

**SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ
RÜZGAR SANTRALİ**

Soner ÇELİKDEMİR

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR
ARALIK-2014**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ
RÜZGAR SANTRALİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Soner ÇELİKDEMİR

(102113102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 Ekim 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Aralık 2014

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet CEBECİ (F.Ü)

Doç. Dr. Sami EKİCİ (F.Ü)

ARALIK-2014

ÖNSÖZ

Bu çalışmadaki önemli katkılarından ve desteklerinden dolayı öncelikle danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mehmet CEBECİ ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mahmut Temel ÖZDEMİR hocalarıma ve sevgili eşim Meltem YAVUZ ÇELİKDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi'ne FÜBAP-MF.12.20 no.lu proje kapsamında yaptığı desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Soner ÇELİKDEMİR

Elazığ-2014

İÇİNDEKİLER

	Numara
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XI
RESİMLER LİSTESİ	XII
SİMGELER LİSTESİ	XIII
KISALTMALAR LİSTESİ	XV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin İçeriği.....	3
2. RÜZGAR ENERJİSİ VE RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMLERİ	5
2.1. Rüzgar Enerjisine Genel Bakış.....	5
2.1.1. Rüzgar Enerjisinin Oluşumu	5
2.1.2. Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi	5
2.1.3. Rüzgar Enerjisinin Çevresel Faktörleri	6
2.2. Rüzgar Türbin Sistemleri.....	7
2.2.1. Eksenlerine Göre Rüzgar Türbinleri.....	7
2.2.1.1. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri	7
2.2.1.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	8
2.2.2. Rüzgar Hızlarına Göre Rüzgar Türbinleri	9
2.2.2.1. Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri	9
2.2.2.2. Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri	9
2.2.3. Kanat Sayılarına Göre Rüzgar Türbinleri.....	11
2.2.3.1. Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri	11
2.2.3.2. Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri	11
2.2.3.3. Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri	12
2.2.3.4. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri	12
2.2.4. Rüzgarı Alma Yönlerine Göre Rüzgar Türbinleri.....	13
2.2.4.1. Rüzgarı Önden Alan Rüzgar Türbinleri	13

2.2.4.2. Rüzgarı Arkadan Alan Rüzgar Türbinleri	13
2.2.5. Güç Kontrol Sistemlerine Göre Rüzgar Türbinleri	14
2.2.5.1. Durma Kontrollü Rüzgar Türbinleri.....	14
2.2.5.2. Eğim Kontrollü Rüzgar Türbinleri	15
2.2.6. Şebeke Bağlantı Durumlarına Göre Rüzgar Türbinleri.....	15
2.2.6.1. Şebeke Entegrasyonlu Rüzgar Türbinleri.....	15
2.2.6.2. Şebeke Entegrasyonsuz Rüzgar Türbinleri	16
3. RÜZGAR TÜRBİN EKİPMANLARI	18
3.1. Rüzgar Türbin Elemanları	19
3.2. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Dönüşüm Sistemleri ve Kontrol Teknikleri	20
3.2.1. Sabit Hız ve Sabit Frekans	20
3.2.2. Değişken Hız ve Sabit Frekans.....	21
3.2.3. Değişken Hız ve Değişken Frekans.....	21
3.3. Güç Elektroniği Sistemleri	21
3.3.1. Soft - Starter	22
3.3.2. Kapasitör Grubu	22
3.3.3. Doğrultucular ve Eviriciler.....	22
3.3.4. Frekans Konverterleri	23
4. RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELDE EDİLEBİLECEK MEKANİK GÜÇ HESABI VE GÜÇ DAĞILIMLARI.....	24
4.1. Rüzgar Enerjisinden Elde Edilebilecek Mekanik Güç Hesabı	26
4.2. Weibull Dağılımı	29
4.3. Rüzgar Türbin Kanat Uç Hız Oranı.....	30
5. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR ÇEŞİTLERİ.....	32
5.1. Doğru Akım Generatörleri.....	32
5.2. Asenkron Generatörler	32
5.2.1. Sincap Kafesli Asenkron Generatörler	33
5.2.2. Rotoru Sargılı Asenkron Generatörler.....	34
5.2.2.1. OptiSlip Asenkron Generatörler	34
5.2.2.2. Çift Beslemeli Asenkron Generatörler	34
5.3. Senkron Generatörler.....	35
5.3.1. Rotoru Sargılı Senkron Generatörler.....	36
5.3.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörler.....	36

5.3.2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinaların Sınıflandırılması	37
5.3.2.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina Tasarımları	37
5.3.2.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinanın Avantaj ve Dezavantajları.....	43
5.3.2.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Matematiksel Modeli.....	44
6. SİSTEMİN PROTOTİP UYGULAMASI VE BENZETİM ÇALIŞMASI	47
6.1. Sistemin Prototip Uygulaması	47
6.1.1. Rüzgar Türbin Seçimi.....	47
6.1.2. Rüzgar Fanı ve Sürücü Seçimi	49
6.1.3. Hava Kanalı Tasarımı	50
6.1.4. İnverter ve Akü Seçimleri.....	51
6.1.5. Sistemin Montajı	52
6.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgar Santrali Sisteminin Benzetim Çalışması	53
6.2.1. Sistemin Matlab Benzetim Çalışması.....	53
6.2.2. Sistemin Matlab Benzetim Sonuçları	56
6.3. Deneysel Bulgular	68
6.3.1. Rüzgar Hız Ölçüm Sonuçları.....	68
6.3.2. Doğrultucu ve Gerilim Regülatörü Çıkışına Uygulanan Omik Yük Deneysel Sonuçları.....	73
6.3.3. İnverter Çıkışına Uygulanan Omik Yük Deney Sonuçları	76
6.3.4. İnverter Çıkışına Uygulanan İndüktif Yük Deney Sonuçları	77
6.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Çıkışının Benzetim Sonuçları İle Deneysel Bulguların Karşılaştırılması.....	78
6.5. İnverter Çıkışının Benzetim Sonuçları İle Deneysel Bulguların Karşılaştırılması...	82
7. SONUÇLAR.....	92
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ	98

ÖZET

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali projesinin gerçekleştirilme amacı; atıkları ile çevreye zararlı fosil kaynaklı yakıtlardan tamamen uzak, çevre dostu ve en önemlisi yenilenebilir enerji kaynağı ile kaliteli elektrik enerjisi üretmek ve sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santralini modelleyerek kullanım alanlarının yaygınlaşmasına katkı sağlamaktır.

Bu amaçlar doğrultusunda, sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulama çalışması yapılmış ve bu uygulama çalışması sonucu elde edilen deneysel bulgular ile bilgisayar benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışma başlangıcında, rüzgar enerjisinin oluşumu, tarihsel gelişim süreçleri, olumlu ve olumsuz çevre faktörleri belirtilmiştir. Çalışmanın devamında ise rüzgar türbin sistemleri farklı özelliklerine göre sınıflandırılmıştır.

İlerleyen bölümlerde rüzgar türbin sistemlerinde kullanılan generatör sistemleri açıklanmış, birbirlerine göre bu generatör sistemlerinin avantaj ve dezavantajları sıralanmıştır. Sistemin prototip çalışması için sürekli mıknatıslı senkron generatör kullanılmasına karar verildikten sonra sürekli mıknatıslı senkron generatör modelinin oluşturulması için matematiksel denklemleri verilmiştir. Ayrıca rüzgar enerjisinin mekaniksel enerjiye dönüşümü ifade edildikten sonra rüzgar enerjisinden maksimum seviyede faydanılması için gerekli ifadeler belirtilmiştir.

Yukarıda bahsi geçen tanımlamalardan sonra sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulama çalışması için gerekli devre eleman seçim parametreleri açıklanarak, sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santralinin montajı yapılmıştır. Sistem modeli gerçekleştirildikten sonra deneysel çalışmalara başlanılmıştır. Bu süreç içerisinde tasarımı yapılan sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali modelinin Matlab/Simulink bilgisayar programında benzetim çalışması da gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde ise sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santralinin prototip çalışmasının deneysel bulguları ile benzetim çalışması sonuçları karşılaştırılmıştır.

Ayrıca elektrik enerji üretimi gerçekleştirilirken; yüksek verimli bir sistemin tasarlanması, çıkışının kontrol edilebilir olması ve çevresel faktörlere karşı hassas olması gibi önemli parametrelere dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Enerjisi, Rüzgar Türbinleri ve Kullanılan Generatör Çeşitleri, Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgar Santralini Matlab Benzetimi

SUMMARY

Permanent Magnet Synchronous Generator With Wind Plant

The objective of carrying out wind plant project with permanent magnetic synchronous generator is to generate quality electric energy with especially renewable energy source which is environment-friendly and far from the fossil-sourced fuel oils which may give harm to environment and also to make contributions to increase the usage areas of wind plants by modelling wind plants with permanent magnetic synchronous generator.

In line with these goals, wind plants with permanent magnetic synchronous generator have been implemented and the resulting experimental findings have been compared to computer simulation results.

In the beginning of the study, formation of wind energy, historical development processes, positive and negative environmental factors have been determined. In continuation of the study, wind turbine systems are classified according to their different characteristics.

Subsequently, generator systems used in wind plants have been explained and advantages and disadvantages are listed comparatively. After it has been decided that permanent magnetic synchronous generator should be used, mathematical equations have been provided for the creation of permanent magnetic synchronous generator model. In addition, after the conversion of wind energy into mechanical energy has been expressed, necessary statements have been described for the maximal use of wind energy.

Following the above mentioned definitions, parameters for selecting necessary circuit elements for wind plants with permanent magnetic synchronous generator have been explained and wind plant with permanent magnetic synchronous generator has been erected. After the system model, experimental studies have been commenced. Throughout this process, wind plant with permanent magnetic synchronous generator has been simulated in Matlab / Simulink computer software.

In the last part of the study, experimental findings of wind plants with permanent magnetic synchronous generator have been compared to results of simulation work.

Furthermore, while electric energy is generated, attention should be paid to parameters such as design of a highly effective system, having controllable output and being sensitive to environmental factors.

Key words: Wind Energy, Wind Turbines and Generator Types, Matlab Simulation of Wind plants with permanent magnetic synchronous generator

ŞEKİLLER LİSTESİ

Numara

Şekil 4.1. Havanın rotor çevresindeki akışı.....	24
Şekil 4.2. C_p 'nin V_3/V_1 'in fonksiyonu olarak çizilmiş eğrisi [3].....	26
Şekil 4.3. Rüzgar türbinlerinde rüzgar hızına bağlı güç yoğunluğu değişimi	28
Şekil 4.4. Farklı kanat açılarına göre C_p 'nin değişimi	29
Şekil 4.5. Weibull dağılım grafiği [6].....	30
Şekil 4.6. Farklı kanat yapılarında $C_p - \lambda$ değişim grafiği [6]	31
Şekil 5.1. Asenkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması [1]	33
Şekil 5.2. Senkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması [1]	36
Şekil 5.3. Mıknatısların rotor yüzeyine farklı yerleştirilmeleri a) Mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmesi b) Mıknatısların rotor oyuklarına yerleştirilmesi	40
Şekil 5.4. Mıknatısların rotor yüzeyine farklı şekillerde gömülü olarak yerleştirilmesi a) Radyal yerleştirilmiş gömülü mıknatıs yapısı b) Dairesel yerleştirilmiş gömülü mıknatıs yapısı.....	42
Şekil 5.5. Rotor kısa devre çubuklarının bir senkron makina kesitindeki gösterimi.....	42
Şekil 6.1. Sistemin prototip uygulama şeması.....	47
Şekil 6.2. Rüzgar türbininin rüzgar hızına göre çıkış gücünün değişimi	48
Şekil 6.3. Hava kanalı tasarımı.....	51
Şekil 6.4. Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali benzetimi.....	53
Şekil 6.5. Sürekli mıknatıslı senkron generatör şeması.....	54
Şekil 6.6. Akım bilgisinin şeması.....	55
Şekil 6.7. Gerilim bilgisinin şeması	55
Şekil 6.8. Harmonik bilgisinin şeması.....	56
Şekil 6.9. İnverter şeması	56
Şekil 6.10. Rüzgar hızının zaman ile değişimi	57
Şekil 6.11. Momentin zaman ile değişimi	57
Şekil 6.12. Generatör rotor hızının zaman ile değişimi.....	57
Şekil 6.13. Generatör gücünün zaman ile değişimi	58
Şekil 6.14. Generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi	58
Şekil 6.15. Generatör çıkış gerilim frekansının zaman ile değişimi.....	58
Şekil 6.16. Generatör çıkışının 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi	59
Şekil 6.17. Akü geriliminin zaman ile değişimi	59

Şekil 6.18. İnverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi.....	59
Şekil 6.19. İnverter çıkış frekansının zaman ile değişimi.....	60
Şekil 6.20. İki seviyeli inverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi	60
Şekil 6.21. İki seviyeli inverter çıkış 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi	60
Şekil 6.22. İki seviyeli inverter çıkış 5.Harmoniğinin zaman ile değişimi	61
Şekil 6.23. Üç seviyeli inverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi.....	61
Şekil 6.24. Üç seviyeli inverter çıkış 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi	61
Şekil 6.25. Üç seviyeli inverter çıkış 5.Harmoniğinin zaman ile değişimi	62
Şekil 6.26. Rüzgar hızının zaman ile değişimi	63
Şekil 6.27. Momentin zaman ile değişimi	63
Şekil 6.28. Generatör rotor hızının zaman ile değişimi.....	63
Şekil 6.29. Generatör gücünün zaman ile değişimi	64
Şekil 6.30. Generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi	64
Şekil 6.31. Generatör çıkış gerilim frekansının zaman ile değişimi.....	64
Şekil 6.32. Generatör çıkış 3. Harmoniğinin zaman ile değişimi.....	65
Şekil 6.33. Akü geriliminin zaman ile değişimi	65
Şekil 6.34. İnverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi.....	65
Şekil 6.35. İnverter çıkış frekansının zaman ile değişimi.....	66
Şekil 6.36. İki seviyeli inverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi	66
Şekil 6.37. İki seviyeli inverter çıkış 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi	66
Şekil 6.38. İki seviyeli inverter çıkış 5.Harmoniğinin zaman ile değişimi	67
Şekil 6.39. Üç seviyeli inverter çıkış gerilimin zaman ile değişimi.....	67
Şekil 6.40. Üç seviyeli inverter çıkış 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi	67
Şekil 6.41. Üç seviyeli inverter çıkış 5.Harmoniğinin zaman ile değişimi	68
Şekil 6.42. 280 d/d için rüzgar hızının hava kanalındaki değişimi	70
Şekil 6.43. 392 d/d için rüzgar hızının hava kanalındaki değişimi	70
Şekil 6.44. 504 d/d için rüzgar hızının hava kanalındaki değişimi	71
Şekil 6.45. 616 d/d için rüzgar hızının hava kanalındaki değişimi	71
Şekil 6.46. Devir sayısına bağlı ortalama rüzgar hızının değişimi.....	73
Şekil 6.47. 644 d/d için doğrultucu çıkış gerilimin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)	76
Şekil 6.48. 644 d/d için gerilim regülatörü çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	76

Şekil 6.49. 280 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).	79
Şekil 6.50. 280 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	79
Şekil 6.51. 392 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).	79
Şekil 6.52. 392 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	80
Şekil 6.53. 504 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).	80
Şekil 6.54. 504 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	80
Şekil 6.55. 616 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).	81
Şekil 6.56. 616 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	81
Şekil 6.57. 400 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	82
Şekil 6.58. 400 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)	82
Şekil 6.59. 400 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)	83
Şekil 6.60. 400 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).....	83
Şekil 6.61. 550 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	83
Şekil 6.62. 550 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)	84
Şekil 6.63. 550 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)	84
Şekil 6.64. 550 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).....	84
Şekil 6.65. Motor ve 400 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	85
Şekil 6.66. Motor ve 400 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)	85
Şekil 6.67. Motor ve 400 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)	85
Şekil 6.68. Motor ve 400 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)	86
Şekil 6.69. Motor ve 550 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	86
Şekil 6.70. Motor ve 550 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)	86
Şekil 6.71. Motor ve 550 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)	87
Şekil 6.72. Motor ve 550 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)	87

Şekil 6.73. 0 Ω 'dan 550 Ω 'a artan yük için gerilimin efektif değerinin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)	87
Şekil 6.74. 0 Ω 'dan 550 Ω 'a artan yük için gerilimin efektif değerinin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).....	88
Şekil 6.75. 0 Ω 'dan 550 Ω 'a artan yük için akımın efektif değerinin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)	88
Şekil 6.76. 0 Ω 'dan 550 Ω 'a artan yük için akımın efektif değerinin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).....	88
Şekil 6.77. 550 Ω 'dan 400 Ω 'a azalıp tekrar 550 Ω 'a artan yük için gerilimin efektif değerinin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü).....	89
Şekil 6.78. 550 Ω 'dan 400 Ω 'a azalıp tekrar 550 Ω 'a artan yük için gerilimin efektif değerinin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).....	89
Şekil 6.79. 550 Ω 'dan 400 Ω 'a azalıp tekrar 550 Ω 'a artan yük için akımın efektif değerinin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)	89
Şekil 6.80. 550 Ω 'dan 400 Ω 'a azalıp tekrar 550 Ω 'a artan yük için akımın efektif değerinin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu).....	90

TABLÖLAR LİSTESİ

	Numara
Tablo 2.1 Mevcut enerji üretim sistemlerinin çevresel etkileri [5]	7
Tablo 2.2. Çeşitli rüzgar türbin modellerinin karşılaştırılması.....	16
Tablo 4.1. Kanat sayısına bağlı uç hız oranı değişimleri [6].....	31
Tablo 6.1. Rüzgar türbin parametreleri	47
Tablo 6.2. Aksiyel fanın nominal parametreleri.....	49
Tablo 6.3. Değişken hız kademelerine göre anlık ortalama rüzgar hız değerleri.....	72
Tablo 6.4. Doğrultucu çıkışına uygulanan omik yükler için akım ve gerilim değerlerinin değişimi	74
Tablo 6.5. Gerilim regülatörü çıkışına uygulanan omik yükler için akım ve gerilim değerlerinin değişimi	75
Tablo 6.6. İnverter çıkışına uygulanan omik yükler için akım ve gerilim değerleri	77
Tablo 6.7. Motor yük parametreleri.....	77
Tablo 6.8. İnverter çıkışına uygulanan indüktif yükler için akım ve gerilim değerleri.....	77
Tablo 6.9. Sürekli mıknatıslı senkron generatörün farklı hızlardaki çıkış değerleri	78

RESİMLER LİSTESİ

Resim 2-1. a) Düşey eksenli rüzgar türbin modeli [49] b) Yatay eksenli rüzgar türbin modeli [49]	8
Resim 2-2. Farklı kanat sayılarındaki rüzgar türbin modelleri a) İki kanatlı rüzgar türbin modeli b) Üç kanatlı rüzgar türbin modeli c) Çok kanatlı rüzgar türbin modeli.....	13
Resim 2-3. a) Rüzgarı önden alan türbin modeli b) Rüzgarı arkadan alan türbin modeli.....	14
Resim 3-1. Bir rüzgar türbinini oluşturan elemanlar ve konumları [28]	20
Resim 6-1. Rüzgar türbinin görüntüsü	48
Resim 6-2. Aksiyel fan ve sürücü görüntüsü.....	50
Resim 6-3. Hava kanalı ve elektrik pano görüntüsü.....	51
Resim 6-4. Gerilim regülatörü, akü ve inverter görüntüsü.....	52
Resim 6-5. Sistemin son halinin görüntüsü	53
Resim 6-6. Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininin montajının yapılacağı kısım	69

SİMGELER LİSTESİ

q	=	Birim hacim için havanın yoğunluğu (kg/m^3)
V_1	=	Türbine giren rüzgarın hızı (m/sn)
V_2	=	Türbinden geçen rüzgarın hızı (m/sn)
V_3	=	Türbinden çıkan rüzgarın hızı (m/sn)
V_a	=	Hava hacmi elemanı
m	=	Rotordan geçen havanın kütlesi
$P_{w\max}$	=	Rüzgar türbininden elde edilecek maksimum güç
P_0	=	Rüzgar gücü
R	=	Kanat çapı (m)
A	=	Süpürme alanı (m^2)
λ	=	Tepe uç hız oranı (m/sn)
β	=	Kanat açısı
C_p	=	Performans katsayısı
V	=	Rüzgar hızı (m/sn)
E	=	Kütle ve hıza bağlı kinetik enerji denklemi
E_k	=	Akışkan yoğunluğuna bağlı olarak kinetik enerji
c	=	Ölçek değişkeni
k	=	Şekil değişkeni
ω_r	=	Açısal hız (rad/sn)
$\dot{M}$	=	Kütlesel debi
$\dot{V}$	=	Hacimsel debi
U_a	=	Stator a-faz gerilimi (V)
U_b	=	Stator b-faz gerilimi (V)
U_c	=	Stator c-faz gerilimi (V)
i_a	=	Stator a- faz akımı (A)
i_b	=	Stator b- faz akımı (A)
i_c	=	Stator c- faz akımı (A)
L_{aa}	=	3 Faza ait stator öz endüktansları (H)
L_{ab}	=	3 Faza ait stator ortak endüktansları (H)
L_{ac}	=	3 Faza ait stator ortak endüktansları (H)
L_{ba}	=	3 Faza ait stator ortak endüktansları (H)

L_{bb}	=	3 Faza ait stator öz endüktansları (H)
L_{bc}	=	3 Faza ait stator ortak endüktansları (H)
L_{ca}	=	3 Faza ait stator ortak endüktansları (H)
L_{cb}	=	3 Faza ait stator ortak endüktansları (H)
L_{cc}	=	3 Faza ait stator öz endüktansları (H)
ψ_{ma}	=	Rotor a - fazının mıknatıs akısı (ω)
ψ_{mb}	=	Rotor b - fazının mıknatıs akısı (ω)
ψ_{mc}	=	Rotor c - fazının mıknatıs akısı (ω)
i_d	=	d - eksenî akımı (A)
i_q	=	q - eksenî akımı (A)
V_d	=	d - eksenî gerilimi (V)
V_q	=	q - eksenî gerilimi (V)
R_s	=	Stator direnci (Ω)
R_l	=	Yük direnci (Ω)
L_m	=	Manyetik indüktansların toplamı
T_e	=	Elektriksel moment
T_m	=	Mekanik moment
J	=	Eylemsizlik momenti
B_m	=	Manyetik geçirgenlik
$2P$	=	Kutup çifti sayısı

KISALTMALAR LİSTESİ

PMSG	=	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
PMSM	=	Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina
SCIG	=	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
DFIG	=	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
EESG	=	Elektriksel Uyartımlı Senkron Generatör
BMİDÇS	=	Birleşmiş Milletler İklim Değişliği Çerçeve Sözleşmesi
PWM	=	Darbe Genişlikli Modülasyon
WRIG	=	Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
OSIG	=	OptiSlip Asenkron Generatör
WRSG	=	Rotoru Sargılı Senkron Generatör
BLDC	=	Fırçasız Doğru Akım Makinası
AA	=	Alternatif Akım
DA	=	Doğru Akım
MİLRES	=	Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Üretimi
KP	=	Kyoto Protokolü
DSP	=	Sayısal Sinyal İşlemcisi

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasının artan enerji ihtiyacını karşılamak konusunda miktarı günden güne azalan fosil kökenli yakıtların yetersiz kaldığı ve atıkları ile de çevreye verdikleri zararların büyüklüğü bilinmektedir. Bu durumu göz önünde bulunduran hem yerli hem de yabancı firmaların Ar-Ge çalışmalarının büyük bir çoğunluğunu alternatif enerji kaynakları çalışmaları oluşturmaktadır. Bu nedenle günümüzde rüzgar santrallerine yönelik çalışmalar gittikçe artmıştır. Konuyla ilgili literatürdeki çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Tekin yaptığı çalışmada [1], birden fazla türbine sahip rüzgar santrali içeren örnek sistemin Matlab benzetimini yaparak, farklı noktalarda meydana gelebilecek kısa devre durumlarını incelemiştir. Toklu [2], yaptığı çalışmada; rüzgar enerjisini ve elektrik enerjisine dönüşümünü incelemiştir. Ayrıca Elazığ ilinin iklimini de inceleyerek, Elazığ şartları için bir rüzgar türbin tasarımı yapmıştır. Ergür [3], rüzgar türbinlerinin gelişimini, Dünya’da ve Türkiye’deki kullanımlarını anlatarak başladığı çalışmasında rüzgar gücünden elde edilebilecek elektrik enerjisi gücünü, kullanılan generatör çeşitlerini anlatmış ve PSCAD paket programı ile sabit ve değişken hızlar için türbin benzetim çalışması yapmıştır. Ackerman [4], rüzgar gücünün tarihsel gelişimi, güç sistemlerini, mevcut rüzgar türbin tasarımlarını, güç kalite standartlarını ve ölçümelerini, şebeke bağlantılarını ve güç sistemlerine kattığı değerleri anlatmıştır. Emniyetli [5], rüzgar enerjisini, Türkiye’deki potansiyel kullanım alanlarını incelemiş ve kullanılacak türbinin çeşidini ve büyüklüğünü belirlemiştir. Daha sonra böyle bir türbinin aerodinamik tasarımı saptanıp, beklenen performansı hesaplanmış ve buna bağlı olarak da üretilecek enerjinin maliyetinin ne düzeyde olabileceğini öngörmeye çalışmıştır. Uğuz [6], bir evin ihtiyacını karşılayacak kadar elektrik enerjisi üretmek amacıyla sürekli mıknatıslı bir rüzgar türbin tasarımını açıklamıştır. Üç kanatlı, yatay eksenli, doğrudan generatöre bağlı, eksenel akılı, neodyum mıknatıslı ve çıkışta doğrultucu devresi olan rüzgar türbini tasarlayarak imalatının yapım aşamalarını detaylandırmıştır. Güneş [7], bir rüzgar türbininin matematiksel modelinin gerçekleştirilmesini, sabit frekans ve sabit bir türbin çıkışını elde etmek için bir kontrolör tasarımını anlatmıştır. Dursun ve Binark [8], yaptıkları çalışmada; rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını açıklamışlardır. Altaş ve Mergi [9], rüzgar türbinlerinin ürettiği elektrik enerjisinin içerdikleri harmonikler için filtreler kullanmış ve bu filtrelerin etkinliklerini grafiksel olarak göstermişlerdir. Deniz ve Çetin [10], rüzgar hızındaki değişimlerin sebep olduğu rüzgar gücü dalgalanmalarının nadiren sınır değerlere ulaştığı ve bu dalgalanmaların

tamamen rastgele gerçekleşmediklerini düşünerek, rüzgar çiftliklerinin güç çıkışları arasındaki ilişkilerin istatistiksel bir analizini yapmışlardır. Yıldırım ve Aydemir [23], yaptığı çalışmada; küçük güçlü bir rüzgar türbininde kullanmak üzere geliştirilen çekirdeksiz statorlu, sürekli mıknatıslı, çift rotorlu, eksenel akılı bir generatörün sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yapmışlardır. Prototipi hazırlanan rüzgar generatörünün gerçek ölçülerinde bir modeli, sonlu elemanlar yöntemini kullanan Ansoft Maxwell paket programında modelleyerek, elektromanyetik analizini yapmışlardır. Haque ve arkadaşları [24], sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin kullanıldığı değişken hızlı rüzgar türbinleri için yeni bir kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Toprak ve Akkaya [25], elektrik enerjisi üretmek için düşük güçlü bir rüzgar enerji sistemi gerçekleştirmişlerdir. Sistem; şarj ünitesi, sürekli mıknatıslı senkron generatör, akü ve PWM inverterden oluşmaktadır. Rüzgar türbininden elde edilen DA gücü AA gücüne dönüştürmek için mikrodenetleyici kontrollü PWM tekniği ile tek fazlı köprü doğrultucu kullanılmış, aynı zamanda benzetim çalışmaları yapılarak deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Kurt [26], yaptığı çalışmada dişli kutusu kullanılan sabit hızlı sincap kafesli asenkron generatör (SCIG) ve değişken hızlı çift beslemeli asenkron generatör (DFIG) ile dişli kutusu kullanılmayan doğrudan sürürlü elektriksel uyartımlı senkron generatör (EESG) ve sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin (PMSG) avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmıştır. Koç ve Güven [27], rüzgar türbinlerinin elektrik şebekesine entegrasyonu çalışmalarına katkı sağlamak için değişken hızlı rüzgar türbinlerinin modellenmesi ve sistemde rüzgar santrallerine yakın bir yerde oluşabilecek bir arıza süresince ve arızanın temizlenmesi sonrasında türbinlerin sisteme bağlı kalabilme yeteneklerini incelemişlerdir. Engin [28], Ülkemizde rüzgar enerji sistemleri alanında başlatılan İlk Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Üretimi (MİLRES) projesinin adımlarını anlatmıştır. Diğer çalışmalarda da genel olarak, rüzgar enerjisinin tarihçesinden, gelişiminden, rüzgar santrallerinde kullanılan generatör çeşitlerinden, enerji dönüşüm sistemlerinden ve benzetim çalışmalarından oluşan ulusal ve uluslararası çalışmaları içermektedir [11-22,29-48].

1.1. Tezin Amacı

Rüzgar santrallerinin maliyetleri azalıp ve enerji kaliteleri arttıkça kullanımları daha da yaygınlaşmaya devam edecektir. Rüzgar enerjisi olarak dünyada yararlanabilecek enerji kaynaklarının 53000 TWs/yıl olduğu tahmin edilmektedir. Bu enerji miktarı dünyanın

2020 yılında gereksinim duyabileceği enerji miktarının 2 katı olarak tahmin edilmektedir. Türkiye'nin bu enerji payında ise 83000 MW kapasitesi söz konusudur [1].

Literatür çalışmalarının bir sonucu olarak, fosil kökenli kaynaklardan bağımsız tamamen doğal ve yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum seviyede yararlanma amaçlanmıştır. Ayrıca dünyanın yaşanabilirlik ortamının korunması ve gelecek nesillere aktarılabilmesi amacıyla yapılan ulusal ve uluslararası hukuki düzenlemeler ve enerji üretim, iletim ve tüketiminden kaynaklanan çevresel etki ve sorunlarda enerji üretim sistemleri ve kaynak seçiminde çevresel etkilerin de dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. Fosil kökenli yakıtların kullanımı ile atmosfere salınan karbondioksit miktarı artmakta ve bu gaz yayılımı sonucu iklim değişikliğine neden olan sera etkisi oluşmaktadır. Uluslararası hukuki düzenlemeler olarak; bu zararlı etkileri azaltmak için dünya ülkeleri 1992 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ni (BMİDÇS) ve 1997 yılında Kyoto Protokolü'nü (KP) imzalamışlardır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde de rüzgar enerjisinin doğal, coğrafik şartlara bağlı olarak sürekli ve gelişen teknoloji ile düşük hızlarda enerji üretimine sahip olmasından dolayı ayrıca bir öneme de sahiptirler [6].

Rüzgar türbin sistemleri, karasal alanlarda rüzgar çiftlikleri (offshore) olarak veya denizüstü (onshore) sistemler olarak tasarlanabilmektedirler. Aynı zamanda elektrik enerjisinin ulaşımının kısıtlı olduğu veya elektrik enerjisinin bulunmadığı bölgeler için bir seçenek oluşturmaktadır.

Yapılan literatür taramasından da görüldüğü gibi son yıllarda rüzgar santralleri üzerine yapılan çalışmalar gittikçe artmaktadır. Yapılan bu çalışmaların büyük kısmının benzetim olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, gerçekleştirilecek bu tez çalışmasının amaçları arasında öncelikli olarak laboratuvar ortamında sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali prototipinin oluşturulması ve sistemin benzetim çalışmasının yapılarak benzetim sonuçları ile deneysel bulguların karşılaştırılması yer almaktadır.

Bu tez çalışması Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi tarafından FÜBAP-MF.12.20 no.lu proje ile desteklenmiştir.

1.2. Tezin İçeriği

Yapılan olan bu tez çalışmasında, sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santralinin benzetim çalışması ve prototip uygulamasının karşılaştırılması üzerine

hazırlanmıştır. Yapılan benzetim çalışmasında Matlab/Simulink bilgisayar programı kullanılmıştır. Çalışmanın bölümlerinde ise;

Bölüm 1’de; tez çalışması hakkında genel bilgiler ve literatür çalışmaları verilmiş olup, ayrıca tezin amacı ve içeriği belirtilmiştir.

Bölüm 2’de; rüzgar türbin sistemlerinde elektrik enerjisi üretirken, kullanılan ekipmanlar ve yöntemlerden dolayı sistemlerin birbirlerine göre farklı özellikleri açıklanmıştır.

Bölüm 3’de; bir rüzgar türbin sisteminde bulunan mekanik ve elektronik aksamalar tanımlanmıştır.

Bölüm 4’de; rüzgar türbin sistemlerine ait tanımlamalar yapıldıktan sonra, rüzgar enerjisinden elde edilebilecek mekanik güç hesabı ve güç dağılımları açıklanmıştır.

Bölüm 5’de; rüzgar türbin sistemlerinde kullanılan farklı generatör çeşitleri incelenmiştir. Ayrıca prototip sistemde kullanılmış olan sürekli mıknatıslı senkron generatörün avantaj ve dezavantajları verilerek matematiksel modeli oluşturulmuştur.

Bölüm 6’da; sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbin sistemin prototip uygulama adımları açıklanmış, sistemin Matlab/Simulink bilgisayar programında benzetimi ve deneysel çalışmalar yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bölüm 7’de ise tez çalışmasındaki sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. RÜZGAR ENERJİSİ VE RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMLERİ

2.1. Rüzgar Enerjisine Genel Bakış

2.1.1. Rüzgar Enerjisinin Oluşumu

Rüzgar enerjisinin kaynağı yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneştir. Güneş enerjisinin yeryüzü ve atmosferin tamamını özdeş ısıtmamasından dolayı oluşan sıcaklık ve buna bağlı olarak basınç farkları rüzgarları oluşturmaktadır.

Rüzgar yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına doğru yer değiştiren havanın, dünya yüzeyine göre bağıl olarak yaptığı harekettir. Ekvator bölgesi Dünya'nın diğer yerlerine göre daha fazla ısınır. Bu bölgede ısınan hava yaklaşık olarak 10 km'ye kadar yükselir, sonra kuzeye ve güneye doğru yayılır. Eğer Dünya hareketsiz kalsaydı, ısınan hava Kuzey Kutbu'na ve Güney Kutbu'na vardıktan sonra aşağıya doğru hareket eder ve ekvatora geri dönerdi. Dünya hareket ettiği için, kuzey yarım kürede her hareket saat yönüne, güney yarım kürede ise saat yönünün tersi istikametine doğru yönelir. Fransız matematikçi Gustave Gaspard Coriolis tarafından bulunan bu kuvvete Coriolis Kuvveti denir [3].

Tahminlere göre dünyaya ulaşan güneş enerjisinin %2'si kinetik enerjiye dönüşür. Bu enerjinin de %30'u 1000 metreden daha alçak kesimlerde meydana gelmektedir. Yeryüzünden 1000 metre yüksekliğe kadar olan atmosfer içerisinde rüzgardan sağlanan kinetik enerji miktarı ABD'nin enerji ihtiyacının 3 katı kadardır [2].

2.1.2. Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgar gücünün üç bin yıldan daha uzun zamandır kullanılmakta olduğu bilinmektedir. Yirminci yüzyılın başlarına kadar rüzgar gücü; su pompalamak ya da tahıl öğütmek amacı ile mekanik güç sağlamak için kullanılmıştır. En eski yel değirmenleri düşey eksenli rüzgar türbinleridir. Bu yel değirmenleri M.Ö. yedinci yüzyıldan beri tahıl öğütmek için kullanılmaktadır. Bu sistemlerin hala günümüzde kullanıldığı bölgeler mevcuttur [4].

Rüzgar enerjisi ilk olarak M.Ö. 5000'li yıllarda Nil Nehri'nde ulaşımda kullanılmıştır. Aynı tarihlerde Çin'de de tarımda su pompalamak için kullanıldığı bilinmektedir. Rüzgar gücü kullanımı Haçlı Seferleri ile Avrupa ülkelerine geçmiştir. 1105 yılında Fransa'da yaygınlaşan rüzgar değirmenleri daha sonra İngiltere ve Hollanda'da kullanılmıştır [3].

1970'lerin başlarında yaşanan petrol krizi ile birlikte, rüzgar gücüne olan ilgi yeniden ortaya çıkmıştır. Ancak bu defa hedef mekanik enerji ile elektrik enerjisi sağlamak üzerine olmuştur. Bu şekilde elektrik şebekesi aracılığıyla diğer enerji teknolojilerini de kullanarak güvenilir ve tutarlı güç kaynağı sağlamak mümkün hale gelmiştir. Elektrik üretimi için ilk rüzgar türbinleri yirminci yüzyılın başlarında geliştirilmiştir. 1891 yılında Dane Poul LaCour rüzgar gücünden elektrik enerji üretmeyi düşünen ilk kişidir. Aslında Dane Poul LaCour meteoroloji eğitimi almıştır. Ayrıca aerodinamik alanında yaptığı çalışmalar ile de tanınmış ve bazı teorik deneyler için de rüzgar tüneline ilk tasarlayan bilim adamıdır. İlk tasarladığı rüzgar türbini 89 W gücündedir. Dane Poul LaCour, Askov Dolk Kolejinde rüzgar generatörleri ile ilgili çeşitli dersler vermiştir. Danimarkalı mühendisler I. ve II. Dünya savaşları sırasında teknolojiyi geliştirerek enerji kesintilerini önlemek için bu teknolojiyi kullanmışlardır. 1941-1942 yıllarında kurulan Danimarkalı F. L. Smith firması tarafından tasarlanan rüzgar türbinleri, modern rüzgar türbinlerinin öncüleri olarak kabul edilmektedir. Bu türbinler, gelişen aerodinamik bilgisini esas alan modern kanat profilinin de ilk kullanıldığı türbinlerdir. Aynı süreçte geliştirilen Amerikan Palmer Putnam firmasının tasarım parametreleri farklı özelliklere sahiptir. Smith firması, düşük hızlarda çalışan aerodinamik fren (stall) düzenlemesine sahip rüzgarı önden alan (upwind) rotoru esas almaktaydı. Putnam firması ise, değişken eğim regülasyonu ile rüzgarı arkadan alan (downwind) rotoru esas almıştır [2].

2.1.3. Rüzgar Enerjisinin Çevresel Faktörleri

Rüzgar enerjisi, herhangi bir atığı ve kirliliği olmayan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Ancak salınım/yayılım (emisyon) üretmektedir. Kule ve kanatların üretilmesi, malzemelerin araştırılması ve ekipmanların taşınması enerji kaynaklarının harcanmasına neden olmaktadır. Bu enerji kaynakları fosil yakıtları esas aldığı sürece yayılım üretir. Bu gibi yayılım doğrudan olmayan yayılımlar olarak sınıflandırılır. Rüzgar türbinleri nüfusun yoğun olduğu bölgelerde konumlandırılmışsa, rüzgar türbinlerinin görsel etkisi ve gürültü, rüzgar enerjisi teknolojisinin kamu tarafından kabul edilebilmesi için önemli hususlardır. Gürültü etkisi, teknik araçlar aracılığı ile azaltılabilir. Gürültü etkisi gibi görsel etki de rüzgar türbinlerinin uygun konumlandırılması ile giderilebilir.

Aşağıdaki Tablo 2.1 'de günümüzde mevcut enerji kaynaklarından üretim sistemlerinin çevresel etkilerini gösteren tablo verilmiştir.

Tablo 2.1 Mevcut enerji üretim sistemlerinin çevresel etkileri [5]

	İklim Değişikliği	Asit Yağmuru	Su Kirliliği	Toprak Kirliliği	Gürültü	Radyasyon
Petrol	X	X	X	X	X	
Kömür	X	X	X	X	X	X
Doğal Gaz	X	X	X		X	
Nükleer			X	X		X
Hidrolik	X					
Rüzgar					X	
Güneş						
Jeotermal			X	X		

2.2. Rüzgar Türbin Sistemleri

Günümüzdeki mevcut rüzgar türbinleri çeşitli yönleri ile birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Rüzgar türbinleri; dönme eksenlerine, hızlarına, kanat sayılarına, rüzgarı alma şekillerine, güç kontrol sistemlerine, kullanılan generatörlere ve şebeke bağlantı durumlarına göre sınıflandırılırlar.

2.2.1. Eksenlerine Göre Rüzgar Türbinleri

2.2.1.1. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Düşey eksenli rüzgar türbinleri temel olarak rüzgarın hava direncinden yararlanılarak tasarlanmıştır. Resim 2.1(a)'da görüldüğü gibi türbin mili düşey konumlu ve rüzgarın geliş yönüne diktir. Savonius ve Darrieus gibi iki başarılı çeşidi vardır. Bunlardan Darrieus rüzgar türbin modelinde, düşey konumda yerleştirilmiş iki tane kanat mevcuttur. Kanatlar, yaklaşık olarak türbin miline elips oluşturacak konumda yerleştirilmiştir. Dönme hareketini ise kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı ile sağlar. Bu türbin modelinde iki defa en yüksek moment değeri elde edilir. Darrieus türbin modelinin ayrıca rüzgar esme yönüne döndürülmesine gerek yoktur. Bu özellik rüzgar yönünün sıkça değiştiği yerler için büyük bir avantajdır. Dikey eksenli olmaları sebebiyle generatör ve dişli aktarma elemanlarının yerde konumlandırılması artı bir özellik daha kazandırır. Bu rüzgar türbin modellerinin düşük hızlarda çalışabildiklerinden yüksek momentler söz konusu olur. Bu yüzden dişli takımları yüksek maliyetli olurlar ve bakımları kolay değildir. Bu nedenle pek tercih edilen bir model değildirler. Bunun yanında yere yakın oldukları için alt noktalardaki rüzgar hızları düşüktür ayrıca düşük verimli olma gibi dezavantajlarına sahiptirler. Savonius rüzgar türbinleri, 1925 yılında Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından keşfedilmiştir. İki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış “kanat” adı verilen iki yarım silindirden

oluşmaktadır. Belirli bir hızla gelen rüzgarın etkisiyle çarkı oluşturan silindirin iç kısmında pozitif ve dış kısmında negatif bir moment oluşmaktadır. Pozitif moment, negatif momentten daha büyük olduğunda dönme hareketi pozitif moment yönünde sağlanır [5].

2.2.1.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Resim 2.1(b)'de görüldüğü gibi bu rüzgar türbinlerinde dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgar yönüyle dik açı yaparlar. Yatay eksenli rüzgar türbinleri yüksek rüzgar hızlarından etkin biçimde faydalandıklarından ve türbülanslardan daha az etkilendikleri için çok daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Yatay eksenli türbinler; bir, iki veya üç kanatlı olabilirler. Yatay eksenli rüzgar türbinleri; rotor eksenini yönlendirme kontrol mekanizmasıyla etkin rüzgar yönüne göre değiştirilerek her yönden esen rüzgar ile çalışabilme özelliğine sahiptirler. Daha çok ticari amaçlı kullanılırlar. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin çoğu rüzgarı önden alacak şekilde imal edilirler [1].



Resim 2-1. a) Düşey eksenli rüzgar türbin modeli [49] b) Yatay eksenli rüzgar türbin modeli [49]

2.2.2. Rüzgar Hızlarına Göre Rüzgar Türbinleri

2.2.2.1. Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri

Sabit hızlı rüzgar türbinleri, rüzgar hızından bağımsız olarak rüzgar türbininin rotor hızı sabittir ve besleme şebekesinin frekansı, dişli oranı ve generatör tasarımı tarafından belirlenir. Bu sistemlerde reaktif güç kompanzasyonu yapmak için bir soft-starter ve kapasitör grubu ile şebekeye doğrudan bağlanmış bir asenkron generatörüne sahip olmaları sabit hızlı rüzgar türbinlerinin genel özelliğidir. Belirli bir rüzgar hızında maksimum verimi sağlayacak şekilde tasarlanmışlardır. Güç üretimini artırmak için, sabit hızlı rüzgar türbinlerinin generatörleri iki sargı grubuna sahiptir. Bunlardan birincisi 8 kutuba sahip düşük rüzgar hızları için ve ikincisi ise 4-6 kutuba sahip yüksek rüzgar hızları için kullanılmaktadır [1].

Sabit hızlı rüzgar türbinleri; basit, sağlam, güvenilir olma avantajlarına sahiptirler ve elektriksel parçaların maliyetleri düşüktür. Dezavantajları ise, kontrol edilebilir olmayan reaktif güç harcaması, mekanik zorlama ve sınırlı güç kalite kontrolüdür. Sabit hızlı çalışmalarından dolayı rüzgar gücündeki tüm salınımlar mekanik torka ve daha sonra şebekedeki elektrik güç olarak iletilir. Zayıf şebekeler söz konusu olduğunda, güç salınımları büyük gerilim dalgalanmalarına da neden olabilir ve bu da önemli iletim kayıplarına sebep olabilmektedir.

2.2.2.2. Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri

Temel olarak dönme eksenleri, düşey ile rüzgar yönünde belirli bir açı yapan türbin modelidir. Değişken hızlı türbinlerin en önemli avantajı verimlerinin fazla olmasıdır. Bunu geniş bir rüzgar hızı aralığında optimum uç hız oranında çalışabilmeleri, böylece rotor verimliliğini artırıp daha fazla enerji elde edilmesini sağlayarak yaparlar. Ayrıca düşük rüzgar hızlarında da çalıştıkları için gürültü konusunda da avantajlıdırlar. Değişken hızlı tasarım, dişli kutusuna gelen yükün düşmesini sağlamakla birlikte bu tür türbinlerde, sabit hızlarda kullanılanlardan farklı özelliklere sahip generatörlerin kullanılması gerekmektedir. Değişken hızlı türbinlerin bu kadar avantajlarına rağmen pek tercih edilmemesinin ana sebebi güç elektroniği maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

Bir rüzgar türbinin çalışma mekanizması, rüzgar enerjisinden alınan kinetik enerjinin şaft sistemi ile generatör miline aktarılmasıdır. Bundan sonra generatör, kinetik enerjiyi

elektrik enerjisine dönüştürür. Bu dönüşüm işlemi daha sonraki bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır. Generatör çıkışından alınan AA, üç fazlı doğrultucu ile DA'ya dönüştürülerek akülere şarj edilir. Akü sistemine gereksinim duyulmasının nedeni, daha öncede bahsedildiği gibi rüzgar enerjisinin sürekli olmadığı durumlarda bile yüke elektrik enerjisi sağlayabilmektir. Akü sisteminden alınan DA 'nın istenilen genlik ve frekansta AA'ya dönüştürülmesi için inverter grubu kullanılır.

Aerodinamik alt sistem, kanatlar ve kanatların birleştiği göbekten oluşan türbin rotorundan meydana gelir. Dişli ve aktarma kutusu düşük hızlı şaft, yüksek hızlı şaft bunlar arasındaki dişli kutusu ve frenlerden oluşur. Generatör yüksek hızlı şafta bağlı aerodinamik momenti elektrik enerjisine çeviren elektrik makinasıdır. Kule rüzgar türbini rotor eksenine dik, rüzgar türbini alt sistemlerini taşıyan boru ve kafes direktten oluşur. Kule üzerinde dişli kutusu ve generatörü içine alan makina dairesini döndürmeye yarayan bir dişli mekanizması vardır. Yukarıda da bahsedildiği gibi türbini kendi etrafında döndürerek rüzgarı mümkün olduğunca tam karşıdan almaya yarayan bu mekanizmaya yaw mekanizması denir [5].

Sabit hızlı bir sisteme zıt olarak, değişken hızlı bir sistem generatör torkunu sabit tutar ve rüzgardaki varyasyonlar generatör hızındaki değişiklikler tarafından absorbe edilir. Değişken hızlı bir rüzgar türbininin elektriksel sistemi, sabit hızlı bir rüzgar türbininin elektriksel sisteminden daha karmaşıktır. Bu rüzgar türbini, tipik olarak bir asenkron ya da senkron generatör ile donatılmış ve şebekeye bir güç konverteri aracılığı ile bağlanmıştır. Güç konverteri generatör hızını kontrol eder, başka bir deyişle rüzgar değişimleri nedeniyle oluşan güç salınımları, temelde rotor generatör hızındaki ve sonuç olarak rüzgar türbini rotor hızındaki değişiklikler tarafından absorbe edilir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin avantajları, rüzgar türbini üzerinde indirgenmiş mekanik zorlama, artırılmış güç kalitesi ve artırılmış enerji yakalama özelliğidir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin dezavantajları, güç elektroniği elemanlarındaki kayıplar, daha fazla sayıda bileşenin kullanılması ve güç elektroniği elemanlarından dolayı cihazların maliyetinin artmasıdır. Değişken hızlı rüzgar türbini tiplerinin devreye girmesi, uygulanabilir generatör tiplerinin sayısını artırmış ve ayrıca generatör tipi ile güç konverteri tipinin kombinasyonunda çeşitli serbestlik dereceleri sağlamıştır.

Değişken hızlı generatörlerin kullanıldığı yerlerde, reaktif güç kesin olarak kontrol edilebilir en iyi elektriksel karakteristikleri verirler ve en yüksek izin verebilir rüzgar çiftliği kapasitesini sağlarlar. Ayrıca rüzgar santralleri, tek olarak değişken hızlı

generatörlere reaktif güç kontrolü uygulayarak, izin verebilir rüzgar santralleri kapasitesi artırılabilir.

Değişken hızlı türbinlerin elektronik güç çeviricileri gerilim düşümüne bağlı aşırı akımlara çok duyarlı olduğundan, küçük bir gerilim düşümünde bile bir bölgedeki rüzgar santralleri topluca devre dışı kalabilmektedir. Bu durum sistem kararlılığına etki eder [6].

2.2.3. Kanat Sayılarına Göre Rüzgar Türbinleri

2.2.3.1. Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Tek kanatlı rüzgar türbinlerinin yapılmasının sebebi, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve bu sayede generatör kütesini ve rotorun döndürme momentini azaltmaktır. Ek olarak rotor kanadı, kanat üzerindeki yapısal yükleri azaltacak ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz olabilmesi için tek menteşe ile sabitleştirilip, iki karşıt ağırlıkla dengelenmelidir. Diğer taraftan tek kanatlı rotorlar da, ilave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik balanssızlık ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için hub çok iyi tasarlanmalıdır. MBB firması tarafından tasarlanan, her birinin tesis gücü 630 kW ve rotor çapı 56 m olan üç tip rüzgar türbini Almanya'nın Wilhelmshaven yakınında çalışmaktadır. En önemli ticari dezavantajı, 120 m/sn civarındaki kanat uç hızının sebep olduğu rotorun aerodinamik gürültü seviyesidir. Bir kanatlı rüzgar türbinlerinin kanat uç hızı, üç kanatlı rüzgar türbinleri ile karşılaştırıldığında, iki kat daha yüksektir ve daha fazla gürültülü çalışırlar. Almanya halkı, gürültü ve görsel rahatsızlık nedeniyle bu rüzgar türbinlerin piyasada kullanılmasına şans tanımamıştır [4].

2.2.3.2. Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Üç kanatlı rüzgar türbinlerine göre rotor maliyetinin azaltılmak istenmesi bu türbin fikrini doğurmuştur. Birçok ülkede 10 m ile 100 m rotor çaplı ölçülerde rüzgar türbinleri tasarlanıp, ABD ve Avrupa'da çalışmaya başlamıştır. Bu ticari rüzgar türbinlerinden sadece birkaç tanesi prototip durumdan seri üretime geçebilmiştir. İki kanatlı rotorun balansı, bir kanatlı rotora göre daha düzgündür. Fakat iki kanatlı rotorun sebep olduğu dinamik hareketleri önlemek için ilave teknik güç maliyetin daha fazla artışına sebep olmaktadır. Hub sisteminin titreşimini azaltmak için rotora kadran sistemi ilave edilmiştir. Bu kadran, rotor şaftına dikey ve iki rotor kanadına dik yerleştirilir. Üç kanatlı rotorla karşılaştırıldığında en büyük avantajı; kanat uç hızlarının yüksek olmasıdır. Ayrıca düşük

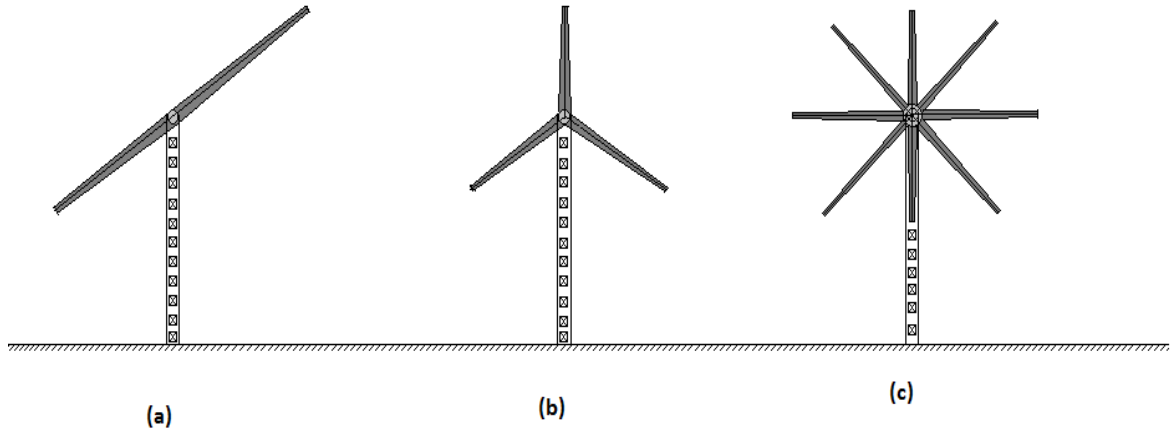
rüzgar hızlarında çalışıyor olması başka bir avantajdır. Bu özelliklerin yanı sıra rüzgar türbinlerinin gürültü seviyesinin yüksek olması gibi dezavantajlarına sahiptirler. Bundan dolayı günümüzde iki kanatlı rüzgar türbinlerine hiçbir eğilim bulunmamaktadır [4].

2.2.3.3. Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Üç kanatlı modern türbinler yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç veya daha fazla kanat kullanılmasının asıl nedeni döndürme momentinin kanatlara daha düzgün ve eşit yayılmasını sağlamaktır. Üç kanatlı rüzgar türbinlerinde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti olmadığından, hub içinde titreşimi önleyici ek parçalara ve aksamalara gereksinim duyulmaz. Kanat hızları düşük olduğundan gürültünün azlığı, sarsıntısız dönme hareketini gerçekleştirdikleri için de estetik görüntüyü bozmamaları bir avantajdır. Küçük güçlerde, üç kanatlı rotor kullanıldığında güç problemleri ortaya çıkar. Bu problemin çözümü için düşük devirde rotorun hızını artıran dişli takımları kullanılır. Ayrıca yeterli hız değerine ulaşmaya kadar, generatör boşa çalıştırılır [4].

2.2.3.4. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Çok kanatlı rüzgar türbinleri, rüzgar türbin sistemlerinin gelişmemiş ilk örneklerini temsil eder. Uzun yıllarca sadece su pompalamak ve yel değirmenlerinde kullanılan bu türbin sistemleri, bu işlemlerdeki büyük moment gereksinimlerin karşılanabilmesi amacıyla çok kanatlı olarak imal edilmişlerdir. Çok kanatlı rüzgar türbinleri, diğer rüzgar türbin çeşitlerine göre daha düşük rüzgar hızlarında çalışırlar. Türbin kanatlarının genişlikleri, pervane göbeğinden kanat uçlarına doğru ilerledikçe artar. Pervane mili, dişli kutusuna bağlanarak generatör mili devir sayısı artırılır ve rüzgar türbini pervane düzleminin rüzgar hız vektörünü her zaman dik olarak alabilmesi için de yaw mekanizması bulunur.



Resim 2-2. Farklı kanat sayılarındaki rüzgar türbin modelleri a) İki kanatlı rüzgar türbin modeli b) Üç kanatlı rüzgar türbin modeli c) Çok kanatlı rüzgar türbin modeli

İki kanatlı rüzgar türbinleri, üç kanatlı rüzgar türbinlerine göre % 2-3 daha az verimlidir. Tek kanatlı rüzgar türbinleri ise; iki kanatlı rüzgar türbinlerinden % 6 daha az verimlidir. Ayrıca tek kanatlı rüzgar türbinlerinde dengeleyici olarak karşıt ağırlık kullanılır. Yüksek rüzgar hızlarında çalışan bu tip rüzgar türbinlerinde kanat sayısı arttıkça verim artar [5].

2.2.4. Rüzgarı Alma Yönlerine Göre Rüzgar Türbinleri

2.2.4.1. Rüzgarı Önden Alan Rüzgar Türbinleri

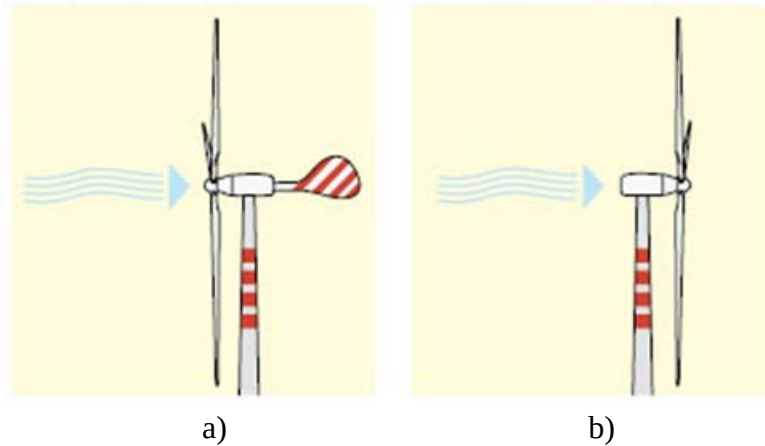
Rotor yüzeyi, rüzgara dönük ve dik olduğundan en fazla tercih edilen sistem olma özelliğini taşımaktadır. Diğer tercih edilme sebepleri ise, kulenin arkasında oluşacak rüzgar gölgeleme etkisine çok az maruz kalmasıdır, yani rüzgar kuleye eğilerek varır. Kule yuvarlak ve düz olsa bile kanadın kuleden her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz daha azalır. Bu nedenle rüzgar çekilmesinden dolayı kanatların sert olması gerekir. Ayrıca rüzgarı önden alan türbinler, yukarıda bahsedildiği gibi rüzgarın esme konumuna getirecek yaw mekanizmalarına ihtiyaç duyarlar.

2.2.4.2. Rüzgarı Arkadan Alan Rüzgar Türbinleri

Bu rüzgar türbinlerinin rotorları kule arkasında bulunur. Bunların önemli üstünlüğü rüzgara dönmek için yaw mekanizmasına ihtiyaç duymayışlarıdır. Yaw mekanizması; rüzgar vanasını kullanarak rüzgar yönünü belirleyen elektronik kontrolör tarafından işletilir. Rüzgar yönü değiştiği zaman normal olarak o anda yaw sadece birkaç derece

kadar olacaktır. Yaw mekanizmasında rüzgara karşı nacelle (makine dairesi) ile rotoru döndürmek için elektrik motorları kullanılır. Bu sistem yaw konumunu saniyede birkaç kez kontrol eder. Konum verileri rüzgar gülünden elde edilen yön bilgileri ile karşılaştırılıp yaw mekanizmasına gerekli komut verilir. Eğer nacelle ve rotor uygun tasarlanırsa, nacelle rüzgarı pasif olarak izler. Daha önemli bir üstünlük kanatların esnek özelliğe sahip olmasıdır. Bu özellik hem ağırlık hem de generatörün güç dinamiği açısından önemli bir üstünlüktür. Böylece bu generatörlerin avantajları; rüzgarı önden alan türbinlere göre daha hafif yapılması sonucu kule yükünün azaltılabilir olmasıdır. Fakat kanat kulenin önünden geçerken meydana gelen güç dalgalanması türbine, rüzgarı önden alan türbinlerden daha çok zarar verir.

Rüzgarı arkadan alan rüzgar türbin sistemlerinde, rotorun kulenin arkasında yer almasından dolayı kulenin yarattığı turbülans rüzgar türbin verimini düşürmektedir.



Resim 2-3. a) Rüzgarı önden alan türbin modeli b) Rüzgarı arkadan alan türbin modeli

2.2.5. Güç Kontrol Sistemlerine Göre Rüzgar Türbinleri

2.2.5.1. Durma Kontrollü Rüzgar Türbinleri

Danimarkalı rüzgar türbin üretici firmaları tarafından uygulanan durma (stall) kontrollü rüzgar türbinleri, uygun fiyatları, az bakım gerektirmeleri, basit ve sağlam olmaları gibi üstünlüklere sahiptirler. Durma kontrollü rüzgar türbin sistemleri, türbin hızının istenilen sınırlar dahilinde kalmasını sağlayan aktif fren sistemidir. Durma kontrollü sistemler nominal hızın üstündeki hızlarda, eğim kontrollü türbinler gibi bir güç seviyesini koruyamamaktadır. Bu sebepten dolayı nominal hızın üzerindeki enerji üretimi eğim kontrollü türbinlere göre daha düşük olmaktadır. Durma kontrollü rüzgar türbin

sistemlerinde, rüzgar türbin kanatları hub (rotor göbeği) sistemine sabit açılar ile sabitlenmiştir [2].

2.2.5.2. Eğim Kontrollü Rüzgar Türbinleri

Eğim (pitch) kontrollü rüzgar türbin kanatları, durma kontrollü rüzgar türbin kanatları gibi hub sistemine sabit açılar ile sabitlenmiş değildirler. Kanatlar, mekanik veya hidrolik sistemler ile rüzgar hızına göre eksenleri etrafında dönebilecek şekilde montajı yapılır. Bu türbin sistemleri nominal hızın üzerindeki rüzgar hız değerlerinde sabit güç üretimi sayesinde daha kaliteli güç çıkışı sağlamaktadırlar. Eğim kontrollü rüzgar türbinlerinden elde edilecek performans, temel olarak kullanılan eğim mekanizmasının hızına ve hassasiyetine bağlıdır [5].

Sistemin avantajları; gücün kontrol edilebilirliğini kolaylaştırılması, kontrollü başlatma ve acil durdurmanın bulunmasıdır. Dezavantajları ise; yüksek rüzgar hızlarındaki küçük değişiklikler bile çıkış gücünde büyük değişikliklere neden olabilmektedir. Eğim mekanizması, bu tür güç dalgalanmalarını önleyecek kadar hızlı değildirler. Kanada eğim verilerek, rüzgardaki küçük varyasyonlar kompanze edilebilir, ancak boralar söz konusu olduğunda bu mümkün değildir.

2.2.6. Şebeke Bağlantı Durumlarına Göre Rüzgar Türbinleri

2.2.6.1. Şebeke Entegrasyonlu Rüzgar Türbinleri

Günümüzde rüzgar türbinleri ticari amaçlı kurulurken rüzgar türbin çiftlikleri şeklinde tasarlanırlar. Bahsi geçen çiftlikler karalarda kurulabildiği gibi deniz üstlerinde de kurulabilmektedir. Rüzgar enerjisi bakımından denizler, karalara göre daha zengin olduğu için bu alanda da çalışmalar yapılmaktadır. Bu konuda ki ilk çalışma; 5 MW gücünde Danimarka'da Lolland Adası yakınlarında kurulan Vindeby rüzgar çiftliğidir. Rüzgar enerjisi sürekli ve sabit olmadığı için üretilen enerji de sürekli olamaz. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünden sonra şebekeye bağlanmasına kadar çeşitli kademelerden geçmektedir [2].

Rüzgar çiftliklerinin şebekeye bağlantı noktasının özel önemi vardır. Rüzgar çiftliklerinin büyük yüke daha yakın ve daha yüksek gerilim seviyesinde şebekeye bağlanması, kayıpları ve reaktif güç kompanzasyon gerekliliğini azaltır. Ayrıca rüzgar çiftliklerinin sistemin gerilim kararlılığına olan olumsuz etkisi söz konusu olmaz.

Şebeke bağlantılı rüzgar santralleri yalnızca bir yerleşim yerinin elektrik enerjisi gereksinimini karşılayacağı gibi, belirli bir yerde çok sayıda şebekeye elektrik enerjisi sağlamak amacıyla da kurulabilirler. Şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin şebeke üzerinde bozucu etkileri de söz konusu olabilmektedir. Bu bozucu etkiler; sistem dinamiği ve kararlılığı, frekans kontrolü ve konvansiyonel santrallerde sık sık yük alma/atma ve reaktif güç kontrolü ve gerilimi, büyük rüzgar santrallerinin planlanmasında yaşanabilecek sürekli hal sorunları, güç katılımının etkileri, kısa devre arızaları ve şebekeyi besleme kapasite sınırları şeklinde sıralanabilir [6].

2.2.6.2. Şebeke Entegrasyonsuz Rüzgar Türbinleri

Şebekeden bağımsız lokal çalışan rüzgar türbin sistemleri belirli bir sistemin enerjisini karşılamak ya da elektrik enerji hatlarının ulaşmadığı kırsal bölgelerde tercih edilmektedir. Güçleri şebeke entegrasyonlu sistemlere göre daha düşük olabilmektedir. Bu nedenle kurulum maliyetleri düşüktür. Bu sistemlerde üretilen elektrik enerjisi doğrultularak DA link gerilimi elde edilir. Daha sonra inverter sistemi kullanılarak AA elde edilir. Burada doğrultma işleminden sonra kullanılan DA-DA kıyıcı elektromanyetik torku kontrol etmektedir. İnverter tarafındaki konverter ise girişin güç faktörünü kontrol ettiği gibi aynı zamanda DA link gerilimini de regüle etmektedir. Genellikle bu tür tasarımlar küçük güçlü sistemler için tercih edilmektedir.

Tablo 2.2. Çeşitli rüzgar türbin modellerinin karşılaştırılması

	Kullanım Alanları	Türbin Gücü	Üretilen Enerjinin Kullanıldığı Yerler	Akü İhtiyacı	Bakım Masrafı	Kurulum Masrafı
Büyük Rüzgar Türbinleri	Endüstriyel	50kW-20MW	Şebeke	Yok	Var	Yüksek
Küçük Rüzgar Türbinleri	Özel	50W-20kW	Çiftlikler, Evler	Var	Yok	Düşük

	Yaw Mekanizması	Kanat Malzeme Yapısı	Kuleye Binen Yük	RüzgarınTürbine Verdiği Zarar
Rüzgarı Önden Alan Türbinler	Var	Sert	Ağır	Az
Rüzgarı Arkadan Alan Türbinler	Yok	Esnek	Hafif	Çok

	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri				Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	
	Tek Kanatlı	İki Kanatlı	Üç Kanatlı	Çok Kanatlı	Savonius	Darrierus
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Estetik Görünüm	Kötü	Kötü	İyi	İyi	İyi	İyi
Gürültü	Yüksek	Yüksek	Düşük	Az	Az	Az
Çalışma Hızı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Kule İhtiyacı	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Kullanım Amacı	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Su Pompası	Su Pompası	Su Pompası
Günümüzde Kullanımı	Yok	Yok	Var	Var	Az	Az
Rotoru Dönmesi İçin Rüzgarı	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler

3. RÜZGAR TÜRBİN EKİPMANLARI

Belirli bir rüzgar türbini için en önemli teknik bilgiyi rüzgar türbinin güç eğrisi verir. Bu güç eğrisi generatörün elektriksel çıkış gücü ile rüzgar hızı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Rüzgar türbinlerinde kanatlara iki kuvvet etki eder. Bunlar; lift (kaldırma) kuvveti ve drag (sürtünme) kuvvetidir. Lift kuvveti; bir rüzgar türbin kanadının üzerindeki hava molekülleri üst yüzeyi boyunca alttaki yüzeye göre daha hızlı hareket eder. Bu üst yüzeydeki basıncın daha az olması demektir. Bu durum kaldırmayı meydana getirir yani yukarıya doğru çekme kuvvetini oluşturur. Kaldırma kuvveti, rüzgar yönüne diktir. Drag kuvveti ise; kaldırma kuvvetine dik ve yönü kanat uçlarına doğru olan kuvvettir.

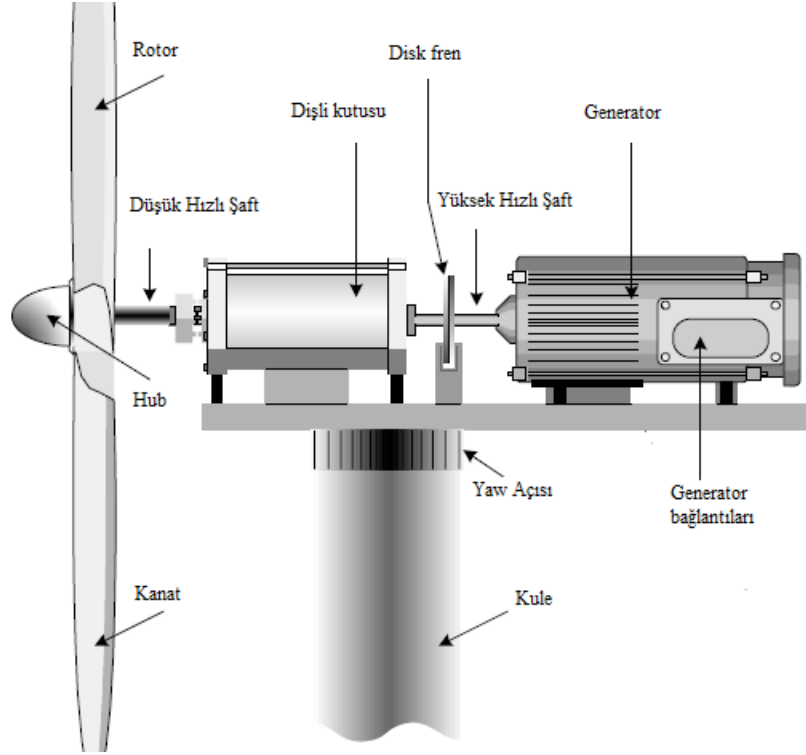
Rotor yüksekliğindeki türbülans yoğunluğu ve bunun sonucu olarak ortaya çıkan mekanik yorulma, türbin ömrünü birinci dereceden etkileyen faktördür ve rüzgar türbin sistemlerinde güç kontrolü, Bölüm 2.2.5’de anlatıldığı gibi iki şekilde yapılmaktadır. Birinci metotta, rotor kanatlarının uygun dizaynı ile rüzgar hızının belirli bir değerin üstüne çıkması durumunda türbin hızı sabit kalarak (stall kontrol) yapılır. İkinci metot ise, kanatların rüzgar doğrultusuyla açısının bir mekanik veya hidrolik sistem ile değiştirilmesiyle (pitch kontrol) yapılır. Çok yüksek hızlarda kanatlar rüzgara en az direnç gösterecek şekilde çevrilerek türbin hızı ayarlanabilir. Açısı değiştirilebilen rotor kanatlarının diğer faydası düşük hızlarda da yüksek verimin elde edilebilmesidir. Teknolojideki diğer bir gelişme değişken hızlı generatörler üzerinedir. Böylece yüksek rüzgar hızlarında da enerjiyi verimli üretmek mümkün olabilmektedir.

Kısaca stall kontrollü türbinler; göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş kanatlara sahip sistemlerdir. Bu sistemler, rüzgar hızındaki artış ile birlikte hücum açısının da artması ve kanatların stall etkisine girmeye başlaması sayesinde güç kontrolü sağlar. Pitch kontrollü türbinler ise, stall kontrollü türbinlerin aksine kanatlar göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmemişlerdir. Kanatlar, pitch kontrol mekanizması sayesinde rüzgar hızına göre eksen etrafında döndürülebilmektedir. Bu türbinler, nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sayesinde daha kaliteli bir güç çıkışı sağlamaktadırlar fakat stall etkisine göre tasarlanmadıkları için ani rüzgarlara karşı hassastırlar.

3.1. Rüzgar Türbin Elemanları

1990'ların sonuna kadar pek çok türbin üreticisi, sabit hızlı, 1,5 MW güç değerinin altında, çok kademeli dişli kutulu, standart sincap kafesli asenkron generatörlü, şebekeye doğrudan bağlanan rüzgar türbinleri inşa etmiştir. 1990'lardan sonra pek çok türbin üreticisi üretimini değişken hızlı rüzgar türbinlerine yönlendirmiş ve 1,5 MW güç civarında, çok kademeli dişli kutulu, daha ucuz, çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbinleri inşa edilmiştir. Çift beslemeli asenkron generatörü, stator terminallerinden şebekeye doğrudan; rotor sargısı ise, gücü türbin gücünün %30 'u kadar olan rotor tarafı ve şebeke tarafı olmak üzere dört bölgeye AA/DA/AA güç konvertörü üzerinden şebekeye bağlıdır. Türbinin generatöre dişli kutusu ile bağlanması değişken generatör hızına izin verir ve türbin hızını 4-5 kat arttırır. Bu üretim ağırlığını ve maliyeti azaltır. 1991 yılından sonra doğrudan sürürlü generatör olarak adlandırılan dişli kutusu olmayan rüzgar türbin sistemleri önem kazanmıştır. Bu türbinler, elektriksel uyartımlı ve sürekli mıknatıslı senkron generatörler ile donatılır. Dişli kutusunun olmayışı arızaları ve bakım masraflarını azaltmaktadır. Buna karşın şebeke bağlantısı için türbin gücüne eşit güce sahip güç konvertörü gereklidir. En çok talep gören, doğrudan sürürlü elektriksel uyartımlı senkron generatörlerdir. Bununla birlikte sürekli mıknatıslı senkron generatör kullanımı ile uyartım kayıpları azaltılmıştır. Diğer yandan güç seviyesinin artması ve hızın düşmesi doğrudan sürürlü generatörleri daha büyük ve pahalı yapmaktadır. Doğrudan sürürlü rüzgar türbinlerinin enerji piyasasından aldığı pay, yarı iletken teknolojisindeki iyileştirme çabalarıyla artmaktadır.

Bir rüzgar türbini başlıca olarak; kanatlardan, rotor, hub, generatör, güç elektroniği sistemleri, dişli sistemi, fren, yaw mekanizması, güç transformatörü ve kuleden meydana gelmektedir. Bir rüzgar türbini ekipmanları ve konumları Şekil 3.1.'de detaylı olarak gösterilmiştir.



Resim 3-1. Bir rüzgar türbinini oluşturan elemanlar ve konumları [28]

3.2. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Dönüşüm Sistemleri ve Kontrol Teknikleri

Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm sistemlerinde güç elektroniği yarı iletken elemanları kullanılmaktadır. Bu elemanlar, enerjinin istenilen forma çevrilmesinde ve kontrol edilmesinde kullanılırlar. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler, güç kapasitesi yüksek anahtarlama elemanları ve hızlı DSP (Sayısal Sinyal İşlemcisi) işlemcilerini ortaya çıkarmış ve böylece asıl hedef olan rüzgar enerjisinden optimum güç elde edilmesini sağlayan sistemlerin tasarımına olanak sağlamıştır.

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, türbin hızı ve üretilen gerilimin frekansı esas alındığında çalışma prensiplerine göre üçe ayrılırlar;

1. Sabit hız ve sabit frekans
2. Değişken hız ve sabit frekans
3. Değişken hız ve değişken frekans

3.2.1. Sabit Hız ve Sabit Frekans

Bu tür sistemlerde rüzgar türbinin mili generatöre, generatör stator terminalleri ise enterkonnekte sisteme doğrudan bağlanmaktadır. Generatör olarak senkron generatör veya asenkron generatör kullanılmaktadır. Senkron generatör kullanıldığı zaman ikaz akımı güç elektroniği devreleri ile kontrol edilerek güç faktörü ayarlanabilir. Asenkron generatör

kullanılması durumunda rotor hızını senkron hızın üzerinde tutabilmek için türbin ile rotor arasında dişli kutusu kullanılmalıdır.

3.2.2. Değişken Hız ve Sabit Frekans

Rüzgar hızının değiştiği durumlarda kanat uç hız oranı optimum bir değerde tutulmak suretiyle rüzgardan elde edilecek gücün maksimum transferi sağlanabilir. Rüzgar türbininden maksimum güç elde etmek için kanat uç hız oranı, kanat aralık açısı değiştirilmek suretiyle optimum değerde tutulabilir. Burada generatör çıkışı değişken gerilim ve frekansta olacağından enterkonnekte şebekeye doğrudan bağlanamaz. Generatör çıkışlarını şebeke gerilim ve frekansı ile uyumlandırmak için bir AA\DA\AA dönüştürücü yardımı ile üretilen enerji önce DA daha sonra da AA forma çevrilebilir.

3.2.3. Değişken Hız ve Değişken Frekans

Bu tür sistemlerde, kapasitör yardımı ile kendinden uyarımlı asenkron generatör, alan sargılı senkron generatör veya sürekli mıknatıslı senkron generatörler kullanılır. Generatör çıkışları bir kontrollü AA\DA doğrultucu yardımı ile doğru gerilime çevrilip akü sistemi şarjında kullanılabilir. Kontrol edilmesi gereken parametreler çıkış gerilim değeri olup değişen rüzgar hız koşullarına göre uyarımı sağlayan asenkron generatörlerin mıknatıslanma akımını sağlayan kapasitörlerin değerlerinin denetlenmesi gerekir. Alan sargılı senkron generatörler hem ikaz hem de kontrollü AA\DA doğrultucu yardımı ile çıkış gerilimi kontrol edilebilir.

Rüzgar hızının aşırı arttığı durumlarda türbini korumak amacı ile kanat aralık açısı değiştirebilir. Böyle bir sistemde çıkış gücü kontrol değişkeni olarak kullanılır.

3.3. Güç Elektroniği Sistemleri

Güç elektroniği sistemleri, yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler ile paralellik göstermektedir. Kullanılan sistemler aracılığı ile daha hızlı ve güvenli şekilde akım ve gerilim değerlerini nominal değerlerine taşıyabilir ve sistemlerin güç kayıpları azaltılabilir. Gelişen teknoloji ile daha büyük güçlü sistemlerin kontrol edilebilmesi ile birlikte maliyetleri de azalmaktadır.

3.3.1. Soft - Starter

Soft-starter sistemleri, sabit hızlı rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlantıları sırasında kullanılan güç elektroniği sistemleridir. Bu sistemlerin kullanılma amaçları, hücum akımlarını azaltmak ve böylece şebekeye ilişkin bozulmaları sınırlandırmaktır. Soft-starter güç elektroniği sistemleri, her bir fazda anahtar olarak iki adet tristörden oluşmaktadır. Bu tristörler her bir faz için paralel olmayan şekilde bağlanmaktadır. Şebeke periyodunda generatörün şebekeye yumuşak bağlantısı, tristörlerin tetikleme açısı ayarlanarak gerçekleştirilir.

3.3.2. Kapasitör Grubu

Kapasitör grupları, sabit hızlı rüzgar türbin sistemlerinde kullanılırlar ve asenkron generatörlerine reaktif güç sağlayan elektriksel bir bileşendir. Böylece, generatör tarafından absorbe edilen reaktif güç en aza indirilir. Rüzgar türbin generatörleri, bir zaman periyodunda generatörün ortalama reaktif güç talebine bağlı olarak belirli sayıda kapasite grubunun sürekli olarak devrede olduğu ya da devreden çıkarıldığı tam yük dinamik kompanzasyona sahip olabilir. Kapasitör grupları, şebekede aşırı gerilimler söz konusu olduğunda ağır bir şekilde yüklenmiş ve hasar görmüş olabilirler, bu sebepten dolayı bakım maliyetleri artabilir.

3.3.3. Doğrultucular ve Eviriciler

Ayarlanabilir bir hız sürücüsü olarak da adlandırılan geleneksel bir frekans konverteri, alternatif akımı doğru akıma dönüştüren doğrultucu, enerjinin depolandığı kondansatörler ve doğru akımı alternatif akıma dönüştüren evirici gibi üç farklı parametreden oluşur. Doğrultucu sistemleri olarak genellikle kontrolsüz yarı iletken elemanlar olan diyotlar kullanılmaktadır. Diyotlar sadece doğrultma modunda kullanılabilirken, kontrollü yarı iletken elemanlar hem doğrultma hem de evirme modunda kullanılabilirler. Bu elemanların kullanımı ile kayıplar azalmakta ve maliyetleri de düşmektedir. Bunun yanında yapısal özellikleri olarak lineer değildirler ve harmonik üretirler. Ayrıca tek yönlü bir güç akışı söz konusudur. Generatör gerilimini ya da akımını kontrol edemezler. Bundan dolayı da gerilimi kontrol edilen bir generatör ve akımı kontrol edilebilen bir evirici ile birlikte kullanılabilirler. Diyotların kullanıldığı doğrultucu sistemleri yalnızca senkron generatörler ile kullanılabilir. Bunun nedeni reaktif bir mıknatıslanma akımı gerektirmemeleridir. Yarı

iletken anahtar olarak tristörlerin kullanıldığı sistemlerde, kayıpların az olmasına rağmen şebekeye bağlanması gerekmektedir. Bu tip inverterler, reaktif güç harcarlar ve büyük değerlikli harmonikler üretirler. Yarı iletken teknolojisinin gelişimi ile maliyetler düşmekte anahtar güçleri ve anahtarlama hızları artmaktadır. GTO ve IGBT gibi yarı iletken anahtarların kullanıldığı doğrultucu devreleri, değişken hızlı asenkron generatörleri ile kullanılmalıdır çünkü reaktif gücü kontrol edebilirler [6].

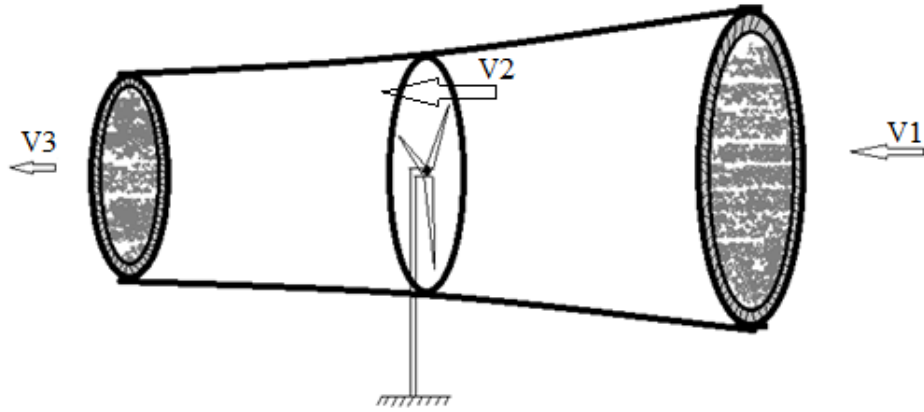
3.3.4. Frekans Konverterleri

Frekans konverterleri olarak; arka arkaya konverterler, çok seviyeli konverterler, tandem konverterler, matrix konverterler ve rezonans konverterler kullanılmaktadır. Arka arkaya konverterler, iki adet darbe genişlikli (PWM) konverterden oluşan çift yönlü bir güç konverteridir. DA link gerilimi, şebeke akımının tam kontrolünü sağlamak için şebeke hat gerilimi büyüklüğünden daha yüksek bir seviyeye güçlendirir. Güçlendirme indüktansının varlığı, giriş harmonik filtresindeki talepleri azaltır ve şebekedeki olağandışı şartlara karşı konverter için koruma sağlar. İnverter ile doğrultucu sistem arasındaki kondansatör grubu, konverterin diğer tarafı etkilemeden hem generatör tarafında hem de şebeke tarafından asimetrisinin kompanzasyonuna imkan vererek iki inverterin kontrolünün ayrılmasını mümkün hale getirir. Bu kondansatör grubunun varlığı, matrix konverter gibi bir DA link kapasitörü olmayan bir konverter ile karşılaştırıldığında, sistemin toplam çalışma ömrünü ve verimini azaltmaktadır. Ancak bir arıza söz konusu olduğunda matrix konverterin koruması arka arkaya konverterin koruması kadar iyi değildir. Bu özelliği yanında matrix konverter ile anahtarlama kayıpları kıyaslandığında daha yüksektir. Matrix konverterin dezavantajı ise, daha yüksek seviyede iletim kayıpları ve çıkış gerilim konverterin sınırlanmasıdır [4].

Sabit DA link gerilimine ve yalnızca iki çıkış seviyesine sahip konverterler ile karşılaştırıldığında matrix konverterin çıkış harmonik içeriği daha azdır. Bunun sebebi ise, matrix konverterin çıkış geriliminin üç gerilim seviyesinden oluşmasıdır. Ancak harmonik performansları değerlendirildiğinde çok seviyeli konverter, giriş filtrelerinde en düşük taleplere sahip konverter olarak ve bu neden ile hem şebeke tarafından hem de generatör tarafında en iyi özelliğe sahip olma anlamında üstündürler [4].

4. RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELDE EDİLEBİLECEK MEKANİK GÜÇ HESABI VE GÜÇ DAĞILIMLARI

Rüzgar türbinin rotoru hava akımındaki enerjiyi absorbe eder ve bu da rüzgarın hızına azaltıcı bir etkide bulunur. Bir rüzgar türbini montajı yapılırken bu etkilere dikkat etmek gerekir. Şekil 4.1.'de havanın rotor çevresindeki akışı verilmiştir. Rüzgar, pervanelere temas ettikten sonra hızı azalarak devam eder. Rüzgarın pervanelere temas ettiği ve pervaneleri terk ettiği anlardaki kinetik enerjileri arasındaki fark, rüzgar enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülen miktarına eşittir. Bu gücün hesabında kinetik enerji formülü temel alınır.



Şekil 4.1. Havanın rotor çevresindeki akışı

$$W_w = V_a \frac{q}{2} (V_1^2 - V_3^2) \quad (4.1)$$

Burada;

q = Birim hacim için havanın yoğunluğu (kg/m^3)

V_1 = Türbine giren rüzgarın hızı (m/sn)

V_2 = Türbinden geçen rüzgarın hızı (m/sn)

V_3 = Türbinden çıkan rüzgarın hızı (m/sn)

V_a = Hava hacmi elemanı

Rüzgar türbininin gücü şu şekilde ifade edilir;

$$P_w = \frac{dW_w}{dt} = \left(\frac{d(V_a \left(\frac{q}{2}\right) (V_1^2 - V_3^2))}{dt} \right) \quad (4.2)$$

Türbin rotorundan geçen hava hacminin akışı ise;

$$\frac{dV_a}{dt} = A_R V_2 \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir. Yarı kararlı halde güç;

$$P_w = A_R \frac{q}{2} (V_1^2 - V_3^2) V_2 \quad (4.4)$$

Burada A_R , güç absorpsiyonu ve türbin işletme koşullarını gösteren bir katsayıdır. Rüzgar türbininden elde edilecek maksimum güç Betz tarafından aşağıda verildiği gibi ifade edilmiştir [3].

$$P_{wmax} = \frac{16}{27} A_R \frac{q}{2} V_1^3 \quad (4.5)$$

Rotordan geçen havanın ortalama hızının, türbine giren rüzgarın hızı ile türbinden çıkan rüzgarın hızının ortalaması olduğu varsayılırsa bu durumda rotordan geçen havanın kütlesi;

$$m = q A \frac{(V_1 + V_3)}{2} \quad (4.6)$$

olarak elde edilir. Newton 'un ikinci kanuna göre rotor tarafından elde edilen güç;

$$P = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_3^2) \quad (4.7)$$

$$P = \frac{q}{4} (V_1^2 - V_3^2) (V_1 + V_3) A \quad (4.8)$$

Rotorun rüzgarı engellemediği kabul edilerek aynı alandan geçen havanın gücü;

$$P_0 = \frac{q}{2} V_1^3 A \quad (4.9)$$

P ile P_0 arasındaki oranına verim katsayısı denir.

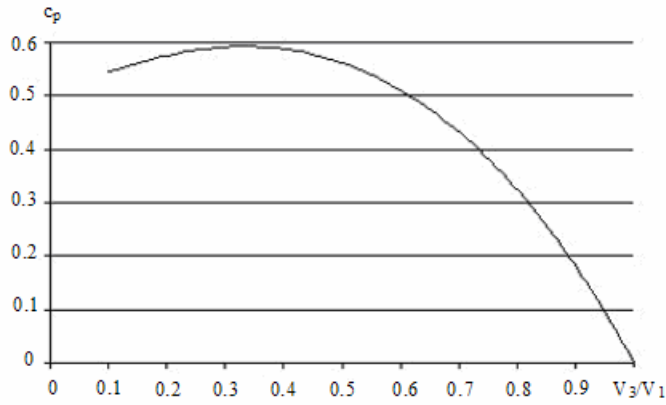
$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{q}{4} (V_1^2 - V_3^2) (V_1 + V_3) A}{\frac{q}{2} V_1^3 A} \quad (4.10)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right) \left(1 + \frac{V_3}{V_1} \right) \quad (4.11)$$

C_p 'nin $\frac{V_3}{V_1}$ 'in fonksiyonu olarak çizilmiş eğrisi Şekil 4.2.'de verilmiştir. Eğriden de görülebileceği gibi fonksiyon maksimuma $\frac{V_3}{V_1} = \frac{1}{3}$ değerinde ulaşmaktadır. Elde edilecek maksimum güç ise toplam rüzgar gücünün 0.593 'ü veya $\frac{16}{27}$ 'sidir. Yani bir rüzgar

türbininde verim katsayısının alabileceği maksimum değer 0.593'tür. Verim katsayısının pratikte alabileceği değerler ise 0.1 ile 0.45 arasındadır. Bu değer, Betz tarafından 1926 yılında formülize edilmiştir ve Betz limiti olarak bilinmektedir [3].

Rüzgar gücü, birim zaman başına mevcut toplam enerjidir. Rüzgar, türbin rotor tarafından mekanik enerjiye dönüştürülür bu da hava kütlelerinde indirgenmiş hıza neden olmaktadır. Rüzgar, türbin tarafından tamamen çıkarılamaz çünkü hava kütlesi alıcı rotor bölgesinde tamamen durdurulur. Bu takip eden hava kütleleri için kesit alanının tıkanmasına neden olur. Hız azalması nedeni ile rüzgardaki gücün kullanımı konusundaki teorik optimum değer 0.593'tür. Bu sebepten dolayı, herhangi bir kayıp olmaksızın güç alımı mümkün olsa bile, rüzgar türbini tarafından rüzgar gücünün yalnızca %59'u kullanılabilir [3].



Şekil 4.2. C_p 'nin $\frac{V_3}{V_1}$ 'in fonksiyonu olarak çizilmiş eğrisi [3]

4.1. Rüzgar Enerjisinden Elde Edilebilecek Mekanik Güç Hesabı

Rüzgarın kinetik enerjisinden elde edilecek mekanik enerji dönüşümünde; kanatlar, rotor ve mil görev almaktadır. Rüzgardan elde edilen, denklemleri Bölüm 4'de verilerek anlatılan kinetik enerji denklemleri yardımı ile;

R = Kanat çapı (m)

A = Süpürme alanı (m^2)

λ = Tepe uç hız oranı (m/sn)

β = Kanat açısı

C_p = Performans katsayısı

V = Rüzgar hızı (m/sn)

Kütle ve hıza bağlı kinetik enerji denklemi;

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (4.12)$$

Burada m, kütleyi sembolize etmektedir. Akışkan yoğunluğuna bağlı olarak kinetik enerji denklemi ise;

$$E_k = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (4.13)$$

Akışkanların belirli hız ile belirli bir alan içerisinde geçerken oluşturdukları enerji akış oranı ile doğru orantılıdır. Bu yüzden bir alan içerisinde geçen belirli bir V hızındaki rüzgarın güç denklemi;

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4.14)$$

Türbin performansı C_p 'ye bağlı yatay eksenli rüzgar türbinlerinden elde edilen mekanik güç denklemi;

$$P_m = C_p (\lambda , \beta) \frac{\rho A}{2} V^3 \text{ (Watt)} \quad (4.15)$$

Kanatların süpürme alanı ise;

$$A = \pi \left(\frac{R^2}{4} \right) \text{ (m}^2\text{)} \quad (4.16)$$

Güç yoğunluğu denklemi ise;

$$P_{\text{güç yoğun.}} = \frac{P_m}{A} \text{ (Watt / m}^2\text{)} \quad (4.17)$$

$$P_{\text{güç yoğun.}} = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 \quad (4.18)$$

Yukarıda denklemler dahilinde genel denklem;

$$C_p (\lambda , \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{(-C_5/\lambda_i)} + C_6 \lambda \quad (4.19)$$

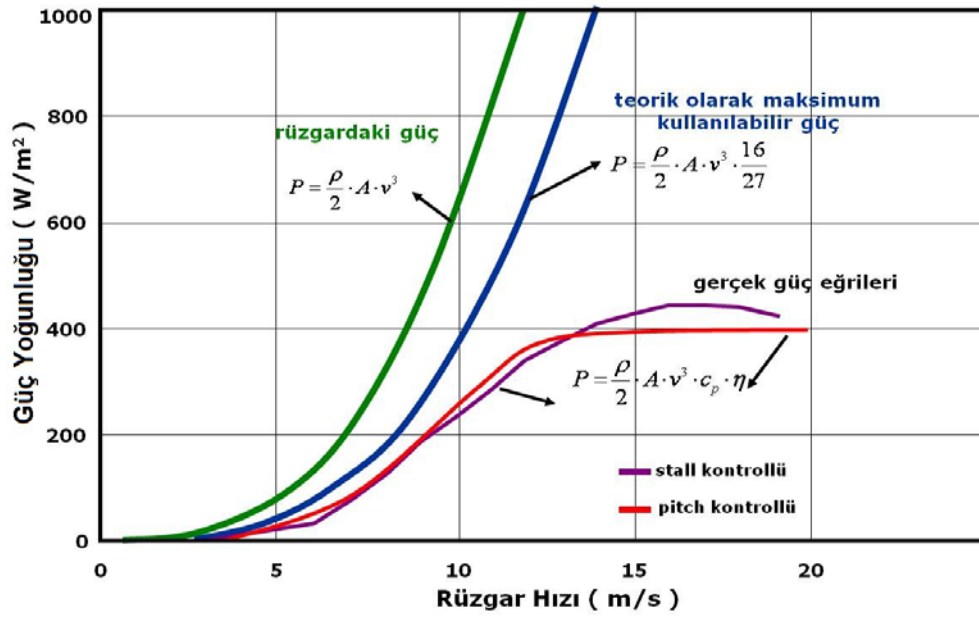
Gerekli olan uç hız oran denklemi;

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4.20)$$

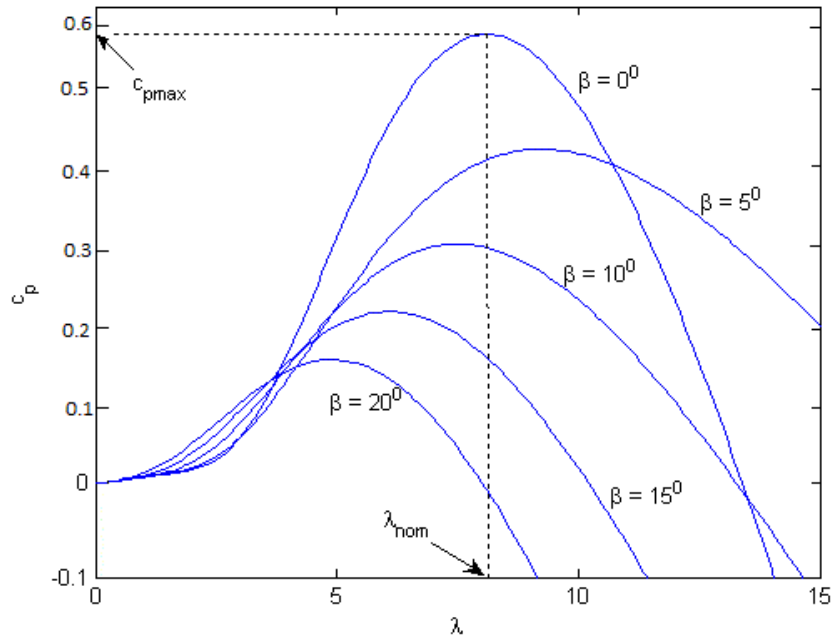
Burada; $C_1 = 0.5176$; $C_2 = 116$; $C_3 = 0.4$; $C_4 = 5$; $C_5 = 21$; $C_6 = 0.0068$ olarak alınır [12].

C_p 'nin fonksiyon değişkenleri olan $\lambda=8.1$ ve $\beta=0^0$ olduğu durumda Şekil 4.4.'de görüldüğü gibi elde edilecek mekanik güç maksimum olur.

Rüzgar türbinleri teknolojisi aerodinamik, mekanik, meteoroloji elektrik gibi birçok disiplini içinde barındıran bir konudur. Eşit güçlü sistemlerde kanat sayısı veya uzunluğu arttıkça atalet momentinin artması nedeni ile türbin devir sayısı düşmektedir. Bu tür sistemler uygulama hayatında yüksek momentin gerektiği su pompalama gibi sistemlerde kullanılmaktadır. Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin pervaneye dişli kutusu olmaksızın doğrudan bağlanabildiğinden düşük hızlı nominal devir sayısı elde etmek için yüksek kutup sayısına sahip olmaları gerekmektedir [29].



Şekil 4.3. Rüzgar türbinlerinde rüzgar hızına bağlı güç yoğunluğu değişimi



Şekil 4.4. Farklı kanat açılarına göre C_p 'nin değişimi

4.2. Weibull Dağılımı

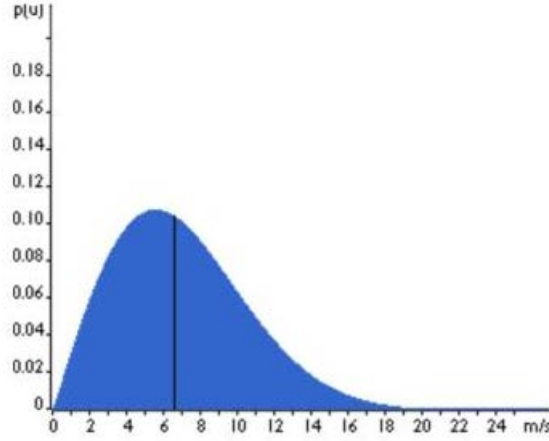
Rüzgar enerjisinin frekans dağılımına en uygun istatistiksel dağılımının Weibull Dağılımı olduğu başta Justus ve Lyons tarafından ifade edilmiştir. Rüzgar hız değerlerinin hakim yön ve şiddetlerinin bulunması, bu dağılımın kullanılmasının esas sebepleri arasında yer almaktadır. Rüzgarın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgar endüstrisinde çok önemlidir. Türbin tasarımcıları, türbin iyileştirilmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgar dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Eğer bir yıl boyunca rüzgar hızı ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgarların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgarların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir bölge için rüzgar dağılımı ya ölçülerek ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde Weibull Dağılımı ile belirlenir. Weibull Dağılımı eğrisi simetrik değil çarpıktır. Bu eğriyi oluşturan her bir hız frekansı, ortalama hızın bulunmasını da sağlar [3]. Buna göre Weibull Dağılımı;

V = Rüzgar Hızı (m/sn)

c = Ölçek Değişkeni (m/sn)

k = Şekil Değişkeni olmak üzere;

$$P(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (4.21)$$



Şekil 4.5. Weibull dağılım grafiği [6]

Şekil 4.5.'de ana hızı 7 m/sn, şekil değişkeni 2 ve ölçek değişkeni 7,9 alınarak çizilmiş bir Weibull Dağılımı verilmiştir. Aynı zamanda bu dağılıma Rayleigh dağılımı denir. Rüzgar türbini üreticileri, makinaların standart performans diyagramlarını Rayleigh Dağılımını kullanarak verirler. Bunun nedeni; değişik yerlerdeki rüzgar dağılımlarının bilinmemesidir [3].

4.3. Rüzgar Türbin Kanat Uç Hız Oranı

Kanat uç hız oranı Denklem 4.22 'de gösterildiği gibi tanımlanır. Kanat sayısı ile kanat uç hız oranı arasındaki değişim grafiği ise Şekil 4.6.'da verilmiştir [5].

ω_r = Açısal hız (rad/sn)

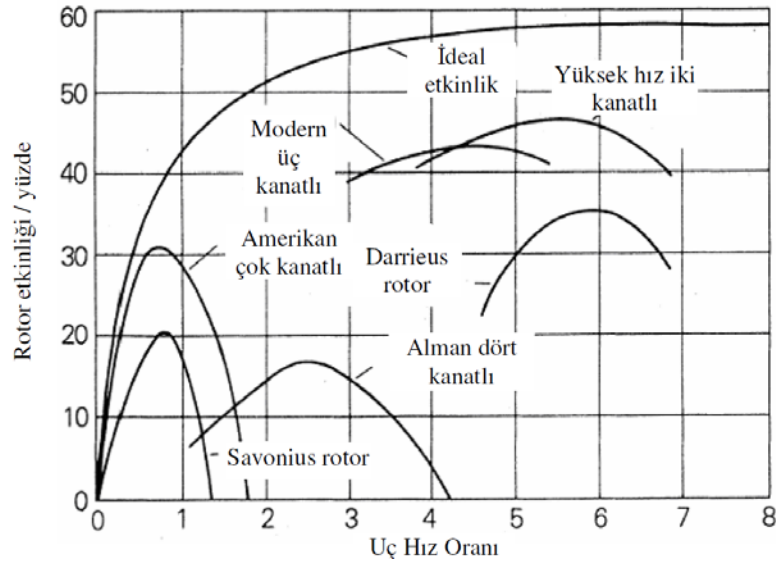
r = Rotor yarıçapı (m)

V = Rüzgar hızı (m/sn)

λ = Kanat uç hız oranı

olmak üzere;

$$\lambda = \frac{\omega_r r}{V} \quad (4.22)$$



Şekil 4.6. Farklı kanat yapılarında $C_p - \lambda$ değişim grafiği [6]

Rüzgar türbin sistemlerinin kanat sayıları artıka, kanat uç hız oranları azalmaktadır. Bununla ilgili olarak, rüzgar türbin kanat sayıları ile uç hız oranları arasındaki Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kanat sayısına bağlı uç hız oranı değişimleri [6]

Kanat Sayısı	Uç Hız Oranı
8-24	1
6-12	2
3-6	3
2-4	4
2-3	>5

5. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR ÇEŞİTLERİ

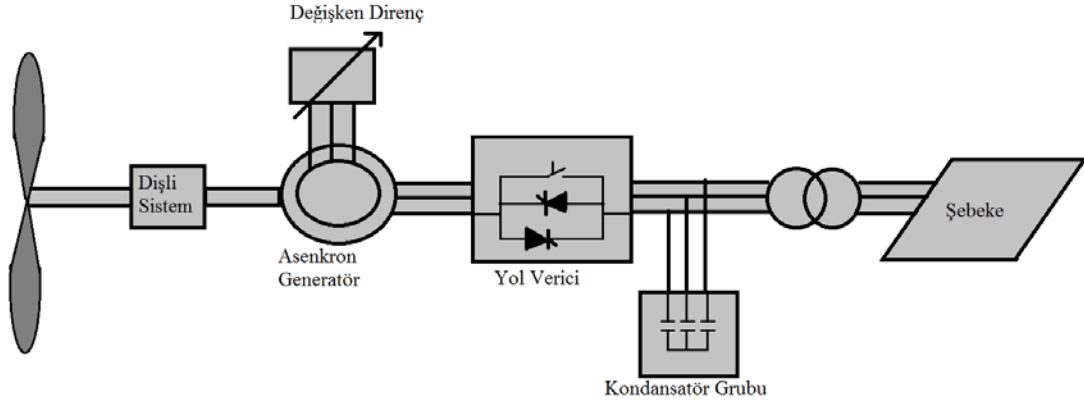
5.1. Doğru Akım Generatörleri

Doğru akım generatörleri, düşük güvenilirlik ve bakım gerektirmeleri gibi dezavantajlarına rağmen, hız kontrollerinin kolay olması nedeni ile endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Doğru akım generatörleri, küçük kapasiteli rüzgar türbinlerinde, özellikle elektriğin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı yerlerde tercih edilmektedir. Son yıllarda mekaniksel komütatörlü doğru akım makinaları, komütatörü elimine etmek için sürekli mıknatıslı olarak tasarlanmaya başlanılmıştır. Bu sistemde üretilen alternatif akım, doğru akıma yarı iletken elemanlar ile dönüştürülürler. Fırçasız doğru akım generatörleri olarak da isimlendirilen bu generatörler, sürekli mıknatısların kapasitelerinin ve güçlerinin sınırlı olması nedeni ile küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır.

5.2. Asenkron Generatörler

Rüzgar türbin sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan generatör çeşitidir. Bunun nedeni sahip olduğu sağlamlık, düşük maliyet ve mekanik basitlik gibi avantajlarından dolayıdır. Asenkron generatörlerin dezavantajları ise, statorun reaktif bir mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymasıdır. Ayrıca asenkron generatörler uyartım akımı için başka bir kaynağa ihtiyaç duyarlar ve bundan dolayı da reaktif güç harcarlar. Reaktif güç, şebeke ya da güç elektroniği sistemi tarafından sağlanabilir. Yalnızca asenkron generatörün şebekeye bağlı olduğu durumda manyetik alan oluşur. Oluşan bu manyetik alan, sargıdaki kutup sayısı ve akımın frekansı tarafından belirlenen bir hızda döner. Bu neden ile rotor senkron hızı aşan bir hızda dönerse nispi bir hareket tarafından (kayma) dönen stator alanı ile rotor arasında bir elektrik alan indüklenir. Bu durum da rotor sargılarında bir akıma neden olur. Rotorun ilgili manyetik alanının stator alanı ile etkileşimi, rotor üzerinde torkun oluşmasını sağlar.

Asenkron generatörler, rotorların yapısına göre; sincap kafesli asenkron generatörler (SCIG) ve rotoru sargılı asenkron generatörler (WRIG) olmak üzere ikiye ayrılırlar.



Şekil 5.1. Asenkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması [1]

5.2.1. Sincap Kafesli Asenkron Generatörler

Sincap kafesli asenkron generatörler, doğrudan şebekeye bağlanabilirler. Rüzgar hızındaki değişikliklerin neden olduğu generatör kaymasından dolayı, sincap kafesli asenkron generatörlerin hızı yalnızca yüzde birkaç derece değişir. Bu neden ile bu generatör sabit hızlı rüzgar türbinleri için kullanılabilir. Generatör ve rüzgar türbin rotoru bir dişli kutusu aracılığı ile bağlanır. Çünkü optimal rotor ve generatör hız aralıkları farklıdır.

Sincap kafesli asenkron generatörleri esas alan rüzgar türbinleri tipik olarak bir soft-starter mekanizması ve reaktif güç harcaması için bir birim ile donatılır. Çünkü sincap kafesli asenkron generatörleri dik bir tork hız karakteristiğine sahiptirler ve bu neden ile rüzgar gücündeki dalgalanmalar şebekeye doğrudan iletilir. Bu geçici rejim özellikle rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantısı sırasında kritiktir. Burada hücum akımı nominal akımın 7-8 kat fazlası olabilir. Zayıf bir şebekede bu yüksek hücum akımı ciddi gerilim bozulmalarına neden olabilir. Bu neden ile sincap kafesli asenkron generatörün şebekeye bağlantısı, hücum akımını sınırlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Normal çalışma ve şebekeye doğrudan bağlantısı sırasında sincap kafesli asenkron generatör, çok sağlam ve kararlıdır. Kayma değişir ve artan yüke bağlı olarak artar. Temel problem, şebekeden stator sargısına sağlanan mıknatıslanma akımından dolayı, tam yük güç faktörünün düşük olmasıdır. Bu düşük güç faktörü, generatöre paralel olarak kondansatör bağlanılarak kompanze edilir. Sincap kafesli asenkron generatörlerde, aktif güç, reaktif güç, uç gerilimi ve rotor hızı arasında benzersiz bir ilişki vardır. Bu ilişki; yüksek rüzgar hızlarında yalnızca generatör daha fazla reaktif güç çekerse, rüzgar türbinin daha fazla aktif güç üretebilmesidir. Sincap kafesli asenkron generatörlerde harcanan reaktif güç kontrol edilebilir değildir. Çünkü bu güç miktarı rüzgar hızlarına göre

değişmektedir. Bu herhangi bir arıza durumunda ve reaktif güç kompanze sistemine sahip olmayan sincap kafesli asenkron generatörler sistem üzerinde ciddi sıkıntılar oluşturabilir.

5.2.2. Rotoru Sargılı Asenkron Generatörler

Rotoru sargılı asenkron generatörlere uyarma akımları uygulanabilir ve bu uygulanan akım kontrol edilebilir. Rotor sargıları, kayan halkalar ve fırçalar ya da güç elektroniği elemanları aracılığı ile bağlanabilir. Güç elektroniği elemanları kullanarak, güç rotor devresine uygulanabilir ve generatör stator devresinden ya da rotor devresinden mıknatıslanabilir. Bu neden ile kayma enerjisinin rotor devresinden geri kazanılması ve statorun çıkışına beslenmesi mümkündür. Bu karakteristik özelliklerinin yanında rotoru sargılı asenkron generatörler, sincap kafesli asenkron generatörler kadar sağlam olmamakla birlikte pahalıdırlar. Rotoru sargılı asenkron generatörler endüstride; OptiSlip asenkron generatörler (OSIG) ve çift beslemeli asenkron generatörler (DFIG) olarak kullanılırlar.

5.2.2.1. OptiSlip Asenkron Generatörler

OptiSlip asenkron generatör modeli Danimarkalı Vestas firması tarafından, oluşan boralar sırasında rüzgar türbini üzerindeki yükü en aza indirmek için tasarlanmıştır. OptiSlip asenkron generatörleri, değişken bir kaymaya sahip olmasına ve optimum kaymayı seçmesine imkan vererek sürüş torkunda ve güç çıkışında daha küçük dalgalanmalara neden olur. Bu sistem ise basit olma özelliğinin yanında güvenilir ve ekonomik bir yöntemdir. Bu avantajları yanında OptiSlip asenkron generatörlerde hız aralığı % 0-10 aralığında sınırlı kalmaktadır. Çünkü bu aralık değişken rotor direncinin büyüklüğüne bağlıdır. Aynı zamanda zayıf aktif ve reaktif güç kontrolü yapabilmekle birlikte kayma gücü değişken dirençte kayıp olarak harcanmaktadır [4].

5.2.2.2. Çift Beslemeli Asenkron Generatörler

Çift beslemeli asenkron generatörleri; rotoru sargılı asenkron generatörlerinin, stator sargılarına sabit frekanslı üç fazlı bir şebekeye doğrudan, rotor sargılarına ise çift yönlü ve arka arkaya IGBT gerilim kaynağı bağlanılmış halidir. Statordaki gerilimin şebekeden uygulandığı ve rotordaki gerilimin güç konverteri tarafından indüklenmesinden dolayı çift beslemeli olarak adlandırılmışlardır. Çift beslemeli asenkron generatörler, büyük ancak sınırlı bir aralık üzerinden değişken hızlı çalışmaya imkan verir. Konverter, değişken frekanslı bir rotor akımı uygulayarak mekanik ve elektriksel frekans arasındaki farkı

kompanze eder. Normal çalışma ve meydana gelebilecek arızalar esnasında, generatörün davranışı güç konverteri ve kontrolörleri tarafından belirlenir.

İki konverterden oluşan güç konverter sistemi birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilirler. Bu kontrol; rotor tarafındaki konverter kontrol edilerek aktif ve reaktif güç, hat tarafı konverter kontrol edilerek ise DA link gerilimi ve birim güç faktöründe çalışma kontrol edilebilir. Konverterin büyüklüğü toplam generatör gücü ile değil seçilmiş hız aralığı ile ve dolayısıyla kayma gücü ile orantılıdır. Bundan dolayı senkron hızın etrafındaki hız aralığı genişledikçe konverterin de maliyeti artmaktadır.

5.3. Senkron Generatörler

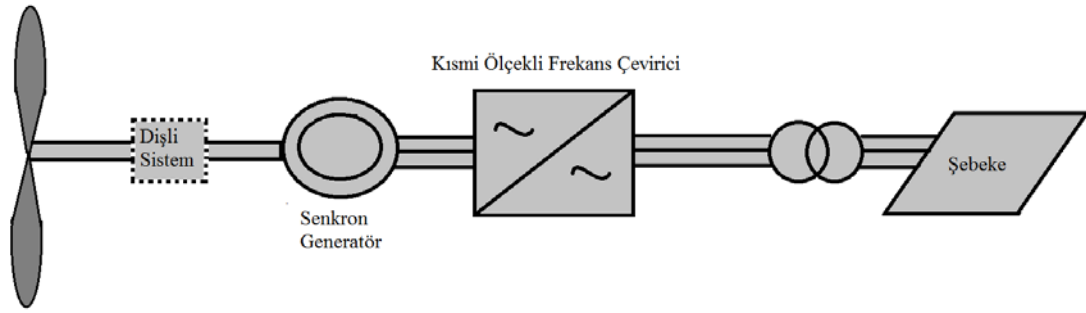
Çoğu makinalarda olduğu gibi senkron makinalarda iki ana bölüme sahiptir. Bunlar hareketsiz olan kısım; stator ve hareketli olan kısım; rotor olarak isimlendirilir. Senkron generatörler, statorunda ve rotorunda sargıları olan makinalardır. Yükten bağımsız olarak sabit hız istenen yerlerde tercih edilirler. Senkron motorlar, inverter veya ayarlı gerilim ve frekans kaynağı ile beslenirse hız ayarı yapılabilir. Doğru akım makinalarına göre makina boyutları ve atalet momentleri daha küçüktür. Asenkron makinalarına göre ise verimleri ve güç faktörleri daha yüksektir.

Makinayı döndürebilmek için, biri statordan diğeri rotordan iki akıya ihtiyaç vardır. Bu prensibe bağlı kalmak suretiyle farklı makina tasarımları yapmak mümkündür.

Senkron generatörlerde manyetik alan, sürekli mıknatıslar ya da alan sargıları kullanılarak sağlanır. Ayrıca uygun kutup sayıları kullanıldığı takdirde rüzgar türbini ile arasında dişli mekanizmaları kullanmaya ihtiyaç yoktur. Bu durumdan dolayı senkron generatörler değişken rüzgar hızlarında çalışma imkanı sağlarlar. Senkron generatörlerin reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymuyor olmaları, asenkron generatörlerinden ayıran en önemli avantajıdır. Senkron generatörler, tam güç kontrolü için uygundur. Çünkü şebekeye bir güç elektroniği konverteri aracılığı ile bağlanmaktadır. Buradaki konverterin temel amacı; yapısal olarak bora etki niteliğindeki rüzgar hızlarının neden olduğu güç dalgalanmaları ve ağ tarafından gelen geçici rejimler için bir enerji tamponu gibi davranmak ve mıknatıslanmayı kontrol ederek, şebeke frekansı ile senkron kalarak meydana gelebilecek sorunları önlemektir. Bu özellikleri yanında senkron generatörler, aynı güçteki sincap kafesli asenkron generatörlere göre daha pahalıdırlar.

Senkron generatörler, şebekeden reaktif güç ihtiyacı duymazlar. Bu daha kaliteli güç sağlanmasını sağlar. Bu avantajın önemi, rüzgar santrali küçük kapasiteli bir şebekeye uzun ve düşük gerilimli hatlarla bağlandığı zaman daha ön plana çıkmaktadır.

Senkron generatörler; rotoru sargılı senkron generatörler (WRSG) ve sürekli mıknatıslı senkron generatörler (PMSG) olarak ikiye ayrılırlar.



Şekil 5.2. Senkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması [1]

5.3.1. Rotoru Sargılı Senkron Generatörler

Rotoru sargılı senkron generatörlerin stator sargıları doğrudan şebekeye bağlanır ve böylece dönüş hızı besleme şebekesinin frekansı ile sabitlenir. Rotor sargısı, dönen bir doğrultucusu olan fırçasız bir uyarıcı ile ya da kayan bilezik ve fırça sistemi kullanılarak uyarılır. Rotoru sargılı senkron generatör, asenkron generatörler gibi herhangi bir ilave reaktif güç kompanzasyon sistemine ihtiyaç duymazlar. Doğru akımın aktığı rotor sargısı uyarıcı alanı oluşturur ve bu alan senkron hızda döner. Senkron generatörün hızı dönen alanın frekansı ve rotordaki kutup çifti sayısı tarafından belirlenir.

Senkron generatörlerin dişli kutusuna ihtiyaç duymuyor olmaları sistem açısından avantaj olsa da, büyük ve ağır generatör ve sistemin tam gücünü kaldırması gereken tam ölçekli bir güç konverterine ihtiyaç olması gibi dezavantajlara sahiptir.

5.3.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörler

Senkron makinanın rotorunda bulunan doğru akım uyarıtım sargıları sürekli mıknatıslar ile yer değiştirilerek rotorda meydana gelen manyetik akı sürekli mıknatıslar tarafından sağlanırsa sürekli mıknatıslı senkron makina (SMSM) elde edilmiş olunur.

Mıknatısların kullanılması, çalışma prensibi ve tasarım açısından senkron makinalar için çok elverişlidir. Rotoru sargılı senkron makinaya göre dinamik performansı daha da artmış olur. Senkron makinaların statorunda asenkron makinalarındaki gibi üç fazlı sargı

bulunur. Rotorda sargı yerine sürekli mıknatısın kullanılmasıyla fırça ve kollektörden kaynaklanan sakıncalar da giderilmiş olunur. Bunun yanı sıra, uyarma kayıpları ortadan kalktığı için termik sınırlar genişlemekte ve aynı hacimli bir makinadan daha büyük güçler elde edilebilmektedir. Rotorda Sm2Co17 veya Nd-Fe-B gibi yüksek enerjili sürekli mıknatısların kullanılması, hava aralığı indüksiyonunu sargılı makinalardan daha yüksek değerlerde tutar ve rotor sargılarında meydana gelen bakır kayıplarını ortadan kaldırarak verimin aynı güçteki senkron makinadan daha yüksek olmasını sağlar. Ayrıca makina boyutları da oldukça küçülür [4].

5.3.2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinaların Sınıflandırılması

Makinalar ilk olarak uyarma akımlarına göre DA ve AA olarak sınıflandırılırlar. Sürekli mıknatıslı makina, yapı olarak kısmen konvansiyonel DA makinanın özelliklerini taşımaktadır. Fakat sürekli mıknatıslı senkron makinaları, konvansiyel DA makinalarından ayırt edici özelliği elektrik sargıları yerine sürekli mıknatısların kullanılmasıdır.

Sürekli mıknatıslı alternatif akım makinalarında, mıknatıslar rotor içerisine veya rotor yüzeyine yerleştirilebilir. Bu makinalar, kollektör ve fırça bulunmadığından dolayı çok basit yapıdadır ve bu özelliklerinden dolayı sorunsuz kabul edilmektedirler.

Sürekli mıknatıslı alternatif akım makinaları iki grupta incelenebilir. Bunlardan birinde hava aralığı alan şiddeti trapezoidal, diğerinde sinüzoidaldir. Trapezoidal sabit mıknatıslı alternatif akım makinaları, fırçasız doğru akım (BLDC) makinaları olarak, sinüzoidal sürekli mıknatıslı alternatif akım makinaları da, konvansiyonel senkron makinalar ile olan benzerliklerinden dolayı sürekli mıknatıslı senkron makinalar (SMSM) olarak adlandırılır. Trapezoidal makina kontrol yapısı basit olması nedeniyle ilk geliştirilen makina türüdür. Fakat moment dalgalanmalarının varlığı bu makinanın yüksek performanslı uygulamalarda kullanılmasına izin vermemektedir. Daha sonra vektör kontrol yöntemlerinin de kullanılabildiği, yüksek performanslı sinüzoidal makina geliştirilmiştir. Sinüzoidal makina, pek çok uygulamada asenkron makina ile yarışabilecek en uygun motor olarak görünmektedir.

5.3.2.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina Tasarımları

Sürekli mıknatıslı senkron makinalar uygulama alanlarına göre farklı tiplerde tasarlanabilmektedir. Sinüzoidal akım ve gerilimlerle çalışmak üzere tasarlanan tiplerde genellikle stator sargıları, asenkron makinadaki gibi stator oyuklarına yerleştirilmiş üç fazlı

sargıdan meydana gelmektedir. Bu tip makinalarda sargılar iki tabakalı, dağıtılmış ve kırılganmış olarak sarılarak, sargı magnetomotor kuvvetleri ve hareket gerilimleri sinüs biçimine yaklaştırılmaktadır.

Rotorda kullanılan mıknatısların özelliği ve mıknatısların rotora yerleştiriliş şekilleri makinaların performansını etkilediğinden makina performansını artırmak için çeşitli tasarım şekilleri yapılmaktadır. Sürekli mıknatısların boyutlarının belirlenmesi ve makinaya yerleştirilmesinde önemli olan iki kriter vardır. Bunlar;

- 1) Hava aralığındaki akı yoğunluğunun değeri makinada kullanılan demir ve bakırın en iyi şekilde kullanılmasını sağlayacak büyüklükte olmalıdır.
- 2) Sürekli mıknatıslar, stator sargılarının manyetik etkilerinden etkilenmeyecek ve mıknatıslık özelliklerini kaybetmeyecek şekilde yerleştirilmelidir.

Farklı rotor şekilleri arasında en çok rastlanan ve diğer tasarımlara da temel oluşturan iki farklı tasarım aşağıda incelenmiştir:

- 1) Mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmesi
- 2) Mıknatısların rotorun içine yerleştirilmesi (gömülü mıknatıslı);
 - a) Radyal yerleştirilmiş gömülü mıknatıs yapısı
 - b) Dairesel yerleştirilmiş gömülü mıknatıs yapısı

5.3.2.2.1. Mıknatısların Rotor Yüzeyine Yerleştirilmesi

Bu tip rotorlarda mıknatıslar ince şeritler ya da yay şeklinde, rotor yüzeyine kuvvetli yapıştırıcılarla yapıştırılmışlardır. Mıknatıslar yarıçap ekseninde mıknatıslanırlar. Maliyet bakımından ucuz olan bu montaj şeklinde hava aralığı etkisi fazla olduğundan, d ve q eksenleri manyetik akıları birbirine eşit kabul edilir ve rotor indüktansı rotor konumuna göre değişiklik göstermez. Manyetik malzemenin bağıl geçirgenliği, hava boşluğu gibi davranır. Bu şekilde hava aralığında mıknatısların çalışma noktalarındaki indüksiyonlara eşit bir manyetik indüksiyon oluşur. Hava boşluğu genişlediğinden, L_s 'nin (stator indüktansı) değerinde azalma meydana gelir. Ancak düşük stator indüktansı nedeniyle alan zayıflatılması (field weakening) zordur.

Rotor manyetik olarak simetrik olduğundan, bu rotor yapısına sahip motorlarda senkronlamaya yardımcı olacak bir relüktans momenti oluşması söz konusu değildir. Basitliği ve manyetik olarak simetrik olması nedeniyle rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatıslar ile gerçekleştirilen makina, düz kutuplu makina olarak davranış göstermekte,

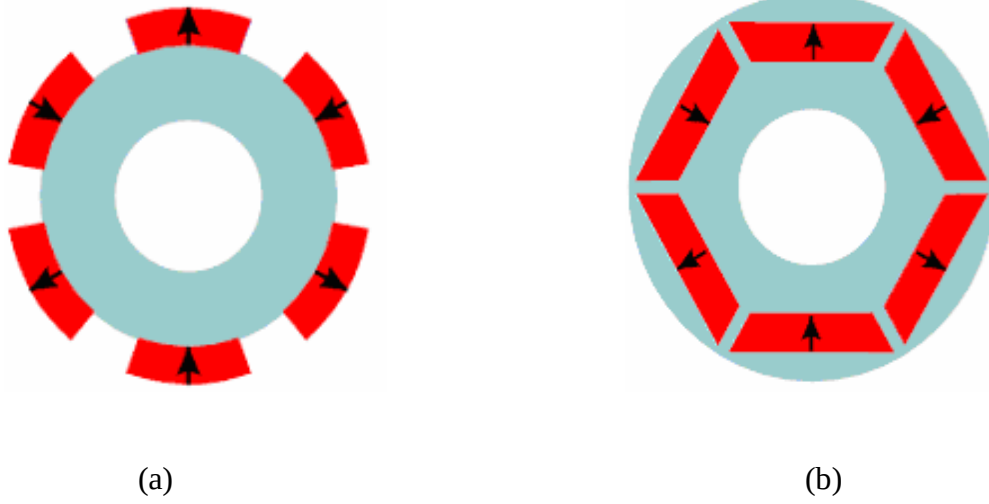
geniş hava aralığına sahip olmakta ve kutup akısının maruz kaldığı endüvi reaksiyonu zayıf olmaktadır.

Bu türde yapılan senkron makinalar daha çok literatürde fırçasız doğru akım makinaları (BLDC) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 5.3(a)'da bu tasarıma tipik bir örnek gösterilmiştir.

Basit yapılı olması nedeniyle en yaygın kullanılan rotor tasarımlarından biri olan bu rotor şeklinin en büyük sakıncası, mıknatısların merkezkaç kuvvetlerine karşı mukavemetlerinin düşük olmasıdır. Mıknatısların yerinden kopmaması için genellikle bu tür tasarımlar düşük hızlı uygulamalar için tercih edilirler. Bir diğer sakıncası ise stator dişlerinden dolayı çalışma noktalarında yüksek frekanslı titreşimler oluşmasıdır. Bu nedenle yüksek elektriksel iletkenlikteki Nd-Fe-B mıknatıslarının bu tasarımda tek parça halinde kullanılması sakıncalara sebep olabilir. Bu durumu önlemek için mıknatıslar yalıtılmış küçük parçalar şeklinde rotor yüzeyine yerleştirilir. Ayrıca yüzey mıknatıslı rotorun sağlamlığını artırmak için rotor yüzeyi manyetik olmayan malzeme ile kaplanabilir.

5.3.2.2.2. Mıknatısların Rotor İçine Yerleştirilmesi

Bölüm 5.3.2.2.1'de incelenen tasarımda hava aralığı indüksiyonun sınırlı olması ve mıknatısların yüksek hızlarda büyük merkezkaç kuvvetlerine maruz kalması, bir başka tasarımın geliştirilmesine neden olmuştur. Bu tasarımda, mıknatıs malzeme rotorun içinde açılan oyuklara yapıştırılmak suretiyle yerleştirilir. Bu rotor şeklinde mıknatısın etrafı hava yerine manyetik malzeme ile kaplı olduğundan relüktans momentinin oluşması kaçınılmazdır. Alan zayıflatılması ile relüktans momenti elde edilir. Gömülü tip mıknatıslı rotorun, yüzey mıknatıslı rotora göre en önemli üstünlüğü mekanik sağlamlığıdır. Mıknatıslar rotora gömülü olduklarından merkezkaç kuvvetlerine karşı mukavemetleri çok yüksektir. Bu nedenle yüksek hızlı uygulamalar için tasarlanırlar. Mıknatısları rotor içine gömülmüş senkron makinalarda dikkate değer özelliklerden birisi, diğer mıknatıslı makinalardan farklı olarak yüksek verime sahip olmasıdır. Stator akım bileşeni olarak mıknatıslama akımının ortadan kalkması makinanın güç katsayısını artırmaktadır.



Şekil 5.3. Mıknatısların rotor yüzeyine farklı yerleştirilmeleri a) Mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmesi b) Mıknatısların rotor oyuklarına yerleştirilmesi

Bu tasarımın en büyük dezavantajı ise maliyetli olmasıdır. Bu makinalarda mıknatısların rotorun içerisine yerleştirme işlemi oldukça iyi bir işçilik ve ileri teknoloji gerektiren bir işlemdir.

Mıknatısları rotor içine yerleştirilmiş (gömülü mıknatıslı) tasarımlar iki şekilde gerçekleştirilebilir;

5.3.2.2.2.1. Radyal Yerleştirilmiş Gömülü Mıknatıs Yapısı

Şekil 5.4(a)'da görüldüğü üzere, mıknatıslar rotorun içine radyal mıknatıslanma sağlayacak şekilde yerleştirilmektedir. Bu yapıda enine indüktans L_{sq} , boyuna indüktanstan L_{sd} 'den büyük olmaktadır. Bu mıknatıslar ile akı yoğunlaşması mümkündür, yani hava aralığı içerisindeki akı yoğunluğu, mıknatıs içerisinde daha yüksek olabilir. Böylece yüksek moment yoğunluğu sağlamak için düşük enerji mıknatısları (Ferrit Mıknatıslar) kullanılabilir. Bu rotor tasarımına sahip makinalarda hava aralığı küçük, endüvi reaksiyonu az olmaktadır. Akı zayıflatma yöntemi ile sabit güç bölgesindeki denetimi, sabit moment bölgesindeki kadar iyi yapılabilmektedir. Yüksek hızlı uygulamalar için idealdir. Çıkık kutuplu makina olarak davranış göstermektedir. Moment oluşumunda hem uyarma alanının hem de relüktans momentinin etkisi vardır. Yüzey mıknatıslı rotora göre, bu tasarımda aynı mıknatıs boyutu için rotorun vereceği momentin tepe değeri daha fazladır. Çünkü mıknatıslar tarafından relüktans moment oluşturulmaktadır.

Mıknatısların manyetik olarak kısa devre olmasını önlemek için rotor yüzeyi ile temas eden bölgeleri manyetik olmayan bir malzeme ile kaplanmıştır. Bu malzemeler oldukça pahalıdır.

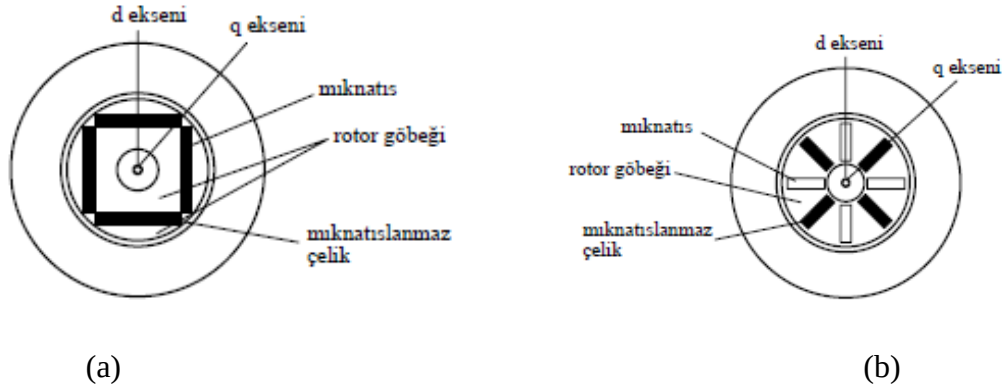
5.3.2.2.2. Dairesel Yerleştirilmiş Gömülü Mıknatıs Yapısı

Bu tasarımın en önemli özelliği mıknatıs boylarının ayarlanarak kutuplarda mıknatısların çalışma noktasından bağımsız bir indüksiyon sağlanabilmesidir. Bu özellik sayesinde hava aralığı indüksiyonu oldukça yüksek değerlere çıkarılabilirken, mıknatısların çalışma noktaları da optimum çalışma noktası civarında oluşturulabilir. Bu özellikten dolayı bu tasarıma akı sıkıştırılmalı ya da akı odaklamalı rotorlar da denilmektedir.

Şekil 5.4(b)'de dairesele yerleştirilmiş gömülü mıknatıs yapısı gösterilmektedir. Sürekli mıknatıslar, yine rotor içine gömülü fakat yarıçap doğrultusunda yerleştirilmiştir.

Mıknatıslar rotora gömülü olduklarından savrulma kuvvetlerine karşı mukavemetleri çok yüksektir bu nedenle bu tip rotorlar yüksek hızlı sistemlerde özellikle tercih edilirler. Bu tasarımda kutup yayı boyunca elde edilen hava aralığı indüksiyon dağılımı 180° 'ye daha yakındır. Mıknatısların manyetik olarak kısa devre olmasını önlemek için rotorun manyetik olmayan bir malzemeden yapılma zorunluluğu ve bu tip malzemelerin pahalı olması bu tasarımın en önemli dezavantajlarıdır. Bu tasarımda hava aralığı diğer tasarımlara oranla daha büyüktür. Mıknatısların havaya yakın manyetik geçirgenlikte olması, d ekseninden gözlenen relüktansın küçük, q ekseninden gözlenen relüktansın büyük olmasına yol açar. Bu, klasik çıkık kutuplu senkron makinelerin tam tersi bir durumdur. En farklı özelliği ise statordan bakıldığında, rotorun manyetik olarak simetrik olmamasıdır. Enine ve boyuna eksenlerde farklı relüktansların söz konusu olması, bu şekilde tasarlanmış makinelerin çalışma ve denetim özelliklerini önemli ölçüde etkiler.

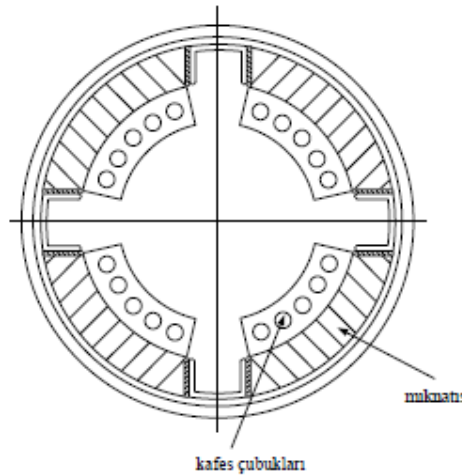
Görüldüğü üzere, mıknatısların yerleştirilme biçimleri istenilen özellikleri sağlayabilecek farklı şekillerde olabilmektedir. Genel olarak bu yerleştirme rotor yüzeyine veya rotor içine gömülerek yapılabilir. Her iki yerleştirme biçimi kendi içinde farklılıklar göstermekte ve kullanıldığı makineye değişik özellikler katmaktadır.



Şekil 5.4. Mıknatısların rotor yüzeyine farklı şekillerde gömülü olarak yerleştirilmesi a) Radyal yerleştirilmiş gömülü mıknatıs yapısı b) Dairesel yerleştirilmiş gömülü mıknatıs yapısı

5.3.2.2.3. Rotor Kısa Devre Çubukları

Bilindiği üzere senkron makinalar doğrudan şebekeden yol alamazlar ve sabit mıknatıslı senkron makina da bir senkron makina olduğu için şebekeden doğrudan yol alamaz. Bu olumsuzluğunu gidermek amacıyla; yukarıda bahsedilen rotor tasarımlarında rotora kalkış için kısa devre çubukları ilave edilir. Bu kısa devre çubukları kalkışta senkron hıza erişinceye kadar makinada asenkron moment bileşeni etkisi göstererek yol alma momentini üretirler. Makina bu kısa devre çubukları sayesinde senkron hıza ulaşıncaya kadar asenkron makina gibi çalışır. Ayrıca senkron hızda ani moment değişikliklerinde makinanın senkron hızdan ayrılmasını önleyerek akımdaki dalgalanmaların oluşmamasını sağlarlar. Kısa devre çubuklarının makinaya yerleştirilmesi oldukça zor olup, makinada ek kayıplara ve mekanik zorlanmalara yol açarlar. Şekil 5.5’de kısa devre çubuklu bir senkron makina kesiti gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Rotor kısa devre çubuklarının bir senkron makina kesitindeki gösterimi

5.3.2.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinanın Avantaj ve Dezavantajları

Sürekli mıknatıslar ve yarı iletken elemanlardaki yeni gelişmeler, SMSM 'lerin klasik doğru akım makinaların üstünlükleri ile alternatif akım makinaların sağlamlık ve güvenilirlik özelliklerini sağlayabilecek duruma getirmiştir. Sürekli mıknatıslı senkron makinalar ve diğer tahrik makinaları ile tasarlanan sistemler karşılaştırıldığında aşağıdaki avantaj ve dezavantajlar sıralanabilir:

5.3.2.3.1. Avantajları

- Rotorunda sargı yerine mıknatısların bulunması verimini artırmaktadır. Rotorda sürekli mıknatıslar bulunduğundan dolayı uyarma akısına gerek yoktur. Bu nedenle harici bir uyarma kaynağına ve uyarma gücüne gerek kalmamaktadır. Uyarma kayıpları söz konusu değildir. Böylece makinanın verimi artmaktadır.
- Özellikle doğru akım makinalarındaki fırça ve kollektör sistemi SMSG'de olmadığından bakım maliyeti azalmakta, ayrıca fırçalarda kayıplar meydana gelmediğinden verim artmaktadır.
- Kollektör bulunmaması rotor boyunun kısalmasına, rotorda sargıların olmaması da ağırlığının dolayısıyla rotor ataletinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle atalet momenti düşük ve dinamik performansı iyidir.
- Hava aralığı indüksiyonu arttığı için stator sargıları azaltılarak makinanın dış çapı küçültülebilmekte böylece aynı nominal güçteki ve nominal devir sayısındaki doğru akım ve asenkron makinalarına göre daha küçük hacimde ve ağırlıkta olmaktadır.
- Rotorda sargılar bulunmadığı için SMSG'nin soğutulması daha kolay sağlanabilmektedir.
- Asenkron makinalara göre güç faktörü yüksektir. İnverterden beslenen sistemlerde güç katsayısının yüksek olması inverterin gücünden verimli olarak faydalanabilmek açısından önem taşımaktadır.
- Vektör kontrollü asenkron makina sistemlerine göre denetimi daha basit ve parametre değişimlerinden etkilenmeyen bir şekilde gerçekleştirilebilir.

5.3.2.3.2. Dezavantajları

- Şebeke frekansına bağlı olarak sabit bir hızda çalışabilirler. Karmaşık kontrol sistemleri tasarlanmadan hızın değişimi söz konusu değildir. Uygulama alanları da sabit hızın gerektiği yerlerdir.
- Sürekli mıknatıslar ve stator alanı arasında senkronizasyon sağlayabilmek için rotor pozisyonunun bilinmesi gerekir. Rotor pozisyonu sensörlerle belirlenebilir fakat bu durum maliyeti artırdığı ve güvenilirliği azalttığı için istenmez. Sensör kullanılmadan da moment üretmek mümkündür. Fakat bu tür bir uygulama düşük hızlarda verimli olmamakta ve karmaşık bir denetim algoritması kullanmak gerekmektedir.
- Generatör çalışma durumunda, gerilim ayarı uyarma akımı olmadığından dolayı yapılamaz.
- Mıknatıs malzemelerin ısı sınırlamaları ve demagnetizasyon riski sistem güvenilirliğini azaltmaktadır.
- Kullanılan mıknatıs malzemelerin, uygun seçilmemesi durumunda uzun vadede mıknatısların, çeşitli atmosferik ve termik etkilerin de sonucu mıknatıslık özelliklerini kaybetmeleri makina için olumsuz bir etki meydana getirebilmektedir.
- Yüksek enerjili mıknatısların fiyatlarının ve üretim giderlerinin yüksek olması nedeniyle sürekli mıknatıslı senkron makinalar, doğru akım ve asenkron makinalara oranla daha pahalıdır.
- Mıknatısların rotor yüzeyinde olduğu tasarımlarda yüksek hızlarda mıknatısların rotor yüzeyine tutturulması oldukça zordur ve her zaman kopma riski vardır.
- Bakım esnasında rotorun statordan çıkarılması durumunda eski çalışma noktası kayabilir.

5.3.2.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Matematiksel Modeli

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün 3 fazlı stator gerilim eşitliği;

$$U_{abc} = - R_s i_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt} \quad (5.1)$$

şeklindedir.

3 Faz eksen sisteminden 2 faz eksen sistemine dönüşüm dikkate alınarak stator akısı bileşenleri, indüktanslar ve mıknatıs akısı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir [7];

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d + L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_d + L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_d + L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{ma} \\ \Psi_{mb} \\ \Psi_{mc} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Burada;

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = 3 \text{ Faza ait stator öz indüktansları} \quad (5.3)$$

$$L_{ba} = L_{ca} = L_{bc} = 3 \text{ Faza ait stator ortak indüktansları} \quad (5.4)$$

$$\Psi_{ma} = \Psi_{mb} = \Psi_{mc} = \text{Rotor mıknatıs akıları} \quad (5.5)$$

Statorun öz ve ortak indüktansları sadece dağıtılmış sargılı içe gömülü mıknatıslarda θ açısına sinüzoidal olarak bağlıdır. Rotor yüzeyine monte edilmiş sürekli mıknatıslı senkron makinalarda stator indüktansları θ 'den bağımsızdır. Dağıtılmamış sargılar için, stator öz ve ortak indüktansları benzer şekilde elde edilebilir. Fakat değerleri, dağıtılmış sargılı eşdeğer makinadan daha büyük olur. Yukarıdaki denklemlere Park dönüşümü uygulanırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir [7];

$$-i_d R_s - u_d = -L_d \frac{di_d}{dt} + \omega_r L_q i_q \quad (5.6)$$

$$-i_q R_s - u_q = -L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + \Psi_m) \quad (5.7)$$

$$L_d = L_{ls} + \frac{3}{2} L_m \quad (5.8)$$

$$L_q = L_{ls} + \frac{3}{2} L_m \quad (5.9)$$

olduğuna göre; Denklem 5.6 ve Denklem 5.7 düzenlenecek olunursa;

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s + R_y}{L_{ls} + \left(\frac{3}{2}\right) L_m} i_d + \frac{P}{2} i_q \omega_r \quad (5.10)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s + R_y}{L_{ls} + \left(\frac{3}{2}\right) L_m} i_q + \frac{\Psi_m}{L_{ls} + \left(\frac{3}{2}\right) L_m} \frac{P}{2} \omega_r - \frac{P}{2} i_d \omega_r \quad (5.11)$$

olarak elde edilir. Burada;

R_y = Faz yükü direnci

L_m = Manyetik indüktansların toplamı

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün hareket denklemi ise;

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3 P \psi_m}{4 J} i_q - \frac{B_m}{J} \omega_r + \frac{1}{J} T_e \quad (5.12)$$

$$\psi_s = \psi_d + j\psi_q \quad (5.13)$$

$$\psi_d = \psi_m + L_d i_d \quad (5.14)$$

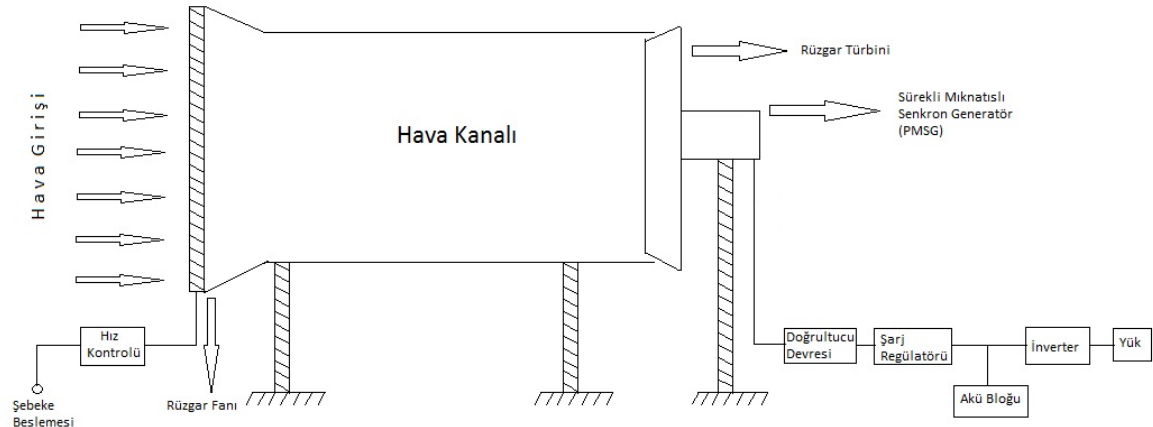
$$\psi_q = L_q i_q \quad (5.15)$$

Şeklinde tanımlanabilir.

6. SİSTEMİN PROTOTİP UYGULAMASI VE BENZETİM ÇALIŞMASI

6.1. Sistemin Prototip Uygulaması

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali çalışması, imkanlar dahilinde laboratuvar şartlarında gerçekleştirildiğinden dolayı sistem tasarımının Şekil 6.1.'de gösterildiği gibi yapılması planlanmış olup tasarım aşamaları sırasıyla aşağıdaki gibi açıklanmıştır.



Şekil 6.1. Sistemin prototip uygulama şeması

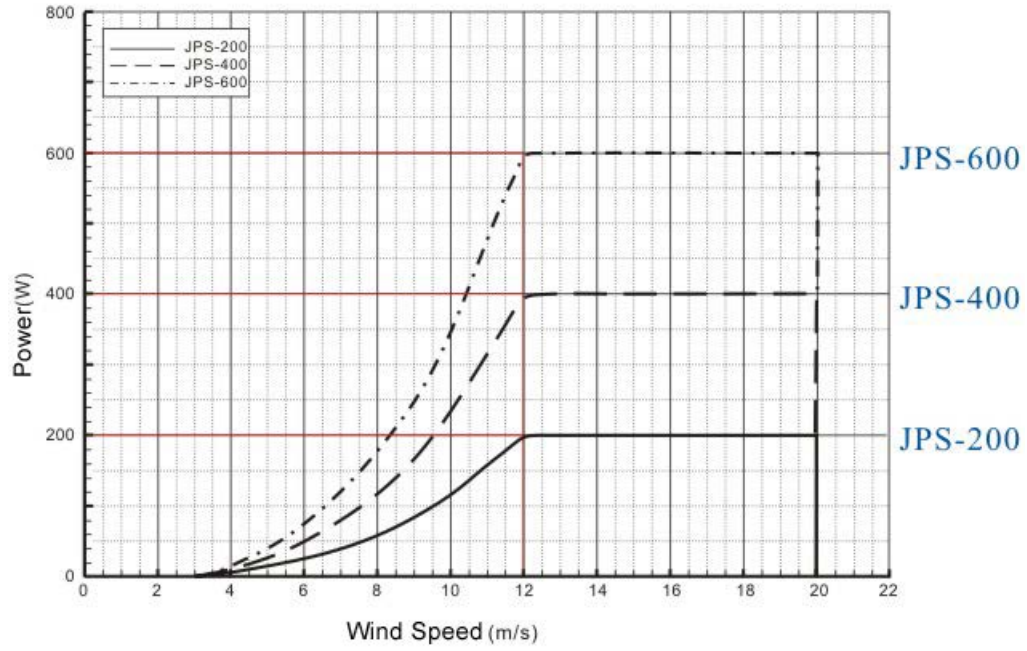
6.1.1. Rüzgar Türbin Seçimi

Rüzgar türbin seçimi için öncelikle dikkat edilmesi gereken husus beslenecek olan elektriksel yüküdür. Yükün büyüklüğüne göre daha güçlü rüzgar türbini seçilmesi bu konuda belirleyici özelliktir. Yapılmakta olan sistem sadece deneysel amaçlı olarak kullanılacağı ve laboratuvar şartlarında tasarlanacağı için rüzgar türbin gücünden ziyade ihtiyaç duyduğu rüzgar hız değeri ve rüzgar türbin çapı sistem için belirleyeci özellik olarak dikkate alınmıştır. Bu bilgiler dahilinde seçilmiş olan rüzgar türbin parametreleri Tablo 6.1.'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Rüzgar türbin parametreleri

B_m	0,00006 Nm.s	L_d	0,4741 mH	L_q	0,4741 mH	2P	4
R_s	1,4190 Ω	J	0,0008 kg/m ²	ψ	0,7293 Wb	T_s	0,00005
R	0,68 m	Kanat Sayısı	5	Güç	200 W	q	1,225 kg/m ³
C_p	0,53	$V_{ort.}$	12 m/sn	$V_{min.}$	3 m/sn	V_{max}	20 m/sn

Tablo 6.1.'de verilen rüzgar türbin parametrelerine ait rüzgar türbininin farklı rüzgar hızlarında ürettiği elektriksel güç eğrisi Şekil 6.2.'de verilmiştir. Üretici firma tarafından JPS-200, JPS-400 ve JPS-600 modelleri olarak üretimi yapılan rüzgar türbinlerinden, yapılan tez çalışması için JPS-200 modeli tercih edilmiştir.



Şekil 6.2. Rüzgar türbininin rüzgar hızına göre çıkış gücünün değişimi



Resim 6-1. Rüzgar türbininin görüntüsü

6.1.2. Rüzgar Fanı ve Sürücü Seçimi

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali prototip çalışmasında, sistem laboratuvar şartlarında tasarlandığı için rüzgar türbini için gerekli rüzgar enerjisi yapay olarak elde edilmiştir. Bunun için rüzgar enerjisi aksiyel fan aracılığı ile sağlanılacaktır. Aksiyel fanın seçiminde temel alınacak parametrelerden birincisi rüzgar türbininin maksimum çalışma rüzgar hız değeri, ikincisi rüzgar türbin çapı olmuştur. Aksiyel fan seçimi için;

Hacimsel debi denklemi;

$$\dot{V} = V A \text{ (m}^3\text{/sn)} \quad (6.1)$$

$$A = \pi r^2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (6.2)$$

Denklem 6.1’de yerine yazılırsa;

$$\dot{V} = V \pi r^2 \text{ (m}^3\text{/sn)} \quad (6.3)$$

Denklem 6.3 değeri 3600 ile çarpılırsa birimi m³/h olur.

Kütlesel debi denklemi;

$$\dot{M} = V A \rho \text{ (kg/sn)} \quad (6.4)$$

Denklem 6.4’ün sonucu 3600 ile çarpılırsa birimi kg/h olur. Aksiyel fanın hacimsel debisi $V = 20 \text{ m/sn}$ için hesaplanacak olunursa;

$$\dot{V} = 20 \pi 0,34^2 3600 \text{ (m}^3\text{/h)} \quad (6.5)$$

$$\dot{V} = 26148,103 \text{ m}^3\text{/h olur.} \quad (6.6)$$

Sistem çalışma hızının deneysel çalışmalar için rüzgar türbininin nominal çalışma hızının üzerine çıkılması düşünülürse hesaplanan hacimsel debi değerinin % 50 fazlasının seçilmesi uygun olacaktır. Bu durumda alınması planlanan aksiyel fanın hacimsel debi değeri yaklaşık olarak 39222,154 m³/h olarak hesaplanmaktadır. Bu değere sahip en yakın ve en uygun aksiyel fanın parametre değerleri Tablo 6.2.’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Aksiyel fanın nominal parametreleri

P	7.5 kW	Devir	1400 d/d
Hacimsel Debi	44000 m ³ /h	Çap	1m

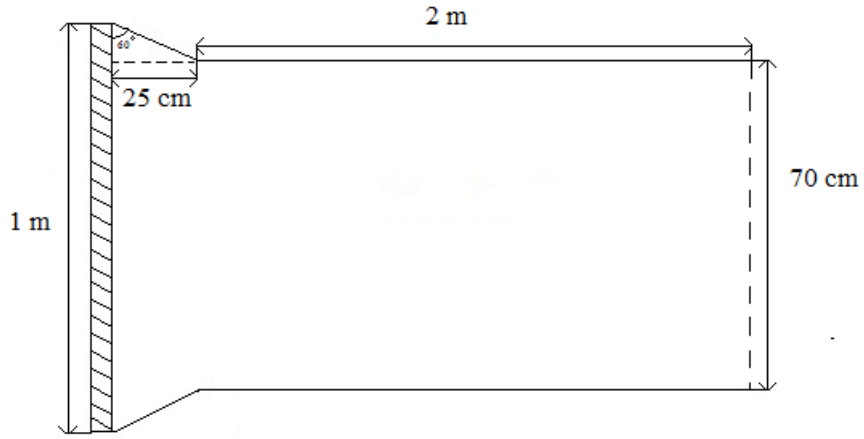
Aksiye fan seçiminden hareket ile seçimi yapılması gereken diğer bir devre elemanı aksiyel fan sürücüsü ve kontrol devresidir. Bu devre elemanının seçimi için ise; DSPIC kontrollü, SPWM modülasyonlu, 7,5 kW gücünde ve 3 fazlı AA motor sürücüsü seçilmiştir.



Resim 6-2. Aksiyel fan ve sürücü görüntüsü

6.1.3. Hava Kanalı Tasarımı

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasında, rüzgar enerjisi yapay olarak aksiyel fan tarafından karşılanacağı için oluşan hava akımları, doğal hava akımları gibi laminar olmayacağı göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre tasarlanan hava kanalı Şekil 6.3.'de gösterildiği gibi aksiyel fanın montajının yapılacağı bölüm 60° 'lik bir eğim ile hava kanalına montajı yapılmıştır. Buna ilaveten hava kanalının uzunluğu 2 metre olarak tasarlanmıştır. Bu sayede aksiyel fan tarafından oluşturulacak hava akımı, hava kanalı içerisinde laminar dağılımı sağlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 6.3. Hava kanalı tasarımı



Resim 6-3. Hava kanalı ve elektrik pano görüntüsü

6.1.4. İnverter ve Akü Seçimleri

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulaması, deneysel veriler elde etmek amacı ile kullanılacağı için büyük güç değerli yükler kullanılmayacağından 300 W, 12 V giriş değerli, tam sinüs inverter seçimi uygun görülmüştür. İnverter seçiminin yanı sıra deneysel çalışmalarının yapılacağı süreler ve akü kullanım ömrü de dikkate alınarak rüzgar türbin regülatör çıkış değeri olan 12 V ve 100 Ah'lık jel akü kullanılması uygun görülmüştür.



Resim 6-4. Gerilim regülatörü, akü ve inverter görüntüsü

6.1.5. Sistemin Montajı

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasının montajının ilk adımı olarak; aksiyel fan, AA motor sürücüsü, rüzgar türbini, regülatör devresi, akü ve inverter elemanlarının anahtarlama kontrollerinin yapılacağı bir elektrik pano tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elektrik pano tasarımından sonra ise hava kanalına zeminden 25 cm yükseklik sağlayacak şekilde ayaklar yapılmıştır. Sonraki adım olarak, hava kanalının geniş çaplı olan kısmına aksiyel fanın montajı yapılmış ve böylece ilk deneysel çalışmalara başlanılmıştır. İlk yapılan deneysel çalışma ise aksiyel fanın, farklı hız kademelerinde çalıştırılarak rüzgar hız değerlerinin ölçümü olmuştur. Bu deneysel çalışma verileri kayıt altına alındıktan sonra da sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini, regülatör devresi, akü bloğunun ve inverterin montajları yapılmıştır. Bu son montaj ile de sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulaması deneysel çalışmalara hazır olarak laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

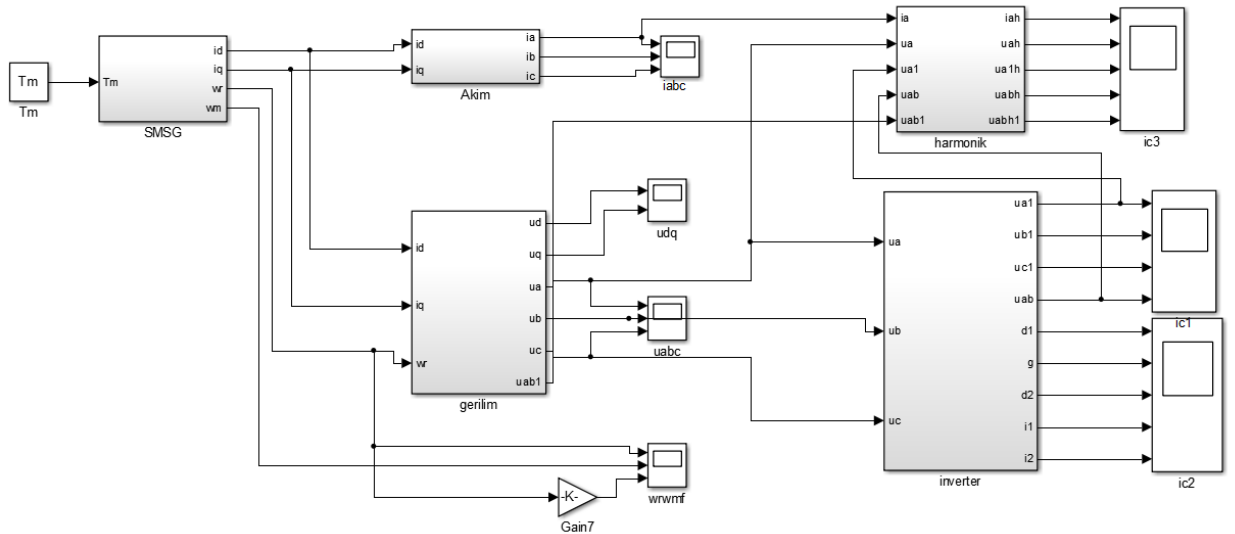


Resim 6-5. Sistemin son halinin görüntüsü

6.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgar Santrali Sisteminin Benzetim Çalışması

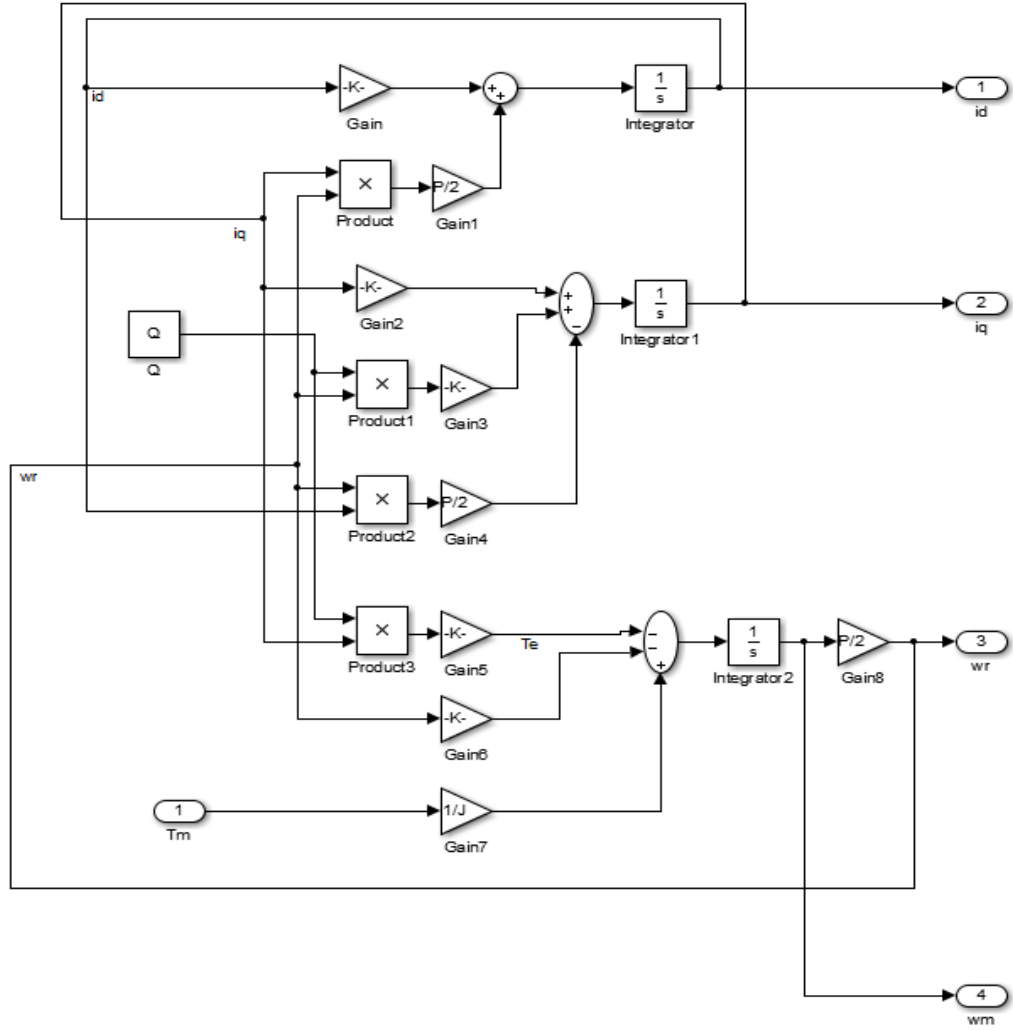
6.2.1. Sistemin Matlab Benzetim Çalışması

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santralinin benzetim çalışması Matlab/Simulink bilgisayar programında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma Şekil 6.4.'de gösterildiği gibi; sürekli mıknatıslı senkron generatör, harmonik analizörü, inverter, akım ve gerilim bilgileri bölümlerinden meydana gelmiştir.



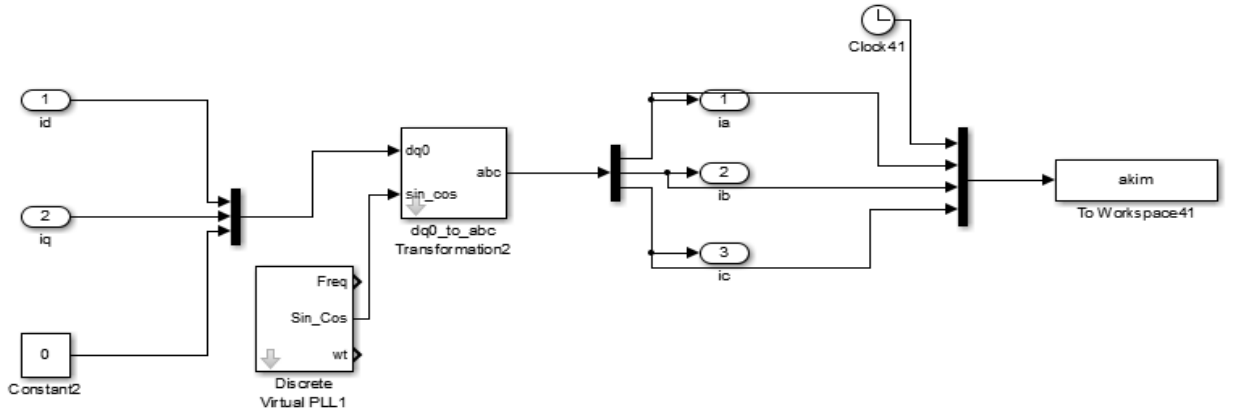
Şekil 6.4. Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali benzetimi

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün benzetim çalışması için Bölüm 5.3.2.4 'de verilen sürekli mıknatıslı senkron generatörün matematiksel denklemleri kullanılmıştır. Benzetim çalışmasının bölümlerinden, sürekli mıknatıslı senkron generatörün benzetim şeması Şekil 6.5.'de gösterilmiştir.

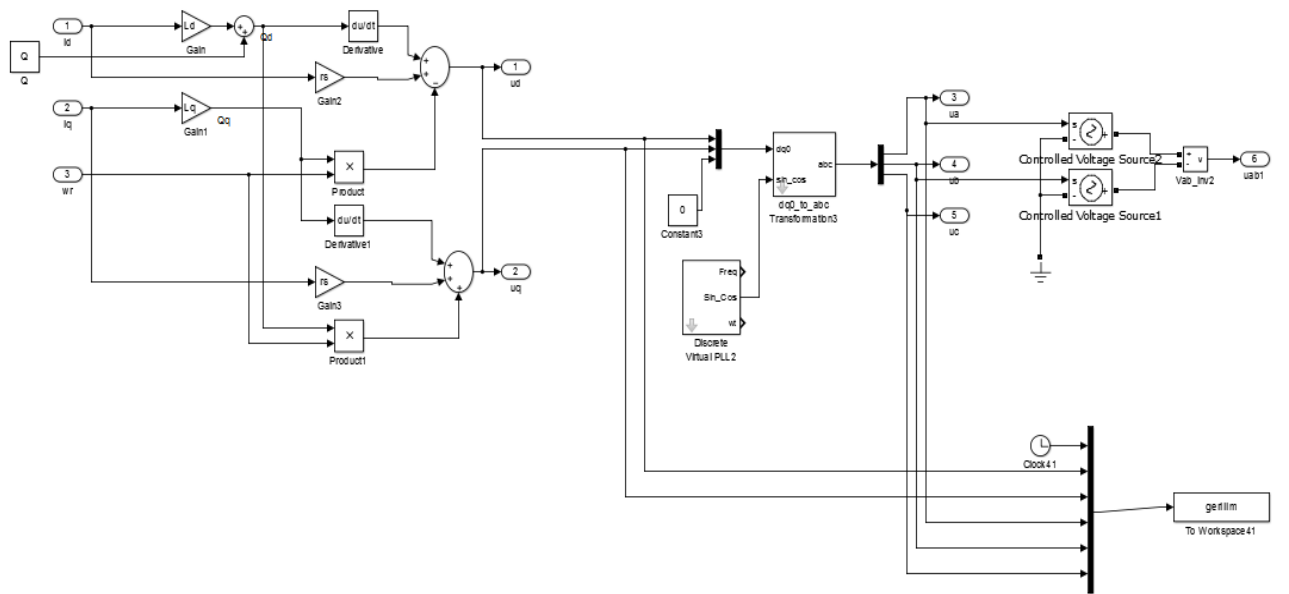


Şekil 6.5. Sürekli mıknatıslı senkron generatör şeması

Benzetim çalışmasının bölümlerinden, akım ve gerilim bilgilerinin benzetim şemaları Şekil 6.6. ve Şekil 6.7.'de gösterilmiştir.

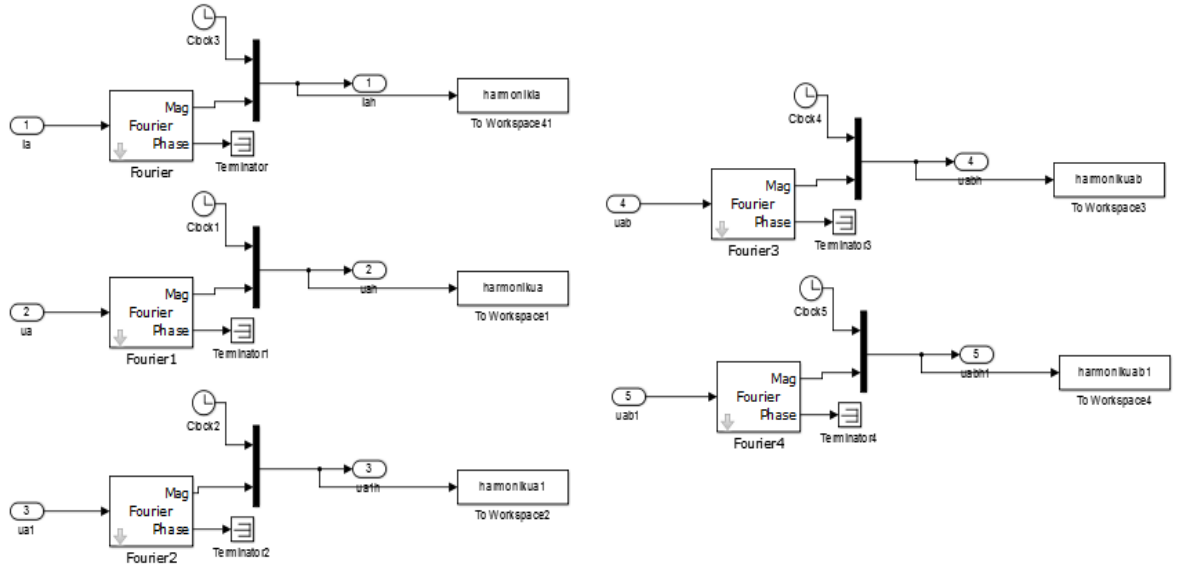


Şekil 6.6. Akım bilgisinin şeması



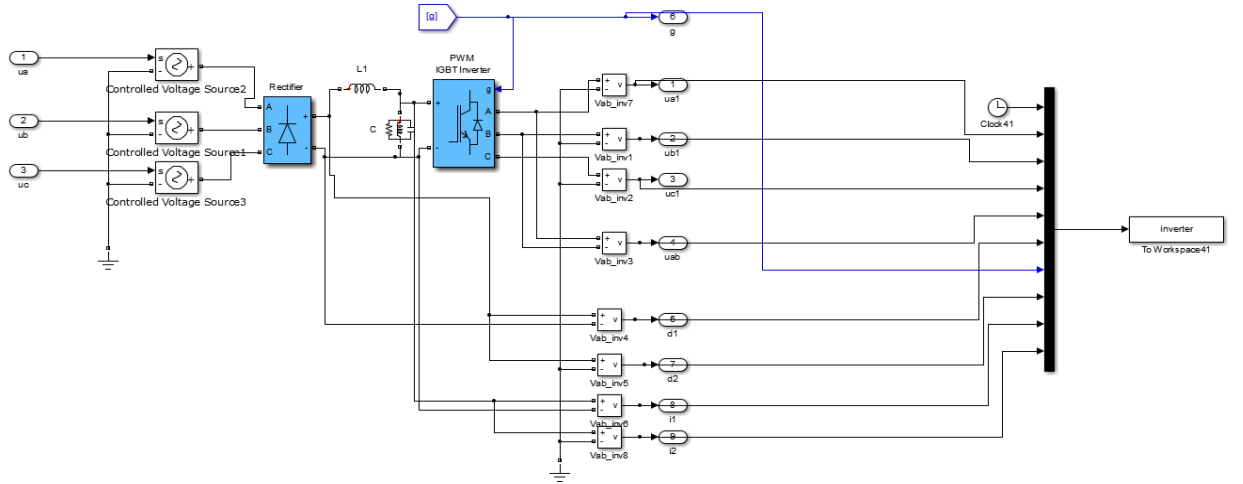
Şekil 6.7. Gerilim bilgisinin şeması

Benzetim çalışmasının bölümlerinden, harmonik bilgilerinin benzetim şeması Şekil 6.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Harmonik bilgisinin şeması

Benzetim çalışmasının bölümlerinden, inverter bilgilerinin benzetim şeması Şekil 6.9.'da gösterilmiştir.

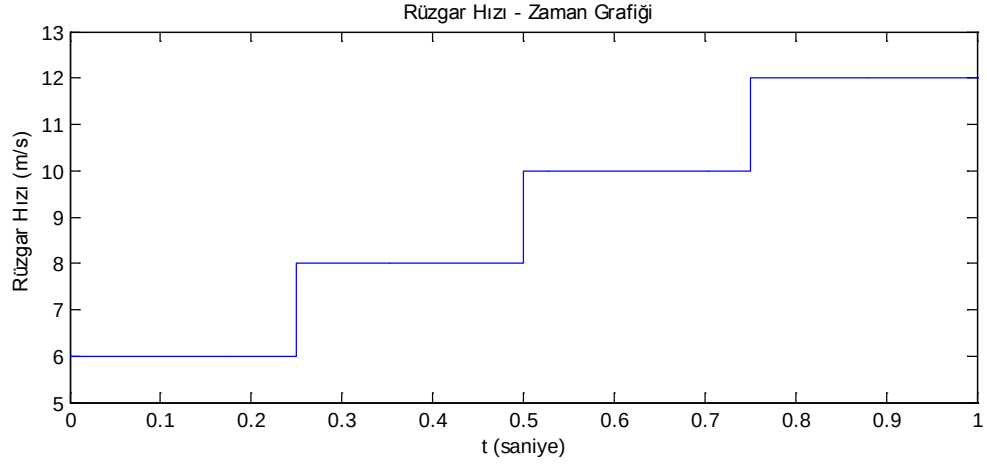


Şekil 6.9. İnverter şeması

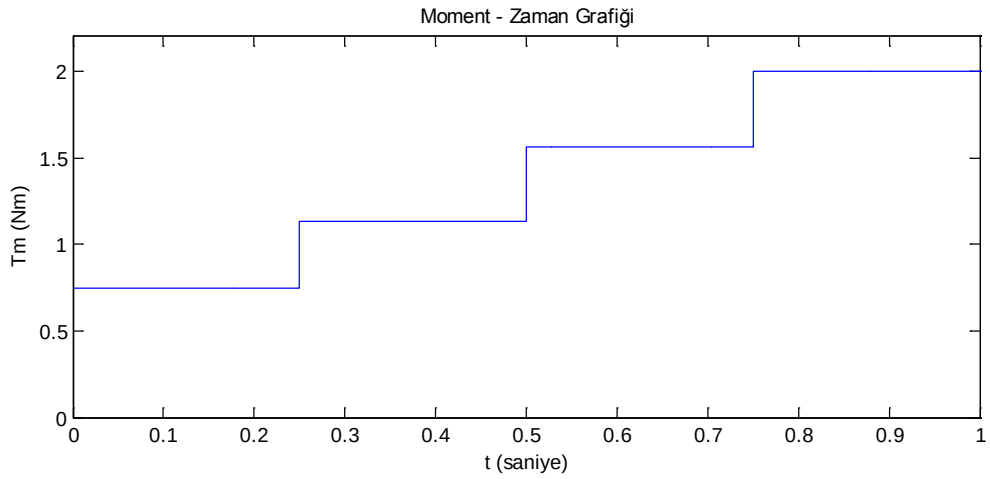
6.2.2. Sistemin Matlab Benzetim Sonuçları

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali benzetim çalışması Bölüm 6.2.1'de belirtildiği gibi Matlab/Simulink bilgisayar programında Tablo 6.1.'deki rüzgar türbin parametleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm ise sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali çalışmasının benzetim sonuçlarını kapsamaktadır. Benzetim çalışmasının ilk sonuçları olarak farklı karakteristik bilgilerin elde edilmesi açısından rüzgar hız değeri 0-0,25 saniyeleri arasında 6 m/sn, 0,25-0,5 saniyeleri arasında 8 m/sn,

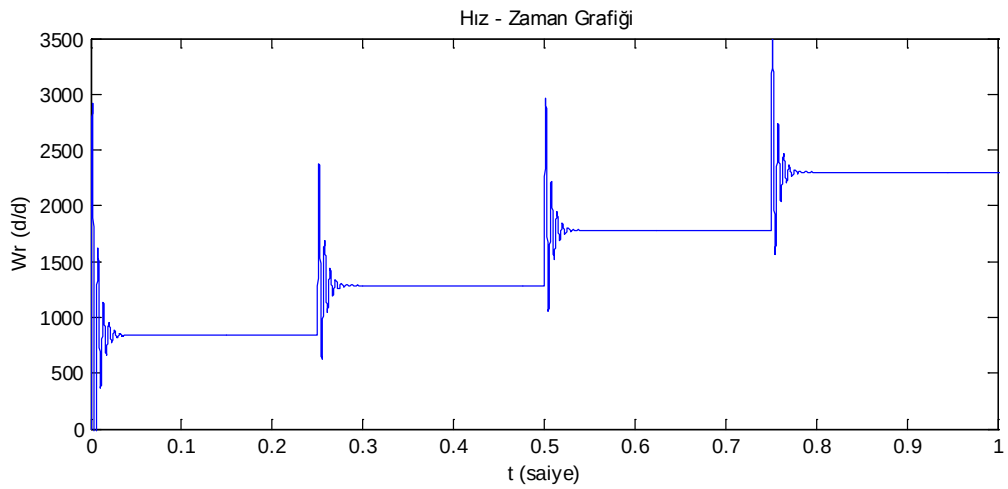
0,5-0,75 saniyeleri arasında 10 m/sn ve 0,75-1 saniyeleri arasında ise 12 m/sn olarak alınmıştır. Bu alınan değerler sonucunda aşağıda verilen benzetim sonuçları elde edilmiştir.



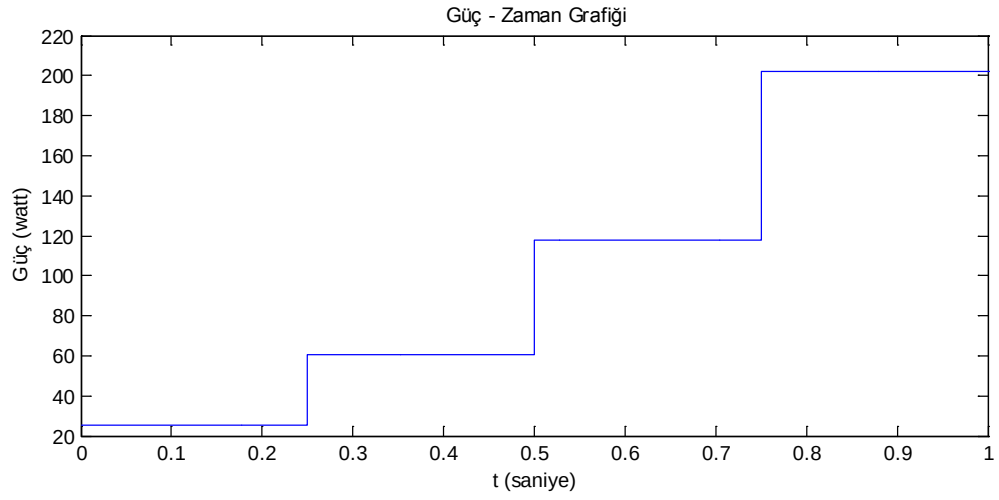
Şekil 6.10. Rüzgar hızının zaman ile değişimi



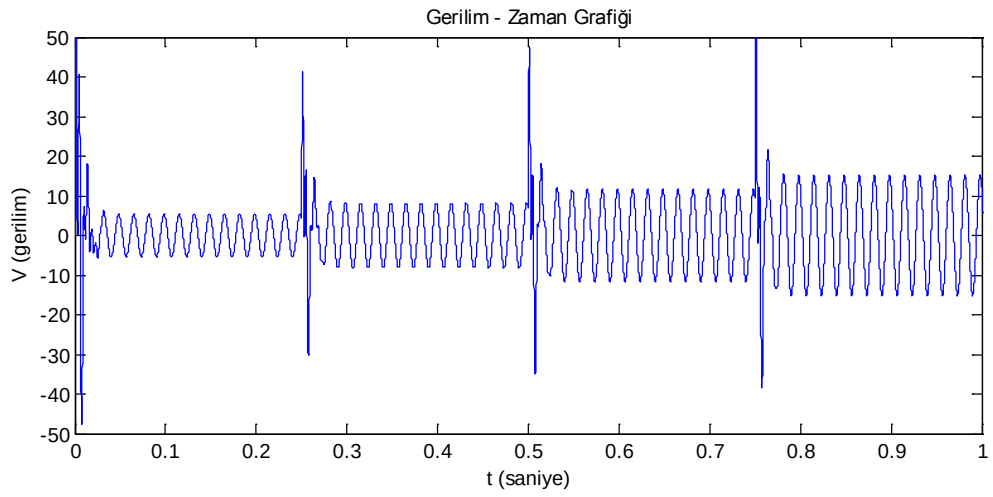
Şekil 6.11. Momentin zaman ile değişimi



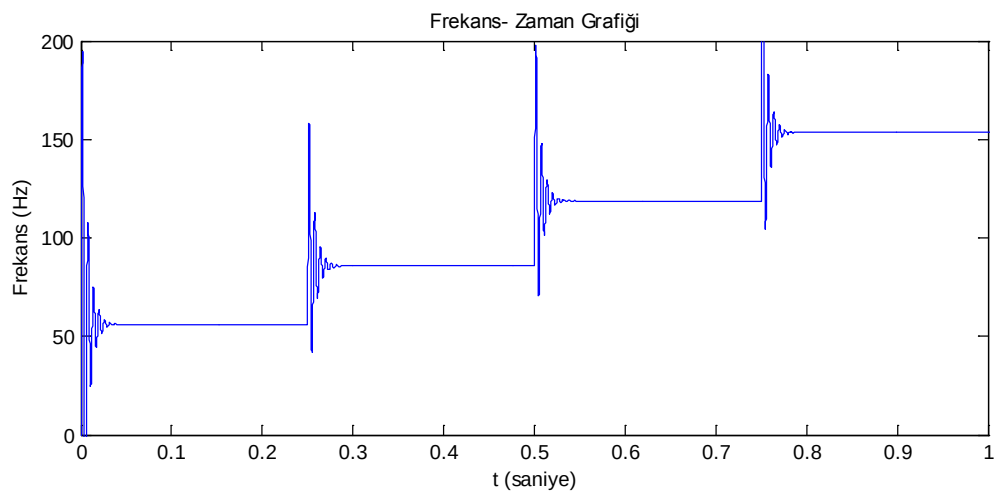
Şekil 6.12. Generator rotor hızının zaman ile değişimi



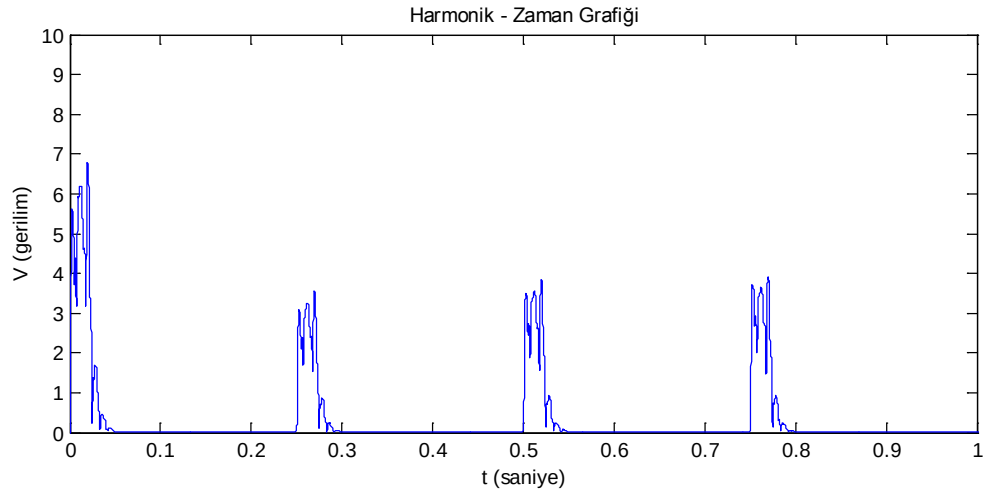
Şekil 6.13. Generatör gücünün zaman ile değişimi



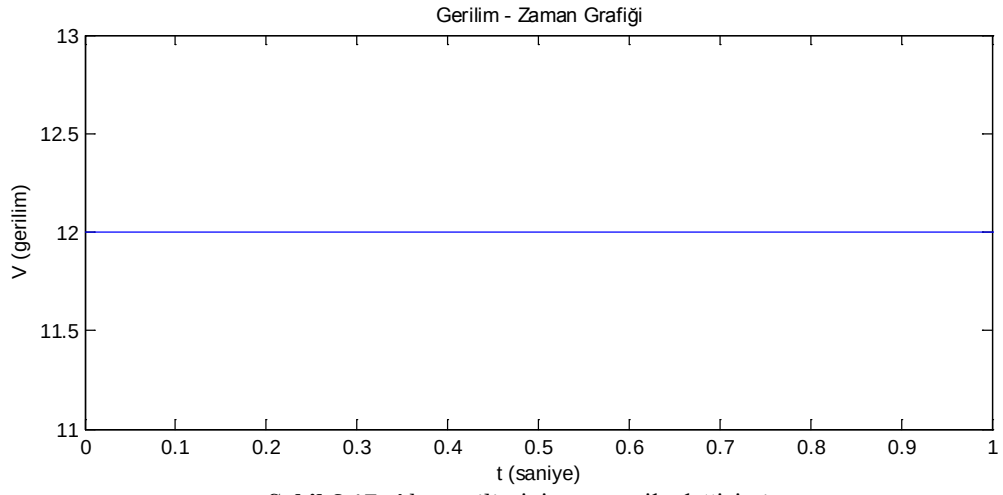
Şekil 6.14. Generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi



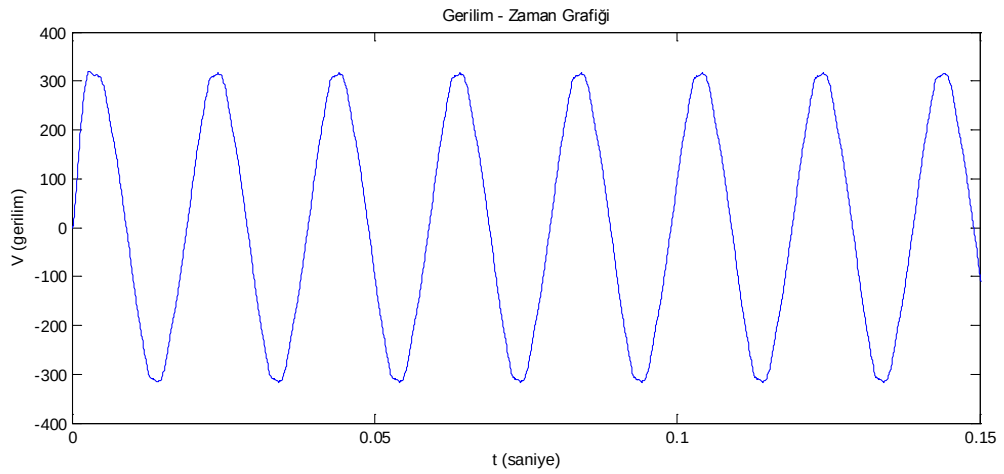
Şekil 6.15. Generatör çıkış gerilim frekansının zaman ile değişimi



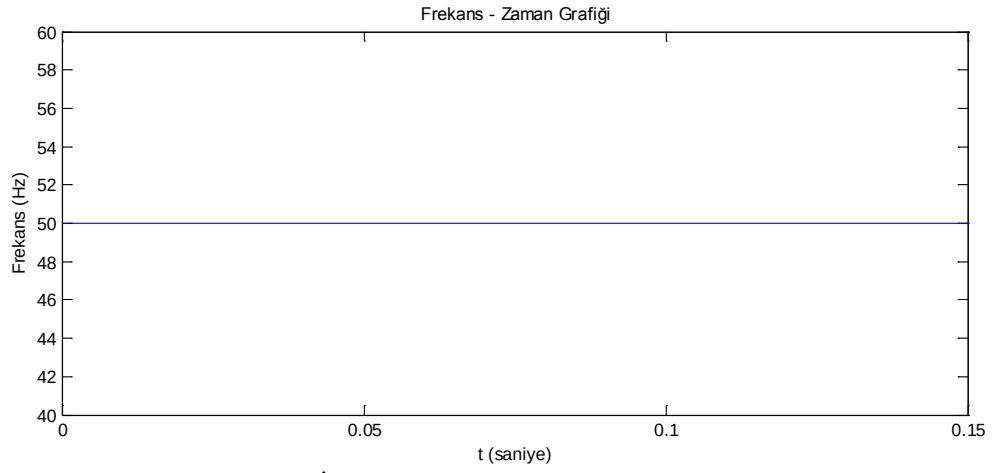
Şekil 6.16. Generatör çıkışının 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi



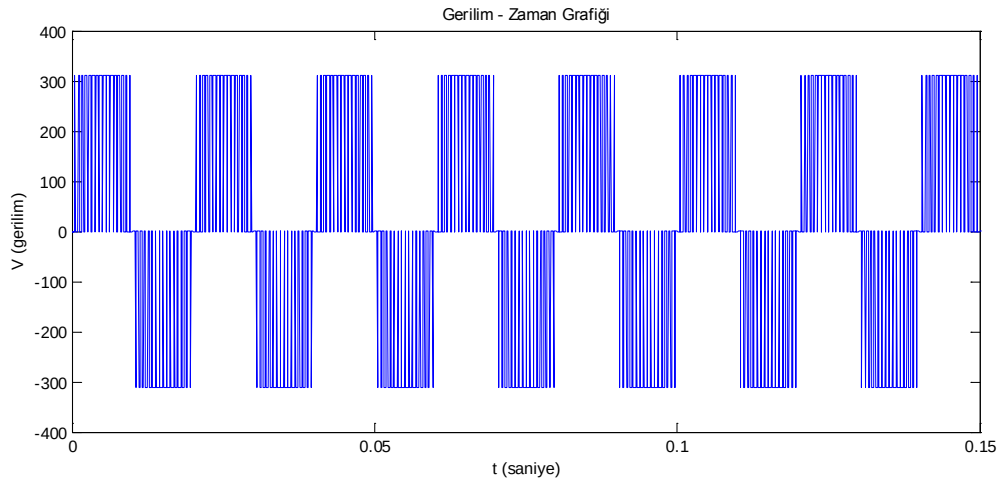
Şekil 6.17. Akü geriliminin zaman ile değişimi



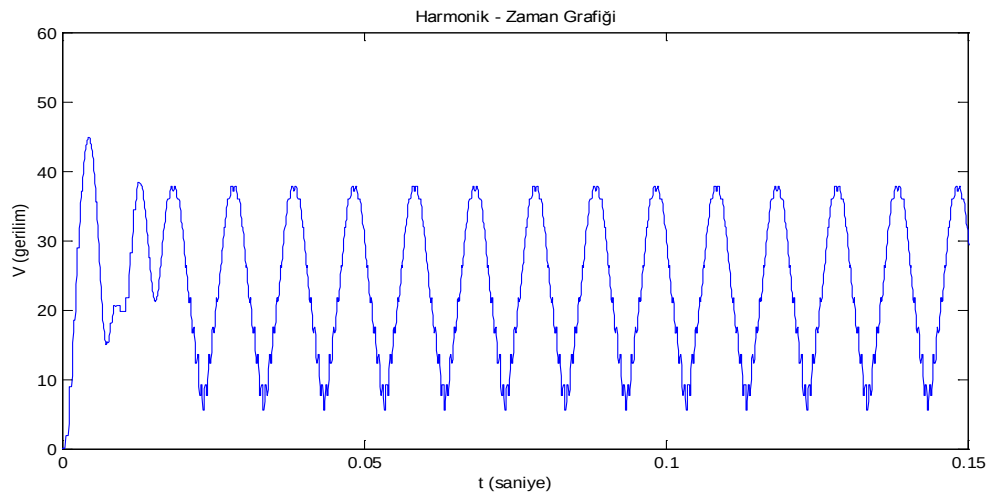
Şekil 6.18. İnverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi



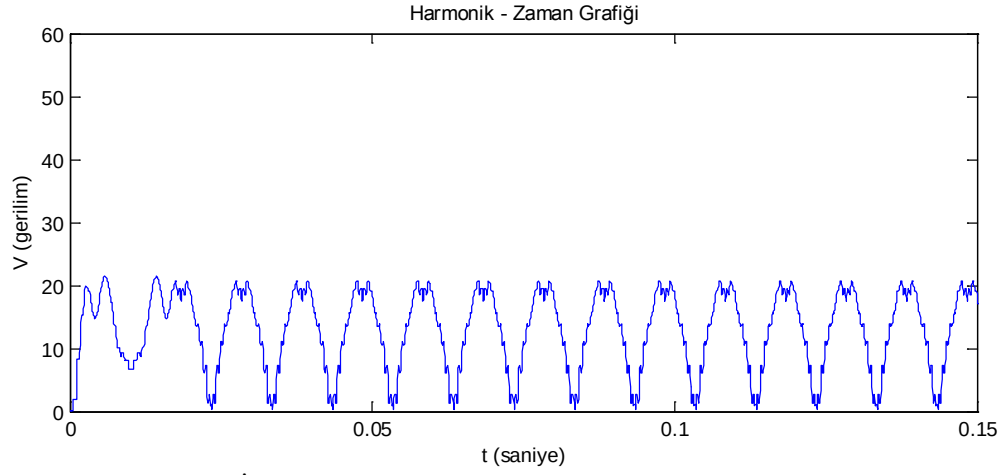
Şekil 6.19. İnverter çıkış frekansının zaman ile değişimi



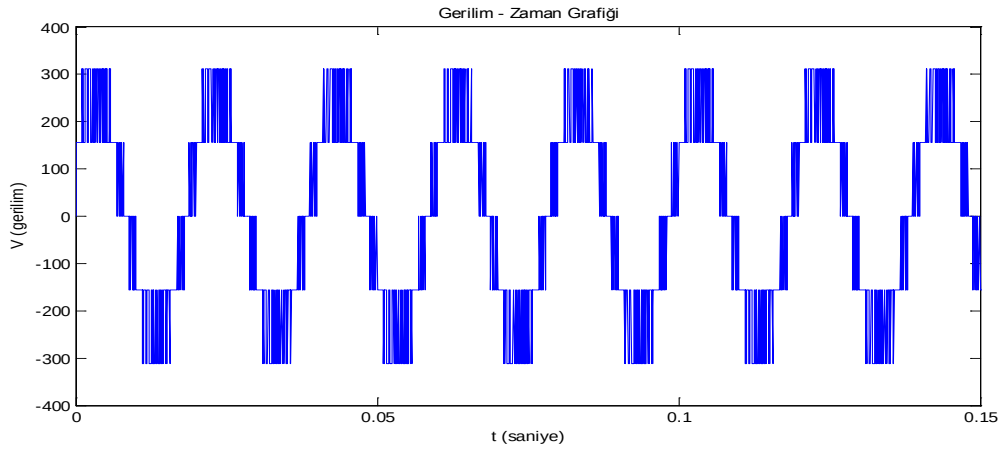
Şekil 6.20. İki seviyeli inverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi



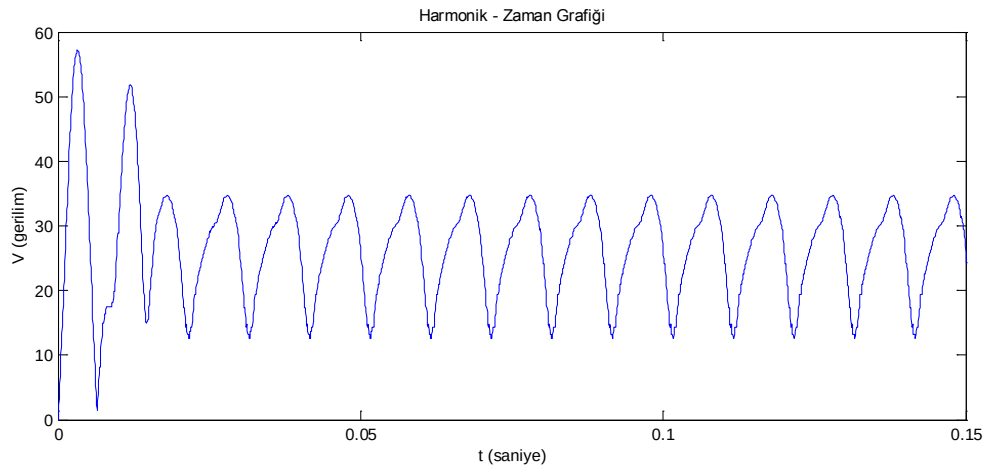
Şekil 6.21. İki seviyeli inverter çıkış 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi



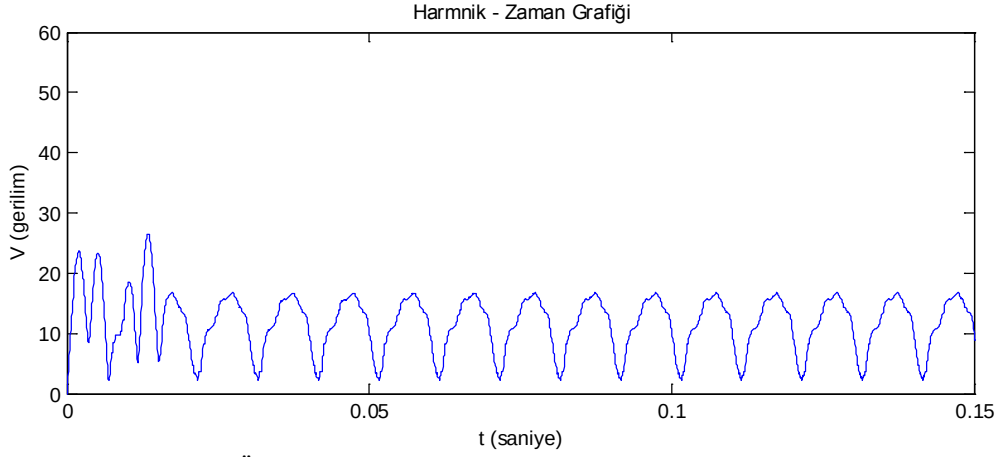
Şekil 6.22. İki seviyeli inverter çıkış 5.Harmoniğinin zaman ile değişimi



Şekil 6.23. Üç seviyeli inverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi



Şekil 6.24. Üç seviyeli inverter çıkış 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi

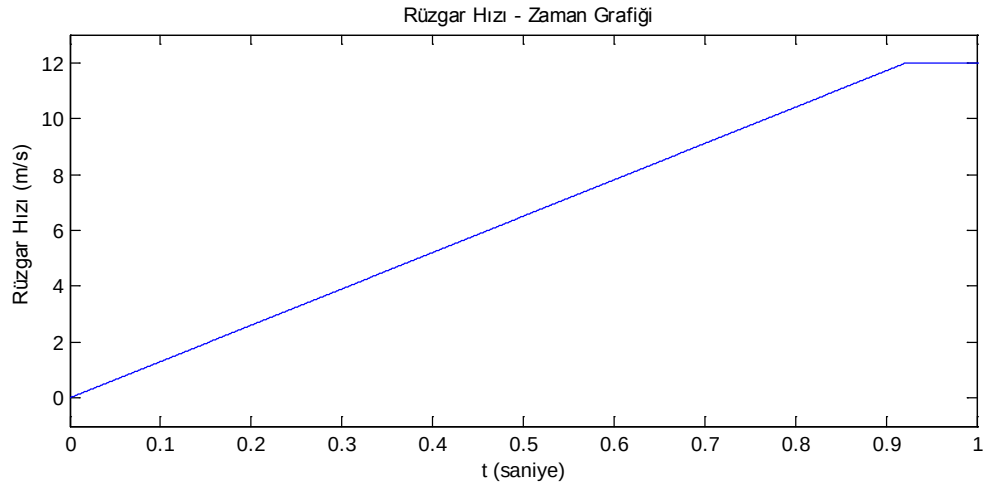


Şekil 6.25. Üç seviyeli inverter çıkış 5.Harmoniğinin zaman ile değişimi

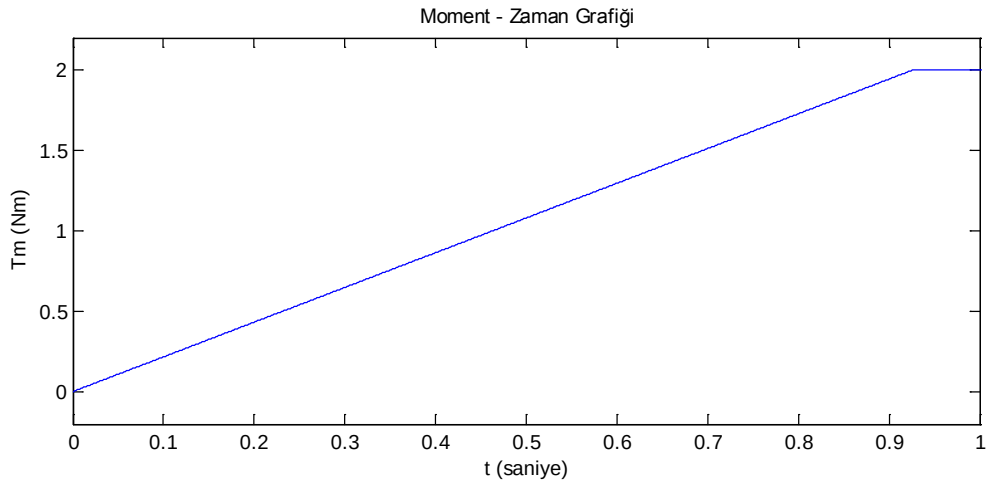
Benzetim çalışması sonuçları incelendiğinde; rüzgar türbinine Şekil 6.10.'daki gibi sırası ile 6 m/sn, 8 m/sn, 10 m/sn ve 12 m/sn'lik artan rüzgar hızları uygulandığında, elde edilen momentin zaman ile değişimi Şekil 6.11.'deki gibi 6 m/sn'lik rüzgar hızında 0,74 Nm, 8 m/sn'lik rüzgar hızında 1,13 Nm, 10 m/sn'lik rüzgar hızında 1,56 Nm ve 12 m/sn'lik rüzgar hızında da 2 Nm olarak değiştiği görülmektedir. Artan rüzgar hızına bağlı olarak sürekli mıknatıslı senkron generatörün hızı da Şekil 6.12.'de ki gibi sırası ile 841 d/d, 1286 d/d, 1782 d/d ve 2302 d/d olmaktadır. Ayrıca buna bağlı olarak sürekli mıknatıslı senkron generatör tarafından üretilen çıkış gerilimi; Şekil 6.14.'de görüldüğü gibi 6 m/sn'lik rüzgar hızında 5,4 V, 8 m/sn'lik rüzgar hızında 8,3 V, 10 m/sn'lik rüzgar hızında 11,6 V ve 12 m/sn'lik rüzgar hızında da 15,15 V olarak, üretilen elektriksel güç ise Şekil 6.13.'de ki gibi sırası ile 25,5 W, 60,6 W, 117 W ve 202 W olarak değişmektedir. Sürekli mıknatıslı senkron generatör tarafından üretilen çıkış geriliminin frekansı Şekil 6.15.'de, 3. Harmoniğinin zaman ile değişimi ise rüzgar hızlarının arttığı zamanlarda 3,5 V, 3,8 V ve 3,9 V'luk salınımlar yaparak sabit kaldığı Şekil 6.16.'da görülmektedir.

Bu değişken rüzgar hızlarına rağmen invertere giriş olarak uygulanan doğru gerilimin zaman ile değişimi Şekil 6.17.'deki gibi 12 V'da, inverter çıkış geriliminin zaman ile değişiminin Şekil 6.18.'deki gibi 220 V'da ve frekansının da Şekil 6.19.'da görüldüğü gibi 50 Hz'de sabit kaldığı görülmektedir. İki seviyeli inverter çıkış gerilimi Şekil 6.20.'de ve 3. Harmoniğinin değişimi Şekil 6.21.'de, 5. Harmoniğinin değişimi ise Şekil 6.22'de görülmektedir. Üç seviyeli inverter çıkış gerilimi Şekil 6.23.'de ve 3. Harmoniğinin değişimi Şekil 6.24.'de, 5. Harmoniğinin değişimi ise Şekil 6.25'de görülmektedir.

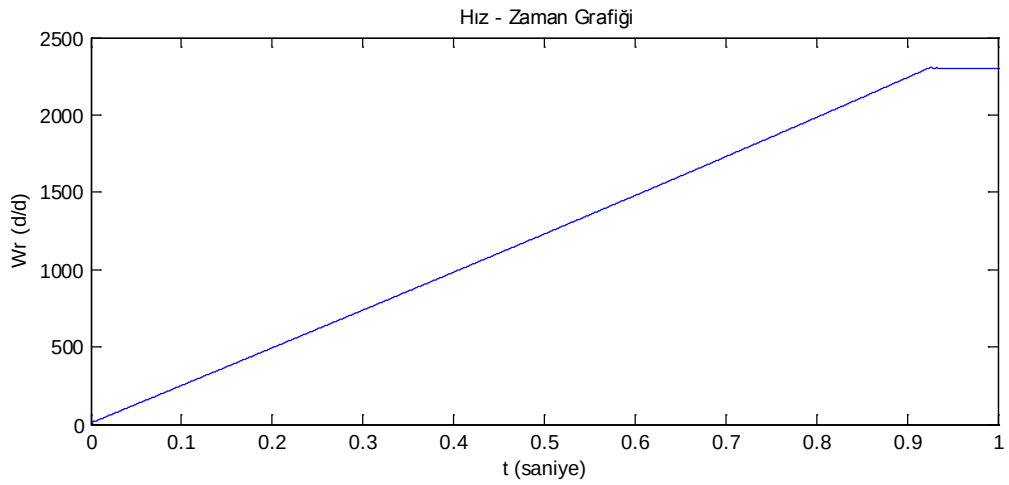
Benzetim çalışmasının ikinci sonuçları olarak ise; rüzgar hızının 0-1 saniyeleri arasında lineer olarak değiştiği durumdaki benzetim sonuçları aşağıda verilmiştir.



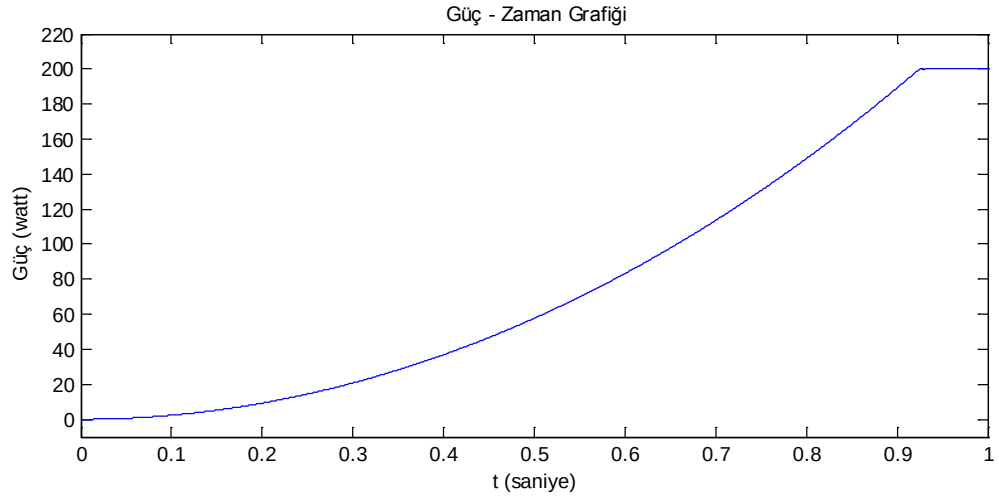
Şekil 6.26. Rüzgar hızının zaman ile değişimi



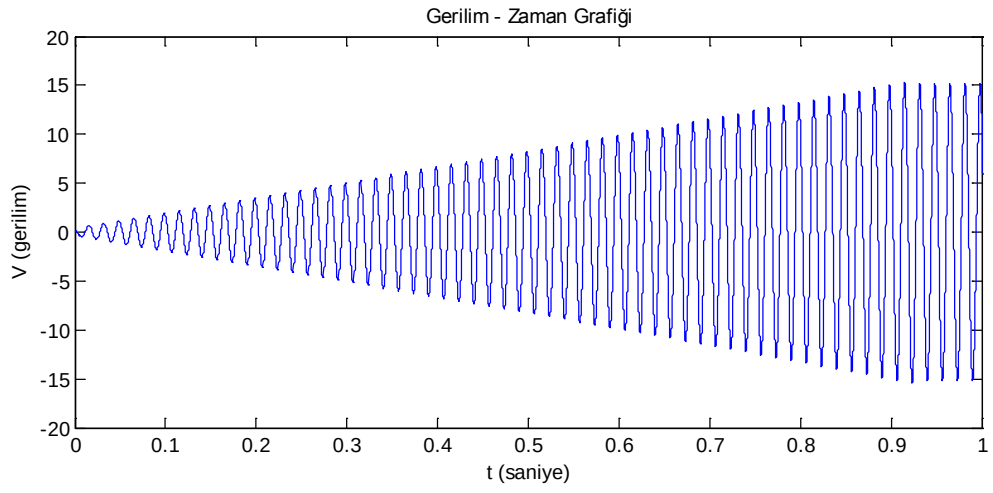
Şekil 6.27. Momentin zaman ile değişimi



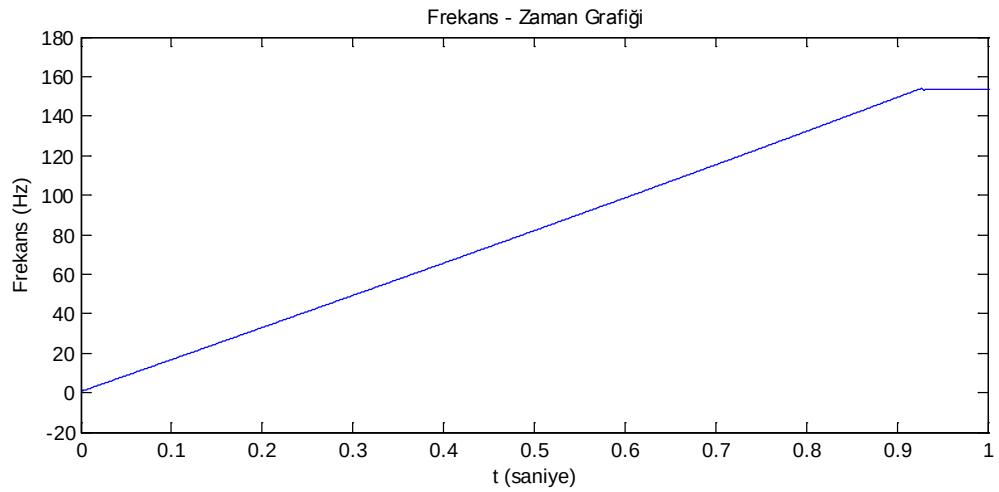
Şekil 6.28. Generator rotor hızının zaman ile değişimi



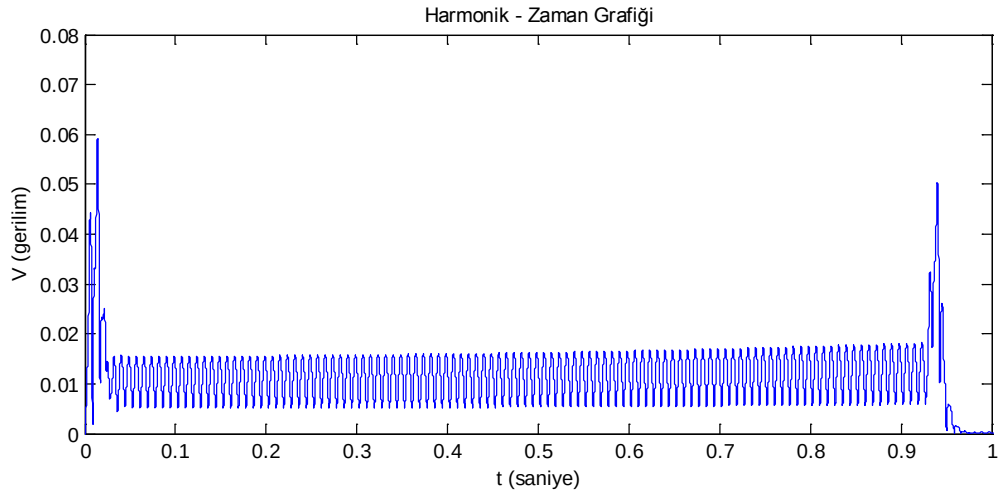
Şekil 6.29. Generatör gücünün zaman ile değişimi



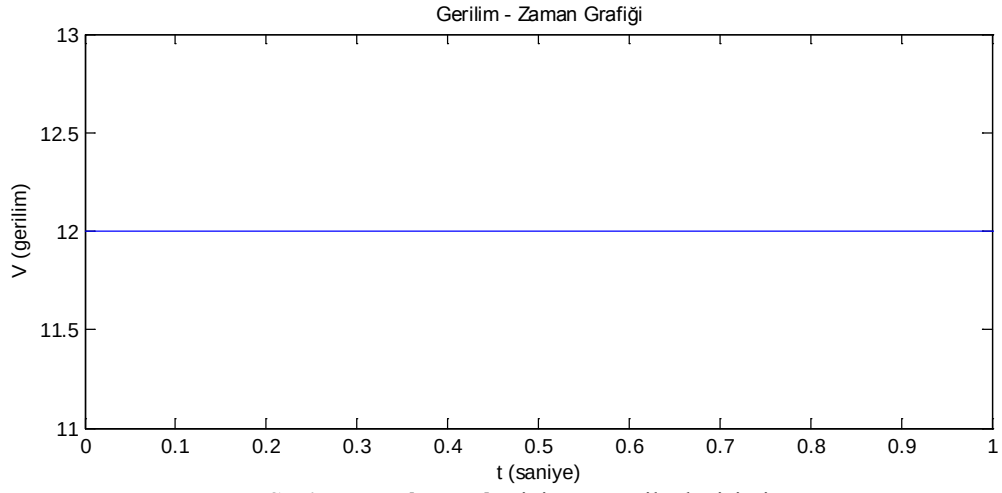
Şekil 6.30. Generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi



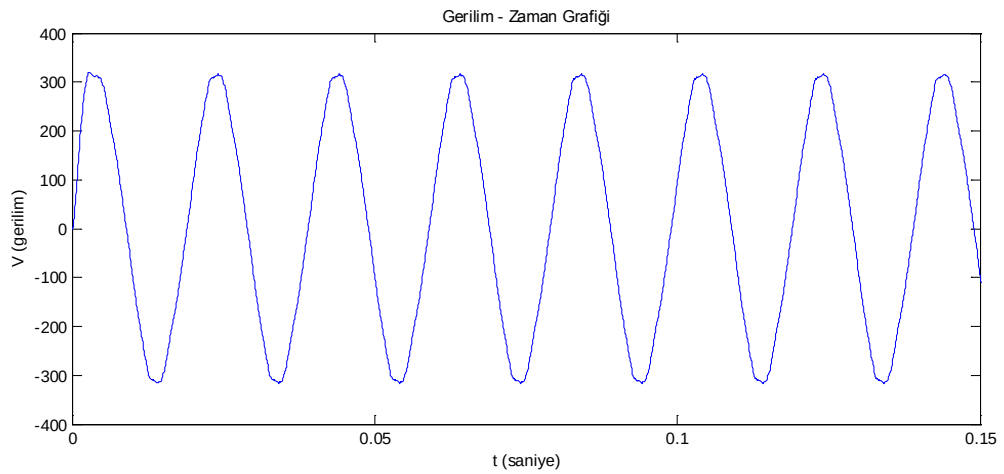
Şekil 6.31. Generatör çıkış gerilim frekansının zaman ile değişimi



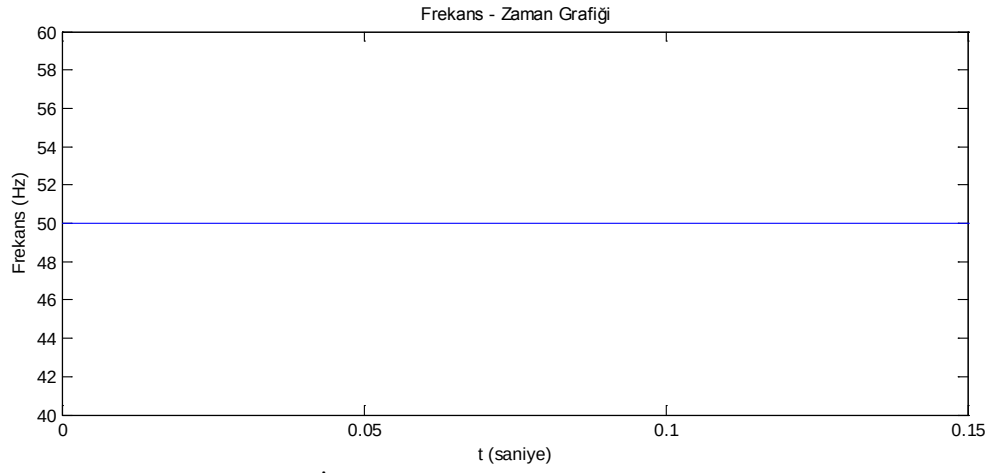
Şekil 6.32. Generatör çıkış 3. Harmoniğinin zaman ile değişimi



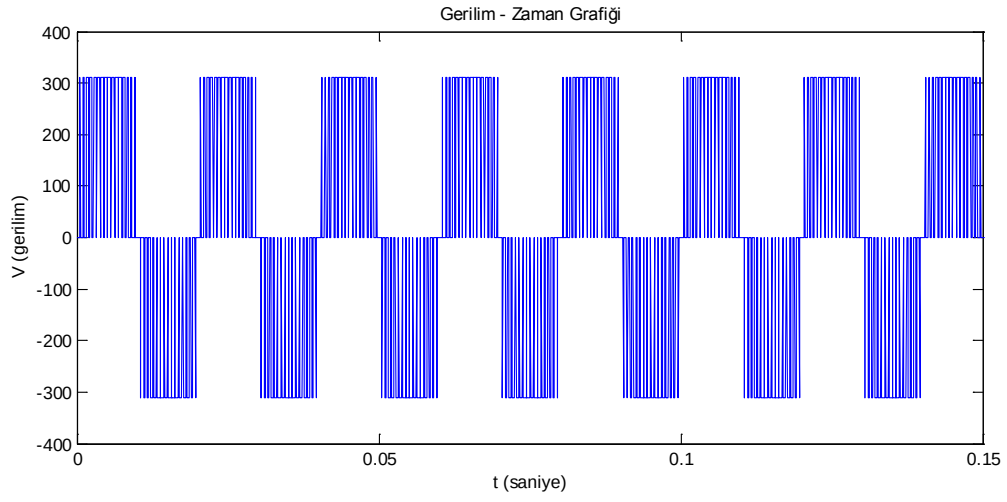
Şekil 6.33. Akü geriliminin zaman ile değişimi



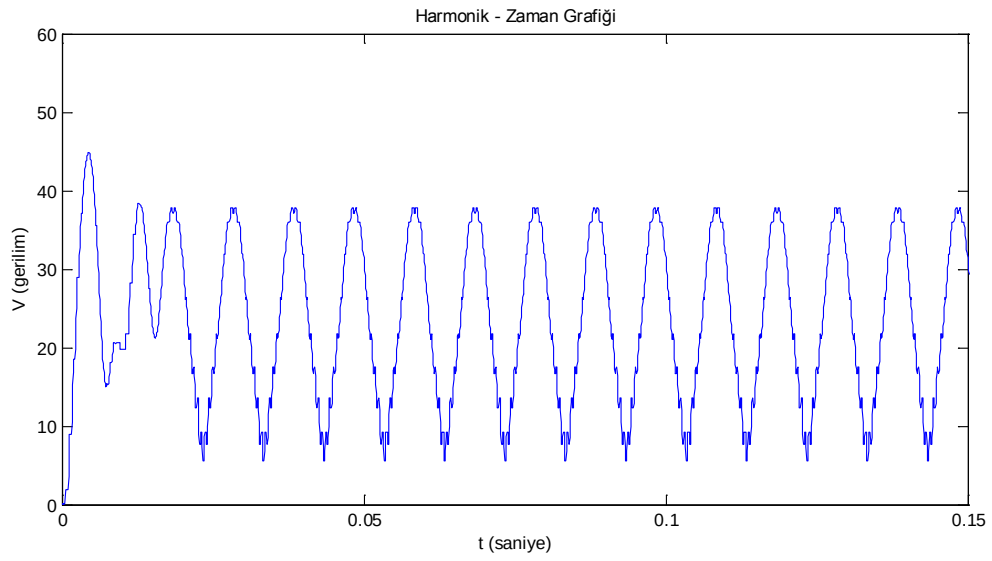
Şekil 6.34. İnverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi



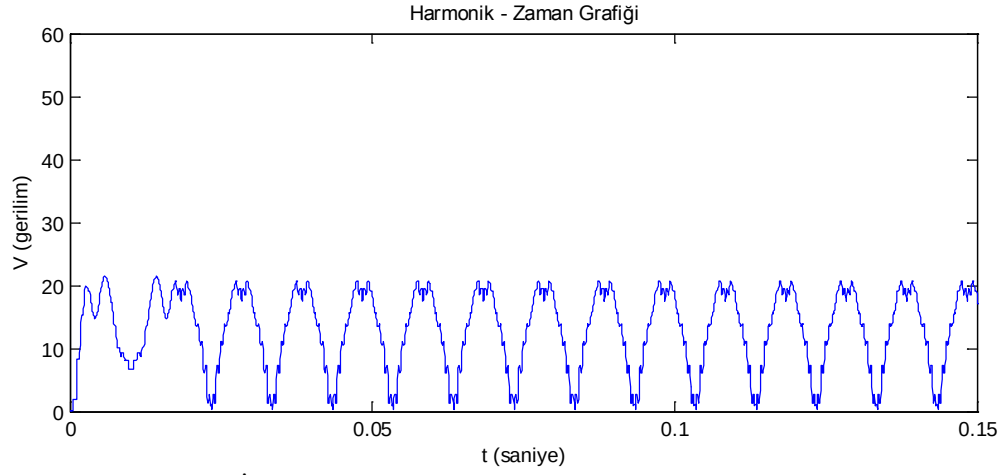
Şekil 6.35. İnverter çıkış frekansının zaman ile değişimi



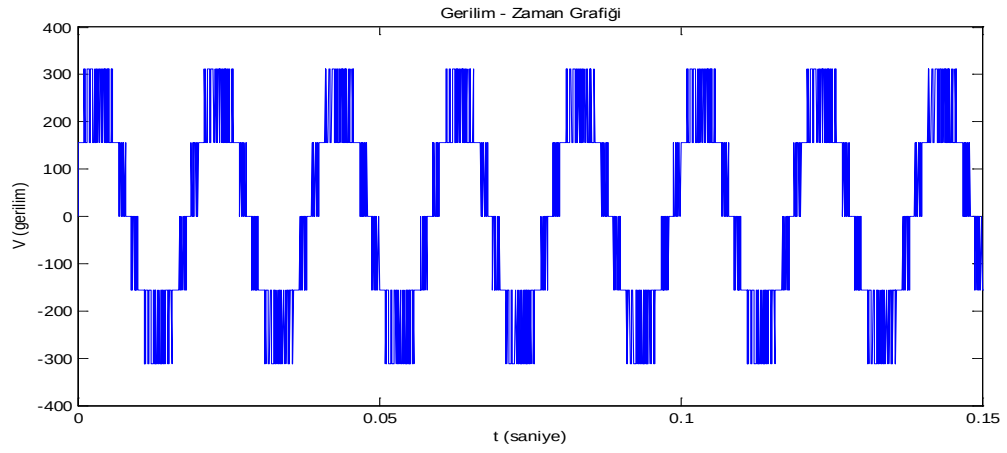
Şekil 6.36. İki seviyeli inverter çıkış geriliminin zaman ile değişimi



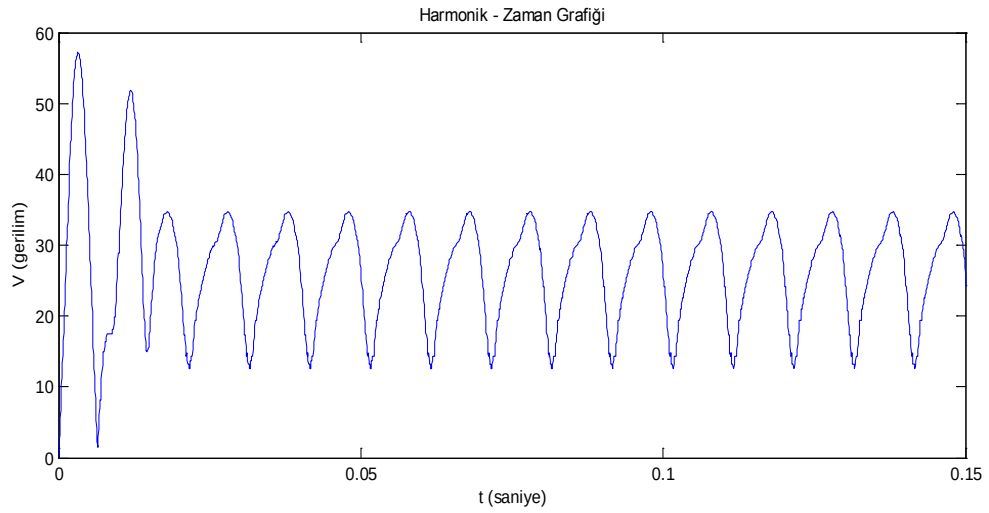
Şekil 6.37. İki seviyeli inverter çıkış 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi



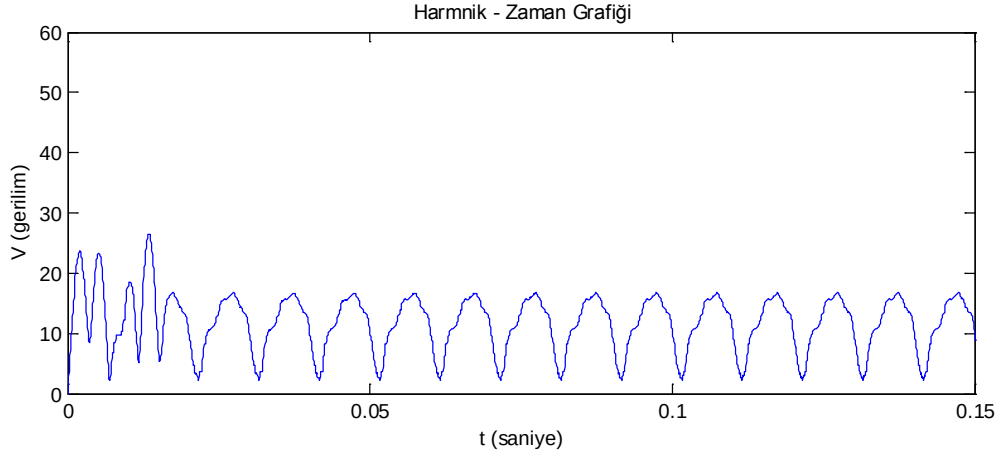
Şekil 6.38. İki seviyeli inverter çıkış 5.Harmoniğinin zaman ile değişimi



Şekil 6.39. Üç seviyeli inverter çıkış gerilimin zaman ile değişimi



Şekil 6.40. Üç seviyeli inverter çıkış 3.Harmoniğinin zaman ile değişimi



Şekil 6.41. Üç seviyeli inverter çıkış 5.Harmoniğinin zaman ile değişimi

Benzetim çalışması sonuçları incelendiğinde; rüzgar türbinine uygulanan rüzgar hızının Şekil 6.26.'daki gibi 12 m/sn'ye doğrusal olarak arttığı durumda, elde edilen momentin zaman ile değişiminin de doğrusal olarak 2 Nm'ye arttığı Şekil 6.27.'de görülmektedir. Artan rüzgar hızına bağlı olarak sürekli mıknatıslı senkron generatörün hızı da Şekil 6.28.'de ki gibi 2302 d/d'ya doğrusal olarak artmıştır. Ayrıca buna bağlı olarak sürekli mıknatıslı senkron generatör tarafından üretilen çıkış gerilimin de 15,15 V'a doğrusal olarak arttığı Şekil 6.30.'da, 3. Harmoniğinin zaman ile değişimi ise Şekil 6.32.'deki gibi 0,02 V değerinde olduğu görülmektedir. Sürekli mıknatıslı senkron generatör tarafından üretilen elektriksel gücün ise 202 W değerine artışı Şekil 6.29.'de görülmektedir.

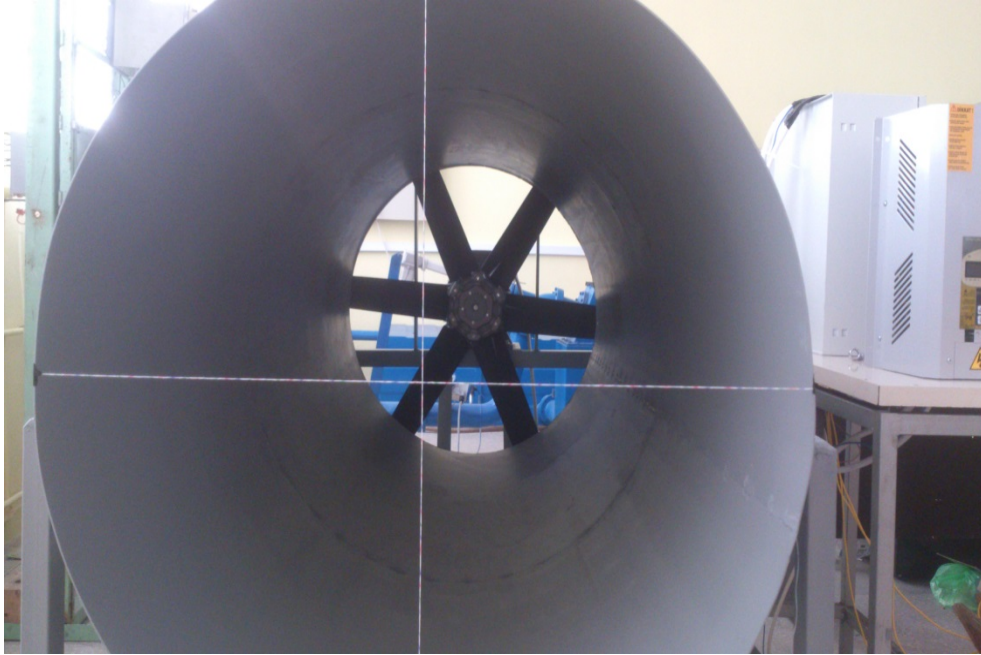
Doğrusal olarak artan rüzgar hızlarına rağmen invertere giriş olarak uygulanan doğru gerilimin zaman ile değişimi Şekil 6.33.'deki gibi 12 V'da, inverter çıkış geriliminin zaman ile değişiminin Şekil 6.34.'deki gibi 220 V'da ve frekansının da Şekil 6.35.'de görüldüğü gibi 50 Hz'de sabit kaldığı görülmektedir. İki seviyeli inverter çıkış gerilimi Şekil 6.36.'da ve 3. Harmoniğinin değişimi Şekil 6.37.'de, 5. Harmoniğinin değişimi ise Şekil 6.38'de görülmektedir. Üç seviyeli inverter çıkış gerilimi Şekil 6.39.'da ve 3. Harmoniğinin değişimi Şekil 6.40.'da, 5. Harmoniğinin değişimi ise Şekil 6.41'de görülmektedir.

6.3. Deneyisel Bulgular

6.3.1. Rüzgar Hız Ölçüm Sonuçları

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasında ilk deneyisel veri olarak rüzgar hızları ölçülmüştür. Ölçüm işlemi, aksiyel fanın montajı yapıldıktan sonra

sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininin montajı yapılacak hava kanalı çıkışından gerçekleştirilmiştir. Bunun içinde Resim 6.6.'da görüldüğü gibi merkezinden geçecek şekilde 3 cm aralıklar ile işaretlenmiş dikey ve yatay eksenli ince şeritler çekilmiştir. Daha sonra ise yapay rüzgar enerjisini meydana getiren aksiyel fan, sürücüsü tarafından farklı hız kademelerinde çalıştırılarak önceden işaretlenmiş noktalarda hava hız ölçer (anemometre) ölçü aleti kullanılarak dikey ve yatay eksenlerde rüzgar hız değerleri alınmıştır.



Resim 6-6. Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininin montajının yapılacağı kısım

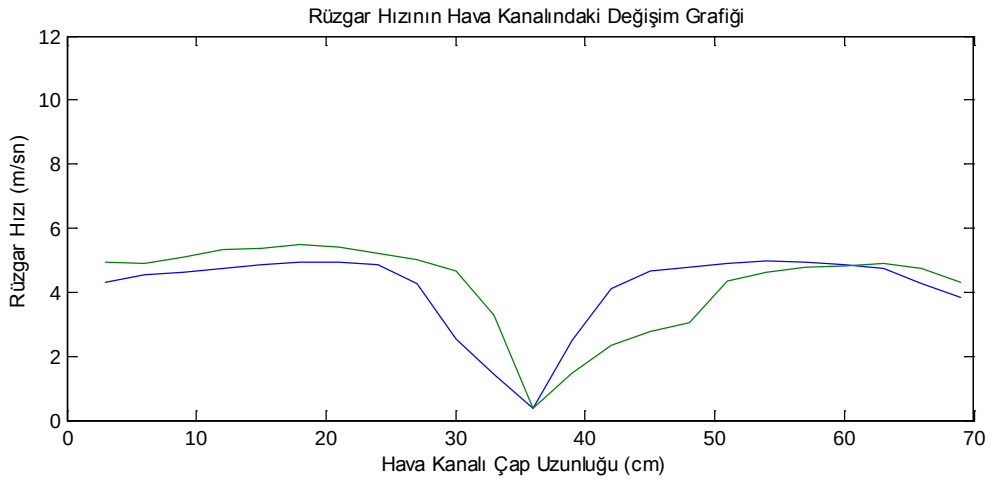
Aksiyel fan sürücüsünün hız değişim aralığı olarak Tablo 6.2.'de verildiği üzere 1400 d/d ve 50 Hz olduğundan adım sayısı olarak;

$$Adım Sayısı = \frac{1400}{50}$$

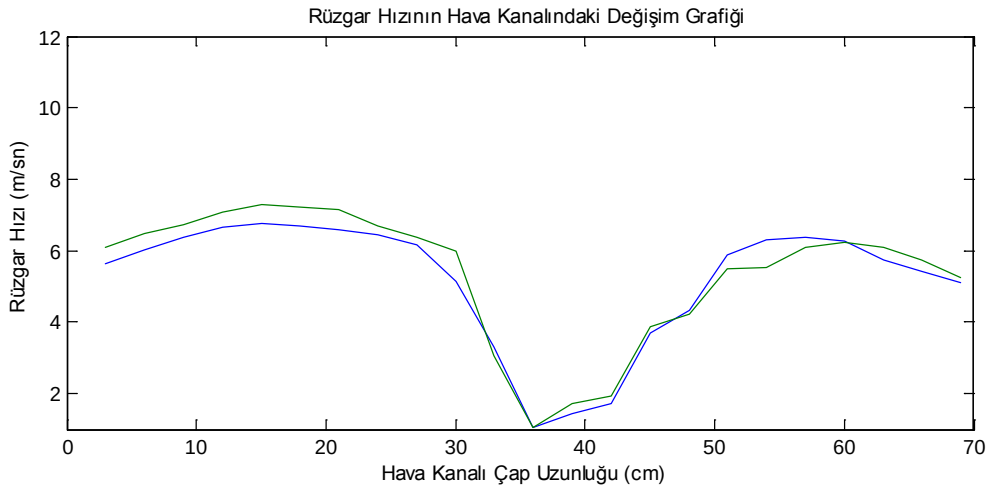
$$Adım Sayısı = 28 \text{ d/d}$$

olarak ayarlanmıştır. Buradan anlaşılabacağı üzere her bir hız kademe değişimi sırasında aksiyel fanın devir sayısı 28 d/d artacak veya azalacaktır. Yapay rüzgar enerjisini meydana getiren aksiyel fanın deneysel olarak çalıştırılacağı başlangıç devir sayısı 224 d/d olarak belirlenmiştir. Bu değerden sonra yapılmış olan ölçümler aksiyel fanın devir sayısı 28 d/d artırılmış ve en son değer olarak da 1288 d/d alınmıştır.

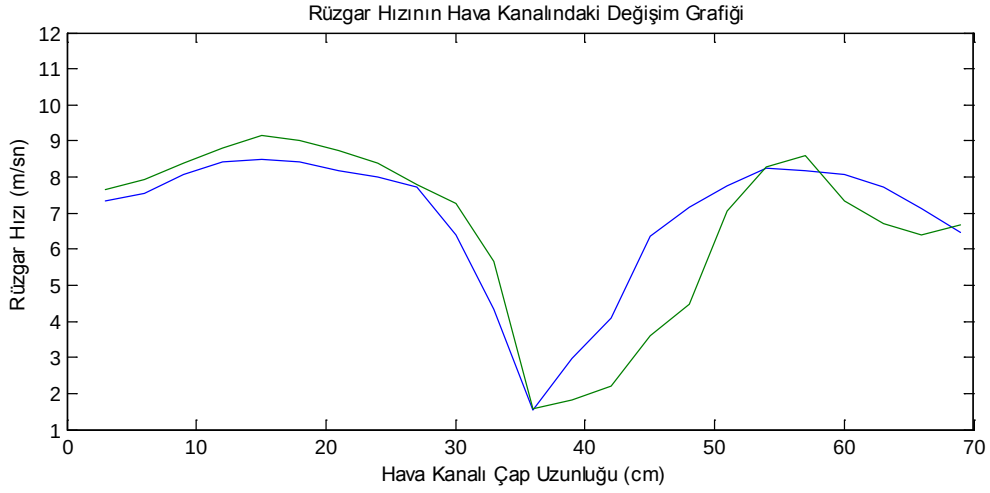
Yapılan deneyler sonucunda alınmış olan değerlerin Matlab benzetim programında çizdirilen eğrileri aşağıda verilmiştir. Burada mavi eğriler dikey ekseninde, yeşil eğriler de yatay ekseninde alınmış rüzgar hız değerlerini göstermektedir. Başlangıç ölçüm noktaları olarak sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbinin montajı yapılacak hava kanalının yatay ekseninde sol köşesinden, dikey ekseninde ise üst köşesinden ölçümler gerçekleştirilmiştir.



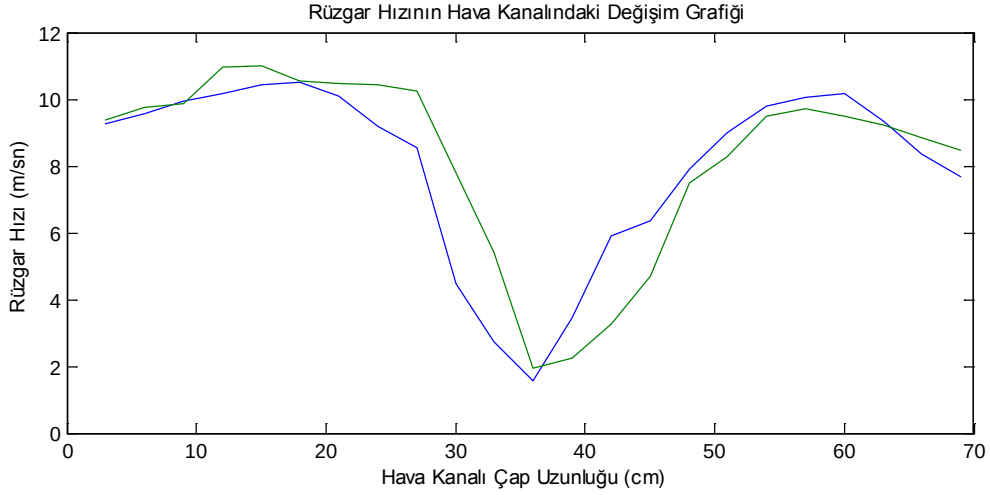
Şekil 6.42. 280 d/d için rüzgar hızının hava kanalındaki değişimi



Şekil 6.43. 392 d/d için rüzgar hızının hava kanalındaki değişimi



Şekil 6.44. 504 d/d için rüzgar hızının hava kanalındaki değişimi



Şekil 6.45. 616 d/d için rüzgar hızının hava kanalındaki değişimi

Rüzgar enerjisini meydana getiren aksiyel fanın, sürücüsü tarafından farklı hız kademelerinde çalıştırıldığında, rüzgar türbinin montajının yapılacağı hava kanalı tarafında yapılan ölçümler sonucunda; aksiyel fan hızının 280 d/d olduğu durumda dikey çap düzleminin üst köşesinde ölçülen hava akımının hızı 4,32 m/sn olmakta, üst nokta ile hava kanalı merkezi arasında bu ölçülen rüzgar hız değerinin 4,95 m/sn değerine kadar arttığı ve daha sonra azalarak hava kanalı merkez noktasında 0,39 m/sn olduğu, daha sonra hava kanalı merkezi ile dikey çap düzleminin alt noktası arasında 4,98 m/sn değerine kadar arttığı ve alt köşede rüzgar hızının 3,85 m/sn olduğu Şekil 6.42’de mavi renk ile gösterilmiştir. Aynı şekilde yatay çap düzleminin sol köşesinde ölçülen hava akımının hızı 4,95 m/sn olmakta, sol nokta ile hava kanalı merkezi arasında bu ölçülen rüzgar hız değerinin 5,47 m/sn değerine kadar arttığı ve daha sonra azalarak hava kanalı merkez noktasında 0,39 m/sn olduğu, sonra ise hava kanalı merkezi ile yatay çap düzleminin sağ

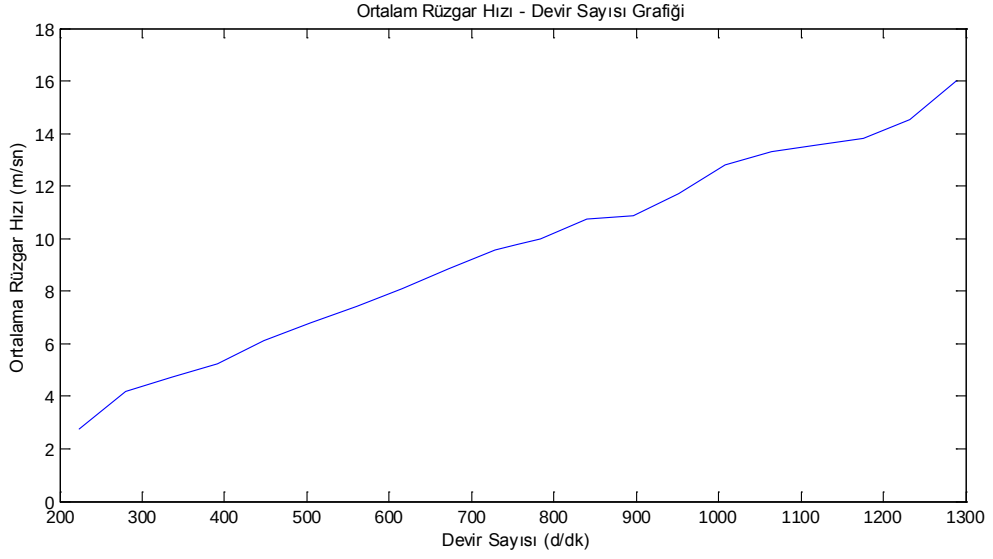
noktası arasında 4,83 m/sn değerine kadar arttığı ve sağ köşede rüzgar hızının 4,30 m/sn olduğu Şekil 6.42’de yeşil renk ile gösterilmiştir.

Aksiyel fan hızının 616 d/d olduğu durumda dikey çap düzleminin üst köşesinde ölçülen hava akımının hızı 9,26 m/sn olmakta, üst nokta ile hava kanalı merkezi arasında bu ölçülen rüzgar hız değerinin 10,52 m/sn değerine kadar arttığı ve daha sonra azalarak hava kanalı merkez noktasında 1,55 m/sn olduğu, sonra ise hava kanalı merkezi ile dikey çap düzleminin alt noktası arasında 10,16 m/sn değerine kadar arttığı ve alt köşede rüzgar hızının 7,68 m/sn olduğu Şekil 6.45’de mavi renk ile gösterilmiştir. Aynı şekilde yatay çap düzleminin sol köşesinde ölçülen hava akımının hızı 9,38 m/sn olmakta, sol nokta ile hava kanalı merkezi arasında bu ölçülen rüzgar hız değerinin 11,01 m/sn değerine kadar arttığı ve daha sonra azalarak hava kanalı merkez noktasında 1,93 m/sn olduğu, sonra ise hava kanalı merkezi ile yatay çap düzleminin sağ noktası arasında 9,72 m/sn değerine kadar arttığı ve sağ köşede rüzgar hızının 8,46 m/sn olduğu Şekil 6.45’de yeşil renk ile gösterilmiştir.

Yukarıda verilen her hız kademesi için alınan anlık rüzgar hız değerlerinin ortalama değerleri Tablo 6.3’de ve ortalama rüzgar hızları ile devir sayıları arasındaki değişimi gösteren grafik ise Şekil 6.46’de gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Değişken hız kademelerine göre anlık ortalama rüzgar hız değerleri

Devir Sayısı (d/d)	Ortalama Rüzgar Hız Değerleri (m/sn)	Devir Sayısı (d/d)	Ortalama Rüzgar Hız Değerleri (m/sn)
224	2,76	784	9,97
280	4,18	840	10,73
336	4,72	896	10,87
392	5,25	952	11,71
448	6,12	1008	12,82
504	6,78	1036	13,06
560	7,44	1064	13,3
616	8,11	1120	13,56
672	8,84	1176	13,83
728	9,57	1232	14,54
756	9,79	1288	16,02



Şekil 6.46. Devir sayısına bağlı ortalama rüzgar hızının değişimi

6.3.2. Doğrultucu ve Gerilim Regülatörü Çıkışına Uygulanan Omik Yük Deneysel Sonuçları

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulaması çalışmasında Bölüm 6.3.1’de anlatılan deneyler tamamlandıktan sonra sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininin montajı gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde sonra yapay rüzgar enerjisini meydana getiren aksiyel fan, farklı hız kademelerinde tekrar çalıştırılarak hem sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbin doğrultucu ve hem de doğrultucu çıkışına gerilim regülatörü bağlandıktan sonra farklı omik yük değerleri uygulanmıştır.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün doğrultucu çıkışına uygulanan farklı omik yük değerleri sonucunda, sistemin sağladığı gerilim ve akım değerleri Tablo 6.4.’de gösterilmiştir. Sürekli mıknatıslı senkron generatörün doğrultucu çıkışına gerilim regülatörü bağlandıktan sonraki uygulanan farklı omik yük değerleri sonucunda, sistemin sağladığı gerilim ve akım değerleri ise Tablo 6.5.’de gösterilmiştir.

Tablo 6.4. Doğrultucu çıkışına uygulanan omik yükler için akım ve gerilim değerlerinin değişimi

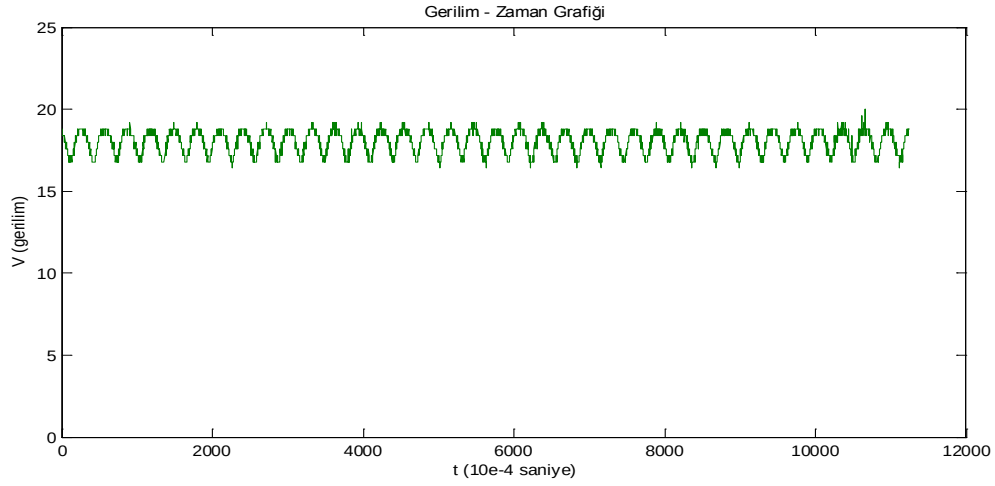
Yük Değerleri	Yüksüz	400Ω	400Ω	450Ω	450Ω	500Ω	500Ω	550Ω	550Ω
Devir Sayısı (d/dk)	Gerilim (V)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)
336	8,2	7,72	0,019	7,75	0,017	7,77	0,015	7,78	0,014
364	8,25	7,73	0,019	7,77	0,017	7,78	0,015	7,81	0,014
392	9,19	8,66	0,022	8,67	0,019	8,69	0,017	8,73	0,016
420	10,27	9,59	0,024	9,61	0,021	9,65	0,019	9,71	0,017
448	11,45	10,6	0,026	10,62	0,024	10,65	0,021	10,69	0,019
476	12,72	11,78	0,029	11,79	0,026	11,87	0,023	11,89	0,021
504	13,62	12,78	0,032	12,8	0,028	12,85	0,025	12,87	0,023
532	14,62	13,74	0,034	13,77	0,031	13,79	0,027	13,97	0,025
560	15,6	14,96	0,037	14,99	0,033	14,98	0,029	14,99	0,027
588	16,2	16	0,04	15,98	0,036	16,07	0,031	16,04	0,029
616	17,6	16,98	0,043	17,05	0,038	17,06	0,033	17,11	0,031
644	18,8	18,25	0,045	18,31	0,041	18,33	0,036	18,45	0,033
672	19,8	19,09	0,048	19,12	0,042	19,14	0,038	19,15	0,035

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbin doğrultucu çıkış geriliminin; yüksüz durumda ve aksiyel fanın devir hızının 336 d/d olduğu durumda 8,2 V olduğu, aksiyel fanın devir hızının artarak 672 d/d olduğu durumda türbin doğrultucu çıkış geriliminin de artarak 19,8 V olduğu Tablo 6.4.'de görülmektedir. Aynı şekilde aksiyel fanın devir hızının örnek olarak alınan 504 d/d da sabit olduğu ve yüksüz durumda türbin doğrultucu çıkış geriliminin 13,62 V olduğu görülmüştür. Fakat türbin doğrultucu çıkışına 400 Ω'luk omik yük uygulandığında türbin doğrultucu çıkış geriliminin azalarak 12,78 V, akımının 0,032 A, omik yük değerinin artırılarak 450 Ω olduğunda türbin çıkış geriliminin 0,02 V artarak 12,8 V, akımının 0,004 A azalarak 0,028 A, omik yük değerinin artırılarak 500 Ω olduğunda türbin çıkış geriliminin 0,05 V artarak 12,85 V, akımının 0,003 A azalarak 0,025 A olduğu görülmüştür. Son olarak, omik yük değerinin artırılarak 550 Ω olduğunda türbin çıkış geriliminin 0,02 V artarak 12,87 V, akımının 0,002 A azalarak 0,023 A olduğu Tablo 6.4.'de görülmektedir.

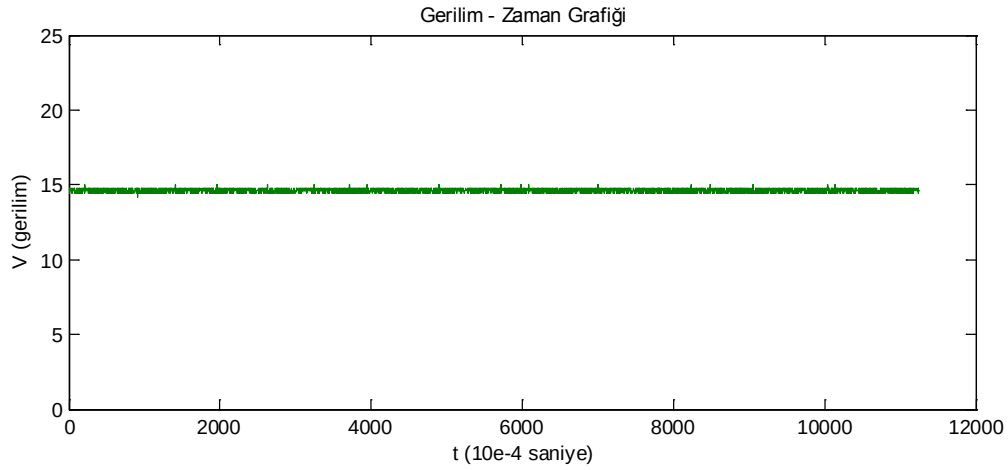
Tablo 6.5. Gerilim regülatörü çıkışına uygulanan omik yükler için akım ve gerilim değerlerinin değişimi

Yük Değerleri	Yüksüz	400Ω	400Ω	450Ω	450Ω	500Ω	500Ω	550Ω	550Ω
Devir Sayısı (d/dk)	Gerilim (V)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)
336	14,53	14,44	0,036	14,44	0,032	14,44	0,028	14,44	0,026
364	14,53	14,44	0,036	14,44	0,032	14,44	0,028	14,44	0,026
392	14,53	14,44	0,036	14,44	0,032	14,44	0,028	14,44	0,026
420	14,53	14,44	0,036	14,44	0,032	14,44	0,028	14,44	0,026
448	14,53	14,44	0,036	14,44	0,032	14,44	0,028	14,44	0,026
476	14,53	14,44	0,036	14,44	0,032	14,44	0,028	14,44	0,026
504	14,55	14,44	0,036	14,44	0,032	14,44	0,028	14,44	0,026
532	14,55	14,46	0,036	14,46	0,032	14,46	0,028	14,46	0,026
560	14,55	14,46	0,036	14,46	0,032	14,46	0,028	14,46	0,026
588	14,55	14,46	0,036	14,46	0,032	14,46	0,028	14,46	0,026
616	14,56	14,46	0,036	14,46	0,032	14,46	0,028	14,46	0,026
644	14,56	14,46	0,036	14,46	0,032	14,46	0,028	14,46	0,026
672	14,57	14,47	0,036	14,47	0,032	14,47	0,028	14,47	0,026

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbin doğrultucu çıkışına gerilim regülatörü bağlandıktan sonraki çıkış geriliminin; yüksüz durumda ve aksiyel fanın devir hızının 336 d/d ile 476 d/d arasında değiştiği durumda 14,53 V, 504 d/d ile 588 d/d arasında değiştiği durumda 14,55 V, 616 d/d ve 644 d/d olduğu durumda 14,56 V ve 672 d/d olduğu durumda 14,57 V olduğu Tablo 6.5.'de görülmektedir. Aksiyel fanın devir hızından bağımsız olarak 400 Ω'luk omik yük uygulandığında akım değerinin 0,036 A, 450 Ω'luk omik yük uygulandığında akım değerinin 0,004 A azalarak 0,032 A, 500 Ω'luk omik yük uygulandığında akım değerinin 0,004 A azalarak 0,028 A ve 550 Ω'luk omik yük uygulandığında ise akım değerinin 0,002 A azalarak 0,026 A olduğu görülmüştür. Fakat aksiyel fanın devir hızının 336 d/d ile 504 d/d arasında değiştiği ve gerilim regülatörü çıkışına 400 Ω, 450 Ω, 500 Ω ve 550 Ω'luk omik yük değerleri uygulandığı durumda regülatör çıkış gerilim değerinin 14,44 V olduğu görülmüştür. Aynı şekilde aksiyel fanın devir hızının 532 d/d ile 644 d/d arasında değiştiği ve gerilim regülatörü çıkışına 400 Ω, 450 Ω, 500 Ω ve 550 Ω'luk omik yük değerleri uygulandığı durumda regülatör çıkış gerilim değerinin 14,46 V olduğu ve son olarak aksiyel fanın devir hızının 672 d/d olduğu ve gerilim regülatörü çıkışına 400 Ω, 450 Ω, 500 Ω ve 550 Ω'luk omik yük değerleri uygulandığı durumda regülatör çıkış gerilim değerinin 14,47 V olduğu Tablo 6.5.'de görülmektedir.



Şekil 6.47. 644 d/d için doğrultucu çıkış gerilimin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



Şekil 6.48. 644 d/d için gerilim regülatörü çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)

Aksiyel fanın devir hızının 644 d/d olduğu durumda doğrultucu çıkış geriliminin, değeri Tablo 6.4 'de 18,8 V olarak, zaman ile değişim grafiği ise Şekil 6.47'de, gerilim regülatörü çıkış gerilimin değeri Tablo 6.5 'de 14,56 V olarak, zaman ile değişimi grafiği ise Şekil 6.48'de görülmektedir.

6.3.3. İnverter Çıkışına Uygulanan Omik Yük Deney Sonuçları

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulaması çalışmasında Bölüm 6.3.2'de anlatılan deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali, gerilim regülatörü, akü ve inverter elemanlarının bağlantıları yapılmıştır. Bu bölümde ise inverter çıkışına uygulanan omik yük değerleri ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel bulgu sonuçları ise Tablo 6.6.'da gösterilmiştir.

Tablo 6.6. İnverter çıkışına uygulanan omik yükler için akım ve gerilim değerleri

Yük Değerleri (Ω)	Gerilim (V)	Akım (A)
400	232,5	0,579
450	232,5	0,513
500	232,5	0,462
550	233	0,424

İnverter çıkışına uygulanan 400 Ω , 450 Ω , 500 Ω 'luk omik yük değerlerinde inverter çıkış geriliminin 232,5 V olduğu ve 550 Ω 'luk omik yük değerinde ise inverter çıkış geriliminin 0,5 V artarak 233 V olduğu Tablo 6.6'da görülmektedir. Ayrıca artan omik yük değerlerinde inverterin sağlamış olduğu akım değerleri sırası ile 0,579 A, 0,513 A, 0,462 A ve 0,424 A olduğu Tablo 6.6.'da görülmektedir.

6.3.4. İnverter Çıkışına Uygulanan İndüktif Yük Deney Sonuçları

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulaması çalışmasında Bölüm 6.3.3'de anlatılan omik yük deneysel çalışmasından sonra indüktif yük uygulanarak deneysel bulgular elde edilmiştir. İnverter çıkışına uygulanan indüktif yük olarak motor yükü tercih edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılmış olan motor yük parametreleri Tablo 6.7.'de verilmiştir.

Tablo 6.7. Motor yük parametreleri

L	2,5 mH	V	200 V
R	630 Ω	P	27 W
C	4300 μ F	A	0,16 A

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbin santralinin inverter çıkışına Tablo 6.7.'de verilen motor yükü ve Tablo 6.6.'da verilen omik yük değerleri seri bağlı olarak uygulanmıştır. Bunun sonucunda inverter sisteminin çıkış gerilimi ve sağlamış olduğu akım değerleri Tablo 6.8.'de verilmiştir.

Tablo 6.8. İnverter çıkışına uygulanan indüktif yükler için akım ve gerilim değerleri

Yük Değerleri	Gerilim (V)	Akım (A)
Motor	232,5	0,193
Motor + 400 Ω	232,5	0,124
Motor + 450 Ω	232,5	0,120
Motor + 500 Ω	232,5	0,114
Motor + 550 Ω	232,5	0,111

İnverter çıkışına uygulanan Motor, Motor + 400 Ω , Motor + 450 Ω Motor + 500 Ω ve Motor + 550 Ω 'luk omik yük değerlerinde inverter çıkış geriliminin 232,5 V da sabit olduğu ve ayrıca artan yük değerlerinde inverterin sağlamış olduğu akım değerlerinin ise sırası ile 0,193 A, 0,124 A, 0,120 A, 0,114 A ve 0,111 A olduğu Tablo 6.8.'de görülmektedir.

6.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Çıkışının Benzetim Sonuçları İle Deneysel Bulguların Karşılaştırılması

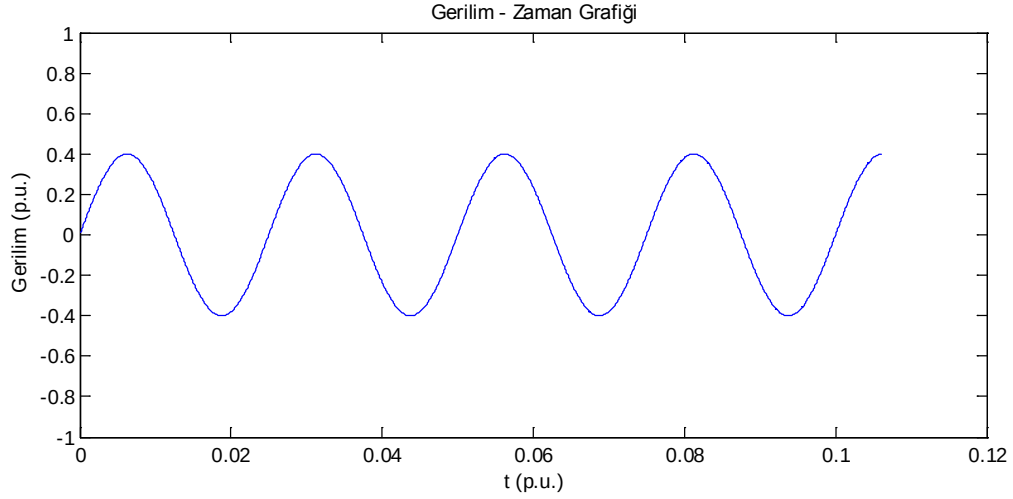
Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasının, generatör çıkışının farklı rüzgar hızlarında üretmiş olduğu gerilim ve frekans değerleri deneysel çalışma sonuçları Tablo 6.9.'da verilmiştir.

Tablo 6.9. Sürekli mıknatıslı senkron generatörün farklı hızlardaki çıkış değerleri

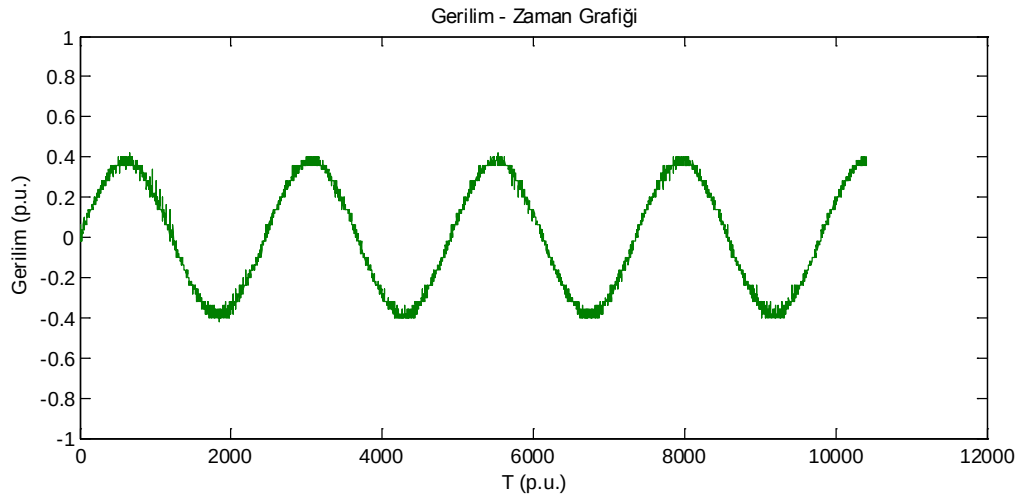
Devir Sayısı (d/dk)	Gerilim (V)	Frekans (Hz)
252	4,44	104,696
280	5,15	105,675
308	5,94	106,653
336	6,59	108,718
364	7,36	117,416
392	8,06	118,395
420	8,84	120,352
448	9,6	123,287
476	10,46	127,201
504	11,35	130,37
532	11,95	139,921
560	12,77	146,771
588	13,95	147,749
616	14,57	148,727
644	14,65	155,577
672	15,1	169,275
700	16	170,254

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali prototip uygulamasında rüzgar enerjisini oluşturan aksiyel fanın artan hızlarında, sürekli mıknatıslı senkron generatörün üretmiş olduğu gerilim değerlerinin arttığı Tablo 6.9.'da görülmektedir. Aynı şekilde aksiyel fanın hızı arttıkça frekans değerlerinin de arttığı Tablo 6.9.'da görülmektedir.

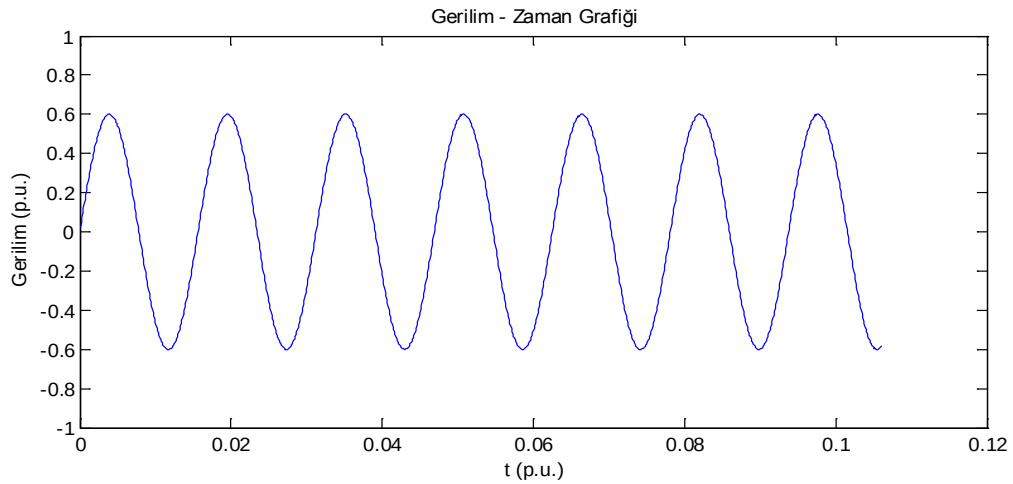
Rüzgar enerjisini oluşturan aksiyel fanın bazı hız değerleri için sürekli mıknatıslı senkron generatörün stator sargılarında indüklenen gerilimin benzetim ve deneysel sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



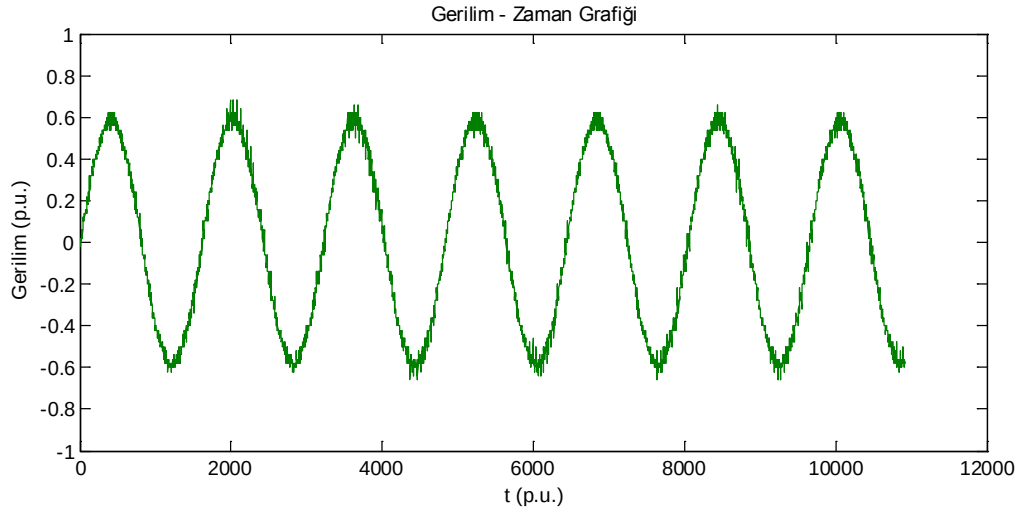
Şekil 6.49. 280 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



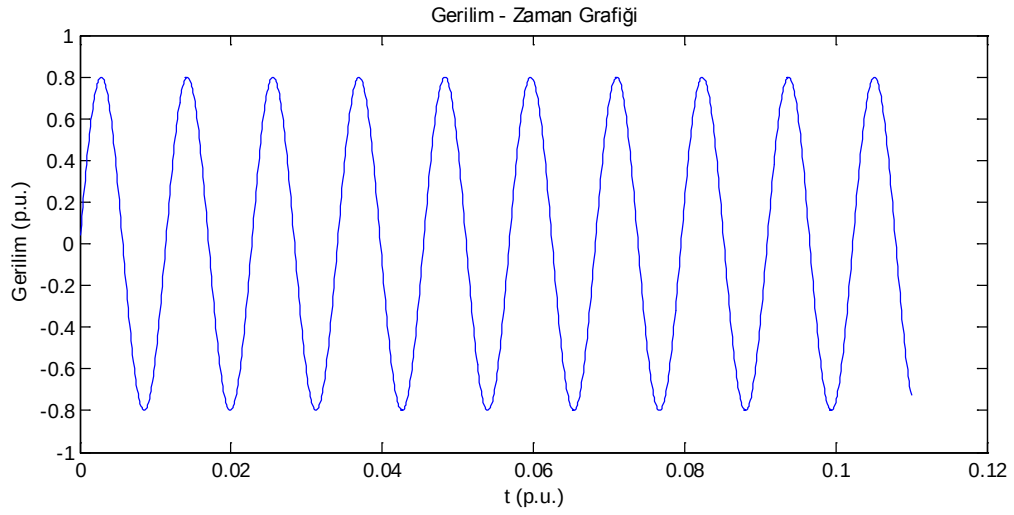
Şekil 6.50. 280 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



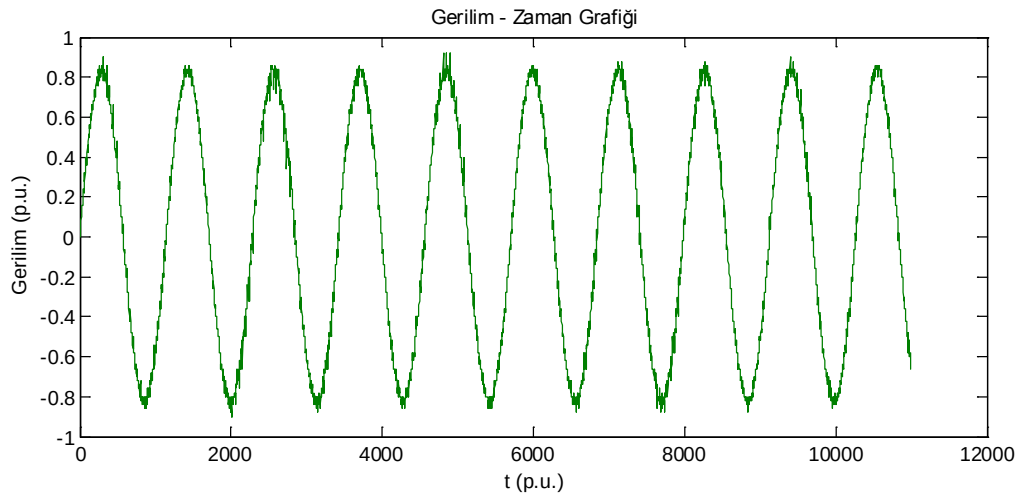
Şekil 6.51. 392 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



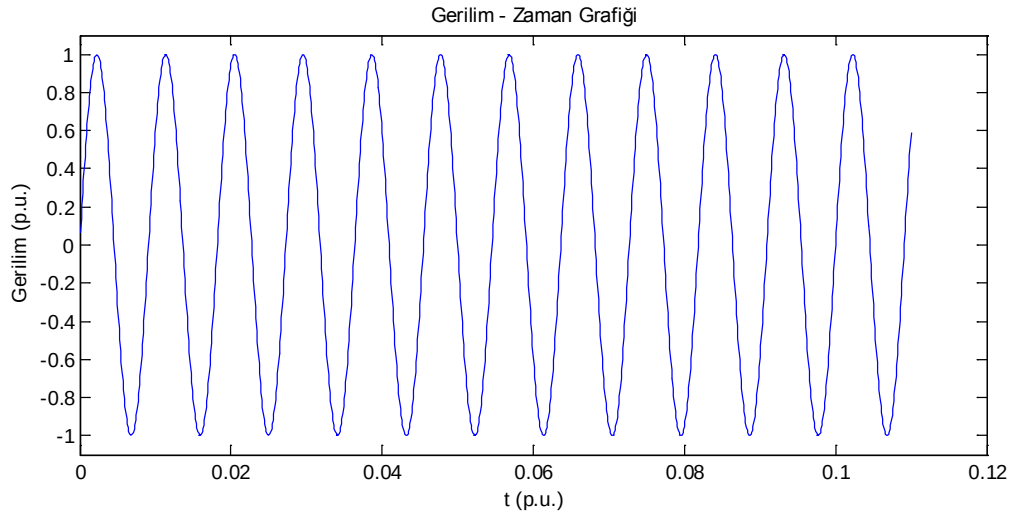
Şekil 6.52. 392 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



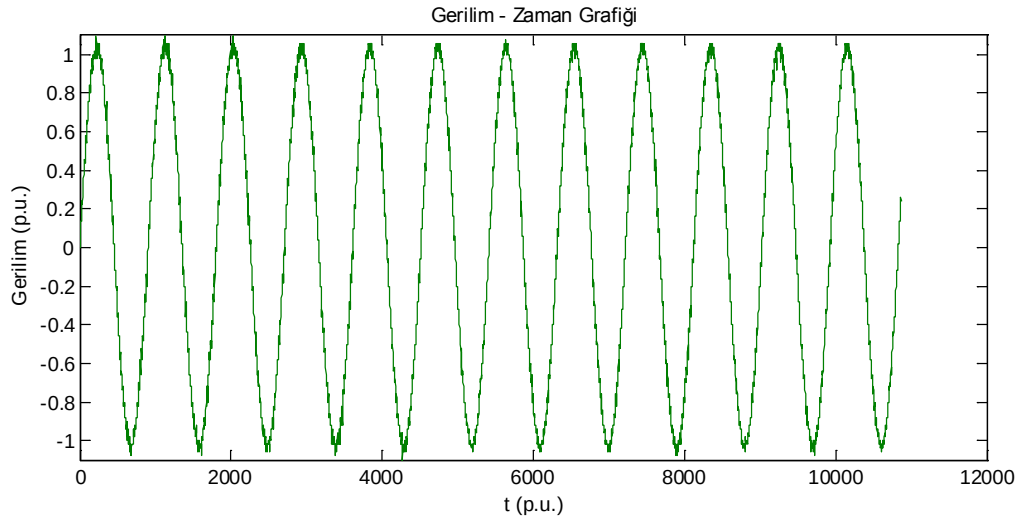
Şekil 6.53. 504 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



Şekil 6.54. 504 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



Şekil 6.55. 616 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)

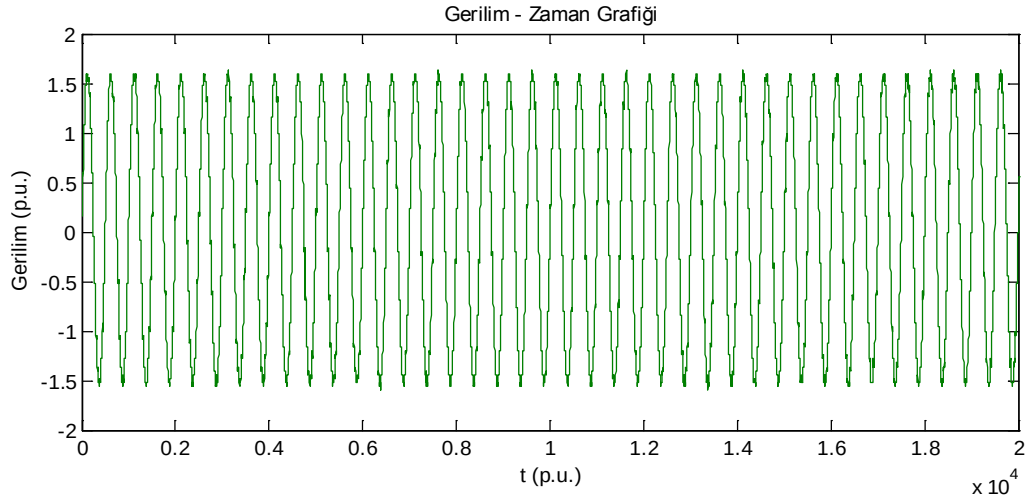


Şekil 6.56. 616 d/d için generatör çıkış geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)

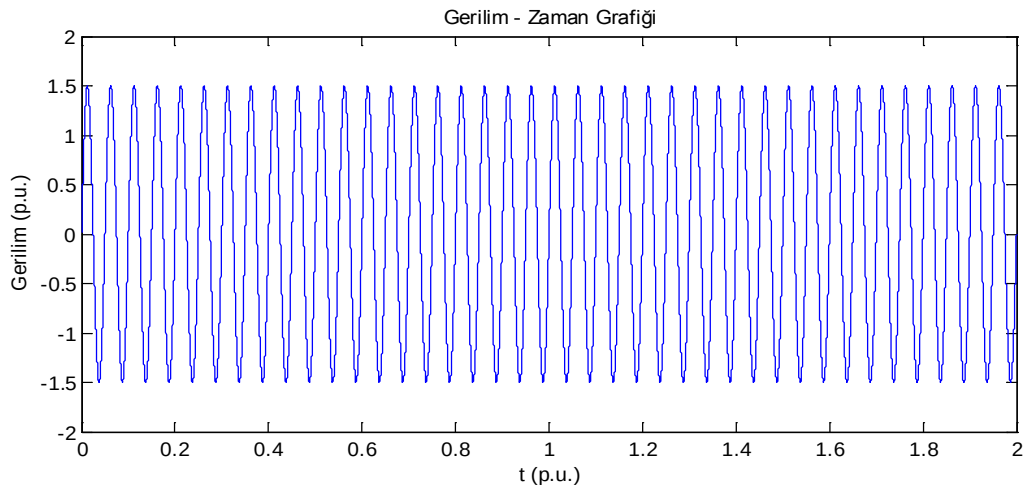
Akiyel fanın 280 d/d olduğu durumda sürekli mıknatıslı senkron generatörün stator sargılarında indüklenen gerilim değeri 5,15 V, frekansının ise 105,675 Hz olduğu Şekil 6.50.'de görülmektedir. Benzetim çalışması sonucu ise Şekil 6.49.'da görülmektedir. Akiyel fanın 392 d/d olduğu durumda sürekli mıknatıslı senkron generatörün stator sargılarında indüklenen gerilim değeri 8,06 V, frekansının ise 118,395 Hz olduğu Şekil 6.52.'de görülmektedir. Benzetim çalışması sonucu ise Şekil 6.51.'de görülmektedir. Akiyel fanın 504 d/d olduğu durumda sürekli mıknatıslı senkron generatörün stator sargılarında indüklenen gerilim değeri 11,35 V, frekansının ise 130,37 Hz olduğu Şekil 6.54.'de görülmektedir. Benzetim çalışması sonucu ise Şekil 6.53.'de görülmektedir. Akiyel fanın 616 d/d olduğu durumda sürekli mıknatıslı senkron generatörün stator sargılarında indüklenen gerilim değeri 14,57 V, frekansının ise 148,727 Hz olduğu Şekil 6.56.'da görülmektedir. Benzetim çalışması sonucu ise Şekil 6.55.'de görülmektedir.

6.5. İnverter Çıkışının Benzetim Sonuçları İle Deneysel Bulguların Karşılaştırılması

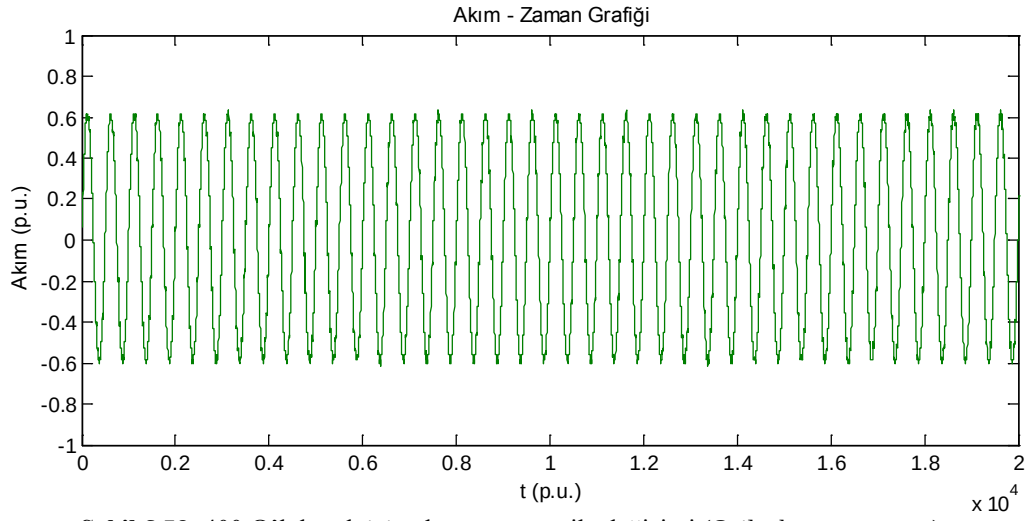
Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasının deneysel çalışmaları ile Matlab/Simulink benzetim çalışması sonuçları aşağıda gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları osiloskop yardımı ile gözlemlenmiştir. Her bir deneysel çalışmanın bilgileri '.csv' uzantısı olarak kaydedilmiştir. Daha sonra ise benzetim çalışmasının yapıldığı Matlab programı kullanılarak grafikler çizdirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçlarını osiloskopta gözlemleyebilmek için diferansiyel koruma rölesi (PINTEK DP-25 differential probe) ve akım bilgisi içinde LEM modüller kullanılmıştır. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalarda gerilim ve akım bilgilerinin efektif değerleri de verilmiştir. Bunun için ise analog sinyal dönüştürücüler kullanılmıştır.



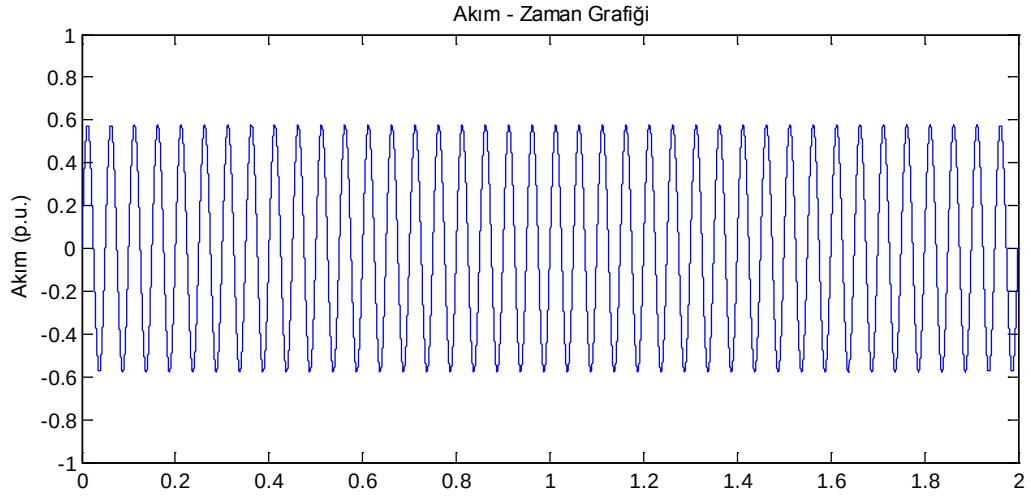
Şekil 6.57. 400 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



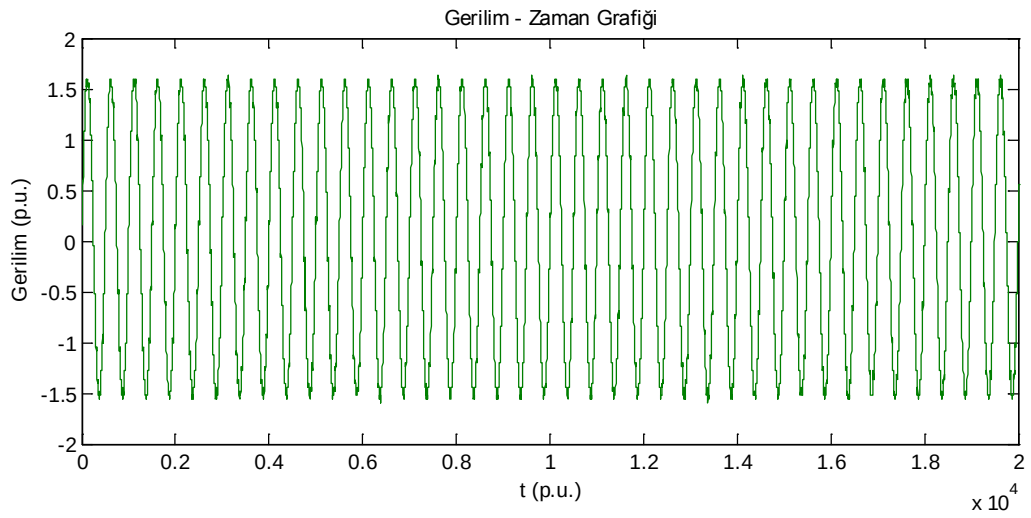
Şekil 6.58. 400 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



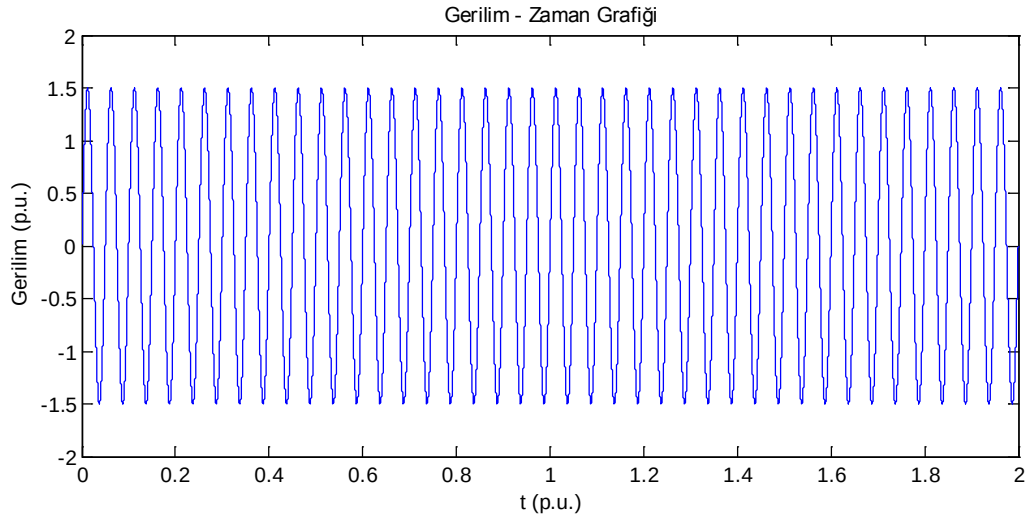
Şekil 6.59. 400 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



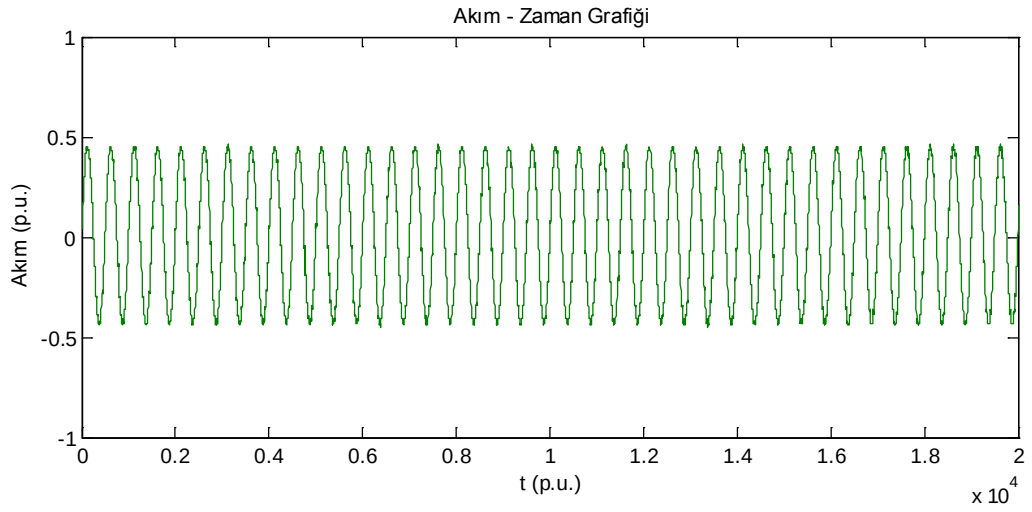
Şekil 6.60. 400 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



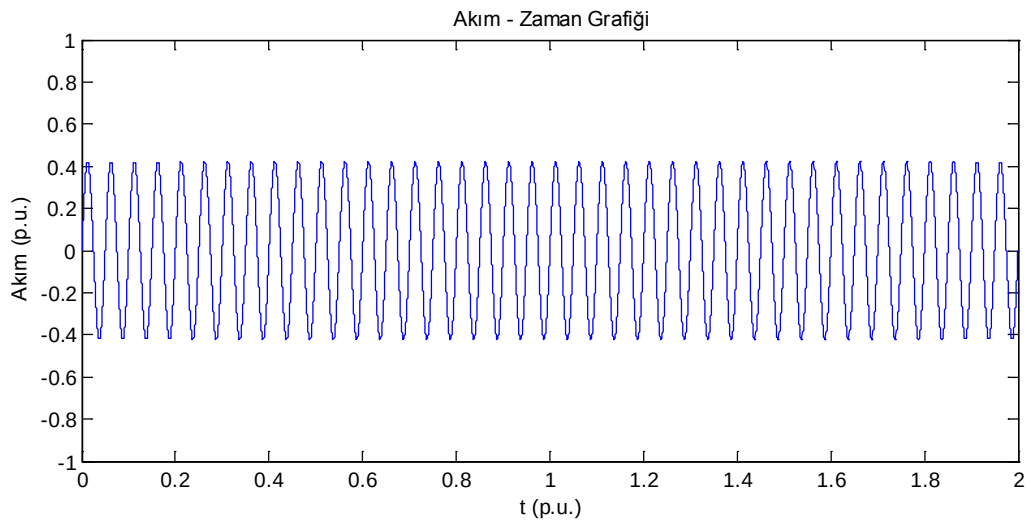
Şekil 6.61. 550 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



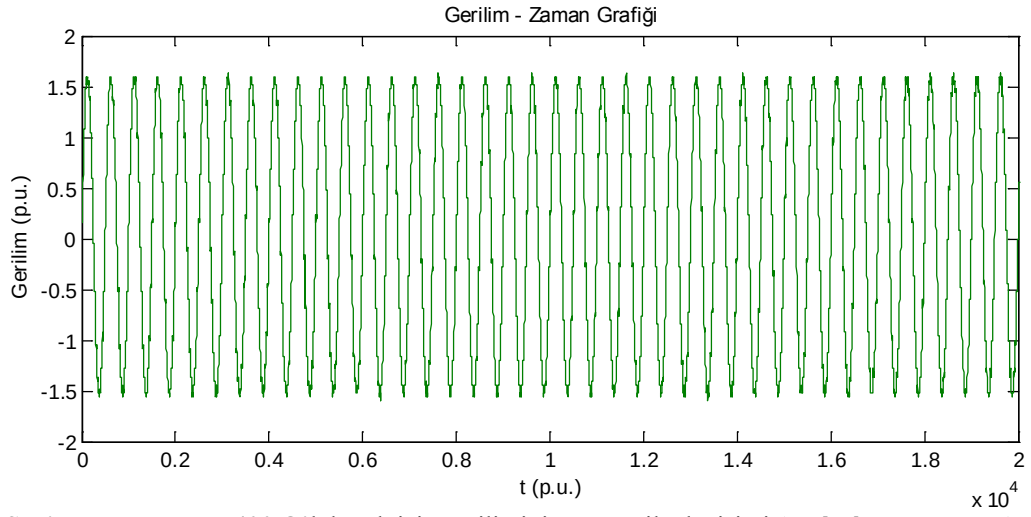
Şekil 6.62. 550 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



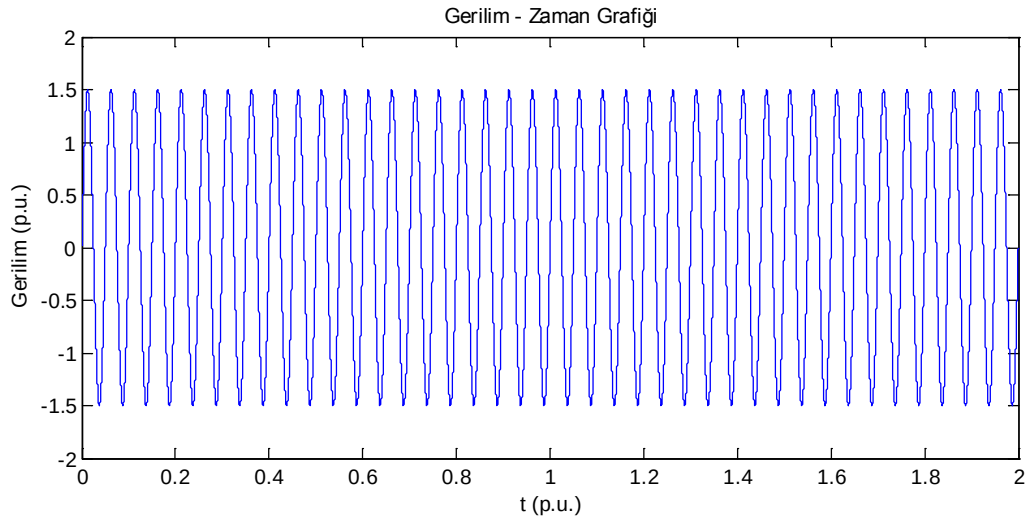
Şekil 6.63. 550 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



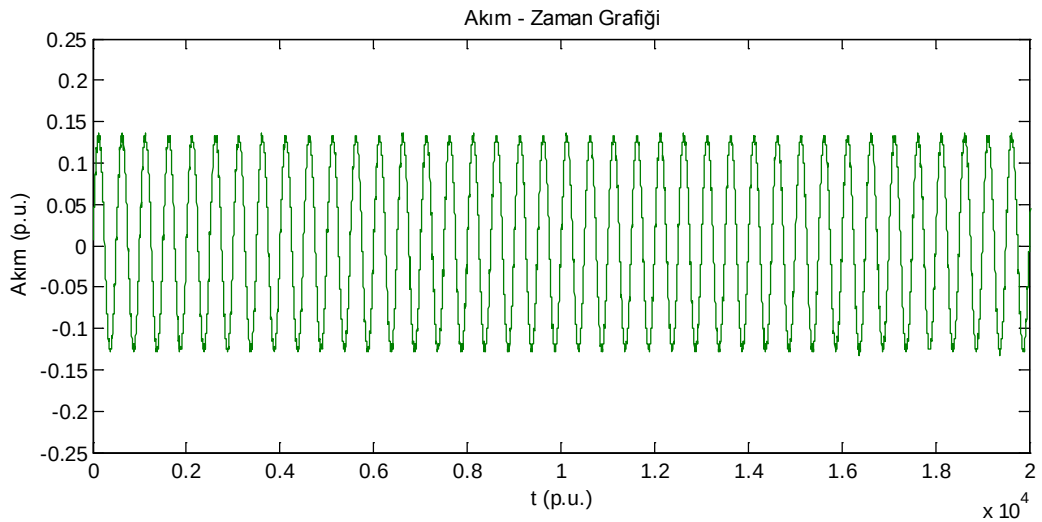
Şekil 6.64. 550 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



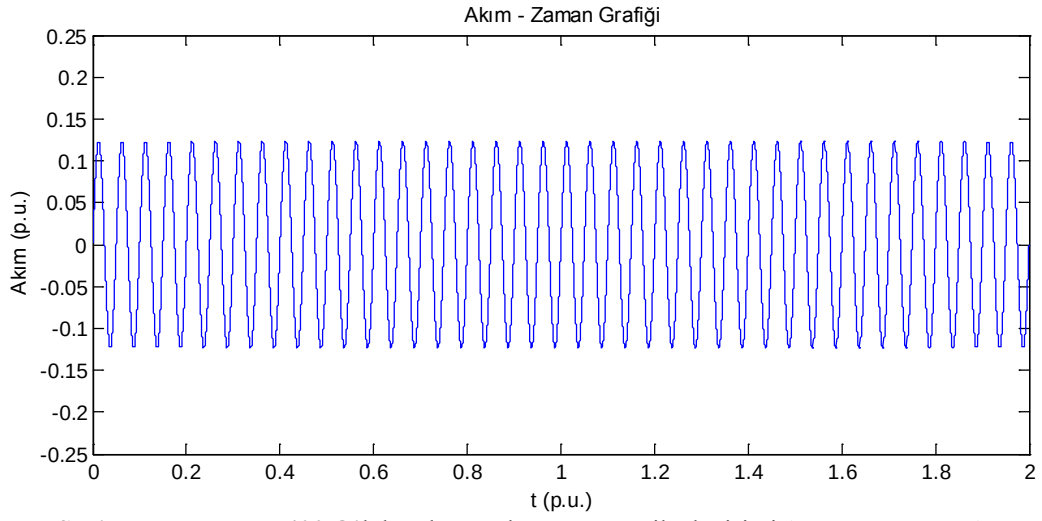
Şekil 6.65. Motor ve 400 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



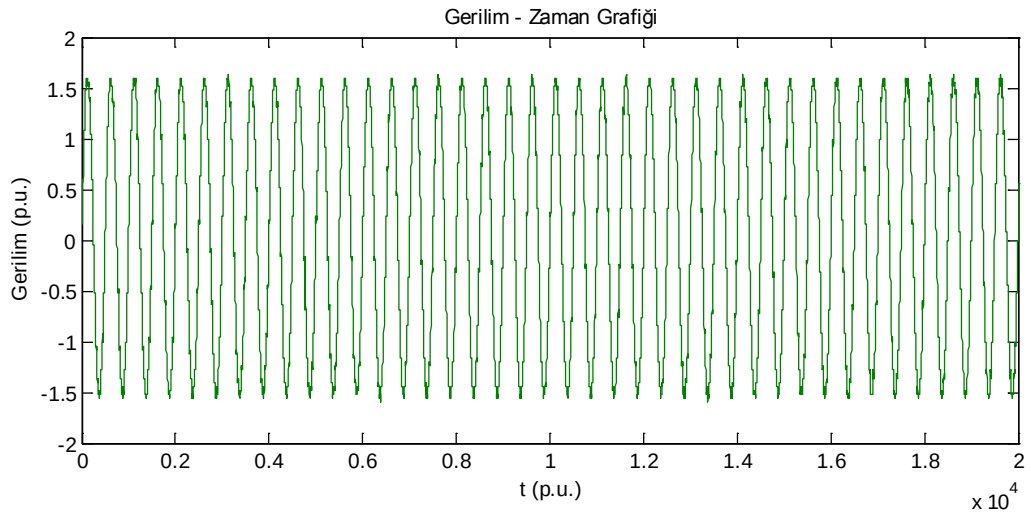
Şekil 6.66. Motor ve 400 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



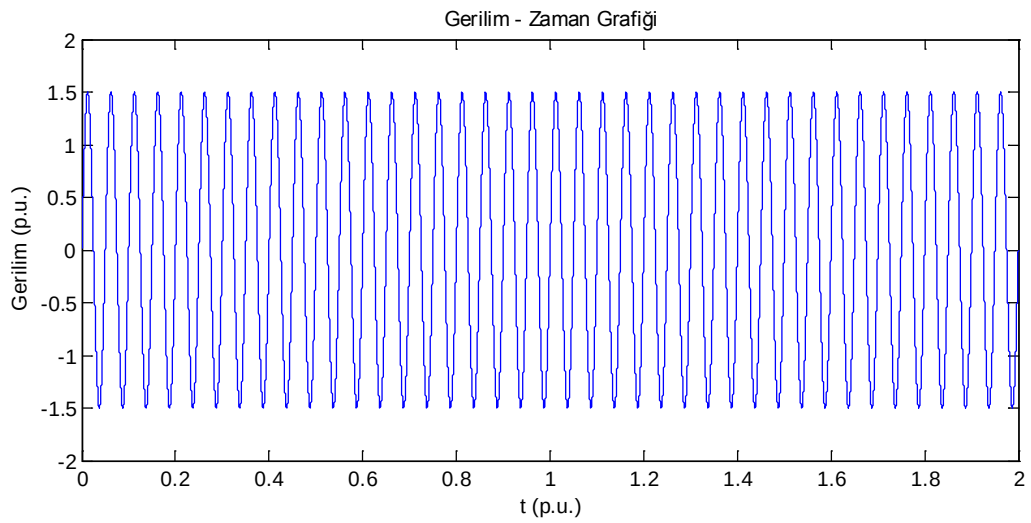
Şekil 6.67. Motor ve 400 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



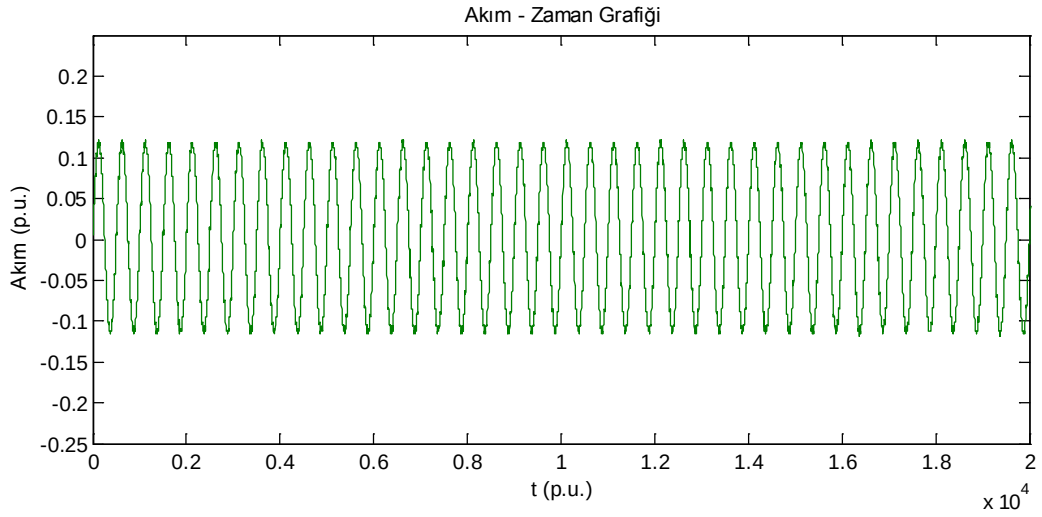
Şekil 6.68. Motor ve 400 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



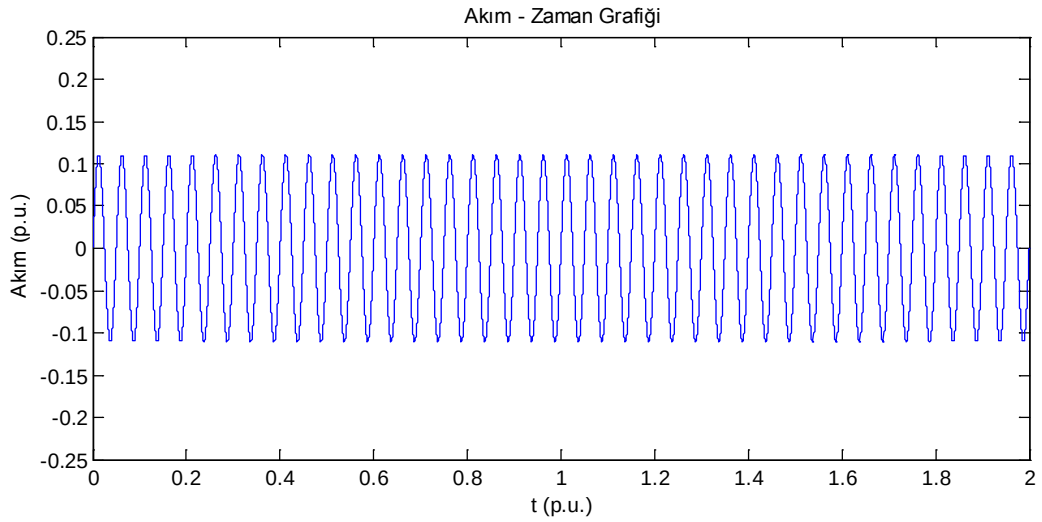
Şekil 6.69. Motor ve 550 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



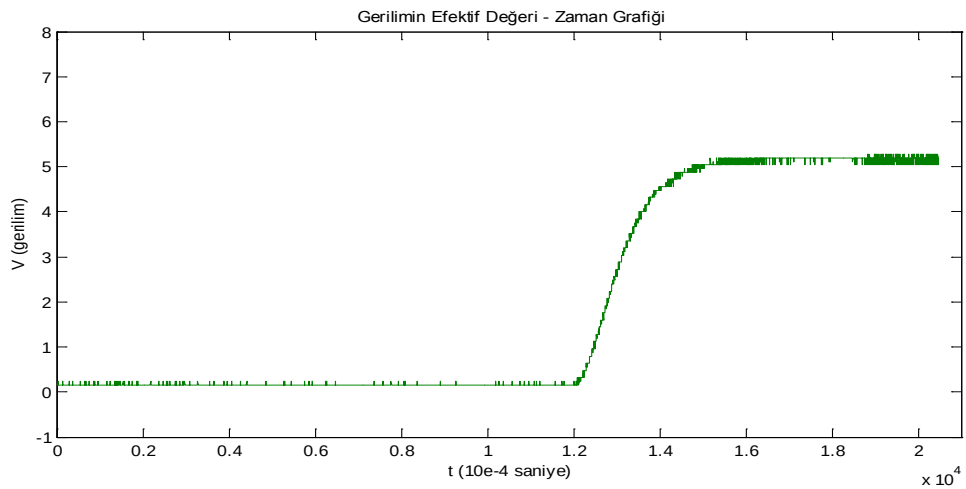
Şekil 6.70. Motor ve 550 Ω 'luk yük için geriliminin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



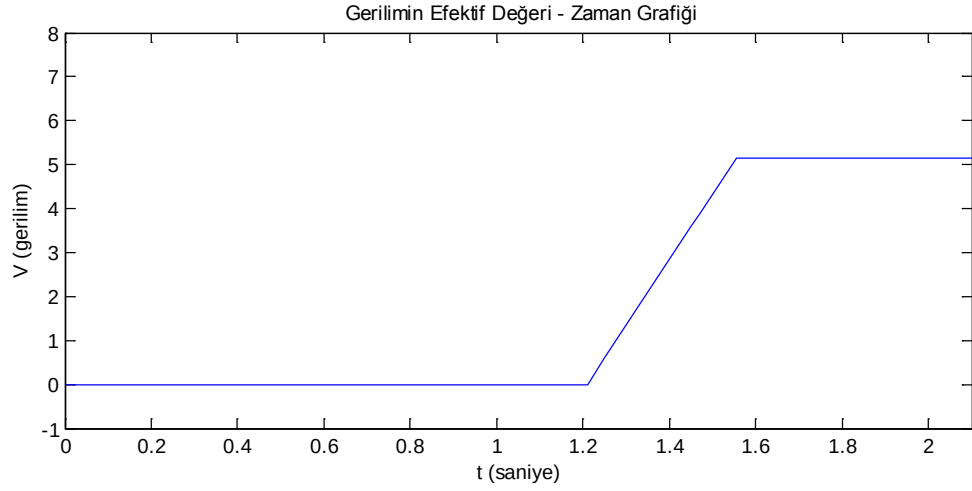
Şekil 6.71. Motor ve 550 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



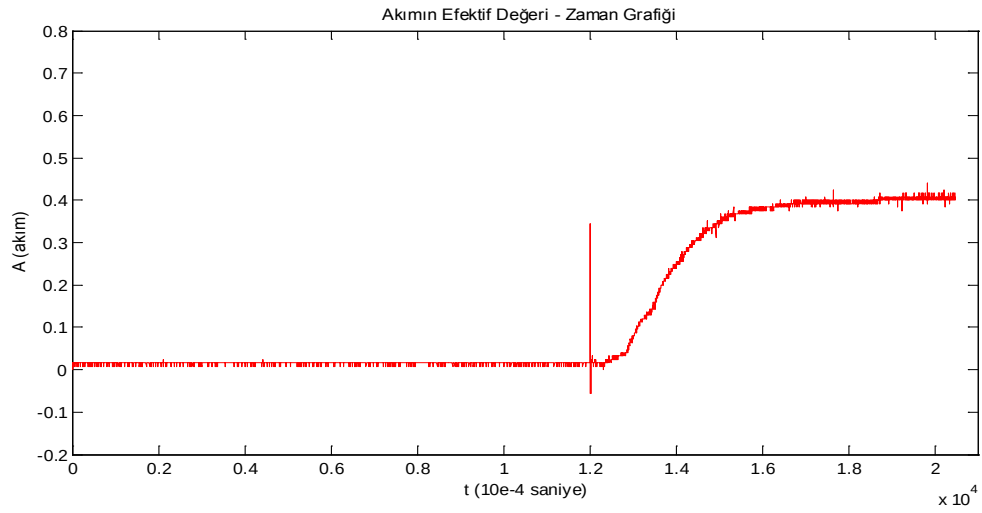
Şekil 6.72. Motor ve 550 Ω 'luk yük için akımın zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



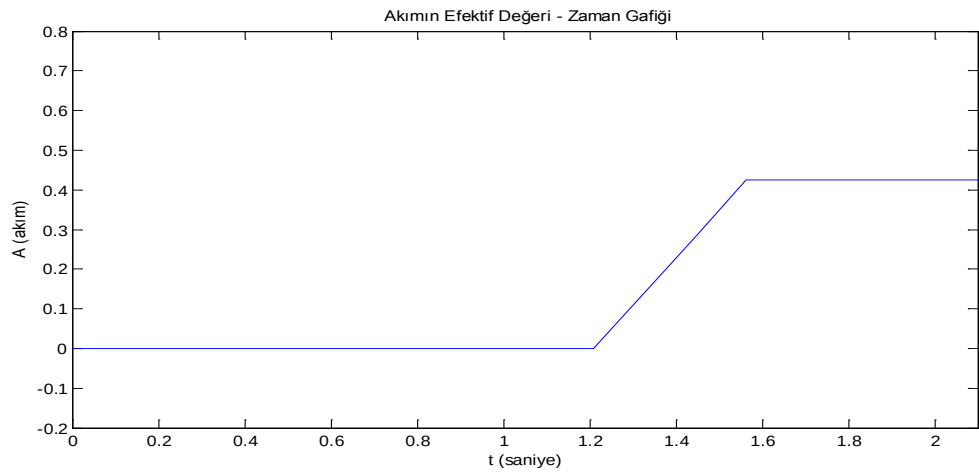
Şekil 6.73. 0 Ω 'dan 550 Ω 'a artan yük için gerilimin efektif değerinin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



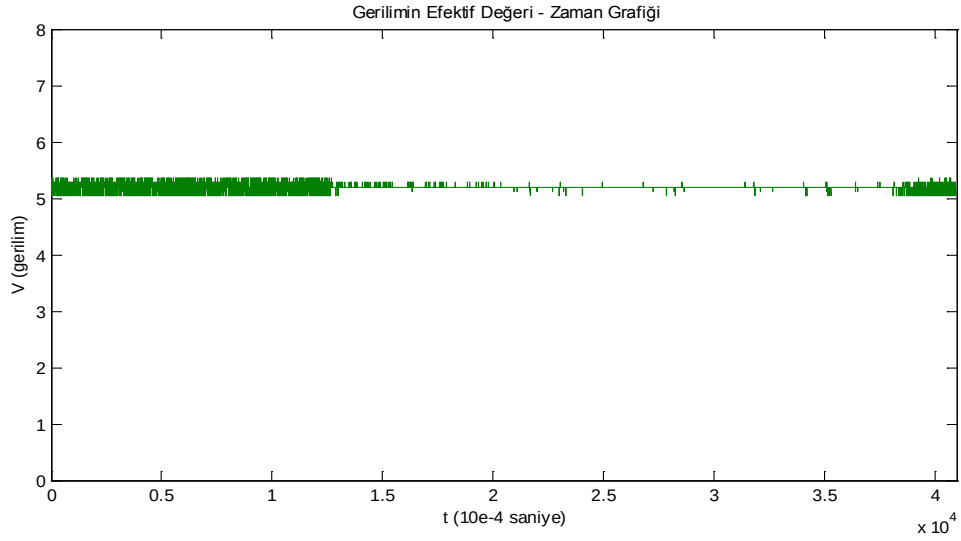
Şekil 6.74. 0Ω 'dan 550Ω 'a artan yük için gerilimin efektif değerinin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



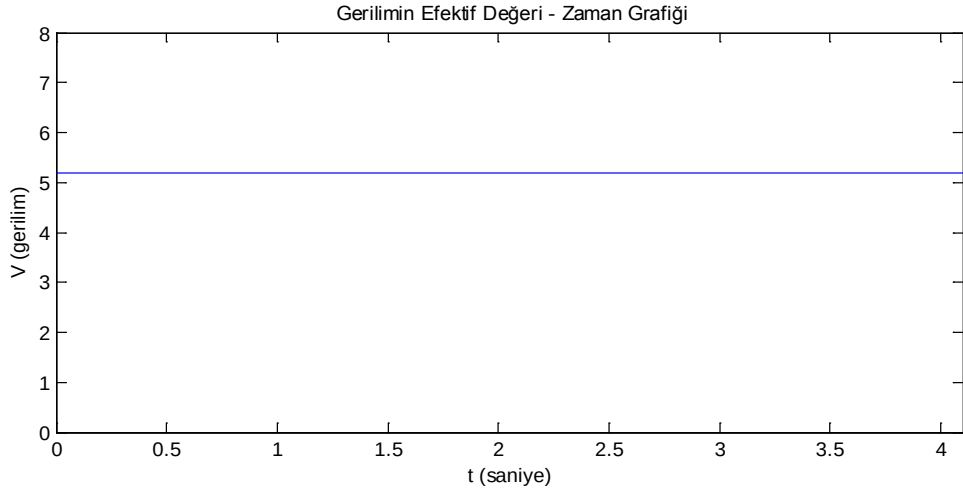
Şekil 6.75. 0Ω 'dan 550Ω 'a artan yük için akımın efektif değerinin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



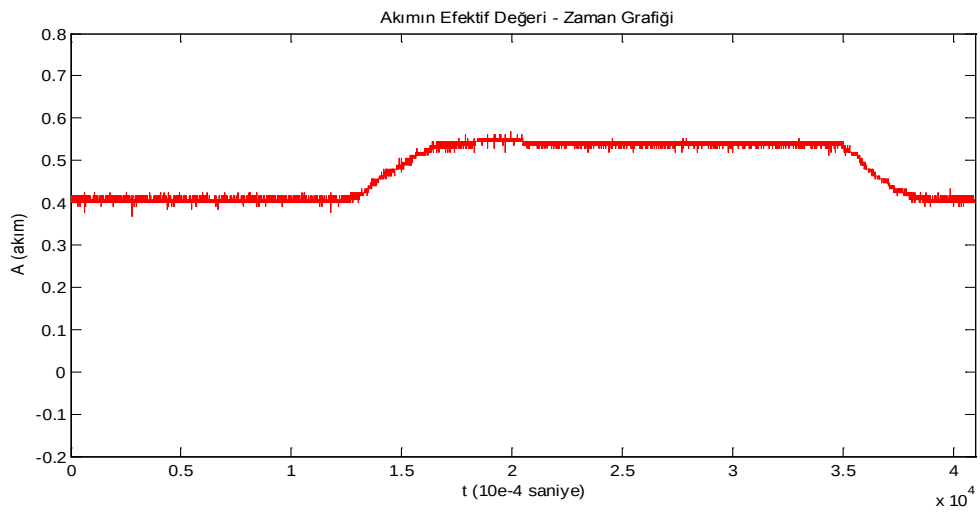
Şekil 6.76. 0Ω 'dan 550Ω 'a artan yük için akımın efektif değerinin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



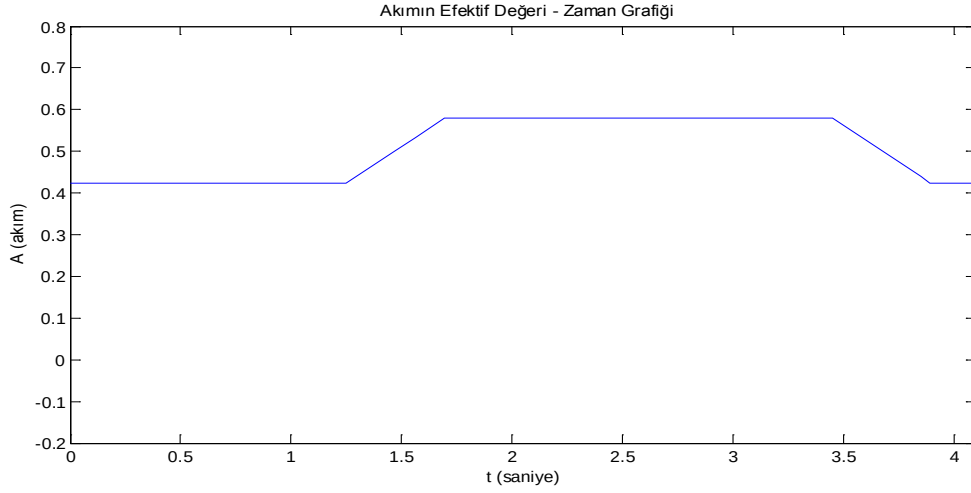
Şekil 6.77. 550 Ω 'dan 400 Ω 'a azalıp tekrar 550 Ω 'a artan yük için gerilimin efektif değerinin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



Şekil 6.78. 550 Ω 'dan 400 Ω 'a azalıp tekrar 550 Ω 'a artan yük için gerilimin efektif değerinin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)



Şekil 6.79. 550 Ω 'dan 400 Ω 'a azalıp tekrar 550 Ω 'a artan yük için akımın efektif değerinin zaman ile değişimi (Osiloskop görüntüsü)



Şekil 6.80. 550 Ω 'dan 400 Ω 'a azalıp tekrar 550 Ω 'a artan yük için akımın efektif değerinin zaman ile değişimi (Benzetim sonucu)

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasının deneysel çalışmasında inverter çıkış gerilim değerinin 232,5 V olduğu Şekil 6.57.'de görülmektedir. Gerilim bilgisinin efektif değerini ölçmede kullanılan analog sinyal dönüştürücüsünün switchleri alternatif gerilimde 450 V için doğru gerilimde 10 V olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu durumda; inverter çıkış geriliminin alternatif gerilimde 232,5 V olduğundan doğru gerilimde $5,18 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$ olduğu deneysel çalışmalardan görülmüştür.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasının inverter çıkışına 400 Ω 'luk omik yük değeri uygulandığında, inverter geriliminin 1,5 p.u. olduğu Şekil 6.57.'de akım değerinin 0,579 p.u. olduğu Şekil 6.59.'da görülmektedir. Bu değerlerin benzetim çalışması sonuçları ise Şekil 6.58. ve Şekil 6.60.'da görülmektedir. Aynı şekilde inverter çıkışına 550 Ω 'luk omik yük değeri uygulandığında, inverter geriliminin 1,5 p.u. değerinde sabit kaldığı Şekil 6.61.'de akım değerinin 0,424 p.u. olduğu Şekil 6.63.'de görülmektedir. Bu değerlerin benzetim çalışması sonuçları ise Şekil 6.62. ve Şekil 6.64.'de görülmektedir.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasının inverter çıkışına motor + 400 Ω 'luk omik yük değeri uygulandığında, inverter geriliminin 1,5 p.u. olduğu Şekil 6.65.'de akım değerinin 0,124 p.u. olduğu Şekil 6.67.'de görülmektedir. Bu değerlerin benzetim çalışması sonuçları ise Şekil 6.66. ve Şekil 6.68.'de görülmektedir. Aynı şekilde inverter çıkışına motor + 550 Ω 'luk omik yük değeri uygulandığında, inverter geriliminin 1,5 p.u. değerinde sabit kaldığı Şekil 6.69.'da akım değerinin 0,111 p.u. olduğu Şekil 6.71.'de görülmektedir. Bu değerlerin benzetim çalışması sonuçları ise Şekil 6.70. ve Şekil 6.72.'de görülmektedir.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasının inverter çıkışına uygulanan omik yük değerinin yüksüz durumdan 550 Ω değerine arttığı durumda, yük uçlarındaki gerilimin efektif değeri 0 V'dan 5,17 V arttığı durum Şekil 6.73.'de, akım değerinin ise 0 A'den 0,424 A'e arttığı ve yükün devreye girdiği anda yükün çekmiş olduğu akım değerinin salınım yaparak 0,424 A'de sabit kaldığı Şekil 6.75.'de görülmektedir. Bu değerlerin benzetim çalışması sonuçları ise Şekil 6.74. ve Şekil 6.76.'da görülmektedir.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali uygulamasının inverter çıkışına uygulanan omik yük değerinin 550 Ω 'dan 400 Ω 'a azaldığı ve tekrar 550 Ω değerine arttığı durumda, yük uçlarındaki gerilimin efektif değerinin 5,17 V durum Şekil 6.77.'de, akım değerinin ise 0,424 A'den 0,579 A'a arttığı ve tekrar 0,424 A'e azaldığı durum Şekil 6.79.'da görülmektedir. Bu değerlerin benzetim çalışması sonuçları ise Şekil 6.78. ve Şekil 6.80.'de görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Gerçekleştirilmiş olan bu tez çalışmasında, küçük güçlü rüzgar santralinin modeli oluşturulmuştur. Tasarım, beş kanatlı, yatay eksenli, sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini olarak gerçekleştirilmiştir. Çıkışta doğrultucu devresi sonra ise regülatör devresi, akü ve inverter birimleri ile sistemin çalışacağı hava kanalı, aksiyel fan ve sürücü devrelerinden oluşmaktadır.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar santrali çalışmasındaki amaç; sistemin prototipi yapılarak, deneysel veriler elde etmek ve bu verileri Matlab benzetim sonuçları ile karşılaştırmaktır. Çalışmaya ilk olarak rüzgar türbini ve rüzgar türbinin çalışacağı hava kanalı parametreleri belirlenerek başlanılmış ve bu parametrelere bağlı olarak da diğer devre elemanlarının parametreleri belirlenmiştir.

Rüzgar enerjisinin, diğer enerji kaynaklarına göre avantaj ve dezavantaj yönleri incelenmiş ve bunun sonucu olarak rüzgar enerjisinin kullanım gerekçeleri sıralanmıştır. Rüzgar enerjisinin, önce kinetik enerjiye sonra da elektrik enerjisine dönüşüm aşamaları incelenmiştir. Bu süreçte senkron generatörlerin önemli üstünlüklerinin oldukları ve rotor sargılarının sürekli mıknatıslar ile yer değiştirmesi sonucu bu üstünlük derecesinin arttığı vurgulanmıştır. Ayrıca düşük rüzgar hızlarında çıkış gerilimi üretmesi, fırça ve kollektörlerden kaynaklanan kayıpların ve uyarma akımına ihtiyaç olmaması, hava aralığı indüksiyonunun sargılı generatörlere göre ve verimlerinin aynı güçteki senkron generatörden daha yüksek olması gibi üstünlükleri sıralanmıştır. Bunun sonucu olarak, sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini tercih edilmiştir.

Rüzgar enerjisini meydana getiren aksiyel fanın, sürücüsü tarafından farklı hız kademelerinde çalıştırıldığında, rüzgar türbinin montajının yapılacağı hava kanalı tarafında elde edilen ölçümler sonucunda; artan aksiyel fan hız kademelerinde ortalama rüzgar hız değerlerinin de arttığı görülmüştür. Elde edilen rüzgar hız değerlerinin ölçümlerinde, dikey yönde üst noktadan ölçülen ilk değerlerin, alt noktadan ölçülen son değerlerden büyük olduğu ve aynı şekilde yatay yönde sol noktadan ölçülen ilk değerlerin, sağ noktadan ölçülen son değerlerden büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca hem dikey hem de yatay yönde yapılan ölçümlerde hava kanalının kenar yüzeylerinden merkez noktaya ilerledikçe ölçülen rüzgar hız değerinin önce artış gösterip sonra azalarak sıfır değerine yaklaştığı ve bu durumda farklı hızlarda aynı şekilde değiştiği görülmüştür.

Rüzgar enerjisini oluşturan aksiyel fanın düşük hızlarında bile sürekli mıknatıslı senkron generatörün gerilim ürettiği görülmüştür. Artan rüzgar hızlarında generatör çıkış geriliminin ve frekansının arttığı hem deneysel çalışmalardan hem de benzetim çalışmasından görülmüştür. Çıkış geriliminin doğrultucu devresine uygulanması sonucu tam dalga doğrultma işleminin gerçekleştiği ve gerilim regülatörü tarafından da gerilimin akü şarj değerine ayarlandığı görülmüştür.

Rüzgar santrali benzetim çalışmasında; başta üretilen elektriksel güç olmak üzere diğer parametrelerin de giriş olarak uygulanan farklı rüzgar hız değerlerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu değişimlere karşı inverter çıkış geriliminin, iki ve üç seviyeli çıkış dalga şekillerinin, giriş olarak uygulanan farklı rüzgar hız değerlerinden bağımsız olarak değişmediği görülmektedir. Harmonik analizinde ise 3. ve 5. Harmonik değerleri incelenmiş ve 3. Harmonik değerinin daha baskın olduğu görülmüştür. Ayrıca rüzgar hız değerinin basamak fonksiyonu şeklinde değiştiği benzetim çalışmasında, rüzgar hızının arttığı zaman değerlerinde, generatör hızının, çıkış geriliminin ve frekans değerlerinin salınım yaptıkları görülmektedir.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün elektriksel gücünün; rüzgar hızının küpüyle orantılı olarak değiştiği vurgulanmıştır. Yalnız bu durumun tüm rüzgar hız değerlerinde geçerli olmadığı, artan rüzgar hızına bağlı olarak uç hız oranının arttığı, bununda performans katsayısını azalttığı, sonuç olarak ise üretilen elektriksel gücün performans katsayısına bağlı olarak değiştiği denklemlerden yorumlanmıştır.

Deneysel çalışmaların sonucunda, inverter çıkış geriliminin farklı yüklerde değişmediği fakat akım değerinin artan yüklerde azaldığı; bu durumun aynı zamanda benzetim çalışması sonuçlarında da görülmüştür. İnverter çıkış gerilimin efektif değerinin ise farklı yüklerde değişmediği fakat akımın efektif değerinin artan yüklerde azaldığı, azalan yüklerde ise arttığı hem deneysel hem de benzetim çalışmalarından görülmüştür. Fakat benzetim çalışmasında yük değişim zaman aralıklarındaki değerlerin deneysel çalışma değerlerinden farklı olduğu ve bu durumunda benzetim çalışmasındaki hata payından kaynaklandığı şekillerden görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Tekin, K., 2006, “Rüzgar Santrali İçeren Elektrik Sistemlerinde Etkilenmeler ve Kısa Devre İncelenmesi”, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [2] Toklu, M., 2002, “Rüzgar Enerjisi ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı”, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [3] Ergür, Ö., 2006, “Rüzgar Türbinleri İle Elektrik Üretimi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [4] Ackerman, T., 2009, “Güç Sistemlerinde Rüzgar”, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Emo Yayın No: GY/2009/4.
- [5] Emniyetli, G., 2007, “Evsel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı”, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [6] Uğuz, S., 2005, “Rüzgar Enerjisi İle Elektrik Üretimi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [7] Güneş, İ., 2006, “Bir Rüzgar Türbinin Modellenmesi, Simulasyonu ve Kontrolü” Gebze İleri teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [8] Dursun, E. ve Binark, K., 2008, “Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler” VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu UTES’08, 17-19 Aralık, İstanbul.
- [9] Altaş, İ., H. ve Mergi, Ö., O., 2008, “Rüzgar Sistemlerinde Harmoniklerin Azaltılması” VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu UTES’08, 17-19 Aralık, İstanbul.
- [10] Deniz, E. ve Çetin, N., S., 2009, “Rüzgar Enerjisi Değişkenliğinin Güç Sistemlerine Etkileri” Ege Bölgesi Enerji Forumu 12-13 Ekim, Denizli.
- [11] Tofticht, T., Agbossou, K., Chêriti, A. and Doumbia, M., L., 2006, “Output Power Maximization of a Permanent Magnet Synchronous Generator Based Stand-Alone Wind Turbine”, IEEE ISIE’06, 9-12 July, Montréal Québec, Canada.
- [12] İşçan, S. ve Demirbaş, Ş., 2001, “Rüzgar Türbin Laboratuvarı: Daimi Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgar Türbini Modellenmesi ve Simulasyonu” 6th International Advanced Technologies symposium (IATS’11) 16-18 May. Elazığ.
- [13] Çamur, S., Arifoğlu, B., Bilgin, Z. ve Duru, T., 2001, “Değişken Hız Sabit Frekans Yöntemi İle Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi Uygulaması”, Elektrik Mühendisleri 9. Ulusal Kongresi, Eylül, sf. 166-170.
- [14] Çetin, S., N., 2001, “Küçük Güçlü Bir Rüzgar Türbini Tasarımı ve Elektrik Enerjisi Eldesi”, VI. Türk-Alman Enerji Sempozyumu, İzmir, sf. 83-93.

- [15] Morques, J., Pinheiro, H., Gründling, A., Pinheiro, J., R., and Hey, H., L., 2003, “A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System”, CE 70 Congress Brasileira de Eletrônica de Potência – COBEP’03, Fortaleza, Brazil, 1, sf. 732-738.
- [16] Svechkorenko, D., 2005, “Simulations and Control of Direct Driven Permanent Magnet Synchronous Generator” Royal Institute of Technology Department Power Electronics.
- [17] Dehkardi, A., B., Gole, A., M. And Mogire, T., L., 2005, “Permanent Magnet Synchronous Machine Model for Real-Time Simulation”, Presented at the International Conference on Power Systems Transients in Montreal, Canada on 19-23 June, no: 1, IPST 05-159.
- [18] Li, H. and Chen, Z., 2009, “ Design Optimization and Site Matching of Direct-Drive Permanent Magnet Wind Power Generator Systems”, Renewable Energy 34 sf. 1175-1184.
- [19] Bhim, S., Sheeja, V., Uma, R. ve Jayoprakash, P., 2009, “Voltage-Frequency Controller for Stand Alone Wecs Employing Permanent Magnet Synchronous Generator”, Third International Conference on Power Systems, Kharagpur, India, 27-29 December.
- [20] Alejandro, R., Álvarez, L., Vázquez, G. and Gustavo, A., 2009, “ Modeling of a Variable Speed Wind Turbine With a Permanent Magnet Synchronous Generator”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE’09) Seoul Olympic Parktel Seoul, 5-8 July, Korea.
- [21] Almalı, M., N. ve Ete, T., 2009, “Ortalama Rüzgar Hızı ve Güç Yoğunluğunun Hesaplanması”, V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Diyarbakır.
- [22] Özgür, S. ve Mutlu, E., “Elektrik Güç Sistemine Bağlı Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin Bütünleşik Modellenmesi”, V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Diyarbakır.
- [23] Yıldırım, E. ve Aydemir, M., T., 2009, “Küçük Güçlü Bir Jeneratöründe Kullanım İçin Eksenel Akıllı Bir Sürekli Mıknatıslı Motorun Analizi, Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt 24 No:3, sf. 525-531.
- [24] Haque, E., Negnevitsky, M. ve Muttaqi, K., M., 2010, “A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine With a Permanent Magnet Synchronous Generator”, IEEE Transactions on Industry Applications Vol 46 No:1 January.
- [25] Toprak, A. ve Akkaya, R., 2011, “Düşük Güçlü Bir Rüzgar Enerjisi Sistemi İçin İnverter Uygulaması”, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu 5-7 Ekim Elazığ.

- [26] Kurt, G., 2011 “Dişli Kutulu ve Dişli Kutusuz Rüzgar Türbin Generatörler Sistemlerinin Karşılaştırılması”, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu 5-7 Ekim Elazığ.
- [27] Koç, E. ve Güven, A., N., 2011, “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi”, EMO Bilimsel Dergi Cilt:1 Sayı:1 sf. 51-55.
- [28] Engin, Ş., N., 2011, “TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enstitüsü Rüzgar Enerjisi Çalışma Alanları ve MİLRRES Projesi”, İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi, 23-24 Aralık.
- [29] Apaydın, M., Üstün, A., K., Kırban, M. ve Filik, Ü., 2009, “Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Jeneratörlerin Karşılaştırmalı Analizi”, V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Diyarbakır.
- [30] Huany, H., Mao, C., Lu, J. ve Wang, D., 2010, “Small-Signal Modelling and Analysis of Wind Turbine With Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Connected to Power Grid”, Published in IET Renewable Power Generation Received on 23rd November.
- [31] Aner, M. ve Nowicki, E., 2011, “Two-Level Backward Operation of a VSMC for PMSG Grid-Connected Variable Speed Wind Turbine Systems”, IEEE International Electric Machines ve Drives Conference (IEMDC).
- [32] Kütük, O., 2011, “Rüzgar Türbinleri İçin Doğrudan Sürüşlü Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı” , İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [33] Kim, H., Kim, A., Kim, S., Park, Ö., Yu, K., Seong, C. ve Wan, Y., 2011, “A Novel HTS SMES Application in Combination With a Permanent Magnet Synhronous Generator”, Type Wind Power Generation Systems Physicac 471- sf. 1413-1418.
- [34] Changliang, X., Qiary, G., Xin, G. and Zhanfeny, S., 2012, “İnput-Output Feedback Linearization and Speed Control of a Surface Permanent Magnet Synhronous Wind Generator With the Boos-Chopper Converter”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol:59, No:9.
- [35] Carranza, O., Figueres, E., Garcerâ and Gonzalez M., R., 2013, “Analysis of the Control Structure of Wind Energy Generation Systems Based on a Permanent Magnet Synhronous Generator”, Applied Energy 103 sf. 522-538.
- [36] Gürkaynak, Y., 2006. Modeling and Control Of Variable-Speed Direct-Drive Wind Power Plant, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] Hussein, M., Orabi, M., Amed, M. and Sayed, M., 2010. Simple Sensorless Control Technique Of Magnet Synchronous Generatör Wind Turbine. IEEE International Conference On Power And Energy (PECon 2010) Nov 29 Dec 1, Malaysia.

- [38] Singh, B., Sheeja, V. and Jayaprakash, P., 2009 Voltage-Frequency Controller For Stand Alone WECS Employing Magnet Synchronous Generator, 2009 Third International Conference On Power Systems, Kharagpur, INDIA, 27-29 Dec.
- [39] Selvaganesan, N. and Romya, S., 2009. A Simple Fuzzy Modelling Of Permanent Magnet Synchronous Generator. Faculty Of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia Vol.11, No.1 P.38-43.
- [40] Li, S., Timothy, A. and Xu, L., 2010. Conventional And Novel Control Designs For Direct Driven Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbines. Electric Power Systems Research 80, 328-338.
- [41] Kim, H., Kim, S. and Ko, H., 2010. Modelling And Control Of Permanent Magnet Synchronous Generator Based Variable-Speed Wind Turbine. Electric Power Systems Research 80 P.46-52
- [42] Bilgin, B., 2008. Voltage Regulation Of a Variable-Speed Magnet Synchronous Alternator For Vehicular Electric Systems. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul.
- [43] Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G. and Azevedo, G., 2009. Modeling Of a Variable Speed Wind Turbine With a Permanent Magnet Synchronous Generator. IEEE International Symposium On Industrial Electronics (ISIE 2009) Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea, 5-8 July.
- [44] Fernandez, M., Garcia, A. and Jurado, F., 2010. Operating Capability as a PQ/PV Node Of a Direct-Drive Wind Turbine Based On a Permanent Magnet Synchronous Generator Renewable Energy 35, P.1308-1318.
- [45] Kim, H., Kim A., Kim, S., Park Ö., Yu, K., Seong, C. and Won, Y., 2011. A Novel HTS SMES Application In Combination With a Permanent Magnet Synchronous Generator Type Wind Power Generation System Physica 471 P.1413-1418.
- [46] <https://www.enerji.gov.tr/>
- [47] <http://www.ritm.gov.tr/>
- [48] <http://www.yegm.gov.tr/>
- [49] <http://tr.wikipedia.org/>

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Elazığ’ da doğdum. İlk, orta ve lise eğitimimi Elazığ’ da tamamladım. 2005 yılında eğitime başladığım Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden 2010 yılında mezun oldum. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makinaları Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladım. 2013 yılında Bitlis Eren Üniversitesi Adilcevaz Meslek Yüksekokulun’ da Öğretim Görevlisi olarak göreve başladım. Halen aynı yerde çalışmaya devam etmekteyim.

Soner ÇELİKDEMİR