

TC.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**Rüzgâr Türbinlerinde Bireysel Hatve Açısının PID, Bulanık PID ve Genetik
Bulanık Denetleyiciler ile Kontrol Edilerek Elektriksel Güç Çıkışı ve Momentin
İyileştirilmesi**

Zafer CİVELEK

OCAK 2017

Elektrik Elektronik Anabilim Dalında Zafer CİVELEK tarafından hazırlanan Rüzgâr Türbinlerinde Modern Kontrol Tekniklerinin Uygulanması adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nihat İNANÇ

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Necaattin BARIŞCI

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY

Üye : Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM

Üye : Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE

Üye : Yrd. Doç. Dr. Atilla ERGÜZEN

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*Sevgili Eşime, Çocuklarıma
ve Aileme*



ÖZET

Rüzgâr Türbinlerinde Bireysel Hatve Açısının PID, Bulanık PID ve Genetik Bulanık Denetleyiciler ile Kontrol Edilerek Elektriksel Güç Çıkışı ve Momentin İyileştirilmesi

CİVELEK, Zafer

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY

Ocak 2017, 144 sayfa

Bu tezde, rüzgâr türbinlerinin bireysel hatve açısının PID, bulanık PID ve genetik bulanık denetleyiciler ile kontrol edilerek elektriksel güç çıkışı ve türbin üzerindeki moment yüklerinin iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr türbini modeli olarak Amerika Yenilenebilir Enerji Laboratuvarının (NREL-National Renewable Energy Laboratory) geliştirdiği Matlab/Simulink ortamında kullanılabilen Fast (Fatigue Aerodynamics, Structures and Turbulence) modeli kullanılmıştır. Fast modeli rüzgâr türbininin kanat hatve açılarının hem kollektif (yani bütün kanatlar aynı açı ile dönmesi) hem bireysel (yani kanatlar birbirinden bağımsız olarak ayrı açıları ile dönmesi) olarak kontrolüne izin vermektedir. Ayrıca Fast modeli gerçek zamanlı olarak rüzgâr türbininin mekanik yük hesaplamalarını yaparak Matlab/Simulink ortamına aktarmaktadır. Fast rüzgâr türbini modeli diğer rüzgâr türbini modellerinde olmayan bu özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir.

Çalışmalar için oluşturulan rüzgâr enerji sisteminde 1,5 MW’lık rüzgâr türbini ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratör (KMSJ) kullanılmıştır. Hem bireysel kanat hatve açısı hem de kollektif kanat hatve açısı modellerinde çıkış gücünü kontrol etmek için PID, bulanık PID ve genetik bulanık denetleyiciler kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr türbini, bireysel hatve açısı kontrolü, bulanık mantık, bulanık PID, PID



ABSTRACT

Electrical Output Power and Moment Loads Improving by The Individual Pitch Angle was Controlled by PID, Fuzzy PID and Genetic Fuzzy Controllers in The Wind Turbines

CİVELEK, Zafer

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Eng., Ph. Degree Thesis

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY

January 2017, 144 pages

In this thesis, a study is carried out on the improvement of electrical power output and torque load on the turbine by controlling the individual pitch angle of wind turbines with PID, fuzzy PID and genetic fuzzy controllers. The work has been done in Matlab / Simulink environment. Fast (Fatigue Aerodynamics, Structures and Turbulence) model which can be used in Matlab / Simulink environment developed by American Renewable Energy Laboratory (NREL) was used as a wind turbine model. The Fast model permits both the collective (ie all the blades rotate at the same angle) and individual (That is, the blades rotate independently of each other with separate openings) control of the opening of the blade of the wind turbine. In addition, the Fast model real-time calculates the mechanical load of the wind turbine and transfers it to the Matlab / Simulink environment. Fast wind turbine model is preferred due to these features which are not in other wind turbine models. A 1.5 MW wind turbine and Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) were used in the wind energy system created for the studies. PID, fuzzy PID and

genetic fuzzy controllers have been used in the collective and individual pitch control to control output power. The simulation results were compared.

Key words: Wind turbine, individual pitch control, fuzzy logic, fuzzy PID, PID



TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve biz araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine sunan, tez yöneticisi hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY'e, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Atilla ERGÜZEN'e, teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1.Literatür Özetleri	1
2.MATERYAL VE YÖNTEM	4
2.1.Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi	4
2.2.Rüzgâr Türbinlerinin Yapısı.....	6
2.3.Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Jeneratörler.....	8
2.3.1. İndüksiyon jeneratörleri	8
2.3.2. Değişken Hız Jeneratörler	10
2.3.3. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratör (KMSJ).....	12
2.4.Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Kontrol Yöntemleri.....	13
2.4.1. Klasik Kontrol Sistemi Tasarımı	13
2.4.2. Modern Kontrol Sistemleri.....	24
2.5. Rüzgâr Türbinlerinde Kontrol (Değişken Hız Değişken Hatve Açısı)	48
2.5.1 Ayırık Hızlı Çalışma	51
2.5.2. Aralıklı Hız Çalışması.....	52
2.5.3. Geçiş Yükünü Azaltma için Düzgün Geçiş Bölgesi	54

2.5.4. İyileştirilmiş Güç Regülasyonu için Geçiş Bölgesindeki Hız Desteği.	56
2.5.5. Kontrol Edilebilirliği İyileştirmek için Geçiş Bölgesinde Hatve Açısı Kontrolü.....	58
2.6. Rüzgâr Türbinlerinde Mekanik Yükler	60
2.6.1. Kanat Yükleri	62
2.6.2. Mekanik Yüklerin Kontrol Algoritmaları	63
2.6.3. d-q Eksen Çevrimi.....	64
2.6.4. Bireysel Hatve Açısı Kontrolü ile Mekanik Yük Azaltma.....	65
2.6.5. Çalışma Esnasındaki Hesaplamaya Dayalı ve Rastgele Mekanik Yükler	66
2.7. Güç Kalitesi.....	70
2.8. Fast Rüzgâr Türbini Simülatörü	71
3.BULGULAR	74
3.1.PID kontrolör ile Çıkış Gücü Kontrol Edilen Rüzgâr Türbininin Bireysel Hatve Açısı Kontrolü ile Mekanik Yüklerinin Azaltılması	74
3.2.Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı (Mamdani)	87
3.3. Genetik Algoritma ile Optimize Edilmiş Bulanık Mantık Denetleyici	100
3.4. Bulanık PID Kontrolör	107
3.5. Rüzgâr Türbininde Güç Kalitesi ve Moment Değişimi.....	117
3.5.1. Rüzgâr Türbininin Bireysel Hatve Açısı Kontrolü ve Güç Kalitesi-Moment Dengesi	119
3.5.2. Çıkış Gücü Kontrolör Tasarımı	121
3.5.3. Güç-Moment Dengeleyicisi Kontrolör Tasarımı	123
3.5.4 Simulasyon Sonuçları.....	124
4.SONUÇLAR	133
KAYNAKLAR	136
EKLER	141

EK 1.....	141
EK 2.....	142
ÖZGEÇMİŞ.....	143



ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Ziegler ve Nichols değerleri.....	20
2.2. Kritik kazanç Kkr ve kritik periyod Pkr 'ye dayanan Ziegler-Nichols ayar kuralı	22
2.3. Kontrol katsayılarının etkilerinin karşılaştırılması.....	23
2.4. Bazı Benchmark fonksiyonları.....	46
2.5. Genetik Algoritmaların Benchmark fonksiyonlarına uygulanmasındaki sonuçlar	47
2.6. Bazı test fonksiyonları.....	47
2.7. Test fonksiyonlarının algoritmalara uygulanma sonuçları.....	48
2.8. Fast arşivindeki örnek modeller.....	72
3.1. Moment karşılaştırma çizelgesi.....	79
3.2. Bulanık mantık kural çizelgesi.....	88
3.3. Bulanık mantık denetleyicinin bireysel ve kolektif moment tablosu.....	93
3.4. Bulanık mantık moment karşılaştırma çizelgesi	100
3.5. Bulanık kural tablosu	101
3.6. Genetik bulanık denetleyicinin bireysel ve kolektif moment tablosu.....	102
3.7. Bulanık PID moment karşılaştırma çizelgesi	109
3.8. Bulanık PID denetleyicinin bireysel ve kolektif moment tablosu	111
3.9. I. Kanat Momentleri	128
3.10. Kule Momentleri	131
3.11. Denetleyicilerin moment iyileştirmesinde karşılaştırılması.....	135

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

2.1. Rüzgâr türbini bileşenleri.....	6
2.2. Güç faktörü düzeltme kondansatörü ile birlikte bir indüksiyon makinasının eşdeğer devresi.....	9
2.3. 1 MW'lık bir indüksiyon makinasında aktif gücün kayma ile değişimi.....	9
2.4. Geniş bölgesel değişken hız üretimi.....	10
2.5. Dar bölgesel değişken hız üretimi.....	11
2.6. Kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlü doğrudan sürülen rüzgâr türbini.....	12
2.7. Seri kontrol sistemi blok diyagramı.....	14
2.8. Geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı.....	15
2.9. Durum geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı.....	16
2.10. PID kontrol sistemi.....	18
2.11. Kontrol sistemlerinin etkileri.....	18
2.12. %25 maksimum sapma gösteren birim basamak cevap eğrisi.....	18
2.13. Bir sistemin birim basamak cevabı.....	19
2.14. Ziegler ve Nichols teğet doğrusu.....	20
2.15. Orantılı kontrol yöntemi.....	21
2.16. Kararlı salınımlar.....	21
2.17. Bir bulanık kümenin grafik gösterimi.....	26
2.18. 1-üçgen 2-yamuk 3-Gauss 4-Çan eğrisi 5- Singleton.....	27
2.19. İki boyutlu bulanık ilişkinin grafiksel yorumu.....	33
2.20. A sınıfı Bulanık PID kontrolör.....	37
2.21. B sınıfı Bulanık PID kontrolör.....	38
2.22. C sınıfı Bulanık PID kontrolör.....	38

2.23. Standart GA akış şeması.....	41
2.24. IGA akış şeması.....	44
2.25. Bazı Benchmark fonksiyonlarının grafikleri.....	45
2.26. İdeal güç eğrisi.....	49
2.27. Temel sabit hız-sabit hatve açısı kontrol stratejisi.....	50
2.28. Temel değişken hız-değişken hatve açısı kontrol stratejisi.....	50
2.29. Ayırık hız kontrol stratejisi.....	51
2.30. Ayırık hız kontrol stratejisi (a) Elde edilen güç (b) Güç verimi.....	52
2.31. Aralıklı değişken hız kontrol stratejisi.....	53
2.32. Temel değişken hız -sabit hatve açısı kontrol stratejisi.....	54
2.33. Değişken hız sabit hatve açısı için opsiyonel kontrol stratejisi.....	55
2.34. Değişken hız-sabit hatve açısı için opsiyonel kontrol stratejisi (a) elde edilen güç (b) güç verimi.....	56
2.35. Düzenlenmiş değişken hız hatveden tüye (pitch to feather) kontrol stratejisi (kontrolör girişimleri azaltılmış).....	57
2.36. Düzenlenmiş değişken hız hatveden tüye (pitch to feather) kontrol stratejisi (kontrolör girişimleri azaltılmış) (a) elde edilen güç (b) güç verimi.....	58
2.37. Düzenlenmiş değişken hız hatveden tüye (pitch to feather) kontrol stratejisi (kontrol edilebilirlik iyileştirilmiş).....	59
2.38. Düzenlenmiş değişken hız hatveden tüye (pitch to feather) kontrol stratejisi (kontrol edilebilirlik iyileştirilmiş) (a) elde edilen güç (b) güç verimi.....	60
2.39. Rüzgâr türbininin kanadına etkileyen kuvvetler.....	63
2.40. Kanat moment eksenleri.....	66
2.41. Düzlem içi ve düzlem dışı kuvvetleri.....	67
2.42. Düzlen içi ve düzlem dışı kanat yüklerinin dağılımı.....	68
2.43. Kule gölge parametreleri.....	70
3.1. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli moment ayırım kısmı.....	74
3.2. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli çıkış gücü kontrol kısmı.....	75
3.3. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli kanat momentleri.....	75
3.4. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli kanat momentlerinin çevrim kısmı.....	76
3.5. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli Fast simülatör kısmı.....	76

3.6. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli jeneratör kısmı.....	77
3.7. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli bütün bloklar.....	78
3.8. Bireysel ve kollektif PID kontrol çıkışı.....	80
3.9. Bireysel ve kollektif PID kontrol hatve açıları.....	80
3.10. Birinci kanat edgewise momenti.....	81
3.11. Birinci kanat flapwise momenti.....	81
3.12. Birinci kanat hatve momenti.....	81
3.13. Birinci kanat düzlem momenti.....	81
3.14. Birinci kanat düzlem dışı momenti.....	82
3.15. Kule dönme momenti.....	82
3.16. Kule hatve momenti.....	82
3.17. Kule yaw momenti.....	82
3.18. Dönmeyen LSS eğilme momenti.....	82
3.19. Döner LSS eğilme momenti.....	82
3.20. Moment şekilleri.....	83
3.21. Birinci kanat moment değerlerinin karşılaştırılması.....	84
3.22. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması.....	85
3.23. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması.....	85
3.24. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması.....	86
3.25. Tek bir kanatın üzerindeki ortalama moment.....	87
3.26. Hata ve hatanın türevinin değişimi.....	87
3.27. Hatanın türevi bulanık kümeleri.....	89
3.28. Hata bulanık kümeleri.....	89
3.29. Hatve açısı değişimi bulanık kümeleri.....	90
3.30. Simüle edilen sistemin Matlab/Simulink modeli-kontrol ünitesi.....	91
3.31. Simüle edilen sistemin Matlab/Simulink modeli-rüzgâr türbini ünitesi.....	92
3.32. Simüle edilen sistemin Matlab/Simulink modeli-mekanik yük ölçüm ünitesi.....	92
3.33. Bireysel ve kollektif bulanık (Mamdani) kontrol çıkışı.....	93
3.34. Bireysel ve kollektif bulanık (Mamdani) kontrol hatve açıları.....	94
3.35. Birinci kanat edgewise momenti.....	94
3.36. Birinci kanat flapwise momenti.....	94
3.37. Birinci kanat hatve momenti.....	95

3.38. Birinci kanat düzlem momenti.....	95
3.39. Birinci kanat düzlem dışı momenti.....	95
3.40. Kule dönme momenti.....	95
3.41. Kule hatve momenti.....	96
3.42. Kule yaw momenti.....	96
3.43. Dönmeyen LSS eğilme momenti.....	96
3.44. Döner LSS eğilme momenti.....	96
3.45. Birinci kanat moment değerlerinin karşılaştırılması.....	97
3.46. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması.....	97
3.47. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması.....	98
3.48. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması.....	98
3.49. Bulanık kontrol kanat moment ortalaması.....	99
3.50. Bireysel bulanık ve genetik bulanık çıkışları.....	102
3.51. Birinci kanat moment değerlerinin karşılaştırılması.....	103
3.52. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması.....	103
3.53. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması.....	104
3.54. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması.....	104
3.55. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması.....	105
3.56. Dönmeyen LSS eğilme momenti.....	105
3.57. Dönmeyen kule hatve momenti.....	105
3.58. Kule üst yaw momenti.....	106
3.59. Dönmeyen kule yaw momenti.....	106
3.60. Kule hatve momenti.....	106
3.61. Kule yaw momenti.....	106
3.62. Kule dönme momenti.....	106
3.63. Birinci kanat edgewise momenti.....	106
3.64. Birinci kanat hatve momenti.....	107
3.65. Birinci kanat düzlem momenti.....	107
3.66. Birinci kanat düzlem dışı momenti.....	107
3.67. Birinci kanat flapwise momenti.....	107
3.68. Bulanık PID blok şemasının içi.....	108
3.69. Bulanık PID çıkış grafiği.....	110

3.70. Bulanık PID hatve açısı değişimi.....	110
3.71. Bulanık PID kp değişimi.....	110
3.72. Bulanık PID ki değişimi.....	110
3.73. Bulanık PID kd değişimi.....	110
3.74. Birinci kanat moment değerlerinin karşılaştırılması.....	111
3.75. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması.....	112
3.76. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması.....	112
3.77. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması.....	113
3.78. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması.....	113
3.79. Bulanık PID kanat momentlerinin ortalaması.....	114
3.80. Birinci kanat edgewise momenti.....	114
3.81. Birinci kanat flapwise momenti.....	114
3.82. Birinci kanat hatve momenti.....	115
3.83. Birinci kanat düzlem momenti.....	115
3.84. Birinci kanat düzlem dışı momenti.....	115
3.85. Kule dönme momenti.....	115
3.86. Kule hatve momenti.....	116
3.87. Kule yaw momenti.....	116
3.88. Döner kule yaw momenti.....	116
3.89. Dönmeyen kule yaw momenti.....	116
3.90. Kule üst yaw momenti.....	116
3.91. Dönmeyen LSS eğilme momenti.....	116
3.92. Döner LSS eğilme momenti.....	117
3.93. Değişik çarpım faktörleri için güç ve moment eğrileri.....	118
3.94. Moment ve güç dengeli bireysel hatve açısı kontrollü rüzgâr türbini modeli.....	119
3.95. Bireysel hatve açısı kontrol sistemi.....	120
3.96. Kollektif hatve açısı kontrol sistemi.....	121
3.97. Moment ve güç dengeleme için bulanık-P kontrolör sistemi.....	123
3.98. Moment ve güç kalitesi bulanık kümeleri.....	123
3.99. Çıkış katsayısı bulanık kümeleri.....	124
3.100. Rüzgâr hızı.....	125
3.101. Çıkış gücü.....	125

3.102. Kanat moment değişimi.....	126
3.103. G-moment dengeleyici bulanık P kontrolörün katsayı değişimi.....	126
3.104. G salınımındaki değişim.....	126
3.105. Bulanık PID kontrolörün K_p katsayısındaki değişim.....	127
3.106. Bulanık PID kontrolrn K_i katsayısındaki değişim.....	127
3.107. Bulanık PID kontrolrn K_d katsayısındaki değişim.....	127
3.108. I. Kanat için momentler.....	128
3.109. 1. kanat edgewise momenti.....	129
3.110. 1. kanat flapwise momenti.....	129
3.111. 1. kanat hatve momenti.....	129
3.112. 1. kanat dzlem momenti.....	129
3.113. 1. kanat dzlem dışı momenti.....	129
3.114. Kule momentleri.....	130
3.115. Kule momentleri.....	130
3.116. Kule dnme momenti.....	130
3.117. Kule yaw momenti.....	130
3.118. Dönmeyen kule yaw momenti.....	131
3.119. Dönmeyen kule hatve momenti.....	131

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

RES	Rüzgâr Enerji Sistemi
LQG	Lineer Quadratic Gaussian
MW	Mega Watt
RT	Rüzgâr Türbini
PI	Proportional Integral
PID	Proportional Integral Derivative
DAC	Disturbance Accommodating Control
MPC	Model Prediction Control
MÖ	Milattan Önce
MS	Milattan Sonra
AC	Alternative Current
OPEC	Organization of Petroleum Exporting Countries
KMSJ	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratör
emk	elektro motor kuvveti
GA	Genetik Algoritma
IGA	Intelligent Genetic Algorithm
SGA	Standart Genetic Algorithm
SOGA	Self Organizing Genetic Algorithm
VS	Variable Speed
VP	Variable Pitch
MPPT	Maximum Power Point Tracking
LSS	Low Speed Shaft
P	Pozitif
N	Negatif
S	Sıfır
PK	Pozitif Küçük
PB	Pozitif Büyük
NK	Negatif Küçük
NB	Negatif Büyük

1. GİRİŞ

1.1.Literatür Özetleri

Enerji maliyetini azaltmaya çalışırken, tasarlanan kontrol sistemi büyük bir öneme sahiptir. Ancak kontrol sistemi sadece mümkün olan ideal güç eğrisini takip edecek şekilde tasarlanmamalı, diğer kontrol nesneleri de ihmal edilmemelidir[1, 2]. Dikkate alınması gereken kontrol nesnelerinden bir tanesi türbindeki mekanik yüklerdir. Mekanik yükler, türbinin çeşitli parçaları üzerinde malzeme yorulmasına sebep olmakta, bu nedenle sistemin faydalı ömrü kısalmaktadır. Bu nedenle rüzgâr enerji sistemlerinin (RES'lerin) ortalama maliyeti yükselmekle, enerji maliyeti de artmaktadır[3].

Bossanyi, 2003 yılında yapmış olduğu çalışmada rüzgâr türbinlerinin mekanik yüklerinden bahsetmiştir. Yapılan çalışmada, türbin kanatlarının rüzgâr ile kesişmesi, kule gölgesi, yaw hizalanması ve türbülans etkilerinin bir sonucu olarak kanatlardan rotor diskine, oradan da türbinin başlık (hub), kule gibi diğer bölümlerine geçen mekanik yüklerin olduğundan bahsedilmiştir. Bu yükler periyodik yükler olup, 1P ile başlamakta ve 2P, 3P gibi harmoniklere de sahip olmaktadır. Üç kanatlı rotorda ise bu yükler arasında 120° faz farkı bulunmaktadır. Türbin boyutları büyüdükçe bu yüklerin dağılımında da dengesizlik görülmeye başlanmakta, bu da türbin üzerinde malzeme yorulmasına sebep olup türbinin ömrünü kısaltmaktadır. Bossanyi, buna çözüm olarak bireysel hatve açısı kontrolünü önermiştir. PI denetleyiciler ile her bir kanat 1P frekansında (yaklaşık 0,3 Hz) kollektif hatve açısına ek olarak, bireysel bir ek hareket ile bu yükleri dengelemeye çalışmaktadır[4]. Yine Bossanyi'nin yaptığı başka bir çalışmada, 1P frekanslı yükleri kompanze eden kontrolöre ileri beslemeli bir filtre eklenerek, 3P frekanslı yüklerde de azaltma yapılmaya çalışılmıştır. Buradaki filtre, yük çerçevesinden birbirine karışmış olarak giren 3P harmonikleri kaldırmak için tasarlanmış basit bir notch filtresidir. Bu filtre olmadan yapılan bireysel hatve açısı kontrolü, karışık yük penceresindeki 3P harmonikleri yükseltme eğiliminde olmaktadır. Bu da nacelle, yaw, kule vb. sabit parçalar üzerindeki

yorulma yüklerinin büyümesine sebep olur. Notch filtresi bunu önlemektedir, bu yüzden bireysel hatve açısı kontrolünde karışık yük penceresindeki 3P tepesi değişmektedir. Böylece sabit parçalar, yükün düşük frekanslı harmoniklerinin kaldırılmasına bağlı olarak küçük yorulma yüklerinin azaltılmasından faydalanmaktadır[5]. Larsen tarafından 2005 yılında yapılan bir çalışmada, büyük rüzgâr türbinlerinin mekanik yüklerinin azaltılmasında yerel kanat akış ölçümü yöntemi kullanılarak güç kaybetmeksizin yük azaltımının mümkün olduğu gösterilmiştir[6]. Selvam tarafından 2009 yılında yapılmış çalışmada, birbirinden bağımsız iki kontrol yapısı ile bireysel hatve açısı kontrolörü kullanarak rüzgâr türbinlerinin yorulma yükleri azaltılmaya çalışılmıştır. Bu kontrol yapılarından birisi; çok değişkenli doğrusal kuadratik gausiyan (lineer quadratic gaussian-LQG) kontrol, diğeri ise rüzgâr hızı tahminine dayanan ileri beslemeli bozucu etki azaltma (feedforward disturbance rejection) kontrolörüdür[7]. Namık tarafından 2011 yılında yapılmış bir çalışmada, bireysel kanat açısı durum uzay (individual blade pitch state space) kontrolü ve bozukluk uygunlaştırıcı (disturbance accommodating) kontrol ile rüzgâr hızındaki karışıklıklara karşı 5 MW'lık rüzgâr türbininde yük azaltımında iyileşmeler olduğu gösterilmiştir[8].

Bossanyi tarafından 2009 yılında yapılan bir çalışmada, bireysel hatve açılı rüzgâr türbini kontrolü üzerine yapılan teorik çalışmaların uygulamada da geçerli olduğu ispat edilmiştir. Biri iki kanatlı, diğeri üç kanatlı 600 kW'lık iki rüzgâr türbini üzerinde yapılan çalışmalarla teorik çalışmaların doğruluğu gösterilmiştir[9]. Camblong tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada, rüzgâr türbinlerinde, doğrusal kuadratik gausiyan (lineer quadratic gaussian-LQG) kontrolörü hem bireysel hem de kollektif hatve açısı kontrolünde kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır[10]. Wang, bireysel hatve açısı kontrolü ve PI kontrolör kullanarak, yüksek güçlü rüzgâr türbinlerinde yüklerin azaltılmasının mümkün olduğunu göstermiştir[11]. Zhang, 2014 yılında rüzgâr türbinindeki dengeli ve dengesiz yüklerin azaltımı üzerine bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada, RT'deki dengesiz yükleri azaltacak yeni bir kontrolör önerilmiştir. Bu yeni kontrolör, bir adet PI ve iki adet rezonans düzenleyiciden oluşmaktadır. Çalışmada, önerilen kontrolör ile hem dengeli hem dengesiz yükler başarılı bir şekilde azaltılmıştır[12]. Yine Zhang 2013 yılında yaptığı çalışmada, kanat azimut açısı ölçümüne ve döner koordinat sisteminden sabit

koordinat sistemine geçişi sağlayan Coleman çevrimine ihtiyaç olmaksızın orantılı rezonans yöntemi ile bireysel hatve açısı kontrolü yapmış, 1P ve 3P harmonikleri azaltılmıştır[13]. Zhang, RT'lerin yüklerinin azaltılmasında bireysel hatve açısı kontrolü için klasik PID ile yeni önerilen oransal integral artı (proportional integral plus-PIP) kontrolörü karşılaştırmıştır. Yapılan karşılaştırmada, oransal integral artı kontrolörün daha iyi performans gösterdiği gösterilmiştir[14]. Yang 2014 yılında yaptığı çalışmada, açık denizdeki RT'lerin hem rüzgâr hem de deniz dalgasından kaynaklanan mekanik yüklerinin azaltılması için hibrit bir kontrol stratejisi önermiştir. Bireysel hatve açısı kontrol sistemi, bozukluk uzlaştırmacı kontrol (disturbance accommadating control-DAC) sistemi ve model tahminli kontrol (model prediction control-MPC) sistemi ile birleştirilmiştir. Bozukluk uzlaştırmacı kontrol sistemi, rüzgârın bozucu etkilerini, model tahminli kontrol sistemi ise deniz dalgalarının bozucu etkilerini azaltmak için kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlarda önerilen sistemin kollektif hatve açısı kontrolörüne göre daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür[15]. Namık tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada, yedek şamandıra (spar-buoy) yapısındaki rüzgâr türbinlerinde bireysel hatve açısı kontrolü kullanılarak çok nesneli doğrusal durum geri besleme (multiobjective linear state feedback) kontrolör vasıtasıyla mekanik yüklerin azaltıldığı gösterilmektedir[16]. Zhang, bireysel hatve açısı ve PI kontrol yöntemi ile MW'lık rüzgâr türbinlerinde yük azaltmanın mümkün olduğunu göstermiştir[17]. Girsang yaptığı bir çalışmada, RT'lerin yüklerini azaltmak için çok girişli çok çıkışlı (multi input multi output-MIMO) bireysel hatve açısı kontrolörü önermiştir[18].

2.MATERYAL VE YÖNTEM

2.1.Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi

İnsanlar rüzgârlara yelken açtığından beri rüzgâr enerjisi kullanılagelmiştir. İnsanların yelkenli gemileri hareket ettirmek için 5500 yıldan beri rüzgâr gücünden faydalandığı bilinmektedir. Rüzgâr enerjisi ile çalışan makineler tahıl öğütmüş ve su pompalamışlardır.

Yel değirmenlerinin ortaya çıkması ise çok daha sonra olmuştur. Dairesel hareketli yel değirmenlerinden yararlanma ilk defa Orta ve Doğu Asya toplumlarında görülmüştür. İlk rüzgâr değirmeninin MÖ 200 yıllarında antik Bağdat'ta inşa edilmiş olduğu sanılmaktadır. Türkler ve İranlılar ilk yel değirmenlerini MS 7. yüzyılda kullanmışlardır. İran'da bulunan yel değirmenleri Haçlı seferleri ile batıya taşınmıştır.

MS 10. yüzyıla kadar Doğu İran ve Afganistan'da rüzgâr yakalama kanatları ve rüzgâr değirmenlerinde tahıl öğütüldüğü bilinmektedir.

Batı dünyası rüzgâr değirmenlerini 12. yüzyılda kullanmaya başlamıştır. Buhar makinasının icad edilmesiyle birlikte, kömür odun gibi yakıtlardan sürekli enerji üretim imkânı, rüzgâr enerji üretimini ikinci planda bırakmıştır. 18. yüzyılın sonunda Hollanda'da 10 bin yel değirmeni bulunuyordu. Rüzgâr türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler 1890'ların başlarında Danimarka'da yapılmıştır.

Rüzgâr enerjisinden elektrik elde etme işleminin ilk olarak Danimarkalı meteorolojist Poul la Cour tarafından gerçekleştirildiği bilinmektedir. Poul la Cour, 1897 yılında 89 W gücünde elektrik üretim amaçlı bir rüzgâr türbini yapmıştır. Johannes Joule, 1950 yılında ilk alternatif akım (AC) ile çalışan rüzgâr türbinini geliştirmiştir. 1956 yılında 200 kW kurulu gücünde Gedser rüzgâr türbini Danimarka'nın güneyinde çalışmaya başlamıştır. Modern rüzgâr türbinlerinin öncüsü niteliğindeki bu rüzgâr türbini, elektromekanik dönüş sistemine ve asenkron jeneratöre sahiptir.

Aynı dönemde, bu makinaların geliştirilmesi için Almanya'da da önemli çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Ancak 19. yüzyılda geliştirilen ilk türbinlerin verimleri düşüktü. Almanya, 1961-1966 yılları arasında kanat uzunluğu 35m olan 100kW'lık bir rüzgâr türbin modeli üzerinde çalışmıştır. 1970'lerde Danimarka da gücü 650 kW olan türbinler kurulmuştur. Bu yıllarda İsviçre, Avusturya ve İtalya gibi ülkelerde rüzgâr türbinlerini geliştirmek için çalışmalar yapılmıştır.

Çok pervaneli yel değirmenlerinin kullanımı 19. yüzyılın ikinci yarısında ABD'de görülmeye başlamıştır. 19. yüzyılın sonunda ABD'de yüze yakın rüzgâr değirmeni fabrikası vardı ve rüzgâr değirmeni ihracatı ABD ekonomisi için büyük bir kaynaktı.

Dizel motorlar icad edilene kadar, ABD'deki büyük demir yolları çok pervaneli yel değirmenlerini kullanmışlardır. Petrol kullanımı yaygınlaşınca kadar, buhar lokomotifleri için su pompalama işlemi yel değirmenleri ile gerçekleştirilmiştir.

20. yüzyılın başlarında ABD'de binlerce, elektrik üreten rüzgâr türbini imal edilmiştir. Bu türbinler, rüzgârdan elde ettikleri dönme hareketini dişli çarklar vasıtasıyla yüksek devirli dönme hareketine çevirmekteydiler. Bu dönme hareketi elektrik jeneratörüne iletilerek elektrik enerjisi üretilmekteydi. İki veya üç tane kanatları olan bu türbinler elektrik hatlarının ulaşamadığı ve enerji ihtiyacı olan birçok yerleşim bölgesinde ve işletmelerde kullanılmıştır. Bunlarla çiftliklere enerji sağlanmış, radyo alıcıları çalıştırılmış, aydınlatma vb. işler yapılmıştır.

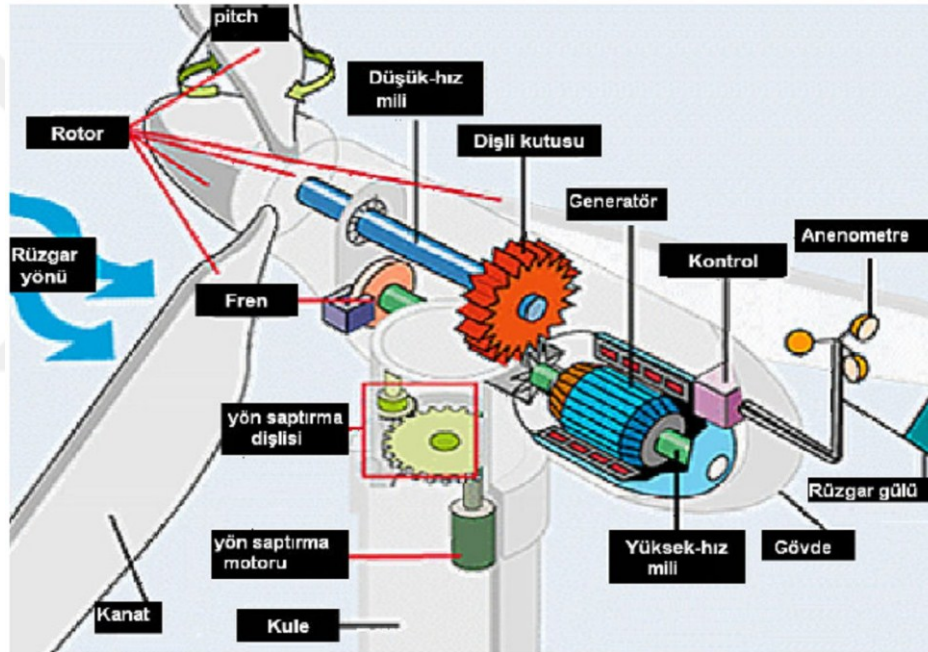
1950'li yılların başlarından itibaren elektrik şebeke hatları yaygınlaşmaya başlamış, elektrik üretimini ve kullanımını düzenleyen kanunlar çıkarılmış, bunun neticesinde rüzgâr türbinleri bir miktar duraksama dönemine girmiştir.

1973 yılında Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü (Organization of Petroleum Exporting Countries-OPEC) petrol ambargosu uyguladıktan sonra enerji fiyatları artmaya başlamıştır. Bu durum, petrol enerji kaynağının sınırlı olduğunu insanlara tekrar hatırlatmış ve diğer enerji kaynaklarından istifade etmek için bir gayret uyandırmıştır. Bu gayretin neticesinde, rüzgâr enerji sistemleri tekrar gündeme gelmiştir. 1980'li yılların başlarında enerji üretimi için rüzgâr tarlaları oluşturulmaya

başlanmıştır. Birçok ülkelerin katkılarıyla deniz üstlerinde ve karalarda yüksek güçlü rüzgâr tarlaları oluşturulmuştur.

2.2.Rüzgâr Türbinlerinin Yapısı

Türbinler tasarımlarına göre farklı parçalardan oluşabilmektedir ancak her türbinde ortak olan bazı elemanlar vardır. Şekil 2.1’de bir rüzgâr türbininin temel parçaları gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Rüzgâr türbini bileşenleri

Gövde: Rüzgâr türbininin kanatları vasıtasıyla elde edilen rüzgâr enerjisinin mekanik donanım yardımıyla elektrik enerjisine çevrildiği bölümdür.

Kanatlar: RT’nin kanatları rüzgâr gücünü mekanik güce çevirir ve rüzgâr türbininin en önemli parçalarından biridir. Rüzgârdan elde edilebilecek gücü kanat sayısı ve kanat aerodinamiği belirler.

Dişli Kutusu: Rüzgâr türbininin önemli elemanlarından biridir. Kanatlar ile jeneratör arasında bulunur. Düşük olan kanat şaft hızını yükselterek, jeneratörün çalışma hızına çıkarır.

Düşük Hızlı Mil: Kanatların rüzgârdan aldığı mekanik enerjiyi aktardığı mildir.

Yüksek Hızlı Mil: Dişli kutusu vasıtasıyla yükseltile devir sayısının jeneratöre aktarıldığı mildir.

Elektrik Jeneratörü: Dönme hareketinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlarlar. Rüzgâr türbinlerinde genelde üç çeşit jeneratör kullanılır; doğru akım jeneratörü, senkron jeneratör ve asenkron jeneratör.

Elektronik Kontrolör: Rüzgâr türbininin çeşitli kısımlarını elektronik kontrol algoritmalarıyla kontrol eden bir kısımdır.

Kule: Rüzgâr türbinini taşıyan bölümdür ve türbinin gücüne bağlı olarak değişik yüksekliklerde olabilmektedir.

Yön Saptırma Mekanizması: Rüzgâr türbinini rüzgâr yönüne çevirerek daha fazla güç elde etmeyi sağlamaktadır.

Anemometre: Rüzgâr hızını ve yönünü ölçerek, aldığı bilgileri elektronik kontrol birimine iletir.

Kanat Hareketlendirici: Kanatların, kendi etrafında dönüşünü sağlayan mekanizmadır.

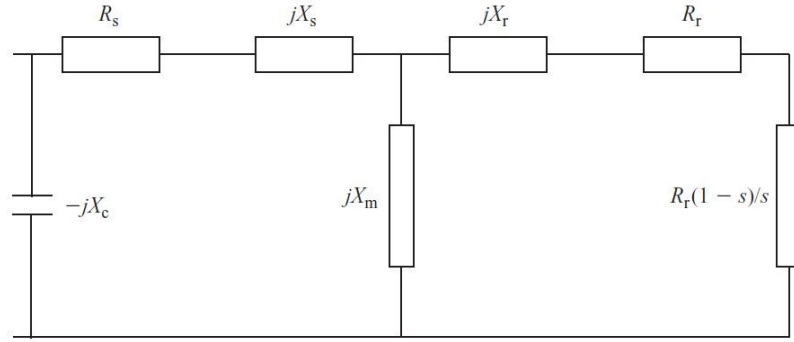
2.3.Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Jeneratörler

2.3.1. İndüksiyon jeneratörleri

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan indüksiyon jeneratörleri, klasik endüstriyel indüksiyon motorlarına çok benzerler. Fark sadece indüksiyon makinasının motor yada jeneratör olarak çalıştırılmasındadır. Makinaya torkun uygulanması veya ondan tork elde edilmesi, rotor hızının senkron hızın altında veya üstünde olmasına göre jeneratör ve motor olarak çalışması belirlenir. Bağlantı kablolarından buna göre güç akışı olur. İndüksiyon motorlarının pazarının boyutu çok büyüktür, bu yüzden bir çok durumda indüksiyon jeneratör tasarımı aynı rotor ve stator laminasyonu üzerinden olmaktadır. Bazı detaylı tasarım değişiklikleri-mesela rotor çubuk malzemesindeki farklılıklar gibi-rüzgâr türbini jeneratörlerinin değişik çalışma şekillerini yansıtmak için makine üreticileri tarafından yapılabilmektedir.

50 Hz'lik bir şebeke bağlantısında manyetik kutup sayısı tarafından belirlenen senkron hız 1500 dev/dak (4 kutup), 1000 dev/dak (6 kutup) veya 750 dev/dak (8 kutup) olacaktır. Ticari sebeplerden dolayı büyük jeneratörlerde ve çok büyük rüzgâr türbinlerinde 690 V'luk voltajın yaygın kullanımından dolayı çok yüksek akımlar nacelleye trafo yerleştirilmesine sebep olmuştur.

Jeneratörün fiziksel olarak korunması, nem girişini önleyecek şekilde düzenlenmesiyle, tamamen kapalı bir tasarım getirmiştir. Bazı türbinlerde hava kaynaklı gürültüyü azaltmak için soğutma sıvısı kullanılmaktadır. Nominal çıkış gücünde yüksek bir kayma (slip) açısı türbin tasarımcıları tarafından talep edilmektedir.

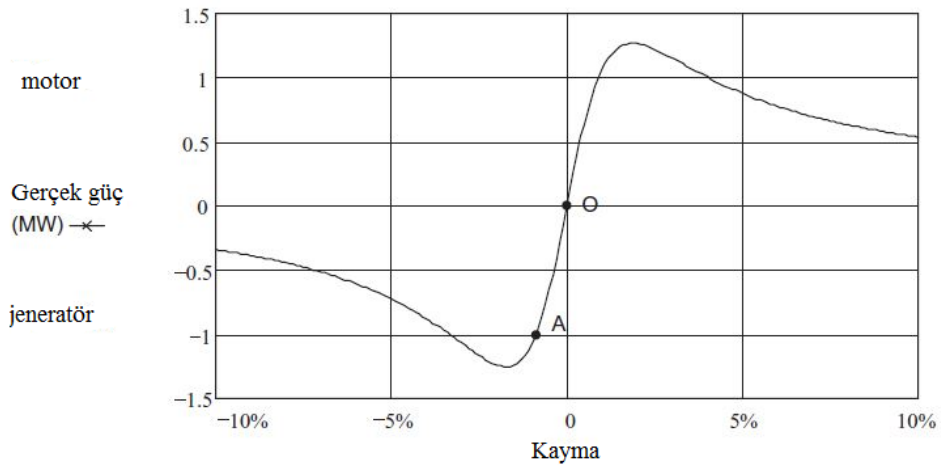


Şekil 2.2. Güç faktörü düzeltme kondansatörü ile birlikte bir indüksiyon makinasının eşdeğer devresi

Şekil 2.2’de kararlı durum analizinde kullanılan indüksiyon makinesinin klasik eşdeğer devresi gösterilmektedir[19, 20]. Kayma (s), stator ve rotor arasındaki açısal hız farkıdır ve eşitlik 2.1’de ifade edilmiştir.

$$s = \frac{w_s - w_r}{w_s} \quad (2.1)$$

Motor çalışmasında kayma pozitif, jeneratör çalışmasında negatiftir.

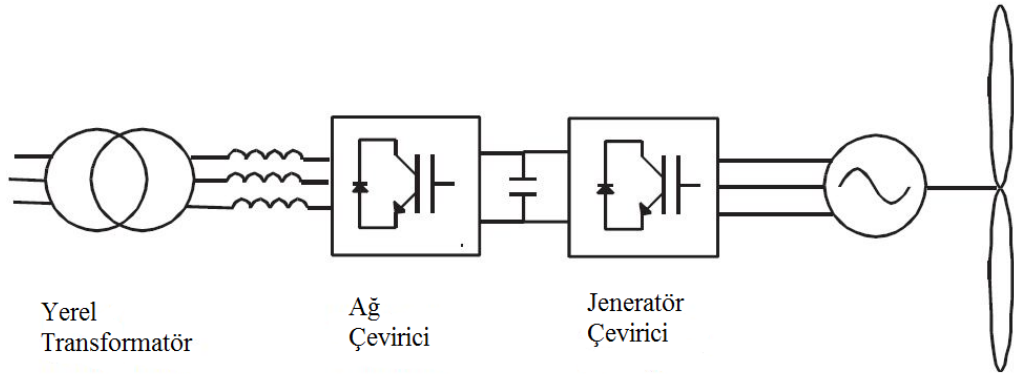


Şekil 2.3. 1 MW’lık bir indüksiyon makinasında aktif gücün kayma ile değişimi

Şekil 2.3’de, 1 MW’lık bir indüksiyon makinasında aktif gücün kayma ile nasıl değiştiği gösterilmektedir. Tercih edilen duruma göre devrenin akımı değişir. O ile A arası normal jeneratör çalışma bölgesidir. A noktasında 1 MW’lık üretim vardır, kayma $-0,8$ civarındadır ve rotor manyetik alanı statordan daha hızlıdır. Eğri tepe değerine geldiğinde 1,3 MW’lık maksimum gücün üretilebileceği görülebilir. Burada makine bir jeneratör olarak dağıtım şebekesine bağlanabilir.

2.3.2. Değişken Hız Jeneratörler

Elektriksel olarak değişken hızlı çalışmada iki temel yaklaşım vardır. Her ikisinde de geniş bir alanda değişken hızla çalıştırmak için rüzgâr türbininin çıkış gücü frekans çeviriciden geçirilir.

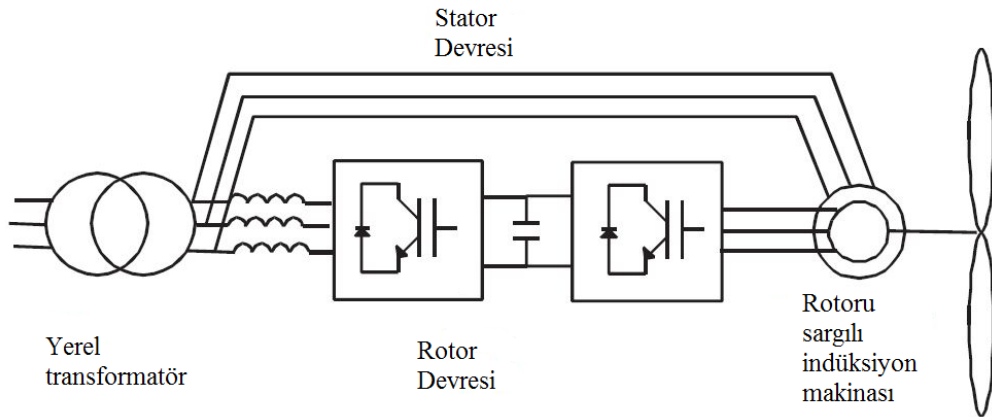


Şekil 2.4. Geniş bölgeci değişken hız üretimi

Şekil 2.4’de geniş bölgeci değişken hızlı jeneratör sisteminin nasıl düzenlendiği gösteriliyor. Geniş bölgeci değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde önceleri jeneratör çeviricisinde doğrultucu diyot köprüsü kullanılırdı. Ağ tarafındaki çeviricide akım kaynağı, tristör tarafından kontrol edilirdi[21]. Bununla birlikte komuta edilen tristörlü çeviriciler reaktif güç tüketirdi ve harmonik akımları üretirdi. Zayıf dağıtım sistemlerinde, bu tarzdaki cihazlarla uygun filtrelemeyi ve güç faktörü düzeltimini sağlamak zordur. Bu yüzden modern uygulamalarda hem senkron hem indüksiyon

jeneratörlerde iki tane voltaj kaynağı çevirici kullanılmaktadır. Her bir çevirici geyti izole edilmiş bipolar transistor (IGBT) kullanan Graetz köprüsünden oluşmaktadır. Köprüler tam bir sinüsoidal dalga üretebilecek darbe genişlik modülasyonu (2-6 kHz) ile hızlı bir şekilde anahtarlanır. Jeneratör çeviricisi gücü doğru akıma (dc) çevirir. Daha sonra ağ çeviricisi tarafından bu geri alternatif akım (ac) gücüne çevrilir.

Kontrol stratejileri değişmekle birlikte bir yaklaşım şekli de doğru akım hat voltajını sabit bir değerde tutacak şekilde jeneratör çeviriciyi kontrol etmektir. Daha sonra ağ çeviricisi, sistem dışına akan gücü ve jeneratör torkunu kontrol etmek için kullanılır[22]. 200-500 rad/sn lik bir bant genişliği ile bu tarz ekipman ile çok hızlı kontrol işlemi yapılarak % 92 gibi bir verime ulaşılabilir.



Şekil 2.5. Dar bölge değişken hız üretimi

Ağ tarafındaki çevirici, çok düşük harmonik bozulması ile herhangi bir güç faktöründe çalışacak şekilde düzenlenebilir. Şekil 2.5’de dar bölge değişken hız kontrolünün uygulamasını gösterilmektedir. Rotoru sargılı indüksiyon jeneratör kullanılmıştır ve kontrol hız-tork eğrisinin dört bölgesinde de mümkündür. Jeneratörün statörü, rotor devresindeki bir frekans çevirici ile ağı doğrudan bağlıdır. Bu çift besleme (doubly fed) yapısı ilk büyük rüzgâr türbinlerinde kullanılmıştır. O zaman, rotor devresinin frekansını değiştirmek için saykıl-çeviriciler (cyclo-

converter) kullanılmıştır. Fakat modern uygulamalarda, geniş b6lgesi değişken hız tasarımına benzer ama daha düşük güç dereceli iki voltaj kaynağı çevirici kullanılmaktadır. Kontrol teknikleri değişmekle birlikte, torku ayarlamak ve jenerat6r6 bağımsız olarak uyarmak için makine tarafındaki çeviricide vekt6r kontrol teknikleri yaklaşımı kullanılmaktadır. Ağ tarafındaki k6pr6 devresi dc hat voltajını korur ve jenerat6r6n güç fakt6r6n6 korumak için ek reaktif güç sağlar[23]. Değişken hızlı çalışmanın faydaları ile birlikte, çıkış g6c6n6 kontrol etmekteki düşük maliyetten dolayı, çift beslemeli jenerat6rlerin (DFIG) r6zgâr t6rbinlerinde kullanımı artmaktadır. Yapılan alışmalar, gelecekte fırçasız çift beslemeli jenerat6rlerin şu anda kullanılan jenerat6rlerin yerine geçeceğini g6steriyor. Bu yaklaşım bilezik ve fırça gerektirmemekle birlikte hen6z ticari kullanıma geçmemiştir.

2.3.3. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jenerat6r (KMSJ)

Kalıcı mıknatıslı makinelerin daha çok uygulamalarda tercih edilmesinin birinci sebebi; düşük maliyetli güç elektroniği kontrol cihazlarının kullanılması ve kalıcı mıknatıs karakteristiğinin iyileştirilmesidir.

Doğrudan s6r6len r6zgâr t6rbini uygulamalarında, y6ksek tork, y6ksek güç yoğunluğu ve düşük hızlı çalışmalarda y6ksek verimi olan makineler dikkate alınmalıdır. R6zgâr g6c6 uygulamalarında, mekanik g6c6 elektrik g6c6ne çevirirken aradaki dişli kutusunu kaldırmak maliyette 6nemli bir azalma sağlamıştır[24]. D6ř6k hızlı y6ksek g6l6 doğrudan s6r6len elektrik makineleri end6stride çok yaygın değildir ancak b6y6k hidroelektrik jenerat6rler düşük hızlı y6ksek torklu 6zel uygulamalarla sınırlıdır. Bu sebepten dolayı düşük hızlı y6ksek torklu makinelerin, doğrudan s6r6len r6zgâr t6rbini uygulamalarındaki gibi bir geleişim s6recine ihtiyaçları vardır[25].

Elektrik jenerat6rlerinin boyutları ve ağırlıkları b6y6k oranda değişebilmektedir. Bazı jenerat6rler çok b6y6k ve ağırlıklarından dolayı ancak yery6z6ne kurulabilirken, bazıları da r6zgâr t6rbinlerinde olduğu gibi kompakt bir şekilde t6rbın başlıklarına monte edilebilmektedirler. T6rbın kulesi, jenerat6r6 ve t6rbini

kaldırabilecek şekilde yapılmaktadır. Elektrik makineleri ister motor isterse jeneratör olarak çalıştırılın temel olarak hava boşluğuna göre dairesel, eksensel ve bunların kombinasyonu olarak sınıflandırılmaktadır. Manyetik akının geçtiği hava boşluğu yoluna bağlı olarak makinenin rotor eksenine hava boşluğu tipini ayırt etmektedir. Eksensel hava boşluğu makinelerde bu yol rotor eksenine paraleldir. Dairesel hava boşluğu makinelerde bu yol rotor eksenine daireseldir. Şekil 2.6’da kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlü doğrudan sürülen bir rüzgâr türbini gösterilmektedir[26].



Şekil 2.6. Kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlü doğrudan sürülen rüzgâr türbini

2.4.Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Kontrol Yöntemleri

2.4.1. Klasik Kontrol Sistemi Tasarımı

Tasarım kriterleri; bir kontrol sisteminin ne yapması gerektiğini belirtmek ve nasıl yaptığını değerlendirmek amacıyla kullanılır. Bu kriterler her bir uygulamaya göre değişiklik gösterse de, kısaca; bağıl kararlılık, kararlı hâl hatası, geçici cevap gibi kısımlardan oluşur. Bazı durumlarda parametre değişimlerine karşı duyarlılık veya bozucu etkileri etkisiz kılma gibi kriterler de ilave edilebilir.

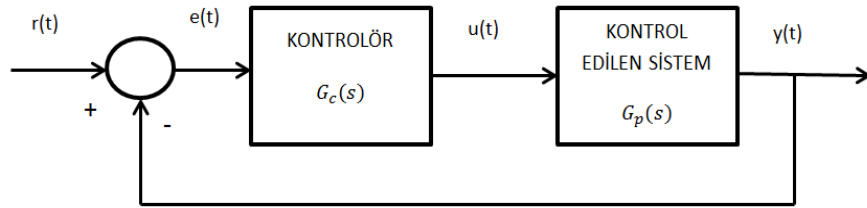
Doğrusal bir kontrol sistemi değerlendirilirken, sistemin girişine birim basamak, rampa veya parabolik giriş sinyali uygulanır. Bu giriş sinyaline karşı sistem çıkışındaki kararlı hâl hatası, en büyük aşım, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı gibi kriterler değerlendirmeye tabi tutulur. İstenilen tolerans sınırları içinde bir kontrolör sistemi, maliyet ve diğer kriterler de dikkate alınarak tercih edilir[27].

2.4.1.1. Kontrolör Yapıları

Kontrol edilmek istenilen doğrusal bir sistem genelde Şekil 2.7’de gösterilen blok diyagramlar ile ifade edilir. Buradaki tasarımın amacı; $y(t)$ ile gösterilen kontrol edilen çıkış değişkeninin davranışlarını kontrol etmektir. Buna göre $u(t)$ kontrol işareti belirlenir. Eğer amaç sistem davranış özelliklerini değiştirmeye yönelikse sabit yapılı bu kontrol tasarımına kompanzasyon ismi verilir.

Kontrol sistemi yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

Seri (kaskat) kompanzasyon: Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Kontrolörün kontrol edilen sisteme seri yerleştirildiği en yaygın kontrolör yapısıdır.



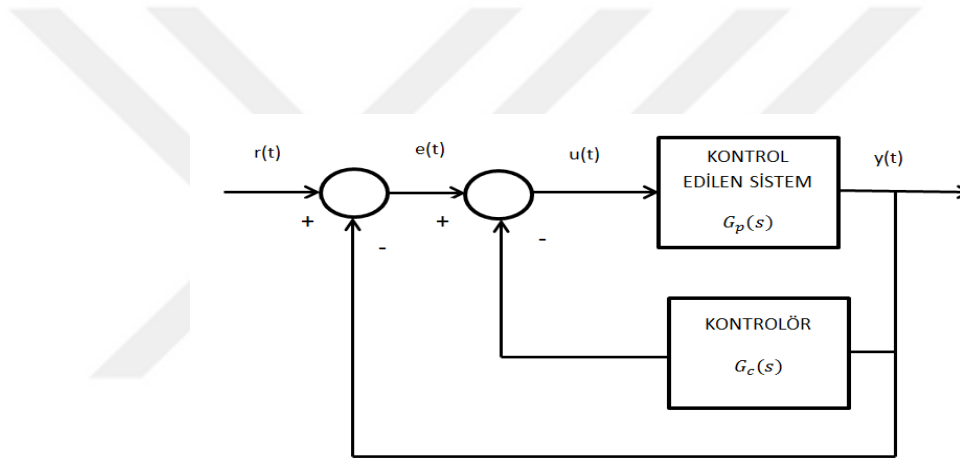
Şekil 2.7. Seri kontrol sistemi blok diyagramı

Geri besleme kontrolü: Bir sistemde bozucu etkiler olduğunda, sistemin çıktısı ve referans giriş arasındaki fark olan hata sinyalini azaltmayı amaçlayan işleme geri besleme kontrolü denir. Önceden tahmin edilebilen veya durumu bilinen bozucu

etkilere sistemin içinden alınacak tedbirler ile karşı gelmek mümkün olabilir. Geri besleme kontrolü ise önceden tahmin edilemeyen bozucu etkilere karşıdır.

Geri besleme kontrol sistemleri: Sistem çıkışı ile referans girişi karşılaştırıp, aralarındaki fark olan hata sinyalini bir kontrol vesilesi olarak kullanarak, bunlar arasında daha önceden tasarlanmış olan bir bağıntının devam etmesini sağlayan sisteme geri besleme kontrol sistemi denir.

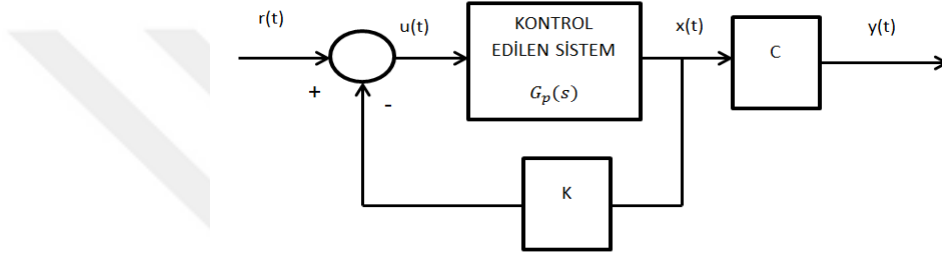
Geri beslemeli kompanzasyon: Şekil 2.8’ de gösterilmiştir. Kontrolör bir alt çevrime yerleştirilerek, geri besleme yapar. Sistem durum değişkenleri sabit kazanç katsayıları ile çarpılarak geri besleme yapılır.



Şekil 2.8. Geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı

Kapalı döngü kontrol sistemleri: Geri besleme kontrol sistemi denince çoğunlukla akla kapalı döngü kontrol sistemi gelir. Çoğunlukla geri besleme kontrolü ile kapalı döngü kontrolü birbirinin yerine kullanılır. Kapalı döngü kontrol sisteminde hata, giriş sinyali ile geri besleme sinyali arasındaki farktır. Geri besleme sinyali ise çoğunlukla çıkış sinyalinin ya kendisi ya da bir fonksiyonu veya bir türevidir. Kapalı döngü kontrol sisteminde hata sinyali kontrolörü besler ve sistem çıkışının istenen değere getirilmesini sağlar. Bu bağlamda kapalı döngü kontrol terimi, sistem hatasını azaltmak için devamlı olarak geri besleme kontrolünün kullanıldığını gösterir.

Açık döngü kontrol sistemleri: Sistem çıkışının kontrol işleminde hiçbir etkisinin olmadığı kontrol sistemlerine açık döngü kontrol sistemi denir. Bir açık döngü kontrol sisteminde, sistem çıkışı ölçülmez ve geriye doğru bir besleme yapılmaz. Açık döngü kontrol sisteminde, sistemin çıkışı referans ile karşılaştırılmadığından, her referans için sabit bir çalışma şartı belirlenir. Eğer sistemin kalibrasyonu doğru ise sistem bu çalışma şartlarına göre çıkış üretir. Ama bu kontrol sistemine herhangi bir bozucu etki dâhil olursa, bu sistemi etkileyecek ve muhtemelen sistemin arzu edilen işi yapmasını önleyecektir[29].



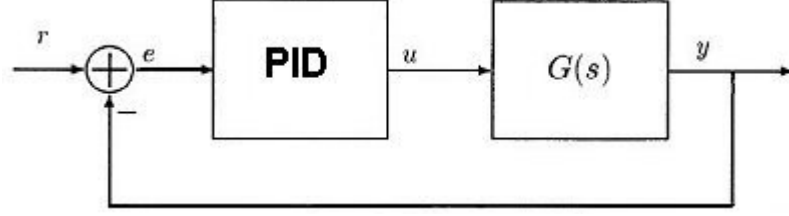
Şekil 2.9. Durum geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı[28]

Şekil 2.7, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9 kompanzasyon yapılarında PID kontrolörü çok sık kullanılır. PID kontrolör, geçerli sinyalin oransal, integral ve türevsel bileşimini sisteme uygulayan bir kontrolördür. PID kontrolör, genellikle zaman tanım bölgesi yöntemleri ile gerçekleştirilir. Kompanzatorlerde birden fazla değişken parametre bulunsa bile, her sistemde sadece bir tane kontrolör yer aldığından, gerçekleştirilebilir davranış kriterleri sınırlı sayıdadır. Parametre değişikliklerine göre sistemin duyarlılığı fazladır.

Mühendislik uygulamalarında tüm tasarım şartlarını sağlayan en basit yapılı kontrolörü tercih etmek gerekir. Kontrolörün karmaşıklığı arttıkça maliyeti artar, güvenilirliği azalır ve tasarımı zorlaşır.

2.4.1.2. PID Kontrolör

Şekil 2.10’da PID kontrol sisteminin blok diyagramı gösterilmiştir.

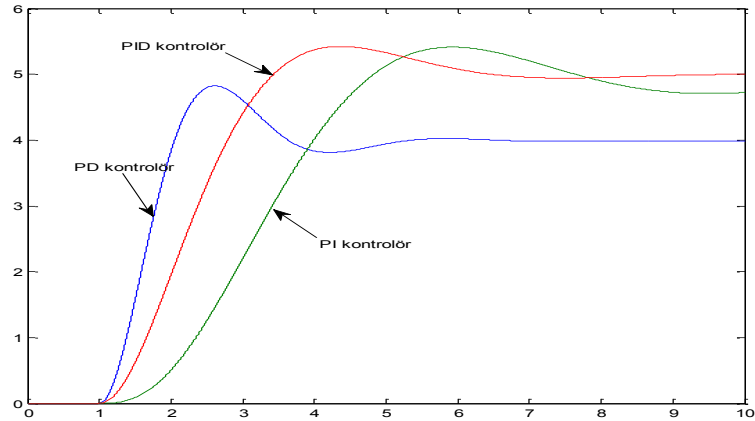


Şekil 2.10. PID kontrol sistemi

PI ve PD kontrolörlerin iyi yönleri alınarak PID kontrolör tasarımı yapılır. PID kontrolörü seri bağlı bir PI ve PD kontrolör kısımlarından oluşur. PID kontrolörün transfer fonksiyonu:

$$G_c(s) = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad \text{dir.} \quad (2.2)$$

Şekil 2.11’de PI, PD ve PID kontrol sistemlerinin etkileri verilmiştir.



Şekil 2.11. Kontrol sistemlerinin etkileri[28]

2.4.1.3 PID Ayarı

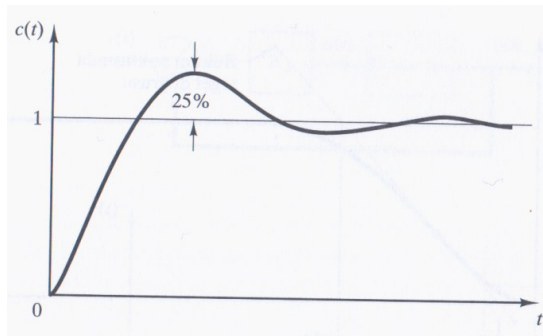
Eğer donanımın matematiksel bir modeli çıkartılabilirse, o zaman kapalı döngü sistemin geçici ve kararlı hal özelliklerini karşılayan kontrolörün parametrelerini belirlemek için çeşitli tasarım tekniklerini uygulamak mümkündür. Eğer donanımın matematiksel modeli kolayca elde edilemeyecek kadar karmaşık ise o zaman analitik bir yaklaşım mümkün değildir. Bu durumda PID kontrolörlerin ayarı için deneysel yaklaşımlara başvurmak gerekir [29].

Sistemin istenilen şekilde çalışabilmesi için PID parametrelerinin ayarlanması gerekmektedir. Bunun için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır: Elle ayarlama veya parametrelerin hesaplanması (Ziegler-Nichols metodu).

2.4.1.3.1. Ziegler-Nichols metodu

Ziegler ve Nichols, bir donanımın geçici cevap karakteristiklerine bağlı olarak orantılı kazanç K_p , integral zamanı T_i ve türev zamanı T_d 'nin değerlerini belirlemek için bazı kurallar önermişler.

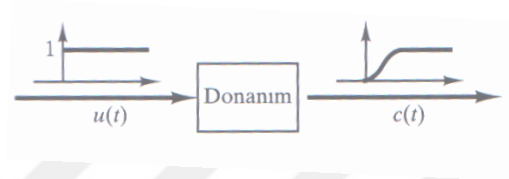
Ziegler-Nichols ayarlama kuralları olarak isimlendirilen iki yöntem, basamak cevabı %25 maksimum sapma elde etmeyi hedefler. Bu durum Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. %25 maksimum sapma gösteren birim basamak cevap eğrisi

Birinci Yöntem

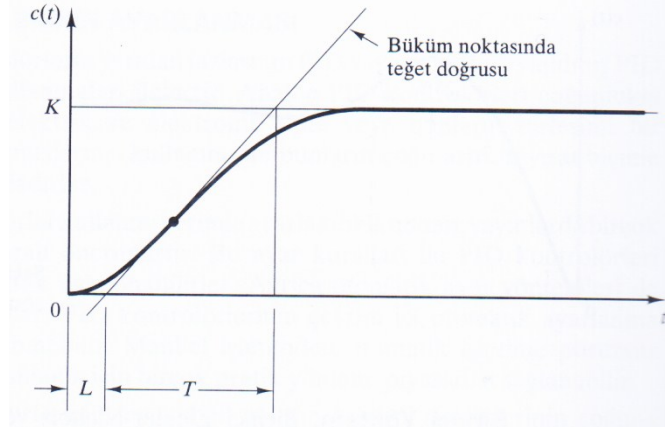
Birinci Ziegler-Nichols yönteminde birim basamak girişine sistemin cevabını Şekil 2.13’de gösterildiği gibi elde ederiz. Eğer sistem, integratörlere ve baskın karmaşık eşlenik kutuplara sahip değilse, birim basamak girişin cevap eğrisi Şekil 2.13’de gösterildiği gibi olur. (Eğer cevap S-biçimli bir eğri olmazsa bu yöntem kullanılamaz) Bu özellikteki basamak cevap eğrileri deneysel olarak veya cihazın dinamik simülasyonundan üretilebilir.



Şekil 2.13. Bir sistemin birim basamak cevabı

S-biçimli eğri, kendisine büküm noktasında bir teğet çizilerek belirlenen iki sabitle (L:gecikme zamanı ve T:zaman sabiti) belirlenebilir. Bu sabitler, Şekil 2.14’de gösterildiği gibi, teğet doğrusunun zaman ekseni ile ve $c(t) = K$ doğrusu ile kesiştiği noktalar tarafından belirlenir. O zaman transfer fonksiyonu $C(s)/U(s)$, taşıyım gecikmeli birinci dereceden bir sistem ile eşitlik 2.3’deki gibi yaklaşık olarak ifade edilebilir.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (2.3)$$



Şekil 2.14. Ziegler ve Nichols teğet doğrusu

Ziegler ve Nichols Çizelge 2.1’de gösterilen formüle göre K_p , T_i ve T_d ’nin değerlerinin alınmasını tavsiye etmişlerdir.

Çizelge 2.1. Ziegler ve Nichols değerleri

Kontrolörün Tipi	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9 T/L$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 T/L$	$2L$	$0.5L$

Birinci Ziegler-Nichols yöntemi ile ayarlanan PID kontrolörün değerleri eşitlik 2.4, 2.5 ve 2.6’a verilmiştir.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.4)$$

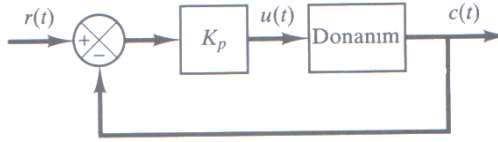
$$G_c(s) = 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \quad (2.5)$$

$$G_c(s) = 0.6T \left(\frac{s + \frac{1}{L}}{s} \right)^2 \quad (2.6)$$

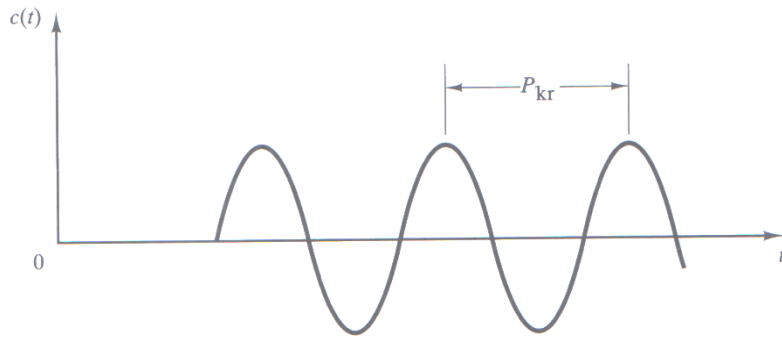
Buna göre PID kontrolör, orijinde bir kutba ve $s=-1/L$ de çakışık iki sifıra sahiptir.

İkinci Yöntem

İkinci Ziegler-Nichols yönteminde önce $T_i = \infty$ ve $T_d = 0$ alınır. Şekil 2.15'deki gibi sadece orantılı kontrol yöntemi kullanarak K_p 'yi 0'dan başlayarak çıkışın ilk defa Şekil 2.16'deki gibi kararlı salınımlar gösterdiği kritik bir K_{kr} değerine kadar arttırırız. (K_p hangi değeri alırsa alsın eğer çıkış kalıcı salınımlar göstermiyorsa o zaman bu yöntem uygun değildir) Bu durumda kritik kazanç K_{kr} ve buna karşılık gelen periyot P_{kr} deneysel olarak belirlenir. Ziegler ve Nichols K_p , T_i ve T_d değerlerinin belirlenmesini Çizelge 2.2'de gösterilen formüle göre alınmasını tavsiye etmektedirler.



Şekil 2.15. Orantılı kontrol yöntemi



Şekil 2.16. Kararlı salınımlar

İkinci Ziegler-Nichols yöntemi ile ayarlanan PID kontrolörün, değerleri eşitlik 2.7, 2.8 ve 2.9'da verilmiştir.

$$G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (2.7)$$

$$G_c(s) = 0.6K_{kr}(1 + \frac{1}{0.5P_{kr}s} + 0.125P_{kr}s) \quad (2.8)$$

$$G_c(s) = 0.075K_{kr}P_{kr}(\frac{(s + \frac{4}{P_{kr}})^2}{s}) \quad (2.9)$$

Buna göre PID kontrolör orijinde bir kutba ve $s = -4/P_{kr}$ ’ de çakışık iki kutba sahiptir.

Çizelge 2.2. Kritik kazanç K_{kr} ve kritik periyod P_{kr} ’ye dayanan Ziegler-Nichols ayar kuralı

Kontrolörün Tipi	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{kr}$	∞	0
PI	$0.45K_{kr}$	$\frac{1}{1.2}P_{kr}$	0
PID	$0.6K_{kr}$	$0.5P_{kr}$	$0.125P_{kr}$

2.4.1.4 Genel PID Denetleyici Tasarım Kuralları

Oransal denetleyicilerin (K_p), yükselme zamanını azaltmada etkisi vardır ve azaltır, ama asla tamamen yok etmez (kararlı hâl hatası). İntegral denetleyicinin (K_i) kararlı hâl hatasının çıkarılmasında etkisi vardır ancak bu geçici tepkinin daha kötü olmasına sebep olabilir. Türevsel denetleyicinin (K_d) sistemin kararlılığının artmasında etkisi vardır, aşmayı azaltır ve geçici tepkiyi düzeltir. Kapalı döngülü bir sistemde, her bir denetleyicinin etkisi K_p , K_d ve K_i Çizelge 2.3’de özet olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Kontrol katsayılarının etkilerinin karşılaştırılması

KONTROLÖR TEPKİSİ	YÜKSELME ZAMANI	AŞMA	YERLEŞME ZAMANI	KARARLI HÂL HATASI
K_p	Azalı	Artar	Az Değişir	Azalı
K_i	Azalı	Artar	Artar	Yok olur
K_d	Az Değişir	Azalı	Azalı	Az Değişir

Unutulmamalıdır ki, bu düzeltmeler tam olarak geçerli değildir. Çünkü K_p , K_i ve K_d birbirlerine bağımlıdır. Yani değişkenlerden birinin değişimi diğer ikisinin etkisini değiştirebilir. Bu yüzden Çizelge 2.3, K_i , K_p ve K_d değerlerinin belirlenmesinde sadece bir referanstır.

PID denetleyici tasarımında istenilen tepkiyi elde etmek için aşağıdaki adımlar izlenir:

1. Açık döngü tepkisi bulunur ve ihtiyaçlar belirlenir.
2. Yükselme zamanını düzeltmek için oransal denetleyici eklenir.
3. Aşmayı düzeltmek için türevsel denetleyici eklenir.
4. Kararlı hâl hatasını yok etmek için integral denetleyici eklenir.
5. İstenilen tepki elde edilene kadar K_p , K_i ve K_d ayarlanır.

Hangi denetleyicinin hangi karakteristiği kontrol ettiği Çizelge 2.3’den yararlanılarak bulunabilir.

Denetleyici tasarımında mümkün olduğu kadar basit tasarıma gidilmelidir. Eğer PI denetleyici ile istenilen tepki sağlanıyorsa, sisteme türevsel denetleyici eklenip sistem karmaşıktırılmamalıdır[28, 30].

2.4.2. Modern Kontrol Sistemleri

2.4.2.1. Bulanık Mantık Kontrol

Bulanık mantık kontrolörün tanımlaması yapılmadan önce bulanık kümeler üzerinde durulacaktır.

2.4.2.1.1. Bulanık Kümeler

Bir bulanık kümenin tanımlanması Örnek 2.1 ile anlatılacaktır.

Örnek 2.1: A, 10'dan büyük tamsayılardan oluşan bir küme olarak tanımlanmış olsun.

$$A = (x: x \in \mathbb{N}, x > 10) \quad (2.10)$$

A kümesinin matematiksel denklemi eşitlik 2.10'da verilmiştir. B ise 10'dan çok büyük tamsayıların bir kümesi olarak tanımlanmış olsun. Matematiksel olarak A kümesi denklemi eşitlik (2.11) şeklinde yazılabilir.

$$A = (x: x \in \mathbb{N}, x \gg 10) \quad (2.11)$$

İki küme arasındaki en büyük fark; eşitlik (2.10), A kümesini tam olarak tanımlarken, eşitlik (2.11), B kümesini yeteri kadar tam olarak tanımlamamaktadır. Bunun sebebi “çok büyük” terimindeki belirsizliktir. 11, 12, 1178 ve 2075'in A kümesinin elemanı olduğu açıktır. Birçok insan tarafından 11234 ve 23^{10} sayılarının B kümesine ait olduğu şüphesizdir fakat 15 veya 50 sayılarının B kümesinden olması şüphelidir. Burada problem; 10'dan çok büyük, en küçük tamsayının nasıl tanımlanacağıdır.

Bu problem, küme tanımlamada alternatif bir yol kullanılarak çözülebilir. Klasik küme teorisine göre; bir küme karakteristik fonksiyonu ile tanımlanabilir.

Karakteristik fonksiyon-keskin küme: S , X -domeninde bir küme olsun. Eğer $x \in S$ ise S kümesinin karakteristik fonksiyonu $\mu_S(x) = 1$ değerine, $x \notin S$ ise $\mu_S(x) = 0$ değerine sahiptir. $\mu: X \rightarrow (0,1)$. S kümesinin karakteristik fonksiyonu keskin küme olarak adlandırılır.

Karakteristik fonksiyon B kümesini tanımlayamaz, B kümesine ait en küçük tamsayının hesaplanması ile ilgili belirsizlikle başa çıkamaz. B kümesini tanımlamak için karakteristik fonksiyon notasyonunu genişletmek daha iyi bir çözümdür. B kümesine ait en küçük tamsayıyı hesaplamak yerine, 10'dan büyük bütün tamsayıların B kümesine-farklı üyelik dereceleri ile ait olduğu söylenebilir. Karakteristik fonksiyon 0 ile 1 arasındaki değerlerden kısmi ya da derecelendirilmiş olarak elde edilir ve buna üyelik fonksiyonu denir.

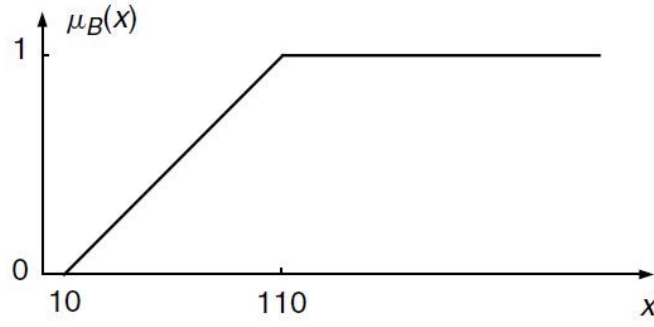
Üyelik fonksiyonu ve bulanık küme: F , X -domeninden bir küme olsun. F kümesinin üyelik fonksiyonu $\mu_F(x)$, değer atanmış bir fonksiyon veya her $x \in F$ için bir üyelik derecesini gösteren $\mu: X \rightarrow [0,1]$ dir. Bu durumda F kümesi bulanık küme olarak adlandırılır. Buna göre, keskin küme, bulanık kümenin özel bir durumu olarak algılanabilir. Keskin küme, üyelik fonksiyonu olarak tanımlanan 0 ve 1 arasındaki değerlerin sadece marjın değerine sahip (yani 0 ve 1) bir kümedir.

Bulanık küme B , bir küme çifti olarak tanımlanabilir.

$$B = ((\mu_B(x), x): x \in \aleph)$$

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < 10 \\ \frac{x-10}{100}, & \text{for } 10 \leq x \leq 110 \\ 1, & \text{for } x > 110 \end{cases} \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.12'nin, üzerinden 0 üyelik derecesine sahip sayıların bulanık B kümesine ait olmadığı görülmektedir. 11 sayısının, $\mu_B(11) = 0.01$ üyelik derecesi ile B 'nin bir elemanı olduğunu, 100 sayısının üyelik değerinin $\mu_B(100) = 0.9$ olduğu görülür.



Şekil 2.17. Bir bulanık kümenin grafik gösterimi

Bulanık B kümesi Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Bulanık küme tanımından anlaşılıyor ki, iki bulanık küme aynı elemana-eğer üyelik fonksiyonları eşit ise-sahip olabilir.

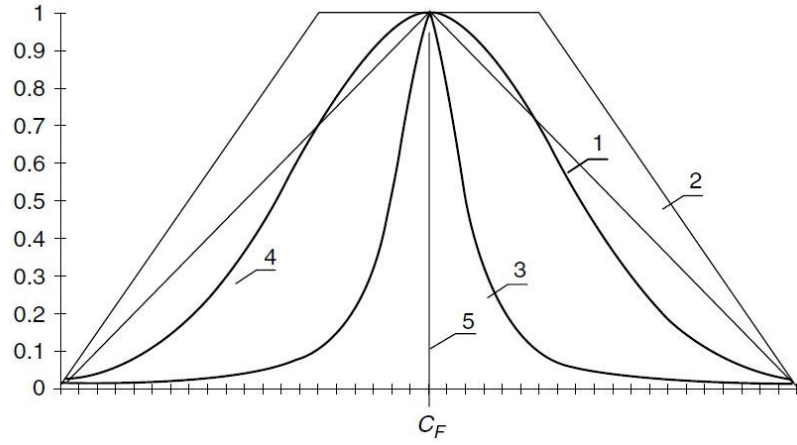
Bulanık Altküme:

Eğer

$$\forall x \in X: \mu_C(x) \leq \mu_B(x) \quad (2.13)$$

ise bulanık C kümesi, bulanık B kümesinin bir altkümesidir.

Bulanık küme teorisinde, bulanık küme üyeleri için dikkate alınan mümkün olan sayısal değer aralığı konuşma uzayı olarak adlandırılır. Konuşma uzayı, sürekli veya ayrık zamanlı olabilir. Konuşmanın ayrık zamanlı uzayı normalde sınırlıdır ve sonlu sayıda eleman ihtiva eder. Konuşmanın ayrık zamanlı uzayındaki bir bulanık küme, ayrık zamanlı bulanık küme olarak adlandırılır. Her bir elemanın bulanıklık ölçüsü, konuşma uzayının tümüne ya da bir bölümü üzerine yayılmış üyelik fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Üyelik fonksiyonu, bulanıklık derecesini, keskin küme üyelerinin üyelik derecelerine benzeyen sınırlı 0 ve 1 değerlerinin arasındaki normalize edilmiş değerlere çevirir. Üyelik fonksiyonları değişik şekillerde olabilir. Diğerlerinden daha fazla kullanılan üçgen, yamuk, çan eğrisi ve Gauss şekilleri Şekil 2.18’de, matematiksel ifadeleri ise eşitlik 2.14, 2.15, 2.16 ve 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. 1-üçgen 2-yamuk 3-Gauss 4-Çan eğrisi 5- Singleton

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{for } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{for } x > c \end{cases} \quad \text{üçgen} \quad (2.14)$$

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{for } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{for } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{for } x > d \end{cases} \quad \text{yamuk} \quad (2.15)$$

$$\mu_F(x) = e^{-(x-c_F)^2/w} \quad \text{Gauss} \quad (2.16)$$

$$\mu_F(x) = \frac{1}{1+(x-c_F)^2} \quad \text{Çan eğrisi} \quad (2.17)$$

Bu bulanık kümeler x değişkeni ile tanımlanmıştır. Aynı bulanık küme altında farklı değişkenler (mesela x ve y gibi) olabilir, bu nedenle üyelik fonksiyonu gösteriminde bazı küçük değişiklikler ($\mu_F^x = \mu_F(x)$ gibi) yapılabilir. Bu durum, $\mu_i^x = \mu_i(x)$, $i = 1, \dots, l$ gibi daha fazla genellemeye izin verir.

Bulanık kümenin merkez ve çekirdeği: $x = c_F = c_F^x \in F$ tek bir değer olmak üzere üyelik fonksiyonu maksimum değere $\mu_F(c_F) = 1$ sahip ise buna bulanık F kümesinin merkezi denir. Eğer orada üyeliğin maksimum derecesinde değerler kümesi varsa

$$nuc(F) = \{x \in X: \mu_F(x) = 1\} \quad (2.18)$$

$nuc(F)$, F bulanık kümesinin çekirdeği olarak adlandırılır.

Bulanık F kümesinin merkezi bir çekirdek ile birlikte $c_F^x = (x_a + x_b)/2$ ile tanımlanır. Burada x_a ve x_b çekirdeğin sınırlarıdır. Bulanık F kümesi c_F^x merkezinde tek bir elemana sahipse buna bulanık teklik (Şekil 2.13) denir. Bazı durumlarda bulanık küme teklik (singleton) olarak seçilir. (bulanık mantık kontrolörlerin çıkış bulanık kümelerinde olduğu gibi). Bulanık kümelerin farklı şekillerini hangi değerlerin temsil edeceğine karar verilmelidir. Bu yüzden bulanık kümeler, düzgün yapılı olabilir veya olmayabilir. Simetrik olabilir veya olmayabilir. Sınırlı olabilir veya olmayabilir. Geometrik şeklin ölçümü iyi olan ağırlık merkezi yöntemidir.

Simetrik bir bulanık kümede, konuşma uzayının üzerindeki ağırlık merkezinin izdüşümü, bulanık kümenin merkezine eşittir. Ağırlık merkezinin c_F^x ile gösterilme nedeni budur. Hesaplama yükünün azaltılması ve daha kısa kontrol süresi sağlanmasından dolayı (bunlar gerçek zamanlı (real-time) kontrol uygulamalarında aranan özelliklerdir) bulanık kontrolör tasarımı bulanık teklik kümeleri çoğunlukla kullanılır.

Komşu bulanık kümeler: F ve T, merkezleri c_F^x ve c_T^x olan, $c_F^x < c_T^x$ şartını sağlayan aynı X konuşma uzayına ait bulanık kümeler olsun. S ise tanımlanan X’de olmayan ve merkezi c_S^x olan bir bulanık küme olsun. $c_F^x < c_S^x < c_T^x$ ise F ve T komşu bulanık kümeler olarak adlandırılır. Birleşme, kesişme ve tümlleme işlemleri keskin kümede tam olarak tanımlanmıştır. Onlar tamdır çünkü klasik küme teorisindeki durumlar, iyi tanımlanmış VE, VEYA, DEĞİL operatörleri tarafından yapılırlar. Klasik küme teorisinde, $x \in B$ ve $x \in C$ durumu sadece her iki bildirim doğru olduğu zaman doğrudur. Diğer bir değişle, B ve C’den yeni bir küme oluşturulsa x’in bu yeni

kümeye ait bir eleman olma durumu ancak x 'in hem B , hemde C kümesinin elemanı olmasıyla olur. Bulanık küme teorisinde bu durum yani, $x \in B: \mu_B(x) = 0.1$ ve $x \in C: \mu_C(x) = 0.3$ yorumlaması basit değildir. B ve C bulanık kümelerinden oluşturulan yeni bulanık kümedeki x 'in üyelik derecesinin nasıl hesaplanacağı açık değildir. Diğer bulanık kümelerin birleşimi, kesişimi ve tümleyeninden meydana gelen bir bulanık kümedeki üyelik fonksiyonlarının hesaplanmasında birbirinden farklı birkaç yöntem vardır. Zadeh bunlarla ilgili aşağıdaki tanımları önermiştir.

$$\begin{aligned}\mu_{B \cap C}(x) &= \min(\mu_B(x), \mu_C(x)) \\ \mu_{B \cup C}(x) &= \max(\mu_B(x), \mu_C(x)) \\ \mu_{\bar{B}}(x) &= 1 - \mu_B(x)\end{aligned}\tag{2.19}$$

Eşitlik 2.19'a göre $x \in B: \mu_B(x) = 0.1$ ve $x \in C: \mu_C(x) = 0.3$ durumunda yeni bulanık küme $D = B \cap C$ ve $\mu_D(x) = 0.1$ dir.

Bu tanımlar kesin kümelerde de geçerlidir. Eğer üyelik fonksiyonu yerine sadece 0 ve 1 değerine sahip karakteristik fonksiyon yerleştirilirse, Zadeh'in operatörleri standart VE, VEYA, DEĞİL işlemlerinde aynı sonucu verecektir.

Genelde bulanık kümelerdeki operatörler üçgen şekliyle kullanılır. İkili sistemlerin bir sınıfı T-norm (VE operatörü) ve S-norm (VEYA operatörü) olarak ikiye ayrılabilir. T-norm bulanık kümeler üzerinde kesişme işlemi yapar ve bulanık mantık kontrolde önemlidir. T-norm genellikle, $T(a,b)$ olarak gösterilir. S-norm, birleşme işlemini gösterir ve $S(a,b)$ olarak gösterilir. Bulanık mantık kontrol uygulamalarında kullanılan bütün T-norm'lar aşağıda listelenen dört temel T-norm'dan türetilmektedir.

$$\begin{aligned}1. \quad & T(\mu_B, \mu_C) = \min(\mu_B, \mu_C) \\ 2. \quad & T(\mu_B, \mu_C) = \mu_B \cdot \mu_C \\ 3. \quad & T(\mu_B, \mu_C) = \max(0, \mu_B + \mu_C - 1) \\ 4. \quad & T(\mu_B, \mu_C) = \begin{cases} \mu_B, & \text{if } \mu_C = 1 \\ \mu_C, & \text{if } \mu_B = 1 \\ 0, & \text{if } \mu_C, \mu_B < 1 \end{cases}\end{aligned}\tag{2.20}$$

2.4.2.1.2.Dilsel Değişkenler

Günlük konuşmalarımızda, uzun cümlelerle aynı miktarda bilgi taşıyan kısa cümleler kullanırız. “Araba uzakta” dediğimizde, arabanın uzak kategorisine ait bir mesafede olduğunu söyleriz. Arabanın uzaklığının tam olarak 350 m olduğunu bilsek bile, günlük iletişimde arabanın uzakta olduğunu söylemeyi tercih ederiz. Trafik terminolojisinde “çok uzak mesafe” ortak bir anlaşma yöntemidir. Mesafe terimi, sayısal olarak 350 m ve dilsel olarak “çok uzak” olarak iki farklı değere ulaşır. Sayılar yerine cümle ya da kelimelerle ifade edilen değerlere dilsel değişkenler denir. Araba örneğinde, sürücü giriş bilgisinin kesin olmayan dilsel niteliğine dayanarak yapacağı hareket hakkında karar verir. Bu yüzden araba sürme stratejisi, somut (sayısal) değerler yerine dilsel değişkenleri taşıyan giriş ve çıkışlarla oluşturulmuş IF-THEN kuralları ile ifade edilebilir. Zadeh’in dediği gibi dilsel değişkenler, özel bir konuşma uzayındaki farklı dilsel değerleri ifade edebilir. Uygun anlamsal kurallar tarafından tanımlanan dilsel değerler, konuşma uzayının özel bir bölümündeki fiziksel değerler hakkındaki bilgi özellikleri haricinde bir şey ifade etmezler.

Dilsel bir değişken eşitlik 2.21’deki gibi gösterilebilir.

$$[x, T, X, M] \quad (2.21)$$

burada x , dilsel değişkenin ismi, $T=(T_i)$ ise x ’in aldığı değerler kümesi, $i=1, \dots, l$, X ise x konuşma uzayının miktarı, M ise X konuşma uzayı ile birlikte T ’deki dilsel değerler ile alakadar anlamsal fonksiyonlardır. Anlamsal M fonksiyonu temel olarak, x değişkeninin dilsel değerlerini gösteren bulanık kümelerin dağılımını tanımlar. Örneğimizde mesafe değişkeni; “çok uzak”, “uzak”, “kısa”, “yakın”, “çok yakın” gibi değerler alabilir. Bu değerler birbirlerinden tamamen farklı fiziksel değerler ile ilgili olabilir. Mesela aynı dilsel değer 5 km mesafe için (aircraft kontrol), 10 m (araba kontrol) veya 3 cm (servo kontrol) için kullanılabilir.

Bulanık önerme: x dilsel bir değişken olarak $x \in X$ ve $T_i(x)$ ise T_i dilsel değeri ile alakalı bir bulanık küme olsun.

$P_i: x, T_i$ olarak yazılır ve notasyon düzenlenip $P_i^x: x, T_i$ olarak gösterilirse buna bulanık önerme denir. Bulanık önerme, bulanıklaştırma işlemi olarak çevrilir.

Bulanıklaştırma: x dilsel bir değişken olarak $x \in X$ ve $T_i(x)$ ise T_i dilsel değeri ile alakalı bir bulanık küme olsun. Fiziksel (sayısal) bir değere sahip x 'in üyelik derecesi ile alakalı olarak dilsel bir değere çevrilmesi işlemine $x \rightarrow \mu_{T_i}(x)$, bulanıklaştırma denir. Üyelik derecesi $\mu_{T_i}(x)$, x 'in değerinin bulanıklık eşdeğerini gösterir. Aşağıdaki örnekte, tanımlanan dilsel bir değişkenin bulanıklaştırılması anlatılacaktır.

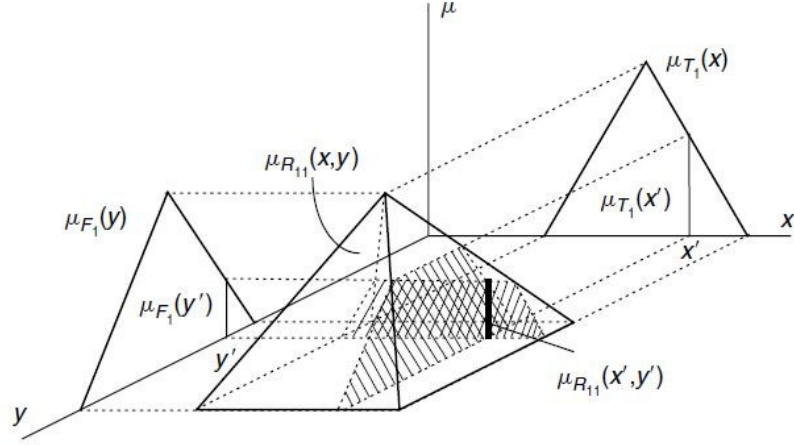
Bulanık ilişki: $x \in X$ ve $y \in Y$ olmak üzere x ve y dilsel değişkenler olsun, $T_i(x)$ ve $F_j(y)$ ise sırasıyla T_i ve F_j dilsel değerleri ile alakalı bulanık kümeler olsun.

$$\begin{aligned} R_{ij}: x, T_i \wp y, F_j \text{ ise} \\ R_{ij}: P_i^x \wp P_j^y \end{aligned} \quad (2.22)$$

$\wp$ operatörü ile iki boyutlu bulanık ilişki gösterilmiştir. $\wp$ 'nin seçimi, tasarlanan bulanık kontrolörün yapısını doğrudan etkilemektedir[31, 32]. Eğer $\wp$ klasik VE operatörü ve eşitlik 2.22 deki önerme keskin küme ise her iki önerme doğru olduğunda ilişki de doğru olur. Diğer bir değişle eşitlik 2.33 bulanık ilişkisindeki derecenin doğruluğu $\wp$ operatörüne ve $\mu_{T_i}(x)$ ile $\mu_{F_j}(y)$ üyelik fonksiyonları tarafından hesaplanan her bir önermenin derecesine bağlıdır. Bu da bulanık ilişki üyelik fonksiyonunun varlığını gösterir. Buna göre eşitlik 2.22'deki bulanık ilişki eşitlik 2.23'deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \left[\mu_{R_{ij}}(x, y), x, y \right] \mid x \in X, y \in Y \\ \mu_{R_{ij}}(x, y) &= \wp(\mu_{T_i}(x), \mu_{F_j}(y)) \end{aligned} \quad (2.23)$$

burada $\mu_{R_{ij}}(x, y): [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ dir.



Şekil 2.19. İki boyutlu bulanık ilişkinin grafiksel yorumu

İki boyutlu bulanık ilişki, iki boyutlu bulanık küme demektir. Bu Şekil 2.19’da $T_i(x) = T_1(x)$, $F_j(y) = F_1(y)$ için grafiksel olarak gösterilmiştir. Burada T-norm min uygulanmış ve üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Burada $\mu_{R_{11}}(x, y)$ üyelik fonksiyonu x-y düzleminde oluşturulan piramitin yüzeyini gösterir.

2.4.2.1.3. Bulanık Kurallar

Bulanık kontrolörlerin amacı; kontrol edilen hedef sisteme ait bilgileri kullanarak bir insan operatörünün hareketlerini taklit etmek ya da bir insan gibi karar vermektir. Bu bulanık kural tabanından oluşan bulanık kurallar ile elde edilir. Bulanık kural tabanı, bulanık kontrolörün merkezi birimidir ve herhangi bir bulanık kontrol algoritmasındaki zekâyı gösterir [33-35]. Tasarımcının bilgi ve tecrübesinin uygun kural kümesine doğru bir şekilde değerlendirilip yönetilmesi gerekir.

Bulanık kural: A ve B her ikisi de bulanık ilişkiler ve bulanık önermeler olsun.

FR: IF A THEN B, yapısı bulanık kural olarak adlandırılır.

Bütün bulanık kurallar, öncül bölüm (IF..) ve izleyen bölüm (THEN..) olmak üzere ikiye bölünebilir. Öncül bölüm sebepleri tanımlar, izleyen bölüm ise kontrol hareketi için uygun sonuçları tanımlar[36]. Bulanık kurallar giriş ve çıkış arasında doğrusal olmayan haritalamaya izin verdiği gibi değişken statik doğrusal olmayan kontrol fonksiyonları oluşturulmasına da izin verir. Bu fonksiyonların doğrusal olmayan karakterde olması, bulanık mantık kontrolörün karmaşık doğrusal olmayan kontrol problemleri ile başa çıkabilmesini sağlar. Çok sık kullanılan iki girişli bir çıkışlı bulanık kontrolörün bulanık kuralları “IF ilişki THEN önerme” şeklindedir.

Bulanık kural tabanının düzenlenmesi, bulanık kontrolör tasarım işleminin çok zahmetli bir adımıdır. Bulanık kontrolörün diğer kısımları dikkate alındığında, onların hepsinin bulanık kural tabanına hizmet ettiği söylenebilir. Giriş bulanık küme sayısı ve üyelik fonksiyonu şekilleri, konuşma uzayına nasıl dağılım olacağını belirler. Bulanık kontrol algoritması üzerinde bulanık kontrolör hesaplama işleminin seçimi, kural tabanına göre daha az etkiye sahiptir.

Bulanık kural tabanının boyutu bulanık kuralların sayısına bağlıdır. Bulanık kuralların sayısı ise giriş ve çıkış değişkenlerinin sayısına ve her bir değişkenle ilgili dilsel değişkenlerin sayısına bağlıdır. Eğer kontrol işlemi hakkındaki bilgi yeterli değilse ve bazı bulanık kurallar hala tanımlanmamışsa, bulanık kural sayısı azalacaktır. Genel olarak, tutarlılık, devamlılık ve bütünlük gibi temel bulanık kural tabanı karakteristiklerini koruyabilmek için bulanık kural şekilleri bazı temel düşünceleri takip etmelidir.

Bulanık kural tabanının tutarlılığı: Bulanık kural tabanı tutarlı olmalıdır. Eşitlik 2.24’deki gibi öncül kısmı aynı, izleyen kısmı farklı kurallar olmamalıdır.

$$\begin{aligned} FR^i: & \quad IF \quad R_{pq} \quad THEN \quad P_m \\ FR^j: & \quad IF \quad R_{pq} \quad THEN \quad P_n \end{aligned} \quad (2.24)$$

Tasarımcı, bulanık kuralların birbiriyle çelişkili olmamasına dikkat etmelidir.

Bulanık kural tabanının tamlığı: Her bir $R_{ijk}: P_i^x \wp P_j^y \wp P_k^z \wp \dots$ için bulanık kural tabanının tam olmasıdır. Pratikte bir bulanık kural tabanının tamlığı nadir olarak elde edilir[37-39]. Bazı kontrol problemlerinde, iyi bir kontrol kalitesini sağlamak için birkaç kural yeterli olabilir. Diğer durumlarda, kontrolör girişinde dilsel değişkenlerin belirli kombinasyonları hiç vuku bulmaz. Tam olmamak bazı durumlarda, işlem hakkındaki operatör bilgisinin eksikliğinin bir yansıması da olabilir.

Bulanık önermelerin ve ilişkilerin dışında, bulanık kuralların sonuç kısmı kontrolörün giriş ve çıkışları ile hesaplanacak bazı fonksiyon ve ifadelerle sahip olabilir. Bu tip kontrolörler, genelde Takagi-Sugeno bulanık kontrolörlerdir. Bu şekildeki kontrolörlerin kuralları şu şekildedir;

$$FR^i: \quad IF R_{pq} \quad THEN \quad u_i = \rho_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.25)$$

burada ρ_i bir fonksiyon ve $x_1, x_2, \dots, x_n$ ise girişlerin sayısal değerleridir.

Eğer ρ_i doğrusal bir fonksiyon ise $\rho_i = a_{0i} + a_{1i}x_1 + a_{2i}x_2 + \dots + a_{ni}x_n$ ve katsayılar $a_{1i} = a_{2i} = \dots a_{ni} = 0$ olmak üzere Takagi-Sugeno kontrolörün kuralları aynı sonuç kısmında singleton taşıyan bulanık kontrolörün kuralları gibi olur;

$$FR^i: \quad IF R_{pq} \quad THEN \quad u_i = a_{0i} = A_{pq} \quad (2.26)$$

olur, eşitlik 2.26'daki A_{pq} , bulanık singleton dur. Sıfırıncı dereceden Takagi-Sugeno kontrolörler, basitliliği ve verimliliği açısından endüstriyel uygulamalarda yaygındır.

2.4.2.1.4. Bulanık Gösterim

Bulanık kurallar ne şekilde olursa olsun asıl ilgi alanı; her bir kuralın manasının nasıl yorumlanacağıdır. Yani bulanık kuralın birinci bölümünün ikinci bölüm üzerindeki etkisinin hesaplanmasıdır. Bu etkinin değerlendirilme işlemine bulanık gösterim

denilir. Bulanık önermelerin ve bulanık ilişkilerin diğer manası üyelik fonksiyonları ile ifade edilir.

Bir bulanık gösterimi tanımlamak için birçok yol vardır [40] fakat kontrol uygulamalarında bunlardan ikisi tercih edilir. Bunlar; eşitlik 2.27'deki çarpım (Larsen olarak da adlandırılır) ve eşitlik 2.28'deki min (Mamdani) gösterimleridir.

$$\mu_{FR^i} = \mu_{R_{pq}} \cdot \mu_{P_m} \quad (2.27)$$

$$\mu_{FR^i} = \min(\mu_{R_{pq}}, \mu_{P_m}) \quad (2.28)$$

Max-min toplaması: r , x_k ve y_k tarafından aktif edilen bulanık kural sayısını gösterebilir. $\mu_{FR^i}(x_k, y_k, u)$, $i=1, \dots, r$, i inci kuralın bulanık değerlendirilmesi olsun. Eğer toplama operatörü olarak max operatörü kullanılırsa bütün bulanık kuralların manası eşitlik 2.29'daki gibi tanımlanır;

$$\mu \cup (x_k, y_k, u) = \mu_{\cup_{i=1}^r FR^i}(x_k, y_k, u) = \max(\min_{i=1}^r [\mu_{R_{pq}}(x_k, y_k), \mu_{P_m}(u)]) \quad (2.29)$$

Eşitlik 2.29'daki toplama max-min toplaması olarak adlandırılır. Eğer eşitlik 2.29'daki min gösteriminin yerine çarpım gösterimi yerleştirilirse bu max-çarpım toplamı olarak adlandırılır. Çıkış bulanık küme sonucu, iki bulanık gösterim arasındaki farka bağlı olarak farklı üyelik fonksiyonu şekillerine sahip olurlar.

Sum-min toplaması: r , x_k ve y_k tarafından aktif edilen bulanık kural sayısını gösterebilir. $\mu_{FR^i}(x_k, y_k, u)$, $i=1, \dots, r$, i inci kuralın bulanık değerlendirilmesi olsun. Eğer toplama operatörü olarak sum operatörü kullanılırsa bütün bulanık kuralların manası eşitlik 2.29'daki gibi tanımlanır;

$$\mu \cup (x_k, y_k, u) = \mu_{\cup_{i=1}^r FR^i}(x_k, y_k, u) = \sum \min_{i=1}^r [\mu_{R_{pq}}(x_k, y_k), \mu_{P_m}(u)] \quad (2.30)$$

Eşitlik 2.30'daki toplama sum-min toplaması olarak adlandırılır. Eğer eşitlik 2.30'daki min gösteriminin yerine çarpım gösterimi yerleştirilirse bu sum-çarpım

toplamı olarak adlandırılır. Kontrol uygulamalarında nadir olarak görülen kompozisyon tabanlı çıkarım, çıkış birleşim üyelik fonksiyonlarını hesaplarken, eşitlik 2.31'deki üyelik fonksiyonlarını kullanır.

$$\mu \cup (x_k, y_k, u) = \mu_{\cup_{i=1}^r FR^i}(x_k, y_k, u) = \max(\min_{i=1}^r [\mu R_{pq}(x_k, y_k), \mu P_m(u)]) \quad (2.31)$$

Eşitlik 2.40 ve 2.42 deki üyelik fonksiyonları arasındaki fark ifade edilmelidir. x_k vey y_k kırpılmış giriş değerleri tarafından aktif edilmiş kurallar için hesap yapılırken, U domeni üstünde tanımlanır oysa önceki gösterimde tanımlanan fonksiyon üç boyutlu $X \times Y \times U$ domeninde idi.

2.4.2.2. Bulanık PID Kontrol

Bir PID kontrolör sürekli zaman domeninde eşitlik 2.32'de gösterilen şekle sahiptir.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.32)$$

burada, K_p , K_I ve K_D sırasıyla sabit oransal, integral ve türevsel kontrolör kazancıdır. T_d genişliği ve $e(iT_d)$, $i = 0, 1, 2 \dots$ yüksekliğinden oluşan dikdörtgenin alanı integral işleminin yerini alarak eşitlik 2.33'de ayrık zamanlı hale getirilmiştir.

$$\begin{aligned} u(k) &= K_p e(k) + K_p \frac{T_d}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + K_p \frac{T_D}{T_d} [e(k) - e(k-1)] \\ &= K_{Pd} e(k) + K_{Id} \sum_{i=0}^k e(i) + K_{Dd} \Delta e(k) \end{aligned} \quad (2.33)$$

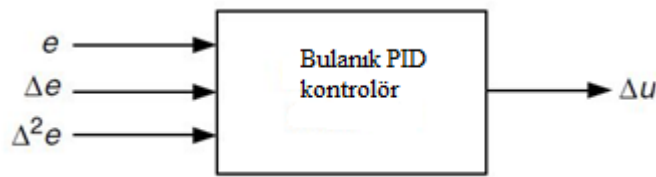
$K_{Pd} = K_p$, $K_{Id} = K_p T_d / T_I$ ve $K_{Dd} = K_p T_D / T_d$ katsayıları, sabit oransal, integral ve türevsel kazanç sabitlerinin yerini tutar.

Eşitlik 2.44'deki PID kontrolörün ayrık zamanlı şekli, bütün önceki kontrol hatalarının toplamını ihtiva ettiği için uygulamaya çok da uygun değildir. Kontrolör çıkışının ardışık iki değeri arasındaki farkı tanımlamak için eşitlik 2.34 daha iyi bir sonuç verir.

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_{Id}e(k) + K_{Pd}\Delta e(k) + K_{Dd}[\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] = K_{Id}e(k) + K_{Pd}\Delta e(k) + K_{Dd}\Delta^2 e(k) = \Delta u_I(k) + \Delta u_P(k) + \Delta u_D(k) \quad (2.34)$$

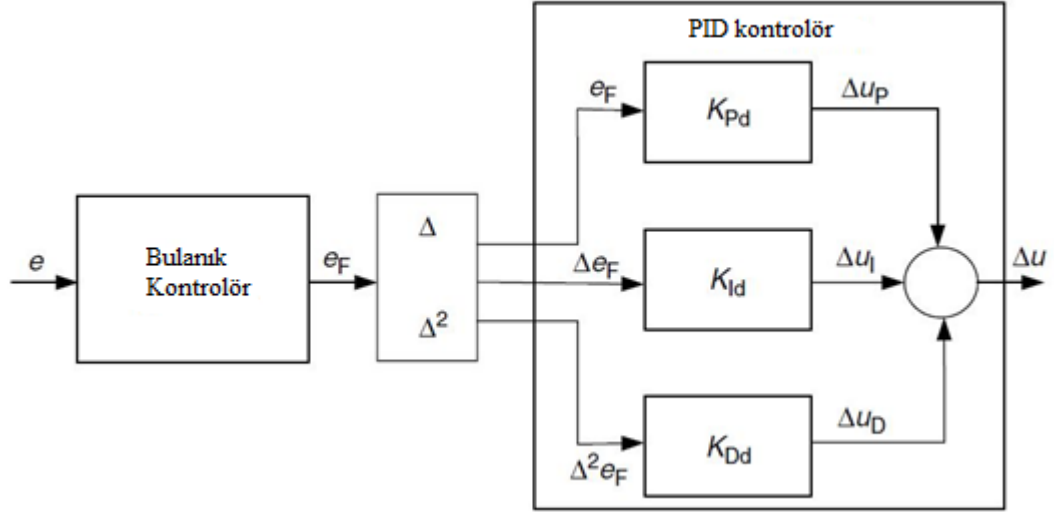
burada $\Delta^2 e(k) = \Delta e(k) - \Delta e(k-1)$ dir. Eşitlik 2.45, bulanık PID kontrolörün uygulanabilecek üç değişik şeklini gösterir.

1. Şekil: Şekil 2.20'de gösterildiği gibi bulanık PID kontrolör, $e, \Delta e$ ve $\Delta^2 e$ olmak üzere üç girişe ve Δu olarak bir çıkışa sahiptir.



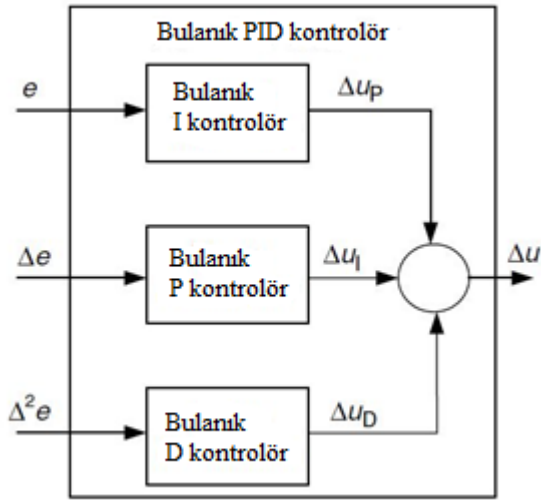
Şekil 2.20. A sınıfı Bulanık PID kontrolör

2. Şekil: Şekil 2.21'de gösterildiği gibi bulanık PID kontrolör, bir doğrusal PID kontrolör ve girişi $e(k)$, çıkışı $e_F(k)$ olan bir bulanık kontrolörden oluşmaktadır.



Şekil 2.21. B sınıfı Bulanık PID kontrolör

3. Şekil: Şekil 2.22’de gösterildiği gibi bulanık PID kontrolör, bir adet girişi e , çıkışı Δu_p olan bulanık P kontrolör, bir adet girişi Δe , çıkışı Δu_I olan bulanık I kontrolör ve bir adet girişi $\Delta^2 e$, çıkışı Δu_D olan bulanık D kontrolörden oluşur.



Şekil 2.22. C sınıfı Bulanık PID kontrolör

Her bir bulanık PID kontrolörün girişinde beş adet bulanık kümeye sahip olduğumuzu farzederek. Şekil 2.15’deki bulanık PID kontrolör için $5 \times 5 \times 5 = 125$ adet

kural, Şekil 2.16'daki bulanık PID kontrolör için 5 adet kural, Şekil 2.17'deki bulanık PID kontrolör için $3 \times 5 = 15$ adet kural gerekir.

2.4.2.3. Genetik Algoritma

2.4.2.3.1. Standart Genetik Algoritma

Bilindiği gibi, genetik algoritma sisteminde, genellikle ikili (binary) kodlama sistemi kullanılmaktadır. Başlangıç popülasyonu ise rastgele oluşturulmaktadır.

2.4.2.3.1.1. Seçim

Seçimde amaç, seçilen uygunluk fonksiyonuna ve seçim yöntemine göre mevcut popülasyondan yeni bir neslin bireylerini seçmektir. Ebeveynler uygunluk değerlerine göre eşleşmek üzere seçilirler. Uygunluğu yüksek olan bireyin yeni nesle aktarılma ihtimali daha yüksektir. Rulet tekerleği (roulette wheel), turnuva (tournament), sabit durum (steady state) ve sıralama (permutation) gibi pek çok seçilme operatörleri vardır.

2.4.2.3.1.2. Çaprazlama

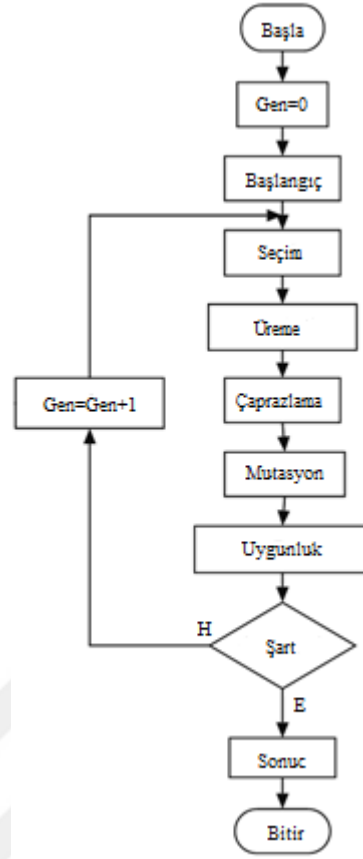
Çaprazlama genetik algoritmadaki en önemli işlemlerden birisidir. Amaç, çözüm uzayına ait iki bireyin yapıları kullanılarak yeni bireyler üretmektir. Uygunluk değeri yüksek olan bireylerden uygunluk değeri daha yüksek bireyler türetilmeye çalışılır. Çaprazlama oranı, çaprazlamaya tabi tutulacak bireylerin tüm popülasyona göre oranını ifade eder. Uygulamaya göre çaprazlama çeşitleri değişmekle birlikte, tek nokta çaprazlama, iki nokta çaprazlama, çok nokta çaprazlama ve uniform çaprazlama en çok bilinen çaprazlama yöntemleridir. Klasik GA tasarlanırken tek nokta çaprazlama tercih edilmiş ve çaprazlama oranı %70 olarak alınmıştır.

2.4.2.3.1.3. Mutasyon

Mutasyon, kromozomun genleri üzerinde belirli bir oranda rastgele değişim yapmaktır. Bu işlem sayesinde en iyi çözümün aranması sırasında GA, bir adım sonraki çözüm arama alanının uzağında çok daha iyi veya kötü çözümü de denmektedir. Mutasyon işleminin sonucunda, bulunan kromozom daha kötü olsa bile GA, popülasyon tabanlı olduğu için algoritma kendisini toplayarak en iyiye doğru yaklaşabilir. Mutasyon, algoritmayı yerel minimum ve maksimum noktalardan korur. Bunun için mutasyon oranının iyi seçilmesi gerekir. Büyük bir mutasyon oranı, algoritmanın en iyiye yakınsamasını etkileyip engel olabileceğı gibi düşük bir mutasyon oranı, algoritmanın yerel minimum ve maksimum noktalardan kurtulamamasına sebep olabilmektedir. Bu çalışmada, klasik GA için mutasyon oranı deneme yoluyla en uygun değer olarak %8 alınmıştır.

2.4.2.3.1.4. Uygunluk Fonksiyonu

Karar uzayının değişik noktalarında dolaşan toplum kromozomlarından her birinin, aranılan çözüme ne kadar yakın olduğunu belirtmek için mutlaka bir uygunluk fonksiyonuna ihtiyacı vardır. Uygunluk fonksiyonu; genelde bulunan çözümün aranılan çözüme ne kadar yakın olduğunu gösteren bir matematiksel ifadedir. Standart bir genetik algoritmanın akış şeması Şekil 2.23 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Standart GA akış şeması

2.4.2.3.2. Zeki Genetik Algoritma (IGA-Intelligent Genetic Algorithm-)

Önerilen çalışmada, yaklaşımı hızlandırmak için başlangıç popülasyonunun ilk bireyleri sıfır olarak seçilmiştir. Genetik algoritma hem çıkış gücünü hem de kanatlardaki moment yükünü optimize ettiği için çok nesneli genetik algoritma olarak adlandırılmıştır. Uygunluk fonksiyonu için $F_1(t)$ ve $F_2(t)$ çıkış gücünü, $F_3(t)$ ise moment yükünü optimize etmek için ayarlanmıştır.

2.4.2.3.2.1. Seçim

Bu çalışmada, rulet tekerleği seçme operatörü tercih edilmiştir. Bu yöntemde her dizi, uyum değeriyle orantılı bir olasılık değeri ile seçilmektedir. Rulet tekerleğinin

yüzeyi, dizilerin uyum değerleri ile orantılı olarak işaretlenir. Tekerlek her döndürüldüğünde, bir dizi eşleme havuzuna atılmaktadır. Daha iyi uyum değerine sahip diziler, tekerlekte daha fazla yer aldıklarından onların seçilme şansları daha yüksek olmaktadır.

2.4.2.3.2.2. Çaprazlama

$$n = \text{yuvarlatılmış}(\text{kromozom sayısı}/10) \quad (2.35)$$

IGA için, değişken çok nokta çaprazlaması uygulanmıştır. Program içerisinde tek nokta çaprazlamadan başlayarak, kromozom sayısı eşitlik 2.35’de ifade edilen n sayısına ulaşana kadar, çok nokta çaprazlama yapılmıştır. Popülasyonun 2. kromozomu tek nokta çaprazlama (1. eleman en iyi olandır ve crossover’a dâhil edilmez aynen alınır.) ile 3. kromozomu iki nokta çaprazlama ile ve hakeza kromozom sayısı bir arttıkça çaprazlama nokta sayısı bir artar taki eşitlik 2.46’daki n değerine gelene kadar. n değerine gelince tekrar başa yani tek nokta çaprazlamaya döner. Buradaki amaç çok nokta çaprazlama kullanarak kromozomlar arasında zengin bir değişim yakalamaktır. Bu zengin değişimlerin optimum değere yaklaşım ihtimali daha yüksektir.

2.4.2.3.2.3. Mutasyon

IGA’da, mutasyon oranı alt sınır ve üst sınırlar arasında yazılımla değiştirilmiştir. Mutasyon oranının değişmesine sebep olacak kriter olarak, bulunan en iyi çözümün tekrar etme sayısı alınmıştır. Iterasyon, alt sınır mutasyon oranından başlar. Bulunan en iyi çözüm belirlenen sayıda tekrar ettiyse, program mutasyon oranını belirli bir değerde arttırır. Mutasyon oranı üst sınırı geldikten sonra, bu sefer mutasyon oranı değiştirme kriteri gerçekleştiği sürece alt sınırı kadar azaltılacaktır. Çünkü yüksek mutasyon oranı popülasyonun optimum değere yakınsamasına engel olur. Yüksek mutasyon oranı algoritmayı lokal minima ve maksimalardan kurtardıktan sonra eski

haline geri dönmelidir ki popülasyon global minima ve maksimaya yakınsamaya devam etsin.

2.4.2.3.2.4. Uygunluk Fonksiyonu

Bu çalışmada uygunluk fonksiyonu belirlenirken üç kriter dikkate alındı. Birincisi, sistemin toplam hatasının mümkün olduğu kadar küçük olmasıdır. İkincisi ise, kabul edilebilir maksimum aşma miktarıdır. Üçüncüsü moment yükünü azaltmaktır. Buna göre uygunluk fonksiyonu $F(t)$ üç parçadan oluşturuldu.

$$F(t) = c_1 \cdot F_1(t) + c_2 \cdot F_2(t) + c_3 \cdot F_3(t) \quad (2.36)$$

Eşitlik 2.36'da $F(t)$, uygunluk fonksiyonu toplamı, $F_1(t)$, birinci uygunluk fonksiyonu, $F_2(t)$, ikinci uygunluk fonksiyonu, $F_3(t)$, üçüncü uygunluk fonksiyonu ve c_1, c_2 ve c_3 sabit katsayılarıdır. Birinci parçası, $F_1(t)$, sistemin toplam hatasını en aza indirgeyecek şekilde ifade edildi.

$$F_1(t) = 10^{-5(e_m - sp)/sp} \quad (2.37)$$

Eşitlik 2.37'de e_m , ortalama hata oranı, sp ise ayar noktasıdır. İkinci uygunluk fonksiyonu $F_2(t)$ için, aşağıdaki formül yazılarak, kurallar belirlendi;

$$F_2(t) = 10^{-5(e_{max} - o_{max})/o_{max}} \quad (2.38)$$

Eşitlik 2.38'de, o_{max} kabul edilebilir aşma değeri, e_{max} ise çalıştırılan sistemin aşma değeridir.

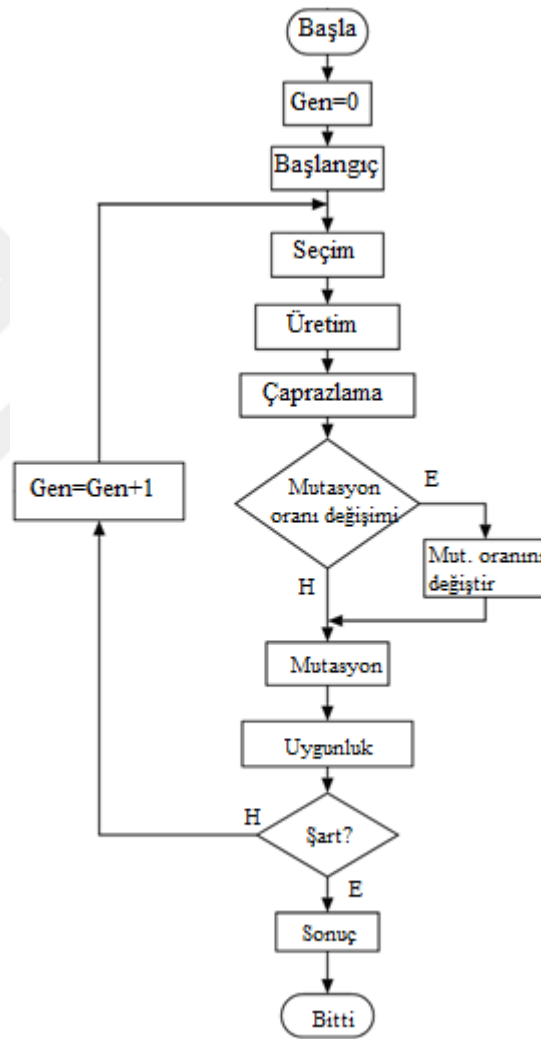
$$F_3(t) = 20x(1651 - Root_ort) \quad (2.39)$$

Eşitlik 2.39'da $Root_ort$, ortalama moment değeridir.

Kurallar ise;

- 1) Kabul edilebilir aşma miktarının üstündeki bölgelerde $F_2(t)$ sıfır,
- 2) Kabul edilebilir aşma miktarından itibaren ise, ayar noktasına doğru gidildikçe artacak bir $F_2(t)$ değeri alındı.

Şekil 2.24’de IGA’nın akış diyagramı gösterilmiştir.

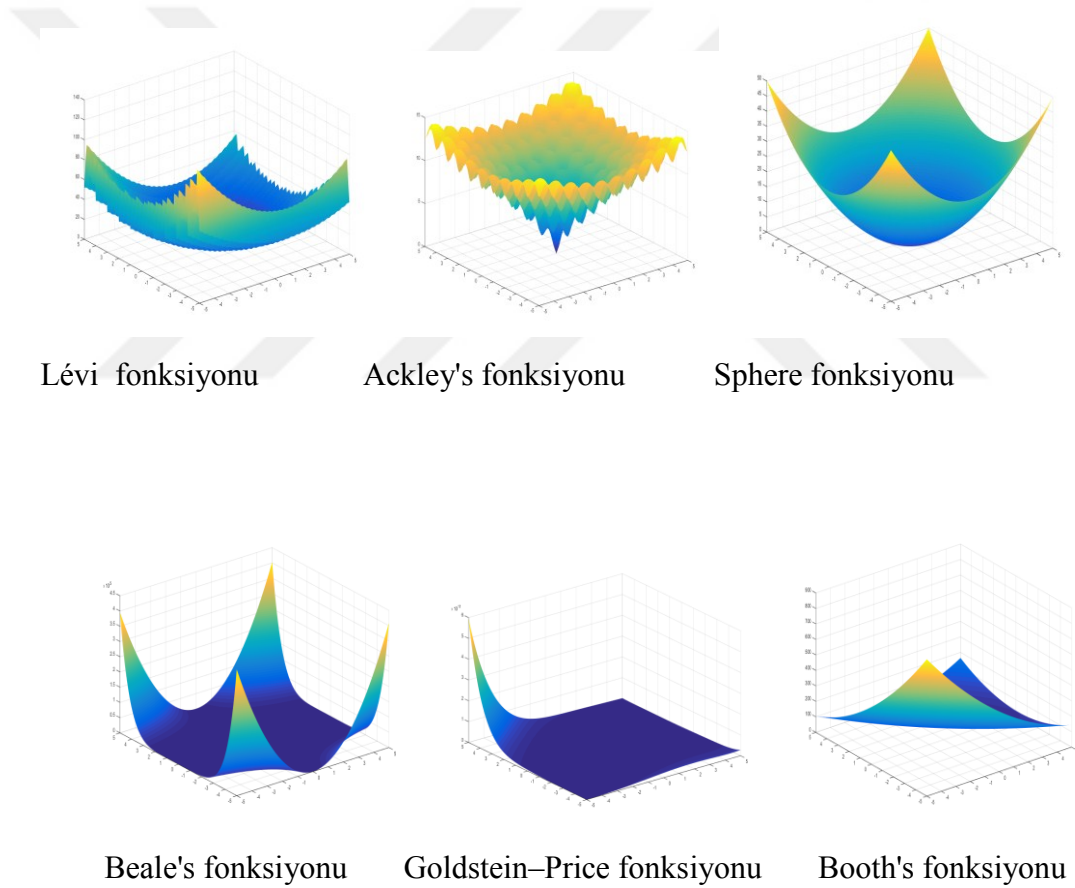


Şekil 2.24. IGA akış şeması

Şekil 2.24'den de görüldüğü gibi IGA çok noktalı crossover uygulamaktadır. Ayrıca mutasyon işleminde yukarıda bahsedilen kriteri takip ederek mutasyon oranını algoritmayı daha iyi çözümlere taşıyacak şekilde değiştirmektedir.

2.4.2.3.3. Algoritmaların Performans Analizi

Bu çalışmada, algoritmaların performans analizi yapılırken, Şekil 2.25'de çizimleri ve Çizelge 2.4'de Benchmark fonksiyonları verilen ve literatürde sıkça kullanılan fonksiyonlardan yararlanılmıştır [41-44].



Şekil 2.25. Bazı Benchmark fonksiyonlarının grafikleri

Çizelge 2.4. Bazı Benchmark fonksiyonları

Fonksiyon İsmi	Fonksiyon	Sınırlar
Sphere fonksiyonu	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$f(x_1, \dots, x_n) = f(0, \dots, 0) = 0$
Ackley's fonksiyonu	$f(x, y) = -20e^{-0,2\sqrt{0,5(x^2+y^2)}} - e^{0,5(\cos(2\pi x) + \cos(2\pi y))} + e + 20$	$f(1,1) = 0$
Lévi fonksiyonu	$f(x, y) = \sin^2(3\pi x) + (x - 1)^2(1 + \sin^2(3\pi y)) + (y - 1)^2(1 + \sin^2(2\pi y))$	$f(1,1) = 0$
Beale's fonksiyonu	$f(x, y) = (1,5 - x + xy)^2 + (2,25 - x + xy^2)^2 + (2,625 - x + xy^3)^2$	$f(3,0,5) = 0$
Goldstein-Price fonksiyonu	$f(x, y) = (1 + (x + y + 1)^2(19 - 14x + 3x^2 - 14y + 6xy + 3y^2))(30 + (2x - 3y)^2(18 - 32x + 12x^2 + 48y - 36xy + 27y^2))$	$f(0, -1) = 3$
Booth's fonksiyonu	$f(x, y) = (x + 2y - 7)^2 + (2x + y - 5)^2$	$f(1,3) = 0$

Test esnasında, her iki algoritmanın popülasyon sayısı 50, çaprazlama oranı da %70 olarak alındı. Standart GA'nın mutasyon oranı %8 ve çaprazlama yöntemi olarak tek nokta çaprazlama tercih edildi. IGA'nın mutasyon oranı %8 ile %200 arasında, algoritmanın yaklaşımına göre, yazılan program tarafından belirlendi. Ayrıca IGA, tek nokta çaprazlamadan başlayarak, birer birer artarak eşitlik 2.53'deki n nokta çaprazlamaya kadar kullanmıştır. Her bir algoritma sonucu için, 1000 iterasyon kullanılırken, iterasyonlar 10 kere tekrar edilip ortalaması alınmıştır.

Bazı Benchmark fonksiyonlarının algoritmalara uygulanması sonucunda elde edilen veriler Çizelge 2.5'de verilmiştir. Çizelge 2.5'de beklenen sonuç o fonksiyonun global minimum değerini gösterir. Standart GA ve IGA sütunları algoritmaların 1000 iterasyon çalıştırılmasıyla beklenen sonuç'a ne kadar yaklaşabildiğini gösterir. Çizelge 2.5'deki sonuçlar bize gösteriyor ki; IGA her fonksiyon için Standart GA'dan daha iyi bir performans göstermiştir. Goldstein-Price gibi fonksiyonlarda ise Standart GA optimum sonuca yaklaşamazken, IGA optimum sonucu büyük bir başarı ile yakalamıştır.

Çizelge 2.5. Genetik Algoritmaların Benchmark fonksiyonlarına uygulanmasındaki sonuçlar

Fonksiyon Adı	Beklenen sonuç	Standart GA	IGA
Sphere fonksiyonu	0	4.608798059342836e-06	6.072540845517372e-10
Ackley's fonksiyonu	0	0.108638094119376	1.199019946451330e-04
Lévi function	0	0.068785432352108	4.799099684833500e-06
Beale's fonksiyonu	0	0.360277722638943	0.050242789240740
Goldstein–Price fonksiyonu	3	1.090268794572235e+07	3.000000074160503
Booth's fonksiyonu	0	0.736320222869314	0.014548004549668

Mesela Sphere fonksiyonu için beklenen sonuç 0'dır. Yani bu fonksiyonun minimum noktası 0 dır. 1000 iterasyon sonunda Standart GA'nın bulduğu sonuç 4.608798059342836e-06 iken IGA'nın bulduğu sonuç 6.072540845517372e-10 dur. IGA, optimum sonuca daha iyi bir yaklaşım sağlamıştır

Çizelge 2.6. Bazı test fonksiyonları

Fonksiyon 1	$f_1 = \max f(x, y) = 1 + x \cdot \sin(4\pi x) - y \cdot \sin(4\pi y + \pi) + \frac{\sin(\sqrt[6]{x^2 + y^2})}{\sqrt[6]{x^2 + y^2 + 10^{-15}}}$	$x, y \in [-1, 1]$
Fonksiyon 2	$f_2 = \max f(x, y) = 3 \cdot (1 - x)^2 \cdot e^{[-x^2 - (y+1)^2]} - 10 \cdot \left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) \cdot e^{(-x^2 - y^2)} - \frac{1}{3} \cdot e^{[-(x+1)^2 - y^2]}$	$x, y \in [-3, 3]$
Fonksiyon 3	$f_3 = \max f(x, y) = \sin(5, 1 \cdot \pi \cdot x)^{30} \cdot e^{\left[\frac{-4 \cdot \lg 2 (x-0,0667)^2}{0,64}\right]} \cdot \sin(5, 1 \cdot \pi \cdot y)^{30} \cdot e^{\left[\frac{-4 \cdot \lg 2 (y-0,0667)^2}{0,64}\right]}$	$x, y \in [0, 1]$
Fonksiyon 4	$f_4 = \max f(x, y) = -[20 + x^2 - 10 \cdot \cos(2\pi x) + y^2 - 10 \cdot \cos(2\pi y)]$	$x, y \in [-5, 5]$

Çizelge 2.7. Test fonksiyonlarının algoritmalara uygulanma sonuçları

	Optimum noktayı bulma sayısı					
	SGA	BSGA	DMGA	AGA	SOGA	IGA
f_1	53	1000	997	1000	1000	1000
f_2	38	1000	969	998	998	1000
f_3	0	998	861	905	997	1000
f_4	0	11	150	10	1000	996
Ortalama	22,75	752,25	744,25	728,25	998,75	999

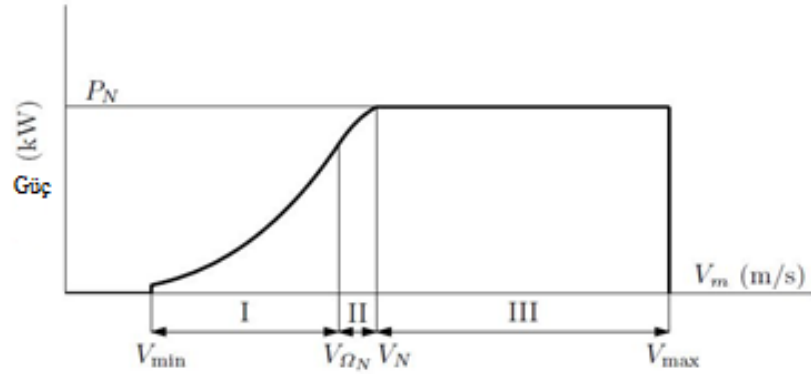
Çalışmanın sonuçlarının doğruluğunu ve performansını anlayabilmek amacıyla, literatürden benzer çalışmalar incelenmiş ve çok benzer olan [45] numaralı çalışma ile karşılaştırma yapılmıştır. Buna göre, [45] numaralı makalede bahsedilen test fonksiyonları da önerdiğimiz IGA optimizasyon tekniği ile çalıştırılmıştır. Bu fonksiyonlar, Çizelge 2.6’da verilmiştir. Bu çalışmadaki tüm fonksiyonlar sırasıyla, standart GA (SGA), adaptif GA (AGA)[46], iyileştirilmiş GA[47] (abbreviated BSGA), adaptif mutasyon oranlı GA[48] (abbreviated DMGA) ve kendi kendini organize eden GA(SOGA)[45] algoritmaları ile test edilmiştir. Yukarıda olduğu gibi, 1000 iterasyon sonucunda genetik algoritmanın en uygun sonucu kaç kere bulduğunu gösteren Çizelgeye IGA’da eklenmiştir. Sonuçlar Çizelge 2.7’de gösterilmiştir. Çizelge 2.7’ye göre IGA, [45]’inci kaynakta tavsiye edilen SOGA’dan, f_2 ve f_3 fonksiyonlarında daha iyi, f_4 fonksiyonunda daha kötü bir performans göstermiştir. Genel ortalamaya göre IGA, SOGA’dan biraz iyi, diğerlerinden ise daha iyidir[49].

2.5. Rüzgâr Türbinlerinde Kontrol (Değişken Hız Değişken Hatve Açısı)

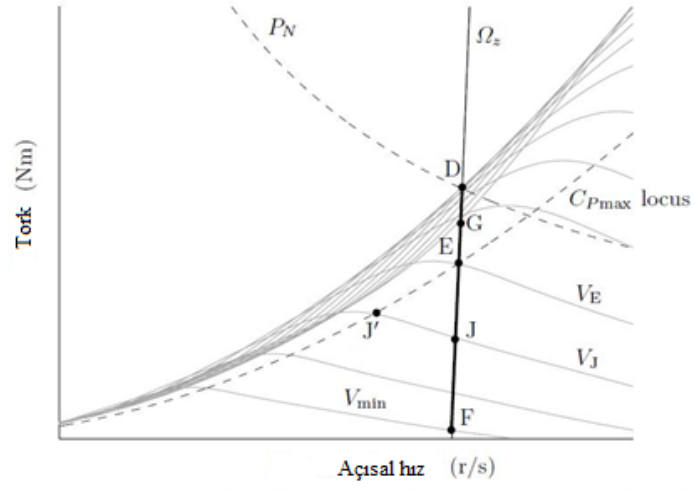
Değişken hız (Variable Speed-VS) değişken hatve açısı (Variable Pitch-VP) kontrol stratejisi ticari rüzgâr türbinlerinde çok yaygındır. Bu Rüzgâr türbini yapısında, nominal rüzgâr hızının üzerinde değişken hatve açısıyla, nominal rüzgâr hızının altında sabit hatve açısı değişken hızla çalışacak şekilde türbin programlanır. Düşük rüzgâr hızlarında, türbin, A ve B noktaları arasındaki C_{pmax} eğrisi boyunca çalıştırılır. B noktasında açısal hız, en üst sınır değeri olan Ω_N değerine gelir. Bu yüzden BC

bölümünde rüzgâr hızı $V_{\Omega N}$ 'den V_N 'e artarken, açısal hız bu değerde sabitlenir. Nominal rüzgâr hızının üzerinde türbinin çalışmasını C noktasında tutmak için hatve açısı kontrol edilir. Nominal güç hiperbolü ile maksimum verim parabolü uzatılarak kesiştirildiğinde BC bölümü C' noktasına iner. Bu durumda çalışma yeri AC' eğrisine iner.

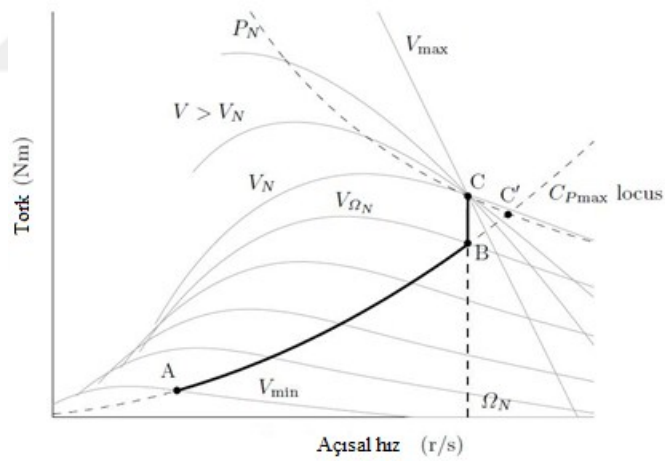
Değişken hız çalışmasında düşük rüzgâr hızında alınan enerji miktarı artar oysa, değişken hatve açısı çalışmasında nominal rüzgâr hızının üstündeki hızlarda etkili bir güç regülasyonu sağlar. Bu kontrol stratejisi Şekil 2.26'daki ideal güç eğrisine ulaşmaya çalışır. Ek olarak değişken hatve açısı çalışması geçiş yüklerini hafifletir. Özellikle büyük ölçekli rüzgâr türbinlerinde, değişken hatve açısı yapısı, sabit hatve açısı yapısı ile karşılaştırıldığında, bu kontrol stratejisinin en büyük avantajıdır. Nominal rüzgâr hızının üzerinde sürekli hatve açısı ve hız kontrolü, rüzgâr türbinlerinin dinamik performansı açısından önemli faydalar sağlar.



Şekil 2.26. İdeal güç eğrisi



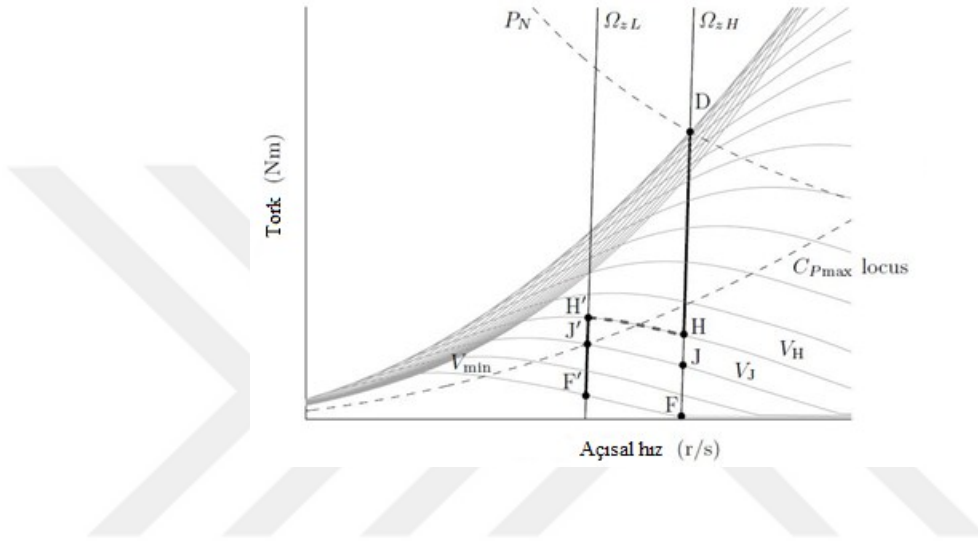
Şekil 2.27. Temel sabit hız-sabit hatve açısı kontrol stratejisi



Şekil 2.28. Temel değişken hız-değişken hatve açısı kontrol stratejisi

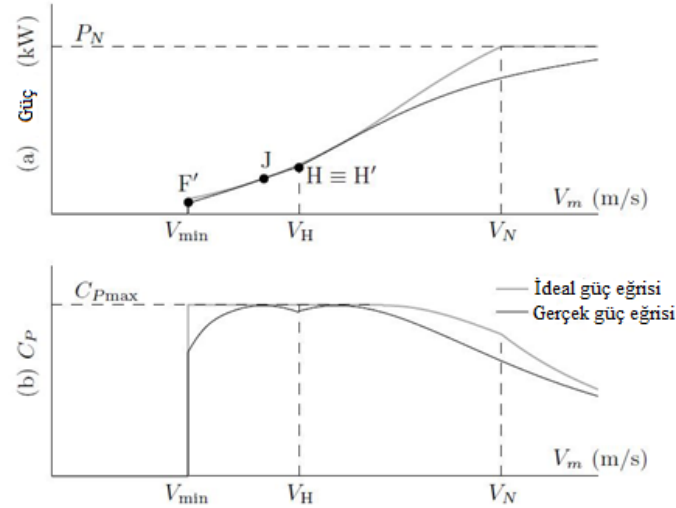
2.5.1 Ayrık Hızlı Çalışma

Bu çalışma modu bazı RES'ler için uygundur. Düşük rüzgâr hızlarındaki sabit-hız kontrol stratejisinin çevrim verimini iyileştirir. Bu temel olarak iki çalışma hızının daha doğrusu iki sıfır tork hızının ($\Omega_Z = \Omega_{ZL}$ ve $\Omega_Z = \Omega_{ZH}$) yer değiştirmesinden oluşur. Yer değiştirme makinanın primer sargılarının tekrar bağlantısı ile yapılır.



Şekil 2.29. Ayrık hız kontrol stratejisi

Şekil 2.29, sabit hatve açılı rüzgâr türbinleri için çalışma modunu göstermektedir ama değişken hatve açılı türbinlerde de uygulanabilir. Yüksek rüzgâr hızlarında türbin, jeneratör-tork karakteristik eğrisinin sağ tarafındaki H ve D noktaları arasında çalışır. Bununla birlikte düşük rüzgâr hızlarında türbin FH bölümü yerine F'H' bölümünde çalışır. Böylece düşük rüzgâr hızı bölgesinde daha iyi enerji çevrim verimi elde edilir. Mesela V_J rüzgâr hızında türbin daha düşük verime sahip j noktası yerine daha yüksek verime sahip C_{pmax} çizgisi üzerindeki j' noktasında çalıştırılır. Bundan dolayı V_J rüzgâr hızında elde edilecek enerji artar. Bu I nolu bölgede rüzgâr hızları için elde edilen enerji ve çevrim veriminin çizildiği Şekil 2.30'da doğrulanmıştır. H ve H' anahtarlama noktalarının seçiminde aynı rüzgâr hızı V_H üzerinde bulunmasına dikkat edilmelidir. Bu rüzgâr hızı ortalama enerji üretimini maksimize edecek şekilde seçilir.

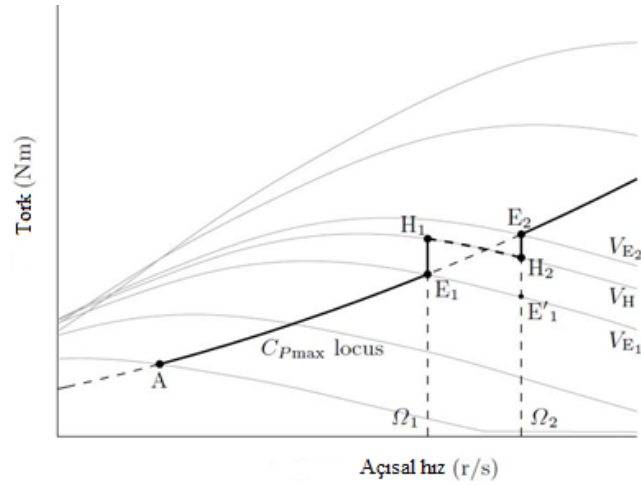


Şekil 2.30. Ayırık hız kontrol stratejisi (a) Elde edilen güç (b) Güç verimi

Şekil 2.30, sabit rüzgâr şartları altında elde edilmiştir. Gerçekte rüzgâr V_H değerinde değiştiğinden Ω_Z devamlı olarak korunamaz, RT yanlış jeneratör-tork karakteristiğinde çalışabilir. Bu yüzden elde edilen enerji Şekil 2.30’da tahmin edilenden daha az olabilir. Elde edilen enerji ve değiştirme frekansı arasında bir uzlaşma vardır. Çok yüksek değiştirme frekansından korunmak için anahtarlama, ortalama rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak hesaplanmalıdır. Ortalama rüzgâr hızı 10 dk veya daha uzun zaman aralıklarında alınan ölçümlerle hesaplanmalıdır. Çok yüksek değiştirme frekansından korunmak amacı ile bir histerisis döngüsü kontrol stratejisine dâhil edilebilir.

2.5.2. Aralıklı Hız Çalışması

Nominal rüzgâr hızının altında değişken hızlı çalışmanın faydalarını sağlamak için açısal hız geniş bir ölçekte değiştirilmelidir. Periyodik yüklerin frekansı, açısal hızla orantılı olarak değişir. Bu çalışma modu bazı yapısal modları harekete geçirmeye eğilimlidir. Yapısal rezonanstan korunmak için izin verilen yapısal hız bölgesi bir şekilde sınırlandırılmalıdır.



Şekil 2.31. Aralıklı değişken hız kontrol stratejisi

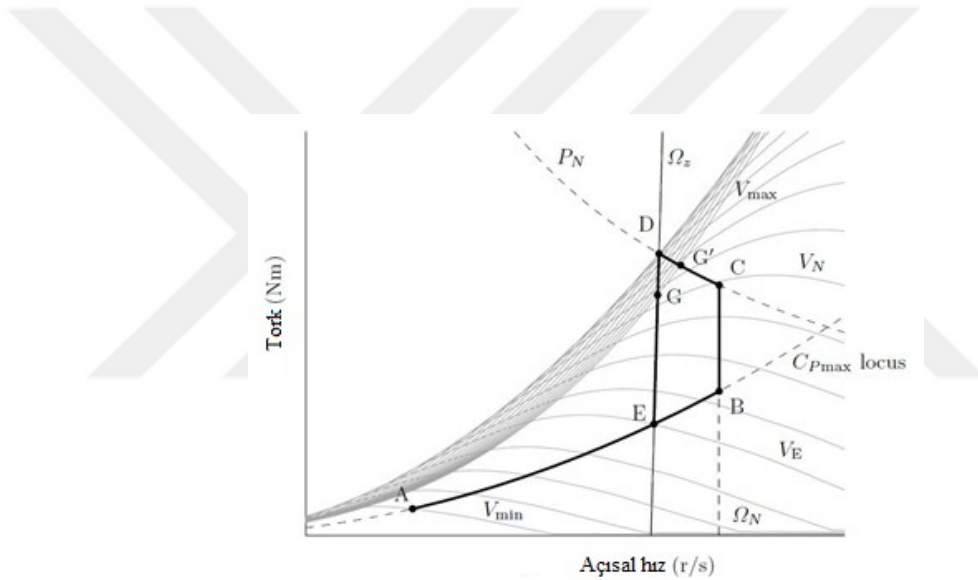
Şekil 2.29, Ω_N 'nin altındaki hızlar için uygun kontrol stratejilerini göstermektedir. Burada Ω_1 ve Ω_2 sabit hız bölgesi ile C_{pmax} üzerindeki değişken hız çalışması birleştirilmiştir. E_1H_1 ve H_2E_2 bölgelerinde hız sabit olsa bile türbin daima değişken hız modunda çalışır. Ω_1 ve Ω_2 arasındaki bölgenin bazı yerinde rezonans frekansının düşmesi beklenir. Kontrol stratejisi gerekli olarak açısal hız ekseninden C_{pmax} bölgesinde ayrılır, bu da bir miktar güç kaybına sebep olur. Bu kontrol stratejisinde enerji alımında düşük kayıplar olmasına rağmen, yapısal rezonanstan korunmuş olur.

Bir önceki kontrol stratejisinde V_H rüzgâr hızında anahtarlama meydana gelerek enerji alımını maksimuma çıkarmıştı. Bu durumda rüzgâr rotoru $C_p-\lambda$ karakteristiğinin tepe noktasına sahipti. E_2H_2 bölgesine doğru büyürken E_1H_1 bölgesinden kısa devre edilebilir. Bu tür rotorlarda uygun bir alternatif çözüm de $AE_1E_1'E_2B$ noktalarına kontrol stratejisinin tespit edilmesidir.

Ayrık hızlı (discrete) çalışma karşılaştırıldığında, aralıklı (discontinuous) hızlı çalışmada anahtarlama çalışması çok daha basittir. Gerçekten motorun primer sargılarına tekrar bir bağlantı yapmak yerine hız kontrol döngüsündeki referansı doğrudan değiştirmek yeterlidir. Ω_1 ve Ω_2 arasındaki anahtarlama frekansının çokluğundan korunmak için histerisis döngüsüne ihtiyaç vardır.

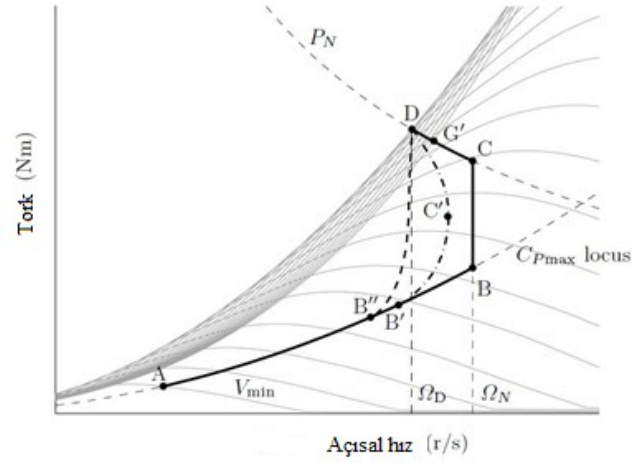
2.5.3. Geçiş Yükünü Azaltma için Düzgün Geçiş Bölgesi

Güvenli çalışma alanında maksimum güç eldesini sağlamak için Şekil 2.32'd3 kontrol stratejisi ABCDG' noktalarına tespit edilmiştir. Onun en büyük sakıncası; nominal çalışma noktası (V_N , Ω_N) çevresindeki geçiş tepkileridir. Nominal rüzgâr hızına yakın türbülanslı rüzgâr tarafından türbin hareketlendirildiğinde, ağır geçiş yüklerinin ve güç aşımının meydana gelmesi kaçınılmaz. Bu olgu türbinin eylemsizliğinde depolanan kinetik enerji ile birleşir. Rüzgârın artmasıyla aerodinamik gücü sabit tutmak için yeterli bir süratle açısal hız azaltılsa bile fazla olan kinetik enerji şebekeye aktarılır. Bu yüzden üretilen güçte nominal değerin ötesinde bir artış olur.



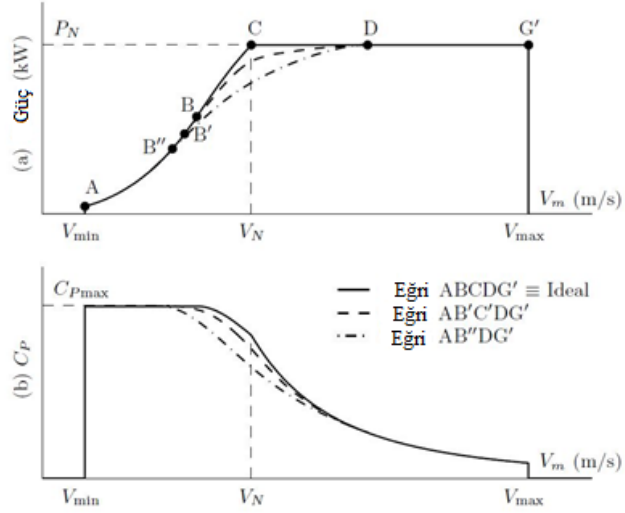
Şekil 2.32. Temel değişken hız -sabit hatve açısal kontrol stratejisi

Yüksek rüzgâr hızlarında geçiş davranışını iyileştirmek amacıyla, çalışma bölgeleri arasındaki geçiş özellikle nominal hız ve nominal güç düzgünleştirilmelidir. Bu daha yumuşak geçiş sağlayan strateji potansiyel olarak yüksek rüzgâr hızlarındaki geçiş yüklerini azaltır fakat elde edilen enerjide bir miktar kayba da neden olur.



Şekil 2.33. Değişken hız sabit hatve açısı için opsiyonel kontrol stratejisi

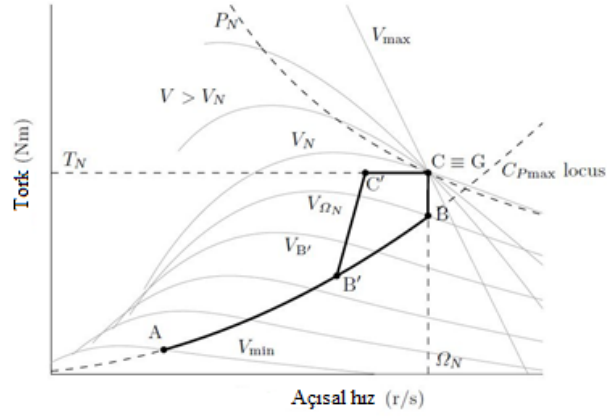
VS-FP stratejisi için uygun opsiyonlar Şekil 2.33’de çizilmiştir. Mesela AB’C’DG’ noktalarına tespit edilmiş kontrol stratejisini ele alalım. B’ noktasında C_{pmax} eğrisinden ayrılmış. O noktadan sonra açısal hız rüzgâr hızıyla artmıştır fakat önceki ile aynı oranda değil. Kontrol stratejisi düzgün bir şekilde maksimum çalışma hızına yaklaşır, ki bu durum nominal değer altındadır. C’ noktasını geçerek çalışma eğrisi, esas kontrol stratejisinin olduğu D noktasına doğru eğilim gösterir. CD arasında sabit kalacağı yerde, C’D eğrisinde güç artarken hız azalır. Geçiş bölgeleri arasındaki bu düzgünlük geçiş yükünü ve güç dalgalanmasını azaltır. Benzer şekilde AB’’DG’ noktalarına tespit edilen kontrol stratejisi Ω_D değerine ulaşmadan B’’ noktasından C_{pmax} eğrisinden ayrılır. Bu noktadan sonra çalışma yönü, esas kontrol stratejisinin olduğu D noktasına doğru döner. Bu kontrol stratejisi, değişken hız pasif stall kontrol stratejisinin düzgün versiyonu olarak görülebilir. Şunu da not etmek lazım ki türbin rüzgâr hızı bölgesinin üzerinde değişken hızda çalıştırılabilir. Şekil 2.34’de bu kontrol stratejileri ile elde edilen güç ve çevrim verimi eğrilerini göstermiş ayrıca ideal eğri ile (ABCDG’) karşılaştırmıştır.



Şekil 2.34. Değişken hız-sabit hatve açısı için opsiyonel kontrol stratejisi (a) elde edilen güç (b) güç verimi

2.5.4. İyileştirilmiş Güç Regülasyonu için Geçiş Bölgesindeki Hız Desteği

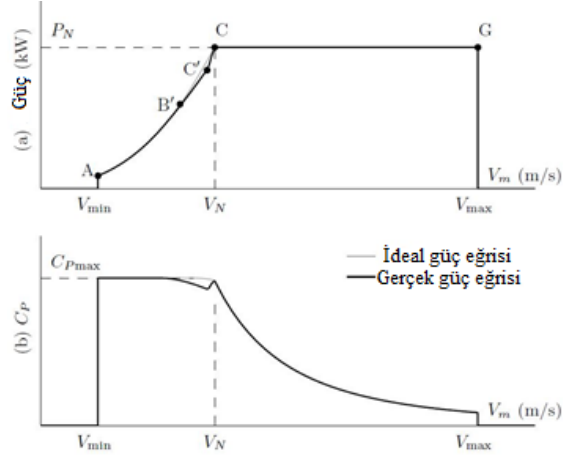
Genellikle VS-VP rüzgâr türbinlerinin kontrolünde iki bağımsız geri besleme döngüsü kullanılır. Bu ayrı kontrol yaklaşımında, jeneratör ve hatve açısı kontrolörleri bireysel olarak regülasyon işlemini gerçekleştirirler. Bazı bölgelerde bu kontrolörler diğerlerine müdahale eder. Hangi kontrolör galip gelirse çalışma noktası ona bağlı olur. Temel VS-VP kontrol strateji durumu Şekil 2.28’de gösterilmiştir. Şekilde 2.28’de nominal rüzgâr hızının çevresinde kontrolörlerin girişimi görünmektedir. Bu girişimin sonucunda kontrol sistemi, C noktasında kötü bir regülasyon özelliği sergiler. Rüzgâr dalgalanmasında büyük güç dalgalanması oluşur.



Şekil 2.35. Düzenlenmiş değişken hız hatveden tüye (pitch to feather) kontrol stratejisi (kontrolör girişimleri azaltılmış)

Şekil 2.35’de gösterilen bu istenmeyen davranıştan RES’i korumak için düzenlenmiş bir kontrol stratejisi tasarlanmalıdır. Bu AB’C’C noktalarına tespit edilmiş bir stratejidir. Bu modifiye edilmiş kontrol stratejisi temel değişken hızlı kontrol stratejisine benzer. (B’ noktasına kadar)

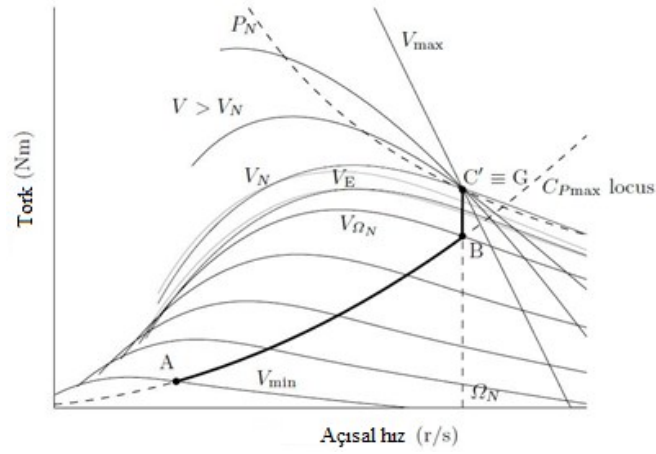
Rüzgâr hızı V_B ’den büyük olduğunda, RT, C_{pmax} eğrisi yerine B’C’ eğrisinde çalıştırılır. C’ noktasında tork nominal değeri olan $T_N = P_N / \Omega_N$ değerini alır. Bundan sonra nominal çalışma noktası C’ ye gelene kadar RT sabit tork değerinde çalıştırılır. Hız kontrolörü kontrol stratejisinin hepsinde aktif iken hatve açısı kontrolörü nominal çalışma noktasına yaklaştığında aktif olur. Kritik çalışma noktası C’ nün çevresinde çalışma esas olarak hatve açısı kontrolörle girişime girmeksizin jeneratör kontrolörü tarafından yönetilir. C noktasına yaklaşıldıkça hatve açısı kontrolörünün üstünlüğü artar. Bu kontrol stratejisinin kullanımında bazı enerji kayıpları oluşur. Rüzgâr hızına bağlı olarak alınan enerjiyi ve çevrim verimini gösteren Şekil 2.36’da bu doğrulanmıştır.



Şekil 2.36. Düzenlenmiş değişken hız hatveden tüye (pitch to feather) kontrol stratejisi (kontrolör girişimleri azaltılmış) (a) elde edilen güç (b) güç verimi

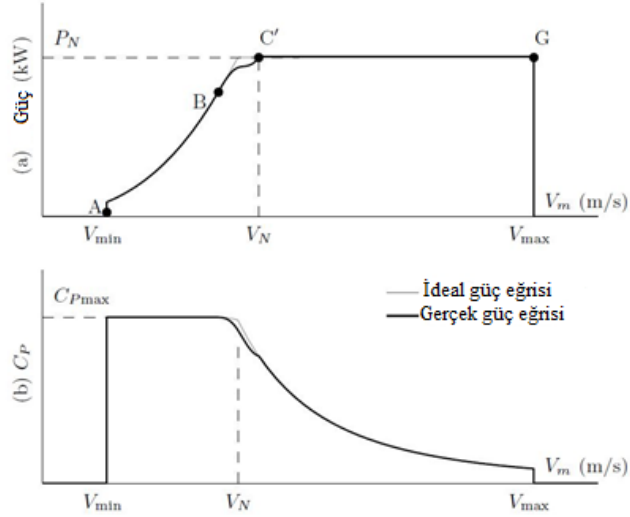
2.5.5. Kontrol Edilebilirliği İyileştirmek için Geçiş Bölgesinde Hatve Açısı Kontrolü

Bütün rüzgâr hızı çalışma bölgelerindeki ideal güç eğrisi ile karşılaştırılarak Şekil 2.28’de değişken hızlı hatve açısı kontrol stratejisinin en belirgin özelliği gösterilmiştir. Nominal çalışma noktası C' ’ nün çevresinde dinamik sistem kötü bir kontrol edilebilirlik göstermektedir. Nominal yakın rüzgâr hızlarında optimum hatve açısıyla çalışan rüzgâr türbininin kontrol edilememesi meselenin esasıdır. Aerodinamik torkun kontrol edilebilmesi için büyük hatve açısı sapmaları gereklidir. Bu eksiklik nominal rüzgâr hızının çevresinde elde edilen performansa şiddetli sınırlamalar yükler. Şekil 2.28’deki temel VS-VP kontrol stratejisinin modifiye edilmiş versiyonu tasarlanmıştır. Tork ve açısal hız eğrileri çizildiğinde, temel ve modifiye edilmiş kontrol stratejileri üst üste çizilmiştir. Aerodinamik tork eğrisi ile hatve açısı parametrelerinde sadece fark görünüyor. Şekil 2.37’de farklı rüzgâr hızları için aerodinamik tork karakteristikleri, kontrol stratejileri için çizilmiştir.



Şekil 2.37. Düzenlenmiş değişken hız hatveden tüye (pitch to feather) kontrol stratejisi (kontrol edilebilirlik iyileştirilmiş)

Düşük rüzgâr hızı bölgesinde değişmeden kalır. Bu durum, $V_{\Omega N}$ rüzgâr hızının altında optimum hatve açısı ile C_{pmax} eğrisi boyunca çalışma noktasını taşır. Düzenleme geçiş bölgesinde gözükür. Burada sistem nominal güce gelene kadar hatve açısı optimum değerde kalacağı yerde rüzgâr hızıyla düzgün bir şekilde arttırılır. Bu düzenleme Şekilde rüzgâr hızı V_E için ($V_{\Omega N} < V_E < V_N$) aerodinamik eğride görülebilir. Bu durumda nominal güce-temel kontrol stratejisi ile kıyaslanırsa daha yüksek rüzgâr hızlarında ulaşır, bunun sonucunda geçiş bölgesi büyümüş olur. Bunun sonucunda pratikte önemli olmayan bir enerji kaybı olur. Bu Şekil 2.38’de gösterilmiştir. Bu kontrol stratejisinin avantajı geçiş yüklerinin çok önemli olduğu nominal çalışma noktası çevresindeki kontrol edilebilirlik kazanılmış olur. Böylece daha iyi bir güç regülasyonuna ve geçiş yüklerinde azalmaya ulaşılabilir.



Şekil 2.38. Düzenlenmiş değişken hız hatveden tüye (pitch to feather) kontrol stratejisi (kontrol edilebilirlik iyileştirilmiş) (a) elde edilen güç (b) güç verimi

2.6. Rüzgâr Türbinlerinde Mekanik Yükler

Enerji maliyetini minimize ederken kontrol sistemi sadece mümkün olan ideal güç eğrisini sıkıca takip edecek şekilde tasarlanmamalı, diğer kontrol nesneleri ihmal edilmemelidir. Rüzgâr türbinlerindeki mekanik yüklere de dikkat edilmesi gerektiği gösterilmiştir[1, 2, 50]. Mekanik yükler türbinin bazı parçaları üzerinde yorulma hasarına sebep olabilir. Bu yüzden sistemin faydalı olan ömrü kısalır. Bu sebeple RES'lerin ortalama maliyeti yükselir, böylece enerji maliyeti artar.

Temel olarak statik ve dinamik olmak üzere iki tip mekanik yük vardır. Statik yükler ortalama rüzgâr hızı ile türbinin etkileşimi sonucunda oluşur. Kontrol noktasında daha önemli olan dinamik yüklerdir. Bu dinamik yüklere, rotor tarafından süpürülen yüzey üzerinde rüzgâr hızı alanının uzaysal ve geçici dağılımı sebep olur. Dinamik yükler, mekanik yapı üzerinde etkisi olan aerodinamik yükteki değişimleri ve drive-train'den aşağı doğru yayılan aerodinamik torkdaki değişimleri içerir. Bunlar drive-train ve yapısal yükler olarak da adlandırılır.

Dinamik yüklerin yaygın bir sınıflandırması daha vardır. O da fırtınaların ve dalgalanmaların sebep olduğu geçiş yükleridir. Onlar ağırlıklı olarak düşük frekanslıdır. Geçiş yükleri yüksek rüzgâr hızlarında çok önemlidir, özellikle rüzgâr türbini parçalarının değerlerinin hesaplanmasında. MPPT (I. bölge) ve güç regülasyonu (III. bölge) arasındaki geçiş, nominal rüzgâr hızının üzerinde güç sınırlama geçiş yüklerini doğrudan etkiler. Uygun olmayan kontrol stratejilerinin güçlü geçiş yüklerine sebep olmaları kaçınılmazdır. Bu yüzden kontrol stratejisi planlanırken bu yükler de göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca kontrolörün tasarımı ve ayarı da geçiş yüklerini etkiler. Gerçekten kararlı durum kontrol strateji eğrisini sıkı sıkıya takip eden bir kapalı çevrim sisteminde, fırtına esnasında daha ağır geçiş yükleri olacaktır.

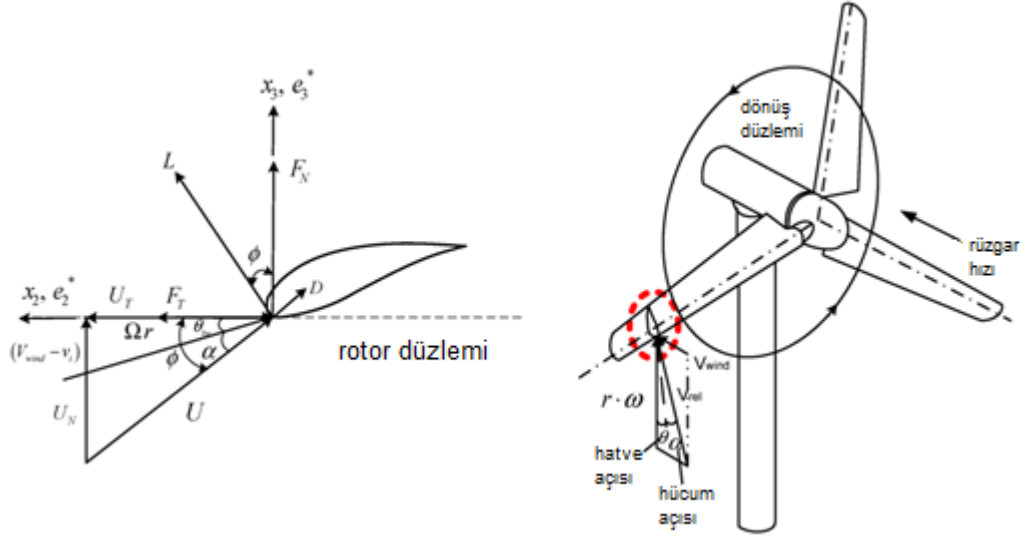
Dairesel örnekleme, rotor hızının katlarında yoğunlaşarak spektral olarak tepe yapmış yüksek frekanslı yüklere sebep olur. N kanatlı bir rüzgâr türbininde spektral yükler NP'de baskındır. Bunlar drive-train ve yapıya doğru yayıldığında (bu periyodik yükler), sistemdeki bazı istenmeyen sönümlü titreşimleri harekete geçirir. Daha büyük rüzgâr türbinlerinde türbin parçalarının esnekliği ve kontrol sisteminin önemi bu yüzden artmıştır. Kontrolör tasarımının ve ayarının iyi olması ile kontrol stratejisi bu periyodik yükleri yüksek oranda etkiler. Hatve açısı kontrolü yapısal yükleri etkilerken, jeneratörün kontrolü drive-train yüklerinin yayılmasını etkiler. Bu yüzden kötü bir kontrol tasarımı türbini titreşim moduna geçirerek, dişli kutusu veya kanatlar gibi bazı mekanik parçaların harap olmasına sebep olabilir. Kontrolör, yorulmaya bağlı kırılma riskini ve yüksek frekanslı yükleri mümkün olduğu kadar azaltmak için titreşimi önlemelidir. Diğer bir deyişle, kontrol stratejisi, kontrolör tarafından sönümlenemeyecek bir titreşime sebep olacak bir çalışma noktasından kaçınılmalıdır.

Rüzgâr türbinlerinde mekanik yüklerin hafifletilmesi için bireysel hatve açısının kullanımının mümkün olduğu yıllardır birçok kere tavsiye edilmiştir. Mekanik yük miktarında büyük ölçekte azalmanın elde edilebileceğini ve bunun için gerekli olan algoritmanın oldukça basit olduğunu son zamanlarda yapılan çalışmalar göstermiştir. Ticari açıdan bu fikri geliştirmek için doğru zamanın geldiğini gösteren birkaç sebep vardır. Bunlar;

- Ticari türbinler daha da büyümektedir. Birçoğu şu anda bireysel hareketlendirici kullanmaktadır. Dikkatli bir tasarımla, bağımsız frenleme sistemi dikkate alındığında, yüksek kapasiteli şaft frenine ihtiyaç kalmayabilir.
- Türbinler daha büyük ve daha esnek oldukça yük azaltımının önemi artmaktadır. Yük azaltımı zeki kontrol sistemleri sayesinde daha çekici olmaktadır.
- Bu teknik, rüzgâr hızındaki değişimlerin sebep olduğu ve kanatlardan rotor diskine geçen asimetrik yüklerin azalmasını da amaçlar. Bu asimetrik yükler, rüzgârdaki türbülans girdaplarının büyüklüğüne de bağlı olarak türbin rotorunun büyüklüğünü belirlemede çok önemlidir.
- En son kullanılan yazılım araçları sayesinde, problemin bizim tarafımızdan anlaşılması artmıştır. Böylece uygun kontrol algoritmalarının tasarımı için metodlar geliştirilmiştir.
- Bu teknik, yeterli seviyede doğruluğa sahip yük sensörlerinin kullanılmasına ve sistem üzerinde hareket eden asimetrik yükleri ölçebilecek sensörlerin bulunmasına dayanır.

2.6.1. Kanat Yükleri

Rüzgâr türbininin kanatları havayı süpürüp, rotor diskine aktarır. Rüzgâr hızında ve yönündeki değişiklikler rotor diskine, rüzgâr kesmesi, kule gölgesi, yaw hizalanması ve türbülans olarak aktarılır. Türbülans girdaplarının boyutunun artmasıyla, rotor diskinin boyutu da artar. Çünkü bu türbülanslar rotor diskine büyüyerek geçer.



Şekil 2.39. Rüzgâr türbininin kanadına etkileyen kuvvetler

Bu değişimlerin sonucunda, kanat yüklerinde en büyüğü 1P frekansında olmak üzere, 2P,3P,4P,... harmoniklerinde yükler oluşur. Üç kanatlı bir rotorda, her bir kanatdaki yükler arasında 120° faz farkı vardır. Rüzgâr türbininin başlık kısmı ve yapının geride kalanları özellikle 3P,6P,...frekansındaki mekanik yüklerden etkilenir. 1P ve diğer harmoniklerdeki asimetrik yükler, başlıkta, şaftta ve kulede önemli oranda yorulma yüklerine sebep olur. 1P yükü büyük türbinlerde önemlidir. Bu yük, 1P frekansında 120 derece açılı bireysel hatve açısı kontrolü ile azaltılabilir. Şekil 2.39'da rüzgâr türbininin kanadına etkileyen kuvvetler gösterilmiştir.

2.6.2. Mekanik Yüklerin Kontrol Algoritmaları

Rüzgâr türbini modelinin kullanılması, 1P yüklerini kontrol etmeye yarayan bireysel hatve açısı kontrolünde değişik algoritmaların kullanılmasına imkan tanımıştır. Bu durum çok değişkenli bir kontrol problemidir. Ölçülen yüklere göre çok girişli ve bu girişlere göre üretilmiş her bir kanat için ayrı hatve açısı değeri içeren üç çıkışlı bir sistemdir. Bununla birlikte karmaşık çok değişkenli kontrolörler basit olmaktan çok uzaktırlar. Bu algoritmalar çok yüksek dereceli olabileceğinden, kontrolörün her bir

adımında yüksek miktarda hesaplama yükü getirebilir. Bu durumda sağlam bir kontrolü garanti etmek oldukça zordur.

Bu kontrolde, en iyi netice üretilen kollektif hatve açısına 1P frekansındaki bireysel hatve hareketi eklenerek elde edilmiştir. Kollektif hatve açısının üretiminde çıkış gücü veya rotor açısal hızı dikkate alınmıştır. Kontrolör olarak PID, bulanık, genetik bulanık ve bulanık PID gibi yapılar kullanılarak üç kanat için ortak bir hatve açısı üretilmiştir. 1P frekanslı yükten elde edilen, aralarında 120° lik faz farkı bulunan fark hatve açısı değeri, kollektif hatve açısı değerine eklenerek sonuç hatve açısı değerleri elde edilmiştir. Fark hatve açısı en az iki giriş iki çıkış olmak üzere çok değişkenli bir kontrolör gerektirmektedir. Rüzgâr türbininin üç kanadı olduğu düşünülürse, en az üç tane fark hatve açısı çıkışı lazımdır. Bu durumda üç fazlı elektrik makinaları teorisinden d-q eksen gösterimini ve transformunu ödünç almak oldukça faydalı olacaktır. Böylece üç tane olan fark hatve açısı, iki adete çevrilip hesaplamalar yapıldıktan sonra ters çevrimle tekrar üç adet fark hatve açısı değeri elde edilmiş olur.

Son zamanlarda yapılan çalışmalar d ve q eksenlerindeki büyüklüklerin birbirlerinden bağımsız olarak yönetilebileceğini gösterdi. Bu da şu manaya gelirki; d ve q eksenindeki kontrolörler birbirinden bağımsız olarak tek girişli ve tek çıkışlı olarak tasarlanabilir. Bu durumda basit bir filtreye seri olarak bağlanmış klasik bir PI kontrolör bile yeterli kontrol hareketini temin eder. Pratikte eksenler arasında bir miktar etkileşim söz konusu olabilir. Fakat bu d ve q eksen çevrimleri arasına basit bir azimuth faz kayması eklenerek halledilebilir.

2.6.3. d-q Eksen Çevrimi

d-q eksen çevrimi eşitlik 2.40'da ifade edilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} \beta_d \\ \beta_q \end{Bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{Bmatrix} \quad (2.40)$$

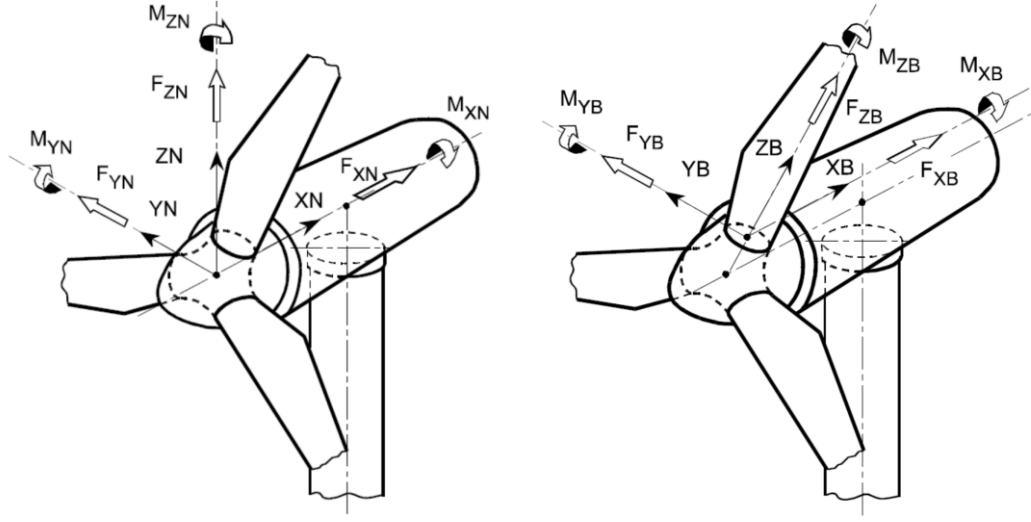
burada $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü kanatlardaki açılardır. β_d ve β_q ise d ve q eksenlerindeki açılar ve θ ise 1. kanat ile d-ekseni arasındaki açıdır. d-q ekseninden geri çevrim ise eşitlik 2.41’de verilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_d \\ \beta_q \end{Bmatrix} \quad (2.41)$$

Burada θ , rotor azimuth açısıdır.

2.6.4. Bireysel Hatve Açısı Kontrolü ile Mekanik Yük Azaltma

Bireysel hatve açısı kontrolündeki mevcut yaklaşımlar, kökü orijinal helikopter teknolojisine dayanır. Son zamanlarda bu tekniğe olan ilgi, rüzgâr türbinlerinin daha büyük olmasına bağlı olarak rüzgârdaki türbülans yapısının çok önemli asimetrik yüklere sebep olmasından dolayı yenilenmiştir. Yapısal maliyeti azaltma isteğinin artmasında, daha kötü potansiyel yüklere karşı dayanan çok güçlü yapılar bina etmekten ziyade daha ucuz potansiyel çözümler üreten zeki kontrol algoritmalarının yükleri azaltmasının etkisi olmuştur. Netice olarak en son sensör teknolojileri bize istenen düzeyde yüksek gerçekliği olan ölçümler sunmaktadır. Bossanyi yorulma yüklerinde kanat köklerinde %20-%30, başlıkta (hub) %30-%40 arasında bir azalma olduğunu göstermiştir[4].



Şekil 2.40. Kanat moment eksenleri

Şekil 2.40’da momentlerin hesaplanmasında kullanılan kanat eksenleri gösterilmiştir.

2.6.5. Çalışma Esnasındaki Hesaplamaya Dayalı ve Rastgele Mekanik Yükler

Dönen kanatlar üzerindeki kararlı rüzgâr yüzünden oluşan dış yükleri diğerlerinden ayırmak alışılmış bir durumdur. Rüzgâr hızındaki değişimlerin sebep olduğu bu yükler farklı yollarla analiz edilir. Rotorun süpürdüğü alan üzerinde rüzgâr hızının kararlı uzay değişimlerinden dolayı oluşan kanatlar üzerindeki periyodik yüklere de hesaplanabilir (deterministik) yükler denilir. Çünkü bu yükler başlık yüksekliği, rüzgâr hızı, açısal hız, rüzgâr kesmesi gibi belirli sayıdaki parametrelerle hesaplanabilir.

Rüzgâr hızındaki dalgalanmalardan dolayı kanat üzerinde rastgele oluşan yükler olasılıksal olarak hesaplanabilir bu yüzden bu yüklere stokastik yükler denir.

Rüzgâr yüklerine ek olarak, dönen kanatlar üzerinde ağırlık ve atalet yükleri de vardır. Ağırlık yükleri kütle dağılımına ve kanatın azimutuna bağlıdır ve bu yüzden

hesaplanabilir. Fakat atalet yükleri türbülansdan etkilenebildiğinden hesaplanabilir olan bu yükler bazen stokastik yükleri de ihtiva edebilir.

2.6.5.1. Hesaplanabilir Aerodinamik Yükler (Sabit, düzgün dağılım akışlı, rotor kanadına dik yükler)

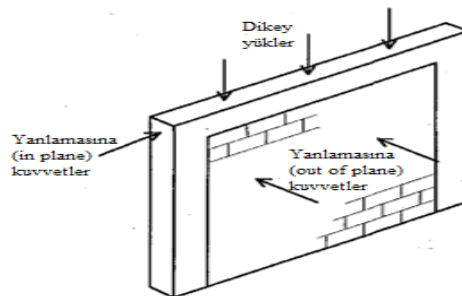
Kanat moment teorisinin uygulanması ile kanat üzerindeki aerodinamik yükler hesaplanabilir.

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \emptyset} \left[(C_x) - \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \emptyset} C_y^2 \right] \quad (2.42)$$

$$\frac{a}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \emptyset \cos \emptyset} \quad (2.43)$$

2.42 ve 2.43 eşitlikleri, kaldırma ve sürüklenme katsayıları hesaplanarak, hücum açısı α , akış açısı $\emptyset$, her bir yarıçap için akış indüksiyon faktörü a ve a' iteratif olarak çözülebilir. Eşitlik 2.49'daki C_y^2 terimi ihmal edilerek çözüm basitleştirilebilir. Çünkü $\sigma_r C_y^2 / C_x$ ifadesi kanat kök alanına göre ihmal edilebilecek küçüklüktedir.

Kanat dışındaki yüklerin kanat uçlarındaki kayıplar eşitlik 2.42 ve 2.43 ile hesaplanabilir. Bu eşitlikler düzenlenerek kanat hareketi yönündeki ve kanat dönüşüne dik birim uzunluğa düşen kuvvet miktarı ifade edilebilir.



Şekil 2.41. Düzlem içi ve düzlem dışı kuvvetleri

Bu kuvvetler Şekil 2.41’de gösterildiği gibi düzlem içi (in plane) ve düzlem dışı (out of plane) kanat kuvvetleri olarak bilinir ve eşitlik 2.44 ve 2.45’deki gibi ifade edilir.

Birim uzunluktaki düzlem dışı kuvvet:

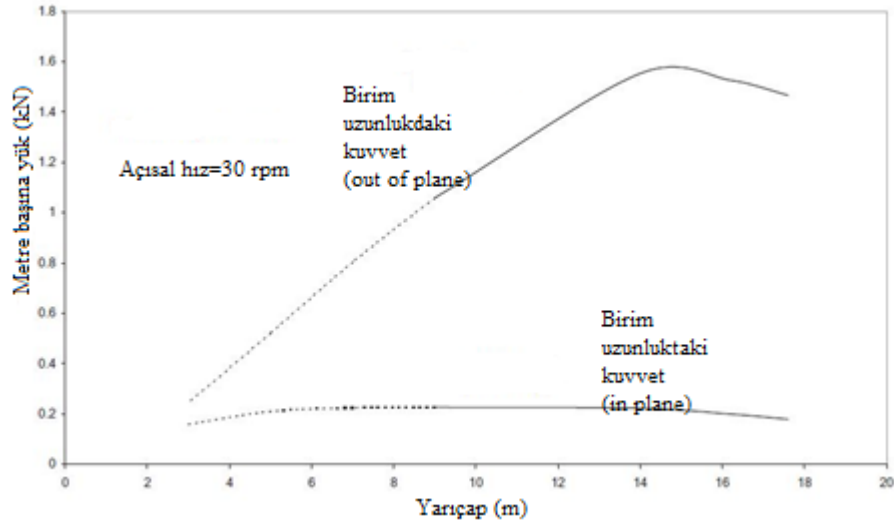
$$F_X = C_x \frac{1}{2} \rho W^2 c = 4\pi \rho U_\infty^2 (1 - af) a \frac{f}{N} r \quad (2.44)$$

Birim uzunluktaki düzlem dışı kuvvet:

$$-F_Y = C_y \frac{1}{2} \rho W^2 c = 4\pi \rho \Omega U_\infty (1 - af) a' \frac{f}{N} r^2 \quad (2.45)$$

İfadedeki parametreler f, uç kayıp faktörü, N, kanat sayısı x ve y eksen koordinatları olarak tanımlanmıştır.

Düzlem içi ve düzlem dışı kanat kuvvetlerinin rotor yarıçapı ile değişimleri Şekil 2.42’de verilmiştir. Burada ortalama rüzgâr hızı 10 m/s olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.42. Düzlem içi ve düzlem dışı kanat yüklerinin dağılımı

2.6.5.2. Şaft Eğilmesi

Önden rüzgâr alan (upwind) rüzgâr türbinlerinde rotor, kule ile gelen rüzgâr arasına yerleştirilir. Rotor ile kule arasındaki boşluğu arttırmak için rotor şaftı birkaç derece yukarı kaldırılır.

2.6.5.3. Rüzgâr Kesmesi

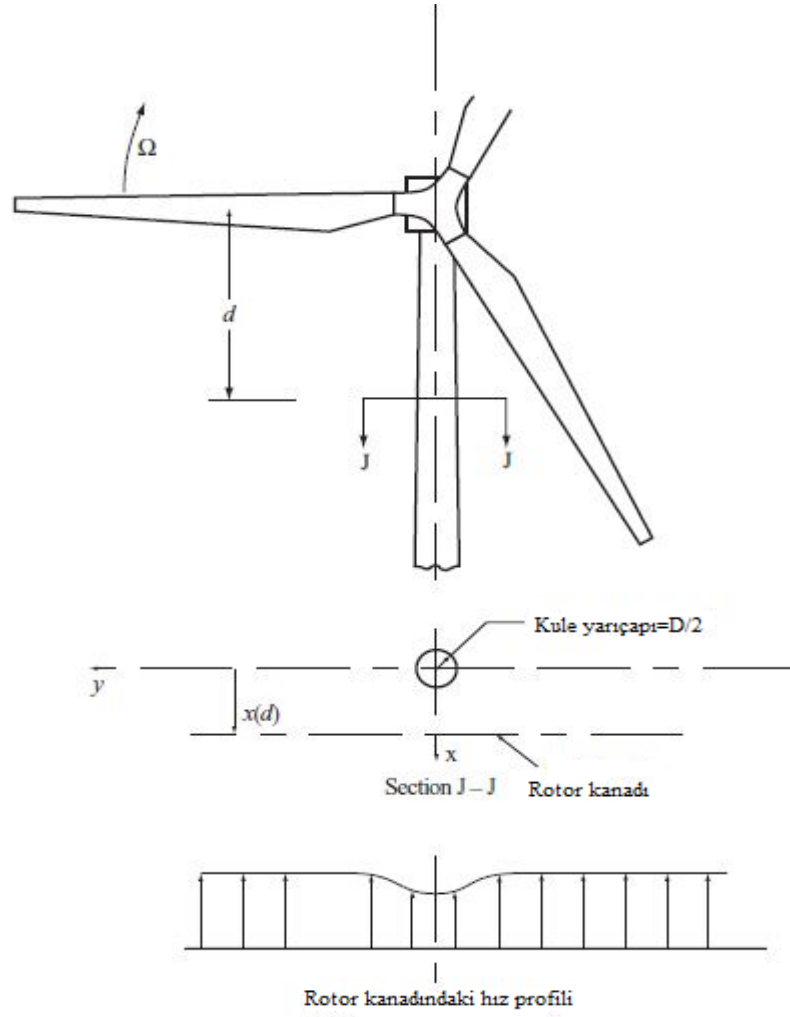
Rüzgâr hızının yükseklikle artması, rüzgâr kesmesi olarak bilinir. Teorik logaritmik yaklaşımla $U(z) \propto \ln(z/z_0)$ dır. Rüzgâr türbini tasarımında $U(z) \propto (z/z_{ref})^\alpha$ güç kanunu kullanılır. Üstel ifadenin değeri, yüzey pürüzlülüğü z_0 ile artar. Kanat moment teorisi bu duruma uygulanacak olursa, dönen kanatın sağ açısındaki hızı $U_\infty(1 + r \cos\psi/z_{hub})^\alpha(1 - a)$ ile ifade edilir.

2.6.5.4. Kule Gölgesi

Kule tarafından hava akışının engellenmesine kule gölgesi denir. Önden rüzgâr alan boru şeklindeki kuleye sahip rüzgâr hızı, akış teorisi kullanılarak modellenenebilir. Silindirik kule çevresindeki akış hızı eşitlik 2.46'da verilmiştir.

$$\psi = U_\infty y \left(1 - \frac{(D/2)^2}{x^2 + y^2} \right) \quad (2.46)$$

Burada D kule çapı, x ve y eksenlerdeki koordinatlardır. Şekil 2.43'de gösterilmiştir.



Şekil 2.43. Kule gölge parametreleri

2.7. Güç Kalitesi

Güç kalitesi enerjinin maliyetini birkaç cihetten etkiler. Mesela düşük güç kalitesi güç hatlarında ek yatırımlar gerektirebilir veya şebekeye uygulanan gücün sınırlarını zorlayabilir. Enerji kaynaklarındaki uzun veya kısa süreli değişebilirlik ve güç şebekeleri ile olan etkileşimi yüzünden rüzgâr üretim tesisleri düşük kaliteli kaynaklar olarak değerlendirilir. Bu yüzden kontrol sistem tasarımı güç şartlarına fayda sağlamalıdır. Klasik güç tesislerinin çıkışları ele alındığında rüzgâr üretimindeki kontrol gereksinimleri tesisin büyüklüğü ile orantılı olarak daha uygun

olmalıdır. Güç kalitesi temel olarak grid bağlantı noktasındaki frekans ve voltaj kararlılığı ve titreşim emisyonu tarafından belirlenir.

Genelde frekans kararlı bir değişkendir. Elektrik güç şebekesindeki frekans değişimi dengesiz güce bağlıdır. Mesela elde edilen güç, tüketim miktarını aştığında jeneratör harekete geçer bu da frekansı artırır. Güç talebi olmadığı zaman jeneratörler yavaşlar, bu da frekansı azaltır. Genelde büyük şebekeye bağlandığında tek bir rüzgâr türbini ya da küçük ölçekli bir rüzgâr tarlası şebeke frekansını etkilemez. Bununla birlikte rüzgâr türbini güç sisteminin yalıtılmış bir bölümü değildir. Ayrıca büyük ölçekli rüzgâr tarlasıyla uğraşıyorsak durum böyle değildir. Bu durumlarda rüzgâr enerjisi üretim tesislerinden elde edilen toplam gücün düzenlenmesi gerekebilir[51-53].

2.8. Fast Rüzgâr Türbini Simülatörü

Fast rüzgâr türbini simülatörü Fortran dilinde yazılmış ve Matlab/Simulink ortamına S_function olarak adapte edilmiştir. Bu yüzden Fast simülatörünü Matlab’da çalıştırmadan önce mutlaka S_function’nun yolu tanımlanmalıdır. Fast hazır rüzgâr türbini modelleri kullanıcıya sunmakla birlikte daha ileri seviye çalışmalarda rüzgâr türbininin bir çok özelliğini ayarlama imkanını kullanıcıya vermektedir. Fast’in hazır modelleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Fast arşivindeki örnek modeller

Test Adı	Türbin Adı	Kanat Sayısı	Rotor Çapı (m)	Nominal Güç (kW)	Tanım
Test01	AWT-27CR2	2	27	175	Esnek, sabit yaw hatası, kararlı rüzgâr
Test02	AWT-27CR2	2	27	175	Esnek, kararlı rüzgâr, yüksek hızda şaft freni kapatması
Test03	AWT-27CR2	2	27	175	Esnek, serbest yaw, kararlı rüzgâr
Test04	AWT-27CR2	2	27	175	Esnek, serbest yaw, türbülans
Test05	AWT-27CR2	2	27	175	Esnek, kararlı rüzgâr
Test06	AOC-15/50	3	15	50	Esnek, kararlı rüzgâr
Test07	AOC-15/50	3	15	50	Esnek, serbest yaw, türbülans
Test08	AOC-15/50	3	15	50	Esnek, sabit yaw hatası, kararlı rüzgâr
Test09	UAE VI downwind	2	10	20	Esnek, yaw rampa, kararlı rüzgâr
Test10	UAE VI upwind	2	10	20	Katı, güç eğrisi, rampa rüzgâr
Test11	WP 1.5 MW	3	70	1500	Esnek, değişken hızlı hatve kontrol, hatve hatası türbülans
Test12	WP 1.5 MW	3	70	1500	Esnek, değişken hızlı hatve kontrol, ECD olayları
Test13	WP 1.5 MW	3	70	1500	Esnek, değişken hızlı hatve kontrol, türbülans
Test14	Şu anda kullanılmıyor				
Test15	SWRT	3	5.8	10	Esnek, değişken hızlı kontrol, serbest yaw, EOG01 olayları
Test16	SWRT	3	5.8	10	Esnek, değişken hızlı kontrol, serbest yaw, EDC01 olayları
Test17	SWRT	3	5.8	10	Esnek, değişken hızlı kontrol, serbest yaw, türbülans
Test18	NREL 5 MW - Land-based	3	126	5000	Esnek, dll kontrol, kule potansiyel akışı ve drag, türbülans
Test19	NREL 5 MW - OC3-Monopile	3	126	5000	Esnek, dll kontrol, kule potansiyel akışı, türbülans, düzensiz dalgalar
Test20	NREL 5 MW - OC3-Tripod	3	126	5000	Esnek, dll kontrol, kule potansiyel akışı, kararlı rüzgâr, 0 faz ile düzenli dalgalar
Test21	NREL 5 MW - OC4-Jacket	3	126	5000	Esnek, dll kontrol, kule potansiyel akışı, türbülans, düzensiz dalgalar, deniz büyümesi
Test22	NREL 5 MW - ITI Barge	3	126	5000	Esnek, dll kontrol, düzensiz ve çok yönlü dalgalar, türbülans
Test23	NREL 5 MW - MIT/NREL TLP	3	126	5000	Esnek, dll kontrol, düzensiz dalgalar, türbülans
Test24	NREL 5 MW - OC3-Hywind	3	126	5000	Esnek, dll kontrol, düzensiz dalgalar, türbülans
Test25	NREL 5 MW - OC4-DeepCwind Semi-Submersible	3	126	5000	Kısaltılmış OC4 yük durumu (LC) 3.7: kararlı rüzgâr, beyaz gürültü ikinci dereceden dalgalar
Test26	NREL 5 MW - Land-based, with BeamDyn	3	126	5000	Test 18 ile aynı, yalnız kanat dinamiğinde ElastoDyn yerine BeamDyn kullanılır

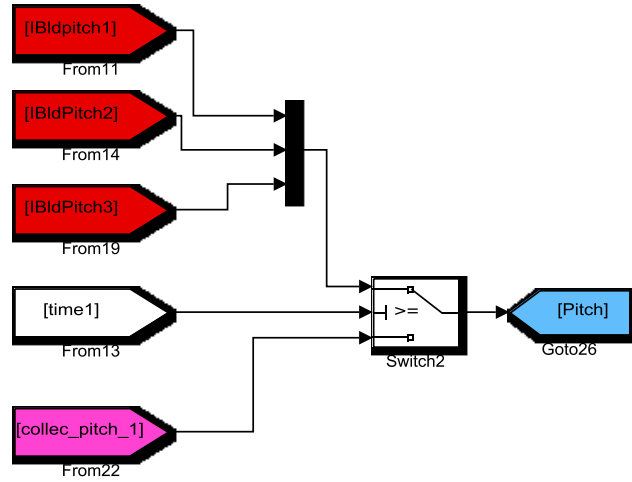
Fast'deki bu hazır modellerle birlikte kullanıcı bazı özel değişiklikler de yapmak isterse Fast klasöründeki bazı dosyalar üzerinde değişiklik yapmalıdır. Bunun için 'FAST' isimli klasörün içinde 'CerTest' isimli klasör açılmalıdır. 'CerTest' klasöründe Çizelge 2.8'deki örnek rüzgâr türbini modellerine ait text dosyaları vardır. Çalışılmak istenen türbine ait dosyalar türbinin test ismi ve numarası ile başlayacaktır. Mesela esnek, değişken hızlı, hatve kontrolü olan 1,5 MW'lık bir türbin ile çalışmak isteniyorsa Test11 seçilmelidir. Bu türbine ait 'CerTest' içerisindeki üç dosyanın isimleri Test11_AD.ipt, Test11_ElastoDyn.dat ve Test11_ServoDyn.dat dır. Bu dosyalarda yapısına ait bütün ayarları bulmak mümkündür. Ayrıntılı bilgi Fast kullanım kitapçığında mevcuttur.



3.BULGULAR

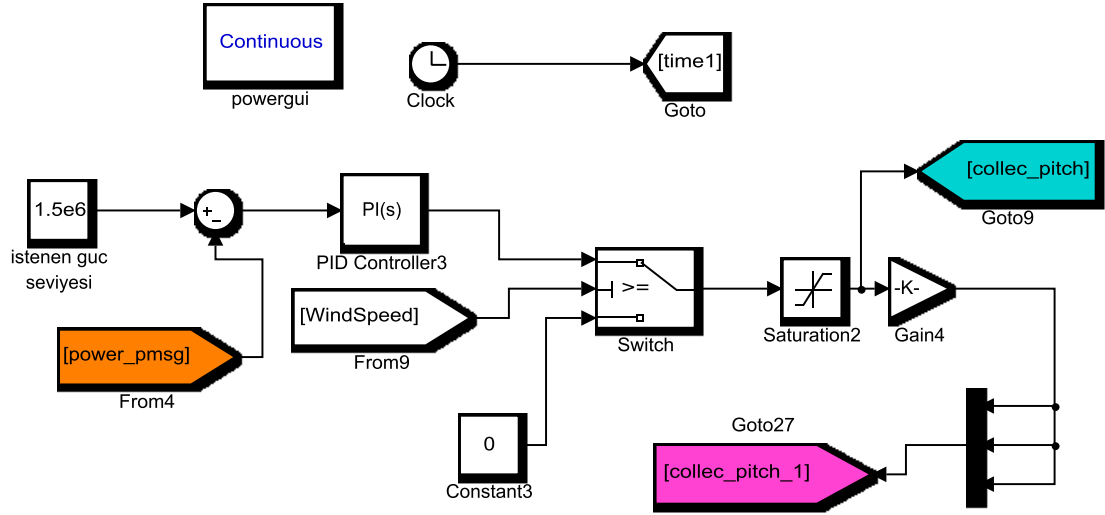
3.1.PID kontrolör ile Çıkış Gücü Kontrol Edilen Rüzgâr Türbininin Bireysel Hatve Açısı Kontrolü ile Mekanik Yüklerinin Azaltılması

Rüzgâr türbininin çıkış gücünü kontrol ederken, çıkış kontrol değişkeni olarak bazen çıkış gücü bazen rotor hızı geri besleme kontrol elemanı olarak alınabilir. Bu simülasyonlarda rotor hızı tercih edilmiştir. PID kontrolörün katsayıları zeki genetik algoritma yardımıyla belirlenmiştir. Genetik algoritmanın sonucunda katsayılar $k_p=-4.59993$, $k_i=-0.486221$, $k_d=0.00111834$ olarak belirlenmiştir. Şekil 3.1’de modelin zamana göre kollektif hatve açısı kontrolünden bireysel hatve açısı kontrolüne geçiş yaptığı blok gösterilmiştir.



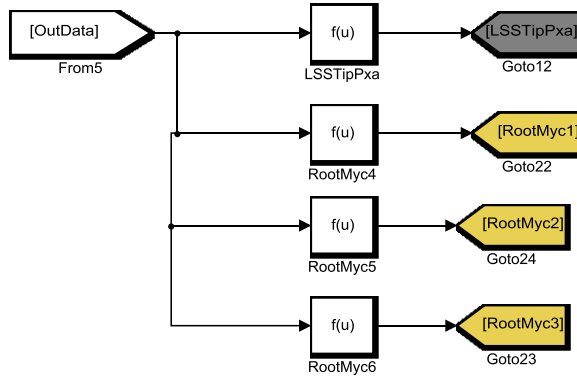
Şekil 3.1. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli moment ayırım kısmı

Şekil 3.2’de kontrolör yapısının sisteme dâhil edildiği blok yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli çıkış gücü kontrol kısmı

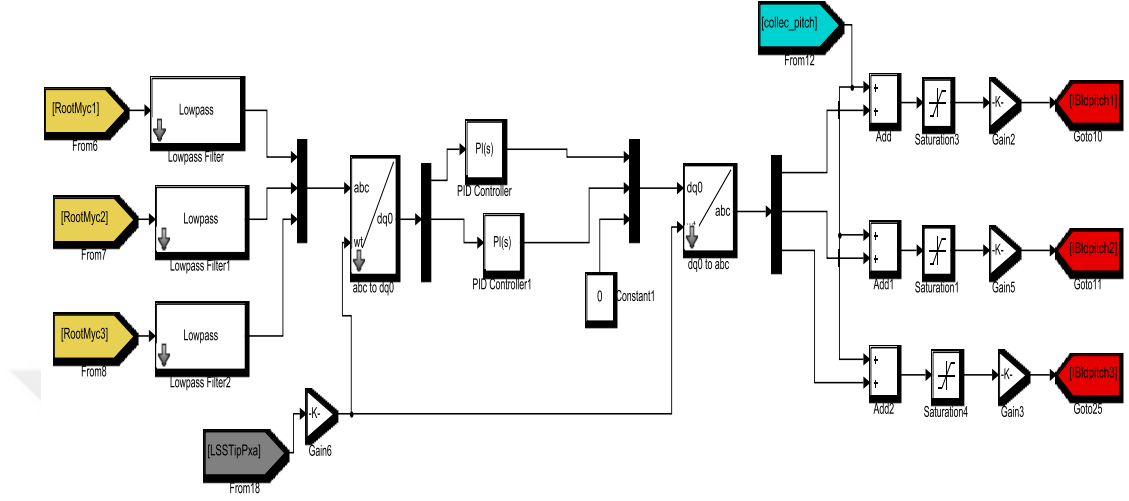
Şekil 3.3 rotor azimut açısının ve kanat momentlerinin simülasyonda gerçek zamanlı olarak elde edildiği bloğu göstermektedir. Bu Fast simülatör programının sağladığı bir imkândır.



Şekil 3.3. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli kanat momentleri

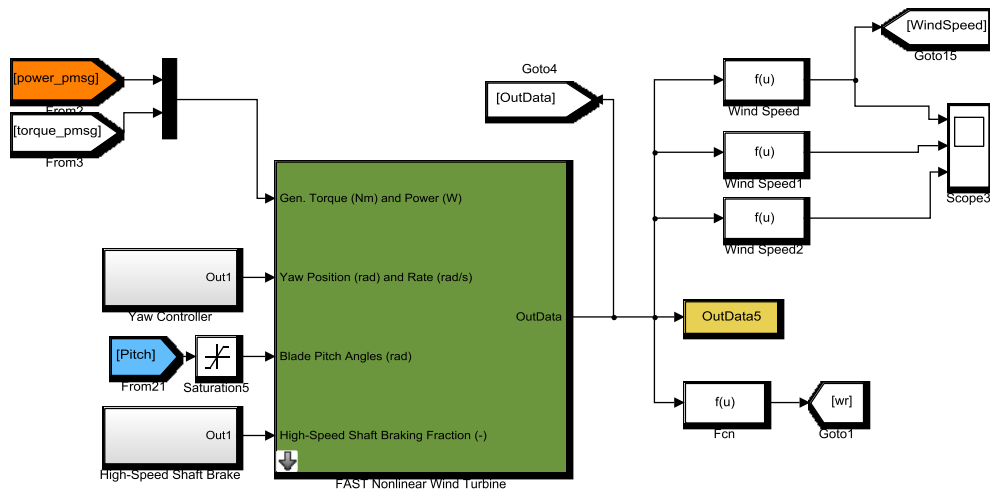
Şekil 3.4’de kanat momentlerinin alçak geçiren filtrelerden geçirilerek, yüksek frekanslı bölümlerinin süzüldüğü filtreler gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 3.4’de bu momentlerin belirli bir katsayı ile çarpılıp kollektif kanat hatve açısına eklendiği

bloklar yer almaktadır. Bu moment değışimleri arasında 120°lik faz farkı bulunmaktadır.



Şekil 3.4. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli kanat momentlerinin çevrim kısmı

Şekil 3.5’de Fast rüzgâr türbini simulink modeli ve bağlantıları gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Rüzgâr Türbini Matlab/Simulink KMSJ modeli Fast simülatör kısmı

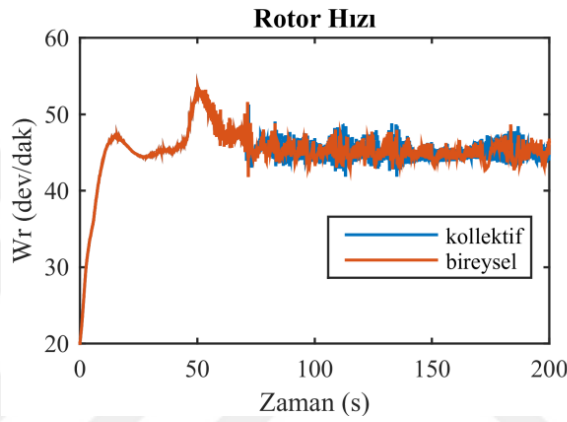
Şekil 3.7’de rüzgâr türbini Matlab/Simulink KMSJ modelinin bütün blokları gösterilmektedir.

Çizelge 3.1’de kollektif ve bireysel hatve açısı kontrolünün neticesinde ölçülen moment değerleri ve yüzde olarak değişimleri verilmiştir. Moment kısaltmalarının açıklamaları EK1’de gösterilmiştir.

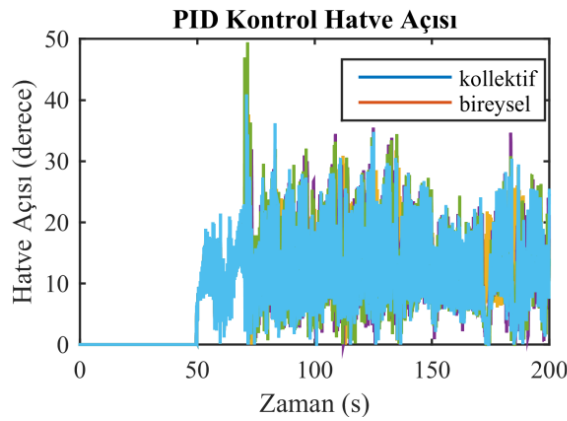
Çizelge 3.1. Moment karşılaştırma çizelgesi

Moment Ölçümleri	Kollektif hatve açısı	Bireysel hatve açısı	% değişim
RootMxb1	2194,487	2008,03	9,285543
RootMyb1	4557,224	4040,543	12,78741
RootMzb1	205,5431	163,4764	25,73255
RootMxc1	2552,631	2308,428	10,57877
RootMyc1	4285,349	3855,843	11,13908
RootMzc1	205,5431	163,4764	25,73255
RootMxc2	2561,214	2317,367	10,52258
RootMyc2	4247,61	3862,494	9,970666
RootMzc2	205,9017	166,4313	23,71572
RootMxb2	2201,479	2019,654	9,002757
RootMyb2	4517,162	4063,63	11,16075
RootMzb2	205,9017	166,4313	23,71572
RootMxc3	2565,616	2275,024	12,77317
RootMyc3	4250,969	3924,696	8,313352
RootMzc3	204,1847	166,6454	22,5265
RootMxb3	2198,077	1965,342	11,84192
RootMyb3	4514,711	4103,968	10,00843
RootMzb3	204,1847	166,6454	22,5265
TwrBsMxt	7687,397	6300,246	22,01742
TwrBsMyt	11444,29	20315,74	-43,6679
TwrBsMzt	7612,432	7161,928	6,290254
YawBrMxn	779,0321	703,1667	10,7891
YawBrMyn	5084,287	3170,983	60,33786
YawBrMzn	7611,634	7161,109	6,291278

Simulasyon sonucunda rotor hızı Şekil 3.8’de, PID kontrolör ile ayarlanan kollektif ve bireysel hatve aç değeri ise Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Bireysel ve kollektif hatve açılı PID kontrolör için moment değışim grafikleri Şekil 3.10-19’da gösterilmiştir. Şekil 3.8’de gösterilen bireysel hatve açılı kontrolün rotor hızı değışiminin kollektif hatve açılı kontrolün rotor hızı değışimi kadar iyi olması istenen bir sonuçdur. Çünkü bireysel hatve açısında mekanik yüklerde bir azalma olmaktadır. Bu azalma ile birlikte rotor devri kollektif hatve açısı gibi veya daha iyi ise rüzgâr enerji sisteminin çıkış gücü kalitesinin bozulmadığını gösterir.

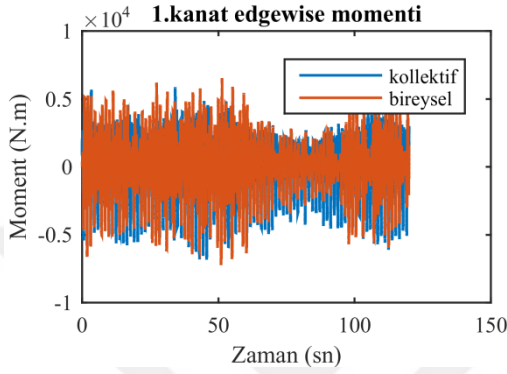


Şekil 3.8. Bireysel ve kollektif PID kontrol çıkışı

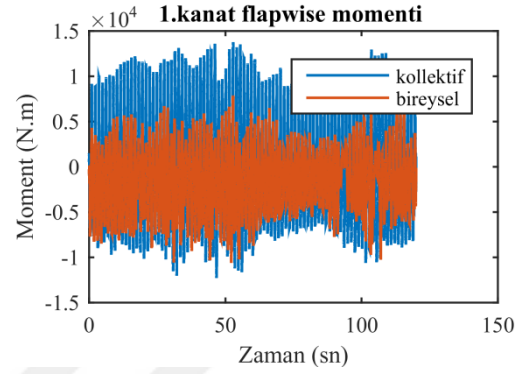


Şekil 3.9. Bireysel ve kollektif PID kontrol hatve açıları

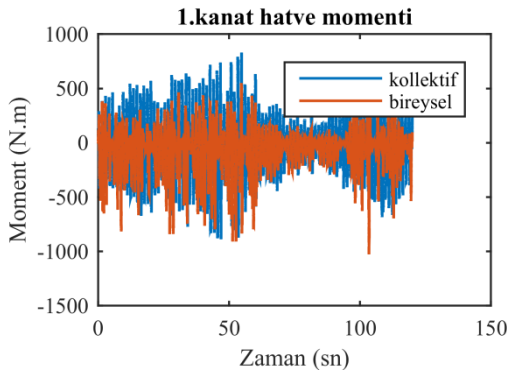
Şekil 3.9'daki bireysel hatve açısı değerlerinde üç adet hatve açısı değeri vardır. Bu açılar arasında 120° lik faz farkı mevcuttur. Şekil 3.10-3.14'deki grafiklerde 1. kanat üzerindeki moment yükleri hem bireysel hem kollektif hatve açısı kontrolünde gösterilmiştir. Şekil 3.10-3.14'deki grafiklerden bireysel hatve açısı kontrolü ile kanatlardaki bütün moment yüklerinin azaldığı söylenebilir.



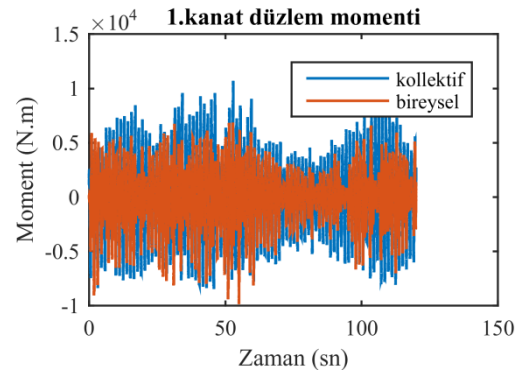
Şekil 3.10. Birinci kanat edgewise momenti



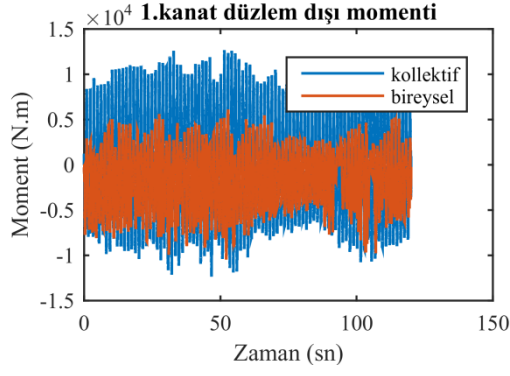
Şekil 3.11. Birinci kanat flapwise momenti



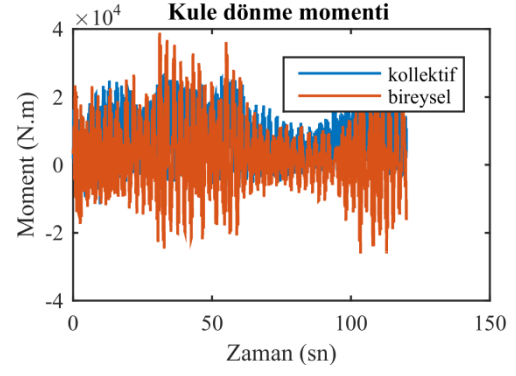
Şekil 3.12. Birinci kanat hatve momenti



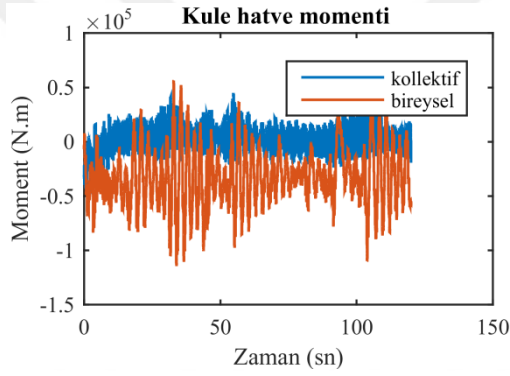
Şekil 3.13. Birinci kanat düzlem momenti



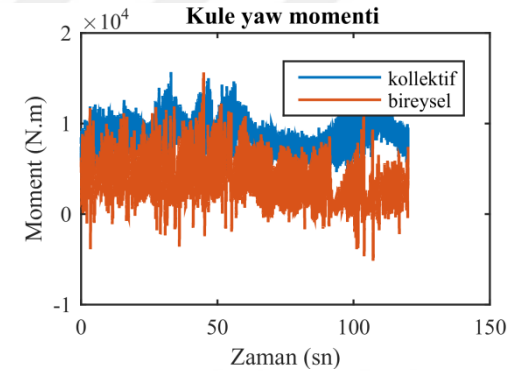
Şekil 3.14. Birinci kanat düzlem dışı momenti



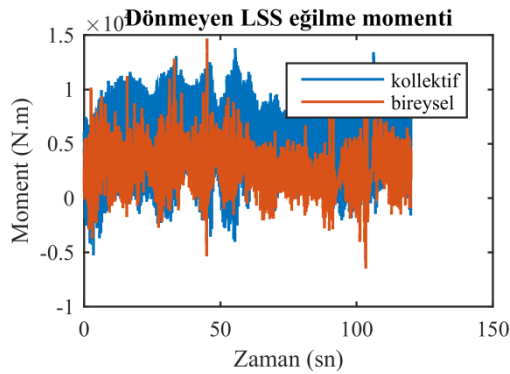
Şekil 3.15. Kule dönme momenti



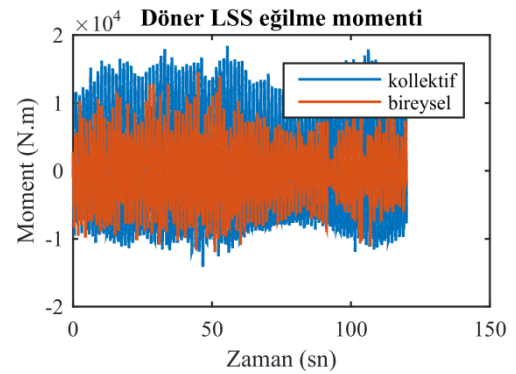
Şekil 3.16. Kule hatve momenti



Şekil 3.17. Kule yaw momenti



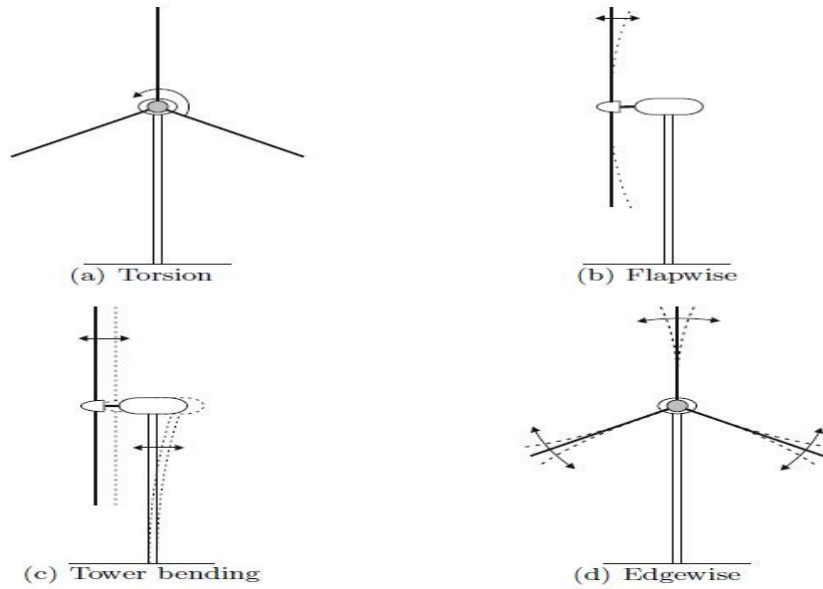
Şekil 3.18. Dönmeyen LSS eğilme momenti



Şekil 3.19. Döner LSS eğilme momenti

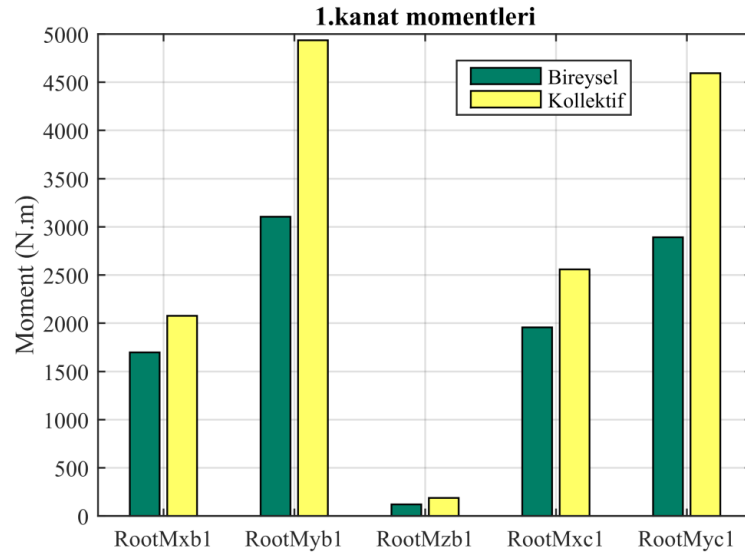
Şekil 3.15-3.17 kule üzerindeki çeşitli moment yüklerini göstermektedir. Şekil 3.15-3.17'deki grafiklere göre bireysel hatve açısı kontrolü ile dönme ve yaw momentlerinde bir miktar azalma olurken, hatve momentinde biraz artış olmuştur. Şekil 3.18 ve 3.19'daki grafiklere göre düşük hızlı şaft (low speed shaft-LSS) üzerindeki moment yükleri bireysel hatve açısı kontrolü ile azalmıştır. Kanatlar üzerindeki moment yükü dengeli olmasından her üç kanatdaki ortalama momentler ve moment değişimleri (120° lik faz farkı ile) birbirine eşittir. Bu yüzden örnek olarak sadece 1. kanatın moment değişim grafikleri gösterilmiştir. 2. ve 3. kanatların moment yükleri 120° lik faz farkı ile 1. kanat ile aynıdır.

Bireysel hatve açısı kontrolünde en önemli noktalardan bir tanesi hiç şüphesiz, kanatlardaki momentin ölçülerek belirli bir oran ile kollektif kanat hatve açısına eklenmesidir. Rüzgâr enerji sistemi için en uygun oranın bulunması için bu oran sıfırdan itibaren arttırılmaya başlanmış ve rüzgâr türbinin çeşitli bölgelerindeki özellikle kanatlardaki moment değerleri ölçülmüştür. Aynı zamanda güç çıkışı da ölçülmüştür. Böylece bireysel hatve açısı oranı ile güç kalitesi arasında optimum bir değer elde edilmeye çalışılmıştır. Moment şekilleri Şekil 3.20'de, moment kısaltmalarının açıklamaları da EK 1'de verilmiştir.



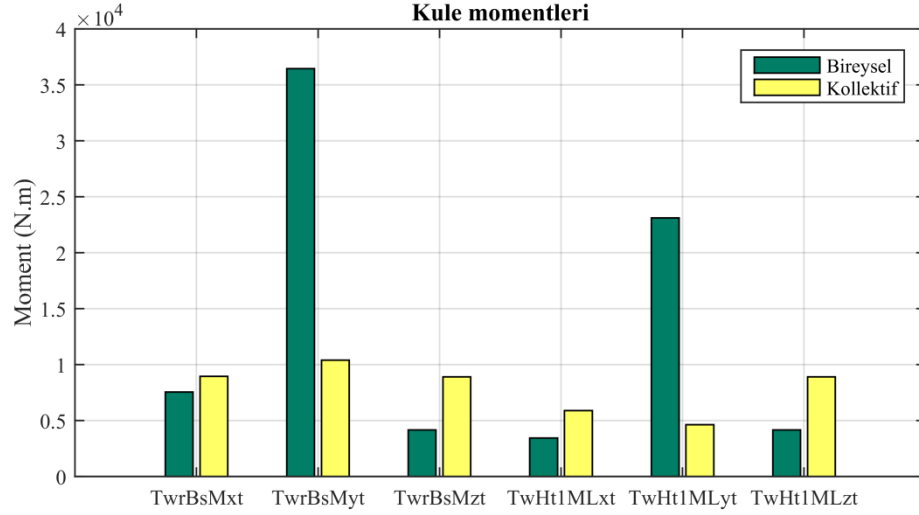
Şekil 3.20. Moment şekilleri

Bireysel ve kollektif hatve açısı kontrol mekanizmalarının moment oranlarındaki değişim başka bir tarzda Şekil 3.21-24 arasındaki çubuk grafiklerde gösterilmiştir. Kanat momentleri birbirinin aynısı olduğundan örnek olarak sadece birinci kanatın moment değerleri verilmiştir. İkinci ve üçüncü kanatların momentleri birinci kanatın aynısıdır. Birinci kanattaki moment değerleri Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Şekil 3.21’den görüldüğü gibi bireysel hatve açısı kontrolü türbin kanatları üzerindeki mekanik yükü ciddi bir oranda azaltmaktadır.



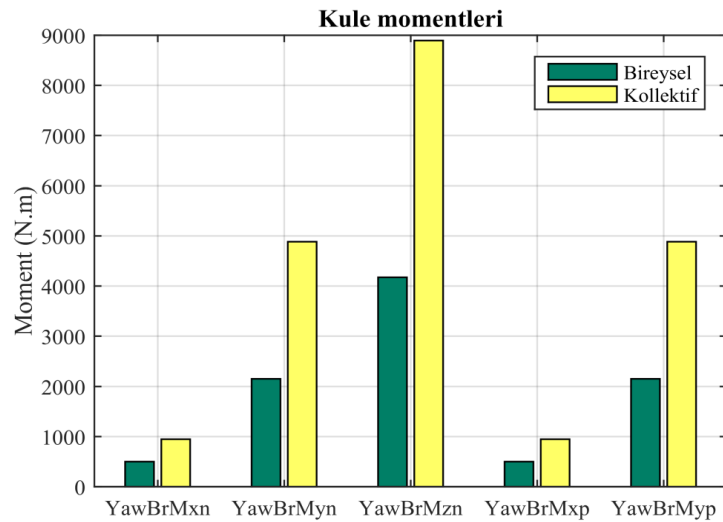
Şekil 3.21. Birinci kanat moment değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.22 ve 3.23’de kule momentleri, Şekil 3.24’de şaft momentleri karşılaştırılmıştır.

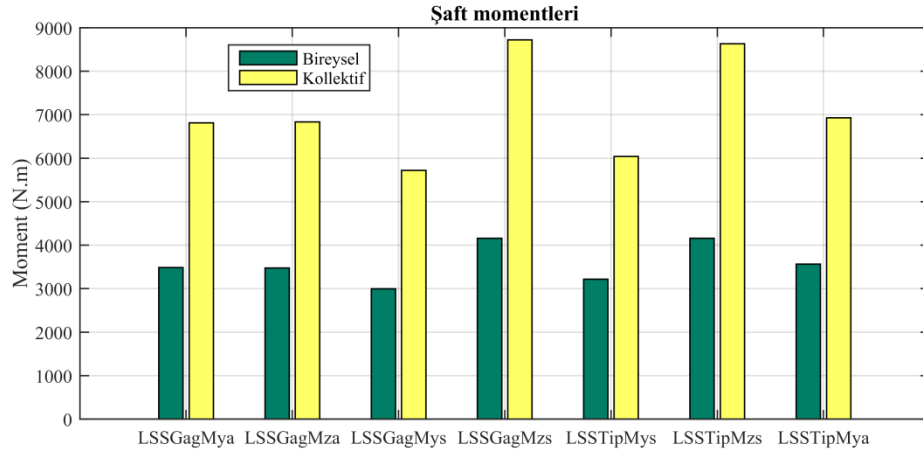


Şekil 3.22. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.22’de sadece kule tabanındaki bazı momentlerde bir artış söz konusu, bu da kule tabanı güçlendirilerek zararlı etkileri azaltılabilir. Rüzgâr türbinlerinde kanat, başlık ve kule gövdesi mekanik açıdan en önemli parçalardır. Bireysel hatve açısı kontrolü ile bu parçalar üzerindeki mekanik yükler ciddi oranda azaltılmıştır.



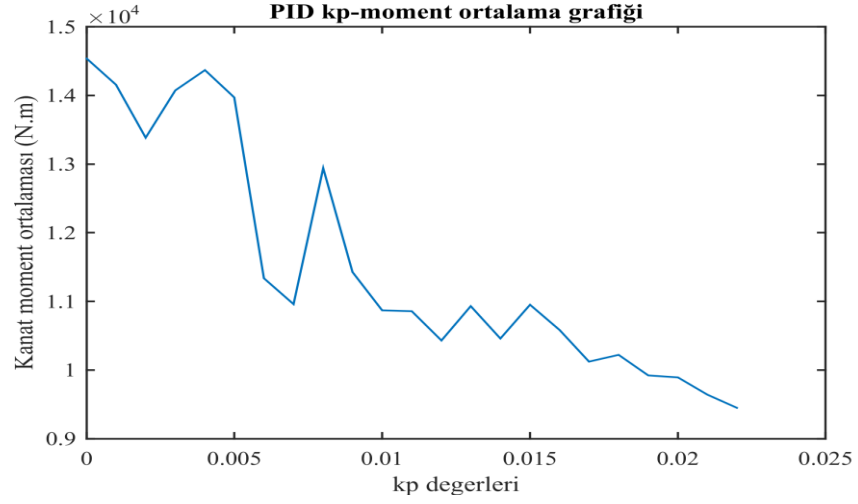
Şekil 3.23. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.24. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.4'deki d-q eksenine aktarılan kanat momenti $RootM_{yc}$, belirli bir k_p katsayısı ile çarpılıp bireysel hatve açısı fark değeri elde edilmektedir. Bu k_p katsayısının aldığı değer RT 'nin moment yüklerinin iyileşmesini doğrudan etkilemektedir. Bu k_p katsayısı 0'dan başlayarak ($k_p=0$ olması kollektif hatve açısı anlamına gelir) arttırılmıştır.

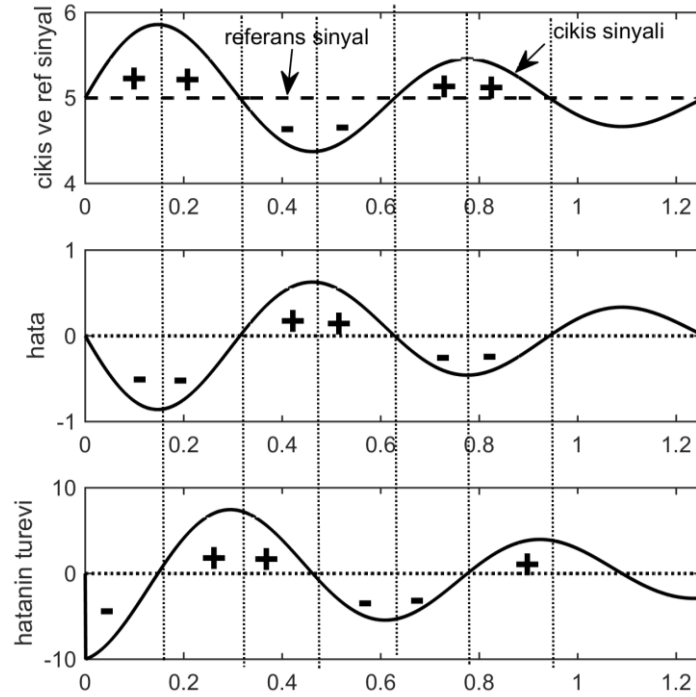
Bireysel hatve açısının kontrolünde kanatlar üzerindeki momentler öncelikli olarak dikkate alındığı için ve her üç kanat üzerindeki yükler dengeli, periyodik olduğundan ve birbirine paralel olduğundan tek bir kanatın üzerindeki ortalama moment ile k_p değerlerinin değişimini grafiksel olarak Şekil 3.25'de verilmiştir. Şekil 3.25'deki grafiğe göre bazı k_p çarpım değerlerinde moment yükü ciddi oranlarda azalmaktadır. bu durum kontrol stratejisi belirlenirken dikkate alınması gereken bir durumdur.



Şekil 3.25. Tek bir kanatın üzerindeki ortalama moment

3.2.Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı (Mamdani)

Bulanık mantık denetleyicinin giriş sinyali olarak, istenen rotor hızı ile mevcut rotor hızının farkı olan hata sinyali ve bu hata sinyalinin türevi alınmıştır.



Şekil 3.26. Hata ve hatanın türevinin değişimi

Kural çizelgesini düzenlerken Şekil 3.26'daki grafik referans olarak alınmıştır. Bu grafiğe göre temel olarak bulanık mantık denetleyicide beş durum söz konusudur. Bunlar;

1. Durum: Hata negatif ve hatanın türevinin negatif olduğu durumdur. Bu durumda çıkış sinyali referans noktasından yüksek ve artmaya devam ediyor demektir. Bu durumda sistemi referans noktasına yaklaştırmak için hatve açısını büyük ölçekte arttırmak gerektir.

2. Durum: Hata negatif ve hatanın türevi pozitifdir. Çıkış sinyali referans seviyeden yüksektir ama arasındaki fark azalıyor demektir. Bu durumda çıkışı referans sinyaline yumuşak bir şekilde yaklaştırmak için hatve açısını küçük ölçekte arttırmak gerekir.

3. Durum: Hata pozitif ve hatanın türevinin pozitif olduğu durumdur. Bu durumda çıkış referans noktasından aşağıda ve azalmaya devam ediyor demektir. Bu durumda hatve açısını çok azaltmak gerekir.

4. Durum: Hata pozitif ve hatanın türevi negatiftir. Çıkış referans noktasından aşağıda ama artarak referans noktasına yaklaşıyor demektir. Bu durumda hatve açısı küçük ölçekte azaltılır.

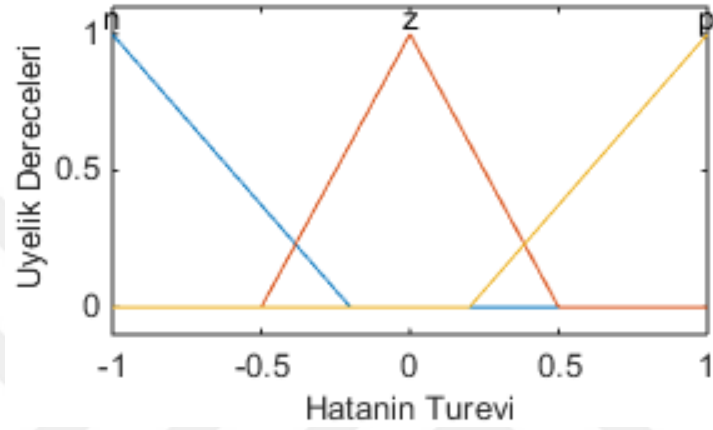
5. Durum ise hatanın ve hata türevinin sıfır olduğu durumdur. Bu durumda hatve açısında herhangi bir artış veya azalma olmaz.

Bu durumlara göre düzeltilmiş kural Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

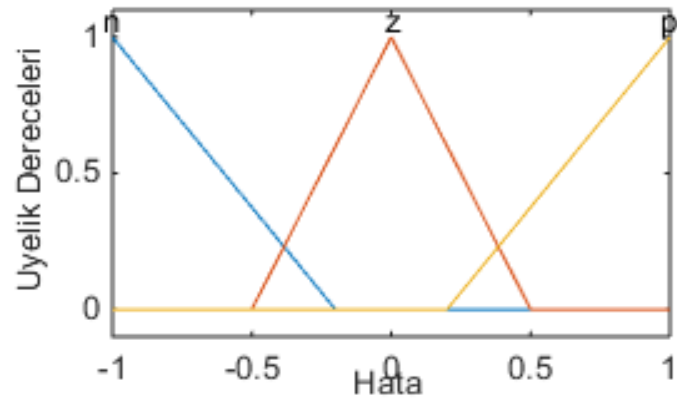
Çizelge 3.2. Bulanık mantık kural çizelgesi

	Hatanın Türevi			
		P	S	N
Hata	P	NB		NK
	S		S	
	N	PK		PB

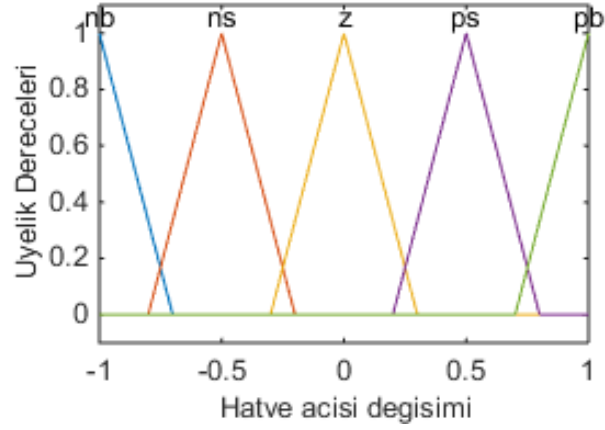
Bulanık kontrol sisteminin iki girişi vardır. Bunlar; hata ve hatanın türevi. Hata ve hatanın türevinin bulanık kümeleri üç adettir. Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de gösterildiği gibi bunlar pozitif (P), negatif (N) ve sıfır (S) dır. Çıkış bulanık kümesi ise beş adettir. Şekil 3.29’da gösterildiği gibi bunlar; negatif büyük (NB), negatif küçük (NK), sıfır (S), pozitif küçük (PK) ve pozitif büyüktür (PB).



Şekil 3.27. Hatanın türevi bulanık kümeleri



Şekil 3.28. Hata bulanık kümeleri



Şekil 3.29. Hatve açısı değışimi bulanık kümeleri

Kurallar:

1. Eğer hata n ve hatanın türevi n ise debeta pb
2. Eğer hata n ve hatanın türevi p ise debeta pk
3. Eğer hata s ve hatanın türevi s ise debeta s
4. Eğer hata p ve hatanın türevi n ise debeta nk
5. Eğer hata p ve hatanın türevi p ise debeta nb

Şekil 3.30-32'de ise modellenen sistemin Matlab/Simulink blok diyagramı gösterilmiştir. Sistem karmaşık olduğu için üç ayrı blok diyagram ile gösterilmiştir.

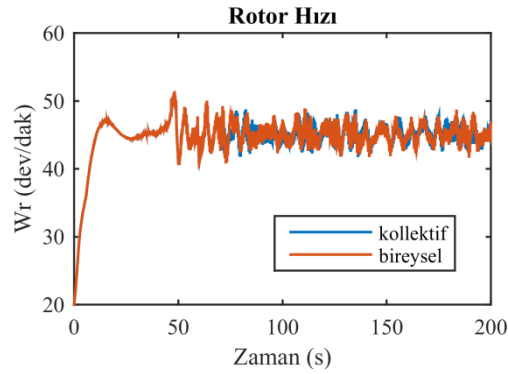
The diagram illustrates the FAST Nonlinear Wind Turbine block and its connections to various controllers, sensors, and output modules. The central block is labeled "FAST Nonlinear Wind Turbine" and has an "OutData" output. It receives inputs from "Yaw Controller1", "Yaw Controller", "[Pitch]", and "High-Speed Shaft Brake". The outputs of the block are connected to "Wind Speed", "LSSTipPxa", "RootMyc4", "RootMyc5", and "RootMyc1", which are then processed by "f(u)" blocks and output to "Scope1", "Display1", "Scope5", "FScope2", and "Display5".

Çizelge 3.3’de kollektif ve bireysel hatve açısı kontrolü ile kanat moment yüklerinin değişimi gösterilmektedir. Çizelge 3.3’ün 3. sütunu bu değişimleri % olarak ifade etmektedir. Çizelge 3.3’ün 3. sütununa bakıldığında bireysel hatve açısı kontrol yöntemi kullanarak kanat üzerindeki mekanik moment yüklerinin %4 ile %18 oranında azaltıldığı görülmektedir. Bu azalma türbinin faydalı ömrünün uzamasına ve enerji maliyetinin düşmesine sebep olur.

Çizelge 3.3. Bulanık mantık denetleyicinin bireysel ve kollektif moment tablosu

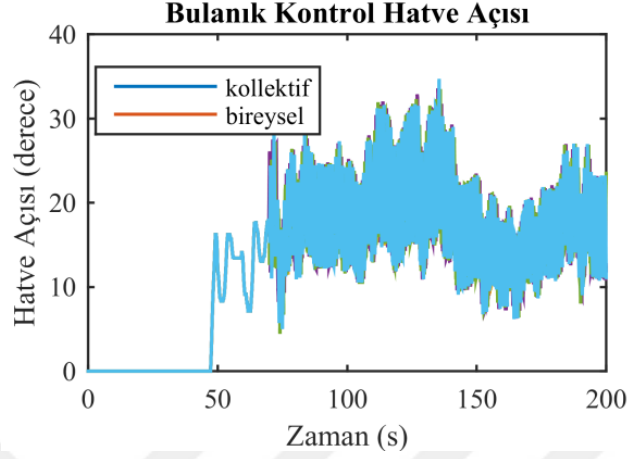
Bulanık mantık	kollektif	bireysel	% azalma
RootMxb1	2422	2105	13,08836
RootMyb1	4908	4141	15,62755
RootMzb1	235	192	18,29787
RootMxc1	2843	2721	4,291242
RootMyc1	4628	4254	8,081245
RootMzc1	235	192	18,29787

Simülasyon sonucunda elde edilen kollektif ve bireysel hatve açısı kontrolü neticesinde rotor hızı çıkışları Şekil 3.33’de gösterilmektedir. Şekil 3.33’de görüldüğü gibi bireysel hatve açısı rotor hızında önemli bir bozulma göstermemektedir.



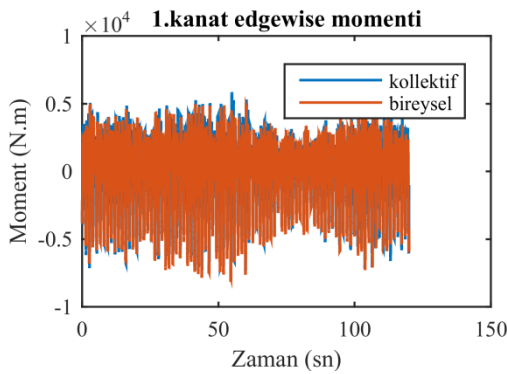
Şekil 3.33. Bireysel ve kollektif bulanık (Mamdani) kontrol çıkışı

Bulanık mantık kontrolör ile kontrol edilen sistemin hatve açıları Şekil 3.34’de gösterilmiştir.

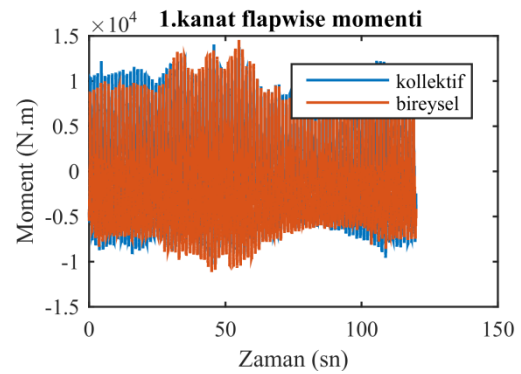


Şekil 3.34. Bireysel ve kollektif bulanık (Mamdani) kontrol hatve açıları

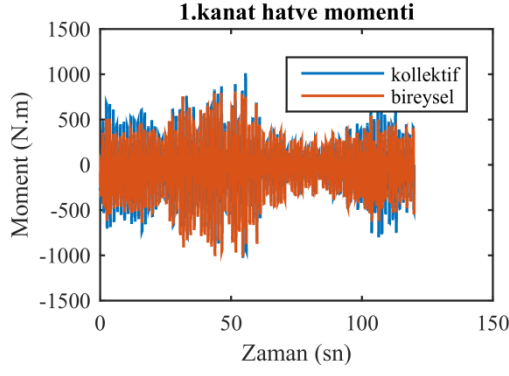
Bireysel ve kollektif hatve açısı ile bulanık mantık kontrolör vasıtasıyla yapılan çıkış gücü kontrolünde kanat, kule ve rotor şaftı üzerindeki momentler Şekil 3.35-44 arasındaki grafiklerde gösterilmiştir. Şekil 3.35-3.39 arasındaki grafiklerde 1. kanat üzerindeki moment yükleri gösterilmiştir, buna göre bireysel hatve açısı kontrolü ile kanatlar üzerindeki mekanik yüklerin azaltıldığını söyleyebiliriz.



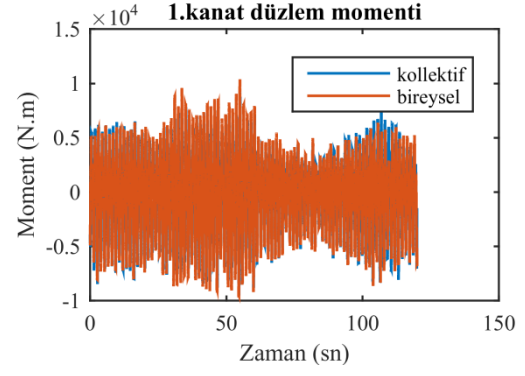
Şekil 3.35. Birinci kanat edgewise momentleri



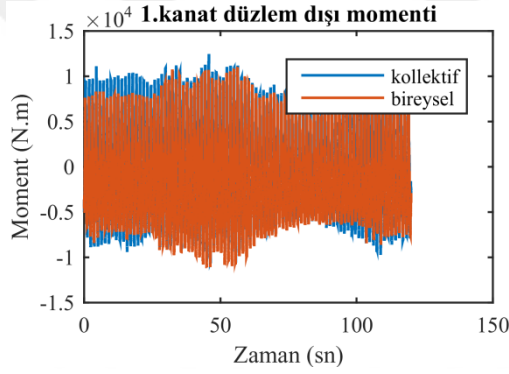
Şekil 3.36. Birinci kanat flapwise momentleri



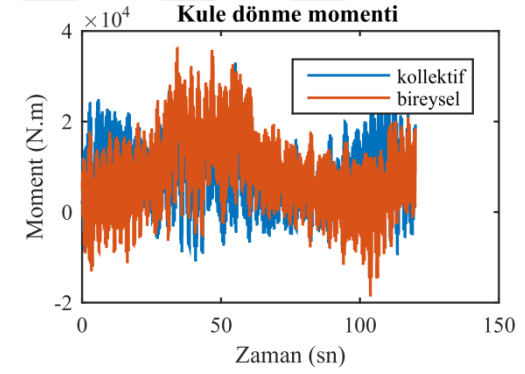
Şekil 3.37. Birinci kanat hatve momenti



Şekil 3.38. Birinci kanat düzlem momenti

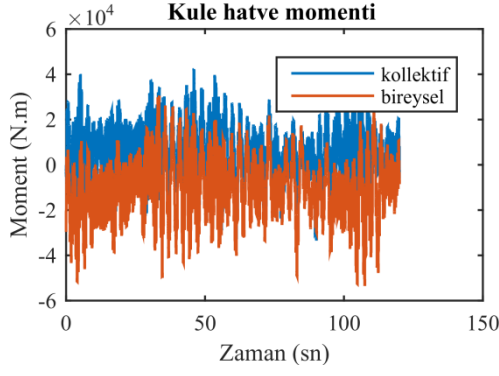


Şekil 3.39. Birinci kanat düzlem dışı momenti

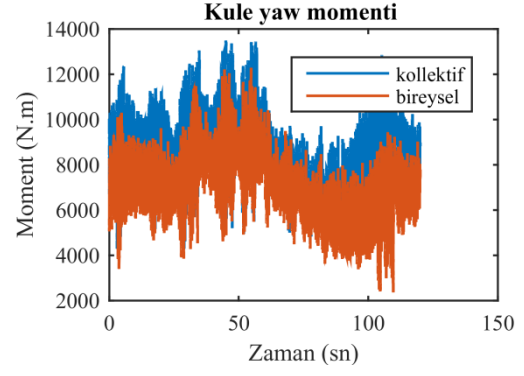


Şekil 3.40. Kule dönme momenti

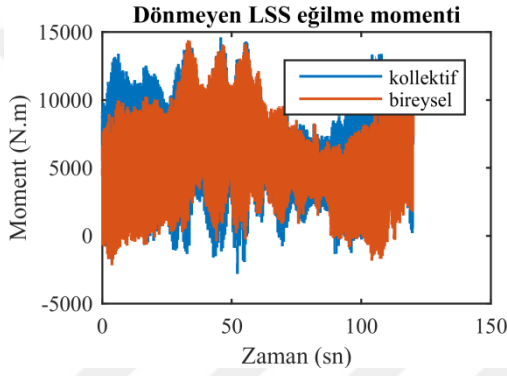
Şekil 3.40-3.42’de kule momentleri gösterilmiştir, bu grafiklere göre dönme ve yaw momentlerinde azalma hatve momentinde bir miktar artma olmuştur. Şekil 3.43 ve 3.45’de düşük hızlı şaft üzerindeki momentler gösterilmiştir, buna göre bireysel hatve açısı kontrolünde şaft üzerindeki momentler azalmaktadır.



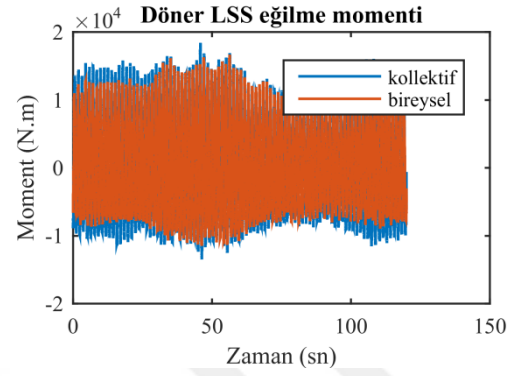
Şekil 3.41. Kule hatve momenti



Şekil 3.42. Kule yaw momenti

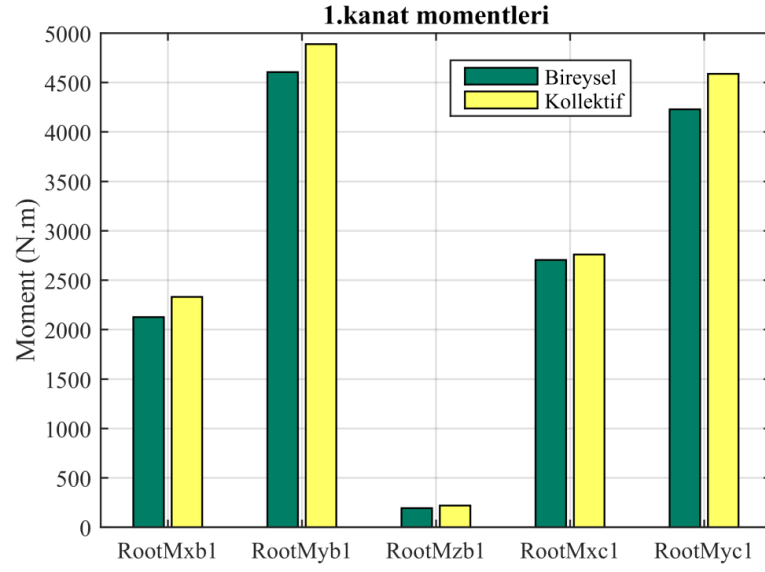


Şekil 3.43. Dönmeyen LSS eğilme

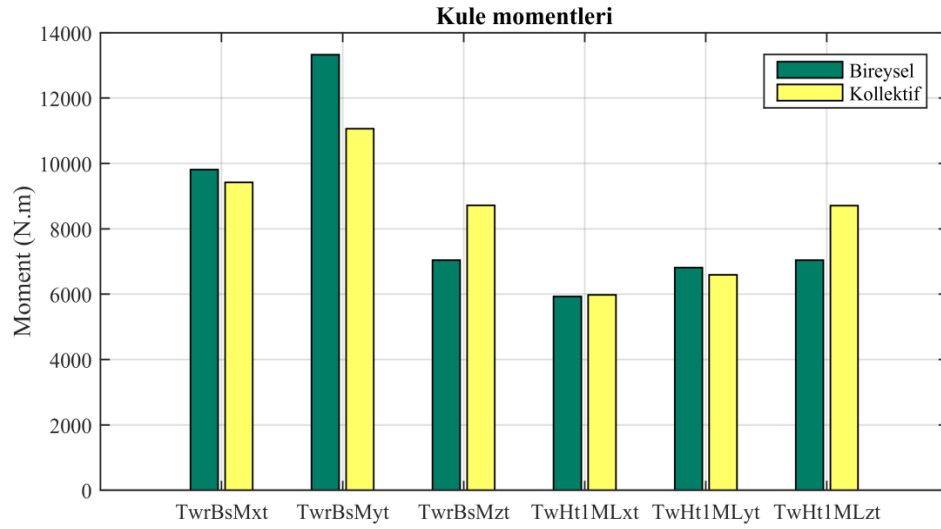


Şekil 3.44. Döner LSS eğilme momenti

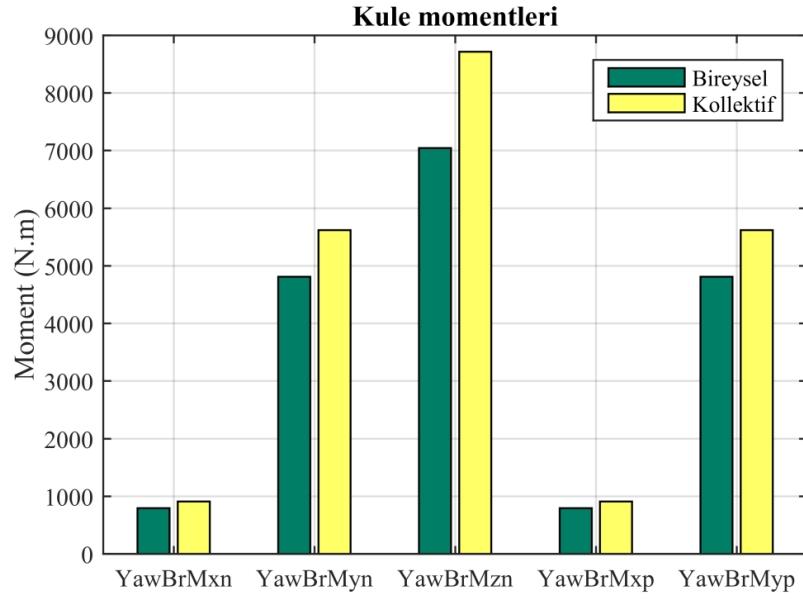
Bireysel hatve açısı kontrolünde momentlerde azalma olduğu Şekil 3.45-48 çubuk grafiklerinde daha net olarak görülebiliyor. Sadece kuledeki bazı momentlerde artış olmakla beraber diğer momentlerde genel itibarıyla bir azalma olmuştur.



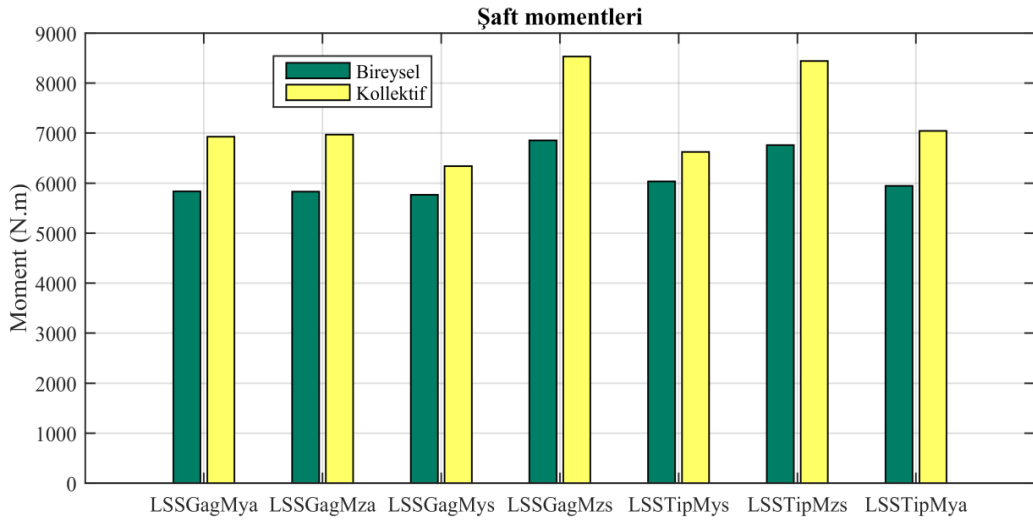
Şekil 3.45. Birinci kanat moment değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.46. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması



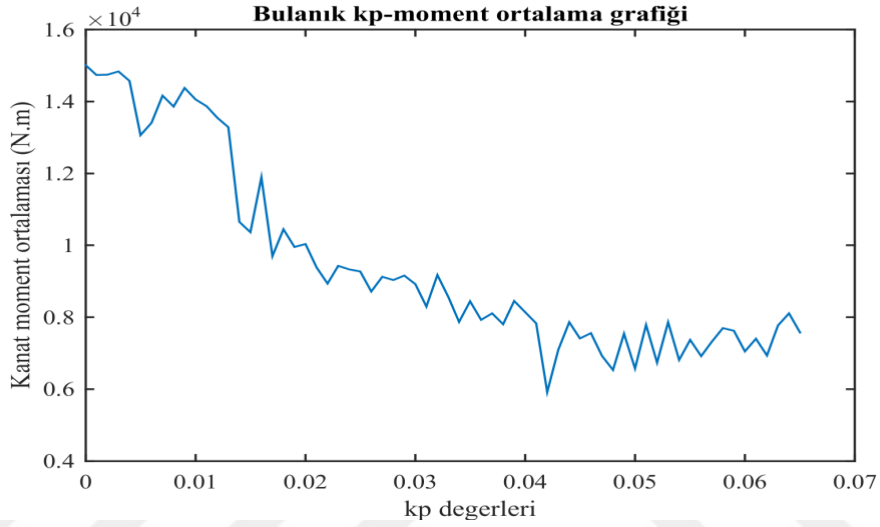
Şekil 3.47. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.48. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması

İleriki aşamada sistemdeki kanat momentleri belirli bir katsayı ile çarpılarak hatve açısına ekleme işlemindeki $kp1$ katsayısını değiştirerek sistemi nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bunun için $kp1$ katsayısını 0'dan başlayarak (ki bu durum kollektif

hatve açısı ile aynıdır) belirli bir oranda belirli bir sınıra kadar arttırılmıştır. Bu oran ve sınır deneme yanılma yöntemiyle bulunmuştur. Şekil 3.49’da kanat momentlerinin ortalama değerlerini vermektedir. Şekil 3.49’daki grafik tercih edilebilecek $kp1$ değerleri hakkında bir fikir vermektedir. Buna göre tercih edilebilecek $kp1$ değeri 0.041 civarında olması, moment azaltımı bakımından faydalı olabilir. Ama bunun çıkış gücü kalitesini nasıl etkilediğini görebilmek için Çizelge 3.4’e bakmak gerekir.



Şekil 3.49. Bulanık kontrol kanat moment ortalaması

Çizelge 3.4, hem moment iyileşme miktarını hem de çıkış gücü üzerindeki etkisini göstermektedir. Çizelge 3.4’e göre % moment iyileşme miktarının yüksek ve % ortalama salınım miktarının düşük olduğu değerler tercih edilebilir.

Çizelge 3.4. Bulanık mantık moment karşılaştırma çizelgesi

kp değeri	% min	% max	% ortalama salınım	% moment iyileşmesi	minimum	maksimum	ortalama salınım
0	6,022051	8,0538861	1,8945688	0	47,040707	53,076797	0,6982892
0,0005	5,423143	7,9933632	1,8556203	- 0,8459754	47,340492	53,050335	0,6839343
0,001	7,755873	8,5061915	2,2648654	27,508245	46,172841	53,274557	0,8347711
0,0015	8,37521	11,229273	2,5039846	28,183613	45,862833	54,465133	0,9229045
0,002	10,27423	21,352234	3,2112849	35,009961	44,912277	58,891068	1,1835971
0,0025	10,84312	13,57126	3,2623702	41,38045	44,627508	55,489093	1,2024256
0,003	9,174525	12,525116	3,3382789	48,578274	45,462727	55,031696	1,2304035
0,0035	9,008069	21,646405	3,8954684	47,581422	45,546052	59,019681	1,4357694
0,004	8,697866	15,113201	3,445216	49,319925	45,701323	56,163257	1,2698181
0,0045	7,43064	8,3820832	0,9397185	61,382163	46,335631	53,220299	0,3463557
0,005	7,525948	7,7369779	0,6843353	61,208898	46,287923	52,93824	0,2522282
0,0055	8,332748	9,062411	0,8012821	57,884875	45,884079	53,517742	0,2953324
0,006	8,141869	6,3126293	0,7827129	56,399369	45,979629	52,315493	0,2884884
0,0065	7,133399	12,31534	0,8171765	54,282347	46,484417	54,939985	0,3011904

3.3. Genetik Algoritma ile Optimize Edilmiş Bulanık Mantık Denetleyici

Bulanık mantık denetleyicinin üç kısmı genetik algoritma ile optimize edilmiştir. Bunlardan birincisi, bulanık mantık denetleyicinin girişlerindeki normalize ve çıkışındaki denormalize katsayılarının belirlenmesidir. İkincisi, kural çizelgesinin belirlenmesidir. Üçüncüsü üçgen üyelik fonksiyonlarının yapısını belirleyen sayısal değerlerin optimizasyonudur.

Bulanık mantık denetleyicinin hata ve hatanın türevi girişleri el ile normalizasyon katsayıları ayarlanarak, sırasıyla 1/7 ve 1/15 bulunmuştur. Genetik algoritma ile optimize edildiğinde bu değerler sırasıyla 1/6 ve 1/12 olarak bulunmuştur. Bulanık mantık denetleyicinin hatve açısını kontrol eden çıkışının denormalize katsayısı el ile ayarlandığında 1/10 bulunmuştur. Genetik algoritma ile ayarlandığında bu katsayı 1/5 olarak bulunmuştur.

Daha sonra kural tablosunda genetik algoritma ile bir düzenleme yapılmıştır. Bulanık mantık denetleyicinin kural tablosu beş adet kuraldan oluşmaktadır. Kural tablosunda tahmin edilemeyen durumlar bulunmaktadır. Bu durumlar özellikle hatanın türevinin sıfır olduğu durumlar ile ilgilidir. Bu konuda da genetik algoritmaya başvurulmuştur. Genetik algoritma, çıkış gücünü daha kararlı kılan yedi adet kuraldan oluşan bir kural tablosu oluşturmuştur. Bu kurallar Çizelge 3.5’de verilmiştir.

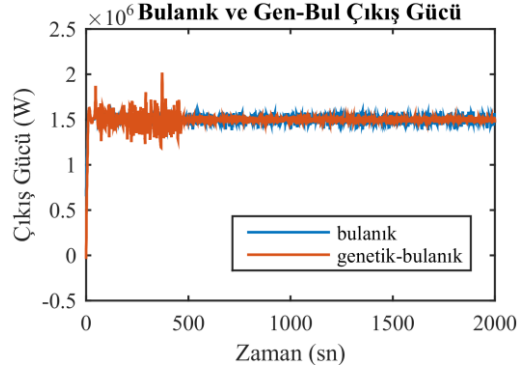
Kurallar:

1. Eğer hata n ve hatanın türevi n ise debeta pb
2. Eğer hata n ve hatanın türevi p ise debeta pk
3. Eğer hata s ve hatanın türevi n ise debeta s
4. Eğer hata s ve hatanın türevi s ise debeta s
5. Eğer hata p ve hatanın türevi n ise debeta nk
6. Eğer hata p ve hatanın türevi s ise debeta s
7. Eğer hata p ve hatanın türevi p ise debeta nb

Çizelge 3.5. Bulanık kural tablosu

	Hatanın Türevi			
		P	S	N
Hata	P	NB	S	NK
	S		S	S
	N	PK		PB

Daha sonra üçgen üyelik fonksiyonlarının yapısını belirleyen sayısal değerler çıkış gücünü en kararlı yapacak şekilde genetik algoritma ile optimize edilmiştir. Şekil 3.50’de genetik algoritma ile optimize edilmiş bulanık mantık denetleyicili bireysel hatve açılı kontrol sistemi ile optimize edilmemiş kontrol sisteminin çıktıları karşılaştırılmıştır.

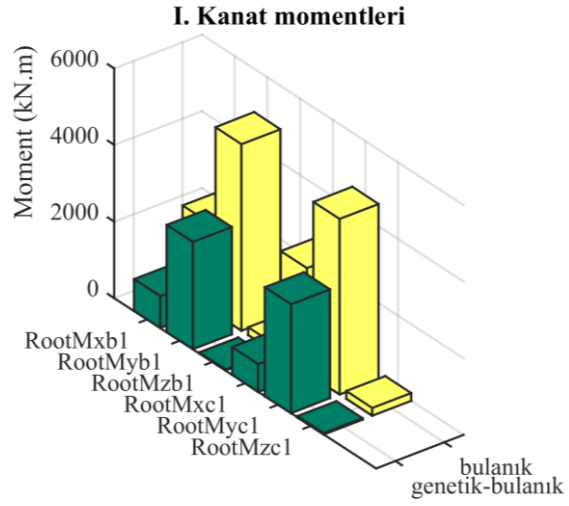


Şekil 3.50. Bireysel bulanık ve genetik bulanık çıkışları

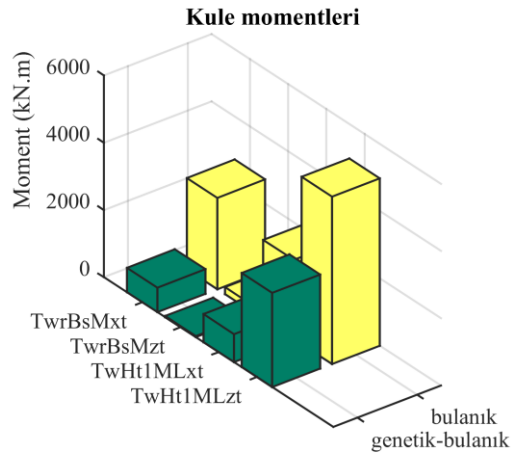
Çizelge 3.6. Genetik bulanık denetleyicinin bireysel ve kolektif moment tablosu

Genetik bulanık	kolektif (k.Nm)	bireysel (k.Nm)	% azalma
RootMxb1	2247	1624	27,72586
RootMyb1	5120	3247	36,58203
RootMzb1	224	142	36,60714
RootMxc1	2748	1829	33,4425
RootMyc1	4425	3356	24,15819
RootMzc1	224	142	36,60714

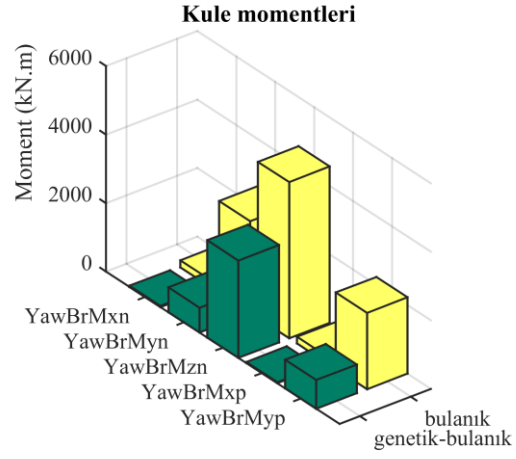
Çizelge 3.6, bireysel ve kolektif kanat hatve açılı kontrol yöntemlerinin sonucundaki kanat moment yüklerini göstermektedir. Çizelge 3.6'nın 3. sütunu bireysel hatve açısı kontrolü ile kanat yüklerinin % olarak azalma miktarını göstermektedir, buna göre kanatlarda %24 ile %36 arasında moment yüklerinde bir iyileşme olmuştur. Şekil 3.51-3.55, genetik algoritma ile optimizasyonun moment yükünün iyileşmesine bulunduğu katkı gösterilmiştir.



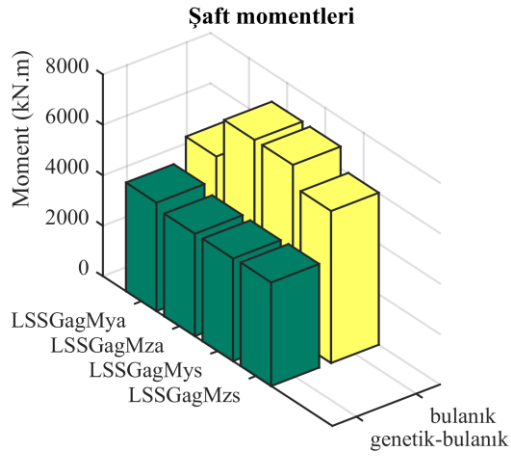
Şekil 3.51. Birinci kanat moment değerlerinin karşılaştırılması



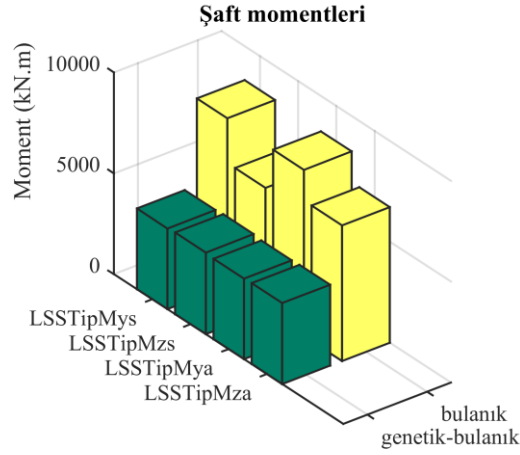
Şekil 3.52. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.53. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması

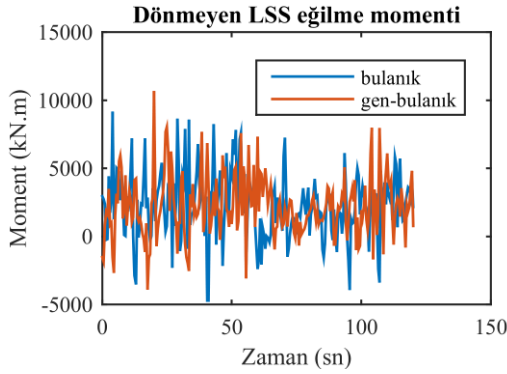


Şekil 3.54. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması

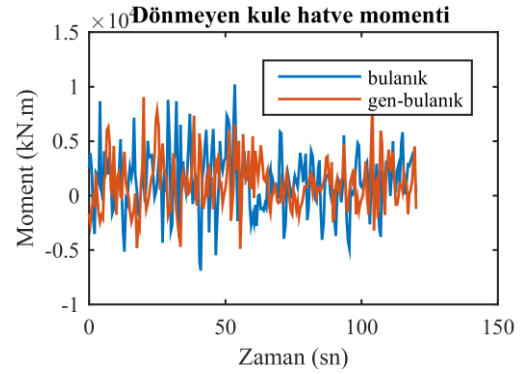


Şekil 3.55. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması

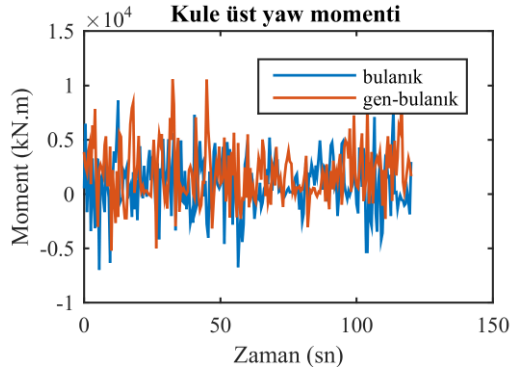
Şekil 3.56 dönmeyen düşük hızlı şaft eğilme momentindeki değişimi Şekil 3.57-3.62 kule momentlerini, Şekil 3.63-3.67 1. kanat momentlerini göstermektedir, bunlara göre genetik algoritma ile bulanık mantık üzerinde yapılan eniyileştirme işlemi başarılı olmuş ve bütün momentlerde iyileşme sağlanmıştır.



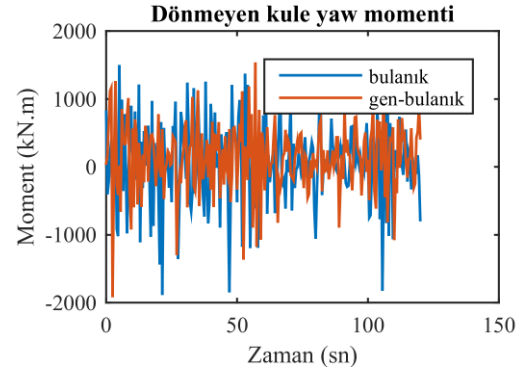
Şekil 3.56. Dönmeyen LSS eğilme momenti



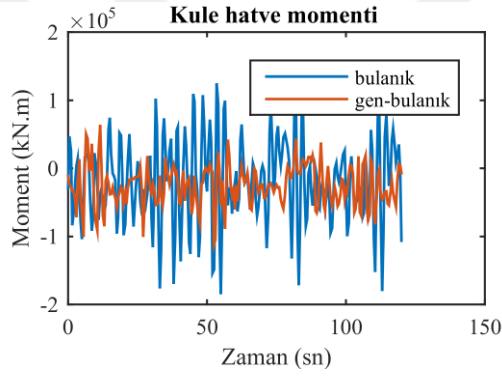
Şekil 3.57. Dönmeyen kule hatve momenti



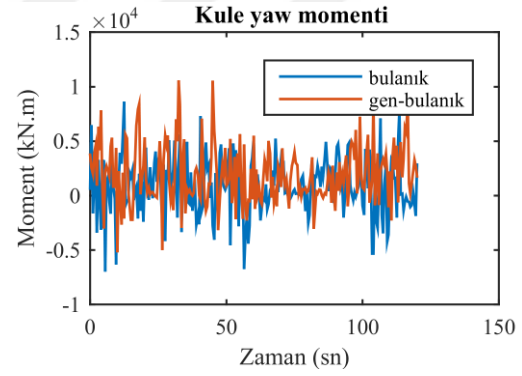
Şekil 3.58. Kule üst yaw momenti



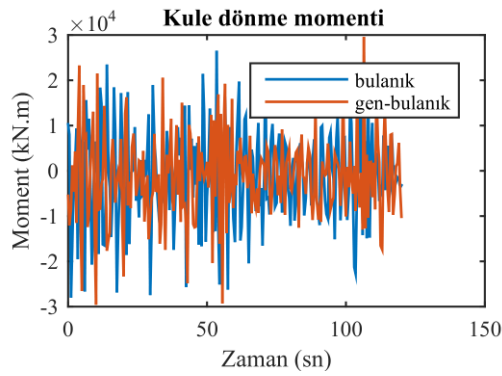
Şekil 3.59. Dönmeyen kule yaw momenti



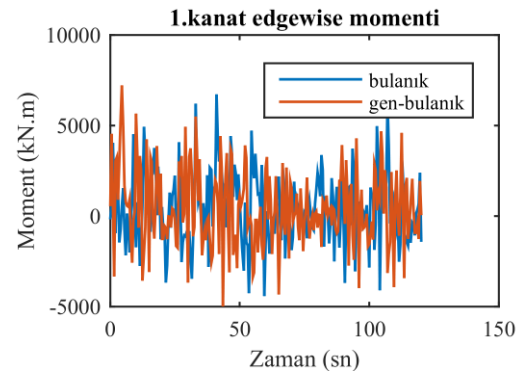
Şekil 3.60. Kule hatve momenti



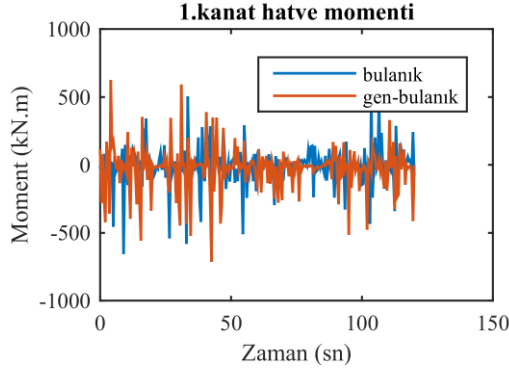
Şekil 3.61. Kule yaw momenti



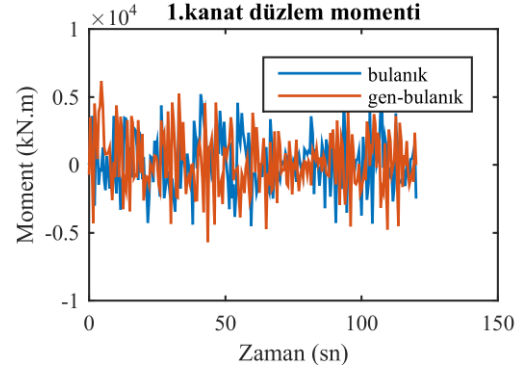
Şekil 3.62. Kule dönme momenti



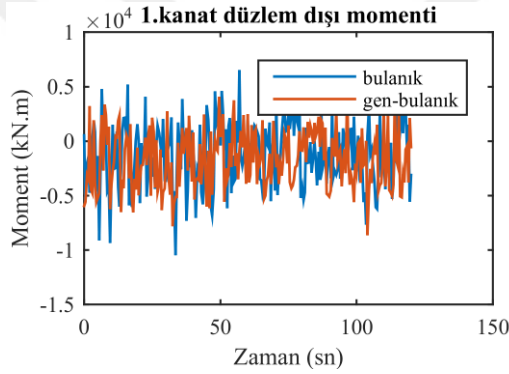
Şekil 3.63. Birinci kanat edgewise



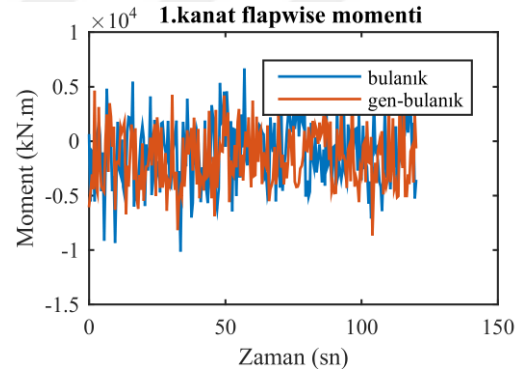
Şekil 3.64. Birinci kanat hatve momenti



Şekil 3.65. Birinci kanat düzlem momenti



Şekil 3.66. Birinci kanat düzlem dışı momenti



Şekil 3.67. Birinci kanat flapwise momenti

3.4. Bulanık PID Kontrolör

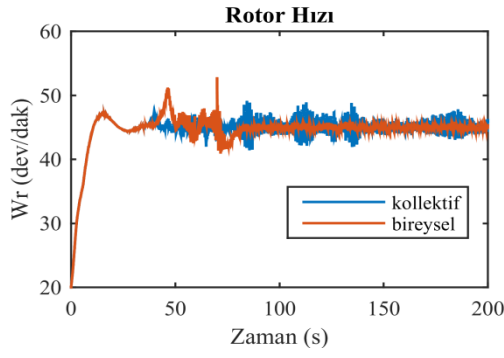
Rüzgâr türbinlerinin bireysel kanat hatve açılarının kontrolünde bulanık PID kontrolör kullanılmıştır. Bulanık yapısı olarak hızlı cevap süresi bakımından avantajlı olan Takagi-Sugeno tercih edilmiştir. Bulanık yapı, PID kontrolörün K_p , K_i ve K_d katsayılarını belirlemektedir. Bu katsayılar belirlenirken hata ve hatanın türevi dikkate alınmıştır. Hata ve hatanın türevinin değişimine göre K_p , K_i ve K_d katsayılarının değeri bulanık kontrolör tarafından belirlenir. Bulanık PID kontrolör bloğunun içyapısı Şekil 3.68’de gösterilmiştir.

Bulanık PID kontrol yapısında da RootMyc kanat momentinden elde edilen bireysel hatve açısı fark değerlerinin kollektif hatve açısına eklenme oranları ve neticeleri Çizelge 3.7’de gösterilmiştir. Çizelge 3.7’in ilk sütunu olan kp değeri, bireysel hatve açısı fark değerinin eklenme oranlarını göstermektedir. Çizelge 3.7’de önemli olan ve kp değerine karar verilmesinde dikkate alınması gereken 4. sütun olan % ortalama salınım ve 5. sütun olan % moment iyileşmesidir. 4. sütunun en düşük değerleri ile 5. sütunun en yüksek değerlerine mukabil gelen kp değerleri, tercih edilmesi gereken kp değerlerini göstermektedir[56].

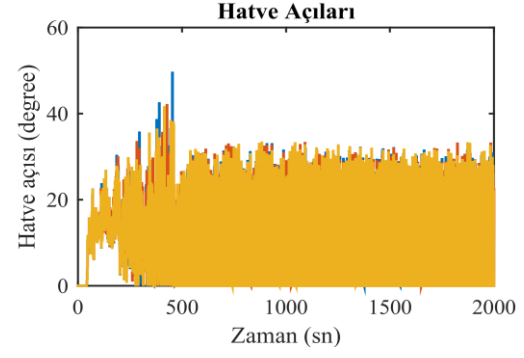
Çizelge 3.7. Bulanık PID moment karşılaştırma çizelgesi

kp değeri	% min	% max	% ortalama salınım	% moment iyileşmesi	minimum	maksimum	ortalama salınım
0	6,022051	7,105764	1,721812	0	42,29008	48,19759	0,774815
0,0005	5,423143	7,052366	1,686415	-0,76744	42,55959	48,17356	0,758887
0,001	7,755873	7,504823	2,058343	24,95454	41,50986	48,37717	0,926254
0,0015	8,37521	9,907337	2,275658	25,56721	41,23116	49,4583	1,024046
0,002	10,27423	18,8386	2,918463	31,75984	40,3766	53,47737	1,313308
0,0025	10,84312	11,97362	2,96489	37,53893	40,12059	50,38813	1,3342
0,003	9,174525	11,05063	3,033877	44,06855	40,87146	49,97278	1,365244
0,0035	9,008069	19,09814	3,540259	43,16424	40,94637	53,59416	1,593116
0,004	8,697866	13,33404	3,131063	44,74135	41,08596	51,00032	1,408978
0,0045	7,43064	7,395325	0,85403	55,6838	41,65621	48,3279	0,384313
0,005	7,525948	6,826163	0,621934	55,52662	41,61332	48,07177	0,27987
0,0055	8,332748	7,995563	0,728217	52,51118	41,25026	48,598	0,327698
0,006	8,141869	5,569492	0,711341	51,16358	41,33616	47,50627	0,320104
0,0065	7,133399	10,86555	0,742662	49,24309	41,78997	49,8895	0,334198
0,007	6,633775	2,000487	0,64657	47,94881	42,0148	45,90022	0,290956
0,0075	7,405607	14,12066	0,845403	45,40421	41,66748	51,3543	0,380431
0,008	4,222251	2,109417	0,575509	43,68559	43,09999	45,94924	0,258979

Tercih edilen kp bireysel hatve açısı fark değeri katsayısına göre bireysel ve kollektif çıkış rotor hızları Şekil 3.69’da, hatve açısı değişim grafiği ise Şekil 3.70’de gösterilmiştir.

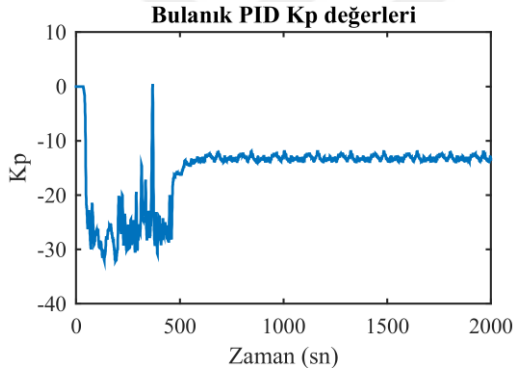


Şekil 3.69. Bulanık PID çıkış grafiği

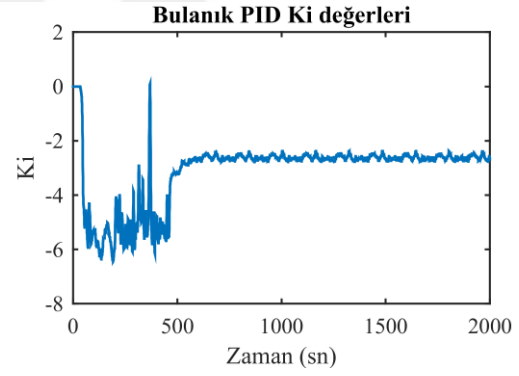


Şekil 3.70. Bulanık PID

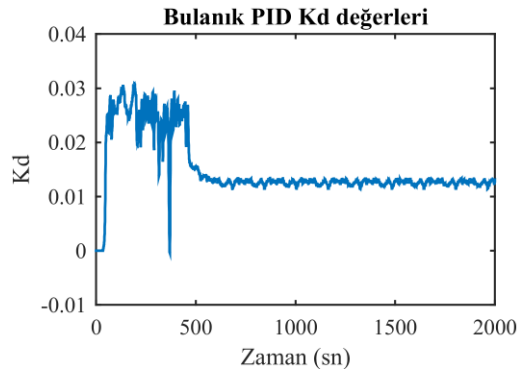
Çıkış gücünü kontrol eden bulanık PID kontrolörün katsayılarındaki değişim Şekil 3.71-3.73’de gösterilmiştir.



Şekil 3.71. Bulanık PID kp değişimi



Şekil 3.72. Bulanık PID ki değişimi



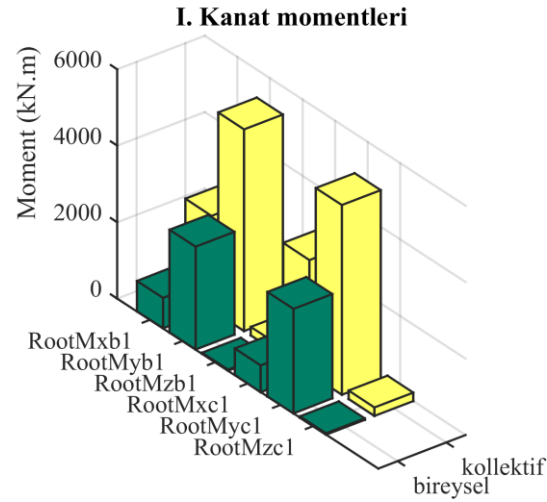
Şekil 3.73. Bulanık PID kd değişimi

Çizelge 3.8’de bulanık PID denetleyicili rüzgâr enerji sisteminin bireysel ve kollektif hatve açılı kontroller neticesinde kanatlardaki moment yükleri ve azalması gösterilmiştir. Çizelge 3.8’e göre kanatlardaki moment yüklerinde %24 ile %63 arasında bir iyileşme olmaktadır.

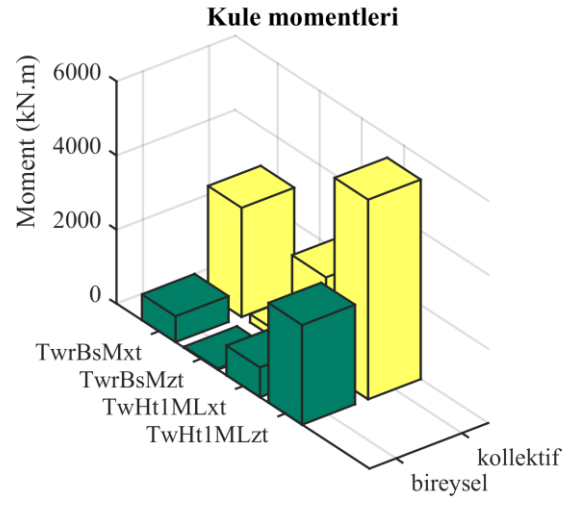
Çizelge 3.8. Bulanık PID denetleyicinin bireysel ve kollektif moment tablosu

Bulanık PID	kollektif (k.Nm)	bireysel (k.Nm)	% azalma
RootMxb1	2024	1125	44,417
RootMyb1	5428	3320	38,83567
RootMzb1	327	120	63,30275
RootMxc1	2547	1847	27,48331
RootMyc1	4125	3124	24,26667
RootMzc1	327	120	63,30275

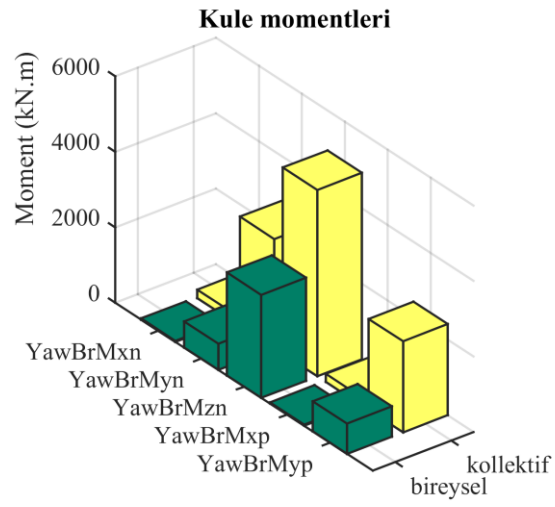
Bulanık PID kontrol sistemindeki moment iyileşmeleri Şekil 3.74-3.78’deki çubuk grafiklerde gösterilmiştir.



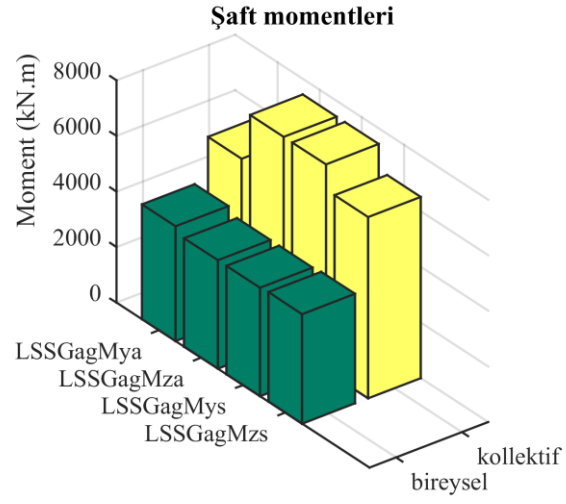
Şekil 3.74. Birinci kanat moment değerlerinin karşılaştırılması



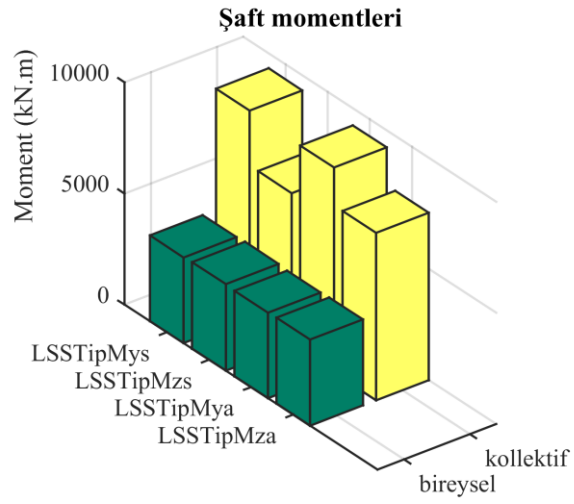
Şekil 3.75. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.76. Kule moment değerlerinin karşılaştırılması

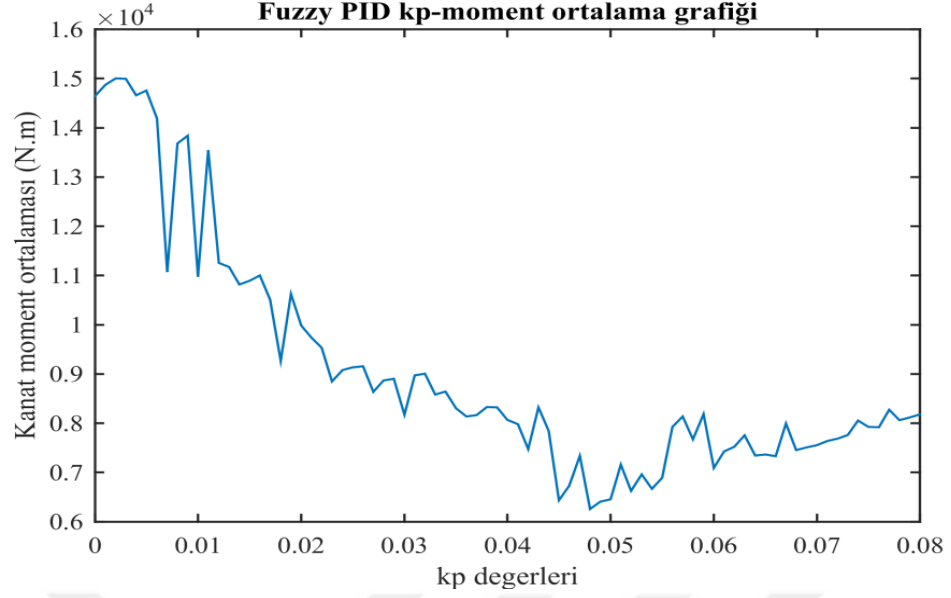


Şekil 3.77. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması



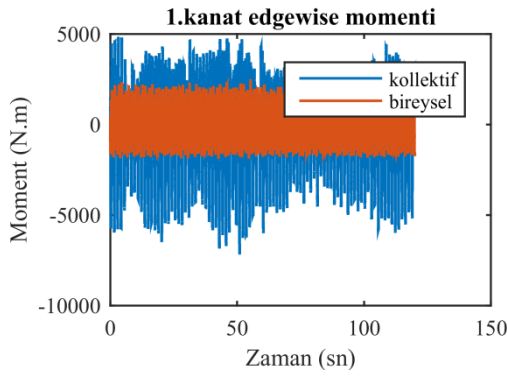
Şekil 3.78. Şaft moment değerlerinin karşılaştırılması

Bireysel hatve açısı fark katsayısı k_p 'nin değişimi ile moment değişimleri Şekil 3.79'da gösterilmiştir.

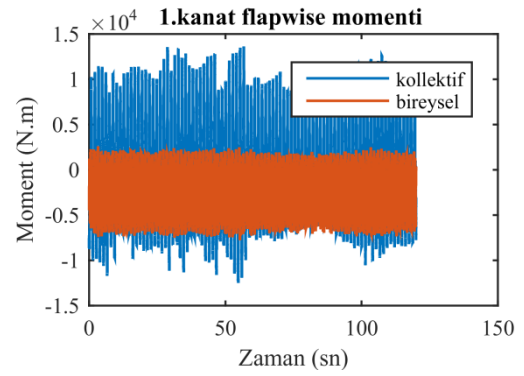


Şekil 3.79. Bulanık PID kanat momentlerinin ortalaması

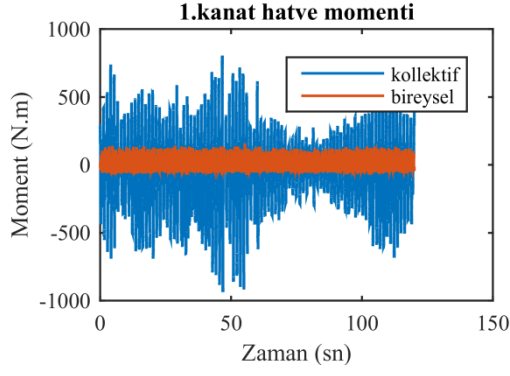
Bireysel ve kollektif hatve açısı kontrolleri arasındaki moment değişimleri Şekil 3.80-3.92’de gösterilmiştir. Şekil 3.80-3.84’de 1. kanat üzerindeki çeşitli moment yüklerinin değişimi gösterilmiştir, bunlara göre bireysel hatve açısı kontrolü ile kanat yüklerinde ciddi oranda bir azalma olmuştur.



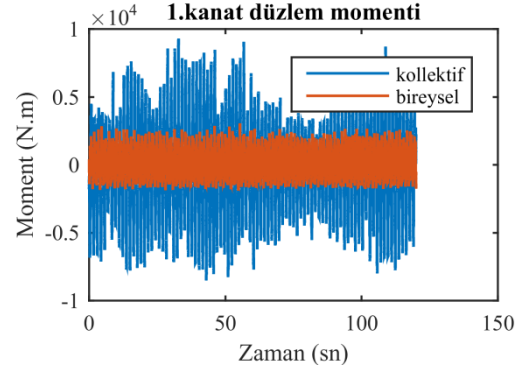
Şekil 3.80. Birinci kanat edgewise momenti



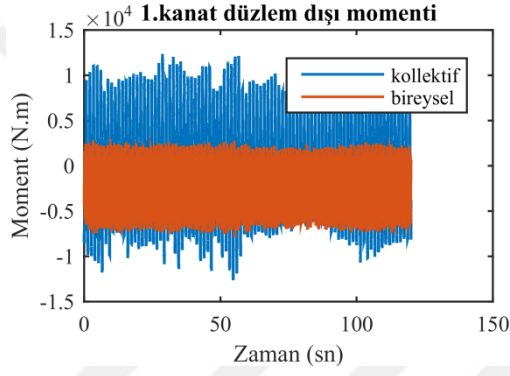
Şekil 3.81. Birinci kanat flapwise momenti



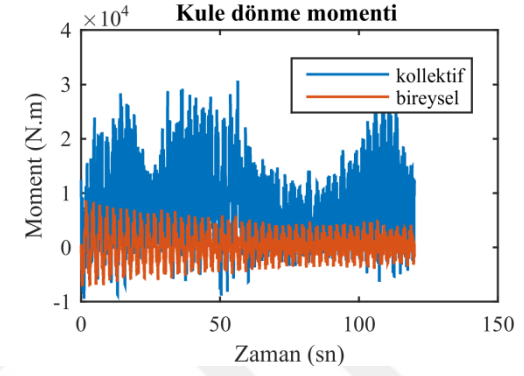
Şekil 3.82. Birinci kanat hatve momenti



Şekil 3.83. Birinci kanat düzlem momenti

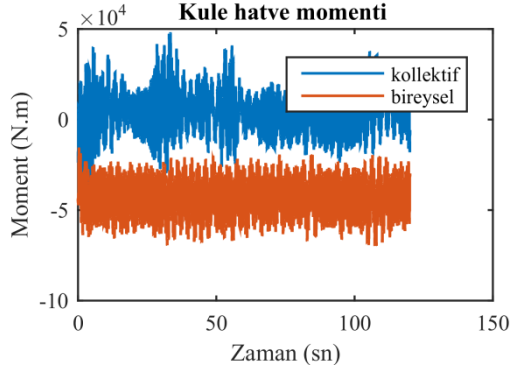


Şekil 3.84. Birinci kanat düzlem dışı momenti

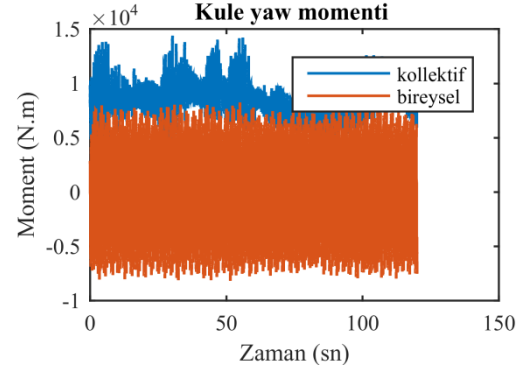


Şekil 3.85. Kule dönme momenti

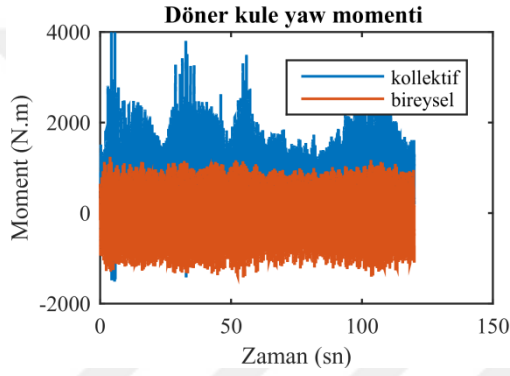
Şekil 3.85-3.90' de kule yükleri, Şekil 3.91-3.92'de şaft momentleri gösterilmiştir, bunlara göre kule hatve momenti hariç diğer bütün momentlerde ciddi oranda bir iyileşme olmuştur.



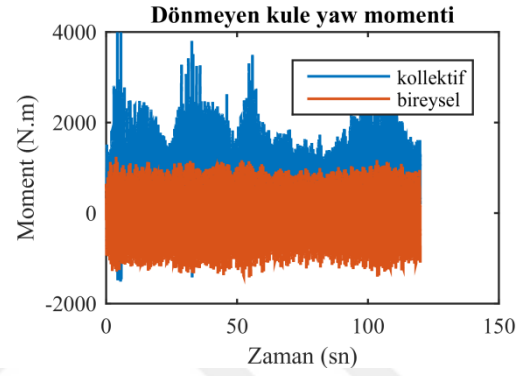
Şekil 3.86. Kule hatve momenti



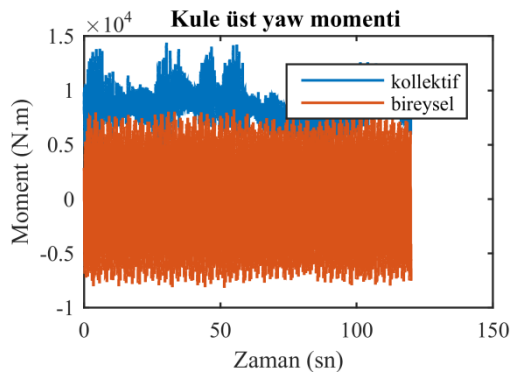
Şekil 3.87. Kule yaw momenti



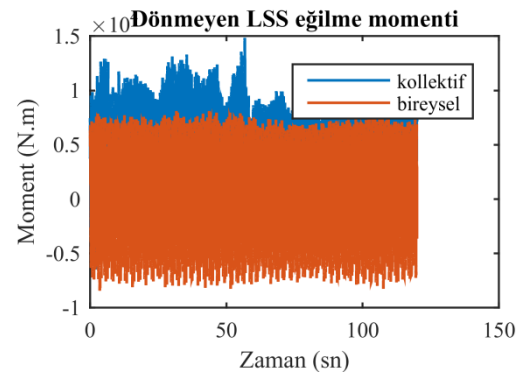
Şekil 3.88. Döner kule yaw momenti



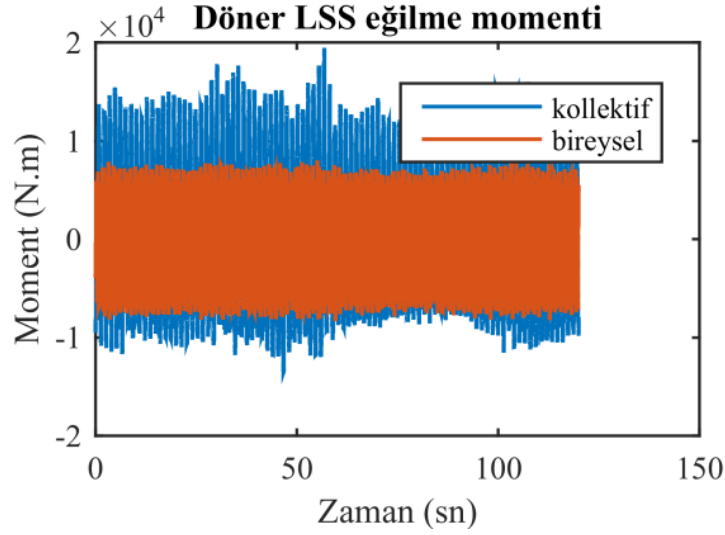
Şekil 3.89. Dönmeyen kule yaw momenti



Şekil 3.90. Kule üst yaw momenti



Şekil 3.91. Dönmeyen LSS eğilme momenti

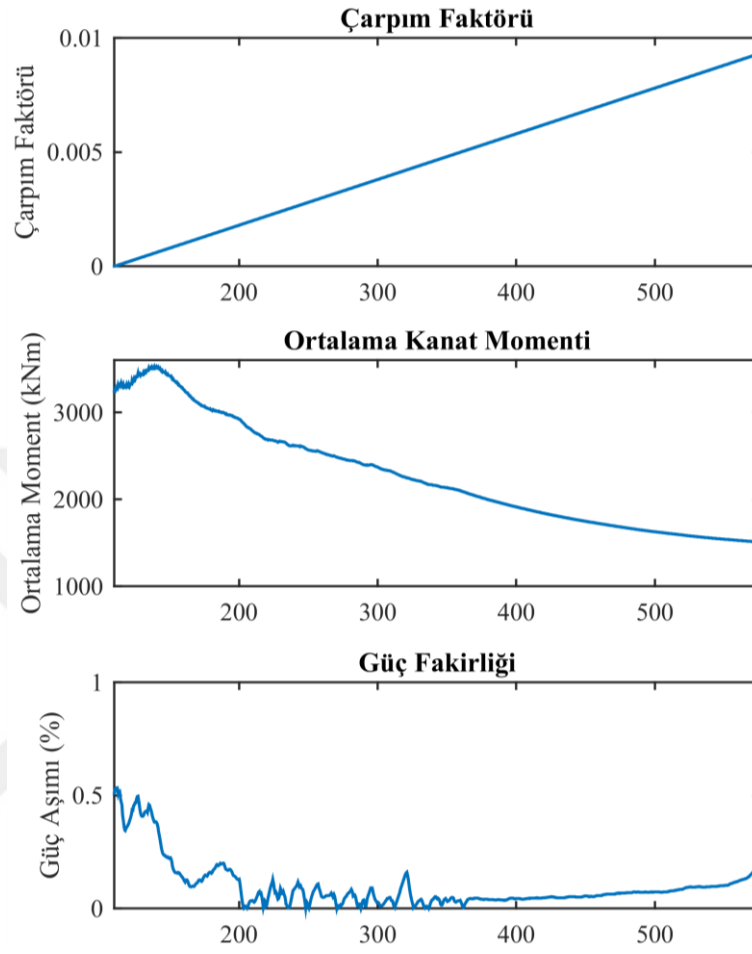


Şekil 3.92. Döner LSS eğilme momenti

3.5. Rüzgâr Türbininde Güç Kalitesi ve Moment Değişimi

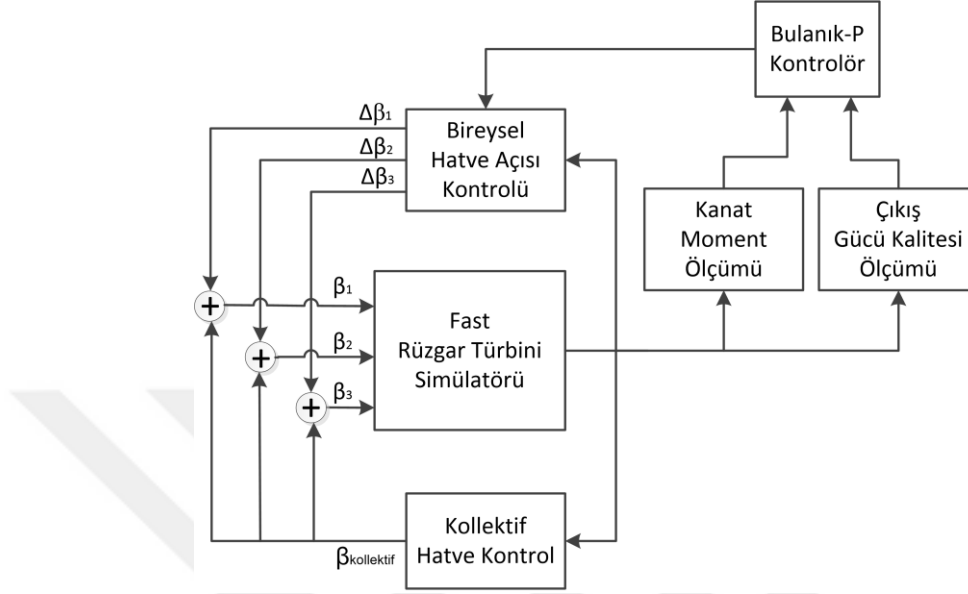
Rüzgâr türbininde bireysel hatve açısı değerleri kanat momentlerinden elde edilir. Bu moment değerleri değerlendirilerek kollektif pitch açısı değerine eklenir. Değerlendirilmiş momentin kollektif hatve açısına eklenme oranı önemli bir işlemdir. Bu oranın aldığı değere göre moment yükünün azaltımı ve çıkış gücünün kalitesi belirlenir. Bu çarpım oranının değişik değerleri için moment ve güç kalitesi ölçümü yapılmıştır. Kanat açlarındaki moment değerlerinin ortalaması gerçek zamanlı olarak ölçülüp, çarpım faktörü ile çarpılarak kollektif hatve açısı değerine eklenmiştir. Çarpım faktörü simülasyon esnasında sıfırdan başlayarak yavaş yavaş arttırılmıştır. Çarpım faktörünün aldığı değerlere göre kanat moment ortalaması değerleri ve çıkış gücündeki dalgalanma oranı ölçülmüştür. Fast rüzgâr türbini simülatörünün izin verdiği miktara kadar çarpım faktörü değeri arttırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.93’de gösterilmiştir. Şekil 3.93’de görüldüğü gibi çarpım faktörü doğrusal olarak arttırılmasına karşılık moment değerleri azalmıştır. Zaten bireysel hatve açısı kontrolünden beklenen sonuç da budur. Güç kalitesi (güç fakirliğinin tersi) ise çarpım faktörünün bazı değerleri için yüksek bazı değerleri için düşüktür. Burada, iyi bir kontrol sisteminin amacı moment değerlerinin düşük olduğu

arpım faktörü değerlerinde güç kalitesinin yüksek (güç fakirliğinin düşük) olduğu kısımları bulabilmektir.



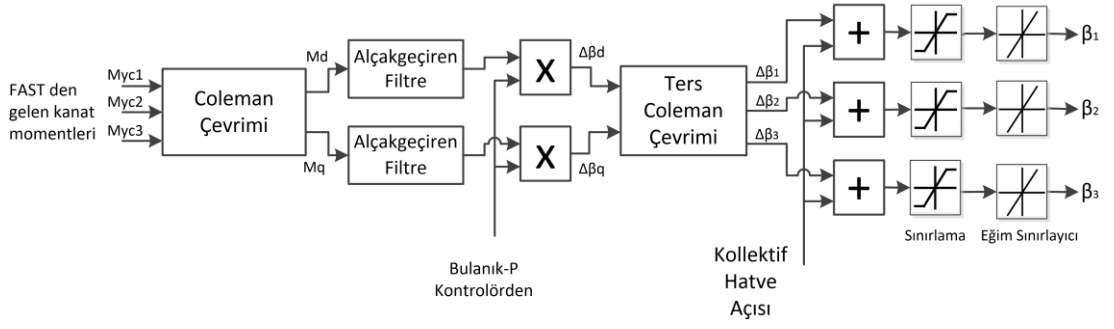
şekil 3.93. Değişik arpım faktörleri için g ve moment eğrileri

3.5.1. Rüzgâr Türbininin Bireysel Hatve Açısı Kontrolü ve Güç Kalitesi-Moment Dengesi



Şekil 3.94. Moment ve güç dengeli bireysel hatve açısı kontrollü rüzgâr türbini modeli

Şekil 3.94’de gösterildiği gibi güç kalitesi-moment dengeleyicili rüzgâr türbini modeli dört temel kısımdan oluşur. Birincisi Fast’in rüzgâr türbini simülatörüdür. Bu simülatör Matlab içinde çalıştırılabilmektedir. Klasik rüzgâr türbini simülatörlerine ek olarak bireysel hatve açısı kontrolüne ve rüzgâr türbininin çeşitli kısımları üzerindeki mekanik yüklerin hesaplanmasına izin vermektedir. İkinci kısım, nominal rüzgâr hızının üzerindeki rüzgâr hızlarında çıkış gücünü kararlı bir seviyede tutmak için kollektif hatve açısını belirleyen Kollektif Hatve Kontrol birimidir. Üçüncü kısım, kanat moment değerlerini ve faz açılarını kullanarak üç ayrı hatve açısı fark değeri üreten Bireysel Hatve Açısı Kontrol bölümüdür. Dördüncü kısım, Fast rüzgâr türbini simülatöründen kanat momentlerini ve çıkış gücü değerlerini gerçek zamanlı olarak alıp bulanık mantık ile değerlendiren Bulanık-P kontrolördür. Bulanık-P kontrolör, moment ve güç kalitesini değerlendirerek Bireysel Hatve Açısı kontrolörüne kanat momentlerini hangi oranla bireysel hatve açısı fark değerlerine çevireceğini bildirir.



Şekil 3.95. Bireysel hatve açısı kontrol sistemi

Şekil 3.95’de görüldüğü gibi kanatlardan elde edilen moment değerlerinden bireysel hatve açısı fark değerleri elde eden kısım Bireysel Hatve Açısı Kontrol birimidir. Fast rüzgâr türbini simülatöründen gerçek zamanlı olarak elde edilen üç ayrı kanata ait M_{yc1} , M_{yc2} ve M_{yc3} moment değerleri Coleman çevrimi ile d-q eksenine ait M_d ve M_q değerlerine çevrilir. Bu çevrim eşitlik3.1’de verilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} M_d \\ M_q \end{Bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_{yc1} \\ M_{yc2} \\ M_{yc3} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

d-q eksenine çevrilen M_d ve M_q momentleri alçak geçiren bir filtreden geçirilerek, yüksek frekanslı bileşenler ayrılır. Bu moment değerleri ile Bulanık-P kontrolörden gelen k katsayısı çarpılarak d-q eksenindeki $\Delta\beta_d$ ve $\Delta\beta_q$ hatve fark açı değerleri elde edilir. Bu değerler eşitlik3.2’de gösterilen ters Coleman çevriminden geçirilerek $\Delta\beta_1$, $\Delta\beta_2$ ve $\Delta\beta_3$ kanat hatve açısı fark değerleri elde edilir.

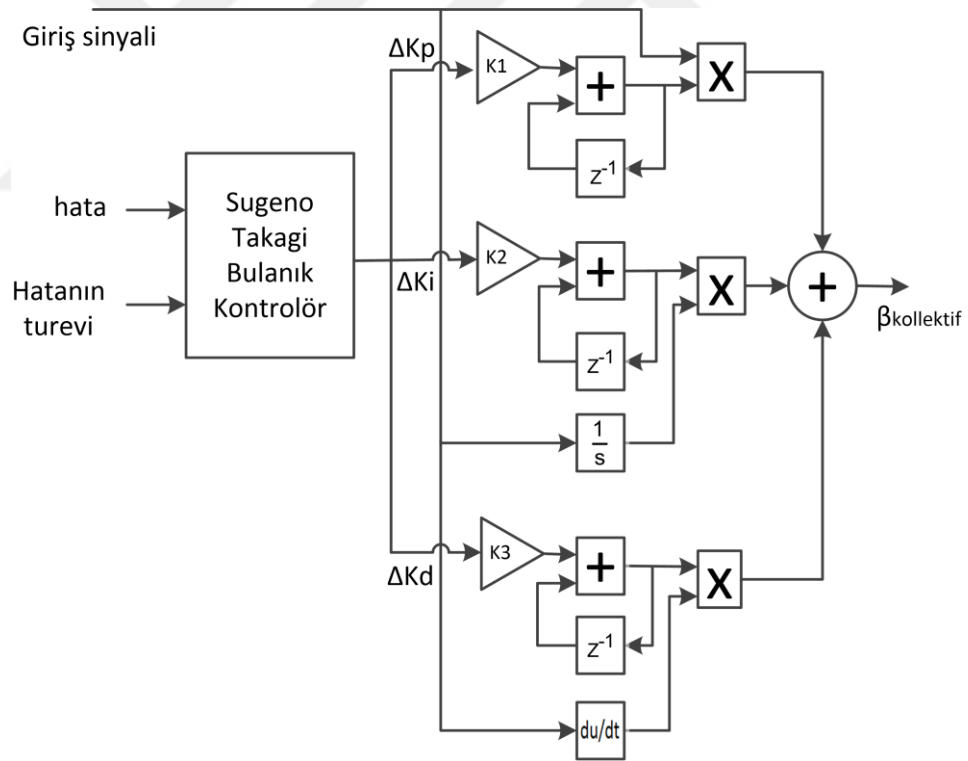
$$\begin{Bmatrix} \Delta\beta_1 \\ \Delta\beta_2 \\ \Delta\beta_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\beta_d \\ \Delta\beta_q \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

Bu değerler kollektif hatve açısı değerleri ile toplanarak bireysel hatve açısı değerleri elde edilir. Elde edilen değerler sınırlayıcı ve eğim sınırlamadan geçirilerek Fast

rüzgâr türbini simülatörüne uygulanır. Sınırlama, hatve açısını 0° ile 90° arasında tutarken, eğim sınırlama saniyedeki hatve açısı değişimini $9^\circ/s$ ile sınırlar.

Bulanık-P kontrolör, girişlerine gelen moment ve güç değerlerine göre pozitif, negatif veya sıfır sayılarını üretir. Ama genel işleyiş istenilen moment ve güç değerine kadar pozitif bir sayı üretmektir. İstenilen güç kalitesi ve moment değerine gelince bulanık-P kontrolör çıkışını sıfır yaparak katsayının değişmesini durdurur. Şayet çalışma içerisinde istenmeyen bir güç kalitesi veya moment değerine sistem girecek olursa bunu düzeltecek şekilde bulanık-P kontrolör çıkış üretir.

3.5.2. Çıkış Gücü Kontrolör Tasarımı



Şekil 3.96. Kollektif hatve açısı kontrol sistemi

Şekil 3.96’da gösterildiği gibi rüzgâr türbini çıkış kontrolünü birinci derece Sugeno-Takagi tipi bulanık-PID kontrolör üstlenmektedir. Kontrol edilen değişken olarak çıkış gücü tercih edilmiştir. Her bir kuralın çıkışı giriş değerlerinin doğrusal birleşimiyle bulunur. Keskin çıkış değerleri ise ağırlık ortalaması alınarak bulunur. Sugeno-Takagi tipinin tercih edilmesinin sebebi; bu yapının matematiksel işlemleri basit olduğundan Mamdani’ye göre daha hızlı sonuç vermesidir. Bu yüzden kontrol işlemlerinde daha fazla tercih edilmektedir.

Rüzgâr enerji sisteminin çıkış gücünü kontrol etmek için tasarlanan Sugeno-Takagi bulanık mantık kontrolörün beş adet kuralı vardır.

Kurallar;

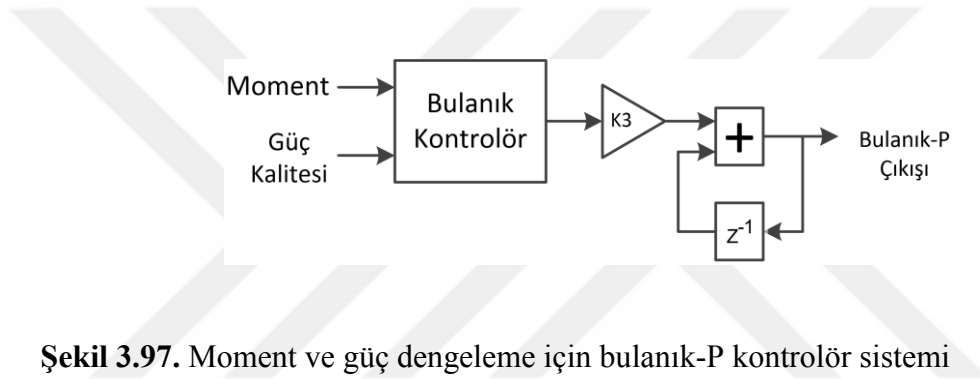
1. Kural $z_1 = a.x + b.y + c$ $a=1, b=0.5, c=0.5$
2. Kural $z_2 = d.x + e.y + f$ $d=0, e=1, f=0.5$
3. Kural $z_3 = g.x + k.y + l$ $g=0, k=0, l=0$
4. Kural $z_4 = m.x + n.y + o$ $m=0, n=1, o=0$
5. Kural $z_5 = p.x + q.y + r$ $p=0.5, q=0.5, r=0$

$$Z = \frac{z_1.w_1 + z_2.w_2 + z_3.w_3 + z_4.w_4 + z_5.w_5}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5} \quad (3)$$

Bulanık kurallardaki x ve y harfleri sırasıyla bulanık mantık kontrolörün girişleri olan hata ve hatanın türevini göstermektedir. a,b,...,r harfleri ise katsayıları göstermektedir. Eşitlik 3’deki w ise her bir kuralın çıkışdaki ağırlığını göstermektedir. Uygulanan sistemde bütün ağırlıklar birbirine eşit ve değeri 1 dir. İstenen çıkış gücü değeri ile çıkış gücü arasındaki fark hatayı teşkil eder. Hatanın birim zamandaki değişimi hatanın türevidir. Bulanık kontrolörün girişi hata ve hatanın türevidir.

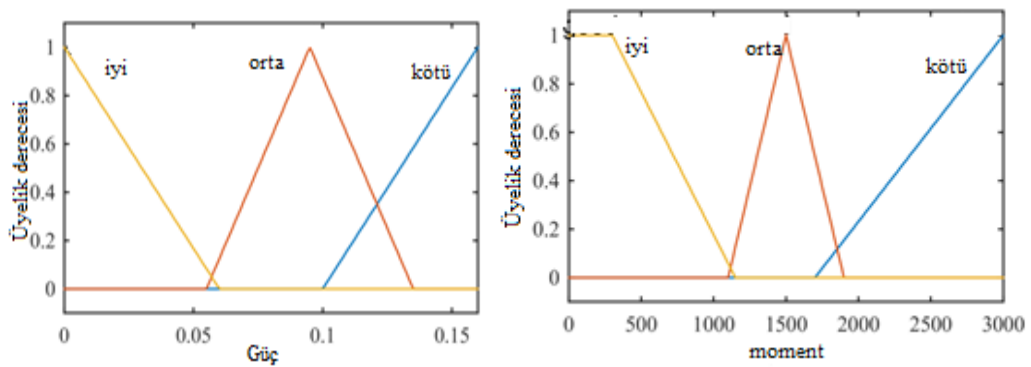
3.5.3. Güç-Moment Dengeleyicisi Kontrolör Tasarımı

Güç-Moment dengeleyicisi görevini Mamdani tipi bulanık kontrolör üstlenmiştir. Bulanık kontrolörün girişi ortalama moment ve ortalama güç kalitesidir. Simüle edilen sistemde belirli zaman aralıklarında güç kalitesinin ve kanat momentlerinin ortalaması alınır. Bu zaman aralığı kontrol sistemini tasarlayan kişi tarafından belirlenmelidir. Zaman aralığı; kontrol etkisinin sistem üzerinde tesirini göstermesini sağlayacak uzunlukta, kontrol edilen sistemin kontrol kalitesini bozmayacak kısıklıkta olmalıdır. Moment ve güç dengeleme için Bulanık-P kontrolör sistemi Şekil 3.97’de gösterilmiştir.



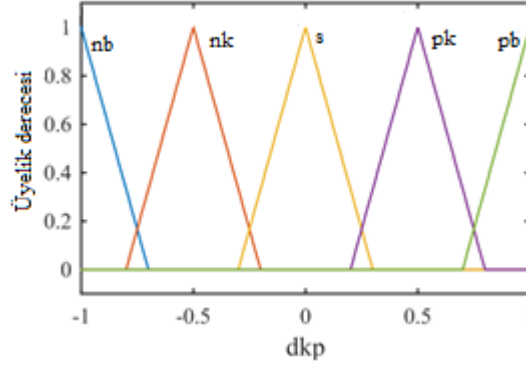
Şekil 3.97. Moment ve güç dengeleme için bulanık-P kontrolör sistemi

Moment ve güç kalitesi için giriş bulanık kümeleri Şekil 3.98’de gösterilmiştir.



Şekil 3.98. Moment ve güç kalitesi bulanık kümeleri

Çıkış katsayısı bulanık kümeleri ise Şekil 3.99'da gösterilmiştir.



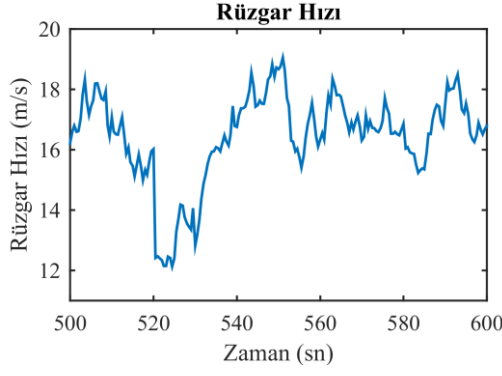
Şekil 3.99. Çıkış katsayısı bulanık kümeleri

Bulanık kurallar:

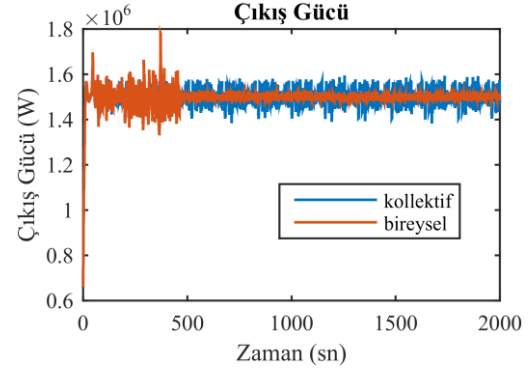
1. Eğer moment iyi ve güç iyi ise dkp'yi s yap
2. Eğer moment iyi ve güç orta ise dkp'yi s yap
3. Eğer moment iyi ve güç kötü ise dkp'yi nk yap
4. Eğer moment orta ve güç iyi ise dkp'yi s yap
5. Eğer moment orta ve güç orta ise dkp'yi s yap
6. Eğer moment orta ve güç kötü ise dkp'yi nk yap
7. Eğer moment kötü ve güç iyi ise dkp'yi pb yap
8. Eğer moment kötü ve güç orta ise dkp'yi pk yap
9. Eğer moment kötü ve güç kötü ise dkp'yi pk yap

3.5.4 Simulasyon Sonuçları

Simulasyonda kullanılan rüzgâr hızı Şekil 3.100'de gösterilmiştir. Rüzgâr hızı verileri her 100 saniyede bir kendini tekrar ettiği için sadece 100 saniyelik bölüm gösterilmiştir.



Şekil 3.100. Rüzgâr hızı

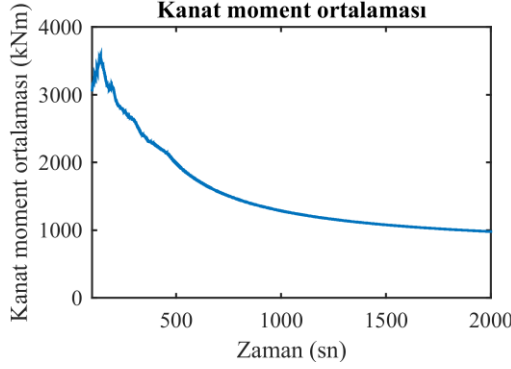


Şekil 3.101. Çıkış gücü

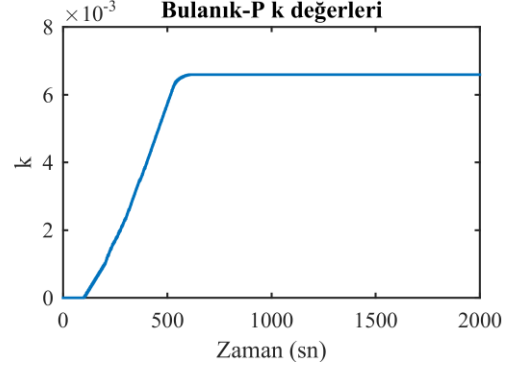
Çıkış gücü Şekil 3.101’de gösterilmiştir. Rüzgâr türbini 1,5 MW’lık çıkış gücüne sahip olduğu için çıkış gücü 1,5 MW’da sabitlenmeye çalışılmıştır. Rüzgâr türbininin başlangıçtaki kararsız halinin geçmesi için Bulanık PID kontrolör simülasyona 33. saniyede devreye girmiştir. Bulanık-P kontrolör 100 saniyede devreye girerek, Bulanık PID kontrolöre çıkış gücünü kararlı hale getirmesi için zaman tanımıştır. Daha sonra her iki kontrolörde kanat hatve açısını belirlemek üzere birlikte hareket etmiştir. Bulanık PID kontrolör, rüzgâr hızı ve değişimlerini kompanze edecek şekilde kanat hatve açısı değeri üretirken, Bulanık P kontrolör hem çıkış gücündeki kaliteyi arttıracak hem de moment yükünü azaltacak bireysel hatve açısı değerleri üretir. Bulanık P kontrolör moment yükünü azaltacak çarpanı belirlerken, çıkış gücü kontrolü üzerinde hassas ayar yapma yeteneğine sahiptir. Bu yüzden bireysel Bulanık P kontrollü çıkış gücü Şekil 3.101’de gösterildiği gibi kollektif çıkış gücüne göre daha mükemmeldir. Katsayılar, çıkışı en kararlı halde tutacak şekilde bulanık kurallara göre değişir böylece sistemin nonlinear olmasından kaynaklanabilecek hataları düzeltir.

Simulasyon boyunca kanatlardaki ortalama moment değeri Şekil 3.102’de gösterilmiştir. Güç-moment dengeleyici kontrolörün ürettiği k katsayı değeri Şekil 3.103’de görülmektedir. Bulanık kontrolör, çıkış gücü ve ortalama kanat momentleri için en uygun değeri bulana kadar k katsayısını artırır. İstenen seviyede iyi bir değeri yakalarsa, katsayıyı arttırmayı durdurur. Eğer güç veya momentde bir kötüleşme olursa (çalışma şartlarının veya türbin parametrelerinin zamanla değişmesinden

kaynaklanabilecek) daha iyi bir noktaya gelmek için bulanık kurallara göre katsayıyı arttırır veya azaltır. Bu tamamen bulanık kurallara bağlıdır.

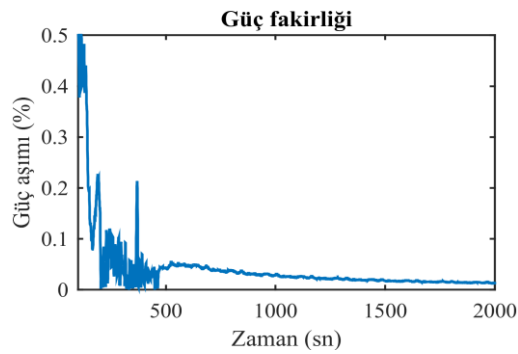


Şekil 3.102. Kanat moment değişimi bulanık P kontrolörün katsayı değişimi



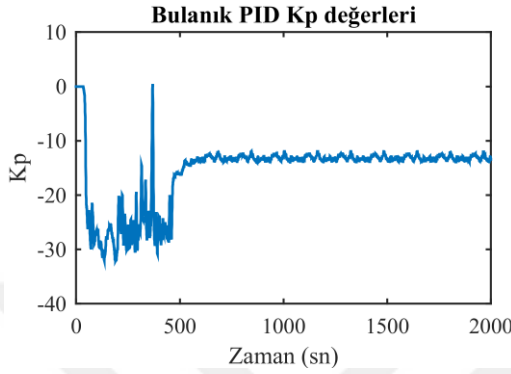
Şekil 3.103. Güç-moment dengeleyici

Şekil 3.104'de ortalama moment grafiği gösterilmiştir. Rüzgâr türbini başlangıçta kollektif hatve açısı ile çalışır çünkü Bulanık P kontrolörün çıkışı olan k katsayısı başlangıçta sıfırdır. Daha sonra k katsayısı Şekil 3.103'de gösterildiği gibi artmaya başlar. Bu durum rüzgâr türbininin hatve açısı kontrolünde kollektif hatve açısından bireysel hatve açısına yumuşak bir geçiş sağlar. Bu geçiş esnasında Şekil 3.104'de gösterildiği gibi güç kalitesinde de değişimler olur. k katsayısı kararlı bir hale geldiğinde moment ve güç kalitesi istenen seviye sınırları içine girmiştir.

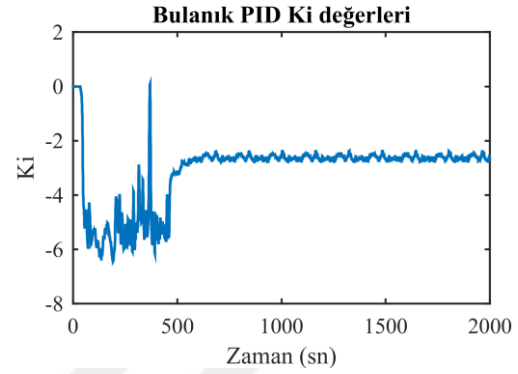


Şekil 3.104. Güç salınımlarındaki değişim

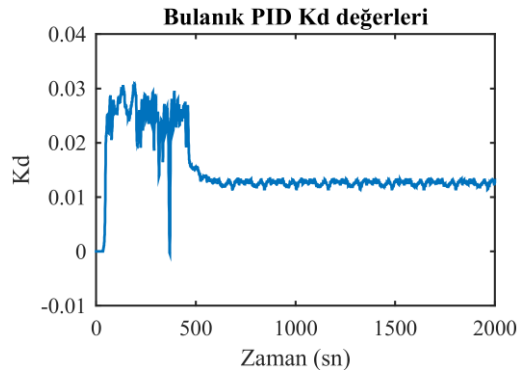
Çıkış gücü kontrolü için tasarlanan Sugeno-Takagi tipi bulanık PID kontrolörün k_p katsayısındaki değişim Şekil 3.105’de, k_i katsayısındaki değişim Şekil 3.106’da ve k_d katsayısındaki değişim Şekil 3.107’de gösterilmiştir. Simulasyon başladıktan belirli bir zaman sonra katsayılar en iyi çıkış gücünü verecek değerleri kazanmıştır.



Şekil 3.105. Bulanık PID kontrolörün K_p katsayısındaki değişim



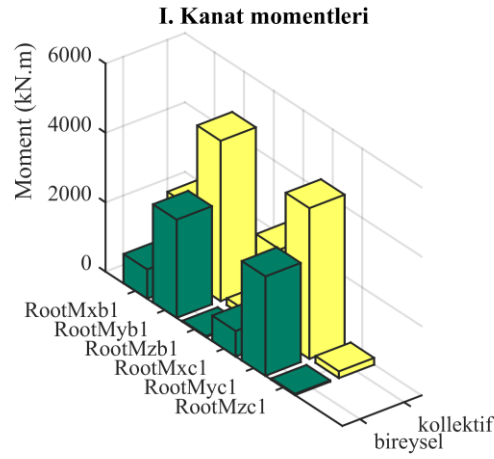
Şekil 3.106. Bulanık PID kontrolörün K_i katsayısındaki değişim



Şekil 3.107. Bulanık PID kontrolörün K_d katsayısındaki değişim

Kanat 2 ve 3'ün moment değerleri kanat 1 ile aynı olduğundan ayrıca onları almaya gerek duyulmadı. Şekil 3.108’de I. kanat üzerindeki momentler kollektif ve bireysel hatve açısı kontrolleri için karşılaştırılmıştır. Şekil 3.109-3.113’de kollektif ve bireysel hatve açısı kontrolü ile I. kanatdaki momentlerin zamanla değişimi

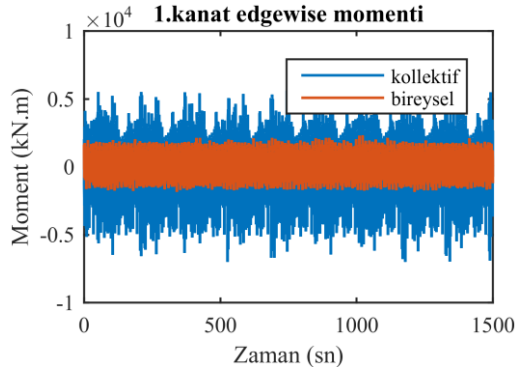
gösterilmiştir. Çizelge 3.9’da ise I. kanat üzerindeki moment değerleri bireysel ve kollektif hatve açılı kontrolleri için karşılaştırılarak, yüzde azalma miktarı kaydedilmiştir. Çizelge 3.6’ya göre güç moment dengeleyici kontrolörün kullanımıyla I. kanat üzerinde edgewise moment(RootMxb1) değerinde %61 azalma, flapwise moment(RootMyb1) değerinde %39 azalma, pitching moment(RootMzb1 ve RootMzc1) değerinde %83 azalma, in plane moment değerinde %72 azalma, out of plane moment değerinde %34 kaydedilmiştir. I. kanat momentlerinde %34 ile %83 arasındaki bu azalma oranları güç moment dengeleyici kontrolörün başarılı bir şekilde çalıştığını gösterir.



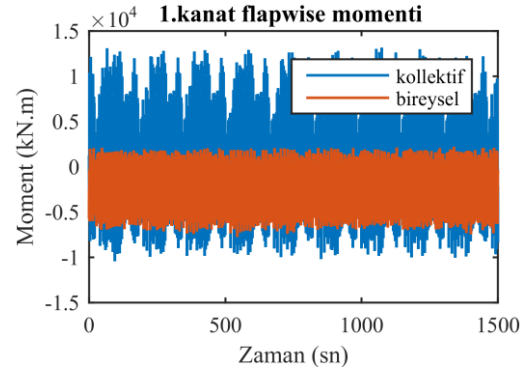
Şekil 3.108. I. Kanat için momentler

Çizelge 3.9. I. Kanat Momentleri

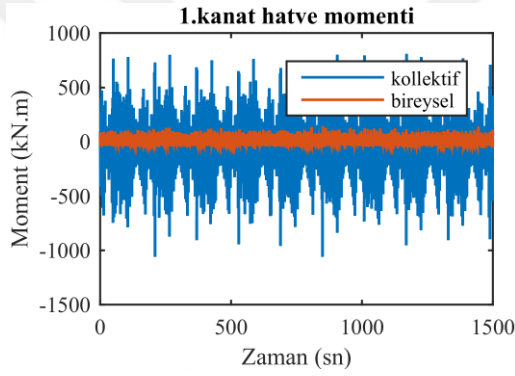
Momentler (kNm)	bireysel	kollektif	% azalma
RootMxb1	839,3918	2150,767	60,97244
RootMyb1	2826,885	4614,758	38,74252
RootMzb1	32,56761	191,6559	83,00725
RootMxc1	734,1797	2599,363	71,7554
RootMyc1	2865,467	4345,918	34,06533
RootMzc1	32,56761	191,6559	83,00725



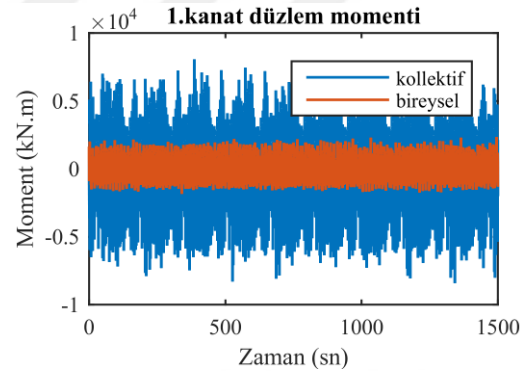
Şekil 3.109. 1. kanat edgewise momenti



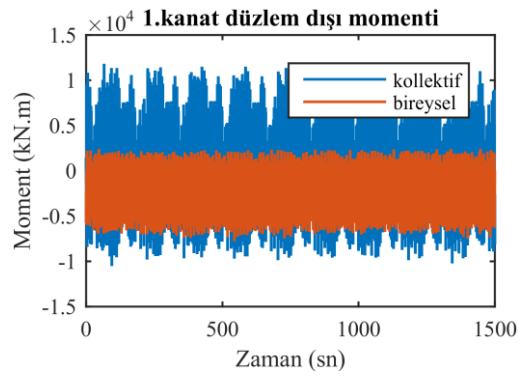
Şekil 3.110. 1. kanat flapwise momenti



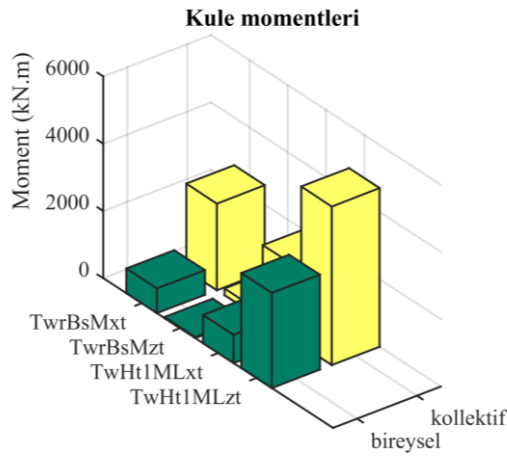
Şekil 3.111. 1. kanat hatve momenti



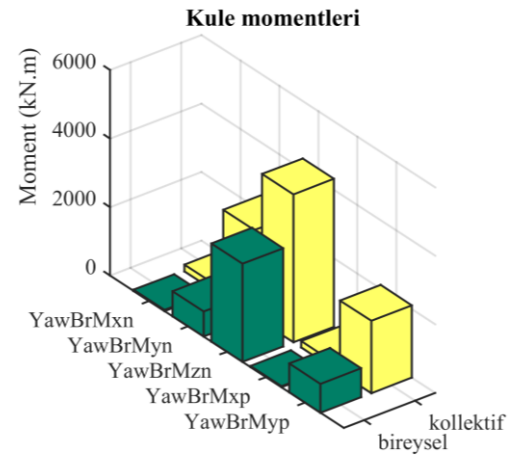
Şekil 3.112. 1. kanat düzlem momenti



Şekil 3.113. 1. kanat düzlem dışı momenti

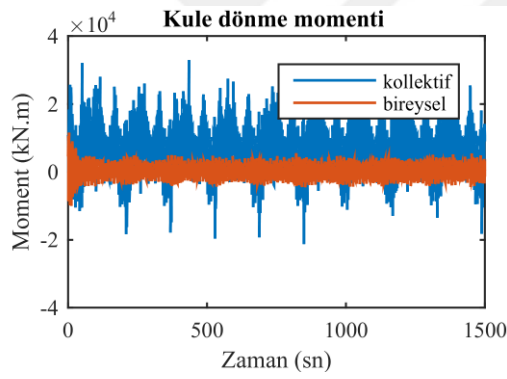


Şekil 3.114. Kule momentleri

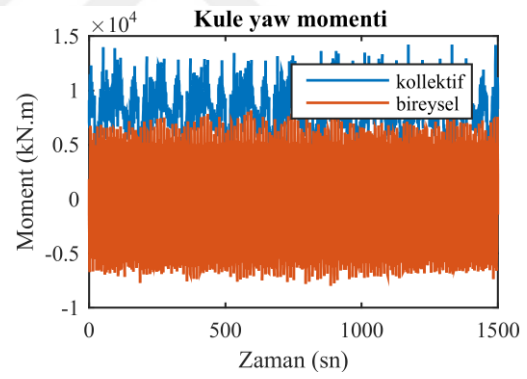


Şekil 3.115. Kule momentleri

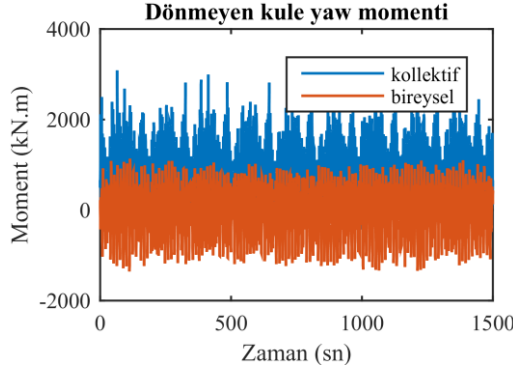
Şekil 3.114 ve 3.115’de kule momentlerinin karşılaştırması vardır.



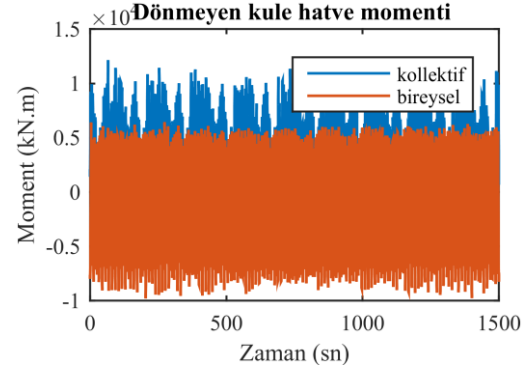
Şekil 3.116. Kule dönme momenti



Şekil 3.117. Kule yaw momenti



Şekil 3.118. Dönmeyen kule yaw momenti



Şekil 3.119. Dönmeyen kule hatve momenti

Şekil 3.116-3.119’da kule momentlerinin zamanla değişim grafiği verilmiştir.

Çizelge 3.10. Kule Momentleri

Moments (kNm)	individual	collective	% reduction
TwrBsMxt	735,4624	2573,347	71,42
TwrBsMzt	32,34672	197,7878	83,64575
TwHt1MLxt	838,8293	2231,766	62,4141
TwHt1MLyt	2822,565	4711,805	40,09588
TwHt1MLzt	32,34672	197,7878	83,64575
YawBrMxn	729,4143	2538,148	71,26195
YawBrMyn	2865,228	4324,47	33,74382
YawBrMzn	32,37449	187,0314	82,69034
YawBrMxp	841,6205	2112,477	60,15954
YawBrMyp	2826,588	4620,097	38,81972

Çizelge 3.10’da bireysel hatve açısı ve kollektif hatve açısı kontrolü ile elde edilen moment değerleri ve bireysel hatve açısı ile yüzde azalma miktarı vardır. Çizelge 3.10’na göre tower base roll moment(TwrBsMxt) %71 oranında, tower base yaw moment(TwrBsMzt) %84 oranında, local tower roll moment(TwHt1MLxt) %62 oranında, local tower pitching moment(TwHt1MLyt) %40 oranında, local tower yaw moment(TwHt1MLzt) %83 oranında, rotating (with nacelle) tower top/yaw bearing

roll moment(YawBrMxn) %71 oranında, , rotating (with nacelle) tower top/yaw bearing pitch moment(YawBrMyn) %34 oranında, tower top/yaw bearing yaw moment(YawBrMzn) %83 oranında, nonrotating tower top/yaw bearing roll moment(YawBrMxp) %60 oranında, nonrotating tower top/yaw bearing pitch moment(YawBrMyp) %35 oranında azalmıştır. Bu durum güç moment dengeleyicinin başarılı bir şekilde kule yüklerini azalttığını gösteriyor.



4.SONUÇLAR

Rüzgâr türbinlerinin çıkış gücü kontrolü ve mekanik yüklerin azaltılması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Mekanik yüklerin azaltılmasında bireysel hatve açısı yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca klasik ve modern kontrol yöntemleri geliştirilen model üzerinde uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Klasik yöntemlerden olan PID kontrol yöntemi ile hem bireysel hatve açılı kontrol yöntemi ile hem de kollektif hatve açılı kontrol yöntemi ile çıkış gücü kararlılığı ve mekanik yüklerin azaltılması konusunda simülasyon yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde bireysel hatve açısı kontrolü ile yapılan çalışmada hem çıkış gücü kontrolünün hemde mekanik yüklerin azaltımının başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmüştür. Ve PID kontrollü hatve açısı kontrolünde bireysel hatve açısı kontrolü tavsiye edilmektedir. Bireysel hatve açısı kontrolü, PID katsayıları iyi bir şekilde ayarlandığı takdirde, hem çıkış gücü kontrolünde hem de mekanik yüklerin azaltılmasında başarılı bir performans göstermiştir.

Modern kontrol yöntemlerinden olan bulanık mantık kontrol yöntemi ile bir denetleyici tasarlanarak, bireysel ve kollektif hatve açısı kontrolleri yapılmış, çıkış gücü kararlılığı ve mekanik yüklerin azaltılması sağlanmıştır. Bulanık mantık denetleyicinin girişi olarak hata ve hatanın türevi seçilmiştir. Çıkış olarak hatve açısındaki değişim miktarı seçilmiştir. Girişlerin bulanık kümeleri 3 adet, çıkışın bulanık kümeleri 6 adet olarak belirlenmiştir. Bulanık kurallar 5 adettir. Bulanık mantık yöntemi olarak Mamdani kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları bulanık mantık denetleyici ile çıkış gücünün başarılı bir şekilde denetlendiğini, bireysel hatve açısı kontrolü ile de mekanik yüklerin başarılı bir şekilde azaltıldığını göstermiştir.

Daha sonra bulanık mantık denetleyici genetik algoritma ile optimize edilmiştir. Optimizasyon için IGA(Intelligent Genetic Algorithm) adı verilen zeki genetik algoritma yapısı geliştirilmiştir. Bu genetik algoritma yapısında lokal minima ve maksimalardan kurtulmak için algoritma yapısına mutasyon ve çaprazlama oranını değiştiren bir yapı eklenmiştir. Bu yapı genetik algoritmanın sonuçlarını takip ederek

lokal bir minima veya maksimaya takıldığını anladığında mutasyon oranını arttırarak buradan kurtulmasını sağlar. Ayrıca çaprazlama nokta sayılarını değiştirerek elde edilen popülasyonun çeşitliliğini temin eder. Bu zeki genetik algoritmanın performansı bu konuda yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılarak üstünlüğü ve başarısı ispat edilmiştir. Daha sonra bu IGA yöntemi ile bulanık mantık denetleyicinin bulanık kümeleri ve kural çizelgesi optimize edilerek daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Optimize edilmiş bulanık mantık denetleyici ile optimize edilmemiş bulanık mantık denetleyicinin sonuçları karşılaştırılarak optimizasyonun sistem kontrolüne kazandırdığı çıkış gücü kararlılığı ve mekanik yüklerin azaltılması grafik ve çizelgeler ile ispat edilmiştir.

Rüzgâr türbininin çıkış gücü kararlılığı ve mekanik yüklerin azaltılmasında bulanık PID kontrol yöntemi kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Bu model ile bireysel ve kollektif hatve açılı kontrol yöntemleri hem çıkış gücü kontrolünde hem de mekanik yüklerin azaltılmasında simüle edilmiştir. Simulasyon sonuçları bulanık PID kontrolör ile hem çıkış gücünün kararlılığını hem de mekanik yüklerin azaltılmasını başarılı bir şekilde sağladığını göstermiştir.

Daha sonra rüzgâr türbinlerinde bireysel hatve açısı kontrolünde çıkış gücü ve mekanik yük arasındaki dengeyi sağlayacak bir bulanık P kontrolör geliştirilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin kanat hatve açısı kontrolündeki hedef; çıkış gücünün kararlı bir halde olmasıdır. Nominal rüzgâr hızının üzerindeki rüzgâr hızlarında, çıkış gücünün kararlılığını mümkün oldukça korumaya çalışmaktır. Fakat rüzgâr türbinlerinin boyutlarının büyümesi ile çıkış gücü kontrolünde mekanik yüklerin de dikkate alınması gerektiği konusunda çalışmalar artmıştır. Mekanik yüklerin bir kısmı için çözüm getiren bireysel hatve açısı kontrolü tavsiye edilmektedir. Bireysel hatve açısını sağlamak için kullanılan kanat momentlerinin çıkış gücü kontrol sistemine ne oranda dahil edileceği konusunda bir çalışma henüz yapılmamıştır. Oysa bu oran kontrol yapısını oldukça etkilemektedir. Oranın fazlalığı momenti iyileştirirken, çıkış gücü kontrolünü kötüleştirmektedir. Oranın düşüklüğü ise iyi bir mekanik yük azaltımı sağlamamaktadır. Bu iki büyüklük arasında denge sağlanarak iyi bir kontrol yapılmış olur. Çıkış gücünün kararlı olmasıyla iyi bir güç kalitesi, momentlerin

azaltımıyla da rüzgâr türbininin faydalı ömrünü arttırma sağlanmış olur. Böylece enerji maliyeti de düşer.

Bulanık P kontrolör, çıkış gücü kalitesini ve kanat moment ortalamasını girişler olarak kabul eder. Çıkışında ise oransal katsayıyı arttıracak, azaltacak veya durduracak bir değer üretir. Böylece sistem çalışmaya başladığında aynen kollektif hatve açısına sahip bir sistem gibi çalışır. Moment değerini kollektif hatve açısına ekleyen katsayı arttıkça bireysel hatve açısına geçiş sağlar. Moment ve güç değerleri istenen seviyeye geldiğinde bu katsayı artışı durdurarak, tamamen bireysel hatve açısı kontrolü ile çalışan bir sisteme dönüşür.

Çizelge 3.11. Denetleyicilerin moment iyileştirmesinde karşılaştırılması

Denetleyicilerin karşılaştırılması	PID	Bulanık mantık	Genetik bulanık	Bulanık PID	Güç moment dengeleyici
RootMxb1	8,477666	13,08836	27,72586	44,417	60,97674
RootMyb1	11,34518	15,62755	36,58203	38,83567	38,75163
RootMzb1	20,4878	18,29787	36,60714	63,30275	83,24607
RootMxc1	9,561129	4,291242	33,4425	27,48331	71,75837
RootMyc1	10,03501	8,081245	24,15819	24,26667	34,06214
RootMzc1	20,4878	18,29787	36,60714	63,30275	83,24607

Çizelge 3.11’de denetleyicilerin moment iyileştirme yüzdeleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.11’den görüldüğü gibi kontrolörler içinde bulanık PID kontrolör moment iyileştirmesinde diğer kontrolörlere göre daha üstündür. Güç-moment dengeleyici yapısı bulanık PID kontrol yapısıyla birlikte çalıştırıldığı zaman daha da mükemmel sonuçlar elde edilmiştir. Mesela 1. kanat, kanat kökündeki edgewise moment azalım miktarı güç-moment dengeleyici yapıda yaklaşık %61 iken, bulanık PID’de %44, genetik bulanık kontrolörde %28, bulanık kontrolörde %13 ve PID kontrolörde %8 civarındadır. Bu da güç-moment dengeleyici yapının daha iyi bir performans sağladığını gösteriyor.

KAYNAKLAR

- [1] H. De Battista, R. Mantz, and C. Christiansen, "Energy-based approach to the output feedback control of wind energy systems," *International Journal of Control*, vol. 76, pp. 299-308, 2003.
- [2] W. Leithead, S. De la Salle, and D. Reardon, "Role and objectives of control for wind turbines," in *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, 1991, pp. 135-148.
- [3] F. D. Bianchi, H. De Battista, and R. J. Mantz, *Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design*: Springer Science & Business Media, 2006.
- [4] E. Bossanyi, "Individual blade pitch control for load reduction," *Wind energy*, vol. 6, pp. 119-128, 2003.
- [5] E. Bossanyi, "Further load reductions with individual pitch control," *Wind energy*, vol. 8, pp. 481-485, 2005.
- [6] T. J. Larsen, H. A. Madsen, and K. Thomsen, "Active load reduction using individual pitch, based on local blade flow measurements," *Wind Energy*, vol. 8, pp. 67-80, 2005.
- [7] K. Selvam, S. Kanev, J. W. van Wingerden, T. Van Engelen, and M. Verhaegen, "Feedback–feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 19, pp. 72-91, 2009.
- [8] H. Namik and K. Stol, "Performance analysis of individual blade pitch control of offshore wind turbines on two floating platforms," *Mechatronics*, vol. 21, pp. 691-703, 2011.
- [9] E. A. Bossanyi, P. A. Fleming, and A. D. Wright, "Validation of individual pitch control by field tests on two-and three-bladed wind turbines," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 1067-1078, 2013.
- [10] H. Camblong, S. Nourdine, I. Vechiu, and G. Tapia, "Comparison of an island wind turbine collective and individual pitch LQG controllers designed to alleviate fatigue loads," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 6, pp. 267-275, 2012.

- [11] H. Wang, W. Wang, and B. Liang, "Individual Pitch Controller for Power Quality Improvement on Megawatt Direct-Drive Wind Turbines," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific*, 2012, pp. 1-4.
- [12] Y. Zhang, M. Cheng, and Z. Chen, "Load mitigation of unbalanced wind turbines using PI-R individual pitch control," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, pp. 262-271, 2014.
- [13] Y. Zhang, Z. Chen, and M. Cheng, "Proportional resonant individual pitch control for mitigation of wind turbines loads," *IET Renewable Power Generation*, vol. 7, pp. 191-200, 2013.
- [14] D. Zhang, P. Cross, X. Ma, and W. Li, "Improved control of individual blade pitch for wind turbines," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 198, pp. 8-14, 2013.
- [15] F. Yang, Q.-w. Song, L. Wang, S. Zuo, and S.-s. Li, "Wind and Wave Disturbances Compensation to Floating Offshore Wind Turbine Using Improved Individual Pitch Control Based on Fuzzy Control Strategy," in *Abstract and Applied Analysis*, 2014.
- [16] H. Namik and K.-J. Stol, "Individual Blade Pitch Control of a Spar-Buoy Floating Wind Turbine," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 214-223, 2014.
- [17] Y. Zhang, Z. Chen, W. Hu, and M. Cheng, "Flicker mitigation by individual pitch control of variable speed wind turbines with DFIG," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 20-28, 2014.
- [18] I. P. Girsang and J. S. Dhupia, "Pitch controller for wind turbine load mitigation through consideration of yaw misalignment," *Mechatronics*, vol. 32, pp. 44-58, 2015.
- [19] J. Hindmarsh and R. Rose, "A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations," *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 221, pp. 87-102, 1984.
- [20] D. Decamp, S. Snow, J. Prat, S. Cartwright, W. Yan, K. Kleinknecht, *et al.*, "ALEPH," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A*, vol. 294, pp. 121-178, 1990.

- [21] F. Farret and L. Freris, "Minimisation of uncharacteristic harmonics in HVDC convertors through firing angle modulation," in *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*, 1990, pp. 45-52.
- [22] R. Hedbeg, "Mean means and their correction," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 44, pp. 922-923, 1995.
- [23] O. Warneke, *Use of a Double-Fed Induction Machine in the Growian Large Wind Energy Converter*, 1984.
- [24] J. Rizk and M. Nagrial, "Design of permanent-magnet generators for wind turbines," in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. IPEMC 2000. The Third International*, 2000, pp. 208-212.
- [25] G. Bywaters, V. John, J. Lynch, P. Mattila, G. Norton, J. Stowell, *et al.*, "Northern Power Systems WindPACT drive train alternative design study report," *National Renewable Energy Laboratory*, vol. 1617, 2005.
- [26] O. Wasynczuk, D. Man, and J. Sullivan, "Dynamic behavior of a class of wind turbine generators during random wind fluctuations," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, pp. 2837-2845, 1981.
- [27] Z. Civelek, "Bulanık PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbininin Hatve Açısının Kontrolü," p. 119, 2013.
- [28] F. Golnaraghi and B. Kuo, "Automatic control systems," *Complex Variables*, vol. 2, pp. 1-1, 2009.
- [29] K. Ogata, *System dynamics* vol. 3: Prentice Hall New Jersey, 1998.
- [30] K. Warwick, *Control systems: an introduction*: Prentice Hall International (UK) Ltd., 1989.
- [31] W. Pedrycz, "Processing in relational structures: Fuzzy relational equations," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 40, pp. 77-106, 1991.
- [32] D. P. Filev and R. R. Yager, "On the analysis of fuzzy logic controllers," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 68, pp. 39-66, 1994.
- [33] M. Braae and D. Rutherford, "Theoretical and linguistic aspects of the fuzzy logic controller," *Automatica*, vol. 15, pp. 553-577, 1979.
- [34] T. Xiangchu and T. Chengyuan, "A new approach to fuzzy control," *Fuzzy Logic in Knowledge Based Systems*, pp. 307-315, 1988.
- [35] U. Höhle and L. N. Stout, "Foundations of fuzzy sets," *Fuzzy sets and systems*, vol. 40, pp. 257-296, 1991.

- [36] F. Bouslama and A. Ichikawa, "Fuzzy control rules and their natural control laws," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 48, pp. 65-86, 1992.
- [37] W. Kickert and H. V. N. Lemke, "Application of a fuzzy controller in a warm water plant," *Automatica*, vol. 12, pp. 301-308, 1976.
- [38] M. B. Stock, "Fuzzy Logic Control of Blood Pressure during Anesthesia."
- [39] T. Heckenthaler and S. Engell, "Approximately time-optimal fuzzy control of a two-tank system," *IEEE Control Systems*, vol. 14, pp. 24-30, 1994.
- [40] M. Mizumoto, "Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods," *Information Sciences*, vol. 45, pp. 129-151, 1988.
- [41] Y. Shi and R. C. Eberhart, "Empirical study of particle swarm optimization," in *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*, 1999.
- [42] K. Parsopoulos and M. Vrahatis, "Initializing the particle swarm optimizer using the nonlinear simplex method," *Advances in intelligent systems, fuzzy systems, evolutionary computation*, vol. 216, pp. 1-6, 2002.
- [43] B. Bhushan and S. S. Pillai, "Particle swarm optimization and firefly algorithm: performance analysis," in *Advance Computing Conference (IACC), 2013 IEEE 3rd International*, 2013, pp. 746-751.
- [44] M. O. Ali, S. Koh, K. Chong, and A. S. Hamoodi, "Design a PID controller of BLDC motor by using hybrid genetic-immune," *Modern Applied Science*, vol. 5, p. p75, 2011.
- [45] J. Zhang, J. Zhuang, and H. Du, "Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers," *Information Sciences*, vol. 179, pp. 1007-1018, 2009.
- [46] J. Zhang, H. S.-H. Chung, and W.-L. Lo, "Clustering-based adaptive crossover and mutation probabilities for genetic algorithms," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 326-335, 2007.
- [47] T. Bäck and M. Schütz, "Intelligent mutation rate control in canonical genetic algorithms," in *Foundations of intelligent systems*, ed: Springer, 1996, pp. 158-167.
- [48] D. Thierens, "Adaptive mutation rate control schemes in genetic algorithms," in *Evolutionary Computation, 2002. CEC'02. Proceedings of the 2002 Congress on*, 2002, pp. 980-985.

- [49] Z. Civelek, E. Çam, M. Lüy, and H. Mamur, "Proportional–integral–derivative parameter optimisation of blade pitch controller in wind turbines by a new intelligent genetic algorithm," *parameters*, vol. 29, p. 30, 2016.
- [50] P. E. Sørensen, A. D. Hansen, F. Iov, F. Blaabjerg, and M. H. Donovan, *Wind farm models and control strategies*, 2005.
- [51] P. M. Bongers, G. E. Van Baars, and S. Dijkstra, "Load reduction in a wind energy conversion system using an H_{∞} controller," in *Control Applications, 1993., Second IEEE Conference on*, 1993, pp. 965-970.
- [52] G. Lalor, A. Mullane, and M. O'Malley, "Frequency control and wind turbine technologies," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 1905-1913, 2005.
- [53] P. E. Sørensen, A. D. Hansen, K. Thomsen, T. Buhl, P. E. Morthorst, L. H. Nielsen, *et al.*, *Operation and control of large wind turbines and wind farms. Final report*, 2005.
- [54] Z. Civelek, E. Çam, M. Lüy, and G. Görel, "A NEW FUZZY CONTROLLER FOR ADJUSTING OF PITCH ANGLE OF WIND TURBINE," *The Online Journal of Science and Technology-July*, vol. 6, 2016.
- [55] Ç. Elmas, "Yapay zeka uygulamaları," *Seçkin Yayıncılık, Ankara*, pp. 379-401, 2007.
- [56] Z. Civelek, M. Lüy, E. Çam, and N. Barışçı, "Control of Pitch Angle of Wind Turbine by Fuzzy Pid Controller," *Intelligent Automation & Soft Computing*, pp. 1-9, 2015.

EKLER

EK 1

Moment kısaltmalarının açıklamaları

Moment Ölçümleri	Açıklama
RootMxb1	1. kanatın kanat kökündeki yanlamasına-edgewise moment
RootMyb1	1. kanatın kanat kökündeki savurma-flapwise momenti
RootMzb1	1. kanatın kanat kökündeki hatve-pitch momenti
RootMxc1	1. kanatın kanat kökündeki düzlem-in plane momenti
RootMyc1	1. kanatın kanat kökündeki düzlem dışı-out of plane momenti
RootMxc2	2. kanatın kanat kökündeki düzlem-in plane momenti
RootMyc2	2. kanatın kanat kökündeki düzlem dışı-out of plane momenti
RootMzc2	2. kanatın kanat kökündeki hatve-pitch momenti
RootMxb2	2. kanatın kanat kökündeki yanlamasına-edgewise moment
RootMyb2	2. kanatın kanat kökündeki savurma-flapwise momenti
RootMxc3	3. kanatın kanat kökündeki düzlem-in plane momenti
RootMyc3	3. kanatın kanat kökündeki düzlem dışı-out of plane momenti
RootMzc3	3. kanatın kanat kökündeki hatve-pitch momenti
RootMxb3	3. kanatın kanat kökündeki yanlamasına-edgewise moment
RootMyb3	3. kanatın kanat kökündeki savurma-flapwise momenti
TwrBsMxt	Kule taban yuvarlanma-roll momenti
TwrBsMzt	Kule taban yaw momenti
YawBrMyn	Dönen (nacelle ile) kule-tepe/yaw burulma hatve-pitch momenti
YawBrMzn	Kule-tepe/yaw burulma yaw momenti
YawBrMxp	Dönmeyen (nacelle ile) kule-tepe/yaw burulma yuvarlanma-roll momenti

EK 2

Rüzgâr türbini ve jeneratör parametreleri

Rated power of wind turbine	1.5	MW
Rotor diameter	70	m
Number of blade	3	
Hub height	84	m
Max/min pitch angle	90/0	degree
Max pitch rate	9	Degree/s
Rated rotor speed	45	rpm
Gearbox ratio	1/40	
Cut-in/cut-out wind speed	3/25	m/s
Generator rated capacity	1.5	MW
Rated stator voltage	690	V
Rated frequency	50	Hz

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Zafer CİVELEK
Doğum Tarihi : 01.10.1968
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lisans : Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik
Mühendisliği 1985-1989

Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği 2011-2013

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

Ankara Üniversitesi Çankırı Meslek Yüksek Okulu	1990-1996
Çankırı Karatekin Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu	2011-

Yayınları (SCI) :

Z. Civelek, M. Lüy, E. Çam, and N. Barışçı, "Control of Pitch Angle of Wind Turbine by Fuzzy Pid Controller," Intelligent Automation & Soft Computing, pp. 1-9, 2015.

Z. Civelek, E. Çam, M. Lüy, and H. Mamur, "Proportional–integral–derivative parameter optimisation of blade pitch controller in wind turbines by a new intelligent genetic algorithm," parameters, vol. 29, p. 30, 2016.

Yayınları (Diğer) :

Z. Civelek, E. Çam, M. Lüy, and G. Görel, "A New Fuzzy Controller for Adjusting of Pitch Angle of Wind Turbine," The Online Journal of Science and Technology- July, vol. 6, 2016.

“Rüzgâr Türbinlerinin Kanat Hatve Açılarının PI Kontrolör ile Kontrolü”, 2nd International Symposium on Enviroment and Morality, 24-26 October 2014, Adıyaman, Turkey

"Genetic-Based PI Controller for Cooling Independent PV Systems", 1st International Conference on Environmental Science and Technology (ICOEST), Sarajevo-Bosnia and Herzegovina, September 9-13, 2015.

Araştırma Alanları :

Kontrol sistemleri, sezgisel kontrol, bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritma, rüzgâr türbinleri