

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**RÜZGAR SANTRALLERİNİN DİNAMİK MODELLEMESİ VE
ANALİZİ**

MEHMET KENAN DÖŞOĞLU

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

RÜZGAR SANTRALLERİNİN DİNAMİK MODELLEMESİ VE
ANALİZİ

MEHMET KENAN DÖŞOĞLU

Doç.Dr. Ayşen BASA ARSOY
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Mehmet Ali YALÇIN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

Prof.Dr. Semra F. ÖZTÜRK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Ali ÖZTÜRK
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.

Doç.Dr. Bora ALBOYACI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.04.2014

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son yıllarda kullanılan fosil yakıtların tükenme aşamasına gelmesinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeler başlamıştır. Rüzgar enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlilerinden biridir ve son yıllarda kullanımı yaygın bir şekilde artmaktadır. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünde kullanılan ve güç sistemlerine bağlı olarak çalışan rüzgar santrallerinin şebeke tarafında oluşabilecek problemlerden etkilenmesi kaçınılmazdır. Bu problemlerin giderilmesi için rüzgar santrallerinin dinamik modellenmesi ve kontrolünün sağlanması gerekmektedir.

Bu tez çalışması süresince bilgileri ve tecrübesi ile bana her zaman yardımcı olan sayın hocam Doç. Dr. Ayşen BASA ARSOY'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmam boyunca bana her konuda destek veren sevgili aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Nisan - 2014

Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Sebepleri	3
1.2. Önceki Çalışmalar	4
1.2.1. Azaltılmış derece modeli	4
1.2.2. Statik yük modelleri	8
1.2.3. Düşük gerilim iyileştirme yeteneği	11
1.2.4. Süperkapasitör.....	15
1.3. Tez Çalışmasının Katkıları.....	17
1.4. Tez Düzeni	18
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	20
2.1. Rüzgar Gücü.....	20
2.2. Türbin Hız ve Güç Kontrolü	23
2.2.1. Pasif (stall) kontrol.....	24
2.2.2. Aktif (pitch) kontrol	25
2.2.3. Aktif (stall) kontrol	25
2.3. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi	26
2.4. Rüzgar Türbini Generatör Modelleri.....	26
2.4.1. Sincap kafesli ve rotoru sargılı asenkron generatör	27
2.4.2. Değişken hızlı sabit mıknatıslı senkron generatör	27
2.4.3. Değişken hızlı rotoru sargılı senkron generatör	28
2.4.4. Değişken hızlı çift beslemeli asenkron generatör	28
3. RÜZGAR SANTRALLERİ İÇİN SİSTEM ENTEGRASYONUNDA UYULMASI GEREKEN KRİTERLER VE YÖNETMELİKLER	30
3.1. Türkiye’de Uygulanan Yönetmeliklere Genel Bakış	30
3.1.1. Aktif güç kontrolü	32
3.1.2. Frekans tepkisi	33
3.1.3. Reaktif güç kapasitesi	33
3.2. Dünyada Uygulanan Bazı Yönetmeliklere Genel Bakış	35
4. MODELLEME.....	38
4.1. Çift Beslemeli Asenkron Generatör Modellemesi	38
4.1.1. Tam derece modelleme	38
4.1.2. Azaltılmış derece modelleme.....	40
4.2. DGİY’nin ÇBAG’lü Rüzgar Türbinindeki Stratejisi	41
4.2.1. Tam derece modelinde rotor dinamik modelinin geliştirilmesi	42

4.2.2. Azaltılmış derece modelinde rotor dinamik modelinin geliştirilmesi	43
4.3. Statik Yük Modelleri	47
4.3.1. Üstel yük modeli	47
4.3.2. ZIP yük modeli	48
4.3.3. Birleştirilmiş yük modeli	48
4.4. Enerji Depolama Sistemi (EDS)	48
4.4.1. Çift beslemeli asenkron generatör ve enerji depolama sisteminin birlikte kullanımı	50
4.4.2. Enerji depolama kontrolü	51
4.4.3. Süperkapasitör modeli	51
5. BENZETİM ÇALIŞMASI	54
5.1. Şebeke Modeli	54
5.2. Analiz Edilen Durumlar ve İlgili Modellemeler	55
5.2.1. Tam ve azaltılmış derece modeli ile geçici durum analizleri	55
5.2.2. Statik yük modelleri ile geçici durum analizleri	60
5.2.3. Rotor dinamiği modellenmesi ile geçici durum analizleri	63
5.2.4. Süperkapasitör modellenmesi ile geçici durum analizleri	65
6. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI	68
6.1. Tam ve Azaltılmış Derece Modeli ile Statik Yüklerin Geçici Durum Analiz Sonuçları	68
6.2. Rotor Dinamiği Modellemesi ile Geçici Durum Analiz Sonuçları	95
6.3. Süperkapasitör Modellemesi ile Geçici Durum Analiz Sonuçları	103
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	112
7.1. Öneriler	113
KAYNAKLAR	114
EKLER	125
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	130
ÖZGEÇMİŞ	133

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Rüzgar türbini pervanesinden geçen havanın enerji hareketi.....	21
Şekil 2.2.	Rüzgar türbininde rotor hızı kontrol bölgeleri	23
Şekil 2.3.	Rüzgar güç dönüşüm sistemi yapısı	26
Şekil 2.4.	SKAG ve RSAG dönüşüm sistemi.....	27
Şekil 2.5.	Rüzgar güç dönüşüm sistemi yapısı	28
Şekil 2.6.	Değişken Hızlı ÇBAG dönüşüm sistemi.....	28
Şekil 2.7.	Güç Elektroniği dönüşüm sistemi	29
Şekil 3.1.	Kısa devre sırasında bağlantı noktasındaki gerilimin zamana göre değişimi	31
Şekil 3.2.	Gerilim dalgalanmalarında, rüzgar türbinlerinin vermesi gereken reaktif güç tepkisi	32
Şekil 3.3.	Rüzgar türbini güç-frekans eğrisi.....	33
Şekil 3.4.	Rüzgar santrali reaktif güç kapasite eğrisi	34
Şekil 3.5.	Rüzgar santrali gerilim ayar noktaları	34
Şekil 3.6.	A.B.D. için kısa devre sırasında bağlantı noktasındaki gerilim değişimi	36
Şekil 3.7.	Almanya için kısa devre sırasında bağlantı noktasındaki gerilim değişimi	36
Şekil 3.8.	İspanya için kısa devre sırasında bağlantı noktasındaki gerilim değişimi.....	37
Şekil 4.1.	Asenkron generatörün senkron referans çatıda eşdeğer devresi	38
Şekil 4.2.	DC/DC evirici devresi ile enerji depolama ara yüzü.....	50
Şekil 4.3.	Süperkapasitör temel devre modeli	51
Şekil 4.4.	Gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici temel devresi	52
Şekil 5.1.	Sistemin modellenmesi	54
Şekil 5.2.	TDM’de d-q eksen stator akılarının elde edilmiş blokları	56
Şekil 5.3.	ADM’de d-q stator eksen akılarının elde edilmiş blokları	56
Şekil 5.4.	TDM ve ADM’de d-q eksen rotor akılarının elde edilmiş blokları	57
Şekil 5.5.	ÇBAG’ün TDM’inde elektriksel ve mekaniksel modelleri	58
Şekil 5.6.	ÇBAG’ün ADM’inde elektriksel ve mekaniksel modelleri.....	59
Şekil 5.7.	Üstel ve ZIP yük matematiksel modeli	62
Şekil 5.8.	ÇBAG’de RDM blok diyagramı	64
Şekil 5.9.	ÇBAG’de DC/DC evirici ve süperkapasitör modellemesi.....	65
Şekil 5.10.	Süperkapasitörün kapasite-gerilim eğrisi	66
Şekil 6.1.	154 kV bara gerilimi (154 kV kesici açma kapama).....	69
Şekil 6.2.	34,5 kV bara gerilimi (154 kV kesici açma kapama).....	69
Şekil 6.3.	ÇBAG çıkış gerilimi (154 kV kesici açma kapama).....	70
Şekil 6.4.	ÇBAG aktif gücü (154 kV kesici açma kapama).....	70
Şekil 6.5.	ÇBAG açılmal hızı değişimi (154 kV kesici açma kapama)	71
Şekil 6.6.	ÇBAG elektriksel moment değişimi (154 kV kesici açma kapama)	71
Şekil 6.7.	ÇBAG d eksen stator akım değişimi (154 kV kesici açma kapama)	72

Şekil 6.8. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (154 kV kesici açma kapama)	72
Şekil 6.9. 154 kV bara gerilimi (34,5 kV kesici açma kapama).....	73
Şekil 6.10. 34,5 kV bara gerilimi (34,5 kV kesici açma kapama).....	74
Şekil 6.11. ÇBAG çıkış gerilimi (34,5 kV kesici açma kapama).....	74
Şekil 6.12. ÇBAG aktif gücü (34,5 kV kesici açma kapama).....	75
Şekil 6.13. ÇBAG açısal hızı değişimi (34,5 kV kesici açma kapama)	75
Şekil 6.14. ÇBAG elektriksel moment değişimi (34,5 kV kesici açma kapama)	76
Şekil 6.15. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (34,5 kV kesici açma kapama)	76
Şekil 6.16. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (34,5 kV kesici açma kapama)	77
Şekil 6.17. 154 kV bara gerilimi (3 faz arızası)	78
Şekil 6.18. 34,5 kV bara gerilimi (3 faz arızası)	78
Şekil 6.19. ÇBAG çıkış gerilimi (3 faz arızası).....	79
Şekil 6.20. ÇBAG aktif gücü (3 faz arızası).....	79
Şekil 6.21. ÇBAG açısal hız değişimi (3 faz arızası)	80
Şekil 6.22. ÇBAG elektriksel moment değişimi (3 faz arızası)	80
Şekil 6.23. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (3 faz arızası)	81
Şekil 6.24. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (3 faz arızası)	81
Şekil 6.25. 154 kV bara gerilimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)	82
Şekil 6.26. 34,5 kV bara gerilimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)	83
Şekil 6.27. ÇBAG çıkış gerilimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)	83
Şekil 6.28. ÇBAG aktif gücü (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)	84
Şekil 6.29. ÇBAG açısal hız değişimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası).....	84
Şekil 6.30. ÇBAG elektriksel moment değişimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)	85
Şekil 6.31. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)	85
Şekil 6.32. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)	86
Şekil 6.33. 154 kV bara gerilimi (Üstel yük/asenكرون motor)	87
Şekil 6.34. 34,5 kV bara gerilimi (Üstel yük/asenكرون motor)	87
Şekil 6.35. ÇBAG çıkış gerilimi (Üstel yük/asenكرون motor)	88
Şekil 6.36. ÇBAG aktif gücü (Üstel yük/asenكرون motor)	88
Şekil 6.37. ÇBAG açısal hız değişimi (Üstel yük/asenكرون motor).....	89
Şekil 6.38. ÇBAG elektriksel moment değişimi (Üstel yük/asenكرون motor).....	89
Şekil 6.39. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (Üstel yük/asenكرون motor).....	90
Şekil 6.40. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (Üstel yük/asenكرون motor).....	90
Şekil 6.41. 154 kV bara gerilimi (ZIP yük/asenكرون motor).....	91
Şekil 6.42. 34,5 kV bara gerilimi (ZIP yük/asenكرون motor).....	92
Şekil 6.43. ÇBAG çıkış gerilimi (ZIP yük/asenكرون motor).....	92
Şekil 6.44. ÇBAG aktif gücü (ZIP yük/asenكرون motor).....	93
Şekil 6.45. ÇBAG açısal hız değişimi (ZIP yük/asenكرون motor)	93
Şekil 6.46. ÇBAG elektriksel moment değişimi (ZIP yük/asenكرون motor)	94
Şekil 6.47. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (ZIP yük/asenكرون motor)	94

Şekil 6.48. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (ZIP yük/asen kron motor)	95
Şekil 6.49. 34,5 kV bara gerilimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)	96
Şekil 6.50. ÇBAG çıkış gerilimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)	96
Şekil 6.51. ÇBAG aktif gücü (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)	97
Şekil 6.52. ÇBAG açısal hız değişimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)	97
Şekil 6.53. ÇBAG elektriksel moment değişimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)	98
Şekil 6.54. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)	98
Şekil 6.55. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)	99
Şekil 6.56. 34,5 kV bara gerilimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile rotor dinamiği kullanımı)	100
Şekil 6.57. ÇBAG çıkış gerilimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile rotor dinamiği kullanımı)	100
Şekil 6.58. ÇBAG aktif gücü (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile rotor dinamiği kullanımı)	101
Şekil 6.59. ÇBAG açısal hız değişimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile rotor dinamiği kullanımı)	101
Şekil 6.60. ÇBAG elektriksel moment değişimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile rotor dinamiği kullanımı)	102
Şekil 6.61. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile rotor dinamiği kullanımı)	102
Şekil 6.62. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile rotor dinamiği kullanımı)	103
Şekil 6.63. 34,5 kV bara gerilimi (3 faz arızası ile süper kapasitör kullanımı)	104
Şekil 6.64. ÇBAG çıkış gerilimi (3 faz arızası ile süper kapasitör kullanımı)	104
Şekil 6.65. ÇBAG aktif gücü (3 faz arızası ile süper kapasitör kullanımı)	105
Şekil 6.66. ÇBAG açısal hız değişimi (3 faz arızası ile süper kapasitör kullanımı)	105
Şekil 6.67. ÇBAG elektriksel moment değişimi (3 faz arızası ile süper kapasitör kullanımı)	106
Şekil 6.68. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (3 faz arızası ile süper kapasitör kullanımı)	106
Şekil 6.69. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (3 faz arızası ile süper kapasitör kullanımı)	107
Şekil 6.70. 34,5 kV bara gerilimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile süper kapasitör kullanımı)	108
Şekil 6.71. ÇBAG çıkış gerilimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile süper kapasitör kullanımı)	108
Şekil 6.72. ÇBAG aktif gücü (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile süper kapasitör kullanımı)	109
Şekil 6.73. ÇBAG açısal hız değişimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile süper kapasitör kullanımı)	109
Şekil 6.74. ÇBAG elektriksel moment değişimi (Üstel yük+asen kron motor ve ZIP yük+asen kron motor ile süper kapasitör kullanımı)	110

Şekil 6.75. ÇBAG d eksenli stator akım değişimi (Üstel yük+asenkron motor ve ZIP yük+asenkron motor ile süperkapasitör kullanımı).....	110
Şekil 6.76. ÇBAG q eksenli stator akım değişimi (Üstel yük+asenkron motor ve ZIP yük+asenkron motor ile süperkapasitör kullanımı).....	111

TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1. EDS'de normal ve sınır çalışma kontrolü.....	49
Tablo 5.1. ÇBAG parametre değerleri	55
Tablo 5.2. Üstel, ZIP ve üstel/ZIP+asen kron motor parametre değerleri	61

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	: Kanat süpürme alanı
C_p	: Türbin verimi
$C_{\text{süperkapasitör}}$: Süperkapasitör kapasitesi, (F)
e_{ds}	: Stator d eksen kaynak gerilimi, (V)
e_i	: Giriş faz sinyali
e_o	: Çıkış faz sinyali
e_{qs}	: Stator q eksen kaynak gerilimi, (V)
E_d	: Rotor d eksen kaynak gerilimi, (V)
E_k	: Rüzgar pervanesinden geçen akım enerji dengesi, (Nm)
E_q	: Rotor q eksen kaynak gerilimi, (V)
E_{EDS}	: Depolanan enerji miktarı, (J)
i_{dr}	: Rotor d eksen akımı, (A)
i_{ds}	: Stator d eksen akımı, (A)
i_L	: Bobin akımı, (A)
i_{qr}	: Rotor q eksen akımı, (A)
i_{qs}	: Stator q eksen akımı, (A)
L_r	: Rotor endüktansı, (H)
L_m	: Manyetizasyon endüktansı, (H)
L_s	: Stator endüktansı, (H)
m	: Kütle, (kg)
M	: Moment, (Nm)
n	: Katsayı
n_p	: Üstel yükte aktif güç katsayısı
n_q	: Üstel yükte reaktif güç katsayısı
P_{nominal}	: Nominal güç, (W)
P_r	: Rüzgarın iş yapabilme yeteneği, (Nm/s)
$P_{\text{şebeke}}$: Şebeke aktif gücü, (W)
$P_{\text{şebeke-ref}}$: Şebeke referans aktif gücü, (W)
P_t	: Türbinden elde edilen teorik güç, (W)
P_0	: Yükün aktif gücü, (W)
P_{im}	: Asenkron motor aktif gücü, (W)
R_r	: Rotor direnci, (Ω)
R_s	: Stator direnci, (Ω)
s	: Kayma
t	: Zaman, (s)
T_0	: Geçici açık zaman sabiti
u_0	: Çıkış gerilimi, (V)
v_{dr}	: Rotor d eksen gerilimi, (V)
v_{ds}	: Stator d eksen gerilimi, (V)
v_i	: Giriş sinyali
v_{qr}	: Rotor q eksen gerilimi, (V)
v_{qs}	: Stator q eksen gerilimi, (V)
v_o	: Çıkış sinyali

V_{sdq}	: Sürekli durum stator d-q eksen gerilimi, (V)
V	: Bara gerilimi, (kV)
V_{ϕ}	: Çıkış genliği, (V)
V_g	: Giriş genliği, (V)
V_{max}	: Maksimum gerilim, (V)
V_{min}	: Minimum gerilim, (V)
V_r	: Rüzgar hızı, (m/s)
V_0	: Yük akışı sonucundaki bara gerilimi, (kV)
Q_{im}	: Asenkron motor reaktif gücü, (VAr)
Q_0	: Yükün reaktif gücü, (VAr)
ω_i	: Giriş frekansı, (Hz)
ω_s	: Stator açısal hızı, (rad/s)
ω_0	: Çıkış frekansı, (Hz)
X	: Stator reaktans, (Ω)
X'	: Geçici reaktans, (Ω)
λ_{dr}	: Rotor d eksen halkalama akısı, (Wb)
λ_{ds}	: Stator d eksen halkalama akısı, (Wb)
λ_{qr}	: Rotor q eksen halkalama akısı, (Wb)
λ_{qs}	: Stator q eksen halkalama akısı, (Wb)
λ_{sdq0}	: Sürekli durumda stator halkalama akısı, (Wb)
λ_{sdq2}	: Geçici durum stator halkalama akısı, (Wb)
σ	: Stator akı sönümleme katsayısı
ρ_h	: Yoğunluk, (kg/m^3)

Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
ADM	: Azaltılmış Derece Modeli
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DA	: Doğru Akım
DHRSSG	: Değişken Hızlı Rotoru Sargılı Senkron Generatör
DGİY	: Düşük Gerilim İyileştirme Yeteneği
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
EDS	: Enerji Depolama Sistemi
EPDK	: Enerji Piyasası Denetleme Kurulu
FKD	: Faz Kilitleme Döngüsü
HAUSG	: Harici Alan Uyarmalı Senkron Generatör
RDM	: Rotor Dinamik Modeli
RES	: Rüzgar Enerji Santrali
RSAG	: Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
SKAG	: Sincap Kafesli Asenkron Generatör
SMAG	: Sabit Miknatıslı Asenkron Generatör
SMSG	: Sabit Miknatıslı Senkron Generatör
ŞDY	: Şebekeyi Destekleme Yeteneği
TDM	: Tam Derece Modeli
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

RÜZGAR SANTRALLERİNİN DİNAMİK MODELLEMESİ VE ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, şebekeye bağlı bir rüzgar santralının geçici durum modellemesi ve analizinin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla rüzgar santralinde yaygın olarak kullanılan Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) için geçici durum modellemeleri ve kontrolü geliştirilmiş olup, bu modellemelerin bozucu etkiler karşısındaki davranışları benzetim çalışmaları ile desteklenmiş ve kararlılık açısından değerlendirilmiştir.

Bir benzetim çalışmasından kabul edilebilir sonuçları kısa sürede almak, etkin bir sistem analizi için önem taşımaktadır. Bu nedenle, rüzgar santrallerinde kullanılan ÇBAG için indirgenmiş model olan Azaltılmış Derece Modeli (ADM) tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasının ilk kısmında, ADM ve Tam Derece Modeli (TDM) ile modellenmiş ÇBAG'ün çeşitli geçici durum olayları karşısındaki davranışları karşılaştırılmıştır.

Statik yüklerin kısa süreli devreye girmesi diğer bir geçici durum olarak belirlenmiştir. Endüstri yüklerini temsil eden statik yükler, üstel yük ve sabit empedans, sabit akım ve sabit aktif güce sahip (ZIP) yük modelleri ile gösterilmişlerdir. Bu yükler ve asenkron motorun kısa süreli devreye alınması ile şebeke tarafında bir gerilim düşümü oluşturulmuş ve bu gerilim düşümü karşısındaki ÇBAG'ün davranışı benzetim çalışmasıyla irdelenmiştir.

Rüzgar santrallerinde Düşük Gerilim İyileştirme Yeteneği (DGİY) için iki farklı yaklaşım benimsenmiştir. Bunlardan ilki, ÇBAG'de Rotor Dinamik Modellemesini (RDM) geliştirmek, ikincisi ise ÇBAG'le birlikte kullanılabilen enerji depolama sisteminin modellemesi ve kontrolünü yapmaktır. Rotor dinamiği için gerekli matematiksel eşitliklerin çıkarımı yapılmıştır. Enerji depolama sistemi, süperkapasitör ve gerilim arttıran-azaltan evirici devresi ile modellenmiştir. Şebeke tarafındaki geçici olayların etkisi her iki modelleme için ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

RDM ve süperkapasitör için geliştirilen modellemeler ile geçici olaylar sonrası oluşan salınımların çok kısa sürede ortadan kalktığı ve sistemin kararlı hale geldiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Azaltılmış Derece Modeli, Rotor Dinamik Modeli, Statik Yük Modeli, Süperkapasitör, Tam Derece Modeli.

DYNAMIC MODELLING AND ANALYZING OF WIND PLANTS

ABSTRACT

The aim of this study is to carry out transient stability modeling and analysis of a grid integrated wind power plant. Transient models are developed for a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) commonly used in wind power plants. Impact of system disturbances on different models is simulated and evaluated in terms of stability.

Having acceptable results from a simulation study within short simulation time is important for efficient system analysis. Therefore, Reduced Order Model (ROM) is preferred in modeling the DFIG against full order model (FOM). In the first part of this thesis, the behaviors of the DFIG represented with ADM and FOM have been compared, when subjected to several transient events.

Commissioning of static loads for a short period of time is considered to be another transient event. Static loads representing common industrial loads has been represented with models of exponential and ZIP load having constant impedance, constant current and constant active power. These loads and induction motors may result in a voltage dip as they are commissioned for a short period of time. The behavior of the DFIG on this event has been analyzed with the various simulation studies.

Two approaches are adopted in this thesis for Low Voltage Ride Through Capability (LVRTC) in wind power plants,. One of those is to develop rotor dynamic modeling (RDM), while the second one is to have a model for energy storage system coupled to a DFIG. The mathematical equations have been derived for RDM. The energy storage system has been modeled with a supercapacitor and a required buck-boost converter circuit. The impact of transient events at grid side has been studied in detail for both models.

Oscillations observed after transient events are damped in a very short period of time resulting in the system stability with the use of RDM and supercapacitor energy storage system coupled to the DFIG.

Keywords: Reduced Order Model, Rotor Dynamic Modeling, Static Load Models, Supercapacitor, Full Order Model.

GİRİŞ

Son yıllarda fosil yakıtların fiyatındaki yükselmeler ve kullanımının sınırlı hale gelmesinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeler başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli olanlarından biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi, rüzgarı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Rüzgar enerjisi sürekli olması, ucuz olması ve temiz olması nedeniyle dünyada kullanımı gün geçtikçe artan yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olmuştur.

Rüzgar enerjisinde elektrik enerjisi üretimi için kullanılan rüzgar türbinlerinden son yıllarda MW mertebesine kadar güç alınmaktadır. Rüzgar türbinin en önemli parçası olan generatör, rüzgarın farklı hızlarda olması nedeniyle değişken hızlı ve verimi yüksek olacak şekilde tercih edilmektedir. Genelde Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (SMAG), Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SCAG) ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) kullanılmaktadır. Rüzgar santrallerinde aktif güç ve moment kontrolü diğerlerine göre daha avantajlı olan ÇBAG tercih edilmektedir. Şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralleri şebeke tarafında oluşabilecek geçici durumlardan oldukça fazla etkilenmektedir. Bunun için ÇBAG'de geçici durumlar için çeşitli kontrol yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu kontrol yöntemleri genel olarak Düşük Gerilim İyileştirme Yeteneği (DGİY) olarak tanımlanmaktadır. Bu çözüm yöntemlerinden biri ÇBAG'de şebekeye bağlanması esnasında oluşacak olan kalkış akımını sınırlı hale getirerek rotor devresini kontrol etmektir. ÇBAG'de rotor devresinin dinamik modellemesi yapılarak şebeke tarafında oluşabilecek problemlerin kısa süre içerisinde ortadan kalkması sağlanmaktadır.

Diğer çözüm yöntemlerinden biride Enerji Depolama Sistemi (EDS)'dir. Çeşitli enerji depolama aygıtları kullanılarak DGİY sağlanmış olmaktadır. Özellikle de şebeke tarafındaki evirici devresinde Doğru Akım (DA) gerilimin geçici durumlara karşı kontrolü sağlanmaktadır. EDS elemanı olarak hem hızlı şarj olması hem de

yüksek güçlerde verimli olmasına bağlı olarak süperkapasitör tercih edilmektedir. ÇBAG'de şebeke tarafındaki evirici devresinde süperkapasitör kullanılması ile oluşabilecek geçici durumlara karşı kısa zaman içerisinde cevap verilmektedir.

1. GENEL BİLGİLER

Rüzgar santrallerinin şebekeye bağlı olarak çalışması son yıllarda hızla artmaktadır. Rüzgar santrallerinin hem şebekeyi rahatlatması hem de ekonomik olmasından dolayı kullanımı cazip hale gelmektedir. Ancak rüzgar santralleri şebekeye bağlı olarak çalışması esnasında oluşabilecek problemlerden etkilenmektedir. Bu problemler özellikle de gerilim düşümü ve salınımların artması olarak görülmektedir. Bu problemlere karşı rüzgar santralinin dinamik modellenmesi ve kontrolü önem kazanmaktadır.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Sebepleri

Son yıllarda yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlı olarak çalışması güç sistemlerinde çalışma koşullarının iyileştirmesi açısından çok önemlidir. Bununla birlikte, rüzgar santrallerinin şebekedeki bozucu etkiler karşısında sistem kararlılığını devam ettirme konusu bir problem olarak ortaya çıkmaktadır.

Rüzgar santrallerinde bu geçici durum etkilerini incelemek için benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Benzetim çalışmasının performansı, kabul edilebilir sonuçların kısa sürede elde edilmesi ile ilgilidir. Sistem analizinde, indirgenmiş modeller daha iyi bir performans için kullanılır. Bu nedenle, aktif güç ve moment kontrolü diğer generatörlere göre daha iyi olan ÇBAG için ADM kullanımını benimsenmiştir.

Şebeke tarafında oluşabilecek geçici durumlar, kısa devre ve statik yüklerin kısa süreli devreye girmesi olarak belirlenmiştir. Endüstrideki yükleri temsil eden statik yüklerin modellenmesinde üstel ve ZIP modelleri kullanılmıştır. Bu yükler ve asenkron motorun kısa süreli devrede olmasının ÇBAG üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiştir.

Kısa devre ve statik yüklerin devreye girip çıkması gibi geçici olaylar, şebeke ve generatör uçlarında düşük gerilime neden olmaktadır. Bu düşük gerilimi iyileştirmek için tam ve azaltılmış derece modellenmiş ÇBAG'nin rotor dinamik modellenmesi ve

kontrolü geliştirilmiştir. Geçici olaylar karşısında RDM'nin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumların karşılaştırılması yapılmıştır.

ÇBAG'de DGİY için kullanılan yöntemlerden biri de Enerji Depolama Sistemi (EDS)'dir. Maliyeti, verimi ve enerji seviyeleri açısından kullanımı avantajlı olan EDS elemanı süperkapasitör tercih edilmektedir. Kısa devre ve statik yüklerin devreye girip çıkmasında düşük gerilim problemlerinin ortadan kaldırılmasında süperkapasitörün kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar karşılaştırılmıştır.

1.2. Önceki Çalışmalar

ÇBAG'de d-q eksen stator gerilim denklemlerinde stator akı türevleri ihmal edilmektedir. İhmal edilen stator akı türevlerinin yerine gerilim kaynağı ve geçici reaktans kullanımı ile yeni bir modelleme oluşturulmaktadır. Bu modelleme ADM olarak isimlendirilmektedir. Benzetim çalışmalarında ÇBAG'nin stator dinamik modellemesinin yanısıra hızlı ve doğru hesaplama yapmasında ADM'den faydalanılmaktadır. ÇBAG'de ADM ile literatürde yaygın çalışmalar bulunmaktadır.

1.2.1. Azaltılmış derece modeli

Ekanayake ve diğ. ÇBAG'de ADM tabanında rotor devresinin tek kafesli ve çift kafesli olarak modellemesini yapmışlardır. Ayrıca ilaveten ADM tabanlı olarak koruma devresi de geliştirilmişlerdir. Rüzgar türbinin davranışı ve şebekedeki çeşitli bozucu etkilerin sistem parametreleri üzerinde oluşturdukları etkileri incelemişlerdir. ÇBAG'ün şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki evirici kontrolünün sağlanmasında ADM'nin kullanımının önemli olduğunu göstermişlerdir [1]. Fernandez ve diğ. ADM ile rüzgar türbinin bir ve birden fazla kullanımında sistem kararlılığı üzerindeki etkileri incelemişlerdir. ÇBAG'nin şebekeye bağlı olduğu durumda ortak birleşme noktasındaki gerilim değişimlerinin oluşturduğu etkilerin karşılaştırılması üzerinde durmuşlardır. Ayrıca ÇBAG'nin ADM ile mekanik moment kontrol ünitesini geliştirmişlerdir [2]. Fernandez ve diğ. ÇBAG'ün bir ve birden fazla kullanımında ADM'de güç kapasitesini incelemişlerdir. Ayrıca güç kapasitesinin maksimum değere çıkarılması için hibrit aktif-reaktif güç kontrol modellemesi oluşturmuşlardır. ADM'de sistemin değerlendirilmesini ortalama rüzgar hızı ve değişimine bağlı olarak yapmışlardır. Ortak bağlantı noktasında şebeke

olayları ve rüzgar değişimi gibi oluşabilecek kararsızlık durumlarının karşılaştırmasını yapmışlardır [3]. Hector ve diğ. ÇBAG'de ADM kullanılarak benzetim çalışmasında seçici model analizi yapmışlardır. Derece modelinin az ya da çok olmasına bağlı olarak bir kontrol modülü geliştirilmiştir. Dört baralı ve otuz dokuz baralı güç sistemlerinde hat kopması ve senkron generatörlerin devre dışı kalması durumlarının geliştirilen kontrol modülü ile sistemi kısa süre içerisinde kararlı hale getirmişlerdir [4]. Gracia ve diğ. ÇBAG'de ADM ile nümerik metotların geçici durum karşılaştırmasını yapmışlardır. Ayrıca ilaveten ÇBAG'de yeni denge modeli geliştirilmiştir. Bu denge modeli ADM ile kullanılarak çeşitli şebeke bozucu etkilerine karşı bir ağırlık katsayısına bağlı olarak geçici durum etkilerini minimum düzeye indirmeyi amaçlamışlardır [5]. Holdsworth ve diğ. ÇBAG dinamik modellemesinde ADM kullanılarak rüzgar türbinin değişken ve sabit hızda analizleri incelemişlerdir. Ayrıca ÇBAG'nin ADM'ye bağlı olarak hız kontrol karakteristiği ve evirici koruma ünitesi geliştirilmiştir. Bu geliştirilen kontrol ünitesi sayesinde üç faz kısa devre ve şebekedeki gerilim kararsızlığına karşı çok etkili sonuçlar verdiğini gösterilmiştir [6]. Erlich ve diğ. şebekeye bağlı olarak çalışan ÇBAG'de ADM kullanılarak evirici korumasını temel frekans değerine göre düzenlemesini sağlamışlardır. Evirici korumasında rüzgar türbininde olumsuz bir durumun oluşmasında şebekeden ayırma işlemini rotor akımına bağlı olarak gerçekleştirmişlerdir. Dört farklı zamanda uygun çalışma modu ayarlaması yapılarak şebeke tarafındaki evirici, rotor tarafındaki evirici kontrolü, açılma hız ve pitch açısı kontrolünü sağlamışlardır [7]. Kretschmann ve diğ. ADM'nin ÇBAG'de oluşturulması ile DA link kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca eviricilerin koruma ünitesindeki tetiklemeleri sonucunda oluşan anahtarlama kayıplarının minimum düzeye indirmek için ilaveten bir kontrol ünitesi geliştirilerek şebekedeki kararsızlığa kısa süre içerisinde ortadan kaldırmışlardır [8]. Lei ve diğ. ÇBAG'de ADM'nin temel frekansta şebeke tarafındaki evirici, rotor tarafındaki evirici ve DC link gerilim kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Her iki eviricinin akım kontrolü ve aktif-reaktif güç kontrollerini geliştirilerek ÇBAG'nin geçici durum analizlerini incelemişlerdir. Geleneksel olarak kullanılan kontrol modellemesi ile gerilim, akım ve güçler arasındaki ilişkiyi yorumlamışlardır [9]. Anayalara ve diğ. ÇBAG'nin ADM ile kısa süreli frekans kararlılığını incelemişlerdir. ADM'ye ilave olarak ÇBAG'ün çıkış gücünü kontrol etmek amaçlı olarak dinamik rotor akı vektörü tasarımı yapılmıştır.

Çok baralı güç sisteminde kullanılan ÇBAG'nin ve senkron generatörlerin bu generik kontrol ile farklı çıkış gücündeki vermiş oldukları sonuçlar karşılaştırılmıştır [10]. Marcus ve diğ. ADM'nin ÇBAG'de kullanılması ile şebekede oluşabilecek geçici kararlılık durumlarına karşı rotor devresi akım kontrolünü sağlamışlardır. Ayrıca ÇBAG'nin geliştirilen bu kontrol ünitesi ile zayıf ve güçlü şebekelerdeki çeşitli dağılımlardaki etkileri incelemişlerdir [11]. Cartwright ve diğ. ADM ile ÇBAG'de gerilim kontrolünü geliştirilmişlerdir. Geliştirilen bu gerilim kontrolü sayesinde hem iletim mertebesinde hem de dağıtım mertebesinde gerilim kararlılığı açısından değerlerdirme yapmışlardır. Ayrıca dinamik doğrusal zaman modellemesini yaparak evirici kontrolü ve transformatör kademe değiştirme sırasındaki oluşabilecek problemlerin minimum seviyeye indirmede başarılı olmuşlardır [12]. Ekanayake ve diğ. ADM ile kısa devre analizinde ÇBAG'nin hem ADM'de hem de TDM'de moment-hız karakteristiğini incelemişlerdir. Hesaplama kolaylığı ve benzetim çalışmasının zaman performansı açısından ADM'nin benzetim çalışmasında kolaylık sağladığını göstermişlerdir [13]. Dusonchet ve Telaretti, ADM ile rüzgar türbinindeki shaft sistemi, aerodinamik model ve pitch açısı kontrolünü incelemişlerdir. Üç faz kısa devre analizinde hem rüzgar türbinin hem de şebekenin çeşitli elektriksel ve mekaniksel parametrelerini değerlendirmişlerdir. Ayrıca arıza ve farklı elektriksel-mekaniksel parametre değerleri ile TDM ile ADM'nin karşılaştırmasını yapmışlardır [14]. Kayıkcı ve Milanovic, rüzgar türbinin çeşitli çalışma koşullarındaki ADM ile analizlerini incelemişlerdir. Çeşitli elektriksel ve mekaniksel parametrelere bağlı olarak geçici durum cevap analizleri üzerinde yoğunlaşmışlardır. Ayrıca farklı koruma ünitesi ve rotor tarafındaki eviricinin kısa süreli olarak devre dışı kalması durumları geleneksel olarak kullanılan modelleme ile ADM'nin karşılaştırmasını yapmışlardır [15]. Sørensen ve diğ. ADM ile ÇBAG'nin sürekli durum analizini hem elektriksel hem de mekaniksel olarak incelemişlerdir. Elektriksel kontrol ünitesindeki elektromekanik moment, mekaniksel kontrol ünitesindeki eylemsizlik üzerinde durulmuştur. Geliştirilen bir aerolastik yöntem ile azaltılmış ve yükseltilmiş derece modellerinin karşılaştırmasını yapmışlardır [16]. Elkington ve diğ. ADM geliştirilerek rüzgar türbinin özdeğer analizini incelemişlerdir. Özdeğer analizinde, şebekedeki küçük ve büyük bozucu etkileri dikkate almışlardır. ADM'nin küçük bozucu etkiler karşısında etkili sonuçlar verdiği görülürken, büyük bozucu etkiler karşısında yetersiz kaldığı görülmüştür [17-18]. Painemal ve diğ.

ADM'nin şebekeye bağılı ÇBAG'e uyarlanması ile çatallanma ve duyarlılık analizlerini incelemişlerdir. ADM'de model analiz kontrol ünitesi geliştirilmişlerdir. Üç farklı şekilde geliştirilen bu kontrol ünitesi ile negatif yüklerin sistem üzerinde oluşturdukları etkiler incelenmiştir [19]. Ledesma ve Julio, ÇBAG'de ADM ile subsenkron hız ve süpersenkron hız çalışması üzerinde yoğunlaşmışlardır. Hızlı matematiksel hesaplamaya dayalı olarak iki farklı metot geliştirmişlerdir. ÇBAG'nin çıkışında kısa devre arızasının olması durumunu geleneksel kullanılan metot ile geliştirilen metotların karşılaştırmalarını yapmışlardır [20]. Boukhezzar ve Houria, ÇBAG'nin kaskat doğrusal olmayan kontrolü ADM ile sağlamışlardır. Özellikle de sürücü devresinin geçici durumlara karşı dayanıklılığı için enerjinin optimum kullanımını göstermişlerdir. Akım kontrolü sayesinde hem generator momenti hem de akıyı etkili bir şekilde takip edici bir mekanizma geliştirilmiştir. Ayrıca rüzgar hızı tahmin kontrol ünitesi oluşturularak rüzgar hızı ve aerodinamik momentin etkili bir şekilde kullanımını sağlamıştır [21]. Wu ve diğ. ÇBAG'de diferansiyel geometrik teoriyi ADM ile geliştirmişlerdir. Bu doğrusal olmayan kontrol metodu ile geçici kararlılık olaylarını incelemişlerdir. Ayrıca doğrusal olmayan kontrol metodunun doğrusallaşması için doğrusal kvadratik düzenleme metodu oluşturmuşlardır [22]. Petersson ve diğ. ÇBAG'ün sürekli durum çalışmasında ADM'yi kullanarak güç kalitesi analizi incelenmişlerdir. ÇBAG'de gerilim düşmesinin yanısıra fliker emisyonu, reaktif güç, toplam harmonik dağılımı gibi konularda ölçümler gerçekleştirmişlerdir. ADM'nin kullanılması ile akım harmonik dağılımının %5'in altına düşürüldüğü, fliker emisyonun 30 derece ile 85 derece arasında bir değer aldığını göstermişlerdir [23]. Holdsworth ve diğ. ADM kullanarak ÇBAG'de yük akışı analizi yapmışlardır. Rotor gerilime bağılı olarak doğrudan çözüm metodu geliştirmişlerdir. Güç akışı analizinde ÇBAG'yi generatör ve yük barası olarak modellemişlerdir. Güç akışı algoritmasının ÇBAG'ün kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlardaki etkileri yorumlamışlardır [24]. Feijo'o ve diğ. ÇBAG sürekli durum analizini matematiksel olarak geliştirmişlerdir. ADM kullanılması ile akım ve gerilimin park-clark dönüşümlerinin ifadelerini matrissel olarak çıkartmışlardır. Sürekli durum analizleri için bir k matrisi geliştirerek değişik kombinasyonlardaki zaman cevaplarını ve ÇBAG'de güç-kayma arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir [25].

Bu tez çalışmasında ÇBAG'de ADM kullanılarak iletim ve dağıtım seviyelerindeki kesici açma kapasası, sabit ve farklı zamanlardaki üç faz kısa devre analizleri incelenmiştir. Özellikle de iletim ve dağıtım seviyesindeki açma kapama olayları ve farklı sürelerdeki üç faz kısa devresi ÇBAG'de ADM tabanlı ayrı birer çalışma olarak literatürde yerini alması amaçlanmıştır.

1.2.2. Statik yük modelleri

Geçici kararlılık çalışmalarında önemli olan konulardan biri de statik yüklerin kısa süreli olarak devreye girip çıkmasıdır. Endüstri yüklerini temsil eden yük modelleri güç sistemlerinde birçok analizde kullanılmaktadır.

Daniel ve David, statik yüklerin matematiksel olarak modellenmesini yaparak güç sistemleri üzerinde oluşturdukları etkileri incelemişlerdir. Statik yük modellerinin bloklarını ve doğrusal olmayan fonksiyonlara bağlı olarak çözümlemesini yaparak parametrelerini belirlemişlerdir. Hem sürekli hem geçici durum analizleri sonucunda statik yük modellerinin karmaşık güç sistemleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür [26]. Reformat ve diğ. statik yük modellerine bağlı olarak zaman cevabını incelemişlerdir. Benzetim çalışması ve uygulama olarak modellemeleri yapılan statik yük modellerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Uygulamada yük modeli olarak floresan lamba ve bilgisayar kullanmışlardır. Hem sürekli durum hem de geçici durumda gerilim ve akım profillerini incelenmişlerdir [27]. Zhu ve diğ. farklı statik yük modellerinin parametrelerini enstrümantal değişim ve mutlak kalıntı minimum toplama metodu ile geliştirmişlerdir. Bu iki geliştirilen metot ile statik yük modellerin özdeğer analizi yapılmıştır. Toplam reaktif güç üretiminde duyarlılık ve kontrol değişimlerini incelemişlerdir. Geliştirilen bu iki metot sayesinde statik yük modellerinin geleneksel olarak kullanılan yöntemden daha iyi sonuçlar verdiğini bu çalışmada göstermişlerdir [28]. Knyazkin ve diğ., Renmu ve diğ., Choi ve diğ., Ma ve diğ. güç sistemlerinde statik yük modellerinde parametre tahmini yapmışlardır. Parametre tahmini için ölçüm verilerinden faydalanmışlardır. Ölçüm verileri sayesinde ölçülen değerler ve modellenen değerler arasındaki hatayı minimum seviyeye indirmeyi amaçlamışlardır. Bu analiz için nümerik yöntemler kullanılmıştır [29-33]. Milanovic ve Hiskens, geliştirilmiş statik yük modelinin güç sistemlerinde oluşturduğu etkileri incelemişlerdir. Generek olarak oluşturulan statik yük modelinin

frekans cevapları üzerinde durulmuştur. Genetik statik yük modelinin bir geri besleme ünitesi ile kontrolünü sağlayarak güç sistemlerinde oluşabilecek salınımların minimum değere indirilmesi amaçlanmıştır. Bazı çalışma koşullarında salınımların azalmasında başarılı olsalar da, diğer çalışma koşullarında olumsuz durumlar ile karşı karşıya kalmışlardır [34]. David, Borghetti ve diğ. farklı statik yük modellerinin güç sistemlerinde gerilim kararlılığı analizlerini incelemişlerdir. Yük modellerinin genetik ve zamana bağlı olarak modellemeleri yapılmıştır. Geliştirilmiş her yük modelinin aktif ve reaktif güç denklemlerine bağlı olarak hem sürekli durumda hem de geçici durumda yük barası ve maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişki üzerinde durulmuştur [35-36]. Burch ve diğ. farklı yük modelleri üzerinde harmonik yayılımı ve bozulumu çalışmasını incelemişlerdir. Farklı doğrusal olmayan yük modellerinin harmonik analizi yaparak yük modellerinin rezonans esnasında sistem empedansları üzerinde oluşturdukları etkileri yorumlanmışlardır. Özellikle, güç sistemlerinin harmonik yayılımı ve bozulumunda güç elektroniği tabanlı doğrusal olmayan yük modellerinin diğer yük modellerine nazaran daha fazla etkilendiği görülmüştür [37]. El-Saadany ve diğ. güç sistemlerinde doğrusal olmayan yük modellerinin gerilim ve akım harmonik dağılımlarını incelemişlerdir. Harmonik bozulumu, yük gerilimi ve akımlarının, yüklenme koşullarının, kaynak empedansının X/R oranı ve yük değişimlerinin etkileri üzerinde durmuşlardır. Net sistem harmonik bozulumunu iteratif yaklaşımla incelenerek farklı frekanslarda doğrusal olmayan yük modellerinin süseptans hesaplamaları yapılmıştır. Buna bağlı olarak tek çıkışlı hibrid reaktanslara bağlı kompanzasyon ünitesi oluşturularak harmonik dağılımlarını minimum düzeye indirilmiştir [38]. Ju ve diğ. güç sistemlerinde farklı bölgelerdeki statik yük modellerini birkaç kategoride sınıflandırmışlardır. Güç sistemlerinde sınıflandırılmış yük modellerine bağlı olarak yörünge duyarlılık analizini gerçekleştirilmişlerdir. Yörünge duyarlılık analizinin statik yük modellerinde etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir [39]. Hiskens, statik yük modellerinin modelleme ve ölçüm değerleri arasındaki ilişkiye bağlı olarak yörünge duyarlılık analizini incelemiştir. Modelleme ve ölçüm değerleri arasındaki çözümlemeyi Gauss-Seidel ve Newton Raphson algoritmaları sayesinde sağlamıştır [40]. Yingqin ve Wang, güç sistemlerinde doğrusal olmayan yük modellerinin oluşturduğu kararsızlık durumlarını Esnek Alternatif Akım (AA) iletim sistemi cihazlarından statik kompanzator ile incelemişlerdir. Generatörlerin uyarımı ve statik kompanzator'un

geri beslemeli doğrusallaştırma tekniğinin geliştirilmesi ile doğrusal olmayan yük modelleri üzerinde oluşturdukları etkiler üzerinde yoğunlaşmışlardır [41]. Hilsens ve David, doğrusal olmayan yüklerin güç sistemlerindeki geçici kararlılık davranışlarını enerji fonksiyonu analizi açısından değerlendirmişlerdir. Şebekeyi doğrusal olmayan yüklere karşı korumak için bazı yeni analitik yaklaşımlar ortaya koymuşlardır. Özellikle bu analitik yaklaşımlar ile açı kararlılığı incelenmiştir. Geliştirilen yaklaşımları belirli sınıflar altında toplayarak herbirinin doğrusal olmayan yüklerdeki etkilerini karşılaştırmışlardır [42]. Sauer ve diğ. statik yüklere bağlı jakobiyen matrisin geliştirilmesi üzerinde durmuşlardır. Güç sistemlerinin doğrusallaşması için güç akışı algoritması ile jakobiyen matrisin arasındaki ilişki ile başlangıç koşullarının belirlenmesini sağlamışlardır. Geliştirilen bu metot ile statik yük modellerinin devrede olması durumunda maksimum yüklenebilirlik parametre değerlerini arttırmışlardır [43]. Davy ve Hiskens, reaktif yüklerin oluşturduğu geçici kararlılık durumlarını Lyapunov fonksiyonun geliştirilmesi ile minimum düzeye indirmeye amaçlamışlardır. Hem statik hem reaktif yüklerin güç sistemlerinde oluşturdukları etkileri Lyapunov fonksiyonu ve Popov kriteri ile karşılaştırmışlardır [44]. Mishra ve diğ. güç sistemlerinde asenkron motor ve birleştirilmiş yük modellerinin olduğu durumdaki özdeğer analizini incelemişlerdir. Sistem kararlılığı açısından sistem dinamiği ve yükler arasındaki ilişkiyi osilatör mod tekniği kullanarak sağlamışlardır. Çeşitli geçici durumlara bağlı olarak osilatör mod tekniğinin sistemi kısa zaman içerisinde kararlı hale gelmesinde etkili olduğunu gösterilmişlerdir [45]. Aquino ve diğ. güç sistemlerinde statik yük modellerinin oluşturduğu geçici durumunu kontrol etmek amacı ile bir senkronizma devresi oluşturmuşlardır. Bu senkronizma devresine ilaveten akım ile gerilim arasındaki faz farkını ortadan kaldırmak için Faz Kilitleme Döngüsü (FKD) devresi tasarımı yapılmıştır. Bu senkronizma devresi sayesinde akım ile gerilim arasındaki oluşabilecek faz farkı minimum düzeye indirgenmiştir [46]. Tseng ve diğ. farklı statik yük modellerinde güç sistemlerinde mesafe koruma rölelerinin açma kapama zamanının tekrar ayarlanması için bir kontrol ünitesi oluşturmuşlardır. Bu kontrol ünitesi ile mesafe koruma rölesinde empedans, empedans açısı, rölelerin devre dışı kalması ve en iyi zaman ayarlaması gibi fonksiyonlar geliştirilmiştir. Mesafe koruma rölesinin bu şekilde koordinasyonun genişletilmesi ile güç sistemlerindeki yanlış zamanlardaki koordinasyonlardaki mesafe koruma rölelerinin açıp kapanmasını engellemişlerdir

[47]. Qian ve Shrestha, yeni geliştirilen statik yük modellerinin hızlı benzetim çalışması ve hesaplaması için yapay sinir ağlarından faydalanmışlardır. Geleneksel olarak kullanılan statik yük modellerine nazaran çok hızlı bir şekilde sonuç veren geliştirilmiş statik yük modelleri ayrıca adaptif geri oransal ağ yapısı ile birleştirilmiştir. Geliştirilen bu yük modellerinin farklı durumlardaki karşılaştırmaları yapılmıştır [48]. Kao, çeşitli statik yük modellerinin frekans kararlılığı analizini incelemiştir. Statik yük modellerinin düşük frekans salınımlarının minimum düzeye indirmek amacı ile yapılan bu çalışmada ölçüm verilerinden faydalanılmıştır. Özellikle güç sistemleri kararlılık analizinde statik yük modellerinin elektromekanik sistem üzerinde oldukça fazla etki oluşturduğu görülmüştür [49].

Yapılan bu tez çalışmasında endüstrideki statik yükleri temsilen üstel ve ZIP yükleri matematiksel olarak modellenmiştir. Literatürde kullanımı gün geçtikçe artan rüzgar santrallerin şebekeye bağlı çalışmasında statik yüklerin kısa süreli devreye girip çıkmasında oluşturabileceği etkiler literatürde yeni bir yaklaşım olarak katkı sağlayacaktır.

1.2.3. Düşük gerilim iyileştirme yeteneği

Şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santrallerinde kullanılan ÇBAG'de geçici kararlılık çalışmaları için önemli bir konu da DGİY'dir. DGİY için ÇBAG'ün stator devresi, rotor devresi ve koruma ünitesinin geliştirilmesine bağlı olarak yapılan çalışmalar bulunmaktadır.

Rahimi ve Parniani, simetrik kısa devre analizinde DGİY için rotor akımı ve gerilimini kalkış akımının etki faktörüne bağlı olarak matematiksel modellemişlerdir. ÇBAG'nin doğrusal olmayan kontrolünde öncelikli olarak şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki evirici üzerinde yoğunlaşmışlardır. Ayrıca rotor akımı, elektromanyetik moment ve DA link geriliminde oluşabilecek salınımların azalması için sönümlenme katsayısı kullanmışlardır [50]. Rahimi ve Parniani, gerilim düşümü ve rüzgar hızı değişimi için ÇBAG'nin geçici ve dinamik çalışma koşullarında kontrol parametrelerinin belirlemişlerdir. Kontrol parametreleri olarak rotor ve rüzgar hızı kullanılmıştır. Elektriksel ve mekanik sistem parametrelerinin belirlenmesi işleminde duyarlılık analizinden faydalanmışlardır. Rotor akım kontrolünde güç faktörü ve rotor gerilimi çok etkilenirken, hız kontrolünde ise rüzgar

hızı etkilenmiştir [51]. Rahimi ve Parniani, ÇBAG'de TDM ile rotor akım dinamiğini elektromanyetik kuvvet olarak modellemişlerdir. Rotordaki kalkış akımına bağlı olarak geliştirdikleri bu modelleme ile DGİY için kompanzasyon işlemini sağlamışlardır. Belirli çalışma koşullarında minimum olmayan faz açılarını ayarlama rotor elektromanyetik kuvvetin oldukça etkili olduğunu göstermişlerdir [52]. Rahimi ve Parniani, Hansen ve diğ. ÇBAG'de DGİY için stator tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki eviricide koordinat kontrolünü sağlamışlardır. Rotor tarafındaki evirici için ilaveten stator sönümlenme direnci kullanılmıştır. Bu stator sönümlenme direnci sayesinde geçici durumda kalkış akımını sınırlandırmış ve salınımlar minimum düzeye indirilmiştir. Ayrıca şebeke tarafındaki eviricide geçici durumlarda DA link üzerinde oluşabilecek aşırı gerilimi belli sınırlar içerisinde tutmuşlardır [53-54]. Rahimi ve Parniani, Abdel-Baqi ve Nasiri, ÇBAG'de kalkış akımını kontrol etmek için aktif ve pasif kompanzasyon modellemesi yapmışlardır. Stator sargılarına seri olarak bağlanan direnç grupları ile pasif koruma ünitesi oluşturulmuştur. Aktif koruma ünitesini arızalara karşı elektriksel momentte oluşacak olan salınımların minimum yapmak amacı ile tasarlamışlardır [55-56]. Yang ve diğ. ÇBAG'de DGİY için rotor hızındaki yükselmelere karşı kinetik enerjiye bağlı olarak rotor tarafındaki eviricide güç kontrolünü sağlamışlardır. Ayrıca bu geliştirilen güç kontrolü sayesinde şebeke tarafındaki eviricinin aşırı gerilimlere karşı korunması da sağlanmıştır. Farklı koruma üniteleri ile geliştirilen güç kontrollerinin karşılaştırılması yapılmıştır [57]. Liand ve diğ., Foster ve diğ. ÇBAG'de rotor tarafındaki eviricide ileri beslemeli geçici akım kontrolü ve aktif-reaktif güç çıkış kontrolünü yapmışlardır. Bu kontrol modellemesine ilaveten geleneksel akım kontrolü için ileri beslemeli geçici kompanzasyon modellemesi geliştirilmiştir. Koruma esnasında meydana gelen kesintileri minimum düzeye indirgemelerinin yanısıra aktif ve reaktif güç kontrolünü daha kolaylaştırmışlardır [58-59]. Mohseni ve diğ. ÇBAG'de sürekli çalışma durumunda kaynak geriliminde aşırı yükselmeler ve azalmalara karşı rotor tarafındaki evirici ve şebeke tarafındaki eviricilerde hibrit akım kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu kontrolde vektör tabanlı histerisiz akım kontrolü oransal kazanca bağlı olarak iki anahtarlama stratejisi ile sağlanmıştır. Rotor akımı ve DA link gerilimi maksimum ve minimum değerlerini sınırlandırılarak çeşitli şebekedeki kararsızlığa karşı bu denetleyici kontrolünün oldukça etkin olduğu göstermişlerdir [60]. Hu ve diğ. DGİY için rotor tarafındaki eviricide oluşabilecek

aşırı akımlara karşı sanal direnç ünitesi oluşturmuşlardır. Gerilim düşümüne karşı sana direnç ünitesi sayesinde ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç kontrolü sağlanmıştır. Bu kontrol ünitesini hem benzetim çalışmasında hemde uygulama düzeneğinde oluşturmuşlardır. Ayrıca şebekede oluşabilecek kısa devrelere karşı hızlı gözlemlene algoritması altında şebeke arıza saptama metodu geliştirmişlerdir [61]. Mendes ve diğ. ÇBAG'de simetrik kısa devrelerde DGİY için frekansa bağlı olarak makine manyetizasyon akım kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Matematiksel olarak geliştirilen bu kontrol modellemesini hem benzetim çalışması hemde uygulama olarak yapmışlardır. Benzetim çalışmasında ve uygulamada akımların geçici durumdan oldukça fazla etkilendiği görülmüştür [62]. Yan ve diğ. DGİY için seri pasif empedans geliştirmişlerdir. ÇBAG'nin stator tarafındaki şebekeye bağlı olan bu seri pasif empedans ile arıza analizinde geleneksel olarak kullanılan kontrol ünitesine nazaran daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca kapalı çevrim çalışmanın düşük maliyet yönünde kullanılmasının oldukça uygun olduğunu göstermişlerdir [63]. Johan Morren ve diğ. ÇBAG'de şebekede oluşabilecek geçici durumlarda şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki evirici devrelerini yüksek akımlara karşı korumak için rotor sargılarına dirençler bağlamışlardır. Bu dirençler ile ÇBAG'nin geçici durum öncesi ve sonrasında senkronizmada kalması sağlanmıştır [64]. Chondrogiannis ve diğ., Dai ve diğ. ÇBAG'de üç faz kısa devresi esnasında gerilim düşümünün etkisini azaltmak için aktif ve reaktif güç kontrolü sağlamışlardır. Aktif ve reaktif gücün vektörel kontrolünü tepe rotor kısa devre akımı ve çıkış gerilimine bağlı olarak incelemişlerdir. DA link dinamiğinin kısa devre esnasındaki ÇBAG'de etkisini minimum yapmak için hem aktif-reaktif güç kontrolü hem de DA link kontrolünün birleştirilerek hibrit hale getirmişlerdir [65-66]. Gomis-Bellmunt ve diğ. ÇBAG'de gerilim düşümü etkisini azaltmak için pasif ve negatif ardışıl akım referans kontrolünü sağlamışlardır. Bu kontrol ile moment ve DA link geriliminin gerilim düşümüne karşı daha uygun değerlerde çalışması ayarlanmıştır. Ayrıca hem şebeke tarafındaki eviricinin hem de rotor tarafındaki eviricinin performansı DGİY için karşılaştırılmıştır [67]. Santos-Martin ve diğ. ÇBAG'de rüzgar hız değişiminin oluşturacağı kararsızlık durumları için dinamik programlı güç kontrolü ünitesi geliştirmişlerdir. Bu kontrol ünitesi sayesinde şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki evirici devresini korumuşlardır. DGİY açısından geliştirilen bu kontrol ünitesi ile gücün yanı sıra akım dağılımını ve moment salınımlarını minimum düzeye

indirgemişlerdir [68]. López ve diğ. şebekedeki kararsızlık durumları için ÇBAG'nin koruma ünitesini geliştirmişlerdir. Geçici durum sonucu oluşan kısa devre akımlarını azaltmak için koruma ünitesinde aktivasyon zaman sabiti oluşturmuşlardır. DGİY'de şebeke gerilim standartlarına uygun olarak geliştirilen bu modelleme ile gerilim kararlılığı sınırları genişletilmiştir. [69]. Lima ve diğ. DGİY için rotor tarafındaki eviricide başlangıç aşırı akım değerlerini minimum düzeye indirmeyi amaçlamışlardır. Bunun içinde farklı çalışma modlarına bağlı bir algoritma tasarımı yapmışlardır. Rotorun dinamik davranışı için geliştirilen bu kontrol ünitesi ile ÇBAG'nin olumsuz durumlarda karşı iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [70]. Okedu ve diğ. ÇBAG'ün aşırı yüklerle ve kısa devrelere karşı korumak için DA link kıyıcı devresi, şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki evirici devrelerini hibrit bütünleyici akım kontrolü tasarlamışlardır. Her iki evirici devresinde frenleme dirençleri kullanarak geleneksel olarak kullanılan akım kontrol çeşitleri ile geçici kararlılık durumlarının karşılaştırılmasını yapmışlardır [71]. Zhou ve diğ., Ibrahim ve diğ. ÇBAG'de dengesiz şebeke gerilimleri için pozitif ve negatif ardışıl dinamik modelleme geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu modelleme ile geleneksel olarak kullanılan kısa devre analizindeki pozitif ve negatif ardışılık karşılaştırılmasını yapmışlardır. Bu geliştirilen dinamik modellemenin özellikle elektriksel moment ve DA gerilim limitlerini ayarlama konusunda oldukça etkili olduğu görülmüştür [72-73]. Seman ve diğ. ÇBAG'de DGİY için sonlu element metodu geliştirmişlerdir. Asimetrik kısa devrelerde ve toplu yük modelleri analitik iki eksenli olarak değerlendirilmiştir. [74]. Flannery ve Venkataramanan, arızalarda ve şebekelerdeki bozucu etkiler sonucu oluşan kararsızlık olaylarını iyileştirmek için ÇBAG'de paralel evirici devresi tasarımı yapmışlardır. Hem seri hemde paralel olarak çalışan eviricilerin geçici kararlılık durumlarını incelenmesinde, şebeke tarafındaki evirici ve birlikte çalışan paralel evirici devresinin sistem üzerinde oluşturdukları etkileri yorumlamışlardır [75]. Mishra ve diğ., Kasem ve diğ. ÇBAG'de düşük gerilim sonucu oluşan salınımları azaltmak için salınım kontrol ünitesi geliştirmişlerdir. Oluşan salınımları sönmülemde sezgisel yöntemler ile birlikte osilatör model oluşturmuşlardır. Osilatör modelini özdeğer analizinde şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki eviriciler üzerindeki etkileri incelemişlerdir [76-77].

Bu tez çalışmasında DGİY ile ilgili ÇBAG'de salınmların azaltılması ve sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale gelebilmesi için ADM tabanında RDM geliştirilmesi amaçlanmıştır. Hem stator hem de rotor dinamiğinin geçici durumlar için incelenmesi literatüre yeni bir çözüm yöntemi olarak katkı sağlamaktadır.

1.2.4. Süperkapasitör

ÇBAG'de DGİY için kullanılan yöntemlerden biri de EDS'dir. EDS'de yüksek güçlerde yüksek enerji elde edilmesi ve verimlilik açısından süperkapasitör kullanılmaktadır. ÇBAG'de süperkapasitör uygulamaları ile ilgili literatürde çalışmalar mevcuttur.

Liyan ve Qiao, Syed ve diğ., Krishnamurthy ve diğ. ÇBAG'de çift katmanlı sabit güç kontrolü sağlamışlardır. EDS elemanlarından süperkapasitör ile geliştirilen çift katmanlı sabit güç kontrolü hibrit olarak ayarlanmıştır. Ayrıca aktif güç talebini karşılamak amacıyla yönetici kontrol ünitesi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu hibrit yöntemle şebeke tarafında oluşan gerilim düşümünü kompanze etmişlerdir [78-80]. Muyeen ve diğ., Mendis ve diğ. ÇBAG'de geçici durum analizlerinde süperkapasitör kullanılmışlardır. Süperkapasitörü güç elektroniği sürücülerini ve çift katmanlı kapasitör ile birleştirilerek tasarımını sağlamışlardır. Sinüzoidal tetikleme genişlik modülasyonu, DA-DA gerilim arttırıcı evirici ve bipolar transistörün olduğu bir kontrol ünitesi geliştirilerek farklı simetrik ve asimetric kısa devrelerde süperkapasitörün etkilerini incenmişlerdir. Çok baralı güç sisteminde süperkapasitör kullanımı hem senkron generatörler için hem de DGİY için çok iyi sonuçlar verdiğini yapılan çalışmalarda görülmüştür [81-82]. Alam ve diğ. ÇBAG'de DGİY için Statik Senkron Kompanzatör kullanmışlardır. Statik Senkron Kompanzatör'ün DA link ünitesi süperkapasitör kullanılarak vektör kontrol tekniği destekli olarak aktif güç ve reaktif güç kontrolü sağlanmıştır. Statik Senkron Kompanzatör'de süperkapasitör kullanıldığı ve kullanılmadığı durumların karşılaştırmasını yapmışlardır [83]. Chad ve Géza, ÇBAG'de geçici durumlarda DA link gerilimini kontrol etmek amacıyla kısa süreli enerji depolama yapmak için süperkapasitör kullanmışlardır. Bu topoloji hem sürekli durum hem de geçici durumlar için değerlendirilerek, geleneksel kontrol yöntemleri ile süperkapasitörden elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır [84]. Li ve Geza, Li ve diğ., Jayasinghe ve diğ. geniş güç sistemlerine bağlı ÇBAG'nin enerji

seviyesini arttırmak için EDS kullanmışlardır. Enerji depolama sistemi batarya-süperkapasitörü hibrit olarak modellenmiştir. Hibrit sistemde batarya DA link geriliminde kullanırken, süperkapasitörü anahtarlama tetiklemesinin yapıldığı evirici devresinde kullanılmıştır. ÇBAG’de süperkapasitör kullanımı ile frekans değişimini, bataryanın kullanımı ile şarj-deşarj durumlar ve güç kayıpları değerlendirilmiştir [85-87]. Aghatehrani ve diğ., Suryana, ÇBAG’de sabit çıkış gücü elde etmek ve evirici devresinde anahtarlama tetiklemelerdeki frekans değişimlerini engellemek için süperkapasitör kullanmışlardır. Sabit çıkış gücünü dengelemek için ÇBAG’de ayrıca maksimum güç noktası takibi analizini gerçekleştirilmesi ile farklı frekans aralıklarında rüzgar hızındaki değişim, kule gölgesi ve koruma ünitesinin vermiş olduğu zaman cevapları incelenmiştir [88-89]. Babazadeh ve diğ. rüzgar türbininde aktif ve reaktif güç kontrolü için süperkapasitör ile geçici durum analizini incelemişlerdir. Rotor tarafındaki eviricide rotor akı kontrolü yapılırken, şebeke tarafındaki eviricide gerilim yön kontrolü sağlanmıştır. Süperkapasitör ve eviricilerdeki yön kontrolü ile rüzgar türbinin maksimum güç noktası takibi sağlanarak süperkapasitörün kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda farklı güç çıkışları için karşılaştırmalar yapılmıştır [90]. Arani ve El-Saadany, ÇBAG’de kısa süreli frekans kararsızlığını ortadan kaldırmak için süperkapasitör kullanmışlardır. Şebekeye bağlı olarak çalışan ÇBAG’de oluşan kısa süreli salınımların süperkapasitörün kullanıldığı ve kullanılmadığı durumları değerlendirmesi yapılmıştır. Eylemsiz kaynağı olarak modellenmesi yapılan süperkapasitörün sürekli durum ve geçici durum zaman cevapları incelenmiştir [91]. Li ve diğ. ÇBAG’de rüzgar hızındaki dalgalanmaların yol açtığı kararsızlık durumunu iyileştirmek için süperkapasitör kullanmışlardır. Süperkapasitör gerilim, aktif güç, reaktif güç ve frekans duyarlılığına karşı bir kontrol modeli geliştirilerek küçük sinyal kararlılığı incelenmiştir. Süperkapasitör ve geliştirilen kontrol modeli ile ÇBAG’nin kararsızlık durumlarında oldukça etkili sonuçlar verdiği görülmüştür [92]. Naswali ve diğ., Mendis ve diğ. ÇBAG’de çıkış gücü ayarlaması, enerji üretimi ve tüketimini optimum hale getirmek için süperkapasitör kullanmışlardır. Birden fazla güçlü şebeke, yükler ve hidroelektrik santrale bağlı rüzgar türbininde süperkapasitörün ömür hesaplaması ile ilgili testler yapılmıştır. Bu testler ile süperkapasitörün güvenli ve etkili kullanımını tahmin edilmiştir [93-94]. Wee ve diğ., Gee ve diğ., Babazadeh ve diğ. rüzgar türbininde batarya ve süperkapasitör kullanarak enerji depolama sisteminin statik yaklaşım

analizini incelemişlerdir. Enerji depolama sisteminin farklı güç, enerji yoğunluğu ve güç şarj-deşarjında koordinat güç akışı kontrolü sağlanmıştır. Bu yaklaşımla ortalama yıllık enerji depolama seviyesi, enerji depolama maliyeti, hibrit enerji depolama, rüzgar hızı dağılımlarını tespit edilmiştir [95-97]. Ling, Lu, Gkavanoudis ve Demoulias, ÇBAG'nin şebekeye bağlı olarak çalışmasında şebekelerde olabilecek bozucu etkiler karşısında süperkapasitör kullanmışlardır. Geçici kararlılık öncesi ve sonrası oluşan düşük gerilim problemini süperkapasitör ile ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Ayrıca ÇBAG'de gerilim, aktif ve reaktif güç kontrolünün sağlanması için bir kontrol ünitesi geliştirilmişlerdir [98-99]. Wei ve diğ. rüzgar türbininde kararsızlık durumları için süperkapasitör kullanmışlardır. Performansının yüksek olması, yüksek sıcaklıkta çalışma yeteneği, uzun ömrü ve uygulamalardaki kullanım kolaylığı gibi avantajlara sahip olan süperkapasitör ile rüzgar türbinin pitch açısı kontrolünü sağlamışlardır [100].

Yapılan bu tez çalışmasında ÇBAG'de DGİY için şebeke tarafındaki evirici devresine bağlı bir EDS kullanılmıştır. Süperkapasitör ve gerilim arttırıcı-azaltırıcı evirici matematiksel olarak modellenmiştir. Üç faz kısa devresinde ve statik yüklerin devreye girip çıkmasında süperkapasitörün kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda karşılaştırma yapılmıştır. ÇBAG'de süperkapasitörün çeşitli geçici kararlılık durumlarındaki analizlerinde vermiş olduğu cevaplar literatürde bir yenilik olarak görülmektedir.

1.3. Tez Çalışmasının Katkıları

Rüzgar santrallerinin geçici durum analizlerinde, doğru sonucu yansıtacak indirgenmiş devrelerin kullanımı hız ve kolaylık açısından önemlidir. Bu bağlamda, şebekeye bağlı rüzgar santrallerindeki ÇBAG'nin stator dinamiği ADM ile modellenmiştir. Yapılan modelleme ile elde edilen analiz sonuçları, çeşitli geçici olaylar karşısında TDM ile modellenmiş durumdaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Geçici olaylar, yanlış koordinasyon sonucu oluşabilecek iletim ve dağıtım gerilimi seviyesindeki kesici açmaları ve farklı süreli kısa devre oluşumları olarak seçilmiştir. ADM tabanlı ÇBAG'nin bu geçici durumlar karşısındaki davranışlarının analiz edilmesi ve değerlendirilmesi tez çalışmasının literatüre sağladığı bir yenilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Endüstride kullanılan yükleri temsilen matematiksel modellemesi yapılan üstel ve ZIP yüklerine asenkron motorun ilave edilmesi durumu şebeke tarafında gerilim düşümüne neden olan diğer bir geçici olay olarak ele alınmıştır. Bu yüklerin kısa süreli devreye girip çıkmasının rüzgar santralleri üzerinde oluşturmuş olduğu etkilerin analizi bu tez çalışmasının literatüre katkısı olarak görülmektedir.

Rüzgar santrallerinin geçici durumlardan daha az etkilemesi için DGİY yöntemleri önerilmektedir. Literatürde özellikle de ÇBAG'ün stator ve rotor ünitelerinde çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmektedir. Bu durumlardan yola çıkarak ÇBAG'de stator dinamiği için kullanılan ADM'ye ilaveten rotor dinamik modellenmesi ve kontrolü yapılmıştır. Hem stator hem de rotor tarafında gerilim kaynağı tabanlı oluşturulan bu modellemenin, daha önce belirlenen geçici olaylar karşısındaki davranışının incelenmesi ve değerlendirilmesi bu tezdeki özgün çalışma olarak görülmektedir.

Rüzgar santrallerinde DGİY için önerilen diğer bir yöntem de EDS'dir. Kısa zamanda şarj olması, yüksek enerji seviyesi ve maliyeti açısından tercih edilen süperkapasitör tabanlı EDS'nin modellenmesi ÇBAG'ün şebeke tarafındaki evirici devresinde yapılmıştır. Şebekedeki geçici olayların, statoru ADM ile modellenmiş ve EDS ile geliştirilmiş ÇBAG içeren bir rüzgar santraline etkilerinin analizi bu tez çalışmasının diğer bir yeniliği olarak görülmektedir.

1.4. Tez Düzeni

Bölüm 2'de rüzgar türbinleri, rüzgar gücü, türbini hız ve güç kontrolü, rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, rüzgar türbini generatör modelleri ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3'de Türkiyede ve dünyadaki rüzgar santrallerinin sistem entegrasyonunda uyulması gereken kriterler ve yönetmelikler hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 4'de Benzetim çalışmasında yapılan modellemeler ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. (TDM), (ADM), (RDM), statik yük modelleri ve süperkapasitör modelleri alt başlıklar halinde toplanmıştır.

Bölüm 5'de Benzetim çalışması bölümü verilmiştir. Bu bölüm şebeke modeli, tam derece ve azaltılmış derece modellenmiş ÇBAG için geçici durumların analizi, rotor

dinamiği modellenmiş ÇBAG için geçici durum analizi, süperkapasitör ile birlikte kullanılan ÇBAG durum analizi alt başlıklarında detaylı olarak anlatılmıştır.

Bölüm 6’da Benzetim alışması sonuçları bölümü verilmiştir. Tam derece ve azaltılmış derece modellenmiş ÇBAG için geçici durumların analiz sonuçları, statik yük modelleri analiz sonuçları, rotor dinamiği modellenmiş ÇBAG için geçici durum analiz sonuçları, süperkapasitör ile birlikte kullanılan ÇBAG için geçici durum analiz sonuçları şekiller ve yorumlamalar bu bölümde verilmiştir.

Bölüm 7’de tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlara yer verilmiştir. Yapılan modellemeler ve karşılaştırmalarında elde edilen sonuçları yorumlaması yapılmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasına bağlı olarak yapılabilecek diğer çalışmalar öneriler kısmında verilmiştir.

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Dönme hareketi yapan ve bir akışkanda bulunan enerjiyi, milindeki mekanik enerjiye dönüştüren makinelere türbin adı verilmektedir. Türbinler genel olarak buhar, gaz, su ve rüzgâr türbinleri olarak dört grupta incelenmektedir. Rüzgâr türbini türbin gövdesi, pervaneler ve kuleden oluşmaktadır. Rüzgar türbinde elektrik enerjisinin elde edilmesinde genel olarak rüzgara karşı bir yüzey belirtilmektedir. Bu belirtilen yüzey sayesinde rüzgar basıncında dönme hareketi oluşur. Bu dönme hareketi ile dişli sistemine bağlı olan generatör tarafından elektrik üretilir. Diğer bir ifade ile rüzgar, yüzeye belli bir açıyla gelir ve yüzeye etki eden hava hızının doğrultusunda dik olarak oluşan kaldırma kuvveti sayesinde mekanik hareketi dönme hareketine dönüştürerek elektrik üretilir. Rüzgar türbinin rotoru generatöre bağlıdır. generatör çıkışı istenen gerilim değerini kontrol etmektedir. Rotor milinin bağlı olduğu kısımda düşük ve yüksek hızlar arasında dişli kutusu bulunmaktadır. Bu dişli kutusu düşük hızda aerodinamik güç üreten türbin tarafından döndürülmektedir [101].

2.1. Rüzgar Gücü

V_r hızı ile hareket halinde olan m kütlelerinin sahip olduğu kinetik enerji,

$$E_k = \frac{1}{2} m V_r^2 \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Hareketli hava kütlesi, kanat süpürme alanı A olan bir rüzgar türbininin pervanesine dik olarak çarptığında kinetik enerjinin belirli bir oranı frenlenir ve türbin kanatları hareket ettirilir [101].

Türbin kanatlarına ρ_h yoğunlukta çarpan hava kütleli debisi,

$$\dot{m} = \rho_h V_r A \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Rüzgarın zamana bağlı iş yapabilme yeteneği,

$$P_r = \left(\frac{1}{2} m V_r^2\right) / t \quad (2.3)$$

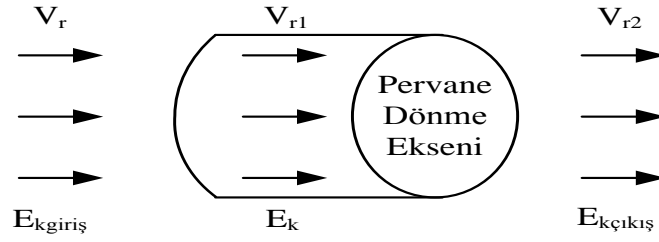
şeklinde ifade edilir. Rüzgardan elde edilecek teorik güç,

$$P_r = \frac{1}{2} \rho_h A V_r^3 \quad (2.4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Rüzgar dönüşüm sistemlerinde teorik gücün tamamen kullanılması mümkün değildir. Rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminde elde edilecek olan toplam verim; türbin verimine, dişli verimine, mekanik kavrama verimine ve generatör verimine bağlıdır [102].

Betz teoremi ile ilgili olarak, rüzgar pervanesinden geçen havanın enerji hareketi Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Rüzgar türbini pervanesinden geçen havanın enerji hareketi [103]

Rüzgar pervanesinden geçen akımın enerji dengesi,

$$E_k = E_{k\text{giriş}} - E_{k\text{çıkış}} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Hareket halindeki rüzgarın taşıdığı kinetik enerji Denklem (2.6)’daki gibi ifade edilir.

$$E_k = \frac{1}{2} m (V_r^2 - V_{r_2}^2) \quad (2.6)$$

Birim zamanda türbinden elde edilecek güç,

$$P_t = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (V_r^2 - V_{r_2}^2) \quad (2.7)$$

şeklinde yazılır. Kütlelin zamana göre türevinin m ile ifadesi,

$$P_t = \frac{1}{2} \dot{m} (V_r^2 - V_{r_2}^2) \quad (2.8)$$

şeklinde olur. Rüzgar türbini kanatlarında yapılan iş aynı zamanda rüzgar tarafından kanatlara uygulanan birim zamandaki basınca bağlıdır.

$$P = S V_{r1} \quad (2.9)$$

Rüzgarın türbin kanatlarına yapacağı basınç ise,

$$\dot{m} V_{r1} (V_r - V_{r_2}) = \frac{1}{2} \dot{m} (V_r^2 - V_{r_2}^2) \quad (2.10)$$

şeklinde elde edilir. Buradan,

$$V_{r1} = \frac{1}{2} (V_r + V_{r_2}) \quad (2.11)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (2.2)'deki eşitlik kullanılarak, türbinden geçen havanın kütleli debisi Denklem (2.8)'de yerine yazılırsa,

$$P_t = \frac{1}{2} \rho_h A V_{r1} (V_r^2 - V_{r_2}^2) \quad (2.12)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (2.11)'deki Denklem (2.12)'de yerine yazılırsa,

$$P_t = \frac{1}{4} \rho_h A (V_r + V_{r_2}) (V_r^2 - V_{r_2}^2) \quad (2.13)$$

ifadesi elde edilir. P_t ve P_r değerleri birbirleriyle oranlanırsa,

$$C_p = \frac{P_t}{P_r} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{V_{r_2}}{V_r} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{V_{r_2}}{V_r} \right) \right] \quad (2.14)$$

Türbin verimi C_p ifadesi elde edilmiş olur. Katsayı ifadesi n Denklem (2.15)'teki gibi tanımlanırsa,

$$n = \frac{V_{r2}}{V_r} \quad (2.15)$$

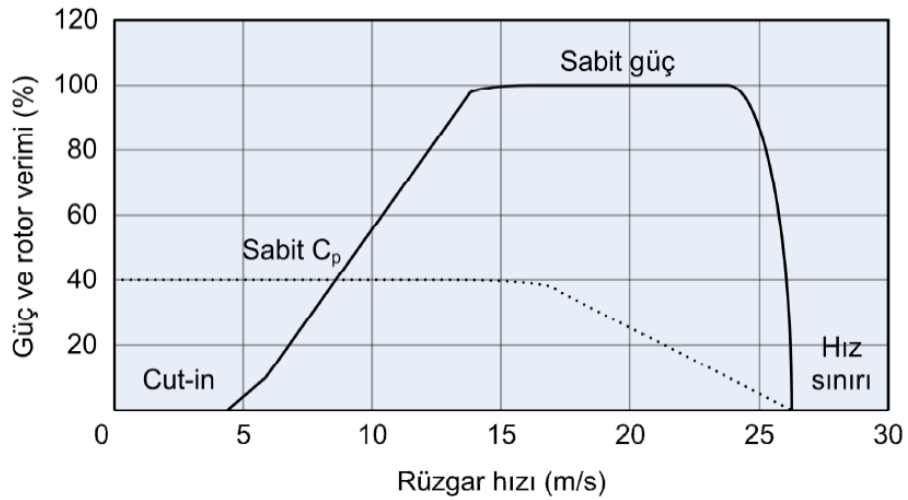
şeklinde elde edilir. Denklem (2.14)'te yerine yazılırsa,

$$C_p = (1/2)(1-n^2)(1+n) \quad (2.16)$$

şeklinde verim katsayı fonksiyonu elde edilir [103-104].

2.2. Türbin Hız ve Güç Kontrolü

Rüzgar hızı değiştikçe hız oran tipi ve rotor güç katsayısı değişir. Ancak C_p karakteristiği, hız oran tipinin belli bir değerinde tek bir maksimum noktaya sahiptir. Bu nedenle sabit hızlı sistemlerde yalnızca bir rüzgar hızında güç katsayısı maksimum olur. Ancak elde edilebilecek en yüksek enerji değeri için rotor güç katsayısı her zaman maksimum seviyede tutmak gerekir. Bunun için çok yüksek rüzgar hızları dışında, değişen rüzgar hızıyla da rotor hızının değişmesi gerekir. Bu değişim, rotor hız kontrolü ile sağlanır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi üretim yapılan en düşük rüzgar hızı, sabit optimum C_p değeri, sabit güç, hız sınırı olmak üzere rüzgar türbinlerinin işletiminde dikkate alınan dört hız bandı vardır.



Şekil 2.2. Rüzgar türbininde rotor hızı kontrol bölgeleri [105]

İlk bant sıfırdan başlayıp üretim yapılan en düşük hıza kadar devam eder. Rüzgar türbinlerinde bu hız genellikle 3-4 m/s arasındadır. Bu hızların altında üretilen güç ancak sürtünme kayıplarını karşılayabilir. İkinci bant, hız kontrolünün sistemi önceden belirlenmiş uygun değer sabit C_p değerinde işlettiği normal çalışma modudur. Sabit C_p bölgesinde kontrol sistemi, belli bir sınıra kadar artan rüzgar hızıyla rotor hızını artırır. Bu sınıra ulaşıldığı zaman üçüncü banda geçilir. Bu bantta hız, yalnızca generatörün kapasitesi tarafından belirlenen maksimum bir sabit çıkış gücünü sürdürülebilirlik amacıyla kontrol edilir. Güç katsayısı C_p artık uygun değerde değildir ve rotor güç verimi düşmektedir. Eğer rüzgar hızı artmaya devam ederse dördüncü banda geçilir ve sistemi mekanik zararlardan korumak amacıyla üretim durdurulur [105-106].

Rüzgar türbinlerinde herhangi bir kontrol sistemi kullanılmazsa türbin şebekeye bağlı olduğundan sabit bir hızda döner. Ancak bu durumda, rüzgar hızıyla değişen güç kontrol edilemediği için, çok yüksek rüzgar hızlarının da hesaba katılarak rüzgar türbininin boyutlandırılması gerekmektedir. Türbinin maksimum rüzgar gücüne göre boyutlandırılması ekonomik bir çözüm olmayacağından bütün rüzgar türbinlerinde bir güç kontrolü bulunmaktadır. Şiddetli rüzgarlarda, türbinde oluşabilecek hasarlardan korunmak için türbin rotoru üzerindeki aerodinamik kuvvetleri kontrol etmek ve gücü sınırlamak için farklı yöntemler vardır. Rüzgar türbinlerinde güç (kanat) kontrolü şu şekilde sınıflandırılabilir:

2.2.1. Pasif (stall) kontrol

Pasif (stall) kontrol en kolay, en dayanıklı ve en ucuz kontrol yöntemidir. Bu kontrolde rotorda hareket eden bir parça yoktur. Rüzgar hızı belli bir değeri aştığında rotorun hız kaybetmesini rotor aerodinamiğinin dizaynı sağlar. Böylece kanatlar tarafından üretilen aerodinamik güç, otomatik olarak nominal güç bölgesinde sınırlanır. Güç üretimi, rüzgar hızının nominal değerinde kendi nominal değerinin biraz daha üzerine çıkar ve daha sonra üretim yapılabilen en yüksek rüzgar hızına ulaşılan kadar azalır. Bu noktadan sonra türbin durur ve güç üretimi sıfıra iner. Yavaş bir şekilde olan aerodinamik güç regülasyonu, hızlı bir “pitch” güç regülasyonundan daha az güç dalgalanmalarına sebep olur. Bu dizaynın en önemli dezavantajı düşük rüzgar hızlarında veriminin düşük olmasıdır. Hava yoğunluğu ve

şebeke frekansındaki değişimlerden dolayı maksimum kararlı hal gücünde meydana gelen değişiklikler ise bu kontrolün diğer bir önemli problemidir [105].

2.2.2. Aktif (pitch) kontrol

Aktif (pitch) kontrolde, nominal rüzgar hızının altında güç çıkışı düşük olduğundan, rüzgardan optimum gücü elde etmek için kanatlar kontrol mekanizmasından gelen bir sinyalle kendi eksenleri etrafında mekanik veya hidrolik olarak döndürülür. Nominal rüzgar hızının üstünde ise gücü sınırlamak amacıyla küçük destek açıları elde etmek için aynı şekilde kanatların açıları değiştirilir. Aktif kontrolde güç, değişen rüzgar hızıyla kanat açısı ayarlandığından nominal değeri etrafında dalgalanır. Bu dalgalanmanın sebebi, özellikle şiddetli rüzgarlarda rotorun yüksek eylemsizliğinden dolayı “pitch” mekanizmasının cevap süresinin yeterince hızlı olamamasıdır. Ancak generatör çıkış gücü, generatör hızındaki dalgalanmalar %10’luk bir değere ulaşana kadar sabit tutulabilir. Aktif kontrolün diğer avantajları; ilk çalışma anında kanat açılarının rüzgarı en iyi alabilecek şekilde ayarlanabilmesiyle bu anda bir destek sağlanması ve acil durumlarda türbini çok hızlı bir şekilde durdurabilmesidir. “pitch” mekanizmasının karmaşık olması ve yüksek rüzgar hızlarındaki türbülans nedeniyle ortaya çıkan büyük güç dalgalanmaları ise bu kontrolün en önemli dezavantajlarıdır [105].

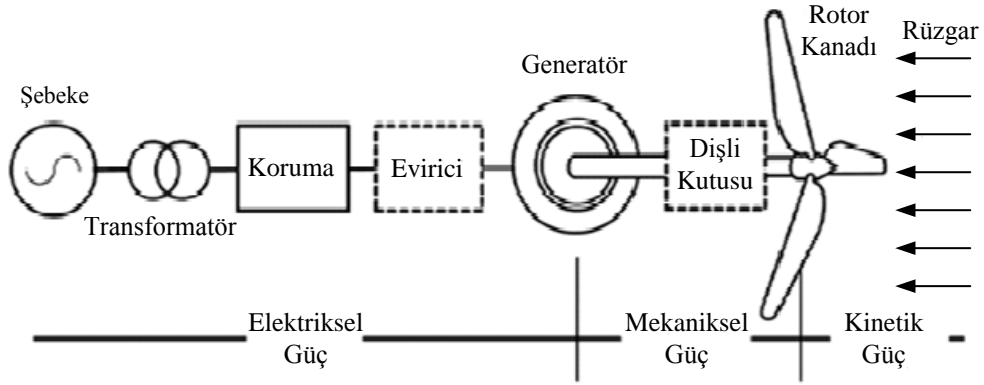
2.2.3. Aktif (stall) kontrol

Rüzgar türbinlerinde özellikle son yıllarda kullanılmaya başlayan aktif stall kontrolde nominal güç için gerekenden daha düşük rüzgar hızlarında, kanatlar bir “pitch” kontrollü rüzgar türbini gibi optimum güç elde edilecek şekilde döndürülür. Böylece maksimum verim sağlanır. Ancak nominal güç için gerekenden daha fazla rüzgar hızlarında, kanatlar “pitch” kontrolden farklı olarak daha küçük destek açıları yerine daha büyük destek açıları için çevrilerek “stall” durumuna geçerler. Aktif stall kontrollü rüzgar türbinleri, “pitch” kontrollü rüzgar türbinlerinin sebep olduğu güç dalgalanmaları olmaksızın gücün düzgün bir şekilde sınırlanmasını sağlarlar. Ayrıca bu kontroldeki “pitch” mekanizması rüzgar türbininin hem çok hızlı bir şekilde durmasını sağlar hem de ilk çalışmasını kolaylaştırır. Günümüzde bu kontrol, yalnızca stall kontrolün kullanılabildiği türbinlerde kullanılmaktadır [107]. Rüzgar türbinlerinde bulunan türbin elemanlarının önemli bir kısmı generatörlere bağlı

olarak seçildiğinden, generatörlerin işletim hızı ve değişen rüzgar hızı ile kontrolleri sistem dizaynı sırasında önceden belirlenmektedir [108].

2.3. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi başlıca farklı elektriksel ve mekanik bölümlerden oluşmaktadır. Şekil 2.3’de rüzgar güç dönüşüm sisteminin genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Rüzgar güç dönüşüm sistemi yapısı [109]

Bunlar rüzgar türbini, generatör, güç dönüşüm elemanları ve kontrol üniteleridir. Rüzgar türbinleri yaygın olarak dişli kutusundaki enerji dönüşümünün elektrik generatörünü döndürmesi ve türbin kanatlarının hareketine bağlı olarak elektrik üretmektedir. Güç enerji dönüşümü ise akım ve gerilim gereksinimine bağlı olarak AA/DA eviricilerin ve enerji depolama elemanının belli bir düzende çalışması ile gerçekleşmektedir [109].

2.4. Rüzgar Türbini Generatör Modelleri

Rüzgar türbininde kullanılan generatörler, elektriksel kısım ile mekanik kısım arasındaki bağlantıyı sağlamaktadırlar. Elektrik generatörünün başlıca görevi; rüzgar türbininden elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek ve şebekeye elektrik enerjisini aktarmaktır. Sabit hızlı rüzgar türbinleri ve değişken hızlı rüzgar türbinleri olarak iki sınıfta toplanmaktadır.

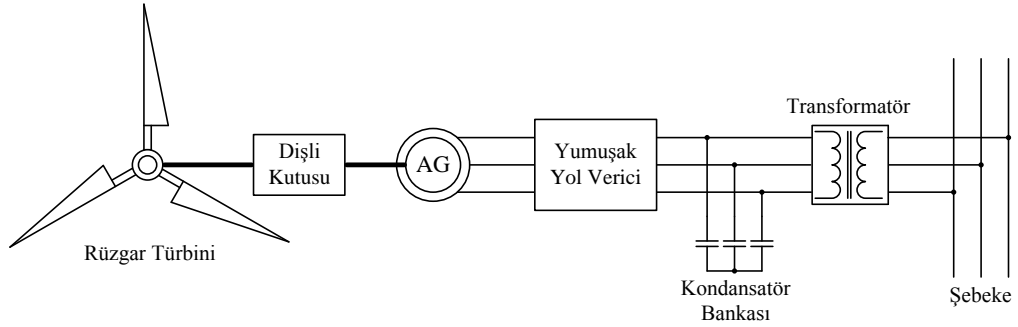
Rüzgar türbininde elektrik generatörleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:

- Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG)
- Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG)

- Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG)
- Harici Alan Uyarmalı Senkron Generatör (HAUSG)
- Sabit Miknatıslı Senkron Generatör (SMSG)

2.4.1. Sincap kafesli ve rotoru sargılı asenkron generatör

SKAG ve RSAG dişli kutusuna bağlı olarak doğrudan şebekeye bağlanırlar. SKAG ve RSAG'ün dönüşüm sistemi Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

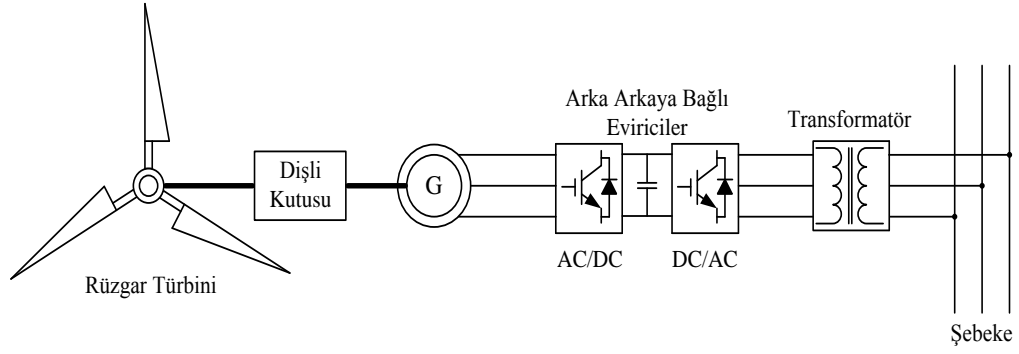


Şekil 2.4. SKAG ve RSAG dönüşüm sistemi [109]

SKAG daha güvenilir ve ucuz olduğu için RSAG nazaran yaygın olarak kullanılırlar. SKAG %1 civarında kaymaya müsaade ettiği için genelde sabit hızlı çalışmalarda tercih edilmektedir. Asenkron generatörün çalışması için reaktif güce ihtiyaç bulunmaktadır. Bunu içinde rüzgar türbinin çıkışına bir kondansatör grubu bağlanmaktadır. SKAG şebekeye bağlandığında asenkron generatörün kalkınma akımını minimum düzeye indirmek için yumuşak yol verici devre kullanılır. Ancak çalışma hızının oldukça kötü etkilenmesi nedeniyle SKAG'de ayrı bir kontrol ünitesinin geliştirilmesi gerekmektedir. Buda maliyeti arttıran bir unsur olmaktadır. Ayrıca pitch açısı kontrolü sadece sabit rüzgar hızında, sabit dişli kutusu oranında kullanılması SKAG'de dezavantajları olarak görülmektedir.

2.4.2. Değişken hızlı sabit miknatıslı senkron generatör

Değişken hızlı sabit miknatıslı senkron generatör dişli kutusu ile evirici devresi üzerinden şebekeye doğrudan bağlanmaktadır. Değişken hızlı sabit miknatıslı senkron generatör'ün dönüşüm sistemi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Rüzgar güç dönüşüm sistemi yapısı [109]

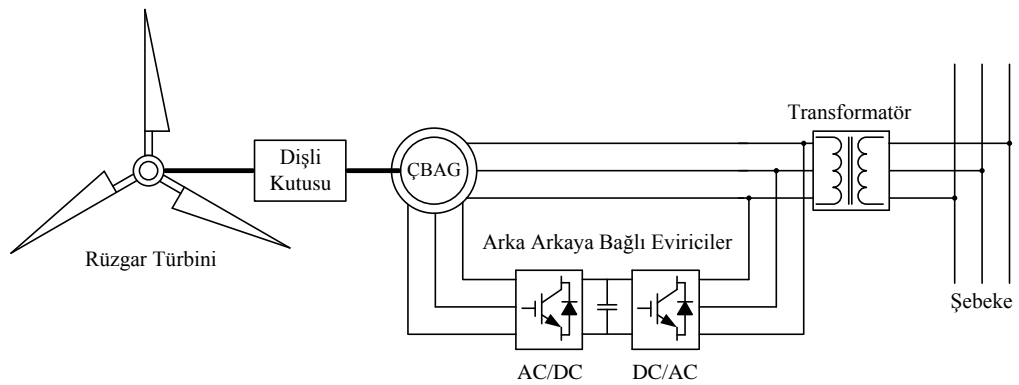
Rüzgar türbininde üretilen elektrik enerjisi güç elektroniği ekipmanları tarafından şebeke gerilim genliğine uygun olacak şekilde ayarlanmaktadır. Değişken hızlı sabit mıknatıslı senkron jeneratör sabit manyetik kutuplara bağlı olarak kendinden uyarımı ile sistemi kontrol etmektedir. Kendinden uyarımlı jeneratör çalışmada özellikle güç faktörünü düzenlemede oldukça etkilidir.

2.4.3. Değişken hızlı rotoru sargılı senkron jeneratör

Değişken hızlı rotoru sargılı senkron jeneratör dişli kutusu ile birlikte şebekeye doğrudan bağlanmaktadır. Değişken Hızlı Rotoru Sargılı Senkron Jeneratör (DHRSSG)'nin dönüşüm sistemi Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Rotoru sargılı senkron jeneratörün elektriksel uyarımı rotor devresindedir. Elektriksel uyarım rotorda bir DC güç kaynağı tarafından sağlanır.

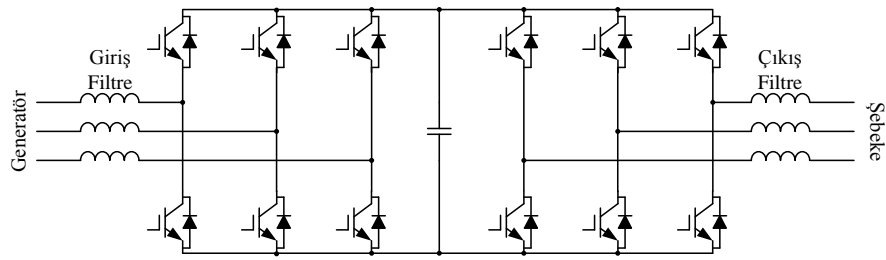
2.4.4. Değişken hızlı çift beslemeli asenkron jeneratör

Değişken hızlı ÇBAG'nin dönüşüm sistemi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Değişken Hızlı ÇBAG dönüşüm sistemi [109]

ÇBAG’de stator kısmı doğrudan şebekeye bağlanırken rotor kısmı arka arkaya bağlı evirici devresiyle şebekeye bağlanmaktadır. Rotorun evirici devresiyle şebekeye bağlanması reaktif güç ayarlaması, pürüzsüz gerilim ayarlaması, frekansa bağlı hız değişiminin geniş limitler arasında ayarlaması gibi üstünlükleri bulunmaktadır. Genel olarak maliyet açısından uygun olduğu için birçok uygulamada ÇBAG tercih edilmektedir. ÇBAG’de arka arkaya bağlı güç eviricisinin dönüşüm sistemi rüzgar türbini generatör ve şebeke gereksinimlerine göre gerilim ve frekansı kontrol etmektedir. Şekil 2.7’de güç elektroniği dönüşüm sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Güç Elektroniği dönüşüm sistemi [109]

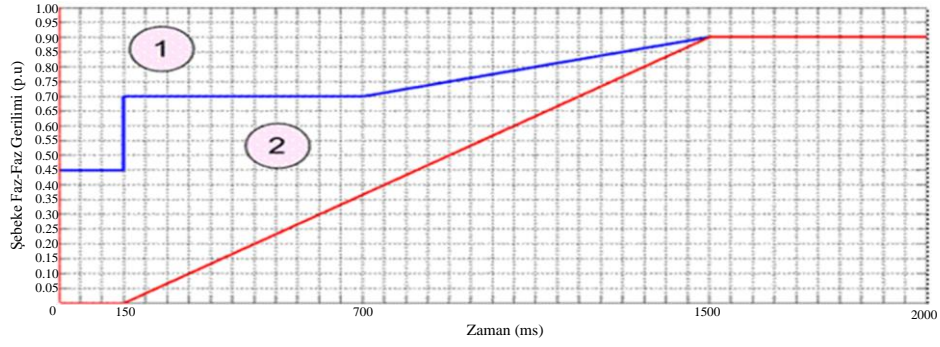
Güç Elektroniği dönüşüm sistemi iki gerilim Dalga Genişlik Modülasyonu (DGM), gerilim kaynaklı evirici kontrolünden oluşmaktadır. Arka arkaya bağlı eviricilerde DA’dan AA gerilim düzenlemesi sağlanamadığı için bir enerji depolama elemanına ihtiyaç duymaktadır. Enerji depolama elemanı olarak kondansatör kullanılır. Bu kondansatör sayesinde AA ve DC gerilim arasındaki fark sabit bir frekans sayesinde uygun hale getirmektedir. Şebeke tarafındaki evirici DA geriliminin sabit kalması için ve belirli değerlerde olması için generatör hız referansına bağlı olarak kontrol eder. Arka arkaya bağlı evirici devresinde enerji depolama elemanı olarak kullanılan DA kondansatörün asıl görevlerinden biride arka arkaya bağlı evirici devresindeki olumsuz durumlarda rüzgar türbinini korumaktır [109].

3. RÜZGAR SANTRALLERİ İÇİN SİSTEM ENTEGRASYONUNDA UYULMASI GEREKEN KRİTERLER VE YÖNETMELİKLER

Türkiye'deki ve dünyadaki rüzgar üretim santrallerinin son yıllarda hızla artan kapasite istatistiklerine bağlı olarak bir çok rüzgar üretim santrallerinin iletim seviyesinde şebekeye bağlanması giderek artmaktadır. 10 MW ve üzerindeki güçlerdeki rüzgar santrallerinin şebeke bağlantısında sistem kararlılığının belli limitler içerisinde sağlanması açısından teknik kriterlerin incelenmesi önemli bir unsur olarak görülmektedir. Türkiye ve dünyadaki rüzgar santrallerinin şebekeye bağlanmasındaki teknik kriterler, genellikle gerilim, frekans, aktif güç ve reaktif güç olarak isimlendirilmektedir.

3.1. Türkiye'de Uygulanan Yönetmeliklere Genel Bakış

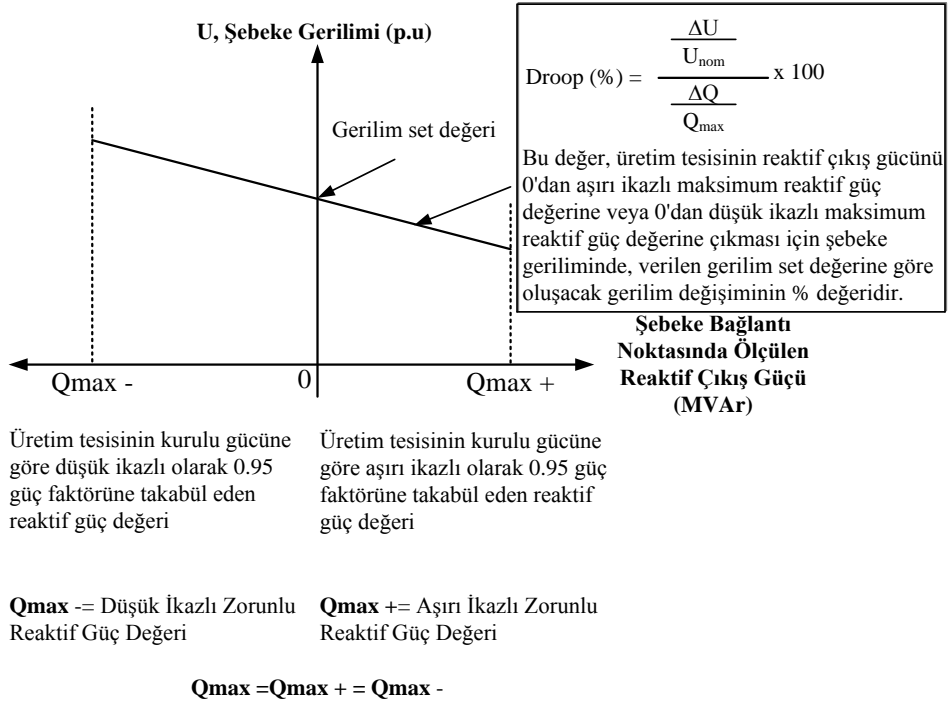
Değişken yüklerin yoğun olarak bulunduğu bölgeler için Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından ilgili mevzuata göre verilen bağlantı görüşüne ilişkin değerlendirmede, bağlantı noktasındaki mevcut değişken yüklerin etkisinin de dikkate alınması ve rüzgar hızının belli limitleri aşması durumunda rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin otomatik olarak devre dışı olma özellikleri dikkate alınarak, sistemde ani gerilim değişimi ve frekans dalgalanmalarını önlemek amacıyla sistem döner yedeği miktarını aşmayacak kurulu güçte rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi bağlantısına izin verilmesi esası belirtilmiştir. 31/12/2008 tarihinden önce geçici kabulü yapılan rüzgar santralleri için geçerli hüküm, bir bağlantı noktasında, sistemin kısa devre gücünün en fazla %5'i kadar kurulu güçte rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi bağlantısına izin verilir ilkesi ile açıklanmaktadır. Sonraki yıllarda güncellenen yönetmelikte bu sınır kaldırılmıştır. Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin kısa devre ve kısa devre sonrası gerilimin zamana göre değişimi Şekil 3.1'de verilmiştir. [110-111].



Şekil 3.1. Kısa devre sırasında bağlantı noktasındaki gerilimin zamana göre değişimi [111]

Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin, reaktif güç ve gerilim değişimlerinde sisteme verecekleri rahatsızlığın sınırlandırılması amacıyla rüzgar enerjisine dayalı asenkron rüzgar türbinine sahip üretim tesislerinin güç faktörü 0,99'dan düşük olmaması ve güç faktörünün kullanıcının kuracağı uygun kompanzasyon tesisleriyle yükseltilmesi gereği bulunmaktadır. 31/12/2008 tarihi itibarıyla geçici kabulü yapılmış rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin arıza ve arıza sonrası performansı bu yönetmeliğin Ek-7'de sunulan grafiğe uygun olarak tasarımılandırılması beklenmektedir. Bu tarihten sonra ise elektrik piyasası şebeke yönetmeliğindeki Ek-18 rüzgar türbinlerinin arıza ve arıza sonrasında sağlaması gereken tepki eğrisine göre değerlendirmeler takip edilmektedir. Elektrik piyasası şebeke yönetmeliğine 24/09/2008'de eklenen değişikliklerle elektrik iletim sistemi arz güvenliği ve kalitesi yönetmeliği daha da geliştirilmiştir. Ayrıca, "Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin frekans kontrolüne katılmaları istenmez" hükmü ilave edilmiştir [111]. Bu değişiklikler, iletim sistemine bağlı rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri ile kurulu gücü 10 MW ve üzerinde olan dağıtım sistemine bağlı rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinde uygulanmaktadır. İletim veya dağıtım sistemi bağlantı noktasındaki şebeke faz-faz geriliminin Şekil 3.1'de verilen 1 numaralı ve 2 numaralı bölgelerde kaldığı süre boyunca, herhangi bir fazda veya tüm fazlarda oluşan gerilim düşümlerinde rüzgar türbinleri şebekeye bağlı kalmalıdır. Kısa devre sırasında gerilim düşümünün 1 numaralı bölgede kaldığı durumlarda, rüzgar türbini aktif gücü, kısa devre temizlendikten hemen sonra nominal gücün %20'si kadar artırılarak, üretebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşmalıdır. Kısa devre sırasında gerilim düşümünün 2 numaralı bölgede kaldığı durumlarda ise, rüzgar türbini aktif gücü, kısa devre temizlendikten hemen sonra nominal gücün

%5'i kadar artırılarak, üretebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşmalıdır. Gerilim dalgalanmalarında, rüzgar türbinlerinin vermesi gereken reaktif güç tepkisi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Gerilim dalgalanmalarında, rüzgar türbinlerinin vermesi gereken reaktif güç tepkisi [111]

Rüzgar santralının, bağlantı noktasındaki 0,9 ile 1,1 p.u. aralığında normal işletme gerilim seviyelerinde oluşabilecek dalgalanmalarda, aşırı ikaz ve düşük ikaz için, gerilime bağlı reaktif güç desteğini vermektedir. Tanımlanan droop faktörünün sistem operatörü tarafından %2 ile %7 aralığında olması istenmektedir. İlgili üretim tesisinde şebeke bağlantı noktasındaki gerilimde ani bir değişme olduğunda en geç 200 ms'de cevap vermeye başlamalı, reaktif çıkış gücü olması gereken denge değerinin %90'ına en geç 1 saniye içerisinde ulaşmalı ve en geç 2 saniye içerisinde dengeye oturmalıdır. Denge durumunda, reaktif çıkış gücünde oluşabilecek salınımların tepe değerinde gerçekleşen değişimin %2'sini geçmemelidir [111].

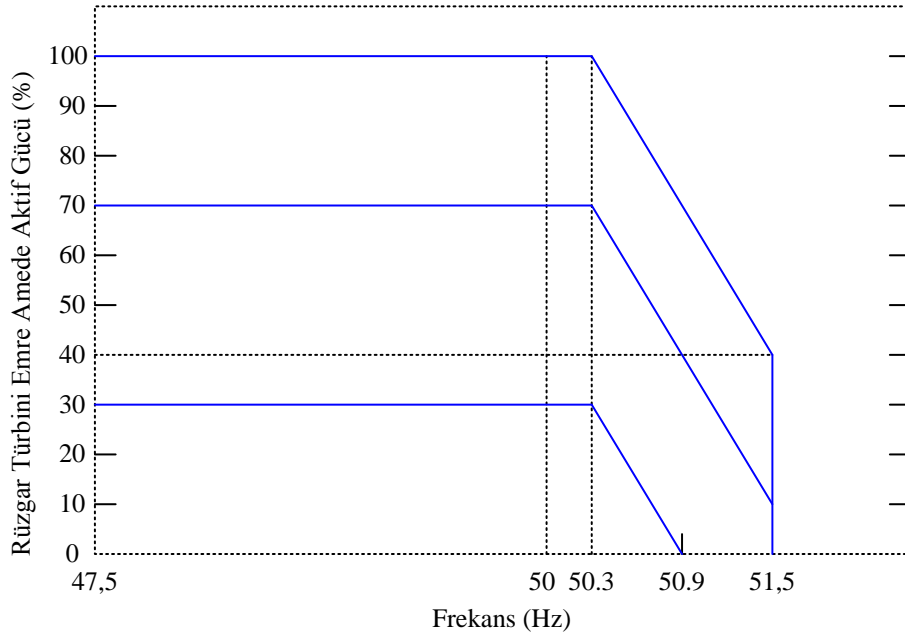
3.1.1. Aktif güç kontrolü

Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisinin aktif güç çıkışı, gerektiğinde TEİAŞ tarafından gönderilecek sinyallerle, tesisin toplam kurulu gücünün %20 ile %100 arasında otomatik olarak kontrol edilebilir olmalıdır. Bu kapsamda;

- Kurulu gücü 100 MW ve altında olan rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri için, yük alma/atma hızı dakikada kurulu gücün %5'i kadar olmalıdır.
- Kurulu gücü 100 MW'ın üzerinde olan rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri için, yük alma/atma hızı dakikada kurulu gücün %4'ü kadar olmalıdır.

3.1.2. Frekans tepkisi

Şebeke frekansının 50,3 Hz'in üzerinde olduğu durumlarda ilave rüzgar türbini devreye girmemelidir. Rüzgar türbini frekans tepkisi Şekil 3.3'te verilen güç-frekans eğrisi sınırları içinde kalacak şekilde olmalıdır.

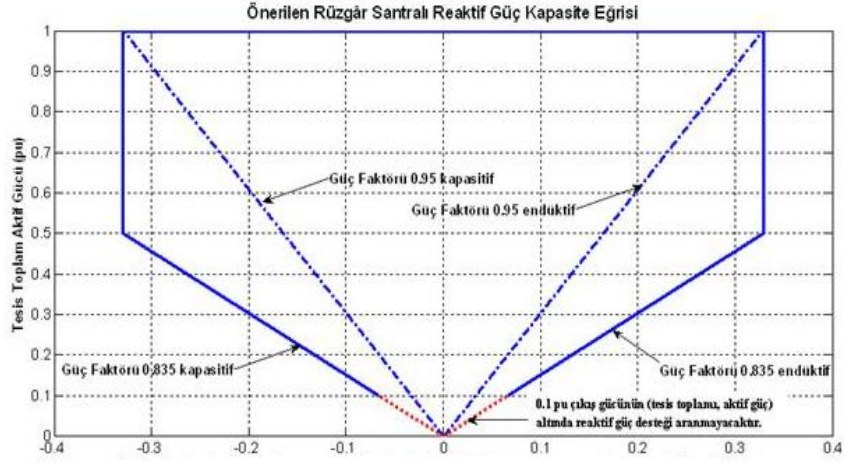


Şekil 3.3. Rüzgar türbini güç-frekans eğrisi [111]

Rüzgar türbini, şebeke frekansı 47,5 Hz ile 50,3 Hz aralığında olduğu sürece istenilen gücün tamamını üretebilecek özellikte olmalıdır. Frekansın 50,3 Hz'i aştığı durumda ise kurulu gücünün Şekil 3.3'te belirtilen ilgili eğriyi takip etmesi ve 51,5 Hz frekans değerinde tamamen devre dışı kalması istenmektedir.

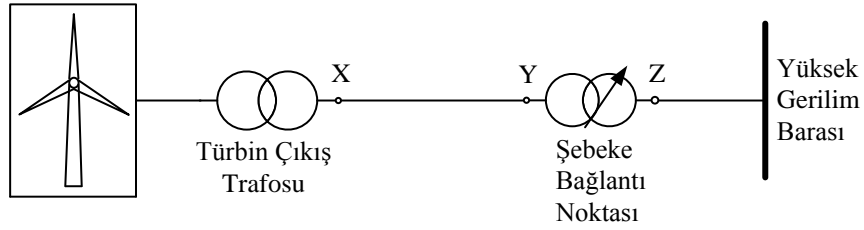
3.1.3. Reaktif güç kapasitesi

Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi iletim sistemi bağlantı noktasında, Şekil 3.4'te koyu çizgilerle belirtilen sınırlar içerisinde güç faktörü değerleri için her noktada çalışabilir olmalıdır.



Şekil 3.4. Rüzgar santrali reaktif güç kapasite eğrisi [111]

Şebekeye bağlı trafo kademe oranları, Şekil 3.5’de Z noktasında şebeke gerilim aralığındaki (nominal gerilimin $\pm\%10$ ’u) her gerilim değeri için Y noktasında nominal gerilimi sağlamalıdır [111].



Şekil 3.5. Rüzgar santrali gerilim ayar noktaları [110]

İletim sistemine doğrudan bağlı rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin şebeke bağlantı trafoları yük altında otomatik kademe değiştirme özelliğine sahip olmalıdır. Trafoların sahip olması gerekli diğer özellikler bu yönetmelik ve elektrik iletim sistemi arz güvenilirliği ve kalitesi yönetmeliğinde tanımlanmaktadır.

2013 yılı itibarıyla toplam Enerji Piyasası Denetleme Kurulu (EPDK) kayıtlarında işletmedeki toplam üretim tesisi kurulu gücü ve bununla birlikte inşa halindeki toplam kapasitede sayısı artmaktadır. Bu kapasitenin artması ulusal şebeke için oldukça önemlidir. Bu artış miktarlarına bağlı olarak arzın mutlaka doğru şekilde yönetilmesi gerekmektedir.

Bağlantı noktalarında kısa devre analizleri, hatlar üzerindeki iletim kapasiteleri ve rezerv miktarlarının doğru şekilde incelenmesi ve uygun yönlendirmelerin yatırımcılara yapılması gerekmektedir. Rüzgar santrallerinin kurulu gücü şebeke

kararlılığı, enerji kalitesi ve rezerv miktarının geliştirilmesi ile daha yüksek değerlere çekilebilir.

3.2. Dünyada Uygulanan Bazı Yönetmeliklere Genel Bakış

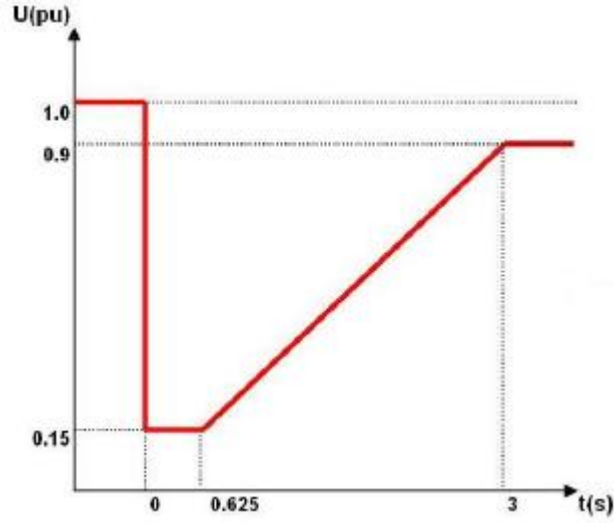
Rüzgar enerjisi santrallerinin şebekeye her geçen yıl daha fazla güçte ve sayıda bağlanması, şebekede bazı kararlılık sorunlarını da beraberinde getirmeye başlamıştır. Şebekenin sürekli bir şekilde ve istenen kriterlerde enerji talebini karşılayabilmesi için rüzgar santrallerinin şebekeye olan katılımlarında, her ülke temelde benzer özelliklere sahip olan ancak detayda ülkelerin sistemlerine ve şartlarına uygun kurallar geliştirmek durumunda kalmışlardır. Belli başlı santral kurulu gücüne sahip ülkelerin temel yönetmelikleri karşılaştırmalı olarak ve grafiksel öğelerle de desteklenerek incelenmiştir. Bu incelemeler neticesinde ülkemizde uygulanan kısıtlarla karşılaştırma sonrası ayrıca bazı değerlendirmeler yapılmıştır.

ABD 2009 yılı itibarıyla 25 GW'ı aşan kurulu gücü ile dünyada kurulu gücü en fazla olan ülke durumundadır. Almanya, 24 GW'luk üretimi ile Avrupa'da kurulu gücü en fazla olan rüzgar enerjisi üreticisi ülkedir. Danimarka'da, toplam üretim kapasitesinin %20 rüzgar enerji santrallerinden sağlanması sebebiyle oransal olarak en yüksek rüzgar enerjisi üretim kapasitesine sahip ülkedir. İspanya, Almanya'nın arkasından 17 GW ile Avrupa'da en yüksek ikinci kurulu gücüne sahiptir. Bu açıdan bu dört ülkeyi daha detaylı incelemek yerinde olacaktır [112]. Kısa devre sırasında sistemin şebekeye bağlı kalabilme ve şebekeyi iyileştirme yeteneği önemlidir. Ayrıca reaktif gücün dengelenmesi için şebeke geriliminin kontrolü, aktif gücün kontrolü içinde şebeke frekansının iyileştirilmesi öncelikli değerlerdir.

Geçmiş dönemlerde şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralleri şebekedeki kısa devre durumlarında şebekeden ayrılması gerekirdi. Ancak günümüzdeki yüksek orandaki katılım sebebiyle belli seviyelerde şebekede kalarak kısa devrenin yarattığı etkiyi azaltma yönünde katkı vermeleri beklenmektedir.

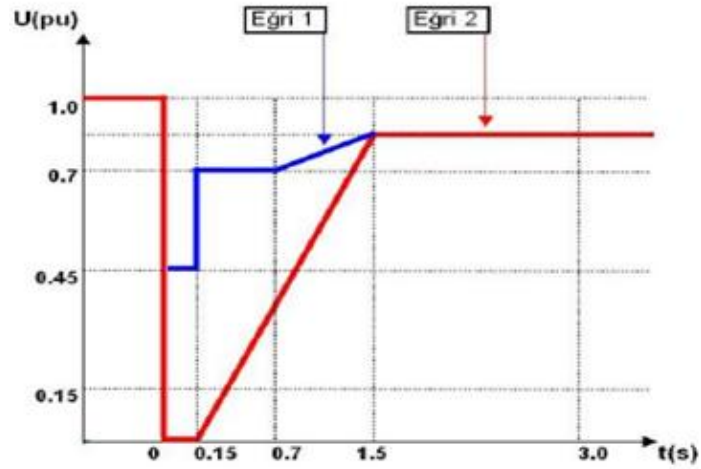
ABD'de, kısa devre anında gerilim, nominal gerilimin %15'i seviyesinden daha yukarıda ve minimum 625 ms süresince bunu koruyabiliyorsa, santral şebekeden ayrılmaması istenmektedir. İlave olarak, gerilim 3 saniye sonunda kısa devre öncesi

nominal gerilimin %90 ulaşıyorsa santral yine şebekeden ayrılmamalıdır. Şekil 3.6'da ilgili eğri gösterilmiştir [113].



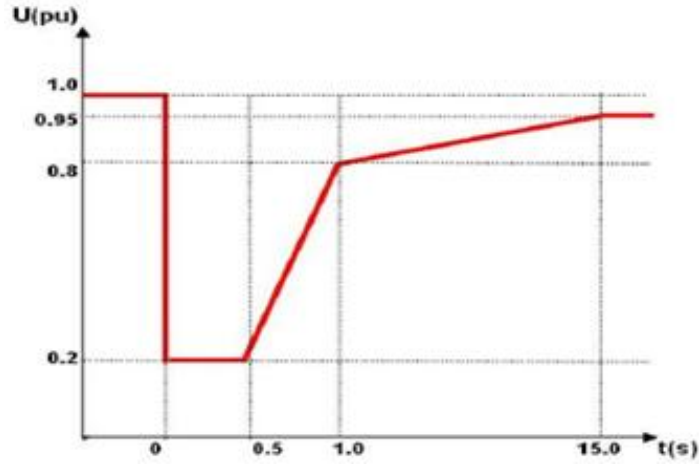
Şekil 3.6. A.B.D. için kısa devre sırasında bağlantı noktasındaki gerilim değişimi [113]

Almanya'da, kısa devre durumlarında sisteme katkı yapılması istenmektedir. Acil katkı gerektiren durumlarda saniyede nominal gücün %20'si talep edilir. Bununla birlikte şebekeye doğrudan bağlı olan senkron generatörler Şekil 3.7'de verilen Eğri 1'e göre kısa devre anından 150 ms sonra, kısa devre öncesi nominal gerilimin %70 ile sınırlı bölgede şebekeden ayrılamazlar. Bunun dışında kalan üretim birimleri Eğri 2'ye uygun şekilde şebekeye bağlı kalmalıdır [114].



Şekil 3.7. Almanya için kısa devre sırasında bağlantı noktasındaki gerilim değişimi [114]

İspanya, üretim birimlerinin geçici kısa devre durumlarında uygulayacağı bağlantı şartı Şekil 3.8’de verilen eğriye göre yapılmaktadır [113]. Danimarka’da, normal işletme koşullarında işletme gerilimi aralığı, nominal gerilimin $\pm\%10$ toleranslı halidir. Kısa devre durumunun ilk 100 ms sinde $\%25$ nominal gerilim seviyesine kadar şebekeye bağlı kalması istenmektedir. Daha sonraki 750 ms sonunda kısa devre öncesi şebeke geriliminin $\%75$ ine ulaşılması beklenir. 10 s sonunda şebeke geriliminin $\%90$ oranında düzeltilmiş olması gerektiğini öngörür. Bu süre zarfında santral şebekeye yine bağlı kalmalıdır. Ayrıca ilk 750 ms de $\%20$ aşırı gerilimde de şebekeye bağlı kalınması beklenmektedir [115].



Şekil 3.8. İspanya için kısa devre sırasında bağlantı noktasındaki gerilim değişimi [113]

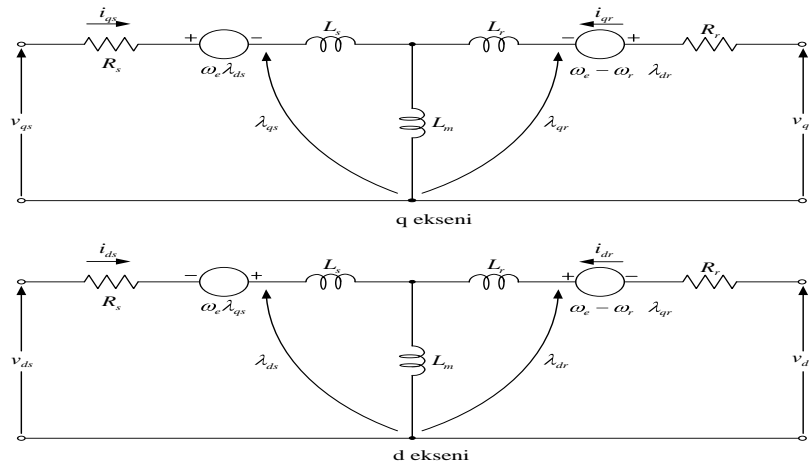
4. MODELLEME

Bu bölümde Çift Beslemeli Asenkron Generatörde (ÇBAG) yapılan modellemeler ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Bu modellemeler ÇBAG modellemesi, Tam Derece Modelleme (TDM), Azaltılmış Derece Modelleme (ADM), TDM’de Rotor Dinamik Modelin (RDM) geliştirilmesi, ADM’de RDM’nin geliştirilmesi, statik yük modelleri ve enerji depolama sistemi alt başlıkları altında verilmiştir.

4.1. Çift Beslemeli Asenkron Generatör Modellemesi

4.1.1. Tam derece modelleme

Hem stator hem de rotor dinamiğini içeren asenkron generatörlerin en detaylı modelidir. Bu model 5. derece modeli olarak da adlandırılmaktadır. Bu modellemenin 5. derece olmasının nedeni ise hem stator hem de rotor dönüşüm gerilim denklemleri ile moment denklem sayısının beş olmasıdır. Beş denklem içerisinde dört denklem elektriksel değişimi içerirken diğer denklem ise mekaniksel değişimi içermektedir. Bu modeller genel olarak elektromekanik denklemler olarak da isimlendirilmektedir. Asenkron generatörün stator ve rotor devresinde akım, gerilim ve akılar durağan bir senkron çatı altında gösterilir. Asenkron generatörün senkron çatı eşdeğer devresi Şekil 4.1’de gösterilmiştir [116].



Şekil 4.1. Asenkron generatörün senkron referans çatıda eşdeğer devresi [117]

Stator ve rotor d-q eksen eşdeğer devrelerinin senkron çatıda oluşturulması ile gerilimler DA birleşen olarak karşımıza çıkmaktadır. Asenkron generatörün gerilim, akım ve akı hesaplamaları bu sayede kolaylaşmaktadır. TDM'nin matematiksel olarak geliştirilmesinde bazı varsayımlar kullanılmıştır [13]. Bunlar;

- Stator akımı generatöre doğru pozitif olarak düşülmüştür.
- Eşitlikler senkron referans çatısına göre oluşturulmuştur.
- Generatör q eksenini d eksenine göre 90 derece önde düşünölmüştür.
- Generatörde stator gerilimi q eksenini bağlı olduğu baranın gerçek kısmını oluştururken, d eksenini bağlı olduğu baranın sanal kısmını oluşturmaktadır.

Asenkron generatör denklemleri oluşturulurken keyfi referans çatıya göre belirlenir. Ancak güç sistemlerinde bu ifadelerin hesaplama kolaylığı sağlanmasında p.u. değerler kullanılmaktadır. ÇBAG'nin p.u. değerlere bağlı olarak gerilim ve halkalama akı hesaplamaları Denklem (4.1) ile Denklem (4.4) arasında gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{ds} \\ \dot{\lambda}_{qs} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + s\omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{dr} \\ \dot{\lambda}_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s + L_m & 0 \\ 0 & L_s + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r + L_m & 0 \\ 0 & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Burada v_{ds} stator d eksen gerilimi, v_{dr} rotor d eksen gerilimi, v_{qs} rotor q eksen gerilimi, v_{qr} rotor q eksen gerilimi, R_s stator direnci, R_r rotor direnci, ω_s stator açısai hızı, s kayma, λ_{ds} d eksenini stator halkalama akısı, λ_{qs} q eksenini stator halkalama akısı, λ_{dr} d eksenini rotor halkalama akısı, λ_{qr} q eksenini rotor halkalama akısı, i_{ds} d eksenini stator akımı, i_{qs} q eksenini stator akımı, i_{dr} q eksenini rotor akımı, i_{qr} q eksenini rotor akımı L_s stator endüktansı, L_r rotor endüktansı, L_m manyetizasyon endüktansıdır [116-117].

4.1.2. Azaltılmış derece modelleme

Güç sistemlerinde geçici durumların generatör ve şebekede oluşturdukları etkileri benzetim çalışmalarında düzenli olarak görebilmek ve sistem boyutlarını sınırlandırmak için nümerik hesaplama zamanının hızlı olması gerekmektedir. Bu yüzden benzetim çalışmasında generatör hesaplamalarında bazı ihmallerin yapılması gerekmektedir. ADM ile bunların sağlanması mümkün hale geldiğini söyleyebiliriz. ADM’de stator d-q eksen gerilim denklemlerinde akı türevleri ihmal edilmektedir. Asenkron generatörde stator akı türevlerinin yerine bir gerilim kaynağı ve geçici reaktans kullanılmaktadır. ADM’nin matematiksel gösteriminde öncelikli olarak TDM’nin stator ve rotor d-q gerilimleri Denklem (4.1) ve Denklem (4.4)’te gösterilmiştir.

Denklem (4.4)’te rotor d-q eksen akımları yalnız bırakılacak olursa;

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_m + L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_m + L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{L_m}{L_m + L_r} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_m + L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)’de rotor d-q eksen akımları Denklem (4.3)’de yerine konulursa;

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 \\ 0 & L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{1}{L_m + L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_m + L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_m}{L_m + L_r} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_m + L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \right\} \quad (4.6)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (4.6) tekrar düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_m + L_s) - \frac{L_m^2}{L_m + L_r} & 0 \\ 0 & (L_m + L_s) - \frac{L_m^2}{L_m + L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_m}{L_m + L_r} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_m + L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

şeklinde oluşur. ADM’de stator geçici reaktans ve sürekli durum reaktansı Denklem (4.8) ve Denklem (4.9)’da gösterilmiştir.

$$X' = w_s \left((L_m + L_s) - \frac{L_m^2}{L_m + L_r} \right) \quad (4.8)$$

$$X = w_s (L_m + L_s) \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{L_m}{L_m + L_r} \\ \frac{L_m}{L_m + L_r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Denklem (4.1)'deki halkalama akıların türevi ihmal edildiğinde Denklem (4.7), Denklem (4.8), Denklem (4.9) ve Denklem (4.10)'daki tanımlamalara göre Denklem (4.11) elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -X' \\ X' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Denklem (4.5), Denklem (4.2)'de yerine yazıldığında; halkalama akıları e_d ve e_q cinsinden ifade edilmesiyle kaynak gerilimlerinin türev ifadesi Denklem (4.12)'deki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \end{bmatrix} = -\frac{1}{T_0} \left\{ \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_m^2}{L_m + L_r} \\ -\frac{L_m^2}{L_m + L_r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \right\} + s w_s \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{L_m}{L_m + L_r} \\ \frac{L_m}{L_m + L_r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ADM'deki geçici açık zaman sabiti ise Denklem (4.13)'te gösterilmiştir.

$$T_0 = \frac{L_r + L_m}{R_r} \quad (4.13)$$

4.2. DGİY'nin ÇBAG'li Rüzgar Türbinindeki Stratejisi

Rüzgar türbinin güç sistemleri ile çalışmasında oluşabilecek problemlerin giderilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak Düşük Gerilim İyileştirme Yeteneği (DGİY) ve Şebekeyi Destekleme Yeteneği (ŞDY) olarak isimlendirilmiştir.

DGİY şebekeye bağlı olan rüzgar türbininde geçici durumun oluşmasına bağlı olarak şebeke bağlantı kriterlerine göre rüzgar türbinin şebekeden ayrılmasını engellemektedir. ŞDY ise şebekeye bağlı rüzgar türbinine reaktif güç desteği vermek olarak tanımlanır.

Rüzgar türbininde kısmi ölçekli güç eviricileri kullanılması yüzünden, ÇBAG şebekedeki bozucu etkilere özellikle de arıza ve gerilim düşüm durumlarına çok duyarlı olmaktadır. Bu gerilim düşümü ÇBAG’de rotor sargılarında ve DC barada aşırı gerilimlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu da eviricilerin çalışma koşullarını değiştirecektir. Ayrıca ÇBAG’nin hız değişimi ile güvenli çalışma ortamı sağlanamayacaktır. Bu gibi olumsuz durumların ortadan kalkması için çeşitli kontrol stratejileri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kontrol stratejilerinden birisi de Rotor Dinamik Modellemesi (RDM) ve kontrolü olarak karşımıza çıkmaktadır [118].

4.2.1. Tam derece modelinde rotor dinamik modelinin geliştirilmesi

ÇBAG’nin TDM’de RDM’nin geliştirilmesi bu bölümde ele alınmıştır. TDM’nin d-q eksen stator, rotor gerilim ifadeleri ve d-q eksen halkalama akıları matris formatında verilmiştir.

TDM’de rotor dinamik modelinin geliştirilmesi işleminde öncelikli olarak Denklem (4.4), Denklem (4.2)’de yerine yazılarak Denklem (4.14) elde edilir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -sw_s \\ sw_s & 0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} L_r + L_m & 0 \\ 0 & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \right\} \\ &+ \begin{bmatrix} L_r + L_m & 0 \\ 0 & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Denklem (4.3)’ten stator d-q akımı yalnız bırakılacak olursa,

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s + L_m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s + L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{L_m}{L_s + L_m} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_s + L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Stator d-q eksen akımının türevi alınacak olursa,

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_m}{L_m + L_s} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_m + L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (4.15) ve Denklem (4.16) Denklem (4.14)'te yerine koyulacak olursa,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} &= \left\{ \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{L_m^2}{(L_m + L_s)^2} & 0 \\ 0 & \frac{L_m^2}{(L_m + L_s)^2} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -s\omega_s \\ s\omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_m + L_r & 0 \\ 0 & L_m + L_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{L_m^2}{L_{ss}^2} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_{ss}} \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \left\{ \begin{bmatrix} L_m + L_r & 0 \\ 0 & L_m + L_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{L_m^2}{(L_m + L_s)^2} & 0 \\ 0 & \frac{L_m^2}{(L_m + L_s)^2} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \frac{L_m}{L_m + L_s} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_m + L_s} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_m + L_s} & 0 \\ 0 & \frac{R_s}{L_m + L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_s \\ -\omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -s\omega_s \\ s\omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (4.17)$$

şeklindeki denklem elde edilmiş olur. TDM'de rotor dinamiği gerilim kaynağı ifadesi Denklem (4.18)'de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \frac{L_m}{L_s + L_m} \left\{ \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_s \\ -\omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -s\omega_s \\ s\omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} \right\} \quad (4.18)$$

4.2.2. Azaltılmış derece modelinde rotor dinamik modelinin geliştirilmesi

ADM'de RDM'nin geliştirmesinde hem stator hem de rotor devresi modellerinde gerilim kaynağı kullanımı amaçlanmıştır. Öncelikli olarak ADM'nin stator gerilim kaynağı denklemleri ve d-q eksen stator gerilimi matris formatında Denklem (4.10) ve Denklem (4.11)'de verilmiştir. ADM'de stator akılarının türevinin ihmal edilmesine bağlı olarak kullanılan geçici reaktans ve gerilim kaynağına ilaveten rotor

ekseninde bir gerilim kaynağı ilave edilmesi ile her iki tarafında dinamik kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır. Bunun için ADM'de rotor denklemleri geliştirilmiştir.

ADM'de stator ekseni halkalama akıları değişiminin ihmal edilmesiyle elde edilen d-q eksen stator gerilimleri Denklem (4.19)'da gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + w_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

TDM'de ifade edilen Denklem (4.4) Denklem (4.2)'de yerine konursa,

$$\begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -sw_s \\ sw_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_m + L_r & 0 \\ 0 & L_m + L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} L_m + L_r & 0 \\ 0 & L_m + L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

şeklinde ifade elde edilir. Denklem (4.3)'den d-q eksen stator akımları çekilecek olursa,

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s + L_m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s + L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{L_m}{L_s + L_m} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_s + L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

d-q eksen stator akılarının türevi alındığında,

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_m}{L_m + L_s} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_m + L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (4.21) ve Denklem (4.22) Denklem (4.20)'de yerine koyulduğunda,

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -sw_s L_m \\ sw_s L_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s + L_m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s + L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{L_m}{L_s + L_m} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_s + L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & -sw_s(L_r + L_m) \\ sw_s(L_r + L_m) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_m^2}{L_s + L_m} & 0 \\ 0 & \frac{L_m^2}{L_s + L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} L_r + L_m & 0 \\ 0 & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \frac{-sw_s L_m}{L_s + L_m} \\ \frac{sw_s L_m}{L_s + L_m} & 0 \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & -sw_s(L_r + L_m) \\ sw_s(L_r + L_m) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_m^2}{L_s + L_m} + L_r + L_m & 0 \\ 0 & \frac{L_m^2}{L_s + L_m} + L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & \frac{-sw_s L_m}{L_s + L_m} \\ \frac{sw_s L_m}{L_s + L_m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.23}$$

şeklinde elde edilir. Burada,

$$L_{r1} = -\frac{L_m}{L_s + L_m} + L_r + L_m \tag{4.24}$$

$$L_{r2} = \frac{L_m}{L_s + L_m} + L_r + L_m \tag{4.25}$$

şeklinde kısaltılacak olursa,

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + L_{r1} \begin{bmatrix} 0 & -sw_s \\ sw_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{r2} & 0 \\ 0 & L_{r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & \frac{-sw_s L_m}{L_s + L_m} \\ \frac{sw_s L_m}{L_s + L_m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.26}$$

şeklinde d-q eksen rotor gerilimi elde edilmiş olur. Stator direncinin ve d-q eksen stator geriliminin ihmaline bağlı olarak ADM'nin rotor gerilim kaynağı,

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{sw_s L_m}{L_s + L_m} \\ \frac{sw_s L_m}{L_s + L_m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

şeklinde elde edilir. ADM'de RDM'yi oluşturulan d-q eksen gerilim kaynağı denkleminin TDM'de RDM'ye nazaran daha sadeleşmiş olduğu görülmektedir.

Hem TDM hem de ADM'de RDM'nin gerilim düşümü davranışı, açısal hız normal çalışma koşullarında sabittir. Ancak geçici durumda açısal hız değişmektedir. Temel akı ilkesine göre ÇBAG'nin çıkış gerilimindeki gerilim düşmesi halkalama akısını değiştirmemektedir. Bu yüzden gerilim düşümünde stator halkalama akı orana bağlı olmalıdır. Bu stator halkalama akı oranı senkron referans çatıda bir osilatör elemanı olarak görülür. Senkron referans çatısında gerilim düşümüne bağlı olarak stator halkalama akı değişimi Denklem (4.28)'de gösterilmiştir.

$$\lambda_{sdq0} = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{sdq0} \cong \frac{v_{sdq0}}{w_s} \\ \lambda_{sdq2} + (\lambda_{sdq0} - \lambda_{sdq2})e^{-\sigma t} e^{-w_s t} \end{array} \right\} \quad (4.28)$$

Rotor dinamik modellemesinin hem TDM hem de ADM'de geçici durum öncesi ve geçici durum esnasındaki gerilim kaynağı Denklem (4.29)'da gösterilmiştir.

$$E_{sdq0} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{L_m}{L_{ss}} s \lambda_{sdq0} \\ \frac{L_m}{L_{ss}} s \lambda_{sdq2} - \frac{L_m}{L_{ss}} (1-s)(\lambda_{sdq0} - \lambda_{sdq2})e^{-\sigma t} e^{-w_s t} \end{array} \right\} \quad (4.29)$$

Burada λ_{sdq0} sürekli durum stator halkalama akısı, λ_{sdq2} geçici durum stator halkalama akısı, v_{sdq} sürekli durum stator d-q eksen gerilimi, t zaman, σ stator akı sönümlenme katsayısıdır. Stator akı sönümlenme katsayısı değerinin hesaplanması Denklem (4.32)'de gösterilmiştir.

$$\sigma = 1 - \frac{L_m}{L_s L_r} \quad (4.30)$$

Denklem (4.28)'de parantezin ilk satırındaki denklem geçici durum öncesini, ikinci satır ise geçici durum sonrasında stator halkalama akısını ifade etmektedir. Stator halkalama akısı gerilim düşümünden önce ve gerilim düşümünden sonra olacak şekilde 2 kısım olarak gösterilmiştir. Bu 2 kısım rotor d-q eksen gerilimi tarafından kontrol edilmektedir. Denklem (4.28)'in 1. kısmında Rotor E_{dq} gerilimi geçici durumda kayma oranının küçük olmasından dolayı $(L_m/L_{ss})/s\lambda_{sdq0}$ tarafından kontrolü sağlanmaktadır. 2. kısımda ise rotor aşırı akımlara karşı ve uzun süreli kararsızlık durumlarından rotor tarafındaki evirici devresini korumak için kullanılmaktadır [55-119].

4.3. Statik Yük Modelleri

Bir modelde eşitliklerin yazılması sistem giriş ve çıkışı arasındaki ilişkinin tanımlanmasını sağlamaktadır. Yük modellerinin matematiksel gösterimi bara gerilimi, aktif güç ve reaktif güç ile doğrudan ilişkilidir. Güç sistemlerinde yüklerin dağıtımı ve çeşitliliğin çok olması birkaç tane alternatif yük modelinin gösterimini sağlamıştır. Bu yükler başlıca statik ve dinamik yük olarak sınıflandırılmıştır. Statik yük modeli zamandan bağımsızdır ve herhangi bir zamandaki aktif ve reaktif gücün gerilim üzerinde oluşturduğu etki önemlidir. Öte yandan dinamik yük modeli zamana bağlı gerilim fonksiyonunun değişimi olarak isimlendirilmektedir. Statik yük modellerinin uzun zamanlı değişimlerde analizi yapılır.

4.3.1. Üstel yük modeli

Üstel bir fonksiyon olan eksponansiyel yük modeli aktif ve reaktif güç eşitlikleri verilecek olursa,

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \quad (4.31)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} \quad (4.32)$$

şeklinde ifade edilir. Burada P_0 yükün aktif gücü, Q_0 reaktif gücü, V bara gerilimini, V_0 yük akışı sonucundaki bara gerilimini, n_p ve n_q değerleri özel durumlarda 0, 1 ve 2 değerlerini almaktadır.

4.3.2. ZIP yük modeli

Statik yük karakteristiği gerilime bağlı olarak sabit empedans, sabit akım ve sabit aktif güç olarak sınıflandırılan yük modelidir. Sabit empedanslı yük için güç gerilime bağlı ikinci dereceden bir denklem olmaktadır. Sabit akımın doğrusal olmasında ve gücün sabit olmasında güç gerilim değişiminden tamamen bağımsız olmaktadır. ZIP model aktif ve reaktif güç eşitliklerini gösterecek olursak;

$$P = P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] \quad (4.33)$$

$$Q = Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right] \quad (4.34)$$

şeklinde ifade edilir. Burada P_0 yükün aktif gücü, Q_0 reaktif gücü, V bara gerilimini, V_0 yük akışı sonucundaki bara gerilimini, p ve q değerleri aktif ve reaktif güç parametreleridir. ZIP yük modelde $p_1+p_2+p_3=1$ ve $q_1+q_2+q_3=1$ olarak alınmaktadır [120-121].

4.3.3. Birleştirilmiş yük modeli

Birleştirilmiş yük, üstel ve ZIP yük modeli ile gösterilen statik yüklere paralel bağlı asenkron motor ilavesi olarak ele alınır. Benzetim çalışmasındaki statik yük modelleri MATLAB/SIMULINK ortamında oluşturulmuşken, asenkron motor modeli hazır olarak kullanılmıştır.

4.4. Enerji Depolama Sistemi (EDS)

ÇBAG'de açısal hızının belli değerler arasında tutulması moment karakteristiğine bağlıdır. Bu yöntem genelde rüzgar üretici firmaları tarafından kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemin yetersiz kaldığı durumlarda söz konusudur. Bu gibi durumlarda çıkış gücü ayarlama tekniği kullanılmaktadır. Ayarlama tekniği ile ÇBAG'nin rotoru

sayesinde geçici bir enerji depolanır. Generatörün mekanik giriş gücü çıkış gücünden büyük olduğu durumda rotor hızlanır. Generatör giriş gücü referans gücün altına düştüğünde ise enerji depolaması yapılır.

Çıkış gücü referans değerinin altına düştüğünde depolanan enerjinin kullanılmasına izin verilir. ÇBAG'nin EDS'de alt ve üst sınır değerlerini dikkate alarak depolama durumunu kontrol edebilme kabiliyetine sahip olmalıdır. ÇBAG'de rüzgar hızındaki değişime bağlı olarak çıkış gücünün EDS tarafından ayarlanması uzun sürmektedir. Bu sürenin azaltılması için algılama devresine ihtiyaç bulunmaktadır. Algılama devresinde enerji kullanımı şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki eviricideki akım sınırlamaları sayesinde doğrudan sağlamaktadır. Tablo 4.1'de farklı çalışma modlarında EDS'nin kontrolünde normal ve sınır durumları gösterilmiştir [122-124].

Tablo 4.1. EDS'de normal ve sınır çalışma kontrolü

Enerji Depolama	Çalışma	Hata Sinyali	Transfer Kontrolü
$E_{min} < E_{EDS} < E_{max}$	Normal	$P_{şebeke}$	$V_{EDS} = V_{max}$ $V_{EDS} = V_{min}$
$E_{EDS} = E_{max}$	Üst Limit	V_{dc}	$P_{şebeke} = 0.95 P_{ref}$
$E_{EDS} = E_{min}$	Alt Limit	V_{dc}	$P_{şebeke} = 1.05 P_{ref}$

Evirici limitleri maksimum reaktif güç kompanzasyon değerine ulaşması için hesaplanmaktadır. Referans sinyali ve EDS gerilim arasındaki ilişki;

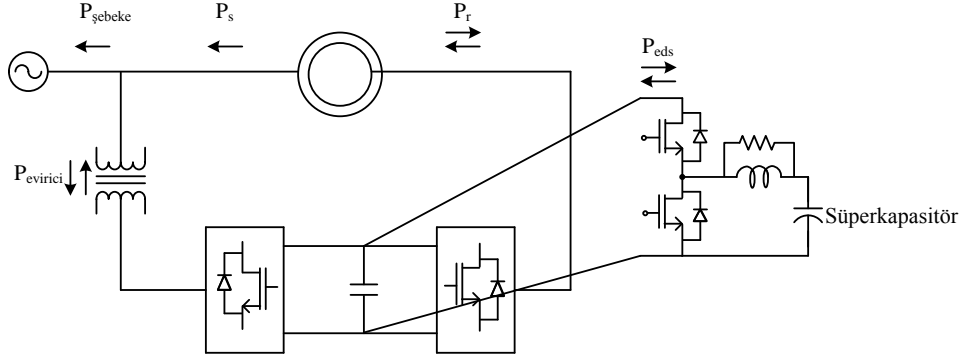
$$P_{şebeke} - P_{şebeke-ref} \quad (4.35)$$

biçiminde gösterilir. Eğer ikisi arasındaki fark 0'dan küçük olursa $V_{EDS} = V_{min}$, 0'dan büyük olursa $V_{EDS} = V_{max}$ olur. Bu iki çalışma noktasındaki salınımları engellemek için bir küçük histeriz band yapısı oluşturulur.

Minimum ve maksimum EDS gerilimlerinin güç değerlerine göre %5 toleransı bulunmaktadır [125].

4.4.1. Çift beslemeli asenkron generatör ve enerji depolama sisteminin birlikte kullanımı

DC baraya EDS'nin ilave edilmesi ile şebeke tarafındaki evirici aktif güç kaynağı olarak çalışmaktadır. EDS DA baraya bir arayüz yardımı ile bağlanabilmektedir. Şekil 4.2'de ÇBAG'nin EDS'nin kullanımı gösterilmektedir.



Şekil 4.2. DA/DA evirici devresi ile enerji depolama ara yüzü [126]

Şekilde görüldüğü gibi süperkapasitör 2 kadranlı DA/DA evirici sayesinde DA baraya bağlanmıştır. Bu topolojide EDS generatör çıkış gücünü şebeke tarafındaki evirici sayesinde düzenlerken, DA gerilim DA evirici devresi ile düzenlenmektedir. Bu ayarlama EDS, DA bara gerilimini %0 ile %100 arasında minimum ve maksimum değerlerde ayarlayabilmektedir. Gerilim değeri %100 üzerine çıktığı durumda EDS doyuma gitmektedir. EDS tasarımında zaman bağlı olarak güç değerleri belirli oranlarda bölünmesi gerekmektedir. EDS'de %20 oranında güç şebeke tarafından sağlanırken, %80 oranındaki güç ÇBAG'nin giriş momentinden sağlanmaktadır. EDS'de süperkapasitörün depolayacağı enerji aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.

$$E_{EDS} = 0.2P_{\text{nominal}}t \quad (4.36)$$

$$E_{EDS} = \frac{1}{2}C_{\text{süperkapasitör}}(V_{\text{max}}^2 - V_{\text{min}}^2) \quad (4.37)$$

$$C_{\text{süperkapasitör}} = \frac{0.4P_{\text{nominal}}t}{(V_{\text{max}}^2 - V_{\text{min}}^2)} \quad (4.38)$$

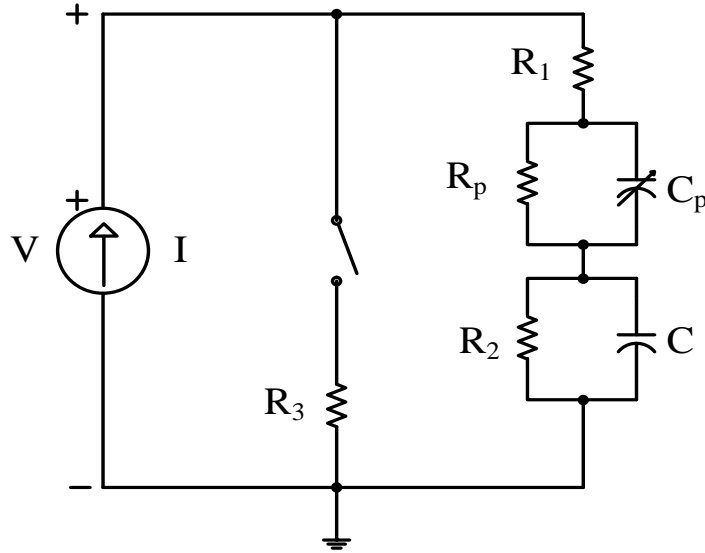
Burada, E_{EDS} depolanan enerji miktarı, $P_{nominal}$ ÇBAG nominal gücü, t süperkapasitörün devrede olma zamanı, $C_{süperkapasitör}$ süperkapasitör kapasitesi, V_{max} maksimum gerilim, V_{min} minimum gerilim olarak tanımlanmıştır. Enerji depolamada nominal güç değeri sisteme göre farklılık gösterebilir [125].

4.4.2. Enerji depolama kontrolü

ÇBAG'nin çıkış gücünün ayarlamasında şebeke tarafındaki evirici devresinden yararlanılmaktadır. Şebeke tarafındaki evirici devresi sisteminin ihtiyacı olan reaktif gücü sağlayarak generatör çıkış gücünü kontrol etmektedir. Bunu da DA gerilimi ile gerçekleştirir. DA gerilimi ve referans DA gerilimi arasındaki fark oransal integral kontrolüne girmektedir. Buradan sinyal minimum ve maksimum olarak karşılaştırma ünitesine girmektedir. Karşılaştırma ünitesine bağlı olarak şebeke tarafındaki eviricinin anahtarlama tetiklemesi üretilmiş olur.

4.4.3. Süperkapasitör modeli

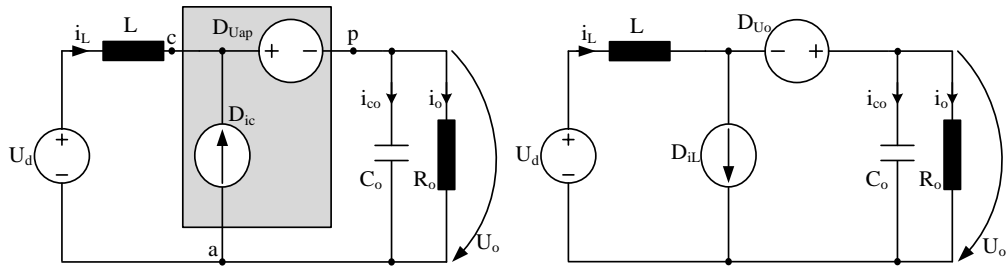
Bir süperkapasitör'ün temel devre modeli Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Süperkapasitör temel devre modeli [126]

Oluşturulan devre gerçek fonksiyonel devreden daha çok kavramsal devreler oldukları için, kapasitör kontrolünün ve anahtarlamanın nasıl olduğu görülmez. Süperkapasitörde gerilimin ayarlanması için doğrusal olmayan kapasite elemanları kullanılmaktadır. Bu devre elemanın kapasitesi gerilime bağlı olarak elde edilir.

Şekil 4.3’de C kapasitörünün model çalışmasında önemli bir rolü bulunmaktadır. Devrede şarjın nasıl olduğunu kontrol eder. Kapasite değişimine bağlı olarak enerji seviyesini ve enerji depolama kısmını izler. R_2 direnci kapasitör ile paralel bağlanarak şarj ve deşarj etkisini kontrol etmektedir. R_1 direnci şarj ve deşarj sırasındaki kayıpları takip eder. R_3 direnci ise aşırı gerilimlere karşı süperkapasitörü korumaktadır. Süperkapasitör gerilim ayarlaması çok hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Yoksa zarar verici durumlar ile karşı karşıya kalınması kaçınılmazdır. Bu yüzden genel olarak farklı oluşabilecek gerilimler için düşük güçlü kapasitör kullanılmaktadır. R_p direnci ve C_p kapasitörü süperkapasitörün dinamik davranışını çok hızlı bir şekilde kontrol eder. [126]. Süperkapasitör çıkış geriliminin DA bara gerilimine eşitlemek amacı ile gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici devresi kullanılmaktadır. Gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici devresi Şekil 4.4’te gösterilmiştir [127].



Şekil 4.4. Gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici temel devresi [127]

Gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici devresinde kirchoff teoremine bağlı olarak birinci diferansiyel eşitlik ile çıkış gerilimi (u_0) dinamik durumunun elde edilmesi Denklem (4.39)’da gösterilmiştir.

$$\frac{du_0}{dt} = \frac{1}{C_0} [(1-D)i_L - \frac{u_0}{R_0}] \quad (4.39)$$

Gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici devresinde kirchoff teoremine bağlı olarak ikinci diferansiyel eşitlik ile bobin akımı (i_L) dinamik durumunun elde edilmesi Denklem (4.40)’da gösterilmiştir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [u_D - (1-D)u_0] \quad (4.40)$$

Çıkış gerilimi ve bobin akımının uzay durum analizi Denklem (4.41)'de gösterilmiştir [127].

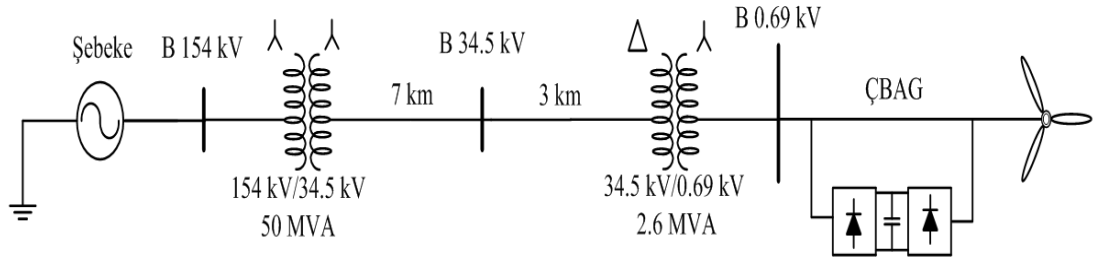
$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{u}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -(1-D)\frac{1}{L} \\ (1-D)\frac{1}{C_0} & \frac{1}{-RC_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u_D \quad (4.41)$$

5. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu çalışmanın amacı, şebekeye bağlı bir rüzgar santralının geçici durum davranışını farklı modelleme ve farklı durumlar karşısında incelemektir. Bu nedenle, önce rüzgar santralının bağlı olduğu şebeke modeli tanıtılacak, sonra tez kapsamında geliştirilen generatör modellemesi, yük modellemesi ve süperkapasitör modellemesi, incelenen durumlar içerisinde verilecektir. Yapılan tüm modelleme ve analizler MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilmiştir.

5.1. Şebeke Modeli

2,3 MW gücündeki bir rüzgar türbini, üçgen/yıldız bağlı 0,69 kV/34,5 kV gerilimli 2,6 MVA güçlü bir yükseltici bir transformatör üzerinden Şekil 5.1’de görüldüğü gibi bir güç sistemine bağlıdır.



Şekil 5.1. Sistemin modellenmesi

Santral çıkışında 34,5 kV’luk 10 km’lik bir hat bulunmaktadır. Bu hattın sonunda da yıldız/yıldız bağlı 34,5 kV/154 kV gerilimli 50 MVA gücünde yıldız/yıldız bağlı bir transformatör üzerinden kısa devre gücü 2500 MVA ve X/R oranı 7 olan bir iletim şebekesine bağlantısı vardır. Rüzgar türbini generatörü olarak ÇBAG kullanılmıştır. Rüzgar hızı da 8 m/s sabit olarak kabul edilmiştir. Benzetim çalışmasında, her iki transformatörün doyum karakteristikleri ihmal edilmiştir. 10 km’lik hat için pi eşdeğer devresi modeli kullanılmıştır. 10 km’lik hat B34,5 kV noktasında bölümlendirilmiş olup, geçici olayların oluşturulacağı yer olarak belirlenmiştir. Generatöre ait parametreler Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. ÇBAG parametre değerleri

ÇBAG	Parametre Değerleri
R_s	0.00706 Ω
L_s	0.171H
R_r	0.005 Ω
L_r	0.156 H
L_m	2 H
H	5.04

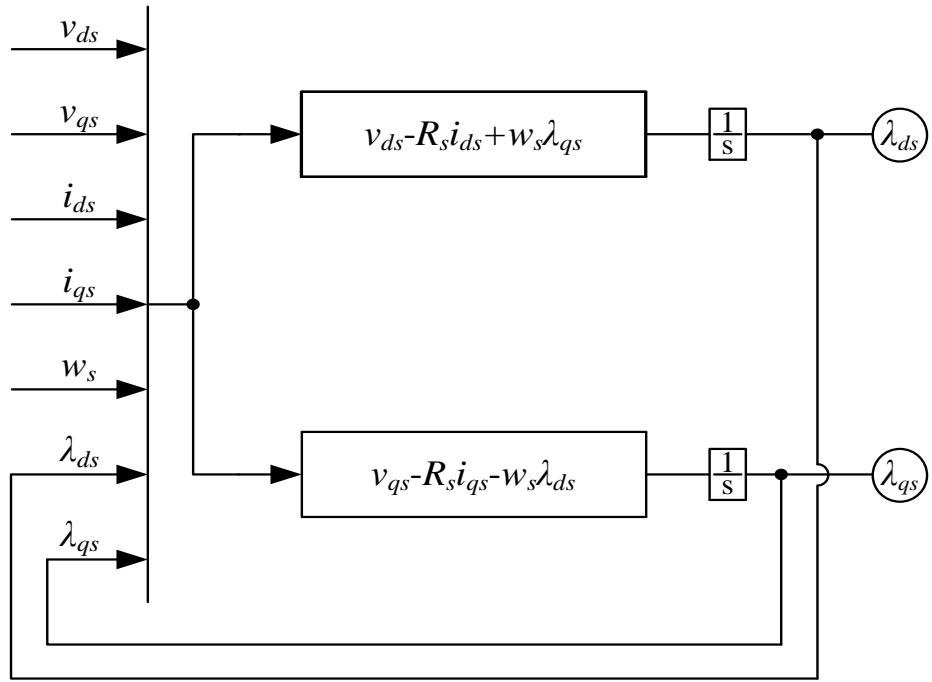
5.2. Analiz Edilen Durumlar ve İlgili Modellemeler

5.2.1. Tam ve azaltılmış derece modeli ile geçici durum analizleri

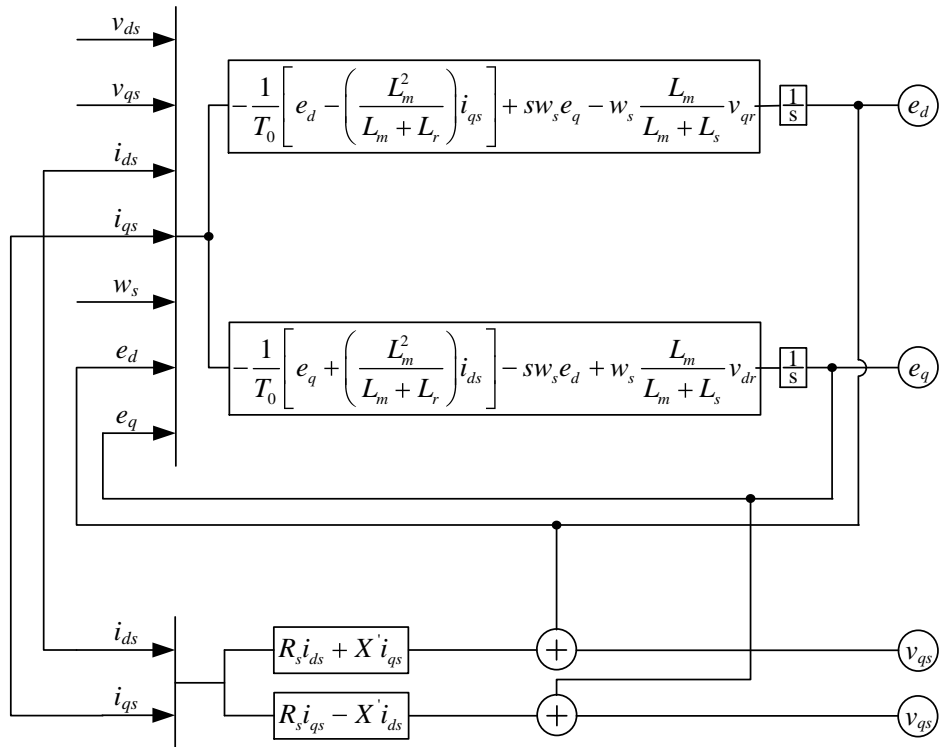
Her bir model için aşağıdaki durumlar incelenmiştir.

- 154 kV kesicisinin 5. Saniyede 50 ms süreli açılması.
- 34,5 kV kesicisinin 5. Saniyede 50 ms süreli açılması.
- B34,5'te 0,56 s'de 20 ms, 50 ms ve 100 ms süreli üç faz kısa devresinin oluşması.
- Modellemesi Şekil 5.8'de verilen doğrusal olmayan yüklerin B34,5 noktasından 0,56 s'de 20 ms süreli devreye girmesi.
- Parametreleri Tablo 5.2'de verilen 0,6 MW-0,55 MVAr güçlü üstel yük modeli ile 1 MW asenkron motorun 20 ms süreli devreye alınması.
- Parametreleri Tablo 5.2'de verilen 0,6 MW-0,55 MVAr güçlü ZIP yük modeli ile 1 MW asenkron motorun 20 ms süreli devreye alınması.

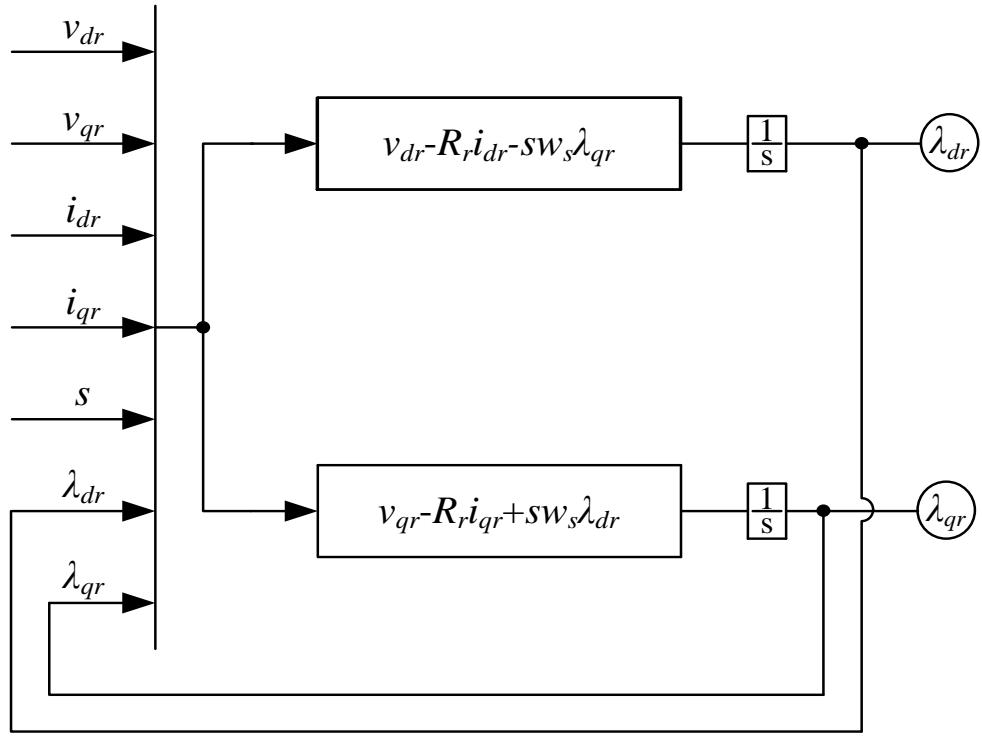
Rüzgar türbin generatörünün d-q eksen stator ve rotor TDM ve ADM Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.2. TDM’de d-q eksen stator akılarının elde edilmiş blokları



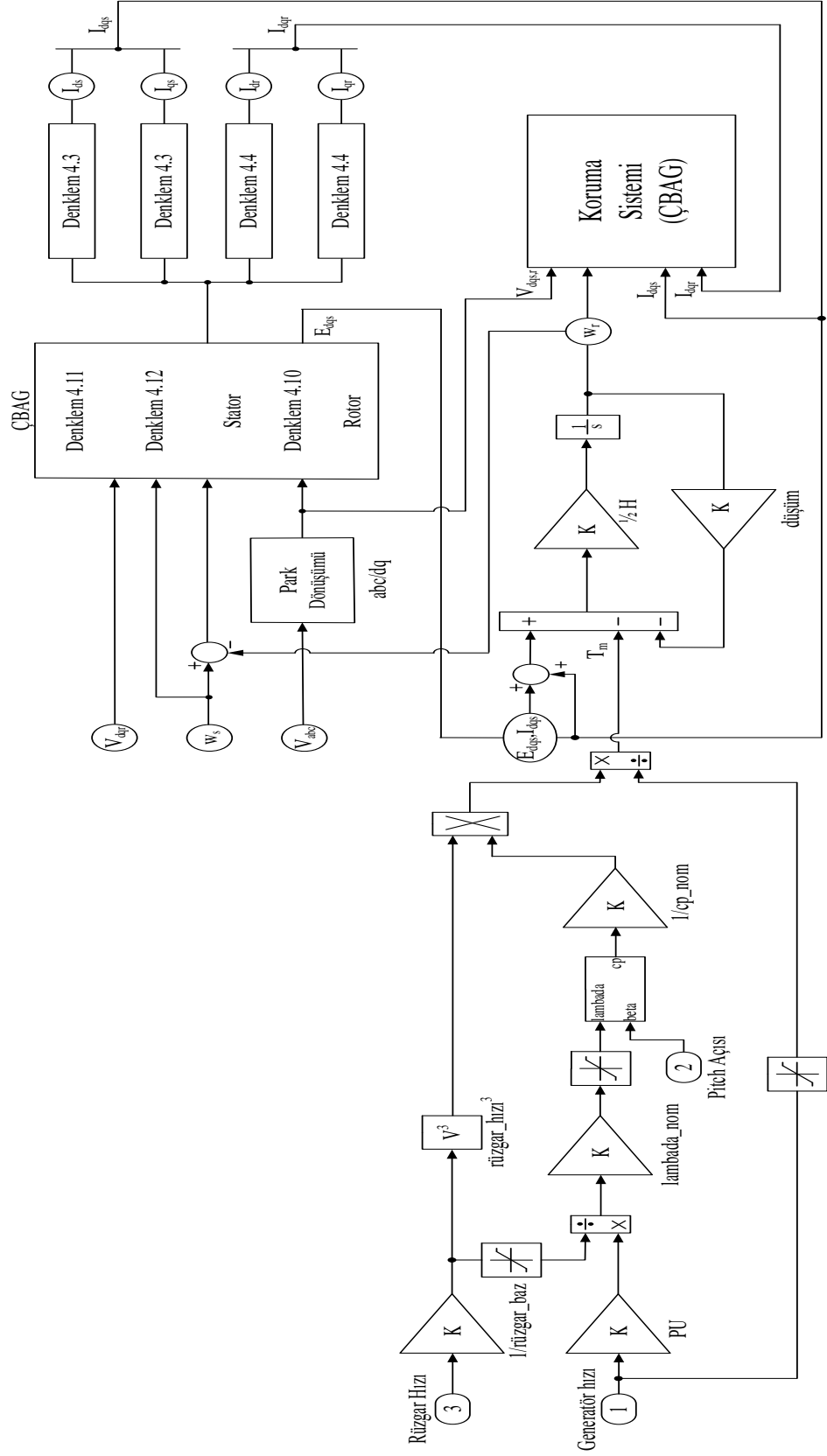
Şekil 5.3. ADM’de d-q stator eksen akılarının elde edilmiş blokları



Şekil 5.4. TDM ve ADM’de d-q eksen rotor akılarının elde edilmiş blokları

TDM’de d-q eksen stator akılarının elde edilmiş blokları Denklem (4.1), ADM’de d-q eksen stator akılarının elde edilmiş blokları Denklem (4.11) ve Denklem (4.12), TDM ve ADM’de d-q eksen rotor akılarının elde edilmiş blokları Denklem (4.2)’deki matematiksel ifadeler ile oluşturulmuştur.

ÇBAG’li rüzgar türbinin TDM ve ADM elektriksel ve mekanik modelleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. ÇBAG'ün ADM'inde elektriksel ve mekanik modelleri

Rüzgar türbinin kontrolü, pitch açısı ve eviricilerin güç kontrolü olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Evirici güç kontrolü genellikle rotor tarafındaki eviricide akım kontrolü, şebeke tarafındaki DA gerilim kontrolü olarak görülür. ADM'de eviricilerin maksimum akım değerini düzenleyebilmede ve düşük gerilim iyileştirme açısından önemlidir. Stator d-q eksen akımının oransal durumuna göre aktif ve reaktif güç iyileştirmesi yapılabilmektedir. ÇBAG'nin moment ve reaktif güç kontrolünü bağımsız hale getirmektedir. Üç faz gerilim ve akım değerleri park dönüşümleri ile d-q gerilim ve akımlarına dönüşmektedir. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi ADM'de akım ve gerilimlerinin yanı sıra kayma ve stator açısal hızı kullanılmıştır. TDM'de Denklem (4.1) ve Denklem (4.2), ADM'de Denklem (4.10), Denklem (4.11) ve Denklem (4.12)'de hesaplaması yapılan d-q eksen stator akımı ile ilişkilidir. TDM'de akıya bağlı modelleme yapılırken, ADM'de d-q eksen stator akımları hesaplamasında stator akılarının ihmal edilmesi ile gerilim kaynağı modellemesinden yararlanılmıştır. Gerilim kaynaklı evirici Sinyal Genişlik Modülasyonu kontrolü altında rotor gerilimini hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada pitch kontrol ve shaft modellemesinden yararlanmaktadır. Güç eviricilerinin çalışma performansı rüzgar türbini pitch açısı ile ilişkilidir. Rüzgar hızının düşük veya yüksek olmasında hız modu ayarlanabilmektedir. Bu hız modu hem TDM hem de ADM'de geri besleme ünitesi ile sağlanmaktadır. ÇBAG'ün koruma ünitesi üç fonksiyon için devreye girmektedir. Bunlar aşırı gerilim, aşırı akım ve açısal hız korumasıdır. Aşırı gerilim 0 p.u. ile 1,2 p.u. değerinde, aşırı akım 0 p.u. ile 5 p.u. değerinde, açısal hız ise 0,8 p.u. değeri ile 1,2 p.u. değerleri arasındadır. Gerilim ve akım değerleri aştığı durumda güç eviricileri sistemi devre dışı bırakmaktadır. Benzer şekilde hızın maksimum ve minimum olduğu değerlerde crowbar ünitesi rotor-side evirici devresini korumuş olur [9].

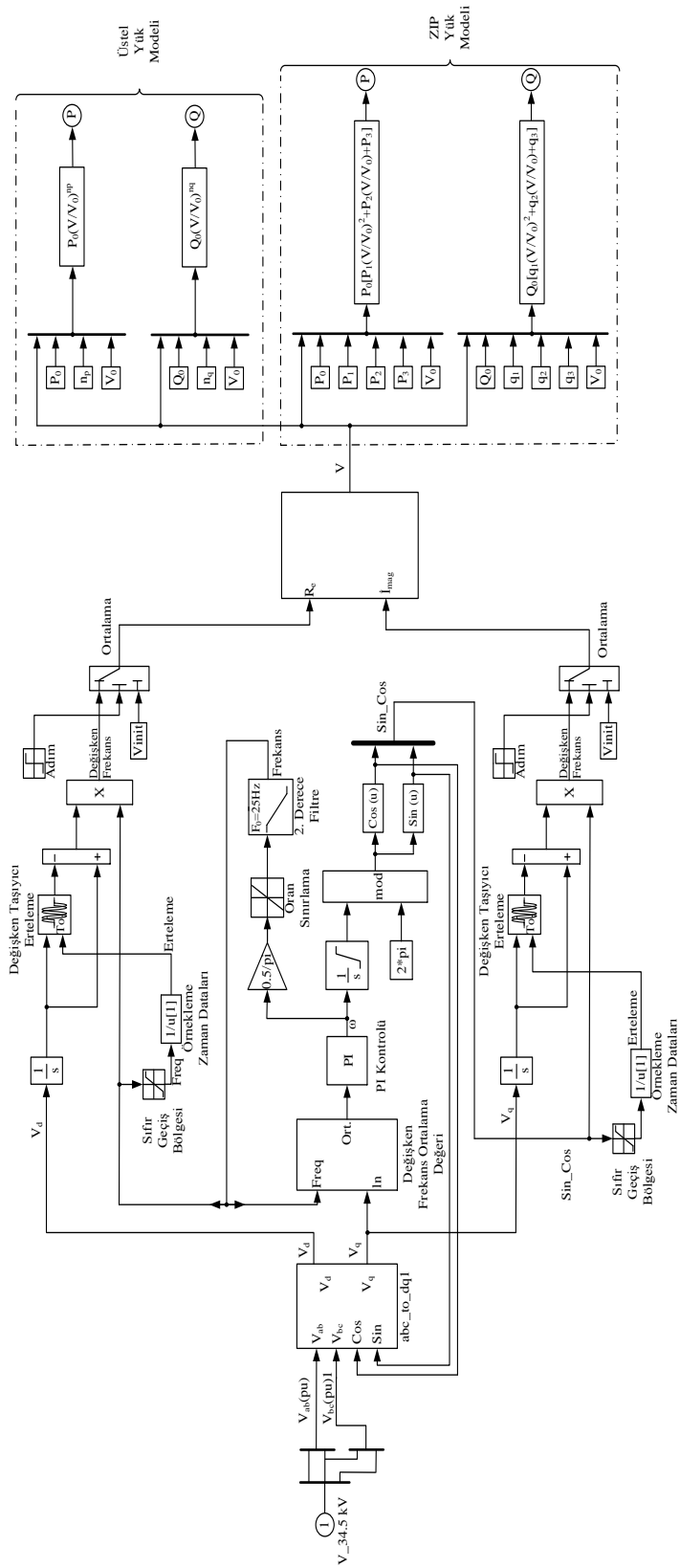
5.2.2. Statik yük modelleri ile geçici durum analizleri

Tablo 5.2'de ÇBAG analizinde kullanılan üstel, ZIP ve üstel/ZIP+asenكرون motor parametre değerleri verilmiştir.

Tablo 5.2. Üstel, ZIP ve üstel/ZIP+asenkron motor parametre değerleri

Yük Modeli	Parametre Değerleri	Asenkron Motor	Parametre Değerleri
Üstel	$n_p=1, n_q=1$	R_s	0.0092Ω
ZIP	$p_1= 0.3$	L_s	0.0717 H
	$p_2= 0.3$		
	$p_3= 0.4$		
ZIP	$q_1= 0.3$	R_r	0.007Ω
	$q_2= 0.3$		
	$q_3= 0.4$		
—	—	L_r	0.0717 H
—	—	L_m	4.14 H
—	—	H	0.5 s

Aktif ve reaktif güç denklemleri çıkartılan üstel ve ZIP yük modellerinin MATLAB/SIMULINK ortamında geliştirilen blokları Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Üstel ve ZIP yük matematiksel modeli

Üç faz geriliminin d-q eksenine dönüştürülmesinde frekansa bağlı gerilim bloklamaları ile gerçekleştirilmiştir. Hem üstel hem de ZIP yük modelinde 34,5 kV'luk bara gerilimi d-q park dönüşümü ile sinüs ve kosinüs formuna dönüştürülmüştür. Dönüşümün sonunda bir Faz Kilitleme Döngüsü (FKD) kullanılmıştır. FKD'de normalde iki tane sinüs sinyali kullanılmaktadır. Giriş sinyali ve çıkış sinyaline (v_i ve v_o) bağlı olarak hata sinyalinin hesaplaması aşağıdaki gibidir.

$$v_i = V_g \sin(\omega_i t + e_i) \quad (5.1)$$

$$v_o = V_c \cos(\omega_o t + e_o) \quad (5.2)$$

Burada V_g ve V_c giriş ve çıkış genlikleri ω_i ve ω_o giriş ve çıkış frekansları e_i ve e_o giriş ve çıkış faz sinyalleridir. Hata sinyallerinin hesaplanması Denklem (5.3) ve Denklem (5.4)'te gösterilmiştir.

$$e = v_i v_o \quad (5.3)$$

$$e = 0.5V_i V_p \sin((\omega_i - \omega_o)t + e_i - e_o) + 0.5V_i V_p \sin((\omega_i + \omega_o)t + e_i + e_o) \quad (5.4)$$

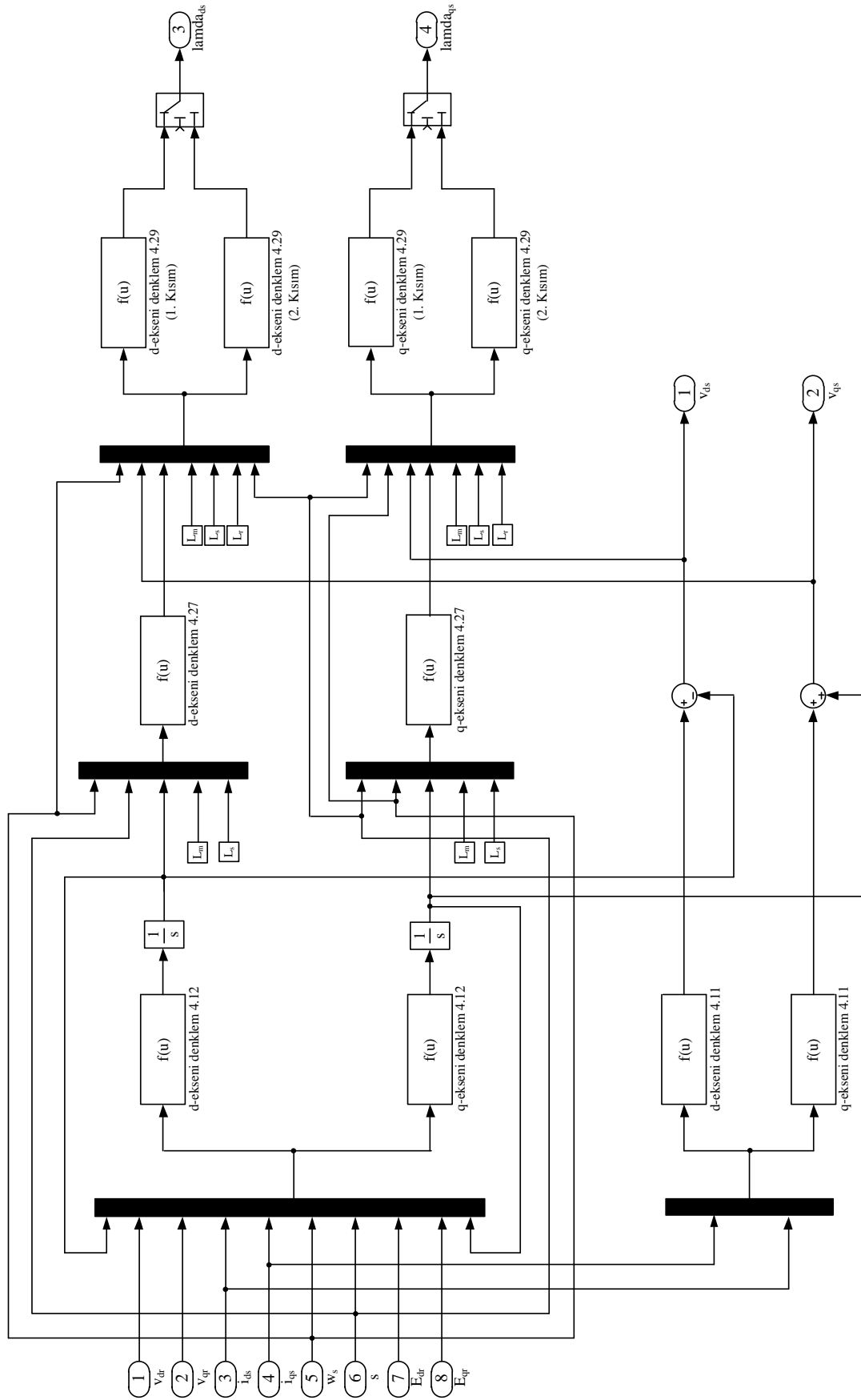
Hata sinyali belli bir değerin üstüne çıktığında geri beslemeli kontrol döngüsü sistemi kontrol etmektedir. Faz hata sinyalinin minimum olması için FKD çıkışı v_o üretir ve performansı iyileştirir. Çeşitli gerilim seviyelerinde aktif ve reaktif güç değerleri yeniden hesaplanır [128].

5.2.3. Rotor dinamiği modellemesi ile geçici durum analizleri

Bu analizler yapılırken, ÇBAG için ADM kullanılmaktadır. RDM'nin etkisi, aşağıdaki durumlar için incelenmiştir:

- B34,5'ta 0,56 s'de 20 ms süreli üç faz kısa devresinin oluşması.
- Modellemesi Şekil 5.7'de verilen üstel ve ZIP yük modellerine asenkron motor ilavesi ile B34,5 noktasından 0,56 s'de 20 ms süreli devreye girmesi.

Önceki bölümde verilen teoriye dayanılarak oluşturulan RDM blok diyagramı Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. ÇBAG’de RDM blok diyagramı

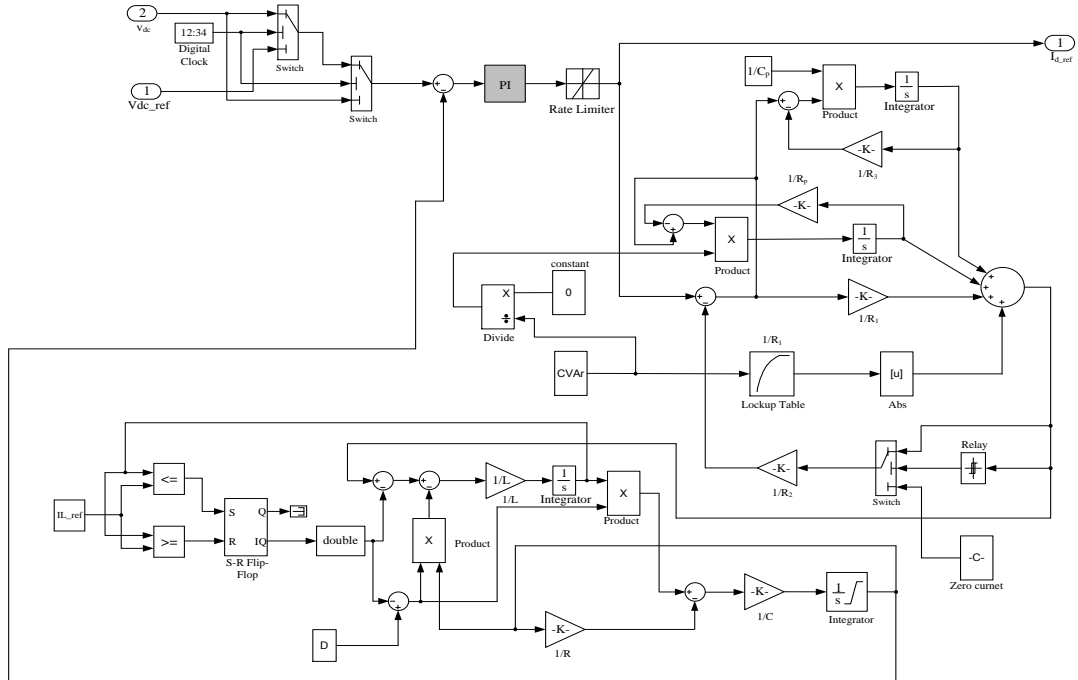
ÇBAG’de RDM’nin geliştirmesinde ADM’den yararlanılmıştır. Denklem (4.12)’nin oluşturulması ile d-q eksen stator gerilim kaynağının zamana karşı turevleri elde edilmiştir. Denklem (4.11) ve Denklem (4.12)’nin toplanması ile d-q eksen stator gerilimleri bulunmuştur. Stator, rotor ve manyetizasyon enduktansları ve gerilim kaynağı ifadesi Denklem (4.27)’de elde edilmiştir. Bu ifadesinin çıkışı ve enduktanslar Denklem (4.29)’da d-q stator eksenini halkalama akıları elde edilmiş olur. Halkalama akıları elde edilirken bir anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Üç faz kısa devresi ve statik yük modeli analizlerinde anahtarlama elemanı 0,56 saniye sonra konumunu değiştirmektedir.

5.2.4. Süperkapasitör modellemesi ile geçici durum analizleri

Süperkapasitör uygulamasının etkisi aşağıdaki durumlar için incelenmiştir.

- B34,5’te 0,56 s’de 20 ms süreli üç faz kısa devresinin oluşması.
- Modellemesi şekil 5.7’de verilen üstel ve ZIP yüklerin asenkron motor ilavesi ile B34,5 noktasından 0,56 s’de 20 ms süreli devreye girmesi.

Bunun için gerekli süperkapasitör modelleme şekil 5.9’da verilmiştir. Bir önceki adımda belirtildiği gibi burada da ÇBAG ADM tabanlı olarak gösterilmiştir.



şekil 5.9. ÇBAG’de DC/DC evirici ve süperkapasitör modellemesi

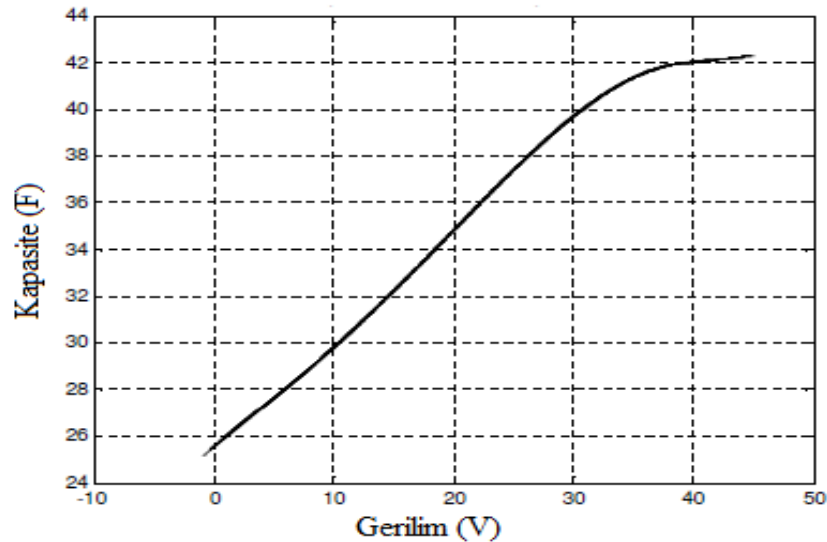
DC gerilim ve DC gerilim referans arasındaki fark oransal integral kontrolüne girmektedir. Buradan sinyal minimum ve maksimum değerlere bağlı olarak oransal limit değeri hesaplanmaktadır. Limit değerinin çıkışında d-ekseni referans akım değeri hesaplanmaktadır. Süperkapasitör devre tasarımında dört direnç iki kondansatör grubundan oluşmaktadır. Sistem dinamiğine göre kapasite ayarlamasında kullanılan kapasite değeri gerilime bağlı olarak kontrol edilmektedir. Denklem (5.5)'de verilen gerilim denklemi ve şekil 5.10'daki kapasite-gerilim eğrisine interpolasyon kullanılarak kapasite değeri elde edilmiştir. Bunların kullanılması ile $C_p= 630$ F, $C=2.69$ F olarak belirlenmiştir [126]. Ayrıca süperkapasitörün temel devresindeki dirençleri $R_1= 6m\Omega$, $R_2= 18k\Omega$, $R_3=52m\Omega$, $R_p= 3m\Omega$ olarak seçilmiştir.

$$u_{LUP} = 7.1138 \times 10^{-8} t^3 + 1.1657 \times 10^{-3} t^2 + 6.4391 t - 11945 \quad (5.5)$$

Geriliminin zamana göre türevi ise,

$$\dot{u}_{LUP} = 2.13414 \times 10^{-7} t^2 + 2.3314 \times 10^{-3} t + 6.4391 \quad (5.6)$$

şeklindedir.



Şekil 5.10. Süperkapasitörün kapasite-gerilim eğrisi

Süperkapasitörün kapasite-gerilim eğrisinde gerilim değeri arttıkça kapasite değerinin arttığı görülmektedir. Bu eğriye bağlı olarak benzetim sistemindeki 1200 V DA gerilime uygun bir kapasite seçilmesi işlemi yapılmıştır [126]. Süperkapasitörde

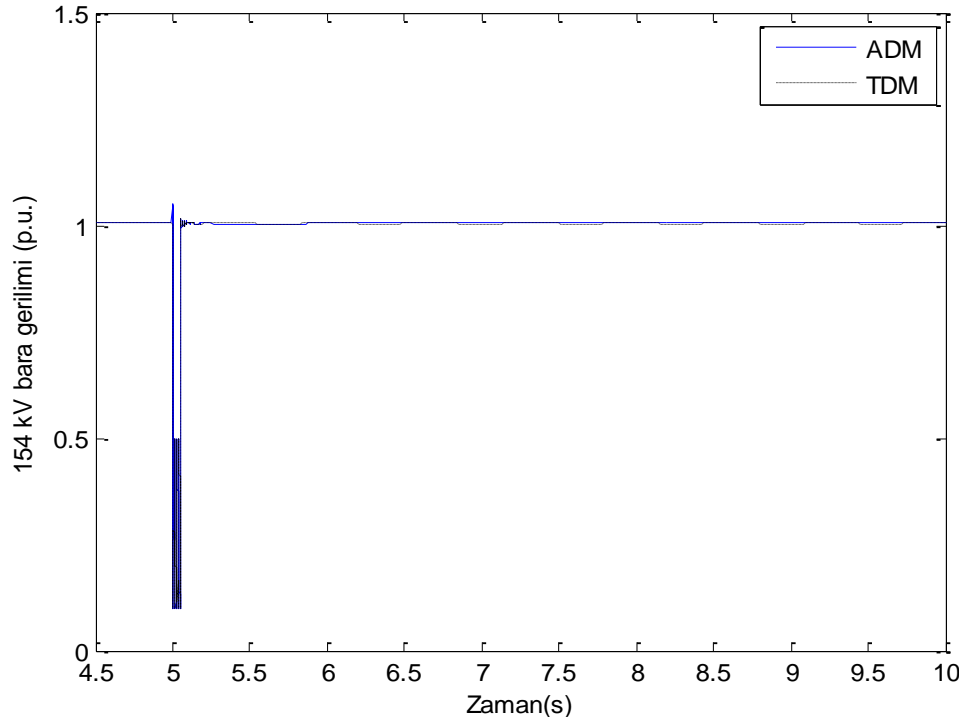
Üretilen gerilim değeri DA gerilim değerine eşit olabilmesi için bir gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici devresine ihtiyaç duyulur. Gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici devresinde birer direnç, bobin ve kondansatör kullanılmıştır. Direnç değeri ise benzetim çalışmasında süperkapasitörün şarj durumuna bağlı olarak belirlenmiştir. R direnci 160Ω , L endüktansı 1 mH ve C kondansatör değeri ise $0,5 \mu\text{F}$ olarak seçilmiştir [127]. Gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici devresindeki çıkış gerilimi 1200 V DA gerilimine eşitlenmiştir. Üç faz arıza süresi ve statik yüklerin devreye girip çıkması ve 0,56-0,58 saniye arasında olduğundan benzetim çalışmasının ilk 0,5 saniyesinde süperkapasitör şarj olmaktadır. 0,5 saniye ile 1 saniyeler arasında süperkapasitör bir anahtarlama elemanı ile devreye alınıp çıkarılmaktadır.

6. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI

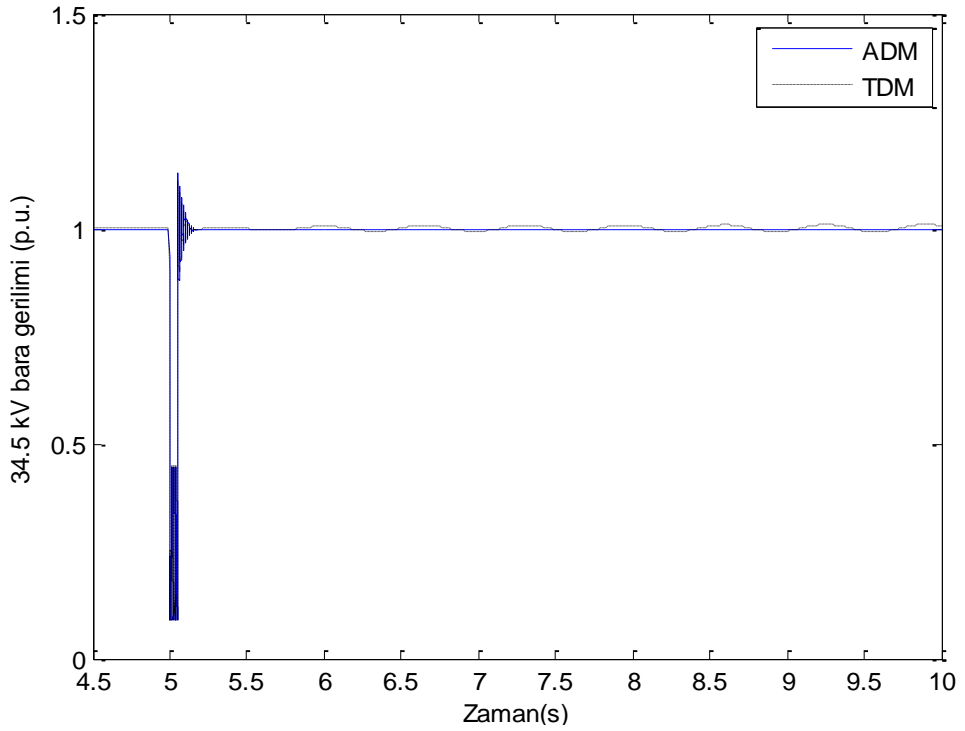
Bu bölümde, MATLAB/SIMULINK ortamında yapılan çalışmaların sonuçları verilmiştir. ÇBAG’de oluşturulan TDM ve ADM’nin geçici durum analizinde vermiş olduğu sonuçlar ile ilgili literatürde yapılan bir test sistemi üzerinde doğrulanmıştır [5]. Ayrıca aktif güç ve reaktif güç denklemlerine bağlı olarak oluşturulan üstel ve ZIP yük modelinden elde edilen sonuçlar başka bir analiz programında yük akışına bağlı olarak hesaplatılarak sonuçların doğruluğu gösterilmiştir [129]. Test sisteminden elde edilen sonuçlar Ekler bölümünde gösterilmiştir. Benzetim çalışmasında elde edilen her bir analiz sonucu alt başlıklar halinde şekiller ve yorumlar ile gösterilmiştir.

6.1. Tam ve Azaltılmış Derece Modeli ile Statik Yüklerin Geçici Durum Analiz Sonuçları

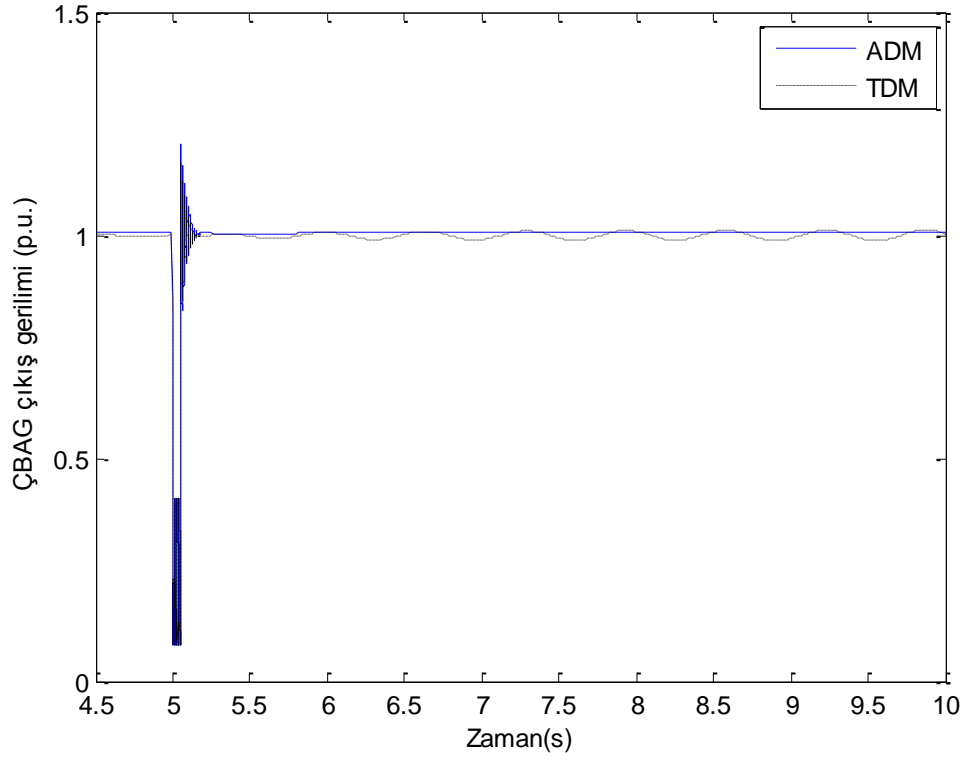
Bu bölümde tam derece ve azaltılmış derecede modellenmiş ÇBAG için geçici durumların analiz sonuçları ele alınmıştır. Şebekeye bağlı olarak çalışan ÇBAG’de 154 kV’luk barada bulunan kesici 5 saniye ile 5,05 saniyeler arasında açılıp kapanmıştır. 154 kV barada kesici açma kapama durumdaki TDM ve ADM’nin vermiş oldukları cevapların karşılaştırılması yapılmıştır. 154 kV bara gerilimi, 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, ÇBAG açılma hızı, ÇBAG elektriksel momentini ve ÇBAG d-q eksen stator akım değişimleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.8 arasında gösterilmiştir.



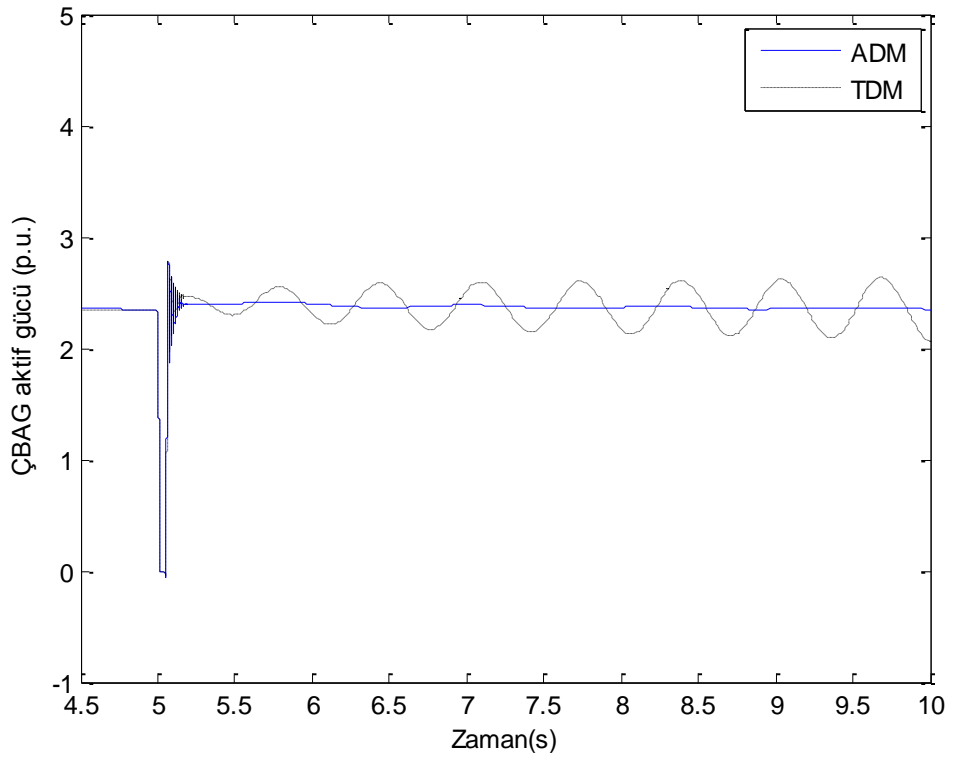
Şekil 6.1. 154 kV bara gerilimi (154 kV kesici açma kapama)



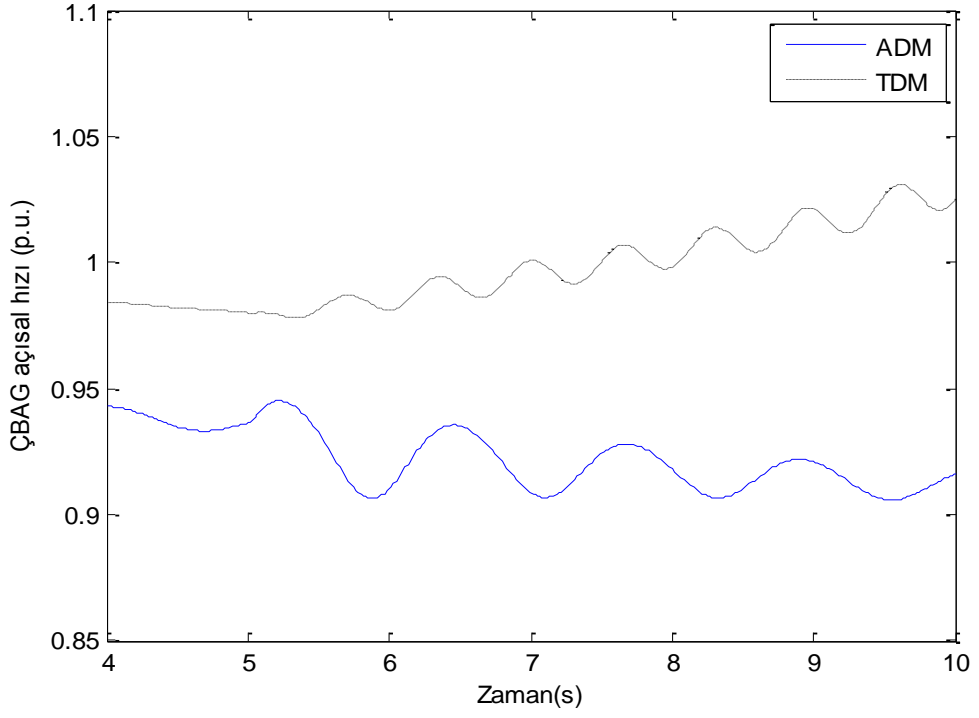
Şekil 6.2. 34,5 kV bara gerilimi (154 kV kesici açma kapama)



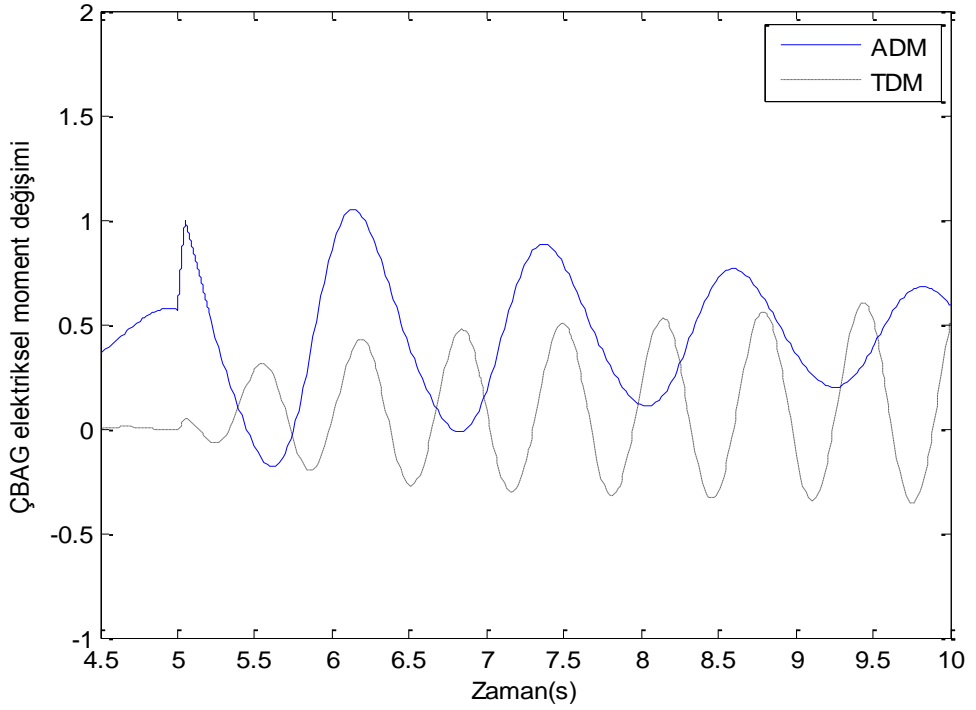
Şekil 6.3. ÇBAG çıkış gerilimi (154 kV kesici açma kapama)



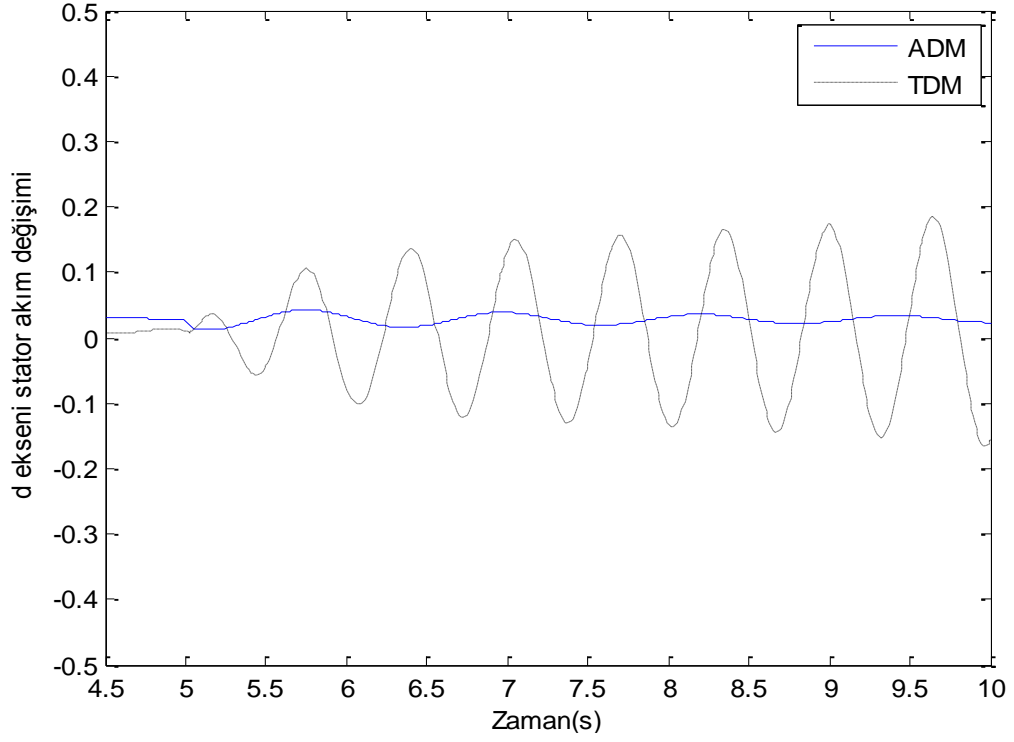
Şekil 6.4. ÇBAG aktif gücü (154 kV kesici açma kapama)



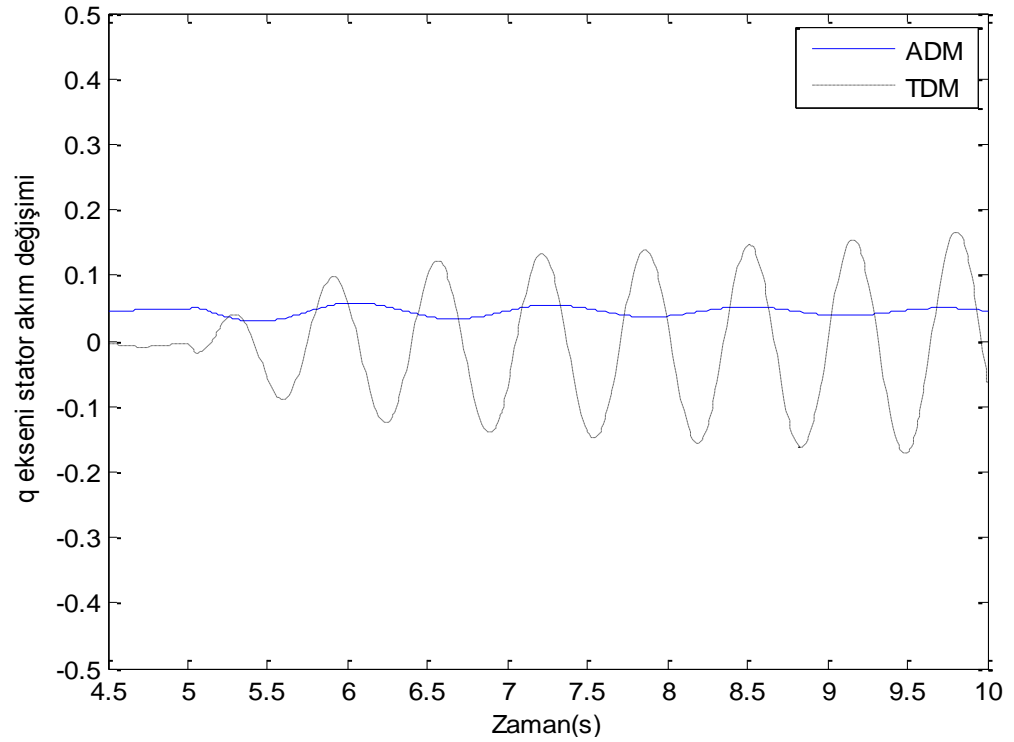
Şekil 6.5. ÇBAG açılma hızı değişimi (154 kV kesici açma kapama)



Şekil 6.6. ÇBAG elektriksel moment değişimi (154 kV kesici açma kapama)



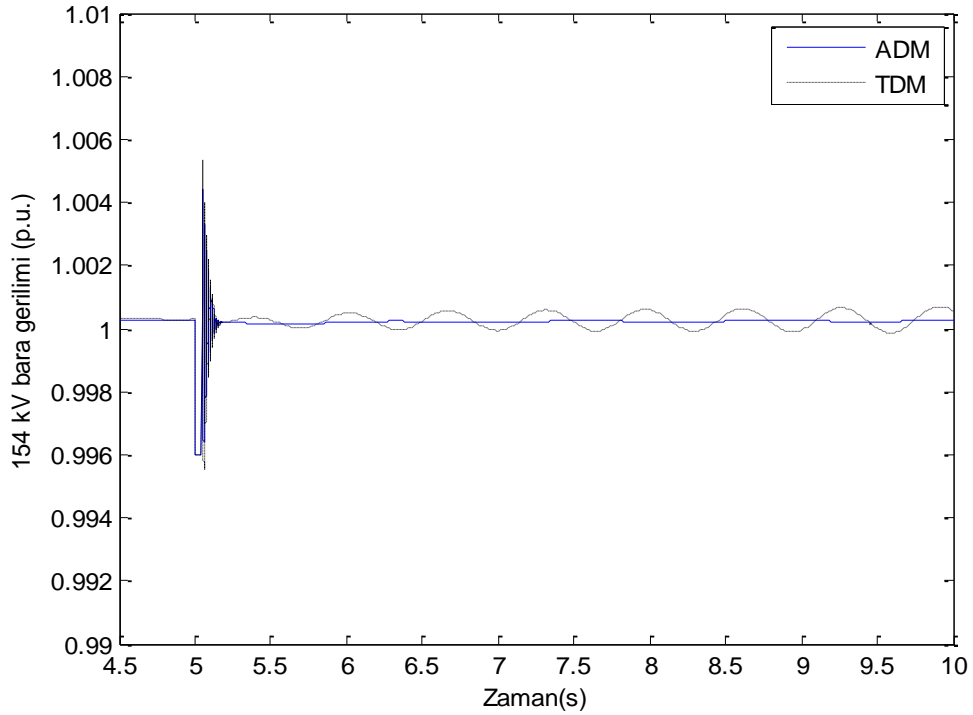
şekil 6.7. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (154 kV kesici açma kapama)



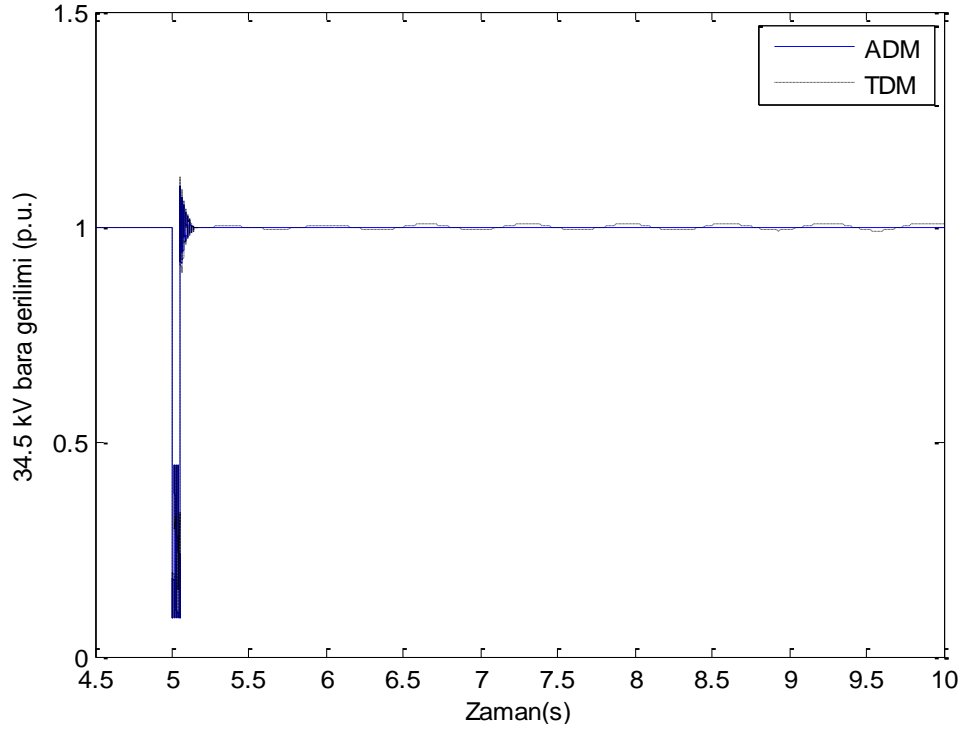
şekil 6.8. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (154 kV kesici açma kapama)

154 kV kesici açma kapama durumunda ÇBAG'nin TDM ve ADM karşılaştırmasında, 154 kV'luk baranın hem TDM hem de ADM'den çok etkilenmediği görülmüştür. 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış gerilimlerinde ADM'de sistem kararlı hale gelirken, TDM'de sistemin kararsızlığa gittiği görülmüştür. ÇBAG'nin aktif gücü, açılma hızı, elektriksel momentini ve d-q eksen stator akım değişimlerinde ADM tabanında salınımların kısa zaman içerisinde ortadan kalktığı görülürken, TDM'de salınımların artışı ile sistem kararsızlığı söz konusudur. 154 kV barada kesici açma kapamasında ÇBAG'de TDM ve ADM'de en çok elektriksel moment etkilenmiştir.

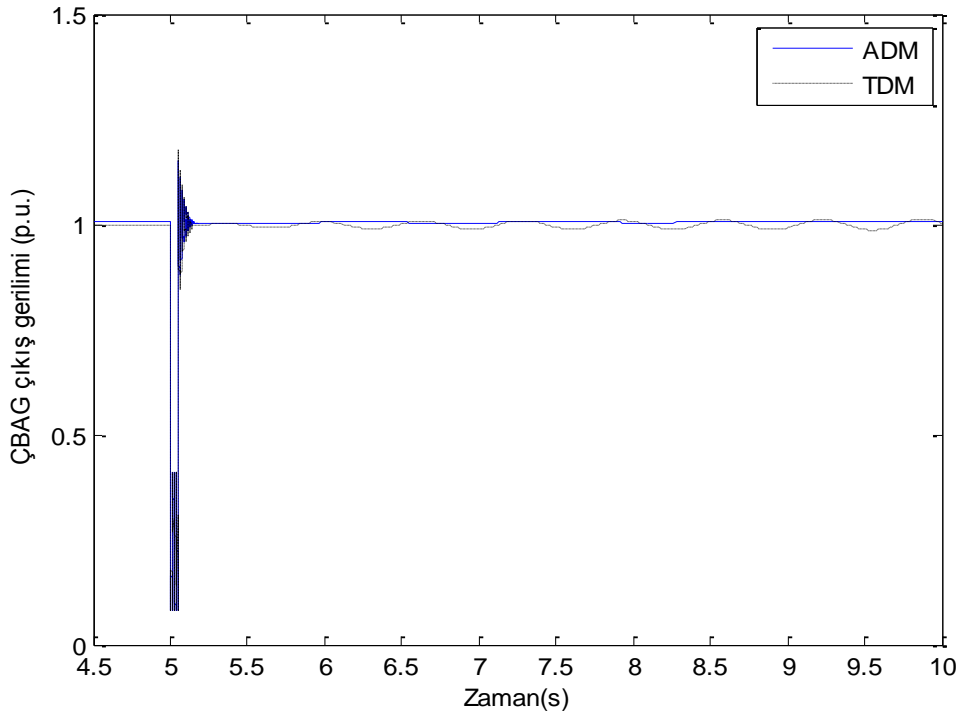
Şebekeye bağlı olarak çalışan ÇBAG'de 34,5 kV'luk barada bulunan kesici 5 saniye ile 5,05 saniyeler arasında açılıp kapanmıştır. 34,5 kV barada kesici açma kapama durumundaki TDM ve ADM'n vermiş oldukları cevapların karşılaştırılması yapılmıştır. 154 kV bara gerilimi, 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, ÇBAG açılma hızı, ÇBAG elektriksel momentini ve ÇBAG d-q eksen stator akım değişimleri Şekil 6.9 ve Şekil 6.16 arasında gösterilmiştir.



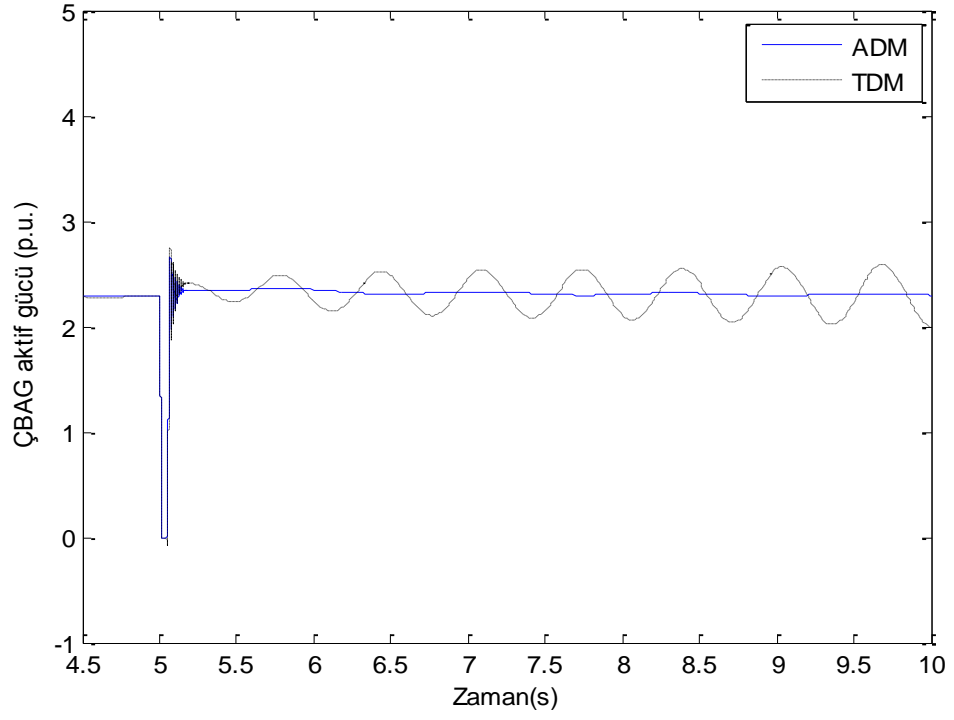
Şekil 6.9. 154 kV bara gerilimi (34,5 kV kesici açma kapama)



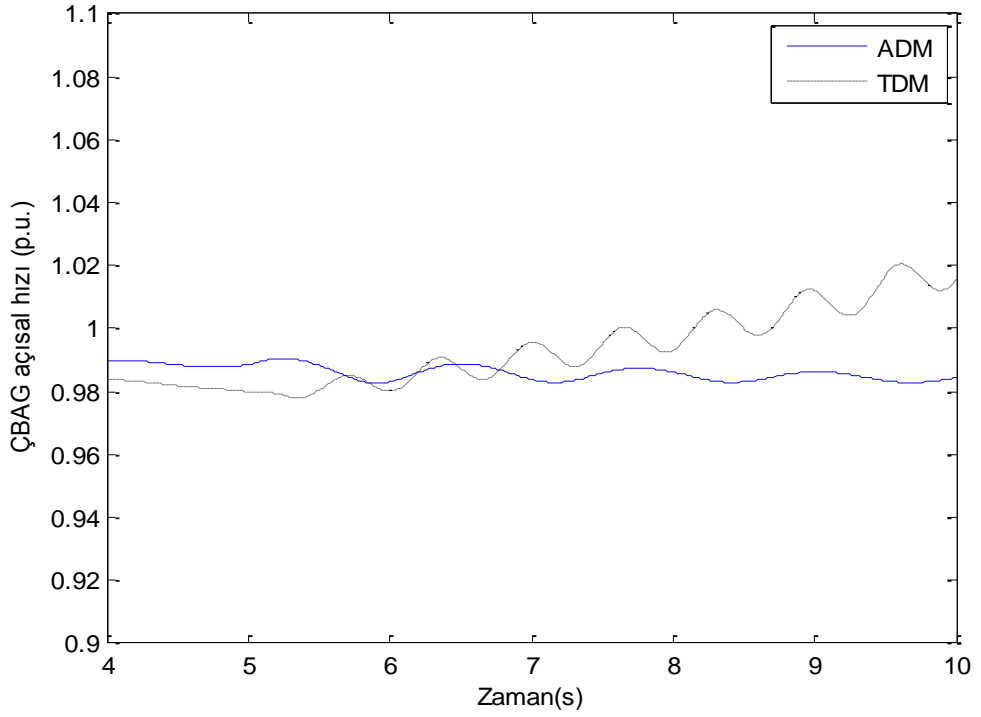
Şekil 6.10. 34,5 kV bara gerilimi (34,5 kV kesici açma kapama)



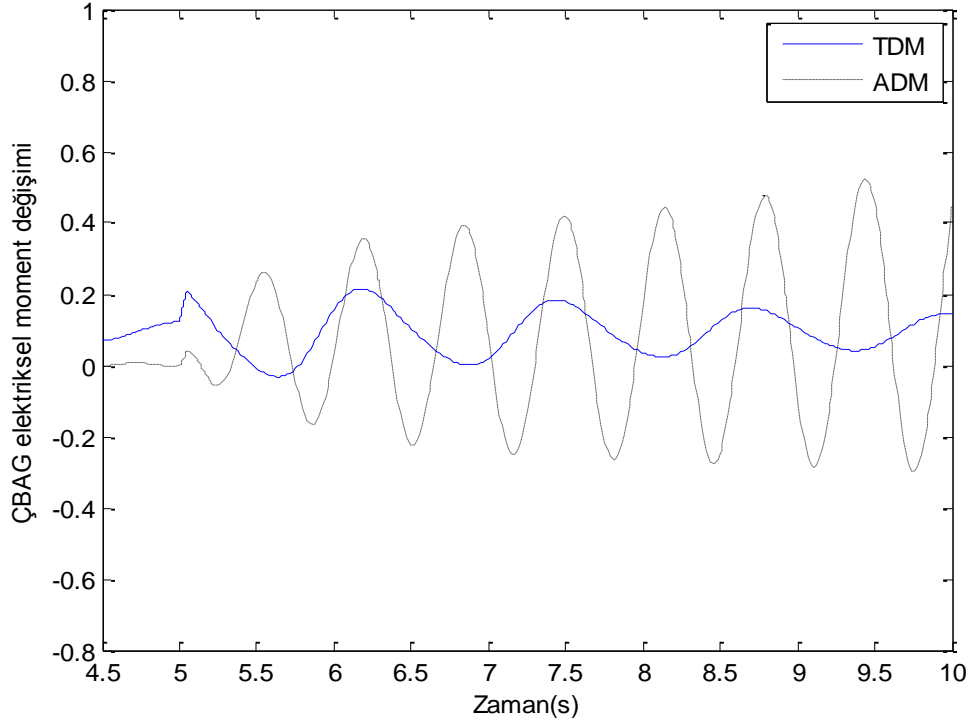
Şekil 6.11. ÇBAG çıkış gerilimi (34,5 kV kesici açma kapama)



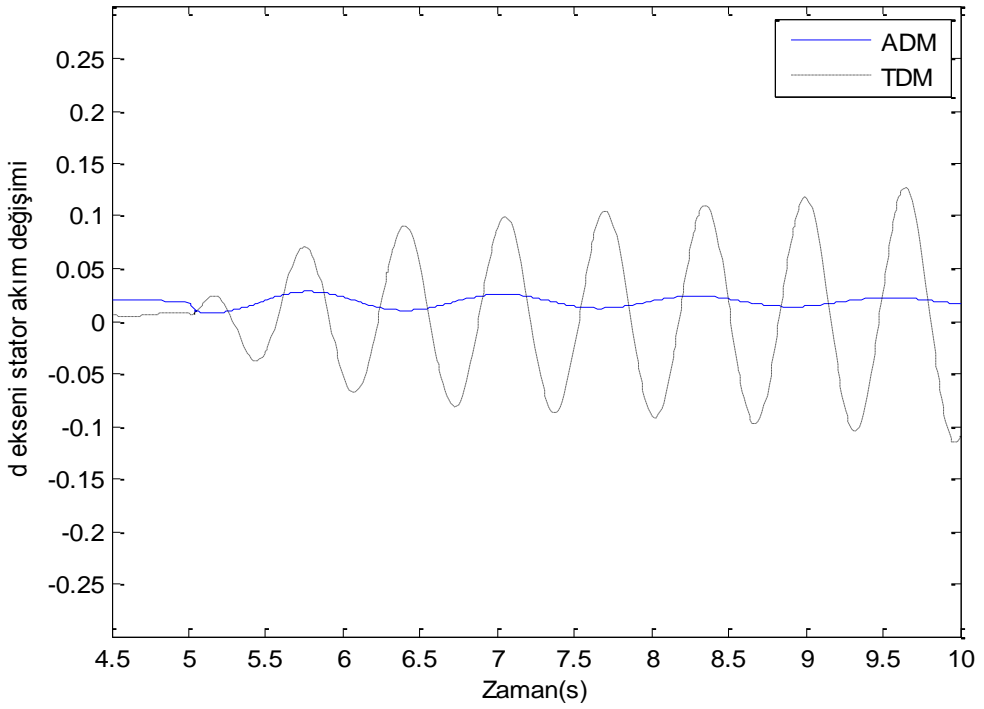
Şekil 6.12. ÇBAG aktif gücü (34,5 kV kesici açma kapama)



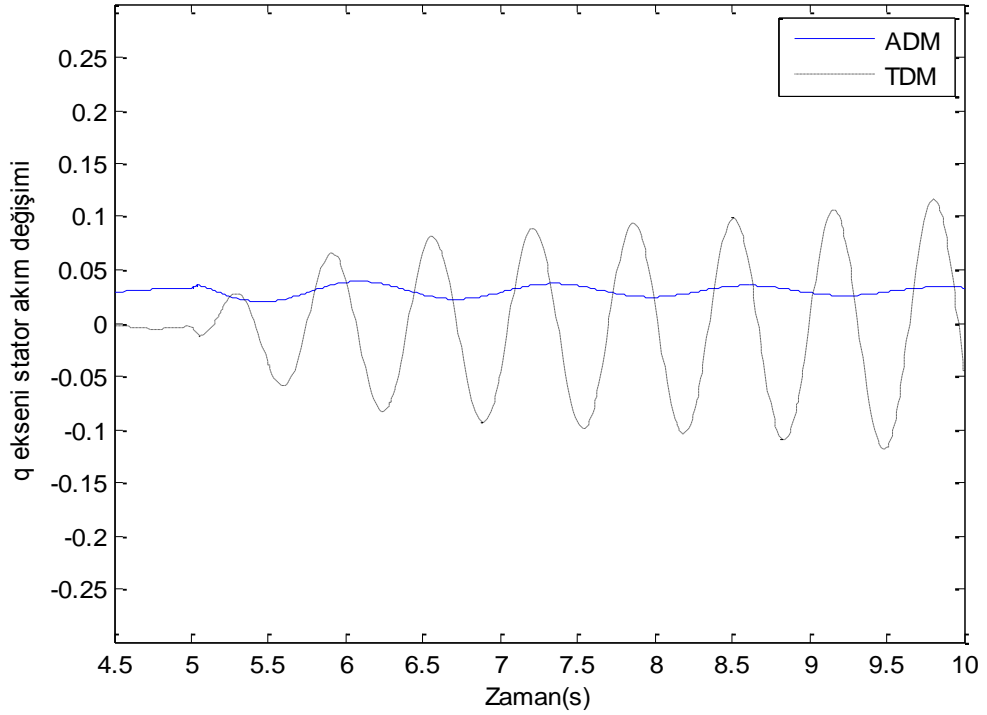
Şekil 6.13. ÇBAG açısal hızı değişimi (34,5 kV kesici açma kapama)



Şekil 6.14. ÇBAG elektriksel moment değişimi (34,5 kV kesici açma kapama)



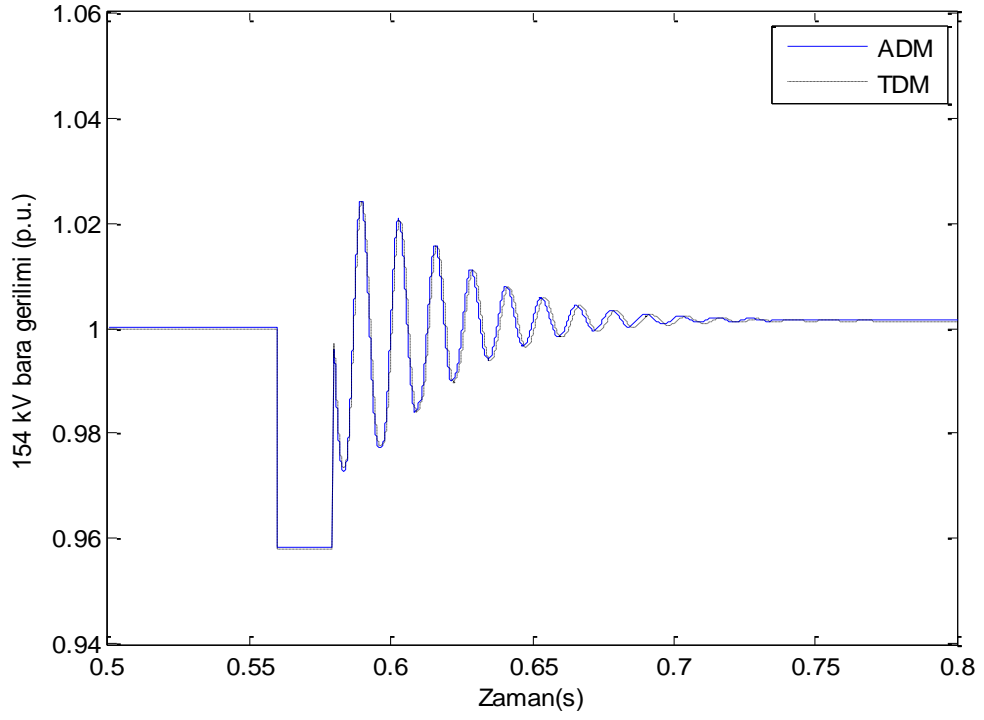
Şekil 6.15. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (34,5 kV kesici açma kapama)



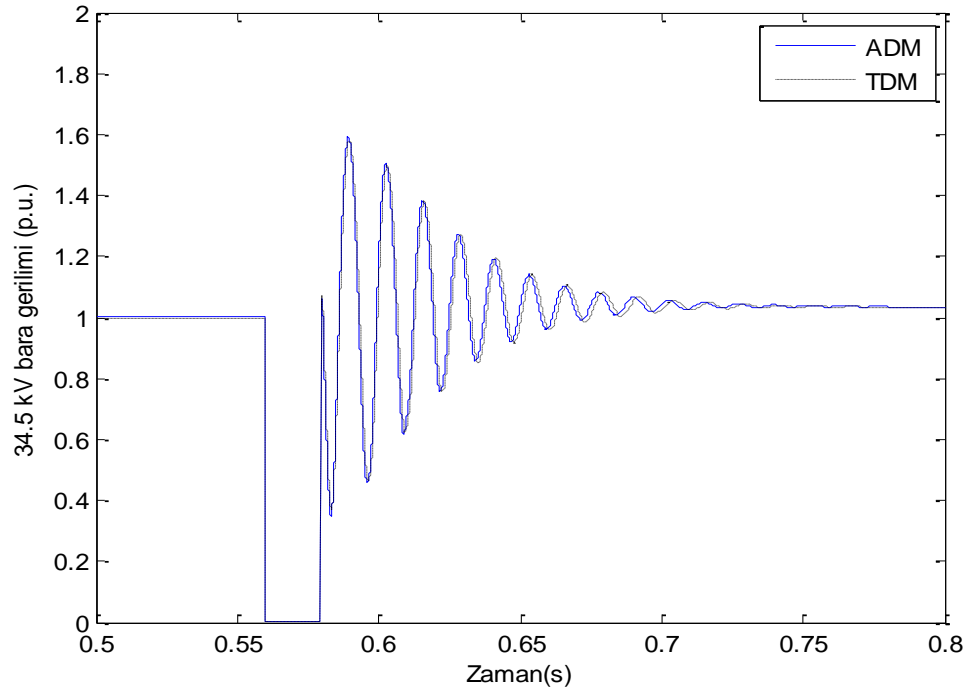
Şekil 6.16. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (34,5 kV kesici açma kapama)

34,5 kV kesici açma kapama durumunda 154 kV bara gerilimi, 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış gerilimlerinde ADM’de sistem kararlı hale gelirken, TDM’de sistemin kararsızlığa gittiği görülmüştür. ÇBAG aktif gücü, ÇBAG açılma hızı, ÇBAG elektriksel moment ve d-q eksen stator akım değişimlerinde ADM tabanında salınımların zamana bağlı olarak ortadan kalktığı görülürken, TDM tabanında salınımların zamana bağlı olarak arttığı ve sistemin kararsız olduğu görülmektedir. kararlı hale geldiği görülürken, TDM’de sistemin kararsızlığa gittiği görülmüştür. 34,5 kV barada kesici açma kapamasında ÇBAG’nin TDM ve ADM’de elektriksel moment değişiminin en çok etkilendiği görülmüştür.

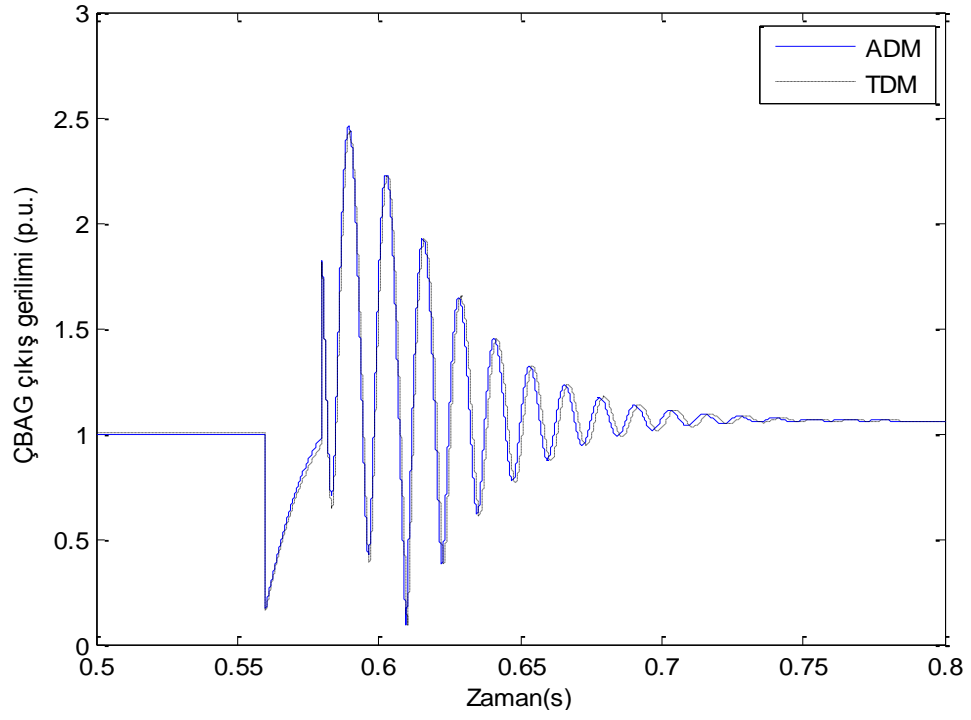
ÇBAG’ün TDM ve ADM’de karşılaştırılmasının yapıldığı diğer bir analiz ise kısa devredir. 34,5kV’luk barada 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arası üç faz kısa devresi oluşturulmuştur. Üç faz kısa devresinde TDM ve ADM karşılaştırılmasında 154 kV bara gerilimi, 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, ÇBAG açılma hızı, ÇBAG elektriksel moment ve ÇBAG d-q eksen stator akım değişimleri Şekil 6.17 ve Şekil 6.24 arasında gösterilmiştir.



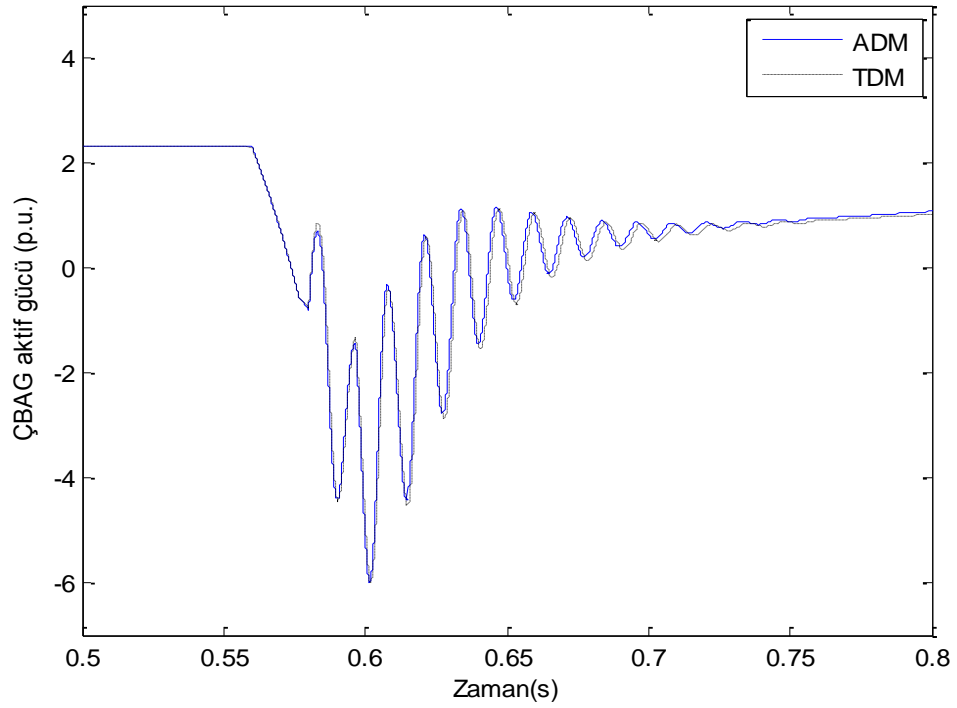
Şekil 6.17. 154 kV bara gerilimi (3 faz arızası)



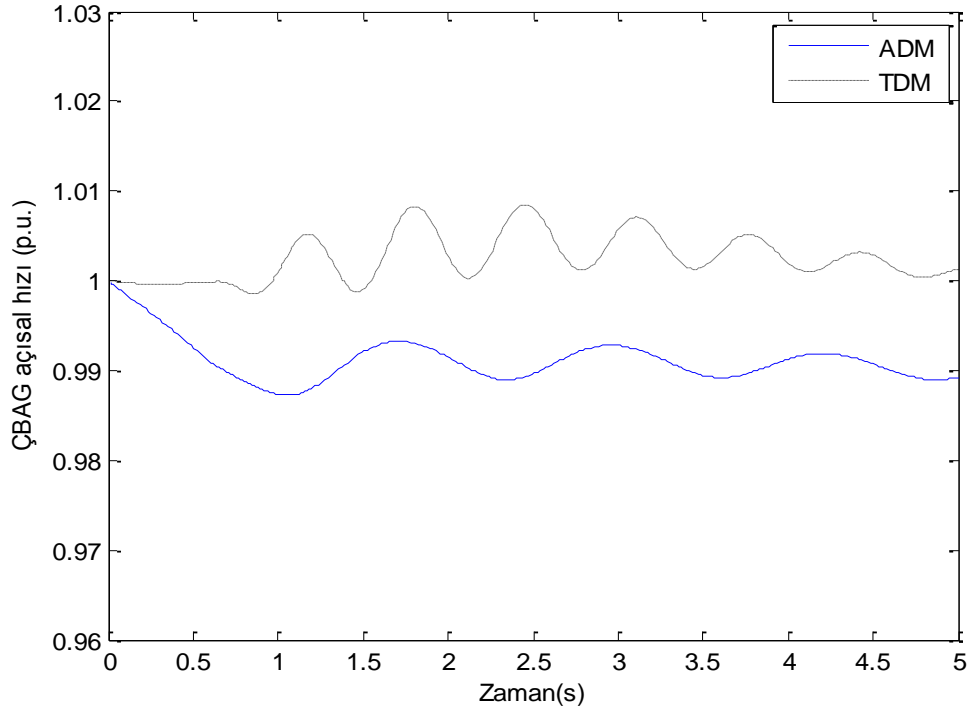
Şekil 6.18. 34,5 kV bara gerilimi (3 faz arızası)



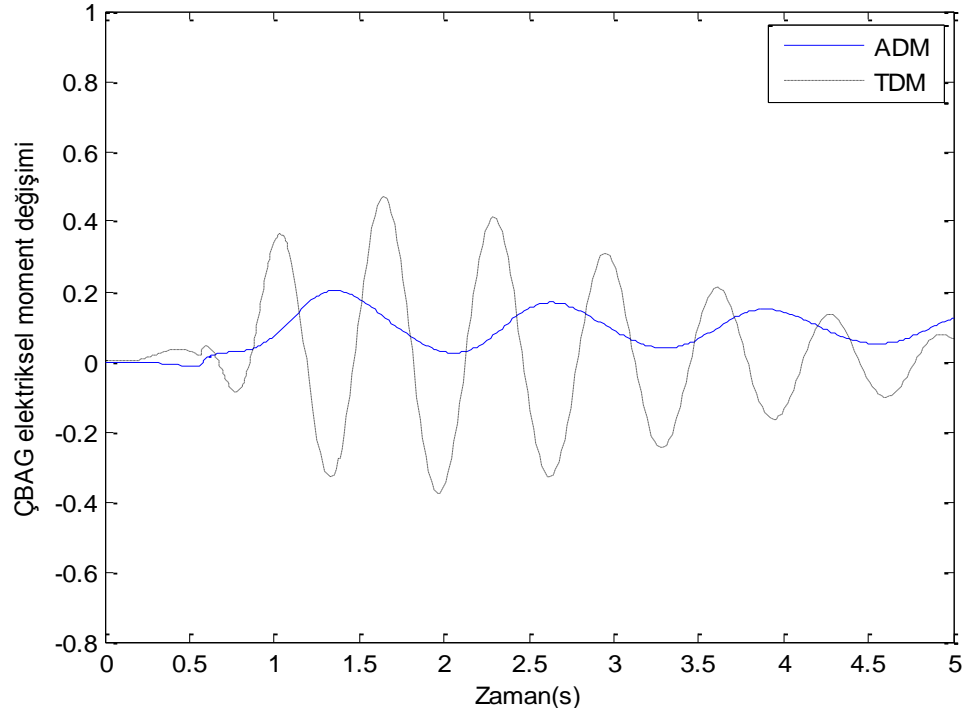
Şekil 6.19. ÇBAG çıkış gerilimi (3 faz arızası)



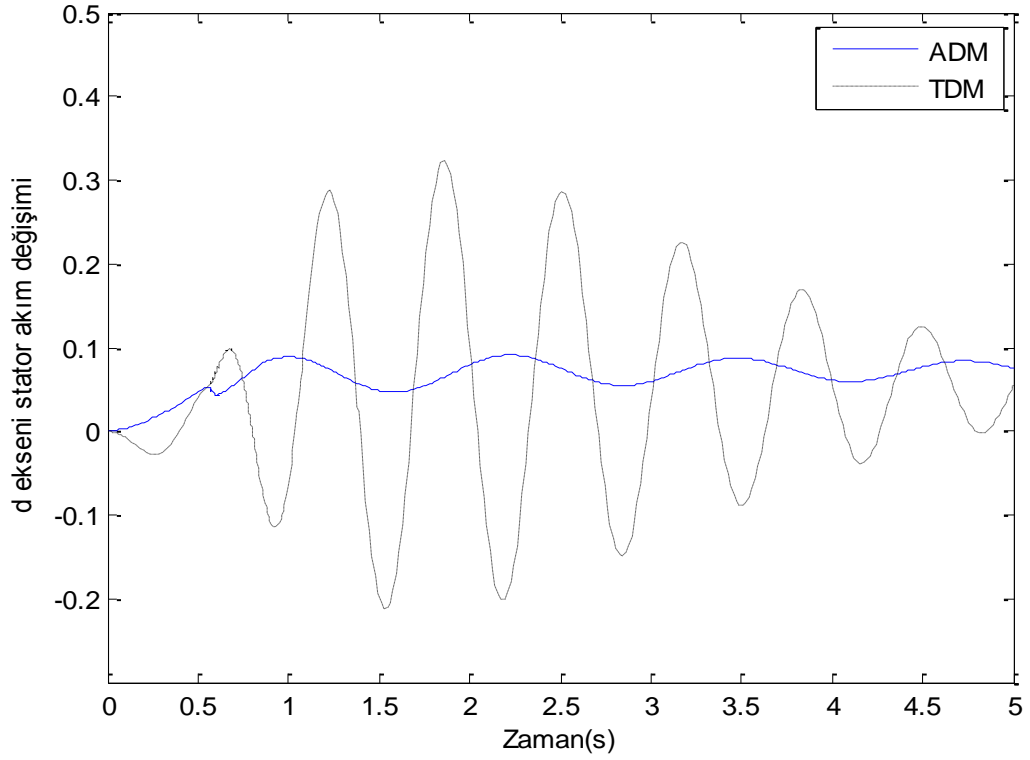
Şekil 6.20. ÇBAG aktif gücü (3 faz arızası)



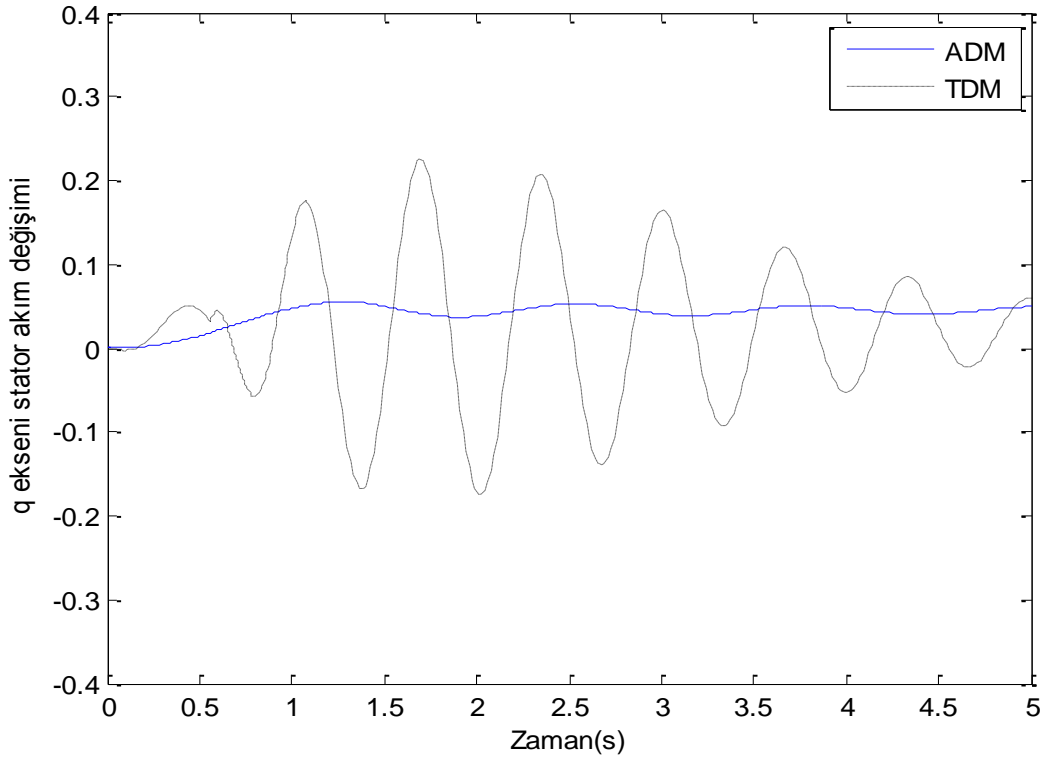
Şekil 6.21. ÇBAG açısal hız değişimi (3 faz arızası)



Şekil 6.22. ÇBAG elektriksel moment değişimi (3 faz arızası)



Şekil 6.23. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (3 faz arızası)

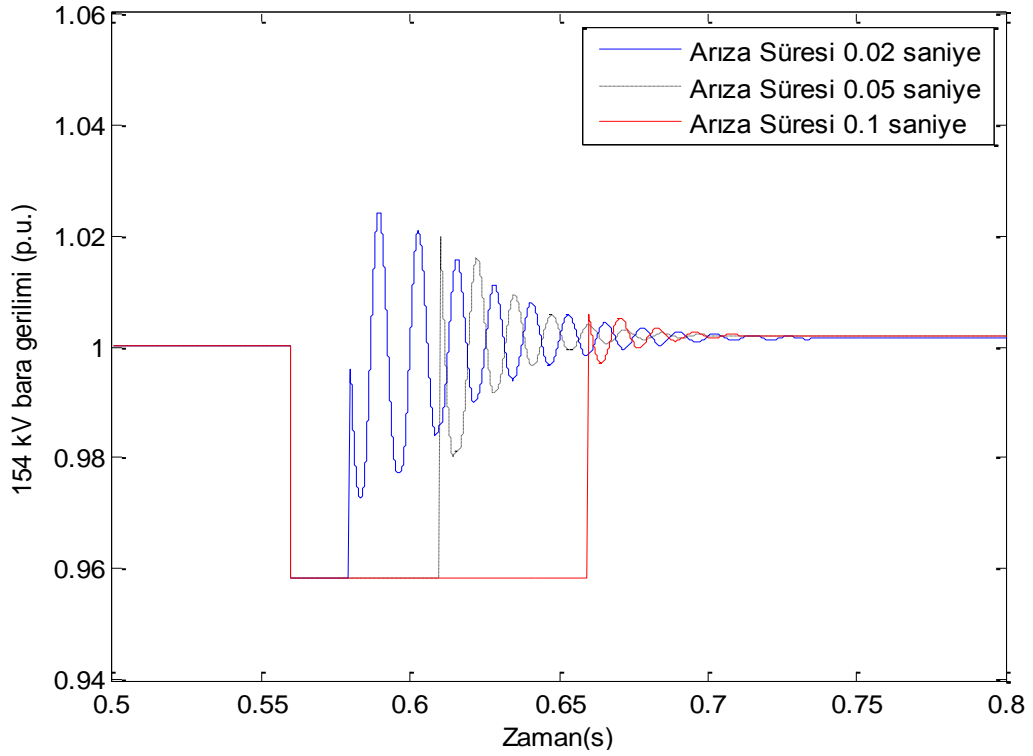


Şekil 6.24. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (3 faz arızası)

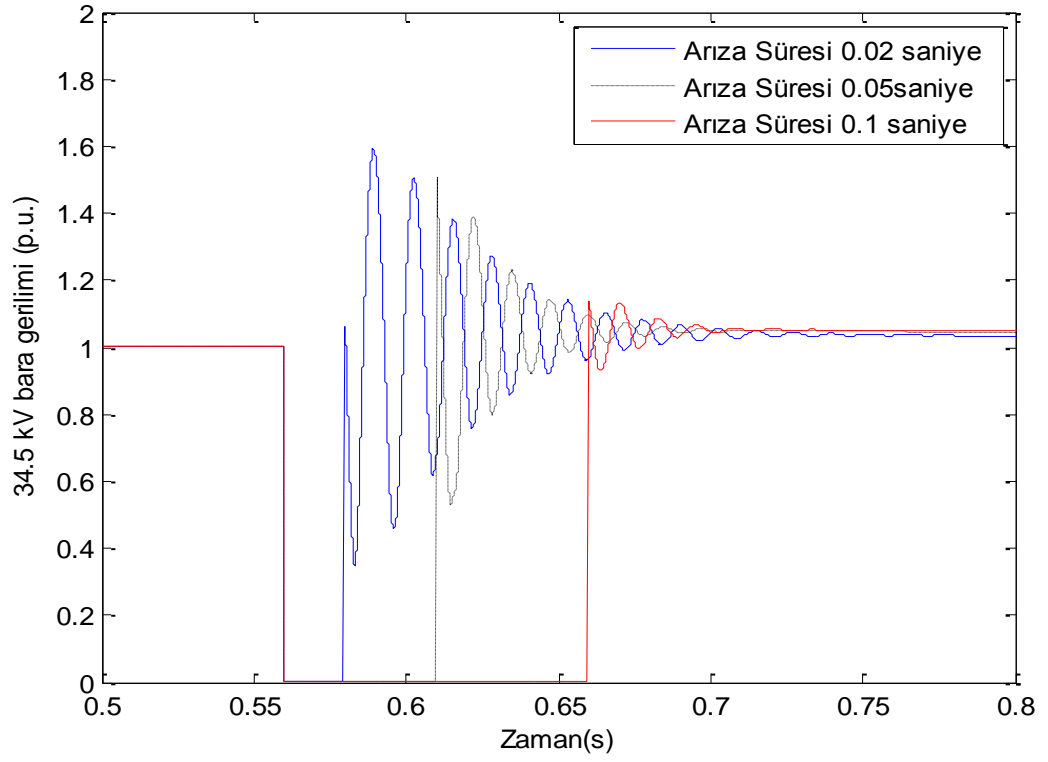
ÇBAG'de 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında meydana gelen üç faz kısa devresinde TDM ve ADM'de 154 kV bara gerilimi, 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG

çıkış geriliminde benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Özellikle 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış geriliminin üç faz kısa devresi sonrasında 2-3 kat kadar tepe değerine çıktığı görülmüştür. ÇBAG aktif gücü, açılma hızı, elektriksel momenti, d-q eksen stator akım değişimlerinde ADM'nin TDM'e nazaran daha kısa zaman içerisinde kararlı hale geldiği görülmüştür. Üç faz kısa devresinde hem TDM hem de ADM'de aktif gücün çok etkilendiği görülmüştür.

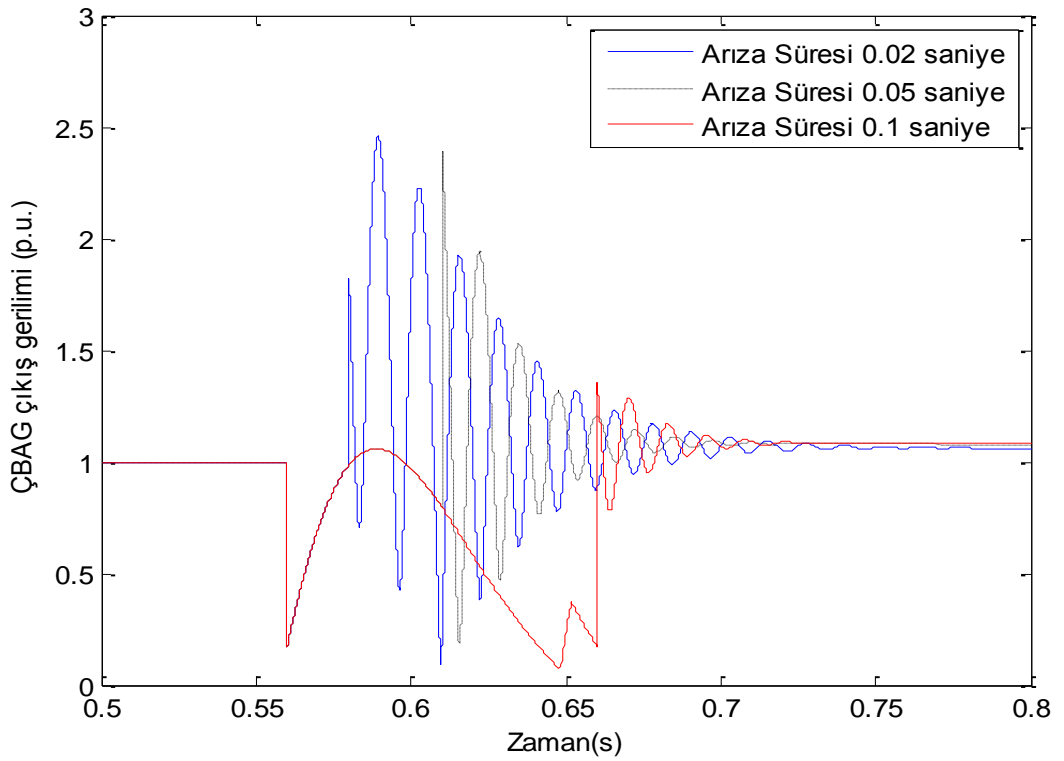
Şebekeye bağlı ÇBAG'nin ADM ile farklı zamanlardaki 34,5kV'luk barada farklı zamanlarda üç faz kısa devre meydana gelmiştir. 0,56-0,58 saniye, 0,56-0,61 saniye ve 0,56-0,66 saniyeler arasında meydana gelen üç faz kısa devresinde 154 kV bara gerilimi, 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, ÇBAG açılma hızı, ÇBAG elektriksel momenti ve ÇBAG d-q eksen stator akım değişimleri Şekil 6.25 ve Şekil 6.32 arasında gösterilmiştir.



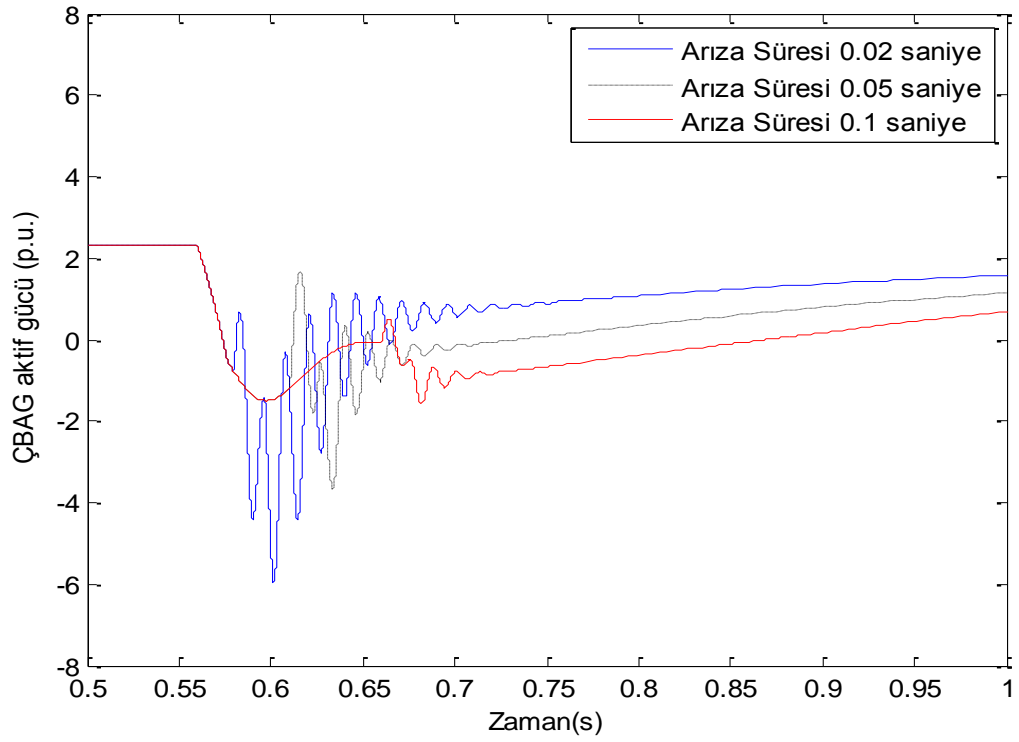
Şekil 6.25. 154 kV bara gerilimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)



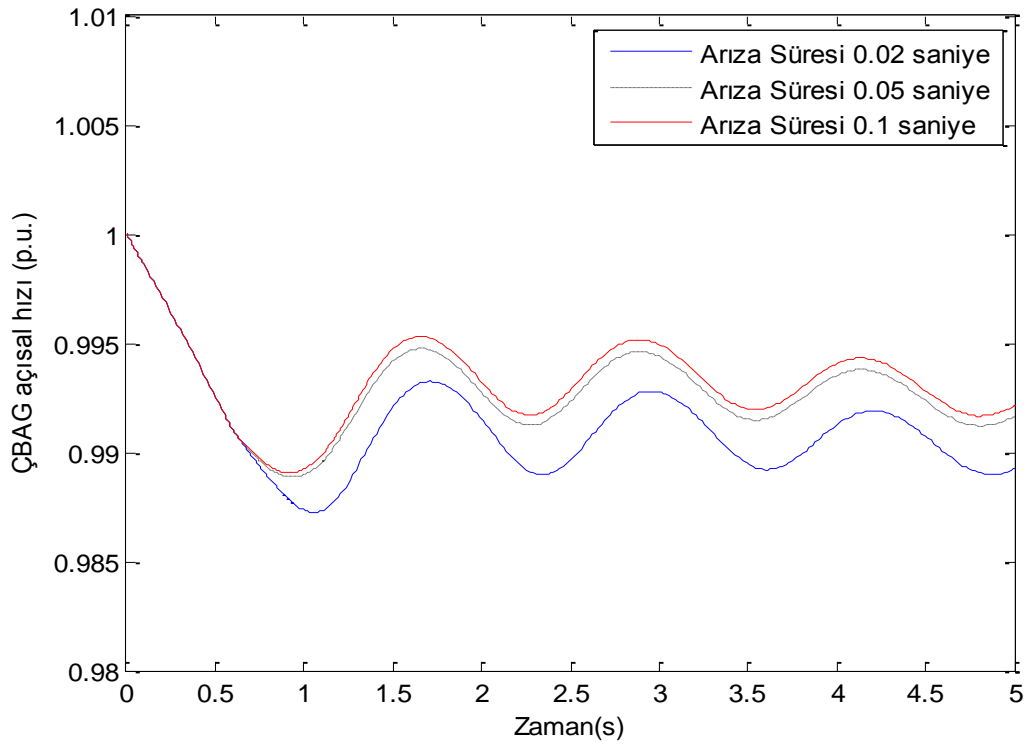
Şekil 6.26. 34,5 kV bara gerilimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)



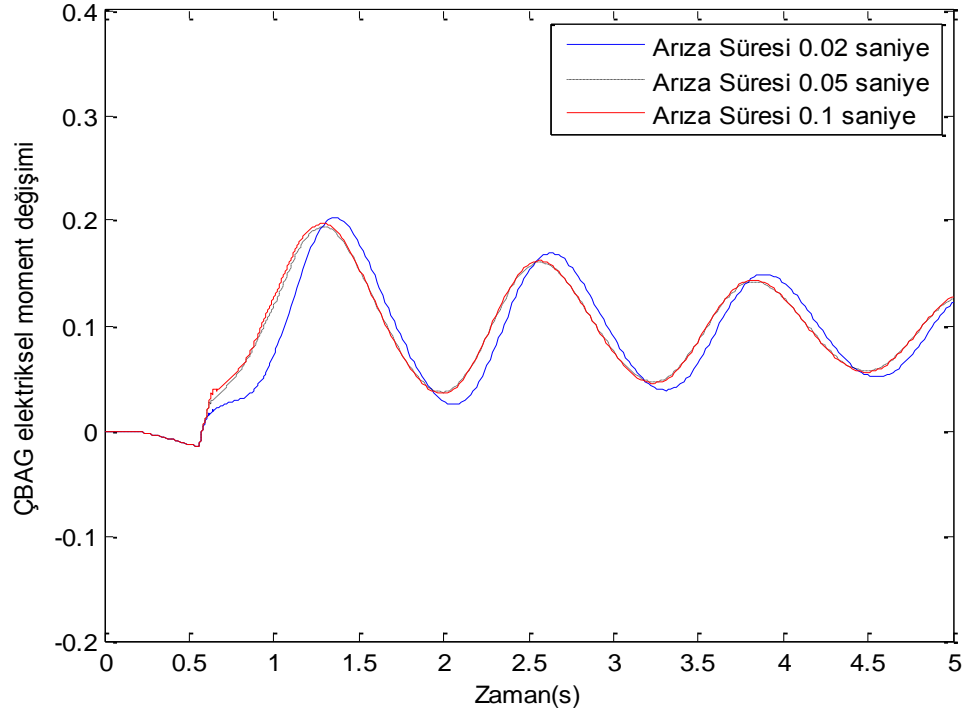
Şekil 6.27. ÇBAG çıkış gerilimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)



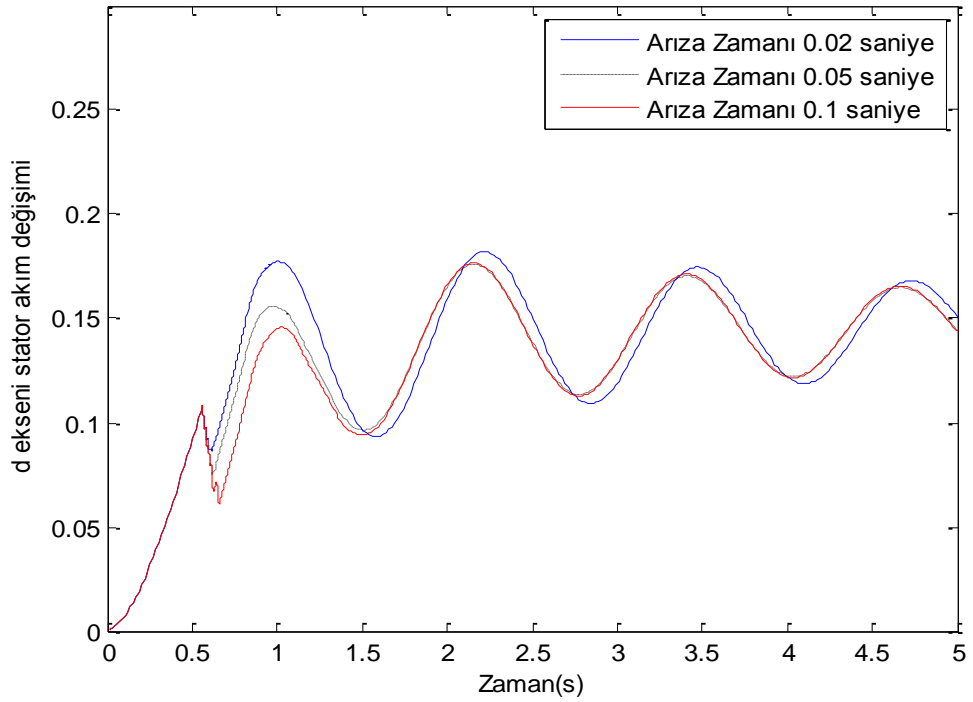
Şekil 6.28. ÇBAG aktif gücü (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)



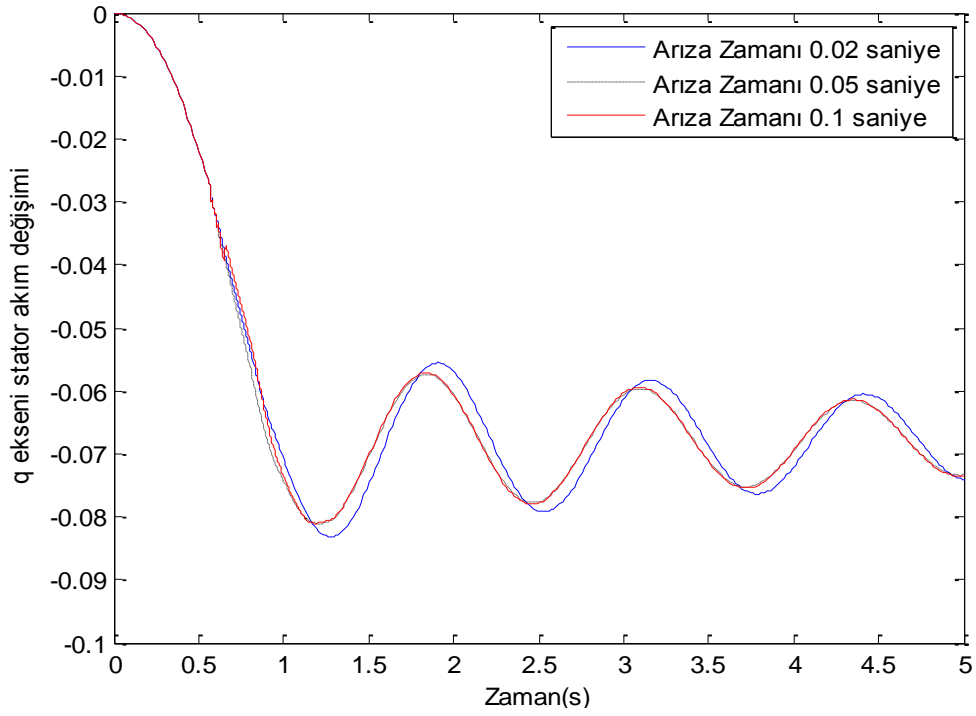
Şekil 6.29. ÇBAG açılmal hız değişimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)



Şekil 6.30. ÇBAG elektriksel moment değişimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)



Şekil 6.31. ÇBAG d eksenli stator akım değişimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)

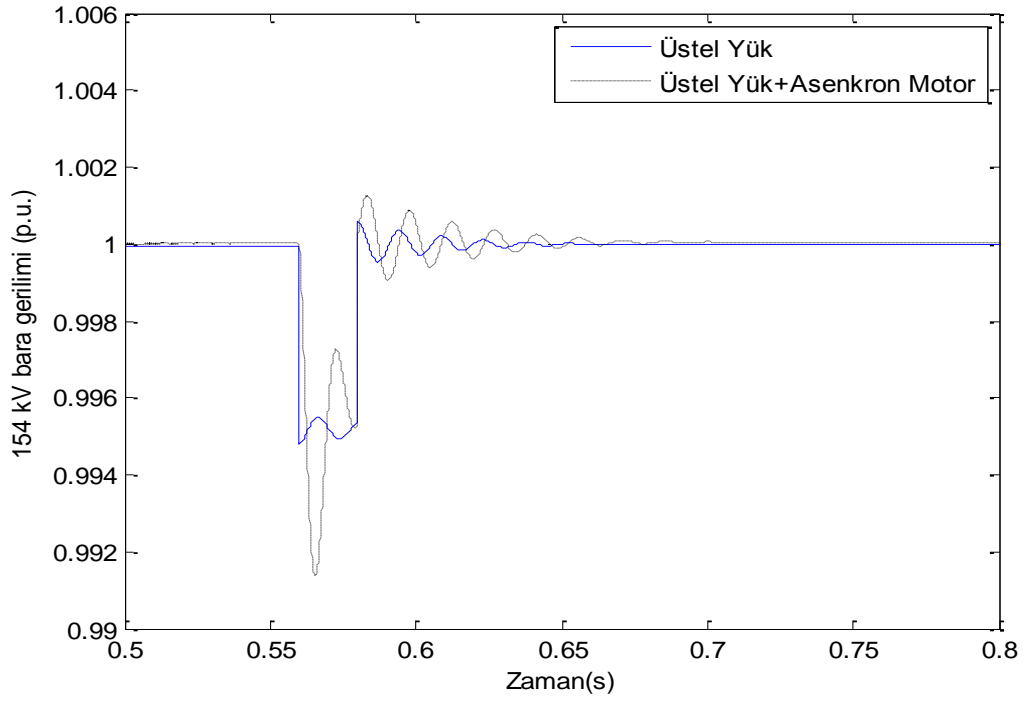


Şekil 6.32. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (farklı zamanlardaki 3 faz arızası)

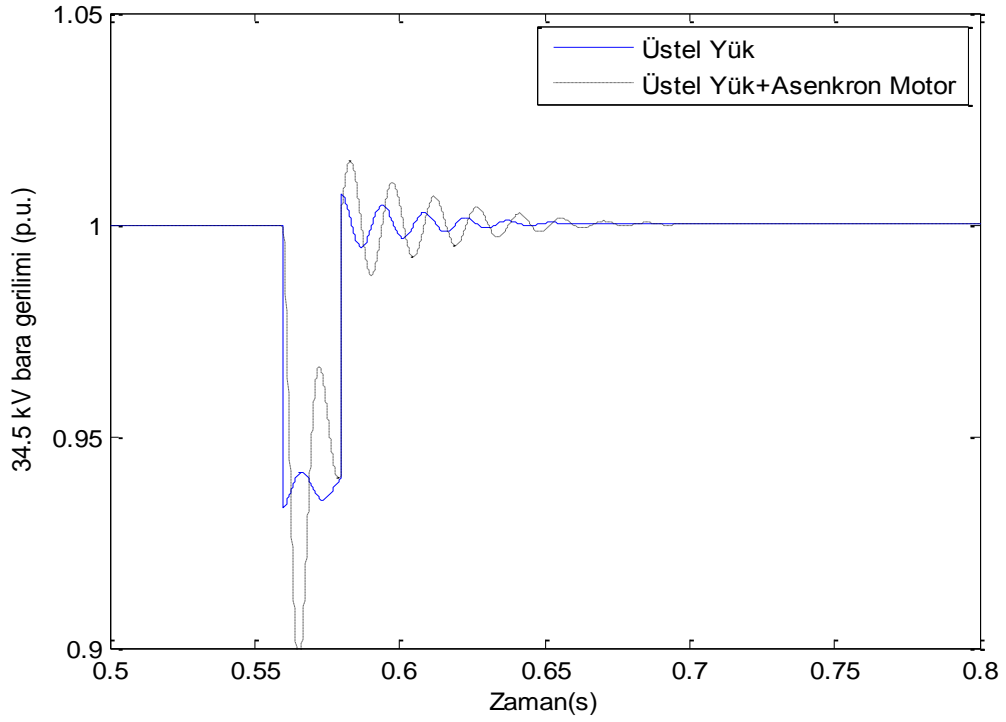
Farklı zamanlardaki üç faz kısa devre analizi incelenen bu bölümde arıza süresinin uzaması ile 154 kV bara gerilim, 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış gerilim değerlerinde salınımların daha az olduğu görülmüştür. 154 kV bara gerilimi üç faz kısa devresinden çok fazla etkilenmezken, 34,5 kV bara gerilim ve ÇBAG çıkış geriliminin farklı zamanlardaki üç faz kısa devresinde tepe değerinin 2-3 kadar arttığı görülmüştür. Arıza süresinin 0,02 saniye olduğu durumda ÇBAG aktif gücü, açılma hızı, elektriksel momentini ve d-q eksen stator akımlarının diğer arıza zamanlarına göre daha çok etkilendiği görülmüştür. Özellikle ÇBAG'nin aktif gücü -6 p.u. civarına kadar düşmüştür.

ÇBAG'nin ADM'de 34,5kV'luk baraya endüstride temsil edilen yüklerden biri olan üstel yük modeli bağlanmıştır. Üstel yük modelinin aktif gücü 0,6 MW, reaktif güç değeri ise 0,55 MVar'dır. Üstel yük modeline ilaveten 1 MW gücünde asenkron motor bağlanmıştır. Üstel yük ve üstel yük+asekron motor 34,5 kV baraya 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında 3 fazlı kesiciler sayesinde devreye alınıp çıkarılmıştır. Bu analiz sonucunda 154 kV bara gerilimi, 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, ÇBAG açılma hızı, ÇBAG elektriksel

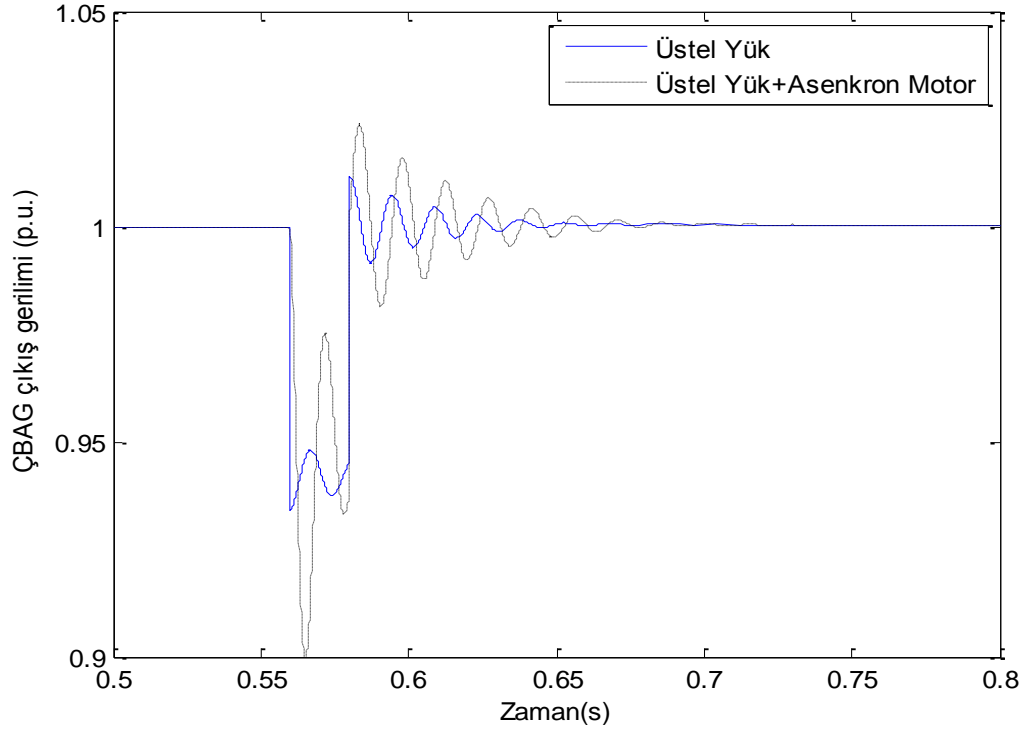
momenti ve ÇBAG d-q eksen stator akım değişimleri Şekil 6.33 ve Şekil 6.40 arasında gösterilmiştir.



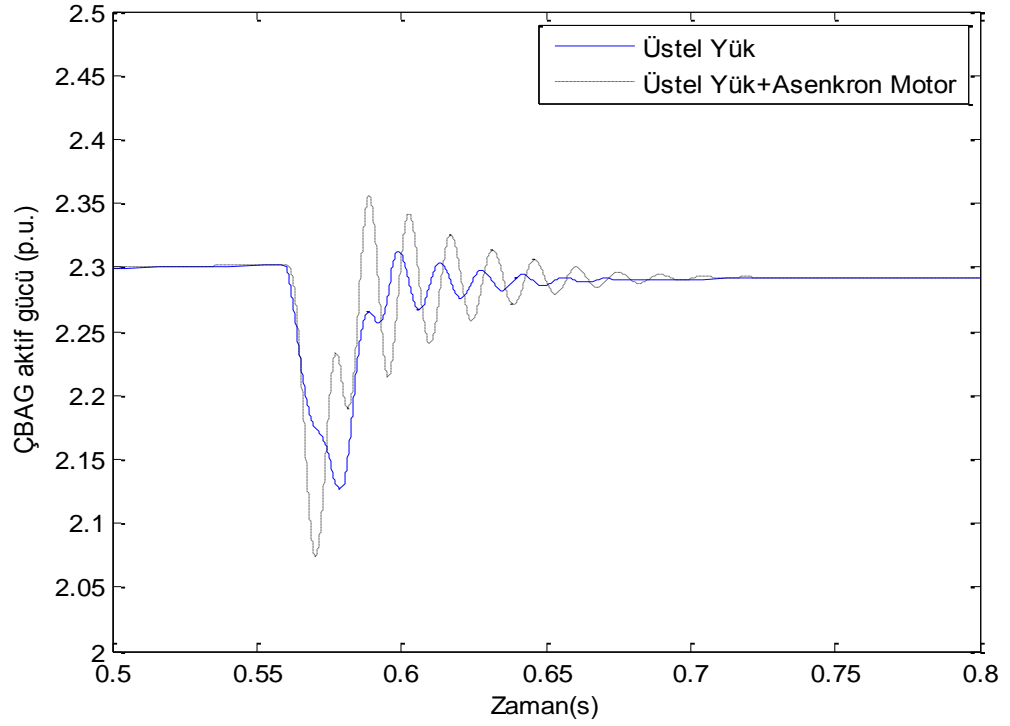
Şekil 6.33. 154 kV bara gerilimi (Üstel yük/asenكرون motor)



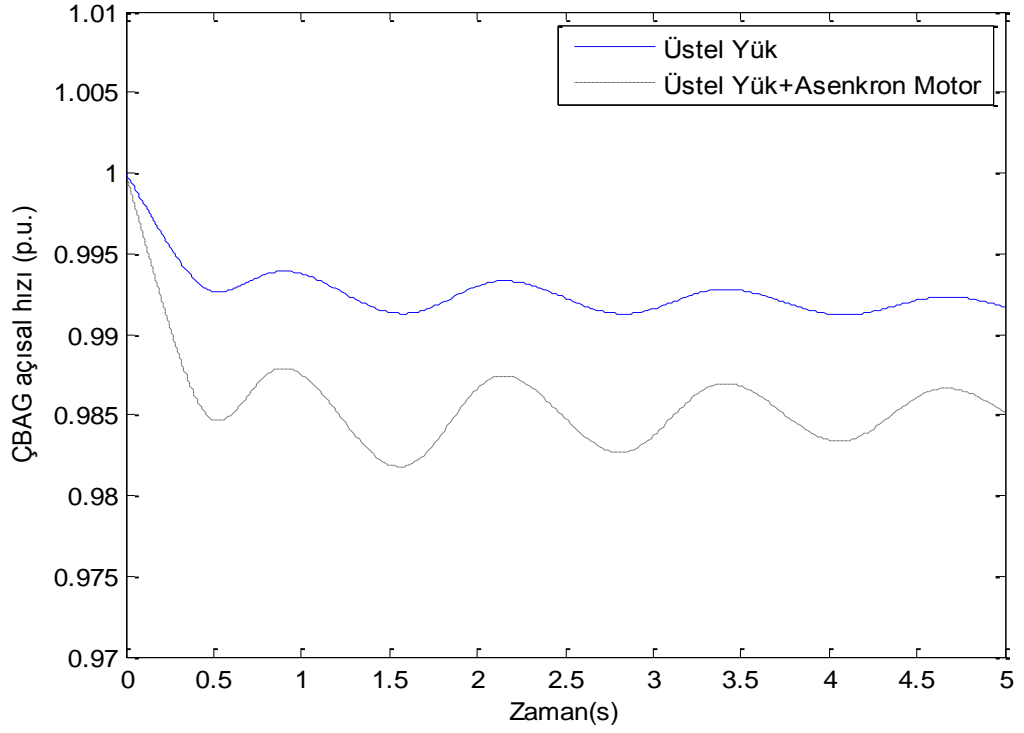
Şekil 6.34. 34,5 kV bara gerilimi (Üstel yük/asenكرون motor)



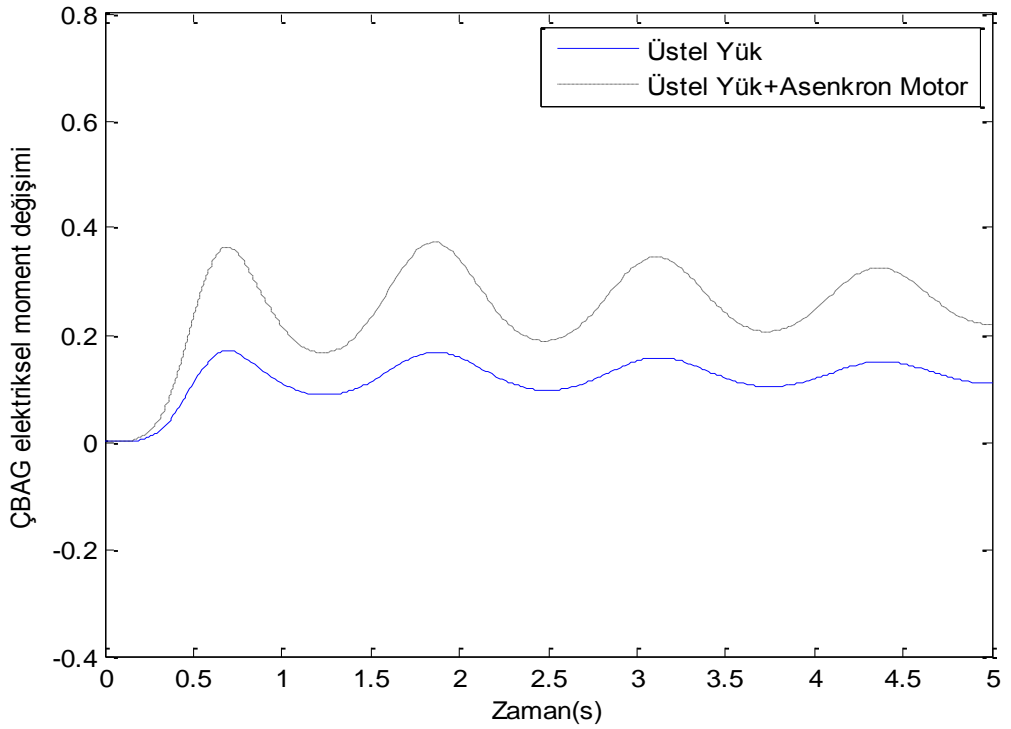
Şekil 6.35. ÇBAG çıkış gerilimi (Üstel yük/asenكرون motor)



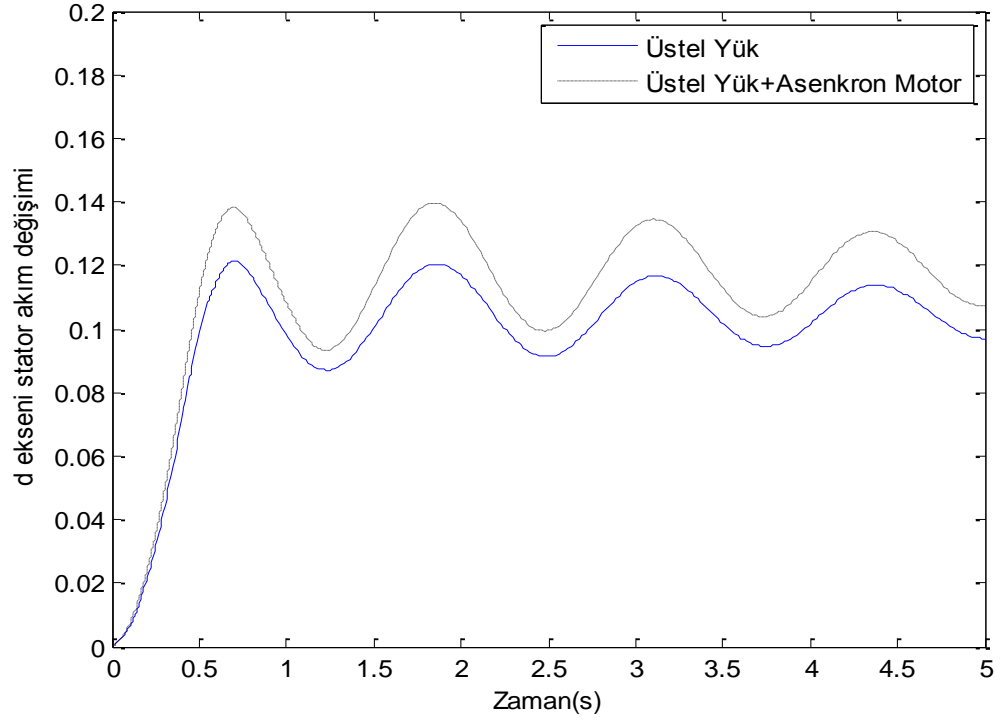
Şekil 6.36. ÇBAG aktif gücü (Üstel yük/asenكرون motor)



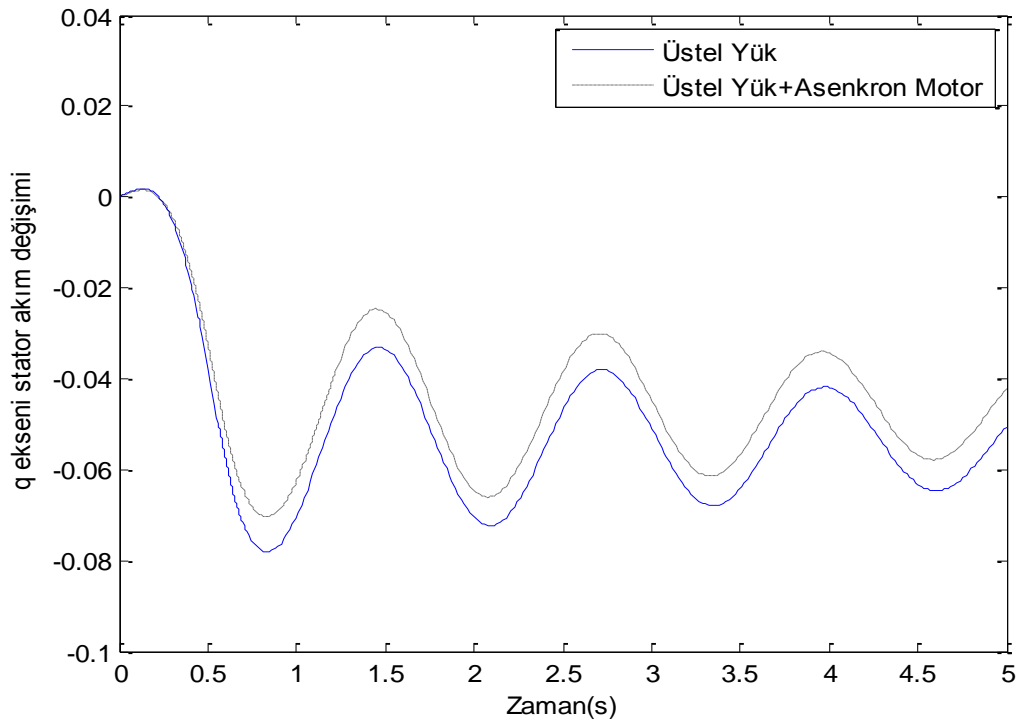
Şekil 6.37. ÇBAG açısız hız değişimi (Üstel yük/asenكرون motor)



Şekil 6.38. ÇBAG elektriksel moment değişimi (Üstel yük/asenكرون motor)



Şekil 6.39. ÇBAG d eksenli stator akım değişimi (Üstel yük/asenkron motor)

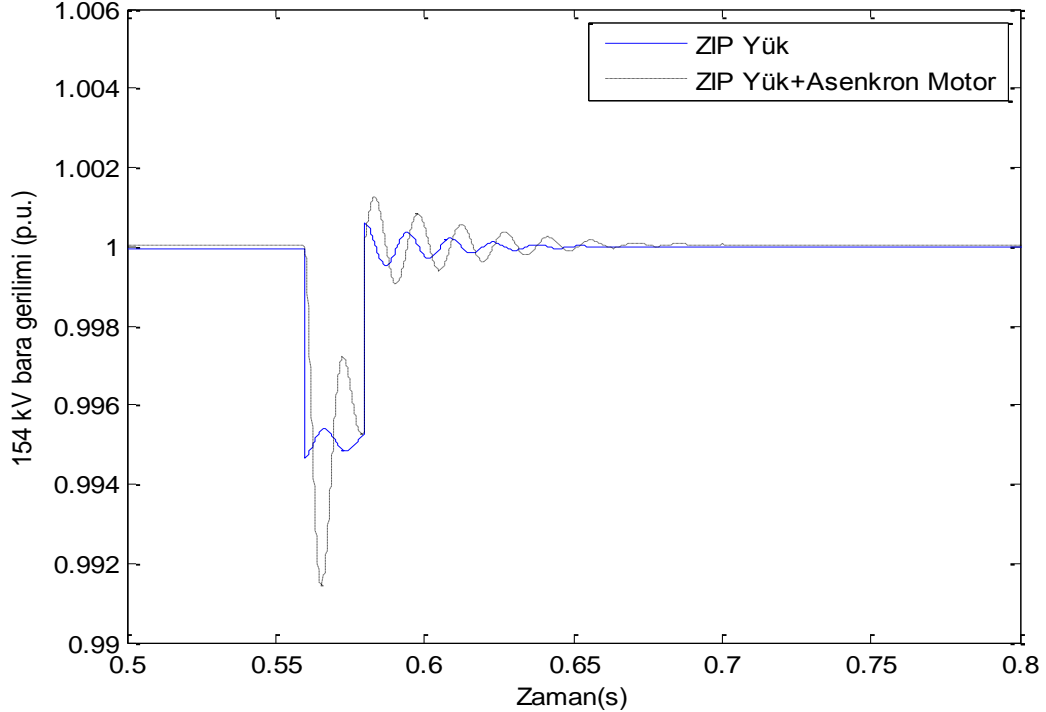


Şekil 6.40. ÇBAG q eksenli stator akım değişimi (Üstel yük/asenkron motor)

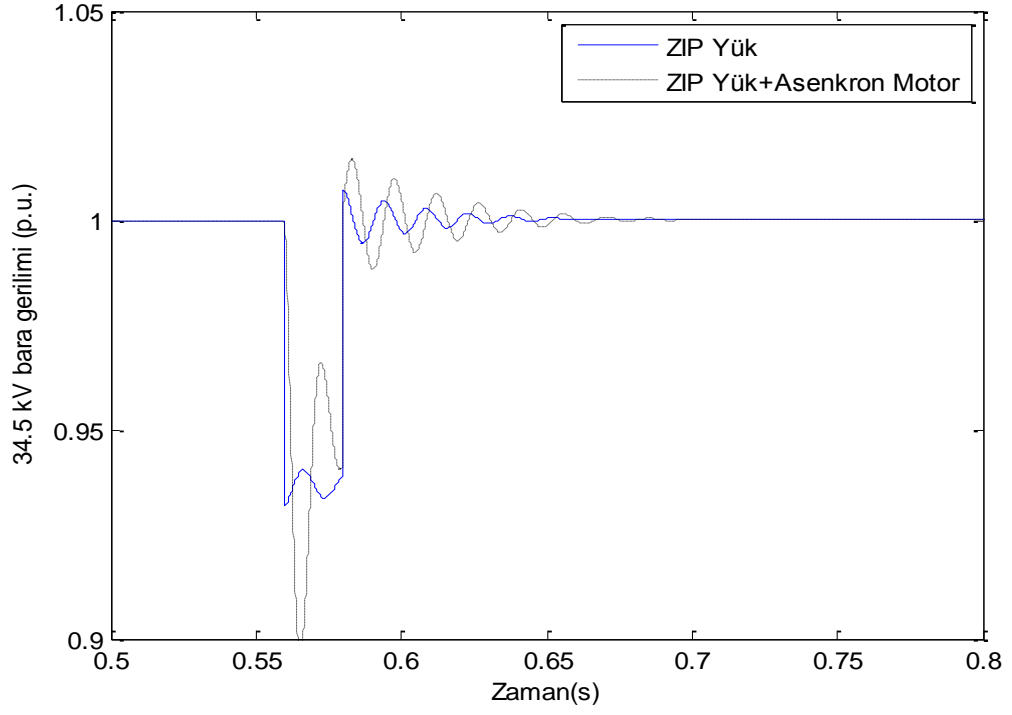
0,6 MW- 0,55 MVA_r gücündeki üstel yük modelinin 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında devreye girmesi ile 154 kV bara geriliminin 0,995 p.u. civarlarına düştüğü görülürken, 34,5 kV bara gerilim ve ÇBAG çıkış gerilim değerlerinin 0,94 p.u.

değerine düştüğü görülmüştür. 0,6 MW- 0,55 MVar gücündeki üstel yük modeline 1 MW gücünde asenkron motorun ilave edilmesi oluşturulan birleşik yük modelinde 154 kV bara geriliminin 0,991 p.u. değerine düştüğü görülürken, 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış geriliminin 0,9 p.u. değerine düştüğü gözlemlenmiştir. ÇBAG aktif gücü, açısal hızı, elektriksel momentini, d-q eksen stator akım değişimlerinde üstel yük+asenkron motor'da salınımların daha fazla olduğu ve sistemin daha geç sürede kararlı hale geldiği görülmüştür.

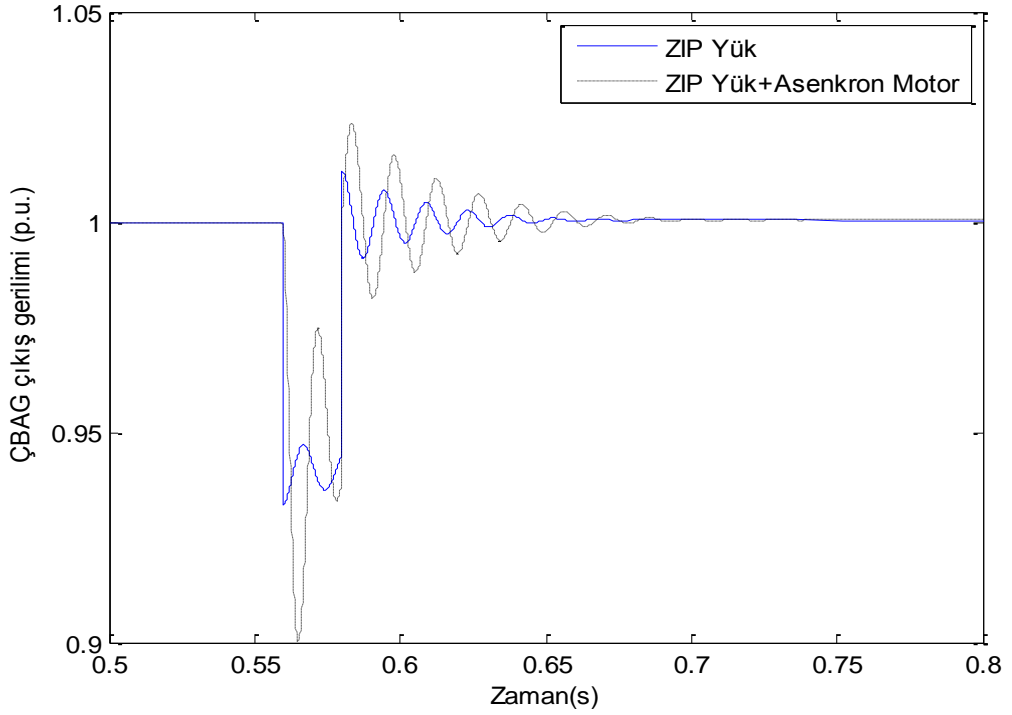
ÇBAG'nin ADM'nde 34,5kV'luk baraya endüstride temsil edilen yüklerden biri olan ZIP yük modeli bağlanmıştır. ZIP yük modelinin aktif gücü 0,6 MW, reaktif güç değeri ise 0,55 MVar'dır. ZIP yük modeline ilaveten 1 MW gücünde asenkron motor bağlanmıştır. ZIP yük ve ZIP yük+asenkron motor 34,5 kV baraya 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında 3 fazlı kesiciler sayesinde devreye alınıp çıkarılmıştır. Bu analiz sonucunda 154 kV bara gerilimi, 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, açısal hızı, elektriksel momentini ve d-q eksen stator akım değişimleri Şekil 6.41 ve Şekil 6.48 arasında gösterilmiştir.



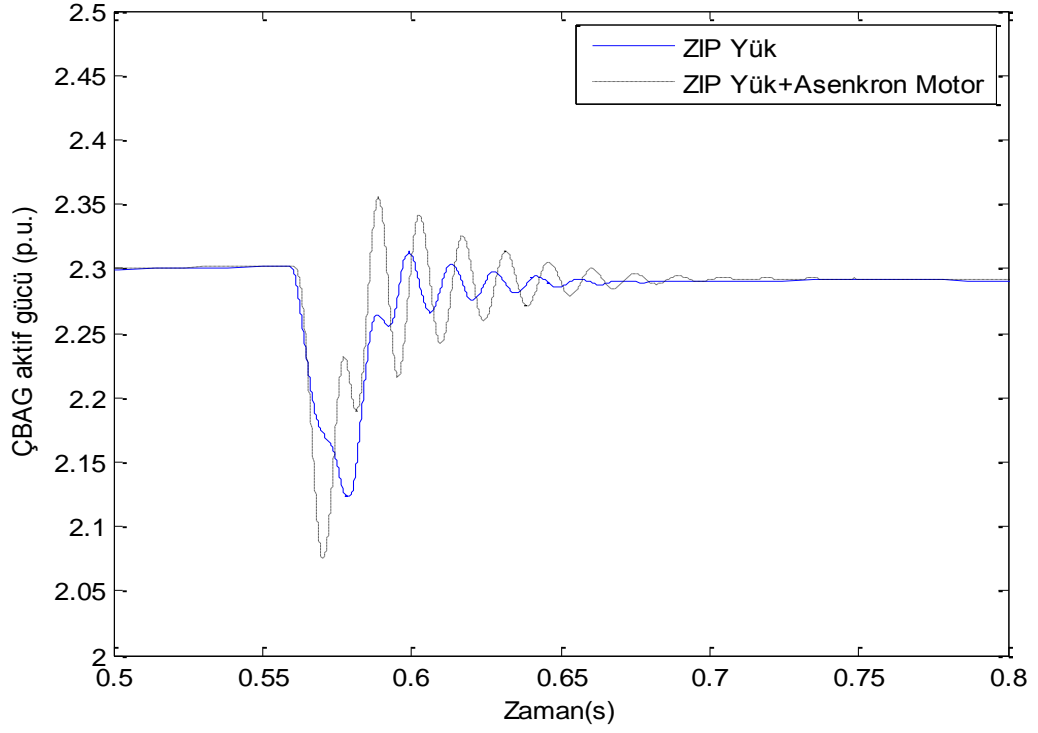
Şekil 6.41. 154 kV bara gerilimi (ZIP yük/asenkron motor)



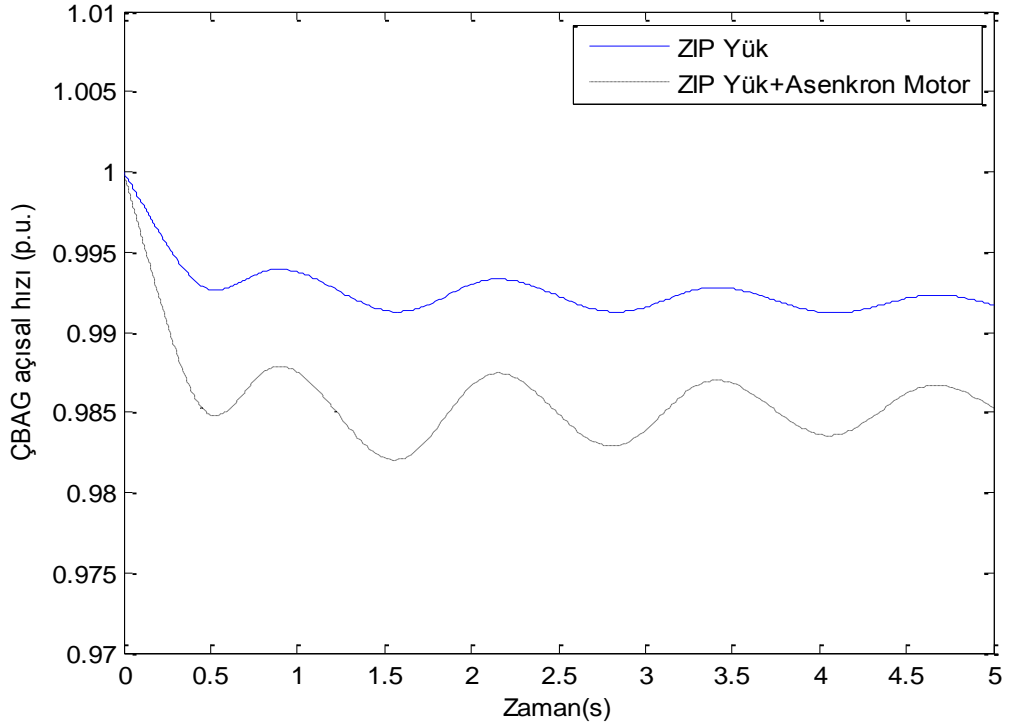
Şekil 6.42. 34,5 kV bara gerilimi (ZIP yk/asenكرون motor)



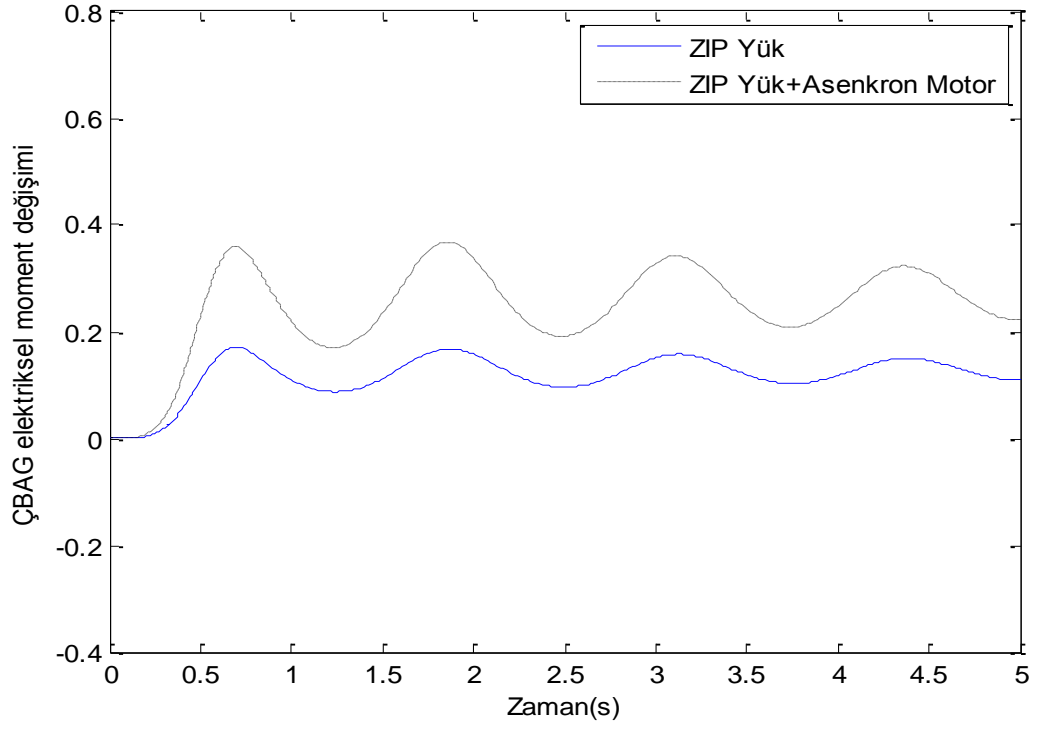
Şekil 6.43. ÇBAG ıkış gerilimi (ZIP yk/asenكرون motor)



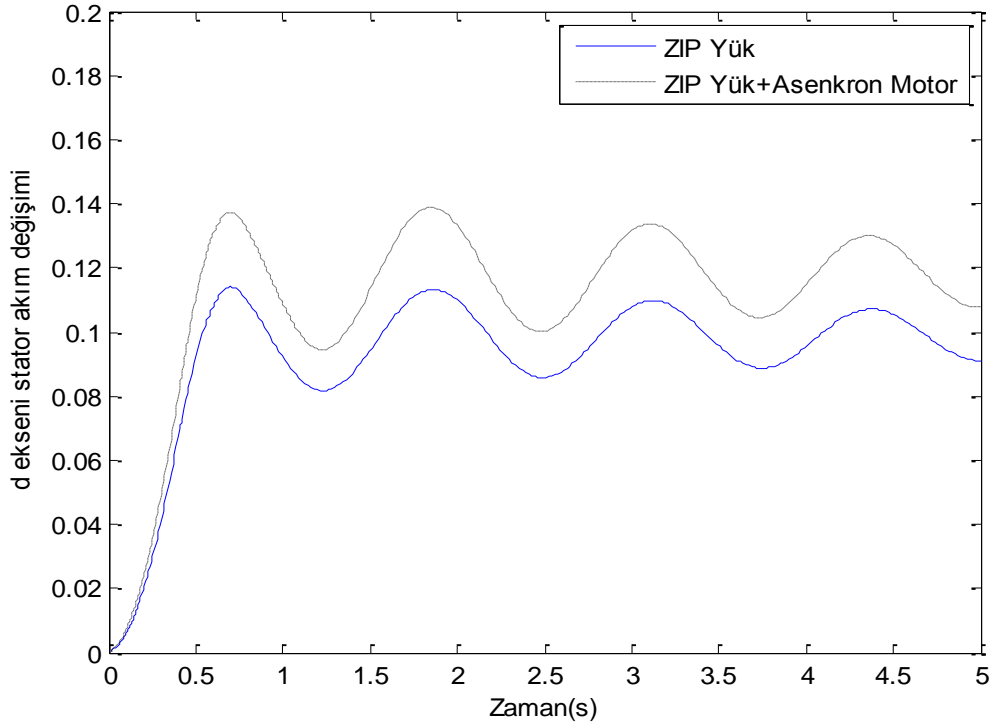
Şekil 6.44. ÇBAG aktif gücü (ZIP yük/asenkron motor)



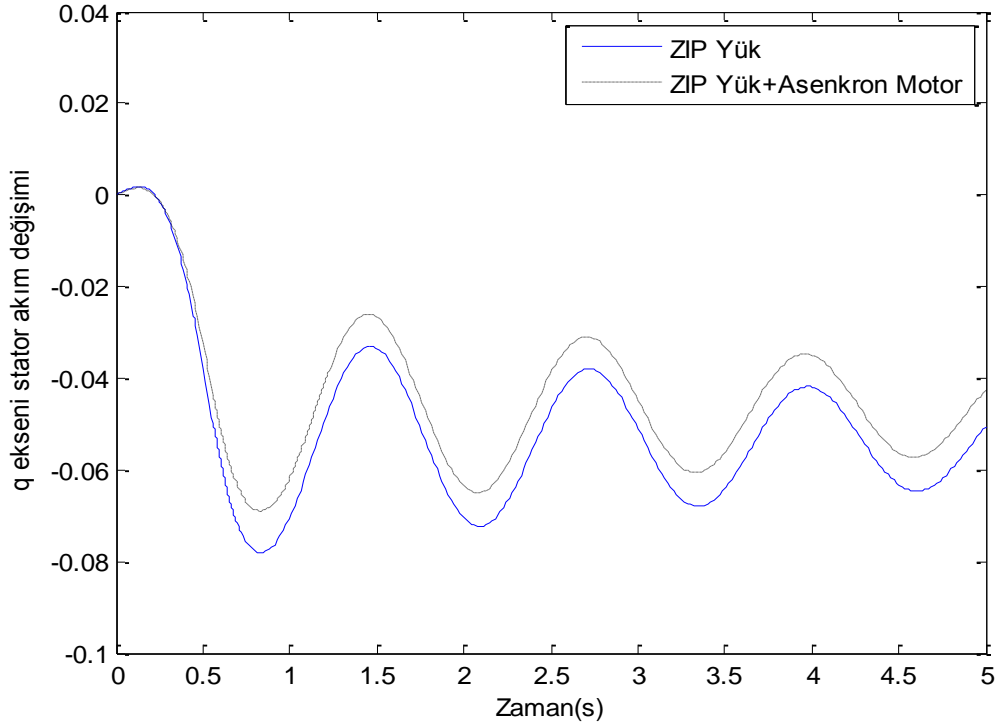
Şekil 6.45. ÇBAG açısal hız değişimi (ZIP yük/asenkron motor)



Şekil 6.46. ÇBAG elektriksel moment değişimi (ZIP yük/asenكرون motor)



Şekil 6.47. ÇBAG d eksenli stator akım değişimi (ZIP yük/asenكرون motor)



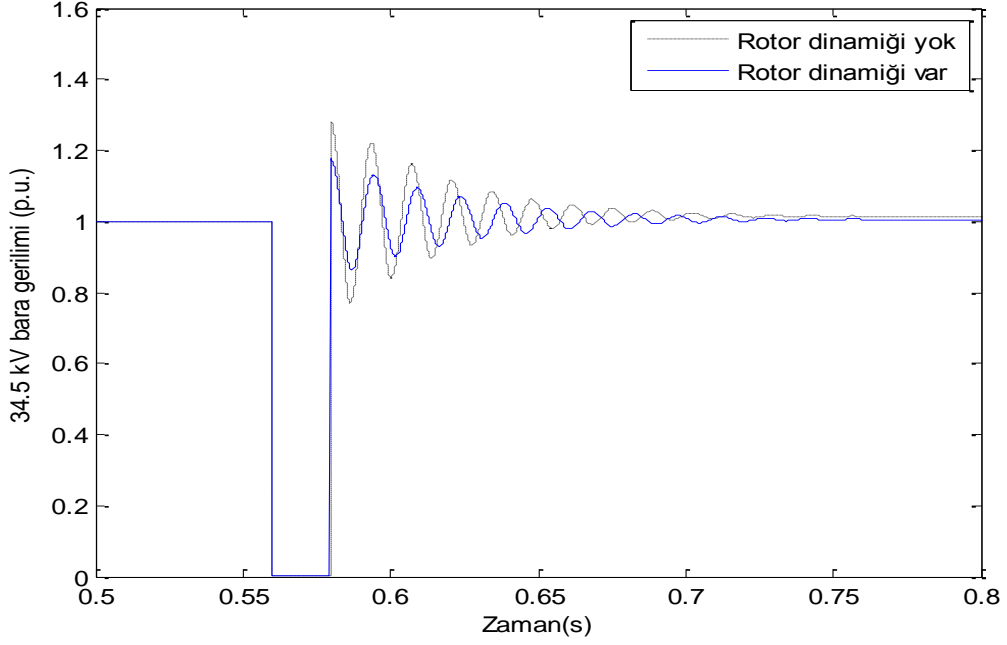
Şekil 6.48. ÇBAG q eksenli stator akım değişimi (ZIP yük/asenكرون motor)

0,6 MW-0,55 MVar gücündeki ZIP yük modelinin 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında devreye girmesi ile 154 kV bara geriliminin 0,995 p.u. civarlarına düştüğü görülürken, 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış gerilim değerlerinin 0,94 p.u. değerine düştüğü görülmüştür. 0,6 MW-0,55 MVar gücündeki ZIP yük modeline 1 MW gücünde asenkron motorun ilave edilmesi oluşturulan birleşik yük modelinde 154 kV bara geriliminin 0,991 p.u. değerine düştüğü görülürken, 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış geriliminin 0,9 p.u. değerine düştüğü gözlemlenmiştir. ÇBAG aktif gücü, ÇBAG açısal hızı, ÇBAG elektriksel momentini, ÇBAG d-q eksen stator akım değişimlerinde ZIP yük+asenكرون motor'da salınımların daha fazla olduğu ve sistemin daha geç sürede kararlı hale geldiği görülmüştür.

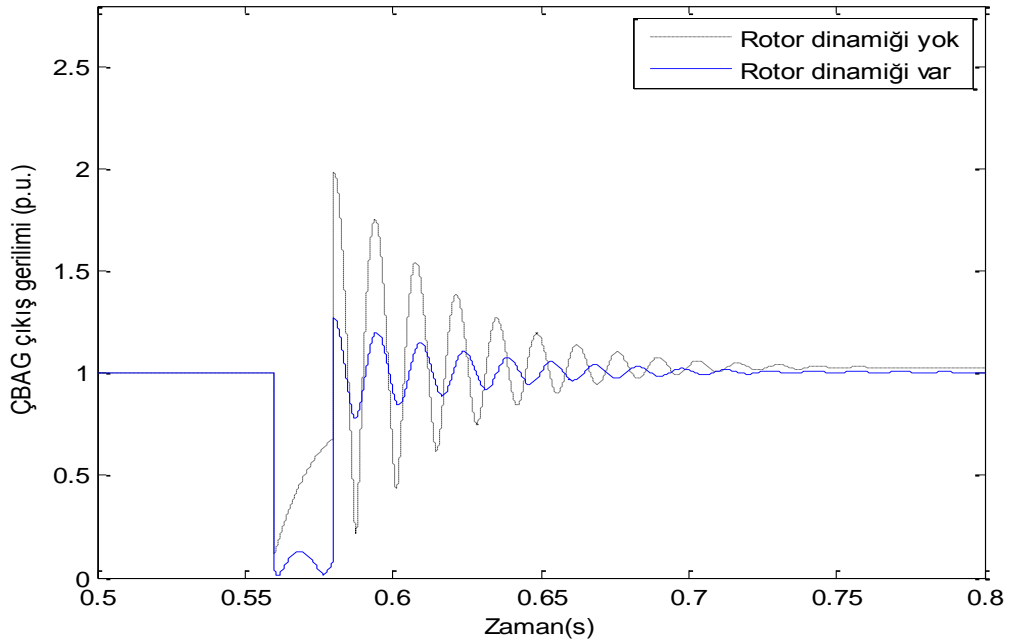
6.2. Rotor Dinamiği Modellemesi ile Geçici Durum Analiz Sonuçları

Bu bölümde rotor dinamiği modellenmiş ÇBAG için geçici durum analizi sonuçları ele alınmıştır. Bu bölümde benzetim çalışmasının ilk analizinde 34,5kV'luk barada 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arası üç faz kısa devresi meydana gelmektedir. Üç faz kısa devresinde ÇBAG'ün ADM tabanlı rotor dinamik modellemesi geliştirilmiştir. Hem stator hem de rotor devresinin dinamik modellemesinin yapılması ile yalnızca stator dinamik modellemesi olan ADM'in karşılaştırılması yapılmıştır. Üç faz kısa

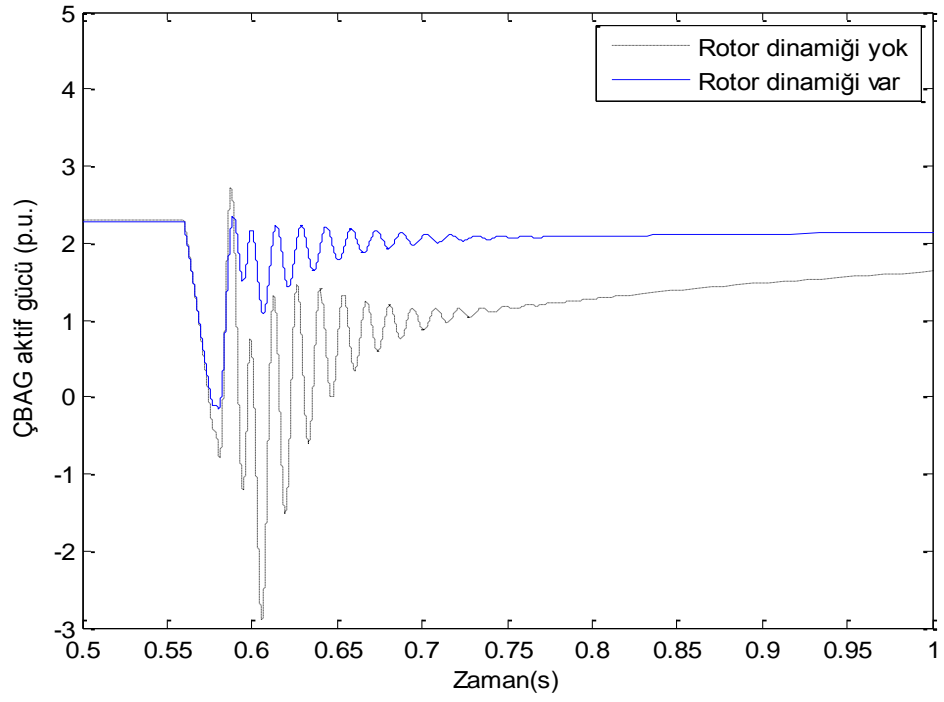
devresinde 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, açılal hızı, elektriksel momenti ve d-q eksen stator akım değışimleri Şekil 6.49 ve Şekil 6.55 arasında gösterilmiştir.



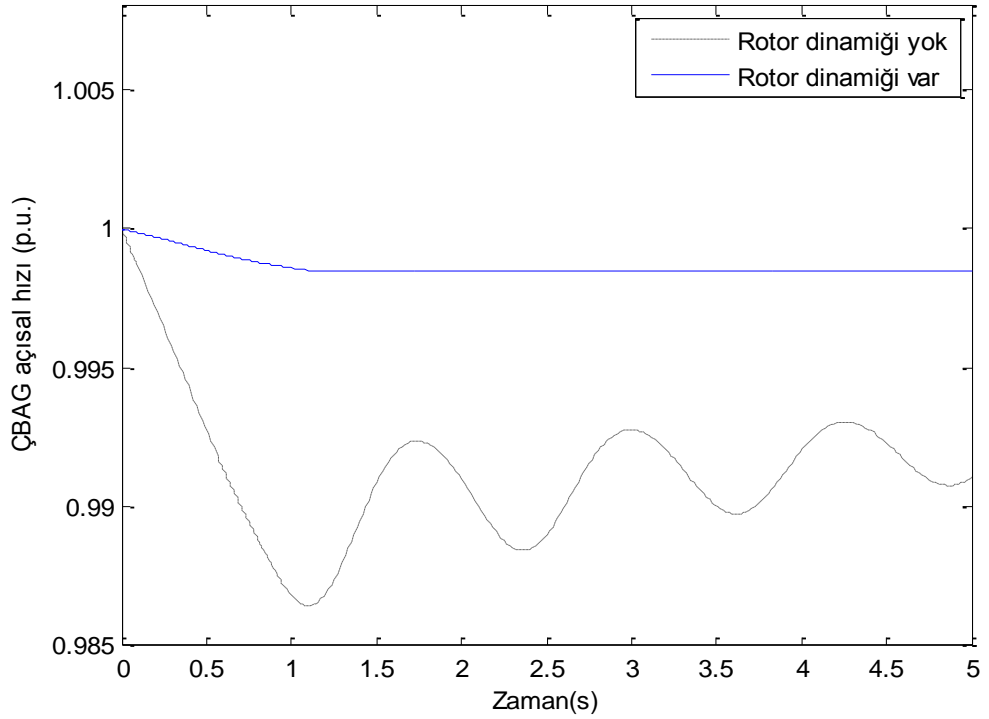
Şekil 6.49. 34,5 kV bara gerilimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)



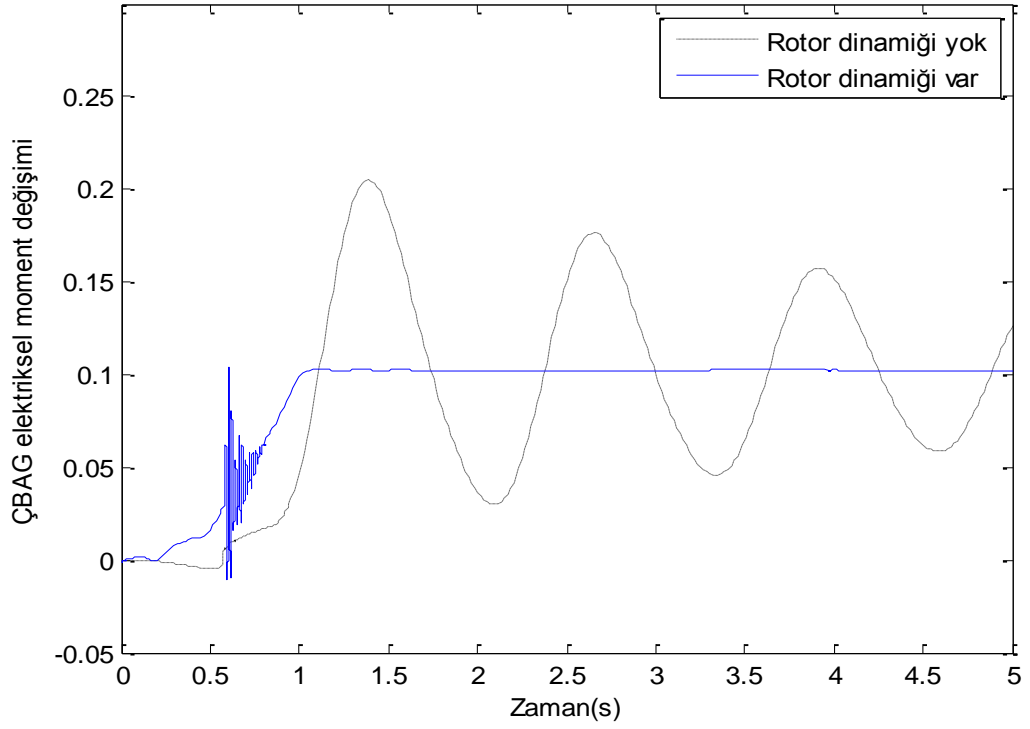
Şekil 6.50. ÇBAG çıkış gerilimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)



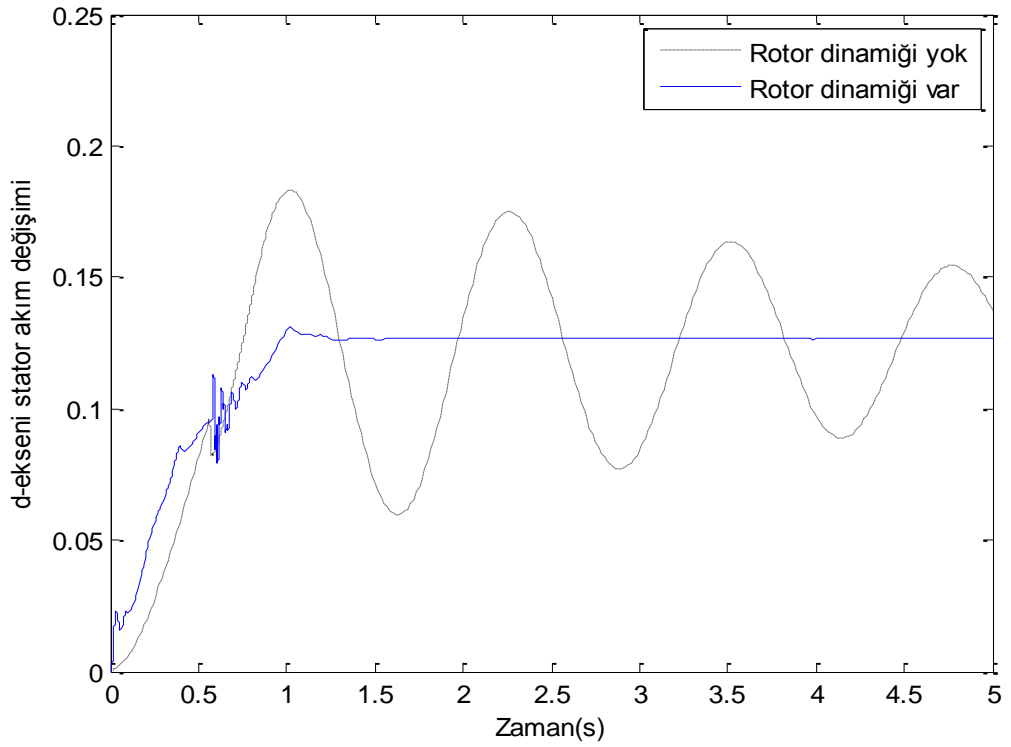
Şekil 6.51. ÇBAG aktif gücü (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)



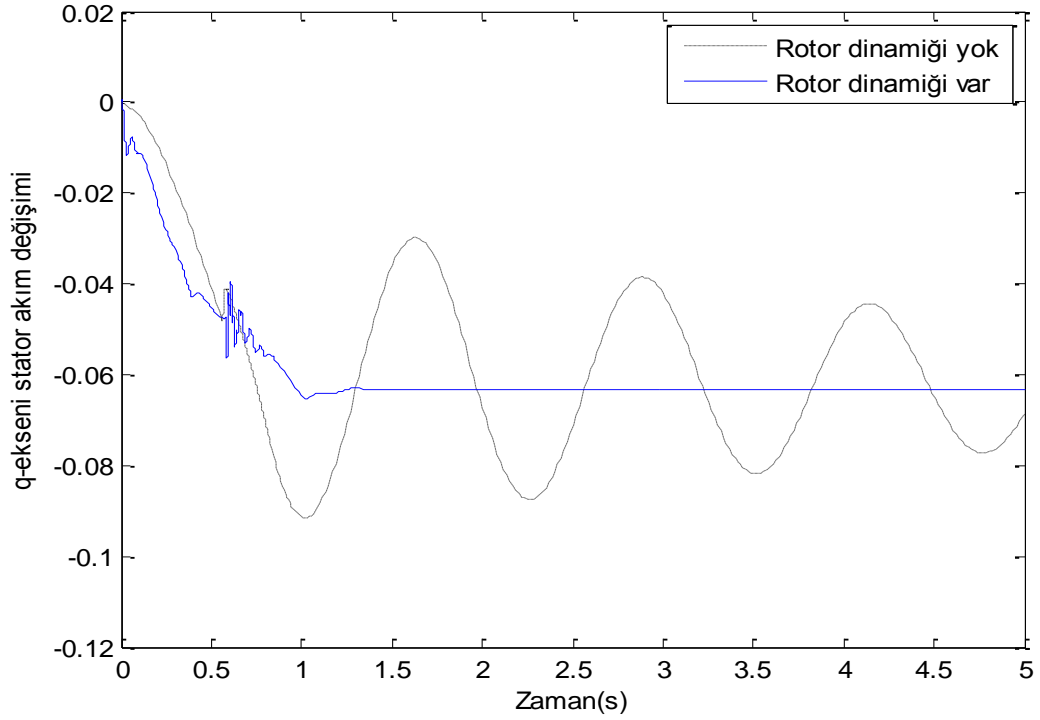
Şekil 6.52. ÇBAG açısal hız değişimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)



Şekil 6.53. ÇBAG elektriksel moment değişimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)



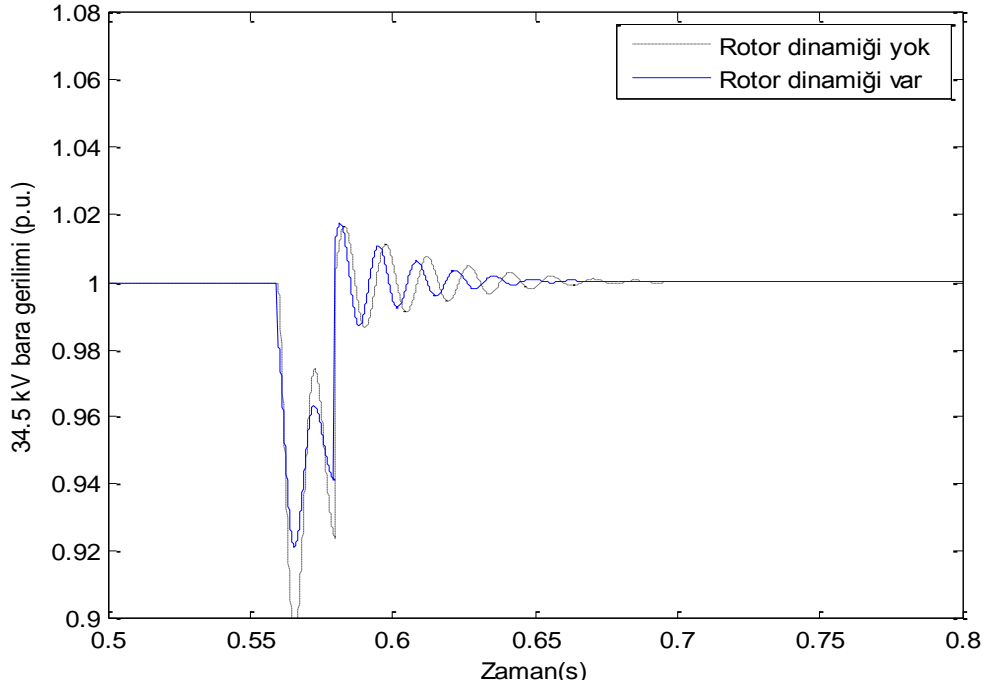
Şekil 6.54. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)



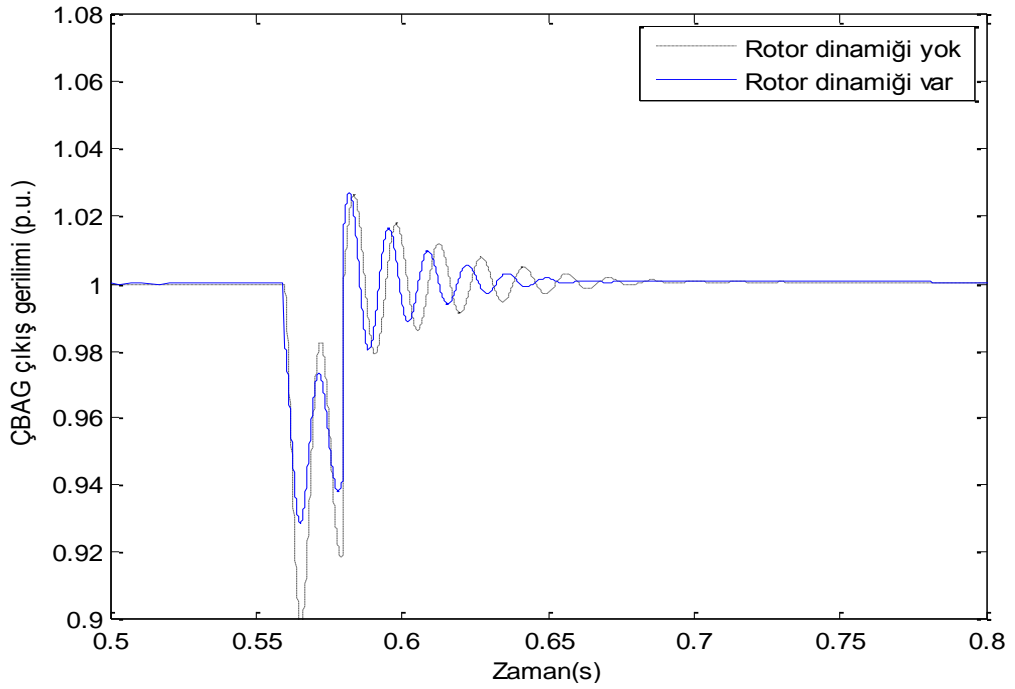
Şekil 6.55. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (3 faz arızası ile rotor dinamiği kullanımı)

0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında 34,5 kV barada meydana gelen üç faz kısa devresinde ADM'nin RDM ile kullanıldığı durumda 34,5 kV bara geriliminde ve ÇBAG çıkış geriliminde tepe değerlerinin azaldığı ve sistemin daha kısa zaman içerisinde kararlı hale geldiği görülmüştür. ADM'de -3 p.u. civarına düşen aktif gücün, RDM'nin geliştirilmesi ile 0 p.u. civarında bir değer aldığı görülmüştür. ÇBAG açılma hızı, elektriksel momenti, d-q eksen stator akım değişimlerinde RDM'nin kullanılması ile sistemde salınımların az olduğu ve kısa süre içerisinde sistemin kararlı olduğu görülmüştür.

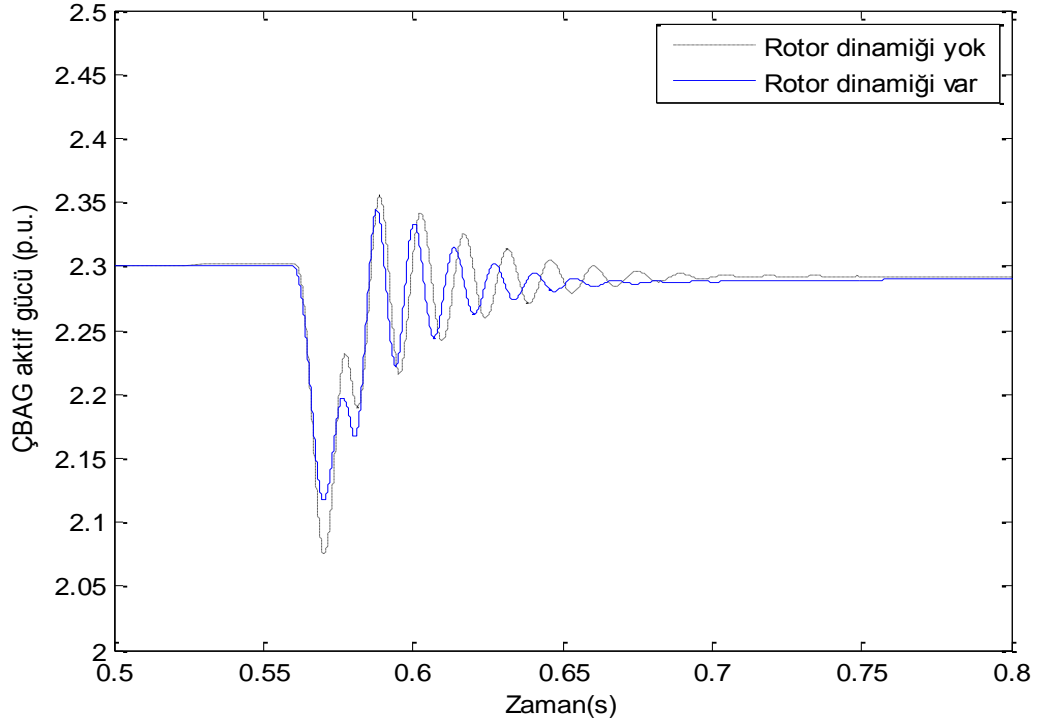
ÇBAG'nin ADM tabanında RDM'in geliştirilmesi ile yapılan üçüncü 34,5kV'luk baraya aktif ve reaktif güç denklemlerine bağlı olarak modellenen 0,6 MW-0,55 MVAR gücünde üstel yük ve ZIP yüklere 1 MW gücünde asenkron motor ilave edilmiştir. Üstel yük+asekron motor ve üstel yük+asekron motor 34,5 kV baraya 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında 3 fazlı kesiciler sayesinde devreye alınıp çıkarılmıştır. ÇBAG'nin ADM'de RDM'nin geliştirilmesine bağlı olarak karşılaştırma yapılmıştır. Bu analiz sonucunda 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, açılma hızı, elektriksel momenti ve d-q eksen stator akım değişimleri Şekil 6.56 ve Şekil 6.62 arasında gösterilmiştir.



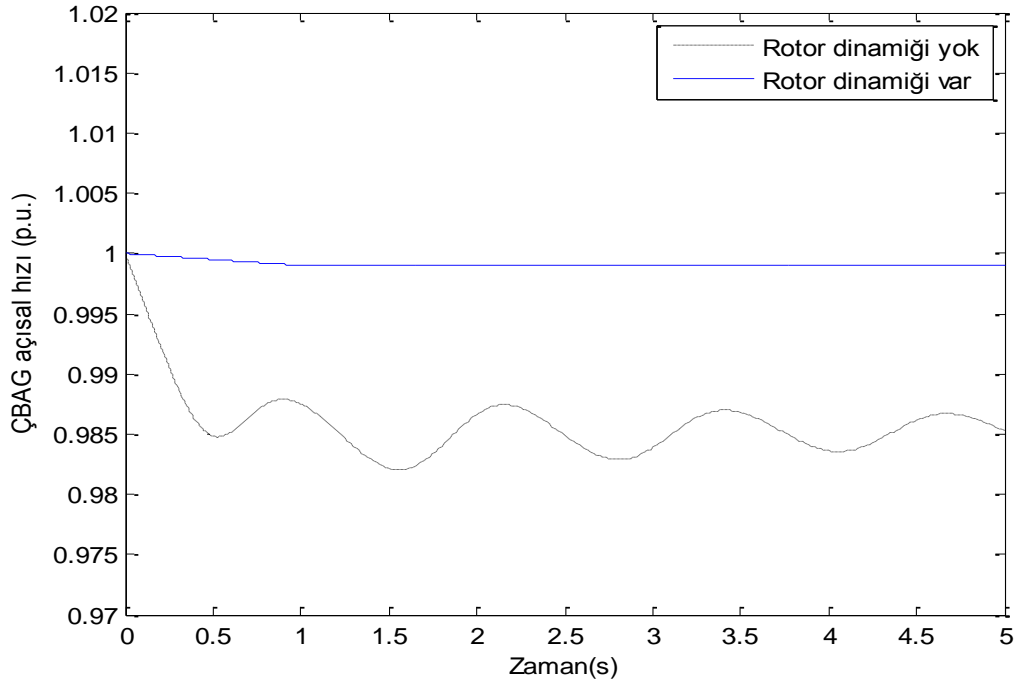
Şekil 6.56. 34,5 kV bara gerilimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile rotor dinamiği kullanımı)



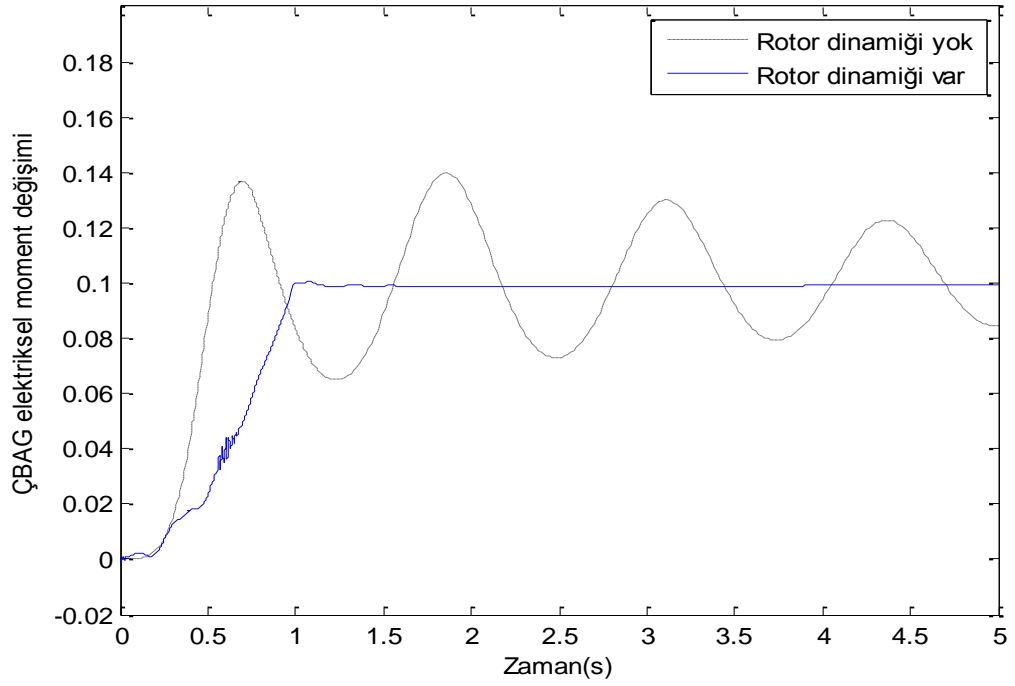
Şekil 6.57. ÇBAG çıkış gerilimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile rotor dinamiği kullanımı)



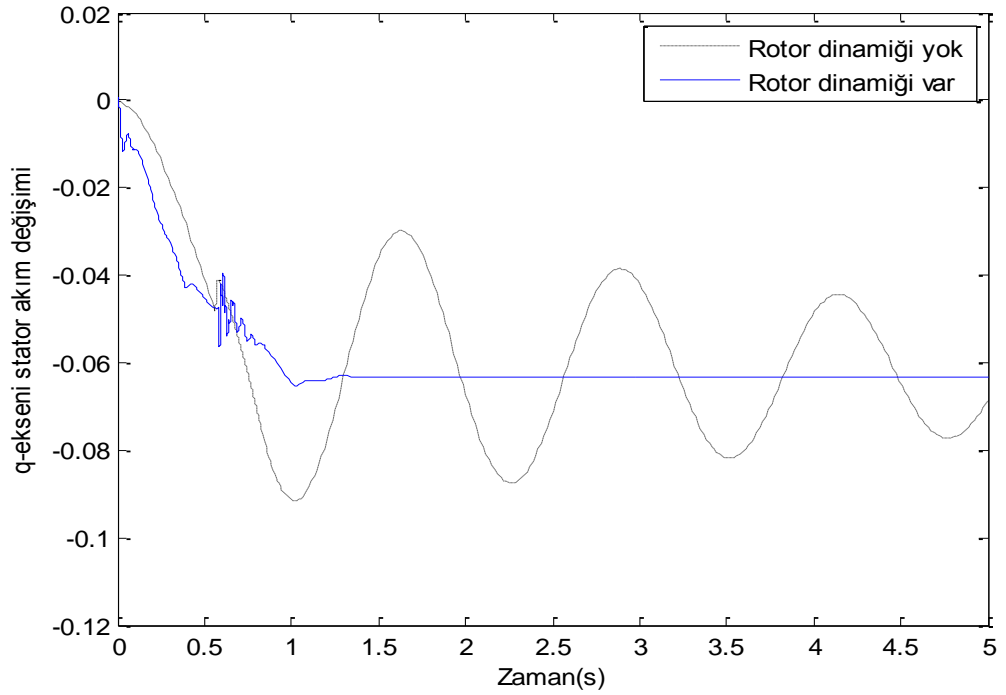
Şekil 6.58. ÇBAG aktif gücü (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile rotor dinamiği kullanımı)



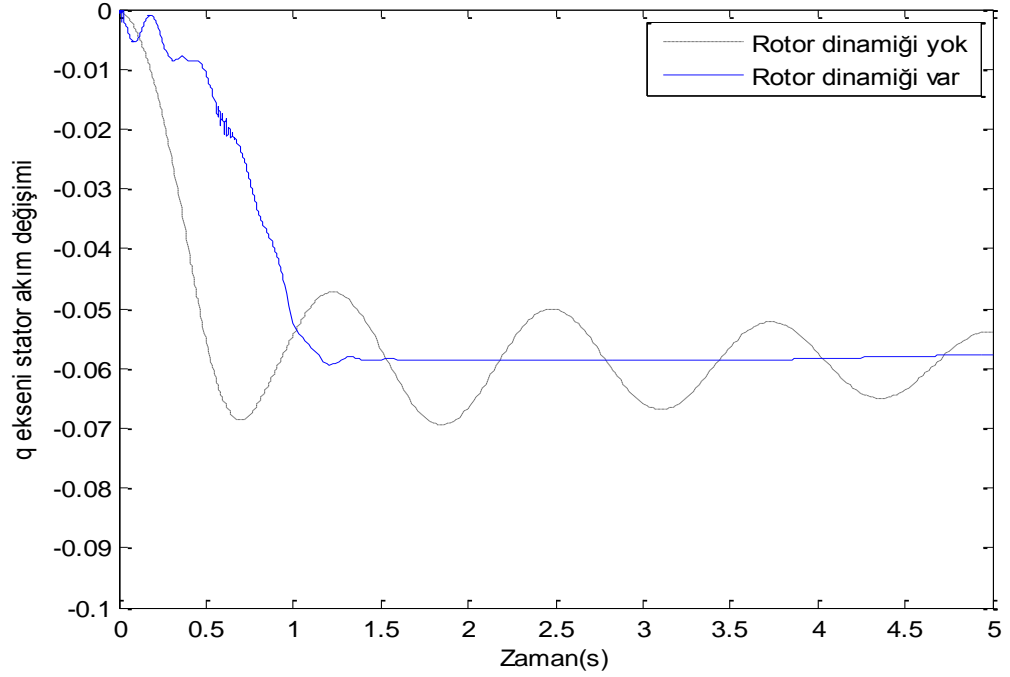
Şekil 6.59. ÇBAG açısız hız değişimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile rotor dinamiği kullanımı)



Şekil 6.60. ÇBAG elektriksel moment değişimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile rotor dinamiği kullanımı)



Şekil 6.61. ÇBAG d eksen stator akım değişimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile rotor dinamiği kullanımı)

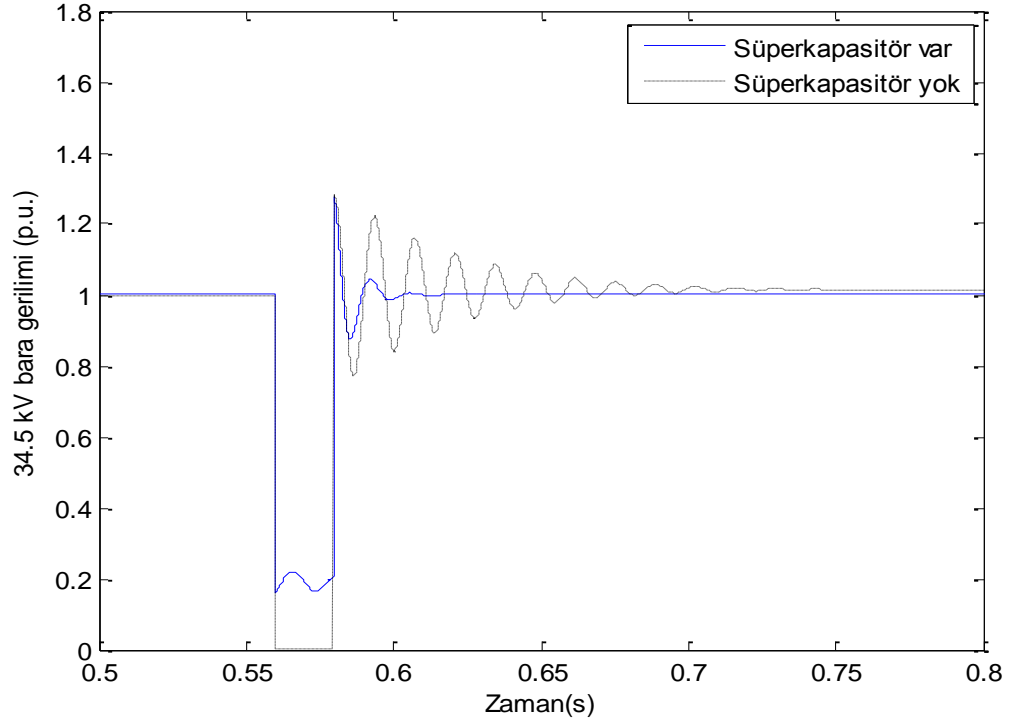


Şekil 6.62. ÇBAG q eksen stator akım değişimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile rotor dinamiği kullanımı)

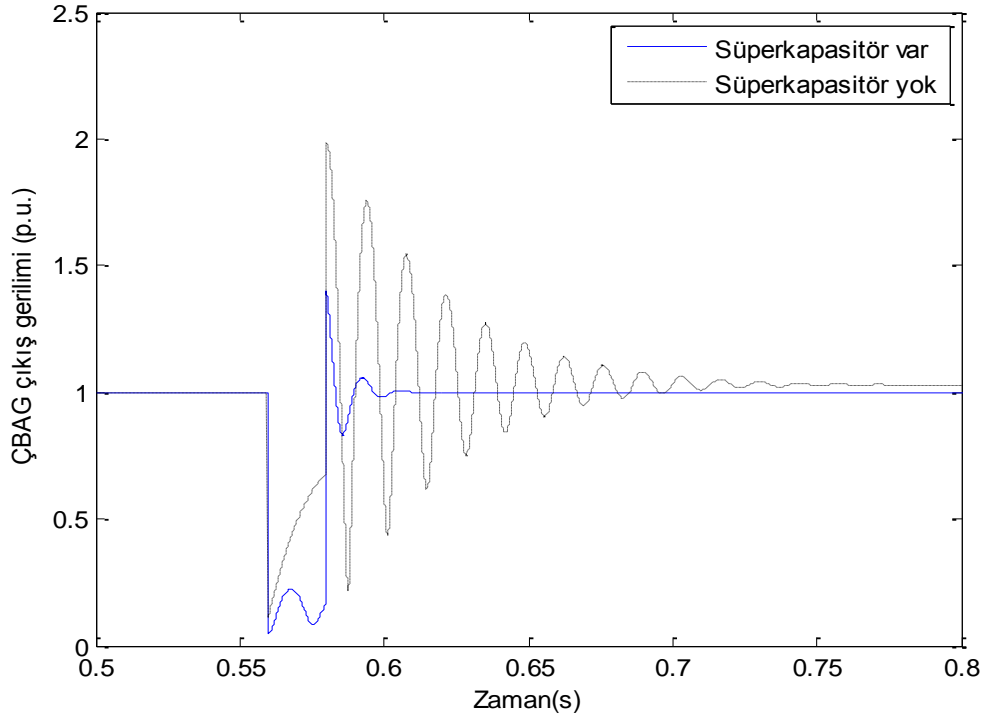
0,6 MW-0,55 MVar gücündeki üstel yük ve ZIP yük modeline 1 MW gücünde ÇBAG'ün ADM tabanlı RDM'in geliştirilmesi ile yalnızca ÇBAG'de ADM kullanıldığında 0,9 p.u. civarında olurken ÇBAG'de RDM'in 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış geriliminin 0,93 p.u. değerine yükseldiği görülmüştür. ÇBAG aktif gücü, ÇBAG açısız hızı, ÇBAG elektriksel momentini, ÇBAG d-q eksen stator akım değişimlerinde üstel yük ve ZIP yük modellerinin kullanılmasında RDM'nin kullanılması ile salınımların daha az olduğu ve sistemin kısa zaman içerisinde kararlı hal aldığı görülmüştür.

6.3. Süperkapasitör Modellemesi ile Geçici Durum Analiz Sonuçları

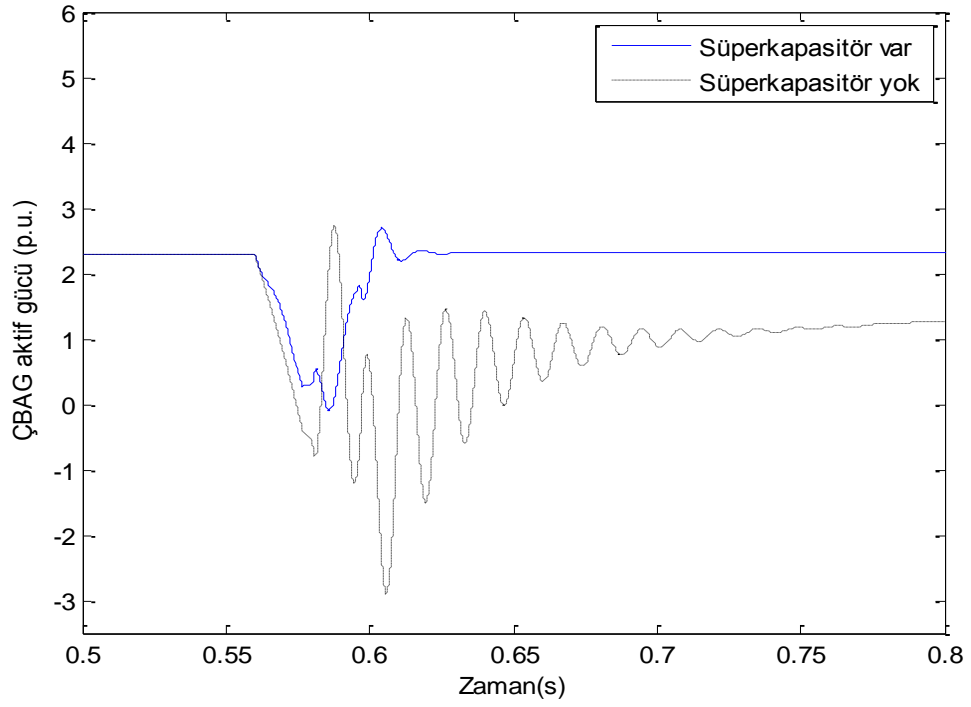
Bu bölümde ÇBAG'de EDS elemanı olarak süperkapasitör kullanılmıştır. İlk analizde 34,5kV'luk barada 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arası üç faz kısa devresi meydana gelmektedir. ÇBAG'de ADM tabanında süperkapasitör ve gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici modellemesinde DGIY açısından karşılaştırma yapılmıştır. Üç faz kısa devresinde süperkapasitör'ün kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, açısız hızı, elektriksel momentini ve d-q eksen stator akım değişimleri Şekil 6.63 ve Şekil 6.69 arasında gösterilmiştir.



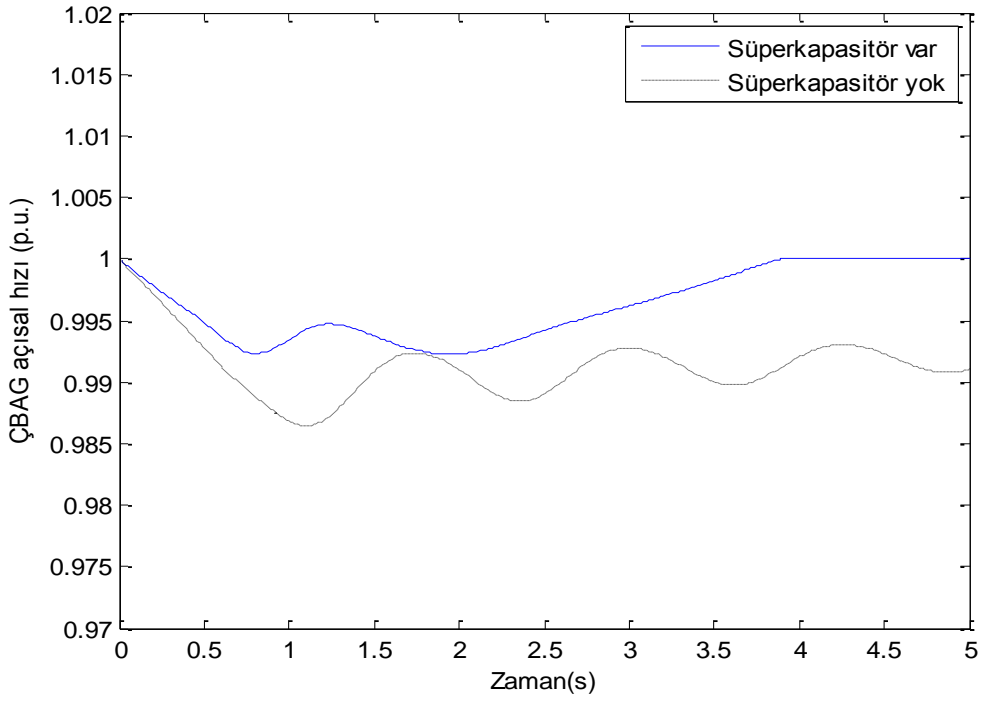
Şekil 6.63. 34,5 kV bara gerilimi (3 faz arızası ile süperkapasitör kullanımı)



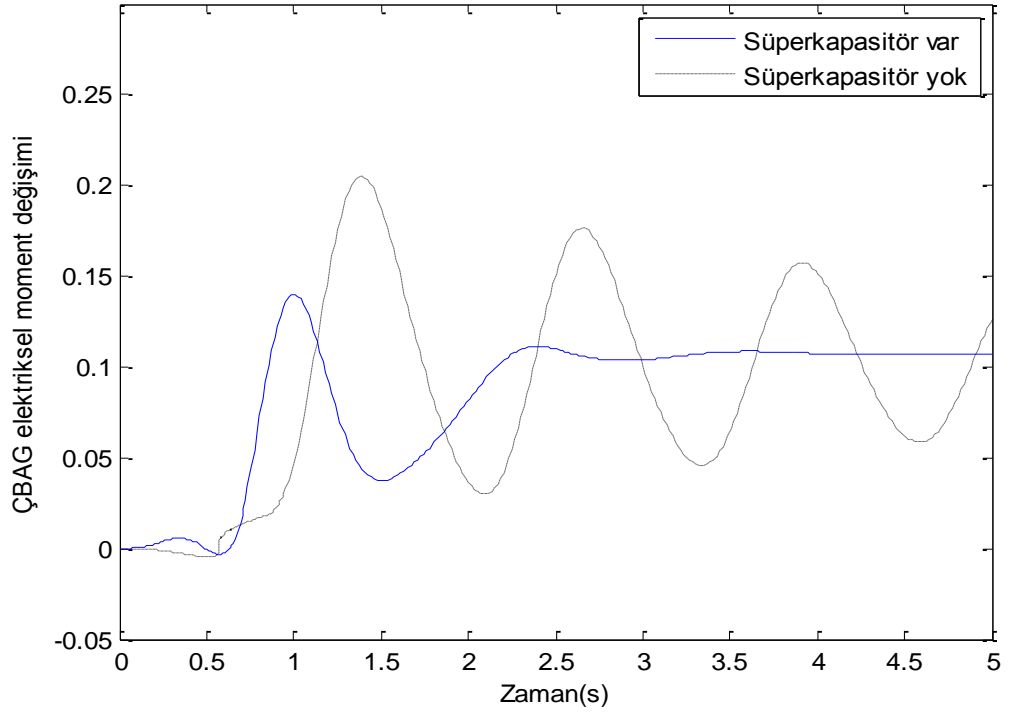
Şekil 6.64. ÇBAG çıkış gerilimi (3 faz arızası ile süperkapasitör kullanımı)



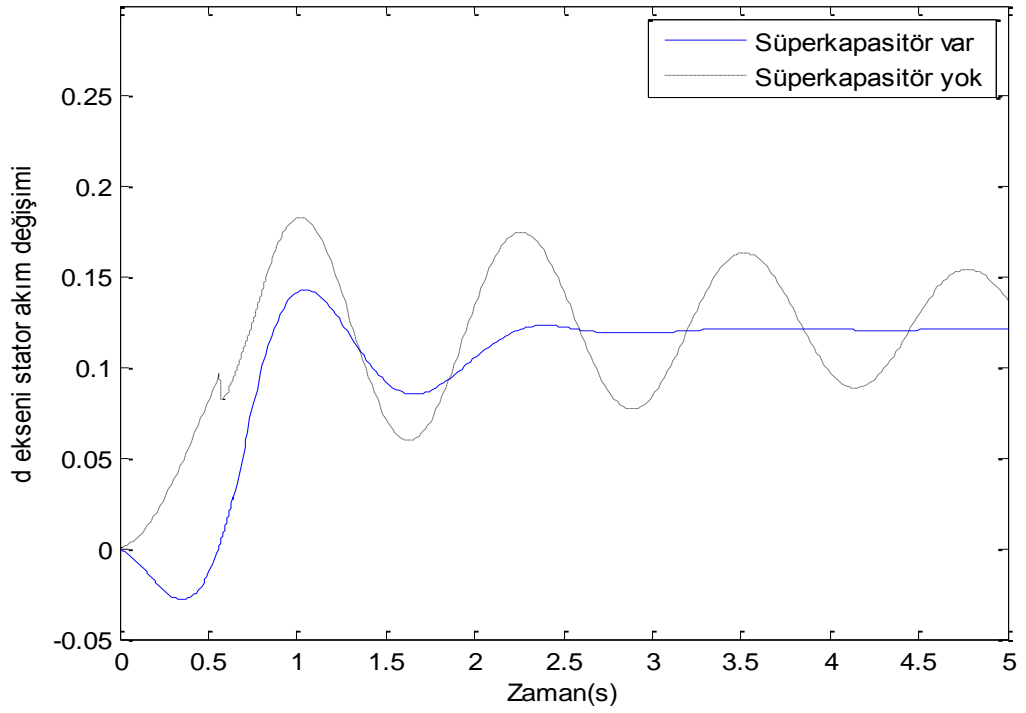
Şekil 6.65. ÇBAG aktif gücü (3 faz arızası ile süperkapasitör kullanımı)



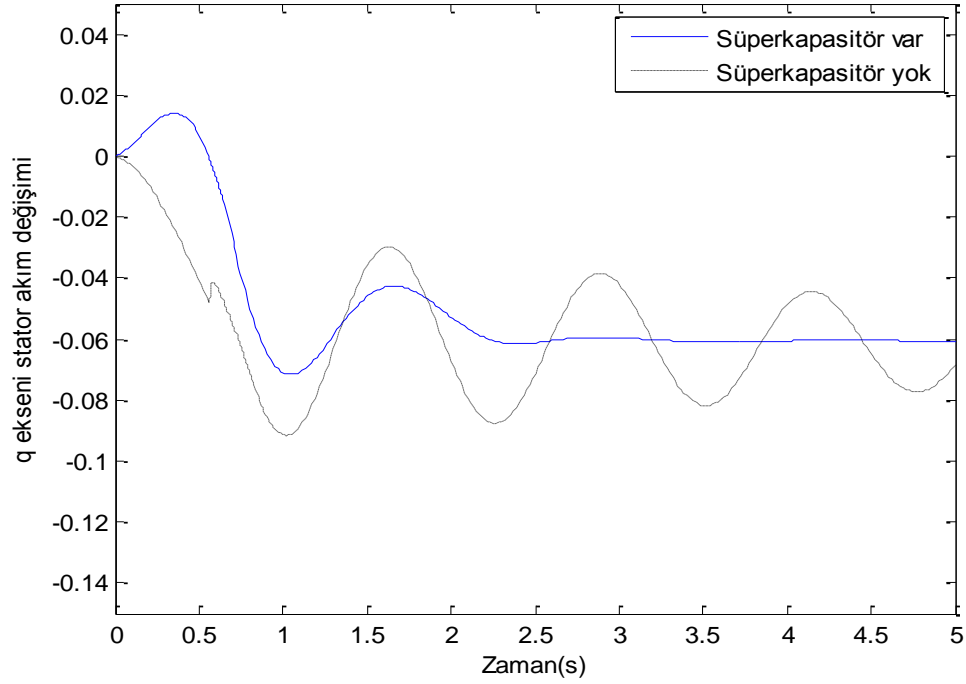
Şekil 6.66. ÇBAG açısal hız değişimi (3 faz arızası ile süperkapasitör kullanımı)



Şekil 6.67. ÇBAG elektriksel moment değişimi (3 faz arızası ile süperkapasitör kullanımı)



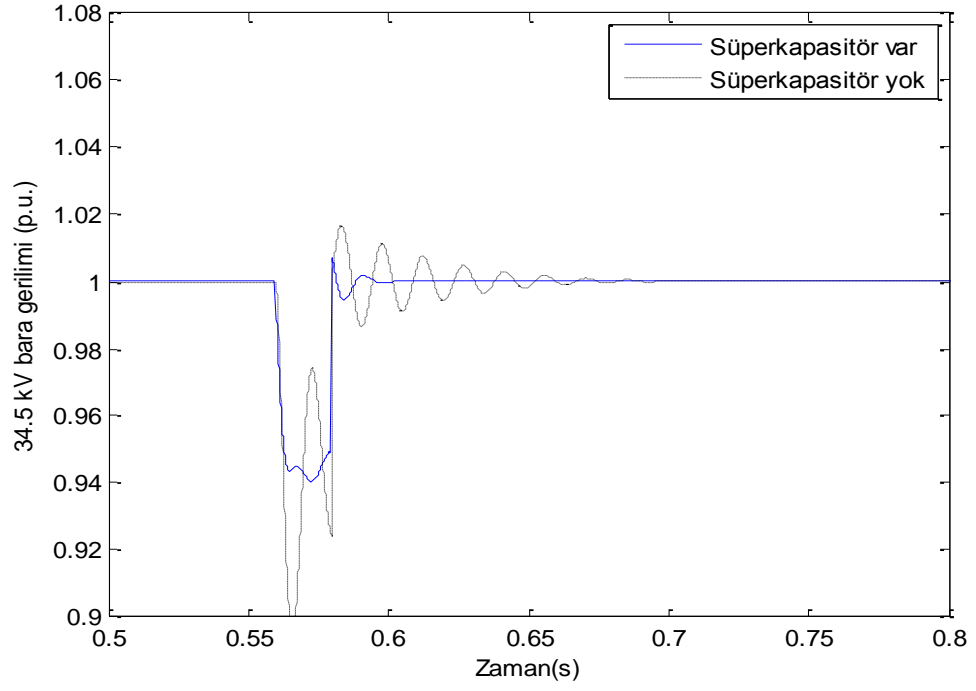
Şekil 6.68. ÇBAG d eksenli stator akım değişimi (3 faz arızası ile süperkapasitör kullanımı)



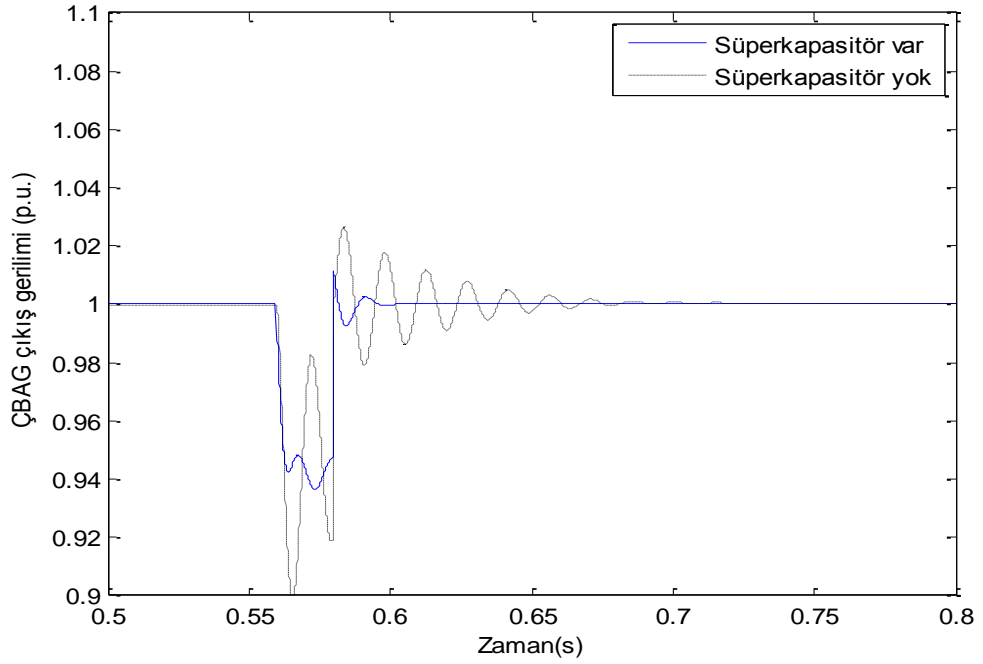
Şekil 6.69. ÇBAG q eksenli stator akım değişimi (3 faz arızası ile süperkapasitör kullanımı)

0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında 34,5 kV barada meydana gelen üç faz kısa devresinde ÇBAG'de süperkapasitörün DGIY için kullanılması ile 34,5 kV bara geriliminde ve ÇBAG çıkış geriliminde tepe değerlerinin azaldığı ve sistemin daha kısa zaman içerisinde kararlı hale geldiği görülmüştür. Üç faz kısa devresinde 34,5 kV'luk bara geriliminin süperkapasitör kullanıldığında 0,16 p.u. civarında olduğu görülmüştür. Süperkapasitörün kullanılmadığı durumda 34,5 kV bara geriliminin 0. p.u. olduğu görülmüştür. ÇBAG çıkış geriliminde ise Süperkapasitörün kullanımı ile kısa süre içerisinde kararlı hale geldiği görülmüştür. Süperkapasitörün kullanımı ile ÇBAG aktif gücü, açısız hızı, elektriksel momenti, d-q eksen stator akım değişimlerinde süperkapasitörün kullanılması ile sistemde salınımların az olduğu ve kısa süre içerisinde sistemin kararlı olduğu görülmüştür.

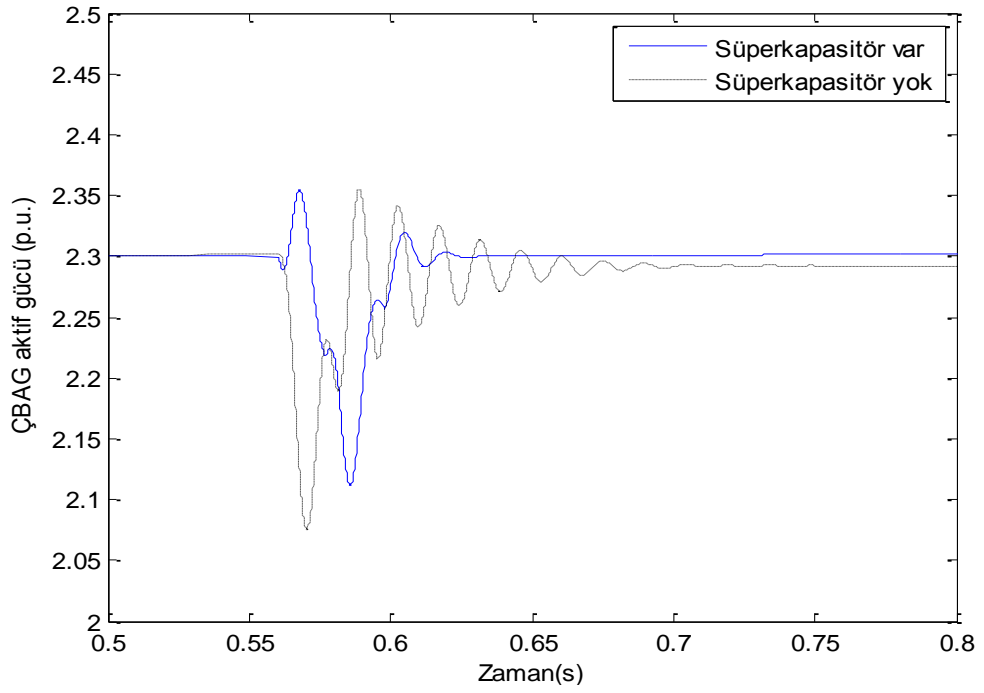
Bu bölümde ikinci analiz olarak statik yük modelleri ile ÇBAG'de süperkapasitör kullanıldığı ve kullanılmadığı durumların karşılaştırılması yapılmıştır. 34,5kV'luk baraya 0,6MW-0,55MVAr gücünde üstel yük ve ZIP yük modellerine 1 MW gücünde asenkron motor ilave edilmesi ile 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında devreye alınıp çıkarılmıştır. 34,5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG aktif gücü, açısız hızı, elektriksel momenti ve d-q eksen stator akım değişimleri Şekil 6.70 ve Şekil 6.76 arasında gösterilmiştir.



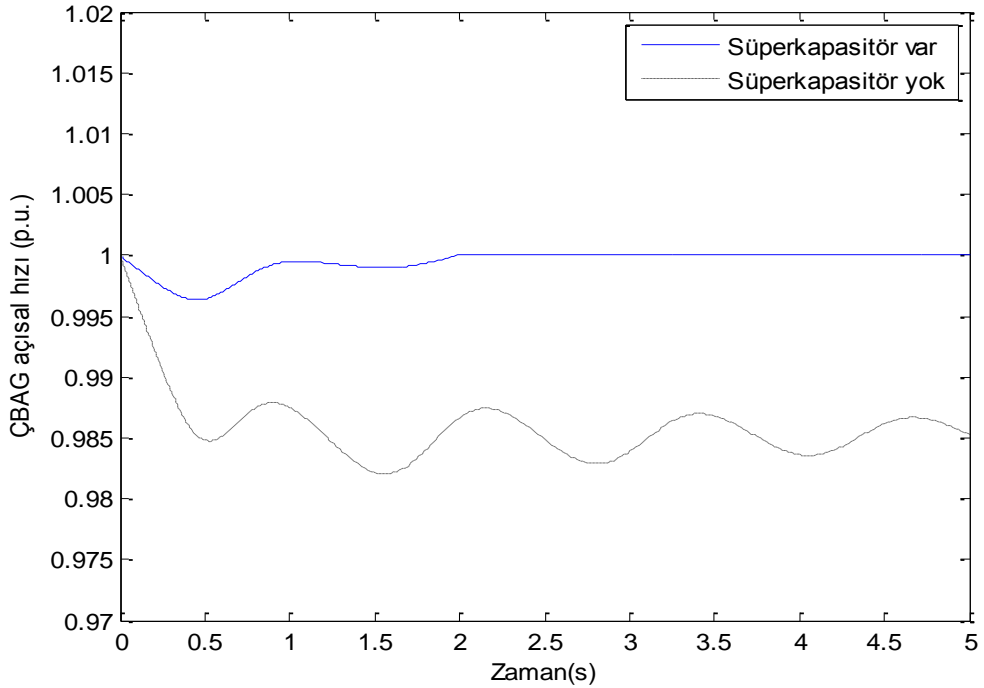
Şekil 6.70. 34,5 kV bara gerilimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile süperkapasitör kullanımı)



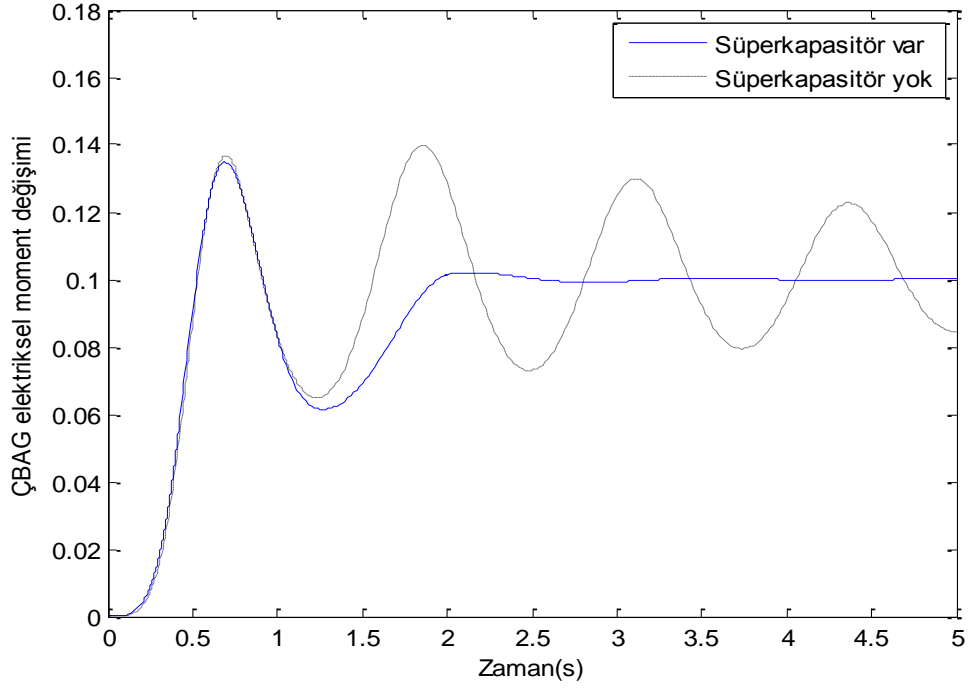
Şekil 6.71. ÇBAG çıkış gerilimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile süperkapasitör kullanımı)



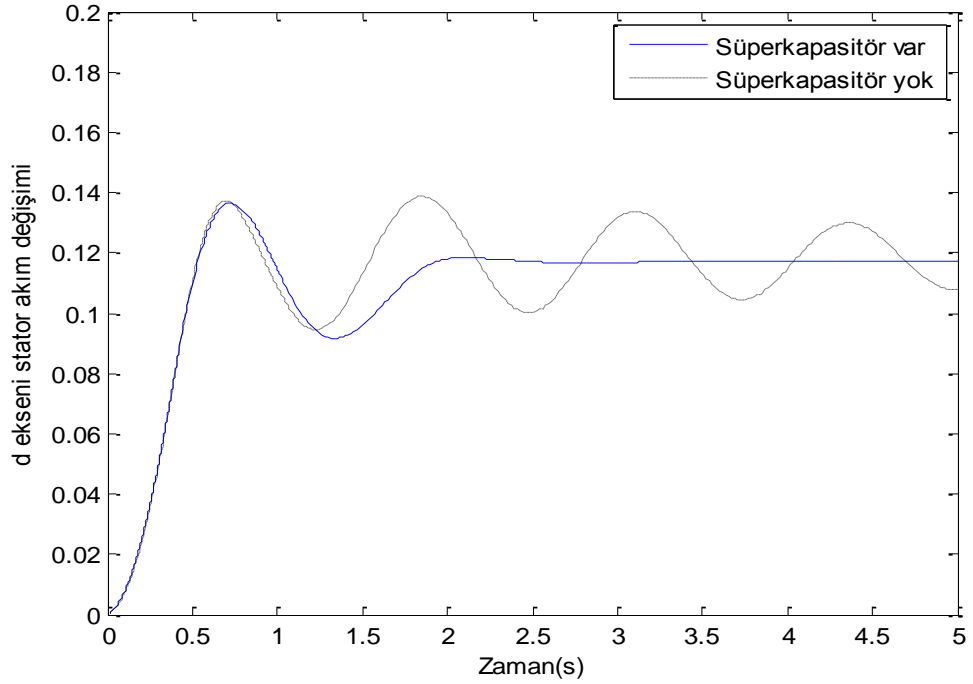
Şekil 6.72. ÇBAG aktif gücü (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile süperkapasitör kullanımı)



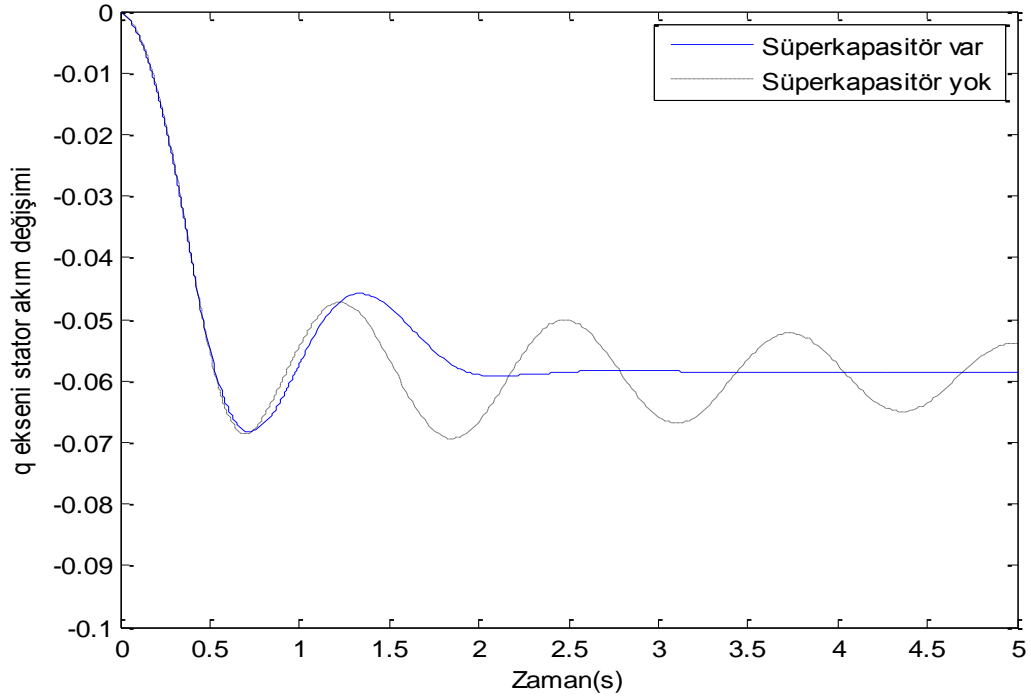
Şekil 6.73. ÇBAG açısız hız değişimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile süperkapasitör kullanımı)



Şekil 6.74. ÇBAG elektriksel moment değışimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile süperkapasitör kullanımı)



Şekil 6.75. ÇBAG d eksenini stator akım değışimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile süperkapasitör kullanımı)



Şekil 6.76. ÇBAG q eksenli stator akım değişimi (Üstel yük+asenكرون motor ve ZIP yük+asenكرون motor ile süperkapasitör kullanımı)

0,6 MW-0,55 MVar gücündeki üstel yük ve ZIP yük modeline 1 MW gücünde asenكرون motor'un ilave edilmesi ile 0,56 saniye ile 0,58 saniyeler arasında devreye girip çıkmasında 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış geriliminin süperkapasitör kullanımı ile 0,94 p.u. civarlarına yükseldiği görülmüştür. ÇBAG'de süperkapasitörün kullanılmadığı durumda 34,5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış gerilim değerinin 0,9 p.u. civarında olduğu görülmüştür. ÇBAG aktif gücü, açılal hızı, elektriksel momenti, d-q eksen stator akım değişimlerinde üstel yük+asenكرون motor ve ZIP+asenكرون motor yük modellerinin kullanılmasında ÇBAG'de süperkapasitör kullanılmasında salınımların azaldığı ve sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale geldiği görülmüştür.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, şebekeye bağlı çalışan bir rüzgar santralının geçici durum davranışını incelemek için ilgili model geliştirme ve analizleri kapsar. Modelleme ve analiz öncesi rüzgar-şebeke entegrasyonu hakkında kısa bilgi verilmiştir. Rüzgar santrallerinin şebeke entegrasyonu için ulusal ve uluslararası standartlar değerlendirilmiştir. Bu standartlar göre gerilim profilindeki değişimlerin önemli bir ölçüt olduğu görülmüştür.

Rüzgar santralinde kullanılan ÇBAG'nin TDM ve ADM'nin çeşitli geçici olaylar karşısındaki davranışları karşılaştırılmıştır. Bu geçici olaylardan ilki, iletim seviyesinde ve dağıtım seviyesinde rastlanabilecek kısa süreli kesici açma durumlarıdır. En yaygın geçici durum olayı ise kısa süreli üç faz arızasıdır. Bu çalışmada ilk defa statik yüklerin kısa süreli devreye girmesi bir geçici olay olarak dikkate alınmıştır.

Geçici olaylar sonucunda oluşan düşük gerilimi iyileştirmek için ÇBAG'de dinamik modelleme ve EDS kullanılmıştır. Rotor kısmında oluşturulan dinamik modelleme ve EDS elemanlarından süperkapasitörün modellemesi ile üç faz kısa devre ve statik yüklerin kısa süreli devreye girmesi incelenmiştir.

İletim ve dağıtım seviyelerinde oluşturulan kısa süreli kesici açmaları karşısında ÇBAG'de ADM'nin kullanılması ile sistem kararlı hale gelmektedir. Ancak TDM'in kullanılması ile sistemin kararsız bir hal aldığı görülmüştür. Ayrıca kısa devre durumlarına karşı ADM'nin TDM'ye göre daha kısa süre içerisinde kararlı olmuştur. ÇBAG'nin ADM'nin kullanılmasına bağlı olarak farklı zamanlarda üç faz kısa devre analizi incelendiğinde, kısa devre süresinin artması ile salınımların daha az olduğu görülürken kısa devre süresinin kısa olması ile salınımların arttığı görülmüştür

Matematiksel olarak modellemeleri yapılan üstel ve ZIP yüklere asenkron motorun ilave edilmesi ile sistemin daha uzun sürede kararlı hale geldiği görülmüştür. Ayrıca asenkron motorun kullanılması ile ÇBAG'de ve bara gerilimlerinde salınımların arttığı gözlemlenmiştir.

ÇBAG'de DGİY için ilk aşamada rotor dinamik modellemesi ve kontrolü yapılmıştır. ADM'de oluşturulan RDM'nin kullanılması ile geçici olaylar karşısında sistemin kısa zaman içerisinde kararlı hale geldiği ve salınımların azaldığı görülmüştür.

ÇBAG'de DGİY için ikinci aşamada süperkapasitör modellemesi ve kontrolü yapılmıştır. Süperkapasitörde üretilen gerilim değeri bir gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici devresi ile arka arkaya bağlı evirici devresindeki DA gerilime eşitlenmiştir. ÇBAG'de süperkapasitör ve gerilim arttırıcı-azaltıcı evirici devresinin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumların karşılaştırılması yapılmıştır. Süperkapasitör kullanımı ile bara gerilimlerinde iyileşme olmuştur.

7.1. Öneriler

ÇBAG'de ADM'in oluşturulması benzetim çalışmasının performansı açısından fayda sağlayacaktır. Ayrıca şebeke tarafında oluşabilecek farklı geçici kararlılık durumlarında stator dinamiğinin ADM ile oluşturulması önemli bir katkı sağlayacaktır.

Endüstrideki yük modellerini temsilen kullanılan üstel ve ZIP yüklerin matematiksel olarak modellenmesinin şebekeye bağlı olan rüzgar santrallerinde oluşturacağı etkiler bu tezde verilen benzetim çalışması ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar bir uygulama düzeneğinin oluşturulmasına zemin hazırlamaktadır.

ÇBAG'de DGİY için stator kısmında oluşturulan ADM'nin yanısıra rotor kısmında oluşturulan RDM'in çeşitli geçici kararlılık durumları için kullanılabilceği bu tez çalışmasında gösterilmiştir. ADM tabanında RDM akım, gerilim ve akılara bağlı olarak farklı modellemelerin geliştirilmesine imkan sağlamaktadır.

ÇBAG'de EDS elemanlarından süperkapasitörün kullanılması ile çeşitli geçici kararlılık durumları için bara gerilimlerinin kompanze edilmesi benzetim çalışmasında kapsamlı olarak verilmiştir. Benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlar neticesinde ÇBAG'de bir uygulama düzeneği içerisinde süperkapasitörün kullanımına öncelik sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Ekanayake J. B., Holdsworth L., Wu X., Jenkins N., Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines, *IEEE Transaction on Power Systems*, 2003, **18**, 803-809.
- [2] Fernandez L. M., Jurado F., Saenz J. R., Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines, *Renewable Energy*, 2008, **33**, 129-140.
- [3] Fernandez L. M., Garcia C. A., Saenz J. R., Jurado F., Equivalent models for wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds, *Energy Conversion and Management*, 2009, **50**, 3, 691-704.
- [4] Hector A., Painemal P., Sauer P. W., Reduced-order model of Type-C wind turbine generators, *Electric Power Systems Research*, 2011, **81**, 840-845.
- [5] Gracia M. G., Comech M. P., Sallan J., Llombart A., Modelling wind farms for grid disturbance studies, *Renewable Energy*, 2008, **33**, 2109-2121.
- [6] Holdsworth L., Wu X. G., Ekanayake J. B., Jenkins N., Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2003, **150**, 343-352.
- [7] Erlich I., Kretschmann J., Fortmann J., Engelhardt S. M., Wrede H., Modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generators for power system stability studies, *IEEE Transaction on Power Systems*, 2007, **22**, 909-919.
- [8] Kretschmann J., Wrede H., Mueller-Engelhardt S., Erlich I., Enhanced reduced order model of wind turbines with DFIG for power system stability studies, *IEEE International Power and Energy Conference*, Putrajaya, Malaysia, 28-29 November, 2006.
- [9] Lei Y., Mullane A., Lightbody G., Yacamini R., Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2006, **21**, 257-264.
- [10] Lara O. A., Hughes F. M., Jenkins N., Strbac G., Contribution of DFIG-based wind farms to power system short-term frequency regulation, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2006, **153**, 164-170.
- [11] Marcus V. A., Lopes J. A. R., Zürn H. H., Bezerma U. H., Almeida R. G., Influence of the variable speed wind generators in transient stability margin of conventional generators integrated in electrical grids, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2004, **19**, 692-701.

- [12] Cartwright P., Holdsworth L., Ekanayake J. B., Jenkins N., Co-ordinated voltage control strategy for a doubly-fed induction generator (DFIG)-based wind farm, *IET Generation Transmission and Distribution*, 2004, **154**, 495-502.
- [13] Ekanayake J. B., Holdsworth L., Jenkins N., Comparison of 5th order and 3rd order machine models for double fed induction generators (DFIG) wind turbines, *Electric Power Systems Research*, 2003, **67**, 207-215.
- [14] Dusonchet L., Telaretti E., Effects of electrical and mechanical parameters on the transient voltage stability of a fixed speed wind turbine, *Electric Power Systems Research*, 2011, **81**, 1308-1316.
- [15] Kayikci M., Milanovic J. V., Assessing transient response of DFIG-based wind plants—The influence of model simplifications and parameters, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**, 545-554.
- [16] Sørensen P., Hansen A. D., Lund T., Bindner H., Reduced models of doubly fed induction generator system for wind turbine simulations, *Wind Energy* 2006, **9**, 299-311.
- [17] Elkington K., Valerijs K., Mehrdad G., On the stability of power systems containing doubly fed induction generator-based generation, *Electric Power Systems Research*, 2008, **78**, 1477-1484.
- [18] Elkington K. Mehrdad G., Comparison of reduced order doubly fed induction generator models for nonlinear analysis, *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Stockholm, Sweden, 22-23 October 2009.
- [19] Painemal P., Hector A., Sauer P. W., Towards a wind farm reduced-order model, *Electric Power Systems Research*, 2011, **81**, 1688-1695.
- [20] Ledesma P., Julio U., Effect of neglecting stator transients in doubly fed induction generators models, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, **19**, 459-461.
- [21] Boukhezzar B., Houria S., Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization, *Energy Conversion and Management*, 2009, **50**, 885-892.
- [22] Wu F., Zhang X. P., Ju P., Sterling M. J., Decentralized nonlinear control of wind turbine with doubly fed induction generator, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**, 613-621.
- [23] Petersson A., Thiringer T., Harnefors L., Petru T., Modeling and experimental verification of grid interaction of a DFIG wind turbine, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2005, **20**, 878-886.

- [24] Holdsworth L., Wu X. G., Ekanayake J. B., Jenkins N., Direct solution method for induction wind turbines in models initialising doubly-fed power system dynamic models, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2003, **150**, 334-342.
- [25] Feijóo A., José C., Camilo C., A third order model for the doubly-fed induction machine, *Electric Power Systems Research*, 2000, **56**, 121-127.
- [26] Daniel K., David J. H., Modelling and identification of nonlinear loads in power systems, *IEEE Transaction on Power Systems*, 1994, **9**, 157-163.
- [27] Reformat M., Woodford D., Wachal R., Tarko N. J., Non-linear load modeling for simulations in time domain, *IEEE 8th International Harmonics and Quality of Power Proceedings Conference*, 1998. Athens, Greece, 14-16 October 1998.
- [28] Zhu S. Z., Zhen J. H., Shen S. D., Luo G. M., Effect of load modeling on voltage stability, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 16-20 July, 2000.
- [29] Knyazkin V., Claudio A. C., Lennart H. S., On the parameter estimation and modeling of aggregate power system loads, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, **19**, 1023-1031.
- [30] Renmu H., Ma J., David J. H., Composite load modeling via measurement approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, **21**, 663-672.
- [31] Choi B. K., Chiang H. D., Li Y., Li H., Chen Y. T., Huang D. H., Lauby M. G., Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, **21**, 1276-1283.
- [32] Ma J., Han D., He R. M., Dong Z. Y., Hill D. J., Reducing identified parameters of measurement-based composite load model, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**, 76-83.
- [33] Li Y., Chiang H. D., Choi B. K., Chen Y. T., Huang D. H., Lauby M. G., Representative static load models for transient stability analysis: development and examination, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2007, **1**, 422-431.
- [34] Milanovic J. V., Hiskens I. A., Effects of load dynamics on power system damping, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, **10**, 1022-1028.
- [35] Borghetti A., Caldon R., Mari A., Nucci C. A., On dynamic load models for voltage stability studies, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, **12**, 293-303.
- [36] David J. H., Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, **8**, 166-176.

- [37] Burch R., Chang G., Hatziadoniu C., Grady M., Marz L. Y. M., Xu W., Impact of aggregate linear load modeling on harmonic analysis: A comparison of common practice and analytical models, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, **18**, 625-630.
- [38] El-Saadany E. F., Salama M. M. A, Chikhani A. Y., Reduction of voltage and current distortion in distribution systems with nonlinear loads using hybrid passive filters, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 1998, **145**, 320-328.
- [39] Ju P., Qin C., Wu F., Xie H., Ning Y., Load modeling for wide area power system, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2011, **33**, 909-917.
- [40] Hiskens I. A., Nonlinear dynamic model evaluation from disturbance measurements, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2001, **16**, 702-710.
- [41] Li Y., Chiang H. D., Choi B. K., Chen Y. T., Huang D. H., Lauby M. G., Load models for modeling dynamic behaviors of reactive loads: Evaluation and comparison, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2008, **30**, 497-503.
- [42] Hiskens I. A., David J., Energy functions, transient stability and voltage behaviour in power systems with nonlinear loads, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, **4**, 1525-1533.
- [43] Sauer P. W., Pai M. A., Power system steady-state stability and the load-flow Jacobian, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1990, **5**, 1374-1383.
- [44] Davy R. J., Hiskens I. A., Lyapunov functions for multimachine power systems with dynamic loads, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1997, **44**, 796-812.
- [45] Mishra Y., Dong Z. Y., Ma J., Hill D. J., Induction motor load impact on power system eigenvalue sensitivity analysis, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2008, **3**, 690-700.
- [46] Aquino A. F. C., Santos J. G., Miranda U., Aredes M., Araujo A. C. M., Synchronizing circuits applied to nonlinear loads models, *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America*, 8-11 November 2004.
- [47] Tseng K. H., Wen S. K., Jia R. L., Load model effects on distance relay settings, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, **18**, 1140-1146.
- [48] Qian A., Shrestha G. B., An ANN-based load model for fast transient stability calculations, *Electric Power Systems Research*, 2006, **76**, 217-227.
- [49] Kao W. S., The effect of load models on unstable low-frequency oscillation damping in Taipower system experience w/wo power system stabilizers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2001, **16**, 463-472.

- [50] Rahimi M., Parniani M., Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators, *Electric Power Systems Research*, 2010, **80**, 184-195.
- [51] Rahimi M., Parniani M., Dynamic behavior analysis of doubly-fed induction generator wind turbines–The influence of rotor and speed controller parameters, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2010, **32**, 464-477.
- [52] Rahimi M., Parniani M., Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, **25**, 514-525.
- [53] Rahimi M., Parniani M., Coordinated control approaches for low-voltage ride-through enhancement in wind turbines with doubly fed induction generators, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, **25**, 873-883.
- [54] Hansen A. D., Michalke G., Sørensen P., Lund T., Iov F., Coordinated voltage control of DFIG wind turbines in uninterrupted operation during grid faults, *Wind Energy*, 2007, **10**, 51-68.
- [55] Rahimi M., Parniani M., Efficient control scheme of wind turbines with doubly fed induction generators for low-voltage ride-through capability enhancement, *IET Renewable Power Generation*, 2010, **4**, 242-252.
- [56] Abdel-Baqi O., Nasiri A., Series voltage compensation for DFIG wind turbine low-voltage ride-through solution, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, **26**, 272-280.
- [57] Yang L., Xu Z., Ostergaard J., Dong Z. Y., Wong K. P., Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, **27**, 713-722.
- [58] Liang J., Qiao W., Harley R. G., Feed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, **25**, 836-843.
- [59] Foster S., Xu L., Fox B., Coordinated reactive power control for facilitating fault ride through of doubly fed induction generator and fixed speed induction generator-based wind farms, *IET Renewable Power Generation*, 2010, **4**, 128-138.
- [60] Mohseni M., Masoum M. A., Islam S. M., Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters, *Electric Power Systems Research*, 2011, **81**, 1456-1465.
- [61] Hu S., Lin X., Kang Y., Zou X., An improved low-voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator during grid faults, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, **26**, 3653-3665.

- [62] Mendes V. F., De S. C. V., Silva S. R., Rabelo B. C., Hofmann W., Modeling and ride-through control of doubly fed induction generators during symmetrical voltage sags, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, **26**, 1161-1171.
- [63] Yan X., Venkataramanan G., Flannery P. S., Wang Y., Dong Q., Zhang B., Voltage-sag tolerance of DFIG wind turbine with a series grid side passive-impedance network, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, **25**, 1048-1056.
- [64] Morren J., De H. S. W., Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, **20**, 435-441.
- [65] Chondrogiannis S., Barnes M., Specification of rotor side voltage source inverter of a doubly-fed induction generator for achieving ride-through capability, *IET Renewable Power Generation*, 2007, **2**, 139-150.
- [66] Dai J., Xu D., Wu B., Zargari N. R., Unified DC-link current control for low-voltage ride-through in current-source-converter-based wind energy conversion systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, **26**, 288-297.
- [67] Gomis-Bellmunt O., Junyent-Ferre A., Sumper A., Bergas-Jan J., Ride-through control of a doubly fed induction generator under unbalanced voltage sags, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, **23**, 1036-1045.
- [68] Santos-Martin D., Rodriguez-Amenedo J. L., Arnaltes S., Providing ride-through capability to a doubly fed induction generator under unbalanced voltage dips, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, **24**, 1747-1757.
- [69] López J., Gubía E., Olea E., Ruiz J., Marroyo L., Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under symmetrical voltage dips, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**, 4246-4254.
- [70] Lima F. K., Luna A., Rodriguez P., Watanabe E. H., Blaabjerg F., Rotor voltage dynamics in the doubly fed induction generator during grid faults, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, **25**, 118-130.
- [71] Okedu K. E., Muyeen S. M., Takahashi R., Tamura J., Wind farms fault ride through using DFIG with new protection scheme, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, **3**, 242-254.
- [72] Zhou Y., Bauer P., Ferreira J. A., Pierik J., Operation of grid-connected DFIG under unbalanced grid voltage condition, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, **24**, 240-246.
- [73] Ibrahim A. O., Nguyen T. H., Lee D. C., Kim S. C., A fault ride-through technique of DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, **26**, 871-882.

- [74] Seman S., Niiranen J., Arkkio A., Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, **21**, 1782-1789.
- [75] Flannery P. S., Venkataramanan G. A., Fault tolerant doubly fed induction generator wind turbine using a parallel grid side rectifier and series grid side converter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, **23**, 1126-1135.
- [76] Mishra Y., Mishra S., Tripathy M., Senroy N., Dong Z. Y., Improving stability of a DFIG-based wind power system with tuned damping controller. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, **24**, 650-660.
- [77] Kasem A. H., El-Saadany E. F., El-Tamaly H. H., Wahab M. A. A., An improved fault ride-through strategy for doubly fed induction generator-based wind turbines, *IET Renewable Power Generation*, 2007, **2**, 201-214.
- [78] Liyan Q., Qiao W., Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, **47**, 359-367.
- [79] Syed I. M., Venkatesh B., Wu B., Nassif A. B., Two-layer control scheme for a Supercapacitor Energy Storage System coupled to a Doubly Fed Induction Generator, *Electric Power Systems Research*, 2012, **86**, 76-83.
- [80] Krishnamurthy V., Kumar C. R., A novel two layer constant power control of 15 DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage, *International Journal of Advanced and Innovative Research*, 2013, **2**, 68-77.
- [81] Muyeen S. M., Takahashi R., Ali M. H., Murata T., Tamura J., Transient stability augmentation of power system including wind farms by using ECS, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**, 1179-1187.
- [82] Mendis N., Muttaqi K. M., Sayeef S., Perera S., Application of a hybrid energy storage in a remote area power supply system, *IEEE Energy Conference and Exhibition*, Manama, Bahreyn, 18-22 December 2010.
- [83] Alam M. A., Rahim A. H. M. A., Abido M. A., Supercapacitor based energy storage system for effective fault ride through of wind generation system, *International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, Italy, 4-7 July 2010.
- [84] Chad A., Géza J., Supercapacitor energy storage for wind energy applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, **43**, 769-776.
- [85] Li W., Geza J., A power electronic interface for a battery supercapacitor hybrid energy storage system for wind applications, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, Greece, 15-19 June 2008.
- [86] Li W., Geza J., Jean B., Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery supercapacitor energy storage system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**, 1137-1145.

- [87] Jayasinghe S. D. G., Vilathgamuwa D. M., Udaya K. M., A dual inverter based supercapacitor direct integration scheme for wind energy conversion systems, *IEEE Sustainable Energy Technologies*, Kandy, Sri Lanka, 6-9 December 2010.
- [88] Aghatehrani R., Rajesh K., Thapa R. C, Power smoothing of the DFIG wind turbine using a small energy storage device, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Minneapolis, USA, 25-29 July 2010.
- [89] Suryana R., Frequency control of standalone wind turbine with supercapacitor, *IEEE Telecommunications Energy Conference*, Amsterdam, Netherlands, 9-13 October 2011.
- [90] Babazadeh H., Gao W., Wang X., Controller design for a hybrid energy storage system enabling longer battery life in wind turbine generators, *IEEE North American Power Symposium*, Boston, USA, 4-6 August 2011.
- [91] Arani M. F. M., El-Saadany E. F., Implementing virtual inertia in DFIG-based wind power generation, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, **28**, 1373-1384.
- [92] Li X., Hu C., Liu C., Xu D., Modeling and control of aggregated supercapacitor energy storage system for wind power generation, *IEEE Industrial Electronics, Annual Conference*, Orlando, Florida, 10-13 November 2008.
- [93] Naswali E., Alexander C., Han H. Y., Naviaux D., Bistrika A., Jouanne A. V., Yokochi A., Brekken K. A. T., Supercapacitor energy storage for wind energy integration, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, Arizona, 17-22 September 2011.
- [94] Mendis N., Muttaqi K. M., Perera S., Active power management of a supercapacitor-battery hybrid energy storage system for standalone operation of DFIG based wind turbines, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Las Vegas, USA, 7-11 October 2012.
- [95] Wee K. W., Choi S. S., Vilathgamuwa D. M., Design of a least-cost battery-supercapacitor energy storage system for realizing dispatchable wind power, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, **4**, 786-796.
- [96] Gee A. M., Robinson F. V. P., Dunn R. W., Analysis of battery lifetime extension in a small-scale wind-energy system using supercapacitors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, **28**, 24-33.
- [97] Babazadeh H., Gao W., Lin J., Cheng L., sizing of battery and supercapacitor in a hybrid energy storage system for wind turbines, *IEEE Transmission and Distribution and Exposition Conference*, Orlando, Florida, 7-10 May 2012.
- [98] Ling Q., Lu Y., An integration of super capacitor storage research for improving low-voltage-ride-through in power grid with wind turbine, *IEEE Power and Energy Engineering Conference*, Shanghai, China, 27-29 March 2012.

- [99] Gkavanoudis S. I., Demoulias C.S., A new fault ride-through control method for full-converter wind turbines employing supercapacitor energy storage system, *IEEE Universities Power Engineering Conference*, London, England, 4-7 September 2012.
- [100] Wei T., Wang S., Qi Z., Design of supercapacitor based ride through system for wind turbine pitch systems, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Seoul, Korea, 8-11 October 2007.
- [101] Toklu M., Rüzgar enerjisi ve Elazığ şartlarında bir rüzgar santrali tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007, 116652.
- [102] Güneş İ.İ., Bir rüzgar türbininin modellenmesi, simülasyonu ve kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 182565.
- [103] Çetin N.S., Şebeke bağlantısız PM generatörlü rüzgar türbinlerinin YSA ile sistem optimizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006, 197361.
- [104] Döşoğlu M. K., Rüzgar santralinde gerilim ve güç kontrolünün FACTS cihazları ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 2010, 309223.
- [105] Patel M.R., *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*, 2th ed., CRC Press, Boca Raton, 2006.
- [106] Farret F. A., Simoes M. G., *Integration of alternative sources of energy*, 1th ed., Wiley IEEE Press, USA, 2006.
- [107] Ackermann T., *Wind power in power systems*, 2th ed., John Wiley and Sons, Chichester, 2005.
- [108] Taşçıkaraoğlu A., Rüzgar türbinlerinin güç kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 243623.
- [109] Yousef A., Wind turbine level energy storage for low voltage ride through (LVRT) support, Master of Sciences Thesis, University of Wisconsin-Milwaukee, 2012.
- [110] <http://www.epdk.gov.tr/index.php/elektrik-piyasasi/mevzuat?id=46>, (Ziyaret tarihi: 04 Aralık 2013).
- [111] <http://www.epdk.gov.tr/index.php/elektrik-piyasasi/mevzuat?id=89>, (Ziyaret tarihi: 04 Aralık 2013).
- [112] Zavadil R., Miller N., Ellis A., Muljadi E., Camm E., Kirby B., Interconnecting wind generation in to the power system, *IEEE Power and Energy Magazine*, 2007, 5, 47-58.

- [113] Sangrois N., Mora J. A., Teixeira M. D., Review of international grid codes for wind generation, *VIII Brazilian Conference on Power Quality*, Blumenau, Brazil, 2-5 August 2009.
- [114] <http://wenku.baidu.com/view/6289c22bcfc789eb172dc88e.html>. (Ziyaret tarihi: 05 Ocak 2014).
- [115] Tumay A., Rüzgar santrallerinin sistem entegrasyonun benzetim temelli tekniklerle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 293669.
- [116] Krause P. C., *Analysis of electric machinery*, McGraw-Hill, 2th ed., New York, 2002.
- [117] Kundur P., *Power system stability and control*, Tata McGraw-Hill Education, New York, 1994.
- [118] Ling P., Research on graphical modeling and low voltage ride-through control strategies of doubly fed induction wind generator system, Phd Thesis, Tsinghua University, Haidian, 2010.
- [119] Guo W., Xiao L., Dai S., Enhancing low-voltage ride-through capability and smoothing output power of DFIG with a superconducting fault-current limiter–magnetic energy storage system, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, **27**, 277-295.
- [120] Parveen T., Composite load model decomposition induction motor contribution, Phd Thesis, Queensland University of technology, 2009.
- [121] Bai H., Novel measurement based load modeling and demand side control methods for fault induced delayed voltage recovery mitigation, Graduated Thesis and Dissertations, Iowa State University, 2010.
- [122] Cardenas R., Pena R., Asher G., Clare J., Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems using a flywheel driven by a vector controlled induction machine, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2011, **48**, 625-635.
- [123] Cardenas R., Pena R., Asher G., Clare J., Power smoothing in wind generation systems using a sensorless vector controlled induction machine driving a flywheel, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2004, **19**, 206-216.
- [124] Balasubramanian R., Kalantar M., Tripathy S.C., Dynamics and stability of wind and diesel turbine generators with superconducting magnetic energy storage 75 unit on an isolated power system, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 1991, **6**, 579-585.
- [125] Abbey C., A doubly-fed induction generator and energy storage system for wind power applications, Master of Sciences Thesis, McGill University, 2004.

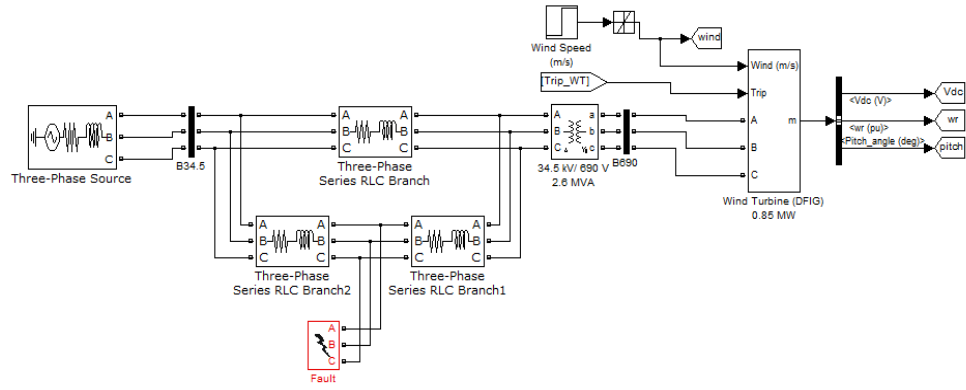
- [126] Johansson P., Andersson B., Comparison of simulation programs for supercapacitor modeling, Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, 2008.
- [127] Gaiceanu M., MATLAB/simulink-based grid power inverter for renewable energy sources integration, *A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications*, 2012, **3**, 220-250.
- [128] Jovicic D., Phase locked loop system for FACTS, *IEEE Transaction on Power Systems*, 2003, **18**, 1116-1124.
- [129] Milano F., An open source power system analysis toolbox, *IEEE Transaction on Power Systems*, 2005, **20**, 1199-1206.

EKLER

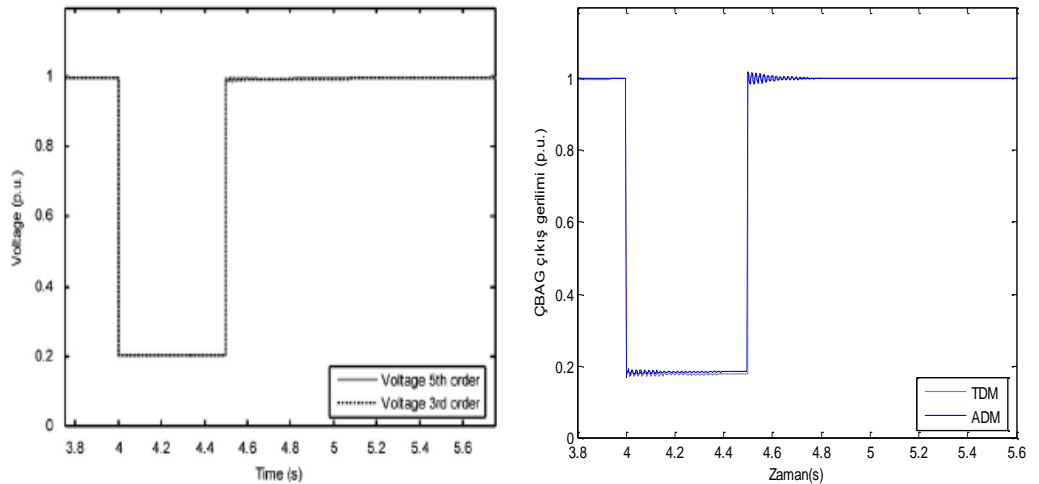
EK-A

Ek kısmında TDM ve ADM farklı bir test sisteminde 3 faz kısa devre analizi incelenmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan yük modellerinin farklı bir benzetim çalışmasında yük akışı analizi yapılmıştır.

TDM ve ADM farklı bir test sisteminde [5] denenerek ÇBAG'ün çıkış gerilimleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca test sisteminden elde edilen diğer sonuçlar şekiller ile gösterilmiştir.

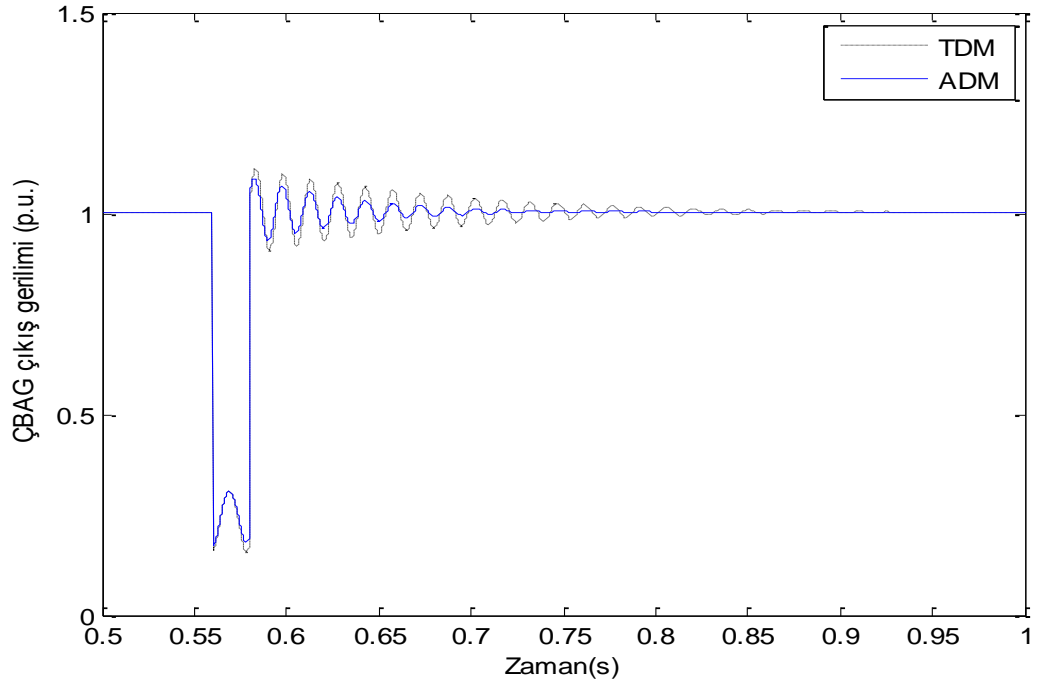


Şekil A.1. TDM ve ADM'nin uyarıldığı test sistemi

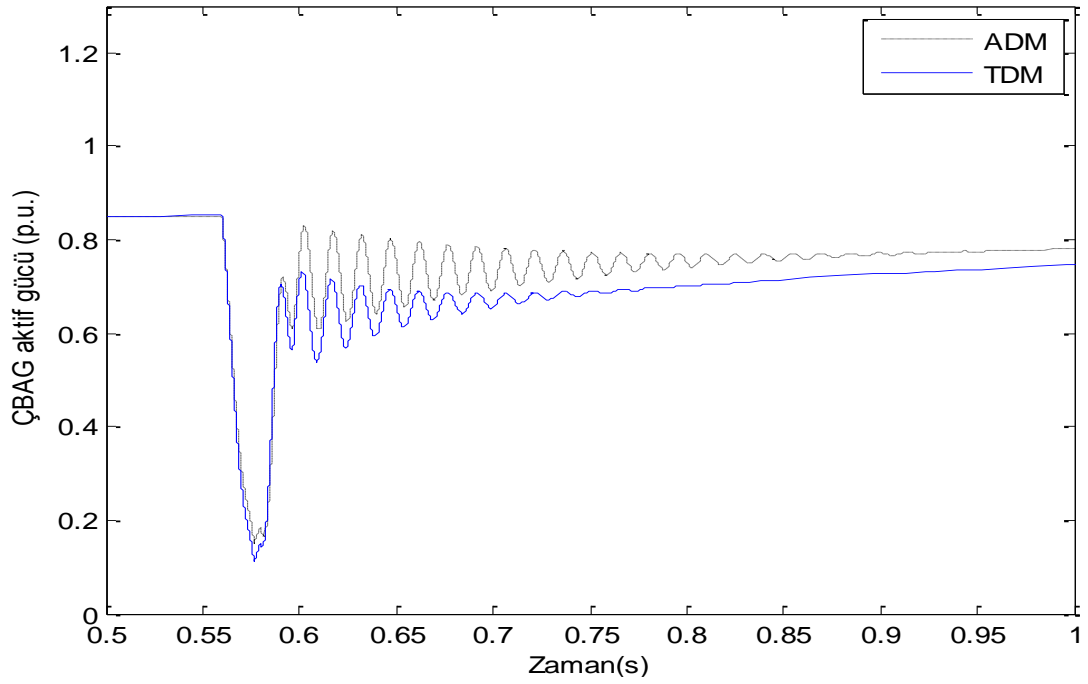


Şekil A.2. ÇBAG çıkış gerilimi (TDM ve ADM'nin test sistemi analizi)

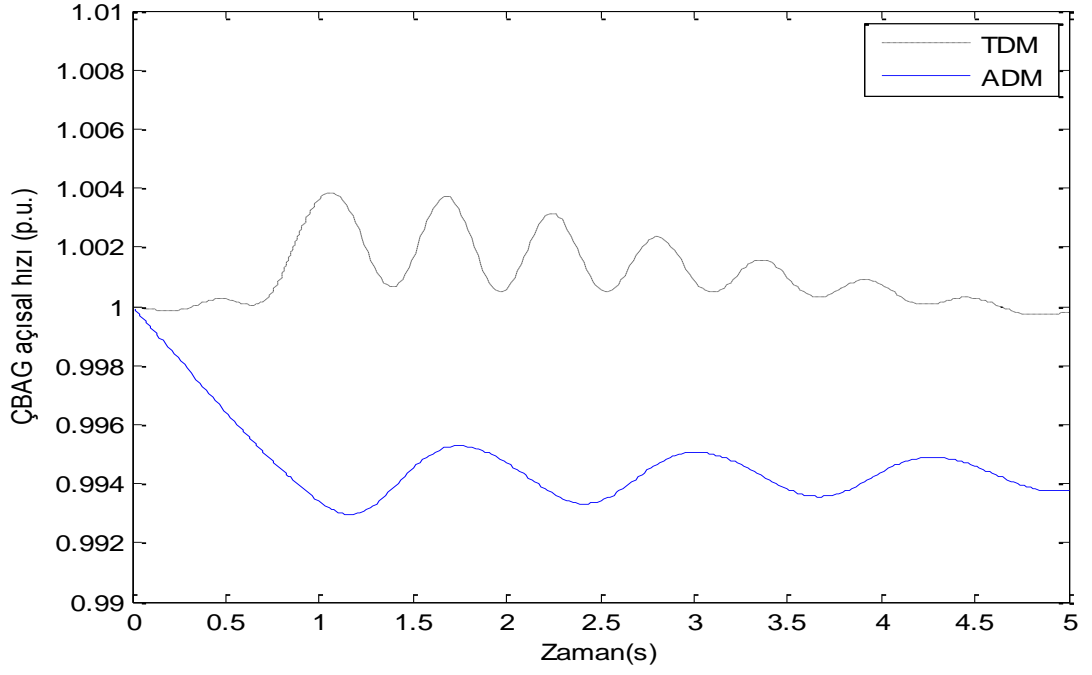
3 faz arızasının 4 saniye ile 4.5 saniye arasında olmasında ÇBAG geriliminin 0.2 p.u. değerine düştüğü görülmüştür. Test sisteminde elde edilen bazı sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.



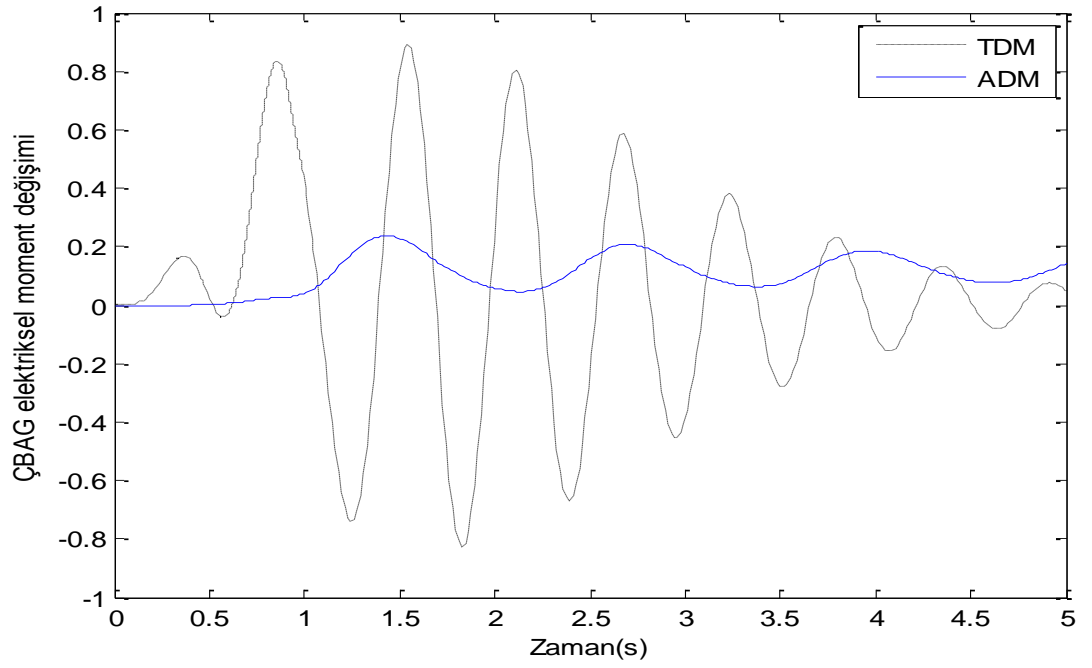
Şekil A.3. ÇBAG çıkış gerilimi



Şekil A.4. ÇBAG aktif gücü



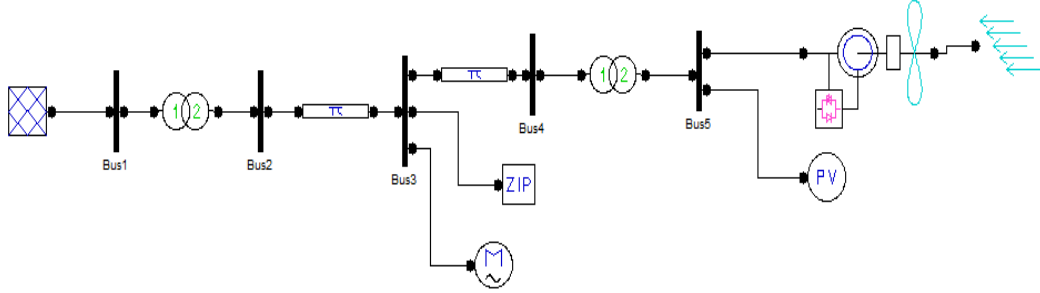
Şekil A.5. ÇBAG açısal hızı



Şekil A.6. ÇBAG elektriksel momentini

EK-B

Matematiksel olarak modellenmeleri oluşturulan üstel ve ZIP, üstel+asenكرون motor, ZIP+asenكرون motor yük modellerinin analizinde kullanılan Power System Analysis Toolbox (PSAT) programı test sistemi şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil B.1. Power System Analysis Toolbox (PSAT) programının kullanılması ile oluşturulan test sistemi

0.6MW-0.55 MVar gücünde oluşturulan üstel ve ZIP yük modelleri ile yük akışı yaptığımızda bara 3’deki gerilim değerinin 0,93-0,94 p.u. civarında olduğu görülmüştür. 1 MW gücünde asenكرون motorun devreye üstel ve ZIP yük modeli ile alınması ile yapılan güç akışında bara 3 gerilim 0,9 p.u. civarında olduğu görülmüştür. Güç akışı sonuçları sonucunda 34,5 kV’luk baradaki doğrusal olmayan yüklerin devreye girip çıkmasında elde edilen sonuçların doğruluğu gösterilmiştir.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Döşoğlu M. K.**, Basa Arsoy A., Modeling and simulation of static loads for wind power applications, *Neural Computing and Applications*, DOI: 10.1007/s00521-014-1583-3.
- [2] **Döşoğlu M. K.**, Basa Arsoy A., Transient stability investigation of a power system with multiple SVC and TCSC, *Energy Education Science and Technology*, 2012, **29**, 1445-1456.
- [3] **Döşoğlu M. K.**, Öztürk A., Poyraz G., Guvenc U., Recovering the voltage dip analysis with STATCOM of DFIG in multi-machine wind farm, *Rzegład Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2012, **10**, 166-171.
- [4] **Döşoğlu M. K.**, Öztürk A., Tosun S., Güvenç U., Investigation of static and dynamic load analysis in the multi-machine wind farms using UPFC, *Elektronika IR Elektrotehnika*, 2012, **117**, 59-64.
- [5] **Döşoğlu M. K.**, Öztürk A., Investigation of different load changes in wind farm by using FACTS devices, *Advances in Engineering Software, Elsevier*, 2012, **45**, 292-300.
- [6] Öztürk A., **Döşoğlu M. K.**, Investigation of the control voltage and reactive power in wind farm load bus by STATCOM and SVC, *Scientific Research and Essays*, 2010, **5**, 1993-2003.
- [7] Duman S., Öztürk A., **Döşoğlu M. K.**, Tosun S., Economic dispatch by using different crossover operators of genetic algorithm, *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2010, **10**, 1173-1183.
- [8] **Döşoğlu M. K.**, Öztürk A. Saraçoğlu B., Investigation of the effects of STATCOM and SSSC static voltage stability continuation power flow operation, *SDU International Technological Science*, 2011, **3**, 23-34.
- [9] **Döşoğlu M. K.**, Duman S., Öztürk A., Tosun S., The investigation of static voltage stability in power system by SVC and TCSC, *SDU International Technological Science*, 2010, **2**, 14-25.
- [10] **Döşoğlu M. K.**, Öztürk A., investigation of the voltage, reactive power and active power in the wind farm change by TCSC And SSSC, *Journal of New World Sciences Academy*, 2010, **2**, 14-25.
- [11] Tosun S., Öztürk A., Duman S., Yalçın M. A., **Döşoğlu M. K.**, The determination of the distance between the conductors in bundled conductor used in high voltage transmission lines by using simulated annealing, *Journal of New World Sciences Academy*, 2010, **2**, 428-434.

- [12] Duman S., **Döşoğlu M. K.**, Öztürk A., Erdoğan P., Economic dispatch by using simulated annealing, genetic algorithm and tabu search algorithms power system in turkey, *Journal of New World Sciences Academy*, 2010, **1**, 64-78.
- [13] **Döşoğlu M. K.**, Duman S., Öztürk A., Genetik algoritma kullanarak ekonomik dağıtım analizi: Türkiye uygulaması, *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 2009, **12**, 167-172.
- [14] **Döşoğlu M. K.**, Tosun S., Saraçoğlu B., Poyraz G., Farklı rüzgar hız modellerinin sabit hızlı rüzgar türbini üzerinde oluşturduğu etkilerin incelenmesi, *Journal of Advanced Technology Sciences*, 2013, **2**, 19-27.
- [15] **Döşoğlu M. K.**, Tosun S., Öztürk A., Poyraz G., Faz kaydırıcı transformatörlerin statik gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Journal of Advanced Technology Sciences*, 2013, **2**, 43-52.
- [16] Duman S., Tosun S., **Döşoğlu M. K.**, Öztürk A., Yüksek gerilim hatlarında demet iletkenler arası mesafenin PSO ile belirlenmesi, *Electrotech Dergisi*, 2010, **189**, 116-120.
- [17] **Döşoğlu M. K.**, Basa Arsoy A., Analysis of reduced order model based on doubly-fed induction generators during different fault times, *Electrical and Electronics Engineering conference*, Bursa, Turkey, 28-30 November 2013.
- [18] **Döşoğlu M. K.**, Poyraz G., Dursun M., Öztürk A., Control of dc link voltage unit with fuzzy logic controller in the wind farm, *Electrical and Electronics Engineering conference*, Bursa, Turkey, 28-30 November 2013.
- [19] **Döşoğlu M. K.**, Tosun S., Öztürk A., Saraçoğlu B., Poyraz G., Weibull distribution and composite wind speed transient stability analysis of wind turbine based on DFIG, *7 International Advanced Technologies Symposium*, Istanbul, Turkey, 30 October-1 November 2013.
- [20] **Döşoğlu M. K.**, Tosun S., Öztürk A., Saraçoğlu B., Poyraz G., Investigation of static voltage stability effects of tap changer transformer in power systems, *7 International Advanced Technologies Symposium*, Istanbul, Turkey, 30 October-1 November 2013.
- [21] **Döşoğlu M. K.**, Basa Arsoy A., Investigation of various voltage sag analyses in wind farm through SVC, *Electrical and Electronics Engineering conference*, Bursa, Turkey, 01-04 December 2011.
- [22] **Döşoğlu M. K.**, Basa Arsoy A., Investigation of transient stability of multi machine power systems with multiple UPFC, *Electrical and Electronics Engineering conference*, Bursa, Turkey, 01-04 December 2011.
- [23] Doğan M., **Döşoğlu M. K.**, Maden D., Tosun S., Öztürk A., Investigation of the best placement for voltage stability by STATCOM, *Electrical and Electronics Engineering conference*, Bursa, Turkey, 01-04 December 2011.

- [24] Doğan M., Tosun S., Öztürk A., **Döşoğlu M. K.**, Investigation of TCSC and SSSC controller effects on the power system, *Electrical and Electronics Engineering conference*, Bursa, Turkey, 01-04 December 2011.
- [25] Öztürk A., Çobanlı S., Duman S., Tosun S., **Döşoğlu M. K.**, Yapay arı kolonisi algoritması ile elektrik güç sistemi optimal yakıt maliyetinin belirlenmesi, *6 th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey, 16-18 May 2011.
- [26] Tosun S, Öztürk A., Yalçın M. A., **Döşoğlu M. K.**, Güvenç A., Güç sisteminde SVC ve STATCOM denetleyici etkilerinin incelenmesi, *6 th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey, 16-18 May 2011.
- [27] **Döşoğlu M. K.**, Duman S., Öztürk A., Tosun S., Environmental/economic load dispatch using bacterial foraging algorithm based on particle swarm optimization, *International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications 2010*, Kayseri Turkey, 21-24 June 2010.
- [28] Öztürk A., Duman S., **Döşoğlu M. K.**, Tosun S., The determination of the bundled conductor distance used in high voltage transmission lines by genetic algorithm, *International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications 2009*, Trabzon, Turkey, 02-04 June 2009.
- [29] Öztürk A., **Döşoğlu M. K.**, Investigation of the control voltage and reactive power in wind farm load bus by STATCOM and SVC, *Electrical and Electronics Engineering conference 2009*, Bursa, Turkey, 05-08 November 2009.
- [30] Kirişoğlu S., **Döşoğlu M. K.**, Öztürk A., Analysis of mathematical calculations on Matlab GUI, *5 th International Advanced Technologies Symposium*, Karabük, Turkey, 13-15 May 2009.
- [31] **Döşoğlu M. K.**, Basa Arsoy A., Tam ve azaltılmış derece modellenmiş rüzgar santrallerinin geçici durum davranışı, *Enerji Verimliliği Konferansı*, İzmit, Türkiye, 23-24 Mayıs 2013.
- [32] Alcan Y., Öztürk A., **Döşoğlu M. K.**, Linyit ile çalışan elektrik üretim santrallerinde karşılaşılan sorunların enerji verimliliğine etkileri ve çözüm önerileri, geçici durum davranışı, *Enerji Verimliliği Konferansı*, İzmit, Türkiye, 23-24 Mayıs 2013.
- [33] **Döşoğlu M. K.**, Basa Arsoy A., Rüzgar santralinde geçici durumun incelenmesi, *Enerji Verimliliği Konferansı*, İzmit, Türkiye, 12-13 Mayıs 2011.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Gaziantep’te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Mersin’de tamamladı. 2002 yılında girdiği Abant İzzet Baysal Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü’nden 2006 yılında Elektrik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2008-2010 yılları arasında, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2007 yılından beri Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.