

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE
BİR UYGULAMA DEVRESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Elektrik Mühendisi Caner ÜNSALVER

**FBE Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. A. Faruk BAKAN

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. Rüzgar Enerji Sistemlerinin İncelenmesi	3
2.1 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi	3
2.2 Rüzgar Türbinlerinin İncelenmesi	10
2.2.1 Rüzgar Türbinlerinin Alt Bileşenlerinin İncelenmesi	15
2.2.1.1 Pervane Kanatları ve Göbek	15
2.2.1.2 Düşük Hız Mili	15
2.2.1.3 Elektronik Kontrol Ünitesi	15
2.2.1.4 Dişli Takımı	16
2.2.1.5 Mekanik Fren	16
2.2.1.6 Generatör	16
2.2.1.7 Soğutma Ünitesi	16
2.2.1.8 Anemometre	16
2.2.1.9 Yelkovan	17
2.2.1.10 Rota Mekanizması	17
2.2.1.11 Makina Yeri	17
2.2.1.12 Kule	17
2.2.2 Rüzgar Türbinlerinin Enerji Üretimi	18
2.2.3 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Elektrik Makinalarının İncelenmesi	20
2.2.3.1 DC Şönt Generatör	21
2.2.3.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör	22
2.2.3.3 Çift Beslemeli Bilezikli Asenkron Generatör	23
2.2.4 Rüzgar Türbinlerinde Dişli Takımı	24
3. Kısa Devre Rotorlu Asenkron Generatör	25
3.1 Minimum Hız ve Uyarma Kapasitesi Değerleri	27

3.2	SEIG'in Geçici Hal Modeli	28
3.2.1	Yüksüz Model.....	29
3.2.2	Omik Yüklü Model.....	30
3.2.3	RLC Yüklü Model	31
3.3	SEIG'in Performansı	32
3.4	Mıknatıslanma Eğrileri ve Kendinden Uyarma.....	36
4.	Kendinden Uyarmalı Asenkron Generatör Sisteminin MATLAB / Simulink Simulasyonu	38
5.	Veri Toplama Amacıyla DSP Tabanlı Mikrodenetleyici Kullanılarak USB Üzerinden Bilgisayarda Gerçek Zamanlı Ölçüm Sisteminin Gerçekleştirilmesi	42
6.	Bilgisayar Üzerinde, Windows XP İşletim Sistemi ile Çalışan, DSP ile USB Veriyolundan Haberleşen bir Kullanıcı Arayüz Yazılımının Gerçekleştirilmesi..	51
7.	1.5kW Kendinden Uyarmalı Asenkron Generatör Uygulaması	53
8.	Sonuçlar	57

SİMGE LİSTESİ

C_p	Türbin güç katsayısı
U	Rüzgar kinetik enerjisi
m	Rüzgar kütlesi
u	Rüzgar hızı
P_w	Rüzgar gücü
A	Pervane süpürme alanı
ρ	Havanın yoğunluğu
d	Pervane çapı
L_m	Mıknatıslanma endüktansı
X_m	Mıknatıslanma reaktansı
T	Sıcaklık
x	Genişlik
p	Rüzgar basıncı

KISALTIMA LİSTESİ

<i>RES</i>	Rüzgar Elektrik Santrali
<i>AC</i>	Alternatif Akım (Alternative Current)
<i>DC</i>	Doğru Akım (Direct Current)
<i>SEIG</i>	Kendinden Uyarmalı Asenkron Generatör (Self-Excited Induction Generator)
<i>AWEA</i>	Amerikan Rüzgar Enerji Kurumu (American Wind Energy Association)
<i>EWEA</i>	Avrupa Rüzgar Enerji Kurumu (European Wind Energy Association)
<i>ADC</i>	Analog Dijital Dönüştürücü
<i>USB</i>	Üniversal Seri Arabirim
<i>IEEE</i>	Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü(Institute of Electrical and Electronical Engineers)
<i>PMSG</i>	Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (Permanent Magnet Synchronous Generator)
<i>DFIG</i>	Çift Beslemeli Bilezikli Asenkron Generatör (Doubly-Fed Induction Generator)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Ülkeler bazında 2006 Avrupa Res kurulu gücü haritası (EWEA 2006).....	8
Şekil 2.2 u hızındaki hava kütlesi	10
Şekil 2.3 İdeal rüzgar türbinindeki dairesel hava akımı	12
Şekil 2.4 İdeal rüzgar türbinindeki dairesel hava akımının 3 boyutlu gösterimi	13
Şekil 2.5 Yavaşlatma faktörünün değişimi	14
Şekil 2.6 Modern rüzgar türbini bileşenleri	15
Şekil 2.7 Modern rüzgar türbini elektronik kontrol sistemi.....	17
Şekil 2.8 Güç elektroniği devresi ile dolaylı şebeke senkronizasyonu.....	19
Şekil 2.9 Semikron firmasının 1.5 MVA gücünde, 4 bölgeli değişken hızlı dönüştürücüsü....	20
Şekil 2.10 Rüzgar türbinlerinde kullanılan elektrik makinaları.....	21
Şekil 2.11 DC şönt generatör, batarya grubu ve yük eşdeğer devresi	21
Şekil 2.12 Sabit mıknatıslı senkron generatörün şebeke senkronizasyonu.....	22
Şekil 2.13 Bilezikli asenkron generatörün şebeke senkronizasyonu	23
Şekil 2.14 AWEA 2006 fuarında sergilenen 2 MW'lık dişli takımı.....	24
Şekil 3.1 Kendinden uyarmalı asenkron generatörün tek faz eşdeğer devresi	25
Şekil 3.2 Kendinden uyarmalı asenkron generatörün d eksenindeki eşdeğer devresi	27
Şekil 3.3 Kendinden uyarmalı asenkron generatörün q eksenindeki eşdeğer devresi	27
Şekil 3.4 Yüksüz haldeki generatörün kapasiteye bağlı hız değişimi.....	28
Şekil 3.5 Kendinden uyarmalı asenkron generatör devresi	34
Şekil 3.6 Asenkron generatör tek faz eşdeğer devresi	35
Şekil 3.7 Kendinden uyarmalı asenkron generatörün mıknatıslanma eğrisi.....	37
Şekil 4.1 MATLAB / Simulink simulasyon blok diyagramı	38
Şekil 4.2 Asenkron makina parametreleri.....	39
Şekil 4.3 Generatör uçlarındaki gerilim.....	40

Şekil 4.4	Generatör çıkış akımı.....	40
Şekil 4.5	800 uF kapasite grubu ile generatör hızı ve uç gerilimi	41
Şekil 4.6	1000 uF kapasite grubu ile generatör hızı ve uç gerilimi	41
Şekil 5.1	FTDI FT232 USB arabirim entegresi blok şeması	42
Şekil 5.2	FTDI FT232 USB arabirim entegresi pin bağlantıları.....	43
Şekil 5.3	Microchip firmasının dsPIC30F3011 kodlu DSP entegresi	43
Şekil 5.4	dsPIC30F3011 devre şeması.....	44
Şekil 5.5	FT232 devre şeması	45
Şekil 5.6	LEM LTS-6P ve LV-25-NP sensörleri.....	46
Şekil 5.7	LEM LV-25-NP sensörleri sinyal uygunlaştırma devresi	47
Şekil 5.8	Microchip MPLAB 8.10 ve ADC başlangıç fonksiyonu.....	48
Şekil 5.9	Microchip MPLAB 8.10 ve seri port başlangıç fonksiyonu	49
Şekil 5.10	dsPIC yazılımı genel akış şeması	49
Şekil 5.11	Veri toplama sistemi donanımı	50
Şekil 5.12	+15V, +5V, -15V 3A çıkışlı güç kaynağı.....	50
Şekil 6.1	Borland C++ Builder 6 Programı	51
Şekil 6.2	Veri toplama ünitesine ait elektrik makinaları analiz yazılımı	52
Şekil 7.1	Kısa devre rotorlu asenkron generatör deney devresi.....	53
Şekil 7.2	Kısa devre rotorlu asenkron generatör deney devresi.....	54
Şekil 7.3	Stator faz-nötr gerilimleri	55
Şekil 7.4	Stator gerilim ve akımları	55

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimi (Gipe, 1995).....	4
Çizelge 2.2 İlk büyük ebatlı rüzgar türbinlerinin performansları (Gipe, 1995).....	6
Çizelge 2.3 Dünya çapında Res kurulu gücü	7
Çizelge 2.4 Avrupa ülkelerinin 2006 sonu Res kurulu gücü miktarları (EWEA 2006)	9
Çizelge 2.5 Senkron güç elde edilme yöntemleri	18
Çizelge 7.1 Uyarma kapasitesine bağlı değişimler	56

ÖNSÖZ

Rüzgar enerji sistemleri üzerine yapılan bu tez çalışmasında, rüzgar enerjisinin tarihsel gelişimi, modern yüksek güçlü türbin sistemleri, 5 kW gücünde şebekeden bağımsız çalışan bir rüzgar enerji sisteminin modellenmesi ve 1.5 kW gücünde bir prototipin laboratuarda gerçekleştirilmesi konuları üzerinde çalışma şansına sahip oldum. Yılların bilgi ve tecrübesi ile gerek aldığım dersleri, gerek ders dışındaki tavsiyeleri ile Sayın Prof. Dr. Hacı BODUR'a, tez çalışmalarım sırasında bana yardımcı olup yol gösteren, her türlü desteğini veren Sayın Yrd. Doç. Dr. A.Faruk BAKAN'a, güleryüzü ve yardımlarıyla Sayın Arş. Gör. Dr. İsmail AKSOY'a ve "Projem İstanbul" akademik araştırmaları destek programı ile İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne teşekkürlerimi borç bilirim. Ve tabii ki; bugüne kadar maddi ve manevi olarak beni destekleyen sevgili aileme ve tüm dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Rüzgar Enerji Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi

ÖZET

Rüzgar enerjisi, fosil yakıt kullanımına ihtiyaç duymadığından çevre dostu bir enerji biçimidir. Rüzgar türbinlerinin, termik santraller ya da dizel santraller gibi emisyonları yoktur. Bu tür emisyonlar, asit yağmurları ve küresel ısınmaya neden olan sera etkisine yol açmaktadır. Rüzgar enerjisinin en önemli özelliği, yenilenebilir enerji kaynağı olmasıdır. Bu sebepten fosil yakıtlar gibi tükenmesi söz konusu değildir.

Rüzgar, günümüz yenilenebilir enerji kaynakları arasında en ekonomik çözüm olsa da, hali hazırda üretilen elektrik enerjisi ile rekabeti oldukça zordur. Ancak çok yüksek hızlarda, sürekli rüzgar alan bölgelerde kurulması rekabet gücünü arttırmaktadır. Kurulum maliyetleri fazla olsa da, bakım ve işletme giderleri azdır.

Rüzgarın süreksizliği büyük bir problemdir. Bu yüzden şebekeden bağımsız çalışması, kesintilere ve dalgalanmalara neden olmaktadır. Genel olarak kararsız bir enerji kaynağıdır. Günümüzde, güç elektroniği uygulamalarının gelişimi ve ilerlemesi ile bu problemler azalmaktadır. Çift yönlü dönüştürücüler sayesinde değişken rüzgar hızlarında da sabit gerilim ve frekansta çıkış verilebilmektedir.

Yaptığım bu tez çalışması kapsamında, öncelikli olarak rüzgar enerji sistemleri, elektrik makineleri ve güç elektroniği bakış açısıyla incelenmiş ve şebekeden bağımsız çalışabilen, kendinden uyarmalı kısa devre rotorlu asenkron makina kullanılarak bir uygulama devresi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Rüzgar enerji sistemleri, kendinden uyarmalı asenkron generatör, rüzgar enerji sistemlerinde güç elektroniği uygulamaları

Analysing Wind Energy Systems and Realization Of An Application Circuit

ABSTRACT

Wind energy is a clean renewable energy and does not depend on fossil fuel. Wind power plants do not have air polluting emissions. In conventional power plants, these kind of emissions causes greenhouse effect, acid rain and global warming.

Although wind energy is the most economical solution in renewable energy systems, it is still expensive to compete with the conventional power plants. The biggest problem in wind power plants, is the foundation and installation costs.

One other disadvantage is the instability of the wind. Without an interconnection to grid, isolated wind power systems, have instability and flicker problems. These problems are being solved with the development and improvement of the new technologies in power electronics. Bidirectional power converters can provide fixed voltage, fixed frequency outputs in variable wind conditions.

In this thesis, the wind energy systems are studied from the view of electrical machinery and power electronics and isolated system with self excited induction generator has been realized.

Keywords : Wind energy systems, self-excited induction generator, power electronics applications in wind energy systems

1. GİRİŞ

Dünyada teknolojinin gelişmesiyle birlikte hızla artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların yüksek miktarlarda kullanımına neden olmaktadır. Fosil yakıtlar ile enerji üretimini gerçekleştiren termik santrallerin atıkları nedeniyle meydana gelen çevresel kirlenme ve buna bağlı küresel ısınma, fosil bazlı yakıtların yakın bir gelecekte tükenecek olması ve ithal enerji kaynaklarına gittikçe artan bağımlılık, dünya genelinde gelişmiş ülkelerin, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımına yönelmesine neden olmaktadır.

Rüzgar, günümüz yenilenebilir enerji teknolojileri arasında en ekonomik olanıdır. Henüz gelişmekte olan hidrojen yakıt pilleri ve güneş panelleri sadece düşük güçlerde gerçekleştirilebilmektedir, ayrıca üretim maliyetleri oldukça yüksek olup ve verimleri düşüktür. Rüzgar enerjisinin en büyük dezavantajlarından biri kurulum maliyetidir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en ekonomik çözüm olsa da, hali hazırda üretilen elektrik enerjisi ile rekabeti çok zordur. Ancak çok yüksek hızlarda, sürekli rüzgar alan bölgelerde kurulması rekabet gücünü arttırmaktadır. Kurulum maliyetleri fazla olsa da, bakım ve işletme giderleri oldukça azdır.

Rüzgar enerjisinin bir diğer önemli dezavantajı süreksizliği olarak tanımlanabilir. Özellikle şebekeden bağımsız çalışan sistemlerde, kesintiler ve dalgalanma etkileri sıkça gözlemlenir. Güç elektroniğinin gelişimi başta olmak üzere, ileri türbin teknolojileri ve kontrol mekanizmaları yardımıyla rüzgar türbinlerinin oluşturduğu harmonik ve gerilimde dalgalanma gibi olumsuz etkilerin belirli oranlarda ortadan kaldırılması sağlanmıştır.

Bu çalışmada, öncelikli olarak rüzgar enerji sistemleri elektrik makinaları ve güç elektroniği bakış açısıyla incelenmiş ve şebekeden bağımsız çalışabilen, kendinden uyarmalı kısa devre rotorlu asenkron makina kullanılarak bir uygulama devresi gerçekleştirilmiştir. Devre, literatür bilgileri ışığında modellenmiş daha sonra laboratuvarında prototipi gerçekleştirilmiştir. Önce kendinden uyarmalı kısa devre rotorlu asenkron makinanın matematiksel modeli oluşturularak simülasyonlar MATLAB / Simulink ortamında gerçekleştirilmiş, daha sonra laboratuvarında kurulan sistemin yüksüz durumda ve omik-endüktif çalışmada geçici hal analizi yapılmış, elde edilen bilgiler ışığında sistemin prototipi ve ölçümlerinin yapılması amacıyla veri toplama sistemi tasarlanmıştır.

Bölüm 2’de rüzgar enerji sistemlerinin incelenmesi, tarihsel gelişimi, rüzgar türbinleri ve alt bileşenlerinin incelenmesi ele alınmıştır. İdeal bir rüzgar türbininin çıkış gücü denklemleri ve Betz katsayısı C_p ile maksimum çıkış gücü açıklanmıştır.

Bölüm 3'te rüzgar santrallerinde kullanılan kısa devre rotorlu asenkron generatör detaylı bir şekilde incelenerek, geçici hal modelleri, boşa çalışma ve omik-endüktif yük durumunda incelenmiştir.

Bölüm 4'te 5 kW'lık kendinden uyarımalı asenkron generatör sisteminin MATLAB / Simulink'te yapılan simülasyonu ve sonuçlar açıklanmıştır.

Bölüm 5'te, kendinden uyarımalı asenkron generatör devresinin gerilim ve akım değişimlerinin toplanması amacıyla tasarlanan veri toplama sistemi açıklanmıştır.

Bölüm 6'da, veri toplama sisteminin bilgisayar kullanıcı arayüzü olarak tasarlanan Windows XP programı açıklanmıştır.

Bölüm 7'de, laboratuarda gerçekleştirilen 1.5 kW'lık kendinden uyarımalı asenkron generatör prototipinden alınan deneysel sonuçlar verilmiştir.

Son olarak Bölüm 8'de ise, yapılan çalışmalar değerlendirilerek sonuçlar verilmiştir.

2. Rüzgar Enerji Sistemlerinin İncelenmesi

2.1 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgar enerjisinin kullanımı yüzyıllar öncesine dayanmaktadır. Yel değirmenleri sayesinde tahılların işlenmesinde, tarımda sulama ihtiyacının karşılanmasında ve deniz taşımacılığında gemilere uygulanan yelkenler sayesinde rüzgardan faydalanılmıştır. Yel değirmenlerinin, elektrik üretimini gerçekleştiren rüzgar türbinleri halini alma serüveni, 19.yy sonlarına doğru Danimarka'da La Cour tarafından yapılan 23 m çapındaki rüzgar türbini ile Amerikan Brush firması tarafından yapılan 12 kW'lık DC türbinin kurulması ile başlamıştır.

1910 yılına gelindiğinde, Danimarka'da ülke genelinde üretim yapan ve güçleri 5 – 25 kW aralığında olan birkaç yüz türbin bulunmaktaydı. 1925 yılında, Amerika'da iki ve üç kanatlı ticari türbinleri, tüketici ile buluşmak için pazarda yerlerini almışlardı. En çok bilinen modeller Wincharger, 200 – 1200 W aralığında ve Jacobs 1.5 – 3 kW aralığındaki güçlerde üretilmekteydi. Bu türbinler kırsal bölgelerde akülerin şarjı, radyo, aydınlatma ve düşük gerilimle çalışan benzer cihazların kullanımı amacıyla yaygınlaşmıştır. Rusya'da 1931 yılında 100 kW'lık rüzgar türbini üretimi gerçekleştirilmiştir. 1941 yılında Amerika'da Rutland yakınlarında kurulan Putnam rüzgar türbini, 1250 kW gücü ile dönemin en büyük rüzgar türbini olmuştur. Kule uzunluğu 34 metreye ulaşan ve pervane çapı 53 m olan Putnam türbini, iki kanatlı modern rüzgar türbinlerine iyi bir örnektir. Kanatların her biri 7300 kg ağırlığında paslanmaz çelikten yapılan türbin, 1250 kW gücünde AC senkron generatör ve kanat açısı kontrol edilebilen bir yapıya sahip olup 28.7 devir / dakika gibi bir hızda dönecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak tasarımındaki hatalar ve dönemin teknolojik yetersizliğinden dolayı, 1945 yılında kanatlarından biri kopmuştur.

Danimarka 1957 yılında rüzgar hızı 15 m/s iken nominal gücü 200 kW değerinde olan Gedser türbinini inşa etti. Yerel şebekeyle doğrudan senkron olarak çalışan sistemin yıllık enerji üretimi 400.000 kWh değerindeydi. Kule uzunluğu 26 m ve pervane 24 m çapındaydı. Aynı yıl, Alman Dr. Ulrich Hutter, nominal gücü olan 100 kW değerine 8 m/s'lik rüzgar hızında ulaşan, 34 m çapında fiberglas pervaneye sahip türbini gerçekleştirdi. Değişken kanat açısı kontrolüne sahip sistem, yüksek hızlarda pervanenin açılma hızını sabit tutmasını sağlayan bir yapıdaydı. Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimi Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimi (Gipe, 1995)

Türbin ve Ülke	Çap (m)	Süpürme Alanı (m ²)	Güç (kW)	Spesifik Güç (kW / m ²)	Kanat Sayısı	Yükseklik (m)	Yapım Tarihi
Poul La Cour, Danimarka	23	408	18	0.04	4	----	1891
Smith-Putnam, ABD	53	2231	1250	0.56	2	34	1941
F.L Smith, Danimarka	17	237	50	0.21	3	24	1941
F.L Smith, Danimarka	24	456	70	0.15	3	24	1942
Gedser, Danimarka	24	452	200	0.44	3	25	1957
Hütter, Almanya	34	908	100	0.11	2	22	1958

1973 yılında meydana gelen petrol krizi ile birlikte, gelişmiş ülkeler radikal kararlar alarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak için araştırma fonları ayırmış ve özel teşebbüsleri teşvik etmek amaçlı destek programları başlatmışlardır. Günümüzde, ekonomik kaygılardan da önemli olan CO₂ , NO_x ve SO_x gibi sera gazları salınımı sonucunda oluşan küresel ısınma ve iklim değişikliği nedeniyle, özellikle gelişmiş ülkeler, rüzgar santralleri konusunda yatırımlar yapmaktadırlar.

1978 yılında ABD’de alınan karar ile enerji tasarrufu ve verimliliğinin artırılması için düzenlemeler yapılmış buna bağlı olarak, ülkenin petrole olan bağımlılığının azaltılması hedeflenmiştir. Bu karar çerçevesinde, yenilenebilir enerji sistemlerine yapılan özel vergi indirimleri tarihte oldukça önemli bir rüzgar enerji girişimini başlatmıştır. San Francisco ve Los Angeles’ı çevreleyen dağlara rüzgar enerji çiftlikleri yerleştirilmiştir. İlk kurulan

sistemler 50 kW'lık rüzgar türbinlerinden oluşmaktaydı. Yerleştirilen türbinlerin bir çoğu Danimarka'dan ithal edilmiştir. 1990'lara gelindiğinde ise gelişen teknoloji ile türbin boyutları artarak türbin gücü 200 kW'a kadar ulaşmıştır. Sadece California'da 15000 rüzgar türbini yaklaşık 1500 MW çıkış gücüne ulaşmıştır.

1990 yılında ABD, rüzgar enerjisine olan mali desteği azaltmaya başlamış, ancak Avrupa ve daha sonra Hindistan yenilenebilir enerji kullanımı için mali destek ve vergi indirimi programları başlatmıştır. Avrupa, şebekeye aktarılan yenilenebilir enerji için sabit bir ücret ödemesi şeklinde teşvik başlatmıştır. Hindistan ise rüzgar enerji yatırımları için vergi indirimi şeklinde bir teşvik başlatmıştır.

Avrupa'da rüzgar enerjisinin gelişimini sağlayan esas neden, üretilen rüzgar enerjisinin yerel şebekeye aktarılarak satışının gerçekleştirilebilmesi olmuştur. Hükümetler tarafından belirlenen fiyatlar ile yerel dağıtım ya da iletim firmaları, şebekeye aktarılan yenilenebilir enerji için ödeme yapıyordu. Belirlenen fiyatlar, hükümet garantisi altında 10 ila 15 yıl süresiyle sabit kalacağından, yenilenebilir enerji yatırımcılarını mali riski düşük olduğundan teşvik etmiştir. Almanya'da yürürlükte olan yenilenebilir enerji kaynakları kanunu, şebekeye aktarılan rüzgar enerjisinin fiyatını 2004 yılında ilk 5 yıl olmak üzere 8.8 avrosent / kWh olarak belirlemiş sonraki zaman dilimi içinde 5.9 avrosent / kWh olarak tanımlamıştır. Aynı kanun ile denizin üzerinde kurulan, kıydan uzakta rüzgar türbinlerinin teşviki amacıyla daha yüksek fiyatlar uygulanmaktadır.

Çizelge 2.2'de ilk büyük ebatlı rüzgar türbinlerinin çalışma performansları verilmiştir.

Çizelge 2.2 İlk büyük ebatlı rüzgar türbinlerinin performansları (Gipe, 1995)

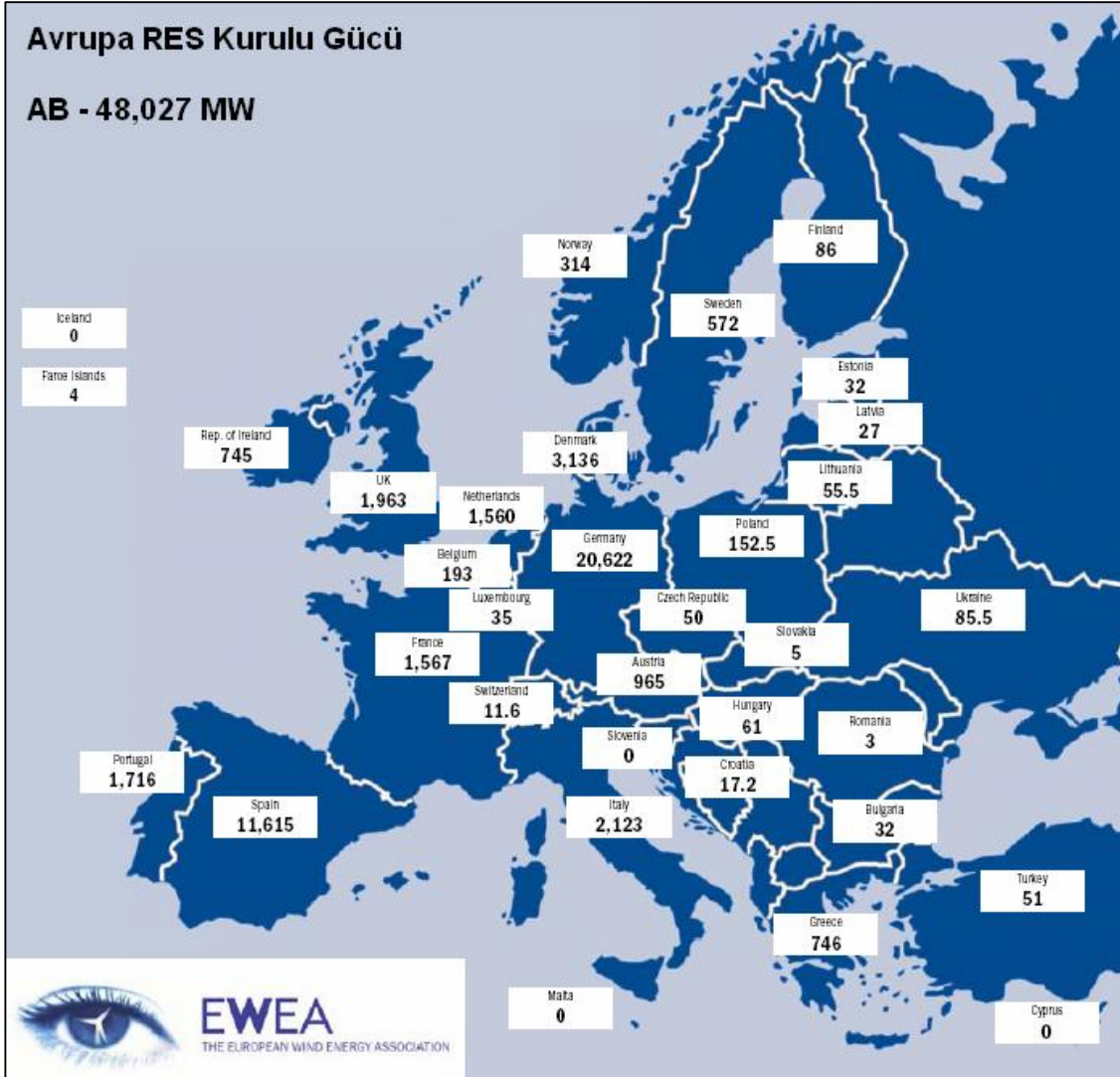
Türbin ve Ülke	Çap [m]	Süpürme Alanı [m ²]	Kapasite [MW]	Çalışma Süresi	Üretimi [GWh]	Periyodu
Mod-1, ABD	60	2827	2	---	---	1979 - 83
Growian, Almanya	100	7854	3	420	---	1981 - 87
Smith-Putnam, ABD	53	2236	1.25	695	0.2	1941 - 45
WTS-4, ABD	78	4778	4	7200	16	1982 - 94
Nibe A, Danimarka	40	1257	0.63	8414	2	1979 - 93
WEG LS1, İngiltere	60	2827	3	8441	6	1987 - 92
Mod-2, ABD	91	6504	2.5	8658	15	1982 - 88
Nassudden, İsveç	75	4418	2	11400	13	1983 - 88
Mod-OA, ABD	38	1141	0.2	13045	1	1977 - 82
Tjæreborg, Danimarka	61	2922	2	14175	10	1988 - 93
Ecole, Kanada	64	4000	3.6	19000	12	1987 - 93
Mod-5B, ABD	98	7466	3.2	20561	27	1987 - 92
Maglarp, İsveç	78	4778	3	26159	34	1982 - 92
Nibe B, Danimarka	40	1257	0.63	29400	8	1980 - 93
Tvind, Danimarka	54	2920	2	50000	14	1978 - 93

Rüzgar elektrik santralleri, yıllık büyümenin kurulu güce oranı olarak Avrupa'da 1990'ların en hızlı gelişen enerji teknolojisi idi. 2003 yılının sonuna gelindiğinde, dünyadaki rüzgar elektrik santrallerinin % 74'ü Avrupa'da, % 18'i Kuzey Amerika'da, % 8'i de Asya'da bulunuyordu. Çizelge 2.3'te dünya çapındaki RES ve kurulu güçleri bölgeler cinsinden verilmiştir.

Çizelge 2.3 Dünya çapında Res kurulu gücü

Bölge	Yıl Sonu Kurulu Güç [MW]						
	1995	1997	1999	2000	2001	2002	2003
Avrupa	2518	4766	9307	12972	17500	21319	28706
Kuzey Amerika	1676	1611	2619	2695	4245	4708	6677
Orta ve Güney Amerika	11	38	87	103	135	137	139
Asya ve Pasifik	626	1149	1403	1795	2330	2606	3034
Orta Doğu ve Afrika	13	24	39	141	147	149	150

1995 ve 2003 yılları arasında, dünya çapındaki şebekeye entegre yeni nesil rüzgar türbinlerinin % 76'sı Avrupa'ya kurulmuştur. Avrupa'daki RES kurulu gücü en yüksek olan ülkeler sırasıyla Almanya, Danimarka ve İspanya'dır. Şekil 2.1 'de Avrupa'nın kurulu gücünü gösteren harita verilmiştir. Çizelge 2.4'de ülkeler ve 2006 yılına ait kurulu güçleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Ülkeler bazında 2006 Avrupa Res kurulu gücü haritası (EWEA 2006)

Çizelge 2.4 Avrupa ülkelerinin 2006 sonu Res kurulu gücü miktarları (EWEA 2006)

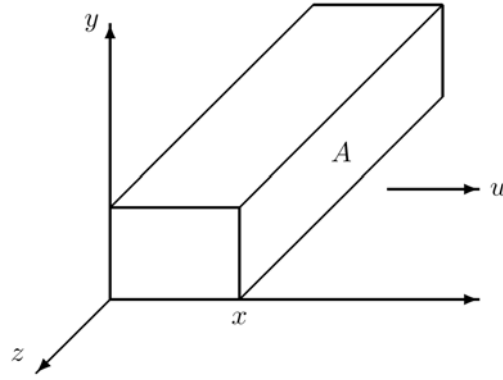
Ülkeler	2006 Sonu RES Kurulu Gücü [MW]
Avusturya	965
Belçika	193
Bulgaristan	32
Kıbrıs	0
Çek Cumhuriyeti	50
Danimarka	3136
Finlandiya	86
Fransa	1567
Almanya	20622
Yunanistan	746
Macaristan	61
İrlanda	745
İtalya	2123
Hollanda	1560
Portekiz	1716
Türkiye	51
İsveç	572
İngiltere	1963
İspanya	11615

2.2 Rüzgar Türbinlerinin İncelenmesi

Rüzgar türbini, rüzgardan kinetik enerji eldesine yarayan bir makinadır. Pervaneden geçen rüzgar, enerjisi alındığından yavaşlar. İdeal bir türbinde, m kütlesine sahip u hızındaki havanın kinetik enerjisi 2.1 eşitliğinde verilmiştir.

$$U = \frac{1}{2} mu^2 = \frac{1}{2} (\rho Ax) u^2 \quad (\text{Joule}) \quad (2.1)$$

Burada A , m^2 cinsinden türbin kesit alanı, ρ , kg / m^3 cinsinden hava yoğunluğu ve x , hava kütlesinin metre cinsinden genişliğidir. Hava kütlesi görsel olarak Şekil 2.2'deki gibidir. Şekil 2.2 incelendiğinde kütlenin lineer olarak artması nedeniyle kinetik enerjinin x ile lineer olarak arttığını görürüz.



Şekil 2.2 u hızındaki hava kütlesi

Rüzgar gücü, P_w , kinetik enerjisinin zamana göre türevi olarak 2.2 eşitliğindeki gibi ifade edilir.

$$P_w = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (\text{W}) \quad (2.2)$$

Burada ρ , hava yoğunluğu 2.3 eşitliğindeki gibidir.

$$\rho = 3.485 \frac{p}{T} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2.3)$$

2.3 eşitliğindeki p , kPa cinsinden basınç ve T , Kelvin cinsinden sıcaklıktır. 2.2 eşitliğinde yerine yazılırsa 2.4 eşitliği elde edilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u^3 = \frac{3.485 p A u^3}{2T} = \frac{1.742 p A u^3}{T} \quad (\text{W}) \quad (2.4)$$

2.4 eşitliğinde A, m² cinsinden türbin kesit alanı, u, m/s cinsinden rüzgarın hızı olarak verilmiştir. Havanın standart kabul edilen durumu için 2.5 ve 2.6 eşitlikleri verilmiştir.

$$p = 101.3 \text{ kPa} \quad (2.5)$$

$$T = 273 \text{ K} \quad (2.6)$$

2.5 ve 2.6 eşitliklerinde kabul edilen değerler, 2.4 eşitliğinde yerine yazılırsa 2.7 eşitliği bulunur.

$$P_w = 0.647 A u^3 \quad (\text{W}) \quad (2.7)$$

Daha genel olan 2.4 eşitliği, rüzgar türbini deniz seviyesinden birkaç yüz metre yüksekte ya da sıcaklık 0°C'nin üzerinde ise kullanılmalıdır.

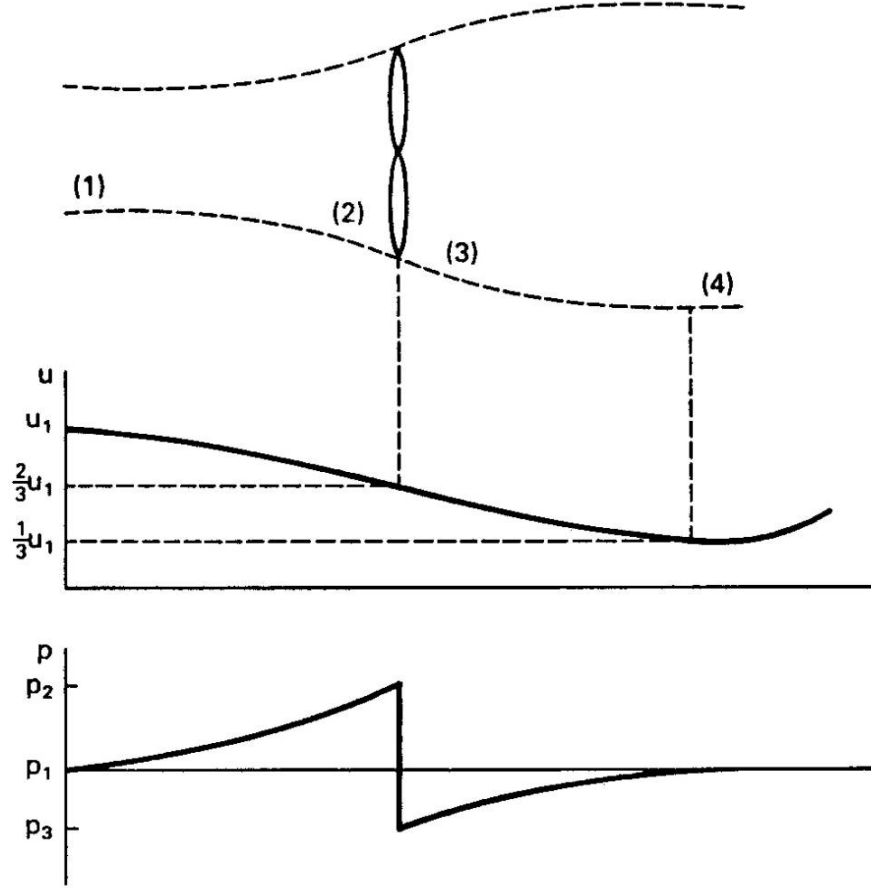
Normal şartlar altında, 1 m² kesitteki rüzgar, 5 m/s ve 10 m/s hızları için rüzgar gücü hesaplanarak 2.8 ve 2.9'da verilmiştir.

$$P_w = 0.647 \cdot 5^3 = 81 \text{ W} \quad (2.8)$$

$$P_w = 0.647 \cdot 10^3 = 647 \text{ W} \quad (2.9)$$

Buradan iki sonuca varılır. Birincisi rüzgar enerjisinin geniş bir alana yayılmasına bağlı olarak büyük miktarlarda güç elde etmek için, büyük boyutlarda pervane süpürme alanına ihtiyaç duyulmasıdır. İkincisi ise rüzgar enerjisinin, rüzgar hızının küpü ile değiştiği gerçeğidir. Bu sebepten, yüksek rüzgar hızları alan bölgeler kurulum açısından tercih edilmeli ancak aşırı yüksek hızlar için yükü ve türbini koruma sistemleri gerekmektedir.

Hareket eden büyük bir hava kütesinin içerisindeki rüzgar türbini, havanın hızını ve basıncını Şekil 2.3'deki gibi değiştirecektir.

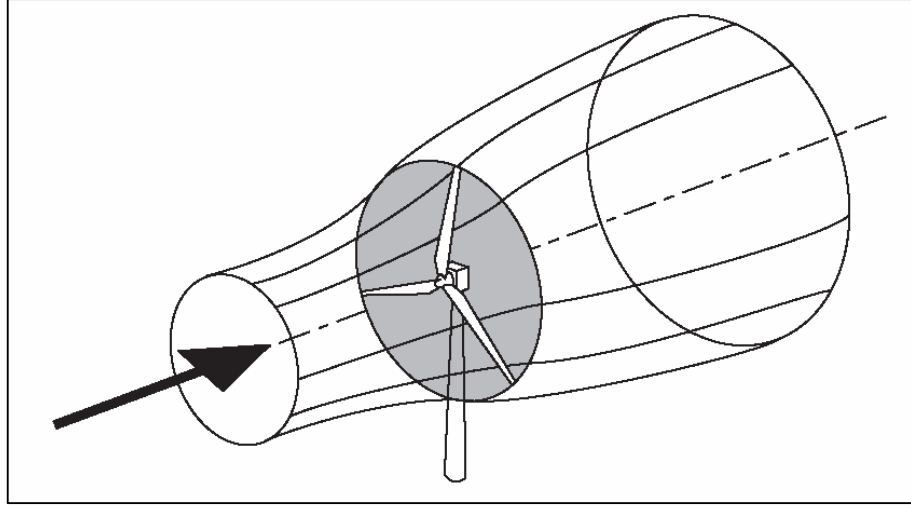


Şekil 2.3 İdeal rüzgar türbinindeki dairesel hava akımı

p_1 basıncında, u_1 hızına sahip d_1 çapındaki hava kütesinin türbine doğru geldiğini varsayalım. Havanın hızı, türbine yaklaştıkça azalır. Havanın çapı ise, türbin çapı olan d_2 'ye genişler. Hava basıncı, türbin girişinde maksimuma yükselirken, türbinin arkasında atmosfer basıncının altına düşmektedir. Havadaki kinetik enerjinin bir kısmı, basınçtaki artışı üretmek için potansiyel enerjiye dönüşecektir. Türbin sonrasında, bir kısım kinetik enerji tekrar potansiyel enerjiye dönüşerek hava basıncını atmosferik basınca yükseltir. Bu olay, rüzgar hızını, basınç dengeye gelinceye kadar düşürecektir. Türbini terk eden rüzgar hızı, en düşük hıza ulaştığında, türbin dışından gelen hava sayesinde tekrar 2.10 eşitliğindeki ilk hızına ulaşacaktır.

$$u_4 = u_1$$

(2.10)



Şekil 2.4 İdeal rüzgar türbinindeki dairesel hava akımının 3 boyutlu gösterimi

En uygun şartlar altında, türbine transfer edilen güç maksimum olduğunda, 2.11, 2.12, 2.13 ve 2.14 eşitlikleri geçerlidir.

$$u_2 = u_3 = \frac{2}{3}u_1 \quad (2.11)$$

$$u_4 = \frac{1}{3}u_1 \quad (2.12)$$

$$A_2 = A_3 = \frac{3}{2}A_1 \quad (2.13)$$

$$A_4 = 3A_1 \quad (2.14)$$

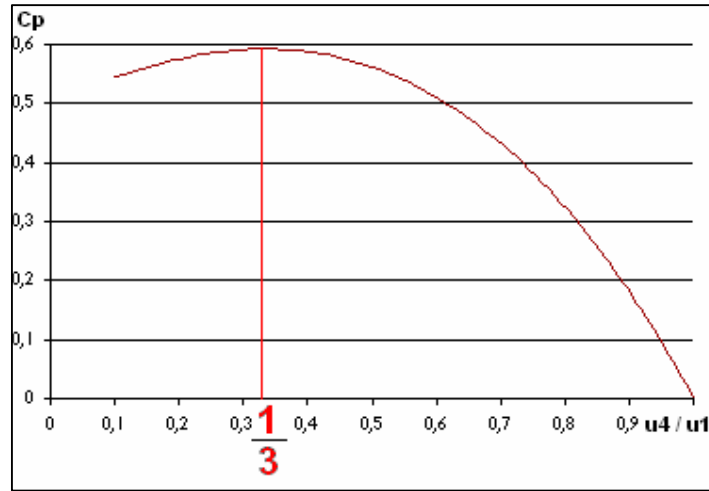
Türbinde elde edilen mekanik güç, giriş gücü ile çıkış gücü arasındaki fark olarak ifade edildiğinde 2.15 eşitliği elde edilir.

$$P_{m, ideal} = P_1 - P_4 = \frac{1}{2}\rho(A_1u_1^3 - A_4u_4^3) = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{8}{9}A_1u_1^3\right) \quad (W) \quad (2.15)$$

2.15 eşitliğinde giriş gücünün 8/9'unun ideal türbin tarafından elde edilmiş olduğunu belirtir. Ancak normalde hava akışının kesit alanı ölçülemediğinden türbin süpürme alanı olan A_2 ve u_1 rüzgar hızı kullanılır. Sonuç olarak 2.16 eşitliği elde edilir.

$$P_{m, ideal} = \frac{1}{2} \rho \left[\frac{8}{9} \left(\frac{2}{3} A_2 \right) u_1^3 \right] = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{16}{27} A_2 u_1^3 \right) \quad (2.16)$$

2.16 eşitliğinde bulunan $16/27 = 0.593$ çarpanı, Betz Katsayısı olarak bilinir. Bunun anlamı, gerçek bir türbin, havanın sahip olduğu enerjinin % 59.3'den daha fazlasını elde edemez. Pratikte bu değer, hava direnci, pervanenin oluşturduğu girdap, aktarma organları ile elektrik sistemi gibi noktalardaki kayıplardan dolayı daha da düşüktür. İyi bir türbin, en uygun koşullarda %35 ile %40 arasında bir performans sergilemekle beraber, %50 oranları da deneysel sistemlerde görülmüştür.

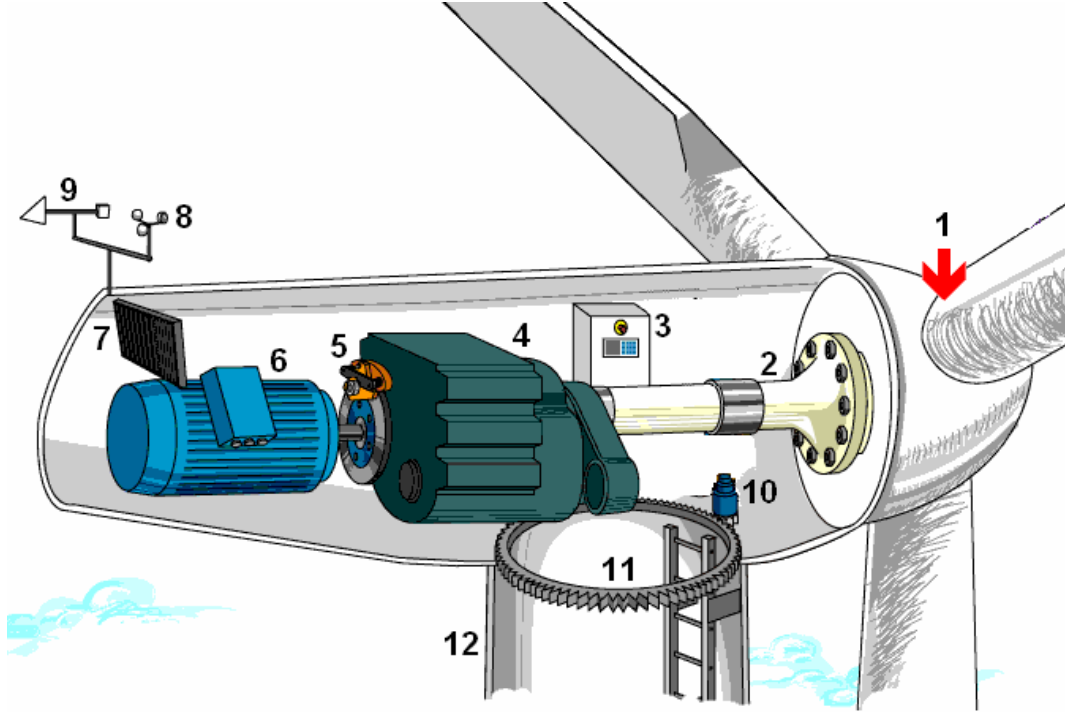


Şekil 2.5 Yavaşlatma faktörünün değişimi

Şekil 2.5'te Cp'nin, rüzgarın türbin çıkış hızının giriş hızına oranı ile değişimi gösterilmiştir. Cp'nin maksimum değeri, türbin çıkış hızının giriş hızının üçte biri olduğunda elde edilmektedir.

2.2.1 Rüzgar Türbinlerinin Alt Bileşenlerinin İncelenmesi

Günümüzde tercih edilen modern rüzgar türbinlerinin iç yapısı Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Şekil 2.6'daki bileşenler ve genel özellikleri sırasıyla açıklanmıştır.



Şekil 2.6 Modern rüzgar türbini bileşenleri

2.2.1.1 Pervane Kanatları ve Göbek

Pervane kanatları, göbek üzerine yerleştirilir. Göbek, pervane kanatları tarafından yakalanan mekanik enerjiyi dişli takımının düşük hız miline aktarır. Günümüz modern rüzgar türbinlerinde pervane çapı 75 kW'lık türbinlerde 17 metre, 3 MW'lık türbinlerde ise 90 metre kadardır.

2.2.1.2 Düşük Hız Mili

Pervane göbeği, düşük hız mili ile dişli kutusuna bağlanır. Modern bir rüzgar türbini düşük hız mili yaklaşık 19-30 devir/dakika hızları ile döner.

2.2.1.3 Elektronik Kontrol Ünitesi

Elektronik kontrol ünitesi, rüzgar türbininin kontrolünü sağlayan bilgisayardan ve yazılımdan

oluşur. Şekil 2.7’de sistemin genel blok diyagramı gösterilmiştir. Bir arıza halinde rüzgar türbin durdurulur ve fiber optik ağ vasıtasıyla ana kontrol operatörünün bilgisayarına uyarı verir.

2.2.1.4 Dişli Takımı

Dişli takımının görevi, pervane çıkışındaki düşük dairesel hızı, elektrik generatörü için uygun olan değere yükseltilmesidir. 300 kW ile 2000 kW nominal çıkış gücüne sahip generatörler için pervane tarafındaki düşük hız mili 48 ile 17 devir / dakika ile döner, bu nedenle dönüştürme oranları 1:31 ile 1:88 olarak kullanılmaktadır.

2.2.1.5 Mekanik Fren

Günümüz modern rüzgar türbinlerinin bir çoğunda yüksek hız mili üzerinde mekanik fren bulunmaktadır. Mekanik fren, genellikle aerodinamik frenler ile birlikte kullanılarak türbinin yüksek hızlarda zarar görmesini önlemek amacıyla devreye alınır. Mekanik fren tek başına kullanılmamakla birlikte, aerodinamik frenin çalışmaması durumunda veya türbin bakımı gibi özel durumlarda kullanılır.

2.2.1.6 Generatör

Generatör, elektrik enerjisi üretimini sağlayan esas bileşendir. Uygulamanın türüne göre değişik yapılarda, değişik elektriksel özelliklere sahip modeller bulunmaktadır. Günümüz modern rüzgar türbinlerinde generatör çıkış gücü 3 MW değerlerine ulaşmıştır.

2.2.1.7 Soğutma Ünitesi

Generatör ve dişli takımındaki mekanik ve elektriksel kayıplardan dolayı ısınmalar meydana gelmektedir. Soğutma ünitesi kullanılarak, sıcaklık değerlerinin nominal çalışma sıcaklığında tutularak bileşenlerin zarar görmesi engellenir.

2.2.1.8 Anemometre

Makina yerinin hemen üzerine yerleştirilen anemometre ile rüzgar hızı ölçülür. Anemometreden gelen hız bilgisi, rüzgar türbininin kontrol ünitesi tarafından değerlendirilerek 5 m/s’ye ulaştığında rüzgar türbinini devreye almak için kullanılır. Kontrol ünitesi ayrıca, türbini korumak amacıyla rüzgar hızı 25 m/s’yi aştığında sistemi otomatik olarak durdurur.

2.2.1.9 Yelkovan

Makina yerinin hemen üzerine yerleştirilen yelkovan sayesinde rüzgarın yönü ölçülür. Yelkovandan gelen yön bilgisi türbini rüzgara karşı döndürmek üzere kullanılır.

2.2.1.10 Rota Mekanizması

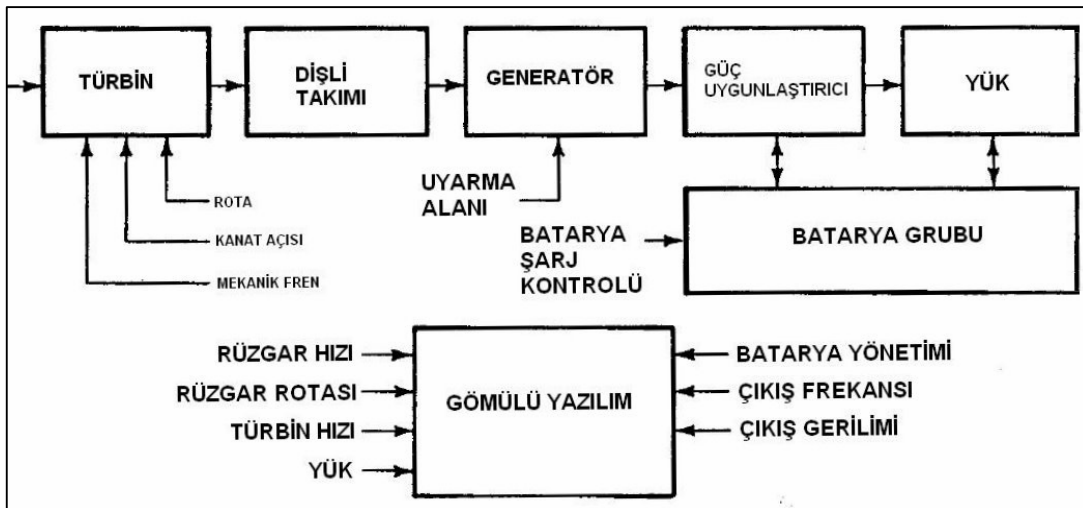
Rota mekanizması, kule üzerine yerleştirilmiş rota dişlisi ve makina yerine yerleştirilmiş rota motorlarından oluşmaktadır. Kontrol ünitesi, yelkovandan gelen yön bilgisini alarak, türbini rüzgara karşı döndürmek üzere, rota mekanizması üzerinde bulunan elektrik motorlarını kontrol eder. Rüzgarın yönüne göre, düşük bir hızda türbinin rotası değiştirilir.

2.2.1.11 Makina Yeri

Makina yeri, kulenin üzerine yerleştirilen odadır. Bu oda içerisinde generatör, dişli takımı gibi alt bileşenler bulunmaktadır. Türbin kanatları göbek üzerinden makina yerine bağlanmıştır. Makina yeri, kule içerisindeki merdiven ile bağlantılı olup montaj ve bakım esnasında yetkili personelin erişimine açıktır.

2.2.1.12 Kule

Rüzgar türbininin kulesi günümüzde betondan yapılmaktadır. Makina yerini ve pervaneyi taşır. Modern türbinlerde kule yükseklikleri 100 metre seviyelerini aşmıştır. Kule genellikle dairesel betondan yapılmaktadır. Dairesel kuleler, personelin kurulum ve bakım amaçlı kullanacağı, makina yerine ulaşan bir merdiven ile üretilirler.



Şekil 2.7 Modern rüzgar türbini elektronik kontrol sistemi

2.2.2 Rüzgar Türbinlerinin Enerji Üretimi

Rüzgar türbinlerinden sabit gerilim, sabit frekans çıkışı almanın zaman içinde gelişen değişik yöntemleri bulunmaktadır. Çizelge 2.5’de sabit gerilim ve sabit frekans çıkışı için kullanılan türbin, dişli takımı ve generatör kombinasyonları verilmiştir.

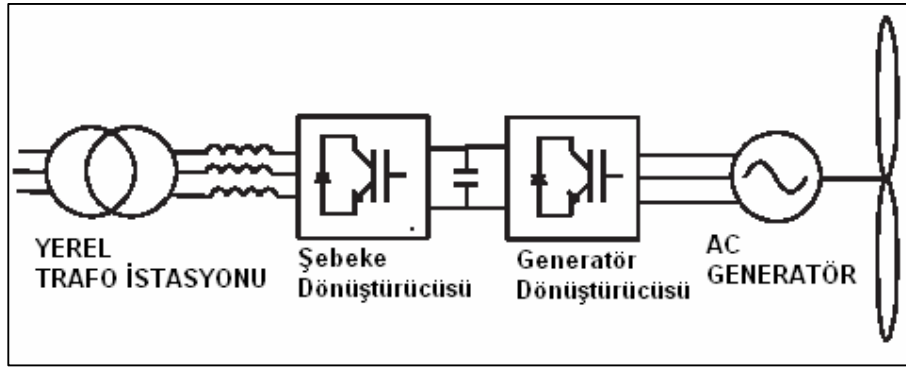
Çizelge 2.5 Senkron güç elde edilme yöntemleri

No.	Türbin	Dişli Takımı	Generatör
1	Değişken Kanat Açısı Sabit Hız	Sabit Oranlı Dişli Takımı	Asenkron Generatör
2	Değişken Kanat Açısı Sabit Hız	İki Oranlı Dişli Takımı	Asenkron Generatör
3	Sabit Kanat Açısı Sabit Hız	Sabit Oranlı Dişli Takımı	Asenkron Generatör
4	Sabit Kanat Açısı Değişken Hız	Sabit Oranlı Dişli Takımı	DC Generatör – DC Motor – Asenkron Gen.
5	Sabit Kanat Açısı Değişken Hız	Sabit Oranlı Dişli Takımı	AC Gen. – Doğrultucu – DC Motor – AC Gen.
6	Sabit Kanat Açısı Değişken Hız	Sabit Oranlı Dişli Takımı	AC Generatör – Doğrultucu - İnverter
7	Sabit Kanat Açısı Değişken Hız	Değişken Oranlı Dişli Takımı	AC Generatör

Generatörün, şebekeye doğrudan bağlanarak çalışmasına doğrudan şebeke senkronizasyonu adı verilir. Şebeke ile generatör arasında güç elektroniği devreleri, dönüştürücüler, kullanıldığı takdirde bu çalışma biçimi dolaylı şebeke senkronizasyonu olarak ifade edilir.

Doğrudan şebeke senkronizasyonu, generatörün nominal çalışma hızında sağlanır. Değişken rüzgar uygulamalarında nominalin altındaki hızlarda generatör şebekeden ayrılarak motor olarak çalışması engellenir. Maliyeti düşüktür, bağlantı için gereken kontrol devresi ve güç elektroniği devreleri fiyat bakımından dolayı şebeke senkronizasyonu uygulamalarının çok altındadır. Modern rüzgar türbinleri şebekeye yumuşak bir şekilde senkron olurlar. Aksi takdirde ilk anda çok büyük güç çeken generatörler, şebekede istenmeyen gerilim düşümlerine neden olurlar.

Şekil 2.8'deki dolaylı şebeke senkronizasyonunda, türbin hızının her değerinde şebeke ile senkronizasyon sağlanır. Aşırı hızlarda, şebekeye doğrudan senkronizasyonda verilemeyen fazla enerji, daha sonra aktarılmak üzere depolanır. Özellikle zayıf bir şebekeye bağlı rüzgar türbinlerinde, güç elektroniği devreleri sayesinde reaktif güç kontrolü sağlanır, güç kalitesi iyileştirilir.



Şekil 2.8 Güç elektroniği devresi ile dolaylı şebeke senkronizasyonu

En büyük dezavantajı maliyetidir. Kullanılan güç elektroniği elemanları pahalı, kontrol sistemi yazılımları ileri seviyede olup karmaşıktır. Yüksek frekansta çalışan güç elektroniği devrelerinin arızalanması, işletmenin sürekliliğini bozmakla birlikte, AC-DC-AC dönüştürme işlemleri, ilave güç kayıplarına neden olmaktadır. Günümüz güç elektroniğinin gelişimi ile Çizelge 2.5'te verilen 6. nolu güç kontrolü sınıfına girmekte ve uygulama açısından güvenilirlik ve kolaylık getirmektedir. Şekil 2.9'da Semikron firmasına ait 1.5 MVA gücünde, 4 bölgeli değişken hızlı dönüştürücü gösterilmiştir.



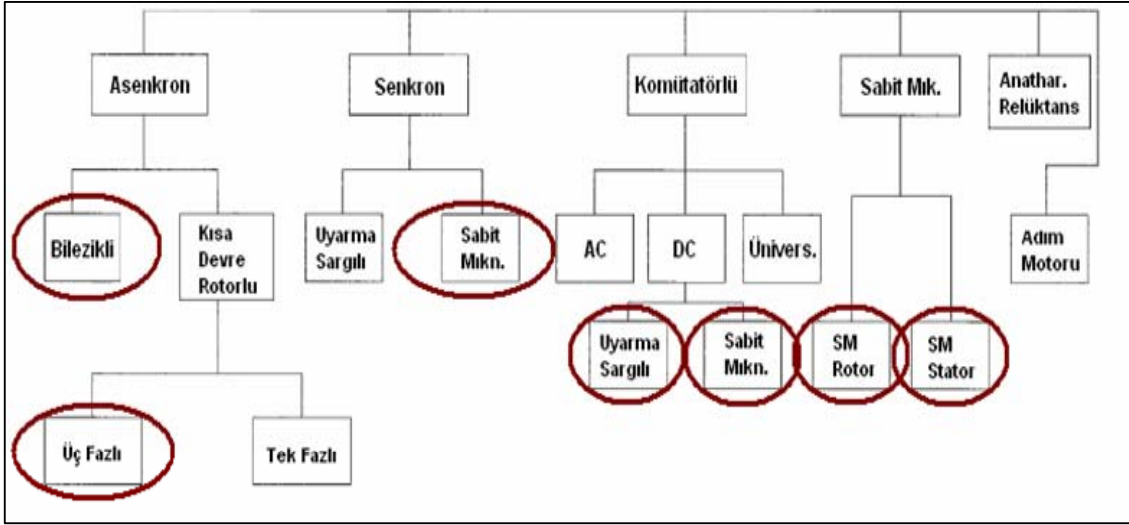
Şekil 2.9 Semikron firmasının 1.5 MVA gücünde, 4 bölgeli değişken hızlı dönüştürücüsü

2.2.3 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Elektrik Makinalarının İncelenmesi

Rüzgar türbinlerinde, zaman içerisinde teknolojinin gelişmesi ile paralel olarak, çeşitli tiplerde generatörler kullanılmıştır. Bunlar ;

- DC Şönt Generatör
- Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (PMSG)
- Çift Beslemeli Bilezikli Asenkron Generatör (DFIG)
- Kısa Devre Rotorlu Asenkron Generatör

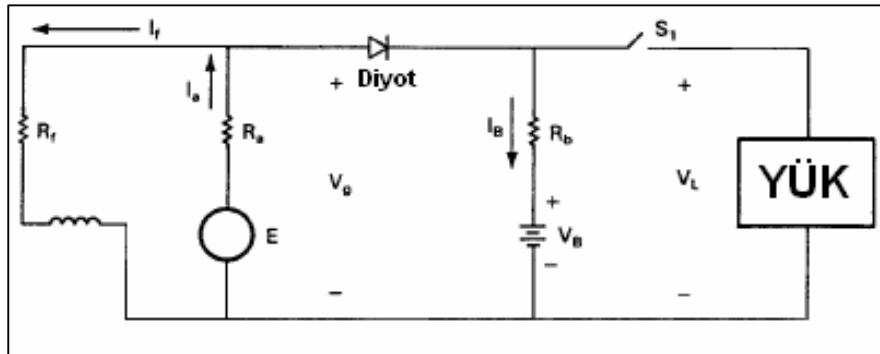
olarak özetlenebilir. Şekil 2.10'da, rüzgar türbinlerinde kullanılan elektrik makinaları sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.10 Rüzgar türbinlerinde kullanılan elektrik makinaları

2.2.3.1 DC Şönt Generatör

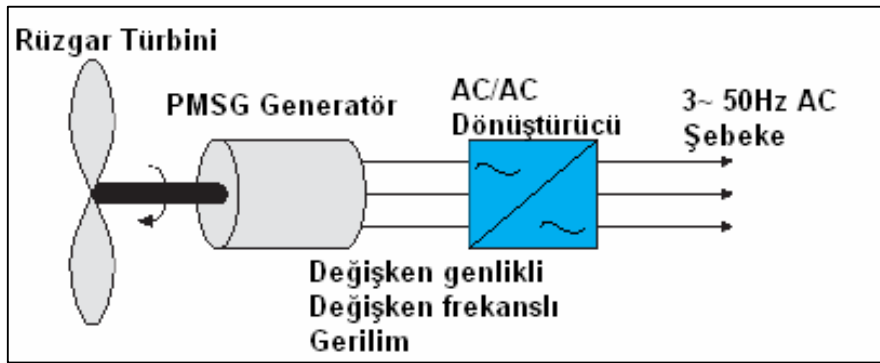
DC şönt generatörler, rüzgar türbinlerinde, 20.yüzyıl başlarında evlerde radyo ve aydınlatma lambaların beslenmesi amacıyla kullanıldı. Günümüzde, enerji hatlarının ulaşamadığı hava tahmin istasyonlarına, yangın gözlem kulelerinde kısıtlı miktarda enerji sağlamada kullanılmaktadır. Çok düşük güçlü türbin uygulamaları için uygundur. Genellikle batarya grubu ile birlikte kullanılırlar. Rüzgarın hızı azaldıkça, generatör uçlarında üretilen gerilim seviyesi düşer. Gerilim seviyesi eğer batarya çıkış geriliminin altına düşerse akım yön değiştirerek bataryadan generatöre doğru gelerek generatör, motor olarak çalışmaya başlar. Bunu önlemek için generatör çıkışına bir güç diyotu konulur.



Şekil 2.11 DC şönt generatör, batarya grubu ve yük eşdeğer devresi

2.2.3.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör

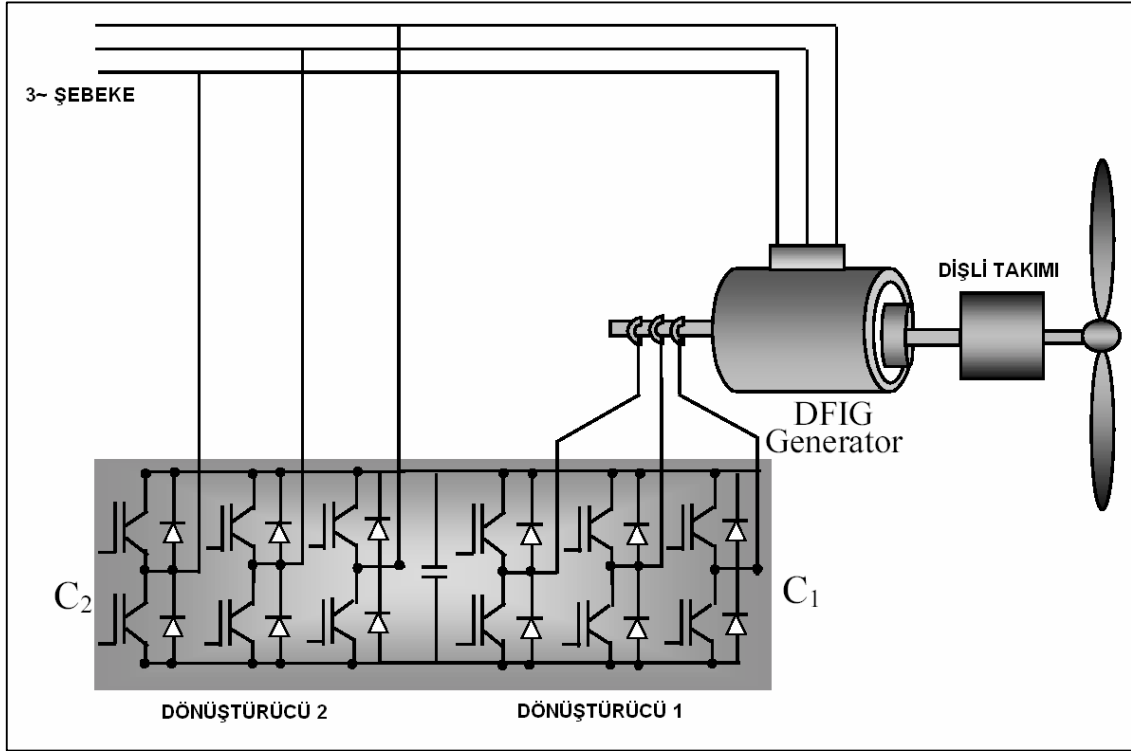
Sabit mıknatıslı senkron generatörde mıknatıslanma alanını, rotora yerleştirilmiş sabit mıknatıslar oluşturur. Rotorda sargı ya da kısa devre çubuklar olmadığından bakır kayıpları yoktur. Makinada rotor kayıplarının bulunmaması, verimin yüksek olmasını sağlar. Sabit mıknatısların sağladığı alanın şiddeti yüksek olduğundan generatör çıkışının dengesiz yüklenmesi durumunda generatör milindeki momentte dalganma olur, generatörün mekanik aksamı sesli çalışır ve uzun süreli çalışmada mekanik problemlerin ortaya çıkmasına neden olur. Sabit mıknatısların kullanımı ile yapılan rotor dizaynı çok kutuplu yapıya imkan sağladığından senkron hızı düşük ve momentini yüksek olan değişik modeller üretilmektedir. Bu sayede dişli takımı ihtiyacı ortadan kalkarak, doğrudan türbin çıkışındaki düşük hız miline akuple edilmesine imkan sağlarlar. Kutup sayısı az olan yüksek hız modellerinde ise klasik dişli takımı, rulmanlar ve akuple elemanları kullanılarak türbin çıkışındaki düşük hız mili generatör için uygunlaştırılır. Sabit mıknatıslı senkron generatörün elektriksel çıkışı, rotor hızı ile orantılıdır. Rotor ω hızı ile tahrik edildiğinde, stator uçlarında ω hızına bağlı olarak değişen genlik ve frekansta bir gerilim oluşur. Türbinin değişken hız uygulamalarında güç elektroniği sistemleri olmaksızın sabit bir çıkış alınamaz ve doğrudan şebeke senkronizasyonu için gerekli şartlar sağlanamaz. Şebeke ile doğrudan senkronizasyon ancak sabit hız uygulamalarında mümkündür.



Şekil 2.12 Sabit mıknatıslı senkron generatörün şebeke senkronizasyonu

2.2.3.3 Çift Beslemeli Bilezikli Asenkron Generatör

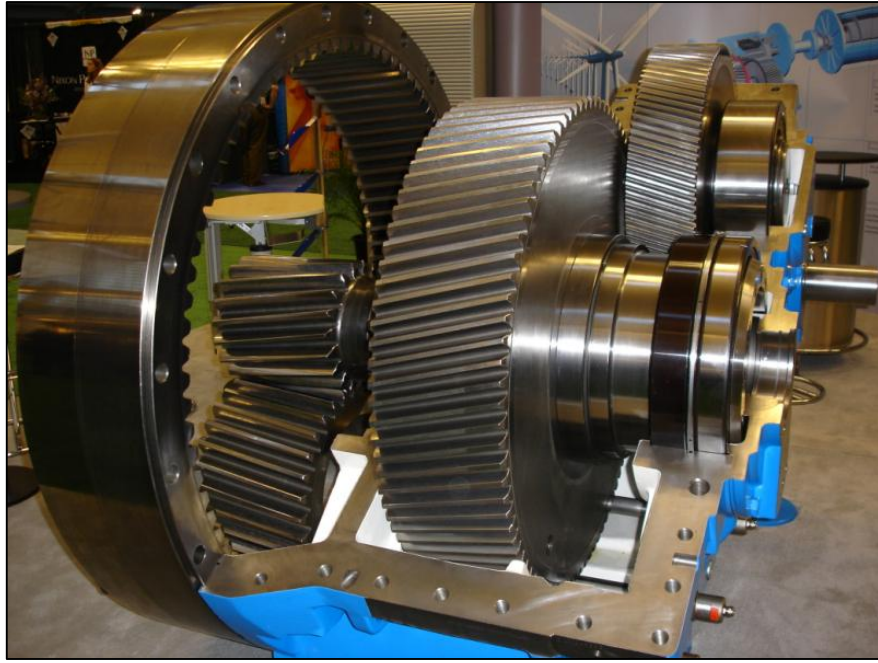
Çift beslemeli bilezikli asenkron generatör, rüzgar uygulamalarında, 4 bölge çalışabilme özelliğine sahip bir güç elektroniği devresi ile kullanılmaktadır. Sadece rotor devresinin kontrolü, yani uyarma enerjisinin kontrolü yeterli olduğundan kontrol devresi düşük güçlü ve düşük maliyetlidir. Değişken hızlı rüzgar türbin uygulamaları için uygundur. Momentteki dalgalanmaları kontrol devresi yardımıyla şebekeye minimum düzeyde yansıtır. Güç faktörü kontrolüne imkan sağlar. Rüzgar türbinlerinde kullanılan generatör ve kontrol devresi grubuna Çift Beslemeli Asenkron Generatör (Doubly Fed Induction Generator) denilmektedir. GE-Wind-Power, Vestas, RE Power, Nordex, NEG-Micon gibi büyük firmalar bu tip generatörü kullanan rüzgar enerji sistemleri üretmektedir.



Şekil 2.13 Bilezikli asenkron generatörün şebeke senkronizasyonu

2.2.4 Rüzgar Türbinlerinde Dişli Takımı

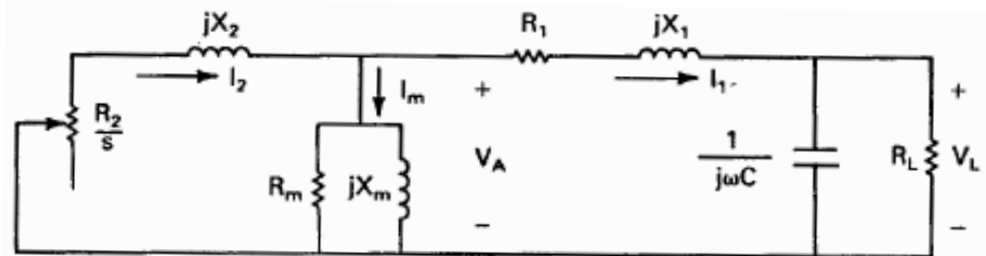
Rüzgar türbinlerinde kullanılan dişli takımlarının görevi, türbin dönüş hızının generatör milinin dönüş hızına uygunluğunu sağlamaktır. Tek kutuplu makinalarda bu hız 1500 d/d'dır. Ayrıca üretilen enerjiye bağlı olarak s kayması da eklenmelidir. Nominal gücü 0.3 MW ile 2 MW arasında olan santrallerde, üst türbin hızları 48-17 d/d arasında olur, buna göre dönüştürme oranı, 1:31 ve 1:88 arasında seçilir. Dişli takımları, istenen dönüştürme oranını, 1:3 ve 1:5 arasındaki oranlara sahip kaskad bağlı dişlilerle sağlar. Verimleri teknolojilerinin gelişmesi ile % 95 - % 98'lere kadar ilerlemiştir.



Şekil 2.14 AWEA 2006 fuarında sergilenen 2 MW'lık dişli takımı

3. Kısa Devre Rotorlu Asenkron Generatör

Kısa devre rotorlu asenkron generatör, yapısal olarak basit olduğundan hem çok güvenilir hem de maliyet açısından ucuz bir makinadır. Şebeke ile doğrudan senkronizasyon yapılması planlanan rüzgar türbini uygulamalarında mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Kısa süreli aşırı yüklenme kabiliyeti ile generatör anlık yüksek hızlarda aşırı yükte çalışmaya olanak sağlar. Kayma ile çalışması sayesinde, makina milindeki ani moment değişiklikleri statora çok fazla yansımaya uğramaz ve mekanik aksamda daha az aşınma ve yorulma meydana gelir. Generatör olarak çalışma ancak senkron hızın üzerinde mümkündür ve makinanın generatör olarak çalışabilmesi için uyarma alanının oluşması gerekir. Doğrudan şebeke senkronizasyonu uygulamalarında generatör, şebekeden reaktif güç çekerek uyarma alanını oluşturur. Şebekeden bağımsız çalışmada ise uyarma alanı, stator uçlarına bağlanan kapasiteler ile makina üzerindeki artık mıknatısiyet tarafından sağlanır. Bu özel generatör çalışma durumu literatürde Kendinden Uyarmalı Asenkron Generatör (SEIG-Self Excited Induction Generator) olarak adlandırılır. Şebekeden bağımsız olarak çalışma için diğer bir yöntemde batarya grubu ve iki yönlü DC/AC dönüştürücü ile statorun kontrolü yardımıyla yapılmaktadır. Statorun kontrolü için V/F kontrolü, alan yönlendirmeli kontrol ya da doğrudan moment kontrolü gibi yöntemler bulunmakla birlikte ileri düzeyde elektrik makinaları bilgisi ve güç elektroniği kontrol yöntemleri gerektirmektedir.



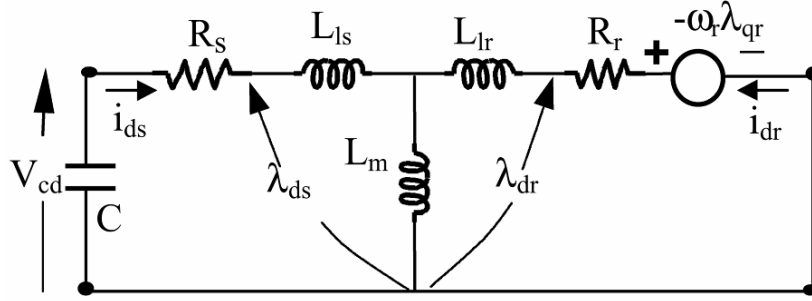
Şekil 3.1 Kendinden uyarmalı asenkron generatörün tek faz eşdeğer devresi

Kendinden uyarımalı asenkron generatörler, uyarı alanını meydana getirmek için ilave güç kaynağına ihtiyaç duymadıkları için rüzgar enerji santralleri için özellikle şebekenin erişemediği uzak bölgelerde iyi bir seçim olarak değerlendirilebilir. Sabit mıknatıslı senkron generatörler de benzer bir yapıda olup, rüzgar enerjisinde kullanılmaktadır ancak uyarı alanını meydana getiren mıknatıslar zaman ile bozulmalara ve zayıflamalara maruz kalmaktadırlar. Bu da sistemin çalışmasında aksaklıklara ve gerilim düşümüne neden olmaktadır.

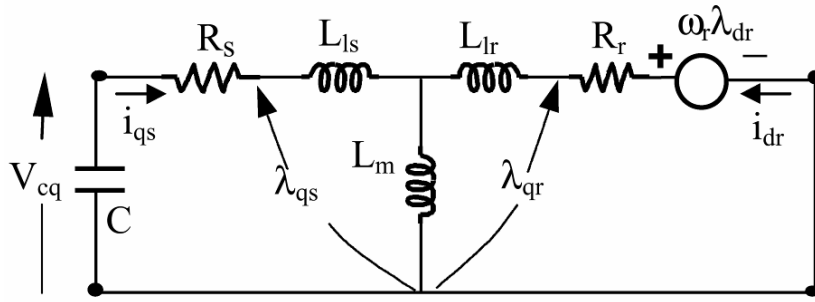
Kendinden uyarımalı asenkron generatörün doğal koruma mekanizması bulunmaktadır. İletim hattında bir kısa devre sonucu gerilim çöktüğü anda uyarı alanı da zayıflayacağından elektrik enerjisi üretimi kendiliğinden duracaktır. SEIG, düşük fiyatı, yapısal olarak basitliği, bakım giderlerinin düşük olması ve fırça kollektör gibi zaman ile aşınan yapısı bulunmadığından ağır şartlar altında bile dayanıklı olması sebebiyle tercih edilir.

Kendinden uyarımalı asenkron generatör incelendiğinde, mıknatıslanma reaktansının değeri, hava aralığı geriliminin düşük olduğu ve doymadığı değerlerde sabit kabul edilir, doyuma gittiğinde ise düşer. Ancak, kendinden uyarmanın gerçekleştiği kararsız halde mıknatıslanma endüktansı karakteristiği, hava aralığı geriliminin sıfırdan yükselerek belirli bir maksimum değere gelmesi ve nominal değerine (doyum değeri) düşmesi ile ilişkilidir. Mıknatıslanma reaktansı X_m , frekansa bağlıdır.

Şekil 3.1'de tek faz eşdeğer devresi gösterilen kendinden uyarımalı asenkron generatörün matematiksel modeli kısa devre rotorlu asenkron makina modeline benzemektedir. SEIG'in etkin bir şekilde modellenmesi için öncelikle makina parametrelerinin hassas ölçümü gereklidir. Bu parametreler, generatörün motor olarak çalıştırılarak, yüksüz (no load) ve kısa devre (locked rotor) testleri ile belirlenebilmektedir.



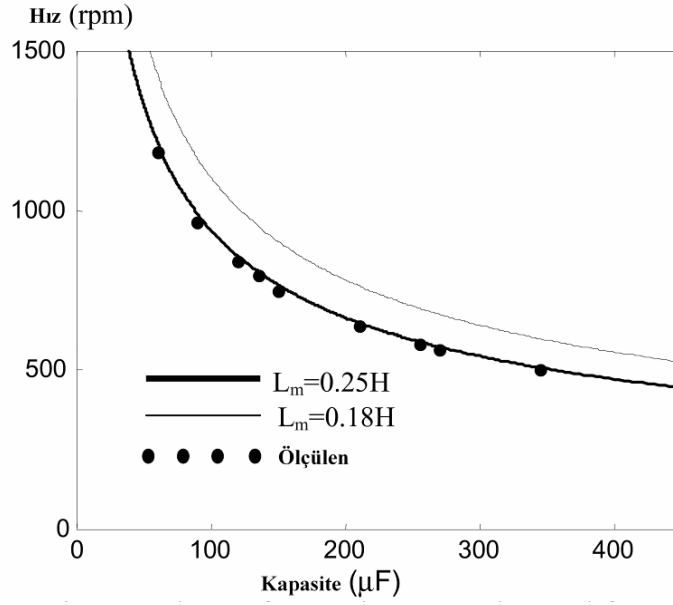
Şekil 3.2 Kendinden uyarmalı asenkron generatörün d eksenindeki eşdeğer devresi



Şekil 3.3 Kendinden uyarmalı asenkron generatörün q eksenindeki eşdeğer devresi

3.1 Minimum Hız ve Uyarma Kapasitesi Değerleri

Şekil 3.2’de stator uçlarına kapasite grubu bağlı SEIG, rüzgar türbini ile dışarıdan tahrik edildiğinde belirli bir minimum hızda gerilim üretmeye başlar. Kendinden uyarma işleminin başladığı bu minimum hız değeri, 3.1 eşitliğinde verilen matrisin çözümü ile gerçekleştirilir. Bu eşitlik kullanılarak hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen yüksüz bir generatörün kendinden uyarma başlangıç hızları Şekil 3.4’da verilmiştir.



Şekil 3.4 Yüksüz haldeki generatörün kapasiteye bağlı hız değişimi

Şekil 3.4'te, hesaplanan ve ölçülen değerlerin yanında mıknatıslanma endüktansının kendinden uyarma olayına etkisi görülmektedir.

Asenkron makinanın modellenmesinde mıknatıslanma endüktansının nominal gerilimdeki değerinin belirlenmesi önemlidir. SEIG'de mıknatıslanma endüktansının değişimi gerilimin ve kararlı hale geçişin esas ögesidir.

3.2 SEIG'in Geçici Hal Modeli

Kendinden uyarma sırasında, asenkron generatörler klasik bakış açısı ile modellenmesi mümkün olmayan, olağandışı geçici hal sergiler. SEIG'in geçici halde analizini yaparken döner alanların incelenmesinde kullanılan Park dönüşümünden yararlanılmıştır.

Park dönüşümü uygulanmış asenkron makine Şekil 3.2 ve 3.3'de gösterilmiştir. I_{ds} ve I_{qs} akımları stator akımlarına, I_{dr} ve I_{qr} akımları da rotor akımlarına d ve q eksenlerinde olacak şekilde karşılık gelir. Açısal hız $\omega = d\theta / dt$, rotorun mekanik hızıdır.

Şekil 3.1'de görüleceği gibi, rotor ya da stator uçlarına hiç bir gerilim uygulanmamıştır. Bu standart bir asenkron generatörün gösterim biçimidir. Ancak, SEIG'de devreye sonradan ilave edilen uyarma kapasiteleri bulunmaktadır.

3.2.1 Yüksüz Model

SEIG, uçlarındaki kapasite grubu ile birlikte yüksüz olarak çalıştığı varsayılır. D ve Q eksenlerindeki gerilim ve akımlar, Şekil 3.1'deki model, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'deki d-q eksenlerindeki gösterim ve 3.1 eşitliği kullanılarak elde edilir. Elde edilen ifade, simetrik üç fazlı asenkron makinanın, üç fazlı ideal kapasite grubuna bağlandığı durumu gösterir. Normal çalışma ve geçici durumlar için referans eksen stator olarak seçilir. Kullanılan s indisi stator, r indisi rotor parametrelerine aittir. Kapasite üzerindeki gerilim düşümleri matris içerisinde $1/pC$ şeklinde gösterilmiştir. Statordan rotora olan dönüştürme oranı 1 olarak kabul edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} Vds \\ Vqs \\ Vdr \\ Vqr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 p + \frac{1}{pC} & 0 & Mp & 0 \\ 0 & R_1 + L_1 p + \frac{1}{pC} & 0 & Mp \\ Mp & \omega M & R_2 + L_2 p & \omega L_2 \\ -\omega M & Mp & -\omega L_2 & R_2 + L_2 p \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} ids \\ iqs \\ idr \\ iqr \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Stator ve rotor arasındaki mıknatıslanma endüktansı, sargılardan geçen akımla ayrıca stator ve rotor konumları ile değişmektedir. d-q eksenlerindeki gerilim düşümleri de geçen akıma ve stator ve rotorun konumlarına bağlıdır. Analitik çözüme ipM terimi eklenerek mıknatıslanma akısının ($\Phi_{mi} = M.i$) oluşturduğu ilave gerilim düşümü bulunur.

$$v = \frac{d\phi_m}{dt} = M \frac{di}{dt} + i \frac{dM}{dt} = Mpi + ipM \quad (3.2)$$

3.2 eşitliğindeki ilk terim stator akımına bağlı değişimi, ikinci terim kendinden uyarma kararlı hale gelene kadarki rotor dönüş hızını gösterir. Rotor dönüş hızı, açısal hız ω olarak sabit, ya da sıfırdan kararlı haldeki son değerine gelene kadar adım adım hesaplanarak değişken kabul edilebilir.

3.2.2 Omik Yüklü Model

SEIG'in uçlarına omik bir yük bağlanarak yüklü kalkışı modellenebilir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te görüleceği gibi, yükün uçlarındaki gerilim, kendinden uyarma kapasitelerinin uçlarındaki gerilime eşit olacaktır. Yük akımı i_{Ld} olacak şekilde;

$$V_{Ld} = V_{Cd} = R \cdot i_{Ld} \quad (3.3)$$

$$i_{Cd} = Cp v_{Cd} = Cp R i_{Ld} \quad (3.4)$$

$$i_{ds} = i_{Cd} + i_{Ld} \quad (3.5)$$

$$i_{ds} = Rcp i_{Ld} + i_{Ld} \quad (3.6)$$

3.5 ve 3.6 eşitliklerinde i_{ds} kullanılarak ve i_{Ld} 'nin fonksiyonu olarak yeniden düzenlenirse 3.7 eşitliği bulunur.

$$i_{Ld} = \frac{i_{ds}}{RCp + 1} \quad (3.7)$$

3.7 eşitliği 3.3 eşitliğinde yerine yazıldığında;

$$V_{Ld} = \frac{R}{RCp + 1} i_{ds} \quad (3.8)$$

bulunur. Benzer şekilde q eksenindeki gerilim düşümü 3.9'da verilmiştir.

$$V_{Lq} = \frac{R}{RCp + 1} i_{qs} \quad (3.9)$$

Omik yüklü çalışmadaki R direnci gözönünde bulundurularak 3.1 eşitliğindeki matris yeniden yazılarak 3.10 eşitliği elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} Vds \\ Vqs \\ Vdr \\ Vqr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 p + \left(\frac{R}{RCp + 1} \right) & 0 & Mp & 0 \\ 0 & R_1 + L_1 p + \left(\frac{R}{RCp + 1} \right) & 0 & Mp \\ Mp & \omega M & R_2 + L_2 p & \omega L_2 \\ -\omega M & Mp & -\omega L_2 & R_2 + L_2 p \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} ids \\ iqs \\ idr \\ iqr \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.2.3 RLC Yüklü Model

SEIG, uçlarına RLC yük bağlı iken modellenenebilir. Bu modelde RLC yük, uyarma kapasitesine paralel bağlıdır. Omik yüklü modelde olduğu gibi RLC yüklü modelde de, RLC yükün uçlarındaki gerilim, kendinden uyarma kapasitesinin gerilimine eşittir.

$$V_{Ld} = R i_{Ld} + L p i_{Ld} \quad (3.11)$$

3.11 eşitliğinden kapasite akımı bulunur.

$$i_{Cd} = C p v_{Ld} = (RCp + LCp^2) \cdot i_{Ld} \quad (3.12)$$

$$i_d = i_{Cd} + i_{Ld}' \quad (3.13)$$

$$i_d = (RCp + LCp^2) \cdot i_{Ld} + i_{Ld}' \quad (3.14)$$

$$i_{Ld} = \frac{i_{ds}}{RCp + LCp^2 + 1} \quad (3.15)$$

3.15 eşitliğinde bulunan değer, 3.11 eşitliğinde yerine yazılarak 3.16 eşitliği bulunur.

$$V_{Ld} = \frac{R + Lp}{RCp + LCp^2 + 1} \cdot i_{ds} \quad (3.16)$$

q eksenindeki gerilim düşümü de benzer olarak 3.17 eşitliğindeki gibi bulunur.

$$V_{Lq} = \frac{R + Lp}{RCp + LCp^2 + 1} \cdot i_{qs} \quad (3.17)$$

olarak bulunur. Omik-endüktif yüklü çalışmadaki R-L yükü gözönünde bulundurularak 3.1 eşitliği yeniden yazılarak 3.18 eşitliği elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 p + \left(\frac{R + Lp}{RCp + LCp^2 + 1} \right) & 0 & Mp & 0 \\ 0 & R_1 + L_1 p + \left(\frac{R + Lp}{RCp + LCp^2 + 1} \right) & 0 & Mp \\ Mp & \omega M & R_2 + L_2 p & \omega L_2 \\ -\omega M & Mp & -\omega L_2 & R_2 + L_2 p \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.18 eşitliğinde elde edilen empedans matrisi, asenkron makinaların klasik denklemine benzemektedir. Yalnız, uyarma kapasitesi ve generatör uçları üzerindeki gerilim düşümü ile yükün cinsine bağlı değişkenler farklılık göstermektedir. Eğer yük ilave kapasite içeriyor ise, uyarma kapasitesine paralel olarak eklenebilir.

Uyarma kapasitesinin uçlarındaki gerilimi bulmak için omik–endüktif yük bağlı olduğu durum seçilmelidir. i_{Ld} ve i_{Lq} sırası ile d ve q eksenlerindeki yük akımları olacak şekilde 3.19 ve 3.20 eşitlikleri elde edilir.

$$pV_{Ld} = \frac{i_{ds}}{C} - \frac{i_{Ld}}{C} \quad (3.19)$$

$$pV_{Lq} = \frac{i_{qs}}{C} - \frac{i_{Lq}}{C} \quad (3.20)$$

3.19 ve 3.20 eşitliklerindeki sistemin çözümü, akım ve gerilimlerin kendinden uyarma sırasında ve kararlı haldeki değerlerini vererek yük değişimlerinin doğrulanmasını sağlar. 3.18 eşitliğinin çözümünde mıknatıslanma reaktansının değişimi, mıknatıslanma akımının fonksiyonu olarak dikkate alınmalı ve manyetik doyum durumu değerlendirilmelidir.

3.3 SEIG'in Performansı

Rüzgar türbinlerinin elektriksel genel performansı, çalışma durumları arasındaki etkileşim, asenkron generatörün yapısı, kendinden uyarma kapasitelerinin seçimi ve yük durumuna bağlıdır. Çıkış performansı, şebeke kullanıcılarının rastlantısal olarak devreye girip çıkan yüklerine bağlıdır.

Elektrik enerjisinin üretimini gerçekleştiren asenkron generatörler, tasarım aşamasında aşağıda verilen kriterlere bağlı bir performans sergilerler.

Asenkron makina parametreleri

- Nominal çalışma gerilimi
- Nominal çıkış gücü
- Nominal çıkış frekansı
- Güç faktörü
- Rotor hızı
- İzolasyon derecesi
- Çalışma sıcaklığı
- Havalandırma sistemi
- Servis faktörü
- Akustik gürültü

Yük parametreleri

- Güç faktörü
- Kalkış momenti ve akımı
- Harmonik seviyeleri
- Bağlantı şekli (doğrudan ya da dolaylı)
- Yük tipi : Omik, endüktif ya da kapasitif, sabit ya da değişken, aktif ya da pasif
- Yükün zamana göre değişimi

Kendinden uyarma süreci

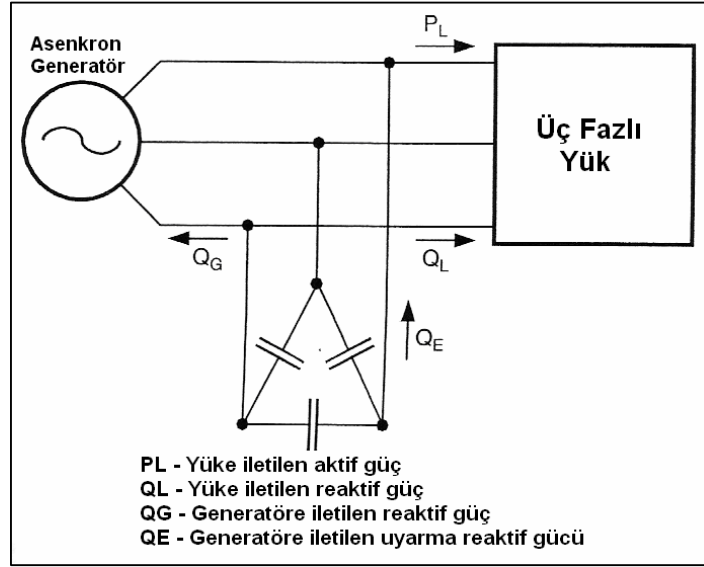
- Kapasite seçimine bağlı olarak doyum derecesi
- Sabit ya da kontrollü kendinden uyarma kapasitesi
- Hız kontrolü

Birincil enerji kaynağı

- Hidro
- Rüzgar
- Biyokütle
- Güneş

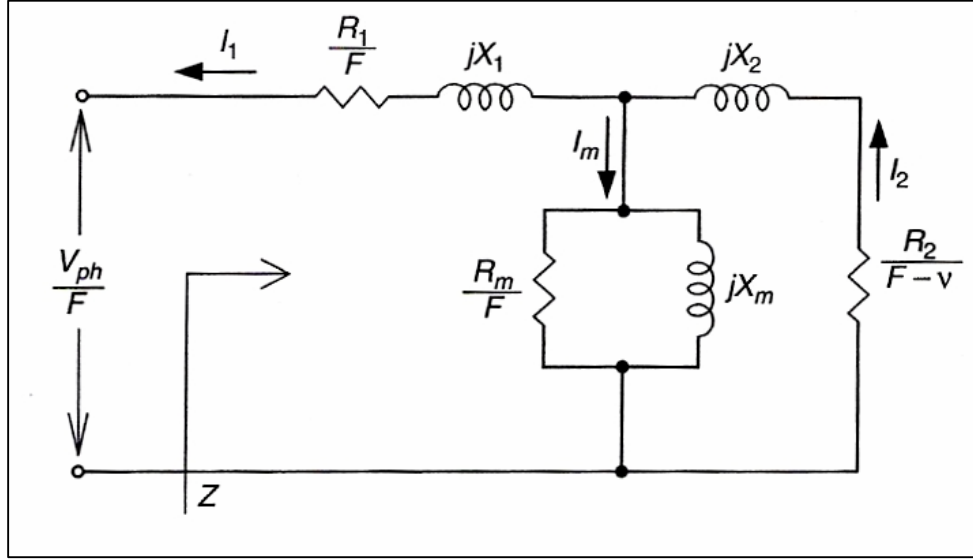
Elektronik güç dönüştürücüleri gibi lineer olmayan yükler, çeşitli kontrol teknikleri ile iyileştirme yapılmazsa, değişken güç faktörüne sahip olup, çalışma anında şebekeden sinusoidal olmayan akım çekerek harmonik üretirler. Harmoniklerin azaltılması, yük girişlerine pasif filtre bağlanması ya da cihazın çalışma biçimine göre ileri kontrol algoritmaları ile güç faktörü düzeltme yaparak sağlanabilmektedir.

Genel olarak pasif filtrelerin maliyeti, karmaşık algoritmalar içeren elektronik frekans ayarıyla yapılan hız kontrolünden çok daha azdır. Şebekeden bağımsız elektrik santrallerinde kendinden uyarma kapasitesi ya da yükün elektronik kontrolü bu tür uygulamalara elverişlidir. IEEE 519 Standartlarında tek fazlı ve üç fazlı asenkron motorlarda harmonik oranı % 2 (N kategorisi hariç) ve yüksek verim için % 3 olarak belirlenmiştir (H ve D).



Şekil 3.5 Kendinden uyarmalı asenkron generatör devresi

Elektrik santrallerinde bağımsız çalışma durumunda, reaktif güç ihtiyacını karşılamak için asenkron generatörün uçlarına bir kapasite grubu bağlantısı gereklidir. Pratikte motorun her fazı başına bir kapasitenin $\Delta - \Delta$ ya da $Y - Y$ bağlanması tavsiye edilir. İhtiyaç duyulan kapasite birincil enerjiye ve ani yüke bağlıdır.



Şekil 3.6 Asenkron generatör tek faz eşdeğer devresi

Kendinden uyarmalı bir asenkron generatör için Şekil 3.6, per unit değerli eşdeğer devre bir elektrik santralini temsilen yazılabilir. Makinanın parametrik değerlerinin ölçüldüğü baz frekansının (f_b) dışında çalışılacaksa; frekansın reaktans üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun için F per unit frekans değeriye, kendinden uyarma frekansı (f_{exc}) ve baz frekansı (f_b) (genellikle 50 Hz) arasında bir 3.21 eşitliği kurulabilir.

$$F = \frac{f_{exc}}{f_b} = \frac{\omega_{exc}}{\omega_b} \quad (3.21)$$

$$X = F \omega L \quad (3.22)$$

Daha genel olarak, baz frekansı için endüktif reaktans parametresi X , 3.22 eşitliğindeki gibi tanımlanabilir. Şekil 3.6'da asenkron generatörün tüm devre parametrelerinin F ile bölünmüş değerlerinin faz başına kalıcı hal eşdeğer devresi görülmektedir. Rotor direnci tanımından R_2/s değerini düzeltmek için 3.23 eşitliğindeki düzenlemeler yapılabilir, rotor ve statordaki p.u. frekans değişimleri göz önüne alınırsa n_r rotor hızının p.u. cinsinden değeri olup rotorda kullanılan test hızına karşılık gelir.

$$\frac{R_2}{Fs} = \frac{R_2}{F \left(1 - \frac{n_r}{n_s}\right)} = \frac{R_2}{F - v} \quad (3.23)$$

Asenkron generatörde geçici rejim olaylarından kaynaklanan, manyetik doyuma bağlı olarak mıknatıslanma reaktansının değişimi de hesaba katılır.

3.4 Mıknatıslanma Eğrileri ve Kendinden Uyarma

Mıknatıslanma eğrisi (doyum ya da uyarma eğrisi) kullanılan demire, çekirdek boyutlarına, genel geometriye ve bobin sarımlarına doğrudan bağlıdır. Başka bir deyişle, asenkron generatör karakteristikleri, stator sargılarından geçen belirli bir mıknatıslanma akımı için uç gerilimini belirler. Mıknatıslanma eğrisi genelde polinom ya da lineer olmayan bir ifadeyle 3.24 ve 3.25 eşitliklerindeki gibi temsil edilir.

$$L_m = a_0 + a_1 V_{ph} + a_2 V_{ph}^2 + a_3 V_{ph}^3 + a_4 V_{ph}^4 \quad (3.24)$$

$$X_m = F \omega_s L_m = \frac{V_g}{I_m} = F(K_1 e^{K_2 I_m^2} + K_3) \quad (3.25)$$

Belirli bir frekansta çıkış geriliminin fonksiyonu olarak asenkron generatörün çalışmasının tanımlanması için bir I_m mıknatıslanma akımına gerek vardır. Bu akımın belirlenmesinde, motor yüksüz olarak çalıştırılır ve akım, uç gerilimi değişiminin bir fonksiyonu olarak ölçülür. Mıknatıslanma akımı eğrisi, sıfır akımda, makinanın demir histeresiz eğrisinde, test başlamadan önce bulunan kalıcı mıknatıslanma değerinden başlar.

Asenkron generatör ile DC generatör karşılaştırılırsa, asenkron generatördeki uyarma kapasitesi DC generatördeki uyarma alanı direncine karşılık gelmektedir. Şönt DC generatör kalktığında, alandaki kalıcı mıknatıslanmanın ürettiği ilk gerilim bir alan akımı üretir, aynı akım daha fazla alan gerilimi üretir ve demir çekirdek doyanaya kadar bu şekilde devam eder.

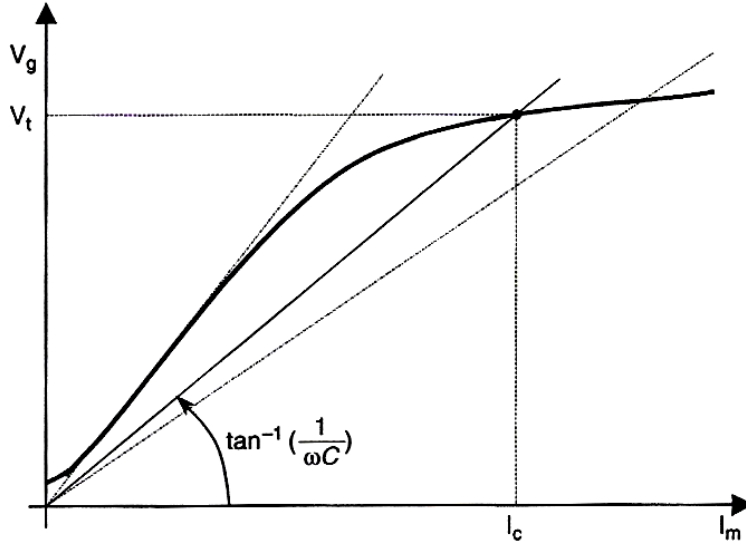
Demirdeki kalıcı mıknatıslanmanın endüklediği küçük gerilim, kapasitif bir akım üretir. Bu akım artan bir gerilim endükler, aynı gerilim de; manyetik alan demir doyumuna ulaşana kadar, kapasitif akımda daha yüksek bir artış sağlar. Kalıcı mıknatıslanma olmadan, DC generatör ve asenkron generatör gerilim üretemez.

Kalıcı mıknatıslanmayı kaybetmek çok zordur, asgari bir miktar her zaman mevcuttur.

Buna rağmen mıknatısıyeti bütünüyle kaybetme durumunda, geri getirmek için dört yaygın yöntem mevcuttur.

1. Makina yüksüz ve yüksek hızlarda kalıcı mıknatısıyet yeniden oluşana kadar döndürülür, ancak aşırı durumlarda bu yöntem mümkün değildir.
2. Makinanın sarımlarından birinde ani akım yükselmesi oluşturmak için pil kullanılır.
3. Şarj edilmiş yüksek kapasiteli bir kapasitör ile 2. yöntemdeki ani akım yükselmesi elde edilir.
4. Şebekeden beslenen bir doğrultucu, 2. yöntemdeki pil yerine geçecek şekilde kullanılır.

Şebekeden izole çalışmada Şekil 3.7'deki asenkron generatörün mıknatıslanma eğrisi gösterilmektedir.

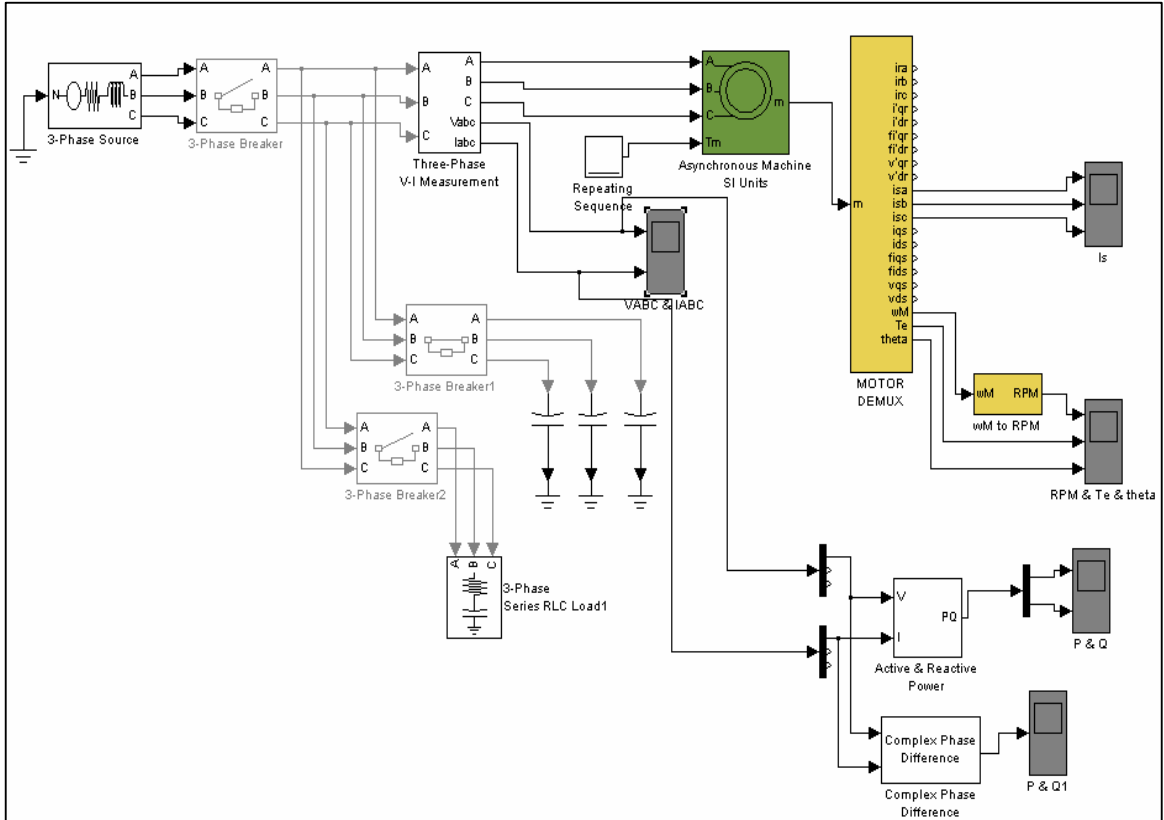


Şekil 3.7 Kendinden uyarımalı asenkron generatörün mıknatıslanma eğrisi

4. Kendinden Uyarımalı Asenkron Generatör Sisteminin MATLAB / Simulink Simulasyonu

Kısa devre rotorlu asenkron generatörlerin rüzgar türbinlerinde kullanılması çok yaygın olarak görülen bir uygulamadır. Kısa devre rotorlu elektrik makinaları, basit, güvenilir ve ucuz olup bakım onarım giderleri düşüktür. Genellikle bu tip generatörler, sabit frekanslı şebekeye doğrudan senkronize edilirler. Sabit frekanstaki çalışmada, asenkron generatör küçük miktarlardaki kayma dışında sabit hızda çalışmaktadır. Rüzgar türbini sadece dar bir rüzgar hızı aralığında optimum verimde çalışır. Değişken hız uygulaması rüzgardan elde edilen enerji miktarını arttıracığı gibi, mekanik aksamdaki moment dalgalanmalarını ve generatör uçlarında oluşan gerilim ve akım dalgalanmalarını da azaltacaktır.

5 kW nominal güce sahip bir kendinden uyarımalı asenkron generatörün simulasyonu MATLAB / Simulink programı kullanılarak öncelikle sistemin Simulink'te Şekil 4.1'deki gibi kurulması ile yapılmıştır.



Şekil 4.1 MATLAB / Simulink simulasyon blok diyagramı

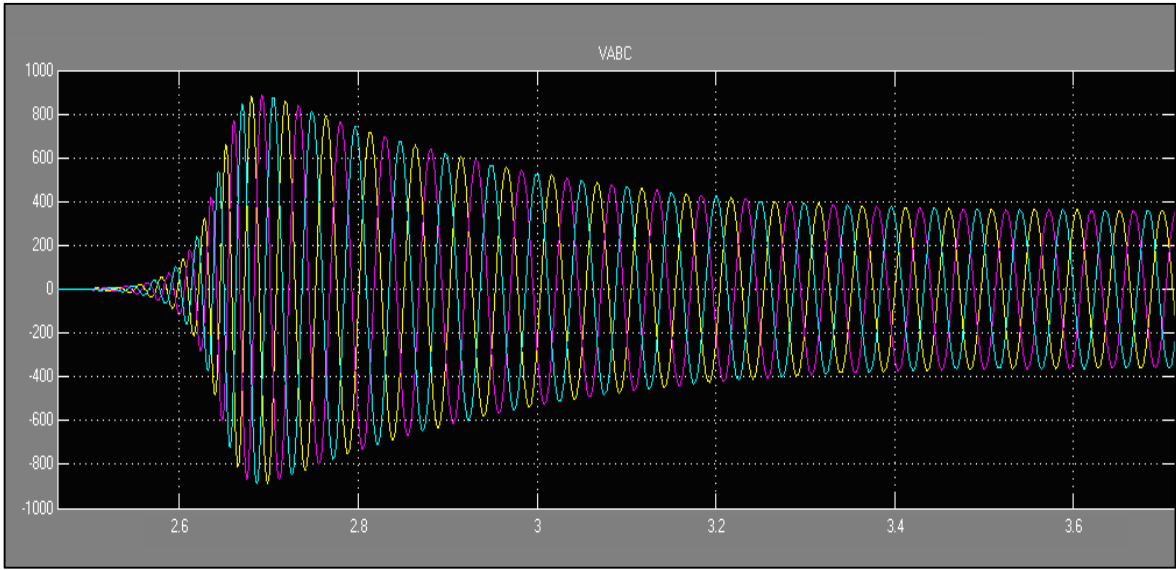
Simulasyonda kullanılan asenkron makinanın nominal gücü, frekansı, stator ve rotor endüktansları gibi parametreleri, elektrik makinası üreten firmaların katalog değerlerine göre belirlenmiştir. Şekil 4.2’de elektrik makinasına ait parameterlerin MATLAB ortamında simulasyon için gereken giriş diyalog kutusu gösterilmiştir.

Şekil 4.2 Asenkron makina parametreleri

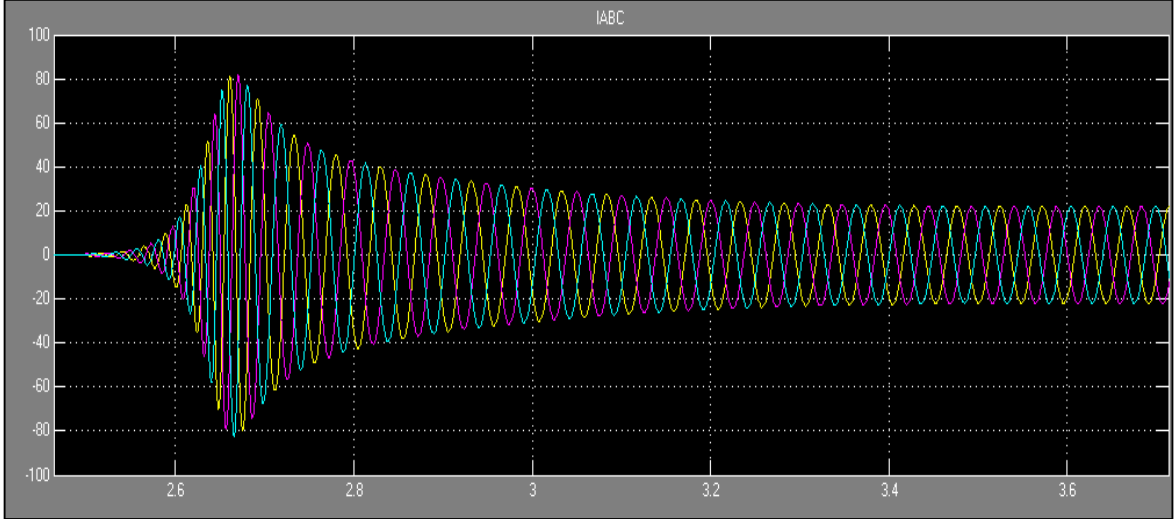
Generatörün elektrik üretebilmesi için çıkışına gereken faz farkını sağlayarak, uyarma alanını oluşturan yıldız kapasite grubu bağlanmıştır. Çıkış frekansı, kayma, çıkış gerilimi ve sistemin çalışma aralığı, seçilen kapasite grubunun değerlerine göre farklılık göstermektedir.

Simulink ortamında anlık simulasyon değerlerinin görüntülenmesi için grafik gösterim modülleri kullanılmıştır. Generatörün miline negatif moment uygulanarak, makinanın dışarıdan rüzgar türbini tarafından sabit moment ile tahrik edildiği kabul edilmiştir.

Simulasyon sonuçları, generatör uçlarında oluşan gerilim Şekil 4.3 ve generatörden çekilen akım Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



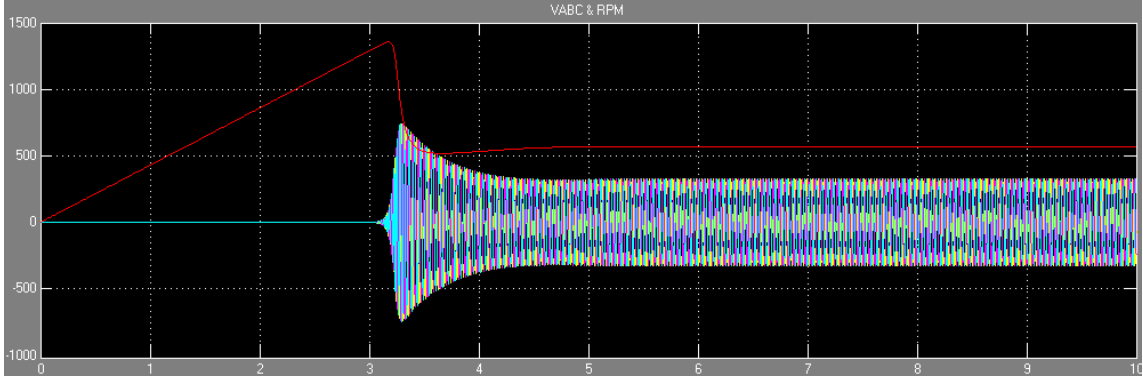
Şekil 4.3 Generatör uçlarındaki gerilim



Şekil 4.4 Generatör çıkış akımı

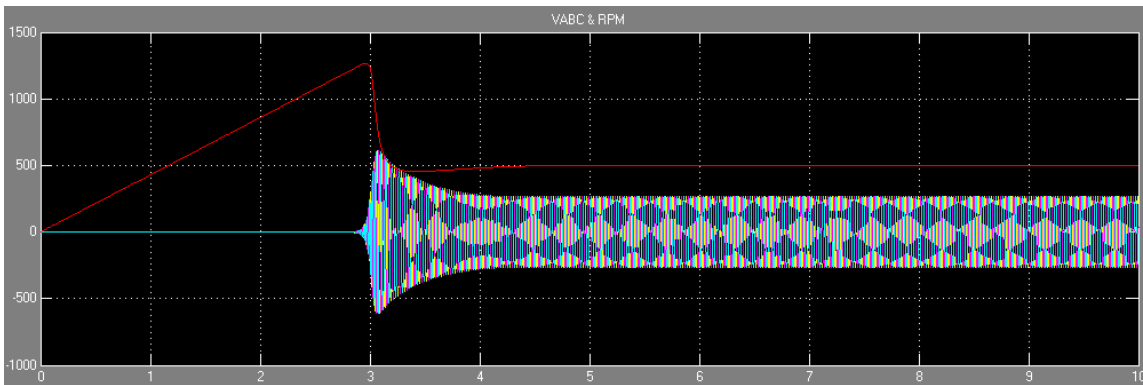
Generatör uçlarında gerilimin oluşması, makina üzerindeki artık mıknatısiyet, çıkışına bağlanan kapasite grubunun değeri ve çıkışa bağlanan yüke bağlıdır. Şekil 4.5'te makina uçlarına bağlanan 800 uF'lık üçgen kapasite grubu için ölçülen hız ve gerilim değerleri

gösterilmiştir. Makina durağan halden hızlanarak yaklaşık 1375 devir/dakika değerine geldiğinde $t = 3.2$ s anında, kısa bir sürede çıkış gerilim ve akımı yükselerek, rotor hızı 575 devir/dakika değerine düşmüştür.



Şekil 4.5 800 uF kapasite grubu ile generatör hızı ve uç gerilimi

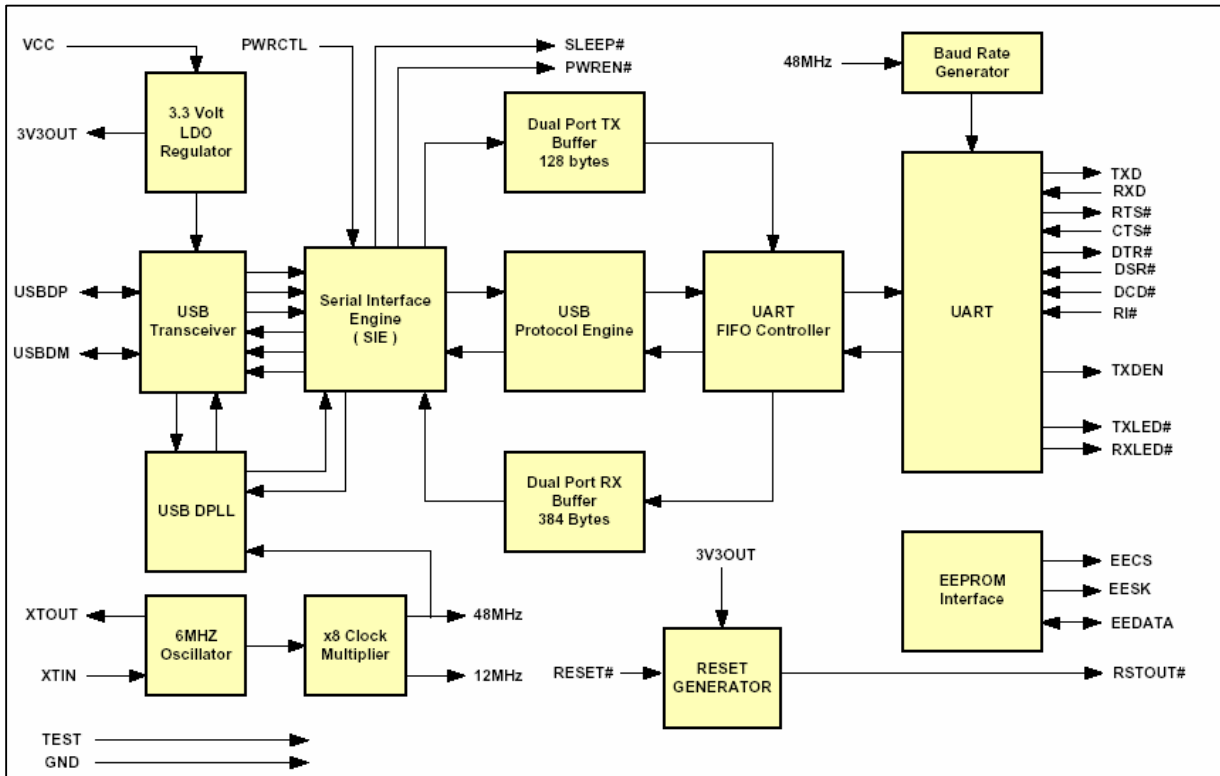
Kapasite değerlerinin artırılması sonucunda uyarma alanı daha kolay oluşturacağından gerilimin üretilmesi işlemi daha düşük devirlerde başlamaktadır. Ancak kapasitenin arttırımı, motor uçlarından çekilen reaktif gücü arttıracığından uygun bir çalışma noktası seçilmelidir. Ayrıca gerilim oluşumunun başladığı andan itibaren yükselme, nominal gerilimin 1.3 – 1.6 katına ulaşma, ardından nominal gerilime düşüş dikkate alınmalıdır. Şekil 4.6'da 1000 uF değerindeki kapasite için ölçülen hız ve gerilim değerleri görülmektedir. Makina durağan halden hızlanarak yaklaşık 1250 d/d değerine geldiğinde $t = 2.8$ s anında, kısa bir sürede çıkış gerilim ve akımı yükselerek, rotor hızı 500 d/d değerine düşmüştür.



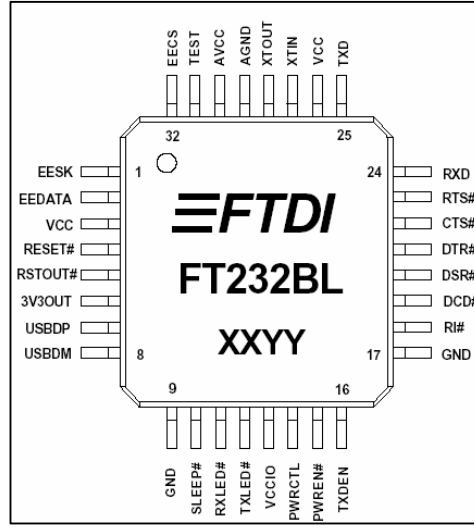
Şekil 4.6 1000 uF kapasite grubu ile generatör hızı ve uç gerilimi

5. Veri Toplama Amacıyla DSP Tabanlı Mikrodenetleyici Kullanılarak USB Üzerinden Bilgisayarda Gerçek Zamanlı Ölçüm Sisteminin Gerçekleştirilmesi

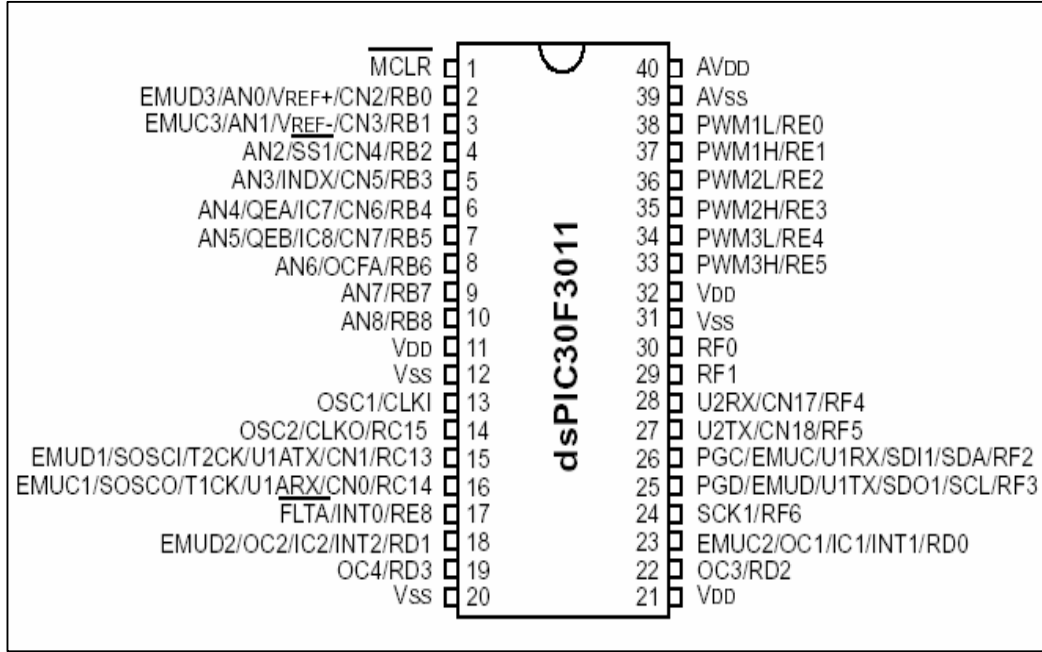
Kendinden uyarmalı asenkron generatörün, geçici hal parametrelerinin izlenip, kayıt edilmesi amacıyla universal seri arabirim (USB) üzerinden bilgisayar ortamında çalışan gerçek zamanlı bir veri toplama sistemi gerçekleştirilmiştir. Eşzamanlı olarak altı kanal (üç adet gerilim ve üç adet akım), yüksek frekansta örnekleneceğinden dolayı, bilgisayar ortamına bilginin hızlı bir şekilde aktarılması gerektiğinden haberleşme arabirimi olarak universal seri arabirim kullanılmıştır. Seri haberleşme ve analog ölçümün dijitale dönüştürmesi işlemleri için Şekil 5.3'deki Microchip firmasının dsPIC30F3011 kodlu DSP Mikrodenetleyicisi kullanılmış, bu işlemciye ait yazılım "C" ve "Assembler" dillerini destekleyen Microchip MPLAB 8.10 IDE yazılım geliştirme programında yazılmıştır. dsPIC30F3011'de USB arabirim bulunmadığından FTDI firmasının FT232 kodlu Seri Port – USB dönüştürücü arabirim entegresi kullanılmıştır. FT232 'nin blok şeması Şekil 5.1'da gösterilmiştir. FT232'nin bağlantı şeması Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 FTDI FT232 USB arabirim entegresi blok şeması

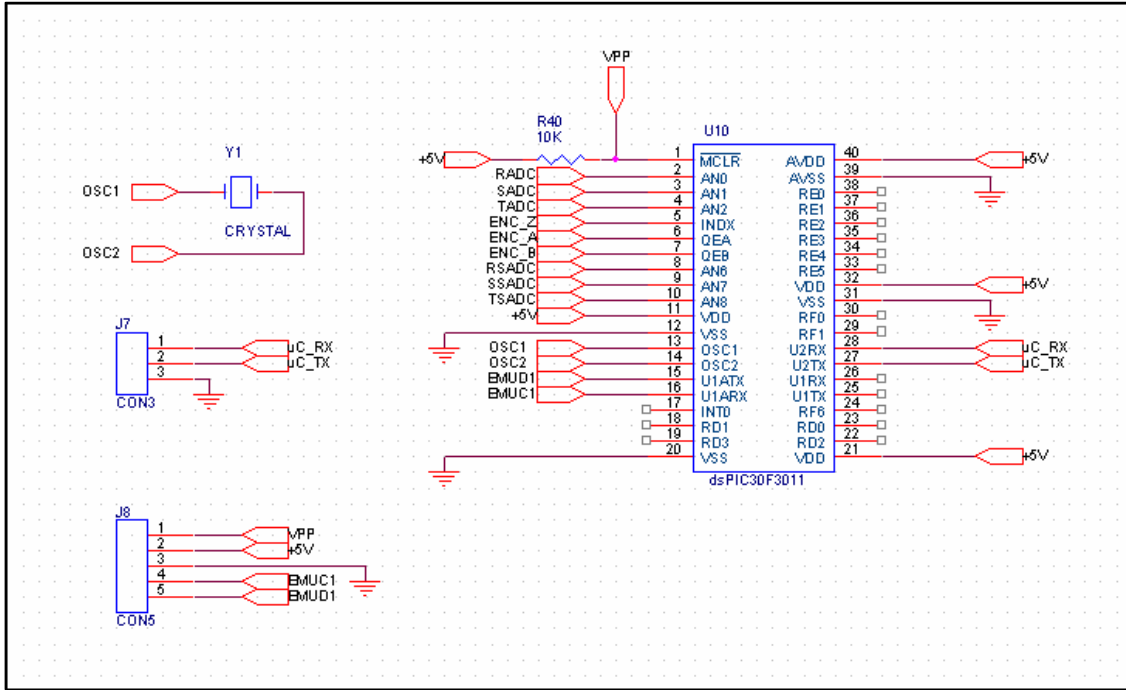


Şekil 5.2 FTDI FT232 USB arabirim entegresi pin bağlantıları



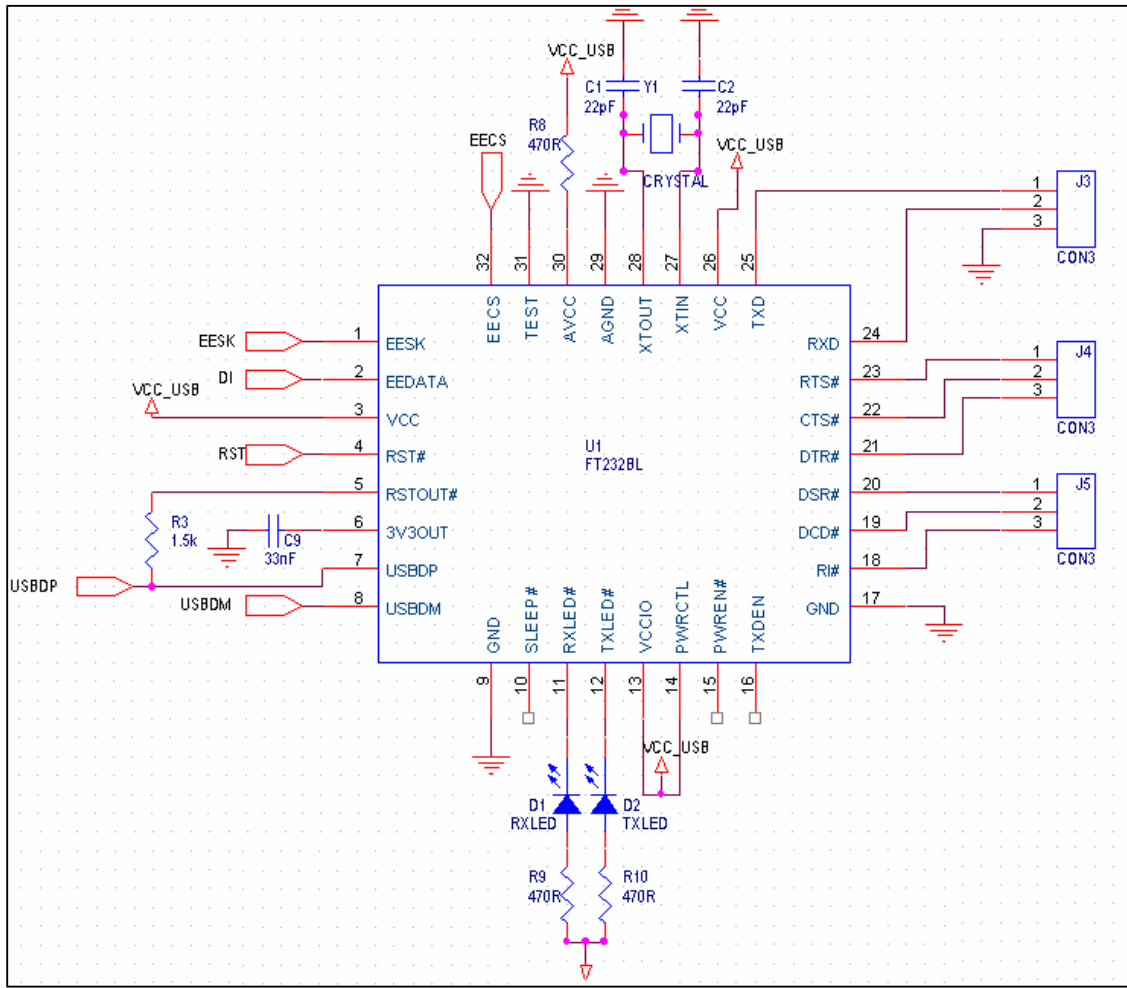
Şekil 5.3 Microchip firmasının dsPIC30F3011 kodlu DSP entegresi

FT232 entegresi, Windows XP ortamında sürücülerini yardımıyla sanal bir seri port açarak, USB arabirimini kullanımlarını sağlamaktadır. dsPIC ile FT232 bağlantısı, TTL (0-5V) olarak RX ve TX pinlerinin bağlantısı ile gerçekleştirilir. Şekil 5.4'de ölçüm sistemine ait donanımın dsPIC arayüzü gösterilmiştir.



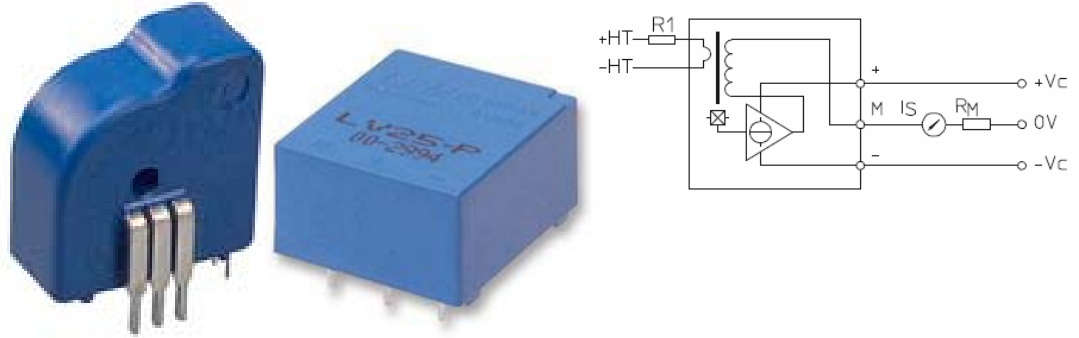
Şekil 5.4 dsPIC30F3011 devre şeması

FT232 entegresi, çalışabilmesi için çeşitli elemanlara ihtiyaç duyar. 6 MHz'lik bir kristal, işlemcinin çalışmasını ve ayrıca 8 x PLL ile oluşturulan 48 MHz'de USB haberleşmesi ve dsPIC haberleşmesi için gereken baud hızlarının oluşturulmasında kullanılır. RX ve TX ledleri, haberleşmenin gösterimi amacıyla konulmuştur. Şekil 5.5'de ölçüm sisteminin USB arayüzü olan FT232 devre şeması verilmiştir.



Şekil 5.5 FT232 devre şeması

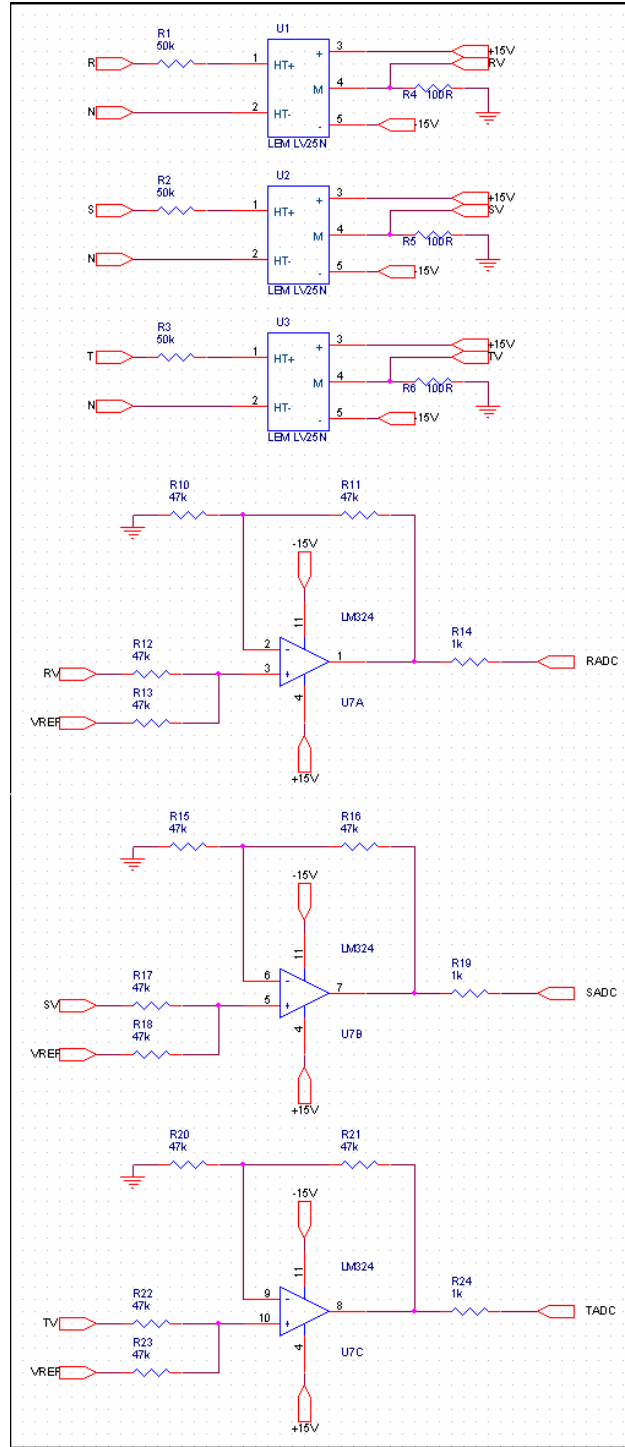
Ölçüm sisteminde elde edilmek istenen akım ve gerilim değerlerinin, izole bir şekilde mikrodenetleyici tarafından alınması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı, izoleli üç adet akım ve izoleli üç adet gerilim sensörü devrede yer almaktadır. LEM firmasına ait olan akım sensörleri LTS - 6NP modeli, aynı firmaya ait gerilim sensörleri LV - 25P modelidir.



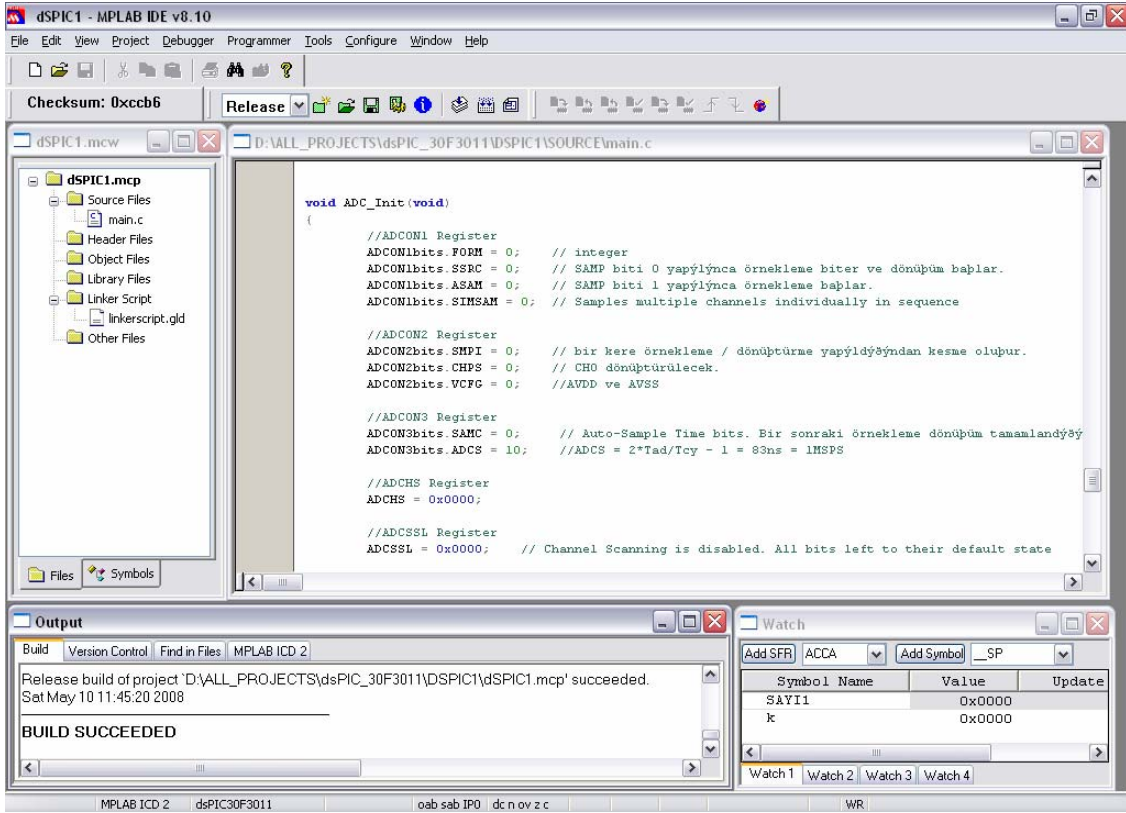
Şekil 5.6 LEM LTS-6P ve LV-25-NP sensörleri

LTS – 6 NP akım sensörleri, sıfır akımda 2.5 V verecek şekilde, Analog Dijital Dönüştürücülere (ADC) uygun bir biçimde tasarlanmıştır. Nominal akımı 15 A'e kadar olan yüklerle uygulanabilmektedir.

LV – 25P gerilim sensörü ise ± 500 V okuma aralığında, iç yapısı itibarıyla gerilimi akıma dönüştürerek akım okuması yapmaktadır. Bu sebepten giriş uçlarına, 50 kohm'luk bir giriş direnci konulmuştur. Ayrıca sensör çıkışı, akım olarak verildiğinden çıkışına 100 ohm'luk direnç konularak akım gerilime dönüştürülür. dsPIC mikrodenetleyicisinin ADC giriş aralığı 0–5 V olduğundan, LM324 OpAmp toplayıcı devresi kullanılarak 2.5 V referans gerilimi ile toplanmış ve Şekil 5.7'deki sinyal uygunlaştırma devresi yapılmıştır. 2.5V referans olarak Linear Technologies firmasının LT1461 – 2.5 V referans entegresi kullanılmıştır.



Şekil 5.7 LEM LV-25-NP sensörleri sinyal uygunlaştırma devresi



Şekil 5.8 Microchip MPLAB 8.10 ve ADC başlangıç fonksiyonu

dsPIC30F3011 üzerinde dokuz adet 10-bit ADC bulunup, 1 MS/s gibi yüksek hızlarda örnekleme yapabilmektedir. dsPIC gömülü yazılımı, başlangıçta seri port ve ADC ayarlarını yapıp, aktive ederek, bilgisayardan komut beklemeye geçer. Bilgisayar tarafından başla komutu olan "A" karakteri geldiğinde altı kanalın ADC okumasını 20 uS gibi bir sürede tamamlayıp, değerleri bilgisayara atar. Bu işlem bilgisayar tarafından dur komutu olan "Z" karakteri gelene kadar devam eder. Şekil 5.10'da programın genel akış şeması verilmiştir. Şekil 5.8'de ADC başlangıç fonksiyonu, şekil 5.9'da UART başlangıç fonksiyonu gösterilmiştir.

```

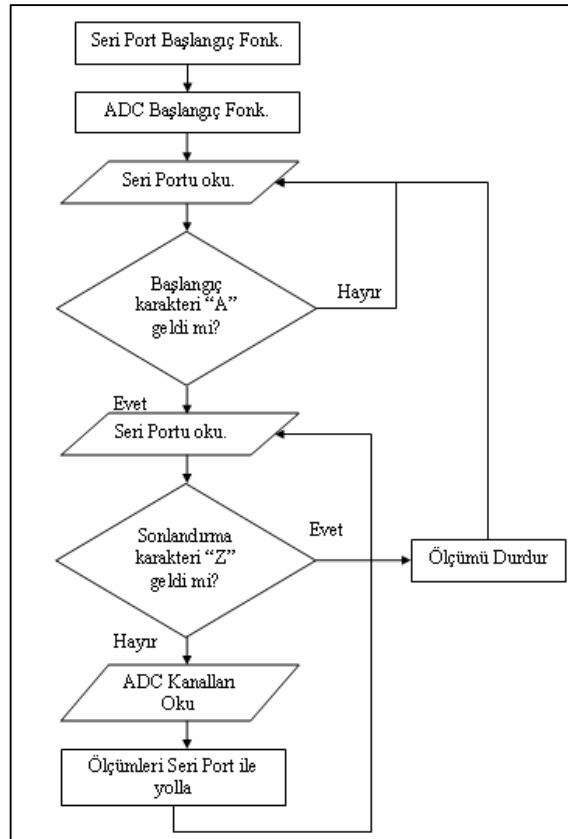
//Turn on the A/D converter
ADCON1bits.ADON = 1; //This is typically done after configuring other registers
}

//*****
void UART_init(void)
{
    U2BRG=1; // Baudrate 1 Mbit/s

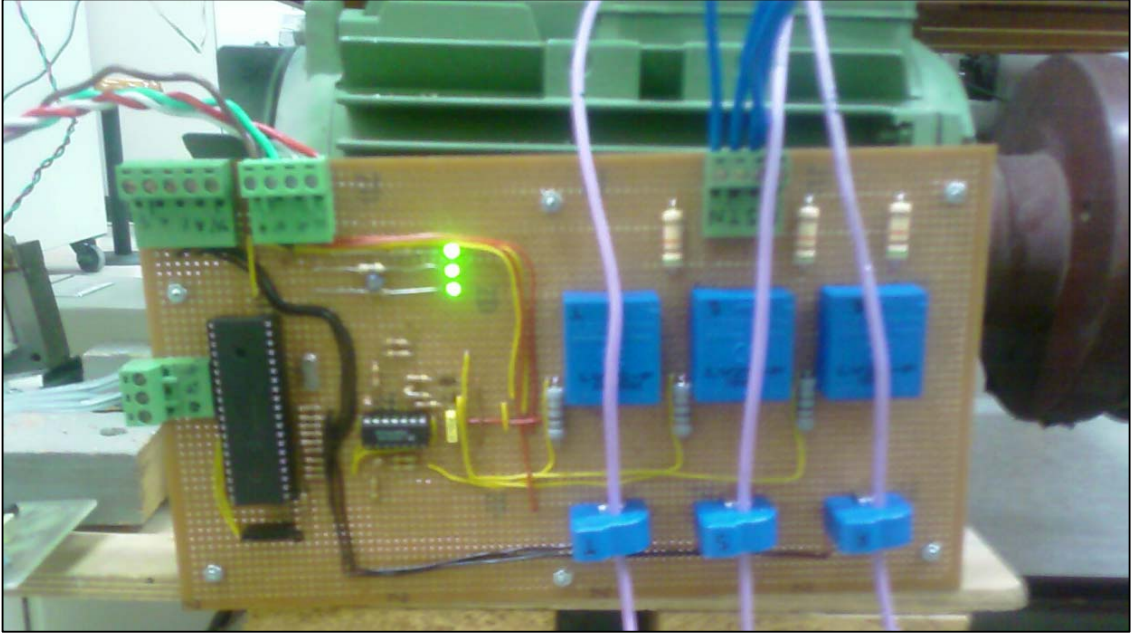
    IPC6bits.U2TXIP=0x003; // UART TX interrupt öncelikleri
    IPC6bits.U2RXIP=0x002; // UART RX interrupt öncelikleri
    U2STA = 0;
    U2MODE = 0x8800; // UART 8-bit veri, parite yok, 1 STOP biti
    U2STAbits.UTXEN=1; // Enable transmit
    IEC1bits.U2TXIE=1; // Transmit interrupt aktif..
    IEC1bits.U2RXIE=1; // Receive interrupt aktif..
    IFS1bits.U2RXIF = 0; // Receive Interrupt Bayragi Temizlenir..
    IFS1bits.U2TXIF = 0; // Transmit Interrupt Bayragi Temizlenir..
}

```

Şekil 5.9 Microchip MPLAB 8.10 ve seri port başlangıç fonksiyonu



Şekil 5.10 dsPIC yazılımı genel akış şeması



Şekil 5.11 Veri toplama sistemi donanımı

Şekil 5.11’de veri toplama sistemi donanımı gösterilmektedir. Motorun yıldız noktası referans alınarak, sırasıyla R,S ve T gerilimleri J1 klemensine, aynı fazlara ait kablolar ise akım sensörleri içerisinde geçirilerek monte edilmiştir. J2 besleme klemensine ise Şekil 5.12’de gösterilen güç kaynağı bağlanarak devreye enerji sağlanmıştır.

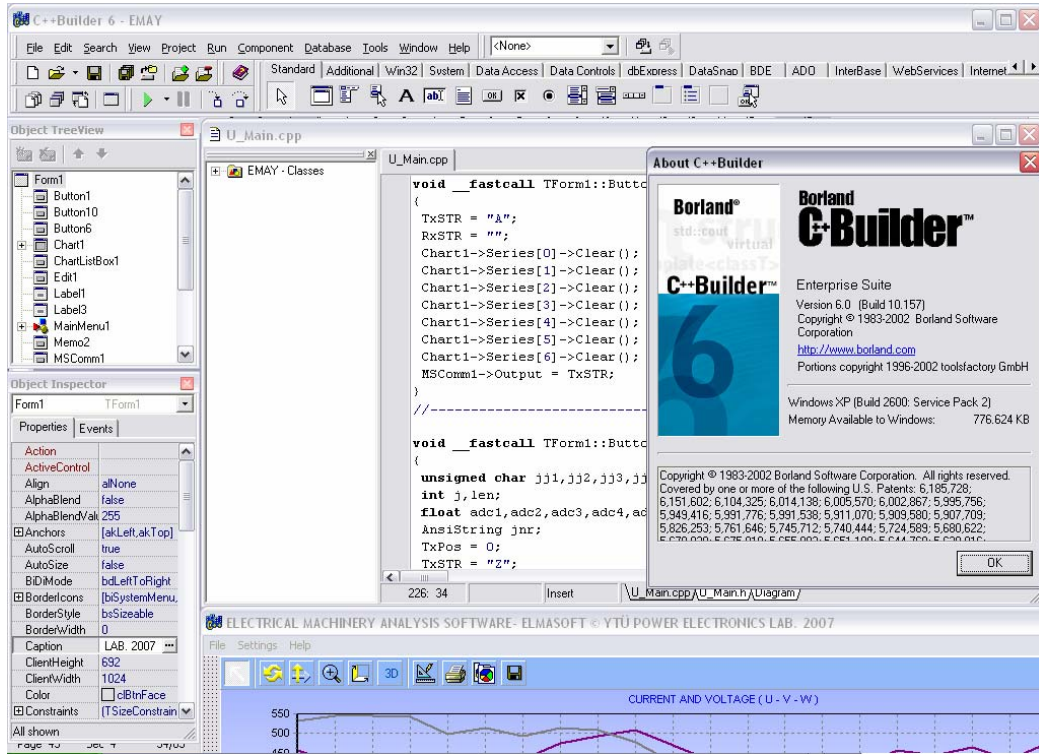


Şekil 5.12 +15V, +5V, -15V 3A çıkışlı güç kaynağı

6. Bilgisayar Üzerinde, Windows XP İşletim Sistemi ile Çalışan, DSP ile USB Veriyolundan Haberleşen bir Kullanıcı Arayüz Yazılımının Gerçekleştirilmesi

Veri toplama sistemi ölçümleri başlatabilmek ve gösterebilmek için bilgisayar üzerinde çalışan bir kullanıcı arayüzüne ihtiyaç duyar. Windows XP işletim sistemi ile çalışan arayüz, Elektrik Makinaları Analiz Yazılımı, Şekil 6.1'deki Borland firmasının C++ Builder 6 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.2'de yazılıma ait ana ekran görüntüsü ve Bölüm 7'de incelenen Kendinden Uyarımlı Asenkron Generatör devresine ait örnek ölçüm gösterilmiştir.

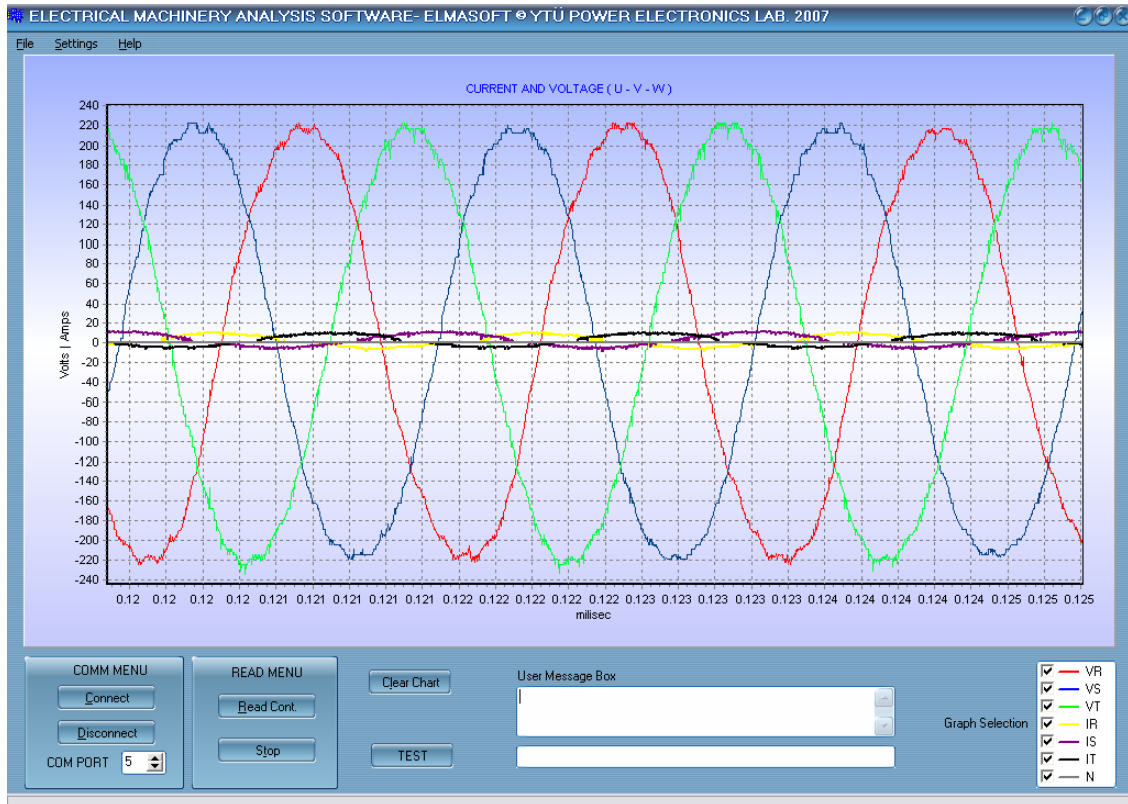
Program, Windows'un MS Comm Controls ActiveX bileşeni kullanarak, Veri Toplama Ünitesi ile universal seri arabirim üzerinden haberleşme özelliğine sahiptir. Ölçüm tamamlandıktan sonra, altı kanalın eşzamanlı olarak ekranda gösterimi gerçekleştirilir. Grafiklerin ve ölçüm değerlerinin kayıtları kullanıcı isteğine göre resim, metin ya da Microsoft Excel formatında saklanarak, daha sonradan tekrar erişebilmesi, ya da MATLAB ortamına aktararak detaylı analiz yapmasına olanak sağlanmıştır.



Şekil 6.1 Borland C++ Builder 6 Programı

Ana ekranda bir adet grafik, seri port ayarlarının yapıldığı bir panel, okuma ve durdurma işlemlerinin yapıldığı diğer bir panel ve kullanıcının bilgilendirilmesi amacıyla bir mesaj kutusu bulunmaktadır.

dsPIC mikrodenetleyicisinin göndermiş olduğu ADC dönüşümlerin sonuçları, 9 baytlık paketler olacak şekilde alınarak, 10-bitlik üç adet gerilim ve üç adet akım bilgileri sensörlerin dönüştürme oranları ve ADC'nin gerilim referansına göre hesaplanır. Hesaplanan değerler, grafik üzerindeki serilere aktarılarak, ekranda gösterimi sağlanır. Grafikselleştirme, kullanıcının istekleri doğrultusunda ayarlama imkanı sağlayarak, grafiği büyütme, küçültme ya da kaydırabilme özelliğine sahiptir.



Şekil 6.2 Veri toplama ünitesine ait elektrik makinaları analiz yazılımı

7. 1.5kW Kendinden Uyarımlı Asenkron Generatör Uygulaması

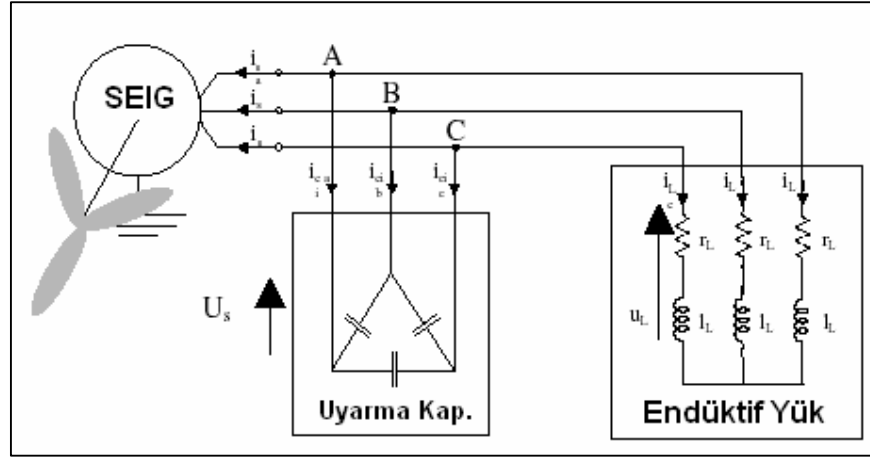
Kısa devre rotorlu asenkron generatörün, kendinden uyarımlı çalışması laboratuvarında yapılmıştır. Şekil 7.1’de sistemde kullanılan elektrik makinasının ve kapasite grubunun özellikleri verilmiştir.

Kısa Devre Rotorlu Asenkron Makina

- $U_n = 380$ (V) Y – 220 (V) Δ
- $I_n = 3.9$ (A) Y - 6.0 (A) Δ
- $P_n = 1.5$ (kW)
- $\cos\phi = 0.77$
- $3 \sim f = 50$ (Hz) $n = 1400$ (d/d)

Üçgen Bağlı Kapasite Grubu

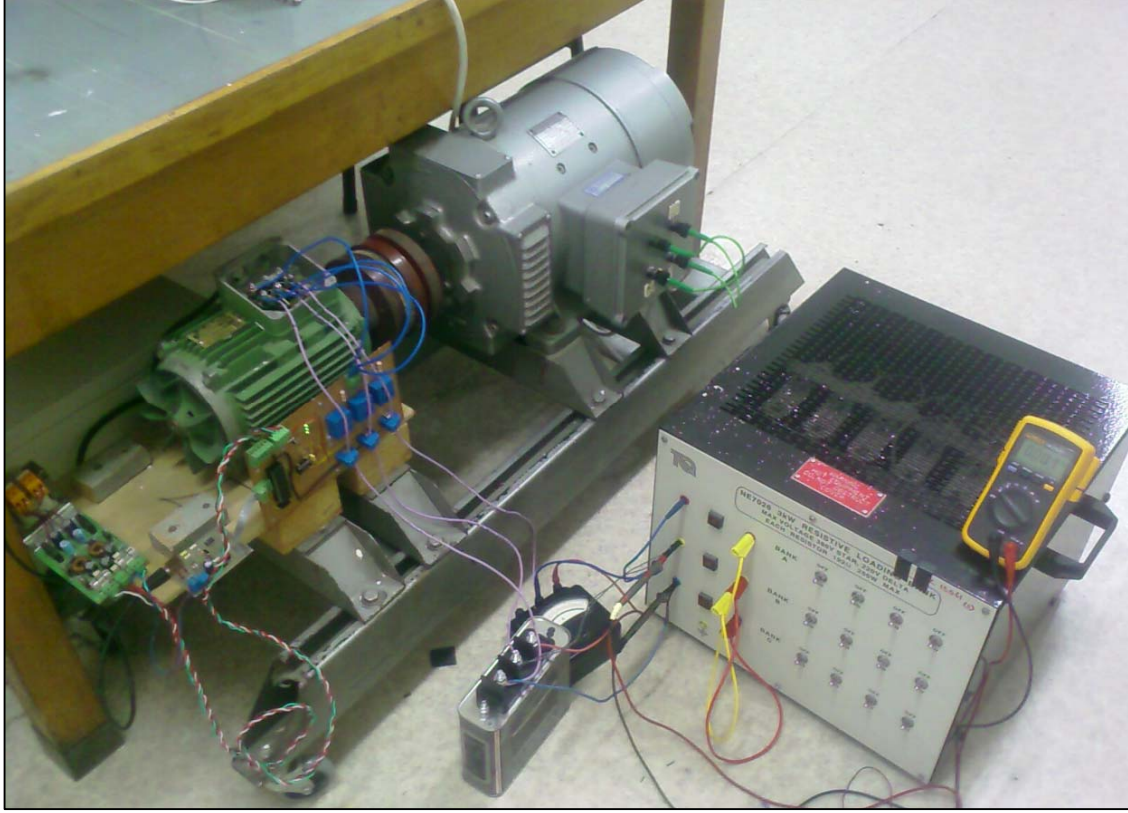
- $U_n = 400$ (V)
- $F = 50$ (Hz)
- $I_n = 14.5$ (A)
- $C = 200$ uF x 2 = 400 uF
- $Q = 7,5$ kVAR



Şekil 7.1 Kısa devre rotorlu asenkron generatör deney devresi

Kısa devre rotorlu asenkron generatör deneyinde, rüzgar türbinini temsil eden kontrollü DC şönt motor, asenkron generatörün miline akuple edilmiştir. Generatör çıkış uçlarına üçgen kapasite grubu bağlanmıştır. Akım ve gerilim ölçümleri, gerçekleştirilen veri toplama sistemi ve yazılımı, ayrıca generatör çıkışına bağlanan akım ve gerilim sensörleri ile yapılmıştır.

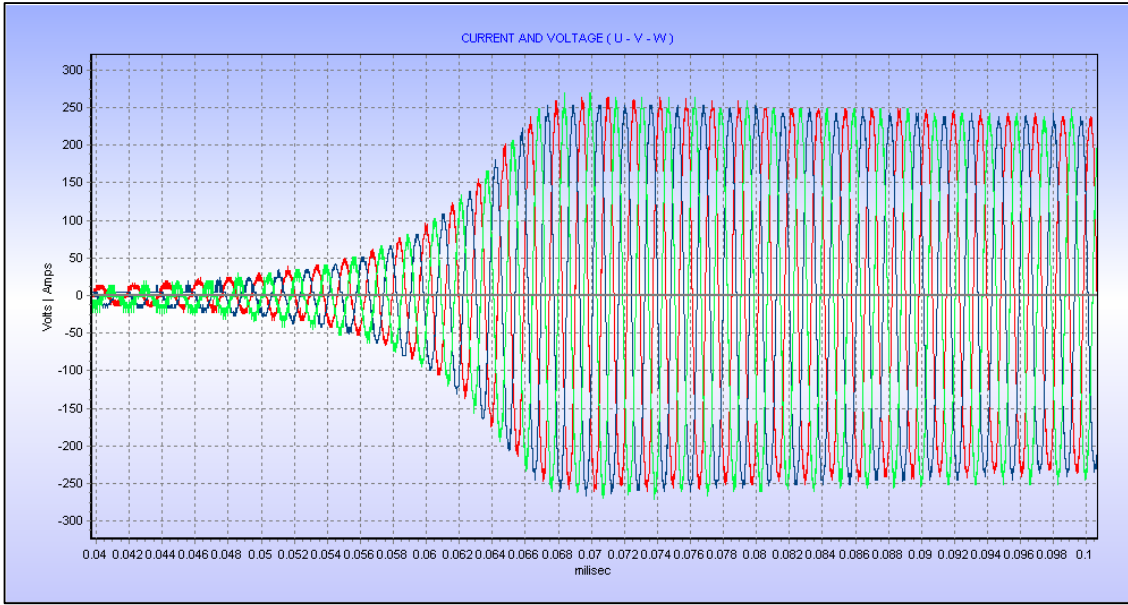
Çıkışa kademe ayarlı omik-endüktif yük bağlanarak generatörün çıkışı kademeli olarak yüklenerek çekilen aktif ve reaktif güçler, gerilim ve akım değerleri, devir sayısı faz farkı ve frekans ölçülmüştür.



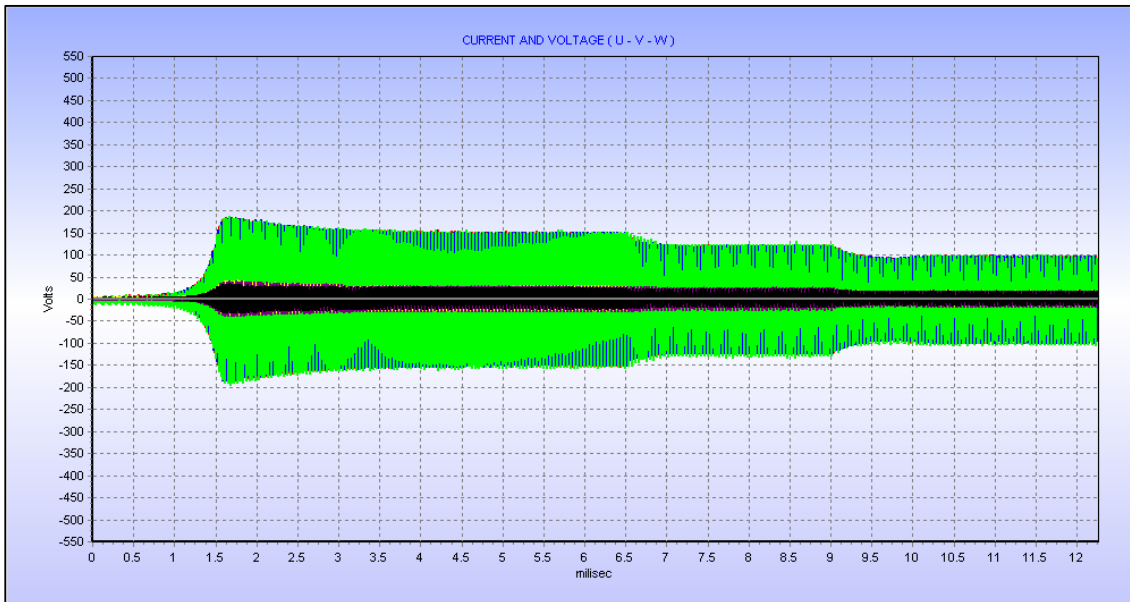
Şekil 7.2 Kısa devre rotorlu asenkron generatör deney devresi

Yapılan deney sonucunda, kendinden uyarımalı asenkron generatör, yapısal özellikleri ve seçilen kapasite grubuna göre değişen tam sinüzoidal gerilim üretebileceği görülmüştür. Üretimin başladığı belirli bir hız değeri bulunmaktadır. Yüksüz çalışma durumunda akım ile gerilim arasındaki faz farkı 90° 'dir. Deneyden önce yapılan MATLAB / Simulink simulasyon sonuçları ile ölçülen değerler arasında büyük benzerlikler bulunmaktadır.

Şekil 7.3 ve şekil 7.4'de ölçülen değerlerin generatörün stator gerilimleri ve akımları verilmiştir.



Şekil 7.3 Stator faz-nötr gerilimleri



Şekil 7.4 Stator gerilim ve akımları

Şekil 7.4'te stator gerilimleri ve akımları verilmiş olup, $t = 6.5$ s anında 250W'lık omik-endüktif yük devreye alınmış, $t = 9$ s anında ikinci 250W'lık paralel omik-endüktif yük devreye alınmıştır. Her iki yükün devreye alınması esnasında gerilim ve akımda düşüş gözlenmiştir.

Çizelge 7.1'de, üç değişik kapasite değeri için yapılan test ve ölçüm değerleri bulunmaktadır. Buradan yola çıkarak kendinden uyarmalı asenkron generatörün çıkışına bağlanan kapasite değerinin değişimi bütün sistemin karakteristiğini değiştirmekte olduğu anlaşılmaktadır. Bu değer arttıkça generatör çıkış gerilimi, başlangıç devir sayısı, çıkış akımı ve çekilen reaktif güç artmakta olup, çıkış frekansı aynı hız değerleri için düşmektedir.

Çizelge 7.1 Uyarma kapasitesine bağlı değişimler

	C1		C2		C3	
Kapasite (uF)	3 x 10		3 x 16.6		3 x 33.3	
Güç (kVAR)	1.5		2.5		5.0	
Gerilim (V)	400		400		400	
Akım (A)	2.1		3.6		7.2	
	Boşta	750 W Yük	Boşta	750W Yük	Boşta	750W Yük
Gerilim (V)	180.00	-	200.00	146	230.00	150
Akım (A)	1.50	-	2.70	2.80	4.00	4.20
Güç (W)	3.00	-	4.00	3 x 127.0	8.00	3 x 126.0
R.Güç (VAR)	3 x 285.0	-	3 x 436.0	3 x 263.0	3 x 685.0	3 x 476.0
Φ (°)	89.8	-	89.9	65	89.7	75.16
n (d/dak)	1350	-	1220	1094	1100	972
Frekans (Hz)	43	-	37.7	34.0	33.3	32.1
nstart (d/dak)	1210	-	970	-	650	-

Makina yüklendikçe uyarma alanı da zayıfladığından çıkış gerilimi düşmekte ve belirli bir kapasite değerinin altında makina çıkış gerilimi sıfıra düşmektedir. Bu olay, makinanın yüklü kalkışı sırasında da benzer şekildedir. Makinada yeterli uyarma alanı oluşmadığından çıkış gerilimi oluşmaz. Bu durumda özel kontrol yöntemleri uygulanarak başlangıçta uyarma kapasitesi artırılır, çıkış gerilimi oluştuktan sonra kapasite değeri tekrar normal değerine düşürülür ve çalışma sağlanır.

8. Sonuçlar

Bu çalışmada rüzgar enerji sistemleri incelenmiş ve 1.5 kW'lık kendinden uyarmalı asenkron generatör ile şebekeden bağımsız çalışan sistemin bir uygulama devresi gerçekleştirilmiştir. MATLAB / Simulink modelleri kullanılarak yapılan simülasyon ile gerçekleştirilen devreden alınan sonuçların uyum içinde olduğu görölmüştür. Uygulama devresinden alınan sonuçlar, geliştirilen USB tabanlı veri toplama sistemi ile bilgisayara aktarılarak değerlendirilmiştir.

Kendinden uyarmalı asenkron generatör basit ve güvenilir olması, bakım ihtiyacının bulunmaması, kısa süreli aşırı yüklenme kabiliyeti, mekanik dayanıklılığı, maliyetinin düşük olması gibi nedenlerden dolayı rüzgar türbinlerinde tercih edilmektedir. Kendinden uyarmalı asenkron generatörün en önemli problemi, stator mıknatıslanma alanını oluşturabilmek için uyarmaya ihtiyaç duymasıdır. şebekeden bağımsız çalışma durumunda gerekli uyarmanın sağlanması için çıkışa kapasite grubu bağlanır. Kapasite grubunun değeri makine parametrelerine göre belirlenir.

Uygulama devresinde seçilen farklı kapasite grupları ile enerji üretimi ve rotor devri arasındaki ilişki incelenmiştir. Kapasite değeri ile generatör çalışmaya başlama hızı arasında ters orantı olduğu gözlenmiştir. Kendinden uyarmalı asenkron generatöre bağlanan kapasite değeri sistemin karakteristiğini değiştirmekte olup, kapasite seçimine göre çıkış geriliminin genliği ve frekansı, rotor devrine göre değişmektedir. Kapasite değerinin büyük seçilmesi durumunda generatör çıkış gerilimi, başlangıç hızı, çıkış akımı ve çekilen reaktif güç artmakta, çıkış frekansı aynı rotor hız değerleri için düşmektedir.

Boşta çalışmada yapılan deneyler sonucunda çıkış gerilimi ve akımı arasında 90° 'lik faz farkı olduğu ve generatörün boşta çalışmada kapasitif enerji sağladığı gözlenmiştir. Rotor devri sabit ve generatör gerilim üretmekte iken yük aniden devreye alındığında uyarma alanının zayıflayarak çıkış gerilim ve frekansının düştüğü gözlenmiştir. Makinanın yüklü kalkışı sırasında da benzer problemler oluşmaktadır. Yapılan alışmalar neticesinde generatör çalışmanın sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesi için başlangıçta yüksek değerli bir kapasite grubunun devreye alınması ve çalışma başladıktan sonra kapasite değerinin tekrar normal değerine düşürölmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. (2001) *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd/Inc., Chichester.

Carlson, O., Hylander, J., Thorborg, K. (1996) ‘Survey of Variable Speed Operation of Wind Turbines’, in 1996 European Union Wind Energy Conference, Sweden, pp. 406–409.

Dubois, M. R., Polinder, H., Ferreira, J. A. (2000) ‘Comparison of Generator Topologies for Direct-drive Wind Turbines’, in IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, IEEE, New York, pp. 22–26.

Hansen, L. H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner, H., Sørensen, P., Bak-Jensen, B. (2001) *Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines, Risø-R-1205(EN)*, Risø National Laboratory, Denmark.

Hansen, J. C., Lundsager, P., Bindner, H., Hansen, L., Frandsen, S. (1999) ‘Keys to Success for Wind Power in Isolated Power Systems’, paper presented at the European Wind Energy Conference, Nice, France, March 1999.

Johnson L. Gary (2006) ‘*Wind Energy Systems*’ Prentice Hall, Manhattan Kansas USA.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D. (2002) *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, John Wiley & Sons Inc., New York.

Mohan N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. (1989) *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, Clarendon Press, Oxford, UK.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] www.awea.org American Wind Energy Association

[2] www.ewea.org European Wind Energy Association

[3] www.windpower.org Danish Wind Industry Association

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	09.07.1982	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1997-2000	FMV Ayazağa Işık Lisesi
Lisans	2000-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Yayınlar

[1] S.Fouzey, S. El-Barbari, W.Hoffman, C.Unsalver (2005) ‘A new space vector modulation scheme for three phase four wire inverter for standalone photovoltaic systems’ EPE 2005, European Conference on Power Electronics and Applications.

Çalıştığı kurumlar

2002-2003	Mak Bilişim ve Güvenlik Sistemleri Ltd.
2003-2005	Scanrotor Otomotiv Tic. A.Ş.
2005-Devam Ediyor	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü Güç Elektroniği ve Kontrol