar{V}_{a_1}$ ve $\bar{V}_{a_2}$ 'dir [4]. Δ ve Σ bileşenleri bize önemli avantajlar kazandıracaktır. Genelleştirilmiş raydal şebekenin (Şekil 2.7) nin tek faz toprak kısa devresi için bileşen devreleri Şekil 2.13 'te görülmektedir.



Şekil 2.13 Gerilim bölücü devre için basitleştirilmiş bileşen devresi (tek-faz toprak)

Bu devrede Z_{11} , Z_{12} ve Z_{10} sırasıyla kaynak empedansının doğru, ters ve sıfır bileşenlerini, Z_{21} , Z_{22} ve Z_{20} ise arıza yeri ile OBN noktası arasındaki hattın sırasıyla doğru, ters ve sıfır bileşen empedanslarını göstermektedir. V_F ise arıza öncesi gerilimdir. Bir faz toprak (1FT) kısa devresi için gerilim düşümünü hesaplamak için kaynak empedansının ters ve doğru bileşenlerinin eşit olduğu kabulü yapılırsa, yeni bir gerilim düşümü tanımlamak gerekir. Bunun adı Kalan Kompleks Gerilim (*Remaining Complex Voltage RVC*) 'dir. Her zaman bu eşitlik olamayacağı için Doğru-Ters Faktörü (*Positive-Negative Factor PNF*) adıyla yeni bir büyüklük daha

tanımlanır. En genel haliyle 1FT arızasında RCV, PNF faktörleri ile her üç fazda oluşan gerilim düşümü aşağıdaki formüllerde ifade edilir [4,28].

$$\bar{V}_{RCV} = \frac{Z_{10} + (2.Z_{21} + Z_{20})}{(2.Z_{21} + Z_{20}) + (2.Z_{11} + Z_{10})} \quad (2.8)$$

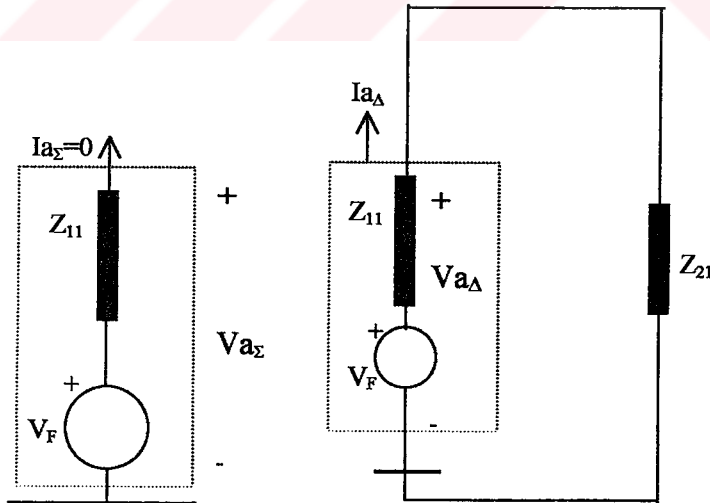
$$\bar{V}_{PNF} = 1 + \frac{Z_{12} - Z_{11}}{(Z_{11} + Z_{12} + Z_{10}) + (Z_{21} + Z_{22} + Z_{20})} \quad (2.9)$$

$$\bar{V}_a = \bar{V}_{RCV} \quad (2.10)$$

$$\bar{V}_b = -\frac{1}{2} \bar{V}_{RCV} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \bar{V}_{PNF} \quad (2.11)$$

$$\bar{V}_c = -\frac{1}{2} \bar{V}_{RCV} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \bar{V}_{PNF} \quad (2.12)$$

İki faz toprak dengesiz kısa devresi için söz konusu gerilim bölücü devreye ait bileşen devresi Şekil 2.14’de görülmektedir. Tek faz kısa devresinde olduğu gibi iki faz toprak devresinde de basitleştirmeler yapılmaktadır.



Şekil 2.14 Gerilim bölücü devre için basitleştirilmiş bileşen devresi (iki-faz toprak)

İki faz toprak kısa devresi için $Z_{11}=Z_{12}$ kabulü yapıldığında $\bar{V}_{a_2}$ sabit bir sayıyı olmaktadır. $\bar{V}_{a_1}$ ise arıza konumu ile değişmektedir. Gerilim düşümünü karakterize etmek için $\bar{V}_{a_1}$ bileşeni kullanılmaktadır.

Tek faz toprak kısa devresindeki gibi RCV ve PNF faktörleri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\bar{V}_{RCV} = \frac{Z_{21}}{Z_{21} + Z_{11}} \quad (2.13)$$

$$\bar{V}_{PNF} = 1 + \frac{Z_{12} - Z_{11}}{(Z_{11} + Z_{12}) + (Z_{21} + Z_{22})} \quad (2.14)$$

Buna göre iki faz toprak kısa devresi sırasında fazlarda gerilimler aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$\bar{V}_a = \bar{V}_{PNF} \quad (2.15)$$

$$\bar{V}_b = -\frac{1}{2}\bar{V}_{PNF} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}_{RVC} \quad (2.16)$$

$$\bar{V}_c = -\frac{1}{2}\bar{V}_{PNF} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}_{RCV} \quad (2.17)$$

Burada RCV indisli gerilim ifadesi, eşitlik (2.10)'dan anlaşılacağı gibi, tek faz toprak arızası sırasında arıza faz gerilimi vermektedir. İki faz toprak arızası için, RCV indisli bileşen, arızalı iki faz arasındaki gerilim farkını vermektedir. Benzer şekilde, PNF bileşeni, iki faz toprak arızasında simetrik fazı, tek faz arızasında ise arızasız fazlar arasındaki gerilim farkını vermektedir [4].

Şekil 2.7'deki gerilim bölücü devredeki yüklerin bağlantı şekli ve transformatör (kaynak ile OBN arasında) bulunması koşulları dikkate alınarak yedi farklı dengesiz gerilim düşümünden söz etmek mümkündür.

Bunlar A, B, C, D, E, F ve G tipi gerilim düşümleri olarak adlandırılır. A- tipi gerilim düşümü dengeli gerilim düşümünü temsil eder. Arıza (gerilim düşümü) sırasında fazların genlikleri ve faz farkları eşit yani simetrik olmaktadır. Yükün yıldız, yada üçgen bağlı olması yük üzerindeki gerilim düşümü sırasında bu simetriyi değiştirmez. Ayrıca transformatör bağlantı grubu da bu simetriyi etkilememektedir. Daha öncede söylendiği gibi üç faz kısa devreler ve motor yol verme olayı sırasında oluşan gerilim düşümleri A-tipi olarak sınıflandırılmaktadır [18].

B tipi, meydana gelen tek faz toprak kısa devresi sonucu yıldız bağlı yüklerde yaşanan gerilim düşümünü ifade etmektedir. İki faz (topraksız) arıza sonucu yıldız bağlı yüklerde C tipi, üçgen bağlı yüklerde ise D tipi gerilim düşümü oluşmaktadır. Yük ve transformatör bağlantı gruplarına göre meydana gelen arıza türünün yol açtığı gerilim düşümü tipi Tablo 2.3 ve 2.4’de gösterilmektedir [18,29].

Tablo 2.3. Dengesiz Gerilim Düşümlerinin Oluşum Nedenleri

Arıza Türü	Yıldız Bağlı Yük	Üçgen Bağlı Yük
Üç Faz	A-Tipi	A-Tipi
Faz-Faz	C-Tipi	D-Tipi
Tek Faz Toprak	B-Tipi	C*-Tipi
İki Faz Toprak	E-Tipi	F-Tipi

*Eşlenik

Tablo 2.4. Transformatör Bağlantı Gruplarının Gerilim Düşümü Tipine Etkisi

Trf. Bağ. Grubu	Primer Tarafta Meydana Gelen Gerilim Düşümü Tipleri						
	A-Tipi	B-Tipi	C-Tipi	D-Tipi	E-Tipi	F-Tipi	G-Tipi
$Y_N Y_n$	A	B	C	D	E	F	G
Y_y, D_d, D_z	A	D*	C	D	G	F	G
Y_d, D_y, D_z	A	C*	D	C	F	G	F

*Eşlenik

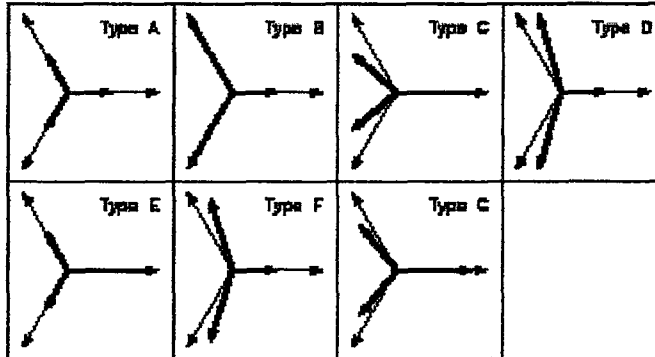
Bir faz toprak ve iki faz toprak arızası için (2.8),(2.9),(2.13) ve (2.14) te hesaplanan RCV ve PNF faktörleri kullanılarak, bu dengesiz düşüm tipleri sırasında faz gerilimleri aşağıdaki tablolarda verilmektedir. Kaynak doğru ve ters bileşeninin eşit olmadığı varsayımı ile yapılan genelleştirme sonucu PNF faktörü 1’den farklı kabul

edilmiştir. Pratikte bu kabul yapıldığında PNF faktörü yerine 1 yazmak gerekebilmektedir. Eğer bu kabul yapılırsa, (2.9) ve (2.14) ifadelerinde kesrin payı sifıra, dolayısıyla PNF faktörü 1'e eşit olacaktır.

Tablo 2.5 Üç faz, TFT, FF kısa devreleri sonucu oluşan dengesiz düşüm türleri

Tür	a fazı	b fazı	c fazı
A	$\bar{V}$	$-\frac{1}{2}\bar{V} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}$	$-\frac{1}{2}\bar{V} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}$
B	$\bar{V}$	$-\frac{1}{2}\bar{F} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}$	$-\frac{1}{2}\bar{F} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}$
C	$\bar{F}$	$-\frac{1}{2}\bar{F} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}$	$-\frac{1}{2}\bar{F} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}$
D	$\bar{V}$	$-\frac{1}{2}\bar{V} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{F}$	$-\frac{1}{2}\bar{V} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{F}$
E	1	$-\frac{1}{2}\bar{V} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}$	$-\frac{1}{2}\bar{V} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{V}$
F	$\bar{V}$	$-j\frac{1}{3}\sqrt{3} - \frac{1}{2}\bar{V} - j\frac{1}{6}\bar{V}\sqrt{3}$	$+j\frac{1}{3}\sqrt{3} - \frac{1}{2}\bar{V} + j\frac{1}{6}\bar{V}\sqrt{3}$
G	$\frac{2}{3} - \frac{1}{3}\bar{V}$	$-\frac{1}{3} - \frac{1}{6}\bar{V} - j\frac{1}{2}\bar{V}\sqrt{3}$	$-\frac{1}{3} - \frac{1}{6}\bar{V} + j\frac{1}{2}\bar{V}\sqrt{3}$

Dengesiz yedi gerilim düşümüne ait fazör diyagramı Şekil 2.15'de verilmektedir.

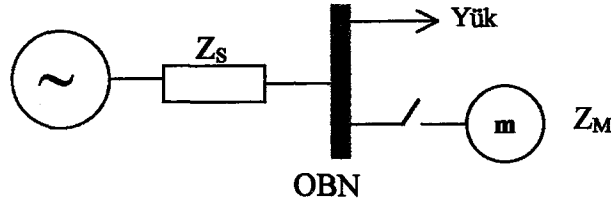


Şekil.2.15 Dengesiz gerilim düşümü tipleri fazör diyagramı

2.6 Büyük Güçlü Motorlara Yol Verilmesi Sırasında Oluşan Gerilim Düşümleri

Genel olarak yüklerin devreye girmesi sırasında ve kapasitör banklarının devre dışı bırakılması anında bir miktar gerilim düşümü olur. Statik yüklerin ve kapasitörlerin yol açtığı bu gerilim düşümü küçük değerlerde olup, devreye alınma/devre dışı kalma olayı bittikten sonra gerilimin tekrar yükselip, eski değerine gelmesi gibi bir sonuç söz konusu olamamaktadır. Gerilimdeki azalma basamak şeklinde olan bir azalmadır. Bununla birlikte, asenkron motorların yol alması olayı, statik yüklere göre çok farklı sonuçlar verir. Motora direkt olarak yol verilirken, nominal akımın 6-8 katı oranında yol alma akımı çekilir. Bu durumda şebeke geriliminde %10-15 gibi düşmeler olur. Eğer bu gerilim düşümü oranı %15'e ulaşırsa yani gerilim nominal değerinin %85'ine düşerse motorların yol alma işlemi gerçekleşemez [5,18]. Asenkron motorun yol alma işlemi, motor anma hızına ulaşınca kadar sürer ve motor anma hızını ulaştığında gerilim kabul edilebilir bir değere tekrar oturur. Bu süreç, motorun anma değerlerine ve mekanik yüküne göre değişen bir süreç olup birkaç saniye ile bir dakika arasında olabilmektedir. Ayrıca transformatör gücü ve şebeke kısa devre seviyesi gerilim düşümü miktarını belirleyen bir faktördür.

Özellikle direkt olarak yol verilen orta gerilim motorlarının bulunduğu endüstriyel tesislerde motorların yol alması dikkate alınacak sonuçlar üretebilir. Genelde motorların yol alması sonucu oluşan gerilim düşümü genlikleri, kısa devre kaynaklı düşümlere kıyasla daha az olur ancak düşüm süresi daha fazla olur. Bu süre ortalama 600 ms ye kadar uzayabilir. Özel amaçlı, büyük motorlar için daha da uzayabilir [18]. Yükler açısından motorlara yol verilmesi sırasında yaşanan gerilim düşümleri önlenabilir bir risktir. Planlı bir faaliyet olan ve çok sık yapılmayan büyük motorlara doğrudan yol verme olayı sırasında geliştirilmiş yöntemler bulunmaktadır. Motor barası gerilimin çeşitli yöntemlerle yükseltilmesi bu yöntemlerdendir [30]. Asenkron motorlara yol verilmesi sırasında oluşan gerilim düşümlerini hesaplamak için Şekil 2.16'daki basit sistemi ele almak gerekecektir.



Şekil 2.16 Motor Yol Verme Olayı için Gerilim Bölücü Devre

Burada Z_s şebeke empedansını, Z_M ise yol alma sırasındaki motor eşdeğer empedansını göstermektedir. Direkt olarak motora yol verildiğinde OBN barasında meydana gelen gerilim düşümünün genliği (2.18) eşitliği ile bulunur.

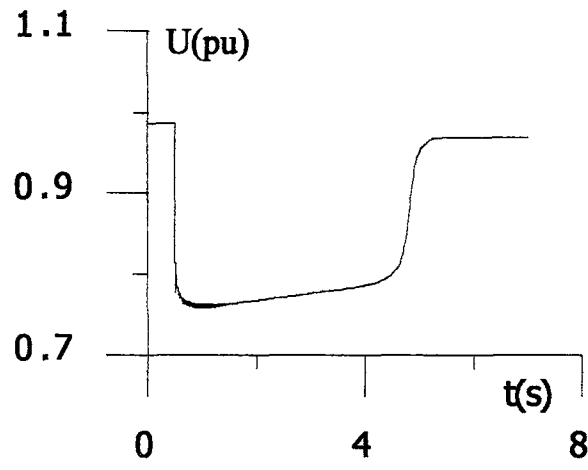
$$V_{\text{sag}} = \frac{Z_M}{Z_s + Z_M} \quad (2.18)$$

Kaynak geriliminin 1.0 birim değerinde olduğu varsayımı altında, motorun anma gücünün S_M , ve kaynağın ise kısa devre gücünün S_{KD} olduğu durumlarda Z_s ve Z_M empedansları aşağıdaki eşitliklerdeki gibi hesaplanacaktır.

$$Z_s = \frac{V^2}{S_{KD}} \quad (2.19)$$

$$Z_M = \frac{V^2}{\beta S_M} \quad (2.20)$$

Burada β , motorların yol alma akımları ile anma akımları arasındaki oranı belirtmektedir. Ortalama olarak 6 ile 8 arasında değişmektedir. Şekil.2.17’de asenkron motorlara direkt olarak yol verilmesi sırasında yaşanan tipik gerilim değişimi görülmektedir.



Şekil 2.17 Asenkron Motorlara Yol Verilmesi Sırasında Oluşan Gerilim Düşümü



BÖLÜM 3. KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİNİN ENDÜSTRİYEL DAĞITIM SİSTEMLERİNE ETKİSİ

3.1 Endüstriyel Dağıtım Sistemleri

Enerji dağıtım sistemleri, iletim sistemi ile tüketici arasında köprü görevi gören, elektrik enerjisinin geriliminin uygun değerlerde taşınarak müşteriye aktarıldığı enerji sistemlerinin önemli bir parçasıdır. İletim hatları vasıtasıyla yüksek gerilimde üretim bölgelerinden taşınan enerji yerleşim birimlerinin yakınında (çoğu kez şehir girişlerinde) ve sanayi bölgeleri girişinde bulunan şalt tesislerinde orta gerilim değerine indirilerek, dağıtım için gerekli şartlar oluşturulur. Türkiye şartlarında bu değer genelde 35 kV'tur. Orta gerilime indirilen enerji, dağıtım hatları ile kısa mesafeli taşıma yapılarak tüketicilere ulaştırılır. Dağıtım şebekeleri orta ve alçak gerilim şebekeleri olarak ikiye ayrılır. Ülkemiz şartlarında enerji, 35 kV'luk orta gerilim şebekeleri ve terk edilmekte olan 6.3 kV hatlarla yerleşim yerlerindeki trafo postalarına aktarılır. Burada alçak gerilime (0.4 kV) indirilen elektrik enerjisi konutlarda ve küçük sanayi tesislerinde kullanıma hazır hale getirilir. Endüstriyel tesislere (petrokimya, demir-çelik gibi) ulaştırılan enerji tesisin kurulu gücü ve talep ettiği enerji miktarına bağlı olarak orta (35 kV) ve yüksek gerilimli (154 kV) hatlar ile tesisin trafo merkezine dağıtım şirketi tarafından ulaştırılır. Türkiye'de ağır sanayi kuruluşlarında 154 kV'luk hatlar ile besleme yapılmaktadır. Özellikle metalurji tesislerindeki fırınların şebeke üzerindeki olumsuz etkilerini aza indirmek için bu tercih edilir. Nispeten daha küçük güçlü sanayi tesislerine ise 35 kV 'luk dağıtım hatları ile enerji beslemesi gerçekleştirilmektedir. Tesislerde kullanılan gerilim seviyesine göre bu değer daha aşağı noktalara (11 kV, 6.3 kV, 4.16 kV, 3.3 kV vb.) indirilebilmektedir.

Enerji dağıtım sistemleri için yükler önemli bir elemandır. Alçak gerilim (380/220V) yükleri genellikle yerleşim birimleri ve küçük ölçekli sanayi bölgeleri için

belirlenmiş gerilim seviyesidir. Orta gerilimle ise daha çok endüstriyel tüketiciler ile için gerekli gerilim seviyesidir.

Prosesin kalitesi ve maddi kayıpların azaltılması için enerji kalitesinin sağlanması zorunludur. Bu kalitenin sağlanması enerji dağıtıcısı şirketler ve söz konusu tesisler için kaçınılmazdır. Çünkü sistemin bir noktasında meydana gelen harmonikler, gerilim düşmeleri yada yükselmeleri gibi enerji kalitesizlikleri komşu yükleri de etkileyebilmekte ve problemi genişletmektedir. Özellikle bu tesisler için şebeke tarafında meydana gelen kısa devreler önemli ve ciddi bir sorundur. Ülkemizde dağıtım şebekesinin yetersizliği ve tasarım hataları sonucu bir çok sanayi tesisi maddi kayıplarla karşılaşmakta ve bu sorunu gidermek için çeşitli önlemlere başvurmaktadırlar. Otoprodüktör de denilen kendi enerjilerini ürettikleri yerel elektrik santralleri ile harmonik filtreleri ve gerilim öteleyici elemanlar bunlardan bazılarıdır. Güç akışı ve kararlılık incelemelerinde yüklerin karakteristiği sistemin kararlılığı açısından önemli bir faktördür. Sanayi tesislerinde asenkron motorların büyük oranda kullanılması ve motorların gerilim düşümleri açısından önemli etkilerinin olması nedeniyle bu bölümde sadece asenkron motorların kısa süreli gerilim düşümlerine etkisi ve motorların davranışı incelenmiştir.

Benzetimlerde kullanılan örnek endüstriyel dağıtım sistemi, orta ve alçak gerilim asenkron motorlar ile statik yükleri ihtiva etmektedir. Ayrıca tesiste (yük) bir yerel elektrik santrali bulunmaktadır. Ancak bu bölümdeki benzetimlerde yerel santral dikkate alınmayacağından GEN_11 ile OBN_11 baraları arasındaki kesici açık olarak dikkate alınmaktadır.

Şekil 3.1’de söz konusu örnek sistemin tek hat şeması verilmektedir. Sistemdeki hat, transformatör, motor ve yüklerin parametreleri EK-A’da verilmiştir.

3.2. Asenkron Motorların Modellenmesi

3.2.1 Sürekli hal modeli

Asenkron motorlar, dinamik yükler içerisinde yaygınlık ve sistemin dinamik kararlılığı etkisi açısından ilk sırayı almaktadır. Özellikle gerilim kararlılığı ve uzun dönemli kararlılık analizlerinde asenkron motorların davranışları sistem kararlılığını etkileyen önemli bir etken olmuştur.

Asenkron motorlar orta ve alçak gerilim dağıtım sistemlerinde bulunan yükler içerisinde, %60 ile %70 arasında kullanım alanına sahiptir [31]. Bundan dolayı asenkron motorların dinamik karakteristiklerin ortaya çıkarılması analizlerde önem kazanmaktadır. Asenkron motorlar rotor yapısı açısından sincap kafesli ve rotoru sargılı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sincap kafesli motorların rotorlarında sargılar bulunmamaktadır. Kısa devre çubukları ile rotor kısa devre edilmiştir. Rotoru sargılı motorlarda, statorda olduğu gibi üç fazlı olarak sarılır. Bu sargının uçları fırça ve bilezikler yardımıyla dışarı çıkartılarak motor gövdesi üzerindeki bağlantı kutusuna bağlanır [32]. Stator sargılarına üç fazlı dengeli bir gerilim uygulandığında, rotor sargılarında elektromagnetik indüksiyon sonucu gerilim indüklenir ve akım akar. Bu arada statordaki döner alanın etkisiyle rotorda elektromagnetik moment indüklenmektedir. Bu momentin etkisiyle rotor dönmeye başlar. Bu nedenle asenkron motorlar indüksiyon motorları da denilmektedir. Statordaki döner alanın hızı senkron hız olup aşağıdaki formülle hesaplanır

$$n_s = \frac{120.f_s}{p} \quad (3.1)$$

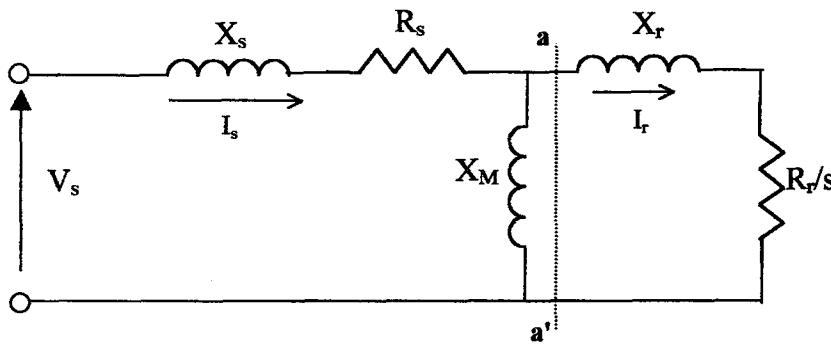
Burada, f_s , uygulanan gerilimin frekansı, p kutup sayısını, n_s ise döner alanın senkron hızını d/dk cinsinden temsil etmektedir. (3.1) ifadesi açısal hız w_s cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$w_s = \frac{120.f_s}{p} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (\text{rad/s}) \quad (3.2)$$

Stator döner alanı n_s senkron hızında dönerken, rotor n_r hızı ile döner. Stator döner alanı ile rotor arasındaki göreceli hareket sonucu, rotor sargılarında indüklenen gerilimin frekansı f_r 'dir. Bu frekans göreceli harekete bağlı olarak değişmektedir. Rotordan akan akımın frekansı da gerilimin frekansı olan f_r 'ye eşittir. Bu rotor akımı, rotorda stator döner alanının dönüş yönünde döndürecek bir moment oluşturur. Rotor hızı n_r , senkron hızdan (n_s) küçüktür. Ancak rotor hızının, senkron hıza yaklaşması durumunda, rotorda indüklenen gerilim ve akım sıfıra yaklaşır. Pozitif moment üretmek için, yani motor olarak çalışmak için $n_r < n_s$ olmalıdır. Göreceli olarak rotorun, stator döner alanından $n_s - n_r$ (devir/dakika) kadar ters yönde hareket ettiği gözlemlenebilir. Bu hıza kayma hızı denilmektedir. Senkron hıza göre birim değerde kayma aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilmektedir [31].

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \text{ (pu)} \quad (3.3)$$

Rotor miline bağlı mekanik yük arttığında, rotordaki akım ve gerilimin yük için gerekli olan momenti üretmek için hız düşecek kayma artar. Böylece makinanın motor olarak çalışması sağlanmış olur. Eğer rotor bir türbin tarafından stator döner alanından daha büyük bir hızla sürülürse, kayma negatif olur. Yani $n_r > n_s$ 'dir. Böylece gerilim ve akımın ürettiği moment ters yönde dönüş sağlar. Dolayısıyla makina generator olarak çalışmaya başlar. Üç fazlı bir asenkron makinanın sürekli halde eşdeğer devresi Şekil 3.2'de verilmektedir. Bu devre EK-B'de ki motor denklemlerinden çıkarılmış bir devre olup, büyüklükler statora indirgenmiştir. Motor çalışma durumunda akım yönü pozitif, dolayısıyla kayma da pozitif olmaktadır.



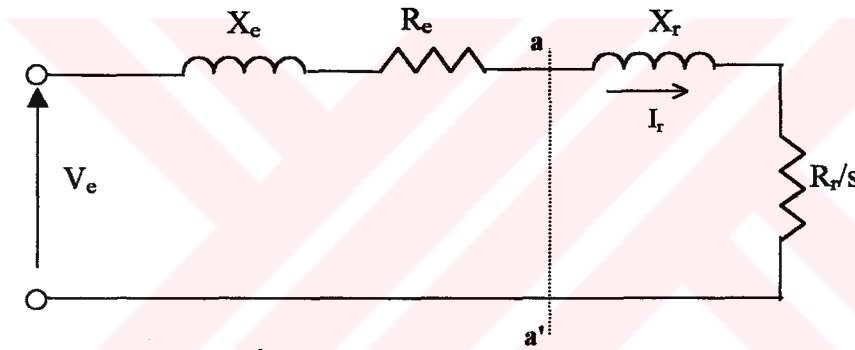
Şekil.3.2 Asenkron Makine Sürekli Hal Eşdeğer Devresi

Bu devrede **aa'** noktası stator ile rotor arasında yer alan ve moment indüklenmesinin gerçekleştiği hava aralığını temsil etmektedir. Buna göre hava aralığı üzerinden rotora transfer edilen güç ve rotor miline aktarılan elektromagnetik moment ifadeleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$P_{ag} = \frac{R_r}{s} I_r^2 \quad (3.4)$$

$$M_e = 3 \frac{p}{2} \frac{R_r}{s \cdot \omega_s} I_r^2 \quad (3.5)$$

Motorun moment-kayma karakteristiğini bulabilmek için, Şekil.3.2'deki devrenin Thevenin eşdeğeri bulunmalıdır. Bu eşdeğer devre Şekil.3.3'deki gibi bulunur.



Şekil.3.3 Moment-Kayma Değişimi İçin Eşdeğer Devre

Bu devrede ;

$$V_e = \frac{jX_M \cdot V_s}{R_s + j(X_s + X_M)} \text{ ve}$$

$$R_e + jX_e = \frac{jX_M \cdot (R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_M)} \text{ 'dir.}$$

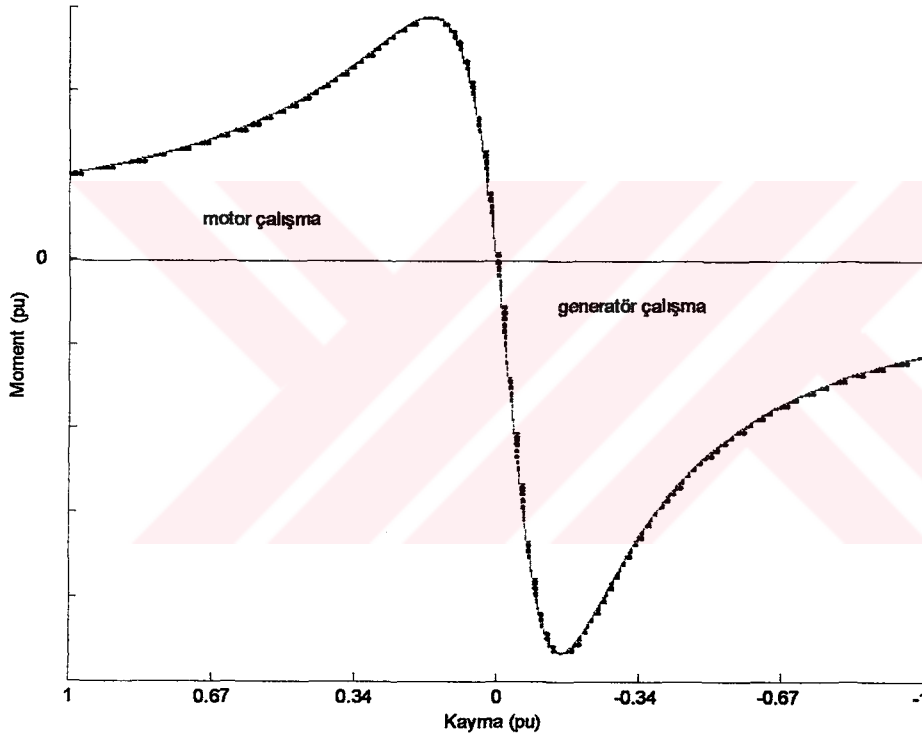
Şekil.3.3.'deki devreden rotor akımı aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{V}_e}{\left[\left(R_e + \frac{R_r}{s} \right) + j(X_e + X_r) \right]} \quad (3.6)$$

Bu ifade, eşitlik (3.5)'teki elektromagnetik moment eşitliğinde yerine yazılarak hava aralığından mile aktarılan elektromagnetik moment ifadesinin kaymaya bağlı değişimi elde edilir [33].

$$M_e = 3 \frac{p}{2} \left(\frac{R_r}{s \cdot w_s} \right) \frac{V_e^2}{(R_e + \frac{R_r}{s})^2 + (X_e + X_r)^2} \quad (3.7)$$

Asenkron makinalarda hem motor ve hem de generator çalışma durumları için (3.7)'de verilen moment kayma değişimi Şekil.3.4.'de görülmektedir.

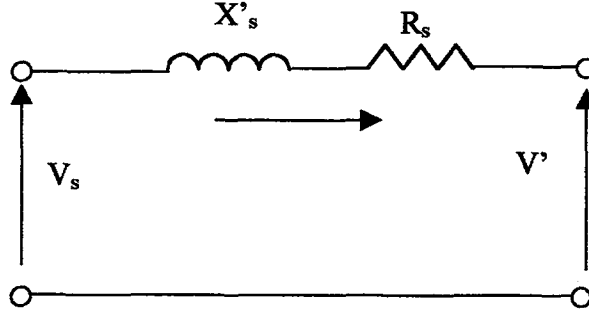


Şekil.3.4. Asenkron Makinanın Moment-Kayma Değişimi

3.2.2 Geçici hal modeli

Bu bölüme kadar verilen modeller ve bağıntılar, makinanın sadece sürekli hal şartlarındaki davranışını belirler. Ancak kısa süreli gerilim düşümlerinin sebepleri arasında birinci sırada yer alan kısa devre gibi geçici olaylar sırasında makinanın davranışını belirleyebilmek için makinanın geçici haldeki modellerine gerek duyulmaktadır. Rotor akımlarının ve akılarının ihmal edildiği geçici çalışma

koşullarında motor davranışını belirlemek için Şekil.3.5'deki eşdeğer devre kullanılmaktadır [31,33].



Şekil.3.5 Asenkron Makinaların Geçici Hal Eşdeğer Devresi

Bu devrede V_s ; stator uç gerilimi, V' ise geçici empedans gerisi gerilimidir. Bu iki gerilim arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.

$$\bar{V}_s = (R_s + jX'_s) \cdot \bar{I}_s + \bar{V}' \quad (3.8)$$

Reaktans arkası geçici gerilimin d ve q eksenli bileşenleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} V'_d = -\frac{1}{T'_o} [V'_d + (X - X'_s) i_{qs}] + s \cdot \omega_s \cdot V'_q \quad (3.9)$$

$$\frac{d}{dt} V'_q = -\frac{1}{T'_o} [V'_q - (X - X'_s) i_{ds}] - s \cdot \omega_s \cdot V'_d \quad (3.10)$$

Bu gerilim denklemine ek olarak rotor açısal hızı ve moment dengesiyle ilgili durum denklemini aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{2H} (M_e - M_y) \quad (3.11)$$

Bu denklemlerdeki H eylemsizlik sabiti, M_y ise mekanik yük momenti, $T'_o = \frac{X_r + X_m}{\omega_s \cdot R_r}$; Geçici hal açık devre zaman sabitini (saniye), $X = X_s + X_m$; Rotor

açık devre reaktansını, ve son olarak $X'_s = X_s + \frac{X_m \cdot X_r}{X_m + X_r}$; Bloke rotor açık devre reaktansı göstermektedir.

Bu üç değişkene göre üçüncü derece asenkron motorun durum modeli aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V'_d \\ V'_q \\ w_r \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} V'_d \\ V'_q \\ w_r \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Motorun mekanik elektromagnetik ve mekanik yük momentleri ile mekanik momentin yaklaşık ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$M_e = E'_d \cdot i_d + E'_q \cdot i_q \quad (3.13)$$

$$M_y = M_{y0} \cdot (a \cdot w_r^2 + b w_r + c) \quad (3.14)$$

$$M_y = M_{y0} \cdot (w_r)^\alpha = M_{y0} \cdot (1-s)^\alpha \quad (3.15)$$

3.3. Arıza Yerinin ve Arıza Türünün Etkisi

Bu bölümde iletim ve dağıtım sistemi ile B1_11, B3_63 ve C2_04 baralarında meydana getirilen dengeli ve dengesiz kısa devrelerin D_11 barasına ve bu baraya bağlı asenkron motorlara etkisi incelenmiştir. Arıza temizleme zamanları şebeke arızalarında 100 ms, iç arızalarda ise 400 ms'dir. Söz konusu motorlar özdeş olduğundan sadece bir motordaki değişimler gösterilmiştir.

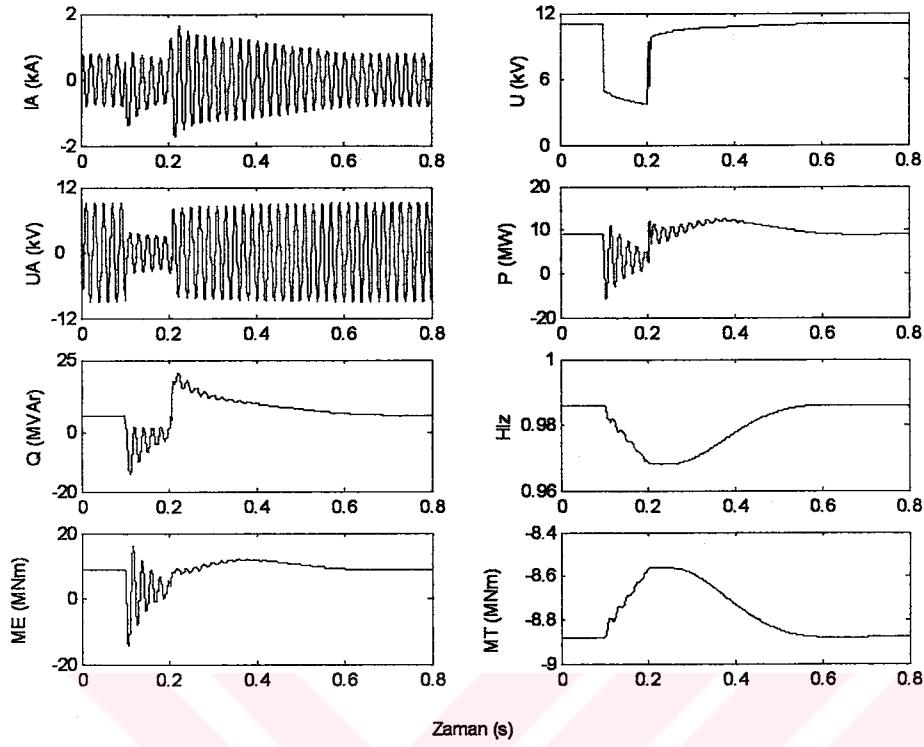
3.3.1 Üç faz simetrik kısa devresi

Üç fazlı dengeli kısa devreler, oluşma sıklığı en az ama şiddeti en çok olan kısa devre türüdür. Bu bölümdeki benzetimlerde sistemin farklı noktalarındaki arızalarda D_11 barasında bulunan orta gerilim asenkron motorun gerilim, güç, moment, akım ve hız değişimleri gözlenmiştir. Kısa devre yeri ile yük arasındaki mesafe yani eşdeğer empedans meydana gelen gerilim düşümünü etki eden ilk faktördür. Bunun

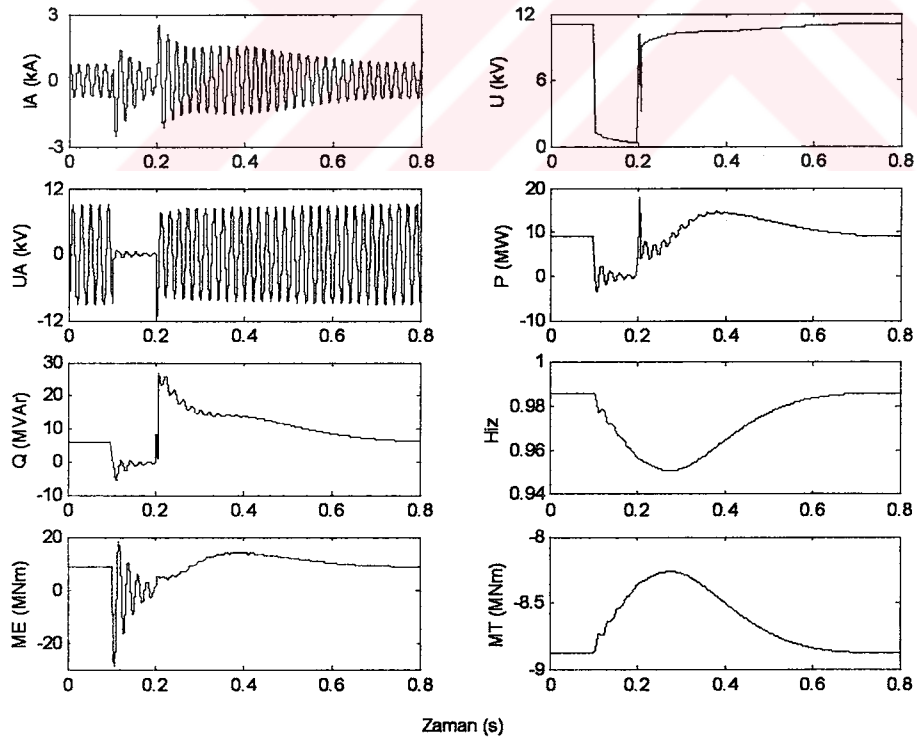
yanı sıra arıza sırasında motor ile şebeke arasındaki güç akışının miktarı bir diğer etkindir. Ayrıca arıza noktasının arıza seviyesi yani kısa devre akımı şiddeti ise önemli bir başka faktördür. Örneğin iletim sistemindeki arıza sırasında (Şekil 3.6) gerilim %70 civarında düşerken, dağıtım sistemi arızası sırasında neredeyse sıfıra inmiştir. İletim sistemi arızası paralel hatlardan birinde meydana geldiği için diğer hattan dağıtım sistemi beslenmiştir. Ayrıca 35 kV'luk tek hattın ortasında meydana gelen dağıtım sistemi arızası D_11'e yakındır. Arıza yeri motora yaklaştıkça, yada daha doğru bir ifadeyle arıza yeri ile motor arasındaki empedans azaldıkça motor üzerindeki gerilim düşümü artmaktadır. B1_11 (11 kV) barasındaki arıza motor üzerinde en şiddetli etkiyi yapmıştır (Şekil 3.8). 6.3 kV ve 0.4 kV seviyelerindeki arızaların ise etkisi daha az olmaktadır. Özellikle transformatör empedansı ve arıza seviyesi bunda etkindir (Şekil 3.9, Şekil 3.10).

Söz konusu dengeli gerilim düşümünden motor hızı, gücü ve moment değişimleri de yukarıdaki eğrilerde (Şekil 3.6-3.10) verilmiştir. Meydana gelen gerilim düşümü miktarı oranında bu parametrelerde değişmiştir. Arızanın ilk anında motorun reaktif gücü negatife inmiştir. Yani kısa bir süre generatör gibi sisteme reaktif güç vermektedir.

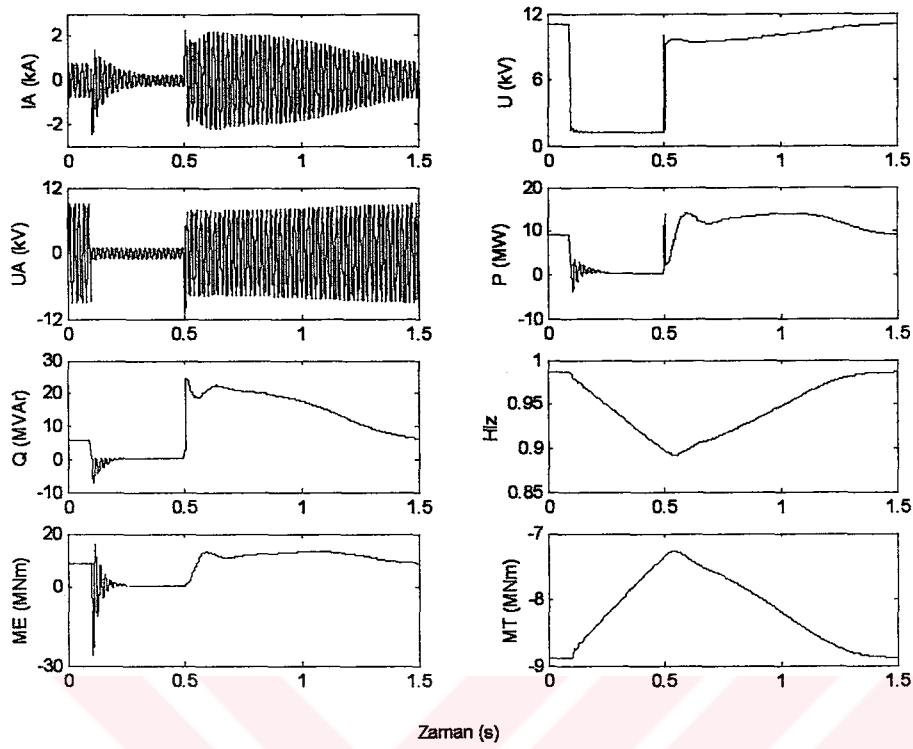
Motorların davranışı ile ilgili önemli bir nokta ise özellikle efektif gerilim değişimi, eğrilerde görüldüğü gibi, arıza temizlendikten hemen sonra gerilimin eski değerine gelmediği bir süre yavaş ve pürüzsüz bir değişim göstererek gerilim düşümü olayını sürdürdüğü görülmektedir. Bu sürece arıza sonrası gerilim düşümü denilmektedir. Süre olarak arıza süresinden daha uzun ve gerilimin anma değerinin %60-%90 dolaylarında olması sistemde bulunan kritik yükler özellikle elektronik yükler için tehlikelidir.



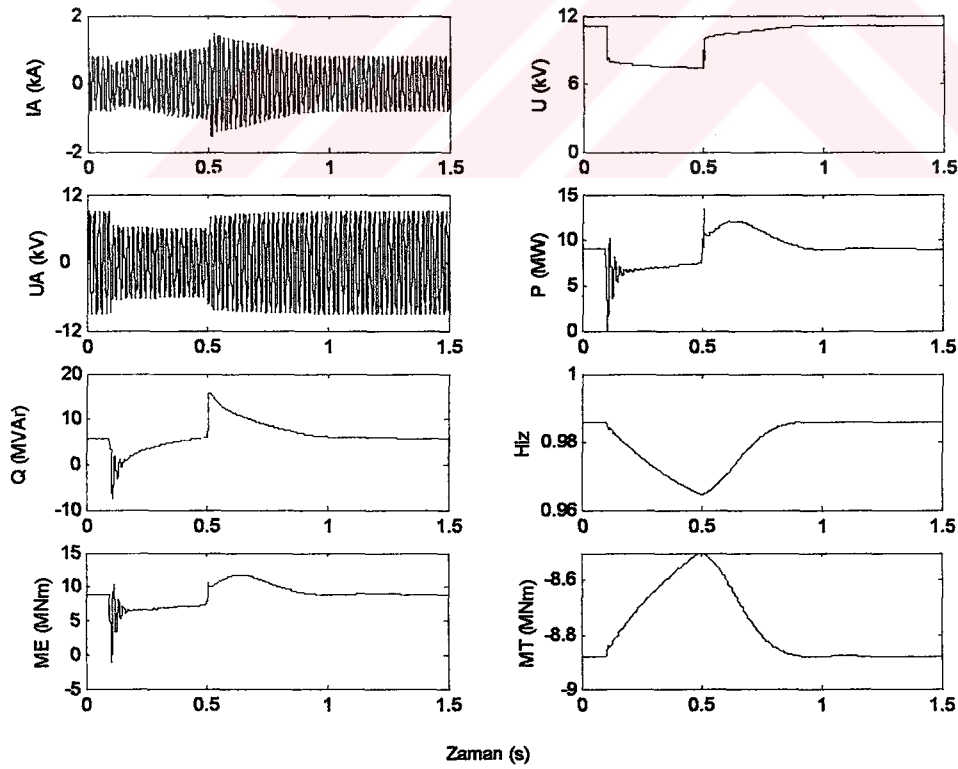
Şekil 3.6 İletim sistemindeki arıza asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi)



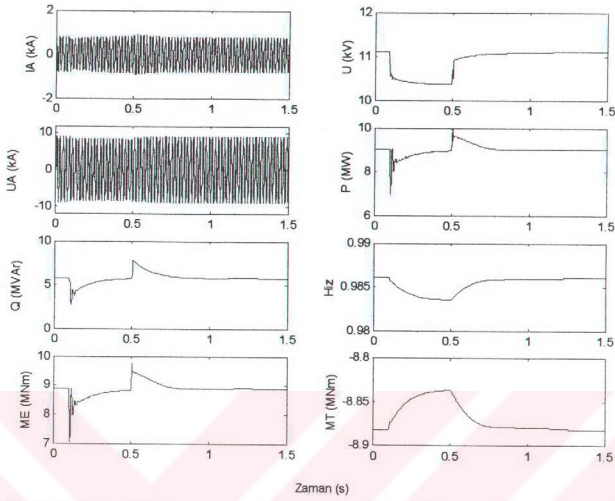
Şekil 3.7 Dağıtım sistemindeki arızanın asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi)



Şekil 3.8 B1_11 barasındaki arızanın asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi)



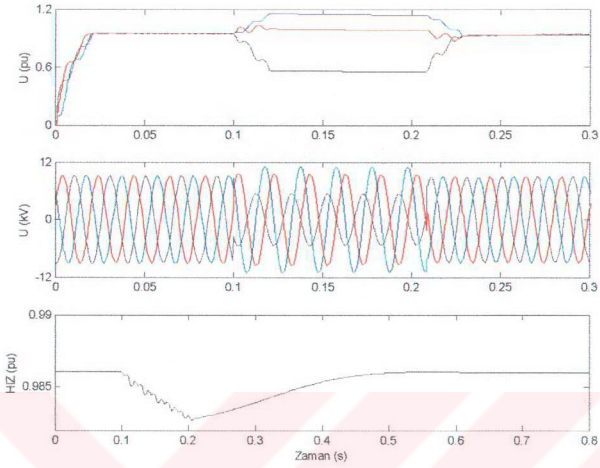
Şekil 3.9 B3_6.3 barasındaki arızanın asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi)



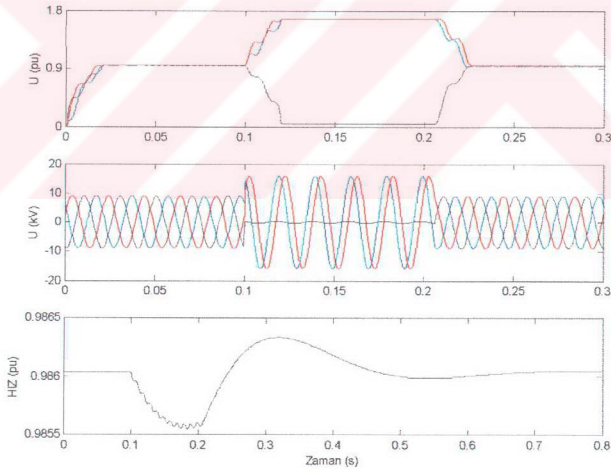
Şekil 3.10 C2_0.4 barasındaki arızanın asenkron motora etkisi (3 Faz simetrik kısa devresi)

3.3.2 Bir faz toprak kısa devresi sonucu oluşan KSGD'lerinin etkisi

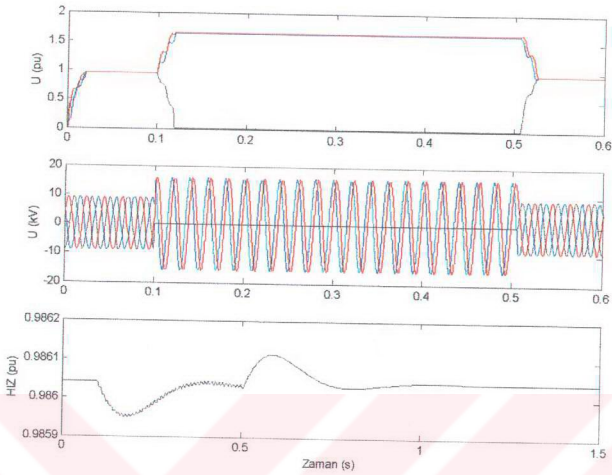
IFT arızası durumundaki gerilim dalga şekillerinde A fazı siyah, B fazı mavi, C fazı ise kırmızı ile gösterilmiştir. IFT arızasında A fazı arızalı fazdır. Aşağıdaki şekillerden görüldüğü gibi arızalı A fazı geriliminde azalma meydana gelirken, diğer fazlarda artış meydana gelmiştir. Ayrıca motor hızlarında değişim üç faz kısa devresine göre daha azdır.



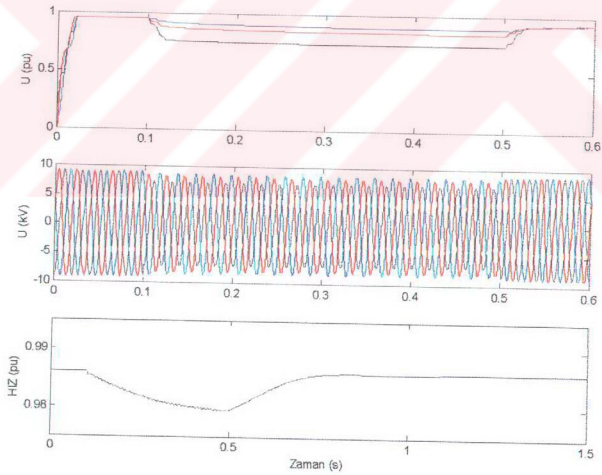
Şekil 3.11 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (IFT, İletim sistemi arızası)



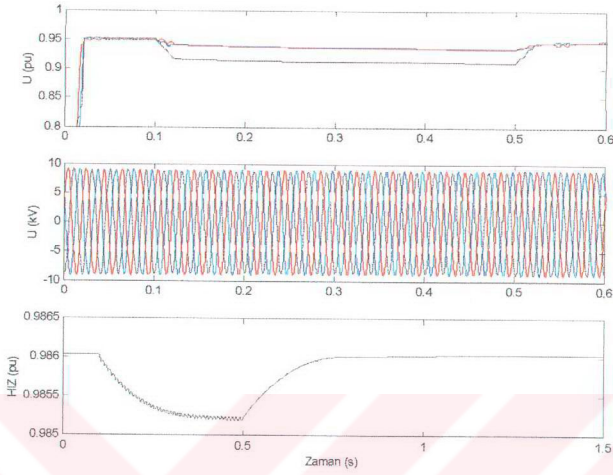
Şekil 3.12 Motor uç gerilimleri (IFT, Dağıtım sistemi arızası)



Şekil 3.13 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (IFT, B1_11 barasında kısa devre)



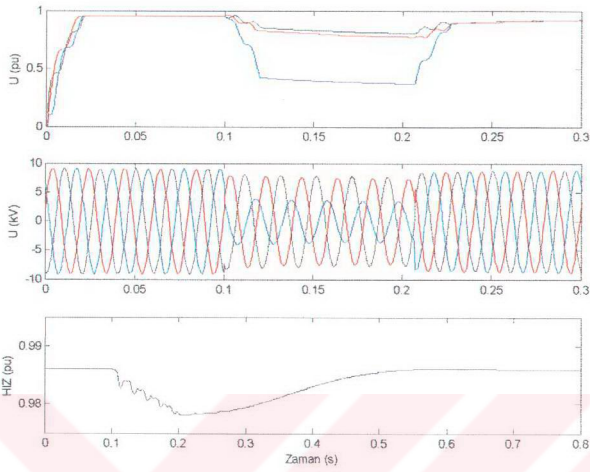
Şekil 3.14 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (IFT, B3_6.3 barasında kısa devre)



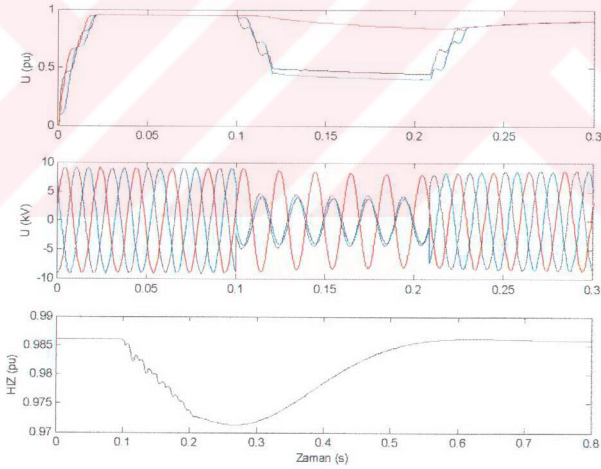
Şekil 3.15 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (IFT, C2_0.4 barasında kısa devre)

3.3.3 Faz faz ve iki faz toprak kısa devreleri sonucu oluşan KSGD'lerinin etkisi

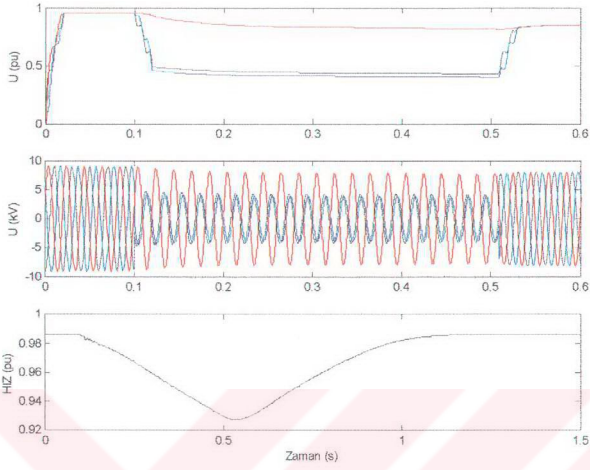
2FT ve 2F arızası durumlarındaki gerilim dalga şekillerinde A fazı siyah, B fazı mavi, C fazı ise kırmızı ile gösterilmiştir. Arızalı fazlar A ve B'dir. Tüm dengesiz arıza benzetimlerinden görüldüğü gibi arızalı fazlarda azalma olurken, arızasız fazlarda yükselme görülmektedir. Ayrıca iletim sistemi arızalarında gerilim düşümü %50 civarında olurken dağıtım ve 11 kV arızalarında sıfıra düşme söz konusudur. Arıza yeri D_11 barasından uzaklaştıkça gerilim düşümünde azalma olmaktadır. Söz konusu motorlar büyük güçlü ve yüksek ataletle sahip olduğundan hız değişimi büyük olmamıştır. 6.3 ve 0.4 kV baralarındaki arızalardan incelenen 11 kV'luk motor çok az etkilenmiştir. Bunda transformatör bağlantı grubunun (Δ/Y) etkisi büyüktür.



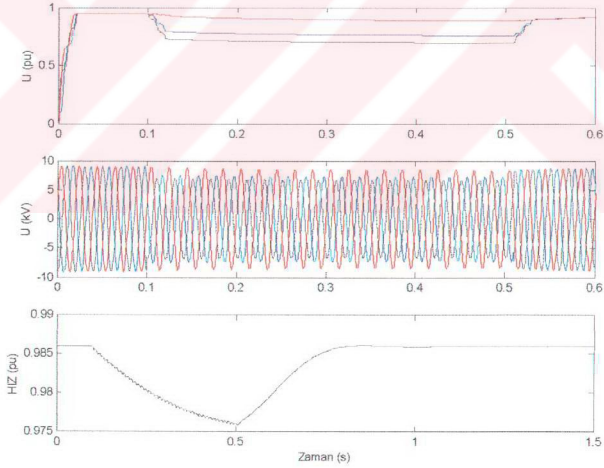
Şekil 3.16 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, İletim sistemi arızası)



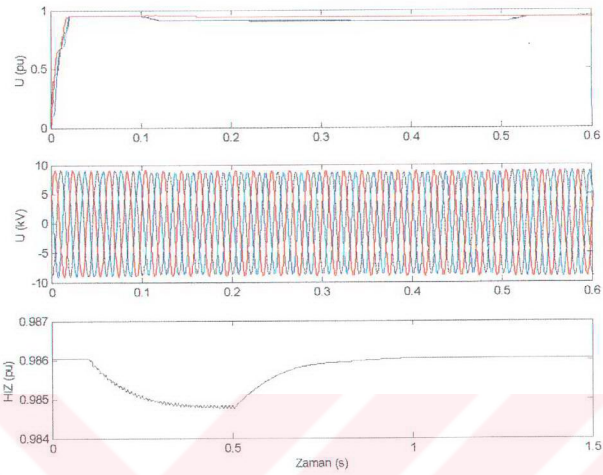
Şekil 3.17 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, Dağıtım sistemi arızası)



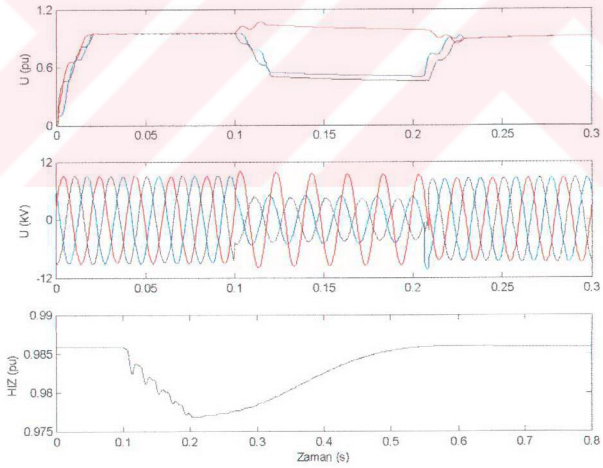
Şekil 3.18 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, B1_11 barasında kısa devre)



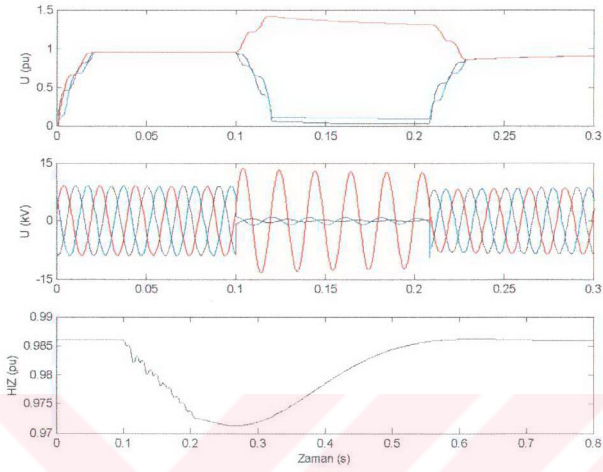
Şekil 3.19 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, B3_6.3 barasında kısa devre)



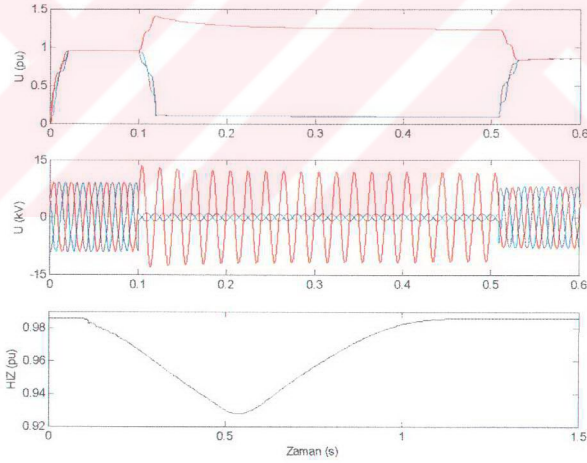
Şekil 3.20 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2F, C2_0.4 barasında kısa devre)



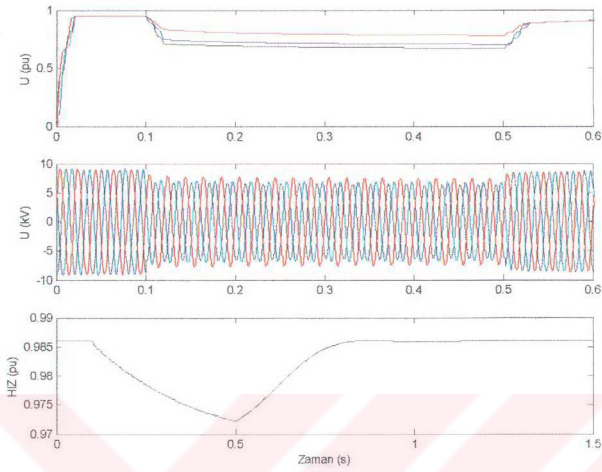
Şekil 3.21 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, İletim sistemi arızası)



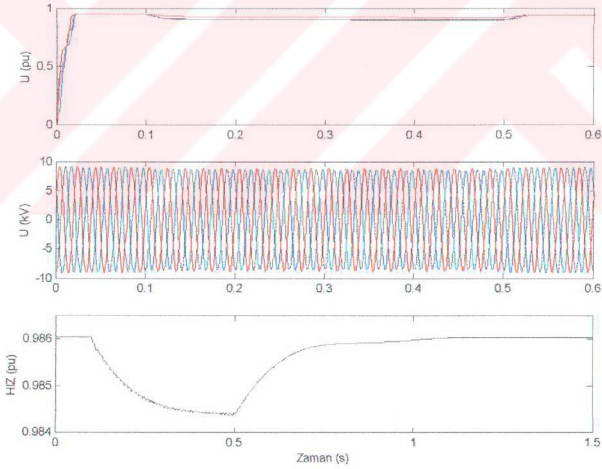
Şekil 3.22 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, Dağıtım sistemi arızası)



Şekil 3.23 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, B1_11 barasında kısa devre)



Şekil 3.24 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, B3_6.3 barasında kısa devre)



Şekil 3.25 Motor uç gerilimleri ve hız değişimi (2FT, C2_0.4 barasında kısa devre)

3.4. Mekanik Yük Moment Karakteristiklerinin Etkisi

Asenkron motorların geniş kullanım alanıyla orantılı olarak hareket ettirilen çeşitli mekanik yüklerin karakteristikleri bulunmaktadır. Kompresör, pompa, asansör, vinç vb farklı özellikteki mekanik sistemlerde kullanılan motorlar için çeşitli yük momenti karakteristikleri tamamlanmıştır. Mevcut örnek sistemdeki 11 kV'luk motorların yer aldığı D_11 barası üzerindeki bu bölüm benzetimleri için üç farklı mekanik yük karakteristiği ele alınmıştır [34,35].

Sabit moment : Genellikle vinç asansör gibi kaldırma makinalarında görülmektedir. Yük momenti ifadesi

$$M_y = M_{y0} \quad (3.16)$$

biçimindedir.

Kuadratik moment : Özellikle fan ve pompa motorları için bu tür yük tipi öngörülmektedir. Moment ifadesi

$$M_y = M_{y0} \cdot (1-s)^2 \quad (3.17)$$

biçimindedir.

Kompozit yük : Tüm karakteristikleri içeren özel bir karakteristiktir. Benzetimlerde kullanılan moment tipi (3.18)'de verilmiştir. Eşitlik (3.18)'deki kompozit moment değişimi $M_{y1}=1.2$ pu ve $M_{y2}=0.4$ pu için Şekil 3.27'de görülmektedir.

$$M_y = M_{y1} \cdot (1-s)^2 + M_{y2} \cdot (s^5) \quad (3.18)$$

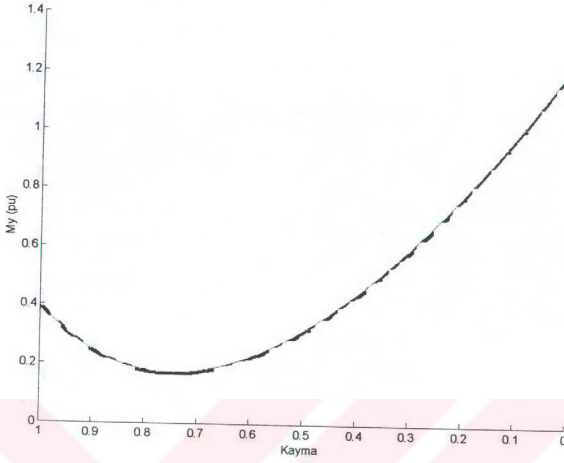
Ayrıca benzetimlerde referans [36]'deki petrokimya tesisinde motorlara ait bir başka yük moment karakteristiği de kullanılmıştır. Bu moment karakteristiğinin kaymaya bağlı değişimi Şekil 3.26'da verilmiştir.

Benzetimlerde iki farklı arıza durumu incelenmiştir. Dağıtım sistemi arızası olarak adlandırılan SBK35-SBK34 dağıtım hattının tam ortasındaki üç fazlı kısa devre ile D_11 barasında yani motor terminallerindeki üç fazlı kısa devre durumunda motorların davranışı üzerinde yük karakteristiklerinin etkisi incelenmiştir.

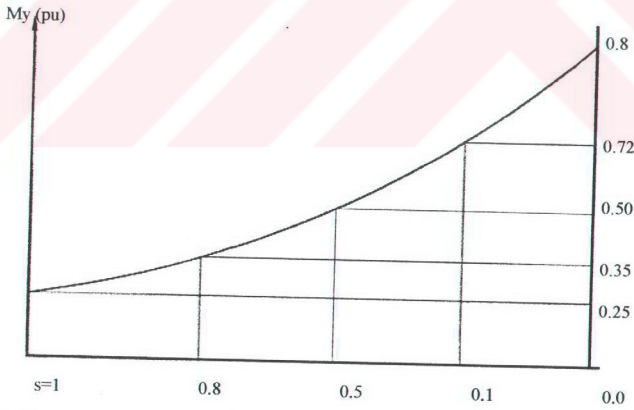
Söz konusu baradaki her üç motor birbiriyle tamamen özdeş olduğundan sadece birine ait faz akımı, faz-faz etkin gerilimi, aktif güç, reaktif güç, hız, elektromagnetik ve mekanik yük değişimleri aşağıdaki eğrilerde görülmektedir.

Bu eğrilerde kırmızı renk ile 3.tip, siyah renk ile 4. tip, mavi ile kuadratik (2.tip) ve pembe ile sabit (1.tip) moment karakteristiklerine sahip motorların gerilim, hız ve moment değişimleri gösterilmiştir.

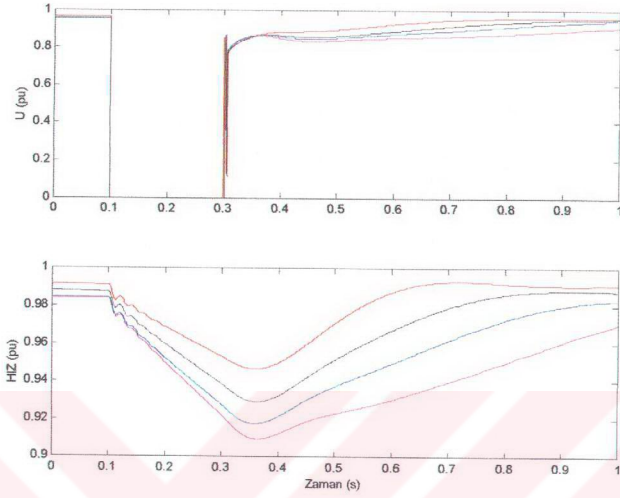
Yukarıdaki eğriler göstermiştir ki gerilim düşümü ve enerji kalitesi açısından sabit yük momenti kötü durumdur. Her üç durumda (%70, %100 ve %80) da arıza sonrası gerilim düşümü sabit momentli motorda daha uzun sürmüş ve bu süreçte gerilim diğer tiplere göre düşük olmuştur. Sabit momentli motorda hız düşümü en fazla olurken, motorun ivmelenerek eski hızına gelmesi daha geç gerçekleşmiştir. En kötüden en iyiye doğru sıralama yapmak gerekirse, ikinci olarak kuadratik (2.tip) motoru, üçüncü olarak 4.tip (Şekil 3.27) ve son olarak yani en iyi durumda olan motor ise 3.tip karakteristiğe sahip motor gelmektedir. Sabit momentli motorlar genellikle alçak gerilimde kullanılan asansör, vinç motorlarıdır. Güçleri ve ataletlerinin küçük olması gerilim düşümlerine karşı duyarlılıklarını arttırmaktadır.



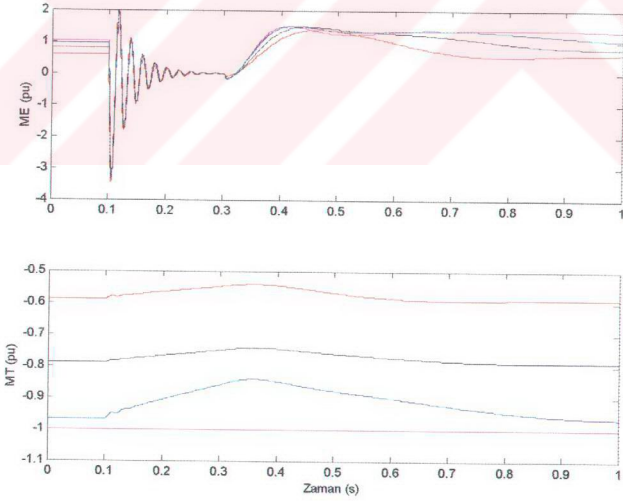
Şekil 3.28 Yük momenti-kayma değişimi (3.tip karakteristik)



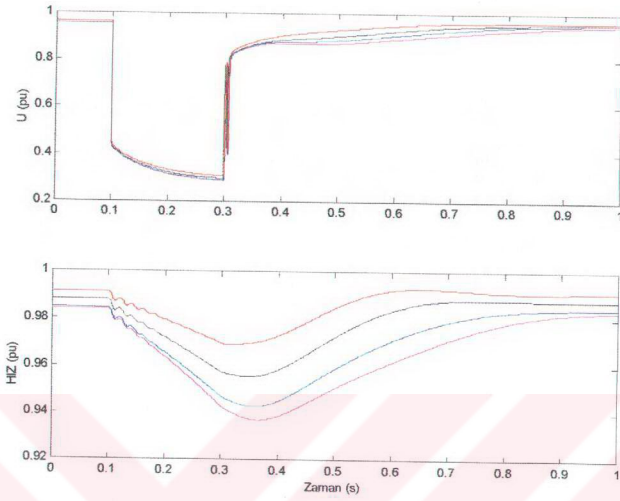
Şekil 3.27 Yük momenti-kayma değişimi (4.tip karakteristik) [36]



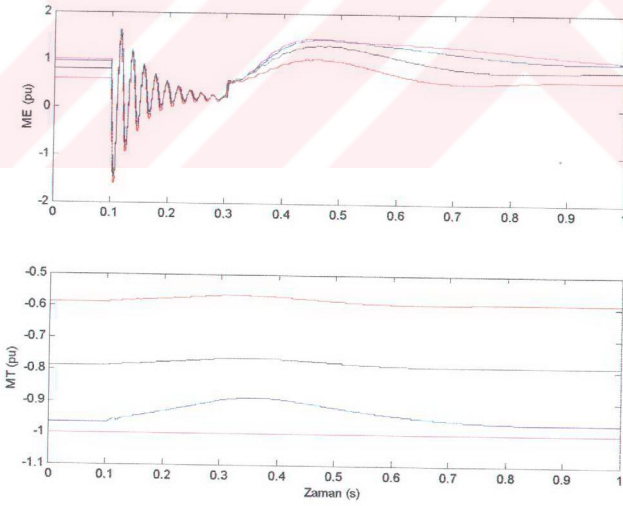
Şekil 3.28 Motor terminalindeki kısa devre sırasında gerilim ve hız değişimi



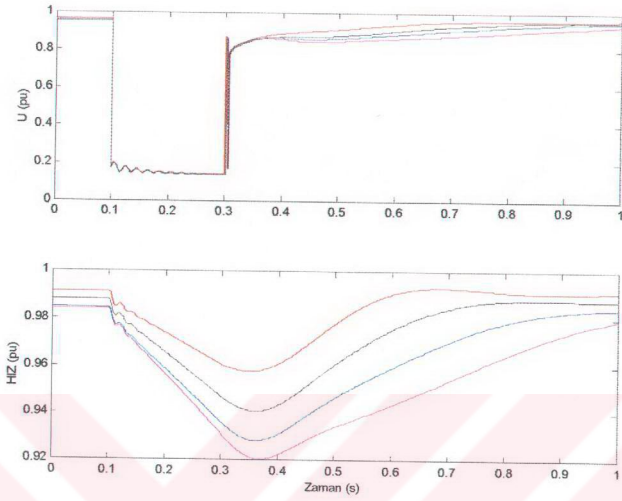
Şekil 3.29 Motor terminalinde kısa devre sırasında moment değişimleri



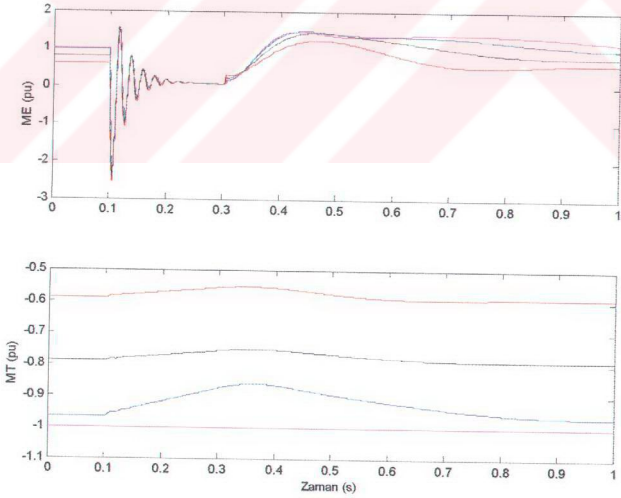
Şekil 3.30 İletim sistemi arızası sırasında gerilim ve hız değişimleri



Şekil 3.31 İletim sistemi arızası sırasında moment değişimleri



Şekil 3.32 B2_11 barasındaki kısa devre sırasında gerilim ve hız değişimi

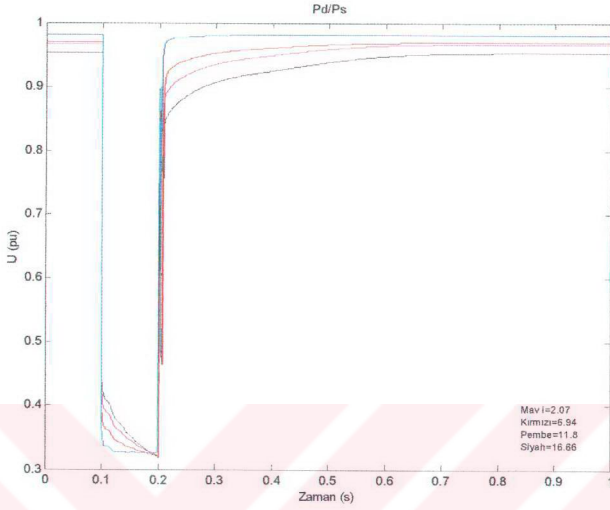


Şekil 3.33 B2_11 barasındaki kısa devre sırasında moment değişimleri

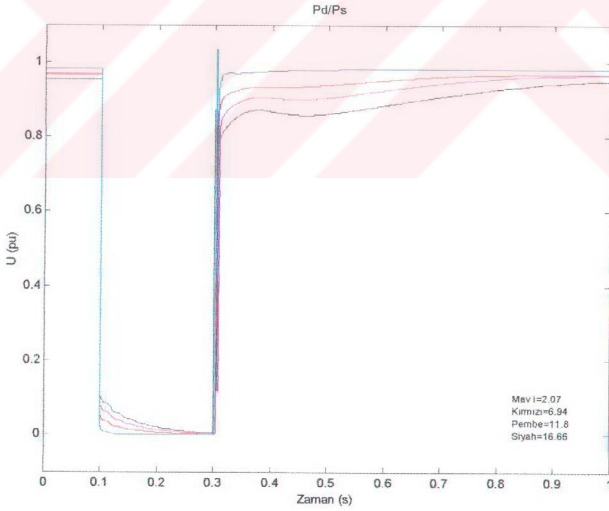
3.5. Dinamik/Statik Yük Oranının Etkisi

Endüstriyel dağıtım sistemlerindeki yüklerin karakteristikleri ile kısa süreli gerilim düşümleri sırasında ve sonrasındaki davranışları arasındaki yakın bir ilişki vardır. Statik yüklerde arıza sona erdikten hemen sonra gerilim önceki değerine ulaşırken, asenkron motorlarda daha önce de bahsedilen arıza sonrası gerilim düşümü olayı yaşanmaktadır. Genel olarak yükler arasında motorların çokluğu yani dinamik özelliğin fazlalığı dağıtım sistemi ortak besleme barasındaki arıza sonrası davranışları etkiler. Bu amaçla örnek sistem üzerindeki D_11 barasında bulunan ve her biri 9 MW gücündeki üç OG motorunun sırayla devre dışı kalması durumunda OBN_11 barasındaki gerilim değişimi gözlenmiştir. Örnek sistemdeki endüstriyel dağıtım tesisi (OBN_11 ve sonrası) bu üç motor devrede iken çekilen toplam aktif güç 30.83 MW ve statik yükler (hepsi sabit güç yükü) 1.85 MW'tır. İlk olarak üç motorda devrede iken yani Pd/Ps oranı 16.66 iken ve daha sonra teker teker üç motor devre dışı iken benzetimler yapılmıştır. Motorlardan biri devre dışı iken bu oran 11.8, ikisi devre dışı iken 6.94 ve hepsi devre dışı iken 2.07'dir. Aşağıdaki eğrilerde görüldüğü gibi dinamik motor yükleri ne kadar çok olursa arıza sonrası gerilim düşümü o kadar uzun sürer ve bu esnada gerilim düşümü fazla olur.

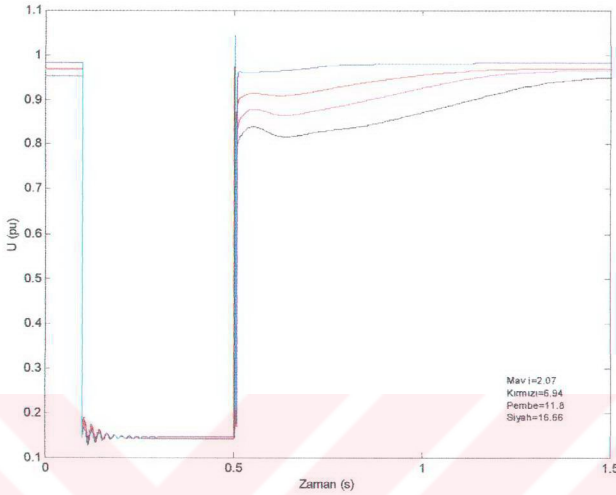
Bu amaçla üç farklı noktada simetrik üç faz arızası yapılmıştır. İlk olarak önceki kısımlarda iletim sistemi arızası olarak adlandırılan 154 kV havai hattın birinin orta noktasındaki arıza sırasında OBN_11 barasında meydana gelen gerilim düşümü ve sonrası Şekil 3.34'deki gibi elde edilmiştir. Dağıtım sistemi arızası (35 kV) ve iç arıza (B2_11) durumlarına ait gerilim düşümü dalga şekli aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 3.34 OBN_11 barası etkin faz-faz gerilimi değişimi (iletim arızası)



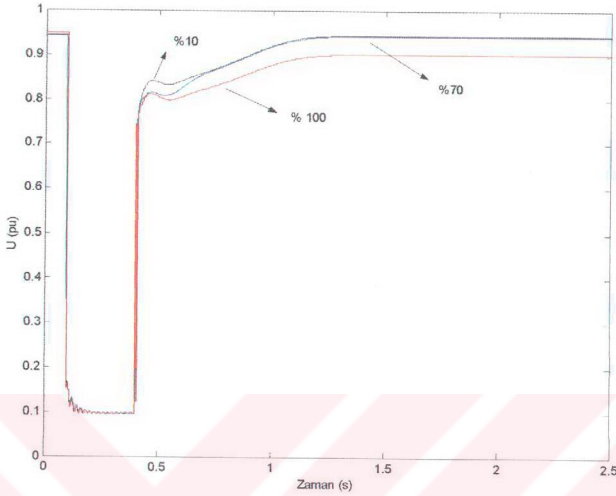
Şekil 3.35 OBN_11 barası etkin faz-faz gerilim değişimi (Dağıtım sistemi arızası)



Şekil 3.36 OBN_11 barası etkin faz-faz gerilimi değişimi (arıza yeri : B2_11)

3.6. Motor Yükleme Oranının Etkisi

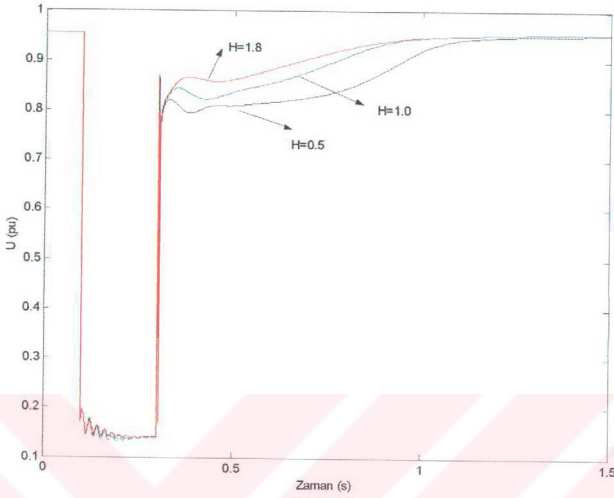
Motorun mekanik yüklenme miktarı arttıkça arıza sonrasındaki gerilim düşümü çok az artmakta ancak oturma süresinde bir değişme olmamaktadır. Boşta ve tam yükte çalışma durumlarında arıza sonrasındaki gerilim düşümü olayı sırasında gerilim düşümleri arasında 0.1 pu civarında bir fark vardır. Bu nedenle motor yüklenme miktarının, kısa süreli gerilim düşümü ve sonrasında motor davranışına olumlu yada olumsuz bir katkısı olduğu söylenemez. Şekil 3.37'de üç farklı yüklenme durumuna ait gerilim düşümleri görülmektedir. Bu değişim B2_11 barasındaki üç faz toprak kısa devresi sonucu elde edilmiştir.



Şekil 3.37 Farklı yüklenme oranlarında 400 V'luk motorun uç gerilimi değişimi

3.7. H-Atalet Sabitinin Etkisi

Atalet sabiti büyük olan motorlar (özellikle OG motorları) gerilim düşümünden daha az etkilendikleri görülmüştür. Çünkü atalet sabitinin büyüklüğü motorun fiziksel boyutlarıyla ilgilidir. Şekil 3.38'deki benzetim sonuçlarından da görüldüğü gibi aynı motor için benzetimlerde atalet sabiti olarak 1.8, 1.0 ve 0.5 kullanılmış ve sonuçta ataleti küçük olan motorun daha çok etkilendiği görülmüştür. Bu bölümde de yine B2_11 barasında meydana gelen üç faz toprak kısa devresi durumu incelenmiştir.



Şekil 3.38 Farklı atalet sabitlerinin gerilim düşümüne etkisi (11 kV motor için)

Arıza sonrası gerilim daha düşük ve arıza sonrası gerilim düşümü süresi diğerlerine göre daha uzun sürmektedir. Bu sonuçların ışığında büyük güçlü pompa ve fan motorları enerji kalitesi açısından daha avantajlıdır denilebilir. Gerilim düşümlelerinden daha az etkilenirler. Genelde bu tür motorlar, orta gerilim motorlarıdır. Bunun yanı sıra alçak gerilimde ve orta gerilimde kullanılan daha küçük güçlü ve boyutlu asenkron motorlar gerilim düşümünden daha çok etkilenirler.

BÖLÜM 4. YEREL ELEKTRİK SANTRALLERİNİN KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİNE ETKİSİ

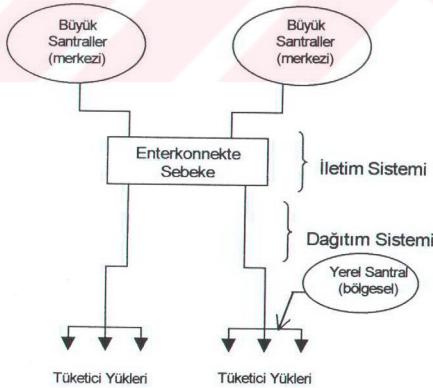
4.1 Yerel Elektrik Santralleri

Günümüzde yaygın olarak enerji üretiminin yapıldığı büyük güçlü elektrik santrallerinin bulunduğu merkezi enerji üretimine alternatif olarak, 1970'lerden sonra yaygınlaşan bir başka seçenek ise dağıtım sistemine paralel bağlı, küçük güçlü santrallerle elektrik enerjisi üretimidir. Özellikle ABD ve bazı Avrupa ülkelerinde özel sektöre tanınan kolaylıklar sonucunda pek çok şirket kendi özel santralini kurmaya özendirilmiştir. Kurulan bu santraller daha çok kendi tesislerinin gereksinimi olan enerjiyi üretmek için tasarlanmış olduklarından küçük ve orta güç seviyelerinde tesis edilmişlerdir [37].

Literatürde bu konuda yapılan çalışmalarda kullanılan terminolojide kısmen bir standart sağlanmakla beraber farklı ülkelerde farklı terimler kullanılmaktadır. Anglo-Amerikan ülkelerinde '*Embedded Generation (EG)*', Kuzey Amerika'da '*Distributed*' yada '*Dispersed Generation (DG)*', bazı Avrupa ülkeleri ile Asya ülkelerinde '*Decentralized Generation*' terimleri daha yaygındır [38]. Türkçe'de bu konudaki çalışmalarda '*Yerel Elektrik Santrali (YES)*' [37] terimi kullanılmaktadır. Endüstriyel santraller, tüketici santralleri, birleşik ısı-güç santrali ve özel santraller olmak üzere farklı kullanım amacı ve yerine sahip olmalarına karşın, bulundukları bölgenin ihtiyacını karşılamakta olmaları ve üretilen enerjinin dağıtım sistemi içerisinde dağıtılmasından dolayı yerel elektrik santrali tanımı oldukça uygun bir tanımdır. Bu santraller dağıtım şebekesiyle paralel çalışabilmekte, gerektiğinde tek başına şebekeden ayrı olarak çalıştırılabilmektedirler [37]. Ayrıca şebekeye sadece aktif güç vermek amacı öngörülmüştür, ancak bazı özel durumlarda reaktif güç temini yerel elektrik santrallerinden de sağlanabilmektedir. Genel olarak güç faktörü 1 yada 1'e çok yakın olarak çalıştırılmaktadır.

Merkezi santrallere göre küçük boyutlu olan YES olarak kombine çevrim, yenilenebilir enerji, küçük su santrali, rüzgar ve güneş enerjisi gibi enerji üretim şekilleri öngörülmektedir. 1960'ların başlarında küçük güçlü asenkron ve senkron generatörlerin kapasiteleri 300 kW ile 2 MW arasında değişmekte ve bunlar 11 kV luk orta gerilim şebekesine bağlanmaktaydılar. 1970'lerde ve 80'lerde çok sayıda mini hidrolik üniteler inşa edilerek, şebekeden uzakta bulunan kırsal yerleşim yerlerinin enerji ihtiyacı temin edilmiştir.

Ring (halka) dağıtım sistemlerinin genişlemesiyle, nehirlerin ve küçük akarsuların üzerine nehir santralleri kurulması kaçınılmaz bir hal almıştır. Bu tür nehir santralleri, orta gerilimdeki yerel dağıtım sistemlerine bağlanmışlardır. 1990'larda bağımsız (özel) güç üretiminin ortaya çıkmasıyla enterkonnekte sisteme bağlı doğal gaz esaslı güç santralleri yapılmaya başlanmıştır. Ucuz bir enerji kaynağı olarak ortaya çıkan doğal gazın üretiminin artması, doğal gaz santrallerinin artmasına yol açmıştır. 1990'ların ortalarında kojenerasyon ve yerel santraller, enerji sektöründe önemli bir etkili bir tercih olarak ortaya çıkmıştır [39]. Şekil 4.1'de yerel santralin enerji üretimindeki yerini ifade eden şema görülmektedir.



Şekil 4.1 Bir yerel santralin enterkonnekte sistem içerisindeki yerini

4.2 Yerel Elektrik Santrallerinin Sınıflandırılması

Yerel elektrik santrallerinin sınıflandırılması kullanılan kriterlere göre farklı şekillerde yapılmaktadır.

- i. Kullanım amaçlarına göre,
- ii. Dağıtım sistemi ile arasındaki bağlantı şekline göre,
- iii. Kurulu güçlerine göre,
- iv. Kullanılan yakıt ve teknoloji türüne göre,

4.2.1 Kullanım amacına göre sınıflandırma

Kullanım amacına göre dört yerel santral türünden söz edilebilir.

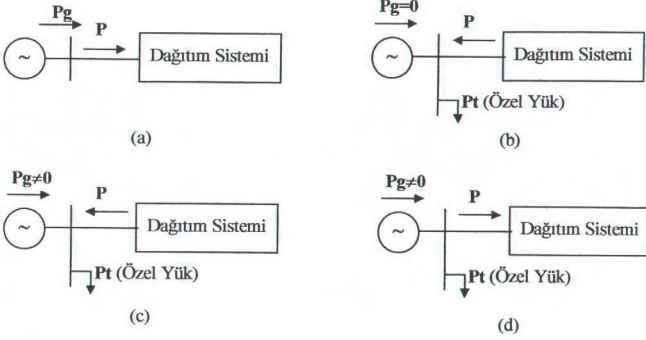
a) Özel teşebbüs tarafından hidrolik, organik artıklar, güneş enerjisi, doğal gaz, rüzgar enerjisi vb kullanılarak yapılan ve şebekeye enerji satan güç santralleridir. Bu tür özel santraller, enterkonnekte sisteme enerji verirler ve herhangi özel bir yükü beslemezler.

b) Yerel santral yedek olarak kullanılmaktadır. Bu generatör, tüketicinin tüm yükünü karşılayacak şekilde tasarlanmaktadır. Ancak tüketici, yükün tamamını yine şebekeden karşılamakta, generatör ise yedek olarak tutulmaktadır.

c) Tüketicinin enerji ihtiyacının önemli bir kısmı, yerel santral tarafından karşılanmakta, geri kalanı ise yine şebekeden alınmaktadır.

d) Kurulan yerel santral gücü, tüketicinin ihtiyaçlarına göre büyük tasarlandığından, santral hem tüketiciyi ve hem de şebekeyi beslemektedir.

Şekil 4.2’de yukarıdaki dört santral tipine ait şekiller verilmektedir.



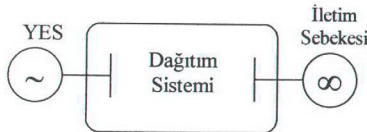
Şekil 4.2 Yerel santraller ile enerji üretimi

4.2.2 Dağıtım sistemi ile arasındaki bağlantı şekline göre sınıflandırma

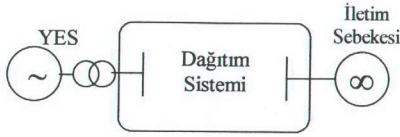
Dağıtım sistemi ile santral arasında dört farklı bağlantı şekli üzerinden bağlantı gerçekleştirilir.

Tip 1 : Generatör dağıtım sistemi geriliminde tasarlanmıştır. Uç gerilimi ile dağıtım sistemi gerilimi aynı olduğundan direkt olarak bağlantı yapılır. Şekil 4.3'de prensip şeması verilmektedir.

Tip 2 : Generatör ile paralel bağlandığı dağıtım sistemi farklı gerilim seviyelerine sahiptir. Bu nedenle bir transformatör üzerinden generatör çıkış gerilimi, şebeke gerilimi seviyesine getirilir. Şekil 4.4'te bu duruma ait prensip şeması verilmektedir. Özel sektör tarafından sadece şebekeye enerji satmak amacıyla kurulmuş olan bu tür santrallerin gücü 50-100 MW civarındadır. Bu tür enerji üretimi, bağımsız güç üreticileri (*Independent Power Producers*) olarak adlandırılır. Genellikle 66 kV ve üstündeki şebekeye bağlanırlar.



Şekil 4.3 Bağlantı şekli Tip 1

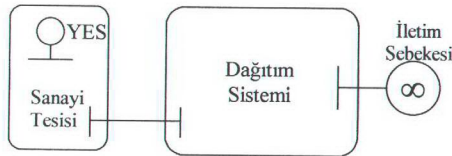


Şekil 4.4 Bağlantı şekli Tip 2

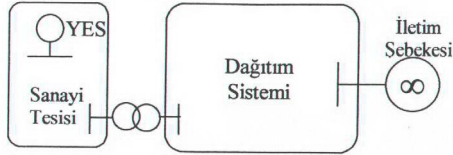
Tip 3 : Endüstriyel bir tesisin ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanmış, duruma göre şebekeyi besleyen yada beslemeyen yerel santralin direkt olarak dağıtım sistemine bağlanmasıdır. Generatör uç gerilimi ile dağıtım sistemi gerilimi aynıdır. Şekil 4.5’de bu bağlantı şekline ait bağlantı şeması verilmektedir.

Tip 4 : Tip 3’deki gibi, endüstriyel bir tesisin ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanmış, duruma göre şebekeyi besleyen yada beslemeyen yerel santralin transformatör üzerinden dağıtım sistemine paralel bağlanmasıdır. Generatör uç gerilimi ile dağıtım sistemi gerilimi farklıdır. Şekil 4.6’da bu bağlantı şekline ait prensip şeması verilmektedir.

Tip 3 ve Tip 4, sanayi tesislerinin içerisinde olup, öncelikli olarak o tesisin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak üzere tesis edilmişlerdir. Bazılarında şebekeye enerji satma durumu da söz konusudur. 34.5 kV, 11 kV, 6.6 kV gibi orta gerilimde şebekeye bağlanırlar. Daha düşük hatta alçak gerilimde sisteme bağlanan özel generatörler vardır, ancak bunlar çok küçük güçlüdür (1 MW’tan küçük). Özellikle enerji naklinin zor olduğu küçük yerleşim yerlerinde kurulabilmektedirler.



Şekil 4.5 Bağlantı şekli Tip 3



Şekil 4.6 Bağlantı şekli Tip 4

Bu bağlantı ara yüz türleri içerisinde, pek kullanılmayan olanı Tip 1'dir. Çünkü şebekeye sadece elektrik satmak üzere kurulan bu tür santrallerdeki generatörlerin çıkış gerilimi 11 yada 13.8 kV gibi değerlerdedir. Bu tür santraller genelde 34.5 kV gerilim seviyesinde sisteme bağlanırlar ve bunun için direkt bağlanamazlar. Yine lokal enerji tüketimini karşılamak için anma gücü 10 MW'tan küçük santrallerin ise uç gerilimi 3.3 kV veya 6.6 kV'tur. Bunlarda şebekeye direkt bağlama imkanı vermezler. Bu yüzden sadece enerji satmak amaçlı kurulan santraller için Tip 2 tercih edilmektedir. Endüstriyel tesislerde kullanılan yerel santralin bağlantı şeklini gösteren bu iki tür arasında en çok tercih edileni Tip 3 yani direkt bağlantıdır [39].

4.2.3 Kurulu güçlerine göre sınıflandırma

Bu tür sınıflandırmaya göre yerel santraller küçük, orta ve büyük güçlü santraller olarak adlandırılmaktadırlar [38]. Farklı güçlere göre bu sınıflandırmanın sınırlarında değişik görüşler olmasına rağmen büyük oranda kabul edilen güç sınırları aşağıdaki Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kurulu güce göre sınıflandırma

Türü	Kurulu Güç Aralığı
Mikro	$\approx 1 \text{ W} - 5 \text{ kW}$
Küçük	$5 \text{ kW} - 5 \text{ MW}$
Orta	$5 \text{ MW} - 50 \text{ MW}$
Büyük	$50 \text{ MW} - \approx 300 \text{ MW}$

4.2.4 Kullanılan yakıt ve teknoloji türüne göre sınıflandırma

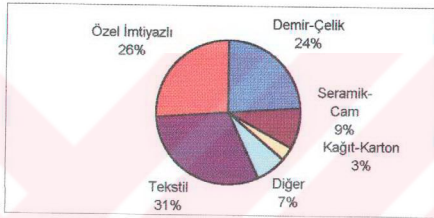
Yerel santraller içerisinde kullanılan yakıt açısından iki temel sınıflandırmadan söz edilebilir. Bunlardan ilki yenilenebilir enerji kaynakları olarak tanınan çevreye etkisi daha az ve daha ucuz kaynaklardır. Rüzgar, güneş, jeotermal, küçük hidrolik santraller ve yakıt hücre teknolojisi yenilenebilir enerji kaynakları grubuna dahildir. Bir diğer grup ise petrol ürünleri (fuel oil, LPG, nafta), doğal gaz ve katı yakıtlı çalışan elektrik santralleridir. Bu tür enerji kaynakları ile yerel çapta küçük santrallerin yanı sıra büyük ve merkezi santrallerde kurulabilmektedir. Özellikle katı yakıt ve doğal gaz santralleri ülkemizin enerji üretiminde önemli bir paya sahiptir. Ancak özellikle birleşik ısı-güç santrali yada bilinen adıyla kojenerasyon santralleri endüstriyel tesisler tarafından öncelikle iç ihtiyacın karşılanmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tablo 4.2’de günümüz teknolojisinde ulaşılan kurulu güç değerleri verilmektedir.

Tablo 4.2 Yerel santraller için ulaşılan teknoloji

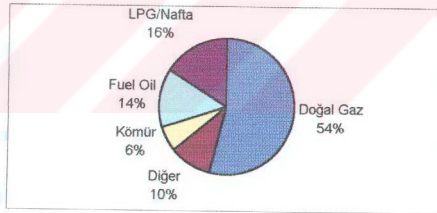
Teknoloji	Ünite başına ulaşılan güç değerleri
Kombine çevrim gaz santralleri	35-400 MW
İçten yanmalı motorlar	5 kW – 10 MW
Mikro Türbinler	35 kW- 1 MW
Küçük Hidrolik Türbinler	1-100 MW
Mikro Hidrolik Türbinler	25 kW-1 MW
Rüzgar Türbinleri	200W-3MW
Güneş enerjisi panelleri	20W-100kW
Biomass	100 kW-20 MW
Yakıt hücresi	1kW-5MW

2000 yılı verilerine göre Türkiye’deki rüzgar santrallerinin kurulu gücü 150 MW iken dünyada 12000 MW’ı aşmıştır [40]. Çevreye hiçbir olumsuz etkisinin olmaması ve ilk yatırım maliyetinden sonra işletme maliyetinin düşük olması rüzgar türbinlerini cazip hale getirmiştir. Ancak üretilen gerilimde dalgalanmalar ve frekans değişimleri olabilme ihtimalinden dolayı şebeke ile paralel bağlantısında harmonik filtreler ve frekans dönüştürücülerin kullanılması gerekmektedir. Birleşik ısı-güç santralleri ise yüksek verimliliği ile tercih edilen bir enerji üretim santrali türüdür.

Özellikle endüstriyel tesislerde otoprodüktör amaçlı kurulmuş çok sayıda birleşik ısı-güç (kojenerasyon) santrali bulunmaktadır. 2001 yılı verilerine göre işletmede olan kojenerasyon santralleri kurulu gücü 2397 MW' a ulaşmıştır [41]. Bu da yaklaşık ülke kurulu gücünün %10'una karşı gelmektedir. Projesi ve yapımı süren santrallerinde devreye girmesiyle bu oranın 2005 yılında %18'e ulaşacağı tahmin edilmektedir. Kağıt ve karton fabrikalarında, rafinerilerde ve tekstil sektöründe kojenerasyon santrallere yönelme vardır. Şekil 4.7 ve 4.8'de Türkiye'deki yerel santrallerin sektörlere dağılımı ve kullanılan yakıt türlerinin oranını gösteren diyagramlar verilmiştir.



Şekil 4.7 Türkiye'de Yerel Elektrik Santrallerinin Sektörlere Göre Dağılımı



Şekil 4.8 Türkiye'de Yerel Elektrik Santrallerinin Kullanılan Yakıtı Göre Dağılımı

4.3 Yerel Elektrik Santrallerinde Enerji Üretimi ve Generatörler

Alternatif akım elektrik enerjisi üretiminde iki tür generatör bulunmaktadır. Bunlar asenkron ve senkron generatörlerdir. Yerel elektrik santrallerinde büyük oranda senkron generatörler tercih edilmektedir. Çünkü günümüzde senkron generatörlerin güç aralığı asenkron generatöre göre daha geniştir. Asenkron generatörler ile daha küçük boyutlu enerji üretimi gerçekleştirilebilirken, senkron generatörler, istenen

büyüklikte enerji üretimi gerçekleştirmek için daha elverişlidir. Asenkron generatörlerde reaktif gücün şebekeden yada generatör terminaline paralel bağlanan bir kapasitörde sağlanması [42] yanısıra yapım maliyetinin senkron generatöre göre yüksek olması bir dezavantajdır.

Dinamik analizlerde senkron generatörlerde yük açısı kavramı, asenkron generatörlerde ise hız ve kayma kavramı ön plana çıkmaktadır. Generatörlerin kararlılığı ve enterkonneksiyonu açısından bu iki parametrenin izlenmesi gerekmektedir. Bu tezde sadece senkron generatörlü yerel santraller incelenmektedir

4.4 Senkron Generatör Modeli

Yerel enerji santrallerindeki generatörlerin modellenmesinde Şekil.9'taki basit tek hat şeması görülen tek makinalı sonsuz baralı güç sistemi modeli kullanılır [43,44]. Generatörün bağlı olduğu dağıtım sistemi, generatör gücüne oranla oldukça büyük güçlüdür ve söz konusu model gerçek sisteme en yakın modeldir.



Şekil 4.9 Dağıtım şebekesine bağlı yerel generatör tek hat şeması

Senkron generatör modelini incelerken basit model denilen salınım denklemi ile ayrıntılı yada dinamik model olarak bilinen modeller incelenmelidir. Aşağıdaki bölümlerle bu modellere ilişkin denklemle verilmektedir.

4.4.1 Salınım denklemi

$$\frac{2H}{w_b} \frac{dw_r}{dt} = P_M - P_E - D.w_r \quad (4.1)$$

Burada, H , eylemsizlik zaman sabitini,
 w_b , makine nominal hızını,

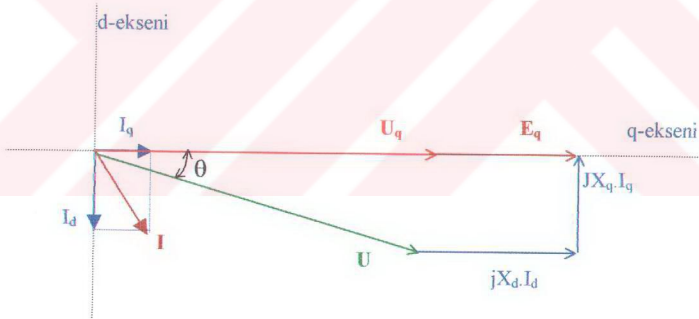
- w_r , makine hızını
 P_M , Mekanik giriş gücünü,
 P_E , elektriksel gücü,
 D , sönüm katsayısını

İfade etmektedir.

Basitleştirilmiş senkron makine modelinde mekanik giriş gücü ile elektriksel güç sabit kabul edilir. Yani türbin çıkış gücünün sabit olduğu var sayılır. Yine bu modelde uyarma geriliminin de değişmediği yani sabit uyarmalı olduğu kabulü geçerlidir [45].

4.4.2 Sürekli ve geçici halde güç bağıntıları

Sürekli haldeki bir senkron generatörün fazör diyagramı şu şekilde verilebilir [31,46].



Şekil 4.10 Sürekli çalışma koşullarındaki senkron makinenin fazör diyagramı

Şekil 4.10'daki fazör diyagramdan aşağıdaki bağıntılar elde edilmektedir.

$$\bar{E}_q = \bar{U} + jX_d \cdot I_d + jX_q \cdot I_q \quad (4.2)$$

$$U_d = I_q \cdot X_q \quad (4.3)$$

$$U_q = E_q - I_d \cdot X_d \quad (4.4)$$

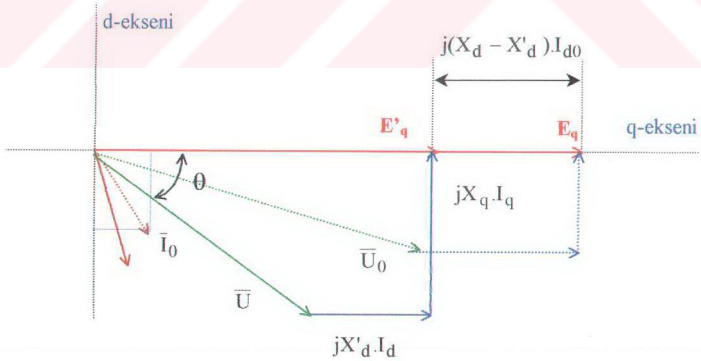
Sürekli halde makinanın aktif ve reaktif gücü ise (4.5) ve (4.6) 'da verilmektedir.

$$P_E = \frac{E_q \cdot U}{X_d} \sin(\theta) + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta) \quad (4.5)$$

$$Q_E = \frac{E_q \cdot U}{X_d} \cos(\theta) - U^2 \left(\frac{\cos^2 \theta}{X_d} + \frac{\sin^2 \theta}{X_q} \right) \quad (4.6)$$

Eşitlik (4.5)'teki P_E ifadesinin ikinci terimi relüktans gücü olarak adlandırılır kutupların çıkık olmasından dolayı eklenmiştir. Turbo-alternatörlerde ikinci terimler göz ardı edilmektedir [31,46].

Geçici olaylar sırasında yukarıdaki eşitlikler geçerliliğini kaybetmektedirler. Senkron makinanın geçici haldeki fazör diyagramı Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11 Geçici halde senkron makinanın fazör diyagramı

Yukarıdaki diyagramda kısa çizgiler sürekli hal, sürekli çizgiler geçici hal fazörlerine aittir. 0 alt indeksi geçici hal öncesindeki sürekli hal değerleridir.

Geçici hal modeli dinamik rotor salınımlarında makinanın modellenmesi için kullanılmaktadır. Burada geçici hale geçişe yol açacak olan bozucu etki öncesinde makinanın sürekli halde olduğu var sayılır. Buna göre geçici olay sırasında, makine akım ve gerilimlerinde küçük değişimler olduğu düşünülerek lineerleştirme yapılır. Buna göre geçici halde makinanın akım ve gerilimleri aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$I_d = I_{d0} + \Delta I_d \quad (4.7)$$

$$I_q = I_{q0} + \Delta I_q \quad (4.8)$$

$$U_d = U_{d0} + \Delta U_d = I_q \cdot X_q \quad (4.9)$$

$$U_q = U_{q0} + \Delta U_q = U_{q0} - \Delta I_q \cdot X'_d \quad (4.10)$$

Burada E_q' nun geçici olay sırasında değişmediği var sayılır. Eşitlik (4.10)'da d-bileşen geçici reaktans (X'_d) kullanılmasının nedeni, rotor devresinin geçici olay sırasında d eksenli reaktansının daha küçük olmasıdır. Daha yavaş gelişen dinamik olaylarda senkron reaktansın d bileşeni kullanılabilir. Çok daha hızlı gelişen dinamik olaylarda ise alt geçici reaktansın (X''_d) kullanılması gerekecektir. q-ekseninde ise her çeşit dinamik olayda (hızlı veya yavaş) reaktans değeri aynı kalmaktadır. Tablo 4.3'de değişik senkron makinalar için reaktans değişimleri verilmektedir [31,43].

Tablo 4.3 Tipik Senkron Makine Reaktans Değerleri

	Çıkık Olmayan Kutup	Çıkık Kutup
X_d (pu)	1.0 – 2.3	0.6 – 1.5
X_q (pu)	1.0 – 2.3	0.4 – 1.0
X'_d (pu)	0.15 – 0.4	0.2 – 0.5

Buna göre geçici reaktansın kullanıldığı olaylar için q-ekseni gerilimi reaktans arkası gerilimleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$U_q = E'_q - I_d \cdot X'_d \quad (4.11)$$

$$E'_q = E_q - (X_d - X'_d) I_{d0} \quad (4.12)$$

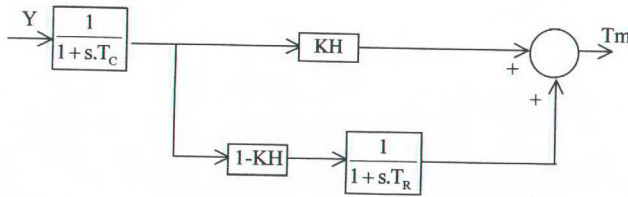
Geçici durum esnasında E'_q 'nun sabit kaldığı kabul edilmiştir. Geçici durum sırasında X_d yerine X'_d ve E_q yerine de E'_q kullanıldığı düşünülürse eşitlik (4.4) ve (4.11) in özdeş olduğu görülür. Benzer değişiklikler (4.5) ve (4.6)'daki güç bağıntılarında yapılırsa, geçici haldeki makine güçleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$P'_E = \frac{E'_q \cdot U}{X'_d} \sin(\theta) + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X'_d} \right) \sin(2\theta) \quad (4.13)$$

$$Q'_E = \frac{E'_q \cdot U}{X'_d} \cos(\theta) - U^2 \left(\frac{\cos^2 \theta}{X'_d} + \frac{\sin^2 \theta}{X_q} \right) \quad (4.14)$$

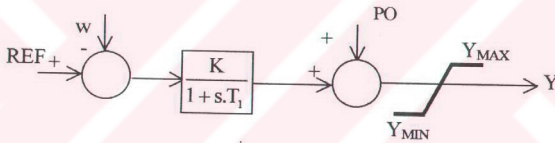
4.4.3 Türbin-regülatör ve uyarma sistemi modeli

Günümüzde doğal gaz üretiminin artması ve birtakım avantajları nedeniyle doğal gaz santralleri yaygınlaşmıştır. Gerek büyük güçlü merkezi üretimin bir parçası ve gerek se küçük güçte yerel üretimi sağlayacak şekilde kullanım alanı bulmuştur. Doğal gaz ile enerji üretiminin üstünlükleri ve olumsuz yönleri mevcuttur. Hava kirliliği yönünden katı yakıt yada diğer sıvı yakıtlı olan santrallere oranla daha az kirlilik kaynağı olsa da kükürt ve diğer partiküllerin iyi süzülmemesi sonucu bir takım problemler rapor edilmiştir. NO_x miktarı, ısınma problemi ve sera etkisi rapor edilen zararlı etkilere en önemlileridir. Bunun yanı sıra buhar türbinleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel olarak benzetimlerde buhar türbini ve regülatörü modelleri kullanılmıştır. Kullanılan türbin-regülatör sistemi blok diyagramı aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.12 Tek ön ısıtmalı buhar türbini yaklaşık modeli [16]

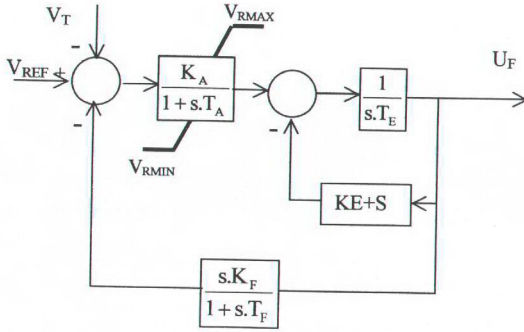
Burada, Y : Giriş (Valf-kapak konumu)
 Tm : Çıkış (Mekanik moment)
 T_C : Buhar zaman sabiti
 KH : Yüksek basınç türbini güç kesiti
 T_R : Ön ısıtma zaman sabiti



Şekil 4.13 Hız regülatörü blok diyagramı [16]

Burada ; w : Giriş (Makine hızı)
 Y : Çıkış (Valf-kapak konumu)
 Y_{MAX}, Y_{MIN} : Valf konumu alt ve üst sınırları
 K : Efektif hız regülasyon sistemi kazancı
 T₁ : Eşdeğer zaman sabiti

Uyarma sistemi modeli olarak IEEE tarafından standart olarak kabul edilen modellerden [47] olan Type-1 modeli tercih edilmiştir.



Şekil 4.14 Uyarma sistemi modeli

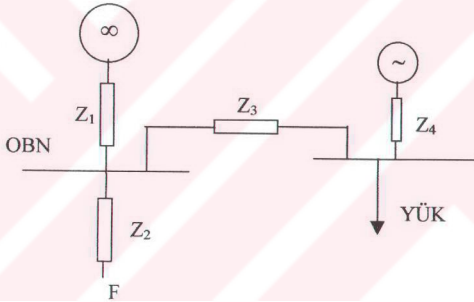
Burada ; V_T , generatör uç gerilimi,
 K_A , regülatör (AVR) kazancı,
 T_A , regülatör (AVR) zaman sabiti,
 K_E , uyarma kazancı
 T_E , uyarma zaman sabiti,
 K_F , regülatör kararlılaştırıcı devresi kazancı
 T_F , regülatör kararlılaştırıcı devresi zaman sabiti,
 S_E , doyma

4.5 Yerel Generatörlerin Kısa Süreli Gerilim Düşümlerine Etkisi

Dağıtım sistemlerine bağlanan yerel generatörler gerilim düşümlerini azaltırlar. Dağıtım sistemlerindeki belirli yüklerin beslenmesinde kullanılan yerel santrallerin gerilim düşümünü hafifletmesi iki şekilde mümkündür. Bunlar beslenen şebekedeki arızalar ve sistemin geri kalan kısmındaki arızalar olarak ele alınabilir. Yerel santraller dağıtım sistemine bağlandıklarında beslenen yük tarafından bakıldığında dağıtım barasının arıza seviyesini yükseltir. Böylece dağıtım sisteminde meydana gelen kısa devrenin şebekenin geri kalan kısmına olan etkisini bir ölçüde azaltır yani arıza seviyesi artan şebeke, meydana gelen arızadan daha az etkilenir. Özellikle zayıf güç sistemlerinde arıza seviyesinin yükseltilmesinin gerilim düşümüne etkisi çok

fazladır. Fakat kuvvetli sistemlerde, arıza seviyesi fazla arttırılamaz. Çünkü koruma cihazlarının izin verilen maksimum kısa devre akımı sınırlarını aşma riski vardır.

Yerel santraller ayrıca, sistemin geri kalanında meydana gelen arızalar sonucu oluşan gerilim düşümlerini de hafifletir. İletim sistemi ve dağıtım sistemin diğer bölümlerinde meydana gelen arızalar yükler açısından ciddi sorunlara yol açmaktadır. Arıza sırasında, generatör kendi yerel barasının gerilimini korumak için arızayı besler. Şekil 4.15’de verilen eşdeğer devre yardımıyla bu etkileri nitelemek mümkündür [17]. Bu devre de bulunan, Z_1 empedansı, OBN barasından görülen kaynak empedansını, Z_2 , arıza yeri (F) ile OBN arasındaki empedansı, Z_3 , generatör barası ile OBN arasındaki empedansı ve son olarak Z_4 empedansı ise arıza sırasında (geçici hal empedansı) generatörün empedansını göstermektedir [3].



Şekil 4.15 Yerel santralin bulunduğu sistemin eşdeğer devresi

Generatörün bulunmadığı bir sistemde, yük gerilimi, OBN barasındaki gerilime eşit olmaktadır. Sisteme bir generatör ilave edildiğinde ise gerilim düşümü süresince yük gerilimi generatör barasındaki gerilime eşit olmaktadır [17]. Buna göre generatör barasından görülen gerilim düşümü genliği aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$(1 - V_{SAG}) = \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} (1 - V_{OBN}) \quad (4.15)$$

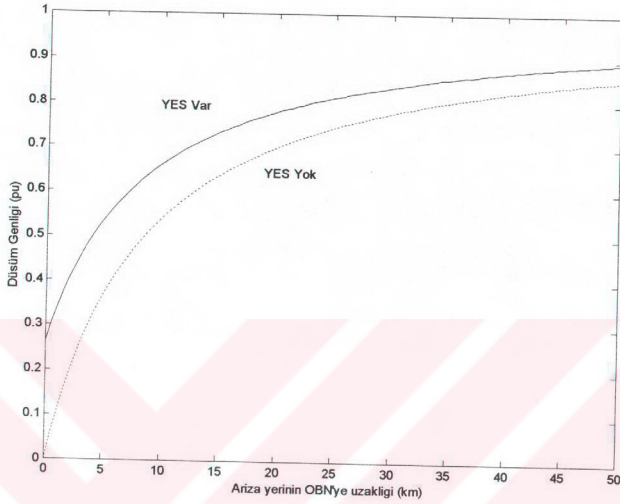
Generatör barasındaki gerilim azalması, OBN barasındaki azalmanın $Z_4/(Z_3+Z_4)$ katıdır. Böylelikle, generatör ile sistem arasındaki güç akışının daha zayıf olduğu bağlantılarda, OBN barasına olan mesafe (empedans) arttığında yada generatör empedansı daha büyük olduğunda yani daha büyük güçlü generatör bulunduğu gerilim azalması daha küçük olur. Generatör barasından sonraki sistemin geri kalan kısmının arızaya katkısı esas olarak besleme transformatörünün empedansı ile belirlenir. Bu durumda, gerilim düşümündeki azalma yaklaşık olarak generatörün bulunduğu baradaki arıza seviyesine katkısına eşittir. Yani arıza sırasında yerel generatörün varlığı (arızayı besleme oranı) nispetinde gerilim düşümünde azalma meydana gelir. Örneğin generatör arıza akımının %50 sini karşıladığında, % 60 olan gerilim düşümü oranı %30 a inebilir. Yani aynı arıza koşulları için yük gerilimi, generatör yokken nominal değerin %40ına kadar inerken, generatörün etkisiyle bu oran %70 inde kalmaktadır. Generatör barası gerilimi ise yük barası gerilimiyle aynı olduğundan yukarıda sözü edilen değerler cihazlar ve yüklerin uç gerilimlerinde değerler olabilmektedir. Bu ifadelerin sonucunda sıfır olmayan minimum düşü genliği kavramından bahsetmek gerekmektedir. OBN barasında meydana gelen bir arıza durumunda ki bu arıza yerel generatör açısından en riskli arıza yeridir, generatör terminal gerilimi aşağıda verilen minimum değerden aşağıya sözgelimi sifıra inmeyecektir.

$$V_{\text{MIN}} = \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \quad (4.16)$$

Arıza yerinin kritik mesafesi ise $Z_2=z.L$ şeklinde verilirse, aşağıdaki gibi olacaktır [10].

$$L_{\text{CRIT}} = \frac{Z_1}{z} \cdot \left\{ \frac{Z_4}{Z_1 + Z_3 + Z_4} \cdot \frac{V_{\text{CRIT}}}{1 - V_{\text{CRIT}}} - \frac{Z_3}{Z_1 + Z_3 + Z_4} \right\} \quad (4.17)$$

$Z_1=2,56 \Omega$, $z=0,3 \Omega/\text{km}$, $Z_3=6,42 \Omega$ ve $Z_4=18,5 \Omega$ olan örnek bir sistem için arıza yeri ile gerilim düşümü arasındaki değişim Şekil 4.16'te görülmektedir [17].

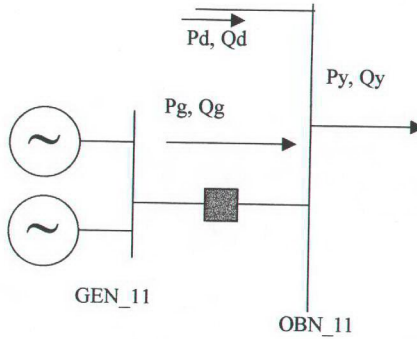


Şekil 4.16 YES'in gerilim düşümüne etkisi

Yerel elektrik santrallerinin dağıtım sisteminde meydana gelen kısa süreli gerilim düşümlerine etkisini göstermek amacıyla önceki bölümde verilen örnek test sistemi (bkz Şekil 3.1) kullanılacaktır.

4.6 Şebeke ile Paralel Çalışma Durumunda YES'in Gerilim Düşümüne Etkisi

Bu kısımda Bölüm 3'te incelenen örnek sistem (bkz Şekil 3.1) üzerinde benzetimler yapılmıştır. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi GEN_11 barasına iki adet 20 MVA'lık senkron generatör eklenmiştir.



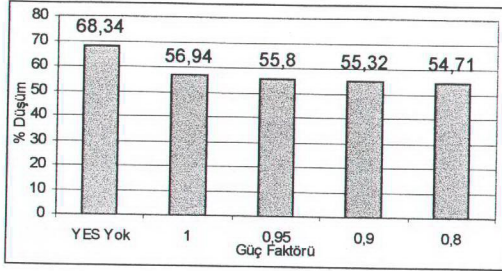
Şekil 4.17 YES'in dağıtım sistemine bağlantısı

Bu sistemde kullanılan senkron generatöre, türbin-regülatör sistemine ve uyarma sistemine ait tüm parametreler EK-A'da verilmiştir. Yerel generatörlerin kısa süreli gerilim düşümlerine etkisini incelemek için çeşitli koşullarda aşağıda sonuçları verilen benzetimler yapılmıştır. Bu bölümdeki benzetimlerde söz konusu kısa süreli gerilim düşümlerinin generatöre olan etkisi ve kararlılık problemleri dikkate alınmamıştır.

4.6.1 Güç faktörünün etkisi

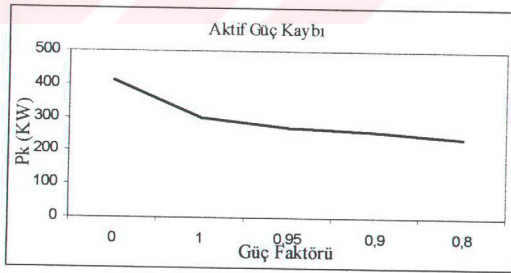
Genelde yerel elektrik santralleri dağıtım sistemine reaktif güç vermek zorunda değildir. Bu nedenle çoğu yerel generatörün güç faktörü genelde bire yakındır.

Şekil 4.17'deki örnek sistemde OBN_11 barasından yüklere giden toplam aktif güç 31.925 MW, reaktif güç ise 21.293 MVar'dır. Bu bölümde söz konusu yerel generatörlerin, OBN_11'den çekilen aktif gücün yarısını sağladığı çalışma noktasında ve reaktif gücün çeşitli değerleri için yani 1'den farklı güç faktörleri için analiz yapılmıştır. İletim sistemi (SBK-SBK154 hatlardan birinin orta noktası) üzerinde 3F kısa devresi meydana getirilmektedir. Söz konusu kısa devre 150 ms sürmektedir. Yerel santralin güç faktörünün 1, 0.95, 0.90 ve 0.80 olduğu durum için meydana gelen gerilim düşümü ve hat kayıplarındaki değişimi aşağıdaki eğrilerde verilmiştir.

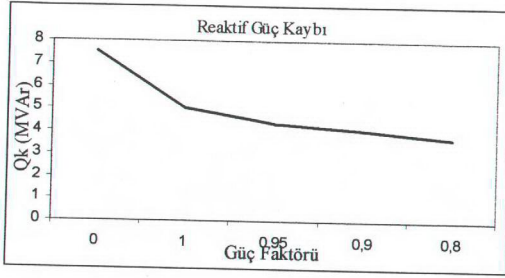


Şekil 4.18 Farklı güç faktörleri için YES'in KSGD'lerine etkisi

Görüldüğü gibi YES yok iken ve devrede olması durumları arasında %12-14 oranında iyileşme vardır. Ancak farklı güç faktörleri altında senkron generatörün şebekeyi beslediği durumlarda iyileşme 1-2 puan seviyesindedir. Pratikte senkron generatörün dağıtım sistemi ile paralel çalışması durumunda güç faktörünün 1 yada 1'e çok yakın olması istenir. Yani yerel santralin sadece aktif enerjiyi karşılaması istenir. Bu nedenle güç faktörünün 0.8 gibi düşük değerlere inmesi istenmediği için diğer durumlar arasında (1, 0.95, 0.9) dikkate alınacak bir farkın olmadığı görülmektedir. Ayrıca bu durumlar için sistemin tamamındaki aktif ve reaktif kayıp eğrilerinden de görüleceği gibi kayıplar arasında önemli bir iyileşme gözlenememiştir.



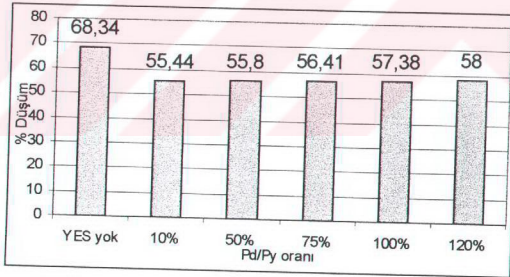
Şekil 4.19 Aktif güç kaybı



Şekil 4.20 Reaktif güç kaybı

4.6.2 Pg/Py oranının etkisi

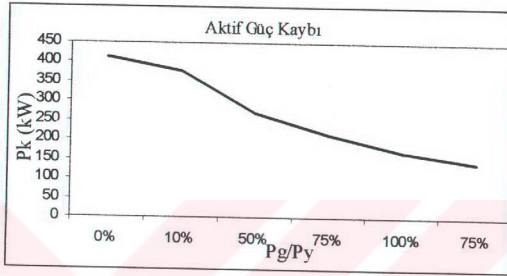
Generatörler tarafından yükün aktif güç tüketimini karşılama oranı olan Pg/Py oranının farklı değerleri (%0, %10, %50, %75, %100, %120) için incelemeler yapılmıştır. %120'lik yüklenme oranında generatörün ürettiği aktif gücün bir bölümü dağıtım sistemine gitmekte, yani aktif güç akışı yön değiştirmektedir. Aşağıdaki şekillerde benzetim sonuçları ve kayıpların değişimi verilmiştir.



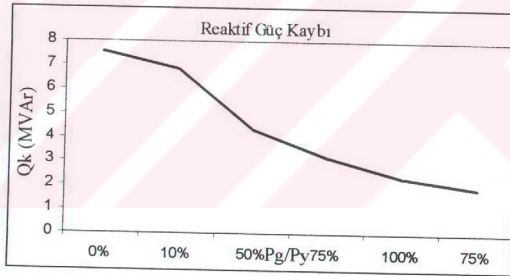
Şekil 4.21 Pg/Py oranının etkisi

Güç faktörü 0.95 (geri) olarak alınmıştır. Arıza yeri SBK-SBK154 havai hatlardan üsttekinin orta noktasıdır. Arıza 150 ms sonra temizlenmiştir. Burada görüldüğü gibi YES'in olup olmaması durumları arasında %13'lük bir iyileşme görülmektedir. Ancak YES'in yüklenme miktarının arttığında gerilim düşümü miktarı değişimi önemli bir artış göstermemektedir. Belli bir noktadan sonra gerilim düşümü artmaktadır. Bunda en önemli etken yerel generatörün kendi anma değerine

yaklaştıkça yani tesisin yükünü daha fazla üzerine aldıkça, olası arızalar sonucunda arızayı besleme gibi risklerden dolayı yükü besleme miktarı azalmaktadır. Ancak az veya ağır yüklenme durumları arasındaki farkta %5 civarındadır. P_g/P_y oranı arttıkça sistem kayıpları azalmıştır. Aktif ve reaktif güç kayıplarının değişimi aşağıdaki eğrilerdeki gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 4.22 Aktif güç kaybı



Şekil 2.23 Reaktif güç kaybı

4.6.3 Farklı arıza türlerinde YES'in etkisi

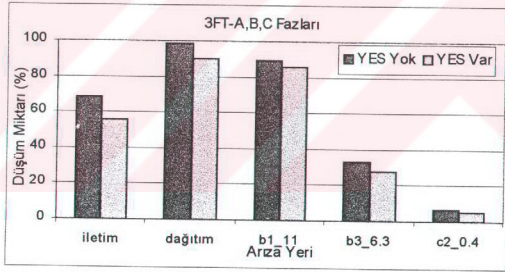
Bu bölümde yerel santrallerin kısa süreli gerilim düşümü sırasında gerilimdeki düşme miktarına etkisi çeşitli gerilim seviyelerinde gerçekleştirilen çeşitli arızalar (İletim, dağıtım, B1_11, B3_6.3 ve C2_0.4 baraları) sonucunda D_11 barasındaki gerilim düşümleri incelenmiştir. Bu amaçla önceki bölümde yer alan dengeli ve dengesiz arızaların motorlar üzerindeki etkisi kısmında simülasyonlara ek olarak

örnek sisteme yerel generatörler eklenmiştir. Generatörler 0.95 güç faktöründe ve dağıtım sisteminin aktif yükünün yarısını karşılayacak şekilde yüklenmişlerdir.

i. Üç Fazlı Dengeli Kısa Devreler Sonucu Oluşan Gerilim Düşümleri

Sistemin farklı noktalarında meydana gelen dengeli ve dengesiz arızaların sisteme etkileri yukarıdaki eğrilerde verilmiştir. Bu eğrilerde meydana gelen gerilim düşümünün % olarak değeri gösterilmektedir. Arızasız fazlarda negatif bölgedeki değerler o fazlardaki gerilim yükselmesini ifade etmektedir.

Üç fazlı dengeli kısa devreler sonucu oluşan gerilim düşümleri Şekil 4.24'deki eğride görülmektedir. Yerel generatörün gerilim düşümüne %5 ile %15 arasında olumlu yönde etkisi görülmektedir. Arıza yeri (Dağıtım ve B1_11) generatör barasına yaklaştıkça generatörün katkısı azalmaktadır.

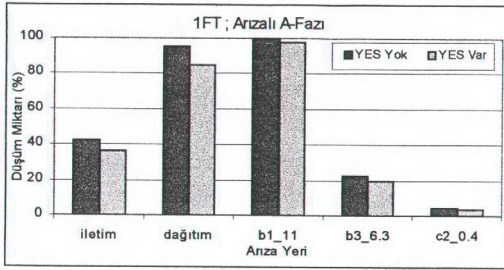


Şekil 4.24 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (3F)

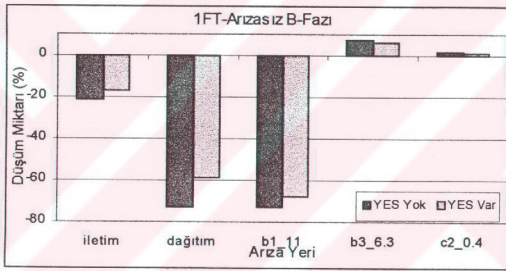
ii. Tek Fazlı Toprak Kısa Devresi Sonucu Oluşan Gerilim Düşümleri

1FT kısa devreleri durumunda her üç fazdaki arıza yeri gerilim düşümü miktarı değişimleri ise Şekil 4.25-4.27'de görülmektedir. Arızalı fazda gerilim düşerken, arızasız fazlarda bazı durumlarda gerilimde yükselme olmuştur. 154, 35 ve 11 kV seviyelerindeki kısa devrelerde B ve C fazlarında artma meydana gelmiştir. Bu artma %80 dolaylarında gerçekleşmiştir. Yerel generatörler, arızalı fazda gerilim düşümünü

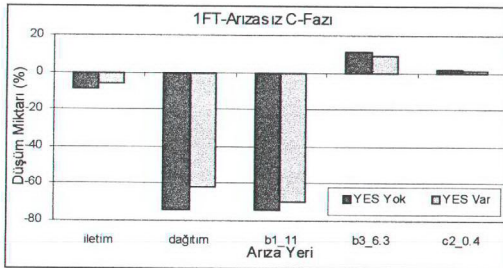
azaltırken, arızasız fazlarda yükselmeyi azaltıcı etkileri olmuştur. Her iki durumda da yine yaklaşık %5 ile %15'lik iyileştirmeler gözlenmiştir.



Şekil 4.25 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (1F, Arızalı A-Fazı)



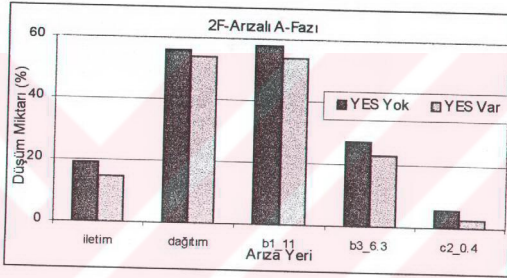
Şekil 4.26 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (1F, Arızasız B-Fazı)



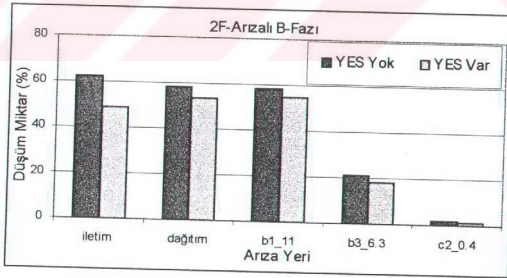
Şekil 4.27 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (1F, Arızasız C-Fazı)

iii. Faz faz ve iki faz toprak kısa devreleri sonucu oluşan gerilim düşümleri

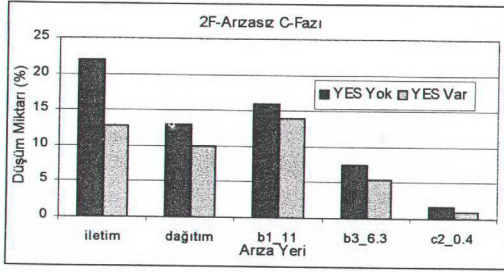
Benzer durum 2F ve 2FT dengesiz kısa devreleri sonucunda da yaşanmıştır. Dikkat edilmesi gereken bir husus, 2F kısa devresinde arızasız C fazında da diğer fazlara oranla az da olsa yükselme yerine düşme gözlenmiştir. Bunda simetrik bileşen empedanslarının ve trafo bağlantı grupları ile yıldız noktası topraklamasının etkisi vardır. OG ve YG trafoları yıldız noktaları 20 ohm'luk direnç üzerinden topraklanırken, OG ve AG trafoları primer tarafı üçgen, sekonder tarafı ise direkt topraklı yıldız bağlama grubundadır.



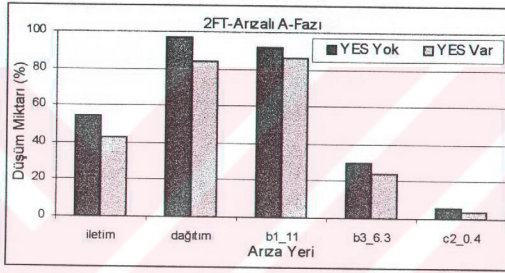
Şekil 4.28 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2F, Arızalı A-Fazı)



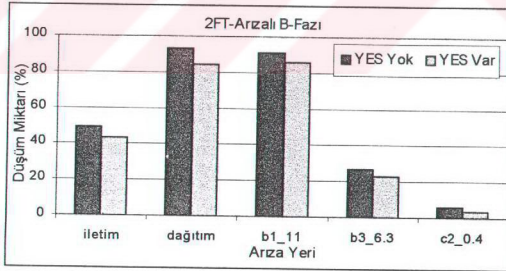
Şekil 4.29 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2F, Arızalı B-Fazı)



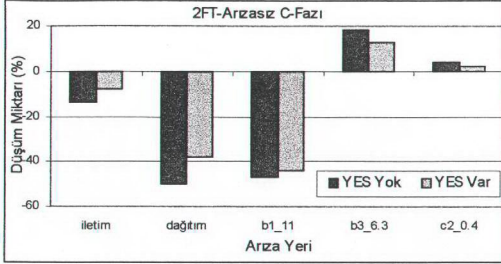
Şekil 4.30 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2F, Arzasız C-Fazı)



Şekil 4.31 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2FT, Arızalı A-Fazı)



Şekil 4.32 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2FT, Arızalı B-Fazı)

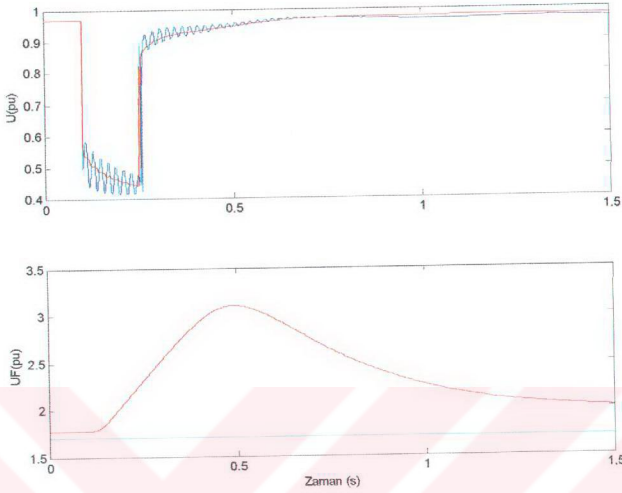


Şekil 4.33 Arıza yeri ile gerilim düşümü miktarı değişimi (2FT, Arızasız C-Fazı)

4.6.4 Uyarma sisteminin KSGD'lerine etkisi

Yerel santrallerde uyarma sisteminin kısa devre kaynaklı gerilim düşümünün genliği ve arıza sonrası oturma zamanına etkisi salınımların azaltılması şeklinde olmaktadır.

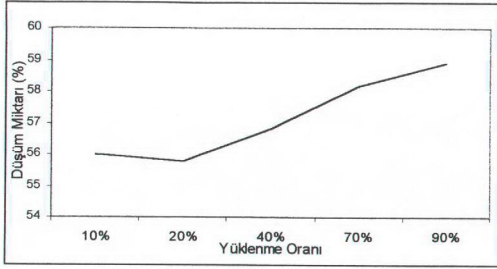
Şekil 4.34'de verilen eğriden açık olarak anlaşılabileceği gibi sabit uyarımalı generatör modeli ile yapılan benzetimlerde arıza sırası ve sonrasında salınımlar olurken, uyarma ve gerilim regülatörü modeli kullanılan benzetimlerde bu salınımlar meydana gelmemiştir. Ancak bu salınımlar dinamik kararlılık açısından problem oluşturmaktadır. Ayrıca enerji kalitesi açısından başka problemlere yol açmaktadır.



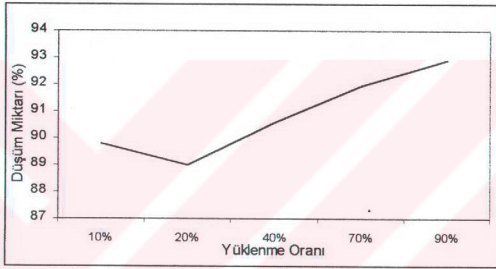
Şekil 4.34 Uyarma sisteminin gerilim düşümüne etkisi (kırmızı regülatörlü uyarma sistemi, mavi sabit uyarma sistemi)

4.6.5 Generatörün anma yüküne göre yüklenmesinin etkisi

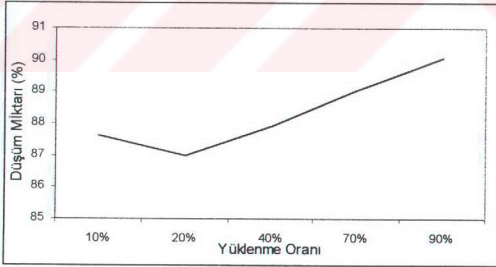
Generatörün bozucu etkisi öncesindeki yüklenmesinin anma gücüne oranı ile gerilim düşümleri arasındaki ilişkiyi göstermek amacıyla güç faktörü 1 ve yüklenme oranları ise sırasıyla %10, %20, %30, %70 ve %90 olarak seçilmiştir. Daha önceki bölümlerdeki gibi iletim, dağıtım sistemi ile B1_11, B3_6.3 ve C2_0.4 baralarında meydana getirilen 3 faz simetrik kısa devresi sırasında OBN_11 barasındaki maksimum gerilim düşümü aşağıdaki eğrilerde verilmiştir. Eğrilerden de görüleceği gibi yüklenme oranları ile gerilim düşümünü azaltıcı yönde katkısı belirgin bir ilişki görülmemiştir. Ancak %20-23 gibi bir oranda yaklaşık en iyi sonuçların alındığını söylemek mümkündür. Arıza yeri ile arıza sırasında çekilen reaktif gücün şebeke ve generatör arasındaki paylaşımı generatör performansını etkileyen diğer faktörlerdir.



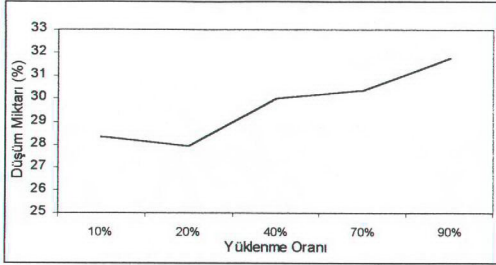
Şekil 4.35 Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (iletim sistemi arızasında)



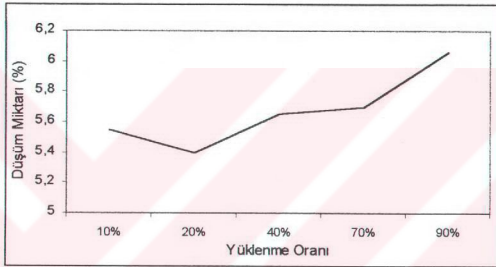
Şekil 4.36 Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (dağıtım sistemi arızasında)



Şekil 4.37 Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (B1_11 barasında kısa devre)

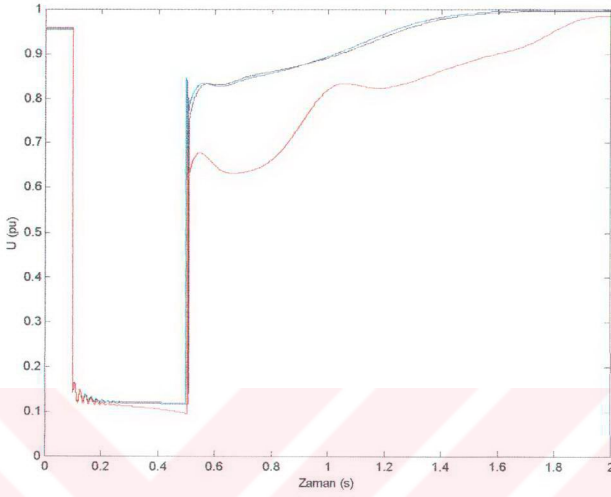


Şekil 4.38 Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (B3_6.3 barasında kısa devre)

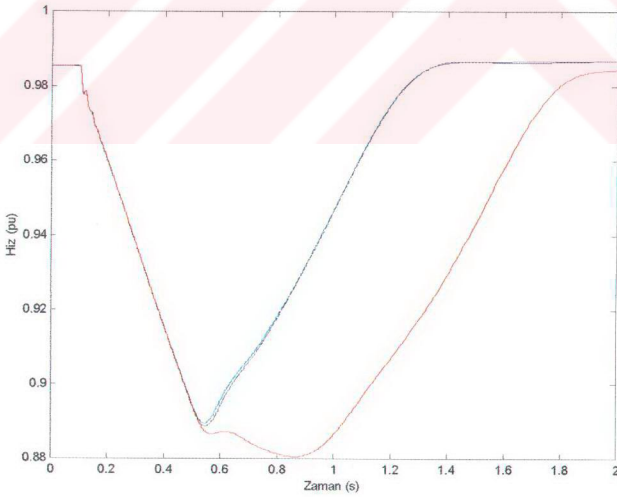


Şekil 4.39 Yüklenme oranı gerilim düşümü ilişkisi (C2_0.4 barasında kısa devre)

Yüklenme oranının %10,%40 ve %90 olduğu durumlarda ve B1_11 barasındaki 3 fazlı simetrik kısa devreler için generatör barası ve D_11 barasındaki motorların hız değişimleri aşağıdaki eğrilerde verilmiştir. Bu eğrilerden de görüldüğü gibi %90'lık durumda arıza sonrasında generatör bara gerilimleri ile motor hızlarının toparlanmasının çok geç sona ermektedir. Çünkü zaten sınıra çok yakın generatörler arıza sonrası dönemde asenkron motorlar tarafından çekilen yüksek reaktif gücü karşılamakta zorlanmaktadır. Buradan elde edilen sonuç generatör anma gücüne yaklaştıkça kısa süreli gerilim düşümleri esnası ve sonrasında dağıtım sistemi geriliminde daha şiddetli düşmeler yaşanmaktadır. Bu nedenle kendi santrallerini şebekeyle çalıştıran tesislerde bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Kırmızı %90, siyah %40'ı ve mavi ise %10 durumlarını göstermektedir.



Şekil 4.40 Yükleme oranı generatör barası gerilimi değişimi

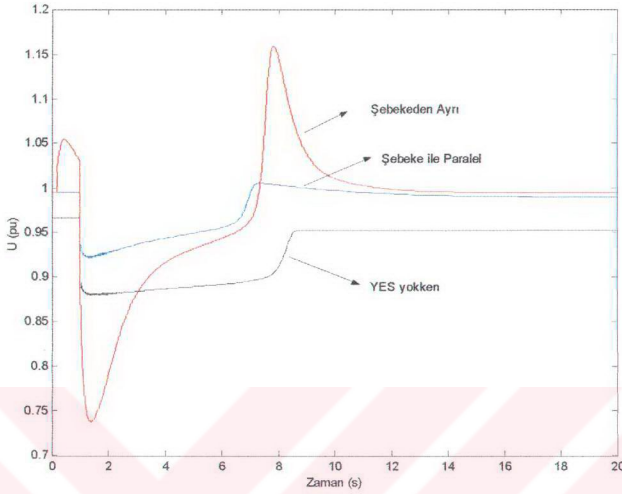


Şekil 4.41 Yükleme oranı motor hızı değişimi

4.6.6. Büyük güçlü motorlara yol verilmesinin gerilim düşümlerine etkisi

Kısa süreli gerilim düşümlerinin ikincil önemli kaynağı büyük güçlü asenkron motorlara doğrudan yol verilmesi sırasında oluşan gerilimlerdir. Bu tür motorlara yol verilirken oluşan gerilim düşümü %15 i aşmamalıdır. Aksi takdirde motorların anma hızına ulaşması imkansızdır [5]. Bu olay motor büyüklüğüne göre değişmekle beraber ortalama 10-20 sn sürebilmektedir. Bu bölümde D_11 barasında bulunan 11 kV nominal gerilimi ve 9 MW anma gücündeki 3 motordan biri devre dışında iken sonradan devreye alınması bilgisayar ortamında simule edilmiştir. Benzetimlerde generatörün devre dışı , şebeke ile paralel ve şebekeden ayrı çalışması gibi 3 ayrı durumda motora yol verilmiştir. OBN_11 barasının faz arası efektif gerilimi değişimleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

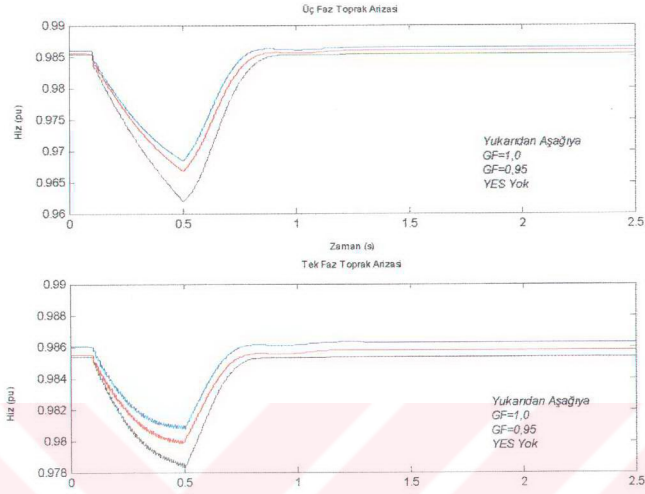
Şekil 4.42'den görülebileceği gibi şebekeden ayrı çalışma durumu motorlara yol vermek açısından en kötü koşullara sahiptir. Bunda mevcut generatörlerin toplam gücünün motor yol alırken çekilen gücü sağlayabilmesi önemli bir etkindir. Büyük güçlü ve OG'de çalışan bu motorlara gerçekte sık yol verilmez. Bu olay planlanan bir bakım sonrasında gerçekleştirilir. Bu nedenle eğer sistem normalde şebekeden ayrı kendi enerjisi ile çalışıyorsa, yol verme olayı sırasında şebekeye bağlanmalıdır. Yada bu durum dikkate alınarak uygun güçte santral planlaması yapılmalıdır.



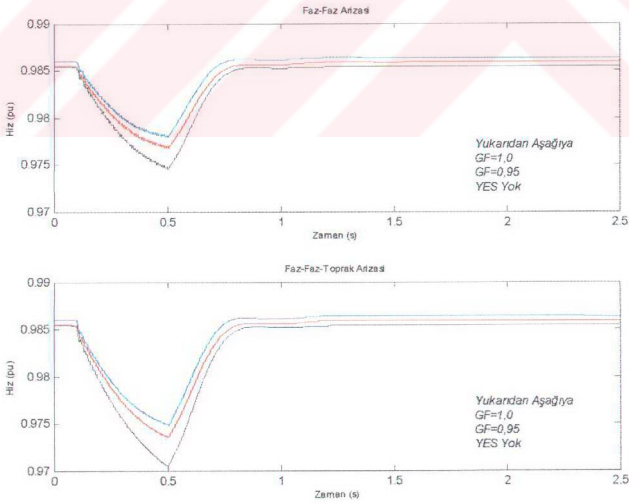
Şekil 4.42 Motorlara yol verilmesi sırasında oluşan gerilim düşümleri

4.6.7. Yerel generatörlerin asenkron motorların hızlanmasına ve arıza sonrası davranışına etkisi

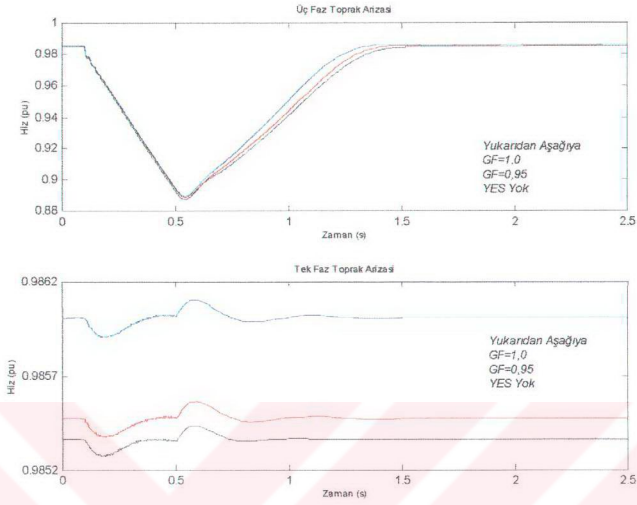
Bu bölümdeki benzetimler ile gerilim düşümü sırasında ve sonrasında motor hız değişimi gösterilmiştir. Böylece hızlanma sürecinde motorlara etkisi ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla örnek sistemdeki D_11 barasındaki özdeş asenkron motorlardan birine ait hızlanma eğrileri aşağıdaki şekillerde verilmiştir. B3_6.3 ve B1_11 baralarında sırasıyla 3FT, 1FT, 2F ve 2FT kısa devreleri yaptırılmıştır. Aşağıdaki eğrilerden de görüleceği gibi yerel generatörlerin hız kaybı ve hızlanma süresini azalttığı görülmüştür. Yerel generatörler şebekeye toplam yükün yaklaşık olarak yarısına karşı gelen 16 MW aktif güç vermektedir. Güç faktörünün 1 olması durumunda reaktif güç sıfırken, 0.90 güç faktöründe şebekeye verdikleri toplam reaktif güç 7.75 MVar'dır



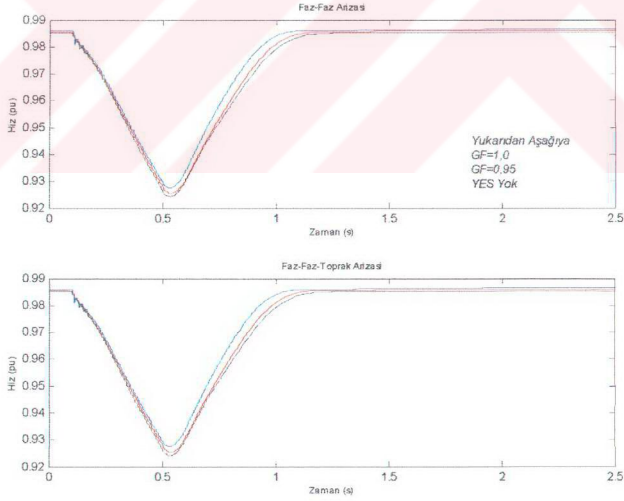
Şekil 4.43 Motor hız değişimleri (B3_6.3 barasında 3FT ve 1FT arızası)



Şekil 4.44 Motor hız değişimleri (B3_6.3 barasında 2F ve 2FT arızası)



Şekil 4.45 Motor hız değişimleri (B1_11 barasında 3FT ve 1FT arızası)



Şekil 4.46 Motor hız değişimleri (B1_11 barasında 2F ve 2FT arızası)

BÖLÜM 5. KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİNİN YEREL SANTRALLERE VE DAĞITIM SİSTEMİ KARARLILIĞINA ETKİSİ

5.1. Giriş

Yerel elektrik santrallerinin dağıtım sistemlerinde kullanılması ile kısa süreli gerilim düşümleri sırasında bir miktar iyileşme elde edilmekle beraber, asıl önemli olan konu söz konusu dağıtım sistemlerinde meydana gelen elektromekanik salınımlar ve dinamik kararlılık problemi. Yerel santraller, dağıtım sistemi ile paralel çalışsın yada çalışmasın meydana gelen arızalar yada yüklerin devreye alınması sırasında ve sonrasında bir takım elektromekanik değişimler meydana gelir. Bu değişimlerin frekansı, genlikleri ile zamana bağlı davranışı generatörün ve sistemdeki yüklerin çalışmasını etkiler.

Yerel santrallerin son 30-40 yıl içerisindeki enerji sektöründeki payında meydana gelen hızlı artışla beraber yukarıda kısaca değinilen kararlılık probleminin yanı sıra enerji kalitesi problemi ve koruma sistemleri üzerinde çok sayıda araştırmalar bulunmaktadır. Yerel santral kavramı içerisinde bağımsız enerji üreticileri olarak tanımlanan orta ve büyük güçlü santraller ile bunların enterkonnekte sisteme bağlandığı noktalarda meydana gelen dinamik kararlılık problemleri ve bunların azaltılmasında güç sistem kararlılaştırıcılarının (PSS) etkisi üzerine yapılan çalışmalar [48] sonucunda PSS'nin düşük frekanslı salınımları azalttığı ve dinamik sistemlerin kararlı hale gelme sürecini hızlandığı görülmüştür. Ancak PSS in genelde 75-100 MW ve üzeri generatörlerde kullanılması gerekliliği, daha küçük güçlü ünitelerde kullanılmasında gerek olmayışı küçük sistemlerde kararlılık probleminin önem kazanmasına yol açmıştır. Dinamik kararlılık problemi, güç sistemlerinin güvenli bir şekilde işletilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Çünkü güç sistemlerinde meydana gelen düşük frekanslı bu salınımların karmaşık bir yapısı vardır. Bu yapıyı tanımlayabilmek için generatör, motor gibi dinamik elemanların

dinamik karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekir. Özellikle küçük yerel santrallerin enerji kalitesine etkisi ve dinamik kararlılık sorunları önemli araştırma konularından olmuştur. Genellikle iletim sistemi ile dağıtım sistemi arasındaki tek yönlü güç akışı, dağıtım sistemine aktif-reaktif enerji enjekte eden bu santrallerin sayesinde yön değiştirmektedir. Hatta çoğu kez dağıtım sistemine doğru bir akış olmakta yani yerel santral dış sistemi de beslemektedir. Özellikle endüstriyel tesislerdeki otoprodüktör santrallerin ikincil amacı şebekeye enerji vermektir. Bu durum elbette ki ticari bir alış veriş sonucu gerçekleşen bir olaydır. Yerel elektrik santrallerinin enerji kalitesine etkisi generatör boyutu ile şebeke arıza seviyesi ve X/R oranına bağlıdır. Ayrıca generatör ve tahrik sistemi karakteristikleri önemli bir diğer etkindir [49]. Özellikle kısa devre seviyesi, gerilim düşümünün şiddeti ve yayılmasını etkileyen çok önemli bir faktördür. Yerel elektrik santralleri olarak karşımıza çıkan temel iki generatör tipi olan senkron ve asenkron generatörler arasında bir kıyas yapmak gerekirse, senkron generatörlerin sistem kısa devre gücüne katkısı asenkron motora göre oldukça fazladır ve asenkron generatörlü yerel santraller ki bunlar rüzgar santralleridir, kısa süreli gerilim düşüme pek katkısı olmayan hatta kararsızlık tehlikesi daha fazla olan yerel generatör tipleridir [50].

Dağıtım sistemlerine yerel enerji üretim generatörlerinin eklenmesi ile sistem gerilim profili iyileştirilir, hat kayıpları azaltılır ve şebekeden talep edilen güç azalır [51]. Ayrıca yerel elektrik santralının eklenmesiyle dağıtım sistemi pasif bir sistemden aktif bir sisteme dönüşmektedir. Yani sadece enerji tüketen değil aynı zamanda enerji üreten bir sisteme dönüşmektedir [52]. Yapılan bazı çalışmalarda özellikle geniş alana yayılmış dağıtım sistemlerine yönelik incelemelerde yerel santrallerin dağıtım sisteminde gerilim kararlılığına da katkısı olabileceği öngörülmüştür [52,53].

Bu noktada generatörlerin ve sistemin kararsızlığa ve enerji kesilmesine karşı korunması önem kazanmaktadır. Özellikle yerel santrallerin arıza sonucunda aşırı akıma ve güç adası oluşumuna karşı korunması üzerinde çalışmalar yapılmıştır [54]. Bunun yanı sıra dengesiz arızaların yerel generatörlere etkisi [55], gerilim düşümlerinin dağıtım şebekesi üzerinde geniş alana yayılması [56], ve gerilim düşümleri ile düşüm süresinin generatör mili momentine etkisinin [57,58] incelendiği

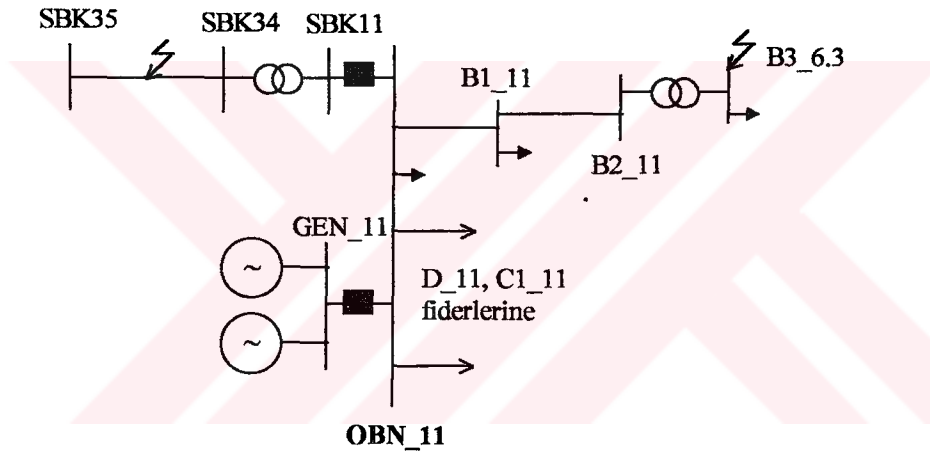
alışmalar ile koruma sisteminin kısa süreli gerilim düşümleri sırasında generatör davranışını anlayabilmeye yönelik bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Referans [57] ve [59]'da yüksek hızlı bir kesici ile yerel santrallerin arıza yani gerilim düşümü sırasında arızadan izole edilmesi önerilmiştir. Bu kesicide yüksek hızı sağlayan GTO elemanı kullanılmıştır. Koruma sisteminin etkisi üzerine yapılan çalışmalarda röle ayar değerleri ile generatörün davranışı arasındaki ilişki ve özellikle arıza temizleme zamanının etkisi ve seri bobin ile aşırı akımın azaltılarak gerilim düşümünün kurtarılmasına yönelik araştırmalarda yapılmıştır [60,61]. Yine aşırı akım röle koordinasyonu ile gerilim düşümü yayılma alanının azaltılması ve yerel santrallerin korunmasında röle ayarının yani arıza temizleme süresinin etkisinin incelendiği [62] çalışmalar bulunmaktadır.

Tezin bu bölümünde yukarıda belirtilen önceki çalışmaların sonuçlarından da faydalanarak kısa süreli gerilim düşümlerine yol açan iç ve dış arızaların ele alınan örnek sistemdeki yerel generatörlere ve dağıtım sistemine etkisi incelenmiştir. Bu incelemelerde; yerel santral ile dağıtım sistemi arasındaki bağlantı şekli yani direkt veya transformatör üzerinden bağlanma durumlarında arızaların generatör barasındaki yol açtığı gerilim düşümü ve generatör hız değişimleri incelenmiştir. Yine şebekeyle paralel çalışma durumunda iç ve dış arızalar sırasında generatör hız ve rotor açısı değişimleri gözlenmiştir. Ayrıca gerilim düşümü esnası ve sonrasında meydana gelen düşük frekanslı rotor salınımları ile dağıtım sistemi yük karakteristiği arasındaki ilişkiyi gösterebilmek amacıyla farklı dinamik ve statik yük oranlarında benzetimler yapılmıştır. Bu işlemler şebekeyle paralel ve ayrı çalışma koşulları için tekrarlanmıştır.

Son olarak, örnek sistemde iki farklı noktadan yerel generatör bağlanması durumu dikkate alınmıştır. Bu amaçla 11 kV'luk generatörün GEN_11 barasına bağlanmasından başka 6.3 kV'luk 16 MVA'lık bir generatörde B3_6.3 kV barasına eklenmiştir. Böylece meydana gelen bozucu etkilerin sonucunda bu iki generatör arasında meydana gelen elektromekanik salınımlar ile iki generatörün kararlılık ve kararsızlık koşulları incelenmiştir. Bu amaçla şiddetli ve hafif gerilim düşümüne ve bozulmaya yol açan çeşitli arıza durumları ve koşullarda benzetimler yapılmıştır.

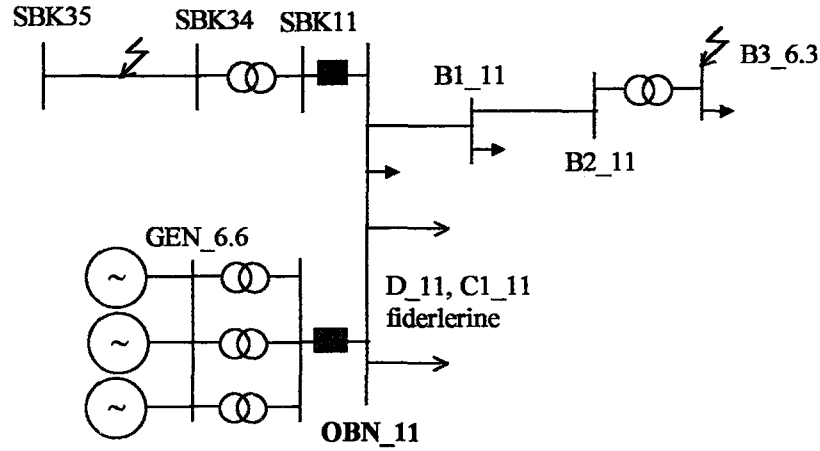
5.2. YES/Dağıtım Sistemi Bağlantı Ara Yüzü ve Gerilim Düşümü İlişkisi

Dördüncü belirtildiği gibi yerel elektrik santrallerinin dağıtım şebekesine olan bağlantısı doğrudan yada transformatör üzerinden dolaylı olmaktadır. Doğrudan bağlantıda generatör çıkış gerilimi ile sistem gerilim aynı değerde olmaktadır. Dolaylı bağlantıda ise generatör çıkışı çoğu kez sistem geriliminden düşük bir anma gerilimine sahiptir. Bu nedenle bir yükseltici transformatör üzerinden sisteme bağlantı gerçekleşir. Bu ara elemanın empedansı nedeniyle generatör barası üzerine düşen gerilim genliği doğrudan bağlantıya göre yüksek olmalıdır. Bu amaçla bu bölümde Şekil 5.1 ve 5.2’de örnek sisteme ait parçadan görüleceği gibi iki ayrı durum söz konusudur.



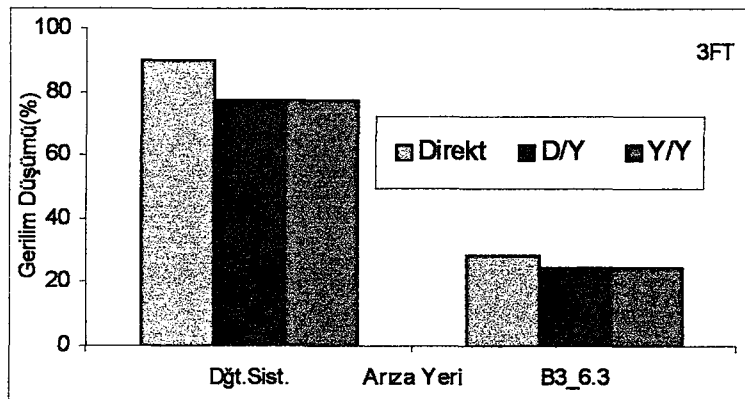
Şekil 5.1 Direkt bağlantı durumu

İlk olarak 11 kV OBN_11 barasına kesici üzerinden bağlanan yine 11 kV 'luk iki adet 20MVA'lık senkron generatör bağlanmıştır. İkinci olarak ise anma gerilimi 6.6 kV olan 3 adet 16.6 MVA'lık senkron generatör bir transformatör üzerinden 11 kV'luk OBN_11 barasına bağlanmıştır. Ayrıca yapılan incelemede yükseltici transformatörün Y/Y ve Δ/Y olması durumları ayrı ayrı ele alınmıştır. Yıldız sargıların hepsinin yıldız noktası direkt olarak topraklanmıştır. Şiddetli gerilim düşümü oluşturmak amacıyla daha önceki bölümlerde dağıtım sistemi arızası olarak adlandırılan SBK35-SBK34 baraları arasındaki 35 kV'luk hattın tam orta noktasında kısa devreler gerçekleştirilmiştir.

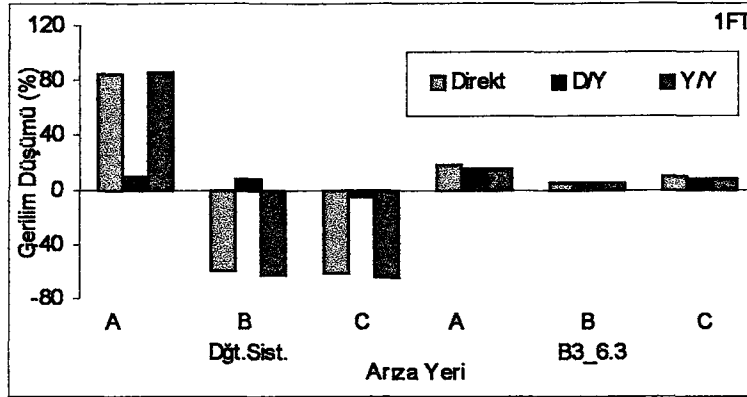


Şekil 5.2 Transformatör üzerinden bağlantı

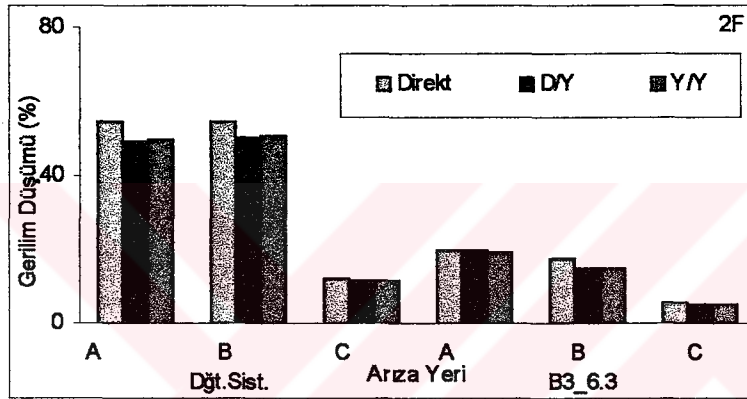
Düşük şiddetli gerilim düşümünü elde etmek amacıyla B3_6.3 barasında yine dengeli ve dengesiz dört kısa devre türü modellenmiştir. Tüm bu durumlarda GEN_11 ve GEN_6.6 baralarında meydana gelen maksimum gerilim düşümü miktarı aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Şiddetli kısa devre durumunda (Dğt.Sit.) arıza temizleme süresi 200 ms, hafif kısa devre durumunda (B3_6.3) ise 400 ms'dir. Bu eğrilerde negatif değerler arızasız fazlarda meydana gelen gerilim maksimum yükselmesini ifade etmektedir.



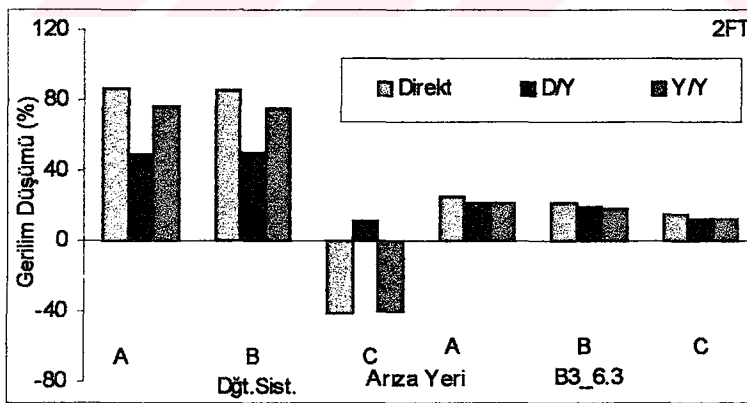
Şekil 5.3 Üç fazlı dengeli kısa devre durumu



Şekil 5.4 Bir faz toprak kısa devresi durumu



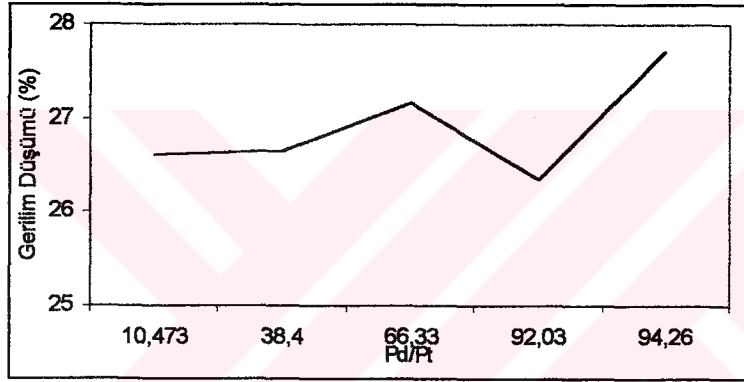
Şekil 5.5 İki faz kısa devresi durumu



Şekil 5.6 İki faz toprak kısa devresi durumu

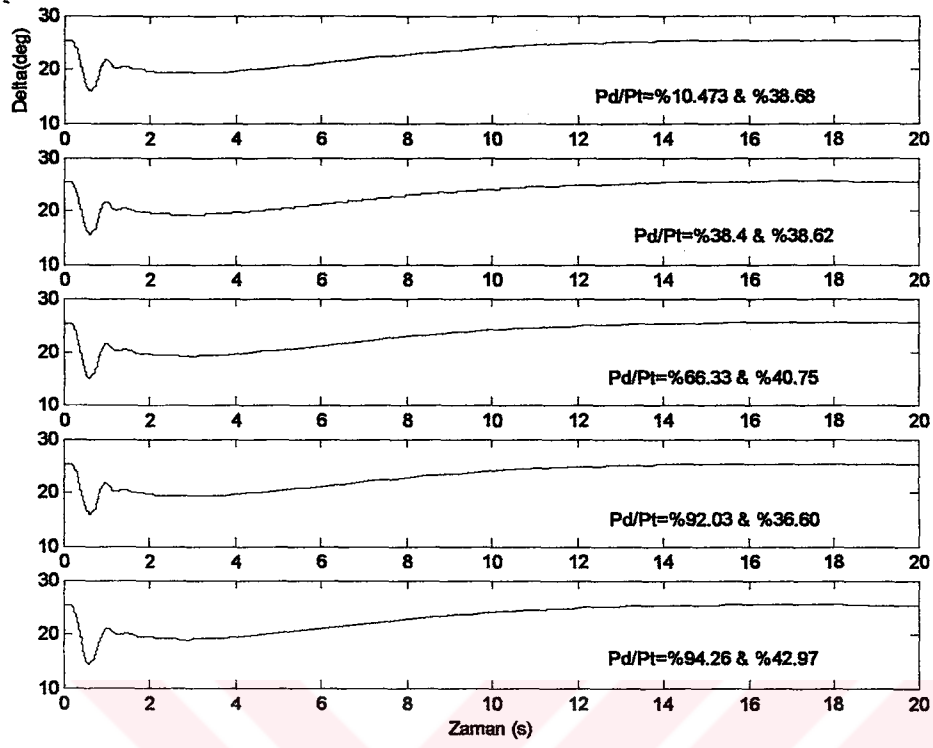
5.3. Yük Karakteristiklerinin Generatör Davranışına Etkisi

Bu kısımda beş farklı durum için benzetimler yapılmıştır. OBN_11 ana besleme barasına bağlı endüstriyel sistemin toplam aktif gücünün dinamik ve statik karakteristikleri arasındaki oranlara göre generatör davranışının etkilenme durumu gözlenmiştir. Bu amaçla B3_6.3 barasında üç fazlı simetrik kısa devresi gerçekleştirilmiş olup, 200 ms sonra temizlenmiştir. Şekil 5.7’de dinamik motor yükü ile toplam yük arasındaki oranın (P_d/P_t) çeşitli değerleri için maksimum gerilim düşümü değişimi verilmiştir. İncelenen durumlar için rotor açısı ve hızı değişimleri Şekil 5.8 ve 5.9’daki gibi gerçekleşmiştir.

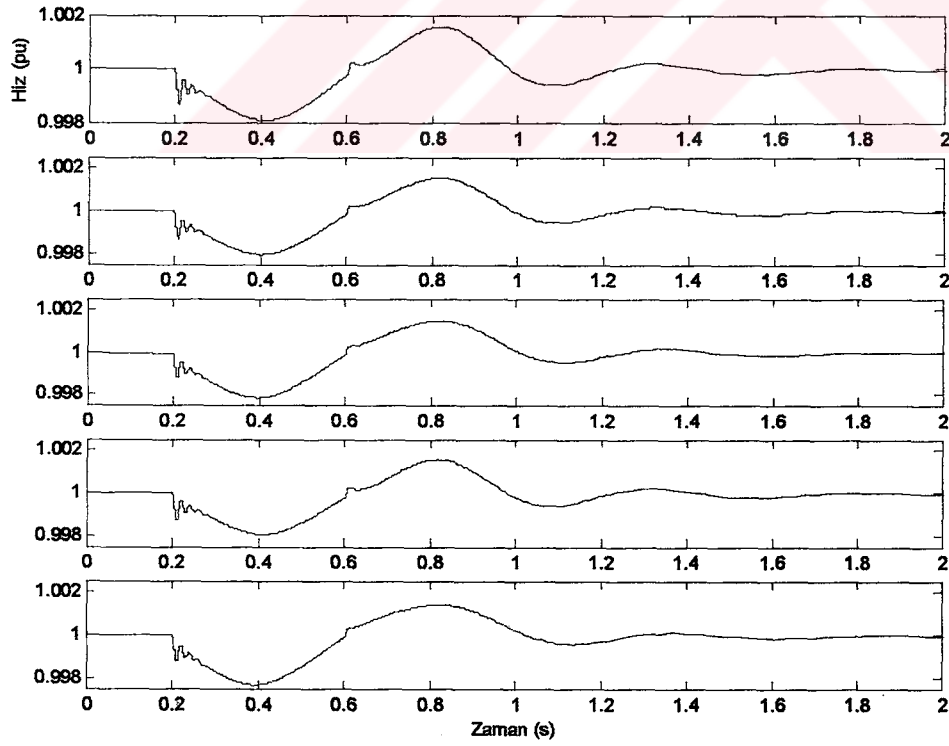


Şekil 5.7 Yük karakteristiklerinin generatör barası gerilimine etkisi

Görüldüğü gibi, toplam yük içerisinde motor yükü oranı ile generatör uç gerilimindeki düşme miktarı arasındaki değişim dikkate alınacak kadar büyük değildir. Ancak küçükde olsa bir artış söz konusudur. Bu durumu Şekil 5.8 ve 5.9’daki açı ve hız değişimlerinde de görmekteyiz. İncelenen beş durum için açı ve hızdaki değişimler birbirlerine oldukça yakındır. Şekil 5.8’deki açı değişimleri yukarıdan aşağıda P_d/P_t oranının %10.473, %38.4, %66.33, %92.03 ve %94.26 olduğu durumlara aittir. Sırasıyla ilk salınım anında meydana gelen maksimum açı düşümleri %38.68, %38.62, %40.75, %36.60 ve %42.97’dir. Görüldüğü gibi alt ve üst değer arasında % 4.3’lük bir fark vardır. Bu kararlılık açısından dikkate alınacak kadar önemli bir fark değildir. Benzer şekilde hız değişimine baktığımızda yukarıdan aşağıya aynı durumlardaki maksimum hız kayıpları ise %0.19, %0.20, %0.22, %0.19 ve %0.23 olarak gerçekleşmiştir. Aralarındaki fark yine oldukça küçüktür.



Şekil 5.8 Generatör rotor açısı değişimleri

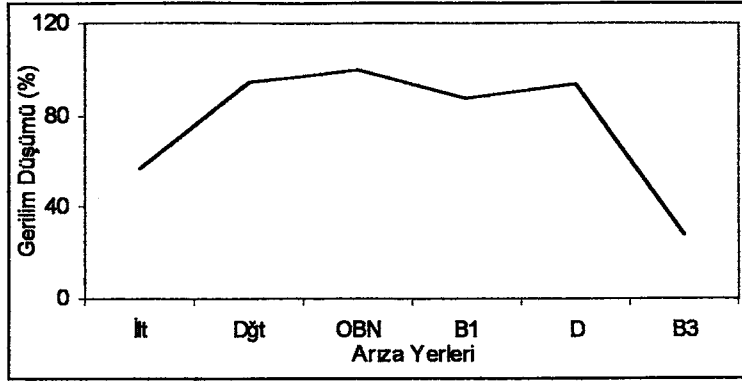


Şekil 5.9 Generatör hız değişimleri

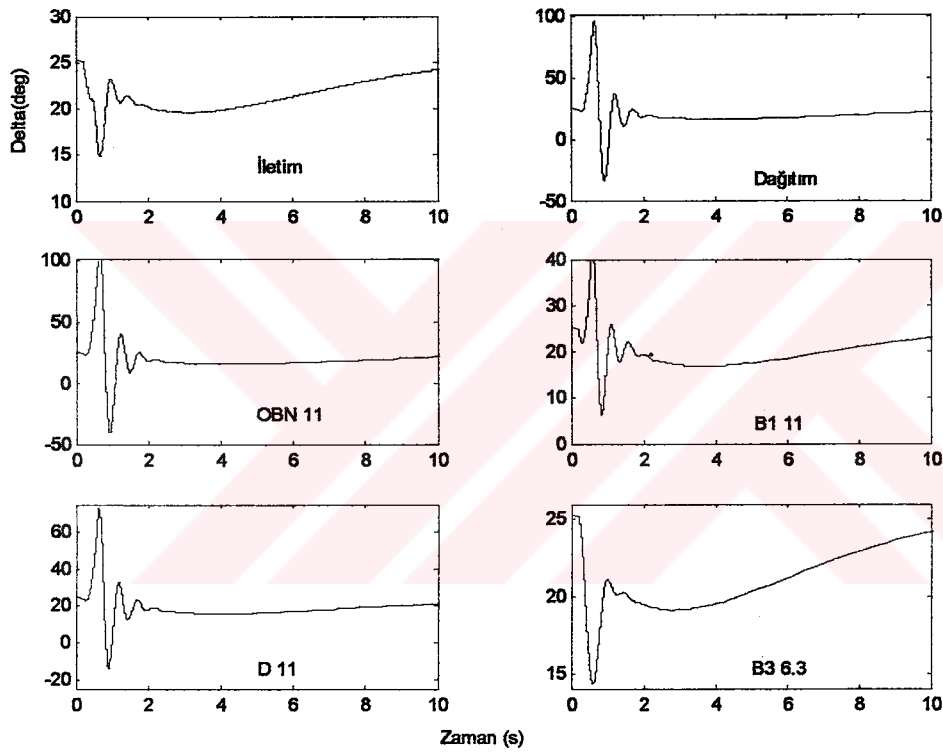
5.4. Arıza Yerinin Generatör Davranışına Etkisi

Bu bölümde örnek sistemin çeşitli noktalarında gerçekleştirilen üç fazlı simetrik kısa devreleri sırasında generatör açı ve hız değişimleri gösterilmiş ve uç geriliminde meydana gelen maksimum gerilim değişimi miktarları karşılaştırılmıştır. Yapılan bilgisayar simülasyonlarında SBK-SBK154 paralel üst hattının orta noktası (154 kV), SBK35-SBK34 hattının orta noktası, OBN_11, B1_11, D_11 ve B3_6.3 baralarında üç fazlı kısa devre yapılmıştır. Arıza temizleme zamanları sırasıyla, 250 ms, 400 ms, 400 ms, 350 ms, 400 ms, 400 ms'dir. Arıza yeri ile generatör arasındaki mesafe azaldıkça meydana gelen gerilim düşüm artmaktadır. Uzak arızalarda ise gerilim düşümü daha düşük olmaktadır. Bu sonuçlar bölüm 2'de Şekil 2.8'deki eğriyle uyumaktadır. Şekil 5.11 ve 5.12'de verilmekte olan rotor açısı ve açısal hız değişimlerine ait eğrilerden görüldüğü gibi, iletim hattındaki arıza sırasında generatör ilk anda hız kaybına uğramaktadır. Uzaktaki bu arıza sırasında generatör ve yüklerde %50 dolaylarında gerilim kaybı olmaktadır. İlk anda arızalı hattan akış sağlanmadığından şebekeden gelen güçte azalma olmakta ve bunu yerel generatör yüklenerek kapatmaya çalışmaktadır. Daha sonra ikinci hattın yüklenmesi ise generatördeki yüklenme düşmekte yani generatör hızlanmaya başlamaktadır. Dağıtım, OBN_11, B1_11, D_11 arızalarında ise yüklerdeki şiddetli gerilim düşümü güç talebini azaltmakta ve mekanik tahrik sisteminin devreye geç girmesinde dolayı üretimin tüketimden fazla olması yani motorun hızlanması görülmektedir. Bunun sonucu olarak yük açısı artış göstermiştir.

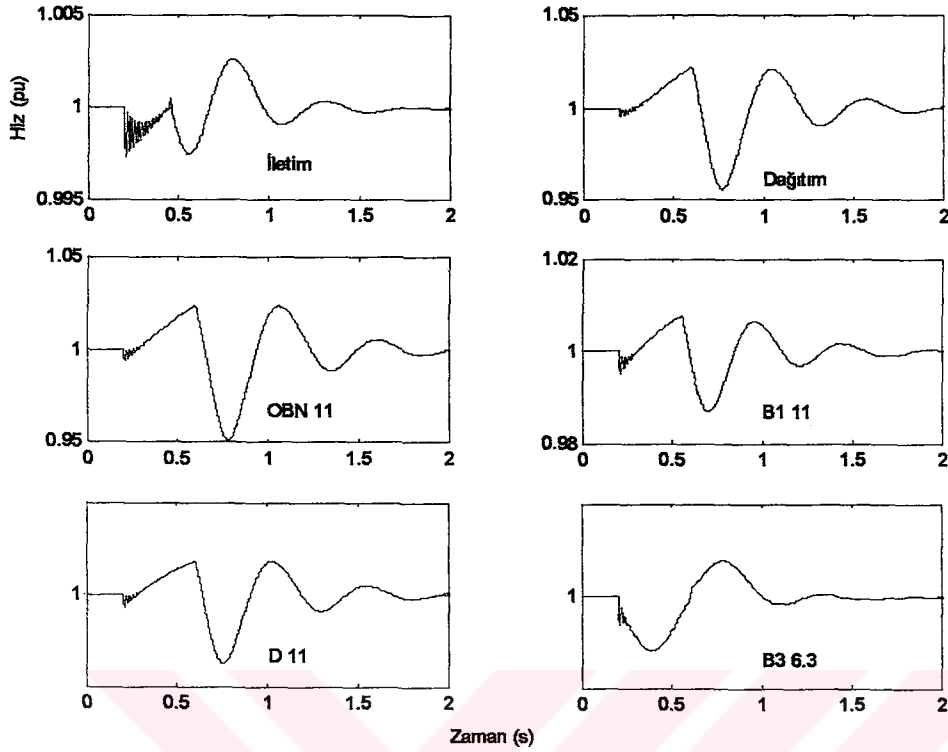
Son olarak B3_6.3'tek arıza sistemin genelini etkileyecek boyutta olmadığı yani gerilim düşümü ve güç talebini diğerleri kadar düşürmediğinden generatör diğer yüklerin yanı sıra arızayı besleme durumuna geçmiştir. Talep fazla olduğundan hız kaybı ve açı azalması meydana gelmektedir.



Şekil 5.10 Farklı yerlerdeki arızalarda generatör barası gerilim düşümleri



Şekil 5.11 Rotor açısı değişimi

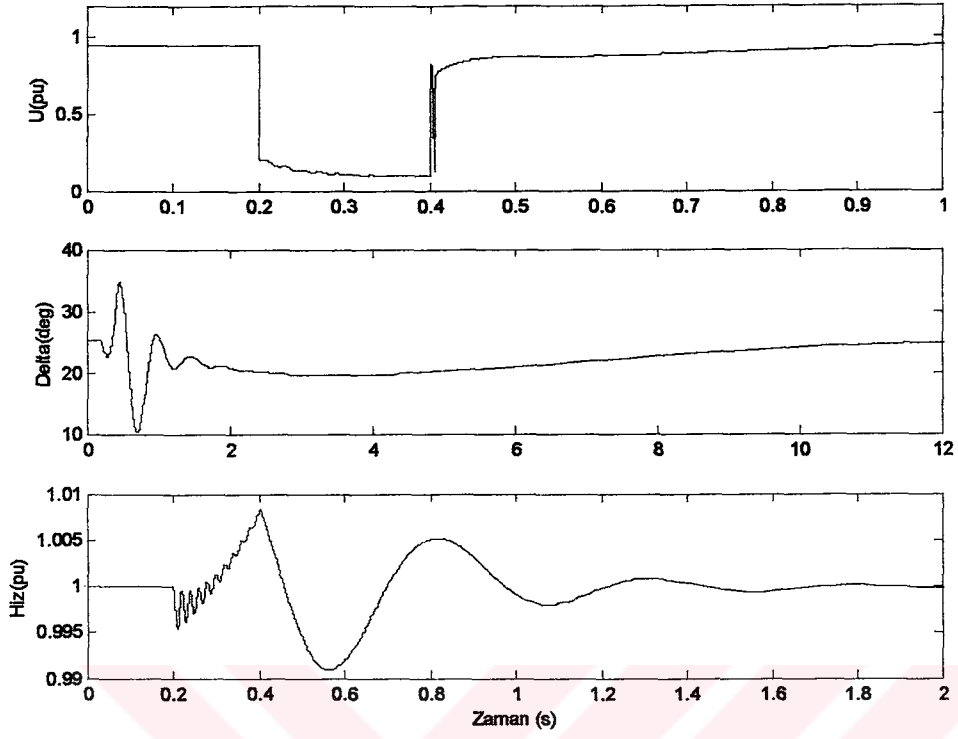


Şekil 5.12 Hız değişimi

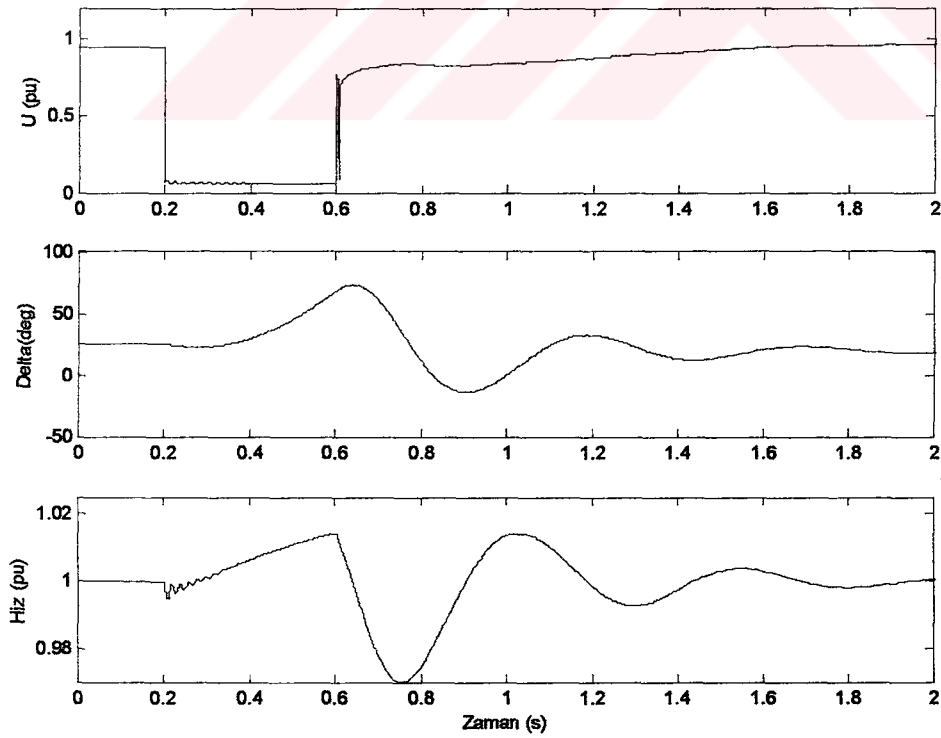
5.5 Arıza Türlerinin Yerel Generatörlerin Davranışına Etkisi

5.5.1 Uç gerilimi, rotor açısı ve hız değişimleri

Pratikte üç fazlı simetrik kısa devreler en az sıklıkta meydana gelen arıza türüdür. En çok meydana gelen tek faz toprak arızası ve diğer dengesiz arızalardır. Bu kısımda 35 kV hattında (SBK35-SBK34) ve D_11 barasında meydana gelen dört farklı kısa devre durumunda generatör uç geriliminde meydana gelen değişimler ile rotor açısı ve açısal hız değişimleri gözlenmiştir. Şekil 5.13’de dağıtım hattında meydana gelen üç faz toprak arızası sırasında gerilim, açı ve hız değişimi verilmektedir. Gerilim %90’ın üzerinde bir düşme göstermiştir. Bu nedenle elektriksel güç talebindeki azalma ile generatör hızlanmaya başlamıştır. Arıza temizlenmemiş olsaydı generatör kararsızlığa gidecekti. Hız 1.01 pu değerine yaklaşmıştır. Bu durum frekansın 50.5 Hz’de çıkması demektir. Şekil 5.14’te ise D_11 barasındaki 3FT arızasının sonuçlar görülmektedir. Hız yaklaşık %1.5-2 civarında artmıştır. Frekansın yükselmesi daha fazla olmaktadır. Ayrıca rotor açısının genliği ilk salınımda yaklaşık 50°’lik artış göstererek 80° civarına çıkmıştır.



Şekil 5.13 Dağıtım sistemi arızasının generatöre etkisi (3FT, 200 ms)

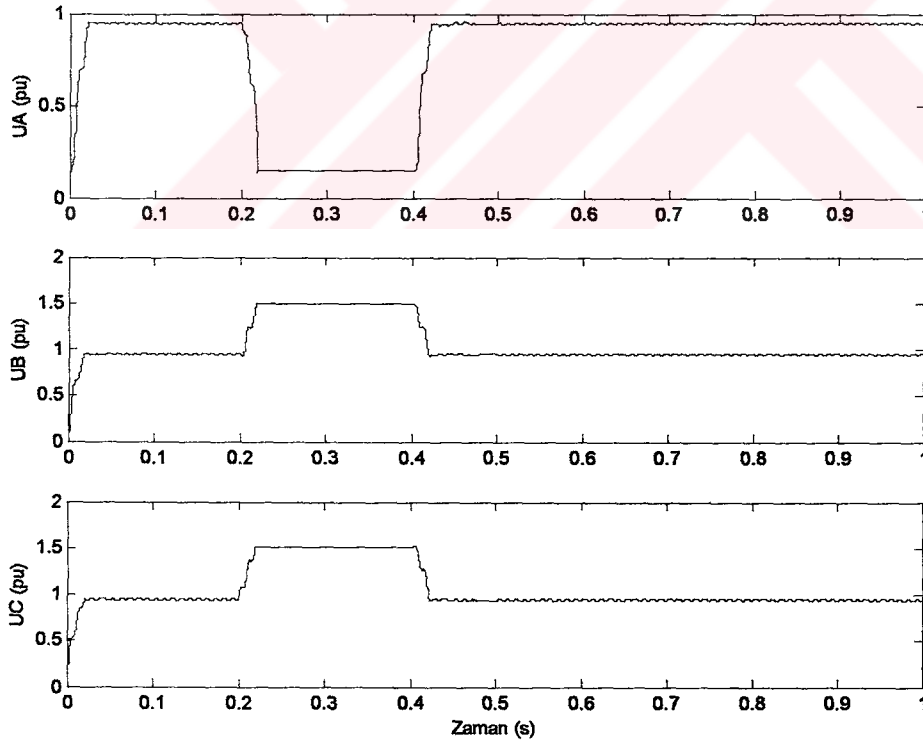


Şekil 5.14 D₁₁ barasındaki arızanın generatöre etkisi (3FT, 400 ms)

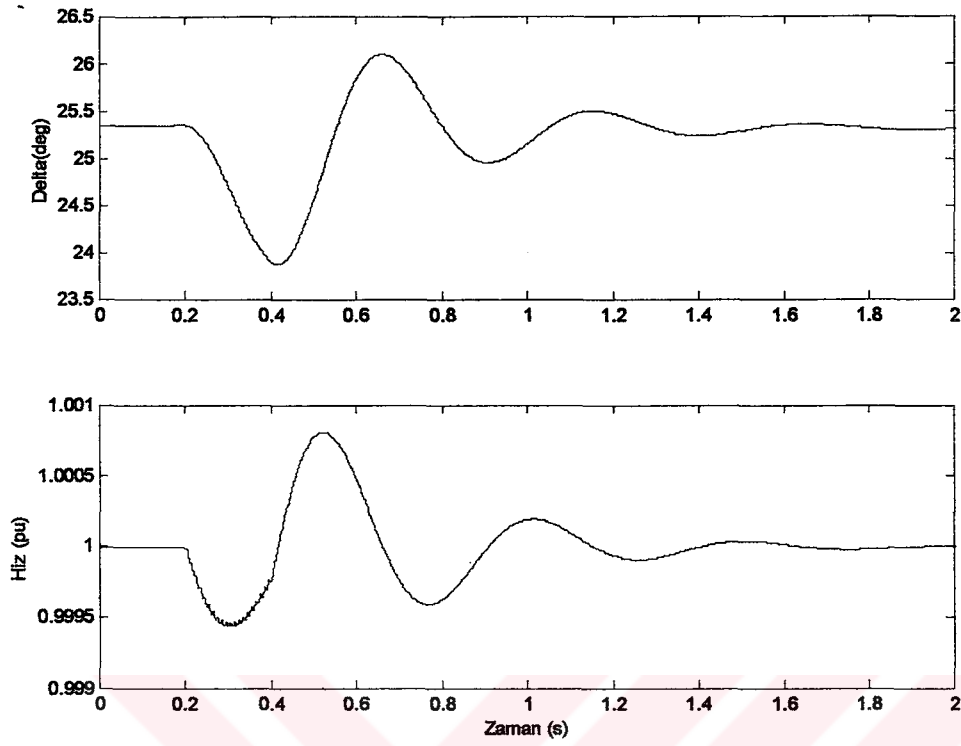
Dengesiz kısa devrelerin etkisini görmek amacıyla aynı noktalarda sırasıyla 1FT, 2F ve 2FT arızaları gerçekleştirilmiştir. Dağıtım hattı arızası 200 ms, D_11 barası arızası ise 400 ms sonra temizlenmiştir.

Tek-faz toprak arızası meydana getirdiği etki yönünden en az şiddete sahip arıza türüdür. Arızalı fazda gerilim düşerken, diğer fazlarda yükselme meydana gelebilmektedir.

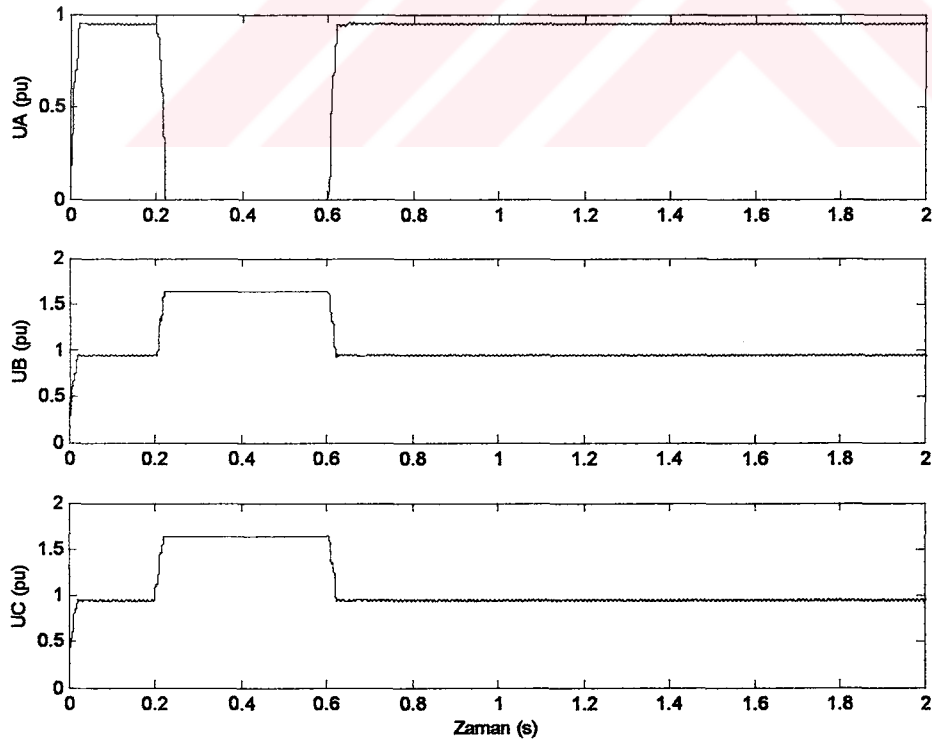
Buradaki benzetimlerde de görüldüğü gibi (Şekil 5.15 ve 5.17) arızalı A-fazı gerilimi düşerken diğer fazlarda yükselme meydana gelmektedir. D_11 barasındaki arıza sonucu arızalı faz gerilimi sıfıra inmiştir. D1_11 ve GEN_11 baraları arasındaki hat empedansının küçük olması gerilim düşümünün aynen arıza noktası gibi olmasına yol açmıştır. Ne var ki aç ve hızdaki değişimler oldukça küçüktür.



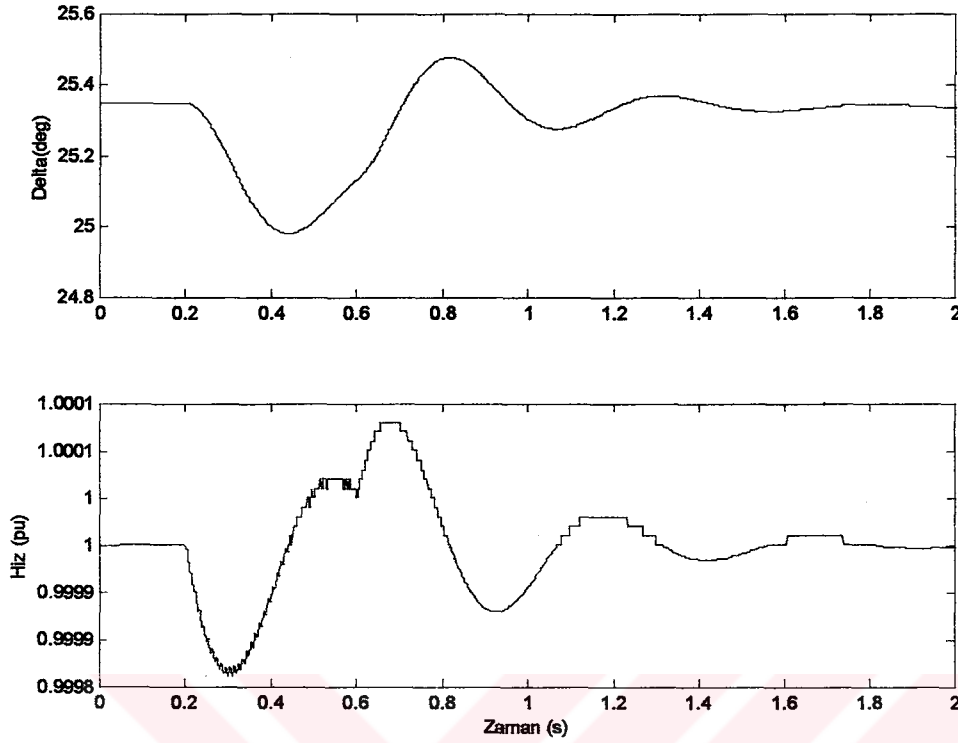
Şekil 5.15 Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (Dağıtım sistemi arızası, 1FT, 200 ms)



7ekil 5.16 Rotor açısı ve hız değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 1FT, 200 ms)

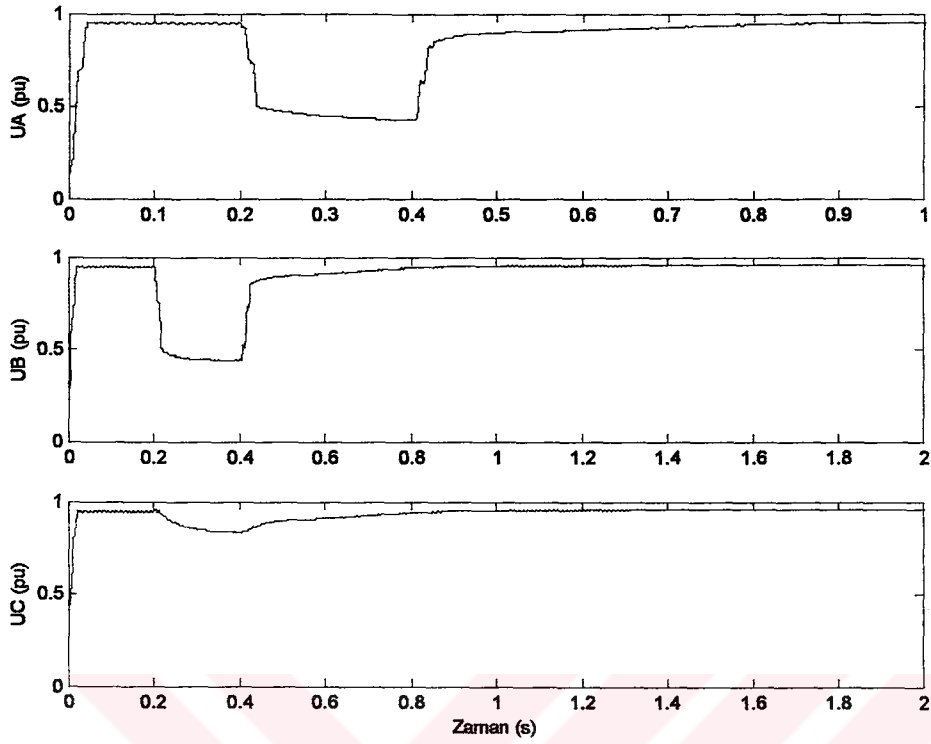


Şekil 5.17 Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (D_11 barası arızası, 1FT, 400 ms)

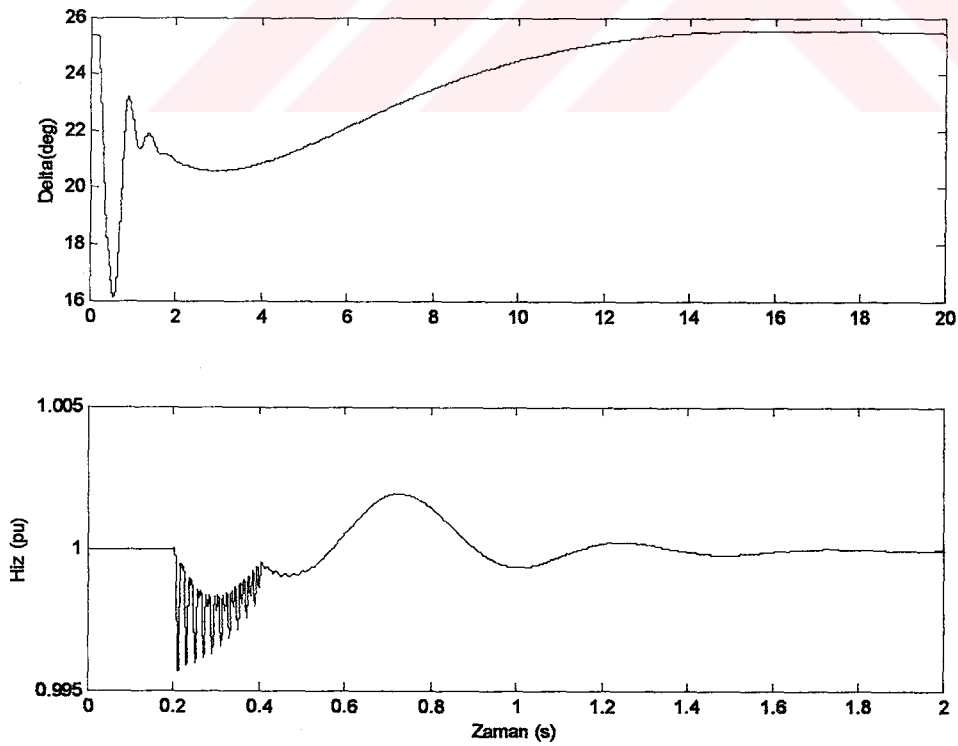


Şekil 5.18 Rotor açısı ve hız değişimleri (D_11 barası arızası, 1FT, 400 ms)

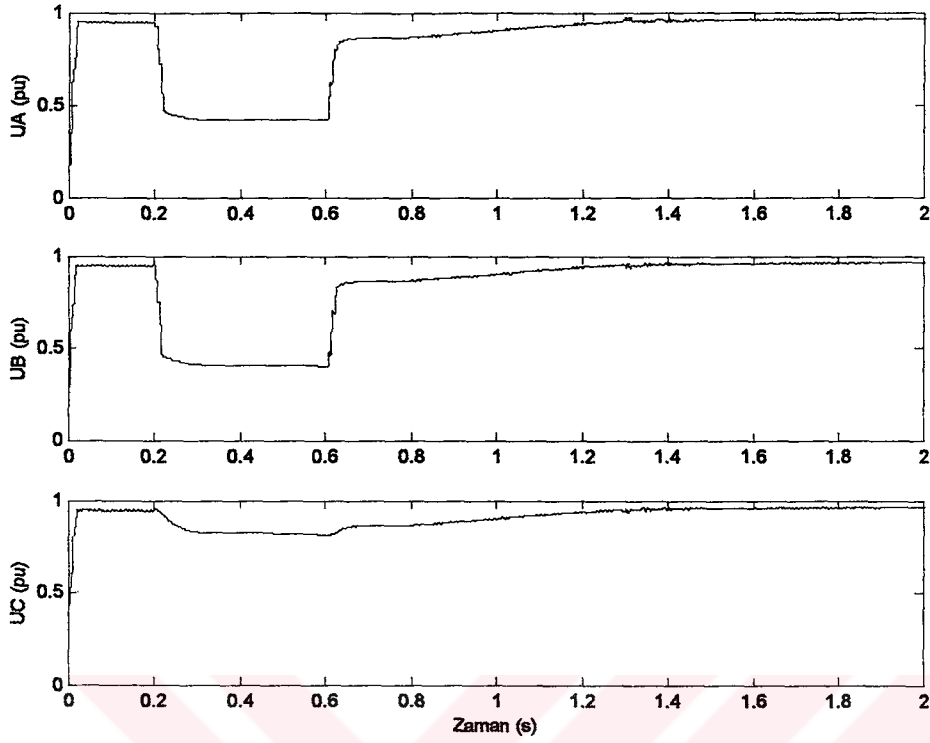
Bir diğer dengesiz arıza şekli olan faz-faz kısa devresi sırasında uç gerilimi ile açı ve hızdaki değişimler aşağıdaki gibi gerçekleşmiştir. Dağıtım sistemi kısa devresinde her üç fazda da düşme yaşanmıştır. C fazındaki azalma daha az olmaktadır. Ayrıca rotor açısı ve hızda ki (Şekil 5.20) salınımlar artmıştır. Ayrıca arıza sonrası gerilim düşümünün de etkisiyle rotor açısında geç bir düzelme meydana gelmektedir. Ancak kararlılık açısından bakıldığında tek generatörlü durumda kararsızlığa gitmeye yol açacak ciddi bir sorun görülmemektedir. Generatörlerin ataleti ve anma gücü bu konuda önemli bir etkidir.



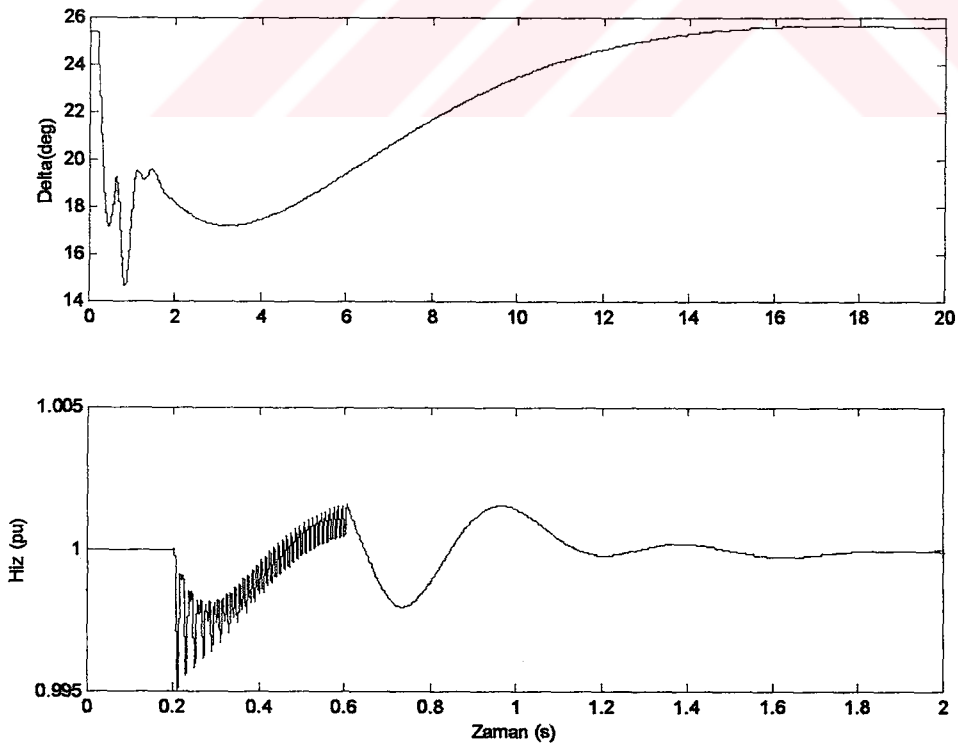
Şekil 5.19 Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (Dağıtım sistemi arızası, 2F, 200 ms)



Şekil 5.20 Rotor açısı ve hız değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 2F, 200 ms)

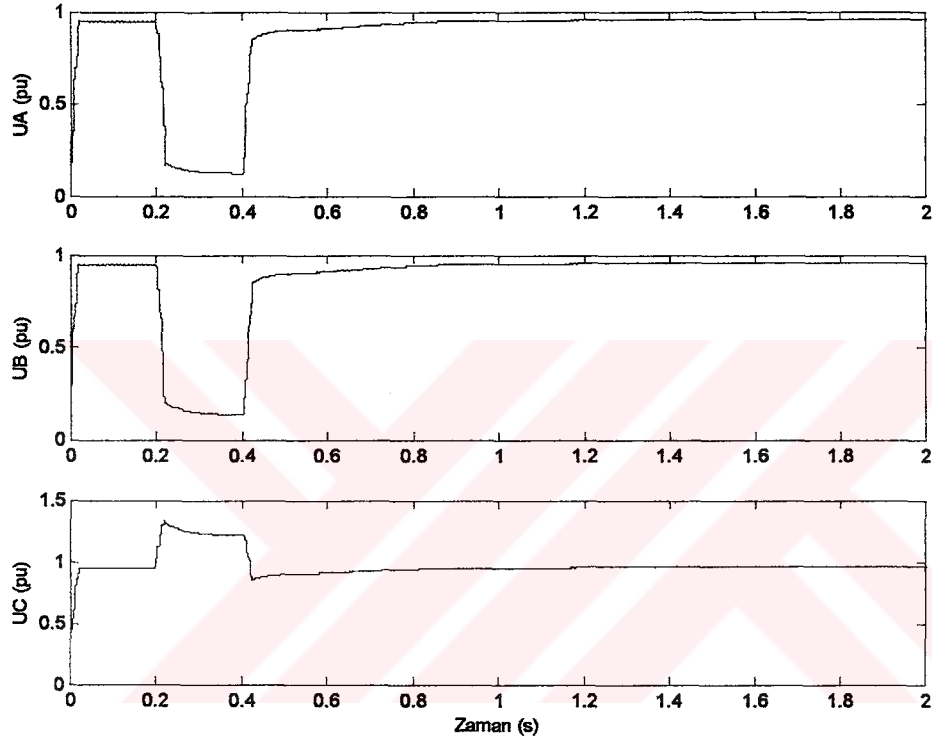


Şekil 5.21 Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (D_11 barası arızası, 2F, 400 ms)

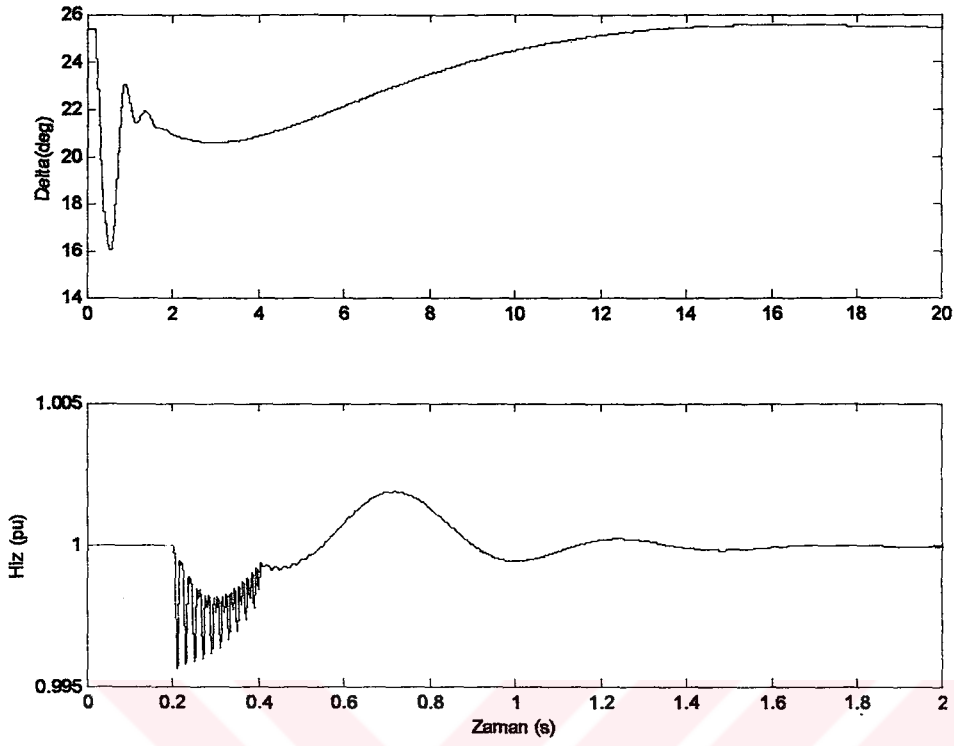


Şekil 5.22 Rotor açısı ve hız değişimleri (D_11 barası arızası, 2F, 400 ms)

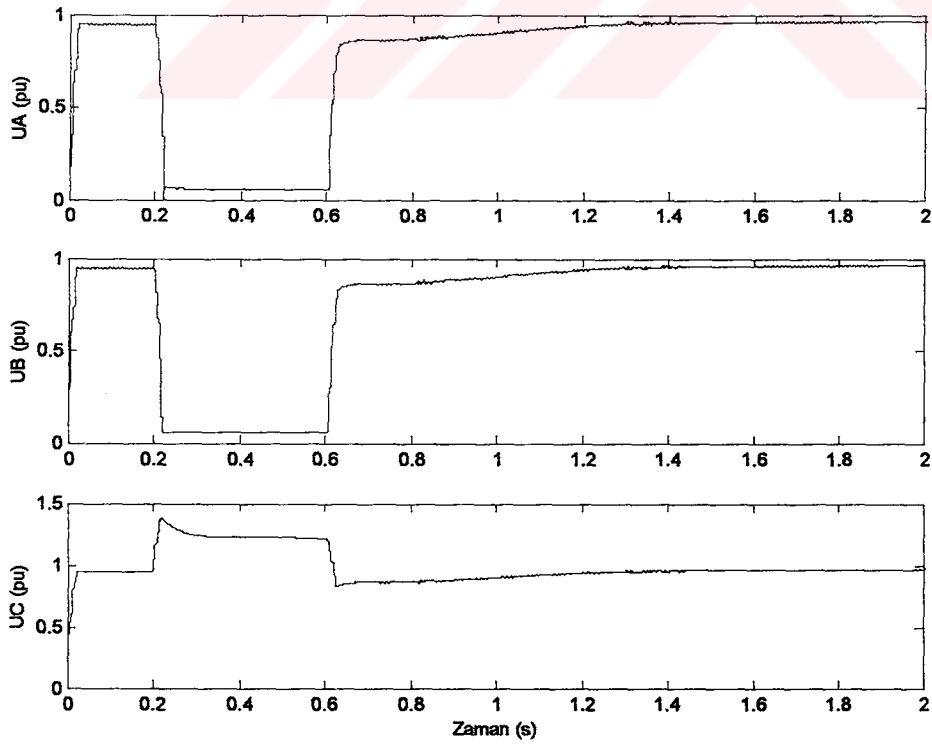
Son olarak incelenen iki faz toprak kısa devresinde arızalı fazlarda gerilimin önemli ölçüde düştüğü diğer fazda ise yükselme yaşandığı her iki yerdeki (Dağıtım, D_11) kısa devreler için elde edilen gerilim eğrilerinde görülmektedir. Yük açısı ve hızdaki değişimler iki durum içinde birbirine çok yakın gerçekleşmiştir. Ayrıca dengesiz arıza durumlarında arıza süresince yüksek frekanslı hız salınımları dikkati çekmektedir.



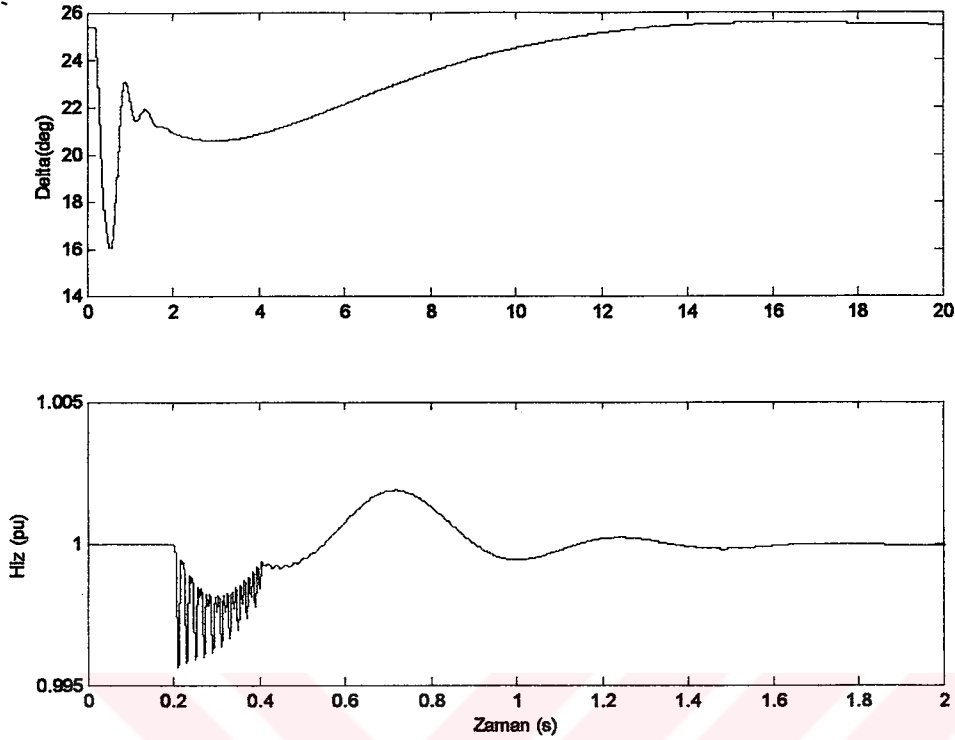
Şekil 5.23 Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (Dağıtım sistemi arızası, 2FT, 200 ms)



Şekil 5.24 Rotor açısı ve hız değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 2FT, 200 ms)



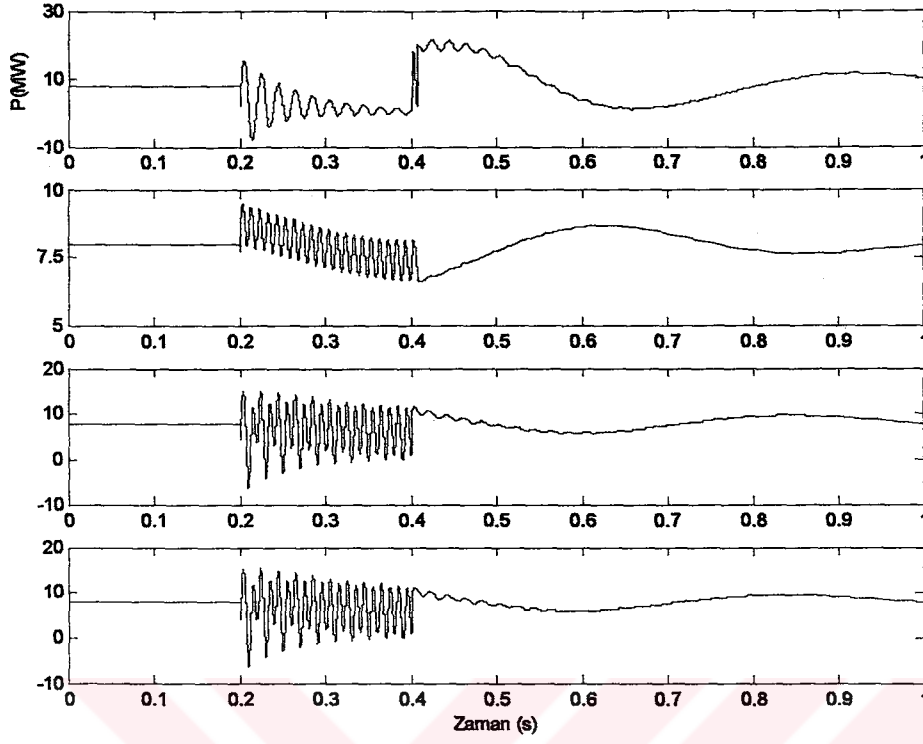
Şekil 5.25 Yerel generatör faz-nötr gerilimleri (D_11 barası arızası, 2FT, 400 ms)



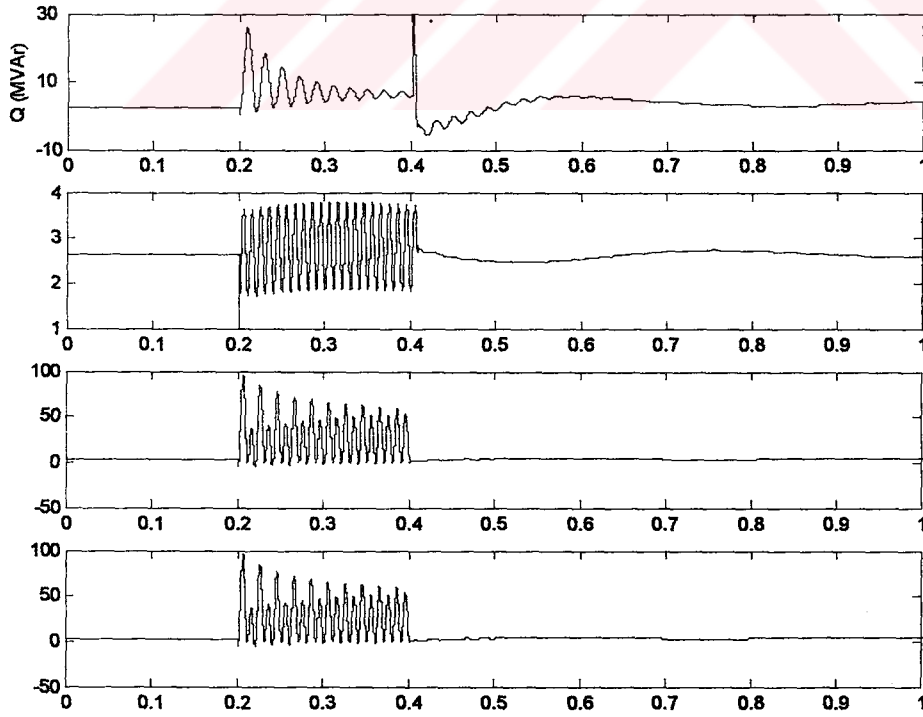
Şekil 5.26 Rotor açısı ve hız değişimleri (D_11barası arızası, 2FT, 400 ms)

5.5.2 Moment ve güç değişimleri

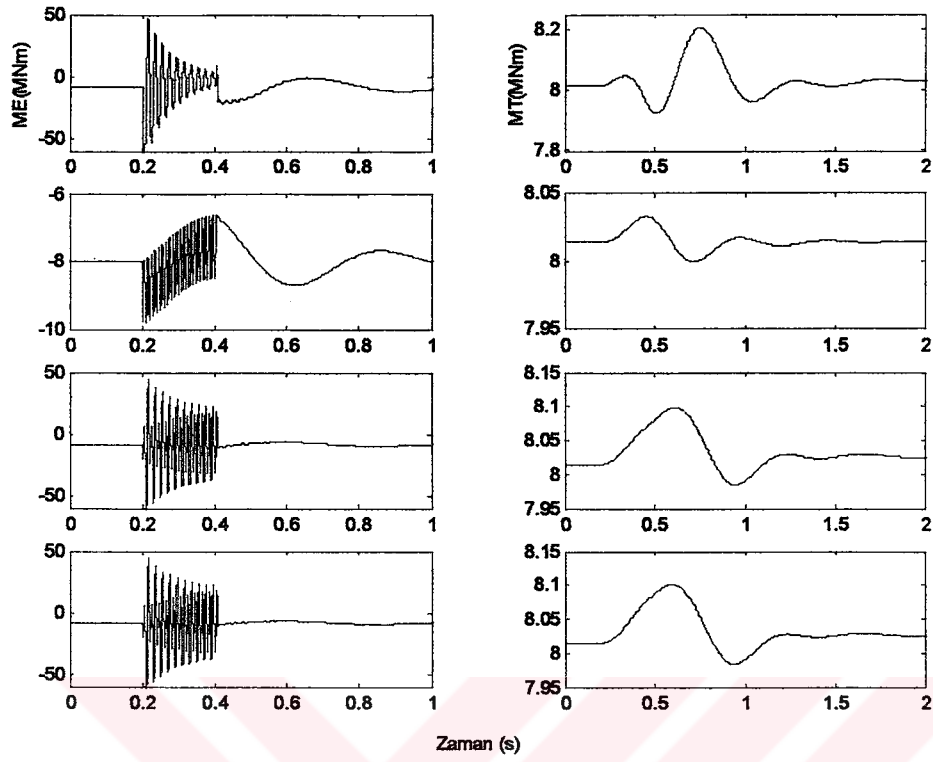
Bu kısımda yukarıdaki simülasyon durumları sırasında aktif-reaktif güç ile mekanik-elektromagnetik moment değişimleri gözlenmiştir. Aşağıda verilen eğrilerde yukarıdan aşağıya doğru 3FT, 1FT, 2F, 2FT arızalarındaki değişimler yer almaktadır. İlk olarak dağıtım sistemi barasına ait sonuçları irdelemek gerekirse; dengesiz arızalar sırasında güçlerde ve elektromagnetik momentte meydana gelen yüksek frekanslı ve düzensiz salınımlar göze çarpmaktadır. Özellikle 2F ve 2FT arızasında bu salınımların genliği arıza öncesine göre iki katına yaklaştığı görülmektedir. Yine 3FT arızası sırasında aktif gücün azalma yönünde salınımlar gösterdiği Şekil 5.27’de görülmektedir. Gerilimi sıfıra yaklaşması sonucu yükler güç talep edememektedir. Böylece azalma olmaktadır. Benzer şekilde elektromagnetik moment (Şekil 5.29 sol üst) de azalma oluşmaktadır. Mekanik moment üreten türbin sistemi bu kadar hızlı gelişen olaya cevap vermede geciktiğinden salınım denklemi gereği üretilen güç tüketilenden fazla olmakta ve generator hızlanmaktadır (Bkz Şekil 5.14, 5.15).



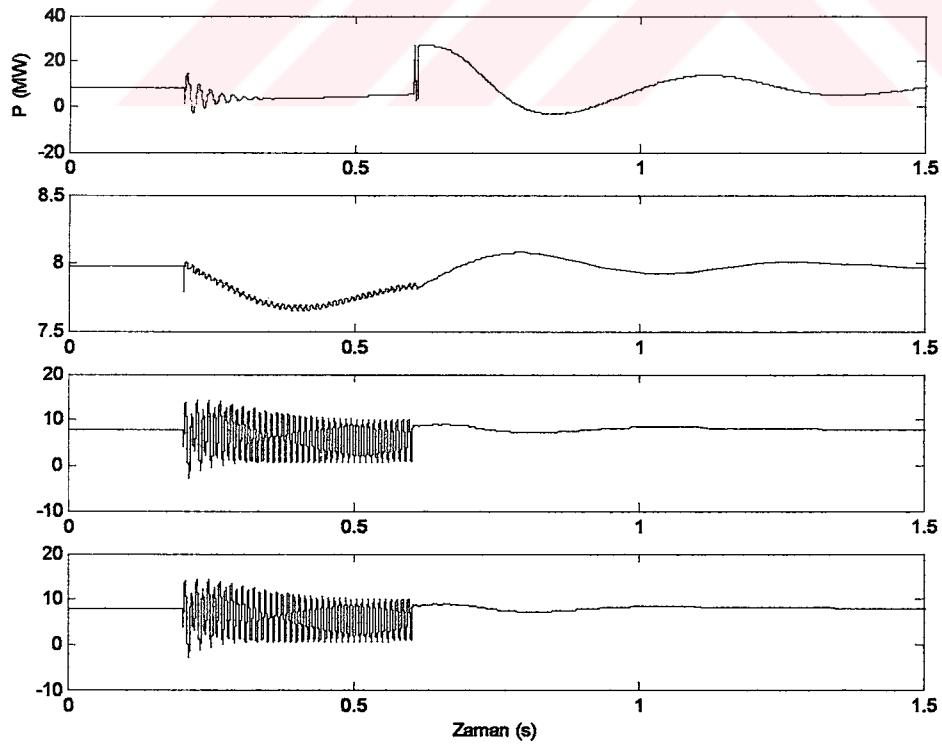
Şekil 5.27 Aktif güç değişimi (Dağıtım sistemi arızası, 3Ft, 1FT, 2F, 2FT, 200 ms)



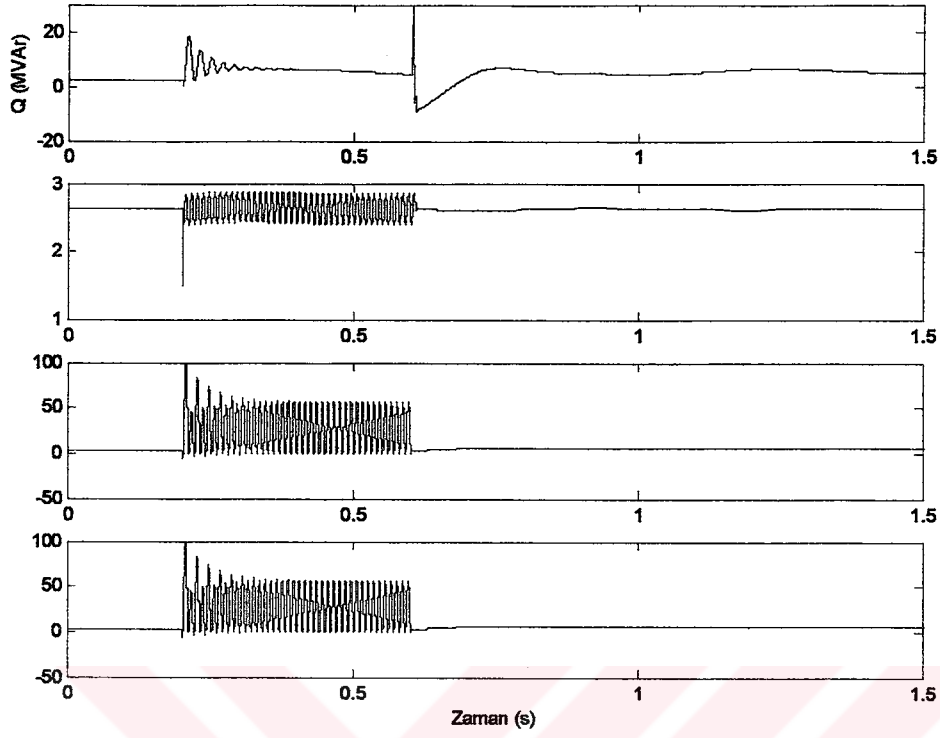
Şekil 5.28 Reaktif güç değişimi (Dağıtım sistemi arızası, 3Ft, 1FT, 2F, 2FT, 200 ms)



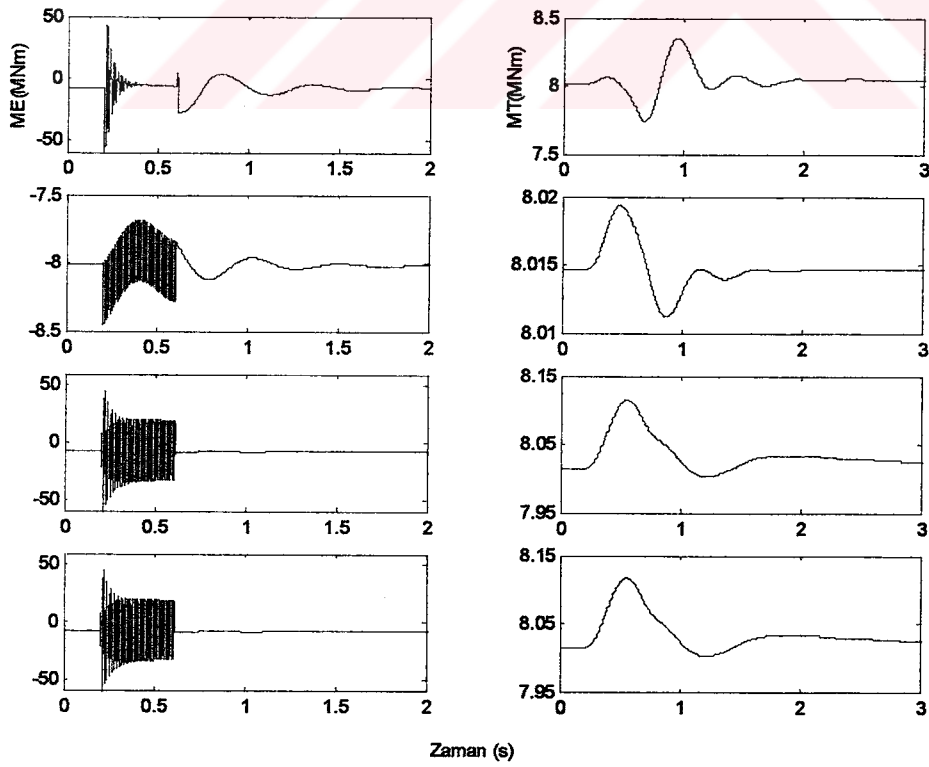
Şekil 5.29 Moment değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 3FT, 1FT, 2F, 2FT)



Şekil 5.30 Aktif güç değişimi (D_11 barası arızası, 3Ft, 1FT, 2F, 2FT, 400 ms)



Şekil 5.31 Reaktif güç değişimi (D_11 barası arızası, 3Ft, 1FT, 2F, 2FT, 400 ms)



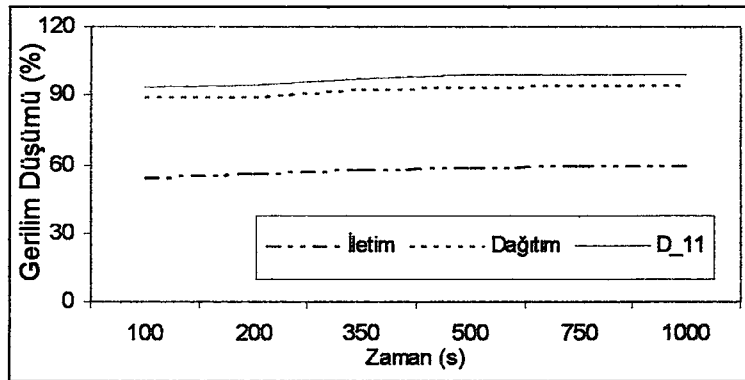
Şekil 5.32 Moment değişimleri (D_11 barası arızası, 3Ft, 1FT, 2F, 2FT, 400 ms)

Dağıtım sistemi arızalarında yaşanan güç ve moment değişimleri için geçerli olan sonuçları D_11 arızasındaki durum içinde geçerlidir.

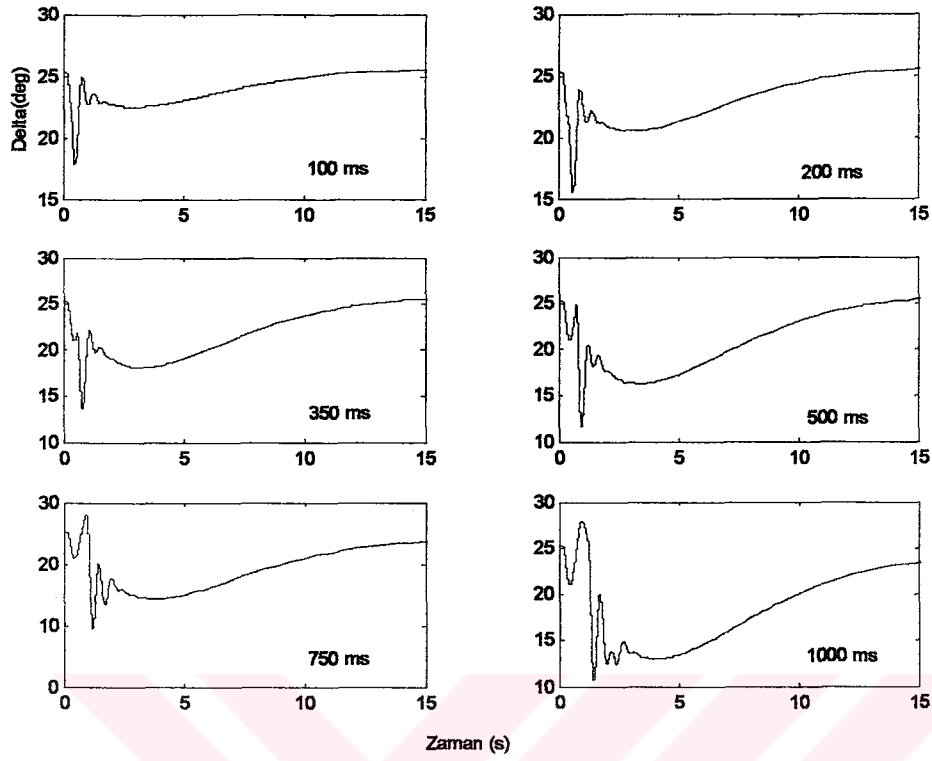
Bu kısımdaki benzetimlerin verdiği sonuçları özetlemek gerekirse, generatör terminallerindeki gerilim düşümü ne kadar fazla olursa elektromekanik salınımlar ve dinamik kararlılık problemleri o kadar fazla olmaktadır. Özellikle yakın ve uzun süreli arızalarda kararsızlık problemleri karşılaşmak mümkündür. Bu nedenle koruma sisteminin performansı yani arıza temizleme zamanı önemli bir kararlılık etkenidir.

5.6. Arıza Temizleme Zamanının Generatörlere Etkisi

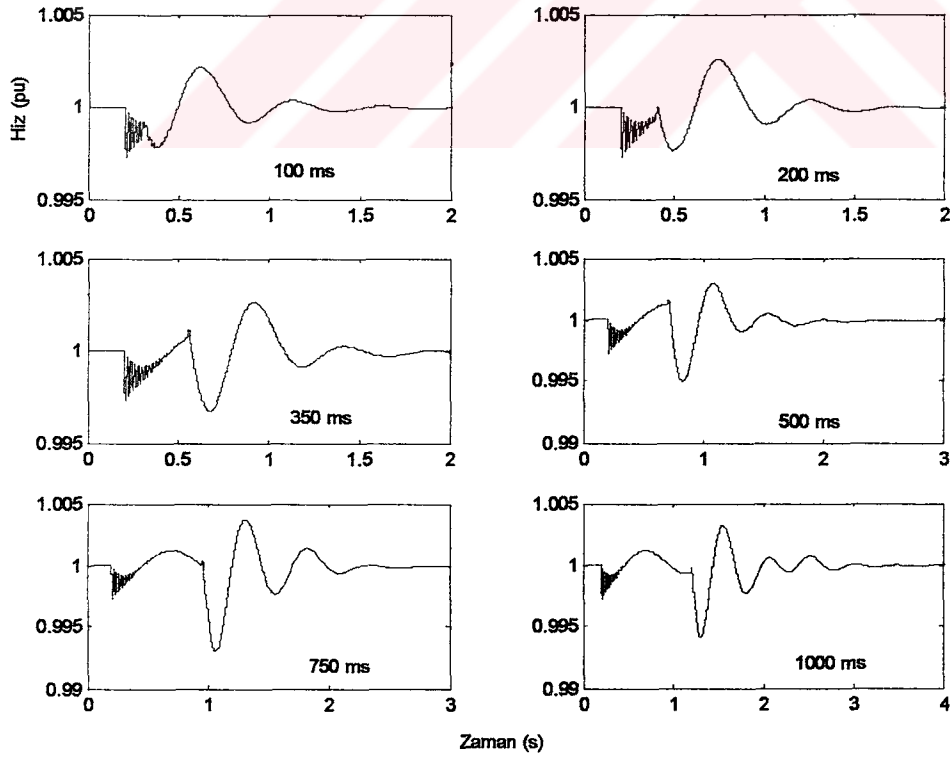
Arıza temizleme zamanı koruma sistemi cihazlarının performansı ve hızına bağlı bir kavramdır. Bunun yanı sıra arıza yeri ile koruma sistemi arasındaki mesafe açma hızını belirleyen bir başka faktördür. Bu bölümdeki benzetimlerde yerel generatör ile şebekenin birlikte çalıştığı ve yerel santralin endüstriyel sistemin toplam enerji ihtiyacının %50 sini 0.95 güç faktörü ile karşıladığı bir durumda iletim hattı (SBK-SBK154 üst hattın orta noktası), dağıtım hattı (SBK35-SBK34 hattının ortası) ve D_11 barasında meydana gelen üç faz toprak simetrik arızası ele alınacaktır. Altı farklı arıza temizleme durumunda meydana gelen gerilim düşümü miktarı Şekil 5.33’de verilmektedir. Görüldüğü gibi ilk ve son değerler arasında gerilim açısında büyük bir farklılık görülmemektedir.



Şekil 5.33 Arıza temizleme zamanı gerilim düşümü değişimi



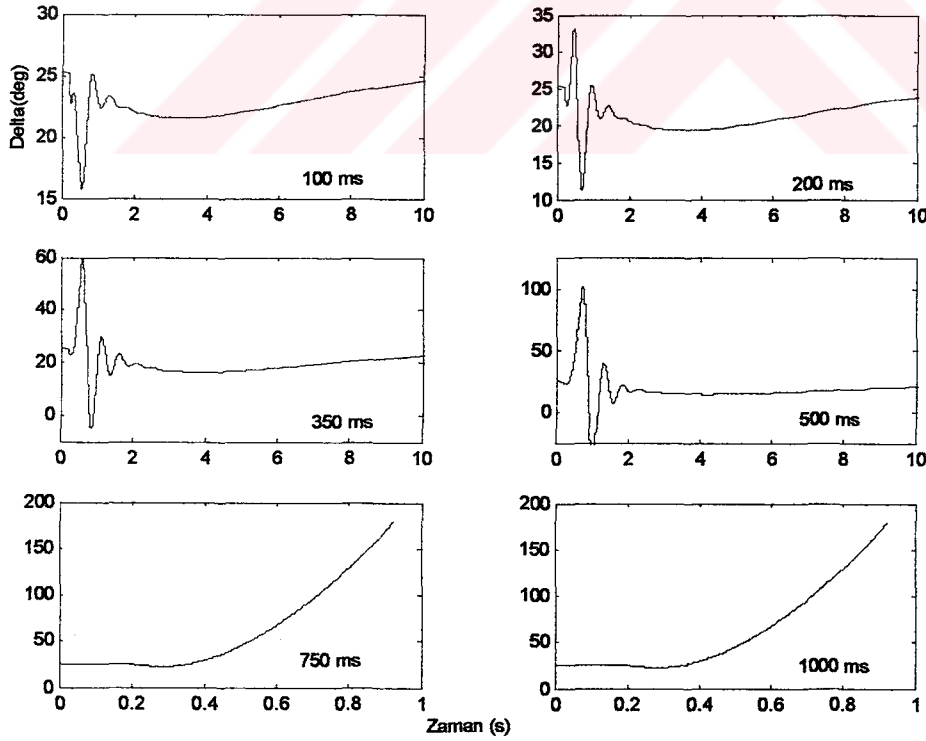
Şekil 5.34 Farklı arıza süreleri için rotor açıları değişimi (İletim, 3FT)



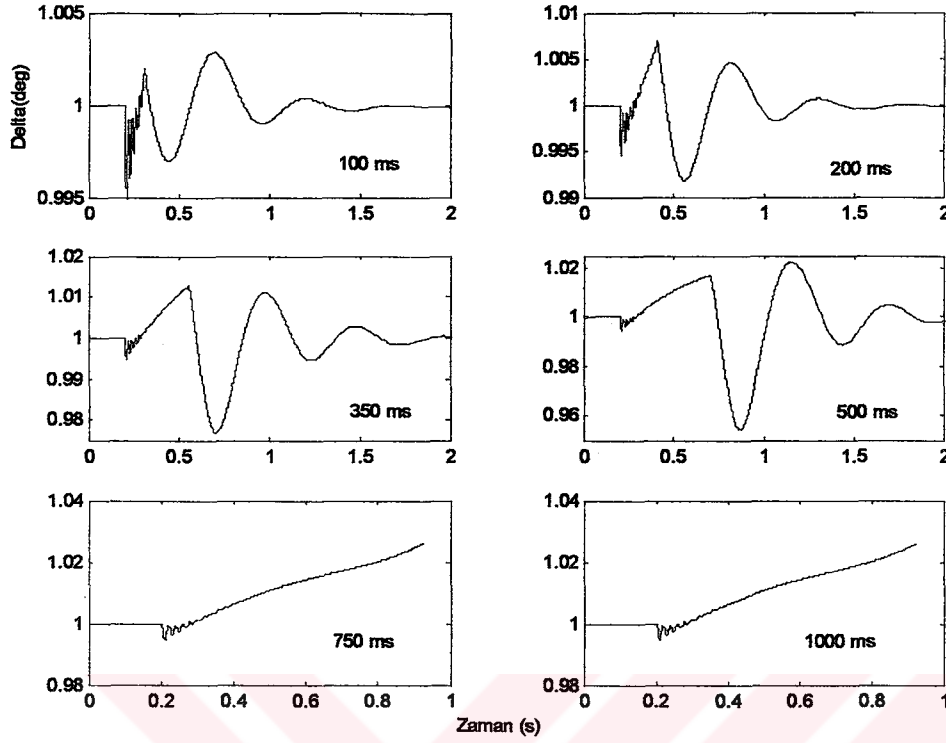
Şekil 5.35 Farklı arıza süreleri için açısal hız değişimi (İletim, 3FT)

Şekil 5.34 ve 5.35’de uzak sayılabilecek ve etkisi nispeten daha az olan iletim sistemi arızası durumunda farklı temizleme zamanlarına karşılık açı ve hız değişimleri görülmektedir. Gerilimdeki önemsiz değişime rağmen, açı ve hızda süre arttıkça salınımların genliği ve süresi ile arıza sonrasındaki oturma süresi artmaktadır. Özellikle hız eğrisinde 750 ve 1000 ms süreleri ait değişime bakarsak, arıza esnasında bir süre sonra hız tepe değerinden dönerek azalmaya başlamaktadır. Mekanik türbin sistemi bu bozucu olayı telafi edecek şekilde mekanik giriş gücünü arttırarak, şebekeden gelmeyen gücüde generatöre yükleme imkanı bulunmuştur.

Ancak şiddetli arızalar için bu kadar şanslı olunamaz. Aşağıda verilen eğrilerde görüleceği gibi generatörlerin açı ve hızları güç dengesinin yeterince sağlanamamasından dolayı kararsızlığa gidebilmiştir. Buradan elde edilen sonuç, gerilim düşümü olaylarında sadece gerilime bakarak generatörün davranışı hakkında yeterli fikre sahip olunamaz. Mutlaka kararlılık incelemesi yapılmalıdır. Aşağıdaki eğrilerde D_11 barasındaki arıza durumu için elde edilen açı ve hız sonuçları verilmektedir.



Şekil 5.36 Farklı arıza süreleri için rotor açıları değişimi (D_11, 3FT)

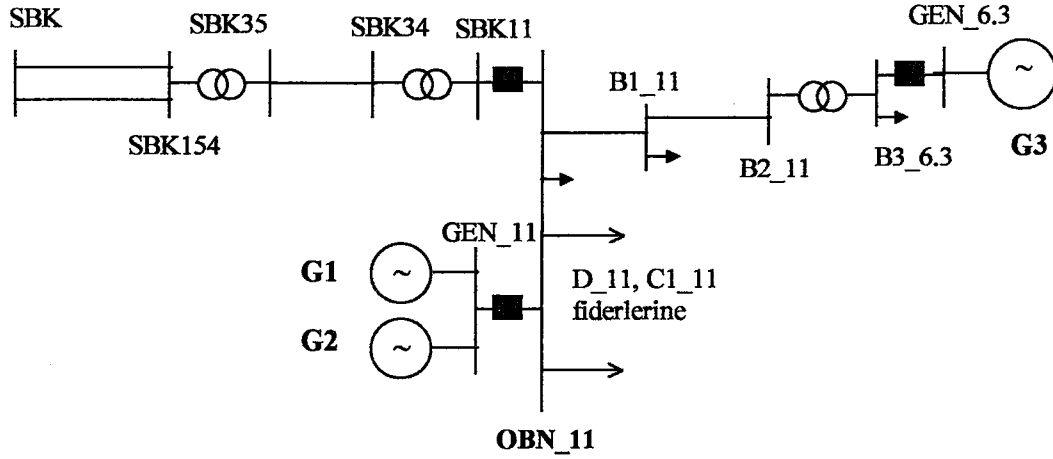


Şekil 5.37 Farklı arıza süreleri için açısal hız değişimi (D_11, 3FT)

5.7. İki Farklı Yerel Generatörün Bulunduğu Dağıtım Sisteminde Dinamik Kararlılık Problemleri

5.7.1 Arıza temizleme zamanının generatör davranışına etkisi

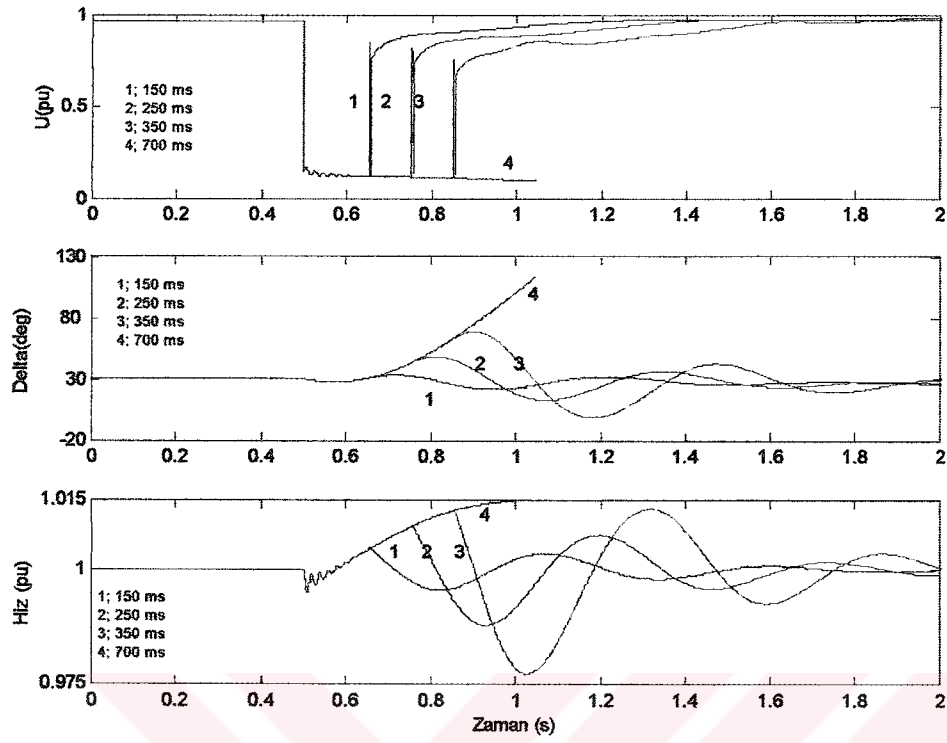
Arıza temizleme zamanı meydana gelen gerilim düşümünün iki karakteristik özelliğinden biridir. İkinci bölümde belirtildiği gibi genlik ve süre kısa süreli gerilim düşümlerinin tanımlanmasına kullanılan iki temel belirleyici idi. Bu bölümde endüstriyel sisteme farklı noktalardan bağlı, farklı güç ve gerilime sahip yerel generatörlerin etkileşimleri ve dinamik kararlılık problemleri incelenmiştir. İlk olarak arıza temizleme zamanı yani gerilim düşümü süresinin generatörlere etkisi ele alınacaktır. Bu amaçla aşağıdaki şekilde gibi örnek sistemde modifikasyon yapılmıştır. B3_6.3 kV barasına kesici üzerinden bağlı yeni bir yerel generatör eklenmiştir. Söz konusu generatör 6.3 kV anma geriliminde 16.6 MVA anma gücüne [63] sahiptir.



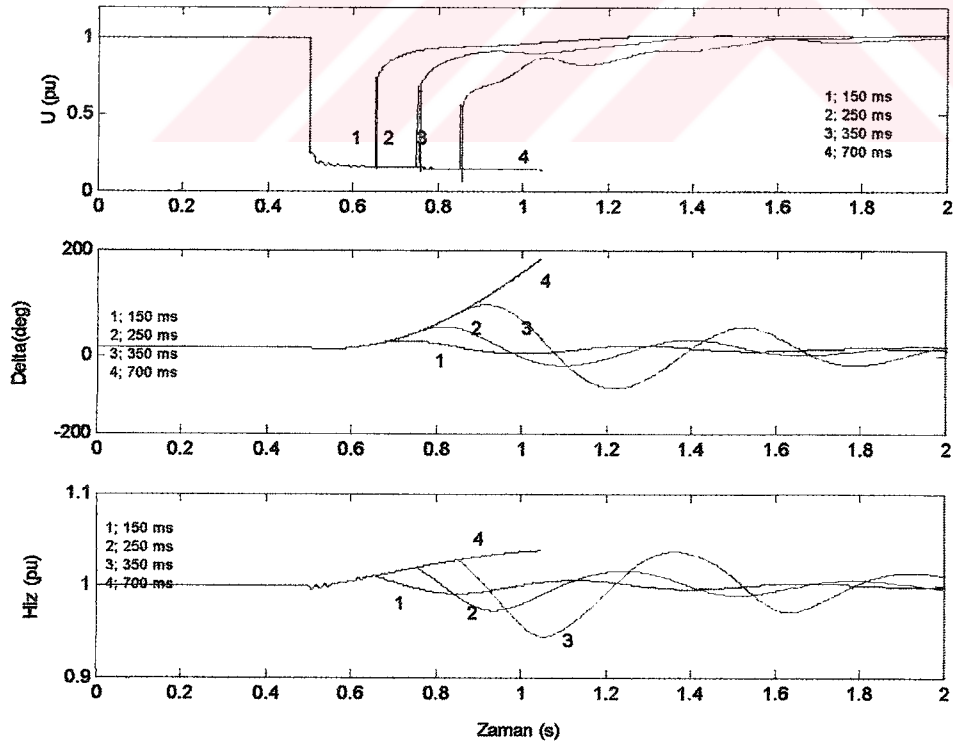
Şekil 5.38 Düzenlenmiş örnek sistem tek hat şeması

Arıza temizleme zamanının generatör davranışına etkisini görmek amacıyla, B1_11 barasında meydana gelen üç faz toprak simetrik kısa devresi dikkate alınmıştır. Arızanın sırasıyla 150, 250, 350 ve 700 ms'de temizlenmesi durumlarına ait benzetim sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. G1 ve G2 generatörü özdeş olup eşit yük paylaşımı yapmışlardır. Bu nedenle sadece G1 ve G3 generatörlerine ait değişimler verilmiştir. Bu şekillerde her iki generatörün efektif uç gerilimi, aktif-reaktif gücü, rotor açısı, rotor hızı ve uyarma gerilimi yer almaktadır.

İlk üç egride sistem kararlı halde devam ederken, son durum yani 700 ms'lik arıza temizleme zamanına ait benzetimlerde her iki generatörde kararsızlığa gitmektedir. Generatörler birinci saniyede kararsız duruma geçmişlerdir. Gen1'ye ait değişimler Şekil 5.40'da Gen3'e ait değişimler ise Şekil 5.41'de verilmiştir.



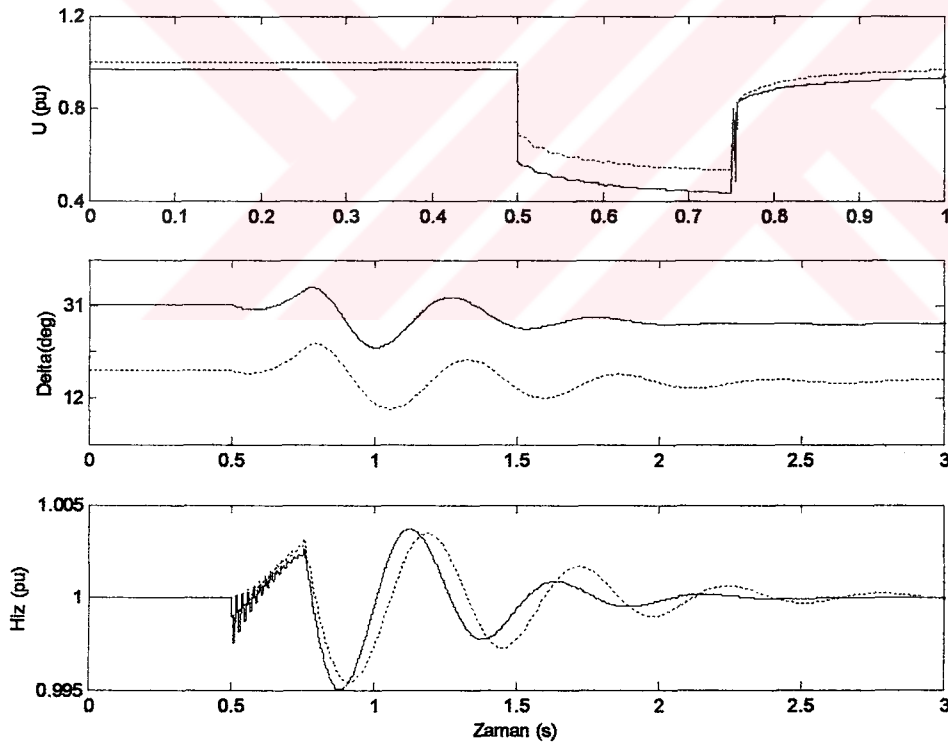
Şekil 5.39 Gen1'in uç gerilimi, açılı ve hız değişimi



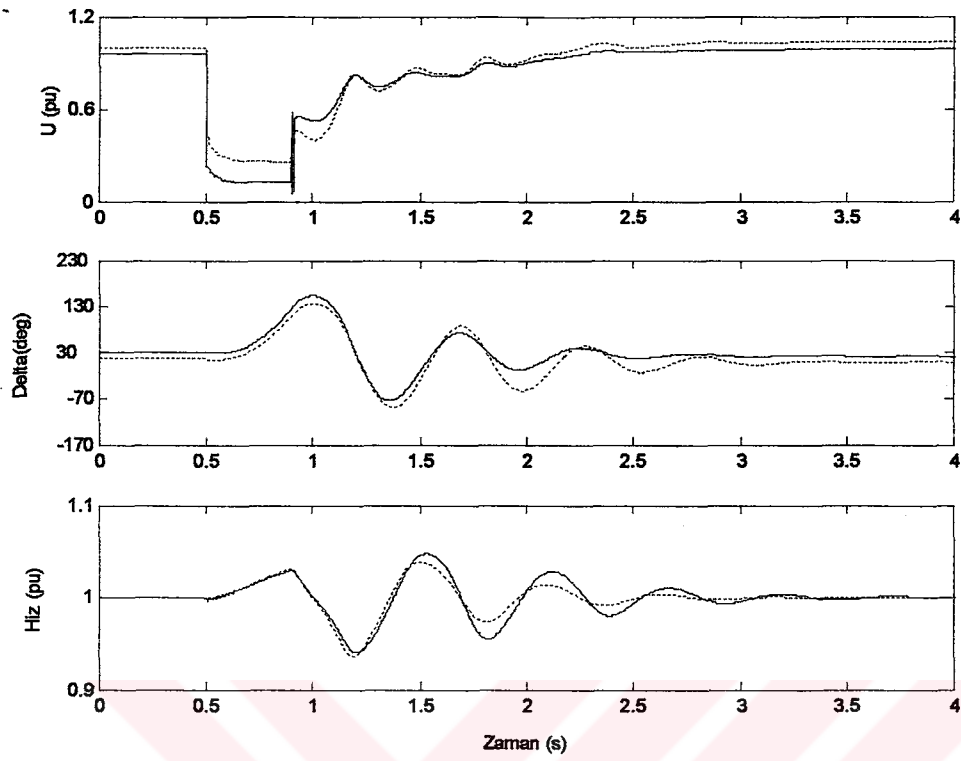
Şekil 5.40 Gen3'ün uç gerilimi, açılı ve hız değişimi

5.7.2 Arıza yerinin generatör davranışına etkisi

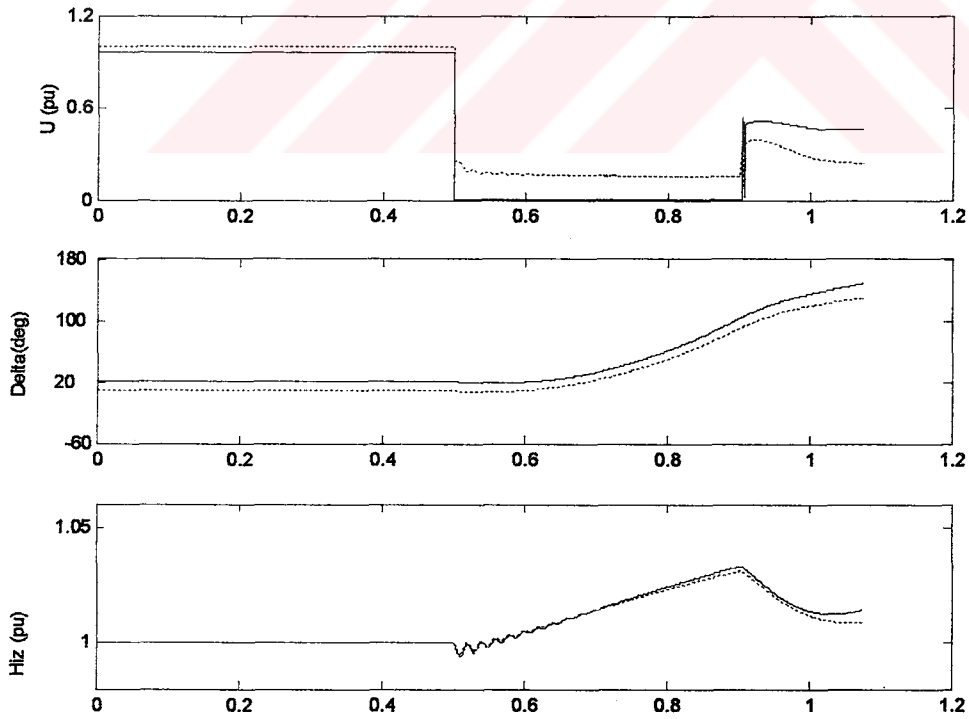
Bu kısımda örnek sistemdeki değişik noktalarda meydana gelen üç fazlı simetrik kısa devrelerin generatörlere etkisi incelenmiştir. Gerek şebeke tarafında ve gerekse yük içerisinde meydana getirilen altı farklı arıza durumunda karşılaştırmalı olarak her iki generatör uç gerilimi, rotor açısı ve hızında meydana gelen salımlar aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Eğrilerdeki sürekli çizgiler GEN_11 barasındaki generatörlerden birini, kesik çizgi ise GEN_6.3 barasındaki üçüncü generatördeki değişimleri göstermektedir. Önceki benzetimlerde de kullanılan iletim ve dağıtım sistemi arızaları yani SBK-SBK154 paralel hattan birinde ve SBK35-SBK34 hattın ortasında meydana gelen üç faz simetrik kısa devresi ile OBN_11, B1_11, D_11 ve B3_6.3 baralarındaki üç fazlı simetrik kısa devreleri durumunda generatörlerin cevabı aşağıdaki gibi elde edilmiştir.



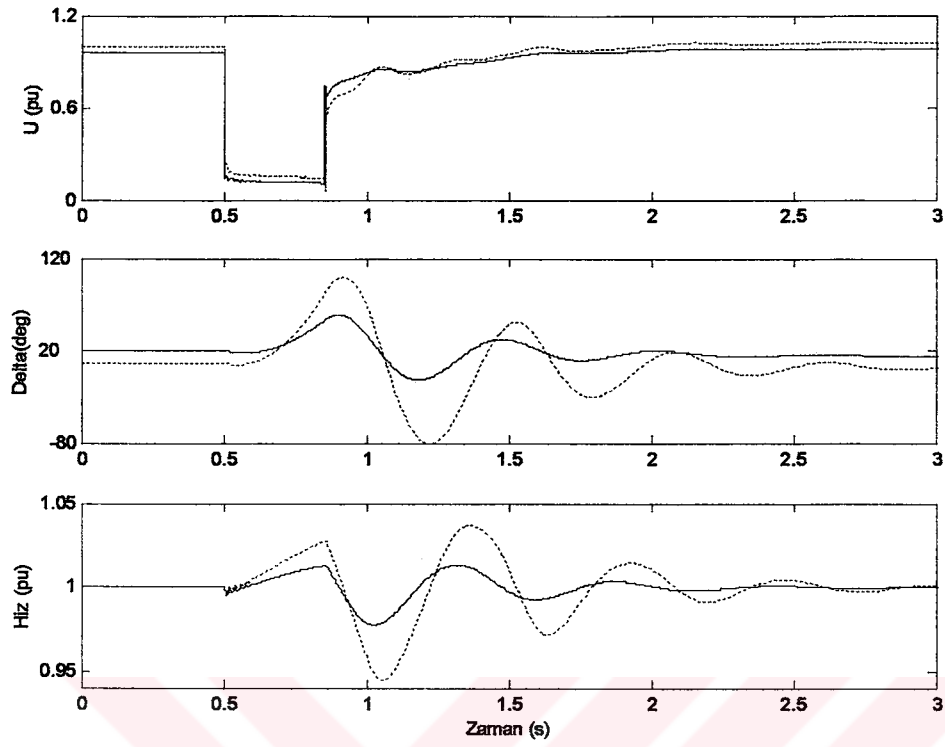
Şekil 5.41 Gerilim, açı ve hız değişimleri (İletim sistemi arızası, 3FT, 250 ms)



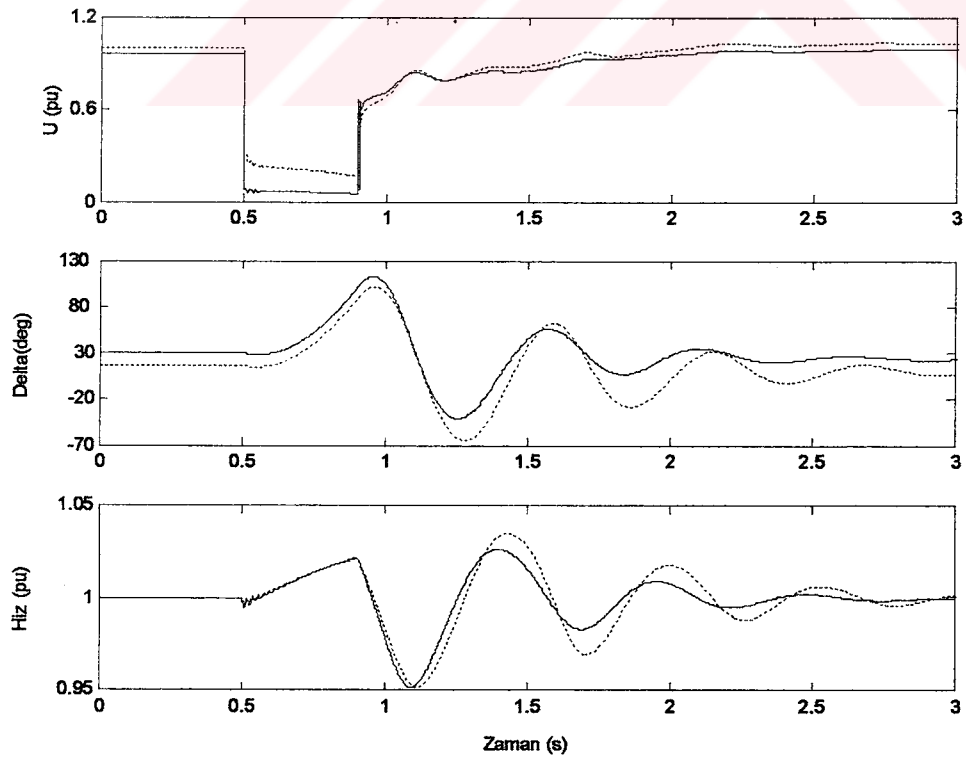
Şekil 5.42 Gerilim, açı ve hız değişimleri (Dağıtım sistemi arızası, 3FT, 400 ms)



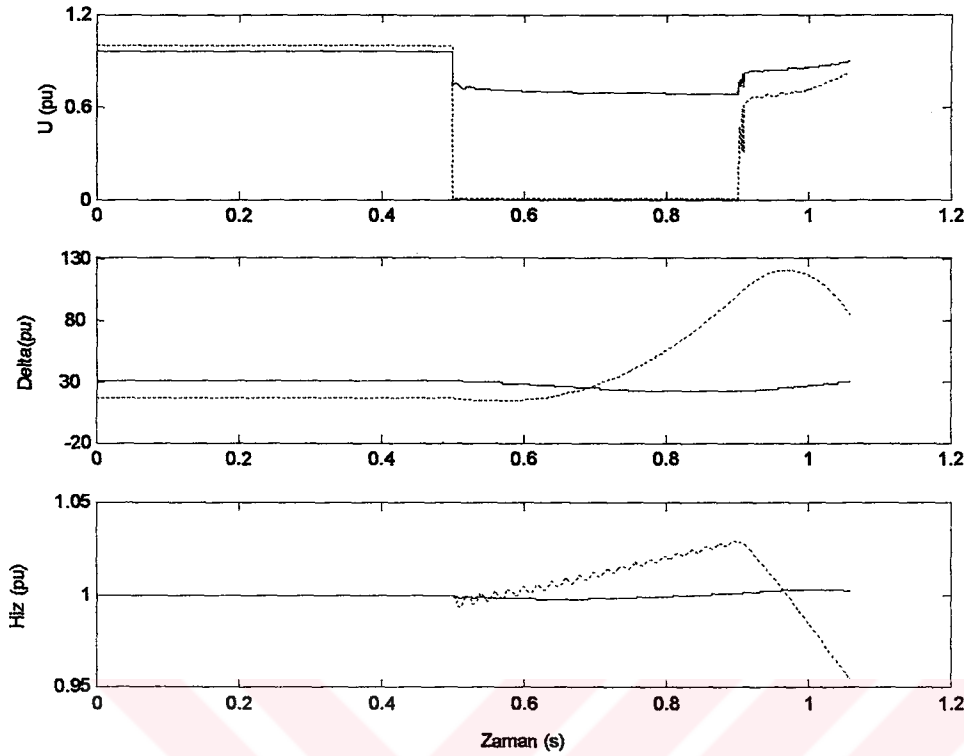
Şekil 5.43 Gerilim, açı ve hız değişimleri (OBN 211 barasındaki arıza, 3FT, 400 ms)



Şekil 5.44 Gerilim, açı ve hız değişimleri (B1_11 barasındaki arıza, 3FT, 350 ms)



Şekil 5.45 Gerilim, açı ve hız değişimleri (D_11 barasındaki arıza, 3FT, 400 ms)



Şekil 5.46 Gerilim, açı ve hız değişimleri (B3_6.3 barasındaki arıza, 3FT, 400 ms)

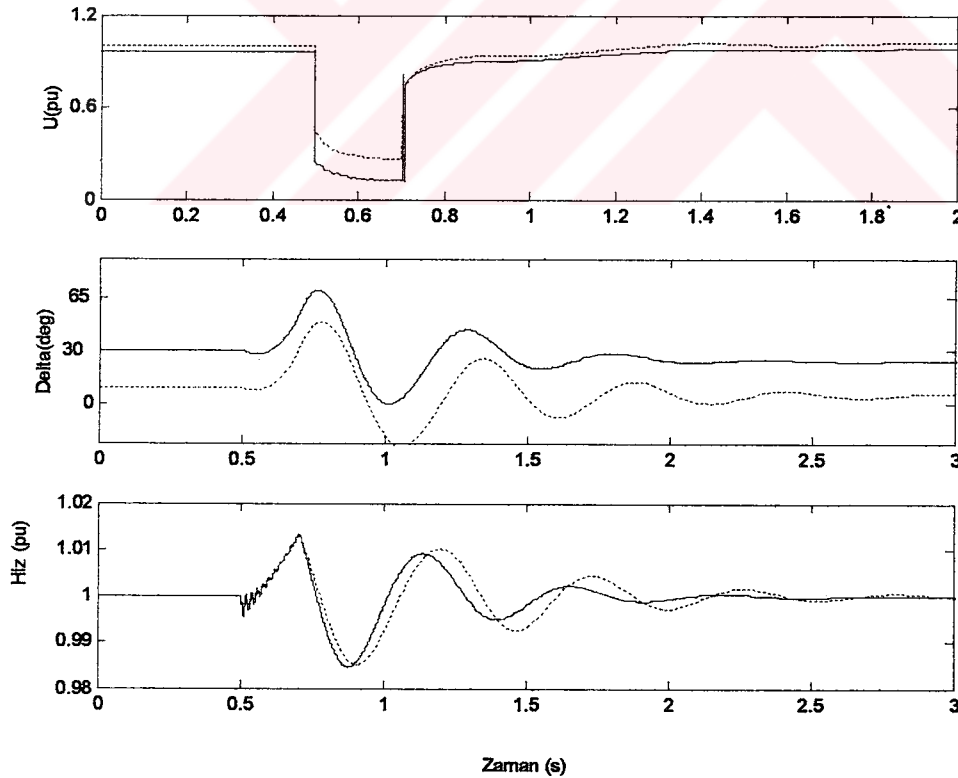
Bu sonuçlara göre öncelikle arıza generatörlere yaklaştıkça etkisinin arttığı ve ataleti daha küçük olan üç numaralı generatörün daha fazla genlikte salınımlara maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Örneğin D_11 barasındaki arızadan (Şekil 5.45) dolayı bir ve iki numaralı generatörlerin salınım genliği büyük iken, B1_11 deki arızada (Şekil 5.44) üç numaralı generatörün daha fazla salınım gösterdiği görülmektedir. Son olarak B3_6.3 barasındaki arıza durumunda üçüncü generatör bir süre sonra devre dışı kalmaktadır. Halbuki aynı durumdayken bir ve iki numaralı generatörlerde kararsız bir durum oluşmadığı yine Şekil 5.46'daki değişimlerden görülmektedir.

5.7.3 Arıza türünün generatörler üzerine etkisi

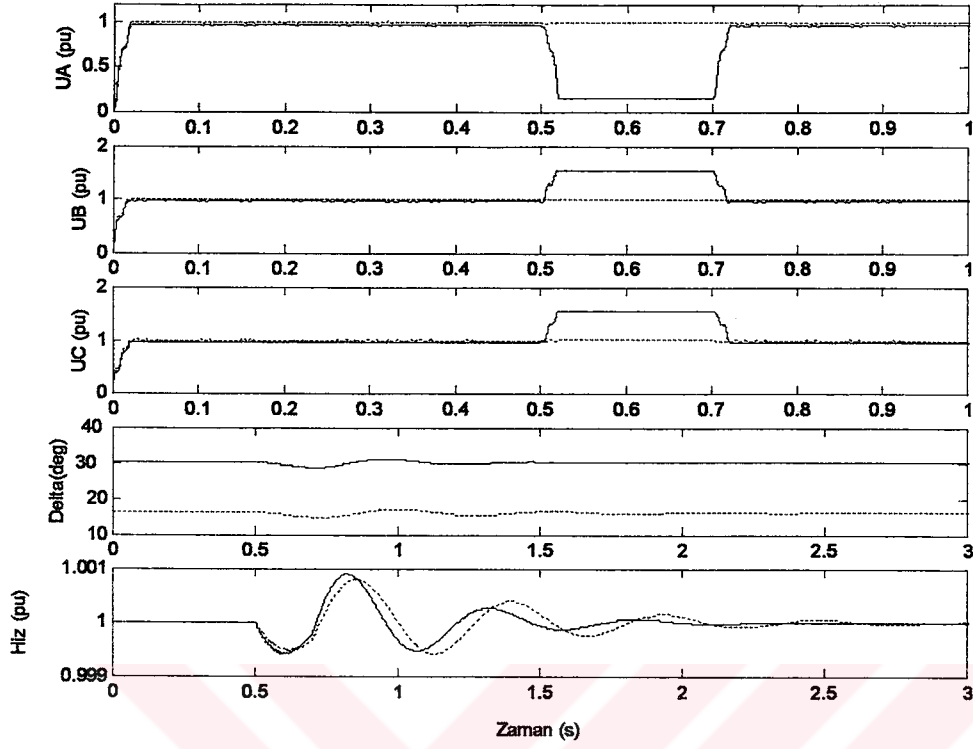
i. Şebeke kaynaklı arızaların etkisi : Şekil 5.39'da görülmekte olan örnek sistemde ŞBK35-ŞBK34 hattının orta noktasında meydana gelen dengeli ve dengesiz kısa devrelerin generatörlere etkisi aşağıdaki eğrilerdeki olmaktadır. Aşağıdaki eğrilerde 1 ve 3 numaralı generatörlerin uç gerilimi, açı ve hız değişimleri gösterilmektedir. Eğrilerden anlaşılabileceği gibi üç faz toprak simetrik kısa devresinin

etkisi daha şiddetlidir (Şekil.5.47). Ayrıca arıza yeri ile 3 numaralı generatör arasındaki transformatörün üçgen/yıldız bağlantıda olması sonucu, dengesiz kısa devrelerde generatör üzerinde oluşan gerilim değişimleri çok az hissedilmiştir. Şekil 5.48 ve 5.50'daki tek faz toprak ve iki faz toprak kısa devrelerinde üçüncü generatöre ait gerilim (kesik çizgili) düşümleri sıfıra yakın oluşmaktadır. Tüm arıza türlerinde temizleme zamanı 200 ms'dir.

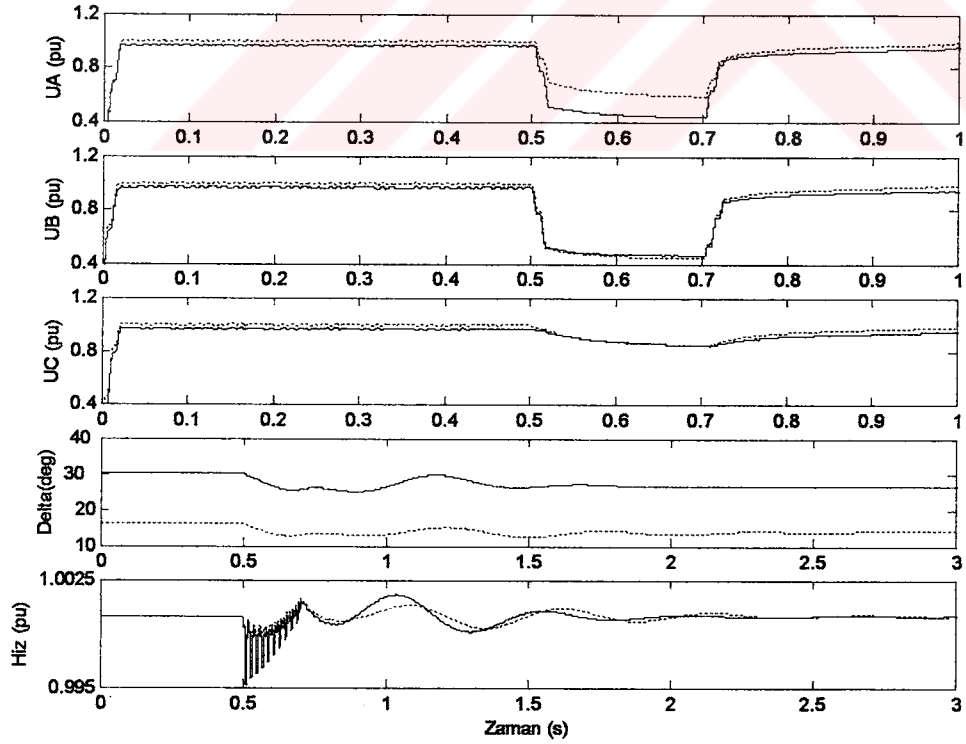
ii. İç arızaların etkisi : Bu bölümde D_11 barasında meydana gelmekte olan dengeli ve dengesiz kısa devrelerin etkisi karşılaştırılmıştır. Arıza yerinin generatörlere yakın olması meydana getirdiği etkiyi arttırmıştır. Örneğin üç fazlı arızaya ait değişimlerden görüldüğü gibi (Şekil 5.51) rotor açısı değişimleri $\pm 75^\circ$ 'lik bir aralıkta gerçekleşmiştir. Arıza daha geç temizlenmiş olsaydı generatörlerin kararsızlığa gitmeleri kaçınılmaz olacaktı. Bu baradaki dengesiz kısa devreler ise (Şekil 5.52, 5.53, 5.54) üç faza göre daha az problem oluşturmuşlardır.



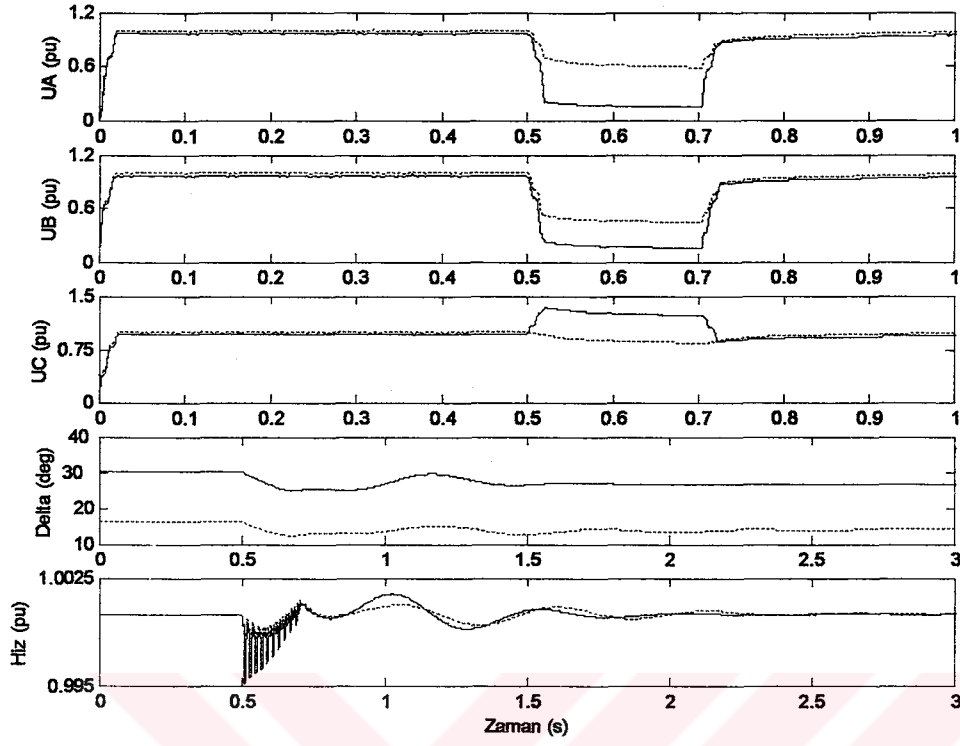
Şekil 5.47 Şebeke kaynaklı üç faz arızasının yerel generatörlere etkisi



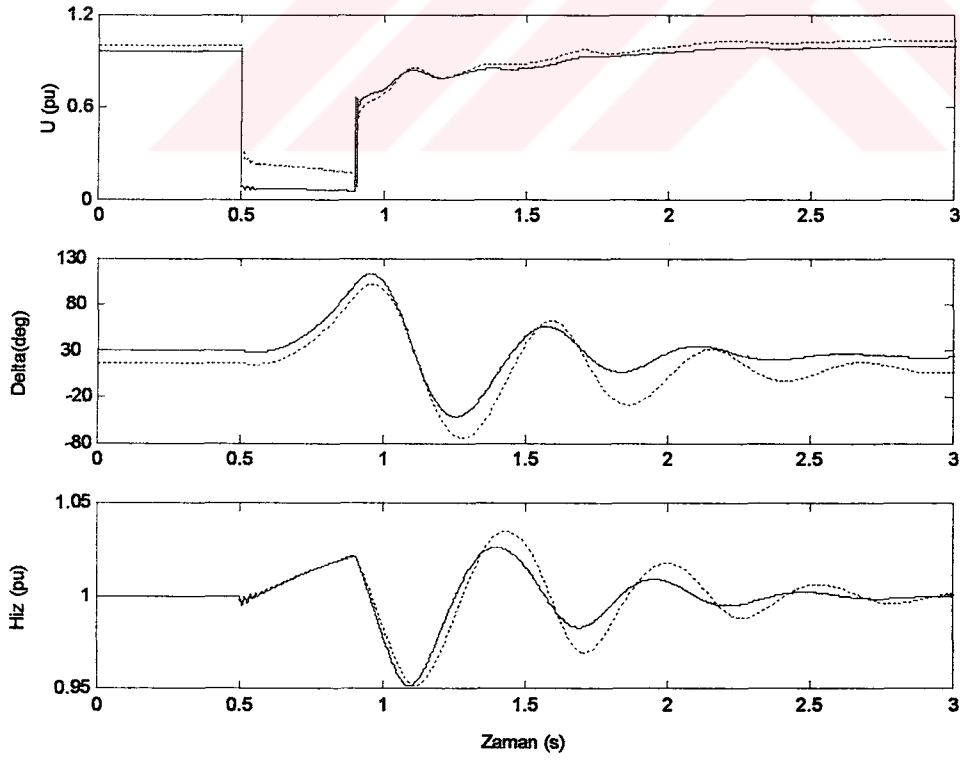
Şekil 5.48 Şebeke kaynaklı 1 faz toprak arızasının yerel generatörlere etkisi



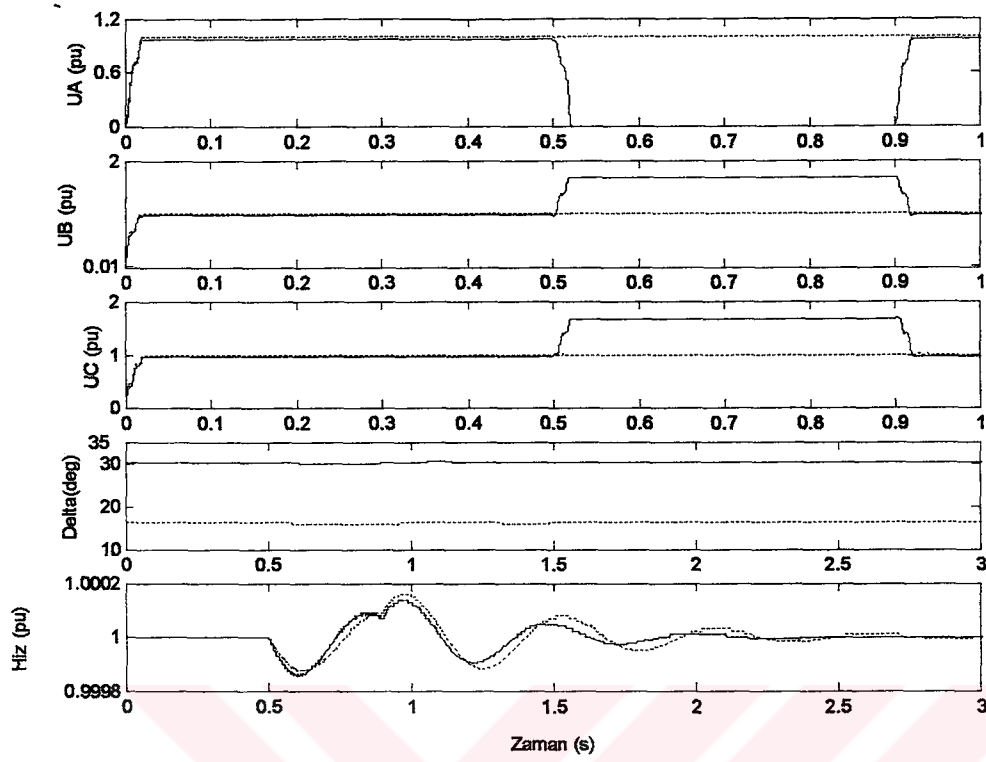
Şekil 5.49 Şebeke kaynaklı faz faz arızasının yerel generatörlere etkisi



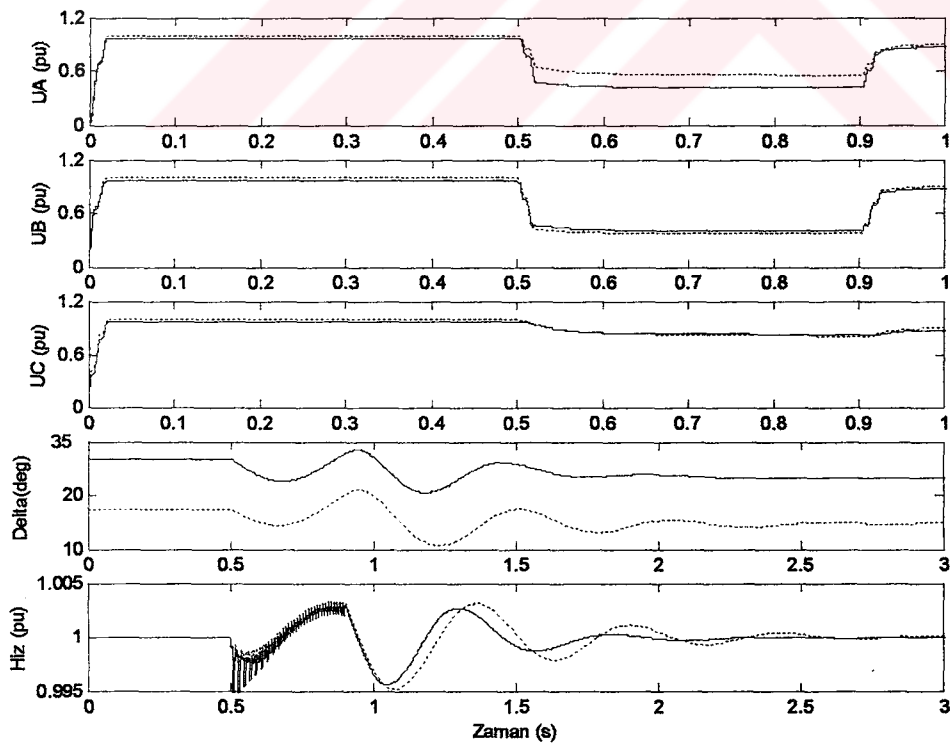
Şekil 5.50 Şebeke kaynaklı iki faz toprak arızasının yerel generatörlere etkisi



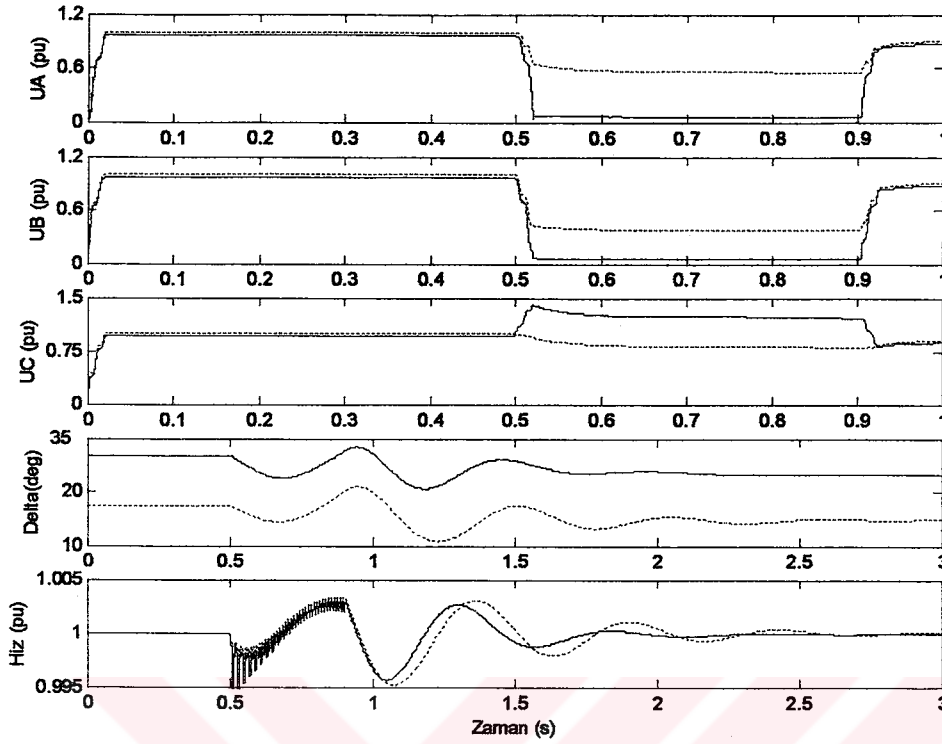
Şekil 5.51 D_11 barasındaki üç faz arızasının yerel generatörlere etkisi



Şekil 5.52 D_11 barasındaki tek faz toprak arızasının yerel generatörlere etkisi



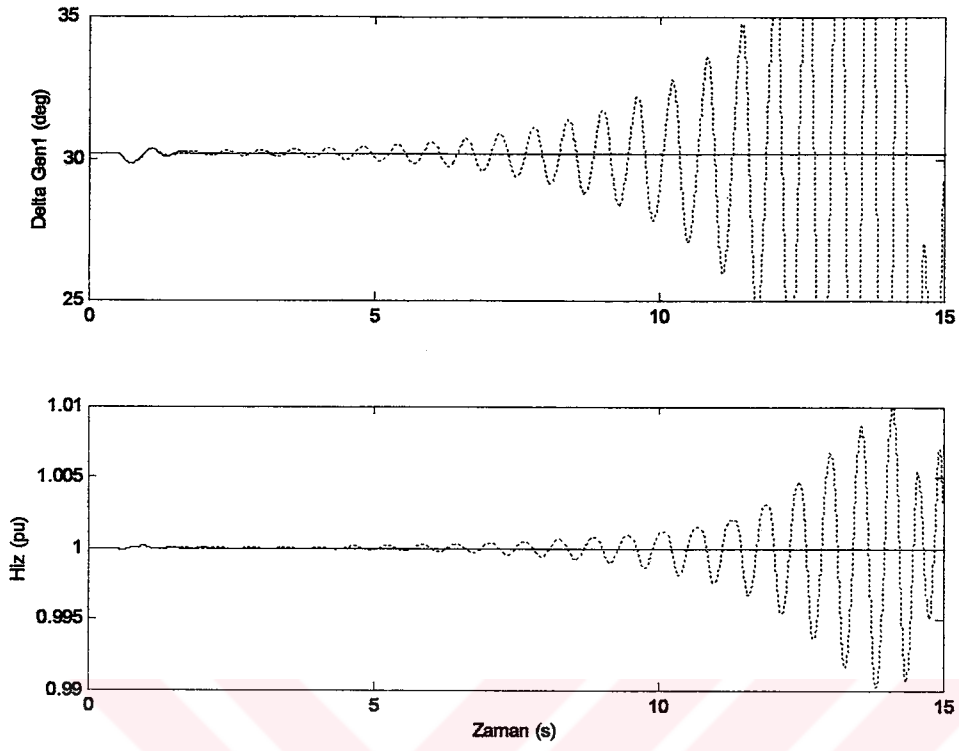
Şekil 5.53 D_11 barasındaki faz faz arızasının yerel generatörlere etkisi



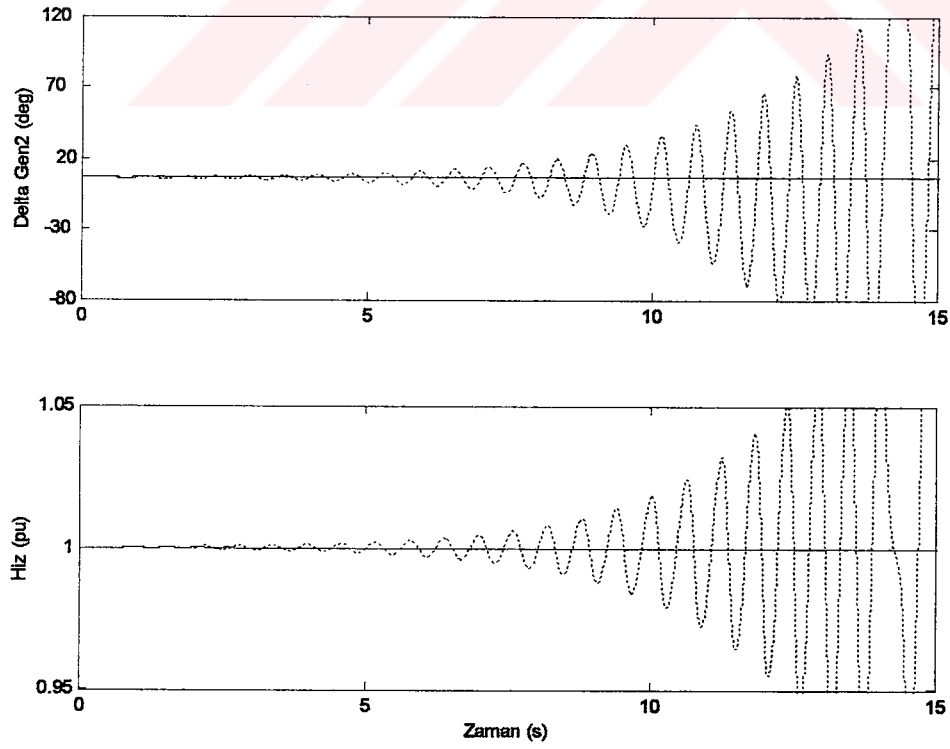
Şekil 5.54 D_11 barasındaki iki faz toprak arızasının yerel generatörlere etkisi

5.7.4 Küçük generatörün sabit uyarıya sahip olması durumu

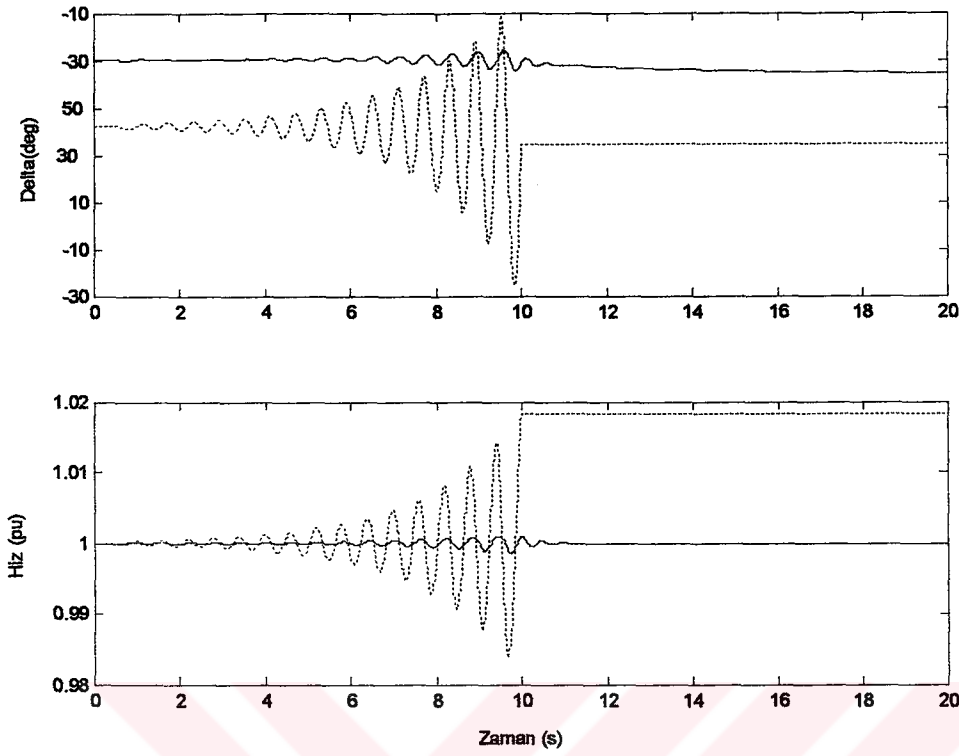
İkinci generatörün sabit uyarımlı olarak modellendiği bu bölümdeki benzetimlerde arıza temizlendikten sonra da olabilen salınımlı kararsızlığa gitme olayı gözlenmektedir. GEN_6.3 barasındaki küçük güçlü üç numaralı generatörün sabit uyarması hem arıza sırasında ve hem de arıza sonrasında gerekli olan reaktif güçü temin edemediğinden gerilim ve reaktif güç ile diğer bazı parametrelerde üstel artan salınımlar oluşmakta ve kararlılık limitine yaklaştığından generatörler devre dışına çıkmaktadır. Problemin kaynağı üç numaralı generatör olmasına rağmen onun kararsızlığa gitmesi, GEN_11 barasındaki generatörleri de etkilemekte ve onlarında kararsızlığa gidebilmelerine yol açabilmektedir. Bu bölümde D_11 barasında meydana getirilen tek faz toprak arızası sonucu sabit ve regülatörlü uyarma sistemi için her iki generatörün açı ve hız değişimleri karşılaştırmalı olarak aşağıdaki eğrilerde verilmiştir. Ayrıca $t=7.5$ s'de üçüncü generatörün devre dışı edilmesiyle tekrar kararlı hale geçme durumu Şekil 5.57'de görülmektedir. Sabit uyarımlı durumda kararsızlık meydana gelmektedir.



Şekil 5.55 Rotor açısı ve hız değişimi (Gen1)



Şekil 5.56 Rotor açısı ve hız değişimi (Gen3)



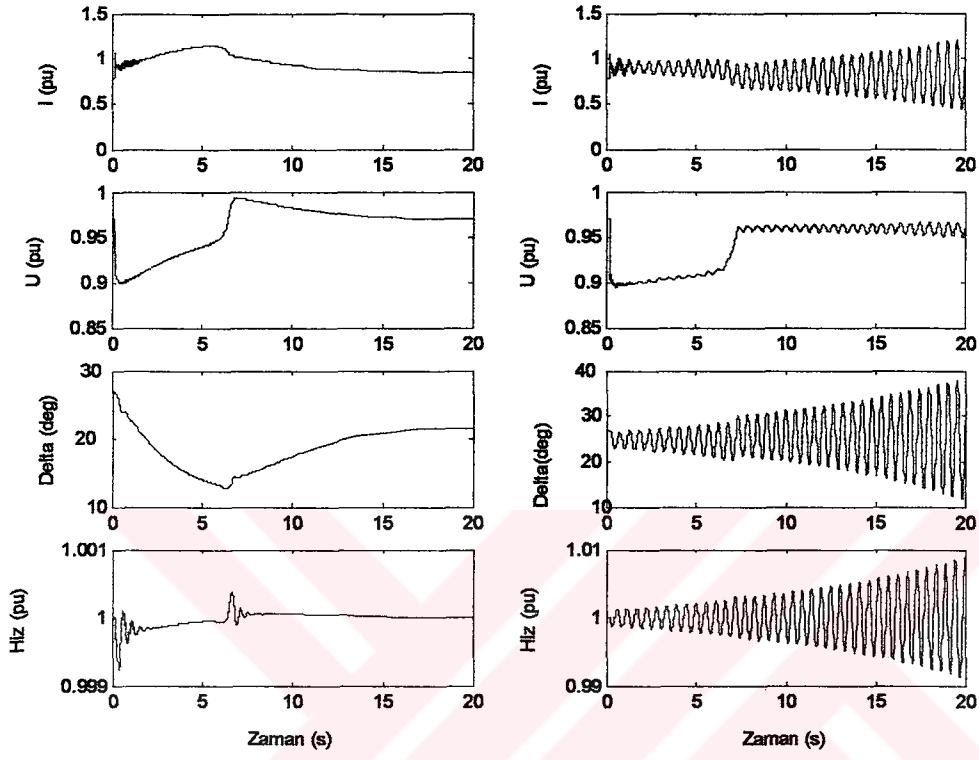
Şekil 5.57 Gen1 ve Gen3 açısı ve hız değişimleri

5.8. Büyük Güçlü Motorlara Yol Verilmesi Sonucu Oluşan KSGD'lerinin Yerel Generatörlere Etkisi

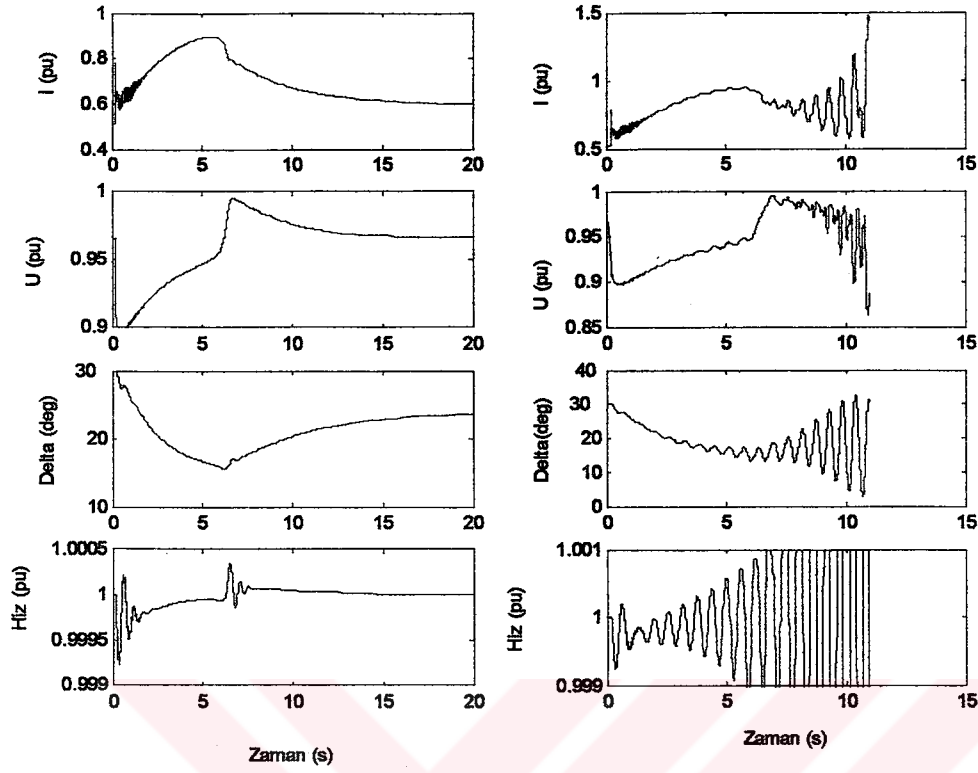
Tezin ilk bölümlerinde ifade edildiği gibi kısa süreli gerilim düşümlerinin ikincil sebepleri arasında büyük güçlü asenkron motorlara doğrudan yol verilmesi gösterilmektedir.

Motorlara yol verme olayı uzun süreli fakat daha az düşüme yol açan bir olaydır. Ayrıca sık rastlanmayan bir olaydır ve beklenmedik bir olay değildir. Bu bölümdeki benzetimlerde tek ve iki generatörlü örneklerde (Bkz Şekil 5.1 ve 5.39) D_11 barasına dördüncü bir motorun bağlanması sırasında yaşanan gerilim, açı, hız ve akım değişimleri incelenmektedir. Ayrıca tek generatörlü incelemelerde Gen1 ve Gen2, iki generatörlü incelemelerde ise Gen3 generatörün sabit uyarmalı olduğu durumlarda elde edilen sonuçlar regülatörlü uyarma kontrolü olan durumlarda karşılaştırılmıştır. Analizlerde $t=0.2$ s'de motorlara direkt olarak yol verilmiştir.

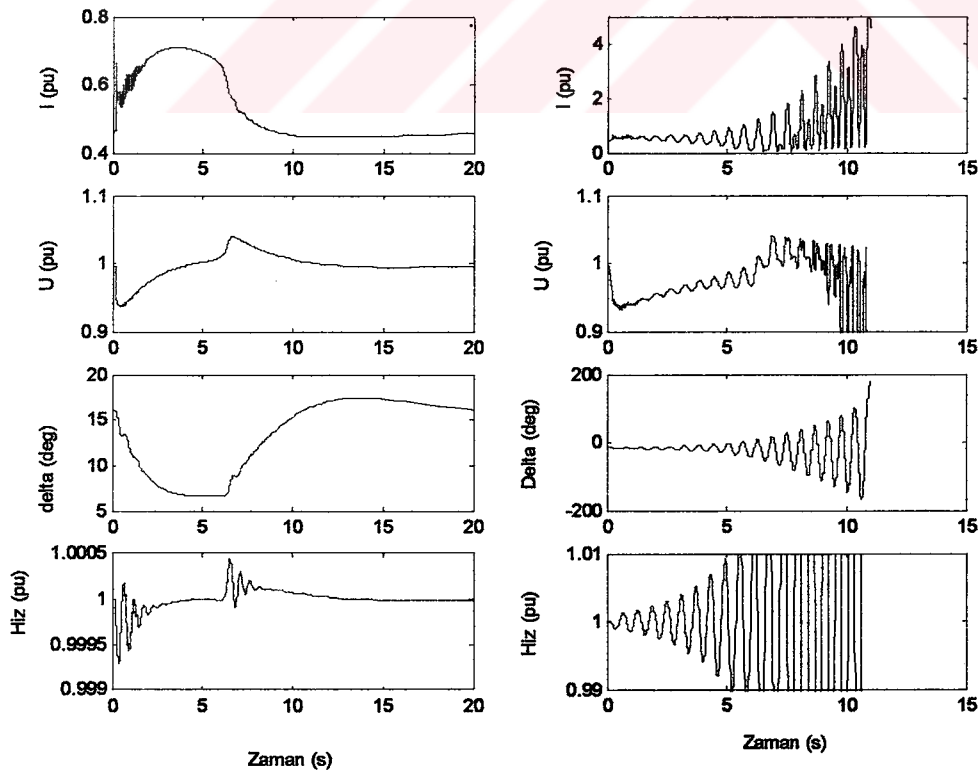
Eğrilerde sol kolon regülatörlü uyarma, sağ kolon ise sabit uyarma durumlarına ait değişimlerdir. İki generatörlü sistemde sabit uyarda kararsızlı gitme söz konusudur.



Şekil 5.58 Tek generatörlü örnek sistemde generatör davranışı



Şekil 5.59 İki generatörlü örnek sistemde generatör 1 in davranışı



Şekil 5.60 İki generatörlü örnek sistemde generatör 3 ün davranışı

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Kısa süreli gerilim düşümleri dağıtım şebekelerinde ve özellikle endüstriyel şebekelerde ciddi sorunlara yol açan bir enerji kalitesi problemidir. Bu konuyla ilgili birinci bölümde özetlenen önceki çalışmalarda ağırlıklı olarak yüklerin davranışı ve hesaplamaya yönelik yöntemler incelenmişti. Özellikle asenkron motorların gerilim düşümleri sırasındaki davranışının yol açacağı etki önemlidir. Çünkü günümüzde sanayi tesislerindeki elektriksel yüklerin büyük çoğunluğunu asenkron motorlar oluşturmaktadır. Özellikle kağıt ve karton sanayi, demir-çelik ve metalürji endüstrisi, petrokimya tesisleri ve rafineriler ve daha bir çok alanda asenkron motorlar kullanılmaktadır. Özellikle orta gerilimde çalışan ve gücü birkaç MW seviyelerinde olan kompresör, fan ve pompa motorlarının enerji kalitesi açısından etkisi büyüktür.

Tezin üçüncü bölümünde literatürde daha önce yapılan bazı çalışmalardan esinlenerek gerilim düşümlerinin asenkron motorlara etkisi farklı simülasyon koşullarında incelenmiştir. Bu bölümdeki benzetimler sonucunda görülmektedir ki, asenkron motorların gerilim düşümünü arttırıcı yönde olumsuz bir etkisi bulunmaktadır. Motorlar gerilim düşümünün dalga şeklini değiştirmekte ve en önemlisi arıza sonrasında gerilimin normal koşullardaki haline gelmesini geciktirerek enerji kalitesi açısından kötü sonuçlara yol açabildiği görülmüştür. Özellikle kısa devre olaylarının bir saniyenin altında bir zaman içinde temizlendiği de dikkate alınırsa, arıza sonrası gerilim düşümünün arıza süresinden uzun sürebildiği (bkz Şekil 3.6-3.10) görülmektedir. Elektronik ve mikroişlemci cihazların gerilimdeki farklılıklara dayanımı ile süre arasındaki ilişkiden dolayı (bkz Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'deki örnek güç kabul edilebilirlik eğrileri) arıza sırasında devre dışı yada hatalı çalışma olmayan bu tür cihazlarda arıza sonrasında bu sonuçlarla karşılaşılma riski bulunmaktadır. Dengesiz arızaların yol açtığı dengesiz gerilim düşümlerine ait benzetimler detaylı olarak irdelenmemiştir. Çünkü bu konuda yapılmış çalışmalar mevcut olup, bu bölümde sadece konuyla ilgili yüzeysel incelemeler verilmiştir. Yine

bu bölümde incelenen ve bu konuda yapılmış bir çalışmanın olmadığı bir diğer durum ise mekanik yük moment karakteristiklerinin etkisidir. Bu amaçla Bölüm 3.4'de sonuçları verilen benzetimler yapılmıştır. Sabit mekanik momentli motorların özellikle arıza sonrasındaki oturma olayını en geç gerçekleştirdiği farklı yerdeki arızalar için gösterilmiştir (bkz Şekil 3.28 ve 3.30). Moment ifadesindeki α üstel ifadesinin (bkz eşitlik 3.15) iki olması durumu yani pompa ve fan tipi yükleri hareket ettiren motorların enerji kalitesi açısından en iyi durumda oldukları görülmüştür. Bu bölümdeki benzetimlerde moment bağıntısının dışında karmaşık ve özel iki moment tipide izlenmiştir. Buradaki dört örnek içinden üçünün ortak özelliği motor yavaşladıkça momentinde düşmekte olmasıdır. Böylece eşitlik 3.11'deki momentler denge ifadesinde verildiği gibi mekanik ve elektromagnetik moment farkı yani hız farkı daha az olacak ve bu durum gerilimdeki değişmeyi daha az tutacaktır.

Genel olarak tüm bir tesis yada dağıtım şebekesi açısından olaya bakmak gerekirse, yük karakteristiklerinin etkisi bir başka incelenilen konu olmaktadır. Bölüm 3.5'de benzetimlerinin sonuçlarından görüldüğü gibi (bkz Şekil 3.34, 3.35 ve 3.36) motor yükü oranı artıkça arıza sonrası gerilim düşümünün miktarında ve süresinde artış olduğu görülmüştür. Asenkron motorların yüklenme oranlarının ise motora ve gerilim düşümüne önemli bir etkisi olmamaktadır (bkz 3.37). Üçüncü bölümde incelenen en son durum ise H atalet sabitinin etkisidir. Yapılan benzetimden H sabitinin artması ile motorun gerilim düşümüne olan duyarlılığının azaldığı görülmüştür (bkz Şekil 3.38). Bu bölümden elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi kısaca özetleyebiliriz.

- Asenkron motorlar kısa süreli gerilim düşümleri açısından olumsuz özellikleri olan yükler olduğundan bilgisayar, mikroişlemci tabanlı cihazlar, elektronik cihazlar vb duyarlı cihazlar için ek önlemler alınmalı ve mümkünse besleme noktaları motorlara uzak olacak biçimde seçilmelidir. Bir başka deyişle duyarlı cihazlar ile motorlar arasındaki toplam empedans olabildiğince büyük olacak şekilde tasarım yapılmalıdır.
- Sabit moment gerektiren mekanik sistemlerde kullanılan motorların bulunduğu tesislerde kısa devreye yol açacak faktörler azaltılmalı, sistem güvenilirliği arttırılmalıdır.

Dördüncü bölümün önemli bir kısmını yerel elektrik santralleri hakkındaki bilgiler oluşturmaktadır. Dünyada ve ülkemizdeki gelişimi ile analizlerde kullanılan modeller hakkında bilgiler verilmektedir. Bu bölümde yerel elektrik santrali kullanımı ile meydana gelen gerilim düşümü miktarı arasındaki ilişki yada daha net bir ifadeyle yerel generatörlerin, gerilim düşümlerini düzeltmek amacıyla ne kadar etkili olabildiği incelenmiştir. Bu bölüm içerisindeki benzetimlerde generatörlerin şebekeyle paralel çalıştıkları göz önünde bulundurulmuştur. Günümüzde yaygın kullanım şekli şebekeyle paralel çalıştırmak olmakla beraber şebekeden ayrı çalışma durumlarına rastlanmaktadır. Ancak bunun getirdiği rotor açısı kararsızlığı problemlerine karşı tedbirler alınması gereklidir. Çok büyük entegre tesislerde çok sayıda ve büyük güçteki yerel santrallere sahip olması durumunda kullanılabilir. Dördüncü bölüm içerisinde de ifade edildiği gibi yerel santraller şebekeye sadece aktif güç vermek amacıyla tasarlanır. Yani güç faktörü çoğu kez 1'dir. Ancak pratikte tamamen 1 olmasa bile 0.90-0.95 ve hatta daha yüksek olabilmektedir. Dördüncü bölümdeki ilk inceleme farklı güç faktöründe çalışan yani aktif güç sabit iken reaktif gücün değiştiği durumlar arasında önemli bir farkın olmadığı görülmüştür. Buradaki benzetimlerde 0.8 ile 0.95 arasındaki fark sadece % 2.23 (bkz Şekil 4.18) olarak gerçekleşmiştir. Bu bölümde tüm sistemdeki aktif ve reaktif kayıplardaki değişimde fazla değildir (bkz Şekil 4.19, 4.20). İkinci inceleme konusu ise yerel generatörün endüstriyel sistem yükünü karşılama oranının etkisidir. Şekil 4.21'de sonuçlardan görüldüğü gibi yaklaşık %3'lük bir değişim vardır. Generatör ne kadar çok yüklenmişse gerilim düşümünde hafif de olsa artış olmuştur. Bunda generatör anma gücünün etkisi vardır. Bu kısımda kayıplardaki azalmanın oldukça büyük bir değişim gösterdiği Şekil 4.22 ve 4.23'den görülmektedir. Bu iki inceleme de yani güç faktörü ve P_g/P_y oranları ilişkisinde yerel santralin olup olmasının sisteme yaklaşık %13'lük bir katkısı olduğu görülmüştür. Yerel santralin bulunması gerilim düşümünde %13'lük iyileştirme ile sonuçlanmıştır. Hem dengeli ve hem de dengesiz arızalar şebekenin değişik noktalarında yapılarak yerel santralin gerilim düşümünü iyileştirmedeki oranı bölüm 4.6.3'deki benzetimlerle ortaya konulmaktadır. Elde edilen sonuçlar yerel generatörlerin gerilim düşümünün %5-%15 daha az gerçekleşmesine yol açtığını göstermektedir.

Dördüncü bölümde incelenen konulardan biri ise generatör yükü ile anma yükü arasındaki orandır. Arıza sırasında bu oranın %10 olması ile %90 olması durumları arasındaki fark %5 kadardır (bkz Şekil 4.35- 4.39). Bu çok büyük bir fark değildir. Ancak yükün motor ağırlıklı olmasının doğal sonucu olarak arıza sonrasındaki gerilim düşümü açısından büyük bir değişim görülmektedir. Yükleme oranı arttıkça arıza sonrasındaki gerilim düşümünün hem genliği ve hem de eski haline gelme süresi uzamaktadır. Şekil 4.40 ve 4.41’de gerilim ve hız değişimlerinden de görüldüğü gibi %90’lık durumda ciddi bir gerilim düşümü meydana gelmiştir.

Yerel generatörlerin varlığı, kısa süreli gerilim düşümleri sırasında motorlarda meydana gelen yavaşlamayı bir miktar düzeltmektedir. Ancak arıza sırasında bu durumda önemli bir değişim olmamaktadır. %1-3 dolaylarında bir iyileşme görülmüştür. Dördüncü bölümde incelenen son durum ise motorlara yol verilmesi sırasında gerilim düşümleridir. Şekil 4.42’den görüldüğü gibi yerel generatörler büyük güçlü motorlara yol verilmesi sırasında gerilimde 0.05 birimlik iyileşme ve yol verme süresinde ise yaklaşık %25 oranında azalma meydana getirmiştir. Ayrıca bu eğride olumsuz durum olan şebekeden ayrı çalışan generatörlerin olduğu tesislerde yol verme olayında gerilimin %15 daha fazla düştüğü görülmekte ve bu durum önerilmemektedir.

Dördüncü bölümdeki incelemelerden çıkarılan sonuçları maddeler halinde aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

- Yerel generatörler kısa süreli gerilim düşümü sırasında ortalama %5 ile %15’lik iyileşme meydana getirmektedir.
- Yerel santraller asenkron motorların sebep olduğu arıza sonrası gerilim düşümü olayında gerilim düşümünü ve süreyi azaltmaktadırlar.
- Yerel elektrik santralleri dağıtım şebekelerindeki güç kayıplarını azaltmaktadırlar.
- Gerilim düşümü şiddetli olduğunda yani arıza noktası generatör barasına yaklaştığında generatörlerin katkısında bir azalma meydana gelmektedir. Buna neden olarak yakın arızalarda kısa devrenin çoğunlukla generatör

tarafından beslenmesidir. Uzak arızalarda ve özellikle şebeke tarafındaki uzak arızalarda kısa devreyi şebeke beslemektedir.

Tezin son bölümü olan beşinci bölümde ise kısa süreli gerilim düşümlerinin yerel generatör davranışına etkisi ve dinamik kararlılık açısından etkisi incelenmiştir. Bu amaçla iki temel durum ele alınmıştır. Birincisi, tek noktadan şebekeye enerji temin eden bir yerel generatör grubu olması durumu, ikincisi ise iki farklı gerilim ve güçteki yerel generatörün olması durumudur. Tüm incelemelerde arıza yeri, arıza türü, arıza süresinin generatörlere etkisi incelenmiştir. Bu bölümde ilk olarak yerel santralin şebekeye bağlantı şekli ele alınmıştır. Direkt bağlantı yani şebeke ile aynı gerilimdeki generatörler ile bir transformatör üzerinden yani şebekeden farklı gerilimdeki yerel generatörlerin davranışı kıyaslanmıştır. Transformatör üzerinden bağlantıda transformatör empedansından dolayı gerilim düşümü daha az gerçekleşmiştir. Ayrıca dengesiz arıza durumlarında sargılardan birinin üçgen olması gerilim düşümünde önemli azalmalara yol açmıştır. Yükün içerisindeki motor yük oranının fazlalığı gerek rotor açısında ve gerekse generatör hızında çok önemli farklılıklara yol açmamaktadır. Ancak motor yükü arttıkça açı ve hızdaki azalmalarda artmaktadır.

Arıza yeri generatöre yaklaştıkça etkisi daha büyük olmaktadır. Şekil 5.11 ve 5.12'deki açı ve hız değişimlerinden açıkça görüldüğü gibi, yakın arızalarda (dağıtım ve 11 kV baraları) gerilim sıfıra çok yaklaşmakta, yüklerde kesilmeler olmakta ve generatörde hızlanma meydana gelmektedir. Hızdaki artışın neticesinde rotor açısı artmaktadır. Salınım denkleminin sonucu olarak açı ve hızda salınımlar daha şiddetli meydana gelmektedir. Bu tür durumlarda uygun ve hızlı bir koruma sistemi ile generatörün ve şebekenin korunması gereklidir. Oysa uzak arızalar olarak görülen iletim sistemi ve 6.3 kV barasındaki arızada gerilimdeki düşme %30-45 dolaylarında olmaktadır. Şebeke kaynaklı ve etkisi daha az olan arıza durumlarında enerjinin bir kısmının sağlandığı şebekeden yeterli besleme olamaması generatörün biraz daha fazla yüklenmesine yani yavaşlamasına yol açmaktadır. 6.3 kV barasındaki iç arızada ise arızanın beslenmesi sonucu yüklenmenin sonucunda yavaşlama olmaktadır. Bu bölümde dengeli ve dengesiz arızaların etkisi de incelenmiştir. Burada vurgulanması gereken bir konu ise arıza bittikten sonra meydana gelen salınımlardır. Bu salınımlar

kısa sürede sönümlenmelidir. Geç sönümlenmesi veya sönümlenmek yerine artarak kararsızlığa gitmesi istenmeyen bir sonuçtur. Bu noktada uyarma sisteminin etkisi büyüktür. Bunu göstermek için sabit ve regülatörlü iki uyarma durumu için inceleme yapıldığında sabit uyarmalı sistemde kararsızlığa gitmenin kaçınılmaz olduğu görülmüştür. Mekanik türbin sisteminin yapı itibariyle yavaş olması bu kısma müdahale ederek salınımları söndürmek zor olduğundan uyarma sistemi ile kararlılık iyileştirilmesi gereklidir. Kararlılığı etkileyen bir diğer faktör ise arıza temizleme zamanıdır. Dağıtım sistemlerinde kullanılan koruma cihazlarının iletimdeki koruma cihazlarına göre daha yavaş çalışması bir risktir. Ayrıca korumada kullanılan cihazların güvenilirliklerinin yüksek olması önemli bir gerekliliktir.

Beşinci bölümde incelenen bir diğer durum olan iki yerel santral durumunda ise tek santral durumuna benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak burada önemli bir nokta küçük generatörün daha çabuk kararsızlığa gidebilmesi durumudur. Bu tezde koruma sistemi ve koruma koordinasyonu ile ilgilenilmediğinden simülasyon çalışmalarında küçük generatör kararsızlığa gitmekte, bu durum diğer generatörü de etkilemektedir.

- Yerel santrallerin transformatör üzerinden bağlanması ve sargılardan birinin üçgen olması şebeke arızalarından generatörü, generatör arızalarından ise şebekeyi korumak için gereklidir.
- Arızalardan şebekenin ve yerel generatörün daha az etkilenmesi için uygun koruma sistemleri kullanılmalı ve özellikle devre dışı kalma durumlarında güç adası problemine karşı yük atma korumaları gerçekleştirilmelidir.
- Koruma sistemleri hızlı çalışmalıdır.
- Uyarma sistemi hızlı cevap veren regülatörlere sahip olmalıdır. Uyarma sistemi dinamik kararlılık açısından oldukça önemlidir.

Son olarak, gerilimde meydana gelen düşmelerin dağıtım şebekesinde önemli bazı sonuçlar getirdiği ve özellikle asenkron motorlarda çeşitli parametrelerin ve büyüklüklerin motor davranışına etki ettiği görülmüştür. Ayrıca asenkron motorların özellikle arıza sonrasında hızlanma sürecinde gerilimdeki düşmeyi devam ettirdiği görülmüştür. Yine son yıllarda kendi enerjisini üretmenin ekonomik üstünlükleri pek çok şirketi kendi santrallerini kurmaya yönlendirmiştir. Küçük güçlü generatörlerin

BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tezde yapılan çalışmalar bilgisayar simülasyonu esaslıdır. İncelenen konudan dolayı herhangi bir deneysel yada pratik çalışma yapamama zorluğu incelenen konunun teorik boyutta kalmasına yol açmıştır. Ancak kullanılan yazılımının kendisini ispatlamış olması ve güç sistemleri açısından dünya çapında bilinen bir kuruluş tarafından üretilmiş olması bunun ispatıdır. Kullanılan matematiksel modeller kabul görmüş modellerdir.

Giriş bölümünde de değinildiği gibi kısa süreli gerilim düşümü konusundaki çalışmalar çok yönlüdür. Bu tezde ele alınan konu sadece şebekelere ve generatörlere etkisinin incelendiği bir çalışmadır. Bu nedenle özellikle beşinci bölümdeki benzetimlerde koruma sistemi dikkate alınmamıştır.

Bundan sonraki çalışmalar da iki durum ön plana çıkmaktadır. İlki senkron yerine daha çok asenkron generatörün kullanıldığı rüzgar santrallerinin davranışının incelenmesidir. Bu konu oldukça yeni bir konu olup, üzerinde devam çalışmalar bulunmaktadır. Bir başka çalışma önerisi ise koruma sisteminin dağıtım sistemi performansına etkisi üzerine olmalıdır. Özellikle generatör içeren şebekelerde koruma sistemi önemlidir. Güç adası, senkronizasyon ve düşük gerilim korumaları arasında koordinasyonun sistem ve generatör performansına etkisi bulunmaktadır.

Bu konuda üzerinde çalışılması gereken bir başka konu ise ülkemizde oldukça fazla bulunan yanlış şebeke tasarımı ve bunun yol açtığı gerilim düşümü yada kesilmelerine karşı şebekelerin iyileştirilmesidir. Türkiye’de bazı sanayi bölgelerinde şebekenin yanlış tasarımı ve bakımsızlığı sonucu meydana gelen şebeke kaynaklı kısa devreler endüstriyel tesislerde maddi kayıplara yol açmaktadır. Bu amaçla yapılacak geniş kapsamlı şebeke rehabilitasyonu çalışmaları enerji kalitesini ve ürün kalitesini arttıracaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Dugan, R., McGranaghan, M.F. and Beaty, H.,W., Electrical Power Systems Quality, Mc Graw Hill, 1996.
- [2] McGranaghan, M.F., Mueller, D.R., and Samotyj, M.J., Voltage Sags in Industrial Systems, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, pp. 397-403, March/April 1993.
- [3] Bollen, M.H.J., Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No.6, pp.1414-1423, Nov/Dec 1996.
- [4] Zhang, L., and Bollen, M.H.J., Characteristics of Voltage Dips (Sags) in Power Systems, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No.2, pp. 827-832, April 2000.
- [5] Das, J.C., Effects of Momentary Voltage Dips on the Operation of Induction and Synchronous Motors, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No. 4, pp. 711-717, July/Aug 1990.
- [6] Bollen, M.H.J., The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 31, No.4, pp. 667-674, July/Aug 1995.
- [7] Bollen, M.H.J., and Dirix, P.M.E., Simple Model for Post-Fault Motor Behaviour for Reliability/Power Quality Assessment of Industrial Power Systems, IEE Proc. Generation-Transmission-Distribution, Vol.143, No.1, pp. 56-60, January 1996.

- [8] Bollen, M.H.J., Method of Critical Distances for Stochastic Assessment of Voltage Sags, IEE Proc. Generation-Transmission-Distribution, Vol.145, No.1, pp. 70-76, January 1998
- [9] Bollen, M.H.J., and et al, Assessment of the Number of Voltage Sags Experienced by a Large Industrial Customer, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.33, No.6, pp.1465-1471, Nov/Dec 1997.
- [10] Yalçınkaya, G., and et al, Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.34, No.6, pp.682-688, July/Aug 1998.
- [11] Wang, P., and et al, Experimental Investigation of Voltage Sag Mitigation by an Advanced Static Var Compensator, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.13, No.4, pp.1461-1467, October 1998.
- [12] Tosato, F., and Quaia, S., Reducing Voltage Sags Through Fault Current Limiter, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.16, No.1, pp.12-17, Jan 2001.
- [13] Chan, K.and Kara, A. Voltage sags mitigation with an integrated gate commutated thyristor based dynamic voltage restorer, Proc. of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 1 pp.561-565, 1998
- [14] Gnativ, R., and Milanovic, J., Voltage Sag Propagation in Systems with Embedded Generation and Induction Motors, IEEE PES Summer Meeting 2001.
- [15] Milanovic, J., and Gnativ, R., Characteristics of Voltage Sags in Radial Networks with Dynamic Loads and Embedded Generation, Proc. CD of Power Tech Conference, Portugal, 2001.
- [16] SIMPOW User Manual, Rev 99-09, ABB Power Systems, Vasteras, Sweden, 1999.

- [17] Bollen, M.H.J, Understanding Power Quality Problems : Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- [18] IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 1995.
- [19] Bollen, M.H.J, Voltage Sags in Three Phase Systems, IEEE Power Engineering Review, Vol. 21 No. 9 pp.8-11, September 2001.
- [20] Yılmaz, A.S., Kısa Süreli Gerilim Düşümleri, Tez Öneri Raporu, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2000.
- [21] IEEE Std 493-1997, IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Gold Book), 1997.
- [22] Steciuk, P.B., and Redmon, J.R., Voltage Sag Analysis Peaks Customer Service, IEEE Computer Applications in Power Systems, Vol.9, No.4, pp.48-51, October 1996.
- [23] Lamoree, J., and et al, Voltage Sag Analysis Case Studies, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.30, No.4, pp.1083-1089, July/Aug 1994.
- [24] ANSI Standard for Electrical Power Systems and Equipment-Voltage Ratings, ANSI Std. C84.1, 1989.
- [25] Thallam, R.,S., and Heydt, G.,T., Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense, Proc. of the IEEE Summer Meeting, 2000.
- [26] Yılmaz, A.S., Yanıkoğlu, E., ve Gelberi, H., Kısa Süreli Gerilim Düşümleri ve Endüstriyel Dağıtım Sistemlerine Etkilerinin İncelenmesi, SAÜ FBE Dergisi, Cilt 5, Sayı 2, s.21-26, Eylül 2001

- [27] Yanikoğlu E., and Yılmaz, A.S., Behavior of synchronous generators during the short duration voltage sags, Proc. of the 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, Vol.II, pp.1148-1151.1998 MELECON 98, Israel.
- [28] Anderson, P.,M., Analysis of Faulted Power Systems, IEEE Press, New York, 1995.
- [29] Bollen, M.H.J., and Zhang, L.D., Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed Drives for Three Phase Balanced and Unbalanced Sags, IEEE Trans on Industry Applications, Vol.36, No.3, pp.904-910, May/June 2000.
- [30] Knyazkin, V., and Söder, L., The Use of Coordinated Control to Mitigate the Impact of Voltage Sags Caused by Motor Start, Proc. of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol.3, pp.804-809, 2000.
- [31] Kundur, P., Power System Stability and Control, IEEE Press-Mc Graw Hill, New York, 1994.
- [32] Çolak, İ., Asenkron Motorlar, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2001.
- [33] Fitzgerald, A.,E., Kingsley, C., and Kusko, A., Electrical Machinery, 3rd Edition, Mc Graw Hill, 1971.
- [34] Van Cutsem, T., and Vournas, C., Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academics Press, 1998.
- [35] Zocholl, S.E., Induction Motors: Part I-Analysis, Technical Report, Schweitzer Engineering Laboratories.
- [36] Grewal, G.S. and et al, Transient Motor Reacceleration Study in an Integrated Petrochemical Facility, IEEE Trans on Industry Applications, Vol.35, No.4, pp. 968-977, July/Aug 1999.

[37] Usta, Ö., Erdoğan, Z., ve Bayrak, M., “Yerel Elektrik Santrallerinde Koruma ve Kontrol Problemleri”, Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Bursa, 1995.

[38] Ackermann, T., Anderson, G., and Söder, L., Distributed Generation : A Definition, Electric Power Systems Research, Vol.57, pp.195-204, 2001.

[39] Arus, Z.T. and et al, Evaluation of the Impacts of Connecting Embedded Generating Units to the Distribution Systems – TNB Experience, Regional Conference of Energy and Environment 2000, UNITEN 15th – 16th Feb 2000.

[40] Rüzgar Enerjisi, Teknik Rapor, Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİE), 2. Baskı, Ankara, 2000.

[41] Türkiye Kojenerasyon ve Otoprodüktör Üreticileri Derneği internet sayfası, (<http://www.kojenerasyon.com>)

[42] The European Educational Tool on Cogeneration (EDUCOGEN), Technical Report, Avrupa Kojenerasyon Derneği (COGEN EUROPE), Second Edition, December 2001.

[43] Jenkins, N., and et al, Embedded Generation, IEE Power and Energy Series 31, 2000, UK.

[44] Jenkins, N., Embedded Generation, IEE Power Engineering Journal, Vol.9, No.3, pp.145-150, June, 1995.

[45] Park, J., Modeling and Simulation of Selected Distributed Generation Sources and Their Assesments, MSc Thesis, West Virginia University, USA, 1999.

[46] Anderson, G., Power System Dynamics and Stability, Course Notes, Dept. of Electric Power Systems, KTH, Sweden, 1999.

- [47] IEEE Std 421.5-1992, Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 1992.
- [48] Lee, W.J and et al, Dynamic Stability Analysis of an Industrial Power Systems, IEEE Trans on Industry Applications, Vol 31, No 4, pp. 675-680, July/Aug 1995.
- [49] Jenkins, N., Strbac, G., Effect of Small Embedded Generation on Power Quality, IEE Colloquium on Issues in Power Quality, 6/1-6/4, Warwick, 1995.
- [50] Henderson, D.S., Synchronous or Induction Generators? - The Choice for Small Scale Generation, Opportunities and Advances in International Power Generation, Proceeding pp.146-149, 1996.
- [51] Ijumba, N.M., Jimoh, A.A., Nkabinde, M., Influence of Distribution Generation on Distribution Networks Performance, Proc of AFRICON'99, Vol 2, pp 961-964, 1999.
- [52] Milanovic, J.V., David, T.M., Stability of Distribution Networks with Embedded Generators and Induction Motors, Proc. of the IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting 2002, Vol.2, pp. 1023-1028, 2002.
- [53] Jenkins, N., Strbac, G., Impact of Embedded Generation on Distribution System Voltage Stability, IEE Colloquium on Voltage Collapse, Digest No: 1997/101, pp. 9/1-9/4, 1997.
- [54] Usta, Ö., Bayrak, M., Analysis of Utility Switching Transient for a Safe and Reliable Operation of Local Power Plants, Proc. of the International SELIT Seminar, Istanbul, Turkey, 2001
- [55] Alshamali M, Fox, B., Unsymmetrical Faults and Their Potential for Nuisance Tripping of Embedded Generators, Developments on Power System Protection, Conference Proceeding, pp 238-241, 2001.

- [56] Radhakrishna, C., and et al, Impact of Voltage Sags in Practical Power System Networks, Proc of the IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol.1, pp.567-572, 2001.
- [57] Funabashi, T., and et al, An Influence of Voltage Sag Duration on Non-utility Generator's Shaft Torque, Proc of the IEEE/PES Winter Meeting, Vol 1, pp 153 – 158, 2000.
- [58] Funabashi, T., and et al, An Influence of Voltage Sag on Non-utility Generator's Shaft Torque, Proc of the IEEE/PES Summer Meeting, Vol 4, pp. 2463-2468, 2000
- [59] Funabashi, T., and et al, Protection of a Embedded Generator Shaft System from an Instantaneous Voltage Sag, Proc. of Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, pp 74-77, 2001.
- [60] Salman, S.K, Rida, I.M., Investigating the Impact of Embedded Generation on Relay Settings of Utilities' Electrical Feeders, IEEE Trans on Power Delivery, Vol 16, No 2, pp. 246-251, April 2001.
- [61] Paap, G.C., and et al, The Influence of Voltage Sags on the Stability of 10 kV Distribution Networks with Large Scale Dispersed Cogeneration and Wind Generators, Proc of CIRED 2001, paper no 4.17, 2001.
- [62] Gomez, J.C., Morcos, M.M., Coordinating Overcurrent Protection and Voltage Sag in Distributed Generation Systems, IEEE Power Engineering Review, pp 16-19, Feb 2002.
- [63] Smith, J.R., Chen, M.J., Three-Phase Electrical Machine Systems : Computer Simulations, RSP Press Ltd, 1993

EK-A Örnek Sistem Parametreleri

Tezde kullanılan örnek dağıtım sistemindeki elemanlara ait parametreler aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo A.1 Hat Parametreleri

Baradan	Baraya	R (pu)	X(pu)
SBK	SBK154	0.003	0.04
SBK	SBK154	0.003	0.04
SBK35	SBK34	0.002	0.03
SBK11	OBN 11	0.0001	0.0001
OBN 11	B1 11	0.0048	0.02
B1 11	B2 11	0.0024	0.01
OBN 11	C1 0.4	0.0048	0.02
OBN 11	D 11	0.0024	0.01

Tablo A.2 Transformatör Parametreleri

Primer	Sekonder	S_N (MVA)	U_{N1} (KV)	U_{N2} (KV)	X (pu)	Bağlantı Grubu
SBK154	SBK35	100	154	35	0.05	Y/Y
SBK34	SBK11	50	34.5	11.7	0.04	Y/Y
B2 11	B3 6.3	10	11.7	6.3	0.035	D/Y
C1 11	C2 0.4	1	11.7	0.4	0.025	D/Y

YY trafoların yıldız noktası 20 ohm direnç üzerinden, diğer trafoların yıldız noktası ise direkt olarak topraklanmıştır.

Tablo A.3. Asenkron Motor Parametreleri

Bara	U_N (kV)	P (Kw)	GF
D 11	11	9000	0.9
B3 6.3	6.3	1700	0.85
C1 0.4	0.4	380	0.82

D_11'de üç özdeş motor, B3_6.3'te ise iki özdeş motor vardır.

Tablo A.4 Statik Yükler (Sabit Güç)

Bara	P (MW)	Q (MVA)
SBK154	40	20
SBK34	20	15
BUSB1	1.2	0.6
BUSB2	0.6	0.35
BUSC2	0.05	0.03

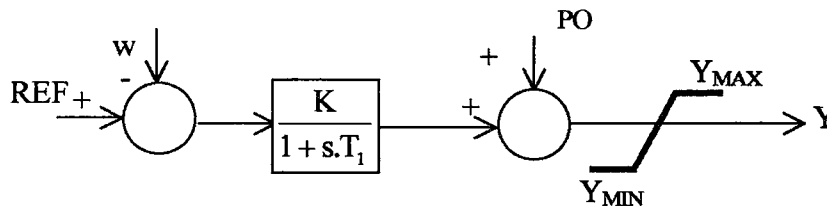
Tablo A.5 Asenkron Motorların Mekanik Yük Tipleri :

Motor	Model
11 kV'luk Motorlar (BUSD)	$M_y=0.9.(1-s)^2$ pu.
6.3 kV'luk Motorlar (BUSB3)	$M_y=1.2.(1-s)^2+0.4(s^5)$ pu.
0.4 kV'luk Motor (BUSC2)	$M_y= 1$ pu

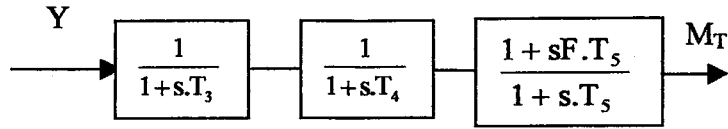
Tablo A.6 Generatör parametreleri

	Gen1-Gen2	Gen3
U_N kV	11	6.3
S_N MVA	20	16.6
x_d pu	1.8	1.85
x_q pu	1.7	1.45
x_d' pu	0.3	0.3
x_q' pu	0.55	0.55
x_d'' pu	0.25	0.25
x_q'' pu	0.25	0.25
T_{d0} sn	8	7

1 ve 2 numaralı generatörlerde Bölüm 4 deki Şekil 4.12 ve 4.13'de blok şeması verilen türbin ve hız regülatörleri kullanılırken, 3 nolu generatörde aşağıdaki türbin ve regülatör modeli kullanılmıştır.



Şekil A.1 Gen3 için hız regülatörü modeli



Şekil A.2 Gen 3 için türbin modeli [16]

Türbin ve hız regülatörü parametreleri :

Gen1 ve Gen 2 : TC=0.3 s, KH=0.3 s, TR=7.0 s, $Y_{MAX}=1$ $Y_{MIN}=-1$ K=20 T1=0.1 s.

Gen 3 : T3=0.3 s, T4=0.09 s, T5=0.0, F=1.0 $Y_{MAX}=3$ $Y_{MIN}=-3$ K=20 T1=0.05 s.

Tablo A.7 Uyarma sistemi parametreleri

	Gen1-Gen3	Gen3
KA	200	50
TA s	0.075	0.025
KE	1	1
TE s	0.36	0.30
KF	0.125	0.125
TF s	1.8	1.8
UE _{MIN}	-4	-4
UE _{MAX}	4	4

EK-B

B.1 Asenkron Motor Denklemleri

Stattoru ve rotoru yıldız bağlı sargılı rotorlu bir asenkron motorun rotor ve stator gerilim denklemleri aşağıdaki gibidir.

Stator gerilim denklemleri :

$$v_a = \frac{d}{dt} \Psi_a + R_s \cdot i_a \quad (B.1)$$

$$v_b = \frac{d}{dt} \Psi_b + R_s \cdot i_b \quad (B.2)$$

$$v_c = \frac{d}{dt} \Psi_c + R_s \cdot i_c \quad (B.3)$$

Rotor gerilim denklemleri :

$$v_A = \frac{d}{dt} \Psi_A + R_r \cdot i_A \quad (B.4)$$

$$v_B = \frac{d}{dt} \Psi_B + R_r \cdot i_B \quad (B.5)$$

$$v_C = \frac{d}{dt} \Psi_C + R_r \cdot i_C \quad (B.6)$$

Burada, R_s stator faz direnci, R_r rotor faz direnci, Ψ ise sargılardaki akı ifadesidir.

Her faz için akı bağıntısı :

Stator ;

$$\Psi_{abc} = L_{ss} \cdot i_{abc} + L_{abcABC} \cdot [i_A \cdot \cos\theta + i_B \cdot \cos(\theta + 120^\circ) + i_C \cdot \cos(\theta - 120^\circ)] \quad (B.7)$$

Rotor ;

$$\Psi_{ABC} = L_{\pi} i_{ABC} + L_{abcABC} \cdot [i_a \cdot \cos\theta + i_b \cdot \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cdot \cos(\theta + 120^\circ)] \quad (B.8)$$

d-q dönüşümü :

Stator Gerilim Denklemleri :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - w_s \Psi_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} \quad (B.9)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + w_s \Psi_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} \quad (B.10)$$

Rotor Gerilim Denklemleri :

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s w_s \Psi_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} \quad (B.11)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + s w_s \Psi_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} \quad (B.12)$$

Stator Akı Bağlılıları

$$\Psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (B.13)$$

$$\Psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (B.14)$$

Rotor Akı Bağlılıları

$$\Psi_{dr} = L_{\pi} i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (B.15)$$

$$\Psi_{qr} = L_{\pi} i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (B.16)$$

Burada,

$L_{ss} = L_{aa} - L_{ab}$ (Stator A-fazı için öz indüktans)

$L_{\pi} = L_{AA} - L_{AB}$ (Rotor A-fazı için öz indüktans)

$L_m = 1.5 L_{aA}$ (Rotor-Stator karşılıklı indüktansı)

B.2 Asenkron Motor Sürekli Hal Karakteristikleri

Stator ve rotor gerilim denklemlerindeki (B.9-B.12) akı türevi $(\frac{d}{dt}\Psi)$ ifadesi sürekli halde iken sıfırdır. Bu nedenle söz konusu gerilim denklemleri bir terim azalır. Diğer yandan bu gerilim denklemlerindeki akı ifadeleri yerine (B.13-B.16) deki eşitlikler yazılırsa aşağıdaki sürekli haldeki gerilim denklemleri elde edilir. Rotor devresi kısa devre edildiğinden rotor gerilim bileşenleri sıfıra eşit olmaktadır.

Stator devresi için,

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s L_{ss} i_{qs} - \omega_s L_m i_{qr} \quad (B.17)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s L_{ss} i_{ds} + \omega_s L_m i_{dr} \quad (B.18)$$

Rotor devresi için,

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} - s \omega_s L_{rr} i_{qr} - s \omega_s L_m i_{qs} \quad (B.19)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + s \omega_s L_{rr} i_{dr} + s \omega_s L_m i_{ds} \quad (B.20)$$

Stator gerilimi, akımı ve rotor akımı için d ve q bileşenlerinin etkin değerleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\bar{V}_s = \frac{v_{ds} + j v_{qs}}{\sqrt{2}} \quad (B.21)$$

$$\bar{I}_s = \frac{i_{ds} + j i_{qs}}{\sqrt{2}} \quad (B.22)$$

$$\bar{I}_R = \frac{i_{dr} + j i_{qr}}{\sqrt{2}} \quad (B.23)$$

Fazörel ifadeler yerlerine konulduğunda stator ve rotor gerilim denkleminin son hali aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + j X_s \bar{I}_s + j X_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r) \quad (B.24)$$

$$\bar{V}_r = 0 = \frac{R_r}{s} \bar{I}_r + j X_r \bar{I}_r + j X_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r) \quad (B.25)$$

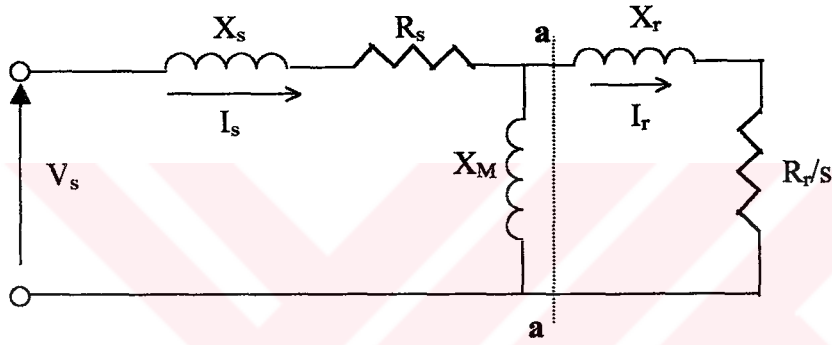
Bu eşitliklerde ;

$$X_s = \omega_s \cdot (L_{ss} - L_m) \quad ; \text{ stator kaçak reaktansı.}$$

$$X_m = \omega_s \cdot L_m \quad ; \text{ mıknatıslanma reaktansı.}$$

$$X_r = \omega_s \cdot (L_{rr} - L_m) \quad ; \text{ rotor kaçak reaktansı}$$

B.24 ve B.25'deki gerilim bağıntıları için Şekil B.1'deki sürekli hal eşdeğer devresi elde edilir.



Şekil B.1 Asenkron Motor Eşdeğer Devresi

B.3. Asenkron Motorun Geçici Hal Karakteristiği

Özellikle kararlılık çalışmalarında kullanılan asenkron motor modeli, makinanın geçici koşullardaki davranışını ortaya koyan modeldir. Bu amaçla (B.15)'teki i_{dr} ifadesi ve (B.16)'daki i_{qr} bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$i_{dr} = \frac{\Psi_{dr} - L_m \cdot i_{ds}}{L_r} \quad (B.26)$$

$$i_{qr} = \frac{\Psi_{qr} - L_m \cdot i_{qs}}{L_r} \quad (B.27)$$

Bu iki ifade (B.13) ve (B.14)'te yerine yazılırsa,

$$\Psi_{ds} = \frac{L_m}{L_r} \Psi_{dr} + \left[L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_r} \right] i_{ds} \quad (B.28)$$

$$\Psi_{qs} = \frac{L_m}{L_r} \Psi_{qr} + \left[L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_r} \right] i_{qs} \quad (B.29)$$

Stator akılarının d ve q bileşenleri (B.9) ve (B.10)'daki stator gerilim denklemlerinde yerine yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - X'_s i_{qs} + v'_d \quad (B.30)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + X'_s i_{ds} + v'_q \quad (B.31)$$

Burada,

$$v'_d = -\frac{w_s \cdot L_m}{L_r} \Psi_{qr} ; \text{ Geçici reaktans arkası gerilimin d-bileşeni,}$$

$$v'_q = \frac{w_s \cdot L_m}{L_r} \Psi_{dr} ; \text{ Geçici reaktans arkası gerilimin q-bileşeni,}$$

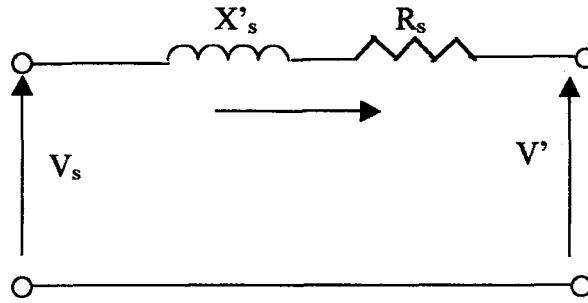
$$X'_s = w_s \cdot \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) ; \text{ Motor geçici reaktansdır.}$$

Stator gerilimin d ve q bileşeni birleştirildiğinde asenkron makine geçici hal gerilim denklemini elde edilir.

$$v_{ds} + j.v_{qs} = (R_s + j.X'_s).(i_{ds} + j.i_{qs}) + (v'_d + j.v'_q) \quad (B.32)$$

Fazör cinsinden yukarıdaki gerilim bağıntısı ve bu bağıntıya ait eşdeğer devre aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$\bar{V}_s = (R_s + j.X'_s) \cdot \bar{I}_s + \bar{V}' \quad (B.33)$$



Şekil.B.2 Asenkron Motor Geçici Hal Eşdeğer Devresi

V_s ; Stator uç gerilimi,

V' ; Geçici empendans gerisindeki gerilim.

ÖZGEÇMİŞ

A.Serdar Yılmaz, 15 Aralık 1973 K.Maraş doğumludur. 1990 yılında İstanbul Kabataş Erkek Lisesi'nden, 1994 yılında İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Yüksek lisans derecesini 1997 yılında SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde 'Güç Sistem Kararlayıcıları ve Uygulamaları' başlıklı tez çalışması ile almıştır. Aynı yıl doktora programına başlamış ve haziran 1998'te yeterlilik sınavını başarıyla verdikten sonra öğrenimine ara vererek askerlik hizmeti için Silahlı Kuvvetlere katılmıştır. Aralık 1998 – Mart 2000 tarihleri arasında İzmir ve Ankara'da askerlik hizmetini tamamladıktan sonra, Sakarya Üniversitesindeki görevine, doktora öğreniminin geri kalan kısmını tamamlamak üzere geri dönmüştür. Evli ve bir çocuk babası olan Yılmaz, enerji sistemlerinin kararlılığı, kontrolü ve enerji kalitesi konularında çalışmalarını sürdürmektedir.