

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN DA/AA EVİRİCİ
MODELLEMESİ VE ANALİZİ

MUSTAFA AYDEMİR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2014

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE
KULLANILAN DA/AA EVİRİCİ
MODELLEMESİ VE ANALİZİ

MUSTAFA AYDEMİR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU

GEBZE

2014



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 24.01.2014 tarih ve 2014/04 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 19/02/2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mustafa AYDEMİR'in tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :Prof.Dr.Selim SİVRİOĞLU

ÜYE

:Doç.Dr.Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE

:Doç.Dr.Ercan ERTÜRK

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Doğada kendiliğinden var olan yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi kavramı, tüketim yerine yakın noktalarda elektrik üretimini mümkün kılması, çevresel etkileri en aza indirmesi, diğer enerji sistemlerine göre daha güvenilir ve daha ekonomik olması gibi nedenlerle birlikte artan önemiyle geniş uygulama alanı bulmaktadır.

Enerji santrallerinin elektrik dağıtım veya iletim sistemine bağlantısında şebeke işleticileri tarafından belirlenen güç kalitesi standartlarının sağlanması gerekmektedir. Bu gereklilik, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretim tesisleri için de geçerlidir. Türkiye’de şebeke bağlantı kriterleri, devlet tarafından belirlenmekte ve “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği” adı altında yayımlanmaktadır.

Sistemin kararlı ve güvenilir çalışması için gerekli kriterler, güç elektroniği devreleri ile sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, rüzgar türbinleri güç devrelerinde kullanılan elektrikselsel güç dönüşüm teknikleri incelendi. Santralin, şebeke kriterleri uyarınca şebekeye bağlantısını gerçekleştiren DA/AA çevirgeç (evirici), Matlab & Simulink ortamında modellenerek farklı rüzgar hızlarında ve şebeke hatalarındaki davranışlarını gösteren simülasyon sonuçları analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (SVPWM), Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör, DA/AA Çevirgeç, Düşük Gerilimde İşletme Devamı.

SUMMARY

Energy production from renewable energy sources which are inherent in the nature, are in wide range of applications with its increasing importance because of its suitability for the electricity production near the consumption point, minimizing the environmental effects, being more reliable and relatively more cost effective than the conventional energy systems.

During the connection of the power station to the distribution or transmission system, it's obligatory to maintain the power quality standards of the grid operators. This requirement is also valid for the energy production facilities of renewable energy sources. In Turkey, the grid connection criterions are defined and published by the government under the name of Electricity Market Grid Regulations.

The criterions for the stable and reliable operation of the power stations are provided by the power electronics circuits.

In this study, electrical power conversion techniques which are used in the power circuits of wind turbines are investigated. The modelling of DC/AC power converter (inverter), that provides the grid connection of the wind turbine according to the grid requirements, is achieved in Matlab & Simulink environment. At the end, the simulation results illustrating the response of the inverter in different wind speed and fault scenarios are analyzed.

Key Words: Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM), DC/AC Inverter, Permanent Magnet Synchronous Generator, Low Voltage Ride Through (LVRT).

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca benden yardım ve desteğini eksik etmeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince hoşgöruları ve yardımlarından dolayı aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGAR TÜRBİNİ YAPISI VE BİLEŞENLERİ	4
2.1. Generatör	5
2.1.1. Asenkron (İndüksiyon) Generatörler	6
2.1.1.1. Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG)	6
2.1.1.2. Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG)	7
2.1.2. Senkron Generatörler	9
2.1.2.1. Rotoru Sargılı Senkron Generatörler	9
2.1.2.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörler	9
2.2. Güç Elektroniği Donanımı	10
2.2.1. Güç Elektroniği Anahtarlama Elemanları	13
2.2.2. Generatör Tarafı Güç Çevirgeci	15
2.2.3. Maksimum Güç Noktası İzleme Sistemi	16
2.2.3.1. Tip Hız Oranı Kontrol	17
2.2.3.2. Güç Sinyali Geri Beslemesi	19
2.2.3.3. THO ve GSGB Karşılaştırması	20
2.2.3.4. Tepe Tırmanma (Hill Climbing) Yöntemi	20
2.2.4. Şebeke Tarafı Çevirgeç (Evirici)	25
2.2.4.1. Şebeke Bağlantı Kriterleri	25
2.2.4.1.1. Arıza Sırası ve Sonrası Sağlanması Gereken Tepki	25
2.2.4.1.2. Frekans Tepkisi	27
2.2.4.1.3. Reaktif Güç Kapasitesi	28

3. SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON GENERATÖR	29
MATEMATİKSEL MODELİ	
4. SVPWM EVİRİCİ TASARIMI	34
4.1. Evirici Tasarımı Elektriksel Parametreleri	35
4.2. LCL Filtre Modeli	38
4.2.1. Çıkış Gerilim Kontrolü	41
4.3. Akımın d-q Eksen Denetleyicileri	48
4.4. Senkronizasyon Teknikleri	50
4.4.1. PLL Senkronizasyon Tekniği	51
4.4.2. CLARK & PARK Dönüşümü	52
4.5. SVPWM (Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu)	53
5. MATLAB & SIMULİNK MODELİ	57
5.1. Simülasyon Çıktıları	58
5.1.1. Sabit Rüzgar Hızı ve Şebeke Arıza Durumu	58
5.1.2. Değişken Rüzgar Hızı ve Şebeke Arıza Durumu	63
6. SONUÇLAR ve YORUMLAR	65
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

LVRT	:	Low Voltage Ride Through (Düşük Gerilimde İşletme Devamı)
PLL	:	Phase Locked Loop (Faz Kilitlemeli Çevrim)
PWM	:	Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
SMSG	:	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
SVPWM	:	Space Vector Pulse Width Modulation (Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu)
VSC	:	Voltage Source Converter (Gerilim Kaynaklı Çevirgeç)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Rüzgar santrali elektromekanik ve elektronik sistem blok diyagramı.	4
2.2: Sincap kafesli asenkron generatör ve bağlantı düzeneği.	6
2.3: Optislip asenkron generatör ve bağlantı düzeneği.	7
2.4: Çift beslemeli asenkron generatör ve bağlantı düzeneği.	8
2.5: Rotoru sargılı asenkron generatör ile tam ölçekli frekans çevirgeci.	8
2.6: Senkron generatör ile tam ölçekli frekans çevirgeci.	9
2.7: Doğrudan sürürlü sürekli mıknatıslı senkron generatör modeli.	10
2.8: Rüzgar türbin alt sistemler ve güç elektroniği topolojileri.	12
2.9: Tam ölçekli çevirgeç blok diyagramı.	13
2.10: Tip hız oranı kontrolü blok diyagramı.	17
2.11: THO kontrol sistemi detaylı blok diyagramı.	17
2.12: Türbin mekanik güç-şaft hızı grafiği.	18
2.13: Güç sinyali geri besleme kontrol sistemi blok diyagramı.	19
2.14: Güç sinyali geri besleme kontrol sistemi detayı.	19
2.15: Rüzgar güç türbin şaft hızı eğrisi.	21
2.16: Tepe tırmanma yöntemi blok diyagramı.	21
2.17: Tipik rüzgar türbini güç ve rüzgar hızı karakteristiği.	22
2.18: Rüzgar türbinlerinin arıza durumunda sağlaması gereken tepki.	26
2.19: Gerilim dalgalanmalarında gerekli reaktif güç tepkisi.	27
2.20: Rüzgâr türbini güç-frekans eğrisi.	28
2.21: Rüzgâr santralı reaktif güç kapasite eğrisi.	28
3.1: SM senkron generatör fazör eksenlerinin gösterimi.	29
3.2: Endüksiyon prensibi.	30
3.3: a) q eksen devresi, b) d eksen devresi.	33
4.1: Evirici sistemi modeli.	34
4.2: Evirici çıkışı elektriksel parametreleri.	35
4.3: Evirici devresi temel bileşenleri.	37
4.4: LCL filtre devresi.	38

4.5:	LCL filtresi bode diyagramı.	40
4.6:	LCL devresi köklerin yer eğrileri grafiği.	41
4.7:	LCL filtreli PWM evirici.	41
4.8:	Sistem blok diyagramı birinci indirgeme işlemi.	45
4.9:	Sistem blok diyagramı ikinci indirgeme işlemi.	45
4.10:	Sistem blok diyagramı üçüncü indirgeme işlemi.	46
4.11:	v_q referans girişi ve v_{cq} çıkış grafiği.	47
4.12:	Akım denetleyici blok diyagramı.	48
4.13:	Akım denetleyici birim basamak tepkisi.	49
4.14:	Birim genlikli, 1 sn periyodik sinüs girişi tepkisi.	49
4.15:	Kapalı çevrim transfer fonksiyonu kök yer eğrileri grafiği.	50
4.16:	Kapalı çevrim senkronizasyon blok diyagramı.	51
4.17:	Senkron düzlem PLL tekniği blok diyagramı.	51
4.18:	d ve q dönel referans düzlemi ve a,b,c sabit referans düzlemi	52
4.19:	SVPWM işareti sektörel gösterimi.	53
4.20:	Fazörlerin d ve q ekseninde gösterimi.	54
4.21:	Güç elektroniği anahtarları ve anahtarlama sırası.	55
5.1:	Evirici simulink modeli.	57
5.2:	Referans değerler hesaplama alt sistemi.	57
5.3:	SVPWM darbe üretici alt sistemi.	58
5.4:	Rüzgar hızı ve referans güç grafikleri.	58
5.5:	Şebeke gerilimi ve evirici çıkış gerilimi.	59
5.6:	Şebeke gerilimi ve evirici çıkış gerilim detay görünümü.	59
5.7:	Evirici çıkışı etkin ve tepkin güç grafiği.	60
5.8:	Kontrolsüz durumda akım grafiği.	60
5.9:	Kontrolsüz durumda arıza anı akım grafiği.	61
5.10:	PI kontrol uygulaması sonucu akım grafiği.	61
5.11:	PI kontrol uygulaması sonucu arıza anı akım grafiği.	62
5.12:	Nonlinear kontrol uygulaması sonucu gerilim grafiği.	62
5.13:	Değişken rüzgar hızı ve referans güç grafiği.	63
5.14:	Şebeke gerilimi ve evirici çıkış gerilimi.	63
5.15:	Evirici çıkış etkin ve tepkin güç grafiği.	64
5.16:	Evirici çıkış akım grafiği.	64

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Verimlilik bakımından generatörlerin karşılaştırılması.	5
2.2: Yarı iletken elemanlar anma değerleri ve karakteristik özellikleri.	14
2.3: Modellemede referans alınan 2 MW Enercon E82 E2 model doğrudan sürürlü (dişli kutusuz) türbin özellikleri.	23
2.4 Rüzgar türbini güç ve C_p katsayısı tablosu.	24
4.1 Her bir anahtarın tetikleme süreleri.	56
4.2 Vektörler ve anahtarlama sırası.	56

1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisinden mekanik güç üretimi insanlık tarihinin çok eski evrelerine kadar uzanmasına rağmen rüzgar enerjisinden elektrik üretimi, XIX. yüzyılda deneysel çalışmalarla başlamıştır.

Rüzgar türbinlerinden elektrik üretimi kavramı 1887 yılında İskoçya ve Amerika'da 1897 yılında Danimarka'da öncü bilim adamlarının çalışmalarıyla literatüre girmeyi başarmış, 1927 yılında Mineapolis - ABD'de rüzgar türbin generatörleri seri üretimi başlayarak ilk kullanımı ise akü şarjı ve aydınlatma ihtiyaçlarının karşılanması şeklinde olmuştur [20].

Büyük çaplı ticari rüzgar türbinleri üretimi 1970 yıllarından günümüze devam etmektedir. Avrupa Birliği'nin 23 Nisan 2009 tarihli 2009/28/EC direktifine göre 2020 yılına kadar, üye ülkeler tarafından yenilenebilir enerjinin toplam enerji üretimindeki payının %20'ye çıkarılması hedefi bulunmaktadır [21]. 2013 verilerine göre Avrupa'daki rüzgar santrali toplam kurulu gücü 117.3 GW, toplam enerji üretimi içerisindeki payı %8 olarak verilmektedir [22]. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminin önemli bir yer kapladığını göstermektedir.

Günümüzde dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü 250 GW'ı aşmıştır [23]. Bu konuda Çin, Türkiye'nin toplam elektrik santrali kurulu gücünün de üstünde olan 75 GW'lık rüzgar santrali kurulu gücü ile başı çekmektedir [24].

Dünyada tüm bu gelişmeler yaşanırken karada ve kıyıda uzak yerlerde, çok sayıda rüzgar türbininin ağ oluşturarak kurulması ve enterkonnekte şebekeye bağlantısı, elektrik iletim ve dağıtım sistemleri için teknik ve ticari açıdan geleneksel anlayışın ötesinde bir durum ortaya çıkarmaktadır.

Enerji iletim ve dağıtım sisteminin kararlılığının hidroelektrik, termik, nükleer gibi geleneksel baz yük santrallerine bağımlı olması yanında, üretimdeki oranı giderek artmakta olan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı santrallere de bağımlı hale gelmektedir. Bu nedenle bu tip santrallerin de belirli kararlılık kriterlerini sağlaması gerekmektedir.

Rüzgar gücünün başarılı bir şekilde mevcut elektrik altyapısıyla bütünleşebilmesi için öne çıkan konu başlıkları şunlardır:

- Güç Sisteminin Tasarım ve İşletilmesi: Diğer kaynaklardan olan elektrik arzı yanında rüzgar gücü tahminleri ile bağlı bulunan yüklerin güç talebinden yola çıkarak sistemin tasarlanması ve arz talep dengelemesinin sağlanması.
- Şebeke Altyapısı: Mevcut sistemin en iyilemesi, genişletmeler ve güçlendirmeler ile en uygun bağlantıların sağlanması.
- Rüzgar Santrallerinin Şebeke Bağlantısı: Güç kalitesinin tesisi, gerilim düzenlemesi ve şebekeye verilen gücün kontrolü ile rüzgar gücü santrallerinin en uygun şekilde yönetilmesi.
- Yasal Düzenlemeler: Elektrik piyasası düzenlemelerinin ihtiyaçlara cevap verebilecek şekilde yapılması.

Tez konusuna ilişkin literatürde öne çıkan bazı makaleler ve literatüre yaptıkları katkılar şöyledir:

- Sürekli mıknatıslı senkron generatöre sahip şebeke bağlantılı bir rüzgar türbinin modellenmesi ve simülasyonunu gerçekleştirmiş, güç dönüştürücü olarak diyot doğrultucu ve DC/AC evirici kullanılmıştır. Düşük generatör hızından dolayı dişli kutusu kullanılmamıştır. Rüzgar türbininin tüm parçaları ve şebeke tarafı dönüştürücü Matlab/Simulink ortamında geliştirilmiştir [3].
- Erkan Koç, Prof.Dr. A. Nezih Güven, yapmış olduğu benzetim çalışmalarından, sürekli mıknatıslı senkron generatör tipi rüzgar türbinlerinin, kullanılan güç elektroniği donanımının etkisiyle şebeke arızalarından daha az etkilendiği, arıza esnasında ve sonrasında sistemin toparlanmasına çift beslemeli asenkron generatör tipi rüzgar türbinlerine göre daha çok yardımcı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır [4].
- LC filtreli üç faz PWM eviriciler için yeni bir nonlinear kontrol stratejisi geliştirilen çalışmada öncelikle evirici sisteminin nonlinear modeli elde edilmiş ve geribesleme doğrusallaştırma yöntemi ile doğrusal olmayan sistem doğrusallaştırılarak doğrusal kontrol teorisi uygulanmıştır. Bu şekilde denetleyicinin, sistemi daha hızlı ve etkin biçimde kararlı hale getirdiği görülmüştür [5].
- Matlab/Simulink ortamında aşama aşama SVPWM modelinin gerçekleştirildiği çalışmada gerilim kaynaklı evirici (VSI) tasarlanmış ve modellenmiştir. VSI çıkışı

maksimum $0,5 V_{dc}$ (giriş uygulanan DC gerilim) olmaktadır. SVPWM tekniği kullanılmasıyla DC barada %15.15 iyileşme elde edilmektedir [7].

- Şebeke bağlantı kriterlerinde önemli yere sahip olan bir kriter de, düşük gerilimde işletme devamı olarak ifade edilen, belirli koşullardaki arıza durumlarda santralin, şebekeye reaktif güç desteği sağlayarak bağlı kalması ve çalışmasına devam edebilme özelliğidir. Akım kaynağı olarak modellenen değişken hızlı rüzgar türbin parkında bu konu incelenmiştir. Generatör tipi olarak doğrudan sürürlü senkron generatör kullanılmış, generatör tarafı dönüştürücü olarak diod doğrultucu, şebeke tarafı dönüştürücü olarak da PWM evirici modellenmiştir [10].

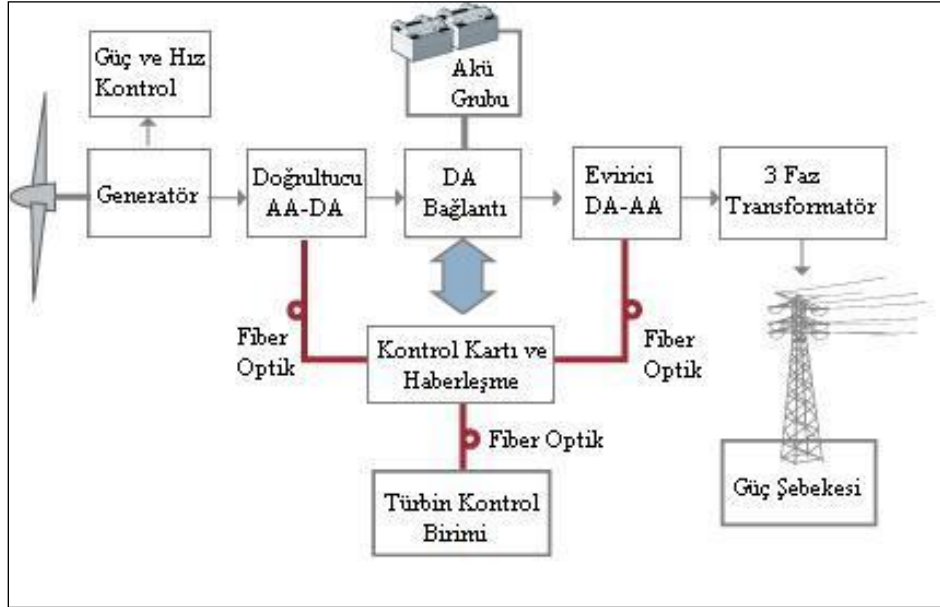
Bu çalışmalardan da faydalanarak yürüttüğümüz tezde, rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantısını sağlayan DC/AC çevirgeç (evirici) tasarımında en iyi performans sağlayan teknikler incelenmiştir. MATLAB/SIMULINK'te evirici modellenmiş, şebeke tarafına ait çeşitli arıza senaryolarının da gerçekleştirilmesiyle simülasyon sonuçları analiz edilmiştir.

2. RÜZGAR TÜRBİNİ YAPISI VE BİLEŞENLERİ

Yapısal olarak rüzgar türbinleri aşağıda ifade edilen mekanik, elektromekanik ve elektronik alt sistemlerinden oluşmaktadır.

- Mekanik Bileşenler
- Elektromekanik bileşenler
- Güç Elektroniği
- Ölçüm Sistemleri
- Kontrol Sistemleri

Mekanik aksam olarak kule, nacelle (kule üstündeki yapı), kanat, düşük hız şaftı, dişli kutusu, yüksek hız şaftı, rota mekanizması, hidrolik sistem, soğutma birimi, anemometre parçaları sayılabilir.



Şekil 2.1: Rüzgar santrali elektromekanik ve elektronik sistem blok diyagramı.

Alt sistemler içerisinde güç elektroniği devreleri üzerinde detaylıca durulacak olup, tüm sistemin ihtiyaçlarına en uygun şekilde cevap verecek olan güç çevirgeçleri incelenecektir. Elektromekanik ve elektronik bileşenler detaylı olarak aşağıda ifade edilmiştir.

2.1. Generatör

Rüzgar türbinlerinde çoğunlukla asenkron veya senkron generatörler kullanılmaktadır. Generatör tipleri, şebeke bağlantısında farklı karakteristikler göstermektedirler. İletim şebekesi bozunumu sırasındaki davranışları da buna göre şekillenmektedir. Dolayısıyla sistem hataları sırasında türbinin davranışına ilişkin öngörüle bulunabilmek için türbine ait dinamik elektromekanik karakteristiklerin detaylıca modellenmesi gerekir. Aşağıdaki tabloda farklı generatör tipleri ve verimlilikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.1: Verimlilik bakımından generatörlerin karşılaştırılması.

Generatör	Verimlilik (%)	Özellik
Çift Beslemeli Asenkron Generatör	83.....94,5	3 kademeli dişli kutusu, Alçak gerilim güç çevirgeci
İndüksiyon Generatör	87,5...94,5	3 kademeli dişli kutusu, Sabit hızlı RT
	87...91,5	3 kademeli dişli kutusu, Tam ölçekli çevirgeç
Dış Uyarımlı Senkron Generatör	87...91,5	3 kademeli dişli kutusu, Tam ölçekli çevirgeç
MSG	87...93	3 kademeli dişli kutusu, alçak gerilim tam ölçekli çevirgeç
	90,5...95	3 kademeli dişli kutusu, orta gerilim tam ölçekli çevirgeç
	88...93,5	1kademeli dişli kutusu, orta gerilim tam ölçekli çevirgeç
	84...93,5	Doğrudan Sürürlü, 2Q çevirgeç
	90,5...93,5	Doğrudan Sürürlü, 4Q çevirgeç

2.1.1. Asenkron (İndüksiyon) Generatörler

Asenkron generatörler yapısal olarak ikiye ayrılır:

- Sincap kafesli asenkron generatör (SKAG)
- Rotoru sargılı asenkron generatör (RSAG) olmak üzere iki çeşittir.

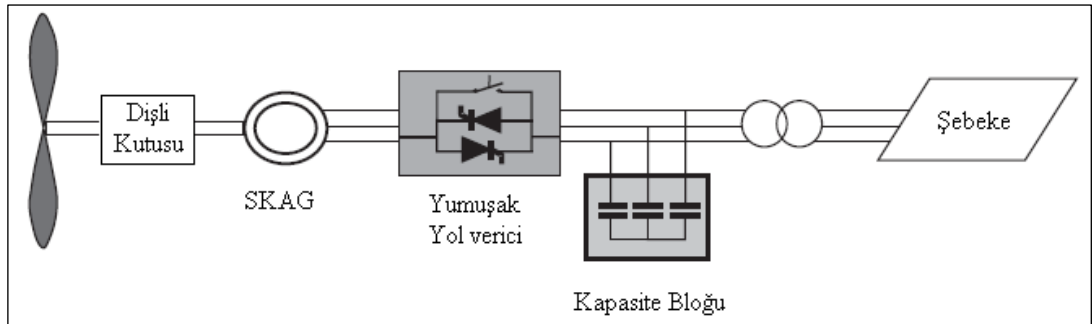
Bunlar içerisinde rotoru sargılı indüksiyon generatör ise;

- Optoslip indüksiyon generatörü
- Çift beslemeli indüksiyon generatörü olmak üzere ikiye ayrılır.

Asenkron (İndüksiyon) generatör sağlamlığı, mekanik basitliği ve maliyetinin düşük olması nedeniyle rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan generatör tipidir.

Asenkron generatörlerde statör, reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyaç duyar. Sabit mıknatısın kullanılmaması nedeniyle ek uyarım devresi gerekmektedir. Bu da şebekeden veya güç elektroniği devrelerinden sağlanır.

2.1.1.1. Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG)



Şekil 2.2: Sincap kafesli asenkron generatör ve bağlantı düzeneği.

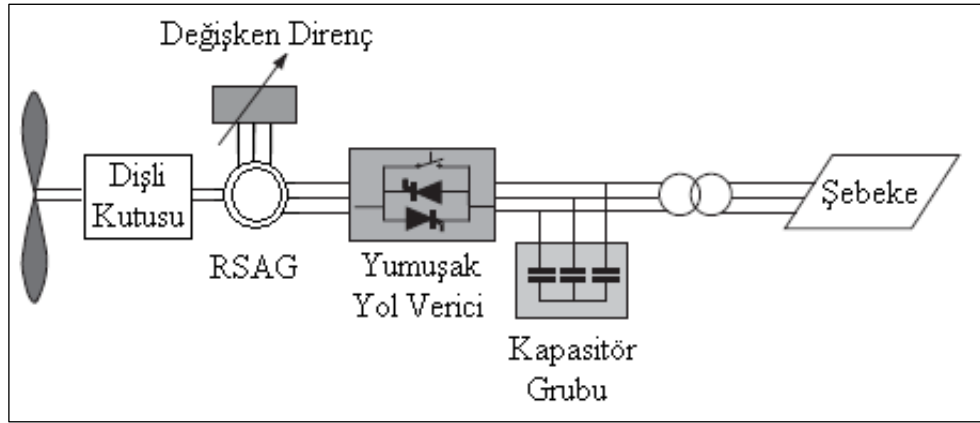
Şekilde görüldüğü gibi SKAG, bir yumuşak yol verici ve reaktif güç desteği sağlayan kapasite bloğu üzerinden doğrudan şebekeye bağlanabilmektedir.

Rüzgar hızındaki değişikliklere rağmen rotor hızındaki değişikliğin çok düşük olması nedeniyle bu generatör tipi sabit hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılır.

Sabit hızlı rüzgar türbinleri, zayıf şebekelerde kullanıldığında bağlantı noktasında şebeke dalgalanmalarına neden olabilirler. Bu gerilim dalgalanmalarından

dolayı, sabit hızlı rüzgar türbini şebekeden değişen miktarda reaktif güç çeker. Bu da gerilim dalgalanmaları ve hat kayıplarını artırır. Bu nedenle herhangi bir hız kontrolünü desteklememesi, sağlam bir şebekeye ihtiyaç duyması ve mekanik yapısının yüksek mekanik zorlamaya dayanıklı olması gerekliliği, bu tip generatörün temel olumsuzlukları olarak sayılabilir [11].

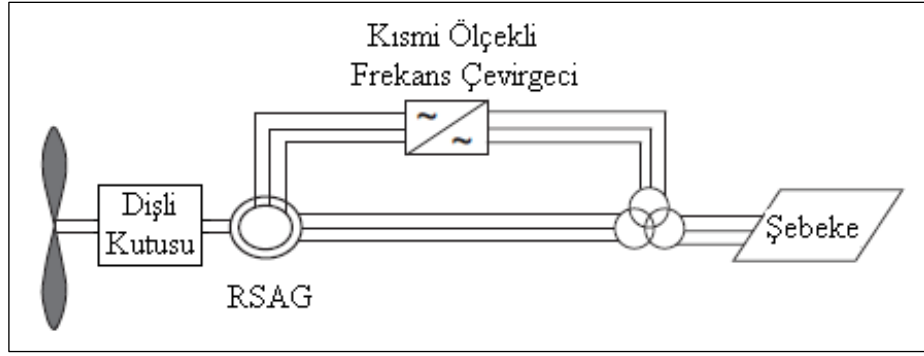
2.1.1.2. Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG)



Şekil 2.3: Optislip asenkron generatör ve bağlantı düzeneği.

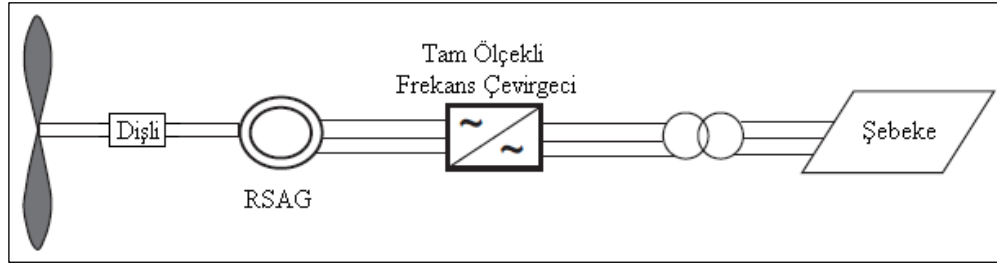
Şekil 2.3'deki düzenekte rotoru sargılı indüksiyon generatörü kullanılmaktadır. Bu düzenekteki farklılık, değişken direnç kullanılarak rotor direncinin değiştirilebilir olmasıdır. Bu direnç, rotor şaftına monte edilmiş optik olarak kontrol edilen bir çevirgeç ile değiştirilebilir. Bu şekilde generatörün optimum kayma değeri seçilerek sistemdeki güç akışı kontrol edilir. Bu nedenle bu düzeneğe sınırlı değişken hızlı generatör düzeneği denilmektedir.

Rotoru sargılı indüksiyon generatörünün olumsuz yönü, SKAG kadar sağlam olmaması ve maliyetinin daha yüksek olmasıdır. Bununla birlikte rüzgar türbini endüstrisinde en çok kullanılan generatör tipi rotoru sargılı indüksiyon generatör ve bunların içerisinde OptiSlip indüksiyon generatörü ile çift beslemeli asenkron generatördür.



Şekil 2.4: Çift beslemeli asenkron generatör ve bağlantı düzeneği.

Şekil 2.4'deki düzenekte kısmi ölçekli frekans çevirgeci reaktif güç kontrolü ve yumuşak şebeke bağlantısını gerçekleştirmektedir. Optoslip ile karşılaştırıldığında daha geniş bir dinamik hız kontrol aralığına sahiptir. Temel avantajı, anma gücünün yaklaşık olarak %30'una karşılık gelen boyutta güç elektroniği devresi kullanılması nedeniyle düşük maliyetidir. Ancak şebeke arıza desteğindeki yetersizliği, zayıf şebekeler açısından olumsuzluklara neden olmaktadır.



Şekil 2.5: Rotoru sargılı asenkron generatör ile tam ölçekli frekans çevirgeci.

Şekil 2.5'deki düzenekte rotoru sargılı indüksiyon generatör, bir dişli kutusu ile türbin rotoruna bağlanmaktadır. Tam ölçekli frekans çevirgeci, generatör tarafından gelen alternatif akımı önce doğru akıma çevirmektedir. Bu şekilde değişken rüzgar yükleri nedeniyle değişken frekansta gelen elektrik akımı, sıfır frekanslı akıma dönüşür. Ardından uygun anahtarlama teknikleri ve güç elektroniği devreleri aracılığıyla alternatif akıma dönüştürülerek şebekeye aktarılır.

2.1.2. Senkron Generatörler

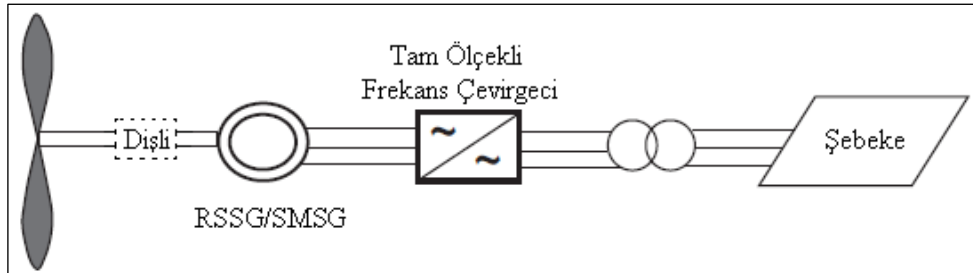
Senkron generatörler, değişken rüzgar hızlarına karşın, sabit frekans çıkışı verebilen güç elektroniği devrelerinin gelişmesi ile rüzgar türbinlerinde kullanım alanı bulmuştur. Senkron generatörler aynı zamanda etkin reaktif güç kompanzasyonu ve daha yumuşak şebeke bağlantısı sağlamaktadır [14].

Senkron generatörler;

- Rotoru Sargılı Senkron Generatörler (RSSG)
- Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörler (SMSG) olmak üzere ikiye ayrılır.

2.1.2.1. Rotoru Sargılı Senkron Generatörler

Rotor sargısına verilen doğru akım, rotorun dönmesi ile statör üzerinde manyetik alan oluşturur. Bu şekilde üretilen enerji, güç çevirgeci aracılığıyla doğrudan şebekeye aktarılır. İndüksiyon generatörden farklı olarak senkron generatörler reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç duymazlar. Düşük rotor hızlarında enerji üretebilmesi nedeniyle dişli kutulu veya dişli kutusuz olarak tasarlanabilmektedirler.



Şekil 2.6: Senkron generatör ile tam ölçekli frekans çevirgeci.

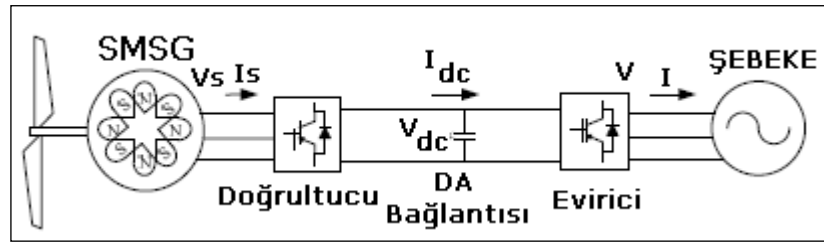
2.1.2.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörler

Türbin şaftına bağlı rotor üzerine yerleştirilen sabit mıknatıslar nedeniyle bu adı almıştır. Bu nedenle rotor sargısına uyarım akımı verilmesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Sabit mıknatısların, rüzgar türbini rotoru ile birlikte dönmesiyle statör üzerinde değişken manyetik alan oluşturulmakta, dolayısıyla enerji

üretilmektedir. SMSG de tıpkı RSSG’de olduğu gibi dişli kutulu veya dişli kutusuz olarak tasarlanabilmektedir.

SMSG’de verim diğer generatör tiplerine göre daha yüksektir. Çünkü kendinden uyarımlı olma özelliği taşımaktadır. Ayrıca dişli kutusunun kullanılmadığı durumlarda mekanik verim de artmaktadır. Bunun yanında sabit mıknatısların maliyetinin yüksektir ve yüksek sıcaklıktan etkilenmeleri nedeniyle ek soğutma tedbirlerine ihtiyaç duymaktadırlar.

SMSG elektriksel karakteristikleri yanında tam ölçekli frekans çevirgeci kullanılmasından dolayı düşük rüzgar hızlarında dahi enerji üretilebilmesi mümkündür.



Şekil 2.7: Doğrudan sürürlü sürekli mıknatıslı senkron generatör modeli.

Doğrudan sürürlü (Direct Drive) sürekli mıknatıslı senkron generatörde, generatör miline bağlı dişli kutusu olmadığından hem maliyet hem de verimlilikte kazanç sağlanmaktadır. Buna bağlı olarak, nominal değer altındaki rüzgar hızlarında, verimlilik açısından en iyi sonucu vermektedir.

2.2. Güç Elektroniği Donanımı

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde üretilen enerjinin istenen güç kalitesinde şebekeye aktarılması için güç elektroniği donanımına ihtiyaç vardır.

Generatörler bölümünde farklı generatörler ve bunlara uygun güç elektroniği donanımları detaylıca anlatılmıştır. Bu bölümde sürekli mıknatıslı senkron generatörlere uygun doğrultucu ve eviriciden oluşan güç elektroniği sistemi açıklanmaktadır.

Şekil 2.7’ de görüldüğü gibi güç elektroniği donanımının iki ana bileşeni (AA/DA) doğrultucu ve (DA/AA) eviricidir.

AA/DA doğrultucu, generatörde üretilen gücü doğru akım şeklinde eviriciye iletir. DA/AA evirici ise türbinin şebekeye bağlantısını şebeke bağlantı kriterleri uyarınca sağlar.

Güç elektroniği donanımının amacı, türbindeki belirli fiziksel ve elektriksel değişkenlerin takip edilerek türbinin mümkün olan en yüksek güç noktasında çalıştırılması ve elde edilen gücün şebekeye aktarılmasıdır. Bu işlem, maksimum güç noktası izleme olarak adlandırılmaktadır.

Rüzgar gücü ile ilgili izleme ve kontrol parametrelerinin bulunduğu formül, rüzgar güç formülüdür:

$$P_m = \frac{\pi \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot R^2 \cdot v_\omega^3}{2} \quad (2.1)$$

Formülde ρ hava yoğunluğu, C_p katsayısı ise λ (Tip hız oranı) ve β (Pitch açısı) na bağımlı bir katsayıdır.

ω_r türbin açısal hızı, R türbin yarıçapı, v_ω ise rüzgar hızı olmak üzere

$$\omega_r = (\lambda \cdot v_\omega) / R \quad (2.2)$$

Türbin tarafından üretilen mekanik torkun ifadesi:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot R^5 \cdot \omega_r^2}{2 \cdot \lambda^3} \quad (2.3)$$

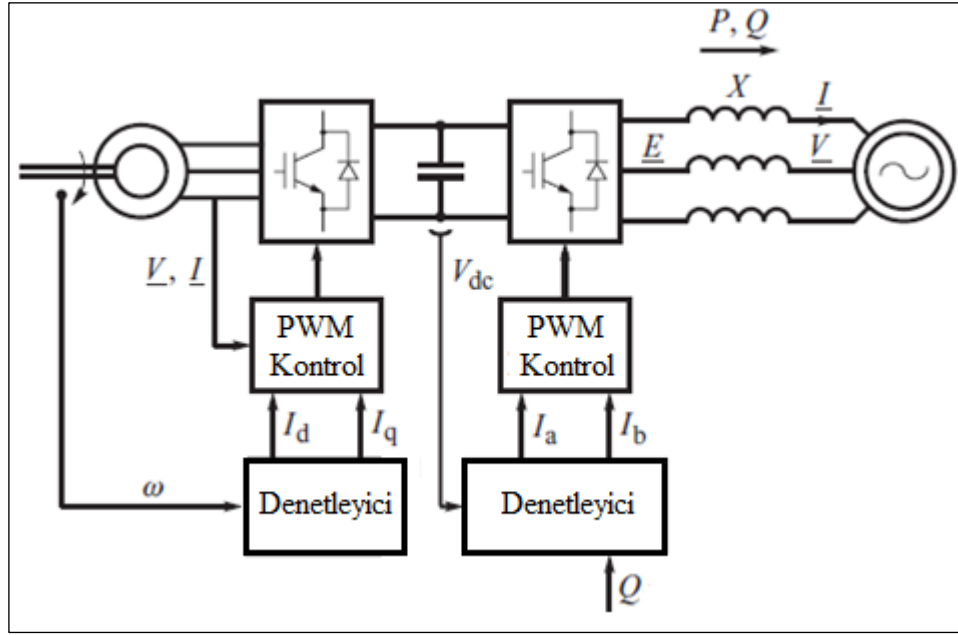
Rotor hızına ait dinamik denklem:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_m - T_L - F \cdot \omega_r}{J} \quad (2.4)$$

- J : Eylemsizlik momenti
- F : Viskoz sürtünme katsayısı
- T_m : Türbin mekanik tork
- T_L : Yük (Generatör) Torku

tarafındaki, hem de şebeke tarafındaki güç elektroniği devreleri PWM kontrollü devreler olup tam ölçekli çevirgeç (fully rated converter) adını almaktadır.

Genel olarak kontrol tekniği olarak akım kontrolü kullanılmaktadır. Bununla birlikte PWM dönüştürücüler, faz geriliminin faz açısı ve genliğini değiştirebilmektedirler. Bu nedenle şebeke tarafı çevirgeç, E faz gerilimini, V sistem gerilimine göre faz ve genliğini değiştirmek suretiyle kontrol edebilmektedir.



Şekil 2.9: Tam ölçekli çevirgeç blok diyagramı.

Bu topolojinin kullanılmasıyla sisteme verilen aktif ve reaktif gücün tam olarak kontrolü sağlanmaktadır. Senkron veya asenkron generatör tipine bağımlı olmaksızın bu yapının yeni sistemlerde geniş kullanım alanı bulunduğu görülmektedir.

Bu tip çevirgeçler çeşitli kontrol tekniklerini kullanmakla birlikte, generatör tarafı çevirgeç generatör torkunu kontrol ederken şebeke tarafı çevirgeç DA bağlantıda sabit gerilim elde etmekte ve aynı zamanda reaktif güç akışını kontrol etmektedir.

2.2.1. Güç Elektroniği Anahtarlama Elemanları

Güç çevirgeçlerinin temel anahtarlama elemanları diyot, tristör ve transistörlerdir. Diyotlar tek yönlü akımın iletmektedir. Tristör ve transistörler

anahtar görevi gördüklerinden akımın istenen anda iletimini ve kesimini mümkün kılmaktadır.

En yaygın ve bilinen güç elektroniği anahtarlama elemanları GTO (Geçit kapamalı tristörler), IGCT (Entegre geçit anahtarlama tristör), BJT (Çift kutup eklemlili transistör), MOSFET (Metal oksit yarıiletken alan etkili transistörler) ve IGBT (Yalıtımlı geçitli çift kutuplu transistörler) dir.

Günümüzde değişken hızlı rüzgar türbini generatör sistemlerinde şebeke anahtarlama veya kendinden anahtarlama çevirgeçler kullanılmaktadır. Yaygın şebeke anahtarlama çevirgeç elemanı tristörlerdir. Tristörler, aktif gücü kontrol edebilirken reaktif güç harcarlar ve filtrelemesi zor akım harmonikleri üretirler. Kendinden anahtarlama çevirgeçler GTO tristörlerden veya transistörlerden oluşmaktadırlar. Aktif güç kontrolü yanında reaktif gücü de kontrol edebilirler. Yüksek frekansta anahtarlama yapabilirler [11].

IGBT güç elektroniği elemanları ise yüksek anahtarlama frekanslarında çalışabilmesi yanında yüksek güç yoğunluğu değerlerine de sahiptir. Bu nedenle hızlı cevap ve yüksek güç ihtiyaçlarının ortaya çıktığı güç kontrol devrelerinde tercih edilmektedirler.

Tablo 2.2: Yarı iletken elemanlar anma değerleri ve karakteristik özellikleri.

	Anahtar Tipi				
	GTO	IGCT	BJT	MOSFET	IGBT
Gerilim (V)	6000	6000	1700	1000	6000
Akım (A)	4000	2000	1000	28	1200
Anahtarlama Frekansı (kHz)	0.2-1	1-3	0.5-5	5-100	2-20
Sürücü Gereksinimleri	Yüksek	Düşük	Orta	Düşük	Düşük

2.2.2. Generatör Tarafı Güç Çevirgeci

Generatörün elektromanyetik torkunu değiştirerek türbinin en yüksek güç noktasında çalışması sağlanır. Bu işlem, belirli rüzgar hızlarına kadar (tipik 8-10 m/sn arası) generatör tarafı güç çevirgeci ile yapılır.

Rüzgar hızı belirli bir değerin üstünde ise (genellikle 10 m/sn) generatör elektromanyetik torku sabitlenir ve kanat açısı değiştirilerek rotor hızı nominal değerinde sabitlenir.

Değişken hızlı rüzgar türbinleri, nonlinear, zamanla değişen sistemlerdir. Önceden tahmin edilmesi zor giriş değişkenleri, sistemin güvenilirliğini ve kararlılığını ciddi anlamda etkilemektedir. Bu nedenle değişken hızlı rüzgar türbinlerinin kontrolü, endüstride güncelliğini koruyan ve teknik çözümler bekleyen bir araştırma konusudur.

Generatör tarafı kontrolün amacı, farklı hızlardaki istenen tork değerini elde etmektir. Bu da d ve q eksenlerinde tanımlanan akımın q eksenindeki bileşenini kontrol ederek sağlanır.

$$E_d = V_d + R * I_d + X_q * I_q \quad (2.5)$$

$$E_q = V_q + R * I_q - X_d * I_d \quad (2.6)$$

(Burada E_f kalıcı mıknatıs tarafından kutup başına oluşan akım değeriyle ilintilidir. $E_f = \psi_{pm} \cdot \omega$);

$E_d = 0$ alınırsa,

$$V_q = -R * I_d - X_q * I_q \quad (2.7)$$

$$V_q = \omega * \psi_{pm} - R * I_q + X_d * I_d \quad (2.8)$$

Çıkış gücü;

$$P = V_d * I_d + V_q * I_q \quad (2.9)$$

$$P = I_d * I_q * (X_d - X_q) + \omega \cdot \psi_{pm} \cdot I_q - R \cdot (I_d^2 + I_q^2) \quad (2.10)$$

İlk iki terim, şaft gücünü gösterir ve üçüncü terim armatür direncindeki güç kaybını ifade eder.

- p: Çift kutup sayısı
- ψ_{pm} : Kalıcı mıknatıs akısı olmak üzere,

$$\tau_m = \frac{I_d * I_q * (X_d - X_q)}{\omega} + p \cdot \psi_{pm} \cdot I_q \quad (2.11)$$

Kalıcı mıknatıslı makinelerde X_d ve X_q , mıknatısların rotor üzerinde nasıl yerleştirildiğine bağlıdır. Mıknatıs rotorun yüzeyinde ise $X_d \approx X_q$ alınır. Bu durumda denklem,

$$\tau_m = p \cdot \psi_{pm} \cdot I_q \quad (2.12)$$

Buradan , tork kontrolünün I_q akım kontrolü ile sağlandığı görülür.

Literatürde en çok karşılaşılan bu kontrol tekniği, Alan Eksenli Kontrol (Field Oriented Control-FOC)'dur. Bu tekniğe sabit açı kontrolü de denilmektedir ve sürekli mıknatısı yüzeyde olan senkron generatörlerde basitlik açısından geniş kullanım alanına sahiptir.

Bu yöntemde şaft hızı, geribesleme sinyali olarak alınır. Statör akım vektörü ile rotor kalıcı manyetik akısı arasındaki açısal fark 90^0 de sabitlenir. Bunun için d eksenindeki statör akım referansını sıfırda tutarak amper başına maksimum tork elde edilir ve böylece direnç kayıpları da en aza indirilmiş olur.

2.2.3. Maksimum Güç Noktası İzleme Sistemi

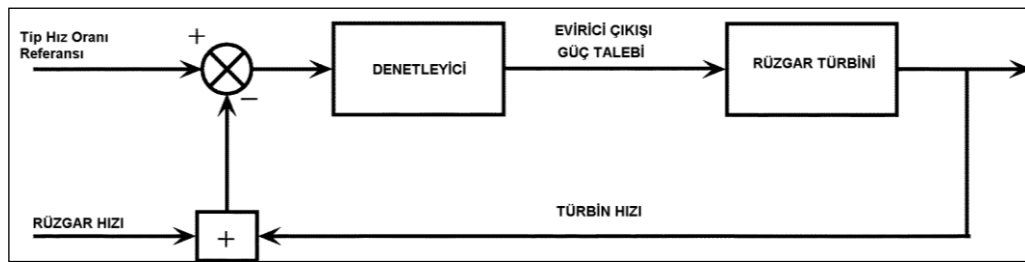
SM Senkron Generatörlerin yüksek verim ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olması, yüksek güçte kalıcı mıknatısların makul fiyatlarla üretilmesiyle birlikte rüzgar türbinlerinde bu generatör tipi yaygın kullanım imkanı bulmaktadır.

Bu tip makinelerle ilgili, literatürde en çok karşılaşılan algoritmalar: Tip hız oranı (Tip speed ratio) kontrol, güç sinyali geri beslemeli (power signal feedback), tepe-tırmanma (hill-climb search) algoritmalarıdır [16].

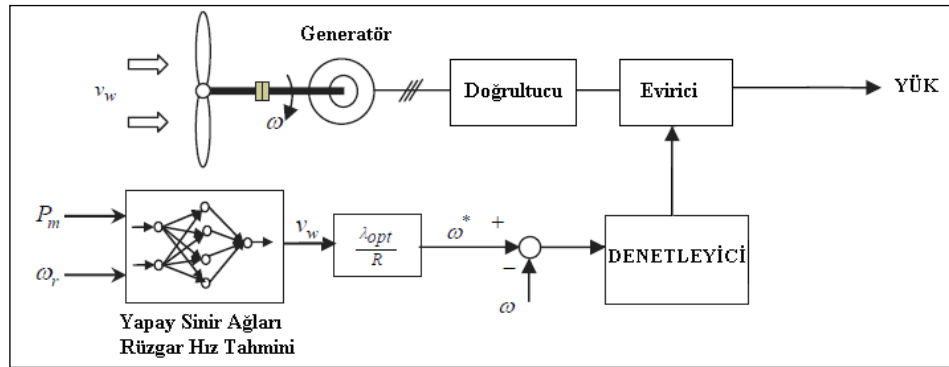
2.2.3.1. Tip Hız Oranı Kontrol

Tip hız oranı kontrolü, generatörün rotor hızının kontrol edilme tekniğidir.

Tip hız oranı kontrol tekniğinde her bir rüzgar hızı için güç çıkışını optimum değere getirecek rotor hızı tespit edilir ve generatörün bu devirde çalışması sağlanır.



Şekil 2.10: Tip hız oranı kontrolü blok diyagramı.



Şekil 2.11: THO kontrol sistemi detaylı blok diyagramı.

Mekanik güç ve rotor hızı, rüzgar hızı tahmin sisteminin girişi olmaktadır. Genellikle yapay sinir ağları ya da benzer gelişmiş teknikler kullanılarak anlık rüzgar hızı tahmin edilir ve optimum Tip Hız Oranı (λ_{opt}) bilgisi kullanılarak optimum hız bilgisi (ω_{r_opt}) elde edilir. Bu değer, mevcut hız ile karşılaştırılarak kontrol sistemi çevrimi başlatılır ve PWM eviricinin anahtarlama oranı değiştirilerek türbin hızının bu değere gelmesi sağlanır.

Mekanik güç bilgisi aşağıdaki dinamik denklemden elde edilir.

$$P_m = \omega_r * J * \left(\frac{d\omega_r}{dt} \right) + P_e \quad (2.13)$$

Rüzgar gücü formülü kullanılarak tip hız oranının elde edilişi ise şöyledir.

$$P_m = 0.5 * \pi * \rho * C_p(\lambda, \beta) * R^2 * v_\omega^3 \quad (2.14)$$

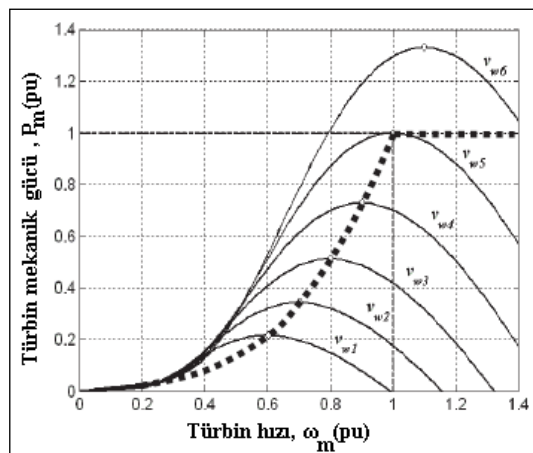
Mekanik güç formülünde; ρ hava yoğunluğu, β pitch açısı, R türbin yarıçapı biliniyor. v_ω rüzgar hız bilgisinin alınmasıyla, generatörün rüzgar hızına karşılık bilinen maksimum güç çıkışı verebilmesi için gerekli optimum Tip Hız Oranı (λ_{opt}) bulunur.

$$\omega_{opt} = \omega^* = \frac{\lambda_{opt} * v_\omega}{R} \quad (2.15)$$

Sonuçta türbinin olması gereken devir sayısı elde edilmiş oldu. Elde edilen maksimum gücün ifadesi :

$$P_{max} = K_{opt} * \omega_{r_opt}^3 \quad (2.16)$$

$$K_{opt} = \frac{0.5 * \pi * \rho * C_{p_max} * R^5}{\lambda_{opt}^3} \quad (2.17)$$

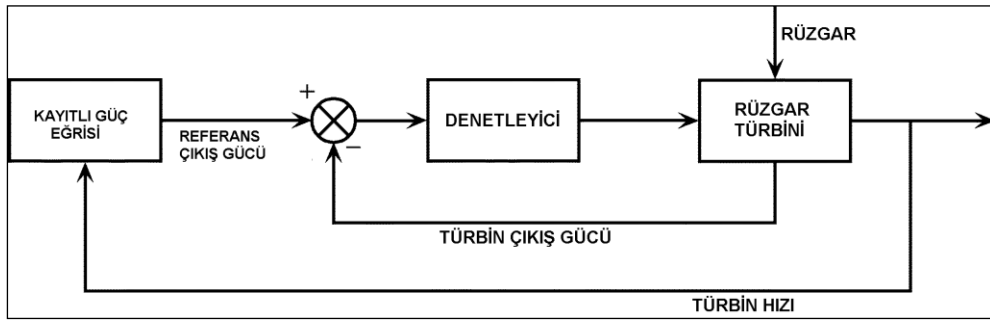


Şekil 2.12: Türbin mekanik güç-şaft hızı grafiği.

Bu tekniğin kullanılmasında, türbin devir-güç karakteristiğinin bilinmesi gerekmektedir. Öyle ki farklı rüzgar hızları için türbinin maksimum güç noktasına karşılık gelen devir bilgisi tablo şeklinde veri tabanında kayıtlı olmalıdır. Yukarıdaki grafikte, değişik rüzgar hızlarında elde edilen mekanik gücün optimum olduğu noktalar kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

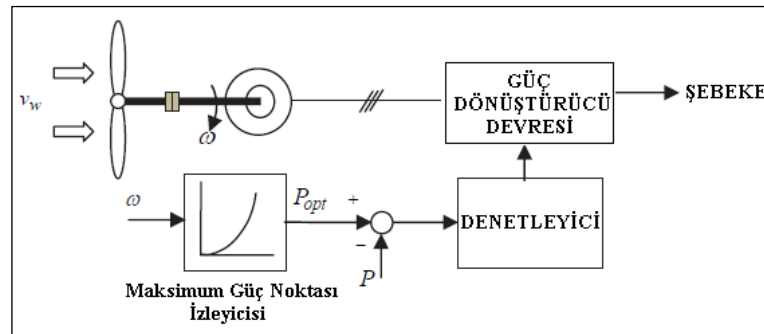
2.2.3.2. Güç Sinyali Geri Beslemesi

Güç sinyali geri beslemesinde, türbinin bilinen güç eğrisi, tasarlanan kontrol algoritması ile takip edilmektedir.



Şekil 2.13: Güç sinyali geri besleme kontrol sistemi blok diyagramı.

Rotor hızı (veya rüzgar hızı) giriş değer olarak seçilmiştir. Bu hıza karşılık gelen güç eğrisindeki maksimum güç noktası tespit edilerek kontrol giriş değeri olarak seçilir. Bu tespit işlemi, kaydedilmiş türbin güç karakteristiklerinden yapılabileceği gibi, mekanik denklemden de çıkarılabilir. Bu güç değerine ulaşılması için şebeke tarafı güç denetleyicisi çalıştırılır.



Şekil 2.14: Güç sinyali geri besleme kontrol sistemi detayı.

2.2.3.3. THO VE GSGB Karşılaştırılması

Tip Hız Oranı Kontrol tekniğinde rüzgar hızı ve türbin hızının anlık olarak ölçülmesi gerekmektedir. Rüzgar hızı ölçümü anemometre ile yapılmaktayken türbin hızı ölçümü için algılayıcılar kullanılmaktadır. Bunlar sistem maliyetini arttırmakta ve uygulamada zorluk çıkarmaktadır.

Bu teknikle ilgili bir başka engel, tip hız oranının optimum değerinin sistemden sisteme değişiklik göstermesidir. Buna bağlı olarak türbin generatör karakteristiklerine göre her bir rüzgar türbinine özel kontrol yazılımı geliştirilmesi gerekliliği bu tekniğin önemli dezavantajlarından.

Güç Sinyali Geri Besleme Tekniğinde rüzgar türbininin güç eğrisi ve maksimum güç noktalarının bilinmesi gerekmektedir. Bu eğrinin elde edilmesi için her bir türbin için gerçek çalışma şartlarına uygun simülasyon veya testler yapılması gerekliliği uygulamayı zorlaştırıcı ve maliyeti artırıcı olmaktadır.

Söz konusu iki kontrol tekniğindeki bu eksikliklerden dolayı “Tepe Tırmanma” adında üçüncü bir kontrol tekniği geliştirilmiştir.

2.2.3.4. Tepe Tırmanma (Hill Climbing) Yöntemi

Önceki iki teknikteki olumsuzluklar nedeniyle geliştirilen TT kontrol tekniği rüzgar türbininin çıkış gücünü sürekli takip etmektedir. Bu yöntemin en iyi çalıştığı koşul, türbin eylemsizliğinin küçük olma durumudur ki türbin hızı, rüzgar hızına neredeyse anlık olarak tepki verebilmektedir.

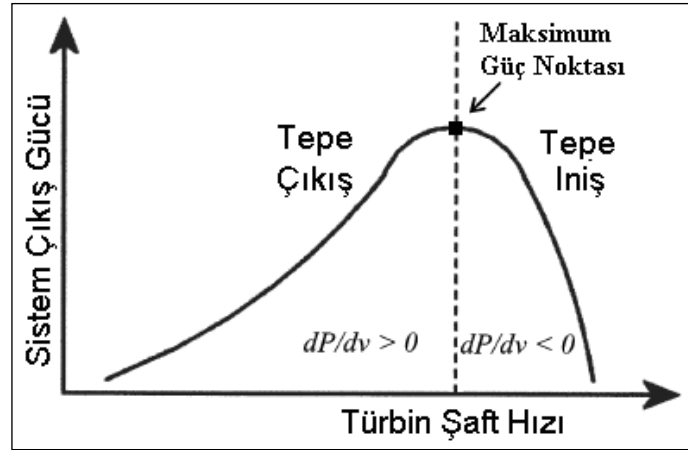
Büyük eylemsizliğe sahip rüzgar türbinlerinde moment denklemindeki sistem çıkış gücü ve mekanik güç ilişkisine bağlı olarak, mekanik olarak depolanan enerjideki değişiklikler, bu yöntemi verimsiz kılmaktadır.

J çok küçük iken, kontrol sistemi elektriksel güç çıkışını düzenleyerek maksimum mekanik güç noktasını takip edebilmektedir. J’nin büyük olduğu durumlarda ise rüzgar hızındaki hızlı değişikliklerde kontrol sistemi maksimum güç noktasına ulaşmakta başarısız olmaktadır.

Bu etkiyi göz önünde tutarak TT Kontrol Tekniği iyileştirilmiş, rüzgar hızı veya türbin rotor hızı ölçümüne gerek duyulmadan, sistem karakteristiklerinden

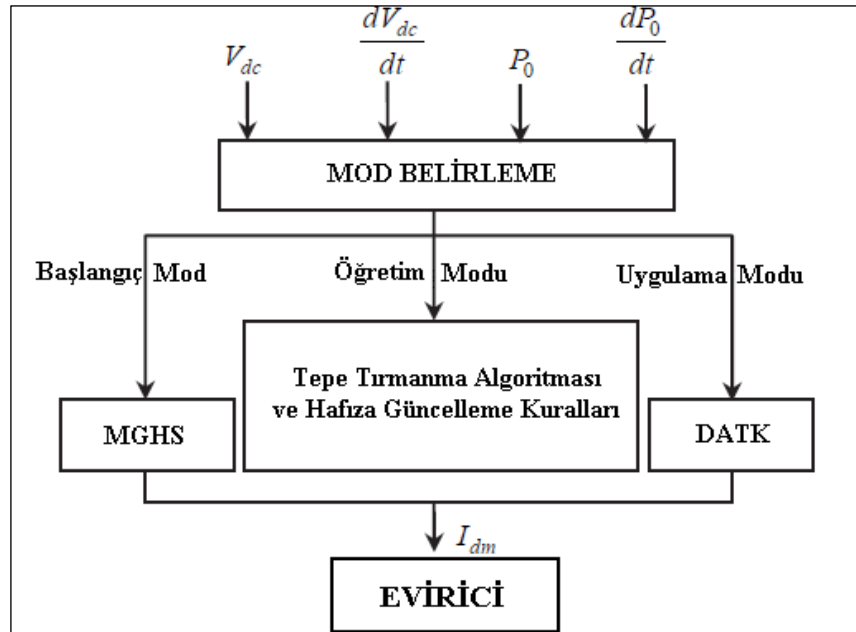
bağımsız ve her büyüklükte rüzgar türbinine uygulanabilen yeni kontrol sistemi geliştirilmiştir.

Bu yöntemde rüzgar türbininin en yüksek güç değerine ulaşıldığı durumlardaki güç ve rotor hızı parametreleri belleğe kaydedilir. Bu işlem, türbine öğretme sürecinde yapılır.



Şekil 2.15: Rüzgar güç türbin şaft hızı eğrisi.

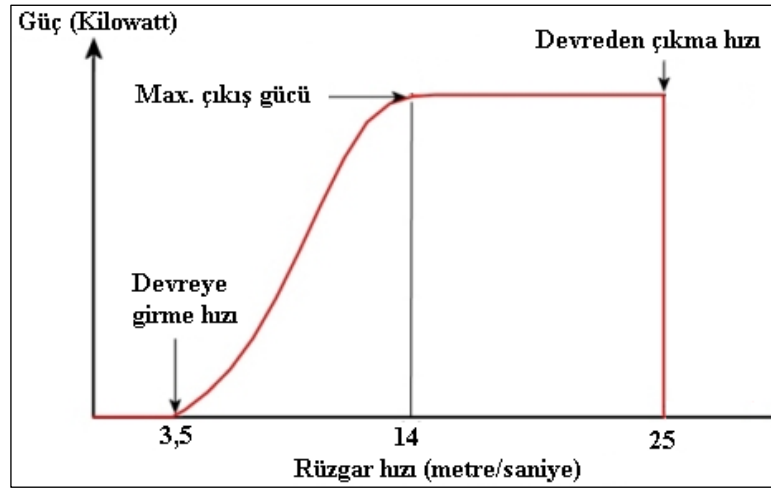
Her bir çalışma çevrimi, V_{dc} ve P_0 değerleri ile bunların türevlerinin örneklenmesiyle başlar. Bu örneklemelere göre denetleyicinin üç çalışma modundan birisi seçilir. Bunlar başlangıç modu, öğretme modu ve uygulama modudur.



Şekil 2.16: Tepe tırmanma yöntemi blok diyagramı.

Belirlenen çalışma modunda, eviricinin istenen çıkış akım değeri olan I_{dm} hesaplanır ve eviriciye bildirilerek sistem çıkışının düzenlenmesi sağlanır.

Maksimum güç hatası sürücü mekanizması (MGHS), belleğin boş olduğu durumda sistemi başlangıç optimum çalışma noktası ile başlatır. MGHS mekanizmasının referans sinyali, türbinin standart karakteristiğindeki rüzgar hızına bağlı maksimum güç değeri olan P_{max} 'tır. Bu karakteristiğin bir örneği aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.17: Tipik rüzgar türbini güç ve rüzgar hızı karakteristiği.

Farklı çalışma koşullarına ait maksimum güç noktaları ve ilgili kontrol değişkenleri akıllı bellek tarafından kaydedilir.

Doğru akım talep kontrolü (DATK), akıllı bellek tarafından kaydedilmiş olan V_{dc} ve I_{dm} arasındaki ilişkiyi kullanarak anlık V_{dc} 'ye karşılık gelen I_{dm} akım değerini belirler. Bu değere göre güç elektroniği donanımları uygun PWM teknikleri ile türbinin istenen şartlarda çalışmasını sağlamaktadır.

Tablo 2.3: Modellemede referans alınan 2 MW Enercon E82 E2 model doğrudan sürürlü (dişli kutusuz) türbin özellikleri.

Rotor çapı	82 m
Pervane sayısı	3
Süpürme Alanı	5281 m ²
Rotor hızı	Değişken 6-18 rpm
Devreden çıkma hızı	28-34 m/sn
Devreye girme hızı	2 m/sn
Şaft Giriş Gücü	2 MW
Nominal Statör Faz	398.37 V (RMS)
Nominal Statör akımı	1761.6 A (RMS)
Nominal Görünür Güç	2.1053 MVA
Nominal Tork	939.54 kN.M
Nominal Statör Frekansı	11.25 Hz
Çift Kutup Sayısı	30
Stator resistance	0.008556[Ω]
d-ekseni endüktansı	0.00359[H]
q-ekseni endüktansı	0.00359[H]

Yukarıda özellikleri verilen türbinin $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ hava yoğunluğunda 80 metre kule yüksekliğindeki güç ve C_p katsayısı tablosu aşağıda verilmiştir.

Tablo 2.4: Rüzgar türbini güç ve C_p katsayısı tablosu.

Rüzgar Hızı (m/sn)	Güç (KW)	C_p Katsayısı
1	0	0.00
2	3	0.12
3	25	0.29
4	82	0.40
5	174	0.43
6	321	0.46
7	532	0.48
8	815	0.49
9	1180	0.50
10	1580	0.49
11	1810	0.42
12	1980	0.35
13	2050	0.29
14	2050	0.23
15	2050	0.15
16	2050	0.13
17	2050	0.11
18	2050	0.09
19	2050	0.08
20	2050	0.07
21	2050	0.06
22	2050	0.05

2.2.4. Şebeke Tarafı Çevirgeç (Evirici)

Evirici, rüzgar türbininin şebekeye bağlantısını sağlayan kısımdır. Evirici tasarımında temel olarak, şebeke işleticisi kuruluşların kriterleri esas alınmak zorundadır. Bu konuyla ilgili yayımlanmış olan “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”, iletim sistemine bağlı rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri ile kurulu gücü 10 MW ve üzerinde olan dağıtım sistemine bağlı rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri için geçerli olan kriterleri tanımlamıştır.

2.2.4.1. Şebeke Bağlantı Kriterleri

Şebeke bağlantı kriterleri, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği Ek 18’de “Rüzgar Enerjisine Dayalı Üretim Tesislerinin Şebeke Bağlantı Kriterleri” başlığıyla açıklanmıştır. Bu kriterler, aşağıda maddeler halinde incelenmiştir.

2.2.4.1.1. Arıza Sırası ve Sonrası Sağlanması Gereken Tepki

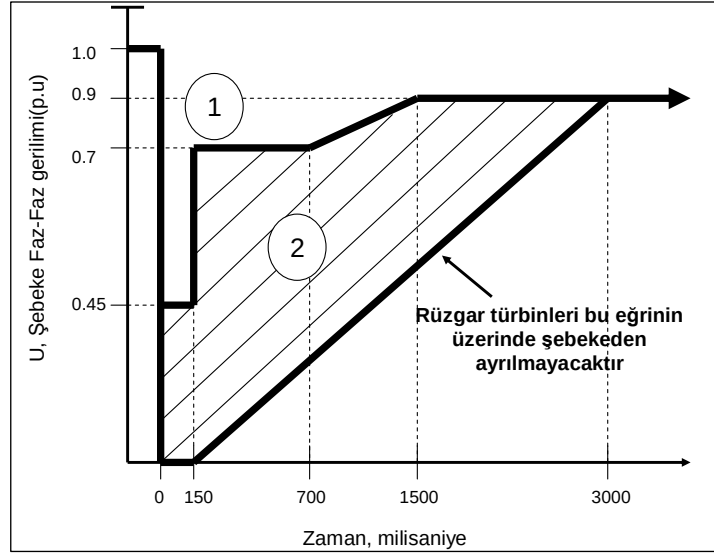
Düşük Gerilimde İşletme Devamı (Low voltage ride through-LVRT), elektrik üretim sistemlerinde kullanılan cihazların, genellikle rüzgar türbinlerinin, şebekenin bir yerinde meydana gelen hatadan ötürü gerilimin geçici olarak düşmesi durumunu karşılayabilmesi olarak ifade edilir.

Cihazın yapısına göre, bu olay esnasında cihazın;

- Şebekeden geçici olarak ayrılması, hatanın sona ermesi sonrasında yeniden bağlanması ve çalışmaya devam etmesi,
- Çalışmasına devam etmesi ve şebekeden ayrılmaması
- Bağlı kalması ve şebekeyi reaktif güçle desteklemesi durumlarından birisini gerçekleştirmesi istenir [17].

Düşük gerilimde işletme devamı kriteri, yukarıdaki şekilde gösterilmektedir. Buna göre iletim veya dağıtım sistemi bağlantı noktasındaki şebeke faz-faz geriliminin Şekil 2.18’de verilen 1 numaralı ve 2 numaralı bölgelerde kaldığı süre

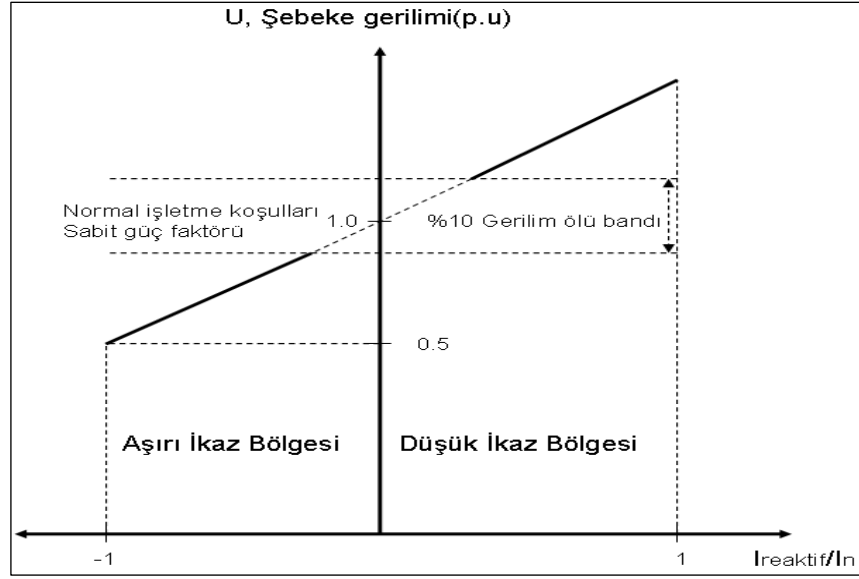
boyunca, herhangi bir fazda veya tüm fazlarda oluşan gerilim düşümlerinde rüzgâr türbinleri şebekeye bağlı kalmalıdır.



Şekil 2.18: Rüzgar türbinlerinin arıza durumunda sağlaması gereken tepki.

Arıza sırasında gerilim düşümünün 1 numaralı bölgede kaldığı durumlarda, rüzgâr türbini aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede nominal gücünün %20'si oranında artırılarak, üretebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşmalıdır.

Arıza sırasında gerilim düşümünün 2 numaralı bölgede kaldığı durumlarda ise, rüzgâr türbini aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede nominal gücünün %5'i oranında artırılarak, üretebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşmalıdır.



Şekil 2.19: Gerilim dalgalanmalarında gerekli reaktif güç tepkisi.

Yukarıdaki şekilde ise gerilim dalgalanmalarında, rüzgâr türbinlerinin vermesi gereken reaktif güç tepkisi gösterilmiştir.

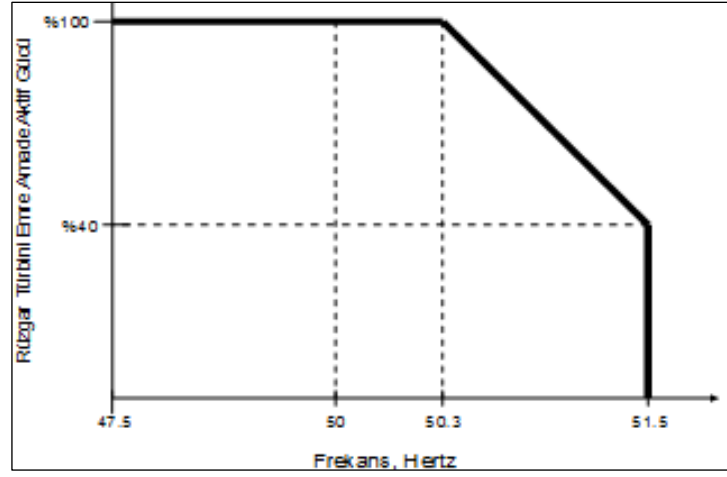
Şebeke geriliminde meydana gelen %10'a kadar olan dalgalanmalarda rüzgâr türbini herhangi bir tepki vermeyecektir. Bu sınırın üzerindeki dalgalanmalarda, nominal gerilimin %1'lik değişimi için nominal akımın %2'si oranında reaktif akım desteği gerekmektedir. Bu destek 20 milisaniye içinde gerçekleşmeli ve şekilde görüldüğü gibi bu desteği 3 saniye boyunca sürdürmelidir.

2.2.4.1.2. Frekans Tepkisi

Rüzgâr türbinleri bu Yönetmeliğin 11 inci maddesinde belirtilen frekans aralıkları ve çalışma sürelerini sağlamalıdır.

Bu çalışma şartlarına ilave olarak, şebeke frekansının 50.2 Hz'in üzerinde olduğu durumlarda ilave rüzgâr türbini devreye girmemelidir.

Rüzgâr türbini frekans tepkisi Şekil 2.20'de verilen güç-frekans eğrisi sınırları içinde kalacak şekilde olmalıdır.

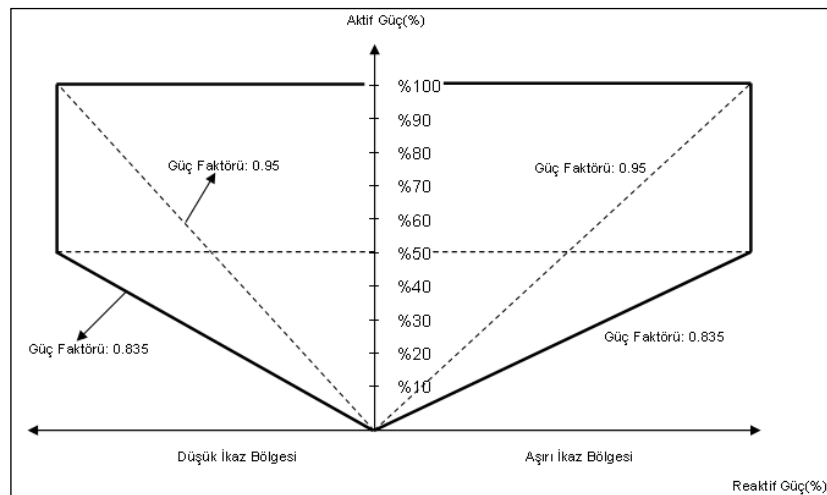


Şekil 2.20: Rüzgâr türbini güç-frekans eğrisi.

Rüzgâr türbini, şebeke frekansı 47.5-50.3 Hz aralığında olduğu sürece emreamade gücünün tamamını üretebilecek özellikte olmalıdır. Şebeke frekansının 50.3 Hz'in üzerine çıkması durumunda ise Şekil E.18.4.1 de verilen eğriyi takip ederek her 100 mHz frekans artışı için emreamade gücünün %5'i oranında yük atabilmelidir.

2.2.4.1.3. Reaktif Güç Kapasitesi

Rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisi iletim sistemi bağlantı noktasında, Şekil E.18.5.1'de koyu çizgilerle belirtilen sınırlar dâhilindeki güç faktörü değerleri için her noktada çalışabilir olmalıdır.



Şekil 2.21: Rüzgâr santrali reaktif güç kapasite eğrisi.

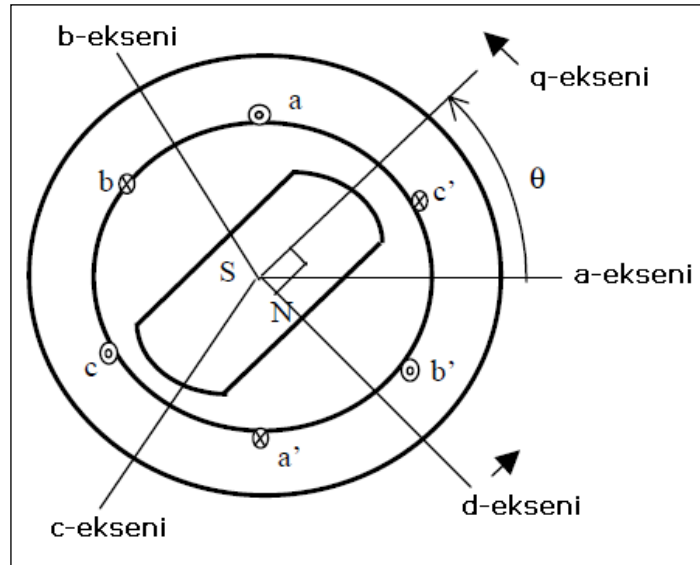
3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR MATEMATİKSEL MODELİ

Sürekli mıknatıslı senkron generatörde endüktanslar, rotor açısının bir fonksiyonu olarak bulunur. Modellemede kolaylık sağlaması açısından magnetomotor kuvvet rotor eksenine dik ve paralel olmak üzere iki bileşene ayrılır. Bu işlem ile senkron generatörün d ve q eksenlerdeki eşdeğer matematiksel denklemleri elde edilir.

İnceleyeceğimiz modelde sürekli mıknatıs rotora yerleştirilmiştir. Uygulamada mıknatısın rotorun yüzeyine yerleştirildiği veya rotorun içine gömülü olduğu durumlar söz konusudur. Mıknatısın rotor içine gömülü olması, mekanik dayanımın yanında daha yüksek tork elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu tip motorlar, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimliliği ile endüstriyel ve askeri uygulamalarda giderek yaygınlaşmaktadır.

Statörün a fazındaki referans eksen, a fazında oluşacak pozitif yönlü akımın en yüksek değerindeyken oluşacak magnetomotor kuvvetin yönü olarak seçilmiştir. B ve c eksenleri ise sırasıyla a fazından 120° ve 240° ileri fazda olacak şekilde gösterilmiştir. Bununla birlikte sürekli mıknatıs akısının yönü olarak d eksen, buna 90° ileri fazda olarak da q eksen seçilmiştir.

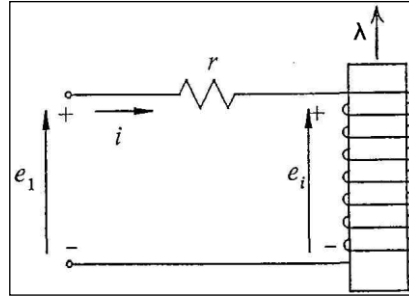


Şekil 3.1: SM senkron generatör fazör eksenlerinin gösterimi.

q-ekseninin d-eksenine göre açısı θ olarak tanımlanmıştır. Rotor döndükçe d-q referans düzlemi de $\omega = d\theta/dt$ hızla dönmektedir. Fakat a-b-c eksenleri sabittir.

Formüllerde kullanılan semboller ve karşılıkları:

- n_{pp} : Generatör kutup sayısı.
- I_a, I_b, I_c : a,b,c fazları statör anlık akımları.
- V_a, V_b, V_c : a,b,c fazları statör anlık gerilimleri
- I_d, I_q : Statör faz akımının d ve q eksenini bileşenleri
- V_d, V_q : Statör faz gerilimlerinin d ve q eksenini bileşenleri
- R_s : Statör direnci
- p : d/dt
- L_d, L_q : d- ve q eksenini statör öz endüktansları
- L_s : Ortalama endüktans $L_s = (1/2) (L_q + L_d)$
- L_x : Endüktans dalgalanması. $L_x = (1/2) (L_q - L_d)$
- λ_m : Sürekli mıknatıs kaynaklı akımın tepe değeri
- θ : a eksenini ile q eksenini arasındaki elektriksel açı (derece)
- ω = Açısal hız (rad/sn.)



Şekil 3.2: Endüksiyon prensibi.

Enerji dönüşümü denklemlerinde gerilim, akımın türevidir.

$$e = d\lambda/dt \quad (3.1)$$

Statör sargı dirençlerinde oluşan gerilim ile birlikte;

$$e_1 = R I + d\lambda/dt \quad (3.2)$$

Bu durumda, sürekli mıknatıslı senkron generatör gerilim denklemleri:

$$V_a = R_s I_a + p \lambda_a \quad (3.3)$$

$$V_b = R_s I_b + p \lambda_b \quad (3.4)$$

$$V_c = R_s I_c + p \lambda_c \quad (3.5)$$

Akı, endüktansla akımın çarpımıdır.

$$\lambda = L I \quad (3.6)$$

Denklemlerdeki akı bağıntıları:

$$\lambda_a = L_{aa} I_a + L_{ab} I_b + L_{ac} I_c + \lambda_{ma} \quad (3.7)$$

$$\lambda_b = L_{ab} I_a + L_{bb} I_b + L_{bc} I_c + \lambda_{mb} \quad (3.8)$$

$$\lambda_c = L_{ac} I_a + L_{bc} I_b + L_{cc} I_c + \lambda_{mc} \quad (3.9)$$

Bu bağıntılardaki

$$\lambda_{ma} = \lambda_m \cos \theta \quad (3.10)$$

$$\lambda_{mb} = \lambda_m \cos (\theta - 120) \quad (3.11)$$

$$\lambda_{mc} = \lambda_m \cos (\theta + 120) \quad (3.12)$$

Ortak endüktanslardaki simetri nedeniyle $L_{ab}=L_{ba}$ olarak alınmıştır. Endüktanslar, rotor açısına bağlı, yani θ 'nın bir fonksiyonudur.

Statör öz endüktansları, q-ekseni ile faz eksenini kesiştiğinde en yüksek değerini alır. Bununla birlikte q-ekseni iki fazın eksenlerinin ortasında kaldığında ise ortak endüktanslar en yüksek değerini alır.

$$L_{aa} = L_{so} + L_{sl} + L_x \cos (2\theta) \quad (3.13)$$

$$L_{bb} = L_{so} + L_{sl} + L_x \cos (2\theta + 120) \quad (3.14)$$

$$L_{cc} = L_{so} + L_{sl} + L_x \cos (2\theta - 120) \quad (3.15)$$

$$L_{ab} = - (1/2)L_{so} + L_x \cos (2\theta - 120) \quad (3.16)$$

$$L_{bc} = - (1/2)L_{so} + L_x \cos (2\theta) \quad (3.17)$$

$$L_{ac} = - (1/2)L_{so} + L_x \cos (2\theta + 120) \quad (3.18)$$

Ortak endüktans denklemlerindeki $-(1/2)$ katsayısı statör fazlarının 120° açıyla yerleşmiş olmasından kaynaklanır. $(\cos 120) = -1/2$

Tüm bu bilgilerden hareketle, genel dönüşüm matrisini aşağıdaki gibi gösterilir. Buradaki S ifadesi, abc eksenlerinden d ve q eksenlerine dönüştürülecek olan elektriksel değişkenlerden (akım, gerilim, akı) herhangi biridir.

$$\begin{bmatrix} S_q \\ S_d \\ S_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos (\theta-120) & \cos (\theta+120) \\ \sin \theta & \sin (\theta-120) & \sin (\theta+120) \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

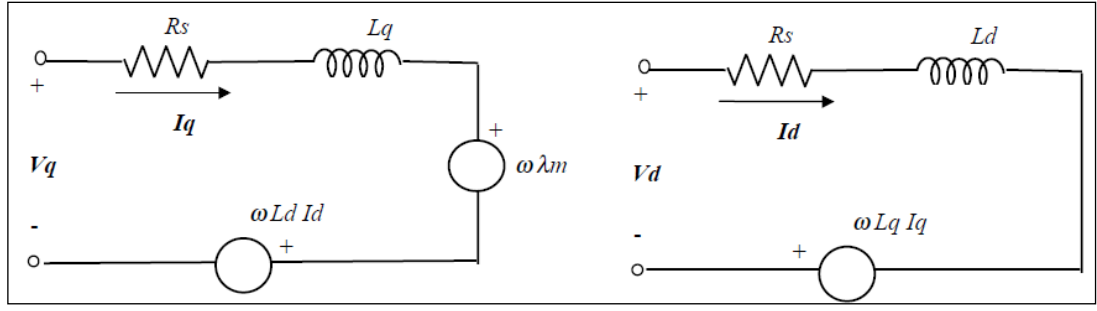
Yukarıdaki matrisin tersi aşağıda gösterilmiştir:

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos (\theta-120) & \sin (\theta-120) & 1 \\ \cos (\theta+120) & \sin (\theta+120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_q \\ S_d \\ S_o \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

d ve q eksenlerinin senkron endüktansları;

$$L_q = (3/2) (L_{so} + L_x) + L_{s1} \quad (3.21)$$

$$L_d = (3/2) (L_{so} - L_x) + L_{s1} \quad (3.22)$$



Şekil 3.3: a) q eksen devresi, b) d eksen devresi.

Yukarıdaki devre şemalarına göre gerilim denklemleri:

$$V_q = R_s I_q + p (L_q I_q) + \omega \lambda_m + \omega p L_d I_d \quad (3.23)$$

$$V_d = R_s I_d + p L_d I_d - \omega p L_q I_q \quad (3.24)$$

Gerilim denklemlerinde abc-qd dönüşümünün ifadesi:

$$V_d = 2/3 [V_a \cos(\theta) + V_b \cos(\theta - 2\pi/3) + V_c \cos(\theta + 2\pi/3)] \quad (3.25)$$

$$V_q = 2/3 [-V_a \sin(\theta) - V_b \sin(\theta - 2\pi/3) - V_c \sin(\theta + 2\pi/3)] \quad (3.26)$$

Akım Denklemleri

$$I_a = I_d \cos(\theta) - I_q \sin(\theta) \quad (3.27)$$

$$I_b = I_d \cos(\theta - 2\pi/3) - I_q \sin(\theta - 2\pi/3) \quad (3.28)$$

$$I_c = I_d \cos(\theta + 2\pi/3) - I_q \sin(\theta + 2\pi/3) \quad (3.29)$$

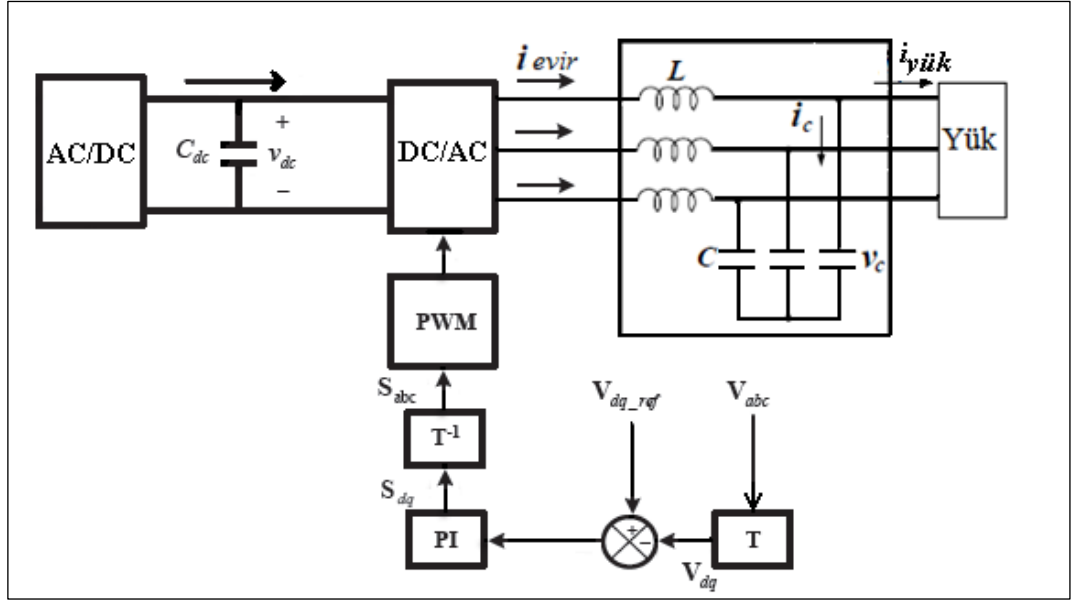
Tork denklemi:

$$T_e = (3/2) n_{pp} (\lambda_m I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (3.30)$$

$$T_m = T_e + K_f \omega + J p \omega \quad (3.31)$$

4. SVPWM EVİRİCİ TASARIMI

Şebeke tarafı çevirgecin amacı, DC bağlantıdaki kapasitenin gerilimini sabit tutmak ve üretilen aktif gücün tamamını şebekeye aktarmaktır. Bununla birlikte ihtiyaç durumunda reaktif güç kontrolü yapmak veya birim güç katsayısı ile çalışmayı sağlamaktır.



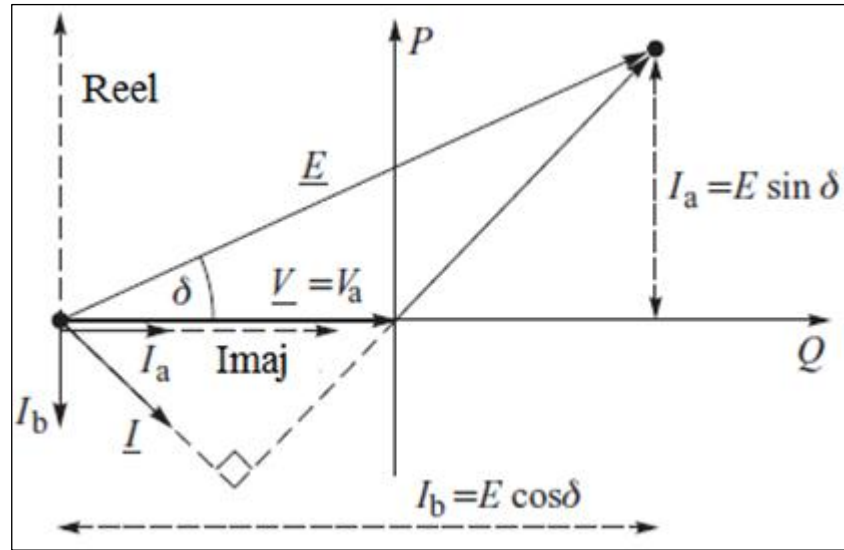
Şekil 4.1: Evirici sistem modeli.

Rüzgar türbinlerinde kullanılan güç elektroniği donanımında yukarıda resmedilen güç elektroniği topolojisinin kullanımında önemli avantajlar bulunmaktadır. Bu topolojiye sırt sırta çevirgeç (back to back converter) denilmektedir. Bu topolojide iki adet gerilim kaynaklı çevirgeç (VSC), bir DC bağlantı üzerinden birbiriyle irtibatlıdır. Bu şekil, iki yönlü enerji akışına uygundur.

Burada hem AC/DC çevirgeçte, hem de DC/AC çevirgeçte kullanılan yüksek frekans anahtarlama aygıtları, uygun PWM tekniklerinden birisi kullanılarak tetiklenmekte ve güç akışını kontrol etmektedirler.

Bu tez çalışmasında, PWM teknikleri arasında SVPWM (Space Vektör PWM) tekniğine uygun güç elektroniği devresi incelenmiştir.

4.1. Evirici Tasarımı Elektriksel Parametreleri



Şekil 4.2: Evirici çıkışı elektriksel parametreleri.

Yukarıdaki fazör diyagramında görüldüğü üzere,

$$V = V_a + j0 \quad (4.1)$$

Evirici çıkış gerilimi:

$$E = E_a + jE_b \quad (4.2)$$

Evirici çıkış akımı (Hat reaktans akımı):

$$I = \frac{E \sin \delta}{X} - j \frac{E \cos \delta - V}{X} \quad (4.3)$$

Şebekeye aktarılan görünür güç:

$$S = 3 * V_a * (I_a + j * I_b) \quad (4.4)$$

$$S = 3 \frac{V_a * E \sin \delta}{X} + 3j \frac{V_a * (E \cos \delta - V_a)}{X} \quad (4.5)$$

Genellikle δ faz açısı küçük değerli olacağından, aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$S = 3 \frac{V_a * E * \delta}{X} + 3j \frac{V_a * (E - V_a)}{X} \quad (4.6)$$

Bu denklemden hareketle aktif güç kontrolünün faz açısı δ ile, reaktif gücün ise E genliğinin kontrolü ile sağlandığı görülmektedir.

Şebeke tarafı çevirgecindeki kontrolün yöntemi:

- DC bara gerilimini şebeke faz-faz gerilimi genliğinden yüksek tutacak şekilde ayarlamak. Bu, akımın q eksen bileşenini kontrol ederek yapılır. Türbin gücü ile şebekeye aktarılan güç eşitse, V_{dc} sabit olmalıdır.

$$I_C = C * \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (4.7)$$

- V_{dc} sabit ise kapasitör akımı sıfır olacaktır.
- Şebekeye verilen aktif ve reaktif gücün kontrol edilmesi aşağıdaki formüllere göre yapılır.

$$P = \frac{3 * E_s}{2 * I_q} \quad (4.8)$$

$$Q = \frac{3 * E_s}{2 * I_d} \quad (4.9)$$

Şebeke faz gerilimleri (E_{an} , E_{bn} , E_{cn}) olmak üzere q ekseninde $E_q = E_s$ alınır. Birim güç katsayısı için d eksen gerilimi sıfır alınır. Reaktif güç ihtiyacı, d eksen bileşeninin kontrolü ile sağlanır.

Faz başına şebeke gerilimi:

$$E = U + R_s I + L_s \frac{di}{dt} \quad (4.10)$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d \quad (4.11)$$

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q + E_s \quad (4.12)$$

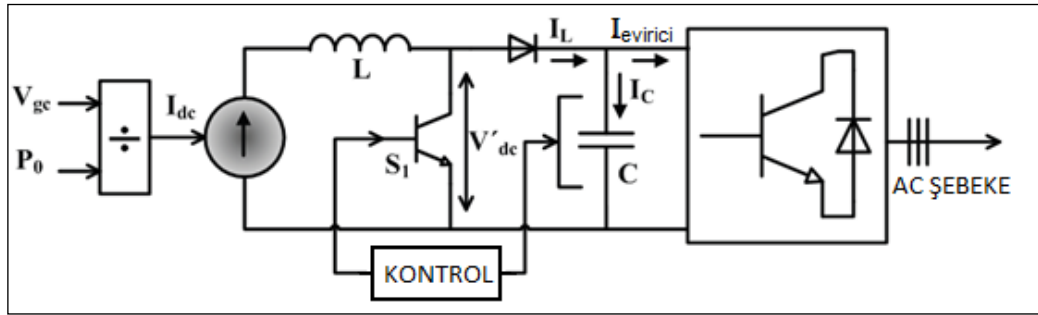
V_d ve V_q , eviricinin d ve q eksen çıkışları, ω_r ise rad/sn cinsinden şebeke frekansdır. R_s ve L_s , şebeke ile evirici arasındaki filtre ve transformatörün eşdeğer seri direnç ve endüktans değerleridir.

Özet olarak,

Generatör Tarafı Güç Çevirgeci: Generatör Tork ve hız kontrolü yapmaktadır.

Şebeke Tarafı Güç Çevirgeci ise DC bağlantı gerilimini sabit tutmakta ve güç akışını kontrol etmektedir.

Şebeke tarafı çevirgeçte, doğrultucu tarafından gelen DA akım ve gerilim değerleri giriş olmaktadır.



Şekil 4.3: Evirici devresi temel bileşenleri.

Şebekeye aktarılacak olan gücün kontrolü esas olduğu için aşağıdaki denklemlere göre akım referansları belirlenerek güç elektroniği elemanları anahtarlanır.

$$I_{dref} = \frac{P_{ref} * V_q + Q_{ref} * V_d}{V_d^2 + V_q^2} \quad (4.13)$$

$$I_{qref} = \frac{P_{ref} * V_d - Q_{ref} * V_q}{V_d^2 + V_q^2} \quad (4.14)$$

Senkron referans eksenindeki gösterimde, kompleks akımın aktif kısmı I_q , reaktif kısmı I_d olarak ifade edilmektedir.

Çevirgecin çıkış gücü:

$$S = P_s + jQ_s = V_d (I_q - jI_d) \quad (4.15)$$

Reaktif güç, doğrudan reaktif akım I_d ile kontrol edilmektedir. Eğer çevirgeç, birim güç katsayısıyla çalışıyorsa reaktif güç sıfır olacaktır.

Akımdan gerilime geçişte:

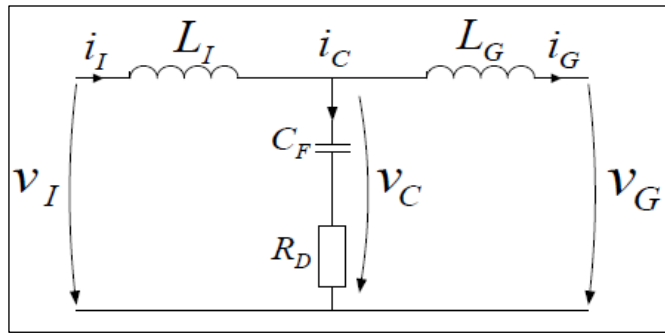
$$V_{d_ref} = V_{d_grid} - L \omega_e I_q + PI (I_{d_ref} - I_q) \quad (4.16)$$

$$V_{q_ref} = V_{q_grid} + L \omega_e I_d + PI (I_{q_ref} - I_q) \quad (4.17)$$

4.2. LCL Filtre Modeli

AA-DA çevirgeç çıkışından gelen güç, DA-AA evirici ile şebekeye aktarılmaktadır. Evirici çıkışındaki LC filtre ise şebeke çıkış harmoniklerini istenen seviyede tutmakla birlikte evirici tarafından üretilen yüksek frekanslı akım dalgalanmalarını en aza indirerek şebekeye bağlantıyı sağlar.

Bu şekilde, PWM eviricinin çıkışına LC filtreler yerleştirilir. Böylece tam sinüse yakın bir çıkış elde edilmeye çalışılır.



Şekil 4.4: LCL filtre devresi.

Yukarıdaki devrenin akım gerilim denklemleri şöyledir:

$$i_I - i_C - i_G = 0 \quad (4.1)$$

$$V_I = i_I L_I s + V_C \quad (4.2)$$

$$V_G = -i_G L_G s + V_C \quad (4.3)$$

$$v_c = i_c \left(\frac{1}{C_F s} + R_D \right) \quad (4.4)$$

Parametre tanımları:

- v_I : Evirici gerilimi
- v_G : Şebeke Gerilimi
- v_c : Kapasitör Gerilimi
- i_I : Evirici Akımı
- L_I : Evirici Tarafı Endüktansı
- L_G : Şebeke Tarafı Endüktansı
- C_F : Şebeke Tarafı Kapasitans
- R_D : Sönümlleme Direnci

Matematiksel modellemede yukarıdaki denklemler aşağıdaki şekle getirilir.

$$i_I = \frac{1}{L_I s} (v_I - v_c) \quad (4.5)$$

$$i_G = \frac{1}{L_G s} (v_c - v_G) \quad (4.6)$$

$$v_c = (i_I - i_G) \left(\frac{1}{C_F s} + R_D \right) \quad (4.7)$$

Transfer Fonksiyonu ifadesi:

$$\bullet G(s) = \frac{i_I(s)}{v_I(s)}$$

(4.5) nolu denklemde v_c ifadesi yerine (4.7) yazılarak (4.8) elde edilir.

$$i_I = \frac{V_I}{L_I s} - \frac{(L_G i_I s - V_c) \cdot (1 + C_F R_D s)}{L_I C_F L_G s^3} \quad (4.8)$$

(4.2) nolu denklemdeki v_c ifadesi (4.8)'de yerine yazılırsa i_L ve v_L dan oluşan bir denklem elde edilir. Bu denklem kullanılarak transfer fonksiyonu şu şekilde bulunur.

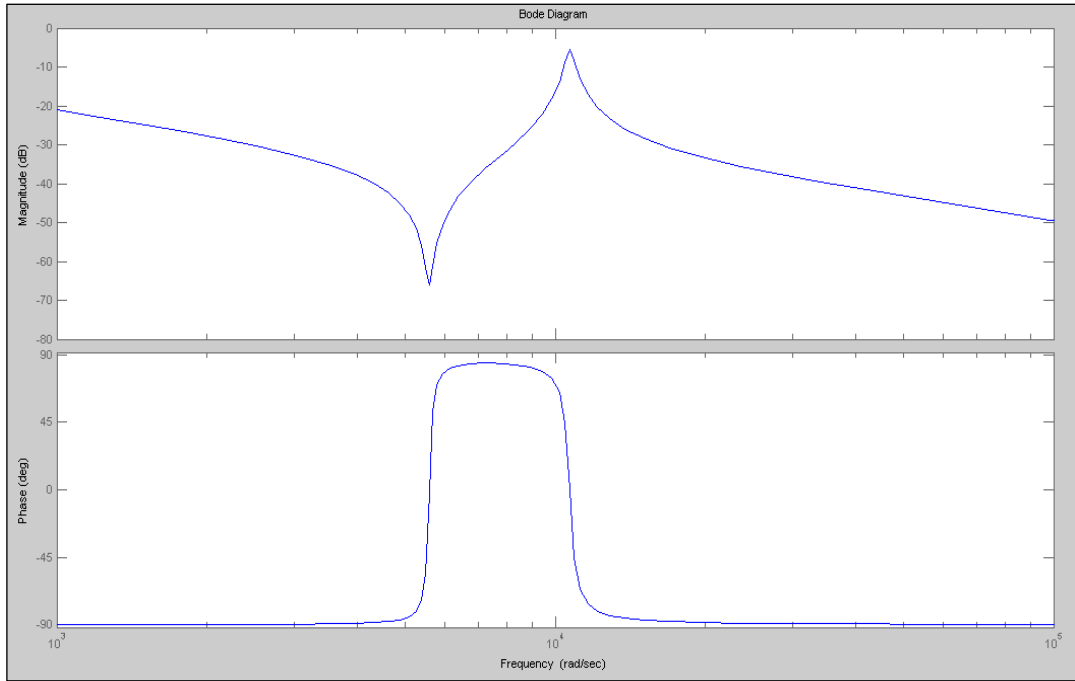
$$G(s) = \frac{L_I C_F s^2 + R_D C_F s + 1}{L_I L_G C_F s^3 + R_D C_F (L_I + L_G) s^2 + (L_I + L_G) s} \quad (4.9)$$

Kullanılan filtrede direnç, endüktans ve kapasite değerleri şöyle seçilmiştir.

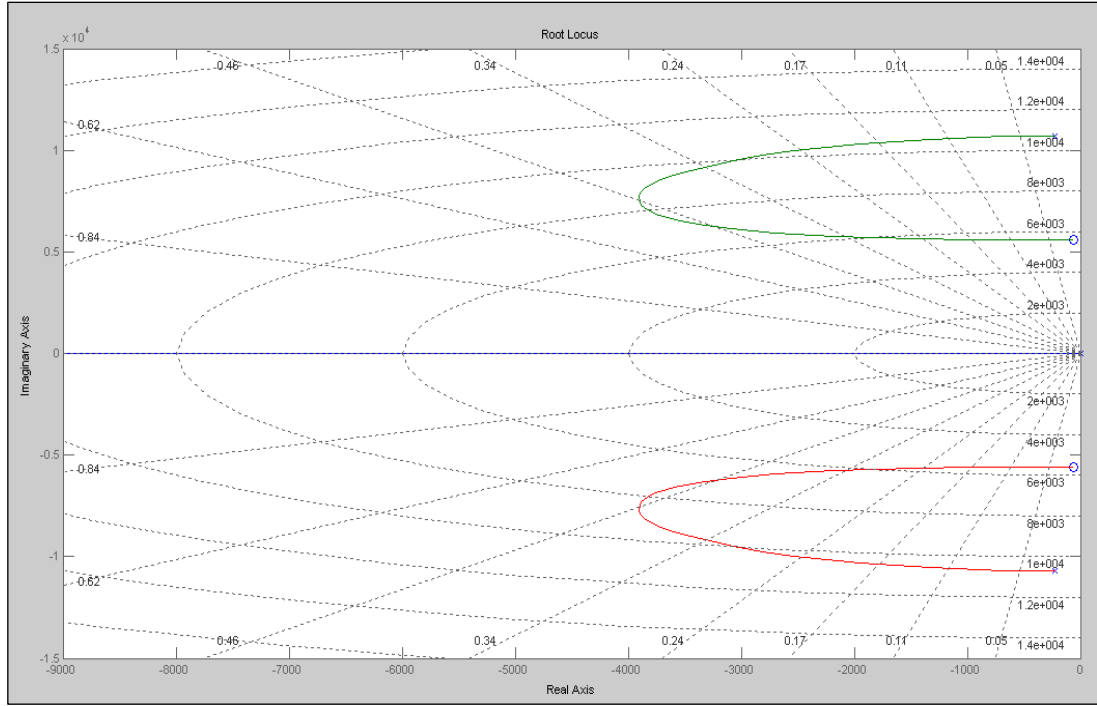
$R_i=0.1$ ohm, $L_i=8$ mH, $R_g=0.1$ ohm, $L_g=3$ mH, $C_f=4$ uF, $R_d=1$ ohm

$$G(s) = \frac{32 \cdot 10^3 s^2 + 4 \cdot 10^6 s + 10^{12}}{96 \cdot s^3 + 44 \cdot 10^3 s^2 + 11 \cdot 10^9 s} \quad (4.10)$$

Bu durumda bode ve köklerin yer eğrileri grafikleri aşağıdaki gibidir.



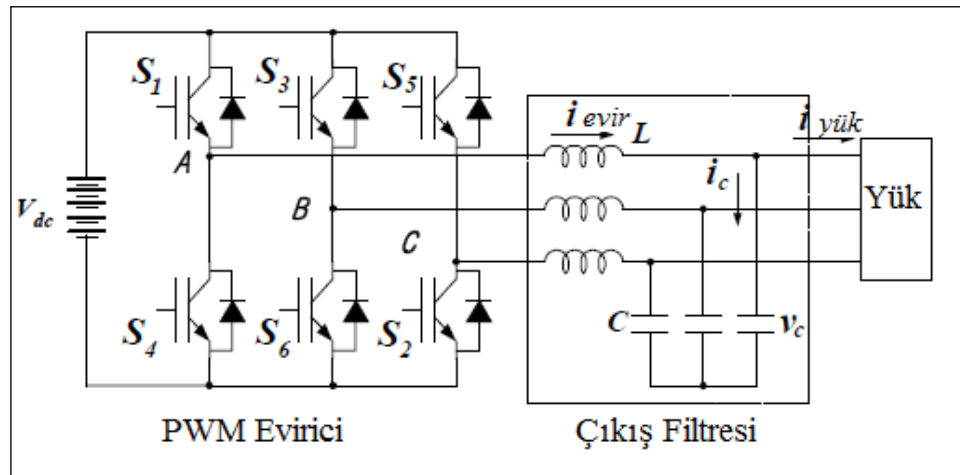
Şekil 4.5: LCL filtresi bode diyagramı.



Şekil 4.6: LCL filtresi köklerin yer eğrileri grafiği.

4.2.1. Çıkış Gerilimi Kontrolü

Bölüm 4.1’de belirtildiği üzere reaktif güç kontrolü, evirici çıkış geriliminin kontrolü ile sağlanmaktadır. Ayrıca şebekeden izole çalışan rüzgar türbinleri için de çıkış gerilimi kontrolü gereklidir.



Şekil 4.7: LC filtreli PWM evirici.

Şekil 4.7'deki devrenin akım, gerilim denklemleri:

$$C \frac{dV_c}{dt} = i_{evir} - i_{yük} \quad (4.9)$$

$$L \frac{di_{evir}}{dt} = V_{evir} - V_c \quad (4.10)$$

- Kapasitör gerilimi $V_c = \frac{V_{ca}}{V_{cb}}, \frac{V_{cc}}$
- Evirici çıkış gerilimi $V_i = \frac{V_a}{V_b}, \frac{V_c}$
- Evirici çıkış akımı $I_{inv} = \frac{i_a}{i_b}, \frac{i_c}$
- Yük akım vektörü $I_{ld} = \frac{i_{la}}{i_{lb}}, \frac{i_{lc}}$

(4.9) ve (4.10) denklemlerini d-q eksenlerine dönüştürelim.

$$\dot{V}_{cq} = \frac{1}{C} i_q - \omega V_{cd} - \frac{1}{C} i_{lq} \quad (4.11)$$

$$\dot{V}_{cd} = \frac{1}{C} i_d + \omega V_{cq} - \frac{1}{C} i_{ld} \quad (4.12)$$

$$\dot{i}_q = \frac{1}{L} V_q - \omega i_d - \frac{1}{L} V_{cq} \quad (4.13)$$

$$\dot{i}_d = \frac{1}{L} V_d + \omega i_q - \frac{1}{L} V_{cd} \quad (4.14)$$

- V_{cd} ve V_{cq} kapasitör d-q gerilimleri,
- V_d ve V_q evirici çıkış d-q gerilimleri,
- i_d ve i_q evirici d ve q akımlarını,

- i_{ld} ve i_{lq} yük d ve q akımlarını,
- ω , çıkış geriliminin açısal frekansını ifade etmektedir.

DC taraftan gelen güç girişinin yük (ya da şebeke) tarafındaki güç talebini anlık olarak karşıladığı varsayımıyla filtre girişi ve çıkışı arasındaki dengeyi gösteren denklem (4.15)'te verilmiştir.

$$V_{dc} I_{dc} = 1.5 (V_{cq} I_{lq} + V_{cd} I_{ld}) \quad (4.15)$$

Dengeli üç faz sistemde d eksen bileşeni $V_{cd} = 0$ alınmaktadır. (4.11) nolu denklem aşağıdaki gibi olur.

$$i_{lq} = i_q - C\dot{v}_{cq} \quad (4.16)$$

(4.16) nolu denklemi (4.15) yerinde yazarsak,

$$\dot{v}_{cq} = -\frac{2V_{dc}I_{dc}}{3CV_{cq}} + \frac{i_q}{C} \quad (4.17)$$

(4.13) ve (4.17) nolu denklemler nonlinear sistem modelini oluşturmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{v}_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}v_{cq} \\ -\frac{2V_{dc}I_{dc}}{3CV_{cq}} + \frac{i_q}{C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_q}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Değişken dönüşümü şu şekilde yapılarak;

$$x_1 = v_{cq} \quad (4.19)$$

$$\xi = \frac{I_{dc}}{v_{cq}} \quad (4.20)$$

$$x_2 = i_q \quad (4.21)$$

$$u = v_q \quad (4.22)$$

(4.18) durum denkleminde aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{2V_{dc}}{3C} \xi + \frac{1}{C} x_2 \\ \dot{\xi} &= a\xi + bx_1 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{L} x_1 + \frac{1}{L} u \end{aligned} \quad (4.23)$$

Burada ξ dinamiği bir alçak geçiren süzgeç olarak düşünülmektedir. a ve b parametreleri belirlenmesi gerekir. Durum uzayı olarak yazılırsa;

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\xi} \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{2V_{dc}}{3C} & \frac{1}{C} \\ b & a & 0 \\ -\frac{1}{L} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \xi \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \xi \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.24)$$

(4.24) denklemini lineer modeli göstermektedir. Bu model kullanılarak lineer kontrol tasarımı gerçekleştirilecektir.

(4.24) nolu denklemde sabitlerin değişken dönüşümünü uygulayalım.

$$\frac{2V_{dc}}{C} = z \quad (4.25)$$

$$\frac{1}{C} = t \quad (4.26)$$

$$\frac{1}{L} = k \quad (4.27)$$

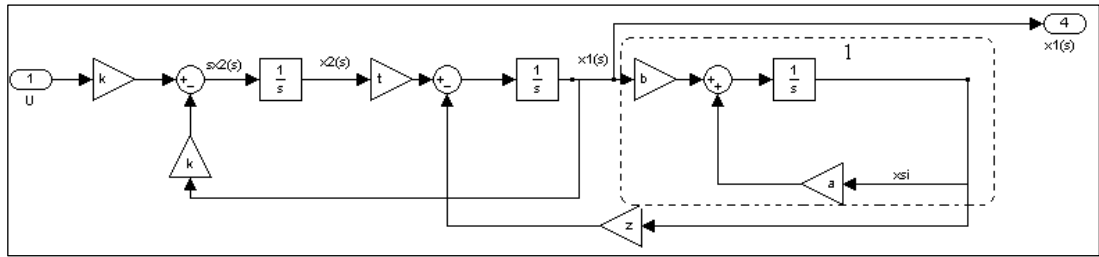
Buna göre Laplace dönüşümleri aşağıdaki gibidir.

$$sX_1(s) = -z \xi + t X_2(s) \quad (4.28)$$

$$s\xi(s) = a\xi(s) + bX_1(s) \quad (4.29)$$

$$sX_2(s) = -kX_1(s) + kU(s) \quad (4.30)$$

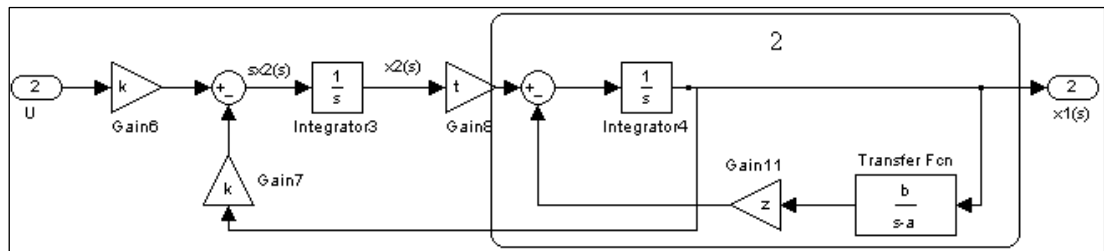
y=x1 için blok diyagramı:



Şekil 4.8: Sistem blok diyagramı birinci indirgeme işlemi.

1 nolu bölümün indirgenmesi sonucunda:

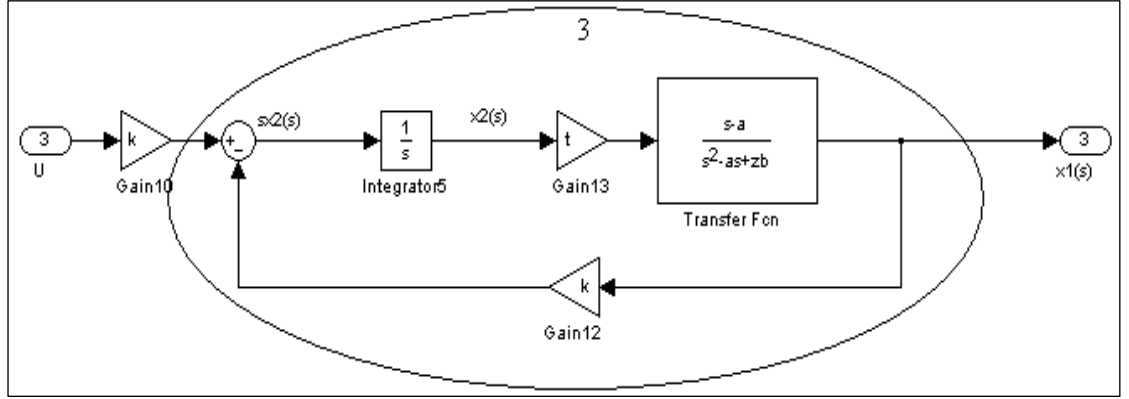
$$\frac{1/s}{1-a/s} = \frac{1/s}{(s-a)/s} = \frac{1}{s-a} \quad (4.31)$$



Şekil 4.9: Sistem blok diyagramı ikinci indireme işlemi.

2 nolu bölümün indirgenmesi sonucunda:

$$\frac{1/s}{1+zb/s(s-a)} = \frac{s-a}{s^2-as+zb} \quad (4.32)$$



Şekil 4.10: Sistem blok diyagramı üçüncü indirgeme işlemi.

3 nolu bölümde indirgeme işlemleri yapıldığında sonuç olarak, u giriş, x1 çıkış olacak şekilde transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur.

$$T(s) = \frac{kts - kta}{s^3 - as^2 + (zb + kt)s - akt} \quad (4.33)$$

$$\frac{2V_{dc}}{C} = z \quad (4.34)$$

V_{dc} , şebeke geriliminin $\sqrt{3}$ katı olacak şekilde seçilir. V_{dc} kontrolü PWM denetleyicisi tarafından gerçekleştirilmektedir. Rüzgar türbini trafo primer tarafı gerilimi 400 V olarak düşünülürse $V_{dc} = 692$ V alınır.

$$\frac{1}{C} = t \quad (4.35)$$

$$\frac{1}{L} = k \quad (4.36)$$

Modellemede kullanılan değerler ; $R_i = 0.1$ ohm, $L_i = 8$ mH, $R_g = 0.1$ ohm, $L_g = 3$ mH, $C_f = 4$ uF, $R_d = 1$ ohm yerine yazılırsa;

- $z = 346 \times 10^6$

- $t = 25 \times 10^4$

$$\bullet k = \frac{10^3}{3}$$

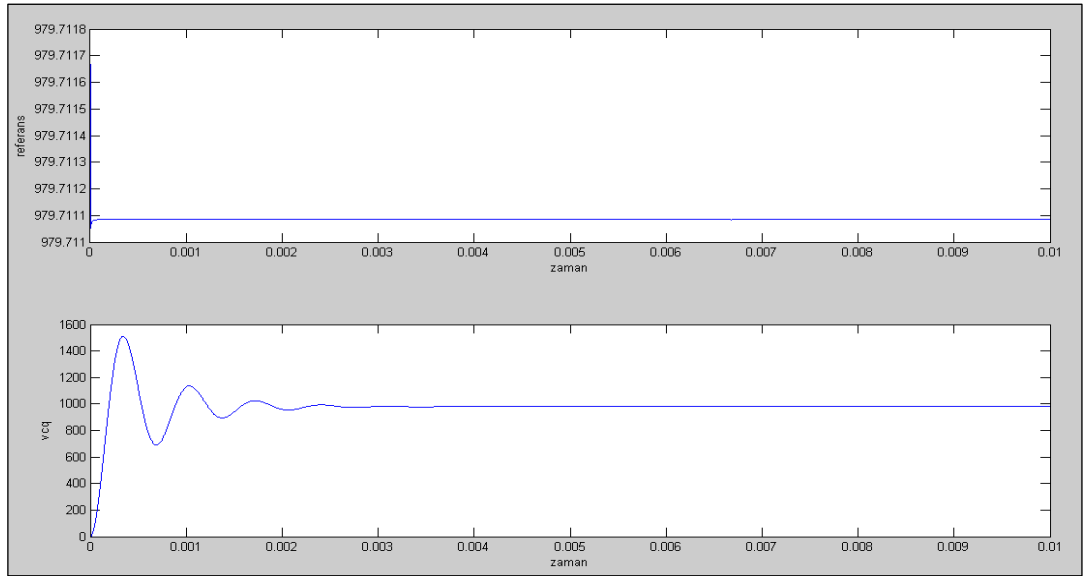
$$T(s) = \frac{83 \cdot 10^6 (s-a)}{s^3 - as^2 + (346 \cdot 10^6 b + 83 \cdot 10^6)s - 83 \cdot 10^6 a} \quad (4.37)$$

Aynı yaklaşımla $y=\xi$ olması durumunda transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$T(s) = \frac{tkb}{s^3 - as^2 + (zb+kt)s - akt} \quad (4.38)$$

Değerler yerine yazılırsa;

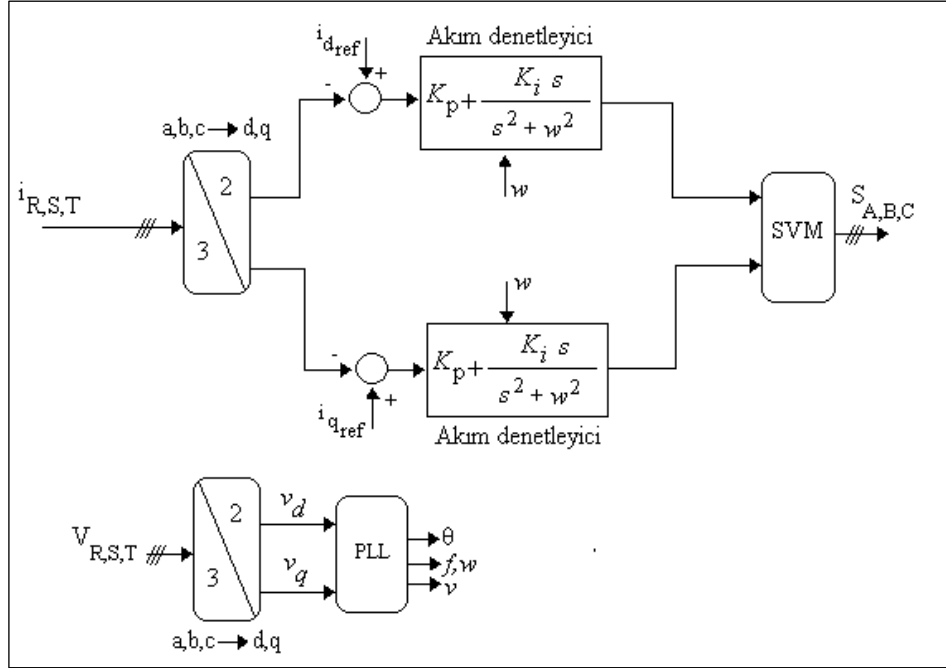
$$T(s) = \frac{83 \cdot 10^6 b}{s^3 - as^2 + (346 \cdot 10^6 b + 83 \cdot 10^6)s - 83 \cdot 10^6 a} \quad (4.39)$$



Şekil 4.11: v_q referans girişi ve v_{cq} çıkış grafiği.

Yukarıdaki grafikte evirici çıkış gerilimi $1200 \sin(\omega t)$ için q eksenini referans değeri üst kısımda verilmiştir. a ve b parametreleri uygun değerde seçilerek kapasite çıkış geriliminin referans değerde olduğunu gösteren grafiklerdir.

4.3. Akımın d-q Eksen Denetleyicileri



Şekil 4.12: Akım denetleyici blok diyagramı.

Akım denetleyici girişlerindeki referans değerler, önceki bölümde ifade edilen güç formülleri ile elde edilmektedir.

Üç faz akımın geri besleme işareti olarak alınmakta ve Park dönüşümü yöntemiyle iki faz d ve q (veya x ve y) bileşenlerine ayrılmaktadır.

Standart PI denetleyici kullanmanın en büyük dezavantajı, dengesiz yüklenme ve şebeke hatalarında faz açısının tespitindeki yetersizlik nedeniyle ortaya çıkan düşük performanstır [12].

Bu nedenle PI denetleyici yerine rezonant kontrolör kullanılmıştır.

Rezonant denetleyici transfer fonksiyonu:

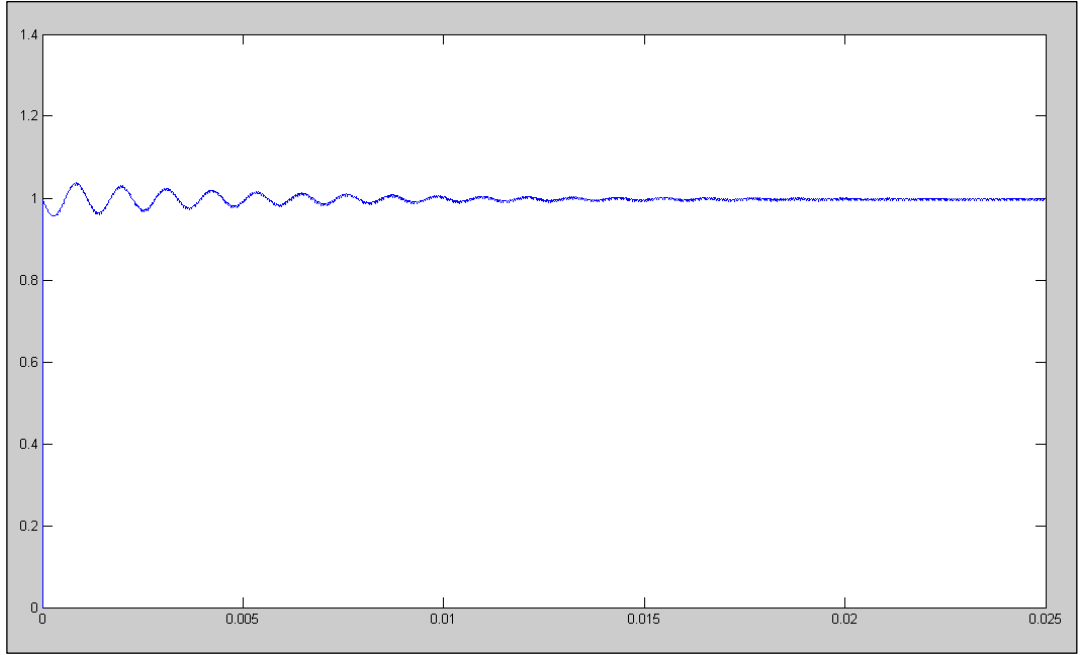
$$K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega^2} \quad (4.40)$$

PLL (Faz kilitlemeli çevrim), 3 faz voltajı şebeke voltajı ile senkronize etmek için kullanılır.

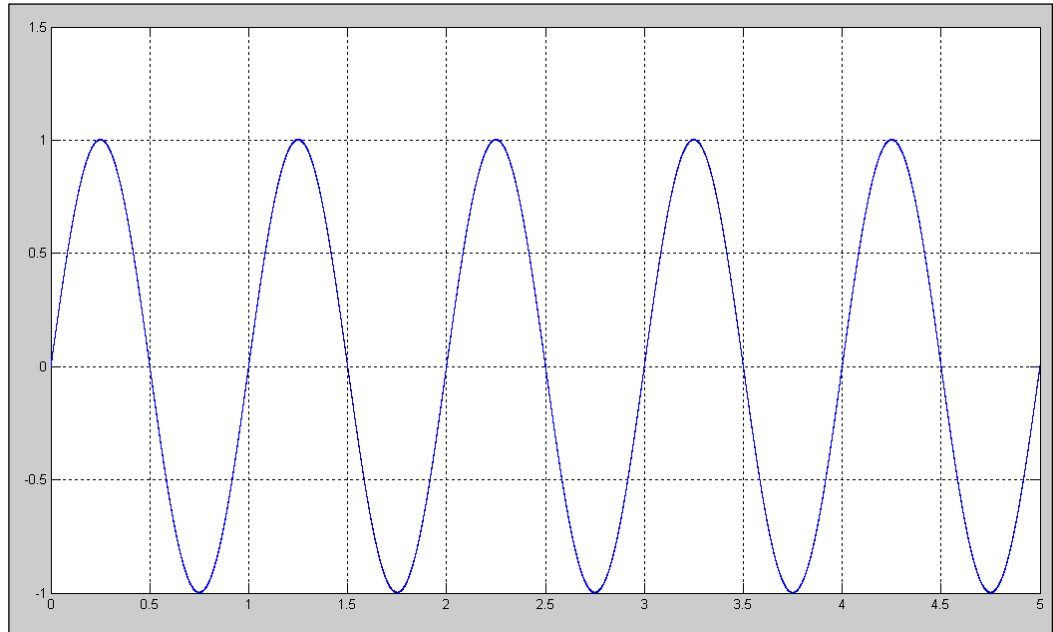
Şebeke gerilim geri beslemesi kullanılarak PLL (Faz kilitlemeli çevrim) tekniği ile şebeke faz açısı anlık olarak elde edilmiş, ω dönel frekansı, kontrolörün bir giriş

parametresi olmuştur. d ve q eksenlerinde çalışıldığı için PLL öncesi şebeke üç faz gerilimi d ve q eksenlerine dönüştürülmüştür. Bu şekilde denetleyicinin şebeke ile senkronizasyon sağlanmıştır.

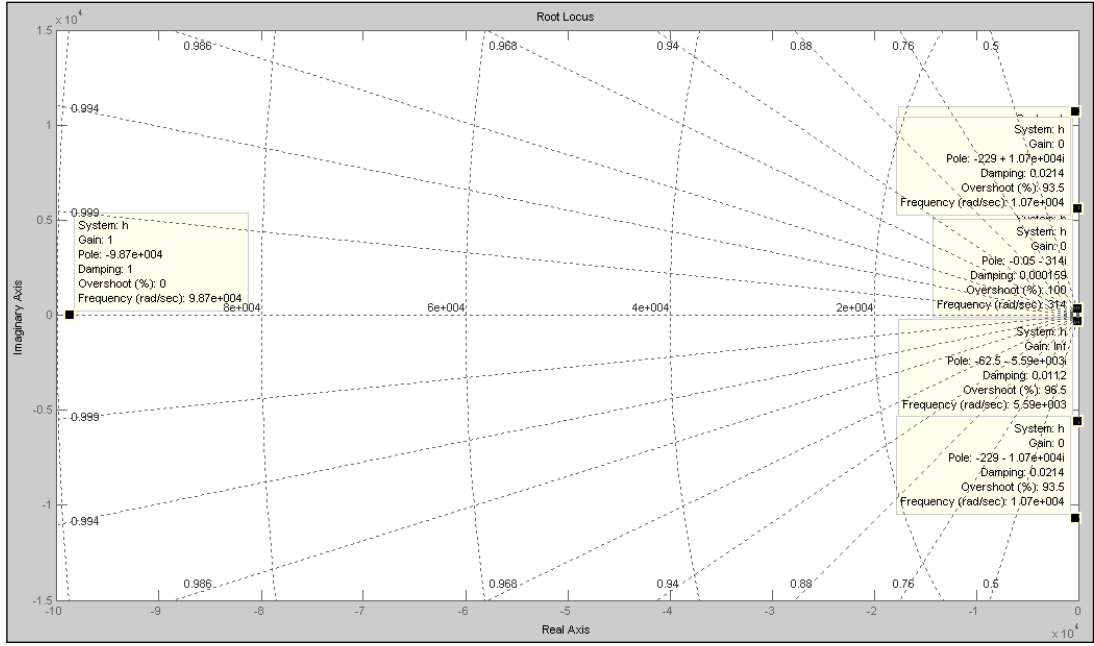
Her iki akım çevriminin özdeş dinamiklere sahip olması nedeniyle q eksen denetleyicisi için seçilen parametreler d eksen için de aynen kullanılmıştır.



Şekil 4.13: Akım denetleyici birim basamak tepkisi.



Şekil 4.14: Birim genlikli, 1 sn periyodik sinüs girişi tepkisi.



Şekil 4.15: Kapalı çevrim transfer fonksiyonu kök yer eğrileri grafiği.

Kök yer eğrileri grafiğine göre kutupların tümü sol yarı düzlemde dir.

4.4. Senkronizasyon Teknikleri

Eviricinin şebeke ile senkronize çalışabilmesi için şebeke faz, genlik ve frekans bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bilgilerin temini için iki temel senkronizasyon yöntemi bulunmaktadır:

- Filtreli sıfır geçiş algılama (ZCD)
- Faz kilitlemeli çevrim (PLL)

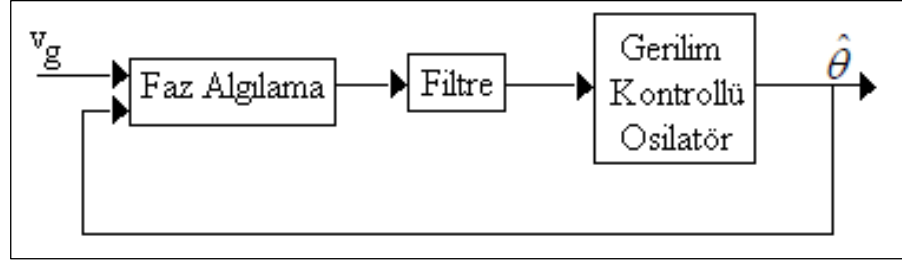
Sıfır geçiş algılama yönteminde şebeke gerilim işaretinin sıfır geçiş noktaları algılanır. Tek fazlı sistemlerde daha yaygın kullanılmaktadır.

Faz kilitlemeli çevrim yönteminde ise geri beslemeli kontrol temel alınmaktadır. Evirici çıkış akımının faz açısının şebeke gerilimi faz açısıyla senkronize ederek güç katsayısının 1 değerine olabildiğince yakın olması sağlanır.

PLL tekniğinde evirici akım frekansı ω_{inv} değiştirilerek evirici akımı ile şebeke gerilimi arasındaki faz farkı giderilmeye çalışılır. Eğer evirici akımı şebeke

geriliminden geri fazda ise ω_{inv} düşürülür. Evirici akımı şebeke geriliminden ileri fazda ise faz farkı giderilene kadar ω_{inv} arttırılır.

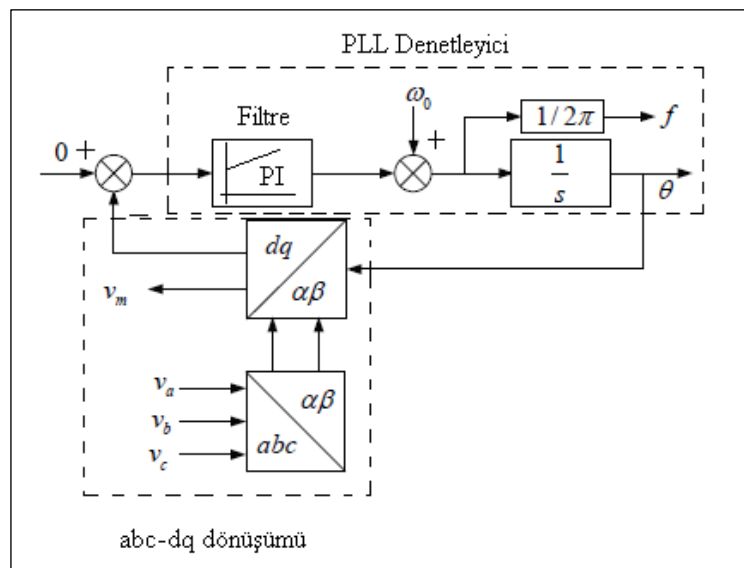
4.4.1. PLL Senkronizasyon Tekniği



Şekil 4.16: Kapalı Çevrim Senkronizasyon Blok Diyagramı.

En yaygın kabul görmüş temel senkronizasyon yöntemine ilişkin blok diyagramı Şekil 4.13 de gösterilmiştir. Giriş sinyali ile çıkış sinyali faz açıları arasındaki fark faz algılama kısmında algılanır ve filtreye gönderilir. Filtre çıkış sinyali gerilim kontrollü osilatörü çalıştırarak giriş sinyali ile aynı fazda olacak şekilde çıkış sinyalini üretir.

Bu temel prensip üzerine özelleşmiş farklı faz kilitlemeli çevrim teknikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, üç fazlı sistemlerde en çok kullanılan yöntemlerden biri olan “Senkron Düzlem PLL” tekniği kullanılmıştır.



Şekil 4.17: Senkron düzlem PLL tekniği blok diyagramı.

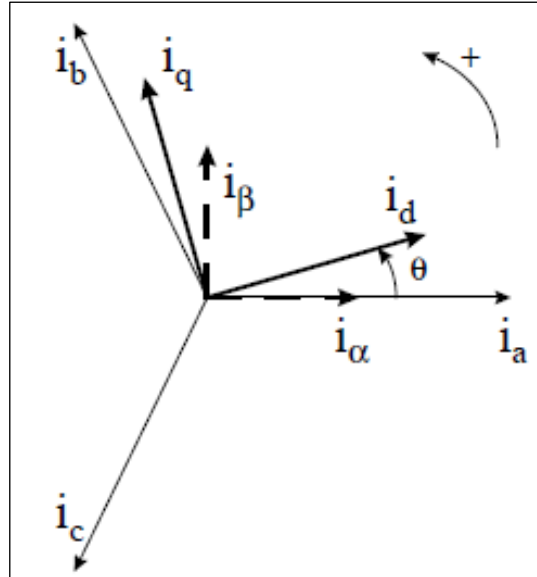
Şekil 4.17' de gösterildiği gibi faz açısı θ , PLL dönel referans düzleminin şebeke gerilim vektörü ile senkronizasyonu sayesinde algılanır. Faz algılama olarak ifade edilen bu kısımda abc-dq dönüşümü kullanılmaktadır.

PI denetleyici, v_d ve v_q referans gerilimlerini sıfıra eşitleyerek referansın şebeke gerilim vektörü faz açısına kilitlenmesini sağlar. Bununla birlikte PI çıkışında şebeke frekansı “ f ” ve şebeke gerilimi genliği “ v_m ” de elde edilir.

Filtre kısmı, sistem dinamiğini belirler. Filtrenin bant genişliği, filtreleme performansını ve zaman tepkisini belirler. Bu nedenle filtre parametreleri, kilitleme kalitesi ve PLL dinamiği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

4.4.2. Clark & Park Dönüşümü

Clark ve Park dönüşümü, asenkron ve senkron makinelerin yüksek performans sürücü mimarisinde kullanılmaktadır. Clark dönüşümünde, akımın Reel (I_d) ve İmajiner (I_q) bileşenleri tanımlanır. Park dönüşümü ile I_d ve I_q akım bileşenlerinin dönel referans düzlemine geçişi sağlanır.



Şekil 4.18: d ve q dönel referans düzlemi ve a,b,c sabit referans düzlemi.

Clark dönüşümü, 3 faz sistemi 2 faz ortogonal sisteme dönüşümünü sağlar.

Clark dönüşümü matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$i_{\alpha} = \frac{2}{3} * i_a - \frac{1}{3}(i_b - i_c) \quad (4.41)$$

$$i_{\beta} = \frac{2}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \quad (4.42)$$

$$i_0 = \frac{2}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (4.43)$$

Üç faz dengeli sistemde i_0 bileşeni ihmal edilir. Bu durumda;

$u = u_{\alpha} + j u_{\beta}$ orijinal 3 faz işareti temsil eder.

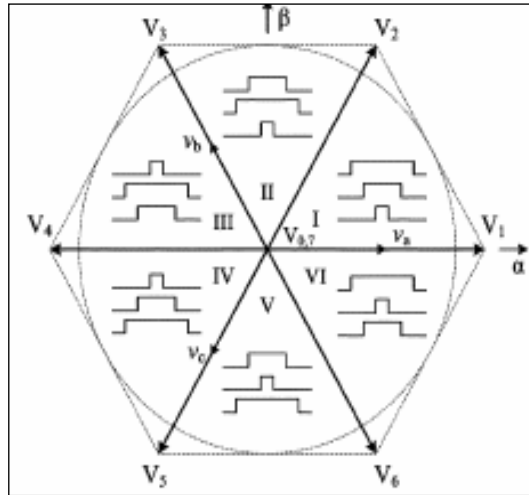
Park dönüşümü matematiksel gösterimi ise şu şekildedir:

Clarke dönüşümü ile hesaplanan iki faz α, β değerlerine θ faz açısıyla aşağıdaki denklemlerde gösterildiği üzere vektörel rotasyon uygulanır. Böylece d ve q bileşenleri elde edilmiş olur.

$$i_d = i_{\alpha} \cdot \cos(\theta) - i_{\beta} \cdot \sin(\theta) \quad (4.44)$$

$$i_q = -i_{\alpha} \cdot \sin(\theta) + i_{\beta} \cdot \cos(\theta) \quad (4.45)$$

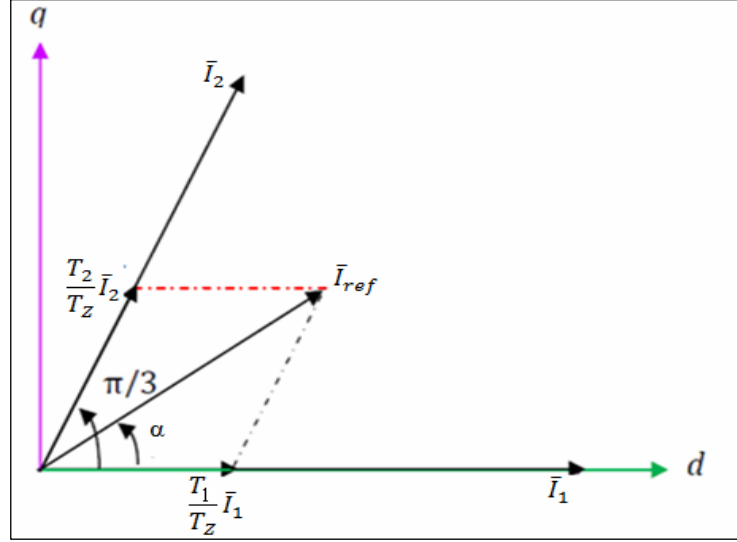
4.5. SVPWM



Şekil 4.19: SVPWM işareti sektörel gösterimi.

Üç faz elektriksel işareti 2π radyanlık fazör düzleminde hareket eden U_α ve U_β fazörlerine indirgendiğinde sinüzoidal işaretin doğrusal modülasyonu yapılabilmektedir.

Her bir bölgede değeri sıfırdan farklı toplam altı adet vektör bulunmaktadır. İki adet sıfır vektörü de orijindedir.



Şekil 4.20: Fazörlerin d ve q ekseninde gösterimi.

Her bir dilimde, elektriksel işaretin yatay ve düşey bileşeni yukarıdaki gibidir. α faz açısı, T_1 ve T_2 fazörlerin zaman değişkenleri, T_z ise birim zamandır.

Yukarıdaki fazörde analitik işlemler yapıldığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{I_{ref}}{\sin(\frac{2\pi}{3})} = \frac{I_1 * T_1}{\sin(\frac{\pi}{3} - \alpha)} \quad (4.46)$$

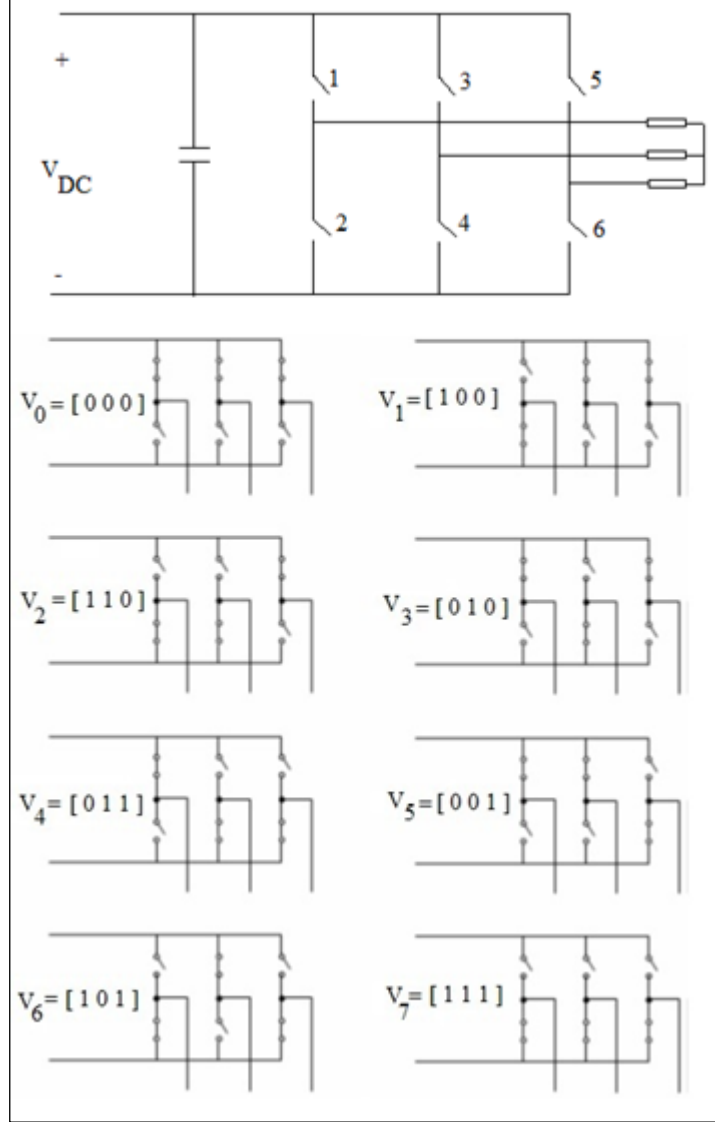
$$\frac{I_{ref}}{\sin(\frac{2\pi}{3})} = \frac{I_2 * T_2}{\sin(\alpha)} \quad (4.47)$$

$$M = \frac{2 I_{ref}}{\sqrt{3} I_{dc}} \quad (4.48)$$

$$T_1 = M \sin(\frac{\pi}{3} - \alpha) \quad (4.49)$$

$$T_2 = M \sin(\alpha) \quad (4.50)$$

$$T_0 = T_z - T_1 - T_2 \quad (4.51)$$



Şekil 4.21: Güç elektroniği anahtarları ve anahtarlama sırası.

Anahtarlama zamanını hesaplayan yazılım kodu referans genlik, referans faz açısı ve karşılaştırma için zamanlayıcı sinyaline ihtiyaç duyar.

Açı bilgisi yazılım kodu içerisinde kullanılarak hegzagonun hangi diliminde olduğunun tespiti yapılır. Aktif ve sıfır vektörleri belirlendikten sonra tabloda gösterilen anahtarlama süreleri hesaplanır.

Her bir anahtarın tetiklenme süreleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Sonuçta her bir tetikleme işareti için Tablo 4.2’deki faz faz ve faz nötr gerilimleri elde edilecektir.

Tablo 4.1: Her bir anahtarın tetikleme süreleri.

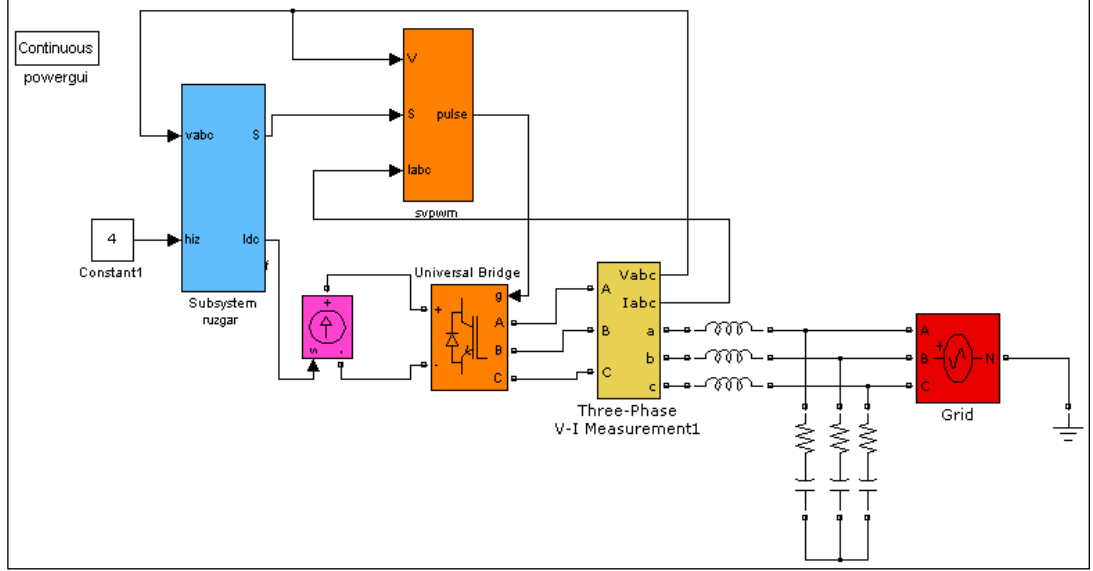
DİLİM	ÜST ANAHTARLAR (S1,S3,S5)	ALT ANAHTARLAR (S4,S6,S2)
1	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_0 / 2$
	$S_3 = T_2 + T_0/2$	$S_6 = T_1 + T_0/2$
	$S_5 = T_0/2$	$S_2 = T_1 + T_2 + T_0/2$
2	$S_1 = T_1 + T_0/2$	$S_4 = T_2 + T_0/2$
	$S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_6 = T_0/2$
	$S_5 = T_0/2$	$S_2 = T_1 + T_2 + T_0/2$
3	$S_1 = T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$
	$S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_6 = T_0/2$
	$S_5 = T_2 + T_0/2$	$S_2 = T_1 + T_0/2$
4	$S_1 = T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$
	$S_3 = T_1 + T_0/2$	$S_6 = T_2 + T_0/2$
	$S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_2 = T_0/2$
5	$S_1 = T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_0/2$
	$S_3 = T_0/2$	$S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$
	$S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_2 = T_0/2$
6	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_0/2$
	$S_3 = T_0/2$	$S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$
	$S_5 = T_1 + T_0/2$	$S_2 = T_2 + T_0/2$

Tablo 4.2: Vektörler ve anahtarlama sırası.

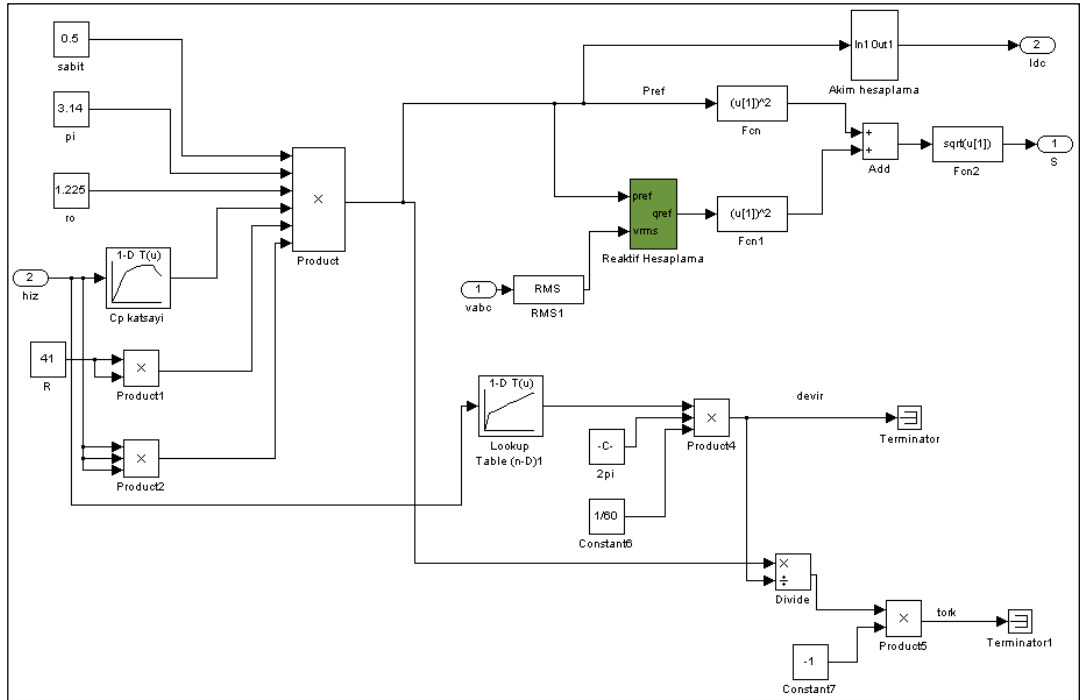
Gerilim Vektörleri	Anahtarlama Vektörleri			Faz Nötr Gerilimleri			Faz Faz Gerilimleri		
	a	b	c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
V_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
V_2	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
V_3	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
V_4	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
V_5	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
V_6	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
V_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

5. MATLAB&SIMULINK MODELİ

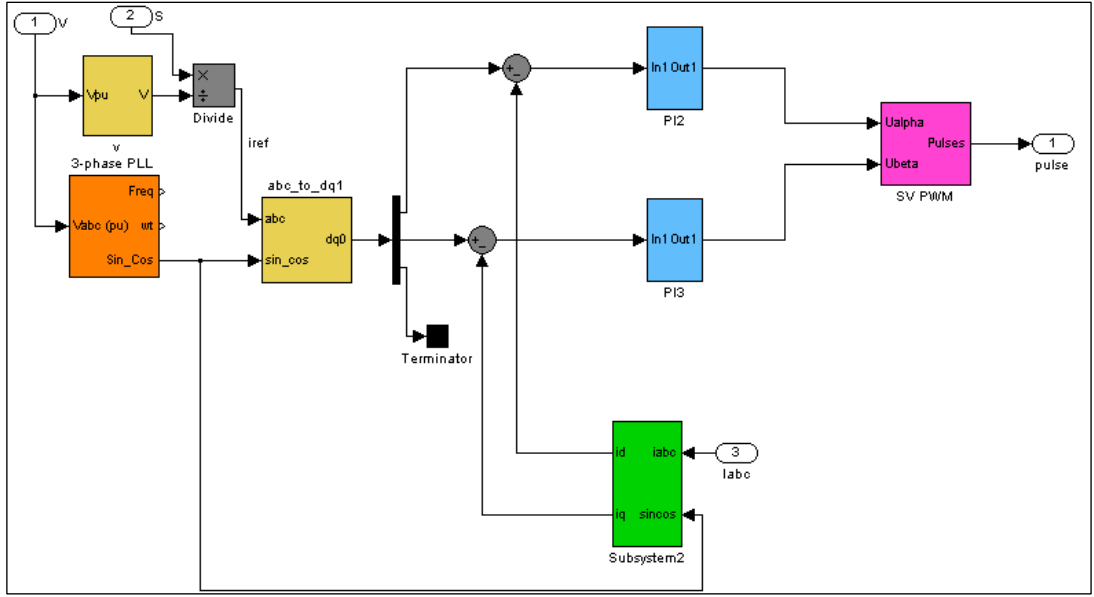
Simulink modelinde DC/AC evirici modeli gerçekleştirilmiştir. Kaynak kısmı rüzgar modelinden hareketle elde edilen referans güç değerleri kullanılarak ideal akım kaynağı olarak modellenmiştir.



Şekil 5.1: Evirici simulink modeli.



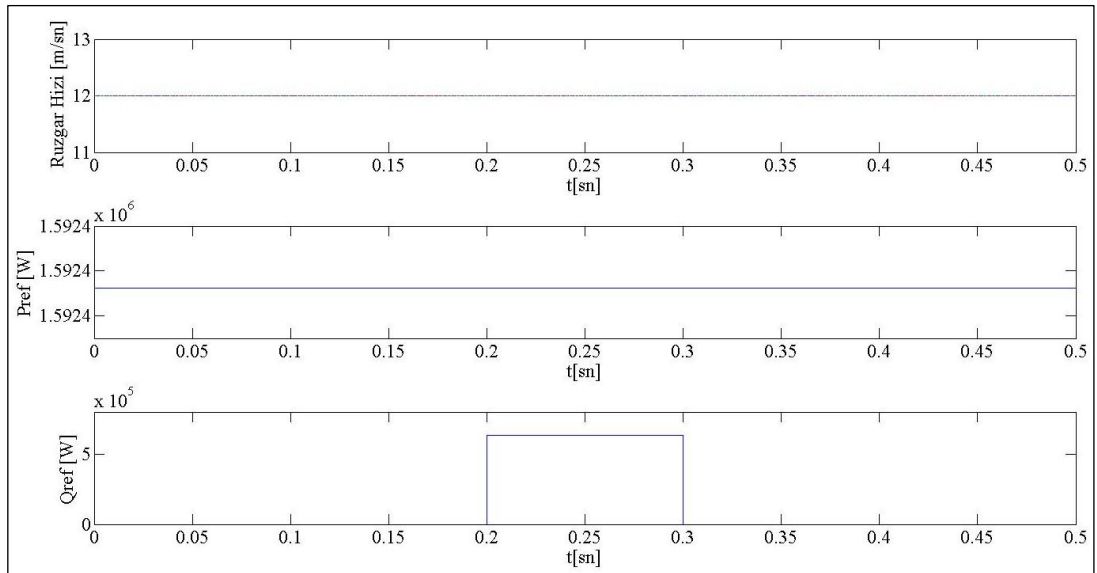
Şekil 5.2: Referans değerler hesaplama alt sistemi.



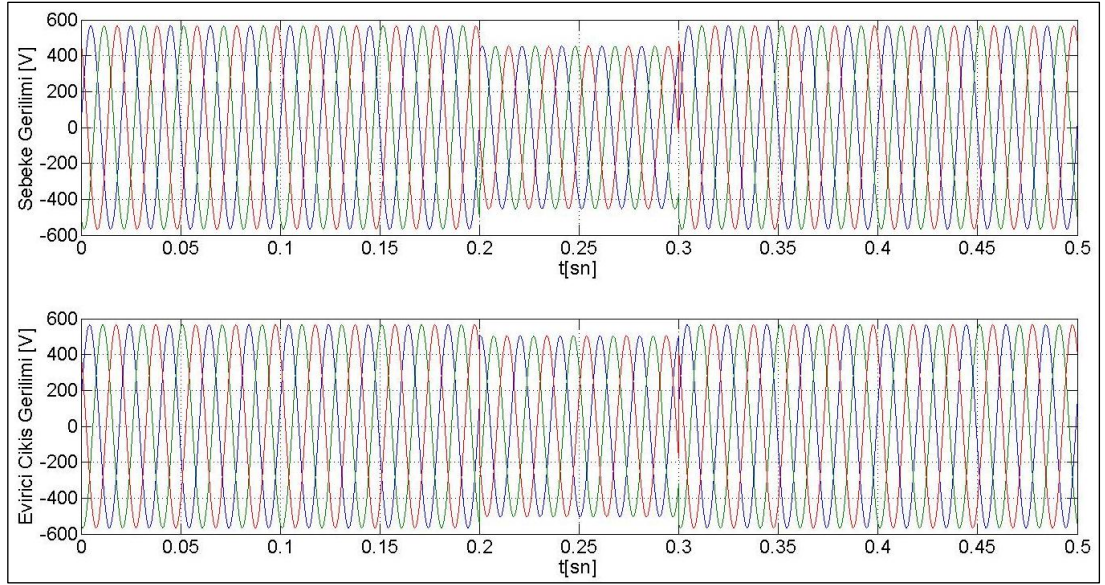
Şekil 5.3: SVPWM darbe üretici alt sistemi.

5.1. Simulasyon Çıktıları

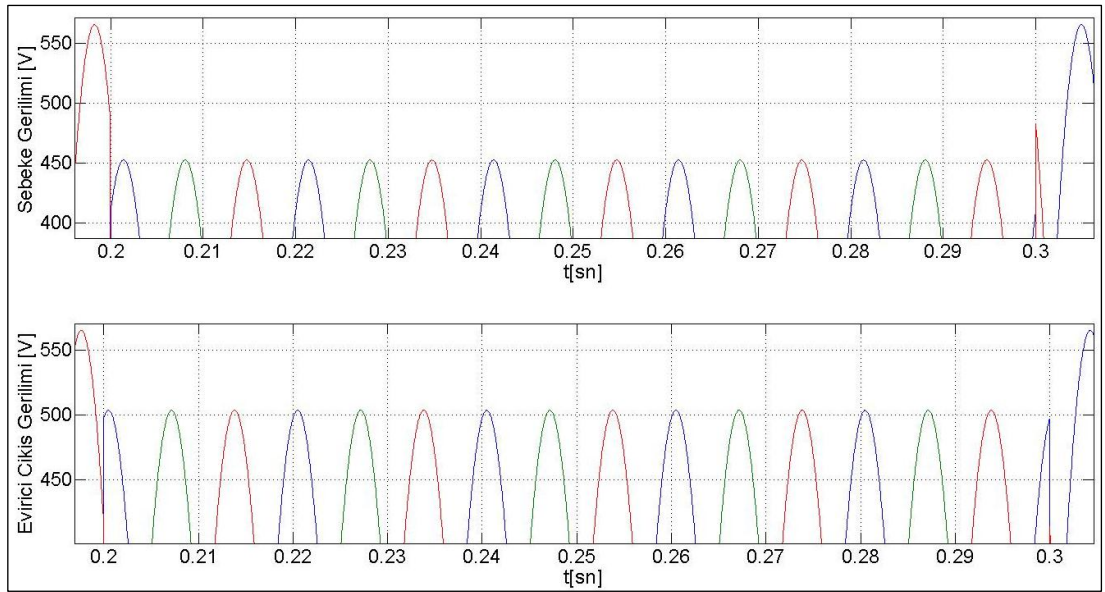
5.1.1. Sabit Rüzgar Hızı ve Şebeke Arıza Durumu



Şekil 5.4: Rüzgar hızı ve referans güç grafikleri.

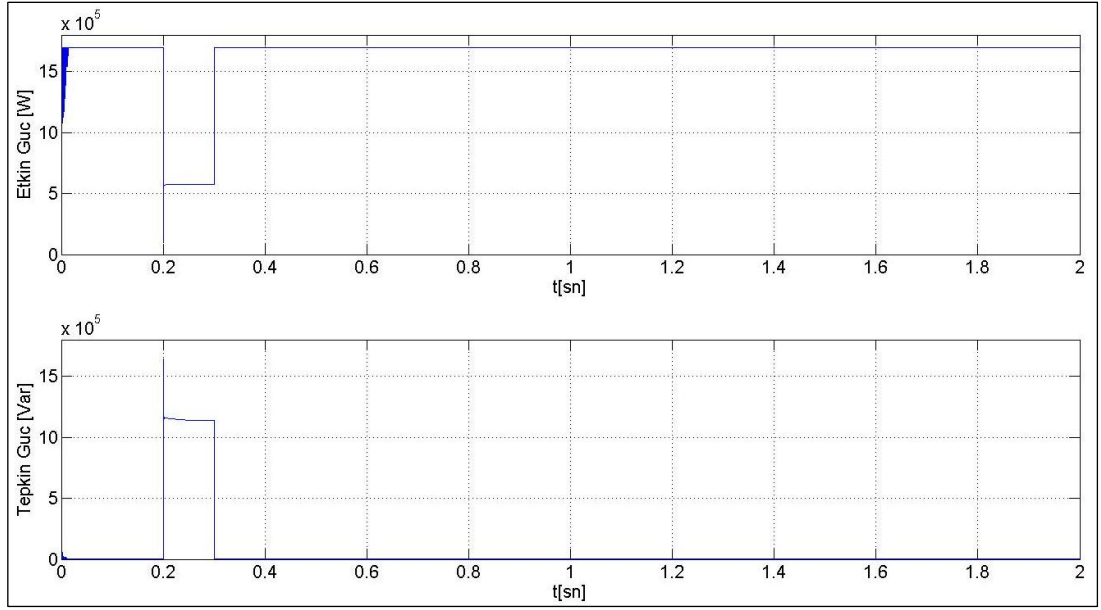


Şekil 5.5: Şebeke gerilimi ve evirici çıkış gerilimi.

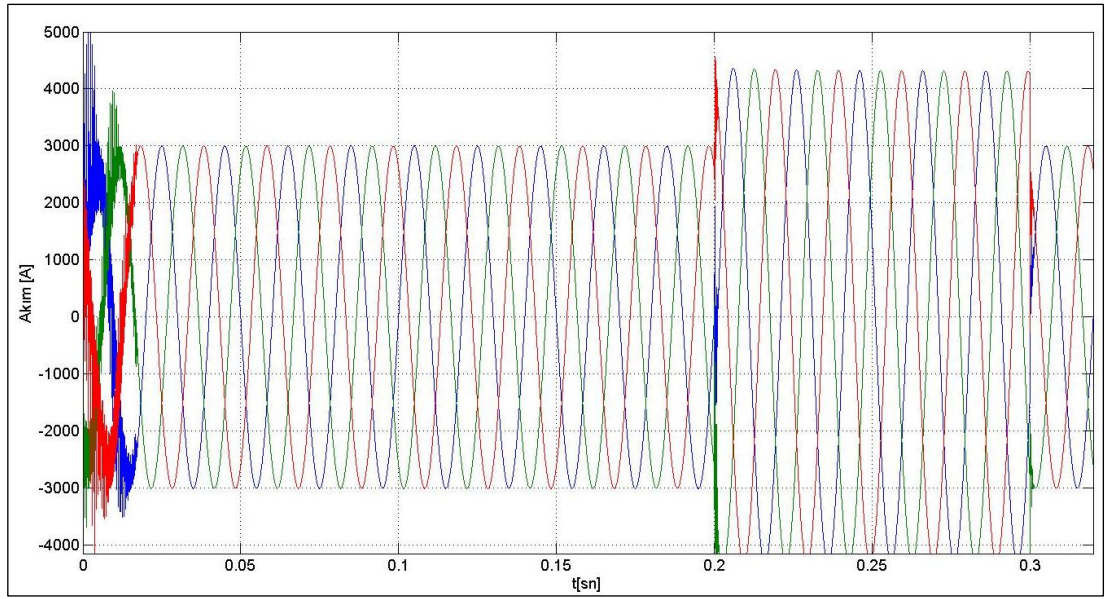


Şekil 5.6: Şebeke gerilimi ve evirici çıkış gerilim detay görünümü.

Şekil 5.4'te 12 m/sn rüzgar hızına karşılık referans etkin ve tepkin güç değerleri görülmektedir. Şekil 5.5'te ise şebeke gerilimi ve arıza durumunda evirici çıkış ve şebeke geriliminin grafiği görülmektedir. Arıza durumunda reaktif güç desteği sağlanması için evirici çıkış gerilimi tepe değeri 500 V iken şebeke geriliminin 450 V olduğu görülmektedir. Bu durum, denklem 4.6'daki eşitliğe uygun çalışıldığını göstermektedir.



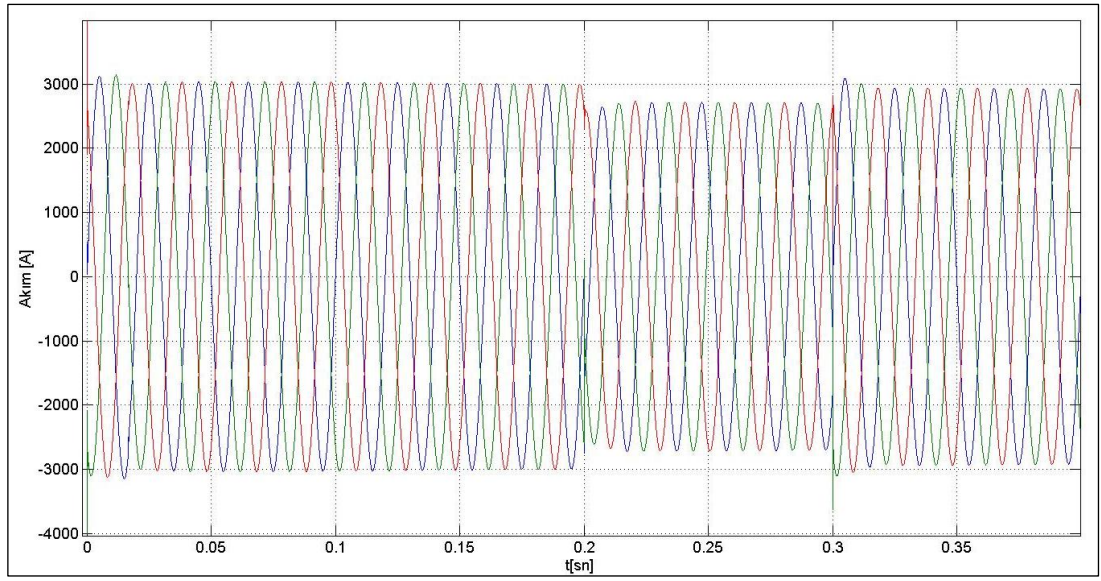
Şekil 5.7: Evirici çıkışı etkin ve tepkin güç grafiği.



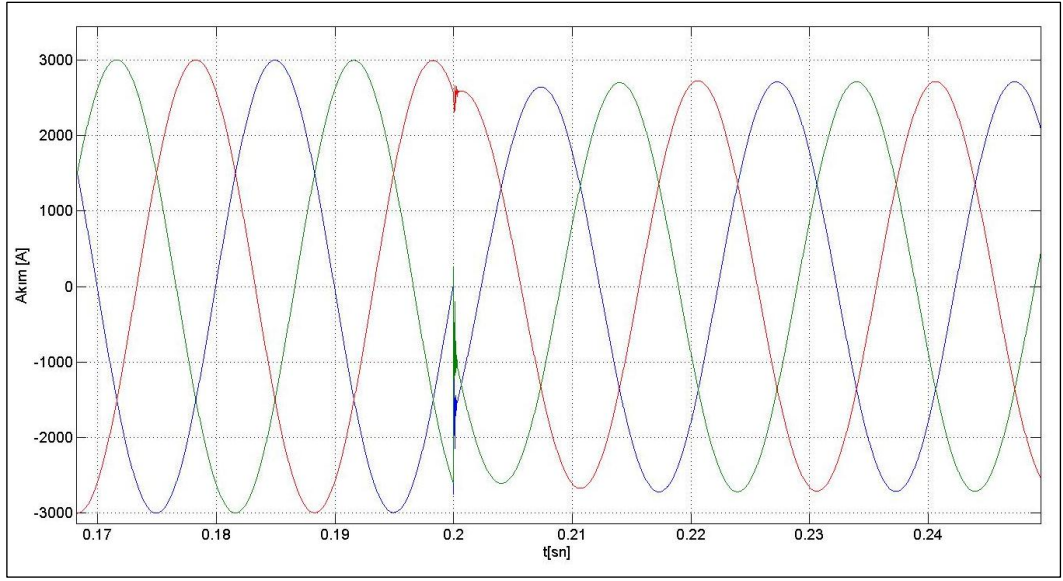
Şekil 5.8: Kontrolsüz durumda akım grafiği.



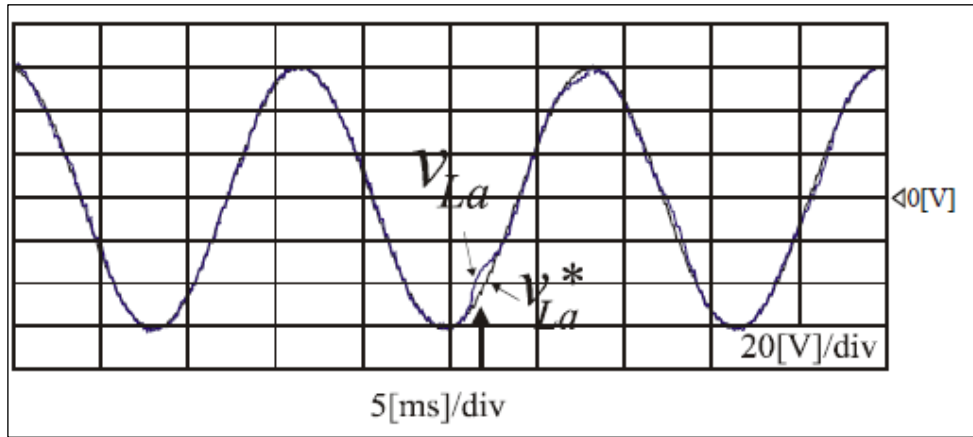
Şekil 5.9: Kontrolsüz durumda arıza anı akım grafiği.



Şekil 5.10: PI kontrol uygulaması sonucu akım grafiği.



Şekil 5.11: PI kontrol uygulaması sonucu arıza anı akım grafiği.



Şekil 5.12: Nonlinear kontrol uygulaması sonucu gerilim grafiği.

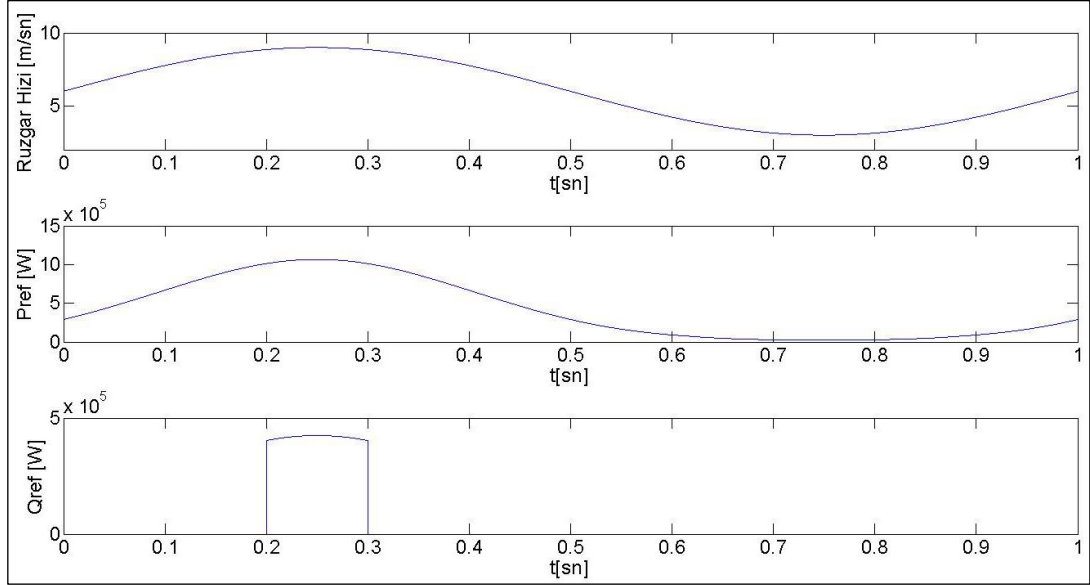
Bölüm 4.2.1. çıkış gerilim kontrolü kısmında yapılan çalışma sonucunda elde edilen model üzerinden PI denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Arıza durumunda Şekil 5.10'da görüldüğü üzere geçici durum karşısında sistem minimum aşımına, istenen sürede tepki vererek çıkış akımını karalı hale getirmektedir.

Literatürde referans aldığımız çalışmada Nonlinear Kontrolör tasarlanmıştır. Bunun sonuç grafiği de Şekil 5.12'de gösterilmektedir. Bu çalışmada rüzgar türbini çıkışındaki yük değişim anında çıkış gerilimi V_{La} ile gösterilmiştir. Nonlinear kontrol uygulaması sonucu şekildeki grafik elde edilmiştir.

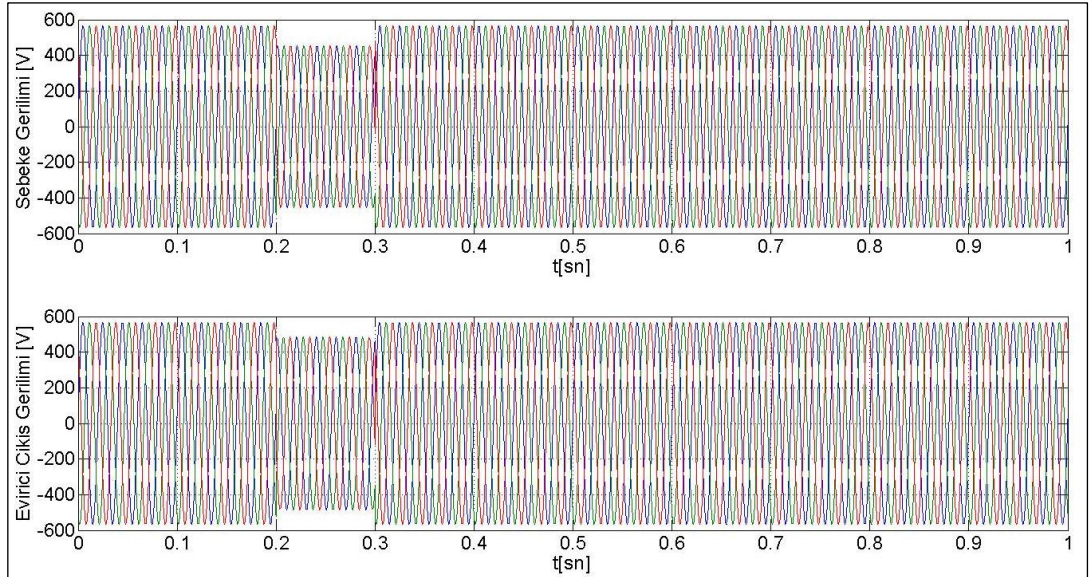
Çalışmamız sonucunda gribesleme doğrusallaştırma yöntemi uygulamadan, sistem modelleme aşamasında uygun pasif devre elemanları seçilerek sistemin açık

çevrim transfer fonksiyonu kararlı olacak şekilde seçilmiştir. Geçici durumlarda sistemin istenen tepkiyi vermesi için uygun PI kontrolör tasarlanmıştır.

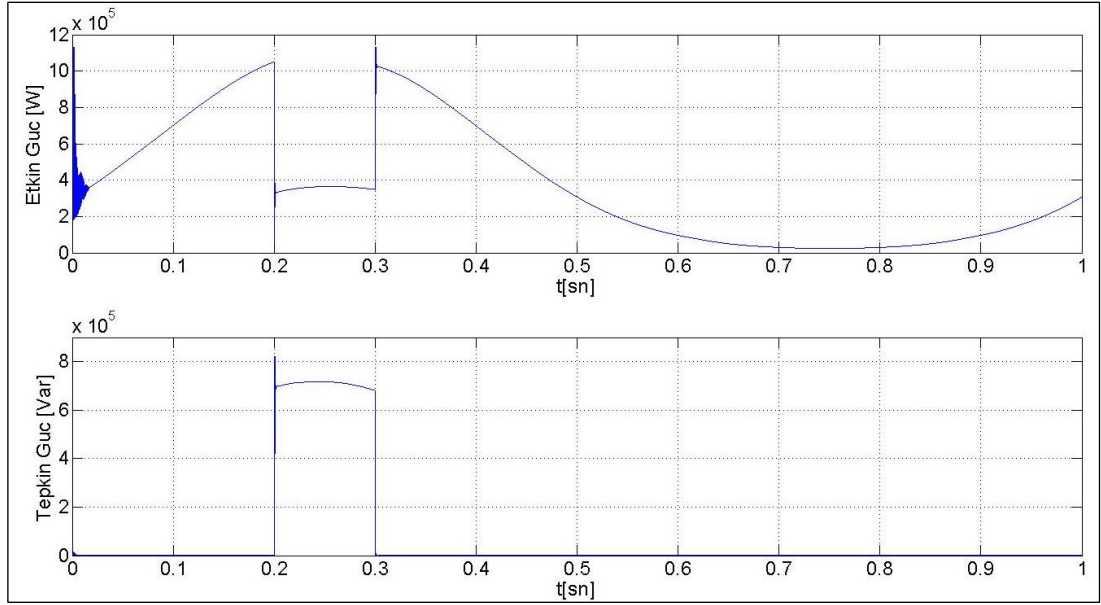
5.1.2. Değişken Rüzgar Hızı ve Şebeke Arıza Durumu



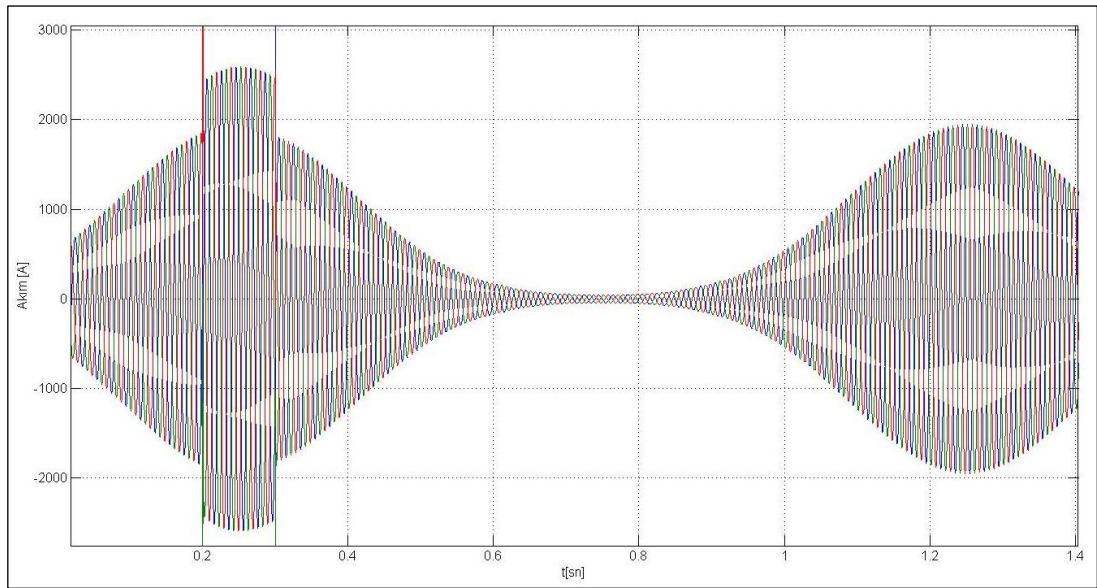
Şekil 5.13: Değişken rüzgar hızı ve referans güç grafiği.



Şekil 5.14: Şebeke gerilimi ve evirici çıkış gerilimi.



Şekil 5.15: Evirici çıkış etkin ve tepkin güç grafiği.



Şekil 5.16: Evirici çıkış akım grafiği.

Rüzgar hızı değişken olduğu durumda da aynı sonuçların alındığı yukarıdaki grafiklerden görülmektedir. Rüzgar hızındaki değişkenliğe karşın referans güç de değişmekte, çıkış gücü belirli bir kayıp oranıyla referans değerleri takip etmektedir.

Aynı şekilde 0.2-0.3 sn arasında şebekeye arıza durumu verilmiştir. Bu arıza durumunda kontrolörün verdiği tepki ve sonuçları yukarıdaki grafiklerde görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Günümüzde önemi giderek artmakta olan ve popüler bir bilimsel araştırma konusu olan yenilenebilir enerji teknolojileri arasında rüzgar türbinleri ve güç dönüşüm teknikleri tezimizin ana konusunu oluşturmuştur. Bu konu içerisinde özel olarak elektriksel güç dönüşümü ve türbinin elektrik şebekesine bağlantısında gerekli kriterler ve bu kriterlerin sağlanmasında kullanılan güç elektroniği teknolojileri, ulusal ve uluslararası bilimsel literatürde detaylıca incelenmiş olup aşağıda maddeler halinde açıklanmış olan sonuçlar elde edilmiştir.

- Rüzgar türbininin şebeke bağlantısında doğru akımı alternatif akıma çeviren ve şebeke işleticileri tarafından belirlenen kriterlere uygun olarak şebeke bağlantısını gerçekleştiren evirici tasarımında son gelişmiş tekniklerden olan sırt sırta tam ölçekli çevirgecin Matlab & Simulink ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu modelde kullanılan parametreler, standartlarda istenen cevap süresinde, sistemin kararlı şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Tasarlanan bu sistemin cevap süresini ve kararlılığını gösteren simülasyon sonuçlarına tezimizde yer verilmiştir.
- Giriş tarafında sabit ve değişken rüzgar hızlarında, çıkış tarafında ise arıza durumu olarak kısa devre sonucu gerilim düşmesi durumunda sistemin istenen çıkışı verdiği görülmüştür. Özellikle düşük gerilimde rüzgar türbininin şebekeye bağlı kalarak çalışmasına devam etmesi ve bunu gerçekleştirirken şebekeye reaktif güç desteği verdiği durum da çalışmamızda gösterilmiştir.
- Çıkış gerilim kontrolü için, LC filtre devresinin matematiksel modeli çıkarılmasında özgün bir değişken dönüşümü kullanılmıştır. Sistem açık çevrim transfer fonksiyonu dikkate alınarak sistemin kararlılığı açısından uygun parametreler seçilmiştir. Literatürde geri besleme doğrusallaştırma yöntemiyle elde edilmiş sonuçlarla, özgün modelleme yöntemiyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kullanılan PD denetleyici ile sistem, istenen cevabı vermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Chen Z., Josep M., Blaabjerg F., (2009), “A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines” IEEE Transactions on Power Electronics, 24 (8),1859–1875.
- [2] Michael P., Kumar K., Reddy K., Kumar S.,Devarajan N., (2010), “Implementation of SVPWM in FPGA through Matlab & Simulink Environment”, International Journal of Engineering Science and Technology, 2 (9), 4585-4594.
- [3] Mary D., Mathew S., Sreejith K., (2013), “Modelling and Simulation of Grid Connected Wind Energy System”, International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), 3 (1), 255-259.
- [4] Koç E., Güven A., (2011), “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi”, EMO Bilimsel Dergi, 1 (1), 51-55.
- [5] Dong-C. L.,Jeong-Ik J., (2005), “Output Voltage Control of PWM Inverters for Stand-Alone Wind Power Generation Systems Using Feedback Linearization” Industry Applications Conference, 3 (1), 1626 – 1631.
- [6] Lee D., Jang J., (2005), “Output Voltage Control of PWM Inverters for Stand Alone Wind Power Generation Systems Using Feedback Linearization”, Industry Applications Conference Fourtieth IAS Annual Meeting, 1626-1631, Kowloon, Hong Kong, 2-6 October.
- [7] Iqbal A., Lamine A., Ashraf I., Mohibullah, (2006), “Matlab/Simulink Model of Space Vector PWM for Three-Phase Voltage Source Inverter”, Universities Power Engineering Conference, 1096-1100, Newcastle-upon-Tyne, 6-8 September.
- [8] Rolan A., Luna A., Vazquez G., Aguilar D., Azevedo G., (2009), “Modelling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Seoul, Korea 5-8 July.
- [9] Thongam J., Ouhrouche M., (2011), “MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems”. In: Carriveau R., Editor, “Fundamental and Advanced Topics in Wind Power”, Intech.
- [10] Lopes A., Nascimento A., Vieira J., Nunes M., Bezerra U., (2011), “Reactive Power Control of Direct Drive Synchronous Generators to Enhance the Low Voltage Ride-Through Capability”, Al-Bahadly I., Editor, “Wind Turbines”, Intech.
- [11] Ackermann T., (2005), “Wind Power in Power Systems”, John Wiley and Sons.

- [12] Raducu G.,(2008), “Control of Grid Side Inverter in a B2B Configuration for WT Applications”, Master Thesis, Aalborg Universitet.
- [13] Cimpoeru A., (2010), “Encoderless Vector Control of PMSG for Wind Turbine Applications”, Master Thesis, Aalborg Universitet.
- [14] Gonzalez-Longatt F.M, Wall P, Terzija V., (2011), “A simplified model for dynamic behavior of permanent magnet synchronous generator for direct drive wind turbines”, PowerTech, 2011 IEEE , 1-7, Trondheim-Norway, 19-23 June.
- [15] Teodorescu R, Liserre M, Rodríguez P, (2011), “Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems”, John Wiley & Sons.
- [16] Wangand Q, Chang L, (2004), “An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed windturbine systems”, IEEE Trans. PowerElectron.,19 (5), 1242-1249.
- [17] Akagi, H., Watanabe E., Aredes M., (2007), “Instantaneous power theory and applications to power conditioning”, IEEE Press Series of PowerEngineering, John Wiley&Sons.
- [18] Xiao-Qiang G., Wei-Yang W., He-Rong G., (2011), “Phase Locked Loop and Synchronization Methods for Grid Interfaced Converters”, Przegląd Elektrotechniczny, 87 (4), 182-187.
- [19] Machowski J., Bialek J., Bumby J., (2008), “Power System Dynamics: Stability and Control”, John Wiley and Sons.
- [20] Web 1, (2013), <http://www.guardian.co.uk/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy> (Erişim Tarihi 12/03/2013).
- [21] Web 2, (2013), http://ec.europa.eu/energy/renewables/targets_en.htm (Erişim Tarihi 16/05/2013).
- [22] Web 3, (2014), <http://www.ewea.org/statistics/> (Erişim Tarihi 11/02/2014).
- [23] Web 4, (2013), http://www.wwindea.org/webimages/Halfyear_report_2012.pdf (Erişim Tarihi 10/02/2013).
- [24] Web 5, (2014), <http://www.bbc.com/news/science-environment-25623400> (Erişim Tarihi 10/02/2014).

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa AYDEMİR, 1986 yılında Trabzon’da doğdu. Lisans öğrenimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde tamamladı. 2008-2009 yıllarında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü’nde Yüksek Lisans Öğrencisi ve Araştırma Görevlisi olarak çalıştıktan sonra özel sektörde çeşitli görevlerde bulunmuştur. 2010–2012 yılları arası plastik imalat sektöründe robotik ve otomasyon sistemleri alanında mühendislik projelerinde çalıştı. 2012 –2014 yılları arasında ise Tekirdağ Çorlu’da, bir sanayi bölgesi olan Avrupa Serbest Bölgesi’nin Enerji İşlerinden Sorumlu Elektrik Mühendisi olarak görev yapmıştır. 2014 yılı başından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektrik Makineleri Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak atanarak akademik çalışmalarına devam etmektedir.