



**DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN
REZONANS GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ
MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ
GELİŞTİRİLMESİ**

**2025
DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Tufan Volkan KÜÇÜK

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Selim ÖNCÜ**

**DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN REZONANS GÜÇ
DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ
GELİŞTİRİLMESİ**

Tufan Volkan KÜÇÜK

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Selim ÖNCÜ**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2025**

Tufan Volkan KÜÇÜK tarafından hazırlanan “DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN REZONANS GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Selim ÖNCÜ

.....

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 25/06/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Selim ÖNCÜ (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. İlker TÜRKER (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Emrah DOKUR (BŞEÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ersagun Kürşat YAYLACI (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Akif KARAFİL (YÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Tufan Volkan KÜÇÜK

ÖZET

Doktora Tezi

DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN REZONANS GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ GELİŞTİRİLMESİ

Tufan Volkan KÜÇÜK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Selim ÖNCÜ

Haziran 2025, 100 sayfa

Bu çalışma, küçük güçlü rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri (REDS) için yüksek verimli, güvenilir ve yüksek güç yoğunluğuna sahip bir güç dönüştürücüsünün tasarımını ve uygulanmasını amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, sistemin farklı rüzgâr hızlarında maksimum güç noktası takibini (MGNT) etkin bir şekilde gerçekleştirmesi hedeflenmiştir.

Rüzgâr türbininin aerodinamik modelini yansıtmak amacıyla, 2,3 kW anma güç değerine sahip üç fazlı sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM), senkron motor sürücüsü ve mikrodenetleyici kullanılarak bir rüzgâr türbini emülatörü geliştirilmiştir. Aynı özelliklere sahip ikinci bir motor, emülatör sistemine dışlı kutusu olmaksızın doğrudan bağlanarak generatör olarak kullanılmıştır. Enerji aktarımı için üç fazlı kontrolsüz doğrultucu ve seri rezonans DA-DA (SRDA) dönüştürücü kullanılmış olup,

SRDA'nın güç denetimi 16'lık düzensiz darbe yoğunluk modülasyonu (DYM) yöntemi ile sağlanmıştır. DYM yönteminin uygulanması sayesinde, sistemin tüm rüzgâr hız aralığında rezonans frekansı yakınlarında çalışması sağlanarak düşük yük bölgelerinde bile yumuşak anahtarlama koşulları korunmuştur.

Sistem, yüksek performanslı STM32F767 serisi ARM Cortex-M7 tabanlı mikrodenetleyici ile kontrol edilmiştir. Tasarlanan SRDA'nın rezonans frekansı 150 kHz olarak belirlenmiş ve anahtarlama frekansının rezonans frekansına yakın seçilmesi ile pasif devre elemanlarının boyutu küçültülmüştür. Böylece güç yoğunluğu artırılmış ve anahtarlama kayıpları minimize edilerek verim arttırılmıştır.

Sistemde MGNT, değiştir ve gözle (D&G) algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Algoritmanın giriş verileri, mekanik sensör kullanılmadan çift ikinci dereceden genelleştirilmiş integratör-frekans kilitlemeli döngü (ÇİDGİ-FKD) algoritması ve aktif reaktif güç teorisi (PQ Teori) kullanılarak generatör üç faz çıkış büyüklüklerinden elde edilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümler neticesinde, sistemin 5–10 m/s rüzgâr hız aralığında etkin bir şekilde MGNT sağladığı (MGNT veriminin %94 ve üzeri olduğu), tüm yük aralığında yumuşak anahtarlama koşullarının sürdürüldüğü ve anahtarlama kayıplarının etkin biçimde azaltıldığı tespit edilmiştir.

Bu çalışma ile elde edilen bulgular, küçük güçlü rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmaya yönelik önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca, geliştirilen güç dönüştürücü ve kontrol algoritmalarının farklı ölçeklerdeki rüzgâr türbinlerine uygulanabilirliği değerlendirildiğinde, ticari ve akademik alanda yeni çalışmalara olanak sağlayacağı öngörülmektedir.

Anahtar Sözcükler : Rüzgâr enerjisi, yumuşak anahtarlama, Darbe yoğunluk modülasyonu, Sensörsüz kontrol, Çift ikinci dereceden genelleştirilmiş integratör – frekans kilitli döngü (ÇİDGİ-FKD), Maksimum güç noktası takibi.

Bilim Kodu : 90522

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

DEVELOPMENT OF A RESONANT POWER CONVERTER-BASED MAXIMUM POWER POINT TRACKER FOR VARIABLE-SPEED WIND TURBINES

Tufan Volkan KÜÇÜK

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Electrical and Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Selim ÖNCÜ

June 2025, 100 pages

This study aims to design and implement a high-efficiency, reliable, and high-power-density power converter for small-scale wind energy conversion systems (WECS). The primary objective is to ensure that the system effectively performs maximum power point tracking (MPPT) at different wind speeds.

To represent the aerodynamic model of a wind turbine, a wind turbine emulator was developed using a three-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM) with a power rating of 2.3 kW, a synchronous motor driver, and a microcontroller. A second motor with the same characteristics was directly connected to the emulator system without a gearbox and used as a generator. Energy transfer was achieved using a three-phase uncontrolled rectifier and a series resonant DC-DC (SRDC) converter, with power control implemented through a 16-level irregular pulse density modulation

(PDM) method. The application of the PDM method allowed the system to operate near the resonant frequency across the entire wind speed range, ensuring soft switching conditions even at low load levels.

The system is controlled using a high-performance STM32F767 series ARM Cortex-M7-based microcontroller. The designed SRDC's resonant frequency is set at 150 kHz, and by selecting the switching frequency close to the resonant frequency, the size of passive circuit components has been reduced. Consequently, power density has been increased, and switching losses have been minimized, leading to improved efficiency.

MPPT was implemented using the perturb and observe (P&O) algorithm. Input data for the P&O algorithm, including power and speed variations, were obtained from the three-phase generator output without the need for mechanical sensors. Instead, a dual second-order generalized integrator-frequency lock loop (DSOGI-FLL) algorithm and active-reactive power theory (PQ Theory) were used to extract these values. As a result of the measurements conducted, it has been determined that the system successfully performed Maximum Power Point Tracking (MPPT) within the wind speed range of 5–10 m/s (with MPPT efficiency reaching 94% and above), maintained soft-switching conditions across the entire load range, and effectively minimized switching losses.

The findings of this study contribute to enhancing the efficiency and reliability of small-scale wind energy conversion systems. Furthermore, the developed power converter and control algorithms can be applied to different scales of wind turbines, potentially facilitating further advancements in both commercial and academic research.

Key Word : Wind energy, soft switching, Pulse density modulation, sensorless control, Dual second order generalized integrator – frequency locked loop (DSOGI-FLL), Maximum power point tracking.

Science Code : 90522

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında emeği geçen ve desteklerini esirgemeyen herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle, tez sürecimde akademik bilgi birikimiyle her daim yol gösterici olan, yalnızca akademik destek sağlamakla kalmayıp bir akademisyenin nasıl olması gerektiğini duruşu ve davranışlarıyla bana öğreten değerli danışman hocam Prof. Dr. Selim ÖNCÜ'ye en derin saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Bu zorlu süreci kendisinin rehberliğiyle başarıyla tamamlamış olmaktan büyük bir mutluluk duymaktayım. Mesleğime olan tutkumun yeniden filizlenmesine katkıda bulunduğu için kendisine minnettarım.

Tezin uygulama aşamasında teknik destekleri ve dostane yaklaşımıyla her zaman yanımda olan Özhan ATMACA'ya teşekkür ederim. Aynı şekilde, laboratuvar çalışmalarında büyük bir özveriyle yanımda bulunan Batuhan ÇAKAN'a destekleri için teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın her anında yanımda olan, bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren kadim dostum ve meslektaşım Doç. Dr. Harun ÖZBAY'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde laboratuvar imkânlarını kullanmamıza olanak tanıyan ve teknik destekleriyle sürece büyük katkı sağlayan ELKON Elektrik San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmamın yürütülmesi ve yönlendirilmesi sürecinde bilgi ve tecrübeleriyle katkı sağlayan, değerli zamanlarını ayırarak değerlendirme ve geri bildirimleriyle çalışmama yön veren Prof. Dr. İlker TÜRKER ve Dr. Öğr. Üyesi Ersagun Kürşat YAYLACI hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, TÜBİTAK'ın 123E370 numaralı "Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri İçin Rezonans Güç Dönüştürücülü Maksimum Güç Noktası İzleyici Geliştirilmesi" konulu

projesi kapsamında desteklenmiştir. Sağladıkları katkı ve destek için TÜBİTAK kurumuna teşekkür ederim.

Son olarak, bu süreçte kendilerine yeterince vakit ayıramadığım halde bana sabır ve anlayış gösteren, her zaman yanımda olan eşim Tuğba KÜÇÜK ve kızlarım Tuğçe Miray KÜÇÜK ile Duru Hilal KÜÇÜK'e sonsuz sevgimle teşekkür ederim. Varlıklarıyla bana güç verdikleri için minnettarım.

Bu çalışma, yalnızca bireysel bir çabanın değil, bana inanan, destekleyen ve katkı sunan tüm bu değerli insanların emeğiyle şekillenmiştir. Her birinize gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. LİTERATÜR ÖZETİ	3
1.1.1. REDS’lerde MGNT Çalışmaları.....	3
1.1.2. REDS’lerde Kullanılan Güç Dönüştürücü Yapılarıyla İlgili Çalışmalar ..	4
1.1.3. Rezonans Dönüştürücüler ve Denetim Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar ..	6
1.1.4. Güç Aktarımı İçin DYM Yöntemi Kullanan Çalışmalar.....	7
1.1.5. Türkiye’de Yapılan Çalışmalar.....	9
BÖLÜM 2	13
RÜZGÂR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ	13
2.1. RÜZGÂR TÜRBİNİ KONFIGÜRASYONLARI.....	13
2.1.1. Tip-1 Sabit Hızlı REDS	14
2.1.2. Tip-2 Kısmi Değişken Hızlı REDS	15
2.1.3. Tip-3 Kısmi Değişken Hızlı REDS	16
2.1.4. Tip-4 Değişken Hızlı REDS	16
2.2. RÜZGÂR TÜRBİNİ KARAKTERİSTİĞİ VE MGNT ALGORİTMALARI	18
2.2.1. Kanat Ucu Hız Oranı Yöntemi (KHO).....	21

Sayfa

2.2.2. Güç Sinyali Geri Besleme Yöntemi (GSGB)	22
2.2.3. Değiştir ve Gözle Yöntemi (D&G).....	23
 BÖLÜM 3	25
SERİ REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE GÜÇ DENETİMİ.....	25
3.1. SERİ REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ	26
3.2. SERİ REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE GÜÇ DENETİM YÖNTEMLERİ	30
3.2.1. Frekans Modülasyonu (FM)	31
3.2.2. Faz Kaydırma Modülasyonu (FKM)	31
3.2.3. Darbe Yoğunluk Modülasyonu (DYM).....	31
3.2.3.1. Düzenli DYM.....	32
3.2.3.2. Düzensiz DYM	36
 BÖLÜM 4	41
RÜZGÂR TÜRBİNİ EMÜLATÖRÜ VE SENSÖRSÜZ DENETİM.....	41
4.1. RÜZGÂR TÜRBİNİ EMÜLATÖRÜ	41
4.2. ÇİDĞİ-FKD.....	43
4.3. D&G MGNT ALGORİTMASI.....	46
 BÖLÜM 5	48
BENZETİM ÇALIŞMASI.....	48
5.1. ÖNERİLEN RÜZGÂR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ.....	49
 BÖLÜM 6	56
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	56
6.1. DENEY DÜZENİĞİ VE KULLANILAN EKİPMANLAR.....	56
6.2. RÜZGÂR TÜRBİNİ EMÜLATÖRÜ ÖLÇÜMLERİ	68
6.3. D&G MGNT YÖNTEMİNİN DENEYSEL PERFORMANS ANALİZİ	82
 BÖLÜM 7	93
SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	93

	<u>Sayfa</u>
7.1. SONUÇ	93
7.2. GELECEK ÇALIŞMALAR.....	94
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	100



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Temel REDS blok şeması.	13
Şekil 2.2. Tip-1 sabit hızlı REDS blok şeması.....	14
Şekil 2.3. Tip-2 kısmi değişken hızlı REDS blok şeması.	15
Şekil 2.4. Tip-3 kısmi değişken hızlı REDS blok şeması.	16
Şekil 2.5. Tip-4 değişken hızlı REDS blok şeması.	17
Şekil 2.6. Kanat ucu hız oranının sembolik gösterimi.	19
Şekil 2.7. Güç katsayısının kanat ucu hız oranına bağlı değişimi.....	20
Şekil 2.8. Rüzgâr türbininin açısal hızına bağlı güç eğrileri.	21
Şekil 2.9. KHO yöntemine ait blok şema.....	22
Şekil 2.10. GSGB yöntemine ait blok şema.....	22
Şekil 2.11. D&G yöntemine ait blok şema.	23
Şekil 3.1. Anahtarlama kayıplarının sembolik gösterimi.....	25
Şekil 3.2. (a) Tam köprü seri rezonans DA-DA dönüştürücü devre yapısı (b) eşdeğer devre modeli.	27
Şekil 3.3. Seri rezonans dönüştürücünün dalga şekilleri (a) $f_s < f_r$ (b) $f_s = f_r$ (c) $f_s > f_r$...	28
Şekil 3.4. Seri rezonans devrenin frekans cevabı.....	30
Şekil 3.5. Düzenli DYM için temel lojik devre yapısı.....	32
Şekil 3.6. Düzenli DYM kontrol darbeleri.....	33
Şekil 3.7. Düzenli DYM'nin lojik devresi.	34
Şekil 3.8. Düzenli DYM ile kontrol edilen tam köprü seri rezonans devresine ait dalga şekilleri (a) $D=1$, (b) $D=0,75$, (c) $D=0,5$, (d) $D=0,25$	35
Şekil 3.9. DYM yöntemine ait anahtarlama koşulları ile teorik gerilim ve akım eğrileri.....	36
Şekil 3.10. Düzensiz DYM kontrol darbeleri.....	37
Şekil 3.11. Düzensiz DYM lojik devresi.	38
Şekil 3.12. Düzensiz DYM ile kontrol edilen tam köprü seri rezonans devresine ait dalga şekilleri (a) $D=1$, (b) $D=0,75$, (c) $D=0,5$, (d) $D=0,25$	39
Şekil 4.1. Rüzgar türbini emülatörü denetim yapısına ait blok gösterim.....	42
Şekil 4.2. ÇİDGİ-FKD blok diyagramı.....	44
Şekil 4.3. ÇİDGİ-FKD ve güç hesaplama blok diyagramı.	46
Şekil 4.4. Önerilen D&G MGNT algoritması.....	47

Şekil 5.1. Benzetim devre modeli	50
Şekil 5.2. Değişken rüzgar hızları altında türbinin mekanik çıkış gücü, generatör elektriksel çıkış gücü ve D değerindeki değişimlere ait grafikler	52
Şekil 5.3. Generatör hızı ve generatör elektriksel gücün gerçek ve tahmini değerleri	52
Şekil 5.4. 16 darbeli düzensiz DYM lojik tablosu	53
Şekil 5.5. D değerine göre DYM anahtarlama sinyali ve rezonans akımının değişimi	54
Şekil 6.1. Deney düzeneğinin genel görünümü.	57
Şekil 6.2. Motor, motor sürücü, generatör ve kaplin.	57
Şekil 6.3. Elektromekanik tasarımın gerçekleştirilmesi.....	58
Şekil 6.4. Diyotlu doğrultucu PCB şeması ve devre kartı.....	59
Şekil 6.5. Seri rezonans DA-DA dönüştürücü güç ve sürme devreleri.....	61
Şekil 6.6. Rezonans bobin ve rezonans kondansatör grubu.	61
Şekil 6.7. U direnç ve soğutma ünitesi.....	62
Şekil 6.8. STM32F767ZI mikrodenetleyici uygulama kartı.	63
Şekil 6.9. Fiber optik alıcı verici devresi.	64
Şekil 6.10. Üç faz akım ve gerilim ölçüm devresi.	65
Şekil 6.11. Doğru gerilimler için besleme devresi.	66
Şekil 6.12. Deneysel çalışma düzeneği.	67
Şekil 6.13. Enkoder hız ölçümü ve tahmini hız ölçümü eğrileri.....	68
Şekil 6.14. 5m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.	69
Şekil 6.15. 5m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.	70
Şekil 6.16. 5m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi kısım-1.....	70
Şekil 6.17. 5m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi kısım-2.....	71
Şekil 6.18. 6m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.	71
Şekil 6.19. 6m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.	72
Şekil 6.20. 6m/s rüzgâr hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.	72
Şekil 6.21. 7m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.	73

Şekil 6.22. 7m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.	73
Şekil 6.23. 7m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.	74
Şekil 6.24. 8m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.	74
Şekil 6.25. 8m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.	75
Şekil 6.26. 8m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.	75
Şekil 6.27. 9m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.	76
Şekil 6.28. 9m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.	76
Şekil 6.29. 9m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.	77
Şekil 6.30. 10m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.	77
Şekil 6.31. 10m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.	78
Şekil 6.32. 10m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.	78
Şekil 6.33. 300d/dk hızda D değerine göre V_{ab} gerilimleri ve rezonans akımları.	79
Şekil 6.34. 1000d/dk hızda D değerine göre V_{ab} gerilimleri ve rezonans akımları. ..	80
Şekil 6.35. 300d/dk hızda D değerine göre V_{ab} gerilimleri ve rezonans akımlarının detay görünümü.	81
Şekil 6.36. 1000d/dk hızda D değerine göre V_{ab} gerilimleri ve rezonans akımlarının detay görünümü.	82
Şekil 6.37. Sistemin yerleşme zamanının belirlenmesi.....	83
Şekil 6.38. 5m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.....	84
Şekil 6.39. 6m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.....	85
Şekil 6.40. 7m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.....	86
Şekil 6.41. 8m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.....	87
Şekil 6.42. 9m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.....	88

Sayfa

Şekil 6.43. Farklı rüzgâr hızlarında (6m/s, 8m/s ve 5m/s) MGNT performansı.....	89
Şekil 6.44. Farklı rüzgâr hızlarında (7m/s, 9m/s, 6m/s ve 8m/s) MGNT performansı.	90
Şekil 6.45. SRDA dönüştürücü giriş gerilim, akım ve güç ölçümleri.....	91
Şekil 6.46. SRDA dönüştürücü çıkış gerilim, akım ve güç ölçümleri.	92



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. REDS’lerin Karşılaştırılması	18
Çizelge 5.1. Türbin, Generatör ve SRDA Parametreleri.....	49
Çizelge 6.1. IXFH52N50P Elektriksel Karakteristiği.....	60
Çizelge 6.2. MGNT Deneysel Ölçüm Sonuçları.....	91



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$P_{\text{rüzgâr}}$	: rüzgâr gücü (W)
$P_{\text{g_türbin}}$	: türbin giriş gücü (W)
ρ	: rüzgâr yoğunluğu (kg/m^3)
v_r	: rüzgâr hızı (m/s)
C_p	: türbin güç katsayısı
A	: türbin kanatlarının taradığı alan (m^2)
β	: kanat eğim açısı
λ	: kanat ucu hız oranı
ω_r	: rüzgâr türbin kanatlarının açısal hızı (rad/s)
v_d	: rüzgâr türbin kanatlarının doğrusal hızı (m/s)
r	: Türbin kanatlarının uzunluğu (m)
λ_{opt}	: kanat ucu hız oranı optimal değeri
ω_{r_opt}	: rüzgâr türbin kanatlarının açısal hızının optimal değeri (rad/s)
W_{iletim}	: MOSFET iletme geçiş enerji kaybı (J)
$W_{\text{yalıtım}}$	: MOSFET yalıtıma geçiş enerji kaybı (J)
$W_{\text{anahtarlama}}$	: MOSFET toplam anahtarlama enerji kaybı (J)
i_D	: MOSFET drain akımı (A)
V_{DS}	: MOSFET drain-source gerilimi (V)
$P_{\text{kayıp}}$	: MOSFET toplam anahtarlama güç kaybı (W)
C_r	: rezonans kondansatörü (F)
L_r	: rezonans bobini (H)
R_{ac}	: etkin direnç (Ω)
f_r	: rezonans frekansı (Hz)
f_a	: anahtarlama frekansı (Hz)
R_y	: yük direnci (Ω)
ω_a	: açısal anahtarlama frekansı (rad/s)

ω_r	: açısal rezonans frekansı (rad/s)
Q	: kalite faktörü
f_n	: normalize frekans (Hz)
D	: darbe yoğunluk oranı
t_{on}	: DYM aktif darbe süresi (s)
t_{off}	: DYM silinen darbe süresi (s)
T_{DYM}	: DYM periyodu (s)
P_o	: rezonans devresi çıkış gücü (W)
P_{max}	: rezonans devresi maksimum çıkış gücü (W)
i_r	: rezonans akımı (A)
V_{ab}	: evirici çıkış gerilimi (V)
V_g	: MOSFET kapı gerilimi (V)
T_{ref}	: referans moment (Nm)
ω_m	: mekanik açısal hız (rad/s)
ω'_m	: tahmini mekanik açısal hız (rad/s)
V_α	: üç faz gerilimin alfa bileşeni (V)
V_β	: üç faz gerilimin beta bileşeni (V)
V_{abc}	: üç faz gerilimler (V)
$T_{\alpha\beta}$	: Clarke dönüşümü
ω'	: faz kilitleme döngüsü tarafından hesaplanan anlık açısal hız (rad/s)
$e_{v,\alpha}$	: frekans hata sinyalinin alfa bileşeni (Hz)
$e_{v,\beta}$	: frekans hata sinyalinin beta bileşeni (Hz)
k	: kazanç değeri
Γ	: FKD kazancı
$ts_{(FKD)}$	: FKD'nin transfer fonksiyonu ve yerleşme süresi (s)
p	: toplam kutup sayısı
ΔD	: adım büyüklüğü
dP	: güç değişimi (W)
dS	: hız değişimi (rad/s)
C_{p_max}	: türbin güç katsayısının maksimum değeri

KISALTMALAR

AABD	: Arka Arkaya Bağlı Dönüştürücü
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
ÇİDGİ-FKD	: Çift İkinci Dereceden Genelleştirilmiş İntegratör-Frekans Kilitlemeli Döngü
D&G	: Değiştir ve Gözle
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
DYM	: Darbe Yoğunluk Modülasyon
EMG	: Elektromanyetik Girişim
FKD	: Faz Kilitlemeli Döngü
FKM	: Faz Kaydırma Modülasyonu
FRKD	: Frekans Kitleme Döngüsü
FV	: Fotovoltaik
GSGB	: Güç Sinyali Geri Besleme
İDGİ	: İkinci Dereceden Genelleştirilmiş İntegratör
KHO	: Kanat Ucu Hız Oranı
MGN	: Maksimum Güç Noktası
MGNT	: Maksimum Güç Noktası Takibi
OMK	: Optimal Moment Kontrolü
PNSB	: Pozitif-Negatif Sıralı Bileşenler
PQ	: Aktif-Reaktif
PSB	: Pozitif Sıralı Bileşenler
REDS	: Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi
RSAG	: Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
RSSG	: Rotoru Sargılı Senkron Generatör
SAA	: Sıfır Akımda Anahtarlama
SGA	: Sıfır Gerilimde Anahtarlama
SHRT	: Sabit Hızlı Rüzgâr Türbini
SKAG	: Sincap Kafesli Asenkron Generatör
SMSG	: Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör
SMSM	: Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
SRDA	: Seri Rezonans DA-DA Dönüştürücü

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Fosil yakıtların üretim maliyetlerindeki artış, sınırlı rezervlere sahip olmaları ve çevresel etkilerinin olumsuz olması, son yirmi yılda yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. Bu süreçte yaşanan teknolojik gelişmeler ve devlet teşvikleri, rüzgâr enerjisini yenilenebilir enerji piyasasında daha rekabetçi bir konuma taşımaktadır [1].

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, çalışma hızlarına göre sabit hızlı, kısmi değişken hızlı ve değişken hızlı olmak üzere üç farklı şekilde tasarlanmaktadır. Basit yapısı ve düşük kurulum maliyeti nedeniyle, sabit hızlı rüzgâr türbinleri (SHRT), REDS'nin gelişiminin ilk aşamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak, bu türbinler yalnızca belirli bir rüzgâr hızında maksimum güç sağlayabildiğinden verimlilikleri düşüktür ve şebekede frekans farklılaşmasına yol açabilmektedir [1,2]. Kısmi değişken hızlı rüzgâr türbinleri, generatör hızını belirli bir aralıkta kontrol ederek rüzgârdan elde edilen gücü artırmaktadır. Belirlenen tüm rüzgâr hız aralığında, maksimum güç noktasında (MGN) çalışamamalarına rağmen, düşük maliyetleri ve SHRT sistemlerine kıyasla daha yüksek verimleri nedeniyle günümüzde de tercih edilmektedirler. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri ise belirlenen tüm rüzgâr hızlarında MGN'de çalışabilme yetenekleri ve şebekeye yüksek uyumlulukları sayesinde en gelişmiş türbin teknolojisi olarak değerlendirilmektedir [1-3].

Küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde, generatörden elde edilen gücün kontrollü bir şekilde yüke aktarılması amacıyla darbe genişlik modülasyonu (DGM) anahtarlamalı DA-DA dönüştürücüler tercih edilmektedir. Bu dönüştürücüler, basit yapıları ve kontrol kolaylıkları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Ancak, DGM anahtarlamalı DA-DA dönüştürücüler sert anahtarlama koşullarında çalıştıkları için yüksek anahtarlama kayıplarına sahiptir. Ayrıca, anahtarlama işlemi sırasında meydana gelen

yüksek gerilim ve akım sıçramaları elektromanyetik girişime (EMG) sebep olmaktadır. Anahtarlama kayıplarının yüksek olması, çalışma frekansını sınırlandırmakta ve düşük frekansta çalışmak zorunda kalan devrelerde pasif devre elemanlarının boyutları artmaktadır. Pasif elemanların boyutlarındaki artış, sistemin güç yoğunluğunu ve verimini azaltırken, maliyetleri de yükseltmektedir. Bu tür dezavantajların giderilmesi için yumuşak anahtarlama teknikleri kullanılabilmektedir [5-7].

DGM anahtarlama DA-DA dönüştürücülerden farklı olarak, rezonans DA-DA dönüştürücüler yumuşak anahtarlama koşullarında çalışabilmektedir. Temel bir rezonans DA-DA dönüştürücü; yarım köprü veya tam köprü evirici, rezonans devresi ve doğrultucu devresinden oluşmaktadır. Rezonans devresi, enerji depolama özelliklerine sahip pasif elemanlar (kondansatör ve bobin) kullanılarak seri, paralel veya seri-paralel konfigürasyonlarda tasarlanabilmektedir. Devre yapısına bağlı olarak rezonans devresi, akım veya gerilimi sinüzoidal forma dönüştürerek sıfır geçiş koşullarını oluşturur. Bu sıfır geçiş anlarında evirici devresinin anahtarlama ile yumuşak anahtarlama gerçekleştirilir. Yumuşak anahtarlama, anahtarlama kayıplarını ve EMG seviyelerini azaltırken, dönüştürücünün daha yüksek frekanslarda çalışmasını sağlayarak, güç yoğunluğunu ve verimi artırmaktadır [6,7].

Rezonans dönüştürücülerde güç kontrolü için sıklıkla frekans modülasyonu (FM) ve faz kaydırma modülasyonu (FKM) kullanılmaktadır. Bu yöntemler, uygulama kolaylığı sağlamalarına rağmen, her güç seviyesinde (özellikle düşük yük durumunda) yumuşak anahtarlama koşullarını tam anlamıyla sağlayamamaktadır. Buna karşılık, DYM yöntemi, sistemin tüm güç değerlerinde rezonans frekansında çalışmasını ve yumuşak anahtarlama koşulunun tüm güç aralığında sağlanmasını mümkün kılmaktadır. DYM yönteminde güç kontrolü, anahtarlama darbelerinin silinmesi yoluyla gerçekleştirilmektedir. Anahtarlama darbelerinin silinmesi işlemi karmaşık lojik devreler, alanda programlanabilir kapı dizileri veya mikrodenetleyiciler içerisinde iyi tasarlanmış yazılımsal yöntemler ile gerçekleştirilebilir. DYM yönteminin en büyük dezavantajı uygulanmasının zorluğu olarak ifade edilmektedir [8,9].

1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu tez çalışması kapsamında sunulan literatür özetinde, değişken hızlı REDS’lerde kullanılan MGNT yöntemleri ve dönüştürücü yapıları ile rezonans dönüştürücüler ve denetim yöntemlerini içeren çalışmalar seçilerek başlıklar halinde sunulmuştur.

1.1.1. REDS’lerde MGNT Çalışmaları

Hossam ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada çok fazlı sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG) ve arka arkaya bağlı dönüştürücüden (AABD) oluşan değişken hızlı REDS’nin MGN’de çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan benzetim çalışmasında üç farklı D&G algoritması uygulanarak performansları karşılaştırılmıştır. Uygulanan D&G algoritmaları sırasıyla; geleneksel D&G, modifiye edilmiş D&G ve değişken adımlı D&G algoritmalarıdır. Yazarların sunduğu değişken adımlı D&G algoritması, türbin güç-hız eğrisini dört kısıma ayırarak her kısımda farklı adım değeri uygulanmasına dayanmaktadır. Sonuçlardan görüldüğü üzere önerilen D&G algoritması MGN’yi daha hızlı yakalamaktadır ve diğer yöntemlere göre daha yüksek verime sahiptir [10].

Mojtaba ve arkadaşları 2015 yılında, 35 kW gücünde REDS’nin benzetimini SMSG ve AABD dönüştürücü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada kanat ucu hız oranı (KHO), güç sinyali geri besleme (GSGB), optimal moment kontrol (OMK) ve D&G MGNT algoritmaları kullanılarak farklı rüzgâr hızları için performansları incelenmiştir. Yapılan çalışmadaki benzetim sonuçlarından görüldüğü üzere D&G algoritması en düşük verim ve en yüksek yerleşme süresine sahiptir. KHO ve GSGB algoritmalarının performansları birbirlerine oldukça yakındır. OMK algoritması ise en yüksek verime ve en düşük yerleşme süresine sahiptir [11].

Dali ve arkadaşları 2021 yılında değişken hızlı SMSG kullanan düşük güçlü bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin Matlab-Simulink ortamında benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan sistemde güç dönüştürücüleri olarak sırasıyla üç faz diyotlu doğrultucu, buck dönüştürücü ve tam köprü evirici yapısı kullanılmıştır. Buck dönüştürücü üzerinden MGNT işlemi, geliştirdikleri yeni bir algoritma ile

uygulanmaktadır. Tasarlanan MGNT algoritması, KHO yönteminin dinamik davranışını geliştirmek üzerine kurgulanmıştır. Yazarlar uyguladıkları teknik ile sistem verimini ve güvenilirliğini arttırdıklarını bildirmişlerdir [12].

1.1.2. REDS’lerde Kullanılan Güç Dönüştürücü Yapılarıyla İlgili Çalışmalar

Blaabjerg ve arkadaşları tarafından 2024 yılında gerçekleştirilen çalışma, rüzgâr enerjisi sistemlerinin modern güç sistemlerine entegrasyonunda güç elektroniği teknolojisinin kritik rolünü kapsamlı bir biçimde ele almaktadır. Çalışma, rüzgâr türbinlerinin geleneksel senkron generatörlerle pasif bir rol üstlenmesinden, güç elektroniği dönüştürücüleri aracılığıyla aktif şebeke düzenleyicisi konumuna evrildiğini vurgulamaktadır. Makale kapsamında, günümüzde yaygın olarak kullanılan Tip-3 ve Tip-4 temelli sistemlerin konfigürasyonları ile birlikte, iki seviyeli ve üç seviyeli konvertörlerin yanı sıra, yüksek güçlü uygulamalar için öne çıkan modüler çok seviyeli konvertör topolojileri detaylandırılmıştır. Ayrıca, geleneksel PI kontrol yöntemlerinin yanında Model Öngörücü Kontrol ve Kayma Modu Kontrolü gibi ileri düzey kontrol stratejilerinin önemi ele alınmıştır. Çalışma Avrupa’da yürütülen güncel araştırma projeleri (örneğin InterOPERA ve WinGrid) üzerinden mevcut araştırma eğilimlerini ortaya koyarken; yüzen rüzgâr türbinleri, daha büyük kapasiteli türbin tasarımları, yapay zekâ tabanlı kontrol sistemleri ve enerji depolama çözümleri gibi gelecekteki gelişim alanlarını özetlemektedir. Bu kapsamda, güç elektroniği teknolojilerindeki sürekli yeniliklerin, rüzgâr enerjisi sistemlerinin güvenilirlik, verimlilik ve şebeke uyumluluğu açısından daha üst seviyelere taşınmasında belirleyici olduğu vurgulanmaktadır [13].

Choubey ve arkadaşları tarafından 2025 yılında gerçekleştirilen bu çalışma, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılan güç elektroniği dönüştürücülerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Özellikle, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinden elde edilen mekanik enerjinin, şebekeye uygun elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan AC-DC-AC dönüştürücü topolojilerinin performansları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Makale, geleneksel iki seviyeli arka-arkaya bağlı gerilim kaynaklı konvertörlerin düşük verimlilik ve yüksek anahtarlama kaybı gibi sınırlamalarına dikkat çekmekte ve bu sınırlamaların üstesinden gelmek amacıyla çok seviyeli

konvertör topolojilerinin önemini vurgulamaktadır. Bu topolojiler daha düşük harmonik bozulma, yüksek güç kalitesi ve modülerlik gibi avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, her bir topolojinin uygulanabilirliği; maliyet, karmaşıklık ve kontrol zorlukları gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu yazarlar tarafından ifade edilmiştir [14].

Vijayapriya ve arkadaşları 2020 yılında doğrudan sürülen SMSG ve AABD dönüştürücü kullanan rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin benzetimini ve deneysel çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada dinamik koşullarda moment salınımını azaltmak için aktif sönümleme tekniği uygulanmıştır. Özellikle rüzgâr hızının ani değişimlerinde oluşan moment salınımlarının uygulanan teknik sayesinde azaltıldığı yazarlar tarafından ifade edilmiştir [15].

Shuhui ve arkadaşları 2012 yılında, doğrudan sürülen bir değişken hızlı rüzgâr türbininin benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Tasarladıkları sistemde 1,5 kW değerine sahip SMSG ve AABD kullanmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada yeni bir vektör kontrol yöntemi sunulmuş ve geleneksel vektör kontrol yöntemi ile karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yeni kontrol yönteminin maksimum güç takibinde ve DA bara gerilimi denetiminde daha başarılı olduğu yazarlar tarafından belirtilmiştir [16].

Peng ve arkadaşları 2017 yılında SMSG kullanan üç adet küçük güçlü rüzgâr türbini ile bir DA mikro şebekenin benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan mikro şebekenin enterkonnekte sistem ile bağlantısı bulunmamakta ve sadece yerel yüklerin (ada modlu çalışma) beslenmesi gerçekleştirilmektedir. Generatör tarafı doğrultucu olarak tam denetimli aktif doğrultucular kullanılmaktadır. DA hat tarafı dönüştürücü olarak düşüren (buck) dönüştürücü kullanılmıştır. Yazarlar uyguladıkları kontrol yöntemi sayesinde generatörlerin yük akımını dengeli bir şekilde paylaştıklarını ifade etmektedirler [17].

Daming ve arkadaşları 2014 yılında SMSG, kontrolsüz doğrultucu, yükselten (boost) dönüştürücü ve gerilim beslemeli eviriciden oluşan değişken hızlı REDS'nin 20 kW güç değeri için benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Bir önceki çalışmadan farklı olarak bu sistem LCL filtre üzerinden üç fazlı şebekeye enerji aktarımı gerçekleştirmektedir.

Çalışmanın benzetim sonuçlarında tasarlanan sistemin genel verimi %94 ve şebekeye aktarılan akımın anma değerindeki toplam harmonik dağılımının %3 olduğu görülmektedir [18].

Lei ve arkadaşları 2009 yılında SMSG kullanan rüzgâr türbininin değişken rüzgâr hızı değerlerinde modellemesini gerçekleştirmişlerdir. 5 kW gücüne sahip SMSG kullanılan bu tasarımda yük olarak batarya grubu ve omik yükler kullanılmıştır. Şebeke bağlantısı bulunmayan sistem kontrolsüz doğrultucu, alçaltan-yükselten (buck-boost) dönüştürücü ve bir fazlı gerilim kaynaklı tam köprü evirici içermektedir. Bataryaların şarj edilmesi buck-boost dönüştürücü ile gerçekleşmektedir. Omik yükler ise ortak DA baradan aldığı gerilimi alternatif gerilime dönüştüren bir fazlı evirici tarafından beslenmektedir. Yapılan çalışmada yazarlar tasarlanan sistem ile bir radyo istasyonunun enerji ihtiyacını başarılı bir şekilde karşıladıklarını ifade etmektedirler [19].

1.1.3. Rezonans Dönüştürücüler ve Denetim Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar

Shixiong ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada SMSG, kontrolsüz doğrultucu, LCC rezonans dönüştürücü ve akım beslemeli tam köprü evirici yapısından oluşan REDS'nin benzetimini ve deneysel çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada rezonans dönüştürücü haricinde sert anahtarlama yöntemi ile sürülen tam köprü DA-DA dönüştürücüde kullanılarak verim ve güç anahtarlarında oluşan stres açısından karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir. Rezonans dönüştürücünün denetiminde, çıkış filtresi ve transformatör tasarımının daha kolay gerçekleştirilmesi için FKM yönteminin seçildiği belirtilmiştir. Sert anahtarlama yöntemi ile sürülen dönüştürücünün verimi, güç değeri arttıkça azaldığı buna karşın rezonans dönüştürücünün veriminin ise güç arttıkça arttığı benzetim sonuçlarından görülmektedir [20].

Catalin ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbininden elde edilen gücün orta gerilim DA bağlantı hattına iletimine ait benzetim çalışmasını seri rezonans dönüştürücü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Benzetim çalışmasında kullanılan seri rezonans dönüştürücünün kontrolü FKM, FM ve ikisinin beraber kullanıldığı hibrit

yöntem ayrı ayrı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her üç yöntem için rezonans altı ve rezonans üstü çalışma durumları da incelenmiştir. Üç farklı kontrol yöntemi ve iki farklı frekans durumu ayrı ayrı uygulanarak kayıplar ve rezonans devre üzerindeki stres değerleri analiz edilmiştir. FM yöntemi ve rezonans altı çalışmada diğer yöntemlere göre en düşük kayıp değeri elde edilirken rezonans devresindeki elemanlarda oluşan stres seviyesi en yüksek değere ulaştığı ifade edilmiştir [21].

Seyed ve arkadaşları 2019 yılında, iki adet fotovoltaiik (FV) paneli MGN'de çalıştırmak için çift girişli yarım köprü LLC rezonans dönüştürücü tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada FKM ve FM yöntemleri birlikte uygulanmıştır. Her iki FV panelin güç değişimi pozitif veya negatif olduğunda FM yöntemi uygulanarak MGN yakalanmaya çalışılmıştır. Eğer bir panelin güç değişimi pozitif iken diğer FV panelin güç değişimi negatif ise FKM uygulanarak MGNT gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada farklı güç değerleri için verim değeri %92 ila %96 arasında ölçülmüştür [22].

Zang ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları çalışmada LLC rezonans dönüştürücü ile mikro evirici tasarımını gerçekleştirmişlerdir. MGNT algoritması olarak değişken adımli D&G algoritması seçilmiş ve rezonans dönüştürücünün anahtarlama frekansını değiştirecek şekilde düzenlenmiştir. Yazarlar önerilen MGNT algoritması sayesinde kararlı durumda daha düşük osilasyon seviyesi ve ısınım koşullarının değişiminde MGN'yi daha hızlı yakaladıklarını ifade etmişlerdir [23].

1.1.4. Güç Aktarımı İçin DYM Yöntemi Kullanan Çalışmalar

H. Fujita ve H. Akagi, yaptıkları çalışmada 4 kW gücünde ve 450 kHz anahtarlama frekansına sahip bir gerilim kaynağı invertörü ile çalışan, seri rezonans devresi tabanlı bir indüksiyon ertitme sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde DYM esaslı bir güç kontrol yöntemi uygulanmış ve bu sayede indüksiyon ertitme sisteminin daha sade, kompakt ve yüksek verimli bir yapıya kavuştuğu gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen modülasyon stratejisi sayesinde sistemin hedeflenen frekans ve güç düzeylerinde kararlı bir şekilde çalışabildiği vurgulanmıştır. Deneysel bulgular ise geliştirilen yaklaşımın geçerliliğini ve uygulama potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır [24].

Karafil ve arkadaşları 2020 yılında yaptıkları çalışmada FV sistemin MGN çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen tasarımda tam köprü evirici, seri rezonans dönüştürücü ve kontrolsüz doğrultucular kullanılmıştır. 600W güç değerine sahip sistemde MGNT algoritması olarak D&G algoritması kullanılmıştır. Rezonans dönüştürücünün güç kontrol yöntemi olarak 16 darbe örneğine sahip düzensiz DYM yöntemi kullanılmıştır. FV sistemden elde edilen güç LCL filtre üzerinden bir fazlı şebekeye aktarılmıştır. Rezonans dönüştürücü 100kHz anahtarlama frekansında çalıştırılmıştır. MGNT verimliliğinin %99 ve üzeri olduğu ayrıca tüm güç aralığında sıfır akımda anahtarlama (SAA) koşulunun gerçekleştirildiği yazarlar tarafından ifade edilmektedir [25].

Karafil ve arkadaşları 2020 yılında indüksiyon ısıtma için seri rezonans dönüştürücü tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Giriş güç kaynağı olarak FV simülatörü kullanılan sistemde seri rezonans dönüştürücünün denetimi 32 darbe örneğine sahip düzenli ve düzensiz DYM yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Sistemi MGN'de çalıştırmak için D&G algoritması kullanılmış ve sonuçlar her iki DYM örneği için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Düzenli ve düzensiz DYM yöntemlerinin her ikisinde de %99 ve üzerinde MGNT verimi elde edilmiştir. Düzensiz DYM in kontrol algoritmasının, düzenli yapıya kıyasla daha karmaşık olduğu fakat akım ve gerilim streslerinin pik değerinin ise daha düşük olduğu yazarlar tarafından belirtilmiştir [26].

Hongchang ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları çalışmada 50 W gücünde kablosuz güç aktarımını 0,5 m mesafeden ve farklı yük değerleri için gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan sistemin rezonans frekansı 917 kHz'dir. Deneysel çalışmanın genel veriminin %70 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca DYM yönteminde yüksek kalite faktörü seçiminin yöntemin başarısını olumlu yönde etkilediği yazarlar tarafından ifade edilmiştir [27].

Manyi ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada raylı taşıtlar için endüktif güç aktarımını 7,5 kW güç değerinde gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada DYM tekniği ile faz kaydırma tekniği karşılaştırılmıştır. DYM tekniğinde %74,2 verim elde edilirken faz kaydırma tekniğinde bu değer %4 daha düşük elde edilmiştir.

Yazarlar özellikle düşük yük değerlerinde DYM tekniğinin anahtarlama kayıplarını, faz kaydırma yöntemine kıyasla daha fazla azalttığını belirtmişlerdir [28].

Vicente ve arkadaşları 2011 yılında 50 kW güç değerine sahip, seri rezonans dönüştürücünün tasarımı için indüksiyon ısıtma için gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada rezonans dönüştürücünün güç denetimi DYM yöntemi ve frekans modülasyonu yöntemi kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her iki yöntemin analizi sunulmuştur. DYM yöntemi sayesinde hedeflenen tüm güç aralığında rezonans frekansında çalışıldığı belirtilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada evirici veriminin DYM yönteminde %92 olduğu, frekans modülasyonu yönteminde ise %88 olduğu ifade edilmektedir [29].

1.1.5. Türkiye’de Yapılan Çalışmalar

Çiftçi ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada SMSG ve AABD dönüştürücü kullanan REDS’nin benzetimini gerçekleştirmişlerdir. KHO MGNT algoritması kullanılan çalışmada farklı rüzgâr hızlarında sistemin MGN’de çalıştığı ifade edilmiştir. Hem generatör tarafı hem de şebeke tarafı dönüştürücü alan yönlendirmeli vektör denetim yöntemiyle kontrol edilerek DA bara geriliminin sabit tutulması ve aktif-reaktif güç denetimi gerçekleştirilmiştir [30].

Yaylacı ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada otonom bir rüzgâr enerjisi sistemi için test düzeneğini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada asenkron motor, SMSG, kontrolsüz doğrultucu, boost dönüştürücü ve omik yükler kullanılmıştır. Asenkron motor, rüzgâr hız bilgisi ve türbin parametrelerini kullanarak rüzgâr türbinin mekaniksel davranışını modellemektedir. Asenkron motora bağlı olan generatörden elde edilen güç, güç dönüştürücüleri üzerinden yüke aktarılmaktadır. Tasarlanan sistemin MGN’de çalıştırılması için boost dönüştürücünün görev oranı değiştirilmektedir. Yapılan çalışma REDS’nin laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi için gerekli olan aşamaları detaylı bir şekilde aktarmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada performans katsayısının KHO’na göre değişimi deneysel olarak sunulmuştur [31].

Ertike ve arkadaşları 2009 yılında yaptıkları çalışmada SMSG, kontrolsüz doğrultucu, buck dönüştürücü ve yük olarak akü grubu kullanarak değişken hızlı REDS'nin benzetimini gerçekleştirmişlerdir. MGNT yöntemi olarak GSGB yöntemi kullanılmış ve buck dönüştürücünün görev oranı değiştirilerek sistem MGN'de çalıştırılmıştır. Benzetim sonuçlarından farklı rüzgâr hızları için MGNT'nin başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir [32].

Perçin ve arkadaşları 2021 yılında değişken hızlı REDS'nin benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada SMSG, kontrolsüz doğrultucu, boost dönüştürücü ve omik yük grubu kullanılmıştır. MGNT bulanık mantık yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada bulanık mantık yönteminin kullanılmasıyla MGN'yi rüzgârın anlık değişimlerinde daha hızlı bir şekilde yakalandığı yazarlar tarafından ifade edilmiştir [33].

Özbay 2019 yılında yaptığı çalışmada seri rezonans dönüştürücü kullanarak FV panelden elde ettiği gücü bataryalara MGNT yaparak aktarmıştır. MGNT için D&G algoritmasını seri rezonans dönüştürücüye göre düzenleyerek uygulamıştır. Yapılan çalışmada değişen koşullarda rezonans frekansını yakalamak için faz kilitlemeli döngü (FKD) yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca yarım köprü eviricinin anahtarlama sinyallerine ait görev oranı da değiştirilerek sistemin MGN'de çalışması sağlanmıştır. Benzetim sonuçlarından farklı ışınlam değerlerinde MGN'nin başarılı bir şekilde takip edildiği görülmektedir. Ayrıca farklı güç değerlerinde rezonans frekansında çalışıldığından dolayı yumuşak anahtarlama koşullarının gerçekleştiği de sonuçlardan anlaşılmaktadır [34].

Çetin 2017 yılında yaptığı çalışmada veri merkezi uygulamaları için yüksek verimli bir tam köprü LLC dönüştürücünün tasarımı ve uygulamasını gerçekleştirmiştir. FM yöntemi ile kontrol edilen rezonans dönüştürücü 48V / 960W çıkış değerlerine sahiptir. Deneysel sonuçlardan görüldüğü üzere tam yük durumunda verim %94 yarı yük durumunda ise %92 olarak ölçülmüştür [35].

Nacar 2019 yılında yaptığı çalışmada elektroliz ile hidrojen üretimi için tasarladığı tam köprü seri rezonans dönüştürücüyü sabit giriş gerilimi ve yük değerleri için farklı

kontrol teknikleri uygulayarak analiz etmiştir. Yapılan çalışmada kontrol teknikleri olarak FM, FKM ve düzenli DYM teknikleri ayrı ayrı uygulanmış ve sonuçlar verim, çıkış gerilim dalgalanması, yumuşak anahtarlama koşulları, anahtarlama stresleri ve uygulama kolaylığı açısından karşılaştırılmıştır. FM yöntemi ile yapılan uygulamada en yüksek verim, en düşük çıkış gerilim dalgalanması, en düşük rezonans tepe akımı ve en düşük anahtar gerilim stresleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmada en düşük verim FKM tekniğinde ortaya çıkmaktadır. Donanımsal açıdan tasarımın en zor olduğu teknik DYM yöntemi olarak ifade edilmiştir [36].

Karafil 2018 yılında yaptığı çalışmada DYM kontrollü seri rezonans dönüştürücü ile FV panellerden elde edilen maksimum gücü bir fazlı eviriciyle şebekeye aktarmıştır. MGNT algoritması olarak D&G yöntemi uygulanmıştır. Uygulama sonuçlarından görüldüğü üzere deneyde kullanılan tüm ısınım değerlerinde SAA gerçekleştirilmiştir. Yumuşak anahtarlama koşulları neticesinde rezonans dönüştürücü 100kHz üzeri anahtarlama frekanslarında düşük anahtarlama stresi ile çalıştırıldığı ve yüksek frekansta çalışmayla pasif devre elemanlarının fiziki boyutlarının küçüldüğü ve devrenin güç yoğunluğunun arttığı ifade edilmiştir [37].

Literatürde değişken hızlı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri için farklı maksimum güç noktası takip algoritmaları ve güç dönüştürücü yapılarına dair çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı, geleneksel DA-DA dönüştürücüler ve mekanik sensör tabanlı MGNT yöntemleri üzerine yoğunlaşırken, bu yöntemlerin sensör maliyetlerini artırdığı ve güvenilirliği azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, literatürde yer alan sert anahtarlama yöntemleri, güç elektroniği devrelerinde anahtarlama kayıplarını ve elektromanyetik girişimleri artırarak sistemin genel verimliliğini ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında, düzensiz DYM kontrol yöntemiyle çalışan, seri rezonanslı bir DA-DA dönüştürücü tasarlanarak, anahtarlama kayıpları minimize edilmiş ve pasif devre elemanlarının boyutları küçültülerek güç yoğunluğu artırılmıştır. Ayrıca, sensörsüz ÇİDGİ-FKD tabanlı bir MGNT algoritması geliştirilerek, mekanik sensör ihtiyacı ortadan kaldırılmış ve sistemin genel güvenilirliği artırılmıştır. Literatürde, DYM tabanlı güç denetimi ile yumuşak anahtarlama koşullarında çalışan ve aynı

zamanda MGNT gerçekleştiren entegre bir yapının yaygın olmadığı göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma söz konusu boşluğu doldurmakta ve küçük güçlü rüzgâr türbinleri için hem verimliliğı hem de ticari uygulanabilirliğı yüksek, sürdürülebilir bir enerji dönüşüm çözümü sunarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.



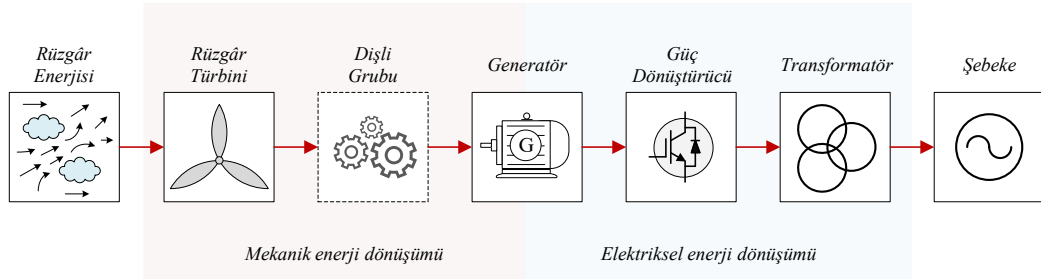
BÖLÜM 2

RÜZGÂR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

Bu bölümde, rüzgâr gücü, rüzgâr türbinlerinde MGN kavramı ve MGNT algoritmaları, rüzgâr türbinleri ve türleri ile ilgili temel bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca, rüzgâr türbinlerinden elde edilen gücün elektriksel yüke aktarılması sürecinde kullanılan güç dönüştürücüleri analiz edilmektedir.

2.1. RÜZGÂR TÜRBİNİ KONFIGÜRASYONLARI

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri ticari olarak kullanılmaya başladığı ilk yıllardan günümüze kadar olan süreç boyunca farklı yapılarda kullanılmaktadır. Toplumların enerjiye olan ihtiyaçlarının artması ve teknolojik gelişmeler neticesinde türbin teknolojileri ucuz ve basit tasarımlardan daha pahalı ve denetim yapısı daha karmaşık tasarımlara doğru evrilmişlerdir [38,39]. Temel bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi rüzgâr türbini, dişli grubu, generatör, güç dönüştürücüsü ve şebeke bağlantı trafosundan meydana gelmektedir [40]. Şekil 2.1’de REDS’nin temel blok şeması sunulmaktadır. Doğrudan sürüş özelliğine sahip olan sistemlerde dişli grubu bulunmamaktadır ve türbin mili generatörün miline doğrudan bağlanmaktadır [40,41].



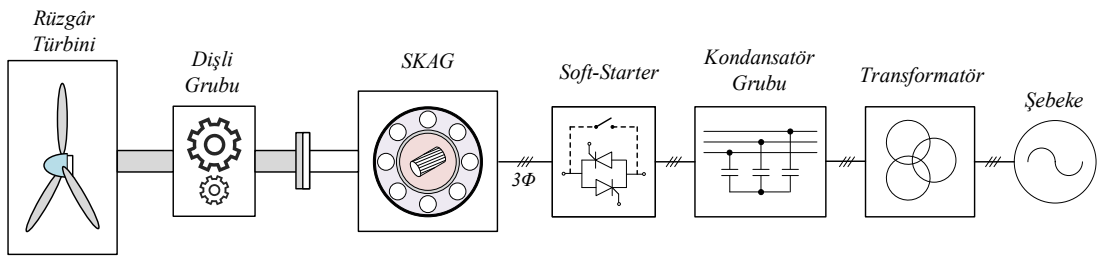
Şekil 2.1. Temel REDS blok şeması.

Rüzgâr türbinleri birçok farklı birleşime sahip olsa da ticari açıdan kabul görmüş dört farklı tasarım tipi bulunmaktadır.

- **Tip – 1:** Sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) kullanan, sabit hızlı REDS.
- **Tip – 2:** Rotoru sargılı asenkron generatör (RSAG) kullanan kısmi değişken hızlı REDS.
- **Tip – 3:** Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) kullanan kısmi değişken hızlı REDS.
- **Tip – 4:** SKAG, SMSG veya Rotoru sargılı senkron generatör (RSSG) kullanılan değişken hızlı REDS.

2.1.1. Tip-1 Sabit Hızlı REDS

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde generatör mili rüzgâr hızından bağımsız olarak sabit açısal hızla dönmektedir. Dişli grubu kullanılarak türbin kanatlarının düşük olan açısal hızı artırılarak generatör miline aktarılmaktadır. Generatörden elde edilen elektrik enerjisi yükseltici tip hat transformatörü yardımıyla şebekeye aktarılır. Generatör yapısı olarak SKAG kullanılmaktadır [38]. Temel bir sabit hızlı rüzgâr türbini yapısı Şekil 2.2’de sunulmaktadır.



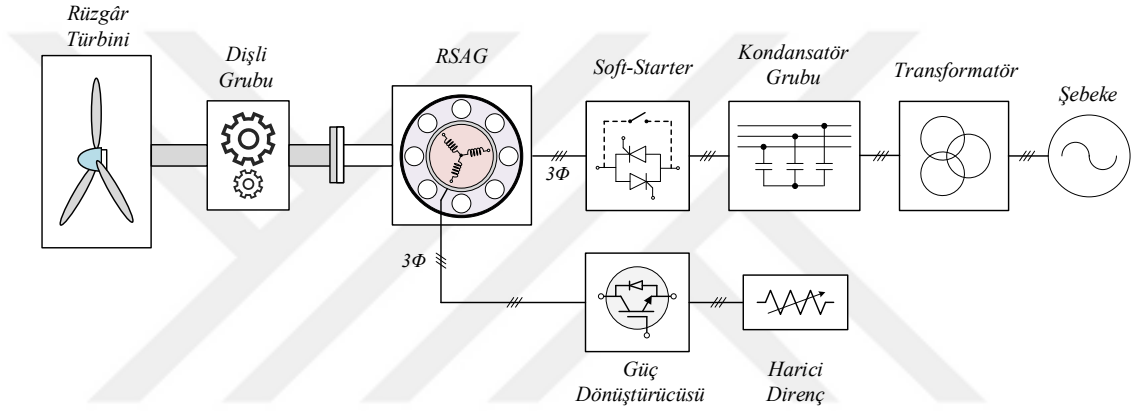
Şekil 2.2. Tip-1 sabit hızlı REDS blok şeması.

Rüzgâr hızının nominal değerinin üzerine çıktığı durumlarda durdurma kontrolü (Stall kontrol) veya eğim kontrolü (Pitch kontrol) yöntemleri kullanılarak türbin açısal hızı sınırlandırılır. SKAG’ler endüktif özellikte olduğundan şebekeden reaktif güç çekmektedirler. Güç katsayısını uygun seviyeye getirmek için kondansatör grupları kullanılarak kompanzasyon işlemi gerçekleştirilir. Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde

rüzgâr hızındaki dalgalanmalar doğrudan elektromekanik momente ve generatörün ürettiği elektriksel güce aktarılmaktadır. Ayrıca dalgalanmalar mekanik streslere, türbin ve generatör şaftı üzerinde mekanik salınımlara da neden olmaktadır [41].

2.1.2. Tip-2 Kısmi Değişken Hızlı REDS

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin sakıncalarını ortadan kaldırmak veya azaltmak için kısmi değişken hızlı REDS'ler kullanılmaktadır. Tip-2 yapısında SKAG yerine RSAG'ler kullanılmaktadır ve blok şeması Şekil 2.3'te sunulmaktadır.

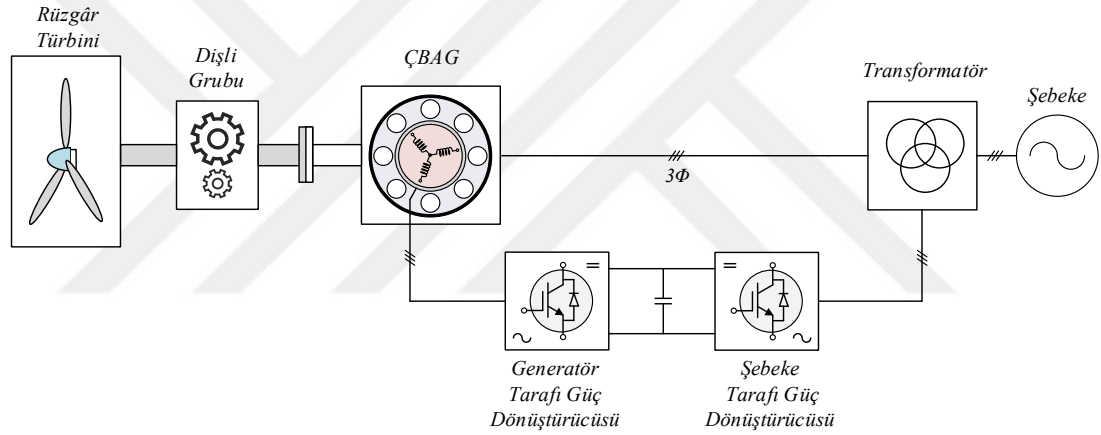


Şekil 2.3. Tip-2 kısmi değişken hızlı REDS blok şeması.

RSAG kullanılan bu yapıda temel hedef rotor sargılarına harici dirençler bağlayarak hız/moment karakteristiğini değiştirmek ve generatör hızını denetleyebilmektir. Generatör hızının belirli bir aralık içerisinde denetlenebilmesi sayesinde farklı rüzgâr hızlarında da MGN'de çalışma mümkün hale gelmektedir. RSAG'lerde bilezik ve fırçalar kullanılmaktadır. Ayrıca RSAG'lerde SKAG'lar gibi yumuşak yol vericiye ve reaktif güç düzenleyici bileşenlere ihtiyaç duymaktadır. Tüm bu yapıların varlığı sistemin kurulum ve bakım maliyetlerini arttırmaktadır. Rotor sargılarında bağlı bulunan harici dirençler devrede olduğu müddetçe enerji tüketmektedirler. Bu durum verimi olumsuz etkilemektedir [42].

2.1.3. Tip-3 Kısmi Değişken Hızlı REDS

Tip-3 REDS’lerde Tip-2 de olduğu gibi RSAG kullanılmaktadır. RSAG’nin rotor sargılarına bağlı olan çift yönlü dönüştürücü sayesinde enerji akışı rotordan şebekeye olabildiği gibi şebekeden rotora doğru da olabilmektedir. Bu nedenle bu generatör yapısı “Çift Beslemeli” olarak isimlendirilmektedir. Stator sargıları hat trafosu ile doğrudan şebekeye bağlanmaktadır ve güç akışı her zaman statordan şebekeye doğrudur [41]. ÇBAG kullanan Tip-3 REDS blok şeması Şekil 2.4’te sunulmaktadır. Generatör tarafı güç dönüştürücüsü, hız-moment karakteristiğine bağlı olarak çalışma noktasını belirler ve aktif/reaktif güç denetimini sağlarken; şebeke tarafı dönüştürücünün görevi DA bağlantı gerilimini sabit tutmaktır. [43].



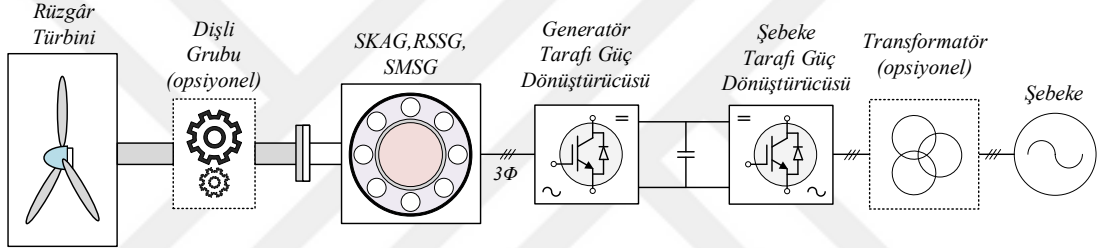
Şekil 2.4. Tip-3 kısmi değişken hızlı REDS blok şeması.

Generatör yapısında bulunan fırça ve bilezikler, rotor devresi için güç dönüştürücü sistem karmaşıklığını, maliyetini ve periyodik bakım ihtiyacını artırmaktadır. Ayrıca şebeke gerilim sorunlarında çift yönlü güç dönüştürücülerini korumak için ilave önlemlerin alınması gerekmektedir [41-43].

2.1.4. Tip-4 Değişken Hızlı REDS

Sabit hızlı ve kısmi değişken hızlı REDS’lerde türbin hızı ya sabit tutulmakta ya da senkron hızın belirli bir seviyesinde kısmi olarak denetlenebilmektedir. Tip-4

REDS'nin en büyük avantajı generatör hızını tam ölçekli (%0-%100) olarak denetleyebilmesidir. Tam ölçekli bir hız denetimini gerçekleştirmek için generatörün üretmiş olduğu gücün tamamının güç dönüştürücüleri tarafından işlenebilmesi gerekmektedir. Bu nedenle güç elektroniği bileşenlerinin güç seviyesi generatör anma gücünden daha fazla olmak zorundadır. Generatör tarafı dönüştürücü, hız-moment karakteristiğine uygun olarak ve maksimum güç noktasını takip ederek çalışma noktasını belirlerken, şebeke tarafı dönüştürücü ise şebeke uyumunu DA bağlantı gerilim seviyesini ve aktif-reaktif güç düzenlemesini gerçekleştirmektedir. İki dönüştürücü yapısı birbirinden bağımsız olarak denetlenmektedir. Bu sayede şebekede frekans farklılaşması sorunlarının önüne geçilmektedir [39,44]. Tip-4 REDS'ye ait blok şema Şekil 2.5'te sunulmaktadır.



Şekil 2.5. Tip-4 değişken hızlı REDS blok şeması.

Tip-4 REDS'de generatör olarak SKAG, RSSG ve MSG'ler kullanılmaktadır. Özellikle MSG ve RSSG'ler daha çok tercih edilmektedir. MSG'ler RSSG'ler ile kıyaslandığında kendinden uyartım yeteneğine sahip olması fırça ve bilezik tertibatına ihtiyaç duymaması gibi avantajlara sahiptir. Senkron generatörlerin kutup sayısı yüksek tutularak dişli grubu devreden çıkartılabilir. Redüktör kullanılmayan bu yapı doğrudan sürüş olarak ifade edilmektedir. Harici uyartım kaynağına ihtiyaç duymaması ve verimliliğinin yüksek olması nedeniyle, küçük (0-100 kW) ve orta güçlü (100 kW – 1 MW) rüzgâr türbinlerinde MSG'ler en çok tercih edilen generatör yapısıdır [42,45]. Son yıllarda rüzgâr türbin teknolojileri üzerine yapılan akademik ve ticari çalışmalar Tip-4 REDS'ler üzerinde yoğunlaşmaktadır. Tip-4 REDS daha fazla güç elektroniği bileşeni içermesi ve daha karmaşık denetim yapılarına ihtiyaç duymasına rağmen düşük rüzgâr hızlarında da verimli bir şekilde çalışabilmesi ve

şebeke hata durumlarında şebekeyi destekleyebilmesi gibi yetenekleri sayesinde popülerliğini arttırmaktadır [40-44]. Çizelge 2.1’de Rüzgâr türbin yapılarının karşılaştırılması özetlenmektedir.

Çizelge 2.1. REDS’lerin karşılaştırılması.

	Sabit Hızlı	Kısmi Değişken Hızlı		Değişken Hızlı		
Türbin Tipi	Tip - 1	Tip – 2	Tip – 3	Tip – 4		
Generatör	SKAG	RSAG	ÇBAG	SKAG	RSSG	SMSG
Güç Dönüştürücü Kapasitesi	0%	10%	30%	100%	100%	100%
Hız Denetim Aralığı	±1%	±10%	±30%	±100%	±100%	±100%
Yumuşak Yol Verici	Gerekli	Gerekli	Gerekli değil	Gerekli değil	Gerekli değil	Gerekli değil
Redüktör İhtiyacı	Var	Var	Var	Var	Opsiyonel	Opsiyonel
MGNT Yeteneği	Yok	Sınırlı	Mümkün	Mümkün	Mümkün	Mümkün
Harici Reaktif Güç Kompanzasyon İhtiyacı	Gerekli	Gerekli	Gerekli değil	Gerekli değil	Gerekli değil	Gerekli değil
Ticari Hacmi	Düşük	Düşük	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek

2.2. RÜZGÂR TÜRBİNİ KARAKTERİSTİĞİ VE MGNT ALGORİTMALARI

Rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr, türbin kanatlarına çarptığında kinetik enerjisinin bir kısmını türbine aktararak yoluna devam etmektedir. Eşitlik 2.1’de rüzgâr gücü ($P_{\text{rüzgâr}}$) ve Eşitlik 2.2’de türbin giriş gücüne ($P_{\text{g_türbin}}$) ait eşitlikler verilmektedir. Rüzgâr yoğunluğu “ ρ ” (kg/m^3), rüzgâr hızı “ v_r ” (m/s), türbin güç katsayısı “ C_p ” ve türbin kanatlarının taradığı alan “ A ” (m^2) olarak verilmektedir [46,47].

$$P_{\text{rüzgâr}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_r^3 \quad (1.1)$$

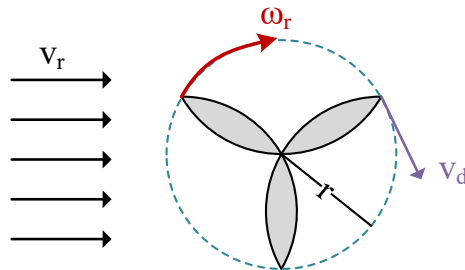
$$P_{g_türbin} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_r^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (1.2)$$

C_p değeri türbin giriş gücünün rüzgâr gücüne oranıdır. Diğer bir ifadeyle rüzgâr gücünün ne kadarlık bir kısmının türbin gücüne dönüştürüldüğünü gösteren birimsiz bir katsayıdır. Betz teoremine göre C_p 'nin maksimum değeri 0,59'dur [46,47]. Yani rüzgâr gücünün maksimum %59'u türbin gücüne dönüştürülebilir. Kayıplar hesaba katıldığında bu değer %40 – %50 arasında değişmektedir. C_p değeri kanat ucu hız oranı “ λ ” ve kanat eğim açısı “ β ”nın bir fonksiyonudur ve Eşitlik 2.3 kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlik 2.3'te kullanılan $c_1, c_2, \dots, c_6$ değerleri rüzgâr türbinin aerodinamik yapısına bağlı olan sabitlerdir. Bu çalışmada kullanılan sabitler, [48] numaralı kaynakta önerilen değerlere dayanmaktadır: $c_1 = 0,5176, c_2 = 116, c_3 = 0,4, c_4 = 5, c_5 = 21, c_6 = 0,0068$. Küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde, kanat eğim açısı sabit tasarlandığı için β değeri genellikle sıfır olarak kabul edilmektedir. [46,47].

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

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{\left(-\frac{c_5}{\lambda_i} \right)} + c_6\lambda \quad (1.3)$$

Şekil 2.6'da rüzgâr türbin kanatlarının açısal hızı “ ω_r ”, doğrusal hızı “ v_d ” ve rüzgâr hızı sembolik olarak gösterilmiştir. Türbin kanatlarının metre cinsinden uzunluğu “ r ” dir.

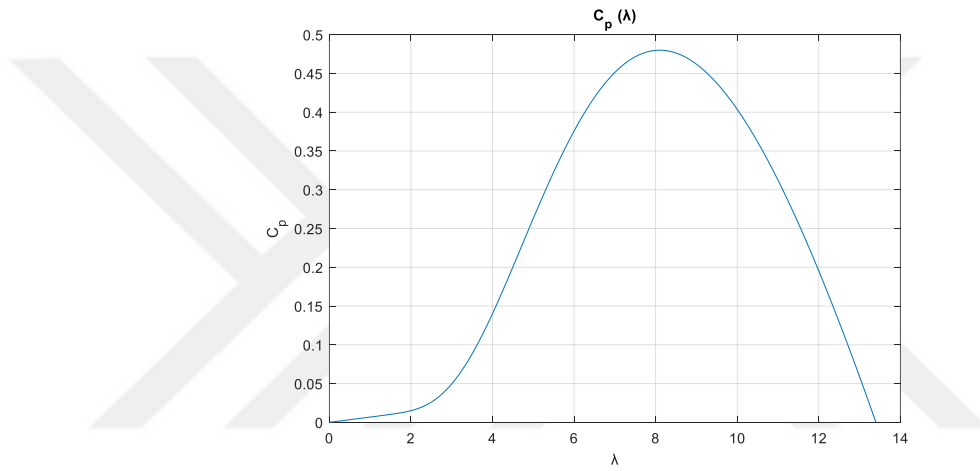


Şekil 2.6. Kanat ucu hız oranının sembolik gösterimi.

Türbin kanatlarının doğrusal hızının rüzgâr hızına oranı, kanat ucu hız oranını vermektedir ve Eşitlik 2.4 ile hesaplanmaktadır [47].

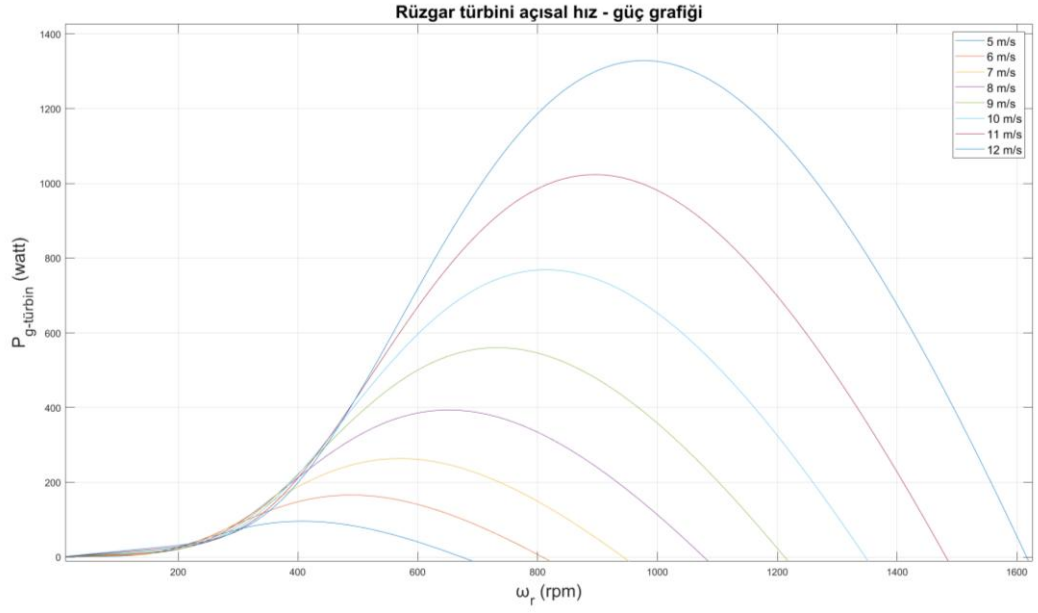
$$\lambda = \frac{v_d}{v_r} = \frac{\omega_r r}{v_r} \quad (1.4)$$

Eşitlik 2.3 ve 2.4 dikkate alındığında küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde $\beta=0$ olduğundan, güç katsayısı sadece λ değerine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.7’de λ değerinin değişimine göre C_p değerinin değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Güç katsayısının kanat ucu hız oranına bağlı değişimi.

Şekil 2.7 incelendiğinde λ değerinin sadece bir değeri için C_p katsayısı maksimum olmaktadır ve bu değer “ λ_{opt} ” olarak ifade edilmektedir. Belirli sabit bir rüzgâr hızı için türbin kanatları optimal açısal hızda “ ω_{r_opt} ” döndüğü takdirde rüzgâr türbini, rüzgâr gücünün maksimum değerini türbin giriş gücüne dönüştürebilecektir. Şekil 2.8’de $r = 0,95\text{m}$, $\beta=0$, $\rho=1,13 \text{ kg/m}^3$ değerlerine sahip ve matematiksel modeli Eşitlik 2.3 ile verilen üç kanatlı ve yatay eksenli bir rüzgâr türbininin açısal hız - güç grafiği sunulmaktadır.

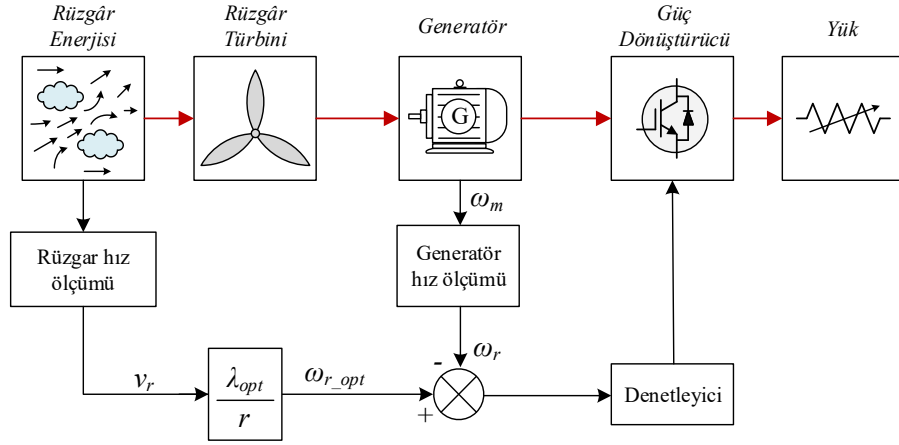


Şekil 2.8. Rüzgâr türbininin açısal hızına bağlı güç eğrileri.

Sabit kanat açısına sahip bir rüzgâr türbininin fiziki tasarımı gerçekleştirildikten sonra denetlenebilir tek parametre türbin kanatlarının açısal hızıdır. Türbin giriş gücünü maksimum değere çıkarmak için türbin kanatlarının optimum açısal hızlarda döndürülmesi gerekmektedir [46]. Bu nedenle yapılan tüm MGNT uygulamaları farklı rüzgâr hızlarında türbin kanatlarının optimum açısal hızlarda döndürülmesine dayanmaktadır. Bu işlem mekanik yöntemler ile gerçekleştirilebileceği gibi generatör hızını kontrol eden güç dönüştürücülerinin denetimiyle de gerçekleştirilebilir [46].

2.2.1. Kanat Ucu Hız Oranı Yöntemi (KHO)

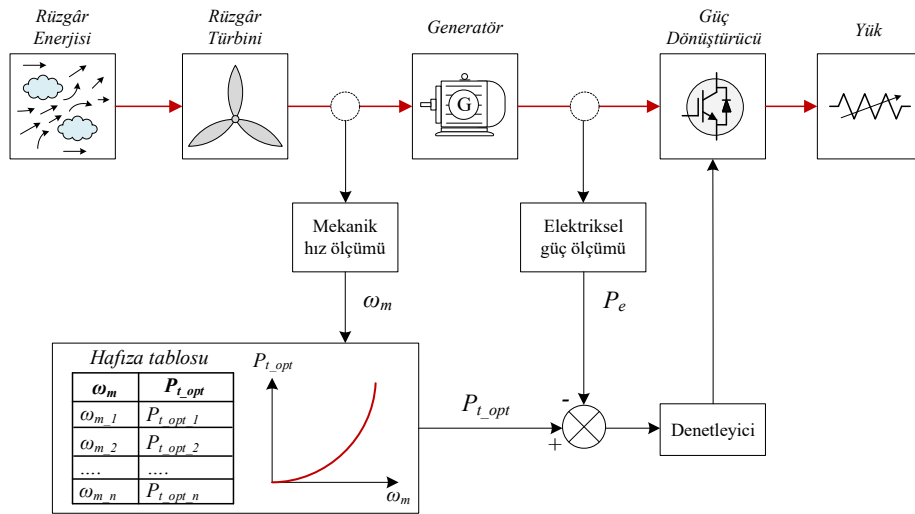
Eşitlik 2.4'te ifade edildiği gibi KHO, türbin kanatlarının doğrusal hızının rüzgâr hızına oranıdır. KHO'nun optimum değeri türbin parametreleri tarafından belirlenmektedir ve rüzgâr hızından bağımsız olarak sabit değerdedir. Bu MGNT yönteminde rüzgâr ve generatör hız bilgileri gereklidir. Rüzgâr hız bilgisi ve KHO optimum değerinin bilinmesi sayesinde generatörün referans hız değeri hesaplanmaktadır. Farklı rüzgâr hızlarında generatör hesaplanan referans hız değerinde çalıştırılarak MGNT işlemi gerçekleştirilir [46-49]. KHO yöntemine ait blok şema Şekil 2.9'da sunulmaktadır.



Şekil 2.9. KHO yöntemine ait blok şema.

2.2.2. Güç Sinyali Geri Besleme Yöntemi (GSGB)

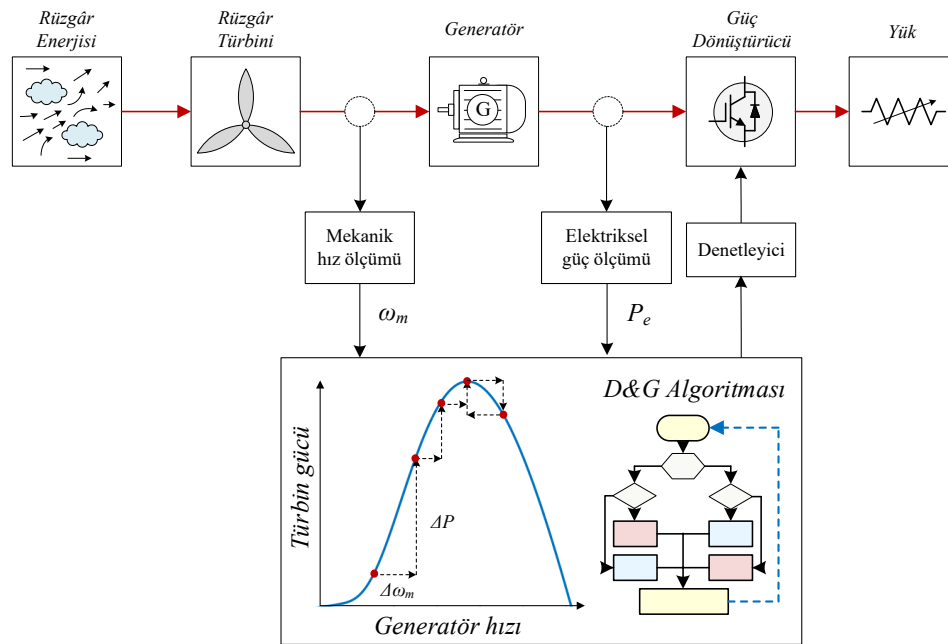
GSGB yönteminde rüzgâr hız bilgisi yerine, farklı mekanik hızlar için türbin optimal güç değerini veren, optimal güç eğrisine ihtiyaç duyulmaktadır [44]. Bu yöntemde mekanik hız değerlerine tekabül eden optimum güç değerleri bir hafıza tablosuna kaydedilir. Generatörün mekanik hızı ve elektriksel gücü ölçülüp hesaplanarak optimum güç değeri ile karşılaştırılır. Hata değeri denetleyiciye gönderilerek generatörün çalışma noktası MGN'ye gelecek şekilde düzenlenir. GSGB yöntemine ait blok şema Şekil 2.10'da sunulmaktadır [46-51].



Şekil 2.10. GSGB yöntemine ait blok şema.

2.2.3. Değiştir ve Gözle Yöntemi (D&G)

D&G yöntemi rüzgâr hız bilgisinden ve türbin parametrelerinden bağımsız bir yöntemdir. Bu yöntemde generatör hız bilgisi ve generatör çıkış gücü bilgileri kullanılmaktadır. D&G yöntemine ait blok şema Şekil 2.11’de sunulmaktadır. D&G yönteminin blok şeması incelendiğinde sabit bir rüzgâr hızı için generatör hızı ve türbin güç eğrisi görülmektedir. Kırmızı ile işaretli noktalar rüzgâr türbinin farklı çalışma noktalarını göstermektedir. D&G algoritması anlık olarak elde edilen generatör hız ve generatör çıkış gücü bilgilerini, bir önceki yaptığı ölçüm ile kıyaslar. Generatör hızı artarken generatör çıkış gücünde artıyorsa MGN’nin solunda çalışıldığı algoritma tarafından tespit edilir ve generatör referans hızını daha önce belirlenen bir adım değerinde arttırarak denetleyiciye gönderir [46-49]. Denetleyicide güç dönüştürücülerinin anahtarlama sinyallerini, generatör hızını arttıracak şekilde değiştirir. Eğer generatör hızı artarken generatör çıkış gücü azalıyorsa bu durumda MGN’nin sağında çalışıldığı anlaşılır. D&G algoritması generatör referans hızını azaltarak denetleyiciye gönderir ve denetleyicide generatör hızını azaltacak şekilde anahtarlama sinyallerini düzenler. Bu işlemler türbin çalıştığı sürece devam ederek sistemin MGN’ye yerleşmesi sağlanmaktadır.



Şekil 2.11. D&G yöntemine ait blok şema.

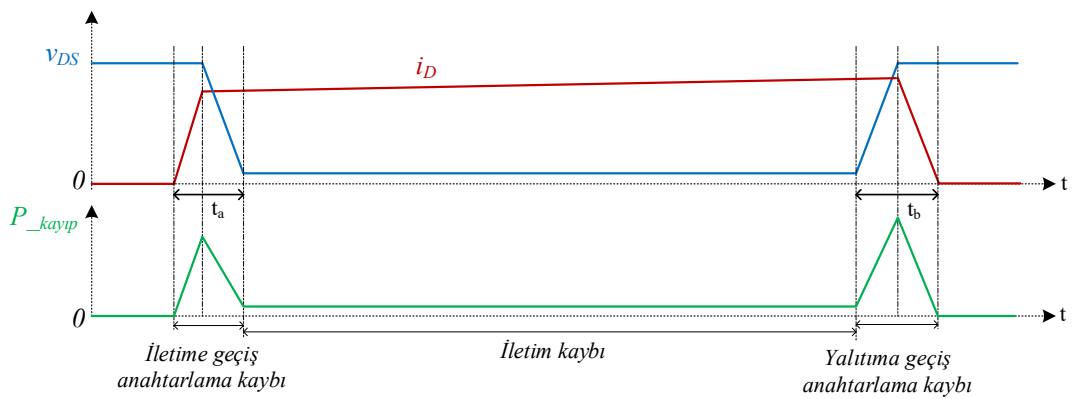
Bu algoritma rüzgâr hız bilgisine ve türbin parametrelerine ihtiyaç duymaması ve uygulamasının basit olması gibi avantajlara sahiptir. Ataleti yüksek olan rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr hızının ani değişimleri gecikmeli olarak generatör miline aktarılmaktadır. Bu nedenle ani ve sürekli rüzgâr değişimlerinde D&G algoritması MGN'yi yakalayamayabilir. D&G algoritmasında referans hız değişiminde kullanılan adım büyüklüğü oldukça önemlidir [46,50]. Adım büyüklüğünün düşük seçilmesi durumunda sistem tepkisi yavaşlayacak, büyük seçilmesi durumunda ise MGN civarında salınımlı çalışma gerçekleşecektir. Her iki koşulda da sistem verimi olumsuz etkilenmektedir.



BÖLÜM 3

SERİ REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE GÜÇ DENETİMİ

Küçük güçlü rüzgâr türbinleri, düşük maliyetleri ve yerel enerji üretimine katkıları nedeniyle yenilenebilir enerji sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu tür sistemlerde, rüzgârdan elde edilen enerjinin yüke aktarımı genellikle basit denetim yapılarının sağladığı avantajlar nedeniyle sert anahtarlama DA-DA dönüştürücüler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak, bu dönüştürücülerde meydana gelen yüksek anahtarlama kayıpları, sistem verimini olumsuz etkileyebilmektedir. Anahtarlama kayıplarını azaltmak ve genel verimi artırmak amacıyla rezonans dönüştürücüler alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Rezonans dönüştürücüler, anahtarlama işlemini akımın ve/veya gerilimin sıfır geçiş anlarında gerçekleştirerek anahtarlama kayıplarını minimize eder ve enerji dönüşüm sürecini daha verimli hale getirir. Şekil 3.1'de sert anahtarlama koşullarında çalışan bir DC-DC dönüştürücüdeki MOSFET güç anahtarının drain akımı (i_D) ve drain-source gerilim (V_{DS}) eğrileri ile anahtarlama kayıpları sembolik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Anahtarlama kayıplarının sembolik gösterimi.

Şekil 3.1'de bir MOSFET'in anahtarlama kayıpları sembolik olarak sunulmuştur [5]. Mavi renkli grafik, MOSFET'in drain-source gerilimini; kırmızı renkli grafik, drain

akımını; yeşil renkli grafik ise iletme ve yalıtıma geçiş anlarındaki anahtarlama kayıpları ile iletim kayıplarını göstermektedir. Anahtarlama kaybı, güç anahtarının iletme ve yalıtıma geçtiği durumlarda, bir periyotluk sürede iki defa gerçekleşmektedir. İletime geçme esnasındaki enerji kaybı (W_{iletim}), yalıtıma geçme esnasındaki enerji kaybı ($W_{yalitim}$) ve toplam anahtarlama enerji kaybı ($W_{anahtarlama}$) olarak ifade edilmekte ve Eşitlik 3.1 ile hesaplanmaktadır. Anahtarlama frekansına (f_a) bağlı olarak anahtarlama güç kaybı Eşitlik 3.2 ile hesaplanmaktadır [5].

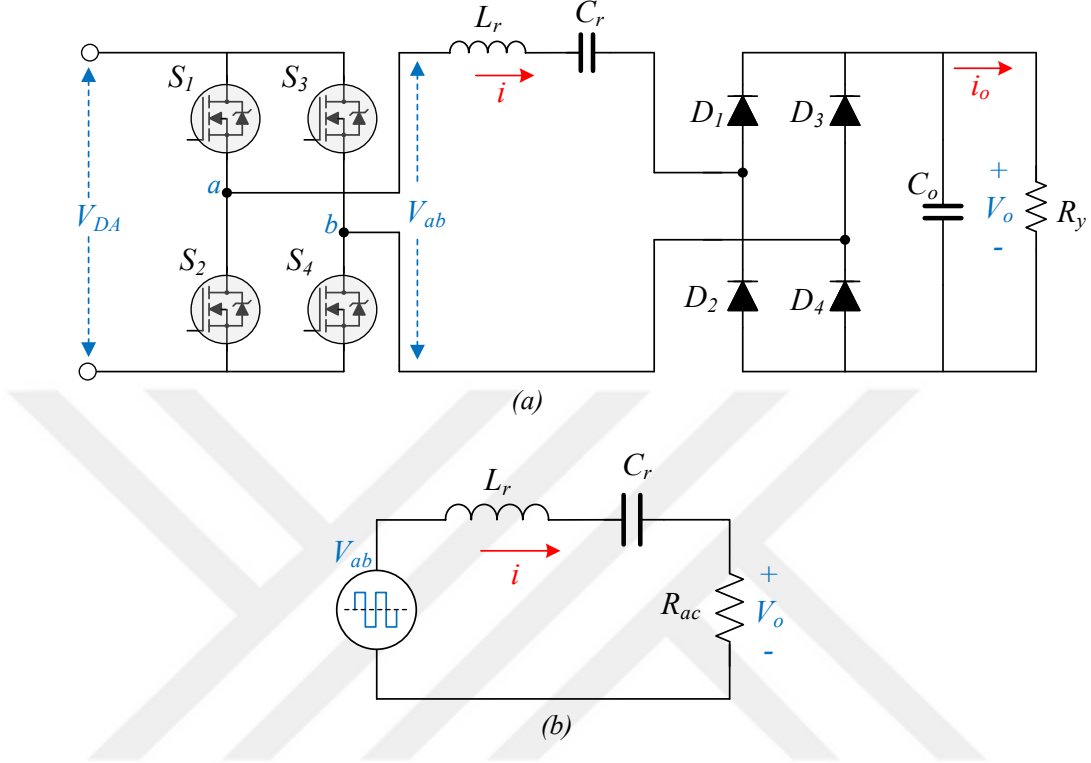
$$W_{iletim} = \int_0^{t_a} v_{ds} \cdot i_d \cdot dt \quad , \quad W_{yalitim} = \int_0^{t_b} v_{ds} \cdot i_d \cdot dt \quad , \quad W_{anahtarlama} = W_{iletim} + W_{yalitim} \quad (2.1)$$

$$P_{kayip} = f_a \cdot W_{anahtarlama} = f_a \cdot (W_{iletim} + W_{yalitim}) \quad (2.2)$$

3.1. SERİ REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Rezonans DA-DA dönüştürücüler güç yoğunlukları ve verimlerinin yüksek olması nedeniyle yenilenebilir enerji sistemlerinde artan bir kullanım alanına sahiptir. Güç yoğunluğunu artırmanın en temel yolu pasif devre elemanlarının boyutunu azaltmakla gerçekleştirilebilir. Güç anahtarlarının yüksek frekansta anahtarlama ile pasif devre elemanlarının boyutu küçültülebilir. Eğer bu işlem sert anahtarlama yöntemleri ile gerçekleştirilirse anahtarlama kayıpları artarak verimi olumsuz yönde etkileyecektir. Rezonans dönüştürücüler yumuşak anahtarlama koşullarında çalışabildiğinden anahtarlama kayıpları düşük, verimleri ve güç yoğunlukları yüksektir. Ayrıca rezonans DA-DA dönüştürücüler geleneksel DA-DA dönüştürücüler (buck, boost, buck-boost v.b.) ile kıyaslandığında EMG seviyeleri daha düşüktür [52,53]. Seri rezonans DA-DA dönüştürücüler, endüktif (L) ve kapasitif (C) devre elemanlarının rezonans devresine seri olarak eklenmesiyle elde edilmektedir. Seri rezonans devresinin temel görevi devre akımının sinüzoidal formda olmasını sağlayarak sıfır geçiş durumlarını oluşturmaktır. Seri rezonans dönüştürücüde rezonans devresi, rezonans bobini (L_r) ve rezonans kondansatörünün (C_r) yüke (R_y) seri bağlanması ile elde edilmektedir. Şekil 3.2 (a)'da tam köprü seri rezonans DA-DA dönüştürücüye ait devre yapısı

sunulmaktadır. Devredeki tüm elemanların ideal olduğu ve devrenin kararlı durumda çalıştığı kabul edilerek eşdeğer devre Şekil 3.2 (b)'de verilmektedir.



Şekil 3.2. (a) Tam köprü seri rezonans DA-DA dönüştürücü devre yapısı (b) eşdeğer devre modeli.

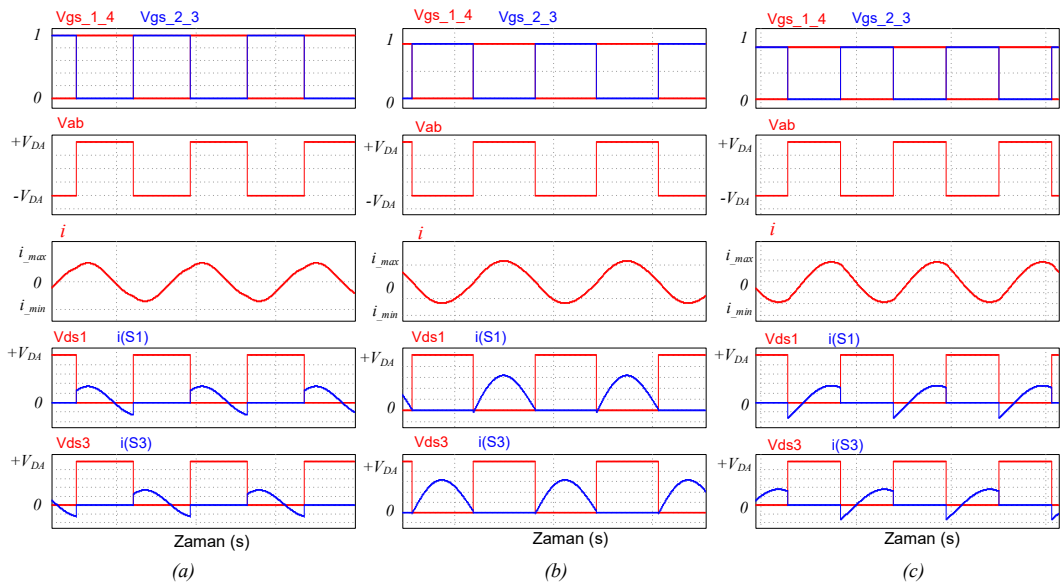
Seri rezonans devresinde anahtarlama frekansının (f_a), rezonans frekansına (f_r) göre değeri, devrenin empedans karakteristiği değiştirmektedir. $f_a=f_r$ durumunda devre omik, $f_a>f_r$ durumunda devre endüktif ve $f_a<f_r$ durumunda ise devre kapasitif karakteristik göstermektedir [36,37]. Eşitlik 3.3'te rezonans frekansı, Eşitlik 3.4'te etkin direnç değeri (R_{ac}), ve Eşitlik 3.5'te devre empedansının (Z) hesaplanması gösterilmektedir.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}, \quad \omega_r = 2\pi f_r \quad (2.3)$$

$$R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} R_y \quad (2.4)$$

$$\mathbf{Z} = R_{ac} + j \left(2\pi f_a L_r - \frac{1}{2\pi f_a C_r} \right) \quad (2.5)$$

Eşitlik 3.5'ten görüldüğü üzere anahtarlama frekansının rezonans frekansa eşit olduğu durumda devrenin kapasitif reaktansı ile endüktif reaktansı eşit olduğundan empedansın reaktif bileşeni sıfırdır. Bu durumda empedans minimum değerindedir. Devre omiktir ve yüke maksimum güç aktarımı gerçekleştirilir. Rezonans devresi endüktif özellikte olduğunda güç anahtarları sıfır gerilimde anahtarlama (SGA) koşullunda ilettime, rezonans devresi kapasitif özellikte ise güç anahtarları SAA koşullarında yalıtıma geçmektedir. Rezonans devresinin omik özellikte olduğu durumda SGA ve SAA koşulları beraber gerçekleşmektedir [36,37]. Şekil 3.3'te (a) $f_a < f_r$, (b) $f_a = f_r$, (c) $f_a > f_r$ durumları için seri rezonans dönüştürücünün dalga şekilleri verilmektedir. Şekil 3.3'te V_{gs} güç anahtarlarının anahtarlama sinyallerini, V_{ds} güç anahtarlarının drain-source arası gerilimlerini, $i(S)$ güç anahtarların akımlarını ve 1'den 4'e kadar olan rakamlarda Şekil 3.2'deki güç anahtarlarının numaralarını ifade etmektedir.



Şekil 3.3. Seri rezonans dönüştürücünün dalga şekilleri (a) $f_a < f_r$ (b) $f_a = f_r$ (c) $f_a > f_r$.

Şekil 3.3 (a)' da güç anahtarlarının akımı negatif değerde iken anahtarın yalıtıma geçtiği görülmektedir. Bu durum rezonans akımının MOSFET'in serbest geçiş

diyotlarından aktığını drain'den source'a doğru akan akımın sıfır olduğunu ve bu nedenle SAA koşulunun gerçekleştiğini göstermektedir. Benzer şekilde Şekil 3.3 (c)'de güç anahtarlarının V_{ds} gerilimleri sıfır değerinde iken ilettime girdiği bu nedenle SGA koşulunun sağlandığı görülmektedir. Şekil 3.3 b)'de SAA ve SGA koşullarının beraber sağlandığı görülmektedir. Seri rezonans devresinin açısal anahtarlama frekansı (ω_a), kalite faktörü (Q) ve gerilim kazancının frekans cevabı ($|G(j\omega)|$) Eşitlik 3.6, Eşitlik 3.7 ve Eşitlik 3.8 ile hesaplanmaktadır [4-7].

$$\omega_a = 2\pi f_a \quad (2.6)$$

$$Q = \frac{\omega_r \cdot L_r}{R_{ac}} \quad (2.7)$$

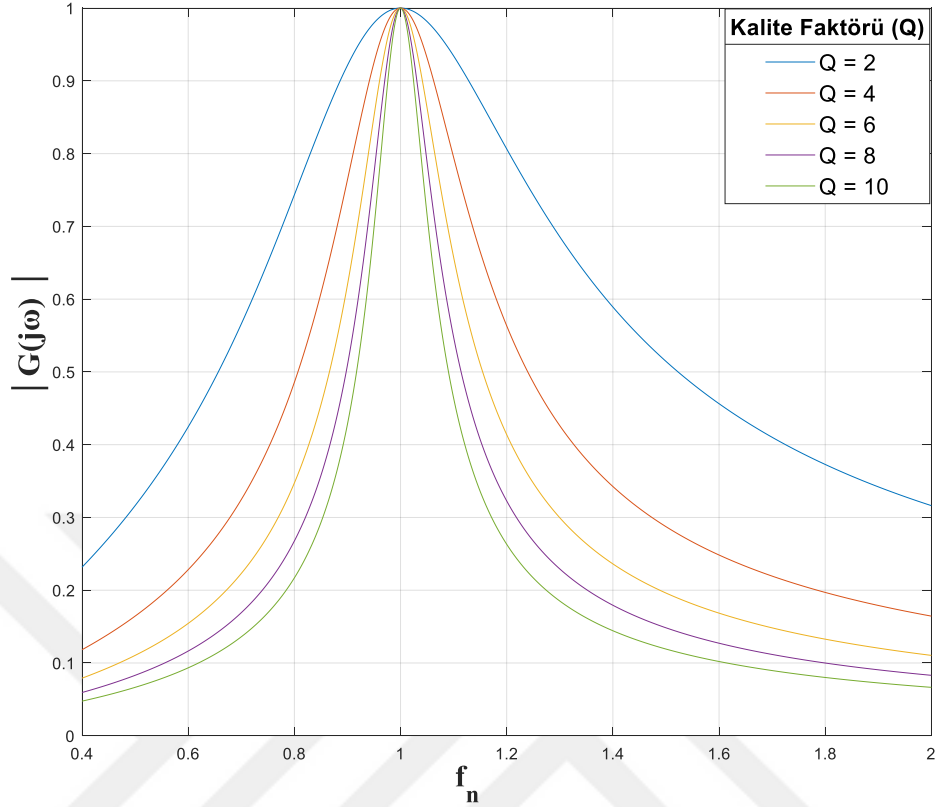
$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + Q^2 \cdot \left(\frac{\omega_a}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_a}\right)^2\right)}} \quad (2.8)$$

Normalize frekans (f_n) anahtarlama frekansı ile rezonans frekansının oranı olarak tanımlanmaktadır ve Eşitlik 3.9 ile hesaplanmaktadır.

$$f_n = \frac{f_a}{f_r} = \frac{\omega_a}{\omega_r} \quad (2.9)$$

Şekil 3.4'te seri rezonans devresinin anahtarlama frekansı değişimi ile gerilim kazancındaki değişim, farklı kalite faktörü değerleri için gösterilmektedir. Anahtarlama frekansının devrenin rezonans frekansına eşit seçildiği durumda gerilim kazancının bir olduğu görülmektedir.

Seri Rezonans Devresi Gerilim Kazancı Değişimi $\langle f_n - |G(j\omega)| \rangle$



Şekil 3.4. Seri rezonans devrenin frekans cevabı.

3.2. SERİ REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE GÜÇ DENETİM YÖNTEMLERİ

Rezonans dönüştürücülerinin denetimi gerçekleştirilirken frekans aralığı, yük durumu, rezonans devre karakteristiği ve yumuşak anahtarlama koşulları gibi birçok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Rezonans DA-DA dönüştürücünün fiziki tasarımı gerçekleştirildikten sonra değişken koşullarda istenilen güç değerini çıkışına aktarabilmek için eviriciye ait güç anahtarlarının DGM darbeleri düzenlenmektedir. Literatür incelendiğinde üç farklı güç kontrol yönteminin öne çıktığı görülmektedir. Bu yöntemler: FM, FKM ve DYM olarak isimlendirilmektedir [36,37].

3.2.1. Frekans Modülasyonu (FM)

Frekans modülasyonu yönteminde evirici devresine uygulanan DGM sinyallerinin görev oranı sabit tutulup frekansı değiştirilerek rezonans devresinin empedansı ve dolayısıyla kazanç değerinin değiştirilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem rezonans dönüştürücülerin kontrollünde sıklıkla kullanılmaktadır. Frekans değişim aralığı rezonans devresinin karakteristiğine göre belirlenmelidir. Eğer frekans değişim aralığı uygun bir şekilde belirlenmez ise rezonans dönüştürücü yumuşak anahtarlama koşullarını sağlamayabilir [54,55].

3.2.2. Faz Kaydırma Modülasyonu (FKM)

Şekil 3.2’de sunulan tam köprü evirici devresinde S1 ve S2 anahtarlarına uygulanan kapı sinyalleri birbirlerine göre terslenmiş durumdadır. Benzer şekilde S3 ve S4 anahtarları da birbirlerine göre terslenmiş durumdadır. Üst ve alt anahtarların aynı anda iletme girmesini önlemek amacıyla anahtarlar arasına ölü zaman eklenmektedir. Faz kaydırma modülasyon yönteminde tüm güç anahtarlarının görev oranı sabit ve 0,5’tir. Faz kaydırma açısı β ile tanımlanır. S1 ve S2 anahtarları sabitken S3 ve S4 anahtarlarına faz kaydırma uygulanmaktadır. Faz değişim açısı 180° olduğunda V_{ab} gerilimi maksimum değerine ulaşır. Açı değeri azaldıkça V_{ab} geriliminin efektif değeri de azalmaktadır. Efektif gerilim değerinin değişmesiyle yüke uygulanan güç değeri kontrol edilmektedir. İstenilen kazanç değeri önceden belirlenerek sabit bir frekans değeri için rezonans devre elemanlarının tasarımı gerçekleştirilmektedir [36,54].

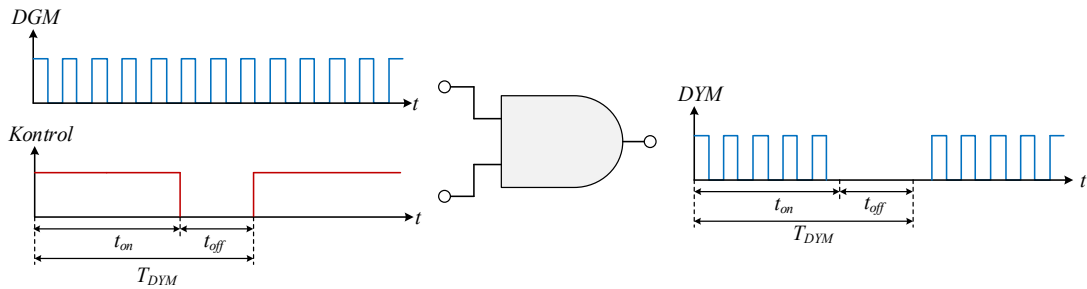
3.2.3. Darbe Yoğunluk Modülasyonu (DYM)

Darbe yoğunluk modülasyonu (DYM), güç elektroniğinde, özellikle de rezonans dönüştürücüler gibi yüksek frekanslı sistemlerde güç kontrolü amacıyla kullanılan bir anahtarlama tekniğidir. Bu yöntemde, sabit genlikli ve sabit genişlikli darbelerin yoğunluğu, değiştirilerek ortalama güç seviyesi kontrol edilir. DYM, anahtarlama frekansını değiştirmeden, sadece darbe dağılımını modüle ederek güç kontrolü sağlar. Bu özelliği sayesinde rezonans dönüştürücülerde yüksek verimlilik, düşük

elektromanyetik girişim (EMG) ve basitleştirilmiş kontrol mimarisi gibi önemli avantajlar sunar. DYM yöntemi, rezonans dönüştürücünün belirlenen tüm güç seviyelerinde rezonans frekansında veya rezonans frekansı yakınlarında çalışmasına imkân sağlamaktadır. Rezonans frekansında çalışma sayesinde dönüştürücü SGA ve/veya SAA koşullarında çalışmasını gerçekleştirebilir. DYM yönteminin temel mantığı eviriciye uygulanan darbelerin silinmesine dayanır. Darbeler silinerek evirici çıkış gerilimi (V_{ab}) sıfır değerini almaktadır. Rezonans devresi girişine uygulanan gerilimin sıfır değerini almasıyla rezonans akımı sönümlü salınımlı bir şekilde güç anahtarlarının serbest geçiş diyotlarını kullanarak akmaya devam edecektir. Sönüm süresi rezonans devresinin kalite faktörüne bağlıdır. Yüksek kalite faktörü seçilmesi durumunda sönümleme süresi artacaktır [36,37]. DYM yönteminde belirli bir grup darbe âdeti içerisinde bazı darbeler silinmektedir. Darbe grubu en az 4 adet olmakla birlikte 4, 8, 16, 32, 64, ... 2^n şeklinde belirlenmektedir. Silinen darbeler ardışık sıralı bir şekilde siliniyorsa bu durumda DYM yöntemi “Düzenli DYM” adını almaktadır. Eğer darbe silme işlemi ardışık değil ise bu durumda DYM yöntemi “Düzensiz DYM” olarak ifade edilmektedir.

3.2.3.1. Düzenli DYM

Düzenli DYM’de darbe silme işlemi ardışık sırada gerçekleştiğinden düzensiz DYM yöntemine göre uygulanması daha kolaydır. Düzenli DYM’de istenen darbelerin silinmesi için uygulanan temel lojik devre Şekil 3.5’de sunulmaktadır. Şekil 3.5’de DGM darbeleri ile kontrol sinyali “ve” işlemine tabi tutulmaktadır. Böylelikle kontrol sinyalinin lojik-0 olduğu zaman aralığındaki DGM darbeleri silinmektedir.



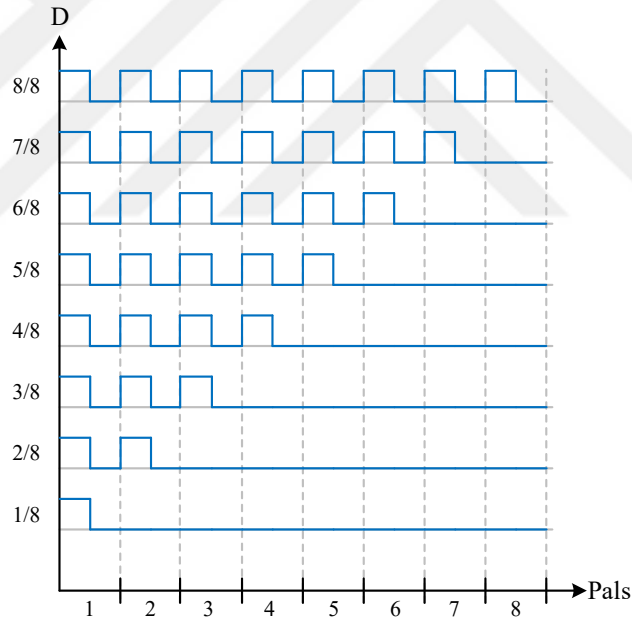
Şekil 3.5. Düzenli DYM için temel lojik devre yapısı.

Kontrol sinyalinin darbe yoğunluk oranı (D) Eşitlik 3.10 ile hesaplanmaktadır. D değeri değiştirilerek silinecek darbe sayısı denetlenmektedir. Rezonans devresinin çıkış gücü, görev oranı ile doğru orantılıdır ve Eşitlik 3.11 kullanılarak hesaplanmaktadır [23].

$$D = \frac{t_{on}}{T_{DYM}} \quad (2.10)$$

$$P_o \cong D \cdot P_{max} \quad (2.11)$$

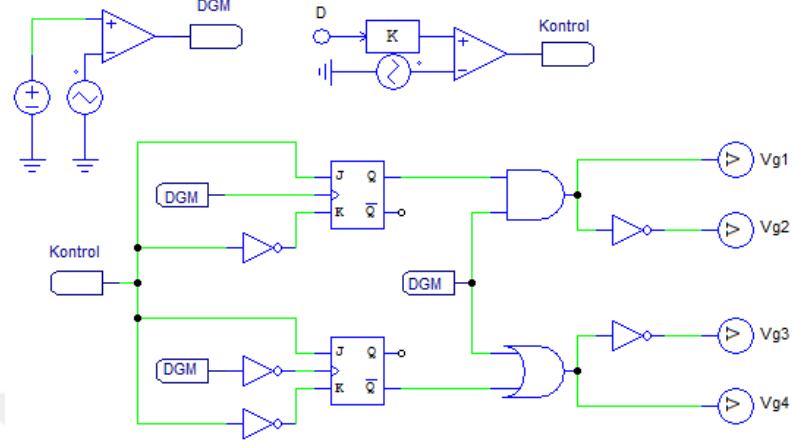
Şekil 3.6’da D değerinin değişimine bağlı darbe silme işlemi, düzenli DYM için gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Düzenli DYM kontrol darbeleri.

Şekil 3.7’de verilen lojik devre kullanılarak anahtar darbelerinin silme işlemi gerçekleştirilmektedir. Fakat tam köprü eviricide DYM yönteminin uygulanabilmesi için Şekil 3.2’de verilen S1-S3 ve S2-S4 anahtarları arasında bir darbelik kayma oluşması gerekmektedir. Kontrol sinyalinin tüm D değerleri için bir darbelik kaymanın korunması gerekmektedir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için JK flip-floplar

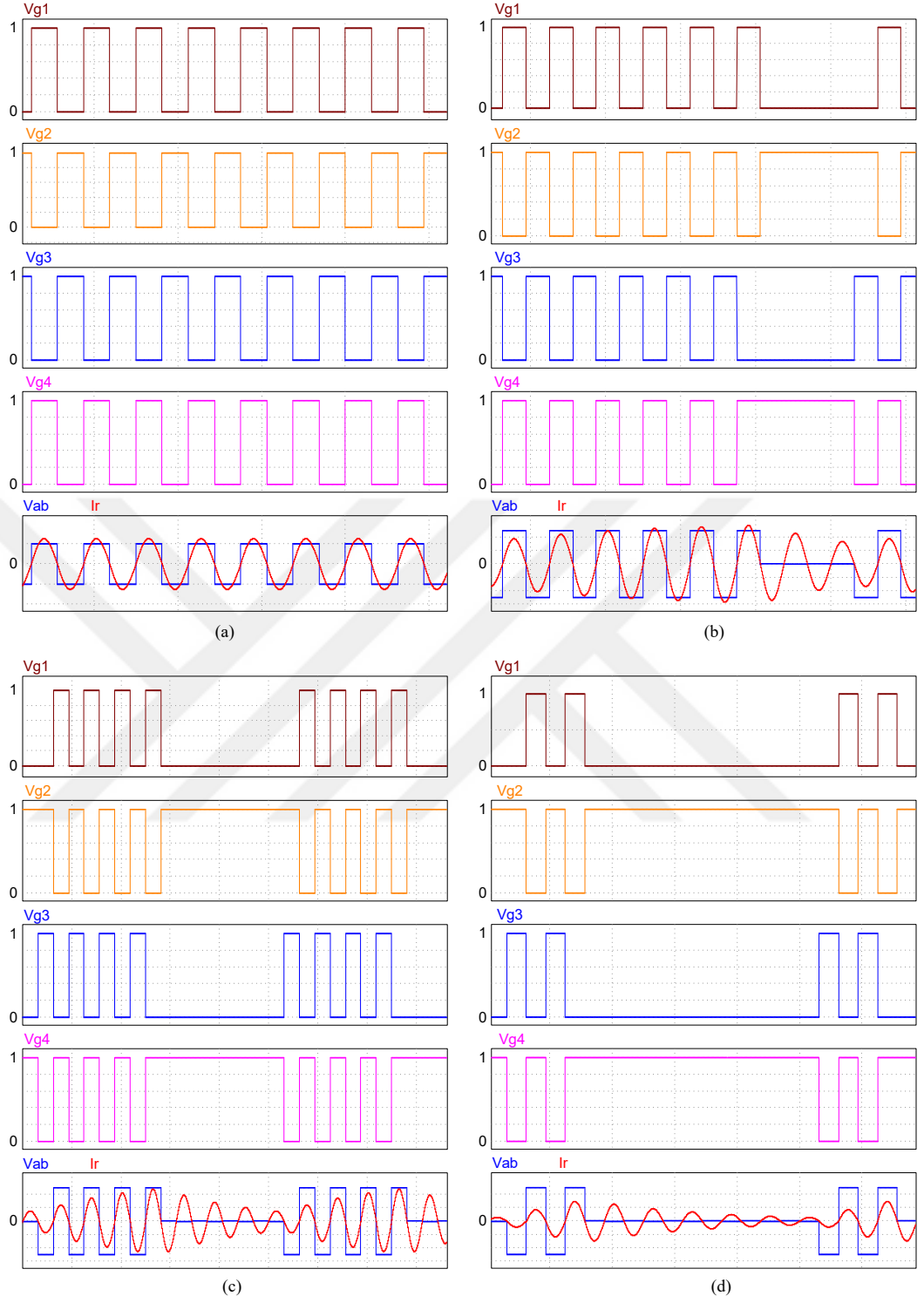
kullanılmaktadır. Şekil 3.6’da tüm anahtarlar için kapı sinyallerinin elde edilmesinde kullanılan lojik devre sunulmaktadır.



Şekil 3.7. Düzenli DYM'nin lojik devresi.

Devrede iki adet JK flip-flop kullanılmaktadır. Üstte bulunan flip-flop'un saat girişine DGM sinyali doğrudan uygulanırken alttaki flip-flop'a DGM sinyali terslenmiş olarak uygulanmaktadır. Böylelikle üst flip-flop DGM sinyalinin yükselen kenarında aktif olurken alt taraftaki flip-flop DGM sinyalinin düşen kenarında aktif olmaktadır. Bu sayede bir darbelik kayma elde edilmektedir.

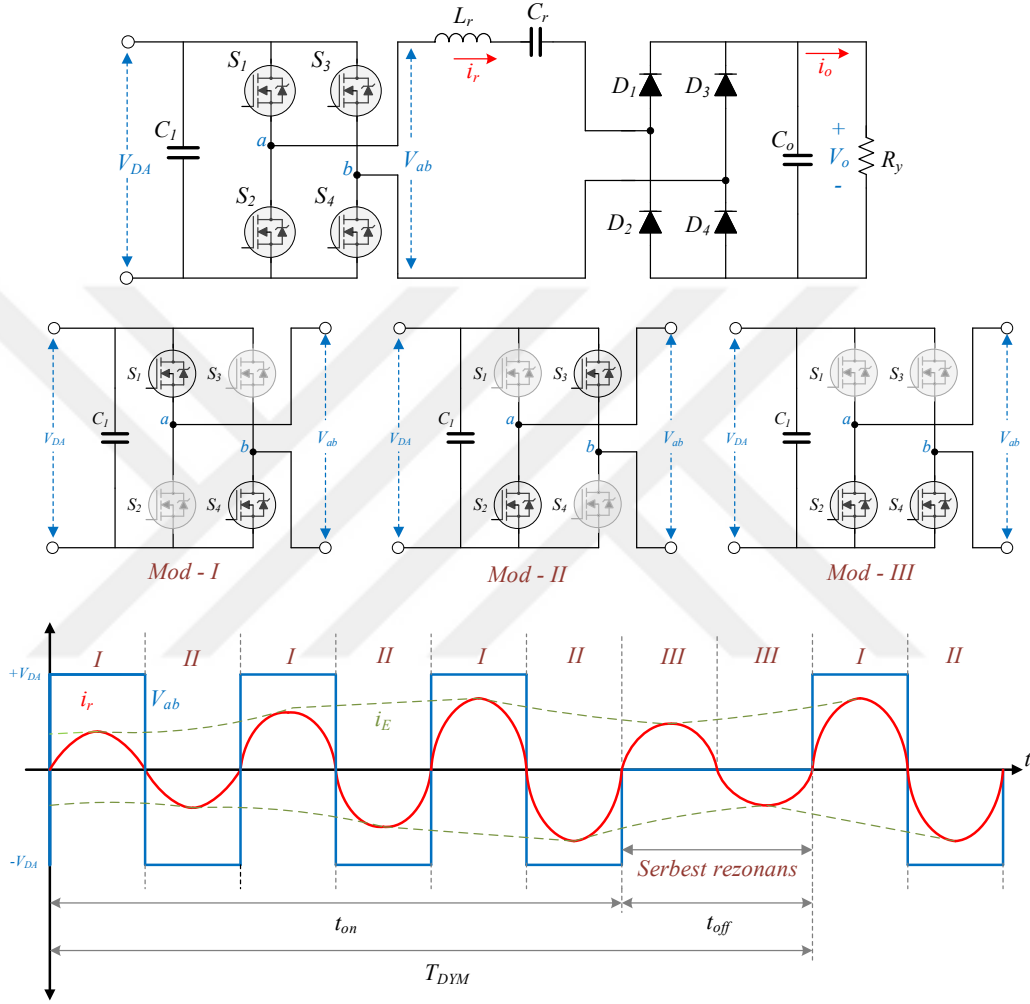
Şekil 3.2’de verilen devreye 8 darbelik düzenli DYM’nin uygulanması ile elde edilen teorik dalga şekilleri Şekil 3.8’de sunulmaktadır. Şekil 3.8 a)’da D değeri 1’dir ve hiçbir anahtarlama darbesi silinmemektedir. Şekil 3.8 b)’de D değeri 0,75’tir. Bu durumda 8 adet anahtarlama darbesinden 2 tanesi silinmektedir. Darbe silme işleminin gerçekleştiği durumda alt anahtarların her ikisi de (S2 ve S4) iletim durumundadır. Şekil 3.8 c)’de D değeri 0,5’tir. 8 anahtarlama sinyalinden 4 tanesi silinmektedir. Şekil 3.8 d)’de D değeri 0,25’tir. 8 anahtarlama darbesinden sadece iki tanesi uygulanmakta geri kalan 6 adet darbe silinmektedir. Rezonans akımı dalga şekli incelendiğinde sönümlü salınımlı olduğu görülmektedir. Rezonans devresinin kalite faktörü yeteri kadar büyük seçildiğinde rezonans akımı sıfır değerine ulaşmadan ikinci periyot başlamaktadır. Eğer tasarlanan sistemde kalite faktörü yeteri kadar büyük seçilmez ise rezonans akımı sıfır değerine ulaşır ve akımın sürekliliği kaybolur.



Şekil 3.8. Düzenli DYM ile kontrol edilen tam köprü seri rezonans devresine ait dalga şekilleri (a) $D=1$, (b) $D=0,75$, (c) $D=0,5$, (d) $D=0,25$.

3.2.3.2. Düzensiz DYM

Şekil 3.9’da DYM yöntemine ait güç anahtarlarının çalışma modları, evirici çıkış gerilimi ve rezonans akımının teorik eğrileri sunulmaktadır [37].



Şekil 3.9. DYM güç denetim yöntemine ait anahtarlama koşulları ile teorik gerilim ve akım eğrileri.

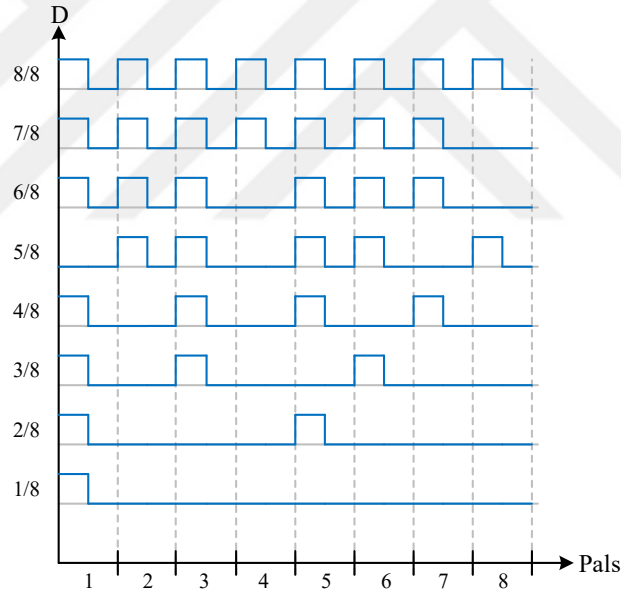
Şekil 3.9’da Mod-1 ve Mod-2 eviricinin normal çalışma şeklini göstermektedir. Mod-3 durumunda evirici çıkış gerilimi sıfır değerini almaktadır. Mod-3 anahtarlara uygulanan darbelerin silindiği durumu ifade etmektedir. Grafikten görüldüğü üzere bu durumda rezonans akımı sönümlü salınım yapmaktadır. Sıfırlanan darbe sayısı arttıkça rezonans akım değeri azalmakta ve yüke aktarılan güç değeri de azalmaktadır. Darbe

silme işlemi uygulanmadığı takdirde tüm güç yüke aktarılmaktadır. Şekil 3.9’da i_r akımı rezonans akımını, i_E ise rezonans akımını çevreleyen zarfı göstermektedir. Eşitlik 3.12 ve 3.13’de sırasıyla rezonans akımı ve ortalama güç eşitliği verilmektedir [37].

$$i_r(t) = i_E(t) \cdot \sin \omega_r t \quad (2.12)$$

$$P = \frac{1}{T_{DYM}} \int_0^{T_{DYM}} V_{ab}(t) \cdot i_r(t) \cdot dt \quad (2.13)$$

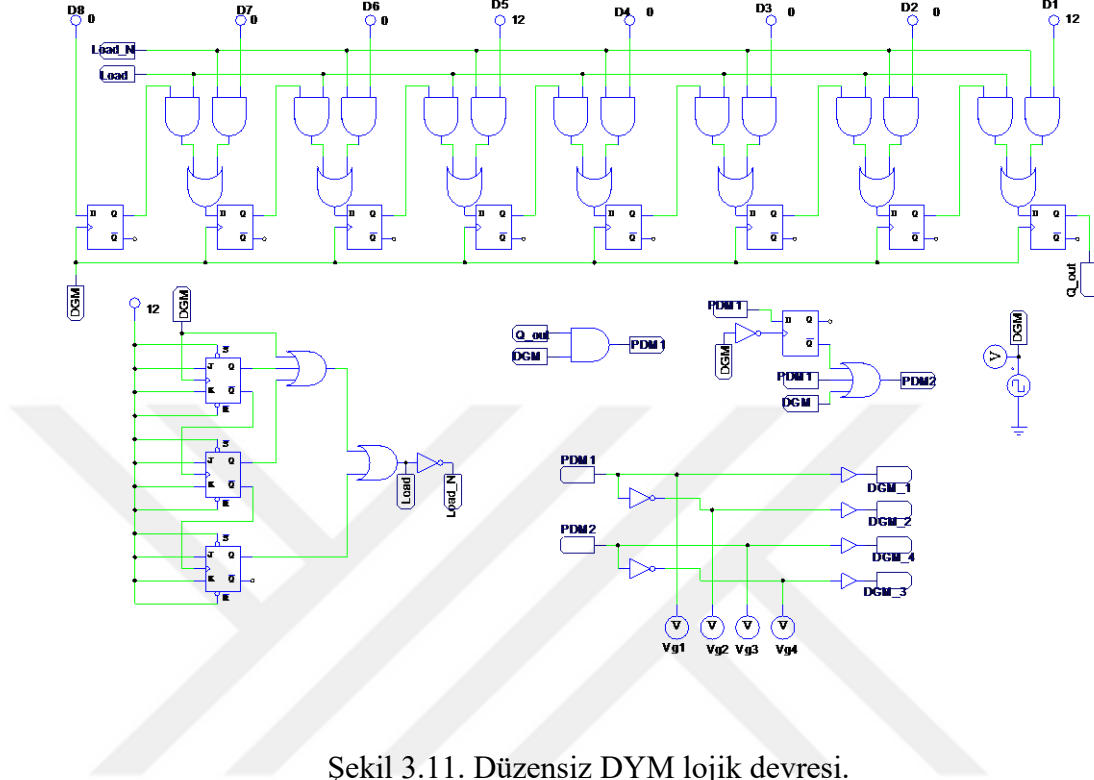
Şekil 3.10’da D değerinin değişimine bağlı darbe silme işlemi, düzensiz DYM için gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Düzensiz DYM kontrol darbeleri.

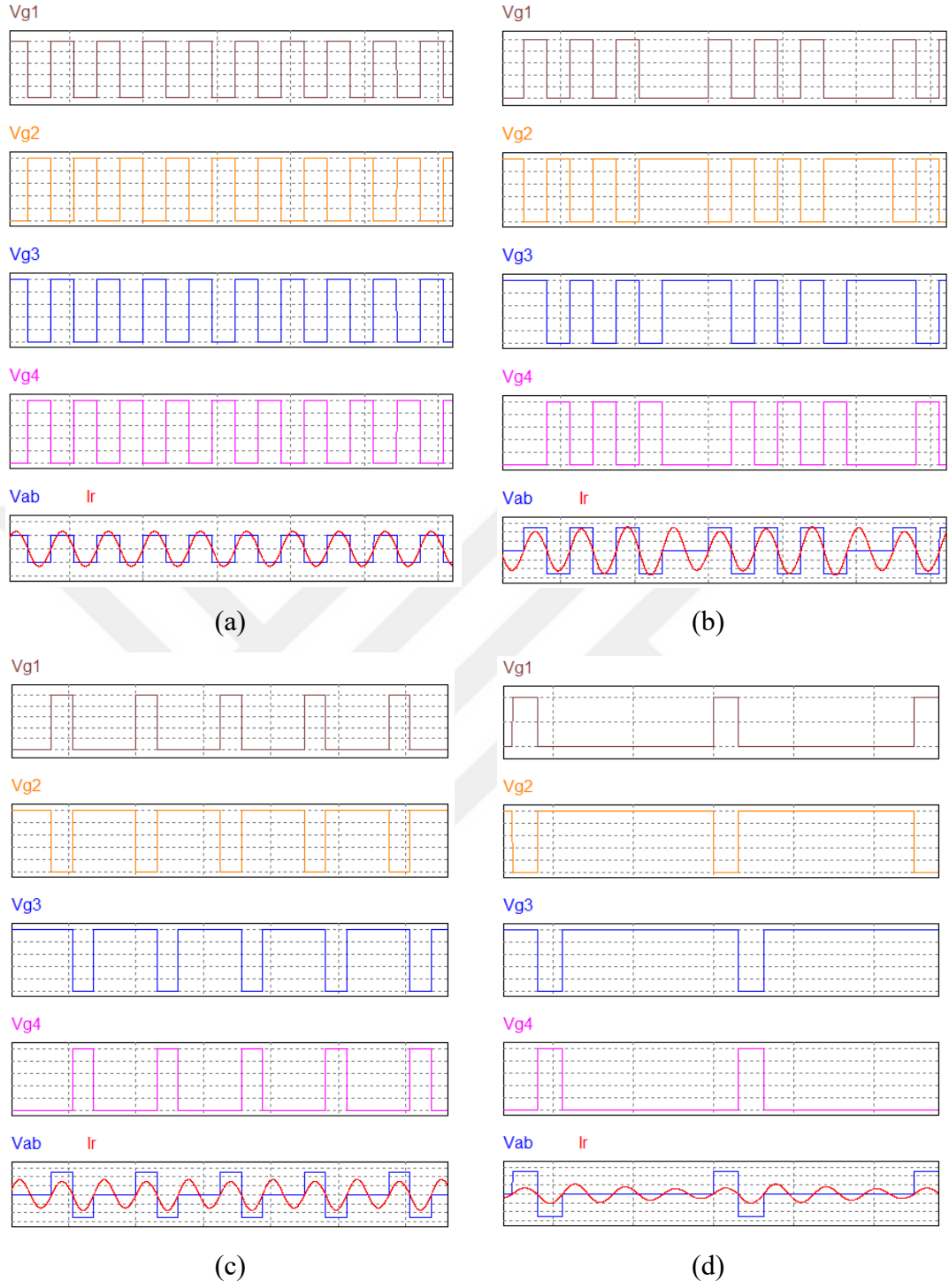
Düzensiz DYM’ye ait lojik devre yapısı 8 darbelik döngü için Şekil 3.11’de verilmektedir. Düzensiz DYM’de lojik devre iki temel kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım JK flip-floplar ile oluşturulan frekans bölücüdür. Frekans bölücünde kullanılan flip-flop sayısı DYM darbe döngüsüne bağlıdır. 8 darbelik döngü için 3 adet flip-flop kullanılmaktadır ($n=3, 2^3=8$). Benzer şekilde 16 darbelik döngü için de 4 adet flip-flop

kullanılmaktadır. Lojik devrenin ikinci kısmı ise paralel giriş seri çıkış kaydırmalı kaydediciden oluşmaktadır.



Şekil 3.11. Düzensiz DYM lojik devresi.

Düzensiz DYM'nin uygulanmasında Şekil 3.10'da verilen anahtarlama deseni önceden bir tabloya kaydedilmektedir. Tabloda bulunan DYM verileri, D değerine göre D1-D8 paralel girişlerine uygulanmaktadır. Seri çıkıştan elde edilen anahtarlama sinyali S1 MOSFET'inin kapı sinyalini (V_{g1}) oluşturmaktadır. V_{g1} sinyalinin terslenmesi sayesinde V_{g2} kapı sinyali elde edilmektedir. V_{g1} sinyaline, D tipi flip-flop kullanılarak bir darbelik kaydırma uygulanarak V_{g3} anahtarlama sinyali elde edilmektedir. V_{g3} terslenerek V_{g4} sinyali oluşturulmaktadır. Şekil 3.9'da verilen devreye 8 darbelik düzensiz DYM'nin uygulanması ile elde edilen teorik dalga şekilleri Şekil 3.12'de sunulmaktadır.



Şekil 3.12. Düzensiz DYM ile kontrol edilen tam köprü seri rezonans devresine ait dalga şekilleri (a) $D=1$, (b) $D=0,75$, (c) $D=0,5$, (d) $D=0,25$.

Şekil 3.12 incelendiğinde düzensiz DYM yönteminde darbe silme işleminin belirli bir simetri ile gerçekleştiği görülmektedir. Simetrik yapı sayesinde rezonans akımının tepe değeri düzenli DYM'ye göre daha düşüktür. Ayrıca gerilim stresi ve harmonik

bileşenler daha düşük seviyededir [23]. Düzensiz DYM'nin lojik devre yapısı düzenli DYM'ye göre daha karmaşıktır. Ayrıca düzensiz DYM'de kullanılan darbe sayısı arttıkça devrede kullanılan lojik eleman sayısı ve devre karmaşıklığı artacaktır. Tüm bu hususlar dikkate alındığında donanımsal olarak lojik devrenin tasarımı zorlu bir süreçtir. Ayrıca devre tasarımında gerçekleşen bir hata nedeniyle mevcut donanım değiştirilip yeni bir tasarımın ve üretimin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Darbe silme işlemi gelişmiş mikrodenetleyiciler ile yazılımsal olarakta gerçekleştirilebilir. Böylelikle karmaşık devre yapısına ihtiyaç duyulmadan anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

Rezonans DA-DA güç dönüştürücüleri yumuşak anahtarlama koşullarında çalışabildiğinden dolayı anahtarlama kayıpları düşük verimleri yüksektir. Güç anahtarlarının anahtarlanması esnasında yüksek seviyedeki dv/dt ve di/dt yayılan ve iletilen EMG'lere neden olmaktadır. EMG özellikle sinyal devrelerinde bozucu etkiye neden olarak denetim sisteminin çalışmasını olumsuz etkilemektedir. Yumuşak anahtarlama koşullarında çalışma ile EMG seviyesi minimize edilmektedir [7,37]. Ayrıca yumuşak anahtarlama sayesinde güç dönüştürücü devresi yüksek frekanslarda çalışabilir. Yüksek frekansta çalışma sayesinde devrede kullanılan pasif devre elemanlarının boyutu küçülerek devrenin güç yoğunluğu arttırılıp maliyet azaltılabilmektedir. Rezonans dönüştürücülerin güç kontrolünde kullanılan DYM yöntemi, tüm yük aralığında rezonans frekansında veya rezonans frekansına yakın frekanslarda çalışmayı mümkün hale getirerek anahtarlama kayıplarını azaltmaktadır [22,23].

BÖLÜM 4

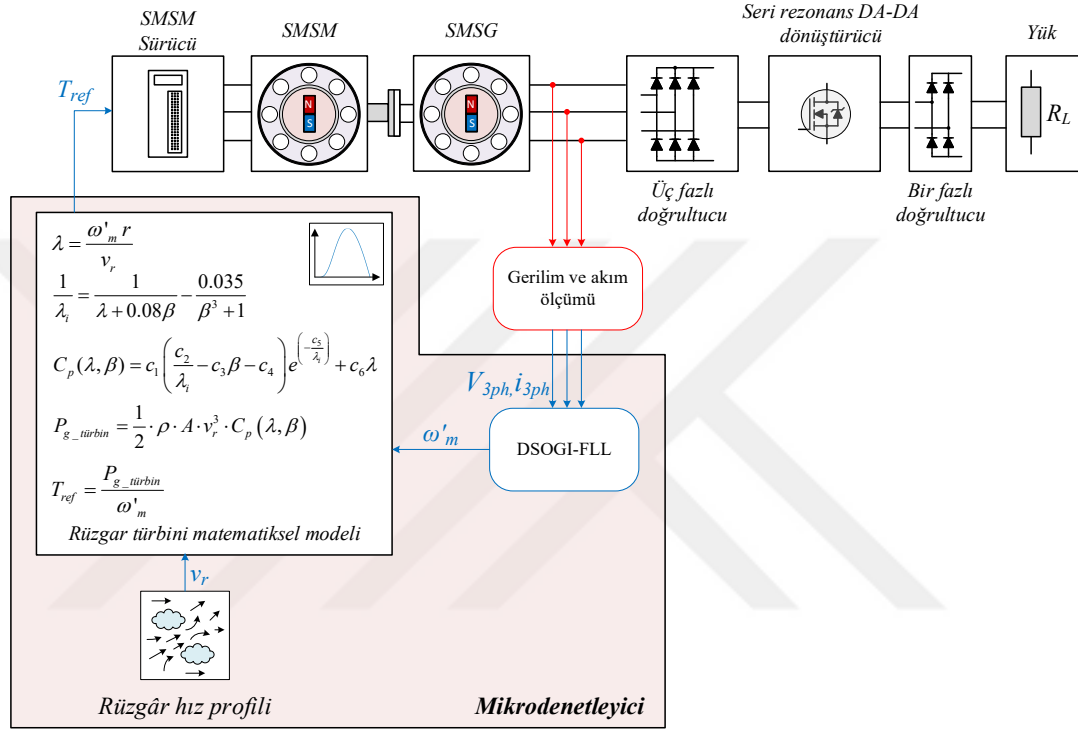
RÜZGÂR TÜRBİNİ EMÜLATÖRÜ VE SENSÖRSÜZ DENETİM

Rüzgâr türbini emülatörü, gerçek rüzgâr türbinlerinin davranışlarını ve dinamiklerini laboratuvar ortamında taklit etmek amacıyla geliştirilen bir sistemdir. Bu sistem, farklı rüzgâr hızları ve yük koşulları altında rüzgâr türbininin performansını ve kontrol algoritmalarının etkinliğini değerlendirme imkânı sağlar. Rüzgâr enerjisi sistemlerinde maksimum güç noktası takibi türbinin verimli ve güvenilir biçimde işletilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel MGNT yöntemlerinde mekanik hız ölçümü için sensörler kullanılır; ancak bu sensörlerin maliyet, bakım ve güvenilirlik açısından çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Bu sebeple, mekanik sensör ihtiyacını ortadan kaldıran sensörsüz denetim teknikleri önem kazanmıştır. Bu bağlamda, ÇİDGİ-FKD algoritması, mekanik hız ve güç değerlerinin hassas ve güvenilir bir şekilde belirlenmesini sağlayan önemli avantajlar sunmaktadır. Bu bölümde, rüzgâr türbini emülatörü temel alınarak geliştirilen sensörsüz denetim yaklaşımı ve bu amaçla kullanılan ÇİDGİ-FKD algoritmasının etkinliği detaylı olarak incelenmektedir.

4.1. RÜZGÂR TÜRBİNİ EMÜLATÖRÜ

Rüzgâr türbini emülatörü rüzgâr türbinin dinamik davranışını laboratuvar ortamında modellemeye yarayan sistemlerdir. Gerçek rüzgâr türbinin yerine onun karakteristiğini yansıtacak bir motor ve sürücüsü kullanılarak dış ortamdan bağımsız olarak deneysel çalışma gerçekleştirilebilmektedir. Bu sistemlerin gerçekleştirilmesinde farklı motor yapıları tercih edilebilse de genellikle DA motorlar denetimlerinin kolay olması nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır. Rüzgâr türbininin aerodinamik modeli mikrodenetleyici veya dijital sinyal işleyici içerisine yazılımsal olarak girilerek motor hız ve moment bilgileri kullanılarak türbin davranışı yansıtılabilmektedir. Tez çalışması kapsamında kullanılan iki adet sabit mıknatıslı senkron makinadan biri emülatörde kullanılan motor olarak, diğeri de REDS'nin generatörü olarak

kullanılmaktadır. Eşitlik 2.3 ile verilen aerodinamik model kullanılarak türbinin belirlenen mekanik hız değerinde hangi moment değeri ile dönmesi gerektiği bilgisi mikrodenetleyicide işlenerek motor sürücüyü referans moment olarak gönderilmektedir. Şekil 4.1’de tasarlanan REDS ve rüzgâr türbini emülatörüne ait denetim blok şeması sunulmaktadır.



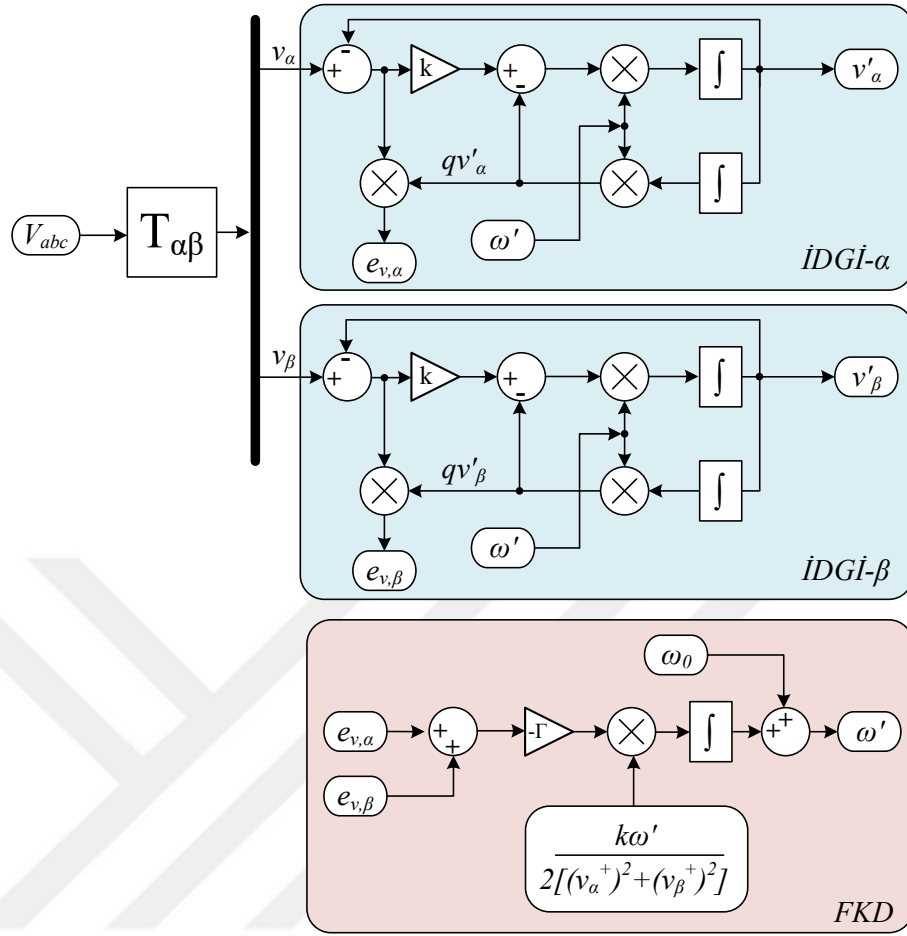
Şekil 4.1. Rüzgâr türbini emülatörü denetim yapısına ait blok gösterim.

Şekil 4.1 incelendiğinde emülatörün denetimini gerçekleştiren mikrodenetleyiciye rüzgâr hız profilinin ve mekanik hız bilgisinin giriş verileri olarak girildiği görülmektedir. Bu bilgiler aerodinamik modelde işlenerek o andaki mekanik hız değerine karşılık gelen referans moment değeri tespit edilmektedir. Elde edilen bu referans moment değeri motor sürücüyü gönderilerek motorun bu değerde çalıştırılması sağlanmaktadır. Yük değerine bağlı olarak verilen referans momenti anlık olarak değişecek ve Şekil 4.1’ de sembolik olarak gösterilen türbin hız-moment eğrisi üzerindeki değerlerin dışında çalışma gerçekleşmeyecektir. Bu sayede motorun ürettiği mekanik güç, sanki bir rüzgâr türbiniymiş gibi davranacaktır.

Emülatörün giriş verisini oluşturan mekanik hız bilgisi, enkoder ile ölçülebilmektedir. Tasarlanan sistemin güvenilirliğini arttırmak ve kurulum ile bakım maliyetlerini azaltmak adına hareketli parçalara sahip olan mekanik sensörler kullanmak yerine generatör çıkış büyüklükleri kullanılarak hız tahmini gerçekleştirilmektedir. Bu denetim biçimi literatürde sensörsüz denetim olarak adlandırılmaktadır.

4.2. ÇİDGİ-FKD

FKD ve Frekans Kitleme Döngüsü (FRKD), rüzgâr türbinlerinin sensörsüz denetiminde yaygın olarak kullanılan iki temel yöntemdir. FKD, giriş sinyalinin fazını belirleyerek senkronizasyon sağlarken, FRKD doğrudan frekans bilgisini takip ederek sistemin adaptif çalışmasını sağlar. Ancak, bu geleneksel yöntemler özellikle düşük dinamik performans ve ani değişimlere karşı hassasiyet gibi bazı sınırlamalara sahiptir. ÇİDGİ-FKD, giriş sinyalini ortogonal bileşenlerine ayırarak daha hassas faz ve frekans takibi yapar. Bu sayede, ani yük değişimlerine, harmonik bozulmalara ve dengesiz çalışma koşullarına karşı daha dayanıklı bir performans sergileyerek, geleneksel FKD ve FRKD yöntemlerine kıyasla daha güvenilir ve hızlı bir dinamik yanıt sunar. Şekil 4.2’de ÇİDGİ-FKD yapısı gösterilmektedir. “ v_α ” ve “ v_β ” bileşenleri, üç fazlı gerilim büyüklüklerinin “ v_{abc} ” Clarke dönüşümü “ $T_{\alpha\beta}$ ” ile elde edilir. Bu iki gerilim bileşeni, ikinci dereceden genelleştirilmiş integratör (İDGİ) ortogonal işaret üreticisinin giriş değerlerini oluşturur. FKD tarafından hesaplanan anlık açısal frekans ω' olarak ifade edilir. “ v'_α ” ve “ qv'_α ” ile “ v'_β ” ve “ qv'_β ”, ortogonal çıkış işaretleridir. Frekans hata sinyalleri “ $e_{v,\alpha}$ ” and “ $e_{v,\beta}$ ” olarak gösterilmektedir. İDGİ bloğunun zaman tepkisini ve filtreleme yeteneğini etkileyen ayarlanabilir kazanç değeri “ k ” ile ifade edilmektedir [56].



Şekil 4.2. ÇİDGİ-FKD blok diyagramı.

İDGİ'ye ait kapalı çevrim transfer fonksiyonu Eşitlik 4.1 ve 4.2 ile verilmektedir.

$$D_{\alpha,\beta}(s) = \frac{v'_{\alpha,\beta}(s)}{v_{\alpha,\beta}} = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (3.1)$$

$$Q_{\alpha,\beta}(s) = \frac{qv'_{\alpha,\beta}(s)}{v_{\alpha,\beta}} = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (3.2)$$

Eşitlik 4.1 ve 4.2'den de görülebileceği gibi, $D(s)$ bir bant geçiren filtre, $Q(s)$ ise bir alçak geçiren filtredir. Şekil 4.2'de gösterilen FKD bloğunda, Γ değeri FKD'in kazancını temsil etmektedir. Giriş sinyalinin temel frekansı ω olduğunda, FKD'in transfer fonksiyonu ve yerleşme süresi $ts_{(FKD)}$, Eşitlik 4.3 ile hesaplanmaktadır [57].

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{\Gamma}{s + \Gamma} \rightarrow t_{s(FKD)} \approx \frac{5}{\Gamma} \quad (3.3)$$

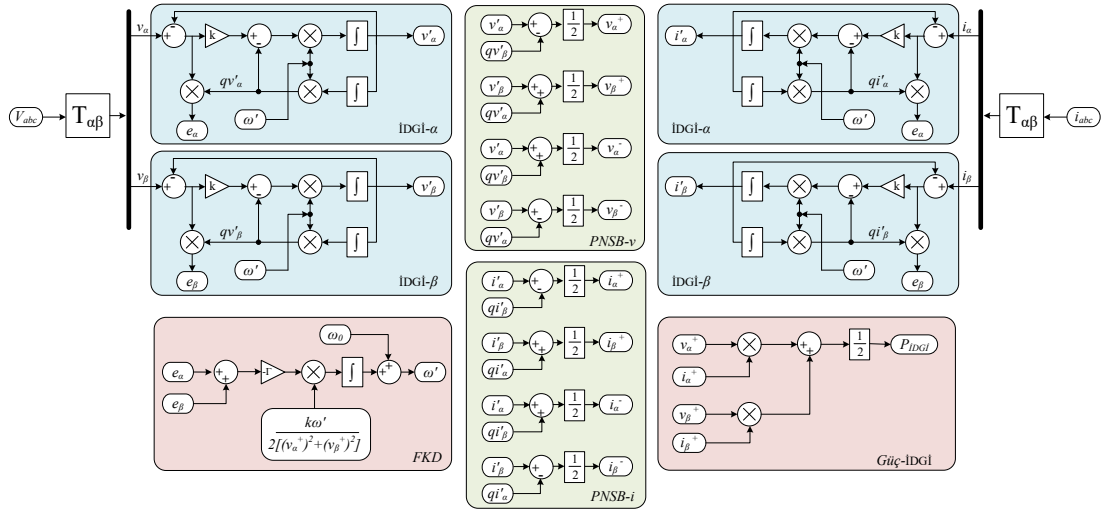
ω' ve ω arasındaki ilişki, frekans hata değerleri $ev_{,\alpha}$ ve $ev_{,\beta}$ 'nin işaretini belirler. $\omega' > \omega$ olduğunda ev pozitif, $\omega' < \omega$ olduğunda negatif ve $\omega' = \omega$ olduğunda sıfırdır. Negatif kazançca ($-\Gamma$) sahip integral denetleyici, ω' değerini ω 'ya eşitleyecek şekilde düzenler. Frekans senkronizasyonunun başlangıç koşullarını düzenlemek için algoritmaya sabit ω_0 değeri eklenmiştir. FKD kazancı, frekans adaptasyon döngüsünün tepkisini doğrusal hale getirmek amacıyla Eşitlik 4.4 ile normalize edilmiştir [58].

$$\frac{k\omega'}{2 \left[\left(v_{\alpha}^+ \right)^2 + \left(v_{\beta}^+ \right)^2 \right]} \quad (3.4)$$

ÇİDGİ-FKD yapısıyla, generatör çıkış voltajının elektriksel frekansı (ω') tahmin edilir. Tahmini generatör mekanik hızı (ω'_m) belirlemek için, ω' toplam kutup çiftleri sayısına (p) bölünerek, Eşitlik 4.5'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\omega'_m = \frac{\omega'}{p} \quad (3.5)$$

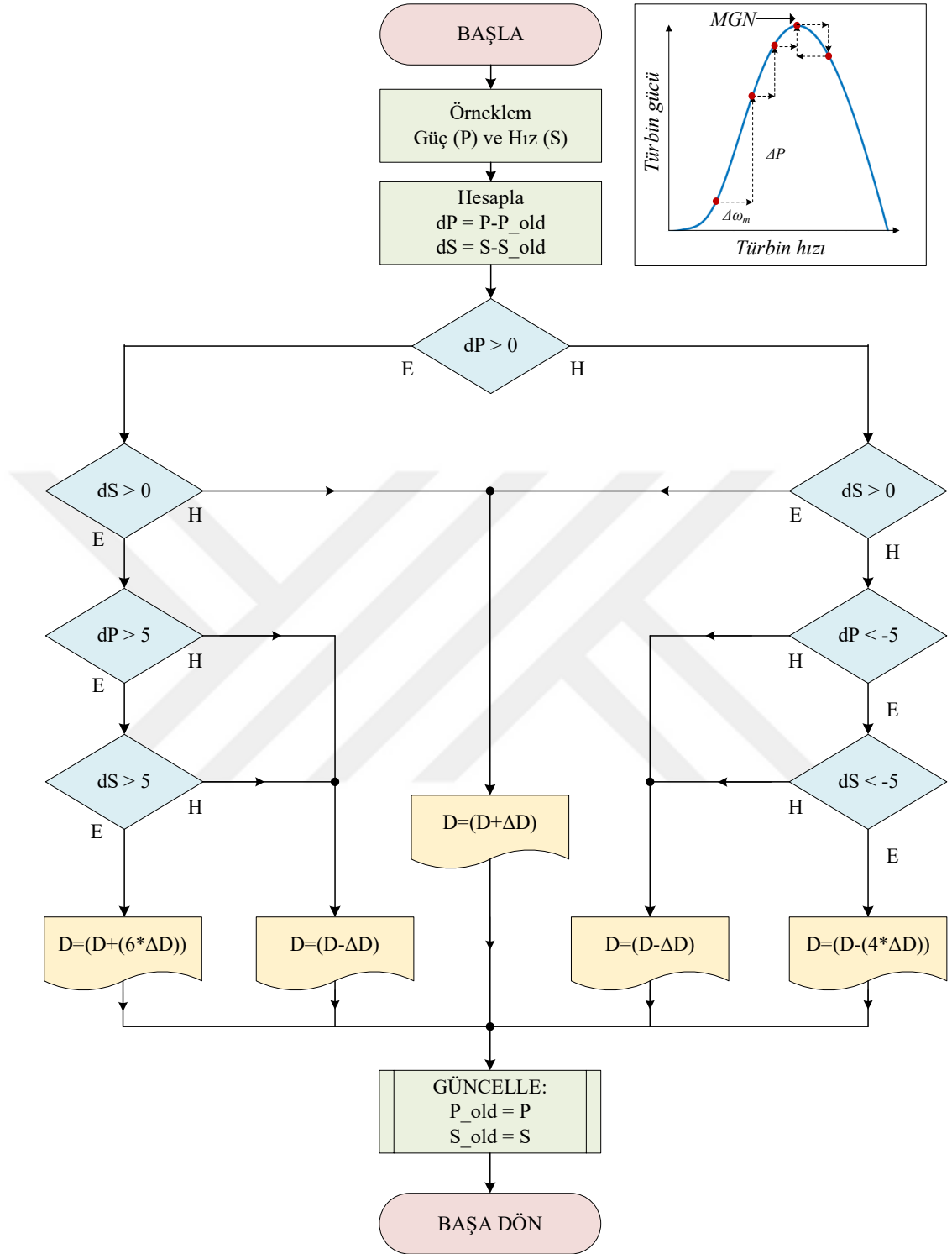
Generatörün aktif gücünün temel bileşenini hesaplamak için, ÇİDGİ üç fazlı akım ve gerilim büyüklüklerine ayrı ayrı uygulanır. Elde edilen α ve β bileşenleri kullanılarak pozitif sıralı bileşenler (PSB) belirlenir. Temel bileşenin anlık aktif gücü, elde edilen pozitif bileşenlere p-q teorisi uygulanarak hesaplanır [59,60]. Pozitif-negatif sıralı bileşenlerin (PNSB) hesaplama ve güç tahmin algoritmalarına ait blok diyagram Şekil 4.3'te sunulmaktadır.



Şekil 4.3. ÇİDGİ-FKD ve güç hesaplama blok diyagramı.

4.3. D&G MGNT ALGORİTMASI

Önerilen D&G yönteminde, algoritmanın giriş verisi olarak tahmini generatör mekanik hızı ω'_m ve generatör aktif güç değerinin tahmini temel bileşeni (P_{IDGI}) kullanılır. Algoritmanın çıkış verisi, rezonans dönüştürücüsünün DYM oranı (D) ile temsil edilir. Rezonans dönüştürücüsünün yüke aktardığı güç, Eşitlik 3.13'te ifade edildiği gibi D değeri ile orantılıdır. Her belirli rüzgâr hızı değeri için, rüzgâr türbininin karşılık gelen bir maksimum güç noktası vardır. D&G algoritması, güç ve hızdaki değişikliklere göre D değerini artırarak veya azaltarak sistemin MGN'de çalışmasını sürdürür. D'deki değişiklik, ΔD olarak adlandırılır ve algoritmanın adım büyüklüğünü temsil eder. Rüzgâr hızında ani değişiklikler olduğunda sistemin performansını iyileştirmek için, ΔD değeri değişken bir adım yöntemiyle kullanılır. Önerilen D&G algoritması Şekil 4.4'te sunulmaktadır. Değişken adım değerine ait katsayılar yapılan deneysel çalışmalar ile tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Önerilen D&G MGNT algoritması.

BÖLÜM 5

BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu bölümde, küçük güçlü rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri için tasarlanan güç dönüştürücüsünün performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen benzetim çalışması sunulmaktadır. Çalışmada, sistemin farklı rüzgâr hızlarında MGNT etkin bir şekilde gerçekleştirme kabiliyeti, güç dönüşüm sürecindeki verimlilik ve yumuşak anahtarlama koşullarının sağlanabilirliği analiz edilmiştir. Benzetim çalışması, sistemin teorik analizleri ile deneysel doğrulama süreci arasında bir köprü işlevi görmekte; bu kapsamda, geliştirilen kontrol algoritmaları ve güç elektroniği devrelerinin, belirlenen çalışma koşullarında hedeflenen performansı sağlayıp sağlamadığı test edilmektedir.

Benzetim çalışması, sistem bileşenlerinin matematiksel modellerine dayanarak oluşturulan sanal devre üzerinden, PSIM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetimde, rüzgâr türbini aerodinamik modeli, generatör, güç dönüştürücüsü ve kontrol yapıları gerçek sistemde kullanılan parametreler ile modellenerek, MGNT algoritması olan D&G yönteminin başarımı incelenmiştir. Ayrıca, ÇİDĞİ-FKD algoritması ve aktif reaktif güç teorisi kullanılarak sensörsüz hız tahmininin doğruluğu test edilmiştir.

Benzetim çalışmasının temel amacı, sistemin farklı rüzgâr hızları altında çalışma performansını değerlendirmek, yumuşak anahtarlama koşullarının korunup korunmadığını incelemek ve tasarlanan SRDA dönüştürücüsünün yüksek güç yoğunluğu sağlama kabiliyetini doğrulamaktır. Bu doğrultuda, çeşitli rüzgâr hızları için benzetim sonuçları analiz edilerek sistemin verimliliği ve güvenilirliği irdelenmiştir.

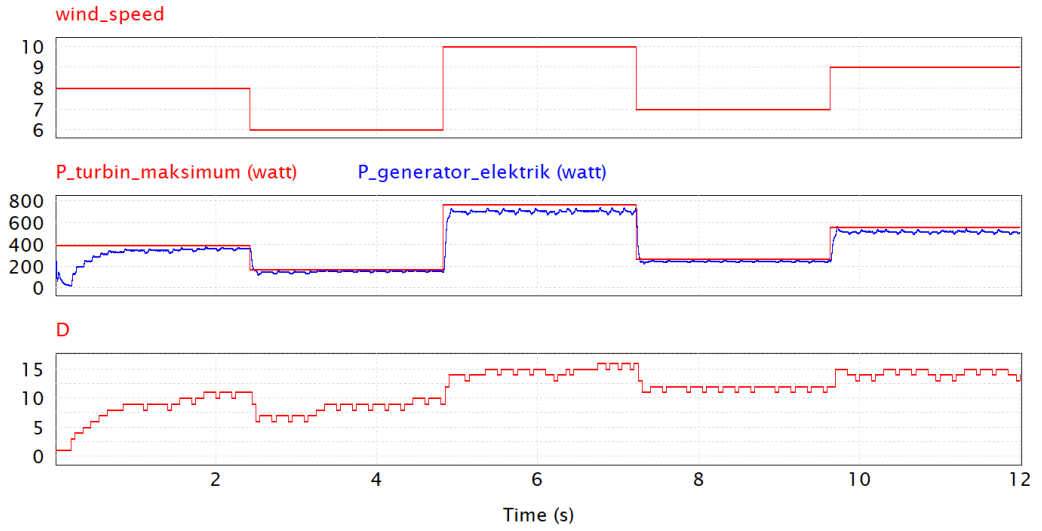
5.1. ÖNERİLEN RÜZGÂR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Önerilen rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin benzetiminde rüzgâr türbini, SMSG, üç fazlı diyotlu doğrultucu, tam köprü seri rezonans DA-DA dönüştürücü ve direnç yükü kullanılmıştır. Benzetimde kullanılan devre modeli Şekil 5.1’de sunulmaktadır. Uygulama devresinde kullanılan ekipmanlara ve devrelere ait parametreler benzetimde kullanılan devre modelinde de kullanılmıştır. Rüzgâr türbinine, SMSG’ye ve SRDA’ya ait parametreler Çizelge 5.1’de sunulmaktadır. Benzetimde kullanılan rüzgâr türbinin aerodinamik modeli Eşitlik 2.3 ile tanımlanmaktadır.

Çizelge 5.1. Türbin, generatör ve SRDA parametreleri.

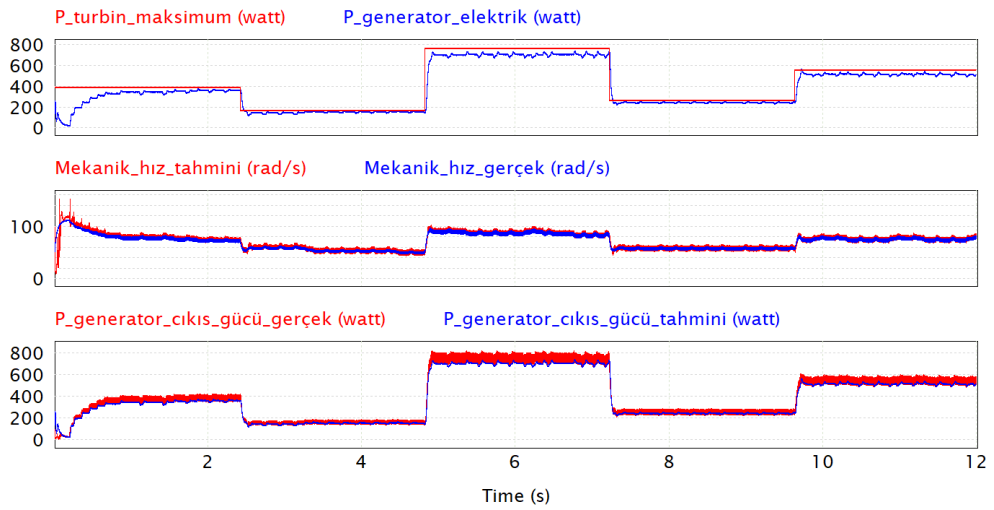
<i>Parametre</i>	<i>Sembol</i>	<i>Değer</i>	<i>Birim</i>
<i>Rüzgâr Türbini</i>			
Türbin kanat uzunluğu	R_T	0,95	m
Optimal kanat ucu hız oranı	λ_{opt}	8,1	-
Türbin maksimum mekanik gücü (12m/s rüzgâr hızı için)	$P_{g_türbin}$	1,3	kW
Türbin güç katsayısı maksimum	C_{p_max}	0,48	-
Hava yoğunluğu	ρ	1,13	kg/m ³
<i>SMSG</i>			
Tek kutup sayısı	p	8	-
Anma güç değeri	P_m	2,3	kW
Anma hızı	n_m	1500	d/dk
Stator direnci	R_s	0,61	Ω
d-eksen endüktansı	L_d	0,78	mH
q-eksen endüktansı	L_q	0,78	mH
<i>SRDA</i>			
Rezonans frekansı	f_r	150	kHz
Rezonans Endüktansı	L_r	150	μH
Rezonans Kapasitörü	C_r	7,5	nF

Tasarlanan sistemde rüzgâr türbini, dışarıdan girilen rüzgâr hız bilgisine ve aerodinamik modele göre hareket etmektedir. Generatörden elde edilen üç fazlı alternatif akım, üç fazlı diyotlu doğrultucu ile doğrultularak SRDA dönüştürücünün girişine uygulanmaktadır. SRDA dönüştürücünün güç denetimi 16 darbeli düzensiz DYM ile gerçekleştirilmektedir. Uygulanan DYM algoritmasında D değerinin belirlenmesi D&G MGNT algoritması tarafından gerçekleştirilmektedir. D&G algoritmasının türbin gücünde ve hızında meydana gelen değişiklikleri algılayarak sistemin, uygulanan rüzgâr hızı değerindeki MGN’de çalıştıracak şekilde D değerini belirlemektedir. Türbin gücü ve hızı mekanik sensörler aracılığıyla ölçülebileceği gibi turbine bağlı olan generatörün elektriksel çıkış büyüklüklerinden de tespit edilebilmektedir. SMSG çıkışına bağlanan üç fazlı kontrolsüz doğrultucu generatörden çekilen akımın ve dolaylı olarak generatör çıkış gerilimlerinin düşük frekanslı harmonikler (5., 7., 11., 13. gibi) içermesine neden olmaktadır. Bu harmonikli yapı, generatör çıkışından ölçülen gerilim ve akım değerlerinin ve buna bağlı olarak hesaplanan güç ve hız değerlerinin doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Tasarlanan sistemde generatör çıkış gücü ve generatörün elektriksel açısal hızını (kutup sayısına bağlı olarak generatörün mekanik hızını) tespit etmek amacıyla ÇİDĞİ-FKD algoritması kullanılmıştır. Algoritma generatör gerilimi ve akımının temel bileşenlerini ve temel bileşenin elektriksel açısal hızını tespit etmektedir. Bu değerler aktif-reaktif güç teorisine uygulanarak generatörün elektriksel çıkış gücü tahmin edilmektedir ve Şekil 4.3’te güç hesabına ait blok şema sunulmaktadır. Her iki değişken D&G algoritmasının giriş verilerini oluşturmaktadır. D&G algoritması D değerinin değişimine göre güç ve hız değerlerindeki değişimi gözlemekte ve bir sonraki D değerini, sistemi MGN’ye yakınlaştırmak için düzenlemektedir. Şekil 5.2’de farklı rüzgâr hızları için türbin maksimum güç değeri, generatör çıkış gücü ve D değerinin değişimi sunulmaktadır. Tasarlanan rezonans devresinin anahtarlama frekansı 150kHz olarak belirlenmiştir. Anahtarlama frekansının yüksek olması ve benzetiminin başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi için benzetimin adım zamanı 5µs olarak seçilmiştir. Benzetim süresinin uzunluğunu kısaltmak ve bilgisayarın RAM kapasitesini aşmamak adına türbin mekanik zaman sabiti on kat küçük olacak şekilde gerçek uygulamaya göre azaltılmıştır.



Şekil 5.2. Değişken rüzgar hızları altında türbinin mekanik çıkış gücü, generatör elektriksel çıkış gücü ve D değerindeki değişimlere ait grafikler.

Şekil 5.2’de rüzgâr hızının değişimine göre türbin maksimum giriş gücü ve generatör elektriksel çıkış gücü eğrileri görülmektedir. Aynı zamanda grafikte D&G algoritmasının MGN’ye ulaşmak için D değerini değiştirdiği anlık olarak görülmektedir. Şekil 5.3’te Şekil 5.2’de sunulan rüzgâr hız profiline göre tahmini ve gerçek generatör hız ve generatör elektriksel çıkış gücü eğrileri sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde hızın ve gücün çok az bir hata ile başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir.



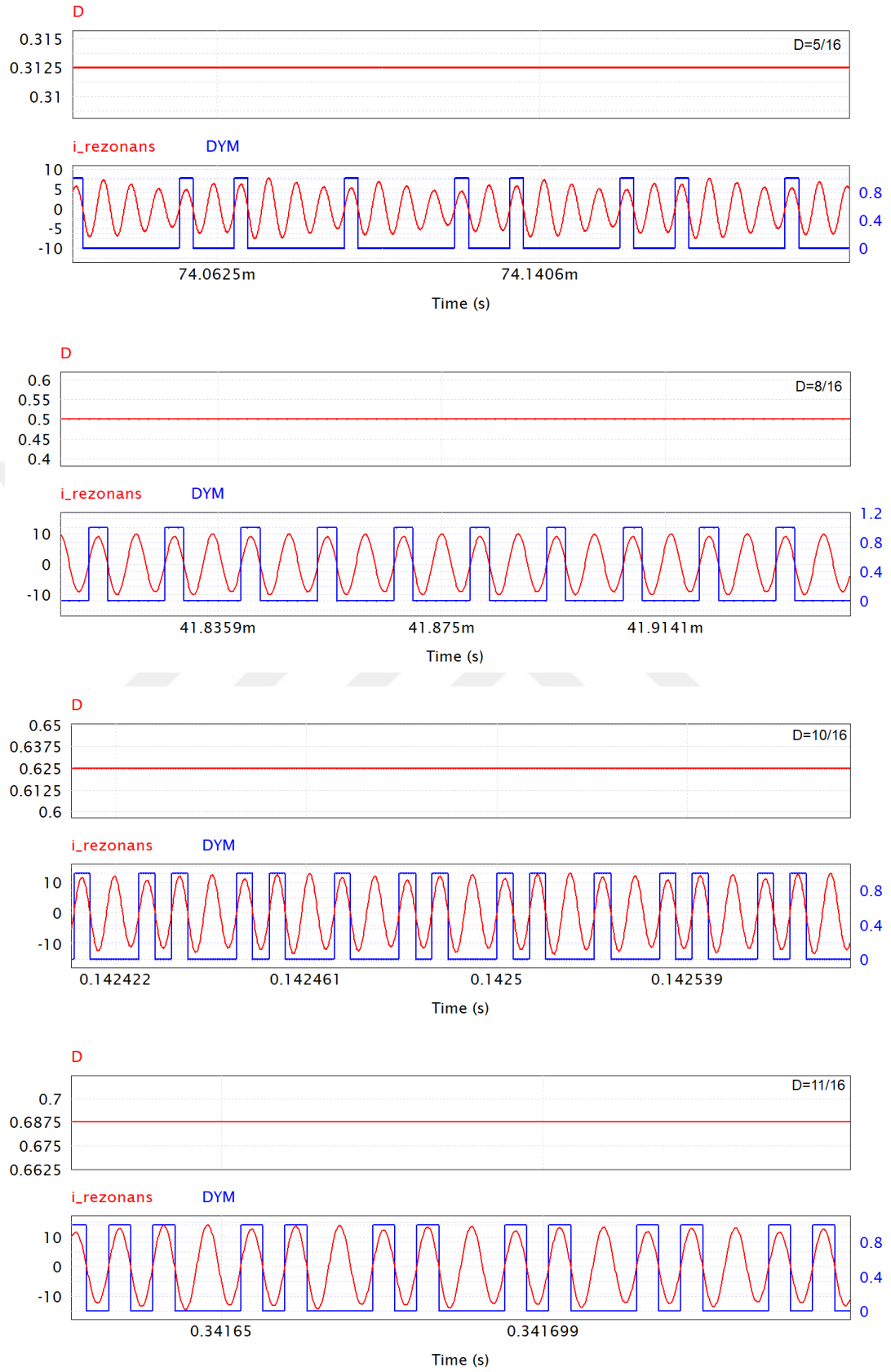
Şekil 5.3. Generatör hızı ve generatör elektriksel gücün gerçek ve tahmini değerleri.

D&G algoritması hız ve güç parametrelerinin anlık değerlerinden ziyade bu değerlerdeki değişimi referans almaktadır. MGNT algoritmasının başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için bu değerlerdeki değişimlerin tespit edilmesi anında minimum bir gecikmenin olması gerekmektedir. Grafik incelendiğinde hem hız hem de güç değerlerindeki değişimlerin gerçek ve tahmini değerleri arasındaki zaman gecikmesinin 12 ms altında olduğu görülmektedir. İfade edilen gecikme süresi kabul edilebilir seviyededir.

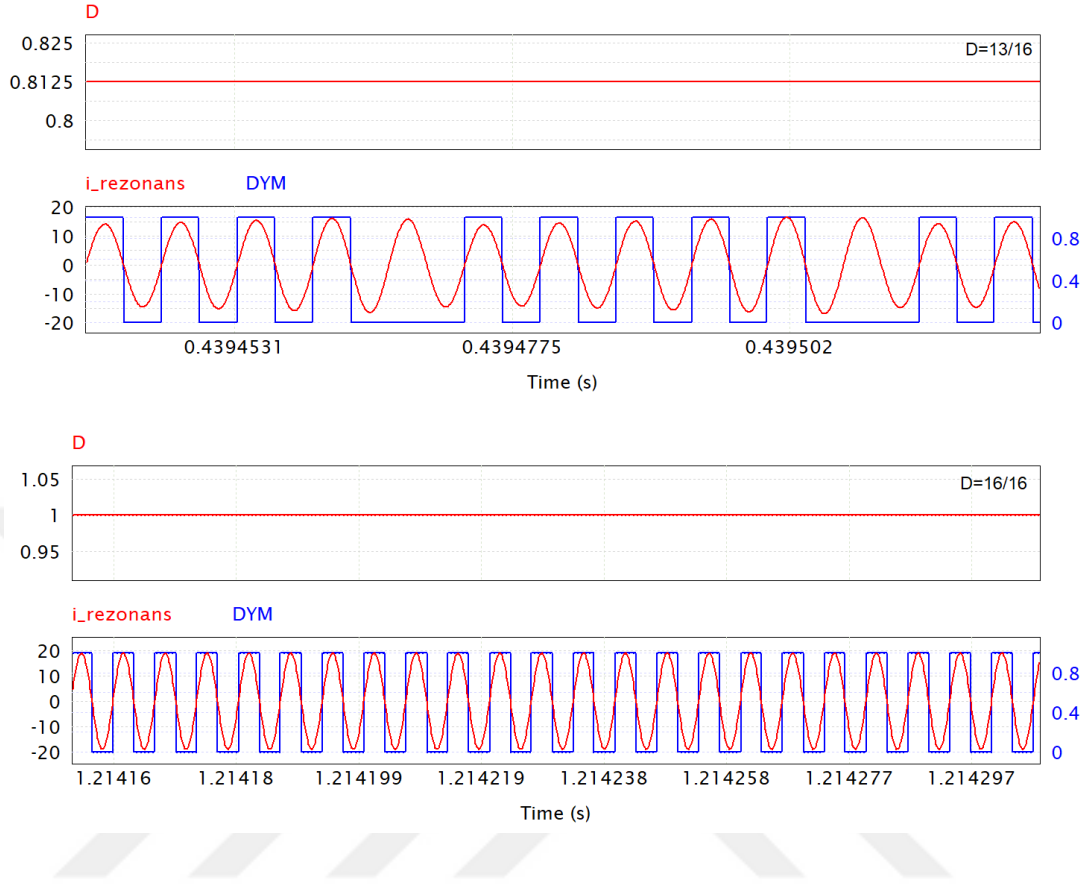
DYM yönteminin en büyük avantajı tüm güç değerlerinde rezonans frekansında çalışmayı mümkün hale getirmesidir. Bu durum yumuşak anahtarlama koşullarının düşük yük değerlerinde bile korunmasını ve anahtarlama kayıplarının minimum seviyede olmasını garanti etmektedir. Şekil 5.4'te 16 darbeli DYM lojik tablosu sunulmaktadır Şekil 5.5'te farklı D değerleri için DYM anahtarlama sinyali ve rezonans akımı gösterilmektedir.

DYM oranı (D)		DYM Uzunluğu															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1/16	0,0625	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/16	0,1250	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3/16	0,1875	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4/16	0,2500	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
5/16	0,3125	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
6/16	0,3750	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
7/16	0,4375	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
8/16	0,5000	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
9/16	0,5625	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0
10/16	0,6250	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0
11/16	0,6875	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
12/16	0,7500	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
13/16	0,8125	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
14/16	0,8750	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
15/16	0,9375	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
16/16	1,0000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Şekil 5.4. 16 darbeli düzensiz DYM lojik tablosu.



Şekil 5.5. D değerine göre DYM anahtarlama sinyali ve rezonans akımının değişimi.



Şekil 5.5. (Devam ediyor).

Benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde tasarlanan rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin MGNT'yi başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir. Belirlenen tüm rüzgâr hız değerlerinde SRDA dönüştürücünün rezonans frekansında anahtarlanması ile yumuşak anahtarlama koşulları başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede anahtarlama kayıpları minimize edilerek sistemin genel veriminde iyileşme elde edilmiştir. Ayrıca tasarlanan sistemde D&G MGNT algoritması sensörsüz denetim yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sensörsüz denetim sayesinde sistemin güvenilirliği artırılmış ve maliyeti azaltılmıştır. Benzetimden elde edilen sonuçlar ışığında önerilen sistemin deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 6

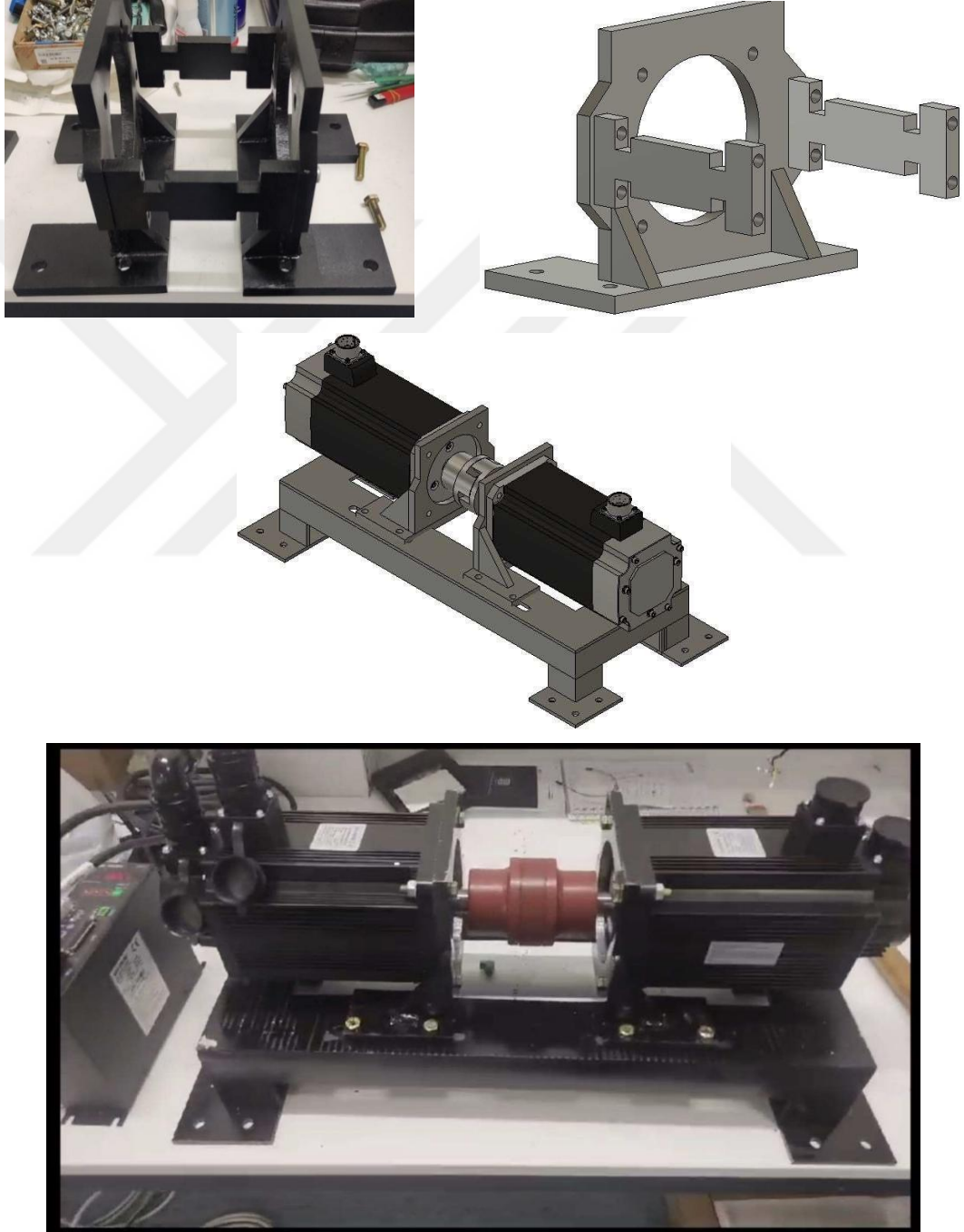
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, geliştirilen rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Çalışmanın bu aşamasında, öncelikle deney düzeneği kapsamlı bir şekilde tanıtılmış; kullanılan ekipmanlar, elektronik devre yapıları, kontrol algoritmalarının donanım üzerindeki uygulamaları ve veri toplama yöntemleri açıklanmıştır. Ardından, sistemin doğrulanması amacıyla kullanılan rüzgâr türbini emülatörü ve bu emülatör aracılığıyla uygulanan çeşitli senaryolar üzerinden elde edilen deneysel veriler değerlendirilmiştir. Son olarak, farklı rüzgâr hızlarında gerçekleştirilen testler yardımıyla, MGNT algoritmasının etkinliği analiz edilmiştir. Bu bölümde sunulan bulgular, tasarlanan sistemin gerçek zamanlı koşullarda nasıl bir performans sergilediğine dair kapsamlı bir değerlendirme sunmakta ve teorik analizlerle deneysel sonuçlar arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.

6.1. DENEY DÜZENEĞİ VE KULLANILAN EKİPMANLAR

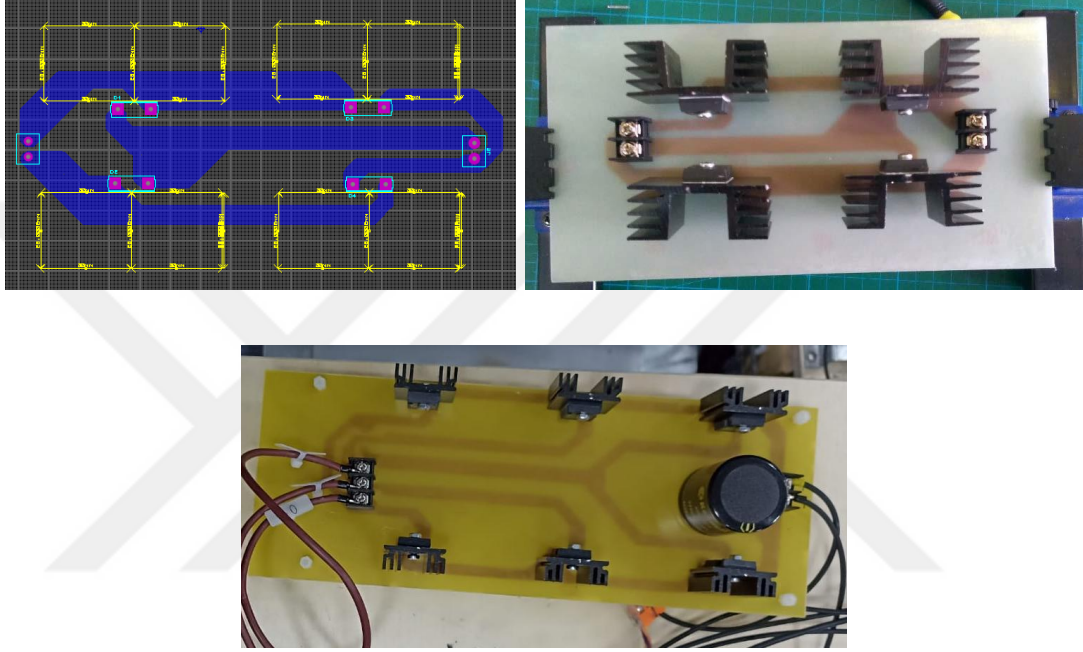
Bu bölümde Şekil 6.1’de gösterilen deney sisteminin genel yapısı, mekanik ve elektronik bileşenler, sinyal işleme devreleri, güç elektroniği bileşenleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. Tez kapsamında tasarlanan rüzgâr türbini emülatöründe tahrik motoru olarak 2,3 kW güç ve 15 Nm nominal moment değerine sahip 8 tek kutuplu SMSM ve sürücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı özelliklere sahip olan diğer bir SMSM ise generatör olarak çalıştırılmıştır. Motor ve generatör dişli kutusu kullanılmadan mil üzerinden kaplin vasıtasıyla birbirlerine doğrudan bağlanmışlardır. Şekil 6.2’de motor, generatör ve motor sürücüsüne ait resimler sunulmaktadır.

Motor ve generatörün aynı eksen üzerinde birleştirilmeleri gerekmektedir. Bağlantı esnasında yaşanan herhangi bir eksenel kayma, vurunun artmasına ve mekanik hasarlara yol açabilmektedir. Bu durumun önüne geçmek için motor ve generatörün mekanik bağlantısı, tasarlanan taşıma sehpası ve braketler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3’de braketlerin teknik çizimi ve imalatı görülmektedir.



Şekil 6.3. Elektromekanik tasarımın gerçekleştirilmesi.

Devrede kullanılan üç fazlı ve bir fazlı diyotlu doğrultucular IXYS firmasının DSEP30-04A model ve seri numarasına sahip 400 Volt, 30A'lık diyotları kullanılmıştır. Doğrultucu çıkışlarında 470uF kapasite değerine sahip 400 voltluk KENDEIL firmasına ait elektrolitik kondansatörler filtre kondansatörü olarak kullanılmıştır. Şekil 6.4'te doğrultucu devresine ait PCB şeması ve devre kartı görülmektedir.



Şekil 6.4. Diyotlu doğrultucu PCB şeması ve devre kartı.

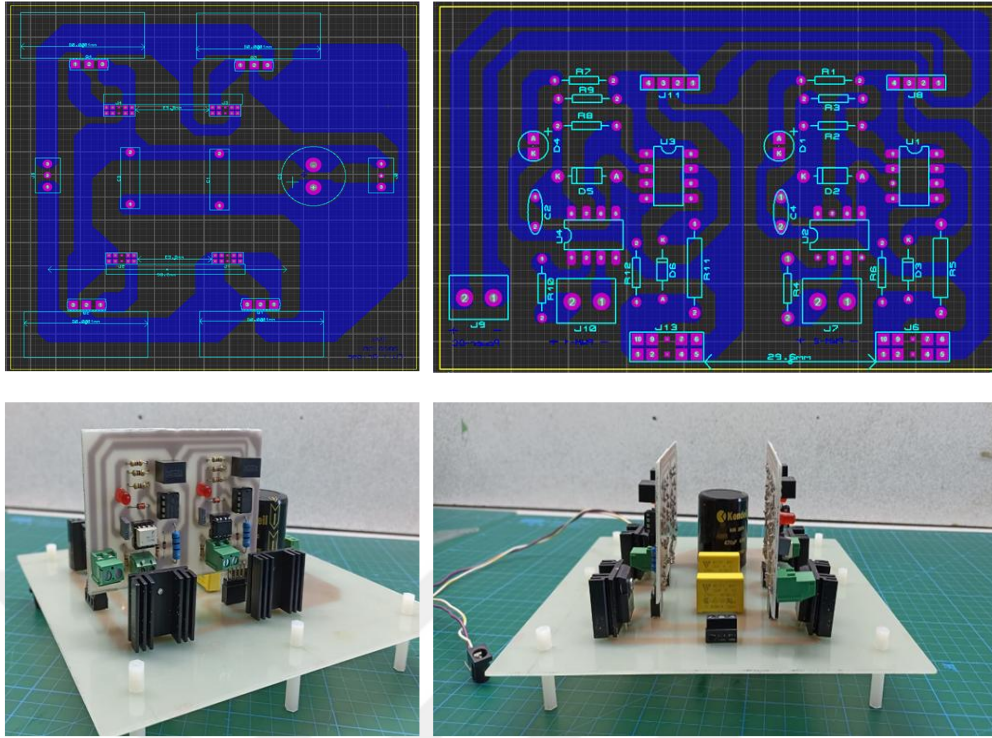
SRDA dönüştürücüde kullanılan MOSFET'ler IXYS firmasının IXFH52N50P kodlu TO-247 kılıf yapısına sahip MOSFET'leridir. Seçilen güç anahtarları, üretici firmanın HiperFET olarak tanımladığı yüksek hızlı MOSFET grubuna dahildir. Çizelge 6.1'de seçilen MOSFET'lere ait elektriksel özelliklerinden bazıları sunulmaktadır. Güç anahtarların sürücü devresinde optik izolasyon için 6N137 optokuplörler kullanılmıştır. 6N137'nin lojik bir seviyesine geçişte meydana gelen yayılım gecikmesi ve yükselme zamanı toplam 60 ns dir. Benzer şekilde lojik sıfır değerine geçişte meydana gelen toplam zaman gecikmesi 61ns dir. Gate sürücü entegresi olarak Microchip firmasının TC4420 sürücü entegreleri kullanılmıştır. TC4420 sürücü entegrelerinin lojik-1 ve lojik-0 geçişlerindeki toplam zaman gecikmesi 80 ns'dir. Ayrıca TC4420 entegresi yapısı gereği iki adet güç anahtarını aynı anda

sürebilmektedir. Eğer uygulamada iki güç anahtarı yerine tek bir güç anahtarı sürülürse entegrenin çıkış pik akım değeri 6A değerine kadar çıkabilmektedir.

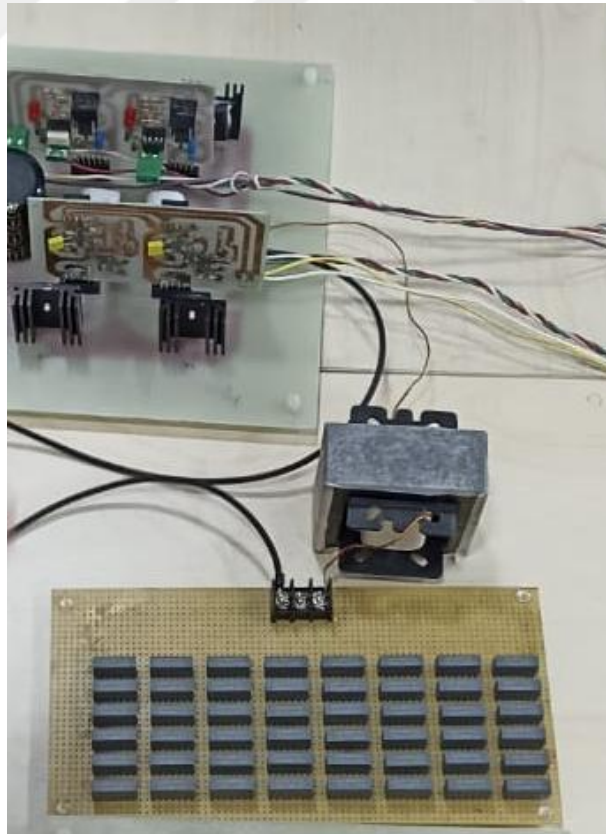
Çizelge 6.1. IXFH52N50P Elektriksel karakteristiği.

<u>Drain-Source Voltage (V)</u>	500 V
<u>Maximum On-Resistance @ 25 °C (Ohm)</u>	0,12 Ω
<u>Continuous Drain Current @ 25 °C (A)</u>	52 A
<u>Gate Charge (nC)</u>	113 nC
<u>Input Capacitance, C_{ISS} (pF)</u>	6800 pF
<u>Thermal resistance [junction-case] (K/W)</u>	0,13 K/W
<u>Configuration</u>	Single
<u>Package Type</u>	TO-247
<u>Power Dissipation (W)</u>	960 W
<u>Maximum Reverse Recovery (ns)</u>	250 ns
$t_{d(on)}+t_r$ (ns)	32 ns
$t_{d(off)}+t_r$ (ns)	54 ns

Sürücü entegresinin bu özelliği sayesinde MOSFET'in giriş kapasitesi hızlı bir şekilde şarj edilebilmektedir. Güç anahtarının, optokuplörün ve sürücü entegresinin iletme geçme ve yalıtıma geçme zaman gecikmelerinin toplamı, mikrodenetleyici tarafından üretilen PWM sinyalinde uygulanacak ölü zaman süresini belirlemektedir. En kötü senaryoda toplam zaman gecikmesi 190 ns değerindedir. 150kHz olarak üretilen PWM sinyalinde ölü zaman değeri 200 ns olarak uygulanmıştır. Şekil 6.5'de SRDA güç devresi ve sürücü devresine ait baskı devre şemaları ve her iki devrenin birleştirilmiş gerçek görünüşü sunulmaktadır. Tasarlanan rezonans dönüştürücüde rezonans bobini 150 μ H, rezonans kondansatörü 7,5 nF yük direnci 15 ohm olarak seçilmiştir. Seçilen değerlere göre rezonans frekansı 150kHz ve kalite faktörü 9,43 olarak hesaplanmıştır. Rezonans kondansatör grubu tasarlanırken 10 nF kapasite ve 600V AC gerilim değerinde kondansatörler sekiz seri altı paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kondansatörler paralel bağlanarak verebilecekleri anlık akım değeri arttırılmıştır. Ayrıca kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kondansatörü giriş gerilim değerinden daha yüksek gerilim değerlerine maruz kalmaktadır. Seri bağlantı ile bu yüksek gerilim bölünerek kondansatörlere uygulanmaktadır. Şekil 6.6'da rezonans bobini ve kondansatör grubuna ait görseller sunulmaktadır.



Şekil 6.5. Seri rezonans DA-DA dönüştürücü güç ve sürme devreleri.



Şekil 6.6. Rezonans bobin ve rezonans kondansatör grubu.

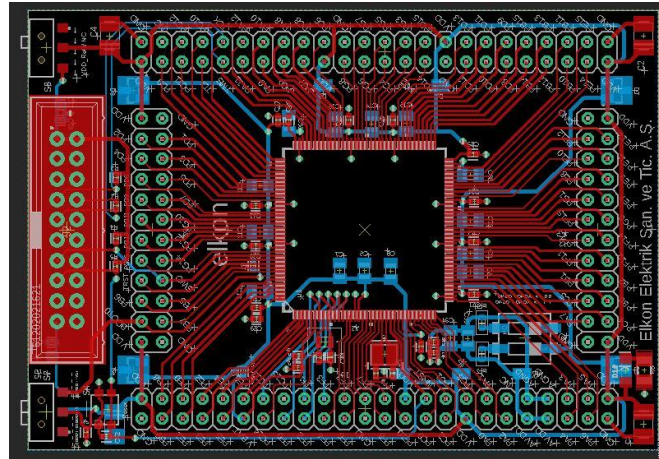
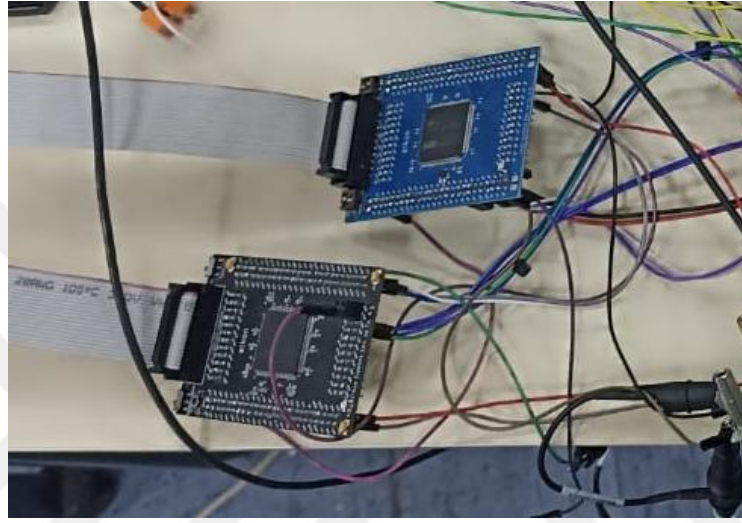
Devrede yük olarak U şekilli 15 Ω direnç kullanılmıştır. Direncin sıcaklık ile değerin değişimini minimum seviyede tutmak için alimünyum soğutucular ile sıkıştırıp salyangoz fan ile soğutma işlemi uygulanmıştır. Bu sayede deneysel ölçümler esnasında yük direnci değişimi istenilen seviyede kalmıştır. Şekil 6.7’de yük ve soğutma ekipmanlarına ait görsel sunulmaktadır.



Şekil 6.7. U direnç ve soğutma ünitesi.

Deneysel çalışmada mikrodenetleyici olarak STM firmasına ait STM32F767ZI Arm Cortex-M7 32-bit tabanlı mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Mikrodenetleyicinin

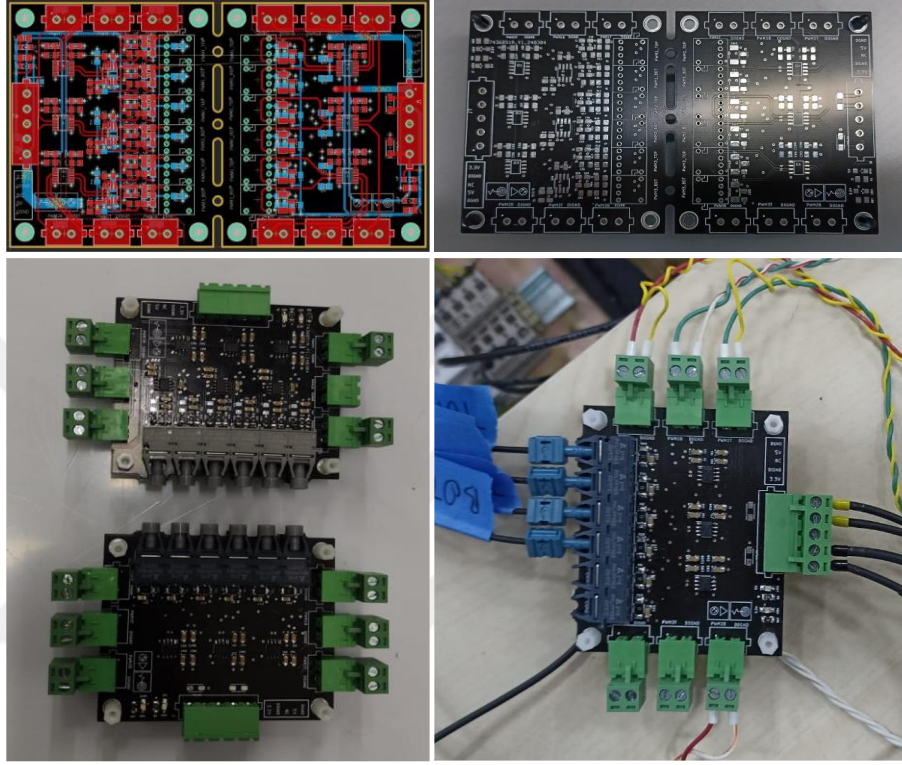
işlemci frekansı 216MHz'dir. 12 bit analog-dijital dönüştürücü (24 adet) ve dijital-analog dönüştürücüye (2 adet) sahip olan mikrodnetleyici, 16 bit ve gelişmiş 32 bit'lik zamanlayıcı bileşenlerine sahiptir. İfade edilen özellikler tasarlanan algoritmaların gerçek zamanlı olarak çalışması ve yüksek frekanslı DYM sinyallerinin üretilmesi için uygun seviyededir. Tasarlanan mikrodnetleyici kartları Şekil 6.8'de sunulmaktadır.



Şekil 6.8. STM32F767ZI mikrodnetleyici uygulama kartı.

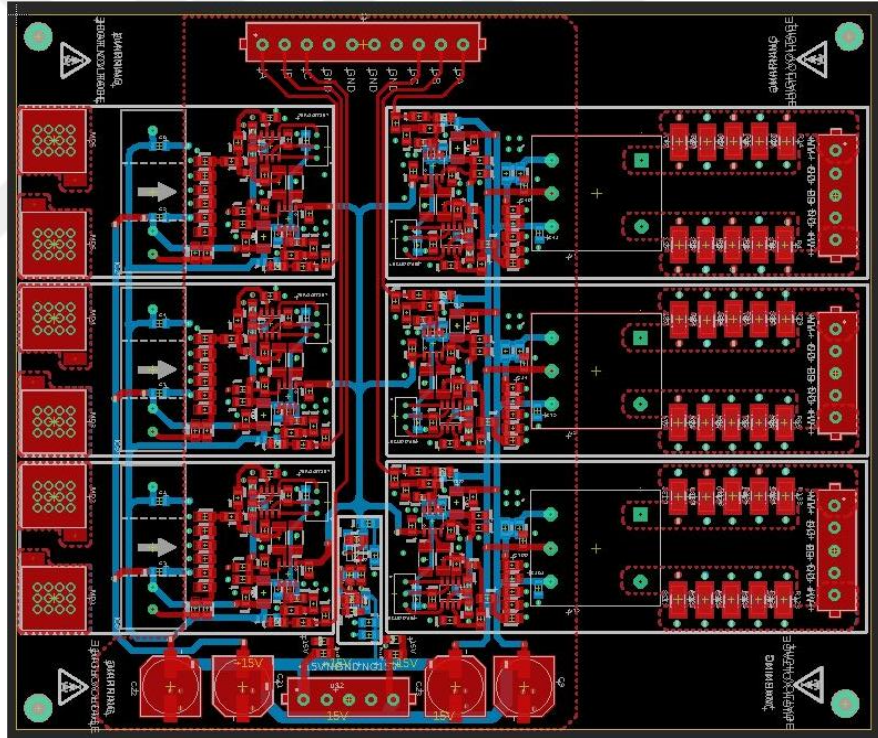
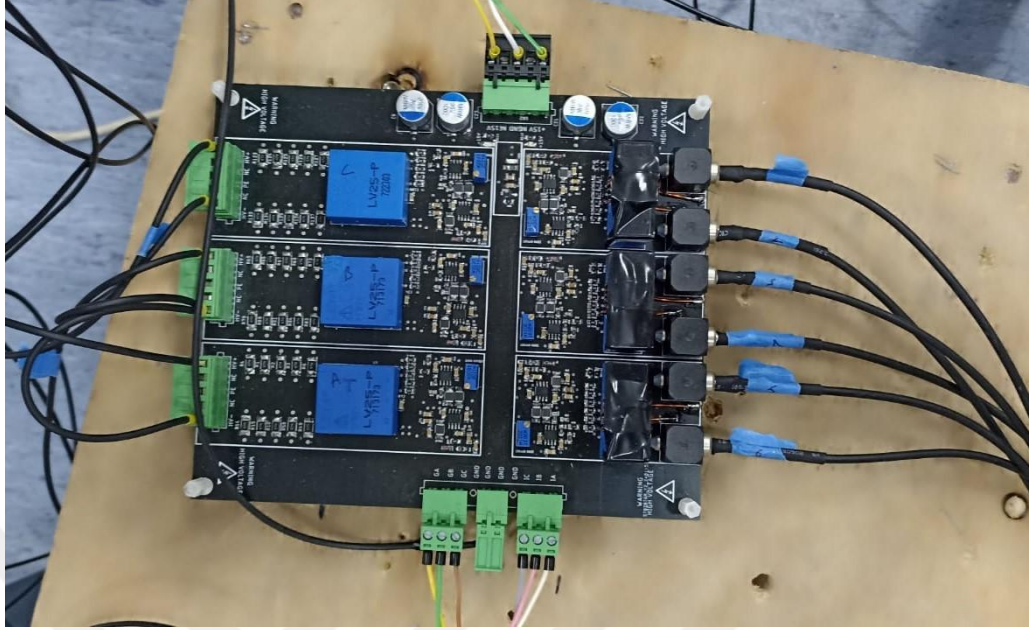
Mikrodnetleyici ile üretilen DYM sinyallerinin sürücü devresine gönderilmesi için fiber optik verici ve alıcı devresi tasarlanmıştır. Özellikle uzun metrajlı kabloların yüksek frekanslı anahtarlama kaynaklı elektromanyetik girişimlere maruz kalacağından dolayı bilgisayar, mikrodnetleyici ve sürücü devreleri birbirlerinden

fiber optik kablolar ve izoleli programlama kartıyla yalıtılmıştır. Fiber optik konnektörler için Broadcom firmasının HFBR serisi konektörleri kullanılmıştır. Şekil 6.9'da fiber optik verici ve alıcı devresinin PCB şeması ve prototip tasarımı gösterilmektedir. Fiber optik kablolarında zaman gecikmesi metre başına 5ns'dir.

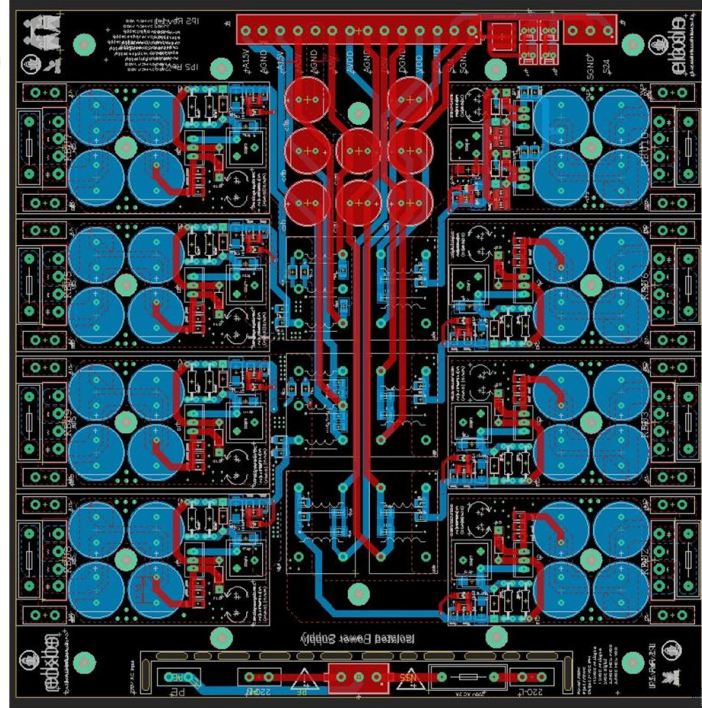
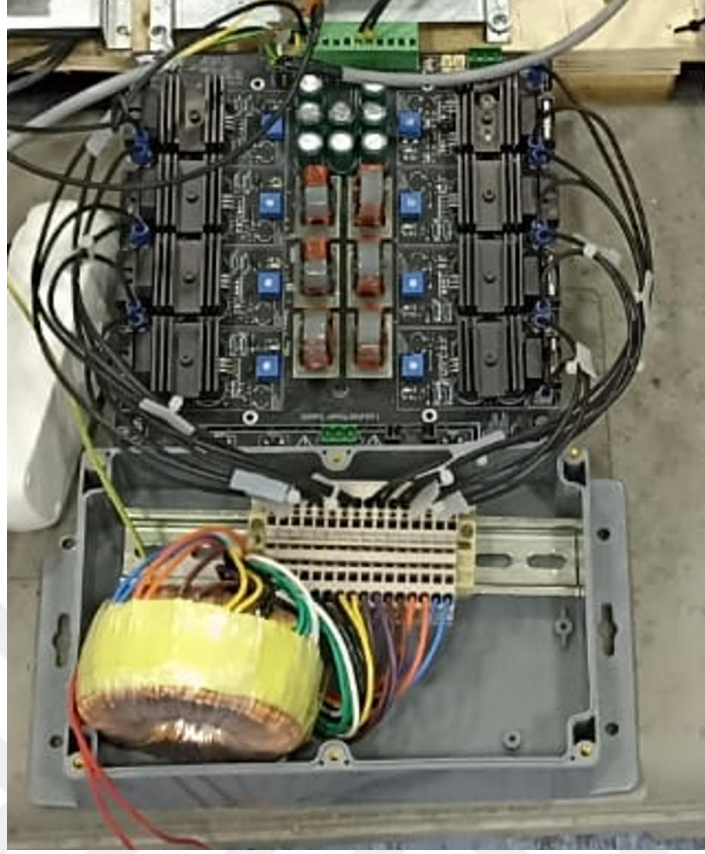


Şekil 6.9. Fiber optik alıcı verici devresi.

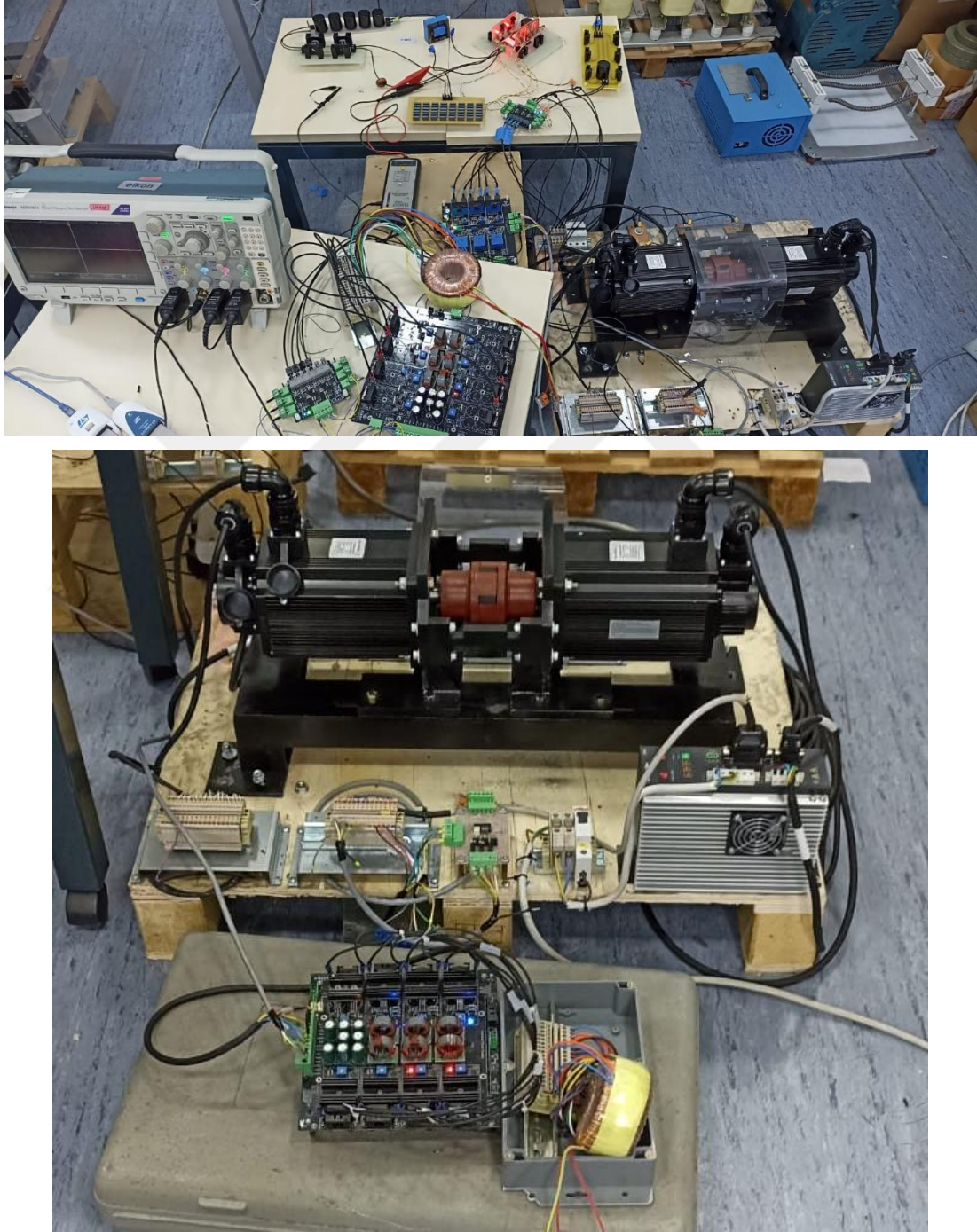
Üç faz akım ölçümü için LEM firmasının LA-55P akım sensörü kullanılmıştır. Kapalı çevrim Hall etkisine sahip olan bu sensör özellikle hassas ölçüm kabiliyeti nedeniyle seçilmiştir. Gerilim ölçümünde ise benzer şekilde LEM firmasına ait olan LV 25-P kapalı çevrim Hall etkili gerilim sensörü kullanılmıştır. Tasarlanan ölçüm devresine ait PCB tasarımı ve devrenin fiziki görüntüsü Şekil 6.10'da sunulmuştur. Ölçüm kartında kullanılan sensörlerin ve opampların besleme devreleri lineer regülatörler ve ortak mod filtreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir faz alternatif gerilim toroid trafo üzerinden 3,3V , 5V , 12V ve 15V'luk gerilim değerlerine düşürülmektedir. Köprü doğrultucular vasıtasıyla alternatif gerilim doğru gerilime dönüştürülerek tüm sistemde ihtiyaç duyulan doğru gerilimler besleme kartı ile elde edilmektedir. Besleme kartına ait devre şeması ve prototip tasarım Şekil 6.11'de sunulmaktadır.



Şekil 6.10. Üç faz akım ve gerilim ölçüm devresi.



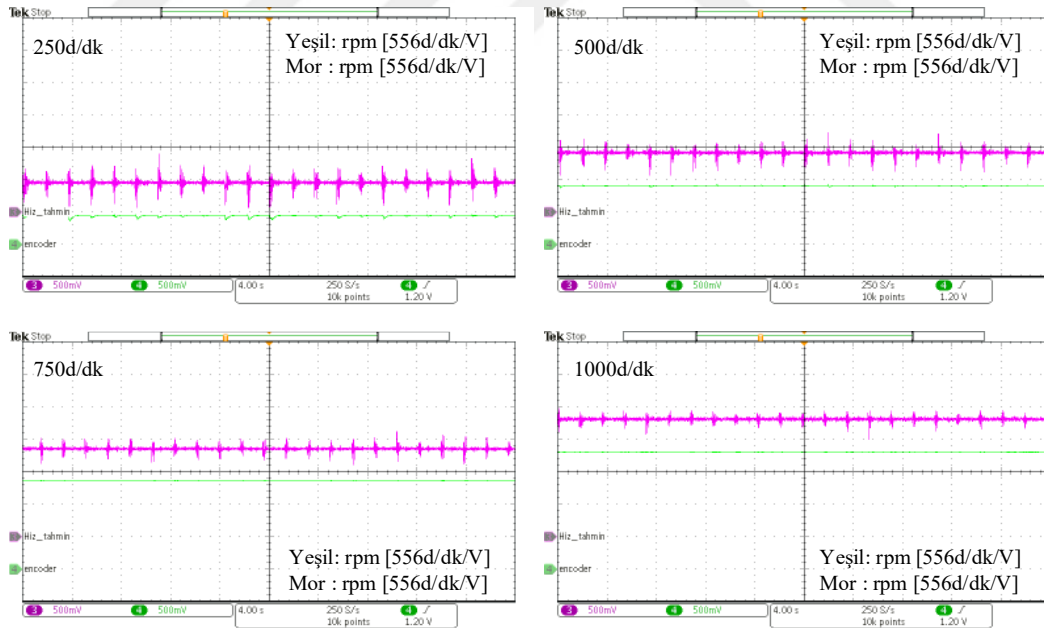
Deneysel çalışma düzeneğinin tüm sistem bileşenleri Şekil 6.12’de gösterilmektedir. Deneysel ölçümler Textronics firmasının MDO3024 modeline sahip osiloskopu ile gerçekleştirilmiştir. İfade edilen osiloskop 200 MHz bant genişliği ve 2,5GSa/s örnekleme oranına sahip dört kanallı bir osiloskoptur.



Şekil 6.12. Deneysel çalışma düzeneği.

6.2. RÜZGÂR TÜRBİNİ EMÜLATÖRÜ ÖLÇÜMLERİ

Rüzgâr türbini emülatörünün başarımını test etmek amacıyla farklı rüzgâr hızlarında D değeri değiştirilerek emülatör davranışının, türbin teorik hız-moment ve güç eğrileri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Generatör hızının enkoderdan ölçülen ve ÇİDGİ-FKD ile tahmini gerçekleştirilen hız değerleri mikrodenetleyicinin DAC çıkışına aktarılarak osiloskopta ölçümü gerçekleştirilmiştir. Her iki ölçüm arasındaki hata oranı %1'in altında tespit edilmiştir. Enkoder hız ölçümü ve tahmini hız değeri Şekil 6.13'te sunulmaktadır. Şekil incelendiğinde mor renk ile ifade edilen eğrinin tahmini mekanik hız değeri olduğu ve yeşil renk ile ifade edilen eğrinin enkoderdan ölçülen mekanik hız değeri olduğu görülmektedir. Generatör elektriksel büyüklükleri kullanılarak tahmin edilen hız değerinde oluşan moment dalgalanmaları, üç fazlı diyotlu doğrultucunun generatörden çektiği harmonikli akımlardan kaynaklanmaktadır. D&G algoritmasında kullanılan tahmini hız değerine dijital alçak geçiren filtre uygulanarak sinyaldeki dalgalanmalar bastırılmıştır.

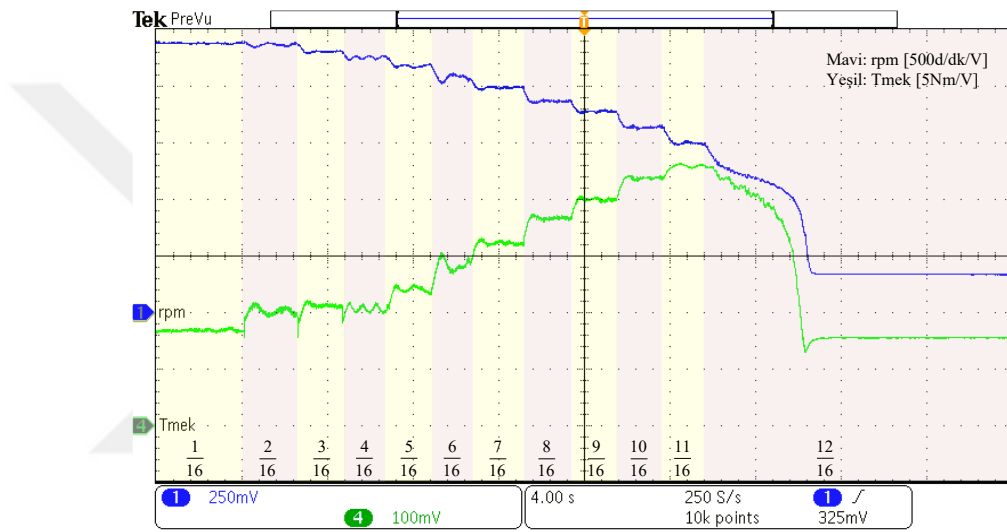


Şekil 6.13. Enkoder hız ölçümü ve tahmini hız ölçümü eğrileri.

Benzer şekilde generatör çıkış gücü, üç faz gerilim ve akım bileşenlerinin temel harmonik değeri kullanılarak aktif – reaktif güç teorisi ile tahmin edilmiştir. Tahmin

edilen değer mikrodnetleyicinin dijital analog dönüştürücü çıkışına gönderilerek osiloskop üzerinden ölçümü gerçekleştirilmiştir.

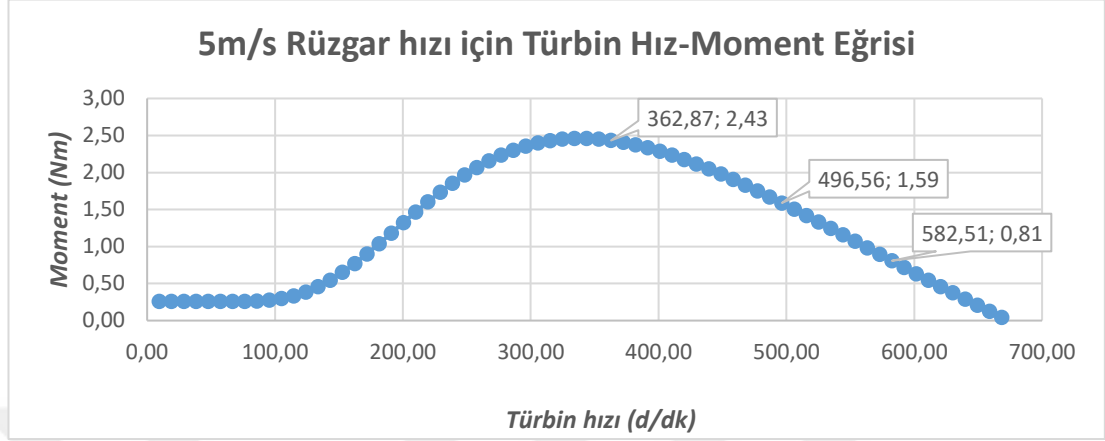
Şekil 6.14'te rüzgâr hızı 5m/s değerinde iken D değeri 1/16'lık adım aralıkları ile arttırılarak moment ve hız değerindeki değişim osiloskop üzerinde gösterilmektedir. Grafikte mavi renk ile ifade edilen eğri tahmini mekanik hız eğrisi, yeşil renk ile ifade edilen eğri ise motor sürücüyeye gönderilen referans moment değerini göstermektedir. Bu değerin doğruluğu motor sürücü panelinden okunan moment değeri ile teyit edilmektedir.



Şekil 6.14. 5m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.

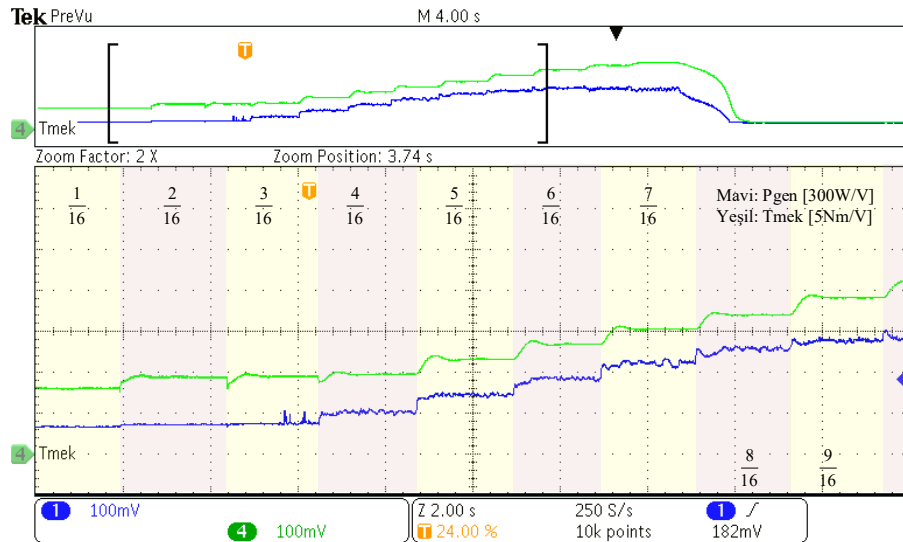
12/16 D değerinde belirtilen hız ve moment değerini motor karşılayamadığından sürücü korumaya geçmektedir. Bu durumun önüne geçmek için yazılımsal olarak motorun 300 d/dk altına inmesi MGNT algoritmasında sınırlandırılmıştır. İfade edilen önlem MGNT algoritmasının performansını etkilememektedir. Büyük güçlü rüzgâr türbinlerinin düşük hızlarda çalışmasını önleyen “Düşük rüzgârda durdurma kontrolü (Low Wind Speed Shutdown)” olarak çalışmaktadır. 5m/s rüzgâr hızında türbin hız-moment teorik eğrisi Şekil 6.15'te sunulmaktadır. Emülatör deneyinden elde edilen sonuçlar teorik egride işaretlenmiştir. Emülatör deneyinden elde edilen sonuçlar ve teorik eğri analiz edildiğinde rüzgâr türbini emülatörünün başarılı bir şekilde çalıştığı

ve aerodinamik modele uygun olarak hız moment eğrisini belirlenen rüzgâr hızı için takip ettiği görülmektedir.

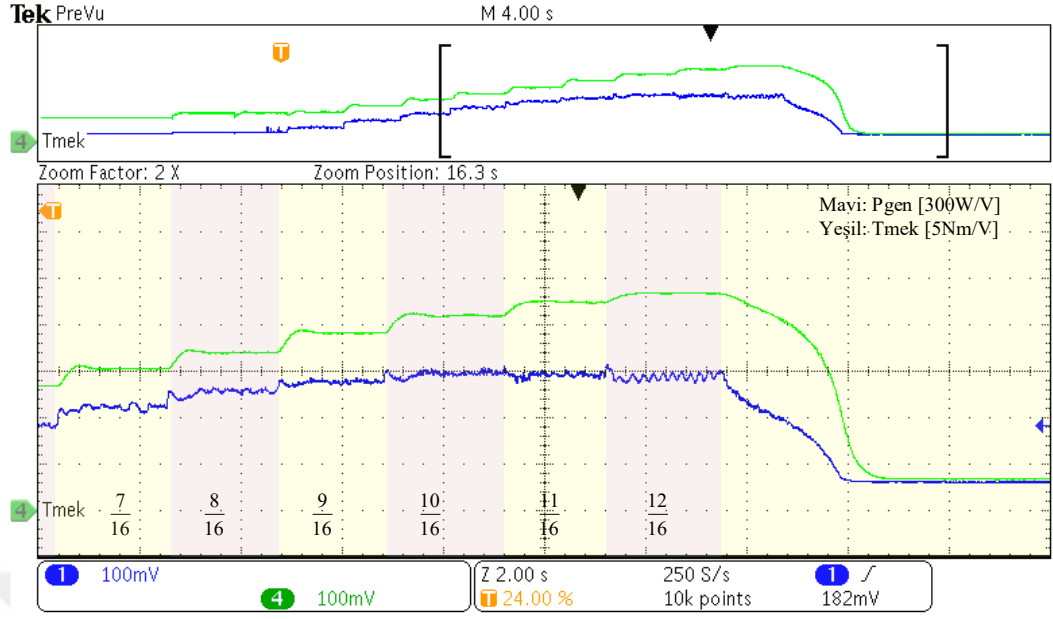


Şekil 6.15. 5m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.

Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de generatör çıkış gücü ve generatör moment değerlerinin, D değerine göre değişimi grafiksel olarak sunulmuştur. Buradaki P_{gen} değeri generatör çıkış gerilim ve akımlarının temel harmonik değeri kullanılarak tahmin edilen temel aktif güç değeridir.



Şekil 6.16. 5m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi kısım-1.



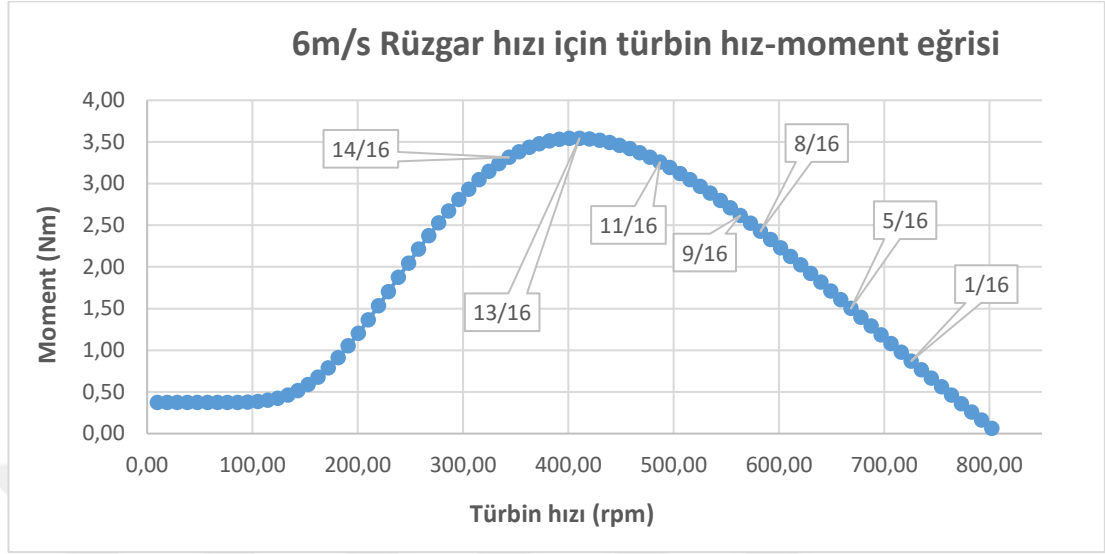
Şekil 6.17. 5m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi kısım-2.

6m/s rüzgâr hızı için gerçekleştirilen hız-moment ölçümü Şekil 6.18’de sunulmaktadır.



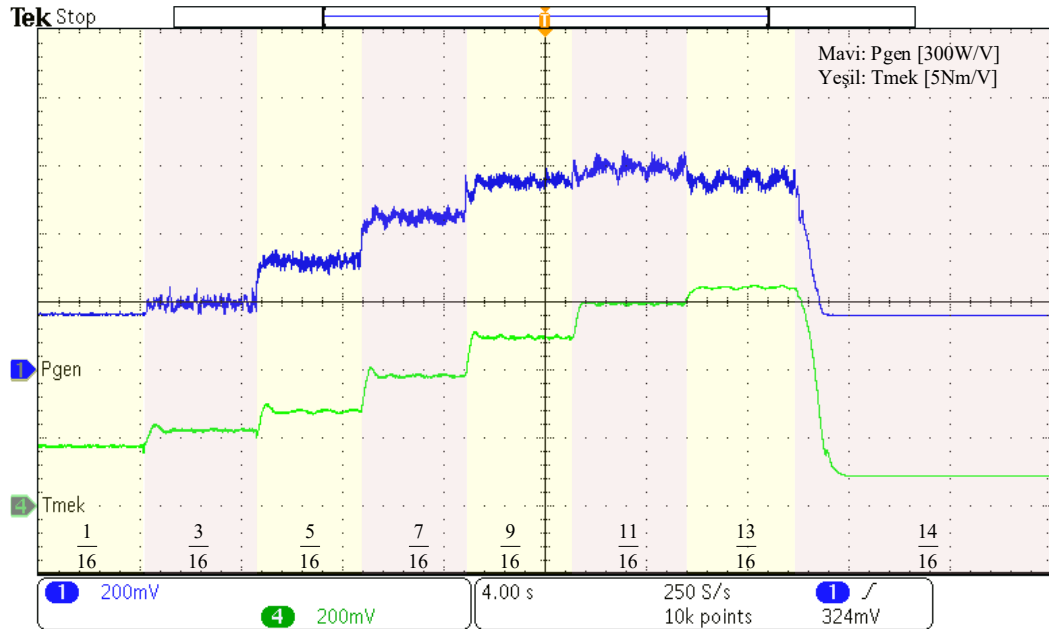
Şekil 6.18. 6m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.

6m/s rüzgâr hızında türbin hız-moment teorik eğrisi Şekil 6.19’da sunulmaktadır.



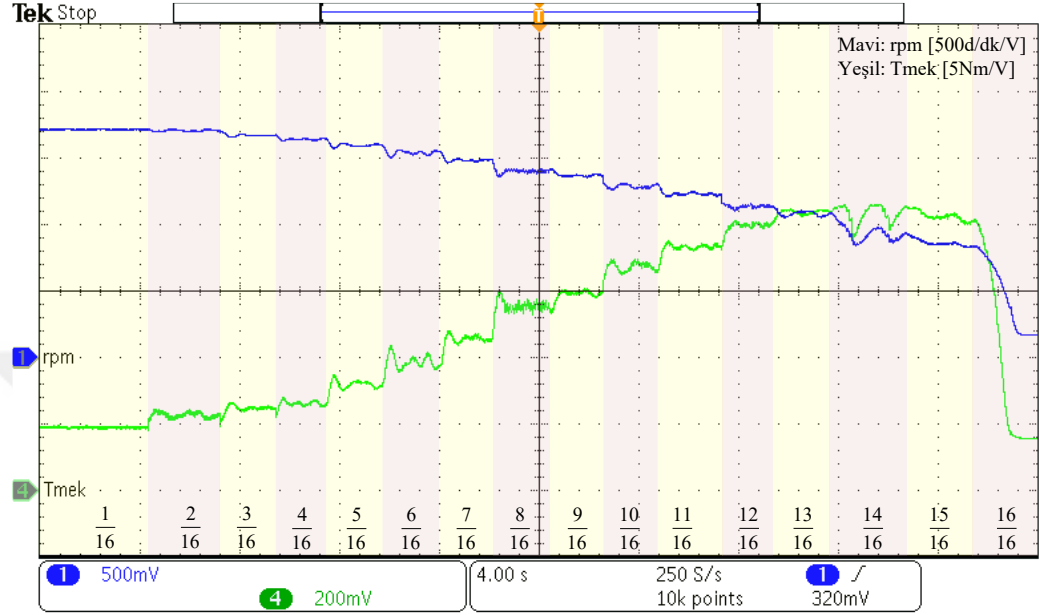
Şekil 6.19. 6m/s rüzgâr hızında rüzgâr türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.

Şekil 6.20’de farklı D değerlerine göre generatör çıkış momenti ve güç değerlerinin değişimi sunulmaktadır.

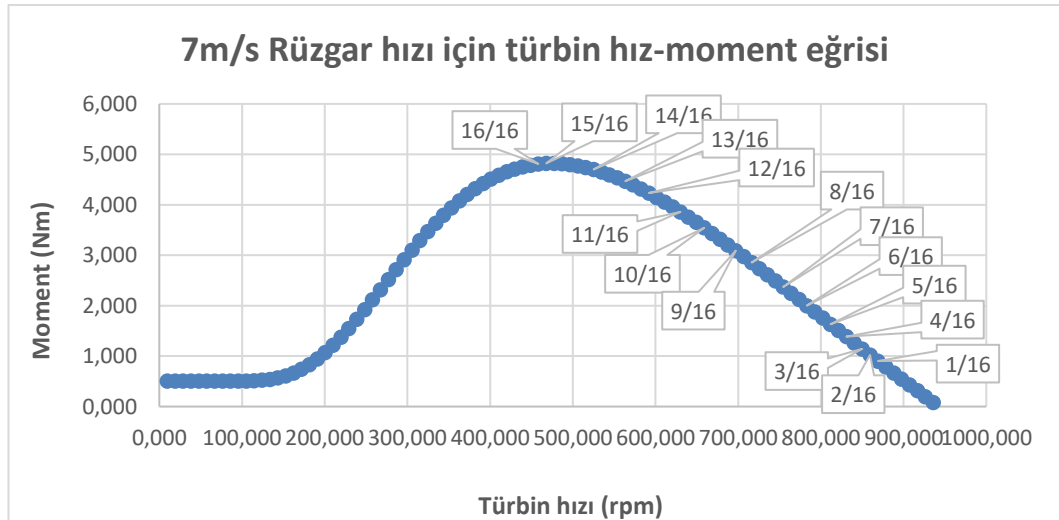


Şekil 6.20. 6m/s rüzgâr hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.

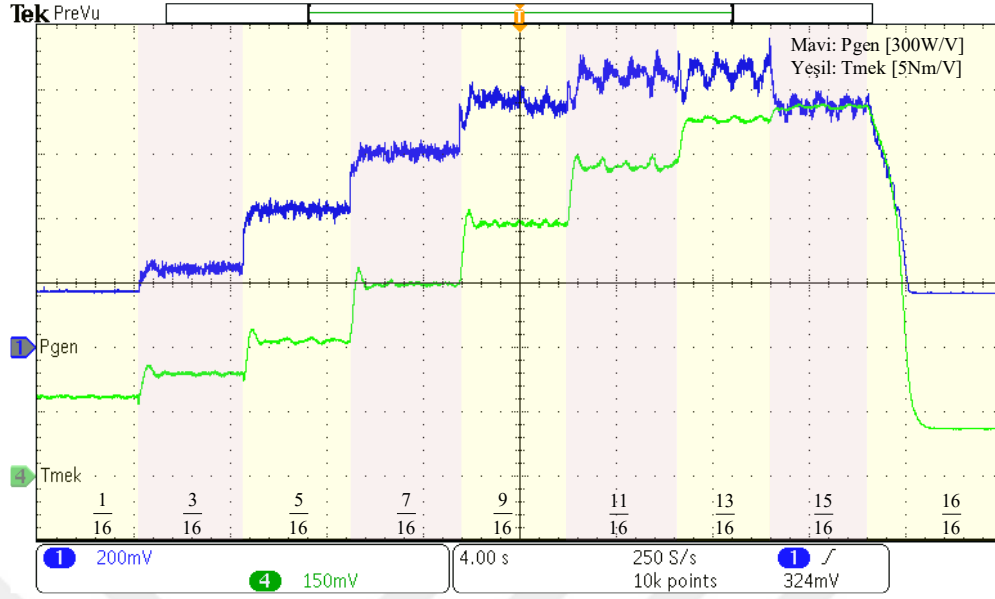
Şekil 6.21’de 7m/s rüzgâr hızında hız ve moment değerinin değişimi, Şekil 6.22’de aynı rüzgâr hızı için türbin hız moment teorik eğrisi ve Şekil 6.23’de moment ve güç eğrileri farklı D değerleri için sunulmuştur.



Şekil 6.21. 7m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.

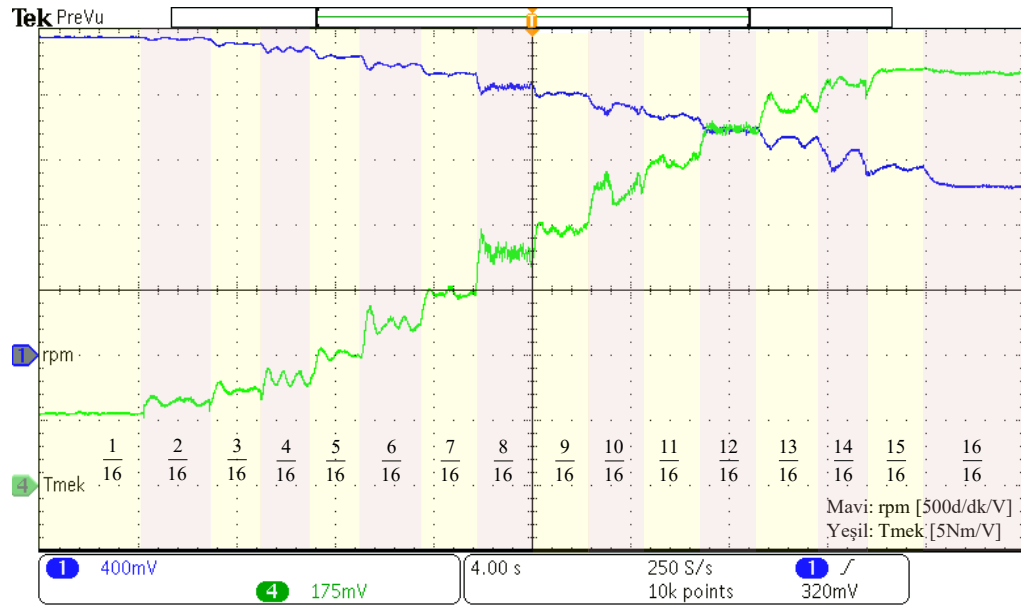


Şekil 6.22. 7m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.

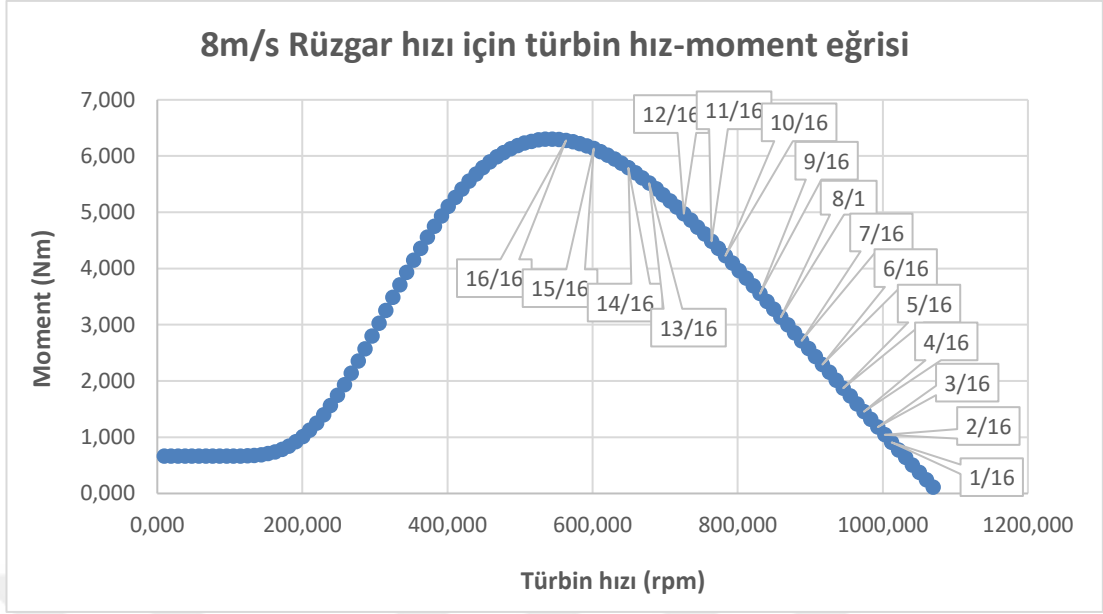


Şekil 6.23. 7m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.

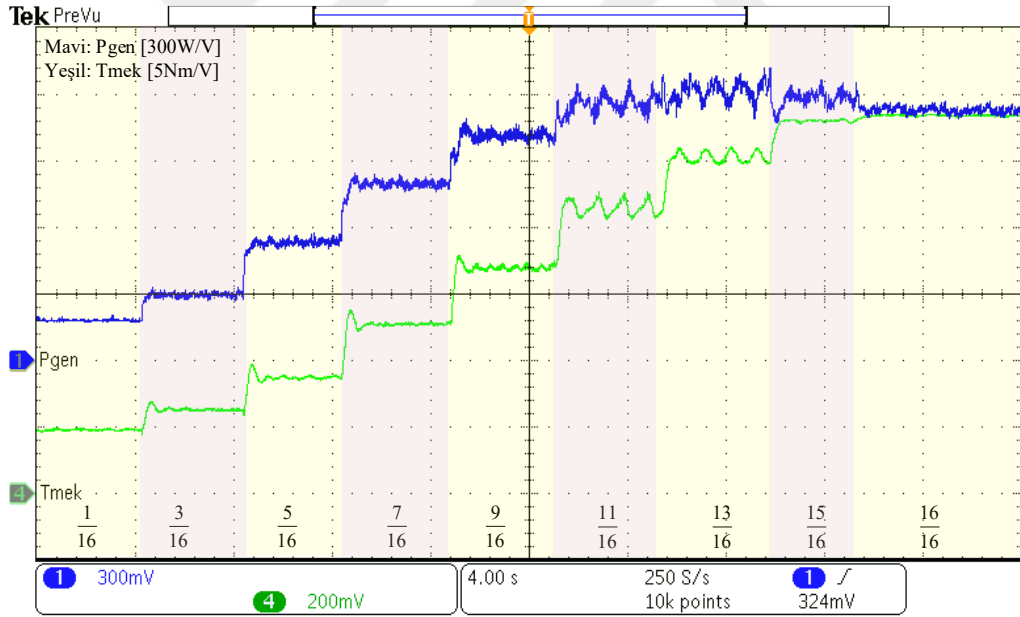
Şekil 6.24’de 8m/s rüzgâr hızında hız ve moment değerinin değişimi, Şekil 6.25’de aynı rüzgâr hızı için türbin hız moment teorik eğrisi ve Şekil 6.26’da moment ve güç eğrileri farklı D değerleri için sunulmuştur.



Şekil 6.24. 8m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.

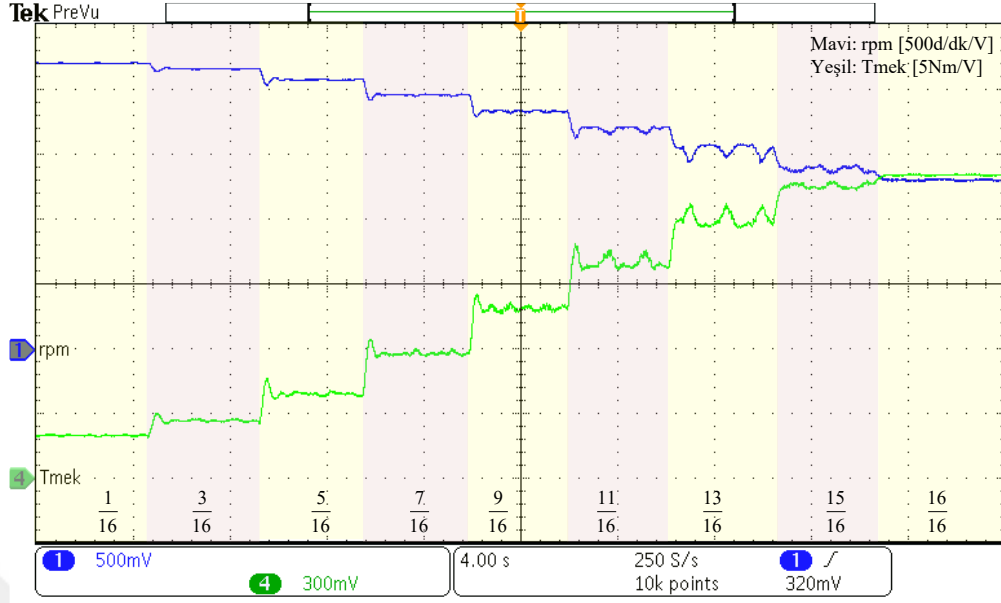


Şekil 6.25. 8m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.

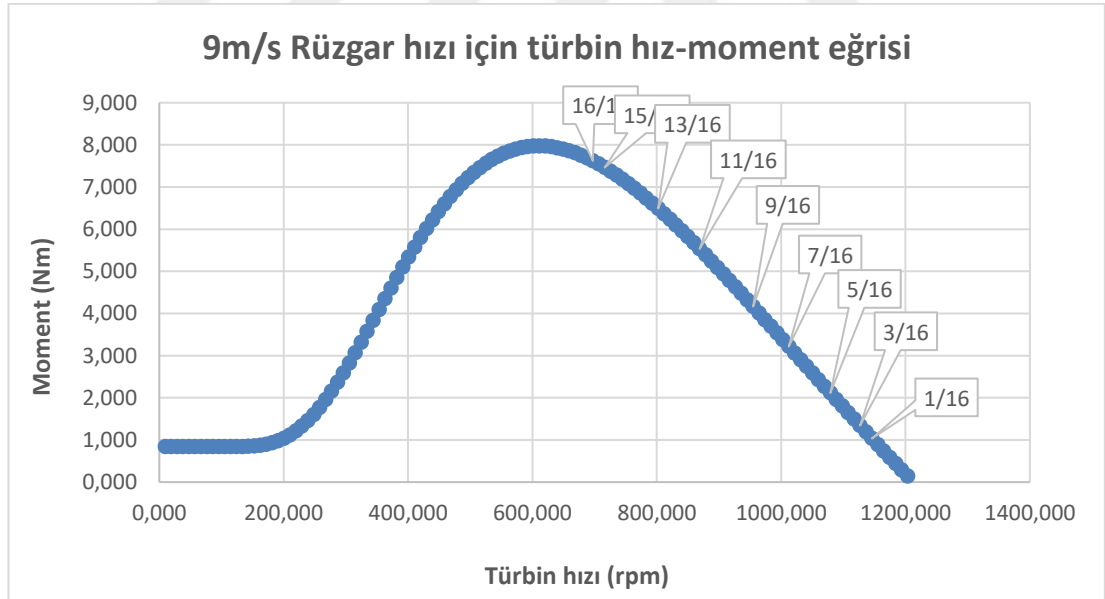


Şekil 6.26. 8m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.

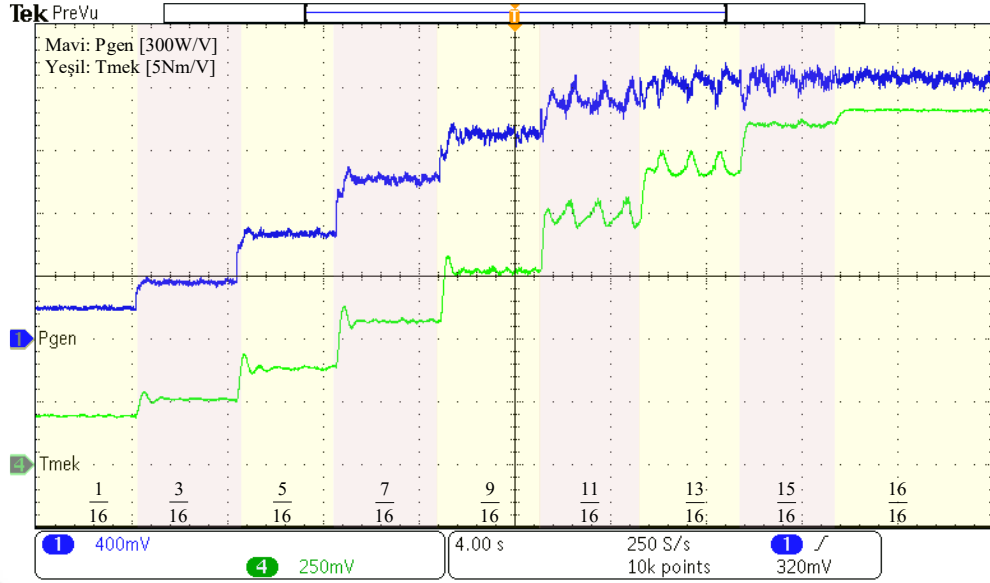
Şekil 6.27’de 9m/s rüzgâr hızında hız ve moment değerinin değişimi, Şekil 6.28’de aynı rüzgâr hızı için türbin hız moment teorik eğrisi ve Şekil 6.29’da moment ve güç eğrileri farklı D değerleri için sunulmuştur.



Şekil 6.27. 9m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.

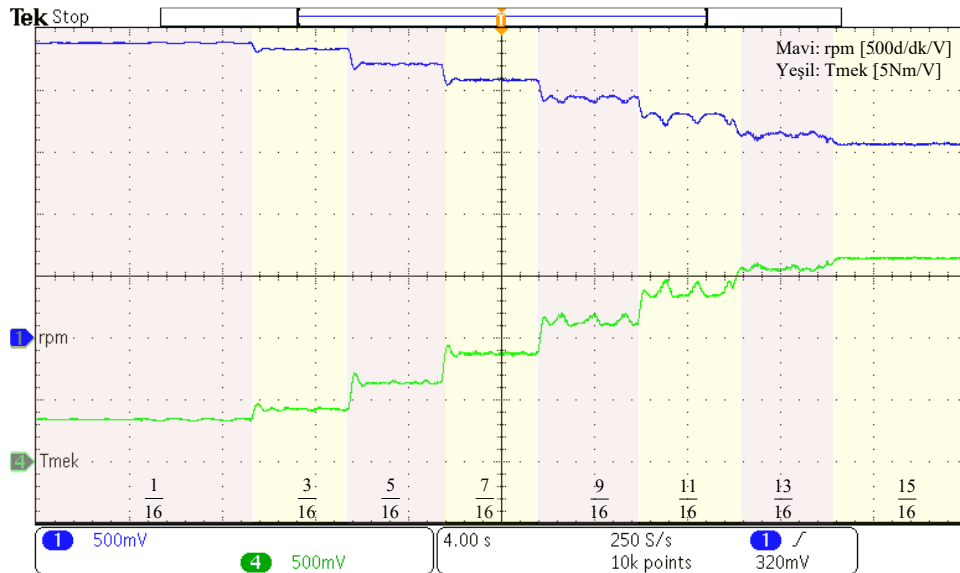


Şekil 6.28. 9m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.

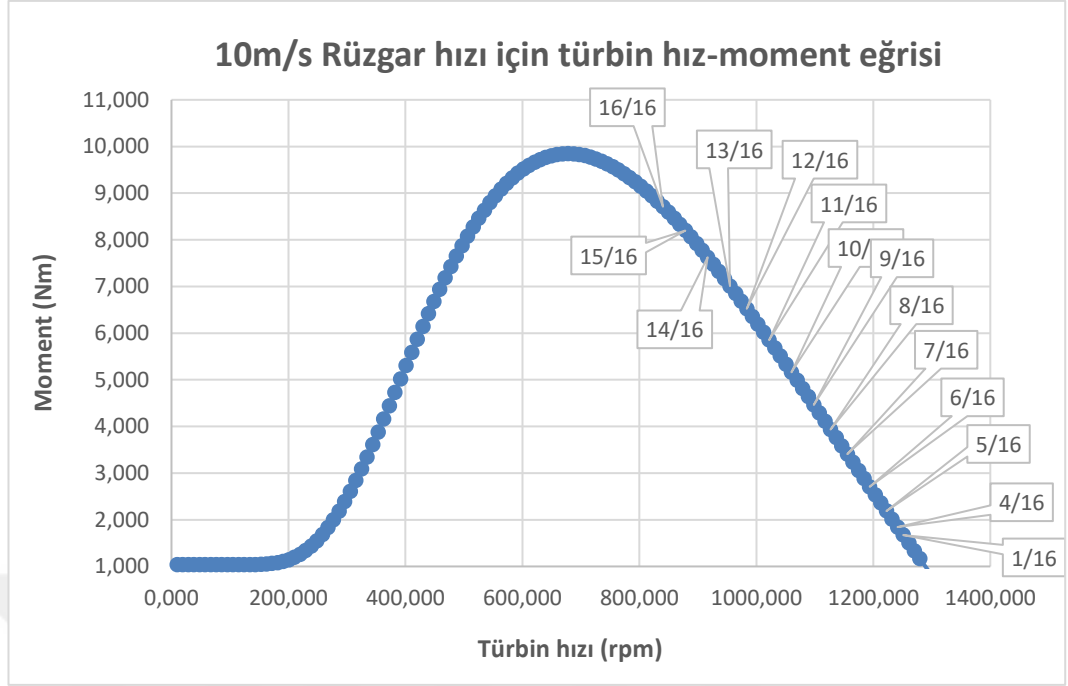


Şekil 6.29. 9m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.

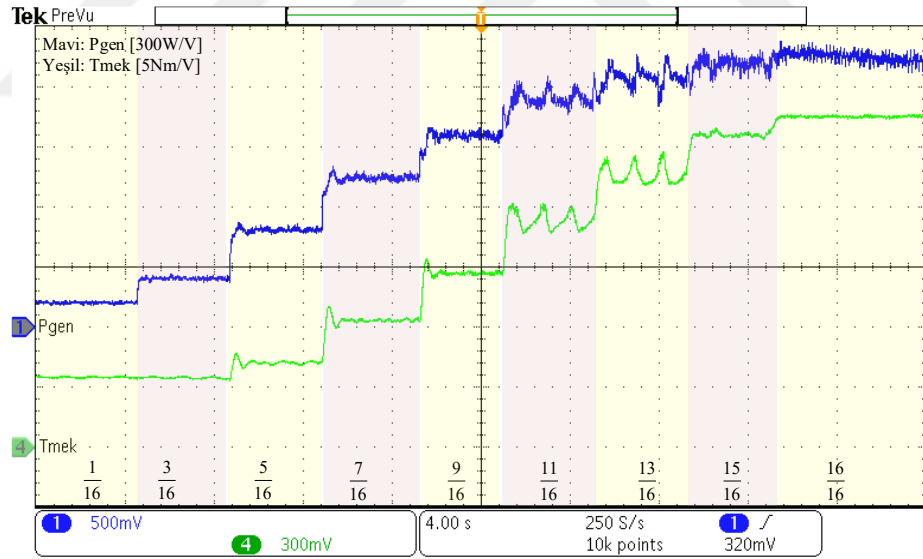
Şekil 6.30'da 10m/s rüzgâr hızında hız ve moment değerinin değişimi, Şekil 6.31'de aynı rüzgâr hızı için türbin hız moment teorik eğrisi ve Şekil 6.32'de moment ve güç eğrileri farklı D değerleri için sunulmuştur.



Şekil 6.30. 10m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör hız ve moment eğrileri.



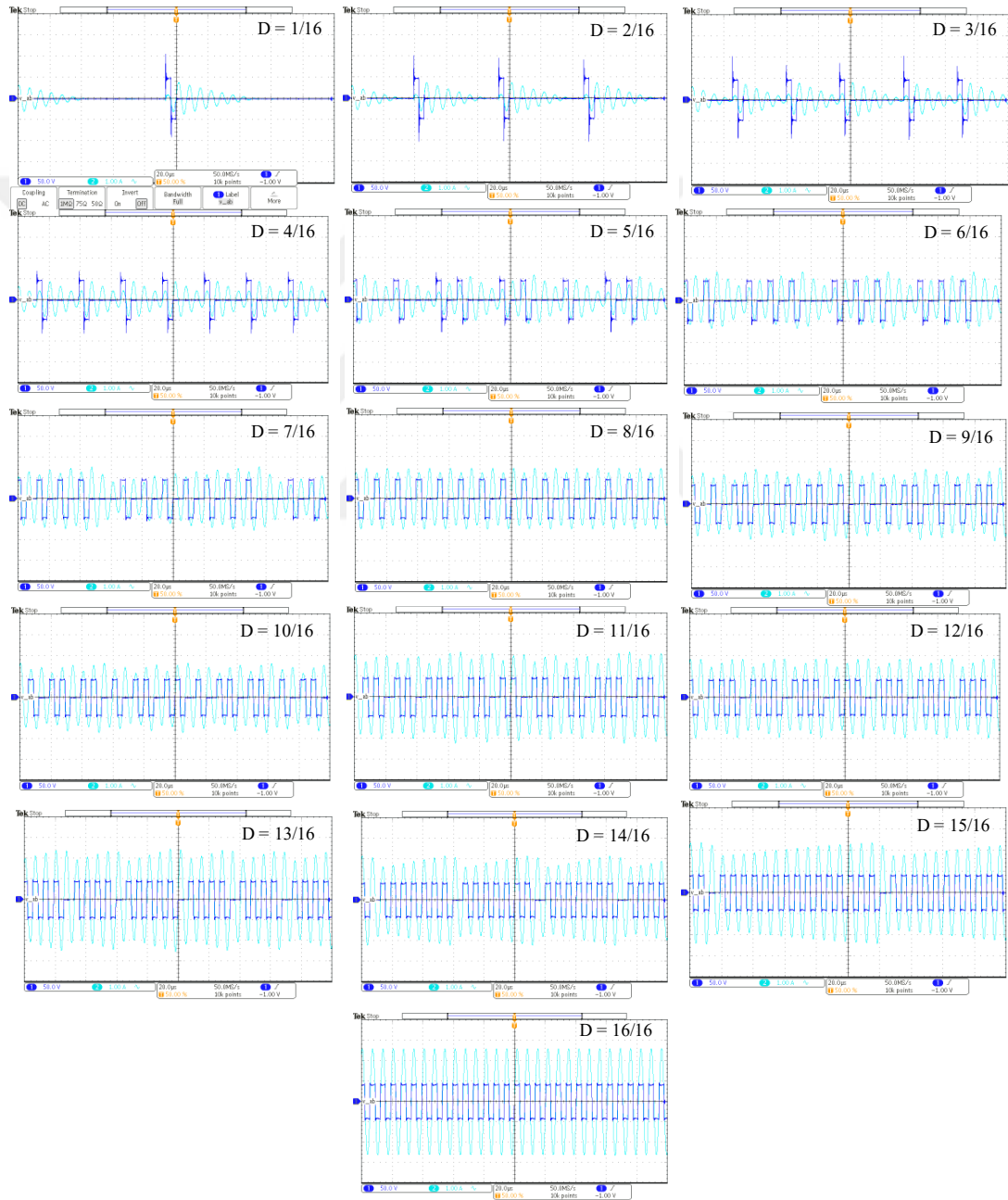
Şekil 6.31. 10m/s rüzgar hızında rüzgar türbini hız ve moment değerlerinin değişimi.



Şekil 6.32. 10m/s rüzgar hızında D değerinin değişimine göre generatör güç ve moment değerlerinin değişimi.

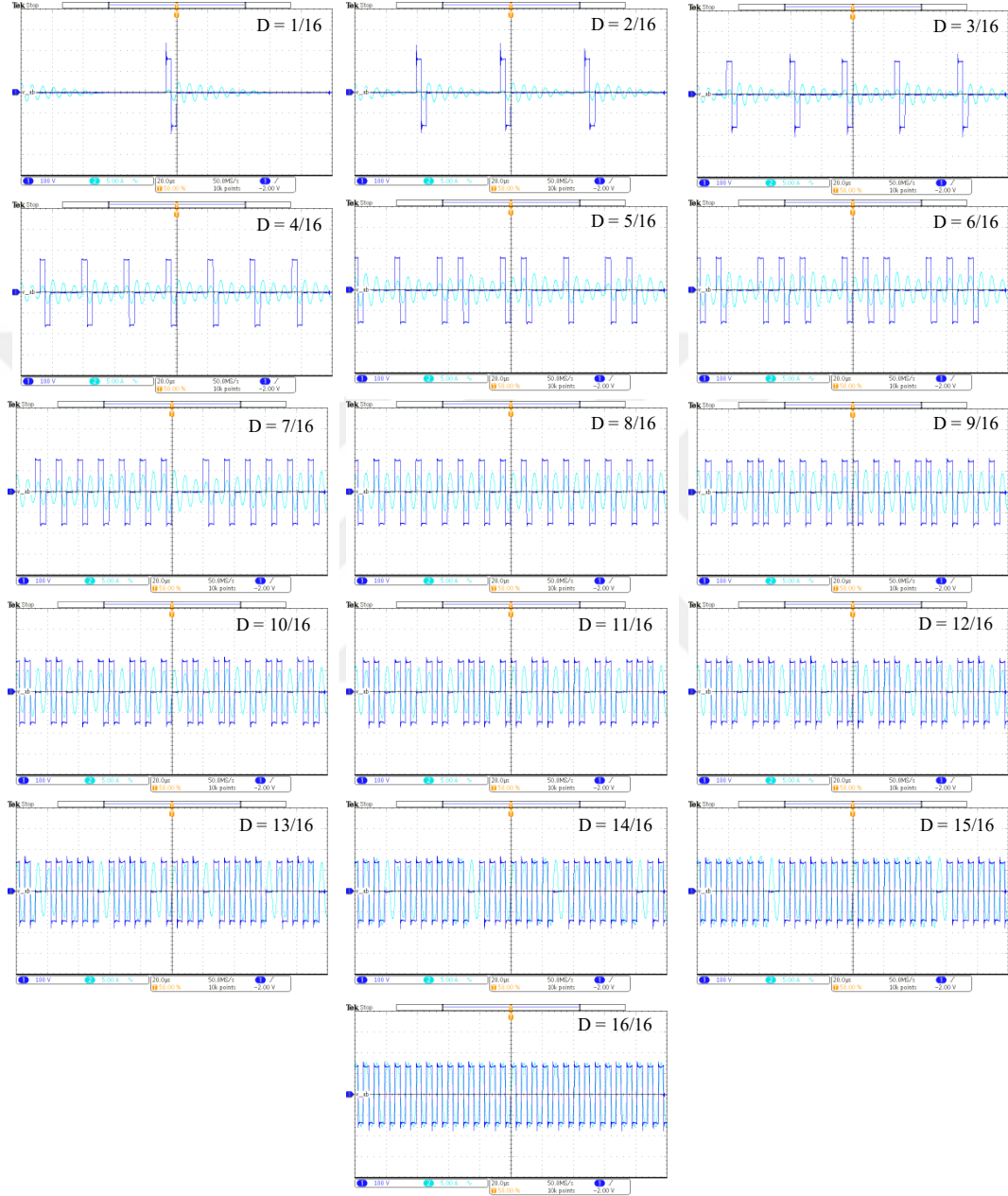
Emülatör deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde belirlenen tüm rüzgâr hız aralığında tasarlanan rüzgâr türbini emülatörünün, türbin aerodinamik modelini başarılı bir şekilde yansıttığı görülmektedir. Ayrıca moment-güç eğrileri analiz

edildiğinde her rüzgâr hızı için bir adet D değerinde maksimum güç noktasına ulaşıldığı görülmektedir. DYM yönteminin başarısını test etmek için düşük devir ve yüksek devirlerde farklı D oranları için SRDA dönüştürücünün giriş gerilimi (V_{ab}) ve rezonans akımı (i_r) ölçülmüştür. Şekil 6.33'te generatör 300 d/dk hızda çalışırken D oranı değiştirilerek V_{ab} gerilimi ve rezons akımı ölçülmektedir. Grafikte mavi eğriler V_{ab} gerilimini, yeşil eğriler ise rezonans akımını göstermektedir.



Şekil 6.33. 300d/dk hızda D değerine göre V_{ab} gerilimleri ve rezonans akımları.

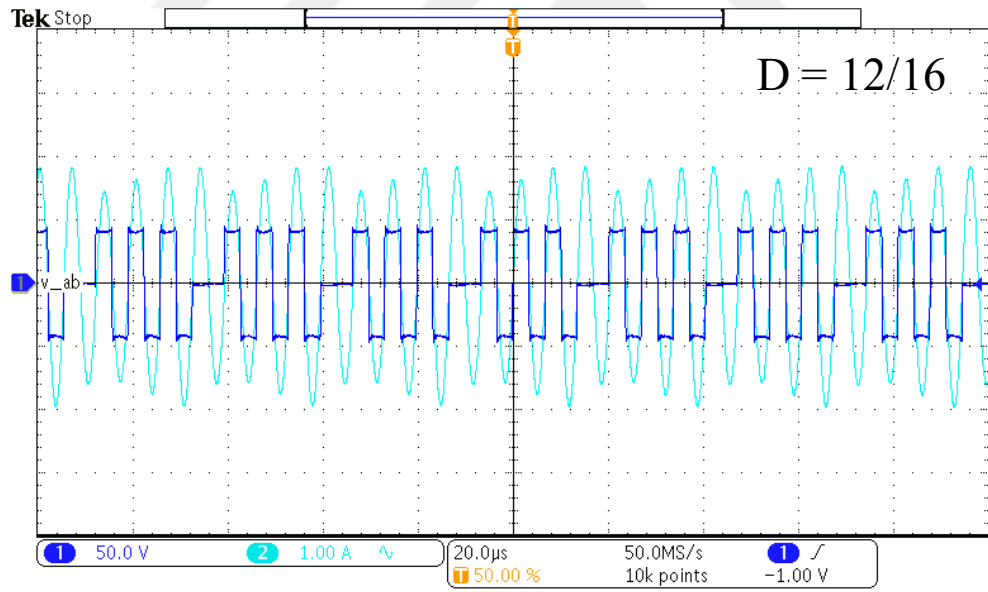
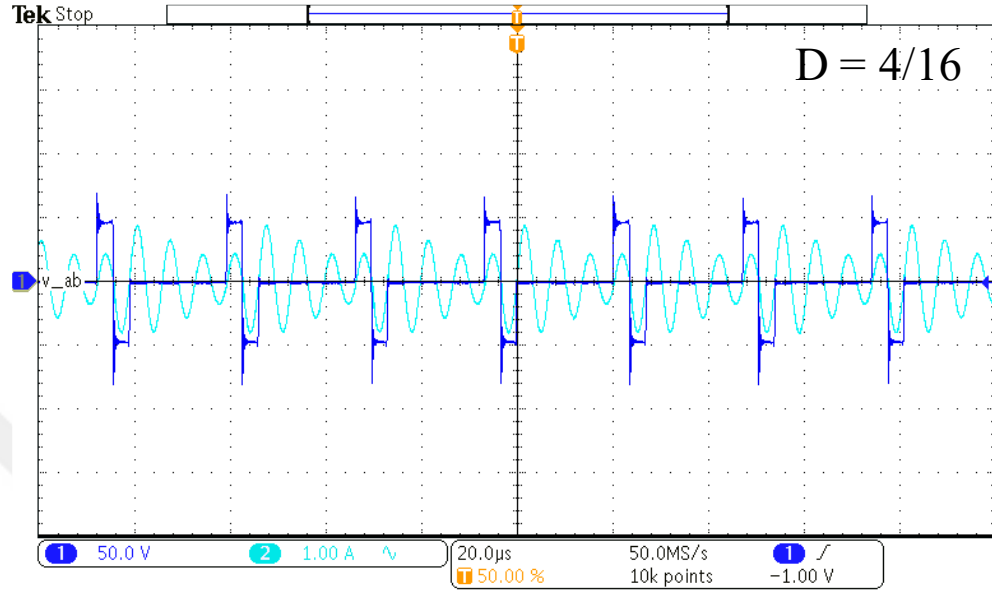
Şekil 6.34’de generatör 1000 d/dk hızda çalışırken D oranı değiştirilerek, V_{ab} gerilimi ve rezonans akımı ölçülmektedir.



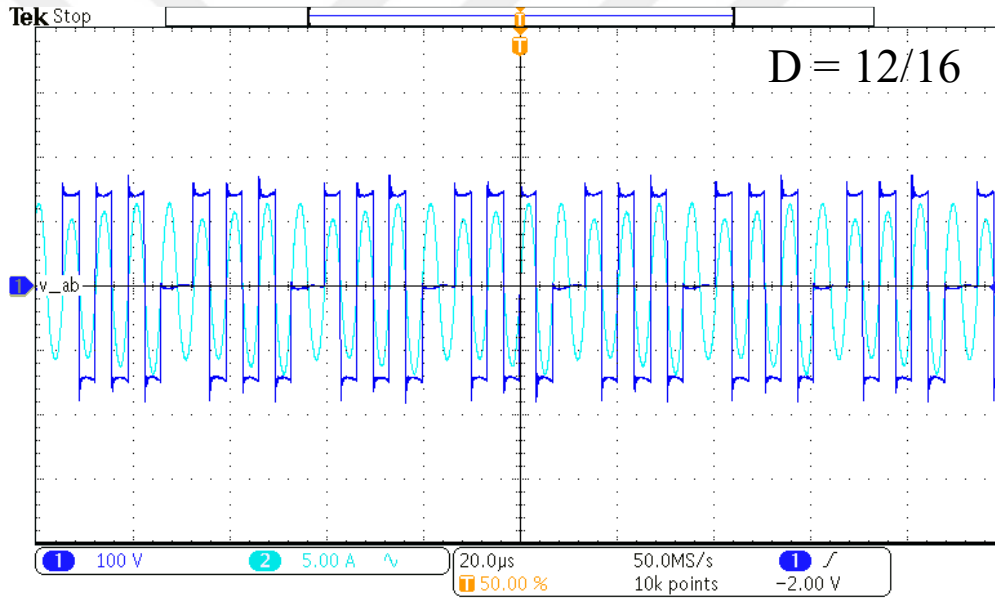
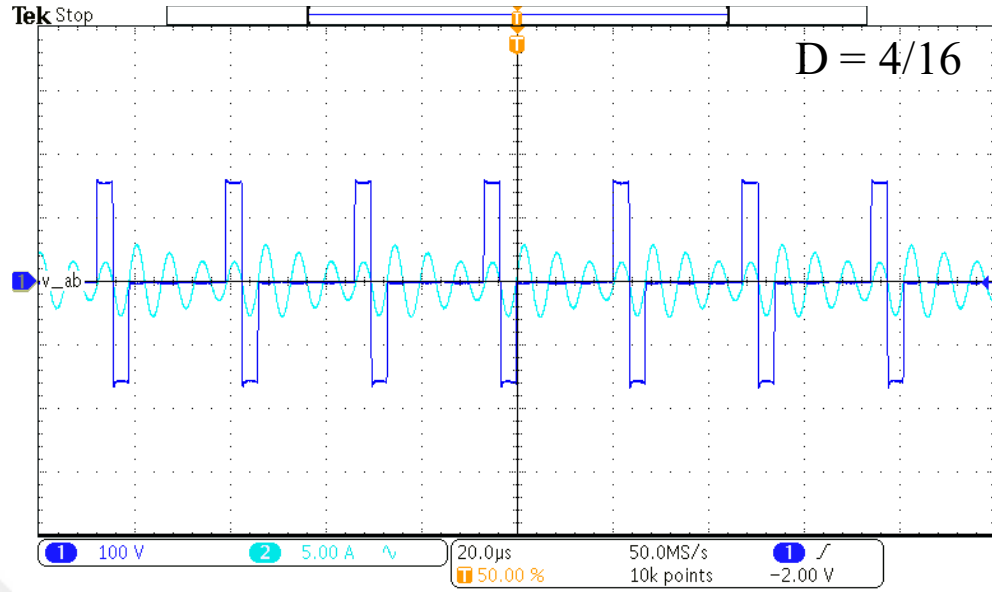
Şekil 6.34. 1000d/dk hızda D değerine göre V_{ab} gerilimleri ve rezonans akımları.

Şekil 6.33 ve 6.34 incelendiğinde düşük devir ve yüksek devirlerde DYM yönteminin başarılı bir şekilde uygulandığı, her iki yük değerinde yumuşak anahtarlama koşullarının korunduğu görülmektedir. Şekil 6.35 ve 6.36’da sırasıyla 300d/dk ve

1000d/dk generatör hızı için yumuşak anahtarlama durumu detaylı olarak sunulmaktadır.



Şekil 6.35. 300d/dk hızda D değerine göre V_{ab} gerilimleri ve rezonans akımlarının detay görünümü.

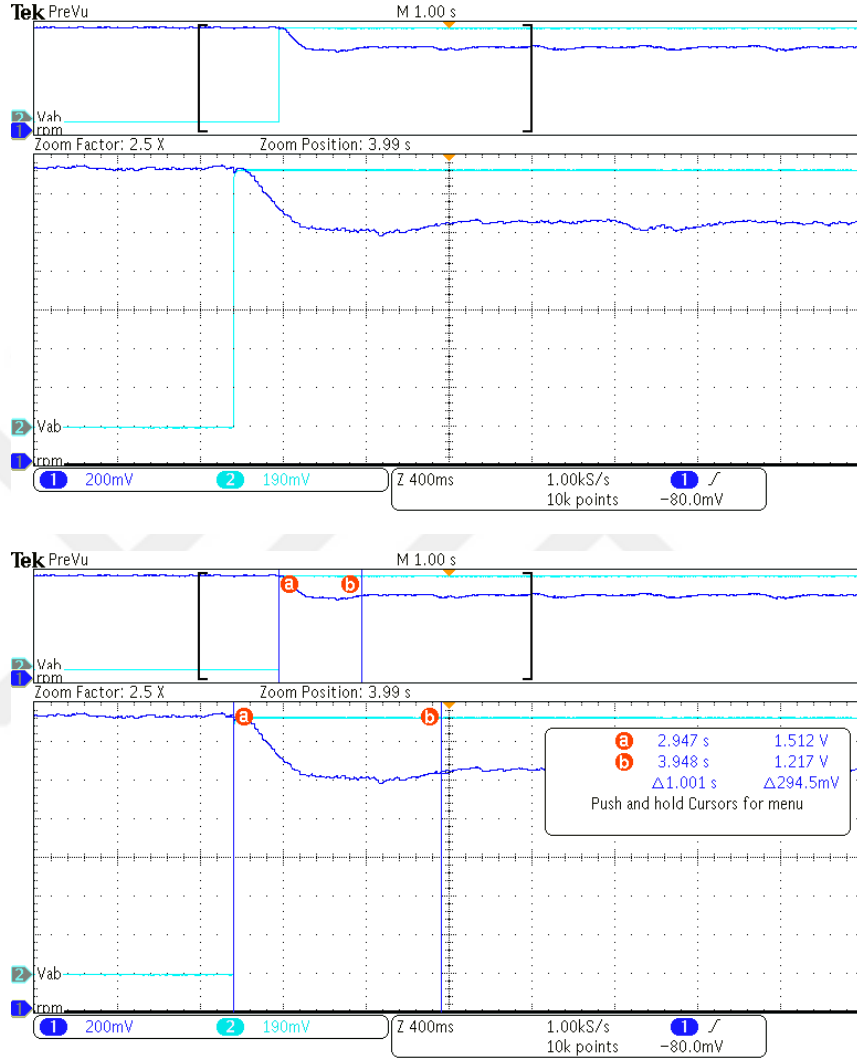


Şekil 6.36. 1000d/dk hızda D değerine göre V_{ab} gerilimleri ve rezonans akımlarının detay görünümü.

6.3. D&G MGNT YÖNTEMİNİN DENEYSEL PERFORMANS ANALİZİ

D&G MGNT algoritmasında kullanılacak adım zamanı, sistemin zaman sabitine (τ) bağlıdır. Sistemin zaman sabitini ve yerleşme zamanını (t_s) tespit etmek için emülatör algoritması çalışırken D değeri anlık olarak arttırılarak SRDA dönüştürücünün yük akımı arttırılmıştır. Sistemin yük değerinin artmasıyla türbin aerodinamik modele

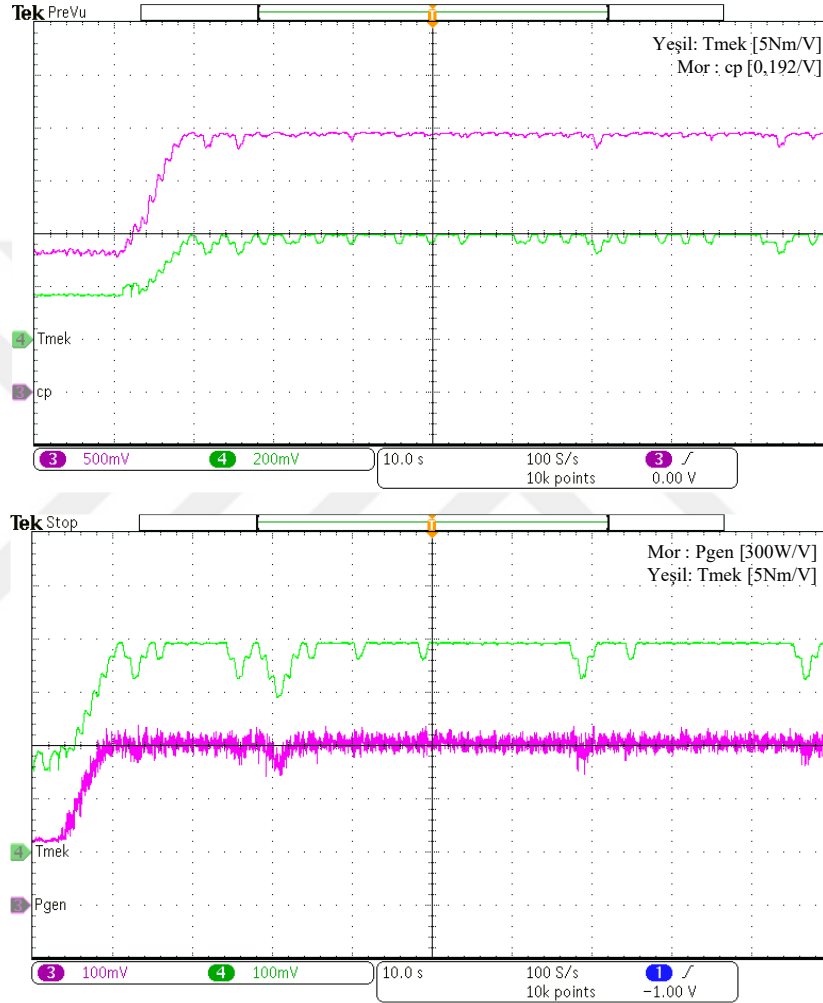
bağlı olarak moment değeri artmış ve hız değeri azalmıştır. Generatörün uygun hız değerine yerleşmesi için geçen zaman, sistemin yerleşme zamanını vermektedir. Şekil 6.37’de yerleşme zamanının tespitine yönelik yapılan ölçüm görülmektedir.



Şekil 6.37. Sistemin yerleşme zamanının belirlenmesi.

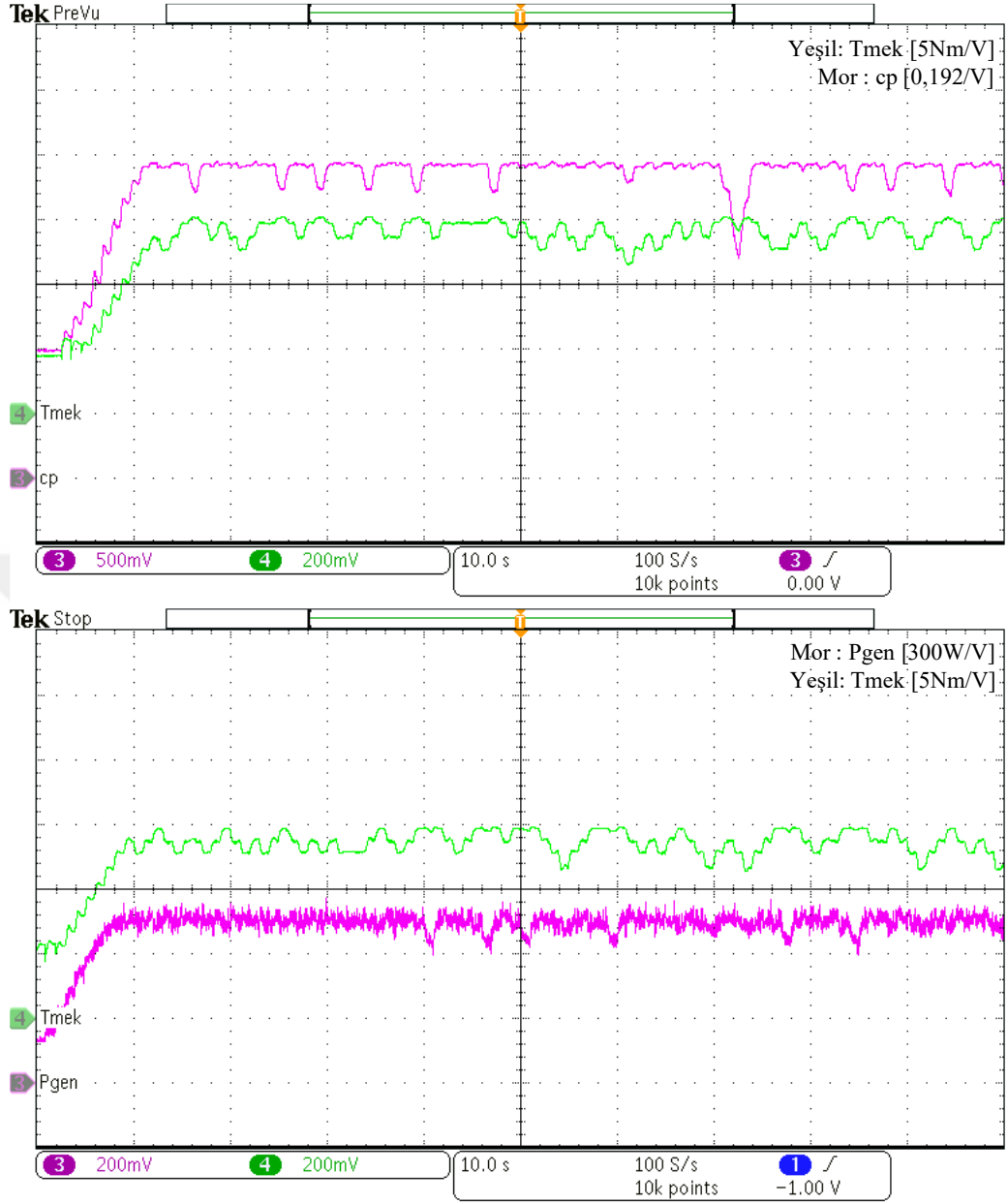
D değerinin anlık değişimi sonrası generatörün uygun hız değerinin %99 una ulaşması için geçen süre sistemin yerleşme zamanını vermektedir. Şekil 6.37 incelendiğinde sistemin yerleşme zamanının 1s olduğu görülmektedir. Tespit edilen yerleşme zamanı aynı zamanda D&G MGNT algoritmasının adım zamanı olarak seçilmiştir. D&G MGNT algoritmasının blok şeması Şekil 4.4’te verilmektedir. MGNT algoritmasının başarısını ölçmek için 5,6,7,8 ve 9m/s rüzgâr hızlarında emülatör yazılımı aktif iken

MGNT yazılımı devreye alınarak sistemin MGN'ye ulaşması ve bu noktada çalışmasını sürdürdüğünü göstermek için moment, güç ve türbin güç katsayısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.38'de 5m/s rüzgâr hızında ve D değeri 1/16 değerinde iken MGNT algoritması devreye alınarak yapılan ölçümler gösterilmektedir. MGNT verimi, sistemin sürekli haldeki MGNT verimidir.



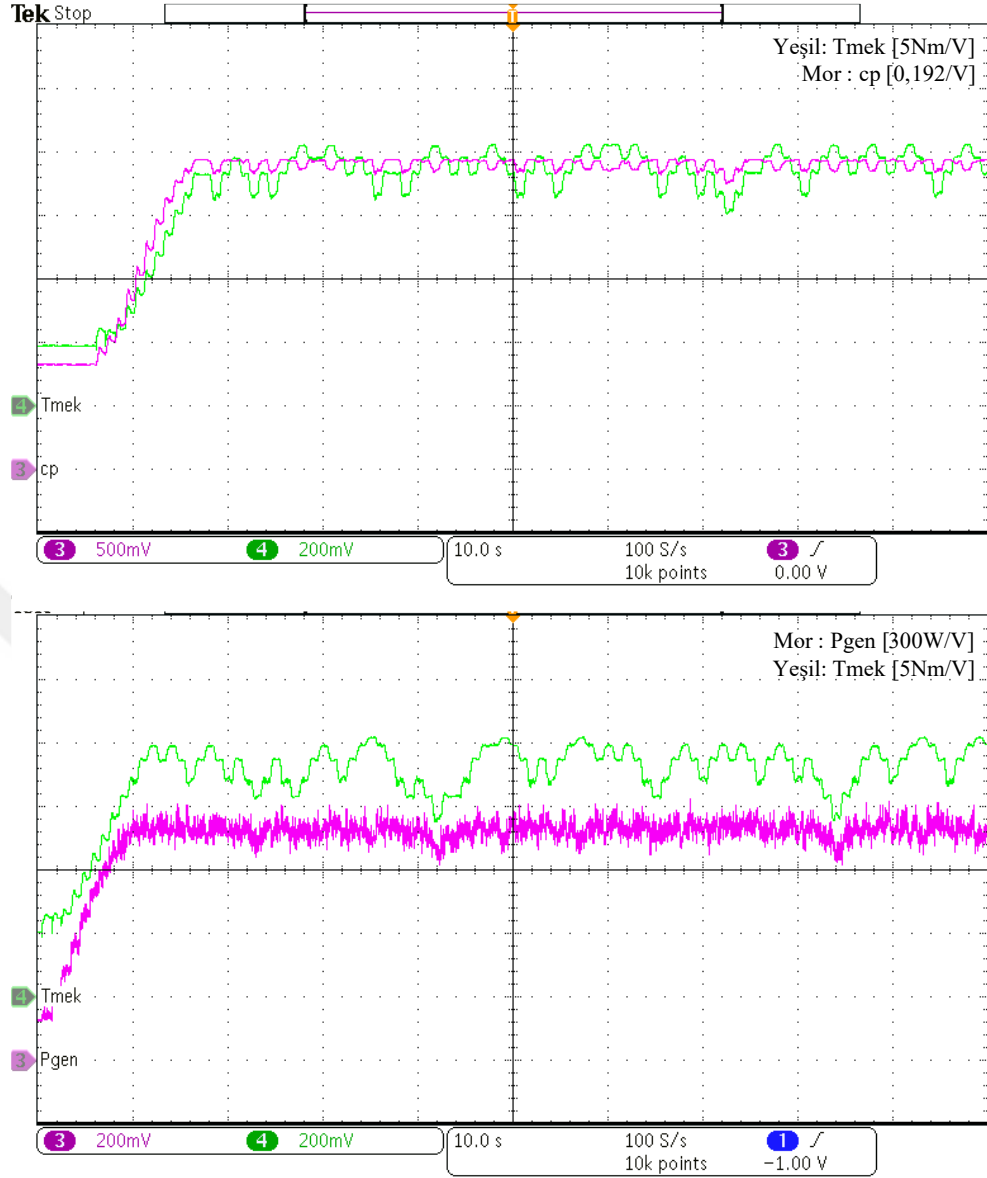
Şekil 6.38. 5m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.

Şekil 6.38 incelendiğinde cp katsayısının 0,47 olduğu görülmektedir. Güç katsayısının maksimum değeri (cp_{max}) 0,48 dir. 5m/s rüzgâr hızı için sistemin MGNT verimi %98'dir. Şekil 6.39'da 6m/s rüzgâr hızı için MGNT algoritmasının performansı sunulmaktadır.



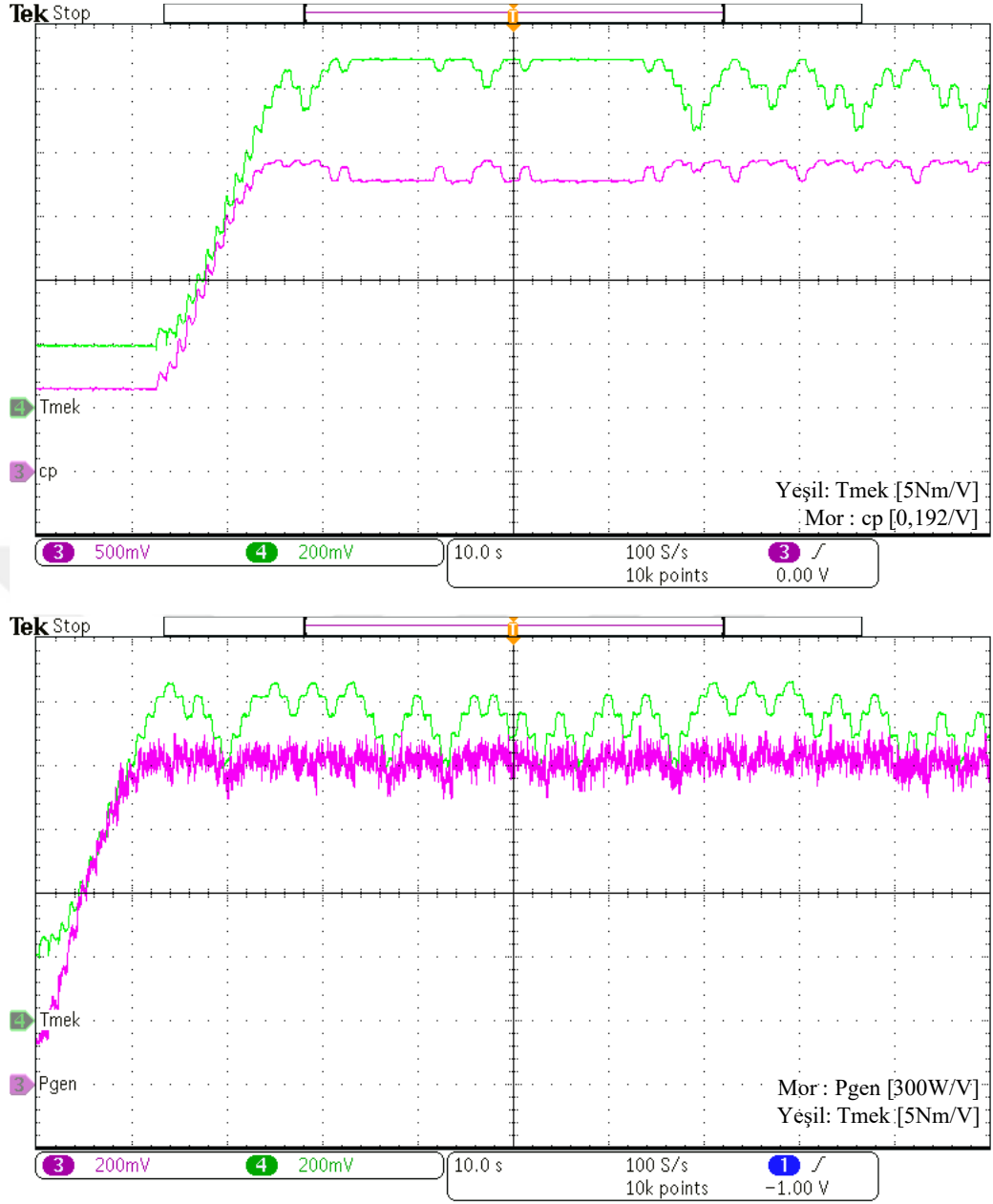
Şekil 6.39. 6m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.

Şekil 6.39 incelendiğinde güç katsayısının 0,46 olduğu ve MGNT veriminin %96 olduğu gözükmemektedir. Şekil 6.40'ta 7m/s rüzgâr hızı için MGNT algoritmasının performansı sunulmaktadır.



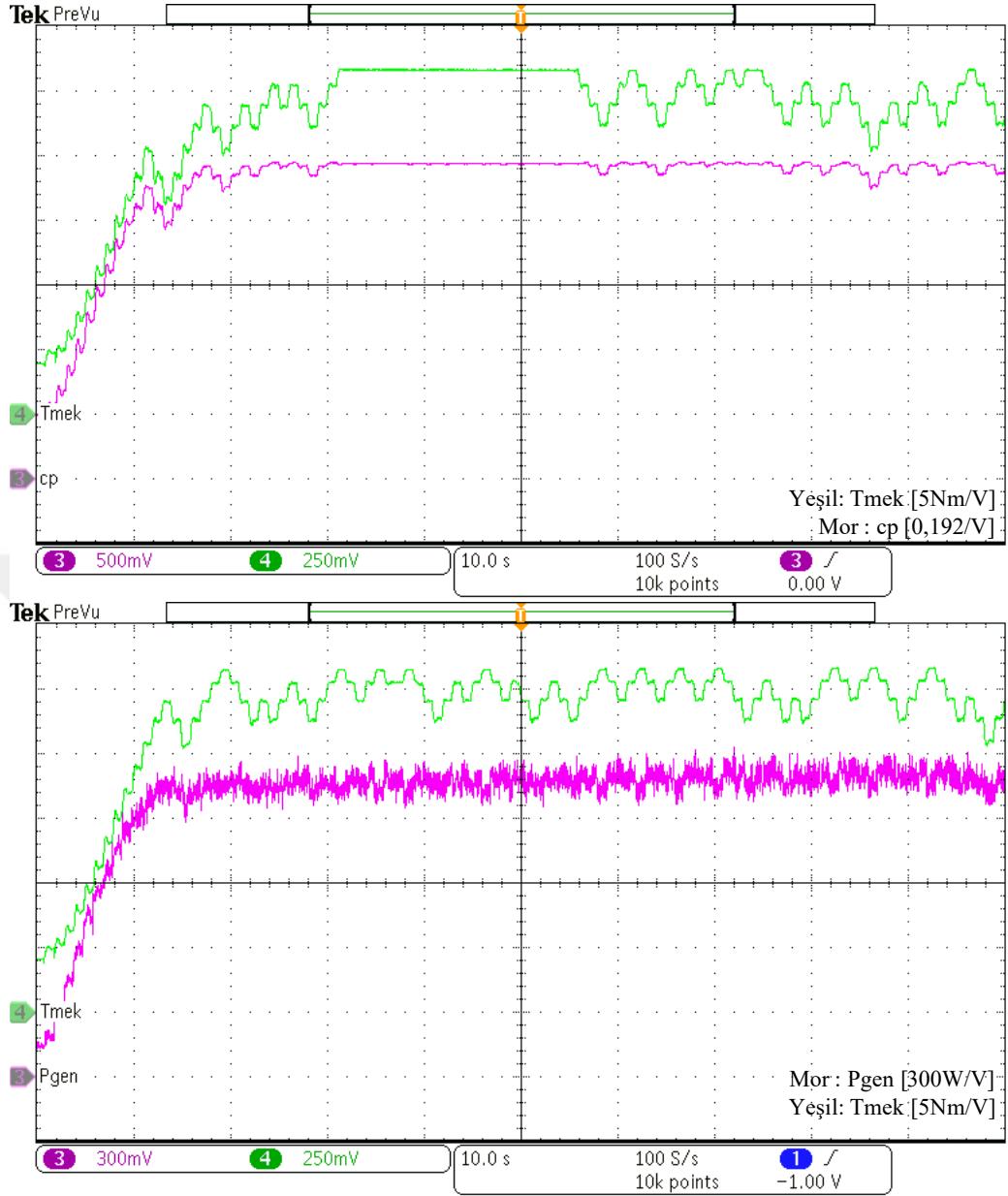
Şekil 6.40. 7m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.

Şekil 6.40 incelendiğinde güç katsayısının 0,46 olduğu ve MGNT veriminin %96 olduğu gözükmemektedir. Şekil 6.41’de 8m/s rüzgâr hızı için MGNT algoritmasının performansı sunulmaktadır.



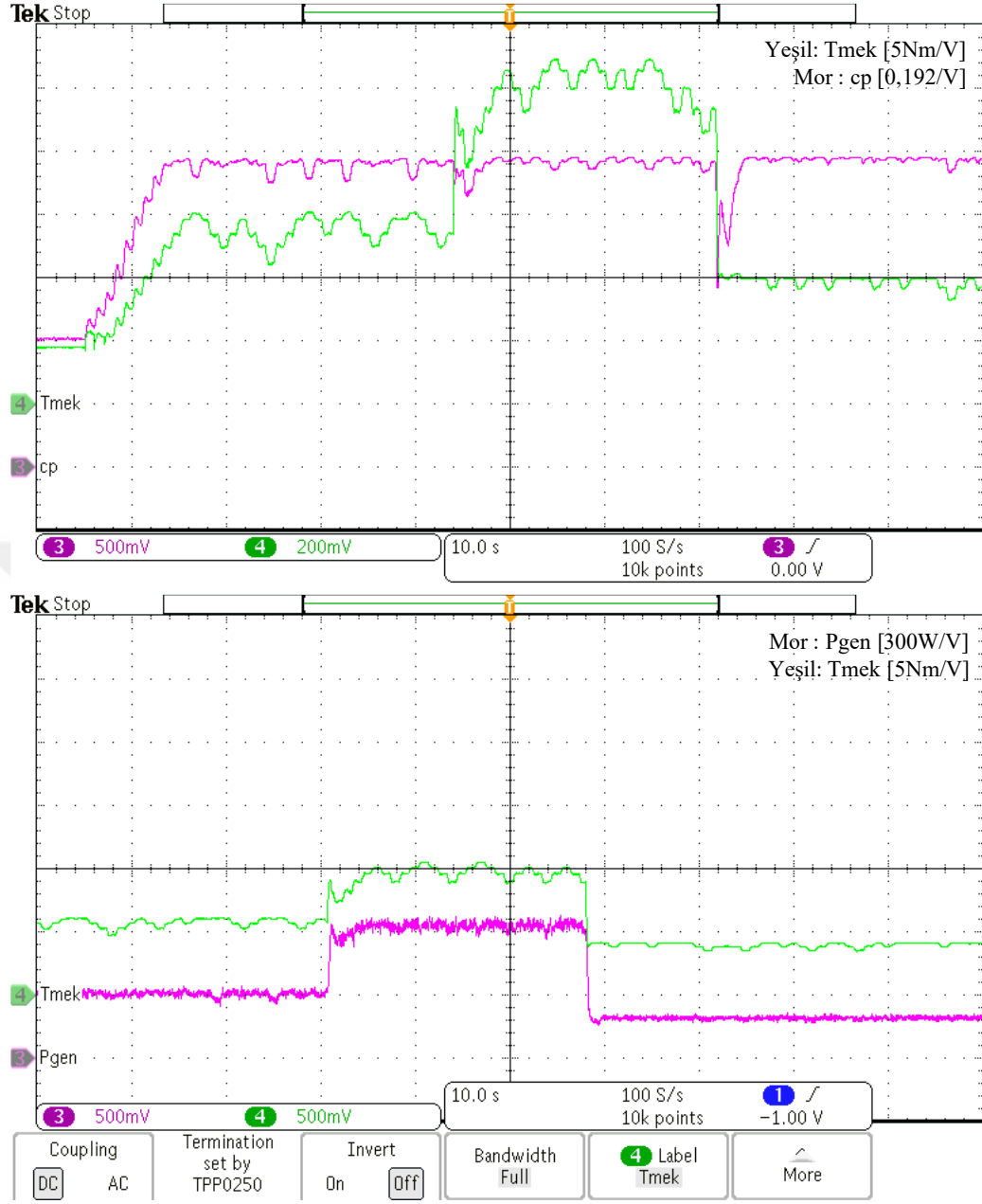
Şekil 6.41. 8m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.

Şekil 6.41 incelendiğinde güç katsayısının 0,45 olduğu ve MGNT veriminin %94 olduğu gözükmemektedir. Şekil 6.42’de 9m/s rüzgâr hızı için MGNT algoritmasının performansı sunulmaktadır.



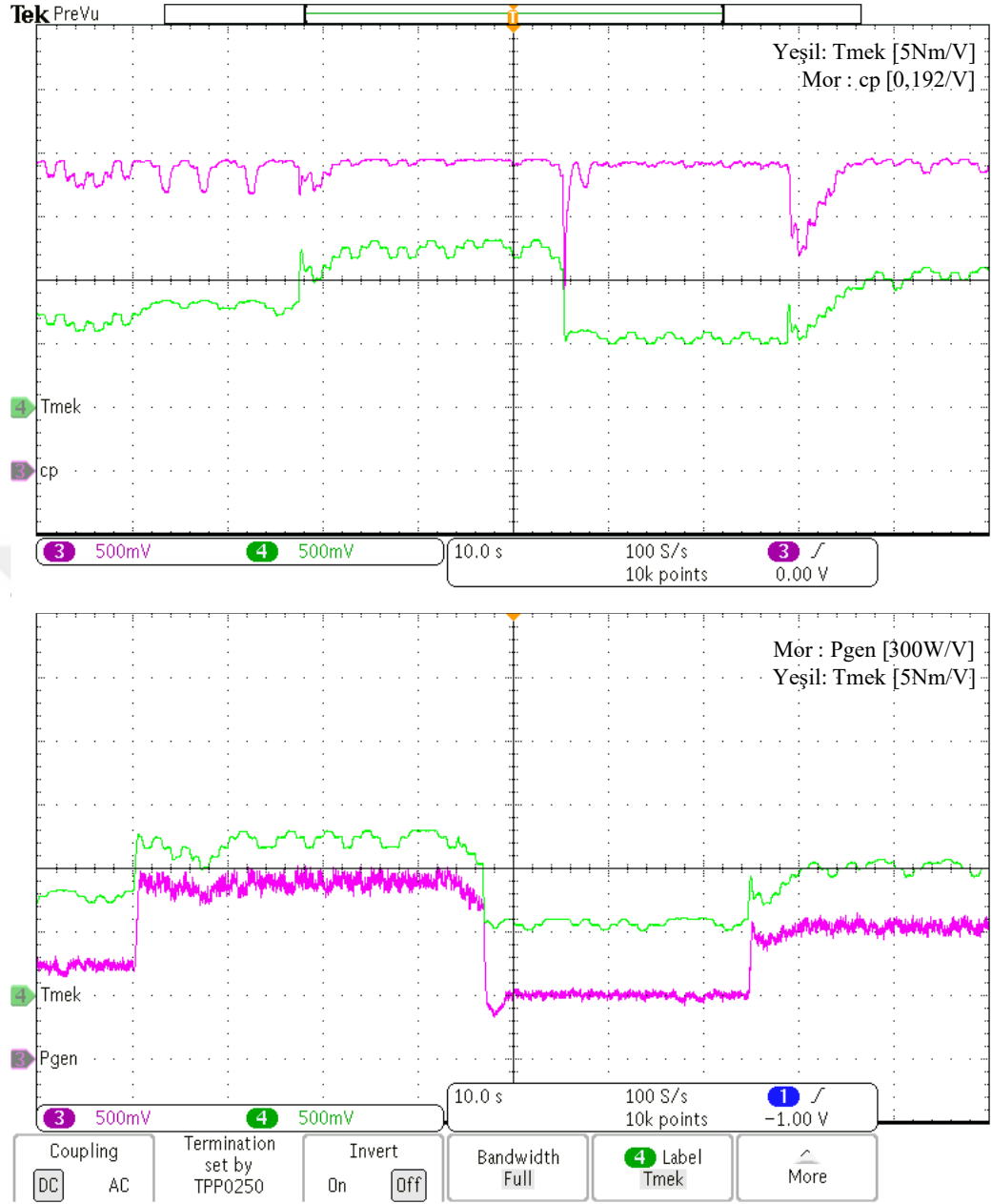
Şekil 6.42. 9m/s rüzgâr hızı için türbin güç katsayısı, generatör çıkış gücü ve moment eğrileri.

Şekil 6.42 incelendiğinde güç katsayısının 0,47 olduğu ve MGNT veriminin %98 olduğu gözükmemektedir. Şekil 6.43’de rüzgâr hızının adım fonksiyonu şeklinde değişiminde MGNT algoritmasının performansı sunulmaktadır. Başlangıç anında 6m/s rüzgâr hızında ve MGN’de sistem çalışırken rüzgâr hızı önce 8m/s değerine çıkarılmış ve daha sonra 5m/s rüzgâr hızı değerine düşürülmüştür.



Şekil 6.43. Farklı rüzgâr hızlarında (6m/s, 8m/s ve 5m/s) MGNT performansı.

Şekil 6.44’de sistem 7m/s rüzgâr hızında MGN’de çalışırken rüzgâr hızı sırasıyla 9m/s, 6m/s ve 8m/s olarak adım fonksiyonu şeklinde değiştirilmiş ve sonuçlar sunulmuştur.



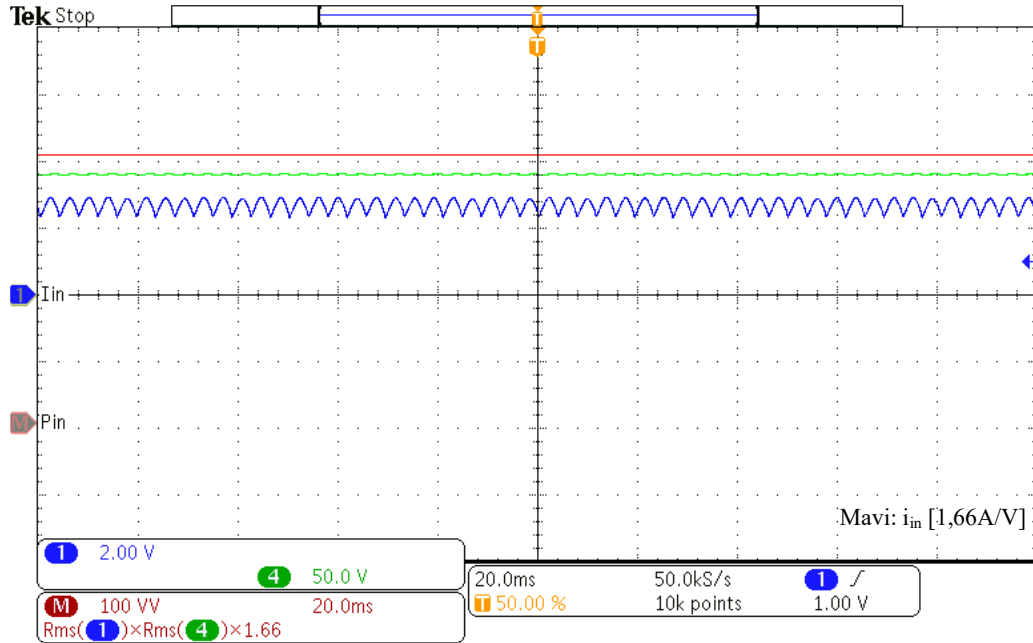
Şekil 6.44. Farklı rüzgâr hızlarında (7m/s, 9m/s, 6m/s ve 8m/s) MGNT performansı.

Yapılan ölçüm sonuçlarından görüldüğü üzere MGNT verimi minimum %94 ve maksimum %98 değerindedir. MGNT deneysel ölçüm sonuçları Çizelge 6.2 de sunulmaktadır. Belirlenen tüm rüzgâr hızlarında MGNT algoritması başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

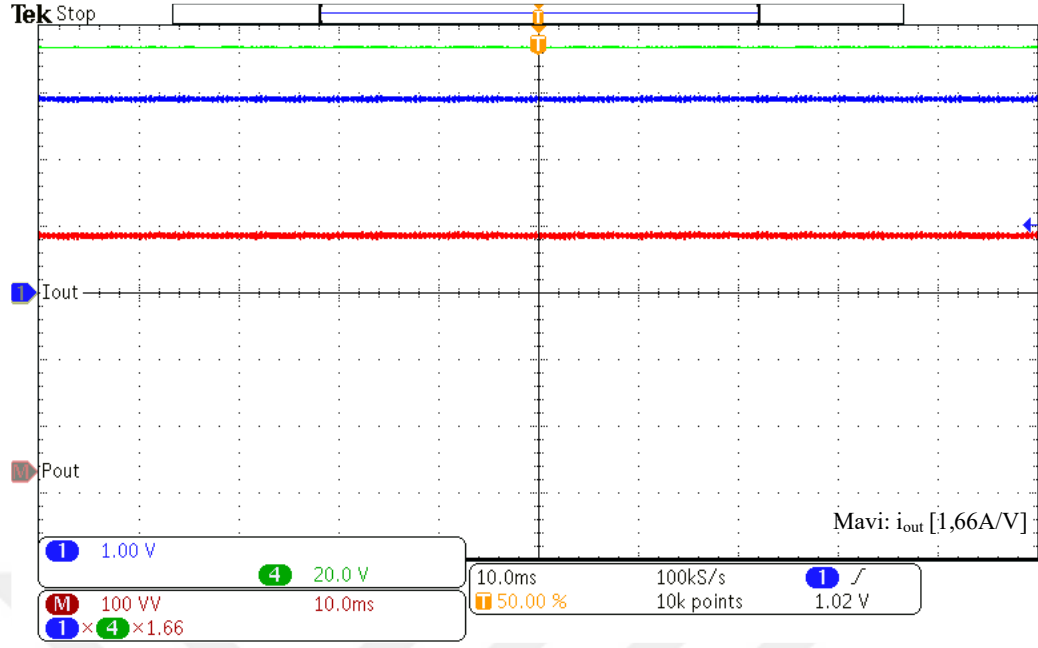
Çizelge 6.2. MGNT deneysel ölçüm sonuçları.

Rüzgar hızı (v_r)	Türbin teorik maksimum güç değeri ($P_{\text{Türbin}}$)	Ortalama generatör çıkış gücü ($P_{\text{gen_ort}}$)	Ortalama türbin güç katsayısı (C_{p_ort})	Ortalama mekanik moment ($T_{\text{mek_ort}}$)	Ortalama MGNT verimi (η)
(m/s)	(Watt)	(Watt)	(Birimsiz)	(Nm)	(Birimsiz)
5	96	94	0,47	1,95	%98
6	166	157	0,46	2,8	%96
7	264	250	0,46	3,76	%96
8	394	312	0,45	4,74	%94
9	561	432	0,47	6,6	%98

Generatörün 650 d/dk hızında çalıştığı durumda, D değeri 15/16 olarak seçildiğinde, SRDA dönüştürücüsünün giriş gerilim, akım ve güç değerleri Şekil 6.45'te; yük tarafındaki gerilim, akım ve güç değerleri ise Şekil 6.46'da sunulmaktadır. Giriş ortalama güç değeri 403 watt ve çıkış ortalama güç değeri 365 watt olarak ölçülmüştür. Her iki güç değeri karşılaştırıldığında ortalama dönüştürücü verimi %91 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 6.45. SRDA dönüştürücü giriş gerilim, akım ve güç ölçümleri.



Şekil 6.46. SRDA dönüştürücü çıkış gerilim, akım ve güç ölçümleri.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

7.1. SONUÇ

Bu çalışmada, küçük güçlü rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri için yüksek verimli, güvenilir ve kompakt yapıda bir güç dönüştürücü geliştirilmiş; sistemin farklı rüzgâr hızlarında MGNT yüksek doğrulukla gerçekleştirebilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla geliştirilen donanım ve kontrol mimarisi hem teorik analizler hem de deneysel ölçümlerle başarıyla doğrulanmıştır.

Geliştirilen rüzgâr türbini emülatörü sayesinde, sabit mıknatıslı senkron motor kullanılarak farklı rüzgâr senaryoları gerçeğe yakın şekilde simüle edilmiş ve güç üretim koşulları laboratuvar ortamında detaylı şekilde incelenmiştir. SRDA dönüştürücü, 16'lık düzensiz DYM yöntemiyle kontrol edilerek rezonans frekansına yakın çalıştırılmış; bu sayede tüm yük aralığında yumuşak anahtarlama koşulları sağlanarak anahtarlama kayıpları minimize edilmiştir. 150 kHz rezonans frekansında çalışan sistem, pasif eleman boyutlarının küçültülmesine olanak tanımış ve güç yoğunluğunda önemli bir artış sağlamıştır.

MGNT için kullanılan D&G algoritması, sensörsüz yapıda uygulanarak, mekanik sensör ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Bu noktada, ÇİDGİ-FKD algoritması ve aktif-reaktif güç teorisi entegre edilerek, generatör çıkışından elde edilen verilerle sistemin MGNT'yi mümkün kılınmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, sistemin 5–10 m/s rüzgâr hız aralığında etkin bir şekilde MGNT gerçekleştirebildiğini ve tüm çalışma aralığında anahtarlama kayıplarını minimize ederek, yüksek verimlilikle çalıştığını ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma; küçük güçlü rüzgâr enerjisi sistemlerinin performansını artırmaya yönelik özgün bir güç dönüştürücü ve kontrol yaklaşımı sunmakta, aynı zamanda ticari uygulamalar ve akademik araştırmalar için genişletilebilir bir temel oluşturmaktadır. Geliştirilen yapının farklı güç seviyelerinde ve değişen yük koşullarında da uygulanabilirliği, gelecekte yapılacak çalışmalarla daha da derinlemesine değerlendirilebilir.

7.2. GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında geliştirilen güç dönüştürücü topolojisi, kontrol algoritması ve emülasyon altyapısı, küçük güçlü rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde yüksek verimlilik ve güvenilirlik elde etmek amacıyla tasarlanmış ve başarıyla uygulanmıştır. Ancak sistemin potansiyeli, ilerleyen çalışmalarla daha da genişletilebilir.

Gelecek çalışmalarda, önerilen SRDA topolojisinin farklı yarı iletken teknolojileri (örneğin GaN veya SiC tabanlı anahtarlayıcılar) ile entegre edilerek, anahtarlama frekansının daha da artırılması ve termal performansın iyileştirilmesi hedeflenebilir. Ayrıca, önerilen sistemin çeşitli yük profillerinde ve daha geniş rüzgâr hız aralıklarında performansını incelemek üzere saha koşullarında test edilmesi, yapının pratik uygulanabilirliğini değerlendirme açısından faydalı olacaktır.

MGNT algoritmasının daha gelişmiş sürümleri (örneğin yapay zekâ tabanlı tahmin algoritmaları, adaptif kontrol teknikleri) ile karşılaştırılması, sistemin kararlılığı ve tepkiselliği açısından ilave bilgiler sağlayabilir. Ayrıca, geliştirilen kontrol yapısının farklı türbin tipleri veya hibrit enerji sistemleri ile entegrasyonu da değerlendirilerek, çok kaynaklı enerji dönüşüm sistemleri için yeni çözümler üretilebilir.

Son olarak, geliştirilen sistemin ekonomik analizinin yapılması ve ölçeklenebilirliğinin değerlendirilmesi, ticari uygulamalara geçiş sürecinde önemli bir adım olacaktır. Bu bağlamda hem akademik hem de endüstriyel paydaşlarla yürütülecek iş birlikleri, sistemin daha geniş çaplı uygulamalar için optimize edilmesini mümkün kılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Wu, Q., Sun, Y., “Modeling and Modern Control of Wind Power”, **John Wiley & Sons**, Incorporated, Hoboken, 1-21, 45-82 (2018).
2. Xu, D., et al., “Advanced Control of Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Systems”, **John Wiley & Sons**, Hoboken, 35-46, 73-98 (2018).
3. Yaramasu, V., Wu, B., “Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems”, **John Wiley & Sons**, Hoboken, 96-110, 135-180 (2016).
4. Wu, B., et al., “Power Conversion and Control of Wind Energy Systems”, **John Wiley & Sons**, Hoboken, 32-65 (2011).
5. Hart, D. W., “Power Electronics”, Tata **McGraw-Hill Education**, New Delhi, 335-412 (2011).
6. Erickson, R. W., Maksimovic, D., “Fundamentals of Power Electronics”, **Springer Science & Business Media**, New York, 725-768 (2007).
7. Kazimierczuk, M. K., Czarkowski, D., “Resonant Power Converters”, **John Wiley & Sons**, Hoboken, 235-310 (2012).
8. Kurumatani, H., Katsura, S., “FPGA-based voltage control with PDM inverter for wideband drive system using T-type neutral-point-clamped topology”, **2017 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)**, Australia, 272–277 (2017).
9. Muthuramalingam, A., Vedula, S. V., Janakiraman, P. A., “Performance evaluation of an FPGA controlled soft switched inverter”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 21 (4): 923-932 (2006).
10. Mousa, H. H. H., Youssef, A.-R., Mohamed, E. E. M., “Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based wind generation system”, **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 108: 218-231 (2019).
11. Heydari, M., Smedley, K., “Comparison of maximum power point tracking methods for medium to high power wind energy systems”, **20th Conference on Electrical Power Distribution Networks (EPDC)**, Zahedan, 55–60 (2015).
12. Dali, A., et al., “A new robust control scheme: Application for MPP tracking of a PMSG-based variable-speed wind turbine”, **Renewable Energy**, 172: 1021-1034 (2021).

13. Blaabjerg, F., Chen, M., Huang, L., “Power electronics in wind generation systems”, **Nature Reviews Electrical Engineering**, 1 (4): 234-250 (2024).
14. Choubey, S., Patro, S. K., Bhalja, B. R., “A Study of Power Electronic Converters for Wind Energy Conversion System”, **Fourth International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)**, Raipur, 161–166 (2025).
15. Ramachandran, V., Pitchaimuthu, R., Selvan, M. P., “Systematized active power control of PMSG-based wind-driven generators”, **IEEE Systems Journal**, 14 (1): 708-717 (2019).
16. Li, S., et al., “Optimal and direct-current vector control of direct-driven PMSG wind turbines”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 27 (5): 2325-2337 (2011).
17. Kou, P., Liang, D., Gao, L., “Distributed coordination of multiple PMSGs in an islanded DC microgrid for load sharing”, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 32 (2): 471-485 (2017).
18. Zhang, D., Tseng, K., “A universal controller for grid-tied DC/AC converters for harnessing PV panel based solar energy and PMSG based wind energy”, **11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)**, Sydney, 256–261 (2015).
19. Dong, L., et al., “Non-grid-connected wind power generating system with permanent magnet synchronous generator and buck/boost converter”, **World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference**, Nanjing, 120–125 (2009).
20. Fan, S., Ma, W., Lim, T. C., Williams, B. W., “Design and control of a wind energy conversion system based on a resonant DC/DC converter”, **IET Renewable Power Generation**, 7 (3): 265-274 (2013).
21. Dincan, C., Kaer, P., “Control and modulation for loss minimization for DC/DC converter in wind farm”, PCIM Europe 2016; **International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management**, Nuremberg, 540–545 (2016).
22. Tayebi, S. M., et al., “Dual-input single-resonant tank LLC converter with phase shift control for PV applications”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 55 (2): 1729-1739 (2018).
23. Zhang, Q., et al., “A center point iteration MPPT method with application on the frequency-modulated LLC microinverter”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 29 (3): 1262-1274 (2013).

24. Fujita, H., Akagi, H., “Pulse-density-modulated power control of a 4 kW, 450 kHz voltage-source inverter for induction melting applications”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 32 (2): 279-286 (1996).
25. Karafil, A., Ozbay, H., Oncu, S., “Design and Analysis of Single-Phase Grid-Tied Inverter With PDM MPPT-Controlled Converter”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 35 (5): 4756-4766 (2019).
26. Karafil, A., Ozbay, H., Oncu, S., “Comparison of regular and irregular 32 pulse density modulation patterns for induction heating”, **IET Power Electronics**, 14 (1): 78-89 (2021).
27. Li, H., et al., “Pulse density modulation for maximum efficiency point tracking of wireless power transfer systems”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 33 (6): 5492-5501 (2017).
28. Fan, M., et al., “A novel pulse density modulation with semi-bridgeless active rectifier in inductive power transfer system for rail vehicle”, **CES Transactions on Electrical Machines and Systems**, 1 (4): 397-404 (2017).
29. Esteve, V., et al., “Improving the efficiency of IGBT series-resonant inverters using pulse density modulation”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 58 (3): 979-987 (2011).
30. Çiftçi, A., Dursun, M., “Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Maksimum Güç İzleme Algoritması ile Vektör Kontrolü”, **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 5 (2): 356-369 (2017).
31. Yaylacı, E. K., Yazıcı, İ., “Otonom bir Rüzgâr Enerji Sistemi için Örnek Test Düzeninin Gerçeklenmesi”, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji**, 7 (1): 175-183 (2019).
32. Ertike, Ş., Yıldırım, D., Turhan, E., İnal, T. T., “Düşük Güçlü Rüzgar Türbinleri İçin Maksimum Güç Noktasını İzleyen Bir Akü Şarj Sistemi”, **Rüzgar Enerjisi Sempozyumu**, Samsun, 4–5 (2009).
33. Perçin, H. B., Çalışkan, A., “Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinde Maksimum Güç Kontrolünün Akıllı Yapı Tabanlı Modellemesi”, **Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 24: 219-225 (2021).
34. Özbay, H., “Rezonans Dönüştürücülü Fotovoltaik Batarya Şarj Sistemi”, **Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi**, 2 (1): 11-20 (2020).
35. Çetin, S., “Veri Merkezi Uygulamaları İçin Yüksek Verimli Bir LLC Rezonanslı DC-DC Dönüştürücü Tasarımı”, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji**, 5 (1): 45-54 (2017).

36. Nacar, S., “Elektroliz İle Hidrojen Üretiminde Kullanılan Tam Köprü Seri Rezonans Dönüştürücünün Farklı Kontrol Teknikleri İçin Performansının Karşılaştırılması”, **Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 30-95 (2019).
37. Karafil, A., “PDM Kontrollü Rezonans Dönüştürücülü MPPT İçeren Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Eviricinin Gerçekleştirilmesi”, **Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 21-86 (2019).
38. Johari, M., Jalil, M., Shariff, M. F. M., “Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT)”, **International Journal of Engineering and Technology**, 7 (4.13): 74-80 (2018).
39. Polinder, H., et al., “Trends in wind turbine generator systems”, **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, 1 (3): 174-185 (2013).
40. Bhutto, D. K., et al., “Wind energy conversion systems (WECS) generators: A review”, **2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)**, Sukkur, 85–90 (2019).
41. Blaabjerg, F., Ma, K., “Wind energy systems”, **Proceedings of the IEEE**, 105 (11): 2116-2131 (2017).
42. Volkov, A. G., Shtein, D. A., Zharkov, M. A., “Analysis of the modern state of power converters for wind turbine systems”, **19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)**, Erlagol, 173–176 (2018).
43. Hansen, L. H., et al., “Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines”, **Risø National Laboratory Report**, Roskilde, 1–56 (2001).
44. Li, H., Chen, Z., “Overview of different wind generator systems and their comparisons”, **IET Renewable Power Generation**, 2 (2): 123-138 (2008).
45. Yaramasu, V., et al., “High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies”, **Proceedings of the IEEE**, 103 (5): 740-788 (2015).
46. Yaylacı, E. K., “Rüzgar enerji sistemlerinde maksimum güç noktası takibi için kayan kipli denetleyici tasarımı”, **Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 42–86 (2017).
47. Küçük, T. V., “Asenkron motorun vektör denetimi ile rüzgâr türbinleri için fiziksel emülatör tasarımı ve deneysel uygulaması”, **Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 32–79 (2018).
48. Heier, S., “Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems”, **John Wiley & Sons**, Chichester, 1–320 (2014).

49. Sarkar, J., Khule, S. S., “A study of MPPT schemes in PMSG based wind turbine system”, **2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)**, Chennai, 3234–3239 (2016).
50. Teodorescu, R., Blaabjerg, F., “Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 19 (5): 1323-1332 (2004).
51. Blaabjerg, F., Ma, K., “Future on power electronics for wind turbine systems”, **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, 1 (3): 139-152 (2013).
52. Elkhateb, A., Adam, G., Morrow, D. J., “DC-to-DC Converter Topologies for Wireless Power Transfer in Electric Vehicles”, **IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, Lisbon, 4413–4418 (2019).
53. Ragab, A. S., Saad, N. H., El-Sattar, A. A., “LLC resonant DC-DC converter for grid-connected PV system”, **12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)**, Cairo, 89–94 (2017).
54. Buccella, C., et al., “A grid-connected PV system with LLC resonant DC-DC converter”, **2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)**, Alghero, 650–655 (2013).
55. Buccella, C., et al., “Multi string grid-connected PV system with LLC resonant DC/DC converter”, **Intelligent Industrial Systems**, 1 (1): 37-49 (2015).
56. Karthik, M., Panda, A. K., “Enhancement of Power Quality in a Grid-Connected Photovoltaic System using Robust Modified Champernowne Function Adaptive Filter and DSOGI-FLL”, **3rd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)**, Bhubaneswar, 1–6 (2023).
57. Dao, N. D., Lee, D. C., Lee, S., “A simple and robust sensorless control based on stator current vector for PMSG wind power systems”, **IEEE Access**, 7: 8070-8080 (2018).
58. Patil, K., Patel, H. H., “Modified SOGI based shunt active power filter to tackle various grid voltage abnormalities”, **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 20 (5): 1466-1474 (2017).
59. Nazib, A. A., Holmes, D. G., McGrath, B. P., “Decoupled DSOGI-PLL for improved three phase grid synchronisation”, **International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 – ECCE Asia)**, Niigata, 3670–3677 (2018).
60. Kherbach, A., Bendib, A., Kara, K., Chouder, A., “ARM based implementation of SOGI-FLL method for power calculation in single-phase power system”, **5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B)**, Boumerdes, 1–6 (2017).

ÖZGEÇMİŞ

Tufan Volkan KÜÇÜK, ilk, orta ve lise öğrenimini Bursa’da tamamlamıştır. 2002 yılında Demirtaşpaşa Anadolu Teknik Lisesi Elektrik Bölümünden mezun olduktan sonra, 2004 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünde lisans eğitimine başlamış ve 2008 yılında mezun olmuştur. Mezuniyetinin ardından 2009–2012 yılları arasında otomotiv sektöründe faaliyet gösteren özel bir şirkette üretim mühendisi olarak görev yapmıştır. 2012 yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi’nde Öğretim Görevlisi olarak akademik kariyerine başlamış ve halen aynı üniversitede bu görevine devam etmektedir. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı yüksek lisans eğitimini 2018 yılında başarıyla tamamlamıştır. Akademik ilgi alanları arasında yenilenebilir enerji sistemleri, güç elektroniği, elektrik makineleri ve sensörsüz kontrol yöntemleri yer almaktadır.