

153 625

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİNDEN UYARTIMLI İNDÜKSİYON GENERATÖRÜ  
(SEIG) İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ GERİLİM DENETLEYİCİ  
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Remzi SÜERKAN**

**Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Faruk ARAS**

**HAZİRAN 2004**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KENDİNDEN UYARTIMLI İNDÜKSİYON GENERATÖRÜ  
(SEIG) İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ GERİLİM DENETLEYİCİ  
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Remzi SÜERKAN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Haziran 2004**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Haziran 2004**

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Faruk ARAS

(...*Faruk Aras*...)

Üye

Doç.Dr. Osman GÜRDAL

(...*Osman Gürdal*...)

Üye

Yrd. Doç. Dr. Mustafa YEĞİN

(...*Mustafa YeğİN*...)

**HAZİRAN 2004**

# KENDİNDEN UYARTIMLI İNDÜKSİYON GENERATÖRÜ (SEIG) İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ GERİLİM DENETLEYİCİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

**Remzi SÜERKAN**

**Anahtar Kelimeler :** İndüksiyon generatörü, SEIG, Gerilim denetleyici,

**Özet:** Bu tezde, rüzgar türbinlerinde kullanılan kendinden uyartımlı indüksiyon generatörü (self excited induction generator - SEIG) için tasarlanan ve laboratuvar ortamında test edilen düşük maliyetli bir gerilim denetleyici sunulmaktadır. Öncelikle rüzgar türbinleri tanıtılmakta ve bu türbinlerde kullanılan generatörlere ilişkin temel bilgiler verilmektedir. Daha sonra SEIG 'in eşdeğer devre modeli ve eşitlikleri sunulmaktadır. 1.1 kW AC sürücü, 1 kW üç fazlı motor, 750 W, 380 V, 3000 rpm generatör, 380/90 V transformatör, AC/DC dönüştürücü ve denetleyiciden oluşan deney düzeneği laboratuvar ortamında kurularak test edilmiştir. Tasarlanan ve kurulan denetim sistemi ayrıntılı olarak tanıtılmakta ve denetleyici ana parametrelerinin belirlenme kriterleri açıklanmaktadır. Tasarlanan sistemin performansının farklı yük ve uyartım kapasitesi durumlarında testi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile, bu tip bir denetim sisteminin ucuz, kolay gerçekleştirilebilir ve uygulanabilir olduğu sonucuna varılmaktadır.

# DESIGN AND PERFORMANCE TEST OF A LOW COST VOLTAGE CONTROLLER FOR SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR

**Remzi SÜERKAN**

**Keywords:** Induction generator, SEIG, Voltage controller

**Abstract:** In this thesis, design and performance test of a low cost voltage controller for self excited induction generator (SEIG) widely used in isolated wind turbine power applications is presented. First, fundamentals of wind power, wind turbines and generators are explained. In addition, equivalent circuit model and equations of SEIG are given. Afterwards, an experimental system, which consist of a 1.1 kW AC driver, a 1 kW induction motor, 750 W, 380 V, 3000 r.p.m. induction generator, a 380/90 V transformer, an AC-DC converter and a controller are installed in laboratory. The details of designed and tested voltage control system are introduced and its main parameters are also determined. Performance of designed system is tested for different loading and excitation capacitance configurations and the obtained data are analyzed and evaluated. The result indicate that the system is cheap and simple in application for remote small wind power turbines.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Şebekeden uzak ve küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılan kendinden uyarımlı indüksiyon generatörlerinin yüksüz veya yüklü durumdaki çıkış gerilimleri, generatörün devir sayısı ve uyarım kondansatörlerinin değerine bağlıdır. Düşük güçlü sistemlerde devir sayısını ve generatör frekansını sabitlemek maliyeti arttırmaktadır. Bu sebeple gerilimi istenilen aralıklarda tutabilmek için uyarım kapasitesini ayarlamak daha uygun olmaktadır.

Bu tezde tasarımı yapılan ve gerçekleştirilen denetleme sisteminin performansını belirlemek için indüksiyon generatörü, farklı devirlerde, yüksüz ve yüklü durumda çalıştırılarak her devir kademesi için uyarım kondansatörleri kapasitesi değiştirilmiştir. Ölçüm yapılan her devir sayısında sistem üzerinden gerekli değerler alınmıştır. Alınan bu değerler yardımıyla generatörün performansını belirleyen karakteristik eğrileri çizilmiştir. Sistemin çıkış geriliminin yük ve akümülatör gerilimi değeri aralıklarında ayarlanabileceği görülmüştür.

Denetim sisteminin daha da geliştirilerek kontrol kalitesinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu konuyla ilgili olarak yapılacak olan çalışmaların ileriki yayınlarda verilmesi planlanmaktadır.

Tez çalışmalarım süresince öneri ve desteğini esirgemeyen danışmanım Yrd.Doç.Dr.Faruk ARAS, çalışma arkadaşım Recai ÇAKAN ve Özcan ATLAM'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xii
TABLolar DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1. GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. RÜZGAR ENERJİSİ.....	5
2.1. Güç Üretim Sınırı.....	5
2.2. Rüzgar Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi .....	8
2.2.1. Weibull dağılımı .....	8
2.2.2. Rayleigh dağılımı .....	10
2.3. Rüzgar Türbinleri .....	11
2.3.1. Rüzgar türbinlerinin yerinin belirlenmesi .....	11
2.3.2. Rüzgar türbin tipleri .....	13
2.3.2.1. Darrieus rüzgar türbinleri .....	13
2.3.2.2. Savonius rüzgar türbinleri .....	13
2.3.2.3. Klasik rüzgar türbinleri .....	15
2.3.3. Türbin kanat çapına göre elde edilecek güç değeri .....	16
2.3.3.1. Engeller ve rüzgar akışı .....	18
2.3.4. Türbinlerin rüzgar alış yönleri .....	18
2.3.5. Rüzgar türbininin hız-güç ilişkisi .....	19
2.3.6. Rüzgar türbinlerinde güç ayarlanması .....	20
2.3.6.1. Dikey denetim .....	21
2.3.6.2 Yatay denetim .....	21
2.3.6.3. Kanat eğimi (Pitch) denetimi.....	23

2.3.6.4. Aerodinamik kanat denetimi.....	24
2.3.6.5. Yön saptırma (Yaw) denetimi.....	24
2.3.6.6. Çoklu denetim sistemi.....	24
2.3.7. Türbinlerin frenleme yöntemleri.....	25
2.3.7.1. Mekanik frenleme.....	26
2.3.7.2. Aerodinamik frenleme.....	26
2.3.7.3. Tüm frenleme yöntemlerinin birlikte kullanımı....	27
2.4. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler.....	27
2.4.1. Doğru akım paralel generatör.....	27
2.4.2. Alternatif akım generatörleri.....	29
2.4.2.1. Sabit mıknatıslı generatörler.....	29
2.4.2.2. Alternatif akım senkron generatörler.....	31
2.4.2.3. Kendinden uyarımlı indüksiyon generatörü.....	32
<b>BÖLÜM 3. KENDİNDEN UYARTIMLI İNDÜKSİYON GENERATÖRÜ MODELİ (SEIG) .....</b>	<b>33</b>
<b>BÖLÜM 4. KENDİNDEN UYARTIMLI İNDÜKSİYON GENERATÖRÜNÜN UYARTIM KAPASİTESİNİN DEĞİŞTİRİLEREK DENETİMİ .....</b>	<b>45</b>
4.1. Giriş.....	45
4.2. Sistemin Blok Diyagramı .....	46
4.2.1. Generatörün sürülmesi .....	48
4.2.2. İndüksiyon generatörü .....	48
4.2.3. Kapasite bankası .....	48
4.2.4. Denetleyici .....	49
4.2.4.1. Karşılaştırma devresi.....	49
4.2.4.2. Sayıcı devresi .....	49
4.2.5. Düşürücü transformator .....	50
4.2.6. Doğrultucu.....	51
4.2.7. Akümülatör Grubu.....	54
4.3. Generatörün Uyarım Kapasitesi.....	55
4.3.1. Uyarım kondansatörlerinin belirlenmesi.....	55

4.3.2. Kapasite değiştirme devresi.....	59
4.3.3. Kapasite gruplarının belirlenmesi.....	59
4.3.4. Kondansatör kademelerinin sıralanması.....	61
4.4. Denetim Devresi Eleman Değerleri.....	61
4.5. İşlemsel Yükseltici.....	64
4.5.1. İşlemsel yükselticinin devre değişkenleri.....	64
4.5.2. İşlemsel yükselticinin sıfırlama (Off-Set) ayarı.....	64
<b>BÖLÜM 5. SİSTEMDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR ve</b>	
<b>DEğERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>66</b>
5.1. Sistemin Boşta Çalıştırılması .....	66
5.2. Sistemin Yükte Çalıştırılması .....	69
5.3. Sonuç .....	79
<b>EK 1 .....</b>	<b>81</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>86</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>88</b>



## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$\omega_m$	: Endüvinin mekanik açısal hızı(rad/s)
$\Phi_p$	: Kutup başına manyetik akı miktarı
A	: Türbin kanatlarının süpürdüğü alan
A	: Türbin kanatlarının süpürdüğü alan
a, b, c	: 2. derece denklem çarpanları
c	: Weibull scala parametresi
C	: Kondansatör kapasitesi
$C_p$	: Güç katsayısı
E	: Generatörden alınan gerilim
$E_1$	: Çalışma frekansındaki hava aralığı gerilimi
$E_a$	: Hava aralığı gerilimi
$E_R$	: R fazı gerilimi
$E_{rem}$	: Artık mıknatısiyet gerilimi
$E_S$	: S fazı gerilimi
$E_T$	: T fazı gerilimi
$f_1$	: Stator çalışma frekansı
$f_r(v)$	: Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F_r(v)$	: Rayleigh toplam dağılım fonksiyonu
$f_w(v_w)$	: Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu
H	: Başvuru ölçüm yüksekliği
$H_o$	: Rüzgar hızı belirlenmek istenen yükseklik
$I_1$	: Generatör eşdeğer devre stator akımı
$I_2$	: Generatör eşdeğer devre rotor akımı
$I_a$	: Generatör endüvi akımı
$I_B$	: Batarya akımı
$I_C$	: Uyarım kondansatörü akımı
$I_f$	: Generatörün faz akımı

$I_h$	: Generatörün hat akımı
$I_L$	: Yük akımı
$I_m$	: Mıknatıslama akımı
$I_R$	: R fazı akımı
$I_u$	: Uyarım akımı
$X_{11}$	: Generatör eşdeğer devre stator endüktif reaktansı
$X_{21}$	: Generatör eşdeğer devre rotor endüktif reaktansı
$X_C$	: Generatör eşdeğer devre uyarım kondansatörü reaktansı
$X_m$	: Generatör eşdeğer devre mıknatıslanma reaktansı
$X_s+R_s$	: Stator sargı empedansı
$k$	: Weibull şekil parametresi
$k_s$	: Kutup sayısı, endüvi oyuk sayısı vb. değişkenlere bağlı sabit sayı
$L_m$	: Mıknatıslama endüktansı
$L_u$	: Uyarım sargısı endüktansı
$m$	: Türbinden geçen hava kütlesi
$n$	: Rotor devir sayısı
$\eta_g$	: Generatör verimi
$P$	: Rüzgarın taşıdığı güç
$p_1$	: Stator kutup sayısı
$P_{\text{çek}}$	: Manyetik nüve kaybı
$P_k$	: Kaybolan kinetik güç
$P_m$	: Türbinden alınan mekanik güç
$P_{\text{mek}}$	: Mekanik güç
$P_R$	: Direncin gücü
$Q_f$	: Faz başına reaktif güç
$Q_o$	: Toplam reaktif güç
$R_1$	: Generatör eşdeğer devre stator omik direnci
$R_{1L}$	: Stator devresi birleştirilmiş omik direnci
$R_2$	: Generatör eşdeğer devre rotor omik direnci
$R_a$	: Ayarlı direnç
$R_b$	: Batarya iç direnci
$R_{\text{çek}}$	: Manyetik nüve kaybını oluşturan omik direnç değeri

$R_f$	: Uyarım sargısı omik direnci
$R_{fb}$	: Geri besleme direnci
$R_g$	: Generatör endüvi direnci
$R_i$	: Giriş direnci
$R_L$	: Yük omik direnci
$R_m$	: Mıknatıslama devresine karşılık gelen omik direnç
$R_s$	: Seri direnç
$S_{1,2}$	: 2. derece denklem kökleri
$S_{max}$	: Maksimum kayma
$S_o$	: Generatörün Görünür gücü
$T$	: Bir periyot için geçen süre
$t_1$	: Bir faza ait gerilim eğrisinin başlangıç açısı $\pi/6\omega$ ( $30^\circ$ )
$t_2$	: Bir faza ait gerilim eğrisinin bitiş açısı $5\pi/6\omega$ ( $150^\circ$ )
$U$	: Dirence uygulanacak gerilim
$U_{DA}$	: Doğrultucu çıkış gerilimi
$v_w$	: Weibull Hızı
$V$	: Rüzgarın hızı
$V_1$	: Türbine yaklaşan rüzgarın hızı
$V_{10}$	: Generatör açık devre gerilimi
$V_2$	: Türbinden uzaklaşan rüzgarın hızı
$V_b$	: Batarya gerilimi
$V_c$	: Kondansatör gerilimi
$V_{et}$	: Gerilimin etkin değeri
$V_f$	: Generatörün faz gerilimi
$V_G$	: Generatör çıkış gerilimi
$V_h$	: Generatörün hat gerilimi
$V_L$	: Yük gerilimi
$v_m$	: Ortalama rüzgar hızı
$V_m$	: Gerilimin maksimum değeri
$\underline{V}_o$	: Ho yüksekliğindeki rüzgar hızı
$V_o$	: Doğrultucu çıkışından alınan ortalama gerilim
$V_{sf}$	: Sekonder sargısı faz başına gerilimi

$V'$  : Rüzgarın türbin kanatlarından geçme anındaki hızı  
 $v_w$  : Weibull Hızı  
 $X_c$  : Kondansatör reaktansı  
 $\rho$  : Havanın yoğunluğu

kWh : Kilo Watt Saat  
kW : Kilo Watt  
Hz : Hertz  
 $\mu$ F : Mikro Farad  
k $\Omega$  : Kilo Ohm  
AA : Alternatif Akım  
DA : Doğru Akım  
kVA : Kilo Volt Amper  
Ah : Amper Saat  
VAR : Volt Amper Reaktif  
emk : Elektro Motor Kuvvet  
d/d : Devir/Dakika  
SEIG : Self Excited Induction Generator

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Kayıp faktörünün alabileceği maksimum ve minimum değerler....	8
Şekil 2.2.	Weibull dağılım eğrisi .....	9
Şekil 2.3.	Darrieus rüzgar türbini .....	14
Şekil 2.4.	Savonius rüzgar türbini .....	15
Şekil 2.5.	Çok kanatlı rüzgar türbini .....	16
Şekil 2.6.	Rotor çapına göre çıkış gücü değişimi .....	17
Şekil 2.7.	Rüzgarın türbine yaklaşımı .....	19
	a-Önden yaklaşan rüzgar	
	b- Arkadan yaklaşan rüzgar	
Şekil 2.8.	Rüzgar türbini hız-güç eğrisi .....	20
Şekil 2.9.	Dikey denetim sistemi .....	21
Şekil 2.10.	Yatay denetim sistemi .....	22
Şekil 2.11.	Kanat eğimi (Pitch) denetimi .....	23
Şekil 2.12.	Bir türbinin iç yapısı ve denetim sistemi.....	25
Şekil 2.13.	Aerodinamik Frenleme Sistemi .....	26
Şekil 2.14.	DA paralel generatör ile batarya şarjı devresi .....	28
Şekil 2.15.	Sabit mıknatıslı generatörün iç yapısı .....	30
Şekil 2.16.	Sabit mıknatıslı generatör eşdeğer devresi .....	30
Şekil 3.1.	SEIG bir faza ait eşdeğer devresi .....	33
Şekil 3.2.	Basitleştirilmiş eşdeğer devre ve kendi kendine uyarımın karakteristik eğrisi .....	34
	a. Basitleştirilmiş eşdeğer devre	
	b. Gerilim değişimi	
Şekil 3.3.	SEIG'in empedans modeli .....	35
Şekil 3.4.	SEIG'in kayma ve frekansa göre eşdeğer devresi .....	37
Şekil 3.5.	SEIG'in basitleştirilmiş eşdeğer devresi .....	38
Şekil 3.6.	SEIG'in omik yüklü durumdaki vektör diyagramı .....	41
Şekil 4.1.	İndüksiyon generatörün kapasite denetimi blok diyagramı .....	47
Şekil 4.2.	Sistemin genel görünüşü .....	47

Şekil 4.3.	Karşılaştırmacı devresi .....	50
Şekil 4.4	Sayıcı denetim devresi .....	51
Şekil 4.5.	Üç fazlı yarım dalga doğrultucu .....	51
Şekil 4.6.	Düzeltilmek kondansatörünün takılmadığı ve takıldığı durum.....	54
	a-Doğrultucu diyotların yüklenme eğrileri	
	b-Gerilim düzeltme kondansatörü kullanıldığında elde edilen gerilim dalga şekli	
Şekil 4.7.	Kapasite denetim devresi .....	63
Şekil 4.8.	İşlemsel yükseltici sıfırlama (Off-Set) ayar devresi .....	65
Şekil 5.1.	Sistemin boş çalışma devre şeması .....	66
Şekil 5.2.	Yüksüz çalışmada generatör faz gerilimi .....	67
Şekil 5.3.	Yüksüz çalışmada doğrultucu çıkış gerilimi .....	68
Şekil 5.4.	Uyartım kondansatörlerinin çektiği akım değişimi .....	69
Şekil 5.5.	Sistemin yükte çalışma bağlantı şeması .....	70
Şekil 5.6.	Generatör gerilimi değişimi .....	71
Şekil 5.7.	Kondansatör akımı değişimi .....	71
Şekil 5.7.	Generatör akımı değişimi .....	72
Şekil 5.8.	Yük akımının değişimi .....	73
Şekil 5.9.	Generatör devir sayısının değişimi .....	73
Şekil 5.10.	Generatörün devir sayısından elde edilen frekans değişimi .....	74
Şekil 5.11.	Kondansatör reaktansından elde edilen frekans değişimi .....	75
Şekil 5.12.	Sürücü devir sayısı ile generatör devir sayısı arasındaki fark .....	75
Şekil 5.13.	Kondansatör reaktansının değişimi .....	76
Şekil 5.14.	Doğrultucu çıkış gerilimi ve denetim aralığı .....	77
Şekil 5.15.	Doğrultucu çıkış akımı .....	78
Şekil 5.16.	Doğrultucu çıkışından alınan gücün değişimi .....	79

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Türkiye'deki Elektrik Enerjisi Üretimi Planlaması .....	2
Tablo 2.1.	Pürüzlülük tipi ile pürüzlülük uzunluğuna bağlı $\alpha$ değerleri .....	18
Tablo 4.1.	Kondansatör Kademe Değerlerinin Sıralanışı .....	60
Tablo 5.1.	Sistemin boş çalışma ölçüm değerleri .....	81
Tablo 5.2.1.	Yükte çalışma ölçüm ve hesaplama değerleri (30 Hz- 35 Hz) .....	82
Tablo 5.2.2.	Yükte çalışma ölçüm ve hesaplama değerleri (40 Hz- 45 Hz) .....	83
Tablo 5.2.3.	Yükte çalışma ölçüm ve hesaplama değerleri (50 Hz- 55 Hz) .....	84
Tablo 5.2.4.	Yükte çalışma ölçüm ve hesaplama değerleri (60 Hz- 65 Hz) .....	85

## 1. GİRİŞ

Günümüzde dünyadaki toplam birincil enerji kaynaklarının yaklaşık % 90'ı fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Dünyadaki fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve bunların yakın bir gelecekte tükenecek olması, yenilenebilir enerji kaynakları arayışını hızlandırmaktadır. Avrupa birliğinin hedefi 2010 yılında toplam enerji tüketiminin % 15'ini yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasıdır (Gençoğlu, 2002).

Enerji üretimi ve kullanımı sırasında yaşanan çevre sorunları, eski teknolojilerin terk edilmesinin temel nedenlerinden biridir. Kömür, petrol ve doğalgaz santrallerinin kuruldukları bölgedeki çevresel etkileri yanında küresel olarak da tüm dünyayı tehdit eden etkileri de bulunmaktadır. Fosil yakıtlar yakıldığında atmosfere yayılan karbondioksit, kükürt dioksit, azot oksit, toz ve kurum yakın çevreyi kirletip ölümlere yol açarken, karbondioksit ve benzeri sera gazları küresel iklim değişikliğine sebep olmakta ve tüm dünya ülkelerinde yaşamı tehdit etmektedir.

21.yüzyıla girerken, artan nüfus ve sanayileşmeden kaynaklanan enerji gereksinimini özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin kısıtlı kaynaklarıyla karşılanamamakta, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki açık hızla büyümektedir. Bu durumda, kendi öz kaynaklarımızdan daha etkin biçimde yararlanmak giderek artan bir önem kazanmaktadır. Enerji talebindeki hızlı artışın karşılanmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarından en etkin ve verimli biçimde yararlanılmalıdır.

Bütün gelişmiş ülkeler, çevre dostu ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmaya olağanüstü bir önem vermektedir. Bu yönüyle gelecek yüzyıl, güneş ve rüzgar gibi tükenmez ve temiz enerji kaynakları kullanımında atılım yapılacak bir yüzyıl olma görünümündedir. Ancak, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak isimlendirilen bu alternatif kaynaklardan yararlanılması, hidrolik enerji dışında, teknolojik gelişmelerinin yeniliği ve geleneksel kaynaklarla ekonomik açıdan rekabet edebilme güçlükleri nedeniyle, bu güne kadar arzulanan düzeye ulaşamamıştır.



Bununla birlikte, jeotermal, pasif güneş, rüzgar ve modern biyokütle teknolojileri, bugün dünya enerji pazarlarında yer almaya başlamıştır.

Türkiye'nin Tablo 1.1'de verilen enerji durumu gözden geçirildiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının yeri ve önemi açıkça görülebilmektedir. Ancak hidrolik enerji dışında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı oldukça düşük düzeydedir ve bu enerji potansiyeli yeterince değerlendirilmemektedir. Özellikle, güneş ve rüzgar enerjisinin kullanımı, enerjisinin büyük kısmını ithal kaynaklardan karşılayan Türkiye'nin enerji bütçesine ciddi katkılar sağlayacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından doğru ve sağlıklı bir biçimde yararlanılması için gereken strateji, plan ve politikaların önemi giderek artmakta ve önemli boyutlara ulaşmaktadır. Türkiye'nin enerji durumu incelendiğinde fosil yakıtların birincil enerji üretiminin hemen hemen yarısını oluşturduğu görülmektedir. (EİE, 2003)

Tablo 1.1. Türkiye'deki Elektrik Enerjisi Üretimi Planlaması

Yıllar	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Nüfus (milyon kişi)	65	71	77	84	92	100
Enerji Üretimi (kWh)	118 10 <sup>9</sup>	236 10 <sup>9</sup>	472 10 <sup>9</sup>	944 10 <sup>9</sup>	1.540 10 <sup>12</sup>	2.160 10 <sup>12</sup>
Kişi Başına Enerji Kullanımı (kWh)	1815	3324	6129	11238	16740	21600
Kömür % (kWh) 10 <sup>6</sup>	28 33.040	10 23.600	5 23.600	0 -	0 -	0 -
Doğal Gaz % (kWh) 10 <sup>6</sup>	17 20.060	26 61.360	30 141.600	30 283.200	23 354.200	20 432.200
Fuel Oil % (kWh) 10 <sup>6</sup>	10 11.800	8 18.880	4 18.880	0 -	0 -	0 -
Nükleer % (kWh) 10 <sup>6</sup>	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -
Hidroelektrik % (kWh) 10 <sup>6</sup>	40 47.200	33 77.780	25 118.000	20 118.800	14 215.600	10 216.000
Rüzgar % (kWh) 10 <sup>6</sup>	2 2.360	10 23.600	14 66.080	26 245.440	26 400.400	20 432.000
Güneş % (kWh) 10 <sup>6</sup>	0 -	2 4.720	4 18.880	4 37.760	6 92.400	6 129.600
Hidrojen % (kWh) 10 <sup>6</sup>	0 -	2 4.720	8 37.760	10 94.400	22 338.800	35 756.000
Jeotermal % (kWh) 10 <sup>6</sup>	2 2.360	6 14.160	6 28.320	6 56.640	6 92.400	6 129.600
Biyoenerji % (kWh) 10 <sup>6</sup>	0 -	1 2.360	2 9.440	2 18.880	1 15.400	1 21.600
Atık Isı % (kWh) 10 <sup>6</sup>	1 1.180	2 4.720	2 9.440	2 18.800	2 30.800	2 43.200
Toplam %	100	100	100	100	100	100

Uluslararası çevre anlaşmasını imzalayan Türkiye, bu oranda fosil yakıt tüketmesi ile zor durumu düşecektir. Üstelik karbondioksit emisyonu bakımından da Avrupa topluluğunun oldukça gerisindedir. Bu durumda geleceğe donuk enerji planlamasında yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek bir zorunluluk olmaktadır.

Hidrolik dışında, güneş ve rüzgar enerjisinden olabildiğince yararlanmak gerekmektedir. Ancak güneş enerjisinin henüz rekabet edebilir düzeyde ticari olmaması, rüzgar enerjisinin kullanımında karşılaşılan zorluklar (rüzgar alan bölgelerin sınırlı olması, şebekeye bağlanma sorunları, rüzgar türbinlerinde kullanılan generatör ve mekanik aksamda karşılaşılan sorunlar) nedeniyle bu tip üretim şekli ancak şebekeden uzak, küçük uygulamalar için cazip olmaktadır.

Şebekeden ayrı rüzgar enerjisinin yerel uygulamalarında en önemli sorunlardan bir de kullanılan generatörün tipidir. Kullanılan generatör tipleri; doğru akım generatörü, sabit mıknatıslı generatör ve kendinden uyarımlı endüksiyon generatörü olarak sayılabilir. Bu generatörlerden kendinden uyarımlı asenkron generatör (literatürde kullanılan adı ile indüksiyon generatörü) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu generatörün kullanılmasının en önemli nedenleri, kolay bulunması, uzuz olması, bakıma çok az ihtiyaç göstermesi, kapasite değişimi veya devir sayısı kontrolü ile çıkış geriliminin ayarlanabilir olmasıdır. Ancak bu generatörün en önemli sorunlarından biri uyarım sorunu sabit uyarım kapasitesinde ve değişen hızlarda yükün uçlarındaki gerilimin belirli bir aralıkta sabit tutulmasıdır.

Kendinden uyarımlı generatörün uyarımı ve uyarım için kullanılan kapasite belirleme çalışmaları üzerine çok sayıda çalışma vardır. (Malik, 1987, Chan 1993). Ancak bu çok sayıda çalışmaya rağmen bu konu halen güncelliğini korumaktadır.

Bu tez çalışması, rüzgar türbinlerinde kullanılan kendinden uyarımlı generatör için gerilimi belirli aralıkta sabit tutan bir denetleyici üzerinedir. Çalışma yapılırken en önemli kriter düşük maliyetli bir sistem olmasıdır (Süerkan et al, 2003). Çünkü şebekeden uzak yerel uygulamalar genellikle küçük güçlüdür ve kullanılan üretim sisteminin ucuz olması gerekmektedir. Bu takdirde bu tip uygulamalar cazip

gelebilir. Bu amaçla tasarlanan sistem tanıtılmakta ve performans testlerine ilişkin analiz sonuçları verilmektedir.



## 2. RÜZGAR ENERJİSİ

### 2.1. Güç Üretim Sınırı

Rüzgar türbinleri rüzgarın taşıdığı enerjinin belirli bir kısmını yakalayıp kullanışlı hale getirebilirler. Türbine yaklaşan rüzgar, taşıdığı enerjinin bir kısmını türbine bırakarak yoluna devam eder. Eğer rüzgarın taşıdığı enerjinin tümü elde edilebilseydi rüzgar türbininin arkasında hiç hava akışı olmayacaktı. Türbine yaklaşan rüzgardaki enerji ile türbinden uzaklaşan rüzgardaki enerji arasında fark vardır. Bu fark “Betz Limiti” olarak adlandırılan bir değer ile belirlenebilmektedir (Johnson, 2001,).

Rüzgardan elde edilecek güç:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A \quad (2.1)$$

Burada ,

- P : Rüzgarın taşıdığı güç ( $m^2kgs^{-3}$ )  
ρ : Havanın yoğunluğu ( $kg / m^3$ )  
V : Rüzgarın hızı (m/s)  
A : Türbin kanatlarının süpürdüğü alandır. ( $m^2$ )

Bir rüzgar türbininden alınabilecek gücün yukarıda belirtildiği gibi bir sınırı vardır ve Betz Limiti olarak adlandırılır.

$$P_m = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot V^3 \right) = C_p \cdot P \quad (2.2)$$

Burada,

$P_m$  : Türbinden alınan mekanik güç (W)

$C_p$  : Güç katsayısıdır

Rüzgarın taşıdığı kinetik enerjinin tamamının mekanik enerjiye dönüşmesini sınırlayan  $C_p$  güç katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

Rüzgardaki kinetik enerji kaybı,

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.3)$$

Burada,

$P_k$  : Kaybolan kinetik güç ( $m^2 \text{ kg s}^{-3}$ )

$m$  : Türbinden geçen hava kütlesi (kg)

$V_1$  : Türbine yaklaşan rüzgarın hızı (m / s)

$V_2$  : Türbinden uzaklaşan rüzgarın hızıdır (m / s)

Eşitlik 2.3. tekrar düzenlenirse,

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V' \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.4)$$

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V' \cdot (V_1 - V_2)(V_1 + V_2) \quad (2.5)$$

Rüzgarın türbin kanatlarından geçme anındaki hızı:

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.6)$$

olarak ifade edilir ve Eşitlik 2.5. tekrar yazılırsa ;

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V' \cdot (2 \cdot (V_1 - V_2)) \cdot (2 \cdot V') \quad (2.7)$$

eşitliği elde edilir.

Rüzgarın edilen güç, rüzgarın taşıdığı güce orantılanırsa aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$C_p = \frac{\text{Rüzgardan Elde Edilen Güç}}{\text{Maksimum Güç}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V' \cdot (2 \cdot (V_1 - V_2)) \cdot (2 \cdot V')}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A} \quad (2.8)$$

$$C_p = 4 \cdot \left( \frac{V'}{V} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{V'}{V} \right) \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.9. da ki,

$$\frac{V'}{V} = a \quad (2.10)$$

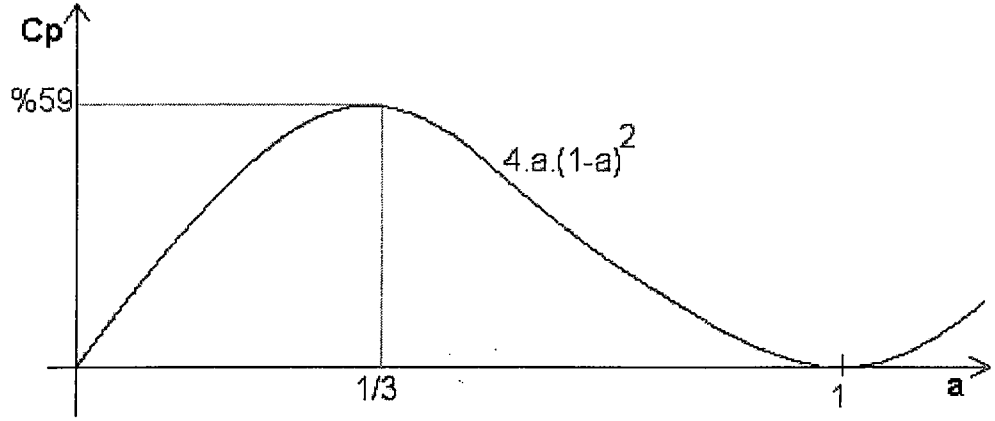
olarak adlandırılırsa güç faktörü aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$$C_p = 4 \cdot a^2 \cdot (1 - a)^2 \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.11. tekrar düzenlenirse,

$$C_p = 4 \cdot a^3 - 8a^2 + 4a \quad (2.12)$$

elde edilir.



Şekil 2.1. Kayıp faktörünün alabileceği maksimum ve minimum değerler

Eşitlik 2.12.'nin kökleri bulunursa,  $a_1=1/3$  ve  $a_2=1$  değerleri elde edilir. Bu değerler Eşitlik 2.11'de yerine konularak işlem yapıldığında,  $C_p=0,59259$  ve  $C_p=0$  değerleri elde edilir.

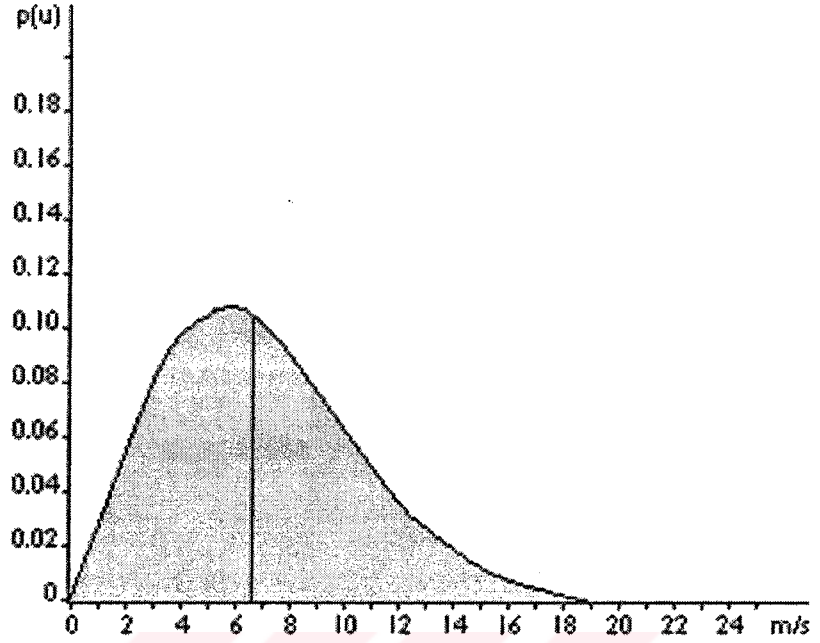
Betz limitinin grafik olarak ispatı Şekil 2.1'de görülmektedir.

## 2.2. Rüzgar Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Elde edilen rüzgar kayıtları, istatistik çözümlerinde kullanılmak üzere değerlendirilir. Değerlendirilmelerde, hem uzun süreli rüzgar kayıtlarını elde etmek, hem de farklı yer ve yüksekliklerdeki rüzgar özelliklerini belirlemek için rüzgar hızı dağılımı olasılık fonksiyonları kullanılır. Bu fonksiyonlar, Weibull dağılım fonksiyonu ve Rayleigh dağılım fonksiyonudur (Johnson, 2001).

### 2.2.1. Weibull dağılımı

Rüzgarın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgar endüstrisinde çok önemlidir. Türbin tasarımcıları, türbin iyileştirilmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgar dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Eğer bir yıl boyunca rüzgar ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgarların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgarların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir türbin yeri için rüzgar dağılımı ya ölçülerek, veya



Şekil 2.2. Weibull dağılım eğrisi

ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde “Weibull dağılımı” ile belirlenir. Bu dağılım, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın altında kalan alanın toplam olasılığı “1”dir. Yani, sakin havalar da bunun içinde olmak üzere, belli bir periyotta rüzgarın her aralıkta toplam olma olasılığı %100 dür. Weibull dağılımı eğrisi simetrik değildir. Bu eğriyi oluşturan her bir hız frekansları, ortalama hızın bulunmasını da sağlar. Weibull dağılımını gösteren örnek bir eğri Şekil 2.2’de verilmektedir. Rüzgar hızı olasılık dağılımları ve bunları matematiksel olarak modellemekte kullanılan fonksiyonlar, rüzgar ile ilgili alanlarda en çok kullanılan kaynaklardır. Özellikle, dağılım fonksiyonlarının parametrelerini tespit etmekte, bir bölgedeki rüzgar hızı ve enerjisini analiz etme işlemlerinde yoğunlukla kullanılmaktadır.

İki parametrelili Weibull olasılık dağılım yoğunluk fonksiyonu şu denklem ile verilir;

$$f_w = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k\right] \quad (2.13)$$



Burada,

$f_w(v_w)$ : Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu

$k$  : Weibull şekil parametresi

$c$  : Weibull scala parametresi (m/s)

$v_w$  : Weibull Hızı (m/s)

Buna karşılık gelen toplam dağılımı da aşağıdaki denklem ile verilir.

$$F_w = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k\right) \quad (2.14)$$

### 2.2.2. Rayleigh dağılımı

Rüzgar türbini üreticileri genellikle makine başarımlarını Rayleigh dağılımına göre verirler. Bunun nedeni, değişik yerlerdeki rüzgar dağılımlarının bilinmesidir. Rayleigh fonksiyonu Weibull'un basitleştirilmiş bir versiyonu olarak düşünülebilir. Weibull fonksiyonunda şekil parametresi olan  $c$  (Eşitlik 2.13,2.14), 2'ye eşitlenirse Rayleigh fonksiyonu elde edilir. Rayleigh olasılık dağılım yoğunluk fonksiyonu Eşitlik 2.15'de verilmektedir.

$$f_r(V) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V}{V_m^2} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{V}{V_m}\right)^2\right] \quad (2.15)$$

Burada,

$f_r(V)$  : Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu

$V_m$  : Ortalama rüzgar hızı (m/s)

Buna karşılık gelen Rayleigh toplam dağılımı da aşağıdaki denklem ile verilir,

$$F_r = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{V}{V_m}\right)^2\right] \quad (2.16)$$

Burada,

$F_r(V)$  : Rayleigh toplam dağılım fonksiyonu

Rayleigh fonksiyonunun en önemli avantajı sadece ortalama rüzgar hızı verisinin bilinmesi halinde dağılımın elde ediyor olmasıdır. Rayleigh fonksiyonu da yaygın bir şekilde kullanılmış ve geçerliliği birçok bölge için kanıtlanmıştır. Bir sonraki adım modellerden elde edilen dağılım ile zaman serisinden elde edilen dağılımlar arasındaki farkı belirleyebilmektedir.

## 2.3. Rüzgar Türbinleri

### 2.3.1. Rüzgar türbinlerinin yerinin belirlenmesi

Bir rüzgar türbininin kurulması için öncelikle kurulacak yerde potansiyeli belirleme çalışmaları yapılması gerekir. Ancak bu işlemden önce o bölge için uygunluğun araştırılması gerekir. Uygunluk için bazı belirtiler vardır. Bunlar:

- Biyolojik belirtiler
- Coğrafik belirtiler
- Jeolojik belirtiler
- Topografik belirtiler
- Sosyal ve kültürel belirtiler

Rüzgar türbinleri kurulurken genellikle rüzgarın fazla olacağı yerler seçilir. Bu yerler:

- Şiddetli basınç değişimi olan yerler
- Şiddeti rüzgara maruz kalan, yağışlı ve uzun vadiler

- Şiddetli jeostrofik rüzgar alanlarındaki yüksek, engebesiz tepe ve platolar
- Şiddetli basınç değişimli, düşük eğimli sürekli rüzgar vadileri
- Şiddetli jeostrofik rüzgar alanlarındaki tepeler ve zirveler
- Şiddetli jeostrofik rüzgar veya sıcaklık basıncı alanlarına maruz kalmış kıyı şeritleri

Yapılan çalışmalar sonucu belirlenen yerlerde elde edilen sonuçlarla birlikte rüzgar karakteristikleri ve enerji üretimi çözümlerinin yapılması gerekmektedir. Bunun için belirlenen araziye temsil edecek nokta veya noktalarda ölçüm yapmak gerekmektedir. Yapılacak ölçümler, teknik açıdan en az bir yıl sürmelidir. Bunun yanında, rüzgar santral kurmaya aday olabilecek yerlerde rüzgar enerjisi santralının olabilirliği ve uygulanabilirliği açısından oldukça önemli olan aşağıdaki noktaların da dikkate alınması gerekir.

- Ulaşım kolaylığı
- Ulusal şebekeye bağlanma kolaylığı
- Arazinin yol ve diğer çalışmalar için işlenme kolaylığı
- Arazinin eğimi
- Arazinin büyüklüğü
- Arazinin kullanılış şekli
- Arazinin bitki örtüsü

Ancak arazilerde rüzgar enerjisinden yararlanmayı önleyecek bir takım kısıtlar olabilir. Bunlar;

- Arazinin yerleşim birimlerine olan yakınlığı
- Arazinin askeri, sivil radar vb. tesislere olan yakınlığı
- Arazini hava alanına olan yakınlığı
- Arazinin mülkiyeti
- Arazinin sit alanı veya özel diğer kapsamlarda olup olmadığı
- Arazinin gelecekteki olası kullanım amacı
- Arazinin milli park veya doğal yaşam koruma kullanımı kapsamında olup olmadığı
- Arazinin turizm bölgeleri ile olabilecek etkileşimi

### **2.3.2. Rüzgar türbin tipleri**

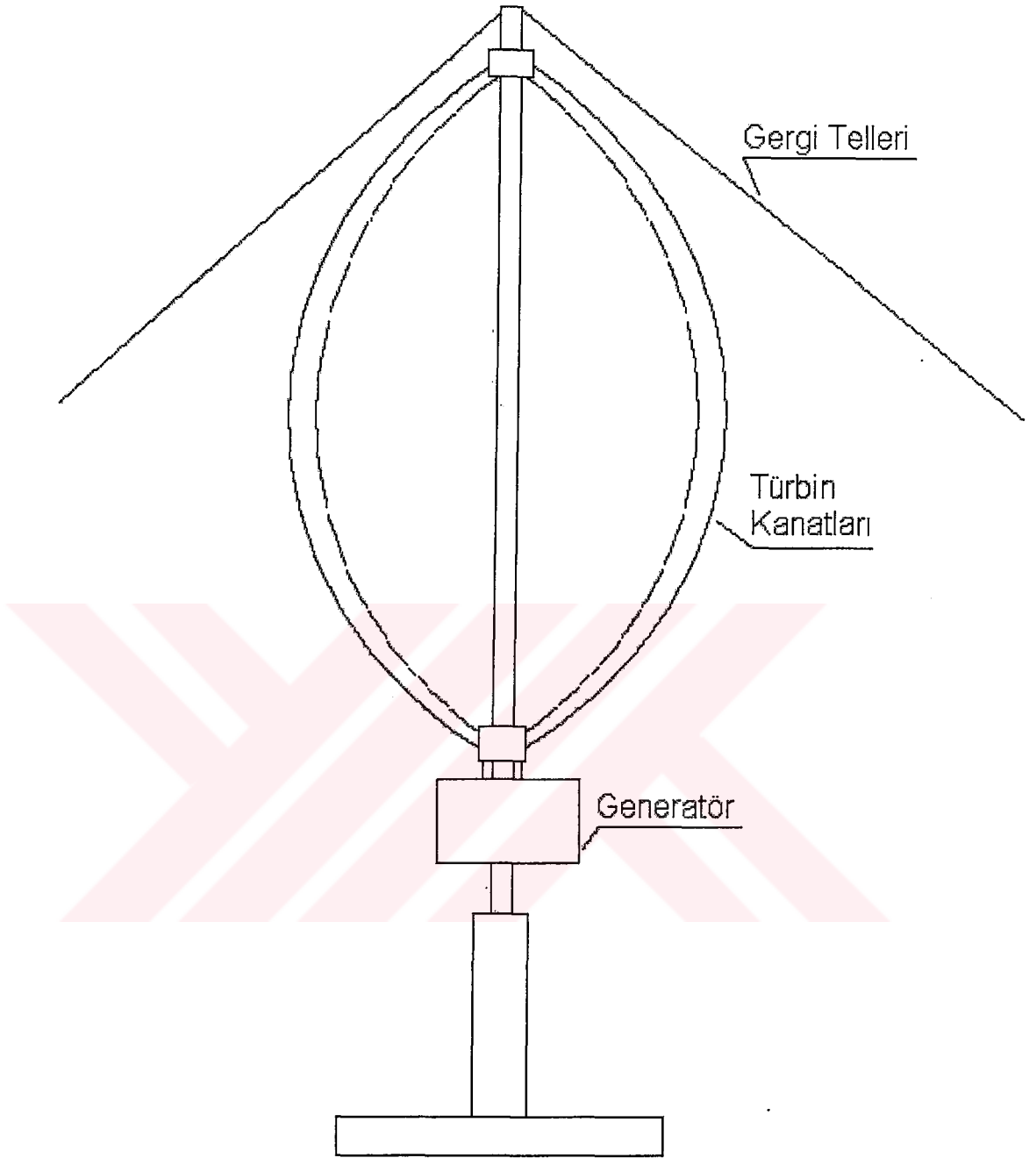
Rüzgar enerjisinden faydalanmak için farklı tiplerde türbinler geliştirilmiştir. Bu türbinlerin her birine ait üstünlükleri olmakta birlikte içlerinden sadece 2-3 kanatlı olan klasik rüzgar türbinleri geniş bir kullanıma sahiptir.

#### **2.3.2.1. Darrieus rüzgar türbinleri**

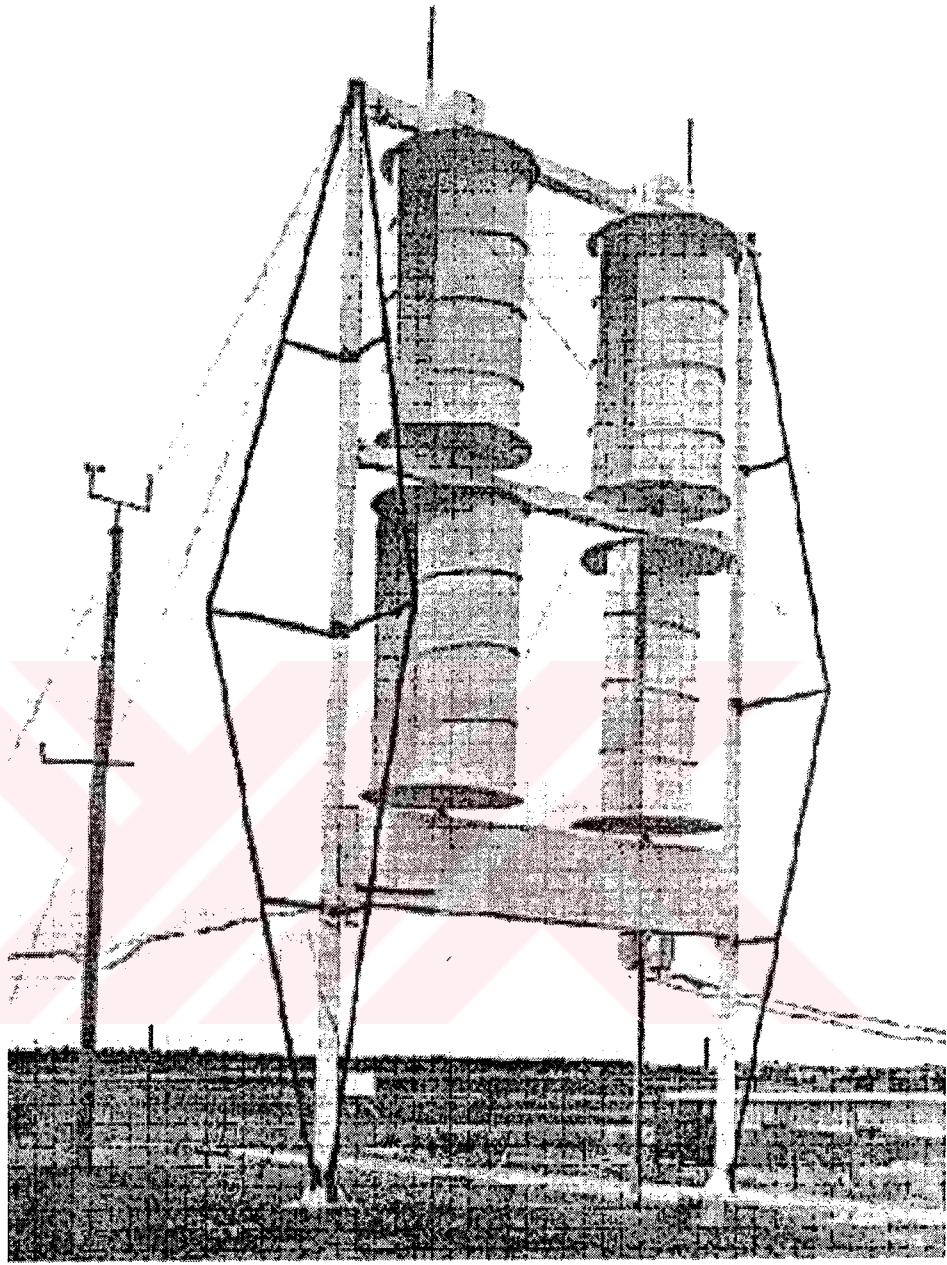
Amerika Birleşik Devletlerinde 1931 yılında G.J.M Darrieus tarafından geliştirilen bu türbin tipinde kanatlar yere dik durumda hareket etmektedir. Generatör ve vites kutusu gibi donanımlar olduğundan kuleye gerek duyulmaz. Ayrıca türbin yönlendirme sistemleri de yoktur. Kule mekanizmasına gerek olmamasına karşılık, yere yakın oldukları için düşük rüzgar hızlarında çalışmak zorundadırlar. Bu türbinler kendi kendine çalışmaya başlayamaz. Türbinlerin yere sabitlenmeleri için çelik halatlara gereksinim duyulur. Bu türbin tipi Şekil 2.3'de görülmektedir (Johnson, 2001).

#### **2.3.2.2. Savonius rüzgar türbinleri**

Finlandiyada 1930'lu yılların başında S.J. Savonius tarafından geliştirilen bu türbin de dikey eksenli olup aynı sistem içinde hareket eden birden fazla türbinden meydana gelmektedir. Avantaj ve dezavantajları Darrieus türbini ile benzerlik göstermektedir. Şekil 4.2'de Savonius rüzgar türbini görülmektedir (Johnson, 2001).



Şekil 2.3. Darrieus rüzgar türbini



Şekil 2.4. Savonius rüzgar türbini

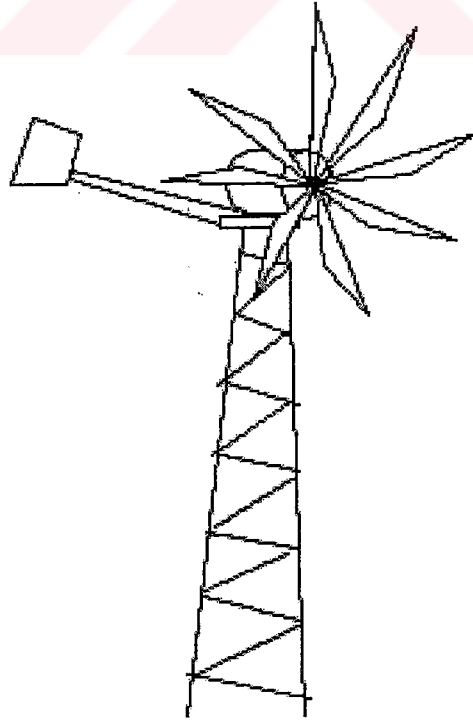
### 2.3.2.3. Klasik rüzgar türbinleri

Yukarıda anlatılan türbinlerden farklı olarak geliştirilen ve klasik yel değirmenleri ile çalışma ilkesi bakımından benzerlik gösteren bu türbin tipleri 1 kanatlı olarak yapıldığı gibi 2-3 kanatlı veya daha çok kanatlı olarak da üretilmektedir. Ancak bu gün için yaygın kullanım alanı bulan türbinler genellikle 2 veya 3 kanatlıdır. Şekil 2.5'de görüldüğü gibi farklı araştırmacılar tarafından çok kanatlı türbinler

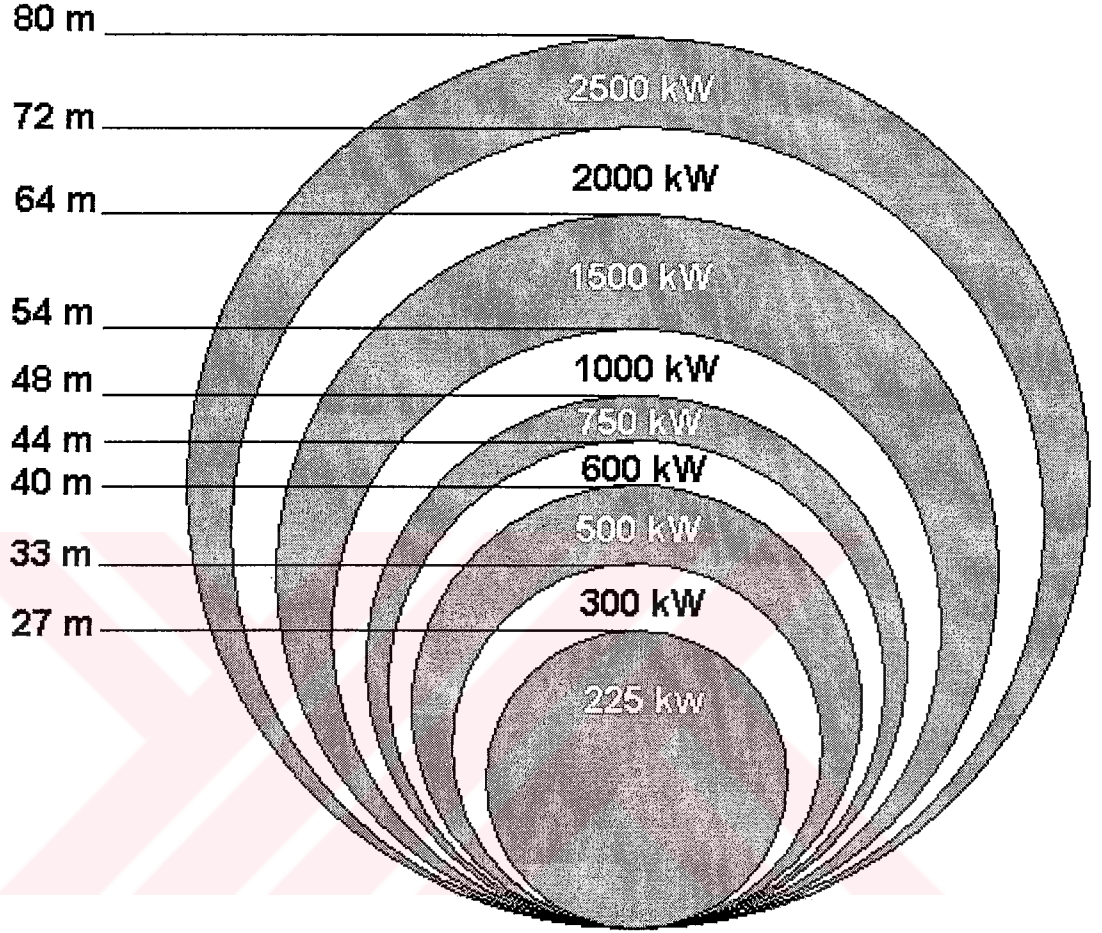
geliştirilmiş ancak fazlaca kullanım olanağı bulamamıştır. Yine de dünyanın birçok ülkesinde ve Türkiye’de de bazı yörelerde sadece su pompalamak için kullanılmaktadır. Şekil 2.5’de görülen çok kanatlı rüzgar türbinleri düşük hızlı rüzgardan daha fazla enerji alabilirken kanat sayısı 1-2-3 olan türbinler ise yüksek hıza sahip rüzgarlardan daha fazla enerji alabilmektedir.

### 2.3.3. Türbin kanat çapına göre elde edilecek güç değeri

Rüzgar türbininin rotor çapına göre elde edilebilecek güç miktarı Şekil 2.6’ de görülmektedir. Bu şekilde verilen güç değerleri yaklaşık olup türbin tipi, yer seçimi, rüzgar yoğunluğu vb. etkenlerle değişiklik göstermektedir. Şekil 2.6’ya göre bir rüzgar türbininden alınan güç, rüzgar hızının küpü ve süpürülen alan yani kanat çapı ile doğru orantılıdır. Yer yüzünden yukarı doğru çıkıldıkça rüzgar hızı artmakta, fakat hava yoğunluğu azalmaktadır. Rüzgar türbinleri için yerden yükseklik değeri minimum 10 m. olmalıdır. Çünkü 10 m’nin altında oluşan hava sirkülasyonları rüzgarın tek yönde esmesini engeller. Yer yüzeyinden yaklaşık 1 km’ye kadar rüzgar, yer yüzeyinin yüzey yapısından oldukça etkilenir (Gipe,1993).



Şekil 2.5. Çok kanatlı rüzgar türbini



Şekil 2.6. Rotor çapına göre çıkış gücü değişimi

Hava kürenin alt katmanlarında rüzgar hızları sürtünmeye uğrarlar. Bu duruma arazinin pürüzlülüğü ve engeller neden olur. Pürüzlülük ne kadar çok ise rüzgar o kadar azalır. Su yüzeyi, daha az etkileyen en pürüzsüz yüzeydir. Uzun ot, çalı ve çöp gibi pürüzlülük öğeleri rüzgar hızını daha çok etkiler ve azaltır (Johnson, 2001).

Rüzgar hızının yükseklikle değişimi Hellman bağıntısı ile verilir.

$$V = V_0 \left( \frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (2.17)$$



Burada,

- $V$  : H yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)  
 $V_0$  :  $H_0$  yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)  
 $H$  : Başvuru ölçüm yüksekliği (m)  
 $H_0$  : Rüzgar hızı belirlenmek istenen yükseklik (m)  
 $\alpha$  : Pürüzlülük tip katsayısıdır.

Düz arazilerde pürüzlülük ile pürüzlülük uzunluğu arasında ampirik bağıntılar bulunmaktadır. Bu bağıntılarda göre kullanılan  $\alpha$  değerleri Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Pürüzlülük tipi ile pürüzlülük uzunluğuna bağlı  $\alpha$  değerleri

Pürüzlülük tipi	Üstel Rüzgar Kesmesi ( $\alpha$ )
Su veya buz yüzeyi	0.1
Küçük ot veya bozkır	0.14
Engelibeli kırsal alan	0.2
Ormanlık alan ve küçük yerleşimler.	0.25

### 2.3.3.1. Engeller ve rüzgar akışı

Engeller, arka taraflarında bozulmuş akış alanları oluşturur. Bunlara dalgalar denir. Engel dalgaları rüzgar hızını azaltır. Hız ve yönde hızlı değişikliklere neden olurlar. Bu olaya türbülans denir. Engellerden ne kadar yükseğe çıkılırsa rüzgar gölgelemesi o kadar az olur. Yatay olarak engelin rüzgar gölgelemesi, engel yüksekliğinin 20-30 katına kadar uzanmaktadır. Eğer engel yüksekliği kanat göbeği yüksekliğinin yarısından daha fazla ise, elde edilecek enerji üretim sonuçları daha belirsizdir ve engelin geometrik şekli sonuçları etkilemektedir.

### 2.3.4. Türbinlerin rüzgar alışı yönleri

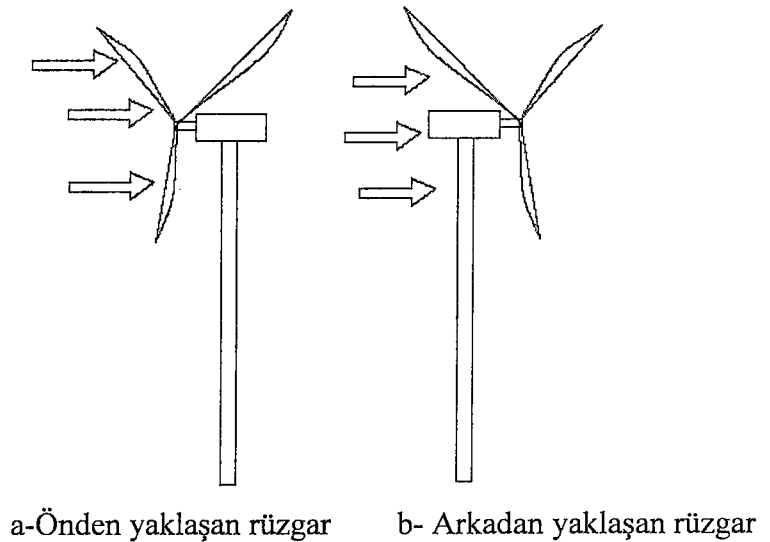
Rüzgar türbinleri genellikle rüzgara paralel konumda tesis edilmektedir. Türbin paralel iken kanatlar rüzgara dik konumda hareket ederler. Rüzgar, türbine ön

yaklaşım ve arka yaklaşım yönü olmak üzere iki şekilde yaklaşır. Şekil 2.7’de her iki tipteki türbin görülmektedir.

### 2.3.5. Rüzgar türbininin hız-güç ilişkisi

Bir türbinin güç-rüzgar hızı ilişkisi türbinden ne kadar güç üretileceğini gösterir. Güç ölçümleri, araziye kurulan ve rüzgar türbinine belli bir yakınlıkta, türbin göbek yüksekliği ile aynı yükseklikte bulunan bir anemometre ile ölçülür. Anemometre, türbin kanatlarının üreteceği türbülans nedeniyle türbinin üzerine yerleştirilmez. Ancak rüzgar hızı ölçümlerinin kusursuz olması gerekmektedir. Çünkü rüzgar hızı ölçümünde yapılacak %3’lük bir hata, enerji hesaplamalarında  $\pm$  % 9’luk bir hataya neden olacaktır. Bu nedenle doğruluğu onaylanmış güç eğrisinde dahi  $\pm$  % 10’luk bir hata olabilir. Güç eğrileri, düşük türbülanslı alanlarda yapılan ve türbine doğrudan gelen hava akımı ölçümlerine dayalıdır.

Yerel türbülans ve karmaşık arazideki hava akımları, rüzgar türbinine değişik yönlerden gelen etki eder. Bu nedenle herhangi bir yerde doğruluğu tam olarak belirlenmiş güç eğrisi elde etmek her zaman olanaklı olmayabilir. Gerçekte, bir güç eğrisi ortalama bir rüzgar hızında türbinin ne kadar güç üreteceğini tam olarak göstermeyebilir. Buna ek olarak türbinin farklı sıcaklık ve hava yoğunluğu koşullarında çalışacağı, bu nedenle farklı güçleri de üretebileceği unutulmamalıdır.

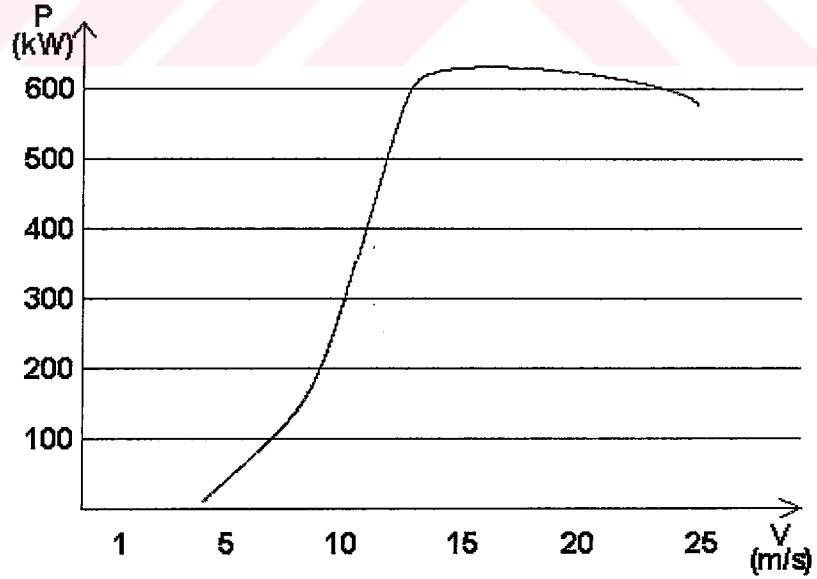


Şekil 2.7. Rüzgarın türbine yaklaşımı

Şekil 2.8’de örnek bir rüzgar türbinine ait güç eğrisi görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi rüzgar hızının belirli bir değerinden sonra türbinden elde edilecek güçte artış olmamakla birlikte aksine azalma başlamaktadır. Çünkü türbin kanatlarının dönebileceği hız mekanik sistemler sebebiyle sınırlıdır. Rüzgar hızı bu değer üzerine çıktığında kanatlar arkasında türbülansa ve dolayısıyla güç azalmasına sebep olmaktadır (Gipe, 1993).

### 2.3.6. Rüzgar türbinlerinde güç ayarlanması

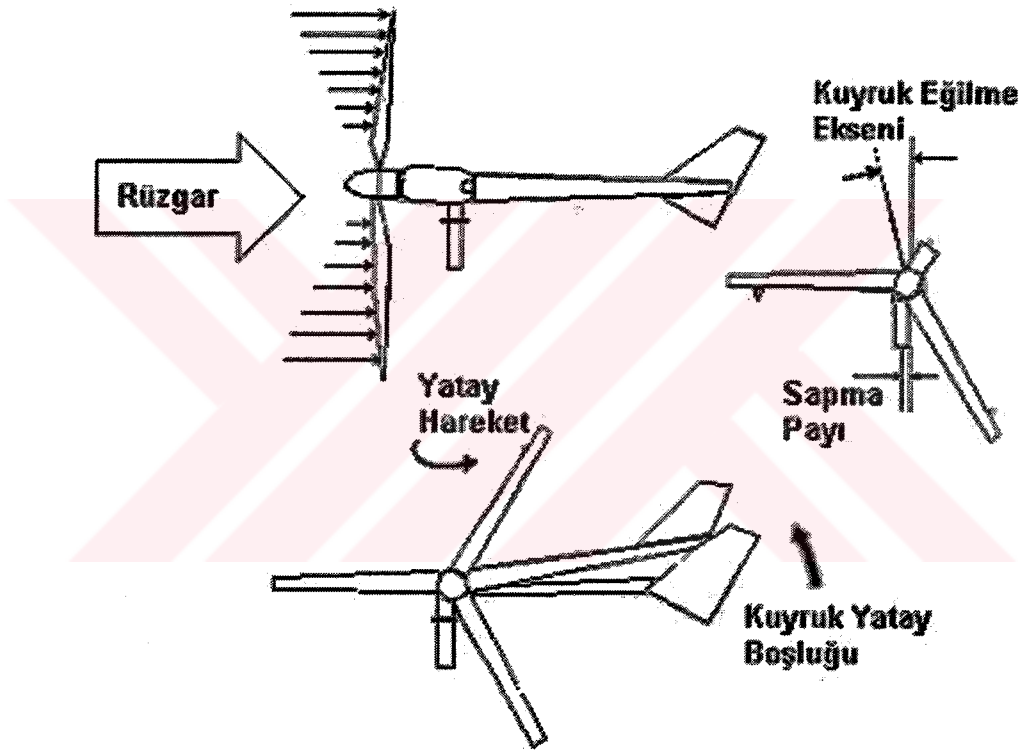
Rüzgar türbinleri olabildiği kadar düşük maliyette elektrik üretecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu nedenle bir türbin yaklaşık 15 m/s’de en fazla güç üretimi verecek şekilde tasarlanmaktadır. Çünkü, daha yüksek hızlara sahip rüzgar hızları daha az oluşmaktadır. Çok şiddetli rüzgar koşullarında türbinlerin zarar görmemesi için belirlenmiş hızdan daha yüksek hızlarda çalışması istenmemektedir. Bu nedenle türbinlerde güç ve hız denetimi sistemleri bulunmaktadır. Bu sistemler, modern rüzgar türbinlerinin güvenli olarak çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.8. Rüzgar türbinini hız-güç eğrisi

### 2.3.6.1. Dikey denetim

Türbinin dikey olarak denetlendiği sistemde, rüzgar hızı belirlenen değeri aşınca türbin kanatları yönlendirici kuyruk ile paralel konuma gelir. Rüzgar hızının düşmesiyle birlikte kanatlar yönlendirici kuyruk ile dik açılı olan konumlarına geri dönerler. Denetim sisteminde türbin ve taşıyıcı kısımlar yön değiştirmez, sadece kanatlar yön değiştirir. Böylece, hem aşırı hızdan koruma hem de devir ayarı sağlanabilir. Bu denetim sistemi Şekil 2.9'de görülmektedir. Dikey denetim sistem küçük güçlü türbinlerde daha fazla kullanılmaktadır (Gipe, 1993).



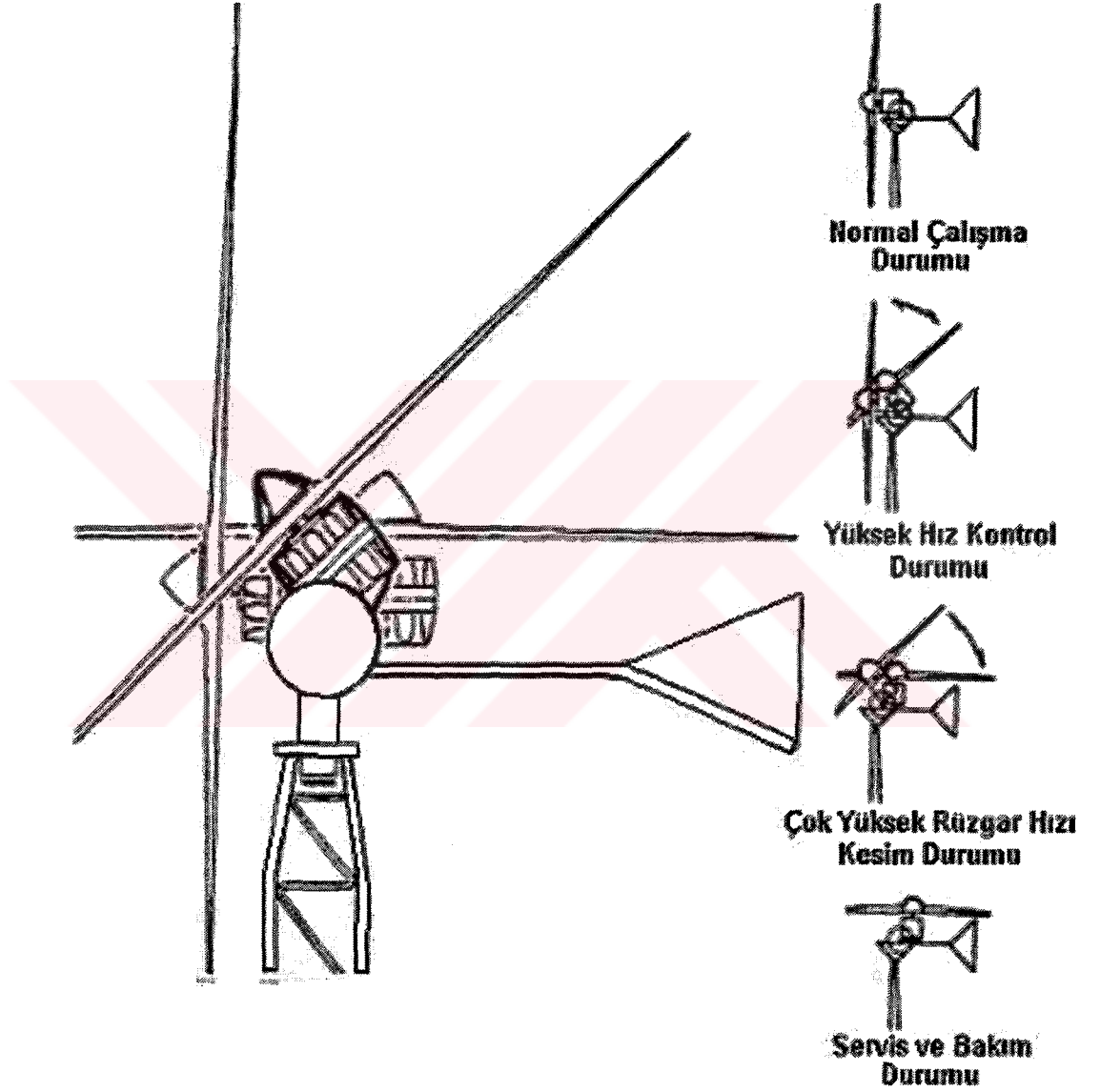
Şekil 2.9. Dikey denetim sistemi

### 2.3.6.2 Yatay denetim

Türbinin yatay olarak denetlendiği sistemde, bir önceki sistemden farklı olarak hem kanatlar hem de generatör veya taşıyıcı kısım rüzgara paralel hale getirilir. Ancak hareket dikey yönde değil yatay yönde meydana gelir. Artan rüzgar hızıyla birlikte kanatlara daha fazla kuvvet uygulanır ve bir hareket mili etrafında yukarı

doğru eğilme başlar. Sistemde denetim elemanı olarak yay mekanizması kullanılır (Gipe, 1993).

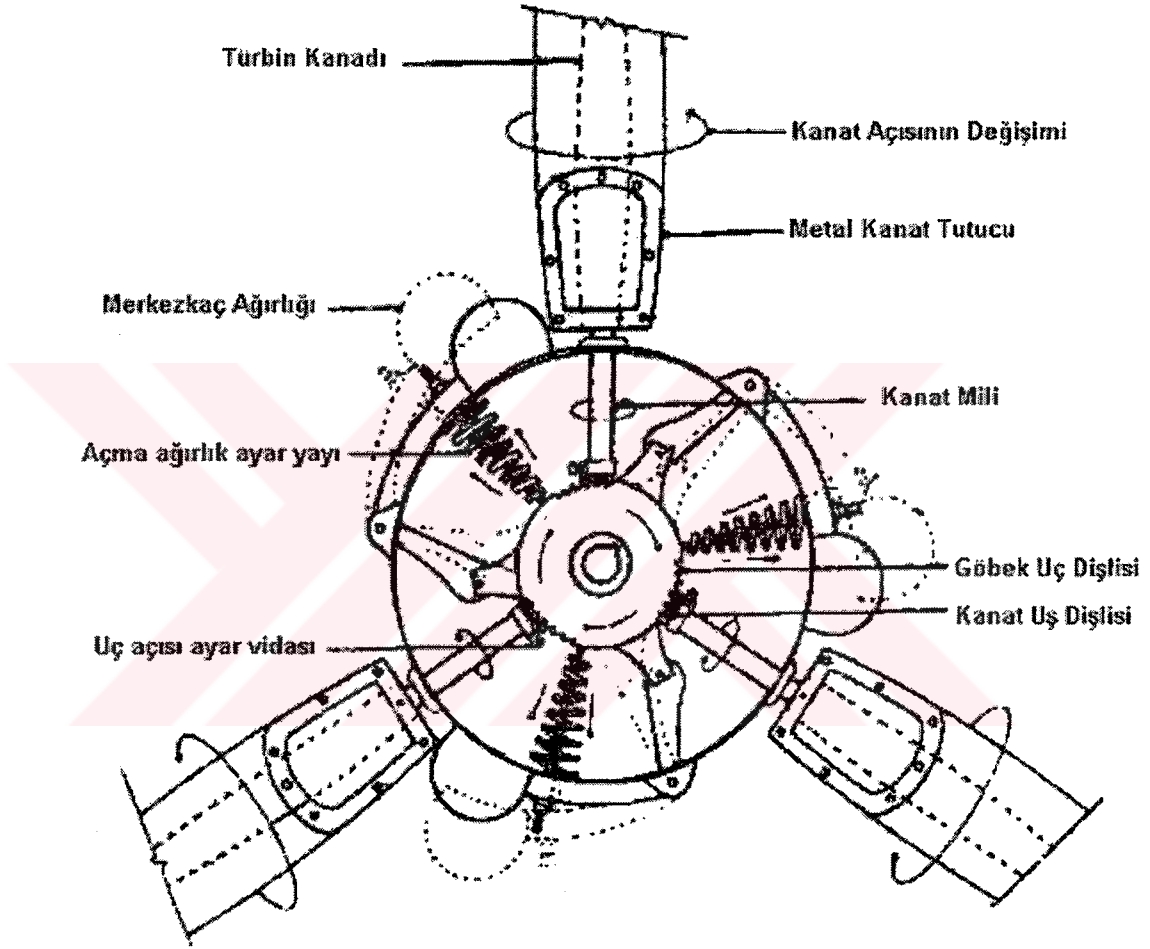
Sistemin alışması Şekil 2.10.'de görülmektedir. Yatay denetim sistemi küçük güçlü türbinlerde uygulanmaktadır.



Şekil 2.10. Yatay denetim sistemi

### 2.3.6.3. Kanat eğimi (Pitch) denetimi

Kanat eğimi ile denetim yönteminde, rüzgar türbinlerinde generatörün elektronik denetimi saniyede birkaç kez güç denetimi yapar. Güç üretimi çok yüksek olduğu zaman, denetim mekanizması kanat eğimi mekanizmasını hemen rüzgara paralel



Şekil 2.11. Kanat eğimi (Pitch) denetimi

gelecek şekilde yavaşça döndürür. Tersine durumda kanatlar, rüzgar tekrar azalınca rüzgara dik konuma getirilir. Kanatlar böylece kendi dikey eksenlerinde dönerek rüzgar yakalama miktarını ayarlarlar. Böylece rüzgar hızı ne olursa olsun güç değişmez hale gelmiş olur. Normal işletimde kanatlar birkaç derece döner. Kanat eğimi denetimli rüzgar türbinlerinde, denetleyici, kanatları birkaç derece döndürerek rüzgar değişikliklerini tüm hızlarda, gücü en büyük yapacak şekilde kanatları rüzgara

en iyi açıda tutar. Kanat eğimi denetimi yönteminin mekanik çalışan bir tipi Şekil 2.11 ' de verilmektedir.

#### **2.3.6.4. Aerodinamik kanat denetimi**

Rüzgar türbininin kanatları rüzgara maruz kaldığında belirlenen yönde dönmeye başlar. Kanat hızı arttığında denetim sistemi kanadın uç kısmında bulunan ve bir eksen etrafında dönebilen kanat parçasını ana kanada dik konuma gelecek şekilde döndürür. Böylece hem rüzgardan alınan enerji azalır hem de dönüş yönüne dik olarak bükülen, kanat uç kısmı hava içinde hareket ederken kanadın yavaşlamasına sebep olur. Bu denetim yöntemi çoğunlukla orta büyüklükteki türbinlerde uygulanmaktadır (Gipe, 1993).

#### **2.3.6.5. Yön saptırma (Yaw) denetimi**

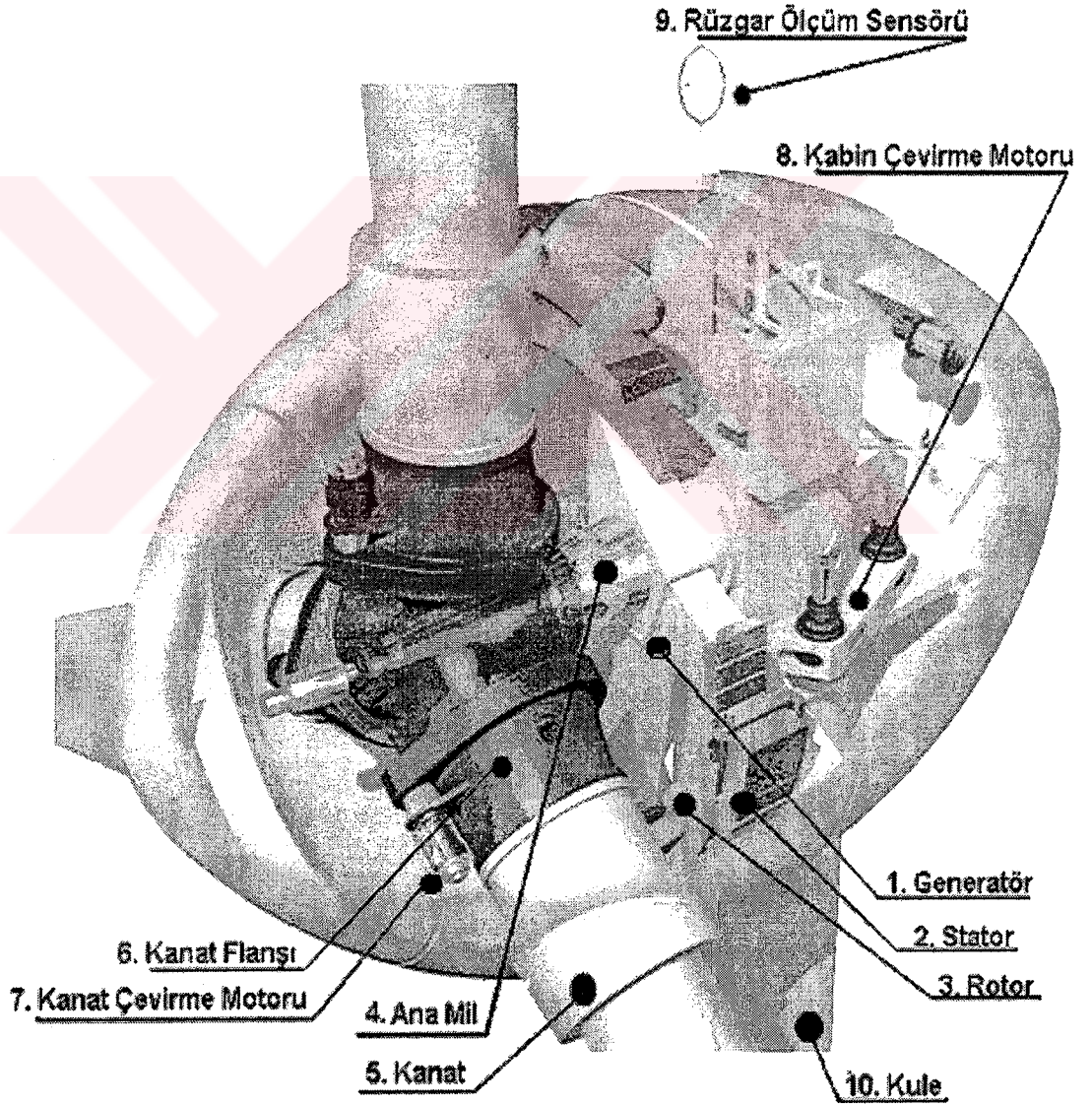
Rotoru kısmen rüzgarın dışına çevirmekle güç azaltılabilir. Bu teknik, pratikte çok küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmaz. Büyük güçlü rüzgar türbinlerinde generatörü taşıyıcı kısmın taban kısmına hidrolik veya motorlu dişli yerleştirilir. Bu sistem bir denetleyici ile hareket ettirilmektedir. Denetleyici, rüzgara ait hız ve yön bilgilerini değerlendirir. Ayrıca generatörün gücünü ve alıcıların çektiği enerji miktarını da denetler. Bu işlemler bir bilgisayar tarafından 1 saniye içerisinde birkaç defa yapılan ölçüm ve denetim sonucunda yapılır. Sistem kanatların rüzgarı karşılama hızını ayarlar (Gipe, 1993).

#### **2.3.6.6. Çoklu denetim sistemi**

Gelişmiş rüzgar türbinlerinde sistemin güç ve gerilim gibi değişkenlerini denetlemek için birden fazla denetim sistemi aynı anda kullanılabilir. Bu tip bir rüzgar türbinine ait iç yapı ve denetim elemanları Şekil 2.12'de görülmektedir.

### 2.3.7. Türbinlerin frenleme yöntemleri

Rüzgar türbinleri 3 m/s ile 25 m/s arasında çalışırlar. Bu hızlar arasında çalışırken her hız değeri için farklı gerilim ve frekans üretilir. Türbinlerin hızı önceden belirlenen ortalama hızın altında ise kanat açısı veya türbin taşıyıcı kısmın yönü, en fazla enerji üretecek şekilde ayarlanır. Rüzgarın hızı ortalama hızın üzerine çıktığında ise türbinin hızının ayarlanması için frenleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler aşağıda verilmektedir.



Şekil 2.12. Bir türbinin iç yapısı ve denetim sistemi

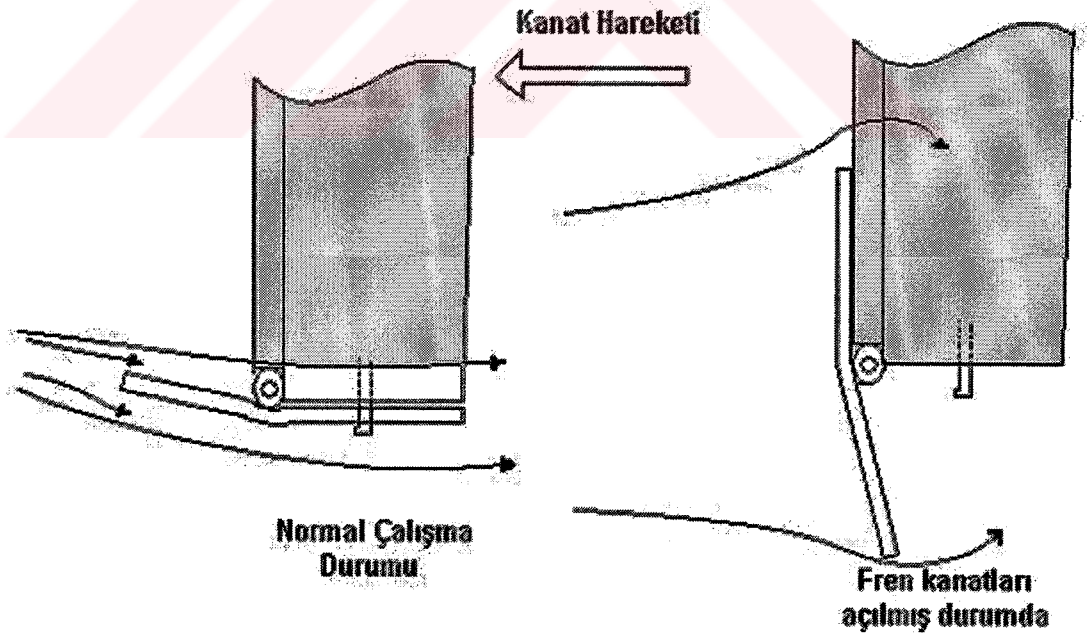


### 2.3.7.1. Mekanik frenleme

Generatör ile kanatlar arasında bulunan dişli sistemini generatöre bağlamak için kullanılan volan üzerine frenleme balataları yerleştirilir. Bu balatalar yardımı ile generatörün, dişli sisteminin ve kanatların yüksek hızın vereceği zararlardan korunması sağlanır. Rüzgar hızı 25 m/s üzerine çıktığında ise sistem tamamen kilitlenir. Sistemin tekrar devreye alınması için rüzgar hızının normal değerlere düşmesi beklenir.

### 2.3.7.2. Aerodinamik frenleme

Bu frenleme yöntemi aynı zamanda denetim amacı ile de kullanılır. Kanat uçlarına yerleştirilen bir sistem yardımıyla aşırı hız engellenir. Belirlenen hızın üzerine çıkıldığında çalışmaya başlayan sistem kanat hızını azaltacak şekilde açılır. Sistemin çalışması Şekil 2.13’de görülmektedir (Gipe, 1993).



Şekil 2.13. Aerodinamik Frenleme Sistemi

### 2.3.7.3. Tüm frenleme yöntemlerinin birlikte kullanımı

Rüzgar türbinleri gelişip güçleri arttıkça daha ayrıntılı ve güvenli denetim sistemleri geliştirilmektedir. Bugün için bazı rüzgar türbinlerinde birden fazla hız denetim ve frenleme sistemi aynı anda kullanılabilir. Bu yöntem hem güvenliği artırır hem de elde edilen enerjinin kalitesini istenilen düzeye getirir.

## 2.4. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler

Rüzgar türbinlerinden elektrik üretme fikri ortaya çıktığından beri farklı elektrik üreteçleri kullanılmaktadır. Bu üreteçlerin birbirlerine göre üstünlükleri veya eksiklikleri vardır. Üreteçler ürettikleri enerjinin akım şekline göre isimlendirilirler. Doğru akım (DA) üreteçleri ve alternatif akım (AA) üreteçleri olarak isimlendirilen üreteçler, rüzgar türbinlerinin büyüklüğüne ve seçilen teknolojiye bağlı olarak türbinlerde kullanılırlar.

### 2.4.1. Doğru akım paralel generatör

1900'lü yılların başında DA paralel generatörleri özellikle elektrik dağıtım şebekesinden uzak olan kırsal kesimde batarya şarjında kullanıldı (Johnson, 2001). Bu generatörler günümüzde de özellikle küçük güçlü ve bakımı kolay yapılabilecek sistemlerde kullanılmaktadır. Generatörün kullanımının tercih edilmesinin sebebi, hemen her devirde elektrik üretebilmesi ve özellikle frekansa bağımlı olmayan ve gerilim değişikliklerinden etkilenmeyen sistemlerde uygun olmasıdır. DA paralel generatörlerde üretilen gerilim;

$$E = k_s \cdot \omega_m \cdot \Phi_p \quad (2.18)$$

Burada,

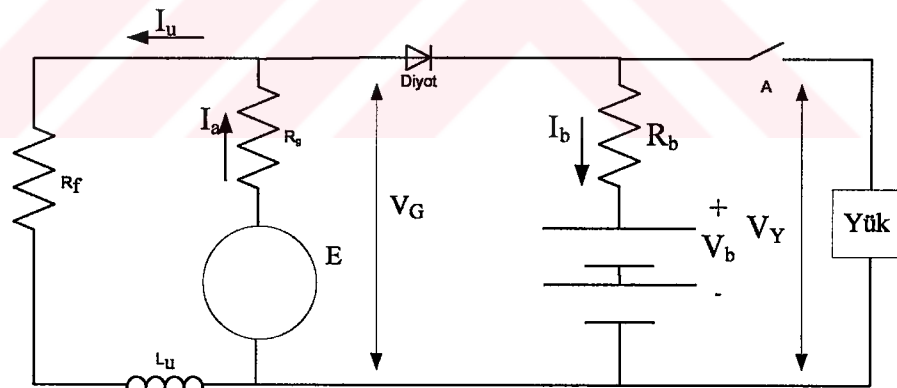
E : Generatörden alınan gerilim (V)

$k_s$  : Kutup sayısı, endüvi oyuk sayısı vb. değişkenlere bağlı sabit sayı

- $\omega_m$  : Endüvinin mekanik açısal hızı (rad/s)  
 $\Phi_p$  : Kutup başına manyetik akı miktarıdır. (max)

Eşitlik 2.18’de görülebileceği gibi DA paralel generatörünün endüvisi çalışmaya başladığında artık mıknatısiyetten dolayı dışarıdan uyarıma gerek olmadan kendi kendine gerilim üretmeye başlar. Üretilen gerilimde ikinci bir etken de endüvinin hızıdır. Ancak hız artışı ile gerilim artışı ilk başlarda yaklaşık olarak doğru orantılı iken kutuplardaki manyetik akının doyuma ulaşması ve endüvi reaksiyonu ile bu artış yavaşlar ve belirli bir hızdan sonra gerilim artışı meydana gelmez.

Şekil 2.14’de verilen generatörün batarya şarjında kullanımında, generatör gerilimi batarya gerilimine ulaşana kadar generatör yüksüz olarak çalışır. Generatör gerilimi batarya gerilimini aştığında şarj başlar ve generatör yüklenir. Bu işlemlerin denetimi bir denetleyici ile sağlanır. Batarya şarjının başlaması veya yükün generatör tarafından beslenmesi için generatör çıkış gerilimi  $V_G$  değerinin, batarya gerilim değeri  $V_B$  den büyük olması gerekir.



Şekil 2.14. DA paralel generatör ile batarya şarjı devresi

Şekil 2.14’ de,

- $R_f$  : Uyarım sargısı omik direnci ( $\Omega$ )  
 $L_u$  : Uyarım sargısı endüktansı (h)  
 $R_g$  : Generatör endüvi direnci ( $\Omega$ )

- E : Generatörün ürettiği gerilim (V)  
R<sub>b</sub> : Batarya iç direnci (Ω)  
V<sub>b</sub> : Batarya gerilimi (V)  
I<sub>u</sub> : Uyarım akımı (A)  
I<sub>a</sub> : Generatör endüvi akımı (A)  
I<sub>B</sub> : Batarya Akımı (A)  
V<sub>Y</sub> : Yük gerilimi (V)  
V<sub>G</sub> : Generatör çıkış gerilimi (V)

#### 2.4.2. Alternatif akım generatörleri

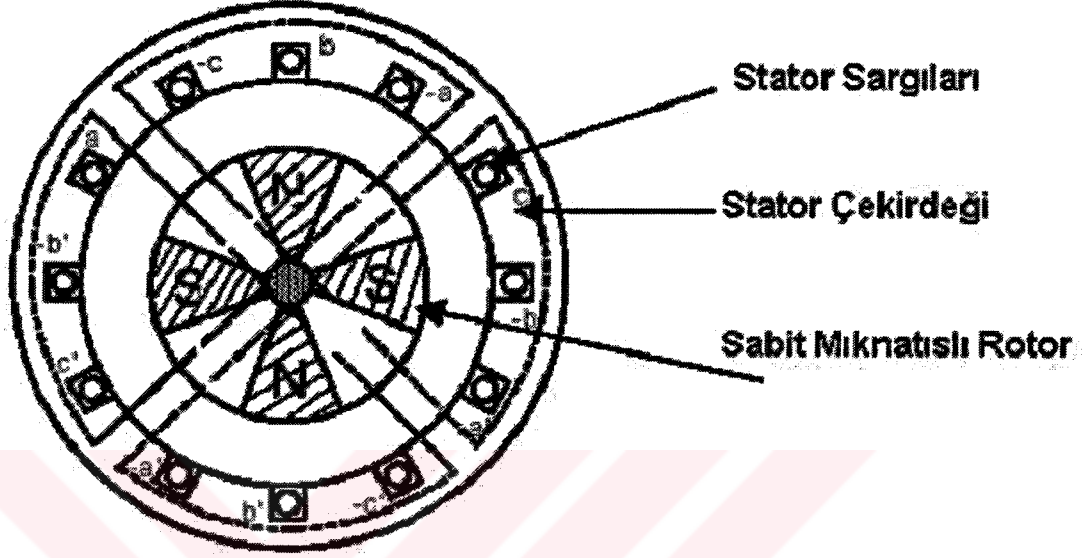
Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan doğru akım generatörlerinde, fırça ve kollektör gibi parçalar nedeniyle arızalar meydana gelmektedir. Bu nedenle bakım gerektirmeyen veya daha az bakım gerektiren AA generatörleri enerji üretiminde kullanılmaktadır. Bu generatörlerin çeşitleri ve çalışma sistemleri aşağıda verilmektedir.

##### 2.4.2.1. Sabit mıknatıslı generatörler

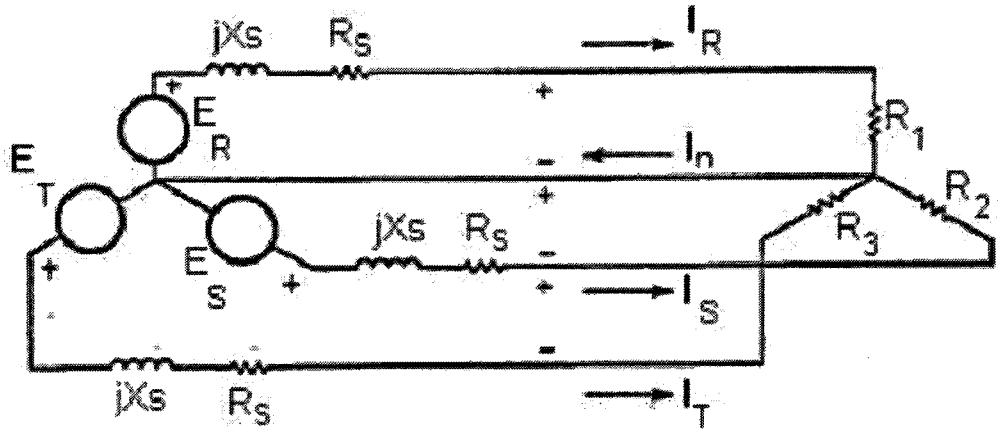
Sabit mıknatıslı generatörlere, dışarıdan uyarım akımı uygulamaya gerek yoktur. Elektrik üretimi için gerekli olan manyetik alanı oluşturan mıknatıslar generatörün hareketli kısmına yani rotor üzerine yerleştirilmiştir. Yerleştirilen mıknatıs adedi kadar rotorda kutup sayısı da mevcuttur. Gerekli manyetik akı, bu mıknatıslardan sağlandığı için uyarım sargısı kayıpları yoktur. Uzun ömürlü mıknatıs çubukları kullanıldığından ortalama olarak 10-15 yıl arasında çalışabilirler (Johnson, 2001). Bu süre bir rüzgar generatörü için yeterli olmayabilir. Bu sebeple genellikle orta ve düşük güçlü sistemler için tercih edilirler. Yükleri, gerilim ve frekanstan çok etkilenmeyecek şekilde seçilmelidir. Sabit mıknatıslı generatörün iç yapısı Şekil 2.15’de görülmektedir.

Sabit mıknatıslı generatörler üç fazlı üretildikleri gibi bir fazlı olarak da üretilebilirler. Kullanım amacına uygun olarak çalışma gerilimleri ve frekansları belirlenebilir. Ancak bu tip üreteçlerde sabit frekans elde edilmesi için devir kontrol

sistemlerine gerek duyulmaktadır. Şekil 2.16’de sabit mıknatıslı generatöre ait üç faz eşdeğer devre verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi generatör devresinde senkron generatörden farklı olarak uyarım devresi elemanları bulunmamaktadır.



Şekil 2.15. Sabit mıknatıslı generatörün iç yapısı



Şekil 2.16. Sabit mıknatıslı generatör eşdeğer devresi

Şekil 2.16'de,

$E_R, E_S, E_T$  : Her faza ait gerilim (V)

$I_R, I_S, I_T$  : Her faza ait akım (A)

$jX_s+R_s$  : Stator sargı empedansı ( $\Omega$ )

$I_n$  : Generatör nötür hattı akımıdır (A)

olarak verilmektedir. Sargıların bütün değerleri eşit olduğu için çıkış gerilimleri de eşit olur. Ancak fazlara ait yükün eşit olması her zaman mümkün olmadığından bu generatörler bazen dengesiz yükleri beslemek zorunda kalabilirler. Bu generatörlerde uyartım akısı sabit olduğundan çıkış gerilimini yük gerilimine eşit tutabilmek için oto transformatör ile gerilimi sabitlemek gerekmektedir. Ancak batarya şarjı vb. yüklerde bu işleme gerek yoktur.

#### 2.4.2.2. Alternatif akım senkron generatörler

Bu generatörler normalde senkron şebekelerden beslendiğinden asenkron yapıda çalışan motorlardır. Bağlantı şekli ve çalışma prensibi sabit mıknatıslı generatörler ile benzerlik göstermektedir. Tek fark, üretilen gerilim sadece makinenin devir sayısına bağlı olmayıp aynı zamanda stator sargılarını etkileyen manyetik alana da bağlı olmasıdır.

Bu makinenin çıkış gerilimi;

$$E_a = k_f \cdot \omega \cdot I_u \quad (2.18)$$

Burada,

$E_a$  : Üretilen Elektromotorkuvvet (V)

$k_f$  : Makine özelliklerine bağlı sabit değer

$\omega$  : Radyan olarak elektriksel frekans (rad/s)

$I_u$  : Uyartım akımıdır. (A)

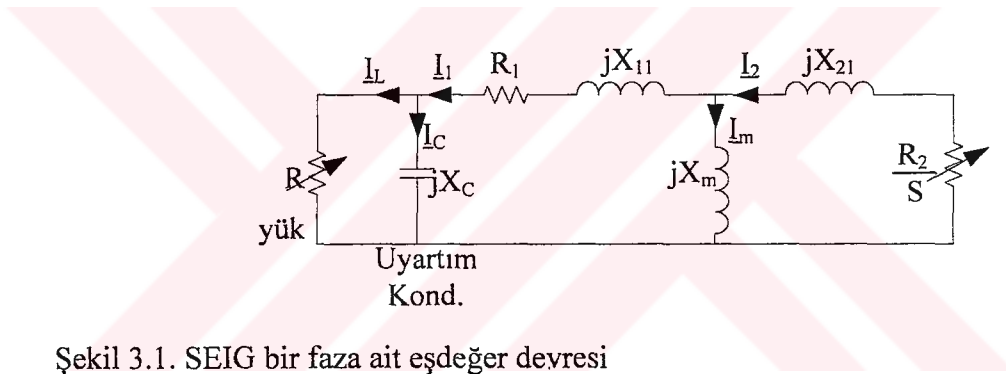
Bu generatörler de frekanstan çok etkilenmeyen alıcılarda kullanılabilir. Örneğin ısıtıcılar, batarya şarj sistemleri, omik özellikteki yükler vb. bu generatörlerin beslediği yükler olarak sayılabilir.

#### **2.4.2.3. Kendinden uyarımlı indüksiyon generatörü**

Bu generatörler çok yaygın olarak kullanılmayan ancak rüzgar türbinleri ve çok küçük boyutlu hidroelektrik türbinlerinde 1940'lı yıllardan beri kullanılan bir generatör tipidir. En büyük üstünlükleri motor olarak çok yaygın kullanıldıkları için bulunmaları çok kolay ve maliyetleri de oldukça düşük olmasıdır. Bununla beraber bakım gereksinimleri düşük ve fırça-bilezik vb. düzenekleri de yoktur. Bu nedenle küçük ve orta büyüklükteki rüzgar türbinlerinde kullanımları çok yaygındır (Gipe, 1993, Johnson, 2001).

### 3. KENDİNDEN UYARTIMLI İNDÜKSİYON GENERATÖRÜ MODELİ (SEIG)

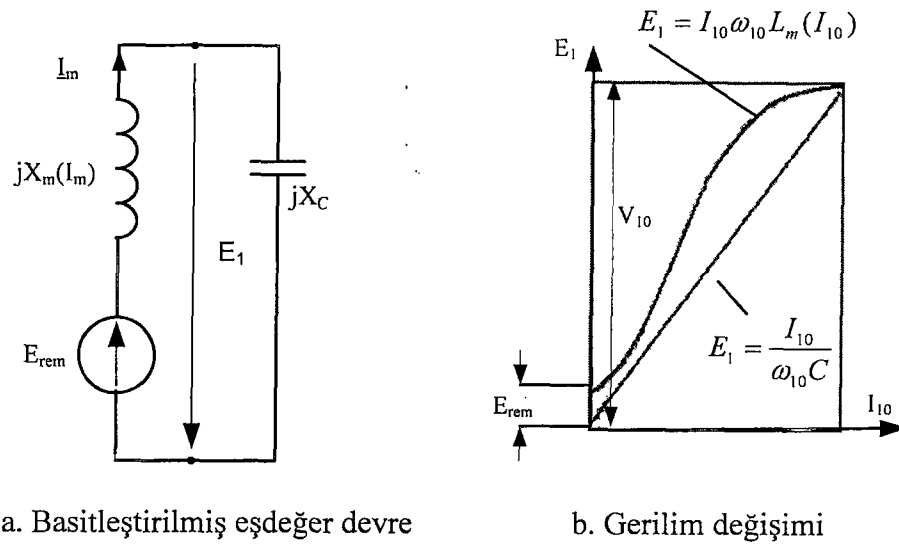
SEIG ile kafes rotorlu indüksiyon generatörü anlatılmaktadır. SEIG'in faz başına standart temel eşdeğer devresi Şekil 3.1'de görülmektedir. Generatör yüksüz durumda açık iken makine bir ön sürücü ile hareket ettirilir. Makine SEIG olarak yavaşça hızlanır, yüksüz olan terminal gerilimi artar ve belirli bir değerde sabitlenir. Bu olay 1930'lardan beri bilinen kendi kendine uyartım işlemidir (Boldea et al., 2002).



Şekil 3.1. SEIG bir faza ait eşdeğer devresi

Daha önce İndüksiyon Generatörü olarak çalıştırıldığından dolayı makine rotorunun çelik saç tabakalarında bulunan artık mıknatisiyet, hareket eden rotorun stator sargılarında e.m.k. indüklemesine sebep olur. Bu gerilimin frekansı  $f_{10}=np_1$  olarak oluşur. Bu gerilim makine terminal uçlarına uygulanır. Uygulanan gerilim, her faz sargısı için oluşan RLC devresindeki mıknatıslama akımı ile stator-rotor arasındaki hava aralığında bir manyetik alan oluşturur. Oluşan bu alan rotor üzerinde daha önce bulunan artık mıknatisiyet alanına eklenir. Rotor saçlarındaki manyetik akı miktarı arttığı için stator sargılarında daha fazla gerilim indüklenmeye başlar. Ancak işlem rotor manyetik akısındaki doymaya ve hıza bağlı olarak gerilimin belirli bir değere ulaşmasına kadar devam edebilir. Bu andaki gerilim değeri generatörün yüksüz durumdaki açık devre gerilim değeridir. (Levi et al, 2000, Rajakaruna et al, 1993).





Şekil 3.2. Basitleştirilmiş eşdeğer devre ve kendi kendine uyarımın karakteristik eğrisi

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi  $X_{11}$ ,  $X_{21}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ -değerleri ihmal edilerek devre basitleştirilmekte ve yüksüz durumdaki eşdeğer devre, bir kondansatör ve buna paralel bağlı olan  $X_m$  ile birlikte rotor artık mıknatısietiyeti kararlı bir gerilim üretmektedir (Boldea et al, 2002).

$L_m(I_m)$  eğrisi doğrusal olmadığı için gerilim artışı da doğrusal değildir.  $V_{10}$  gerilimi ile kondansatör gerilimi doymanın oluştuğu noktada kesişirler. Şekil 3.2.b’de görülen bu eğride  $E_{rem}$  değeri kendi kendine uyarımın başlaması için gereken artık mıknatısietiyete karşılık gelen ilk uyarım gerilimidir (Wamkeue et al, 2002, Johnson, 2001).

Eğer SEIG yüklü ise terminal gerilimi rotor hızına, SEIG’in devre eleman değerlerine, yükün özelliği ve miktarına göre değişiklik göstermektedir.

Rotor devre akımının oluşması için rotor devri ile döner alan devri arasındaki fark sıfırdan farklı olmalıdır. Yani kayma  $S \neq 0$  şartı gerçekleşmelidir. Aksi halde stator manyetik akı çizgileri rotor çubuklarını kesmediği için rotor manyetik alanını arttıracak olan ek manyetik akı oluşmamaktadır. Rotoru hareket ettiren mekanik kuvvet sabit olsa bile  $f_1$  frekansı yüke göre değişme göstermektedir.

$$f_1 = \frac{np_1}{1 + |S|}; f_{10} = (f_1)S = 0 = np_1 \quad (3.1)$$

$V_1$  gerilimini,  $f_1$  frekansını, stator akımını güç katsayısını ve verimi hız, yük ve kondansatör değeri bilindiğinde hesaplamak, SEIG'in sürekli durum performansını belirlemek anlamına gelmektedir. Bu işlemlerde temel bilinmeyenler  $f_1$  frekansı ve  $V_1$  gerilimidir.

Eğer hız, yük ve çıkış gerilimi verilirse C kapasitesi ve  $f_1$  frekansı da bilinmeyen olabilir. Şekil 3.1'de verilen standart eşdeğer devredeki  $L_m(I_m)$  fonksiyonu ile problemi basitleştirilmiş hale getirebiliriz. Aşağıda bu olay ayrıntılı olarak vermektedir.

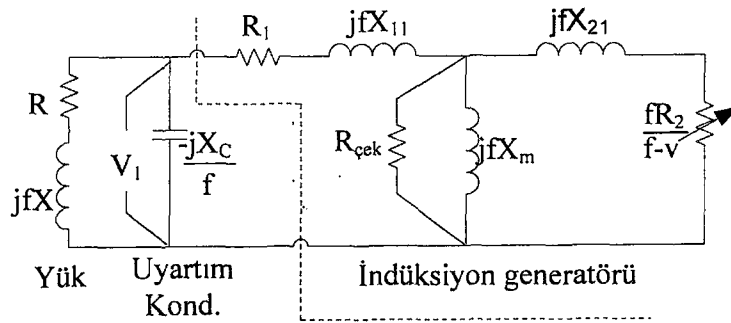
Literatürde SEIG'in sürekli hal performansını tahmin etmek için geliştirilen farklı analitik yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılan ikisi empedans modeli ve admitans modelidir (Boldea et al, 2002).

Tek faza indirgenmiş empedans modelinde  $f$  frekansı  $f_1$ 'in  $f_{1b}$  frekansına oranıdır.

$$f = f_1 / f_{1b};$$

$f_{1b}$  senkron hız için  $v$  hızı  $v = np_1 / f_{1b}$  dir.

Devrenin son durumu Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3. SEIG'in empedans modeli

Yükün R, L özelliği, frekansa bağlı olan demir kayıpları  $R_{çek}$ , doğrusal olmayan  $X_m(I_m)$ ' fonksiyonundan elde edilen ve Şekil 3.2.a'da görüldüğü gibi  $V_1$  gerilimini belirleyen  $X_m$  bileşeni ile birlikte  $f$  frekansı devrenin sayısal çözüm işlemini yapmamıza imkan sağlamaktadır.

$X_m$  ve  $f$  hesaplandığında devre modelinin bütün değerleri tam olarak belirlenmiş olmaktadır.

Eşdeğer devre empedansının üçüncü veya dördüncü derece denklemlerinde reel ve asal kökleri sıfıra eşitlendiğinde  $f$  veya  $X_m$  değeri elde edilebilir. Konu ile ilgili olarak literatürde oldukça fazla örnek çözüm bulunmaktadır. Son zamanlarda empedans modelinin genel çözümünde yeni optimizasyon tabanlı yöntemler geliştirilmektedir. Ancak çözüm için kullanılan eşitliklerin derecesi arttığında eşdeğer devre modelinin devreyi oluşturan bazı bilinmeyenlere olan duyarlılığı azalmaktadır. Çünkü çözüm yönteminde eşitlik derecesi azalırken bazı sabit değerler ihmal edilir veya yok edilirse bu değerlerin etkileri de ortadan kalktığı için devre çözümü belirsiz bir durum alabilir (Rajakaruna et al, 1993).

Eşitliklerin çözümünde  $X_m$  eşitliği basitleştikçe  $f$  frekansını hesaplamak karmaşık hale gelmektedir. Bununla beraber admitans modelinde ise ikinci derece denlem kullanılarak yapılan çözümlerde özellikle dengeli omik yüklerde bazı kolaylaştırıcı kabuller de kullanılabilir.

Standart devreden elde ikinci derece eşitlik modeli Eşitlik 3.8'de görülmektedir.

İndüksiyon makinesi, motor olarak çalıştığında pozitif yönde oluşan kayma generatör durumu için negatiftir.

$$S = \frac{(f - v)}{f} \quad (3.2)$$

f frekansı için  $E_a$  hava aralığı gerilimi

$$\underline{E}_a = f \underline{E}_1 = \underline{I}_2 \left( \frac{R_2}{S} + jX_{21} \right) \quad (3.3)$$

Burada,

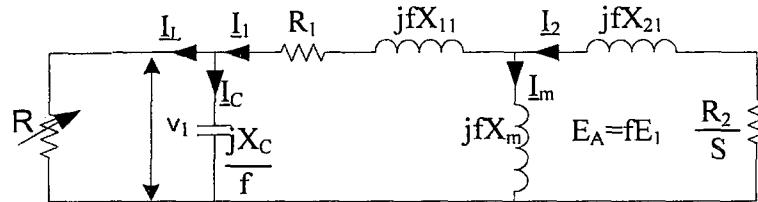
$E_1$  : Çalışma frekansındaki hava aralığı gerilimidir.

Devreyi basitleştirmek için hesaplamalarda yük direncine göre çok küçük olan demir kayıpları direnci ihmal edilmektedir. Eşdeğer devrede paralel olan uyartım kondansatörü ve yük direnci generatör devresine seri bağlı olan bir empedans elemanına dönüştürülerek,

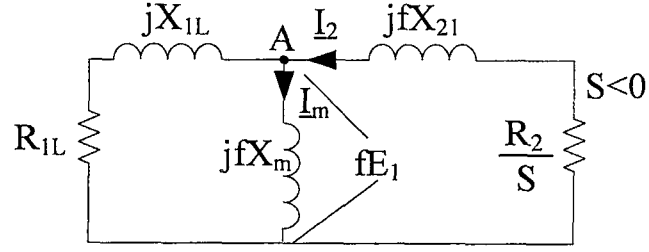
$$R_L - jX_L = \frac{R \left( -j \frac{X_c}{f} \right)}{R - j \frac{X_c}{f}} = \frac{R}{1 + \frac{R^2 X_c^2}{f^2}} - \frac{j \frac{X_c}{f}}{1 + \frac{X_c^2}{f^2 R^2}} \quad (3.4)$$

eşitliği elde edilmektedir.

Böylece stator devresindeki  $R_1$  ve  $R_L$ ,  $R_{1L} = R_1 + R_L$  ve  $fX_{11}$  ve  $X_L$ ,  $X_{1L} = fX_{11} - X_L$  şeklinde birleştirilerek eleman sayısı azaltılır. Bu durumda Şekil 3.5'deki yeni ve basitleştirilmiş eşdeğer devre elde edilir (Boldea et al, 2002).



Şekil 3.4. SEIG'in kayma ve frekansa göre eşdeğer devresi



Şekil 3.5. SEIG'in basitleştirilmiş eşdeğer devresi

Eşdeğer devrede,  $f$  frekansı belirlendiğinde  $S$  kayma değeri ve generatörün yüksüz çalışmadaki doyma karakteristiğinden elde edilebilen  $E_1(I_m)$  veya  $X_m(E_1)$  yeni devre bilinmeyenleri durumuna gelir. Eşdeğer devrede bulunan  $R_2$ ,  $X_{21}$ ,  $R_1$ ,  $X_{1L}$  değerleri de devre verilenleri olmaktadır. Bunlara bağlı olarak  $f$  bilinir ve  $S$  hesaplanırsa  $v$  hızı,

$$v = f(1 - S) \quad (3.5)$$

eşitliğinden elde edilir.

Eğer hız biliniyorsa,  $f$  frekansı yaklaşım metodu kullanılarak  $v$  değeri elde edilene kadar değiştirilebilir. Ayrıca  $f$  frekansı bilindiğinde, yükün özelliği değişse bile Eşitlik 3.4'de yapılan düzenleme ile devrede farklı bir durumun meydana gelmesi engellenebilir. Örneğin devrede yük olarak tipik bir indüksiyon motoru kullandığımızda devre değişkenleri fazlaca değişiklik göstermez.

Şekil 3.5'de verilen eşdeğer devrede görülebileceği gibi kendi kendine uyarımın başlayabilmesi için  $A$  noktasındaki akımların toplamı sıfır olmalıdır (Boldea et al, 2002).

$$0 = -I_2 + I_1 + I_m \quad (3.6)$$

$$fE_1 \left( \frac{1}{jfX_m} + \frac{1}{R_{1L} + jX_{1L}} + \frac{S}{R_2 + jSfX_{21}} \right) = 0 \quad (3.7)$$

Aynı sonuç rotor içine bir gerilim kaynağı eklendiğinde de elde edilir. Eşitlik 2.7'deki reel ve sanal kısımlar sıfıra eşitlenmelidir.

$$\frac{R_{1L}}{R_{1L}^2 + X_{1L}^2} + \frac{SR_2}{R_2^2 + S^2 f^2 X_{21}^2} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{fX_m} - \frac{X_{1L}}{R_{1L}^2 + X_{1L}^2} + \frac{SfX_{21}}{R_2^2 + S^2 f^2 X_{21}^2} = 0 \quad (3.9)$$

f frekansı, yük ve IG eleman değerleri verildiğinde S kayma değeri tek bilinmeyen olur.

$$aS^2 + bS + c = 0 \quad (3.10)$$

$$a = f^2 X_{21}^2 R_{1L}; b = +R_2 (R_{1L}^2 + X_{1L}^2); c = R_{1L} R_2^2 \quad (3.11)$$

Bilindiği gibi ikinci derece denklemlerin iki adet kökü vardır. Ancak Eşitlik 3.10'un köklerinden sadece birisi ( $S_1$ ) generatör çalışma durumunda kullanılır. Diğer kök ise kilitli rotor deneyinde olduğu gibi makine gücünün tamamının kayıplara harcandığı durumda kullanılmaktadır.

$$S_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} < 0 \quad (3.12)$$

$S_{1,2}$ 'nin köklerinin ikisinin de sanal çıkması durumunda kendi kendine uyarım başlamamış demektir.

$S_1$  kayma değeri bilindiğinde f frekansına karşılık gelen v hızı, kondansatör kapasitesi ve yük Eşitlik 3.5. kullanılarak hesaplanır. v hızı bilindiğinde ise f değeri bilinen v hızı elde edilene kadar değiştirilir.

Bu durumda S, f ve diğerleri bilindiğine göre Eşitlik 3.9'da tek bilinmeyen  $X_m$  değeridir. Eşitlik 3.9'dan  $X_m$  değerini çektüğümüzde,

$$X_m = \frac{R_2(R_{1L}^2 + X_{1L}^2)}{-(SfX_{2L}R_{1L} + R_2X_{1L})f}; S < 0 \quad (3.13)$$

eşitliği elde edilir.

$X_m$ 'nin bulunmasıyla  $E_1$  gerilimi doğrudan Şekil 3.2.b'de ki yüksüz çalışma eğrisinden elde edilebilir.

$E_1$  ile birlikte f, S,  $X_m$  değerleri bilindiğinde Şekil 3.4'deki eşdeğer devre üzerinden  $I_2$  ile  $I_1$ 'i ve mıknatıslanma eğrisi üzerinden de  $I_m$  değerini hesaplayabiliriz.

$$I_2 = \frac{-fE_1}{\frac{R_2}{S} + jfX_{21}} \quad (3.14)$$

$$I_1 = \frac{fE_1}{R_{1L} + jX_L}; X_{1L} < 0 \quad (3.15)$$

Bu durumda  $V_1$  gerilimini elde etmek mümkün olmaktadır,

$$V_1 = I_1[(R_{1L} - R_1) + j(X_{1L} - X_{11})] \quad (3.16)$$

veya

$$V_1 = fE_1 - (R_1 + jfX_{11})I_1 \quad (3.17)$$

Kondansatör ve yük akımları  $I_C$  ve  $I_L$  sırasıyla,

$$I_{-C} = \frac{+V_1jf}{X_C}; \quad I_L = I_1 - I_C \quad (3.18)$$

$$I_{-c} = \frac{+V_1 jf}{X_c}; \quad \underline{I}_L = \underline{I}_1 - \underline{I}_C \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.14. ve 3.15, Şekil 3.6'deki fazör diyagramında gösterilmektedir.

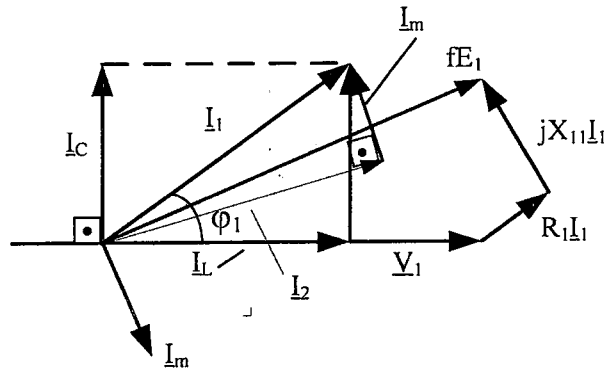
Vektör diyagramında  $\underline{I}_1$  akımı ve  $\underline{V}_1$  gerilimi generatör durumunu,  $\phi_1$ - güç açısı da akımın gerilimden ileride yani kendi kendine uyarımın olduğu generatör durumunda olduğunu göstermektedir. Bu olay makinenin dışarıdan uyarıldığını göstermektedir (Boldea et al, 2002).

Şekil 3.6'da, beklendiği gibi omik yük, terminal gerilimi  $\underline{V}_1$  gerilimi ve yük akımı  $\underline{I}_1$  faz gerilimine eklenmektedir.

Demir kayıplarını yaklaşık olarak hesaplamak için,

$$P_{çek} = \frac{3(fE_1)^2}{R_{çek}} \quad (3.19)$$

eşitliği kullanılmaktadır. Eşitlik 3.19'da kullanılan  $R_{çek}$  değeri çalışma frekansındaki yüksüz durumda çekilen güç değerinden bulunmaktadır. Aslında  $R_{çek}$  demir kayıpları frekansla çok az değişim göstermekte ve makine hesaplamalarında sabit olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3.6. SEIG'in omik yüklü durumdaki vektör diyagramı



SEIG'in verimini belirlemek için,

$$\eta_g = \frac{3V_1 I_L \cos \varphi_L}{3V_1 I_L \cos \varphi_L + 3R_1 I_1^2 + 3R_2 I_2^2 + P_{çek} + P_{mek}} \quad (3.20)$$

eşitliği kullanılır.

Eşitlik 3.20'de ki  $P_{mek}$  mekanik kayıplar ise yüksüz durumda değişik frekans ve gerilimler kullanılarak yapılan deney ile bulunmaktadır.

Yukarıda verilenlerden anlaşılmaktadır ki  $f_1$  frekansı, uyartım kondansatörü değeri, makine değişkenleri ve yüksüz çalışma karakteri verildiğinde S ve  $X_m$  değerleri yukarıda verilen eşitliklerle bulunabilmektedir. v hızı veya onun yerine frekans sabit ise makine değişkenleri aynı eşitliklerle ve frekansın değiştirilmesiyle  $S < 0$  durumu, yani generatör durumu sağlanıncaya kadar yaklaşım metodu kullanılarak devre değişkenleri hesaplanabilir.

Eşitlik 3.10'un çözümünü sağlamak için,

$$fX_{11} \langle X_L; X_L = \frac{\frac{X_C}{f}}{1 + \frac{X_C^2}{f^2 R^2}} \quad (3.21)$$

şartı sağlanmalıdır.

Burada,  $X_L$  yük empedansına paralel bağlı olan kondansatör değerine göre belirlenir. Kondansatör olmadığında gerilim çok çabuk sıfıra düşme göstermektedir. Kapasite değeri bilindiğinde yükün omik değeri,

$$R \geq X_C \sqrt{\frac{X_{11}}{X_C - f^2 X_{11}}} \quad (3.22)$$

Yük direnci R Eşitlik 3.22' nin reel köküdür.

$$X_c \geq f^2 X_{11} \quad (3.23)$$

Böylece Eşitlik 3.22. ile verilen C uyartım kapasitesi, f frekansı ve  $X_{11}$  stator kaçak reaktansı için yükün minimum değeri  $R_{\min}$  belirlenir.  $X_{11}$ 'in azalması ile  $R_{\min}$  değeri de azalır ve yük de artış gösterir.

Eşitlik 3.10'daki kayma denkleminde gerçek kök,

$$b^2 - 4ac = R_2^2 (R_{1L}^2 + X_{1L}^2)^2 - 4f^2 X_{21}^2 R_{1L}^2 R_2^2 > 0 \quad (3.24)$$

veya

$$2fX_{21} \leq \frac{(R_{1L}^2 + X_{1L}^2)}{R_{1L}} \quad (3.25)$$

olarak belirlenir.

Eşitlik 3.25'den görüleceği gibi düşük değerdeki  $X_{21}$  rotor kaçak reaktansı da aynı faydayı sağlamaktadır.

Kaymanın maksimum değeri  $S_{\max}$ ,  $b^2 - 4ac = 0$  durumunda oluşmaktadır. Bu durumda,

$$S_{\max} = -\frac{b}{2a} = -\frac{R_2}{fX_{21}} \quad (3.26)$$

eşitliği elde edilir. Kaymanın bu değeri daha fazla büyüyemez. Böylece birleştirilmiş olan yük ve kondansatör reaktansı da daha fazla kapasitif duruma gelemez. Bunun sonucu olarak  $S_{\max}$  durumundaki gerilimde belirlenmiş olur. Bununla beraber Eşitlik 19.26'daki hassas denge maksimum yük değerinin belirlenen makine

değişikliklerinde değiştirilemeyeceği ortaya çıkmaktadır. Bu eşitlikte verilen  $S_{max}$  kayma değerinde makine momenti de maksimum değer almaktadır.



## 4. KENDİNDEN UYARTIMLI İNDÜKSİYON GENERATÖRÜNÜN (SEIG) UYARTIM KAPASİTESİNİN DEĞİŞTİRİLEREK DENETİMİ

### 4.1. Giriş

İndüksiyon generatörünün kendi kendine uyartım işlemine başlayabilmesi için kritik devir sayısı ve terminal gerilimine ulaşması gerekir. Bu sebeple harekete başlama anında generatör uçlarının açık devre olması ve kondansatör gruplarının terminal uçlarına bağlı olması gerekmektedir. İlk hareket anında generatörün ürettiği enerji stator sargılarında harcanabilecek enerjiden yüksek olmalıdır. Bununla beraber uyartımın başlaması için gerekli reaktif enerjinin stator sargılarına uygulanması gerekmektedir. Yıldız veya üçgen bağlantılı her faz sargısı için reaktif enerjiyi sağlayacak olan yıldız veya üçgen bağlı bir kondansatör grubu gerekmektedir. Bir önceki bölümde açıklandığı gibi iki elemanlı bu devreye tank devresi denmektedir. Devrenin karşılıklı olarak enerji alışverişine devam edebilmesi için devrenin dışarıdan sürekli enerji almaya devam etmesi gerekmektedir. Bu enerjiyi sağlamak için devir sayısının giderek artması ve yeterli kapasitede kondansatör grubunun terminal uçlarına bağlı olması gerekmektedir. Farklı her devir sayısı için farklı bir kapasite değeri gerekmektedir. Bu kapasite değerleri generatörün boş ve yükte çalışması sırasında da farklılıklar gösterir. Çünkü generatör boşta çalışırken aktif enerji harcaması sadece stator sargılarının omik direncinde ve generatörün sabit kayıplarını oluşturan demir ve sürtünme kayıplarını oluşturan devre bileşenlerinde meydana gelmektedir. Generatör uçlarına herhangi bir yük bağlandığında ise aktif enerji harcaması yük üzerinde daha fazla oluşmaktadır. Harcanan aktif enerji sadece generatör milini hareket ettiren mekanik sistemden karşılanmaktadır. Bu sebeple aktif enerjinin sürekliliği için mekanik hareket kaynağının sürekliliği gerekir. Ancak generatörün gerilim üretebilmesi için gerekli olan mıknatıslama akımının da sürekliliği gerekmektedir. Bu süreklilik ise uyartımı sağlayan kondansatör gruplarının terminal uçlarında bağlı olmasıyla sağlanmaktadır.

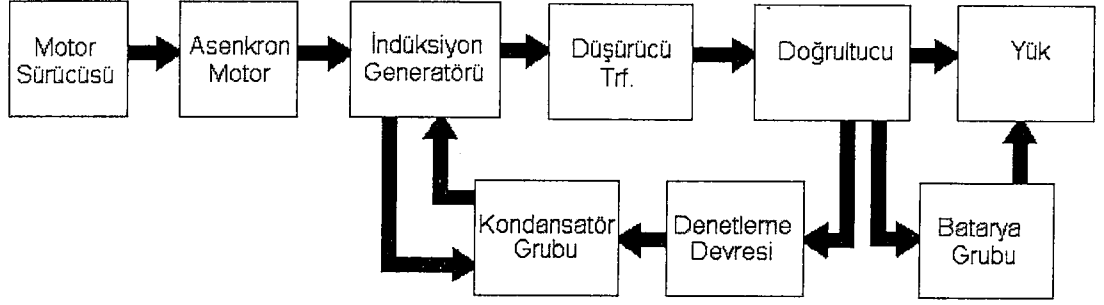
Generatörün yüksüz olarak veya yükte çalışması sırasında önemli bir bileşen de generatör geriliminin değeridir. Generatör gerilimi devir sayısı yanında uyarım akımı değerine de bağlıdır. Uyarım akımı kondansatör akımına eş olduğu için generatörünün gerilimini kondansatör akımına bağlı olarak da kabul edebiliriz. Bilindiği gibi kondansatör akımı da sabit bir gerilim ve frekansta çalışma anında doğrudan kondansatör kapasitesine bağlıdır. Kondansatör kapasitesi ne kadar yüksek olursa uyarım akımı da o kadar yüksek olmaktadır. Kondansatörün kapasite değeri generatörün ilk hareketinde ve uyarmanın başladığı anda gerilim arttırıcı etki yapmaktadır. Bu etki normal yükte çalışmada da devam etmektedir. Ancak normal yükte çalışma anında, gereken kapasite değeri aşıldığında yani gerekenden fazla reaktif enerji üretilmesi durumunda generatör gerilimi artmak yerine azalmaya başlamaktadır. Bu olay özellikle generatörün normal devri sayısından daha yüksek bir devir sayısında çalıştırıldığında meydana gelmektedir (Levi et al,1999)

Yukarıda açıklanan özelliğinden dolayı generatörün farklı her devir sayısı ve yük değeri için uygun olan bir kapasite değeri bulunmaktadır. Her yük değeri ve devir sayısı için farklı kapasite değerinin bir denetim devresi ile generatör uçlarında bulundurulması gerekmektedir.

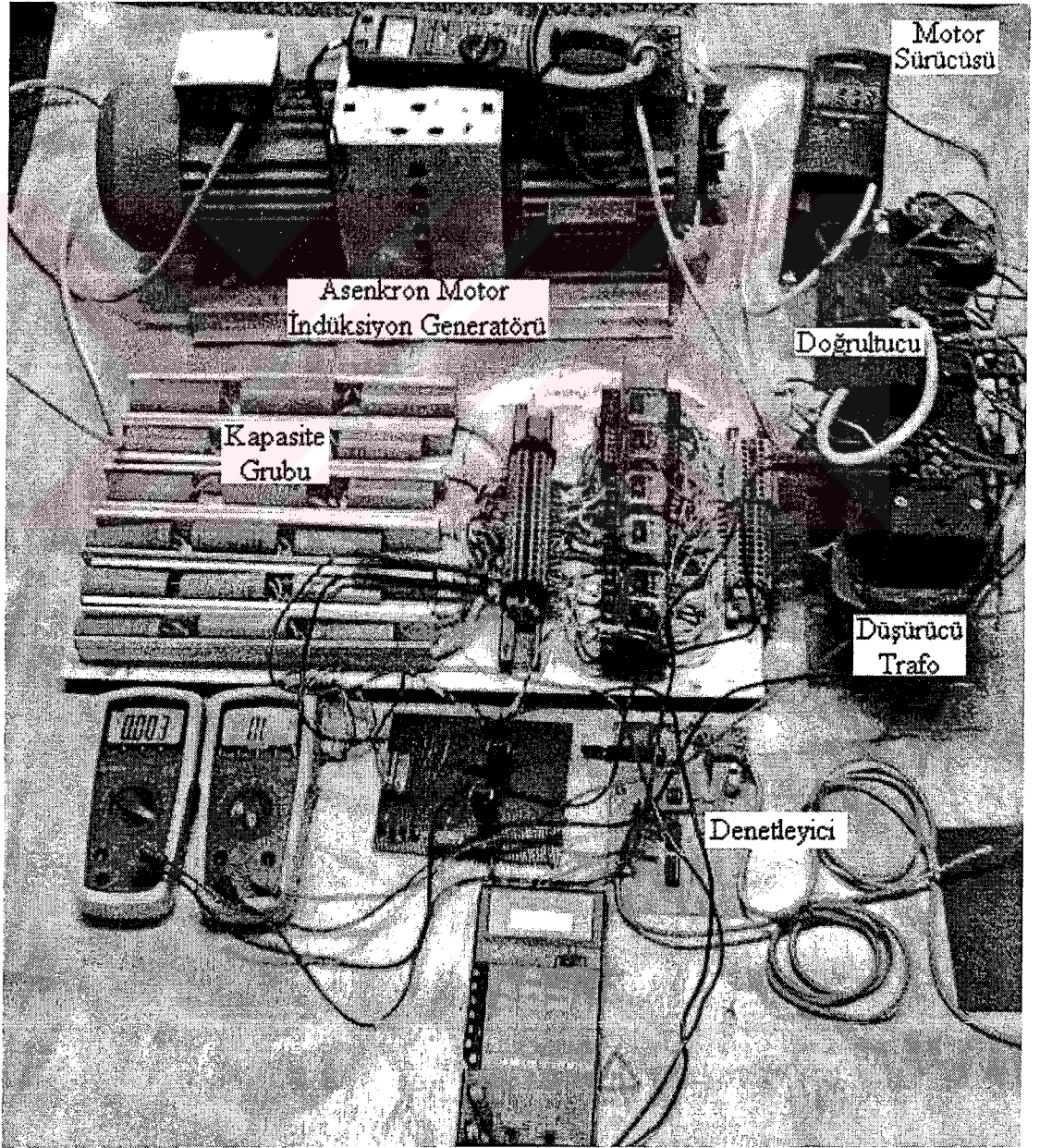
Bu çalışmada kendinden uyarımlı bir indüksiyon generatörünün farklı devir sayısı ve yük koşullarında çıkış gerilimini belirlenmiş bir aralıkta sabit tutmak için bir denetleme devresi geliştirilmiş ve generatör devresinde uygulanmaktadır.

#### **4.2. Sistemin Blok Diyagramı**

Generatörün farklı devir sayısı ve yük durumlarında çıkış gerilimini belirlenen aralıklarda sabit tutmak için tasarlanmış olan blok diyagramı Şekil 4.1'de görülmektedir. Şekilde görülen denetleme sistemi, doğrultucu çıkışından alınan gerilimi sürekli olarak ölçmekte ve generatör reaktif enerjisini sağlayan kondansatör kapasitelerini belirlemektedir. Doğrultucu çıkış gerilimi, yük devresi gerilimi ve şarj devresi gerilimi değerinin altına düştüğünde kondansatör kapasitesi arttırılmakta, generatör gerilimi arttığında ise kondansatör kapasitesi azaltılmaktadır (Suerkan et al, 2002).



Şekil 4.1. İndüksiyon generatörün kapasite denetimi blok diyagramı



Şekil 4.2.Sistemin genel görünüşü

#### **4.2.1. Generatörün sürülmesi**

Bir indüksiyon generatör, rüzgar türbinleri veya su türbinleri ile tahrik edileceği için generatörün çok geniş hız aralığında sürülmesi öngörülmektedir. Bu nedenle generatörün çalışması sırasında geniş bir hız ayar imkanı bulunan üç fazlı motor sürücüsü kullanılmaktadır. Sistemde generatörün ihtiyacı olan mekanik enerji kaynağı olarak kullanılan 1 kW gücündeki asenkron motoru beslemek için 0-200 Hz çıkış verebilen 1,1 kW gücünde Mikro Master Junior Motor sürücüsü kullanılmaktadır. Sürücünün çıkış frekansı cihaz üstünde bulunan tuşlar yardımıyla 30 Hz değerinden 65 Hz değerine kadar her seferinde 5 Hz arttırılarak ayarlanmaktadır.

#### **4.2.2. İndüksiyon generatörü**

Çalışmada küçük güçlü rüzgar ve hidrolik sistemlerde generatör olarak yaygın olarak kullanılan üç fazlı asenkron motor kullanılmaktadır. Motor 1 HP gücünde 380 V, yıldız veya üçgen bağlanabilen, 50 Hz'de 3000 d/d özelliklerine sahiptir. Generatör, sürücü motora bir kavrama yardımıyla direkt olarak bağlanmaktadır.

#### **4.2.3. Kapasite grubu**

Değişen hızlarda değişik kondansatör kapasite değerlerine gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle sistemde (4-8-12-24  $\mu$ F) değerlerinde dört adet kondansatör grubu kullanılmaktadır. Generatörün uyarımı (reaktif güç ihtiyacının karşılanması amacıyla) motor uçlarına paralel bağlanan bu kondansatörler ile sağlanmaktadır. Generatör ve kondansatör grupları yıldız bağlanmış durumdadır. Kondansatörlerin uçlarına 120 k $\Omega$  değerinde yine yıldız bağlı deşarj dirençleri bağlanmıştır. Böylece her kademe artışında kondansatörlerin boş olarak devreye girmeleri sağlanmakta ve yüksek gerilimden korunmaları amaçlanmaktadır.

#### 4.2.4. Denetleyici

Denetleme devresi birkaç alt elektrik ve elektronik devreden oluşmaktadır. Bu devreler doğrultucu çıkış gerilimi ile bir referans gerilimi karşılaştırarak kapasite değerini değiştirmektedir.

##### 4.2.4.1. Karşılaştırma devresi

Tasarlanan ve gerçekleştirilen karşılaştırma devresi Şekil 4.3' de görülmektedir. Denetim elemanı olarak bir karşılaştırıcı devre kullanılmaktadır. Sistemin çıkışından alınan gerilim değeri, bir referans gerilim değeri ile karşılaştırılarak sayıcı devresine bilgi gönderilmektedir. Sayıcı ile ikili sayı sisteminde çıkış veren kapasite ayarlama devresi, farklı çıkış değerlerine sahip kondansatör gruplarını devreye alarak gerilimi sabit tutmaya çalışmaktadır.

Karşılaştırma devresi doğrultucu çıkışından alınan gerilimi, bir gerilim bölücü kullanarak işlemsel yükseltecin 2 numaralı negatif (tersleyen) girişine uygulamaktadır. İşlemsel yükseltecin 3 numaralı ucuna ise 5.1 V değerindeki zener diyot üzerinden sabit gerilim uygulanmaktadır. İşlemsel yükselteç iki girişi karşılaştırmaktadır. 2 numaralı giriş düşük olduğunda çıkış değeri sıfır volt seviyesinden daha yüksek değere çıkmaktadır. 2 numaralı giriş yüksek olduğunda ise çıkış değeri sıfır volt seviyesinden daha düşük değere inmektedir. İşlemsel yükselteç çıkışından alınan gerilim, sayıcı kontrol devresine uygulanmaktadır.

##### 4.2.4.2. Sayıcı devresi

Karşılaştırma devresinin çıkışı Şekil 4.3' deki sayıcı devresine aktarılarak sayıcının aşağı veya yukarı yönde sayması sağlanmaktadır. Sayıcının sayma yapabilmesi için kare dalga osilatörünün çıkışı, sayıcı entegresine bağlanmalıdır. Bunun için işlemsel yükselteç çıkışından alınan sinyal, iki adet transistor tarafından sayma yön denetim rölelerini çalıştırmakta ve bu röleler sayıcının aşağı veya yukarı sayabilmesi için osilatörden gelen sayma sinyalini sayıcı entegrenin uçlarına aktarmaktadır. Sayıcı ise çıkışında bulunan transistörleri tetikleyerek transistorun devresinde bulunan kapasite

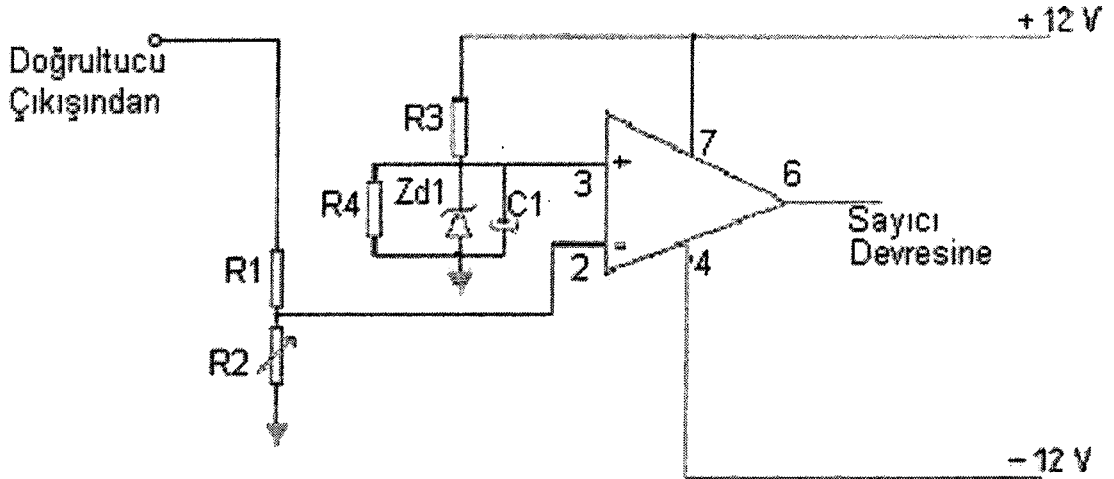


denetim rölelerini devreye almakta veya çıkarmaktadır. Bu röleler ise kontakları aracılığı ile yıldız bağlı olan kondansatör gruplarını asenkron generatörün terminal uçlarına paralel bağlamaktadır.

Sayıcı denetim devresinde bulunan PNP ve NPN tipi iki transistörün beyz uçları bir akım sınırlayıcı direnç ile kontrol devresindeki işlemsel yükseltecin çıkışına bağlı durumdadır. PNP tipinde olan Tr2 transistörü, beyz ucu emiterine göre negatif gerilim değerinde olduğunda ilettime geçmektedir. Böylece sayıcı entegrenin sayma işlemi için gerekli olan ve osilatörden alınan kare dalga sinyali Röle 2 tarafından entegrenin aşağı sayma ucuna uygulanmaktadır. NPN tipinde olan Tr1 transistörü, beyz ucu emiterine göre pozitif gerilim değerinde olduğunda ilettime geçmektedir. Sayıcı denetim devresi Şekil 4.4’de görülmektedir.

#### 4.2.5. Düşürücü transformatör

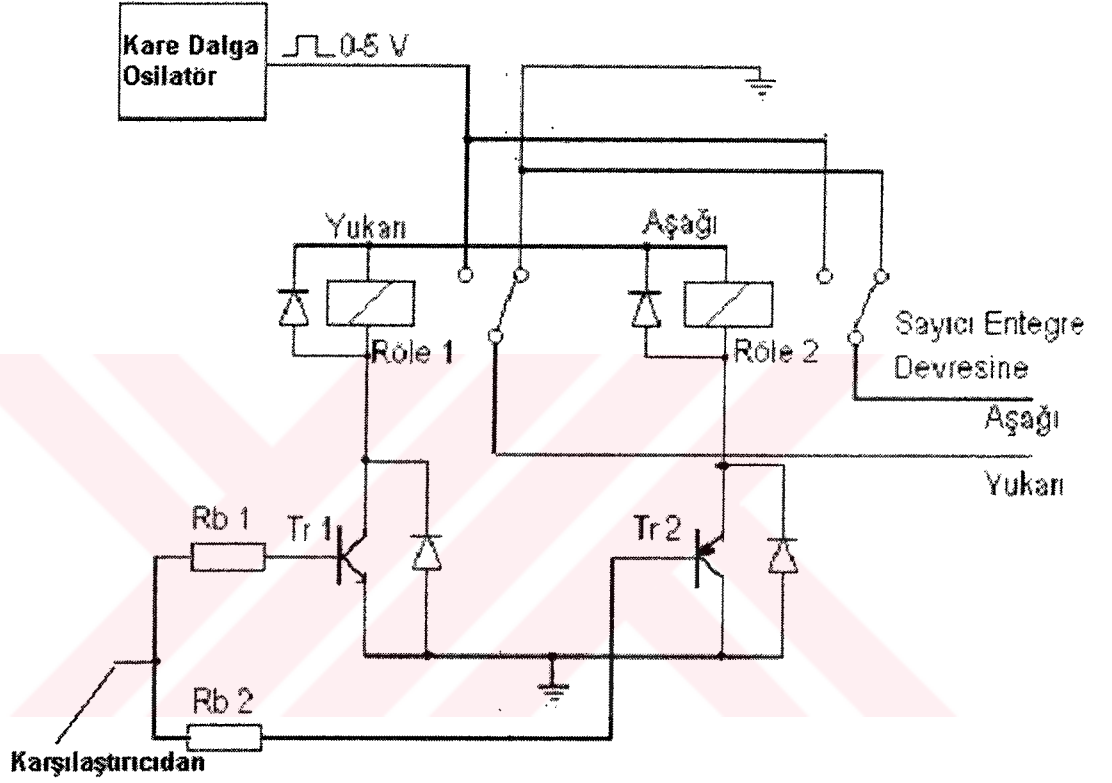
Generatör çıkışına üç fazlı yıldız bağlı 2 kVA gücünde 415 / 100 V’luk bir trafo bağlanmaktadır. Hem üretilen gerilim değerini batarya şarj gerilimi seviyesine indirmek hem de yüksek frekans değerlerinde artan empedans ile motor akımını sınırlandırmak amacıyla transformatör sekonder sargısı faz başına gerilim değeri,  $V_{sf}=100/\sqrt{3}=58$  voltuttur. Normal şartlarda girişe 380 Volt gerilim uygulandığında boşa Trafo faz başına 58 volt gerilim vermektedir. Diyot grubu ile doğrultma yapıldığında batarya gerilimine uygun bir gerilim değeri elde etmek amacıyla bu gerilim değeri seçilmiştir.



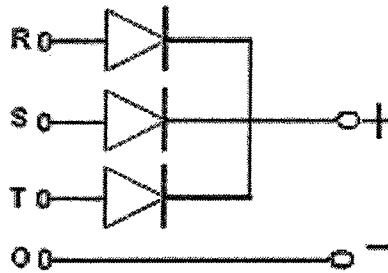
Şekil 4.3. Karşılaştırmalı devresi

#### 4.2.6. Doğrultucu

Transformatör çıkışından alınan gerilimi doğrultabilmek için her biri 6 A, 300 V değerinde üç adet diyot, üç fazlı yarım dalga doğrultucu olarak Şekil 4.5'de görüldüğü gibi bağlanmaktadır.



Şekil 4.4. Sayıcı denetim devresi



Şekil 4.5. Üç fazlı yarım dalga doğrultucu

Doğrultucu çıkışına uygun kapasite ve gerilim değerinde bir kondansatör paralel bağlı bulunmaktadır. Üç fazlı yarım dalga doğrultucunun çıkış geriliminin ortalama değeri ise aşağıda hesaplanmaktadır (Fisher, 1991).

$$V_o = \frac{3}{T} \int_{t_1}^{t_2} V_m \cdot \sin \omega t \cdot dt \quad (4.1)$$

Burada,

$V_o$  : Doğrultucu çıkışından alınan ortalama gerilim (V)

$t_1$  : Bir faza ait gerilim eğrisinin başlangıç açısı  $\pi/6\omega$  ( $30^\circ$ )

$t_2$  : Bir faza ait gerilim eğrisinin bitiş açısı  $5\pi/6\omega$  ( $150^\circ$ )

$V_m$  : Gerilimin maksimum değeri (V)

$T$  : Bir periyot için geçen süredir (açı veya zaman)

Eşitlik 14.1' in integrali alınıp  $t_1$  ve  $t_2$  değerleri yerine konularak işlem yapıldığında,

$$V_o = 0.827 \cdot V_m \quad (4.2)$$

değeri elde edilmektedir.

Bu gerilim değerinin maksimum değeri ise

$$V_m = 1,41 \cdot V_{et} = 1,41 \cdot 100 = 141 \text{ V' dur.}$$

Burada,

$V_{et}$ : Transformatör sekonder sargısından ölçülen fazlar arası gerilimin etkin değeridir. (V)

Elde edilen  $V_m$  değeri Eşitlik 4.2 ' de yerine konulduğunda,

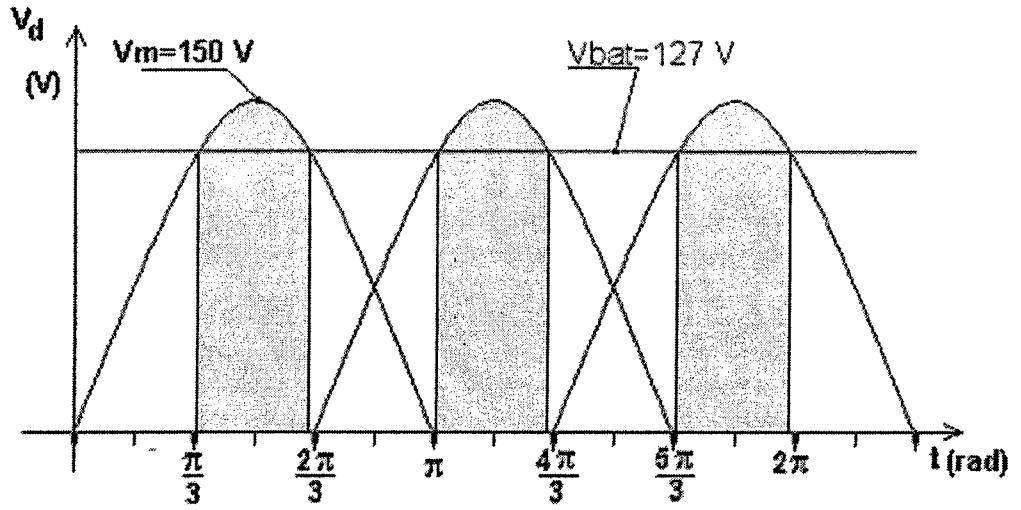
$$V_o = 0.827 * 141 = 0.827 * 141 = 116 \text{ V}$$

değeri elde edilmektedir.

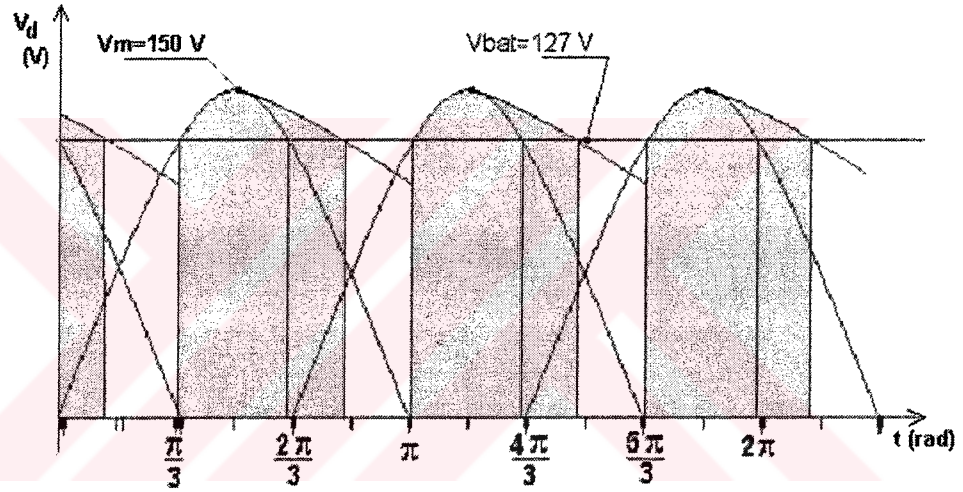
Doğrultucu çıkışından tam doğru bir gerilim değeri elde etmek için yüksek kapasiteli düzeltme kondansatörü kullanılmaktadır. Bu durumda gerilim değeri, gerilim düzeltme kondansatörünün değerine bağlı olarak 141,5 volt değerine yaklaşmaktadır. Bu kondansatörün kullanılmasının temel amacı, karşılaştırma devresinin girişine tam doğrultulmuş bir gerilim uygulamaktır. Aksi takdirde işlemsel yükseltecin karar verme işlemi zorlaşmaktadır.

Gerilim düzeltme kondansatörü bağlandığında oluşacak olan gerilimin ortalama değeri birçok değişkene bağlı olarak değiştiğinden hesaplanması zordur. Ayrıca sistemin çıkış değeri, gerilim düzeltme kondansatörü uçlarında hiç bir zaman batarya gerilim değerinin altına düşmemektedir. Bu değer altına düştüğünde ise diyotların çıkış gerilimi, giriş geriliminden yüksek olduğu için diyotlar iletme geçmemekte ve bu anlarda generatör yüksüz olarak çalışmaktadır. Generatörün yüksüz çalışma süresi, giriş geriliminin maksimum değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Şekil 4.6-a'de 150 Volt Maksimum gerilim değerine sahip üç fazlı gerilimin düzeltme kondansatörü dikkate alınmadan generatörü yükleme eğrisi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi diyotlardan kısa bir süre akım geçmektedir. Bu süreyi arttırmak için gerilim düzeltme kondansatörü eklenmiştir. Kondansatör her faz alternansının artan kenarında şarj olmakta ve maksimum değerden dönüldüğünde ise diyotlara yardımcı olarak akü grubunu beslemektedir. Bu anda akü grubunun enerji ihtiyacı paralel iki koldan sağlandığı için kondansatörün deşarjı zaman almaktadır. Bu durumda düzeltme kondansatörü bağlı bir devrenin tipik yükleme eğrisi Şekil 4.6-b'deki gibi olmaktadır. Buradan görüleceği gibi gerilim düzeltme kondansatörünün kapasitesi ayarlanarak batarya şarj geriliminin ortalama değeri de ayarlanabilmektedir (Fisher, 1991).



a-Doğrultucu diyotların yüklenme eğrileri



b-Gerilim düzeltme kondansatörü kullanıldığında elde edilen gerilim dalga şekli

Şekil 4.6. Düzeltmek kondansatörünün takılmadığı ve takıldığı durum

Sistemde akümülatör grubunun şarj gerilimini ayarlamak amacıyla bir denetleme devresi tasarlanmıştır. Bölüm 4.2.4'de belirtildiği gibi denetleyici akümülatör gerilimini 127 V'dan büyük fakat 150 V'den küçük değerlerde tutmaya çalışmaktadır. Bu değerler sistemin besleyeceği diğer yükler içinde aynı olmaktadır.

#### 4.2.7. Akümülatör grubu

Sistemde omik özelliği olan bir yükü beslemek amacıyla her biri 12 V-7Ah değerinde seri bağlı 10 adet akümülatör kullanılmaktadır. Bu nedenle deneyde

akümülatör grubu yanında omik yükte dikkate alınmaktadır. Omik yük olarak üç adet 150 W gücünde lamba grubu kullanılmaktadır.

Sistemin çalışması hem boшта hem de yükte test edilmektedir. Her kademedeki ölçülen değerler bir tabloya kaydedilmektedir. Kondansatör ile uyartımın zamana bağlı olarak değişmesi ve belirli süre sonunda sabit değere ulaşması nedeniyle her bir kademe için ortalama 10-15 sn beklenmektedir.

### 4.3. Generatörün Uyartım Kapasitesi

#### 4.3.1. Uyartım kondansatörlerinin belirlenmesi

Bir generatörün gerilim üretebilmesi için reaktif güce gereksinimi vardır. Bu nedenle uçlarına reaktif güç ihtiyacını karşılayacak bir kondansatör grubu bağlanmaktadır. Bu kondansatör grubu tek bir kondansatör olabileceği gibi birbirinden farklı değerlerdeki kondansatörlerden oluşan bir kapasite grubu da olabilmektedir. Ancak, gerekli kapasite değeri generatörün çalışması sırasında ihtiyaç duyulduğunda değiştirilebilmelidir. Bu amaçla sistemde 4 farklı kapasite değerine sahip, yıldız bağlantılı bir kondansatör grubu kullanılmaktadır (Smith, 1999).

Generatörün uyartımı için gerekli kapasite değeri aşağıdaki şekilde belirlenmektedir. Generatörün görünür gücü;

$$S_o = \sqrt{3} \cdot V_h \cdot I_h \quad (4.3)$$

Burada,

$S_o$  : Generatörün Görünür gücü (VA)

$V_h$  : Generatörün Hat Gerilimi (V)

$I_h$  : Generatörün Akımıdır (A)

$V_h$  ve  $I_h$  değerleri indüksiyon generatörü olarak kullanılacak olan asenkron motorun etiketinden alınmaktadır. Bu değerler Eşitlik 4.3' de yerine konulduğunda,

$$S_o = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1,7 = 1118 \text{ VA}$$

değeri elde edilir.

Generatörün boştaki reaktif gücü  $Q_o$  ise görünür güce eşit olduğundan;

$$Q_o = S_o = 1118 \text{ VAR}$$

olarak yazılabilir. Bu durumda generatörün boşa faz başına reaktif gücü  $Q_f$ ,

$$Q_f = \frac{Q_o}{3} \tag{4.4}$$

olmaktadır. Böylece,

$$Q_f = \frac{1118}{3} = 372 \text{ VAR}$$

değeri elde edilir.

Generatörün bağlantı şekli yıldız olduğu için faz başına düşen gerilim  $V_f$ ;

$$V_f = \frac{V_h}{\sqrt{3}} \tag{4.5}$$

Burada,

$V_f$  : Generatörün faz gerilimi (V)

$V_h$  : Generatörün hat gerilimidir (V)

Eşitlik 4.5' de değerler yerine konulup hesaplama yapıldığında  $V_f=220$  V değeri elde edilmektedir.

Yıldız bağlantı için motor akımı  $I_f$  ;

$$I_f = \frac{Q_f}{V_f} \quad (4.6)$$

Burada,

$I_f$  : Generatörün faz akımıdır (A)

Eşitlik 4.6' de değerler yerine konulup hesaplama yapıldığında  $I_f=1,7$  A değeri elde edilmektedir.

Bu akım değeri, generatörün reaktif güç ihtiyacının karşılanması için terminal uçlarına bağlanacak olan kondansatör grubunun çekeceği akım değeridir. Böylece, bu akım değeri kullanılarak kapasitif reaktans hesaplanabilmektedir.

Generatör uçlarına bağlanacak kondansatörler, generatör gibi yıldız bağlı olduklarından, generatörün faz başına gerilim ve akım değerleri bu kondansatörler için de geçerlidir.

$$X_c = \frac{V_c}{I_c} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (4.7)$$

Burada,

$X_c$  : Bir Faza ait kondansatör reaktansı (  $\Omega$  )

$V_c$  : Kondansatör faz gerilimi (V)

$I_c$  : Kondansatör faz akımı (A)

$C$  : Bir faz için gerekli kondansatör kapasitesidir (F)



Eşitlik 4.7'den kondansatör kapasite değeri C;

$$C = \frac{I_c}{2\pi \cdot f \cdot V_f} \quad (4.8)$$

yazılabilir ve böylece bir faza ait kondansatör kapasitesi ihtiyacı ;

$$C = \frac{1.7}{2\pi \cdot 50 \cdot 220} = 24 \cdot 10^{-6} = 24 \mu\text{F}$$

olarak bulunabilir. Aynı şekilde generatörün farklı güç değerleri için kapasite değerleri hesaplanabilmektedir.

Yukarıda yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen kapasite değeri sadece 50 Hz frekansında geçerlidir. Ancak çalışma frekansı değiştiğinden, buna bağlı olarak kapasite değeri de değişecektir.

Aynı hesaplamaları deneyde kullanılan en düşük frekans değeri için de yapmak gerekmektedir. Diğer bütün değerlerin sabit olduğu kabul edilerek sadece frekansın değiştiğini varsayarak kapasite değeri tekrar hesaplanırsa aşağıda görüldüğü gibi farklı bir kapasite değeri elde edilmektedir.

Sistemin çalışması sırasında çalışma frekansı alt sınır değeri olan 30 Hz için kapasite değeri;

$$C = \frac{1.7}{2\pi \cdot 30 \cdot 220} = 41 \cdot 10^{-6} = 41 \mu\text{F}$$

olarak bulunur. Hesaplanan bu kapasite değeri gerilim düşümleri ve fazla yüklenme durumu dikkate alındığında 48  $\mu\text{F}$  olarak kullanılabilir uygun görülmektedir. Ancak bu değer en yüksek kapasite değeridir.

Sistemde kullanılan en yüksek frekans sınır değeri 65 Hz için kapasite değeri tekrar hesaplanmaktadır. Burada bütün değişkenlerin aynı olduğu, sadece frekansın değiştiği kabul edilmektedir. Böylece;

$$C = \frac{1.7}{2.\pi.65.220} = 11.10^{-6} = 11 \mu\text{F}$$

bulunan bu değer yaklaşık 12  $\mu\text{F}$  olarak alınmaktadır.

Yukarıda hesaplanan kondansatör kapasite değerleri 4-48  $\mu\text{F}$  değerleri arasında faz başına uyarım kapasitesi olarak ayarlanabilmesi için bir denetleyiciye gereksinim duyulmaktadır.

#### 4.3.2. Kapasite değiştirme devresi

Şekil 4.7’de görülen kapasite değiştirme devresinde 4 bit yukarı–aşağı sayıcı entegresi kullanılmaktadır. Entegre çıkışında kullanılan transistörler ile kondansatörleri generatör ucuna bağlayan röleler devreye alınmaktadır. Röle kontak akımları kondansatör akımlarına uygun olarak belirlenmektedir. Kondansatör grubu, denetim devresi yardımıyla 4  $\mu\text{F}$  ile 48  $\mu\text{F}$  arasındaki kapasite değerleri 4  $\mu\text{F}$  ‘lık kademeler ile artırılıp azaltılabilmektedir. Böylece generatörün her devir sayısı için gerekli kapasite değeri  $\pm 4 \mu\text{F}$  olarak ayarlanabilmektedir. Hangi kapasite değerinin generatöre bağlanacağı denetim devresi tarafından belirlenmektedir.

#### 4.3.3. Kapasite gruplarının belirlenmesi

Kondansatör grupları standart değerlerde ve paralel bağlantılar yapılarak 4-8-12-24  $\mu\text{F}$  kademeleri ile oluşturulmaktadır. Bu değerleri elde etmek için;

4 $\mu\text{F}$ kondansatör grubu	4 $\mu\text{F}$
8 $\mu\text{F}$ kondansatör grubu	3 $\mu\text{F}$ +5 $\mu\text{F}$
12 $\mu\text{F}$ kondansatör grubu	12 $\mu\text{F}$
24 $\mu\text{F}$ kondansatör grubu	9 $\mu\text{F}$ + 15 $\mu\text{F}$

şeklinde bağlantıları yapılmıştır. Her kondansatör grubunun ana devreye bağlantısı farklı röleler ile sağlanmıştır. Bu sebeple her grup için bir adet olmak üzere toplam 6 adet röle kullanılmıştır. Rölelerin kontak akımları en az 6 ampere dayanacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca kondansatör gruplarının uçlarına yıldız bağlı olarak 120 k değerinde deşarj dirençleri bağlanmıştır. Bu değer kondansatörün maksimum gerilim değeri dikkate alınarak belirlenmiştir. Kondansatörlerin deşarj süreleri, maksimum gerilim değeri ve kademe değişimlerini belirleyen sayıcı ilerleme süresi dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Tablo 4.1. Kondansatör Kademe Değerlerinin Sıralanışı

Sayıcı Çıkış Uçları				Sayısal Çıkış Değeri	Toplam Kapasite Değeri
D	C	B	A		
24	12	8	4	0	0 $\mu$ F
0	0	0	0	0	0 $\mu$ F
0	0	0	1	1	4 $\mu$ F
0	0	1	0	2	8 $\mu$ F
0	0	1	1	3	12 $\mu$ F
0	1	0	0	4	12 $\mu$ F
0	1	0	1	5	16 $\mu$ F
0	1	1	0	6	20 $\mu$ F
0	1	1	1	7	24 $\mu$ F
1	0	0	0	8	24 $\mu$ F
1	0	0	1	9	28 $\mu$ F
1	0	1	0	10	32 $\mu$ F
1	0	1	1	11	36 $\mu$ F
1	1	0	0	12	36 $\mu$ F
1	1	0	1	13	40 $\mu$ F
1	1	1	0	14	44 $\mu$ F
1	1	1	1	15	48 $\mu$ F

#### 4.3.4. Kondansatör kademelerinin sıralanması

Yukarıda belirtildiği gibi sistemde 4 farklı kademe, kondansatör grubu kullanılmaktadır. Sayıcı çıkışından elde edilen ikili sayı sistemine göre elde edilen kondansatör grupları aşağıdaki Tablo 4.1' de verilmektedir.

Tablo 4.1' den görüleceği gibi sayıcı 16 farklı çıkış vermektedir. Ancak kondansatörlerin kapasite değerleri uygun kademelerde bulunmadığı için (4-8-16-32  $\mu\text{F}$  gibi) tablodan da görüleceği gibi 12  $\mu\text{F}$ , 24  $\mu\text{F}$  ve 36  $\mu\text{F}$  değerleri ikişer defa çıkış vermektedir. Ancak bu durum deney sırasında herhangi bir aksaklığa sebep olmamaktadır. Ancak yapılacak gerçek uygulama devrelerinde seçilecek kondansatör kapasiteleri daha uygun olarak seçilebilir.

#### 4.4. Denetim Devresi Eleman Değerleri

Denetim sisteminde kullanılan karşılaştırıcı devresinde doğrultucu çıkış geriliminin, batarya şarj gerilim değerinde tutulabilmesi için sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple karşılaştırıcı bir referans gerilimi ile doğrultucu gerilimini karşılaştırarak sayıcı devresine uygulanacak gerilimi belirlemektedir. Ancak doğrultucu çıkış gerilimi yüksek olduğu için bir gerilim bölücü ile düşürülerek karşılaştırıcı girişine uygulanmaktadır. Gerilim bölücünün eleman değerleri aşağıdaki şekilde belirlenmektedir.

Şarj devresinin kabul edilebilir şarj gerilim değeri akümülatör devresinin şarj edilebilmesi için gereken akımı karşılamak amacıyla 150 volt olarak belirlenmiştir. Kullanılan dirençler üzerinde oluşan ısının kolaylıkla dağıtılması amacı ile 0.5 Watt değerinde seçilmiştir.

Buna göre ;

$$P_R = \frac{U^2}{R} \quad (4.9)$$

$$R = \frac{150^2}{0.5} = \frac{22500}{0.5} = 90000 \quad \Omega$$

olarak hesaplanmaktadır.

Burada,

$P_R$  : Kullanılan direncin gücü (W)

$U$  : Dirence uygulanacak gerilimdir (V)

Karşılaştırıcı devresinde kullanılan ayarlı direnç değeri,

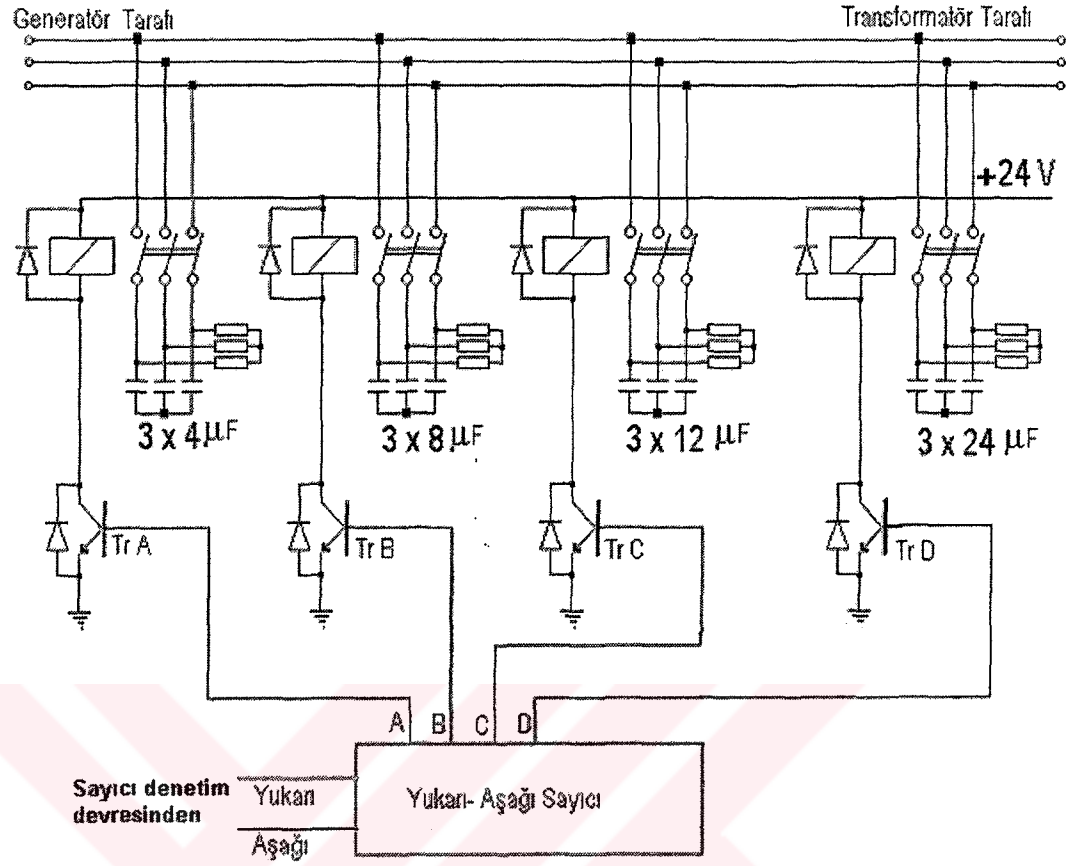
$$R_a = \frac{5,1}{150} \cdot 90000 = 3060 \quad \Omega$$

olarak belirlenir. Bulunan bu değer, toplam direnç değerinden çıkartılarak seri bağlı direnç değeri bulunmaktadır.

$$R_s = R - R_a = 90000 - 3060 = 86940 \quad \Omega$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen direnç değerleri 150 Volt içindir. Ancak deney sırasında yapılan ölçümlerde doğrultucu devresinin gerilim değerleri 150 V değerinden büyüktür. Boş çalışma sırasında yapılan ölçümlerde alınan bu en yüksek değer 65 Hz çalışmada 28  $\mu$ F kondansatör grubu bağlı iken elde edilmiştir.

Bu kademede transformatör giriş faz gerilim değeri;  $U_f=340$  V, doğrultucu çıkış değeri de  $U_{DA}=350$  V'dur.



Şekil 4.7. Kapasite denetim devresi

Görüldüğü gibi en büyük çıkış gerilimi normal çalışma geriliminden çok büyüktür. Bu nedenle gerilim bölücü devre dirençlerini aşırı ısınmadan korumak için yukarıda yapılan hesaplama tekrar yapılarak, Eşitlik 4.9. yardımı ile;

$$R = \frac{350^2}{0.5} = \frac{122500}{0.5} = 245000 \quad \Omega$$

olarak belirlenmektedir. Ayarlı direnç değeri de;

$$R_a = \frac{5,1}{150} \cdot 245000 = 8330 \quad \Omega$$

olarak belirlenmektedir. Böylece seri bağlı direnç değeri de,

$$R_s = R - R_a = 245000 - 8330 = 236670 \Omega$$

olarak tekrar bulunmaktadır.

Bu değerler standart direnç değerlerine uygun olmadığı için 236670  $\Omega$  direnç değeri 220 k, 15 k, 1k5, ve 180  $\Omega$  dirençler seri bağlanarak elde edilmektedir.

#### 4.5. İşlemsel Yükseltici

Sistemimizde doğrultucu çıkışı ile referans gerilimi değerini karşılaştırarak gerekli kondansatör kapasitesi değerlerini belirlemek üzere bir işlemsel yükseltici kullanılmaktadır.

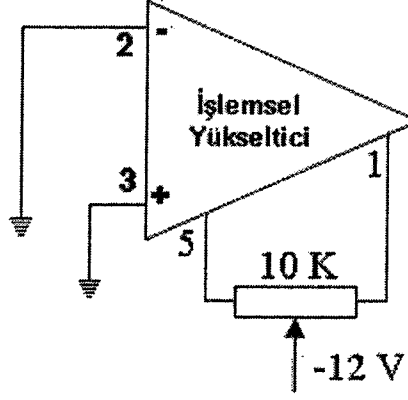
##### 4.5.1. İşlemsel yükselticinin devre değişkenleri

İşlemsel yükselticiler temel olarak giriş gerilim değerlerini karşılaştırarak aradaki farkı geri besleme direnci ile giriş dirençlerinin bölümü  $R_{fb}/R_i$  oranında çarparak çıkışa aktaran elemanlardır. Ancak kullanılan devrede giriş direnci ve geri besleme direnci kullanılmadığı için çıkış değeri teorik olarak sonsuzun sıfıra bölümü şeklinde bir değer olarak çıkış değeri sonsuza ulaşmaktadır. Bu pratikte mümkün değildir. Çünkü işlemsel yükselticilerin çıkış gerilimleri besleme gerilimleri ile sınırlandırılmaktadır. Bu sebeple işlemsel yükselticinin çıkış gerilimi +12 volt ile -12 volt arasında değişmektedir. Çünkü işlemsel yükselticinin besleme gerilimi olarak  $\pm 12$  volt kullanılmıştır.

##### 4.5.2. İşlemsel yükselticinin sıfırlama (Off-Set) ayarı

İşlemsel yükseltici, yapısından dolayı giriş gerilimleri arasında hiç fark olmasa bile sıfır volttan farklı bir çıkış vermektedir. Oysa giriş gerilimleri birbirine eşitlendiğinde çıkışın sıfır volt olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için Offset ayarının yapılması gerekmektedir (Boylestad et al,1994). İşlemsel yükselticinin 1 ve 5 nolu ayakları kullanılarak yapılan sıfırlama ayarı Şekil 4.8'de görülmektedir. İşlemsel yükselticinin çıkışı sayıcı kontrol devresindeki transistörlerin her ikisinin de beyzine ulaştığı için

beyz akımı  $\beta$  yükseltme katsayısı dikkate alınarak hesaplanan bir değerdeki  $R_b$  dirençleri ile sınırlanabilir. Bu direnç gerekirse hassas ayarlama gereken yerlerde ayarlı direnç şeklinde de olabilir.



Şekil 4.8. İşlemsel yükseltici sıfırlama (Off-Set) ayar devresi



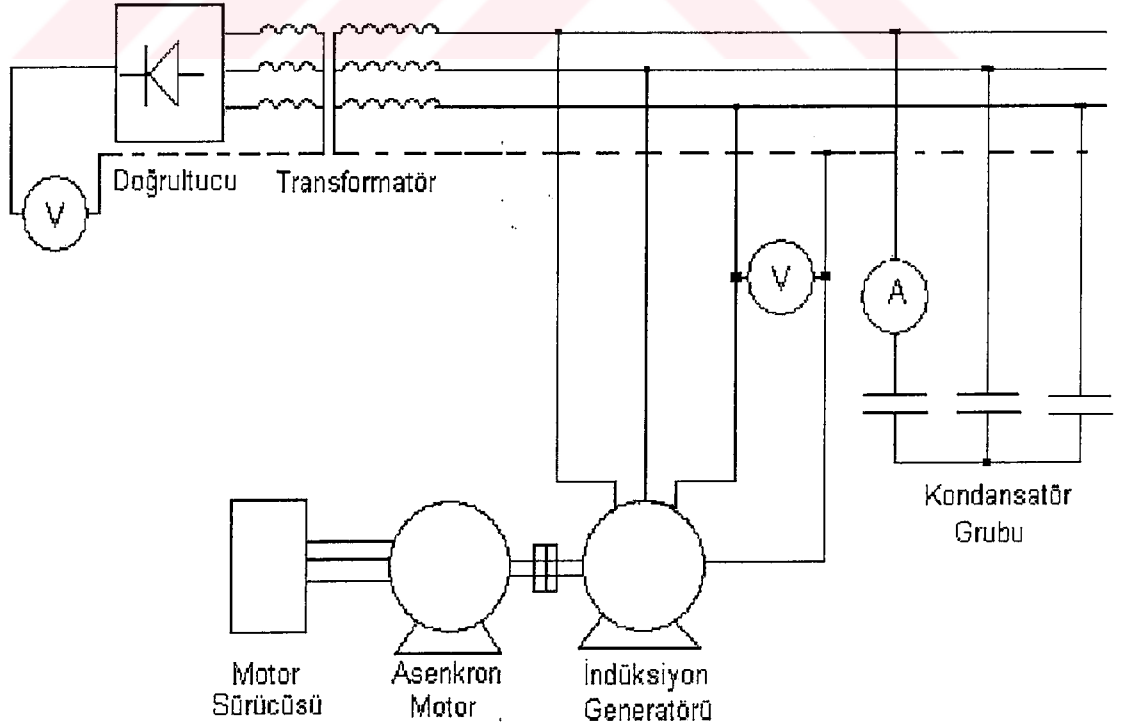
## 5. SİSTEMDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRİLMESİ

Gerçeklenen sistemin performansı geniş bir frekans aralığında boş ve yüklü durumda 30 Hz ve 65 Hz frekanslarında 5 Hz'lik kademelerle test edildi. Boşta ve yükte çalışma sırasında her frekans kademe değeri için  $4 \mu\text{F}$ 'dan  $48 \mu\text{F}$ 'a kadar  $4 \mu\text{F}$ 'lık kademelerle uyarım kapasite değerleri yükseltildi.

### 5.1. Sistemin Boşta Çalıştırılması

Generatörün boşta çalışması amacıyla Şekil 5.1'de görülen devre kurularak yapılan ölçümler ve elde edilen değerler Ek 1.'de görülen Tablo 5.1'e kaydedildi.

İndüksiyon generatörünün klemens uçlarına bağlı olan kondansatör kapasiteleri  $4 \mu\text{F}$  kademeler halinde artırılarak her kademede faz gerilimi değeri, R fazı ile nötr

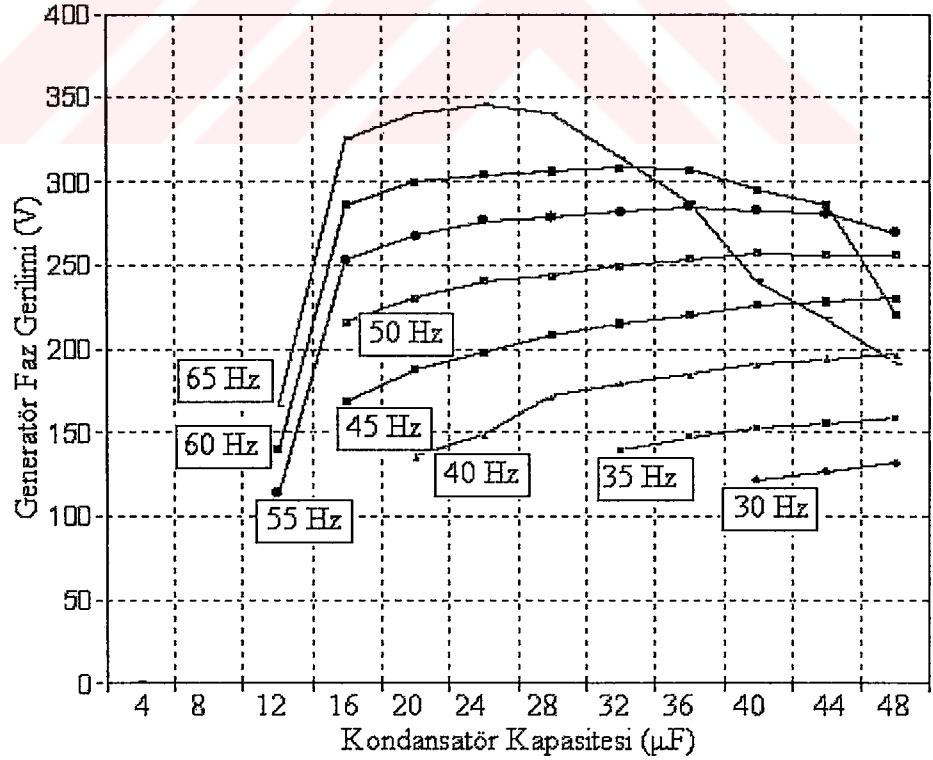


Şekil 5.1. Sistemin boş çalışma devre şeması

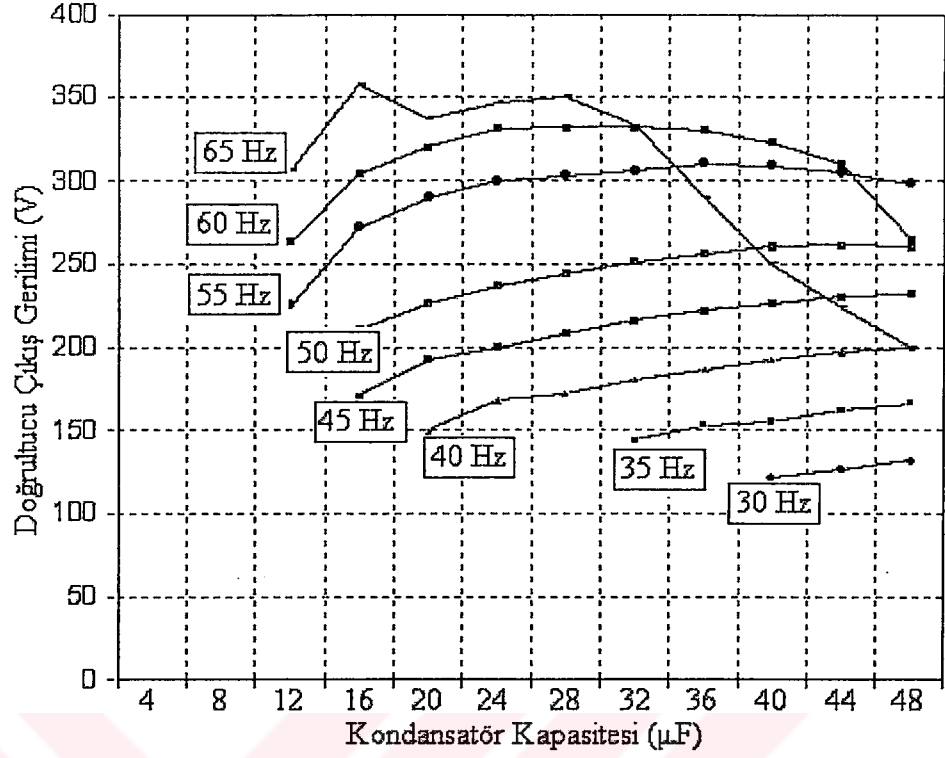
arasında ölçülerek Ek 1' de verilen Tablo 5.1' e kaydedildi. Bu tabloya kaydedilen değerler ile Şekil 5.2' de görülen  $U_f(C, f)$  grafiği oluşturuldu.

Şekil 5.2' de görüldüğü gibi 30-50 Hz. aralığındaki çalışmada kapasite arttığında gerilim değeri de arttığı görülmektedir. Ancak 55-65 Hz aralığındaki frekanslarda ise kapasite değeri arttığı halde, gerilim belirli bir değerden sonra düşmeye başlamaktadır. Bu durum stator sargılarının sarıldığı saç nüvenin artık doyuma ulaştığını ve daha fazla uyarılamayacağını göstermektedir. Bu değerden sonra uyarım kondansatörleri bir yük gibi davranmaya başlamaktadır. Generatörün boş çalışma sırasında bile uygun çalışma karakteristiği 30-50 Hz' de en uygun olarak gerçekleşmektedir.

İndüksiyon generatörünün klemens uçlarına bağlı olan kondansatör kapasiteleri 4  $\mu\text{F}$  kademeler halinde arttırılarak her kademede doğrultucu çıkışından ölçüm yapılarak Ek 1' de görülen Tablo 5.1' e kaydedildi. Bu tabloya kaydedilen değerler ile Şekil 5.3' de görülen  $U_{da}(C, f)$  grafiği oluşturuldu.



Şekil 5.2. Yüksüz çalışmada generatör faz gerilimi



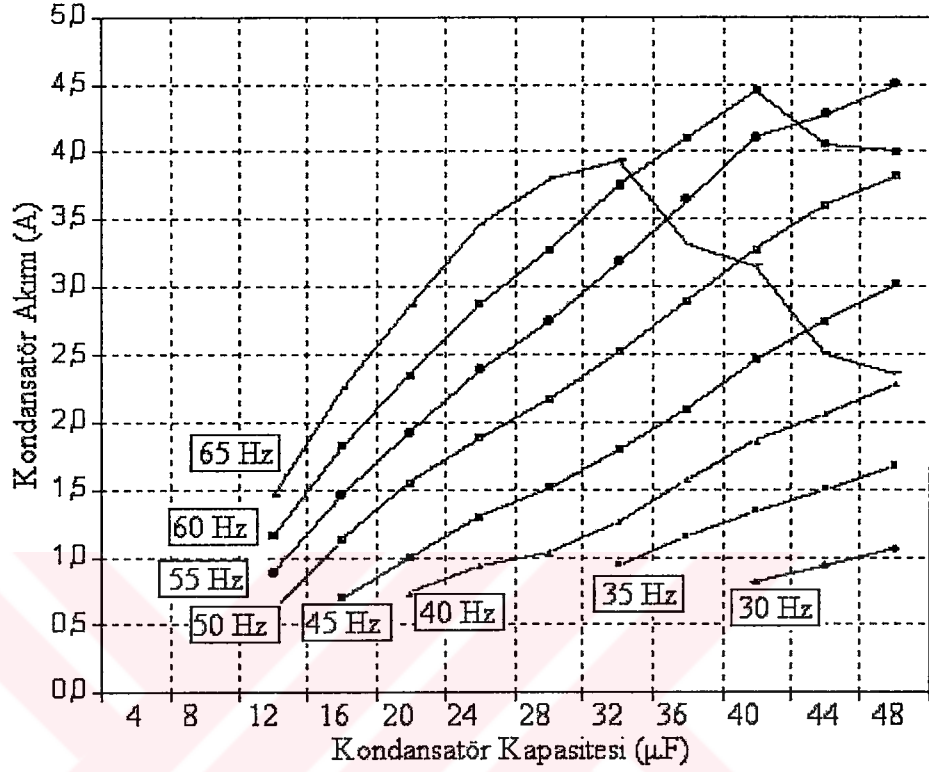
Şekil 5.3. Yüksüz çalışmada doğrultucu çıkış gerilimi

Şekil 5.3' de görüldüğü gibi 30-50 Hz. aralığındaki frekanslarda doğrultucu çıkışındaki gerilim değerinde artış görülmektedir. Ancak 55-65 Hz aralığındaki frekans değerlerinde ise 24-32  $\mu\text{F}$  uyarım kapasitesinden sonra gerilim düşmeye başlamaktadır. Bu olay, daha önce açıklandığı gibi stator sargularının sarıldığı saç nüvedeki doymaya bağlı olarak meydana gelmektedir.

Yukarıda açıklandığı gibi bu işlemde de indüksiyon generatörünün klemens uçlarına bağlı olan kondansatör kapasiteleri 4  $\mu\text{F}$  kademeler halinde artırılarak her kademede kondansatör bir faz akımı ölçülerek Ek 1' de görülen Tablo 5.1' e kaydedildi. Bu tabloya kaydedilen değerler ile Şekil 5.4' de görülen  $I_c (C, f)$  grafiği oluşturuldu.

Şekil 5.4' de görüldüğü gibi 30-55 Hz. aralığındaki frekanslarda kondansatör grubunun çektiği veya indüksiyon generatörü ile karşılıklı alıp verdiği akım değerinde artış görülmektedir. Ancak 60-65 Hz. aralığındaki frekans değerlerinde ise 32-40  $\mu\text{F}$  uyarım kapasitesinden sonra akım düşmeye başlamaktadır. Bu olay, daha önce açıklandığı gibi stator sargularının sarıldığı saç nüvedeki doymaya bağlı olarak

gerilimin azalması sonucu kondansatör akımlarının azalması şeklinde meydana gelmektedir.

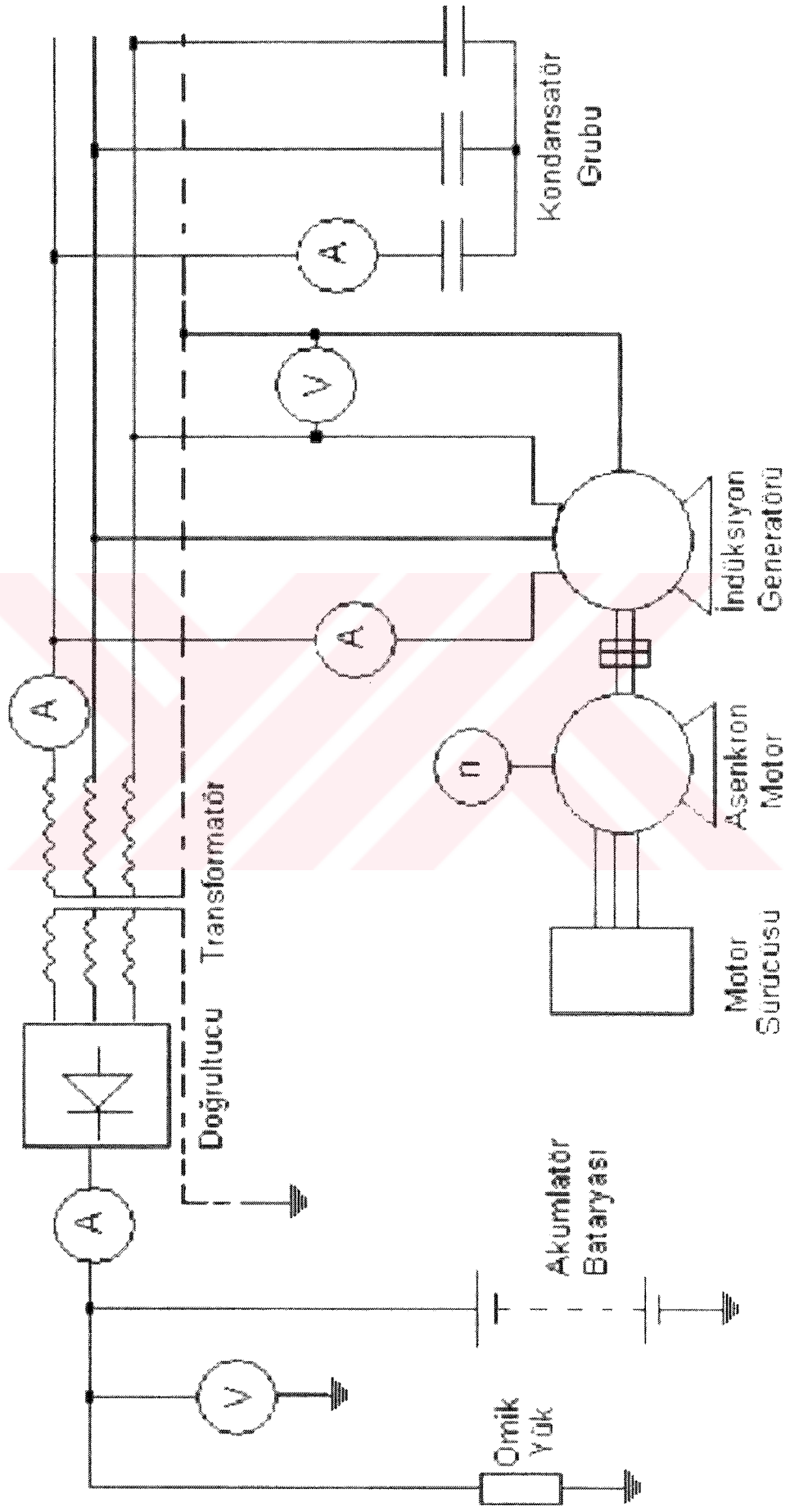


Şekil 5.4. Uyarım kondansatörlerinin çektiği akım değişimi

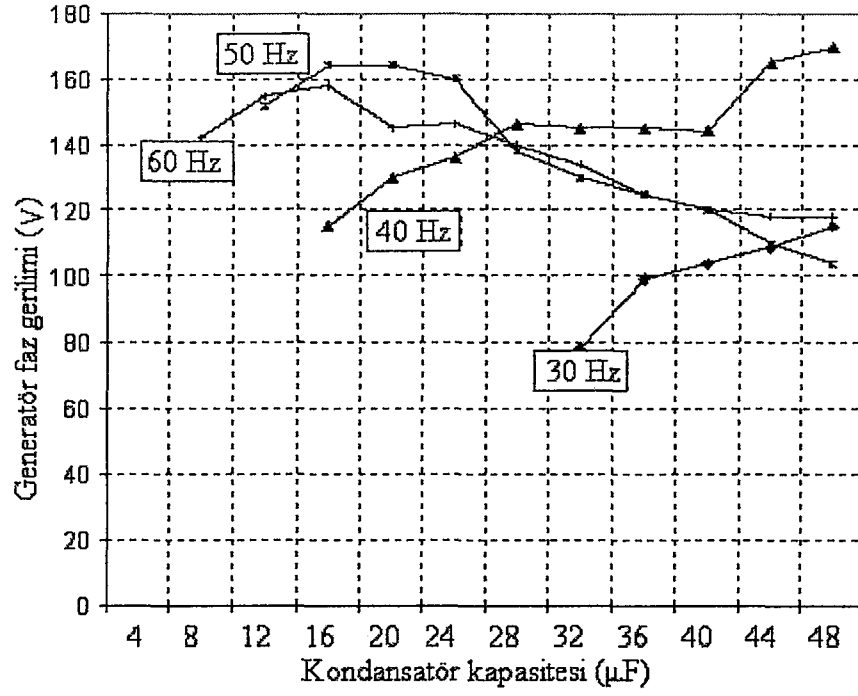
## 5.2. Sistemin Yükte Çalıştırılması

Bölüm 5.1' de açıklandığı gibi bu işlemde de indüksiyon generatörünün klemens uçlarına bağlı olan kondansatör kapasiteleri 4 µF kademeler halinde arttırılarak her kademede generatör faz gerilimi ölçülerek Ek 1' de görülen Tablo 5.2.1., Tablo 5.2.2., Tablo 5.2.3., Tablo 5.2.4' e kaydedildi. Bu tabloya kaydedilen değerler ile Şekil 5.6' de görülen  $U_f(C, f)$  grafiği oluşturuldu.

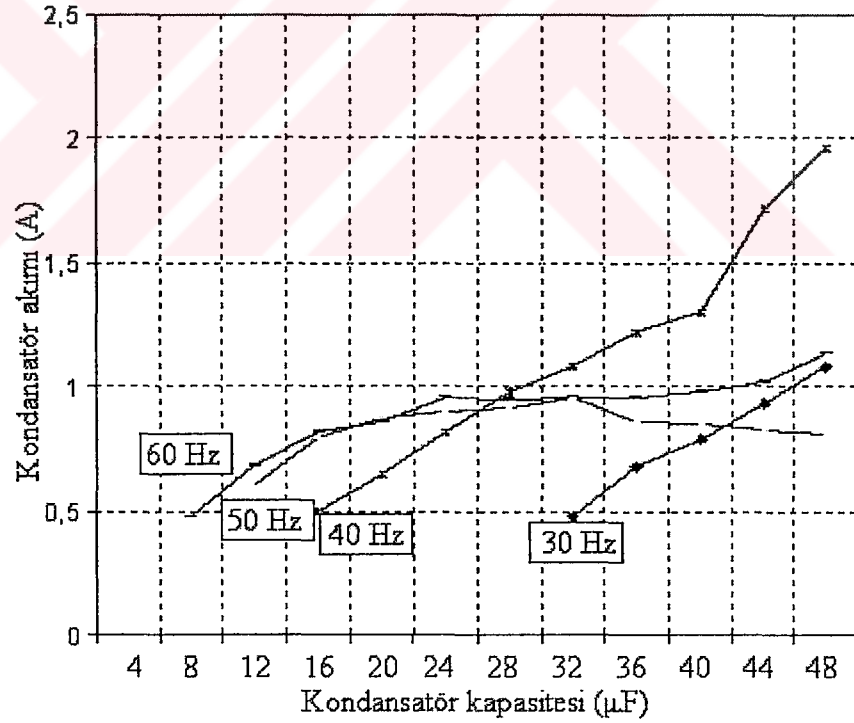
Şekil 5.6' de görüldüğü gibi 30-50 Hz. aralığındaki frekanslarda generatör gerilimi belirli bir eğimle ilk başta artış gösterirken daha ileri kapasite değerlerinde azalma görülmektedir. Ancak 55-60 Hz. frekanslarında ilk başta yüksek gerilimle başlarken yüksek kapasite değerlerinde gerilim azalmaya başlamıştır. Generatörün uyarım kapasitesi artmasına rağmen gerilimler artmamaktadır. Bu olay yük ve yükü besleyen transformatörün gerilimi azaltıcı etkisi olarak açıklanabilir.



Şekil 5.5. Sistemin yükte çalışma bağlantı şeması

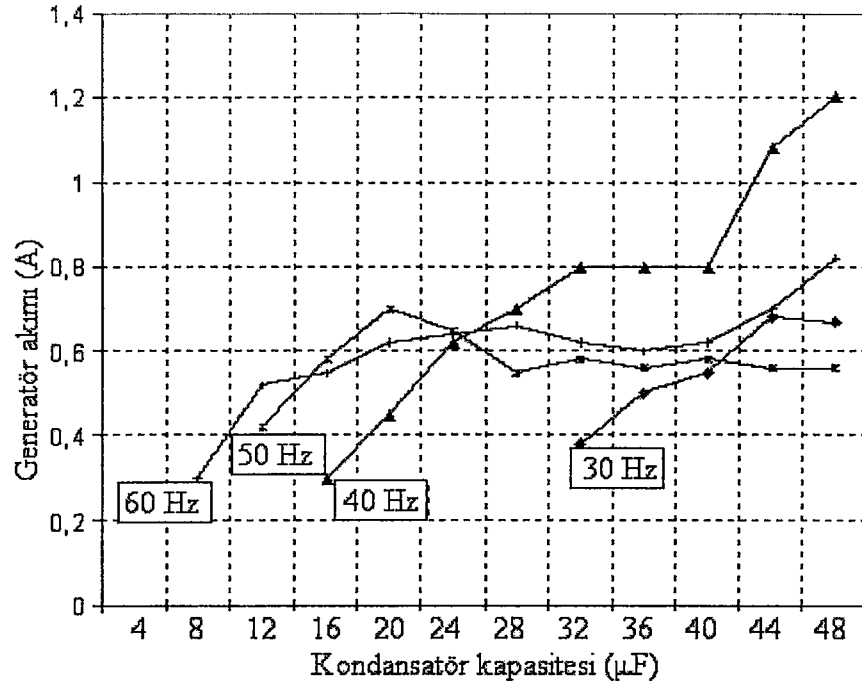


Şekil 5.6. Generator gerilimi değişimi



Şekil 5.7. Kondansatör akımı değişimi

Şekil 5.7' de kondansatör grubunun çektiği akımın uyartım kapasitesi ve frekansa göre değişimi verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi kondansatör akımı kapasite ile doğru orantılı olarak artmamaktadır. Kapasite değeri arttığında daha fazla akım



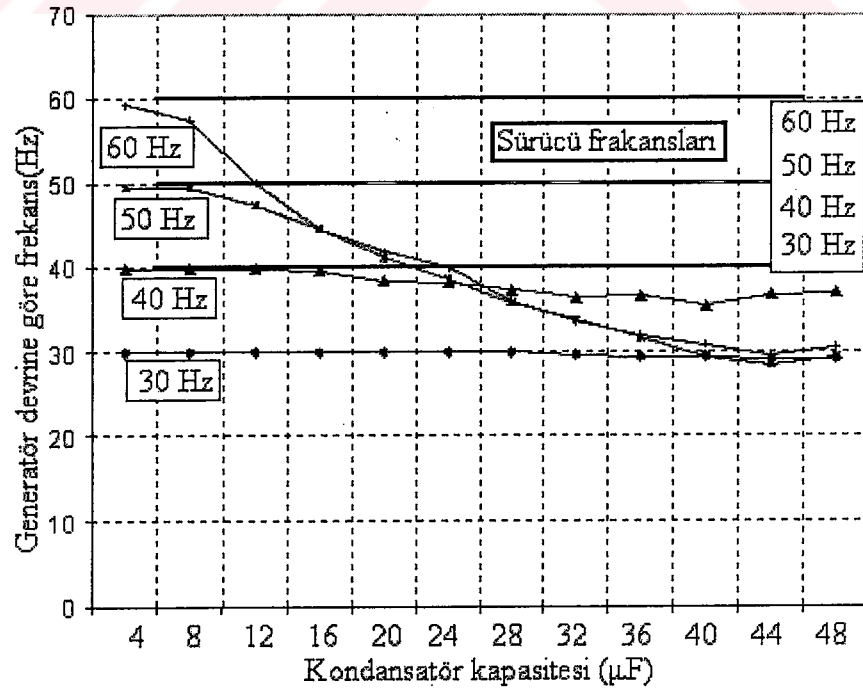
Şekil 5.7. Generator akımı değişimi

çekilmesi gerektiği halde akımın sabit kalması generator geriliminin azalması olarak yorumlanabilir. Şekil 5.6' de görülen generator  $U_f(C,f)$  eğrisinde de kapasite ile generator gerilimi beraber artış göstermemekte, aksine kapasite arttığında gerilim değeri azalma göstermektedir.

Şekil 5.8' de yüklü çalışma durumunda yük akımının kapasite ve sürücü frekansına göre değişimi görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi 30 Hz sürücü frekansında yük akımının oluşması için 32 µF kapasite değeri elde edilmesi gerekmektedir. Bu değere kadar oluşan gerilimlerde yük akımı oluşmamaktadır. Ancak 60 Hz sürücü frekansında yük akımı 8 µF kapasite değerinden sonra oluşmaya başlamaktadır. Bu olay yük akımının uyartım kapasitesi ile generator frekansıyla doğrudan bağlantılı olduğunu göstermektedir. Eğrilerden de görüleceği gibi sadece 30-40-50-60 Hz çalışma değerleri dikkate alınmaktadır. Eğer tüm frekanslardaki değerler dikkate alınırsa değerlerin değişimi karmaşık hale gelmektedir.

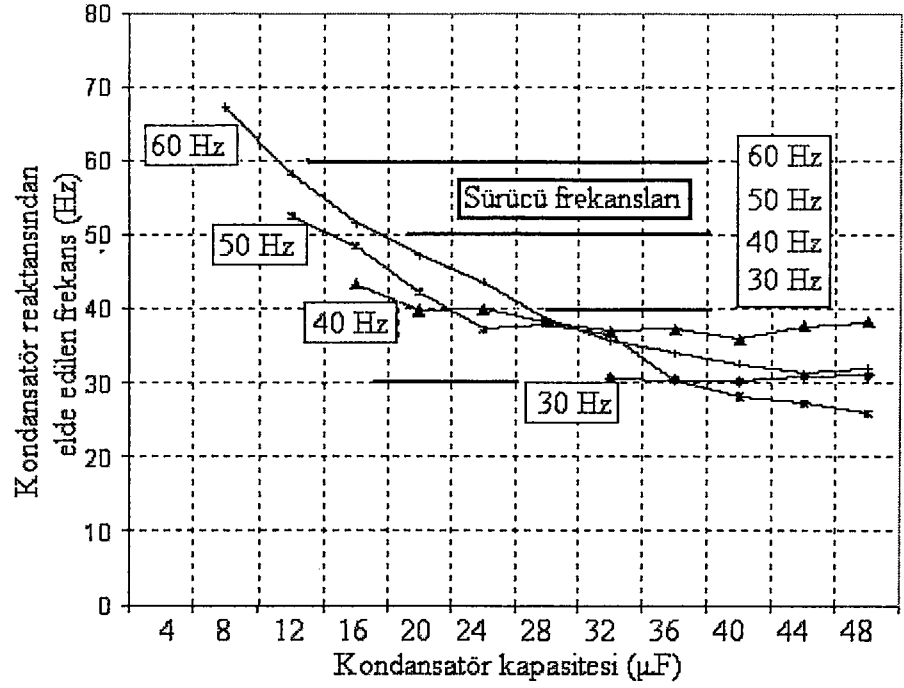
devir sayısı çok fazla değişmemektedir. Ancak sürücü frekansının yüksek değerlerinde ilk başta yüksek devir elde edilmekte, uyarım kapasitesi ve buna bağlı olarak yük akımı arttıkça generatör devir sayısı da azalmaktadır. Rüzgar türbinlerinde de rüzgardan elde edilen enerjinin % 59.3'ü rotor tarafından mekanik enerjiye çevrilir. Ancak bu güç yüke aktarıldığında türbin kanatlarının devri sayısında düşme meydana gelmektedir. Bu nedenle Şekil 5.9'da görülen eğrilerde de yük arttıkça generatör devri azalmaktadır.

Şekil 5.9'da görülen değerler devir sayısı olarak verilmektedir. Ancak bu değerleri frekans olarak görüp değişimi incelemek istediğimizde Şekil 5.10'da verilen generatör frekansı değişim eğrisi elde edilmektedir. Bu eğri ile Şekil 5.9'da verilen eğri benzerlik göstermektedir. Çünkü Şekil 5.10'da ki eğriyi oluşturan değerler Generatörün 1 dakikadaki devir sayısının 60'a bölünmesiyle elde edilmektedir. Ancak generatörün devir sayısını, kondansatör akımı ve gerilimini kullanarak elde edilen kondansatör reaktansı değerlerini kullanarak elde ettiğimizde Şekil 5.11'deki tablo elde edilmektedir. Şekilden görüleceği gibi iki eğri arasında bir miktar fark vardır. Bu fark sistemin çalışması sırasında alınan ölçümlerdeki ölçme ve okuma hatası olarak yorumlanabilir.

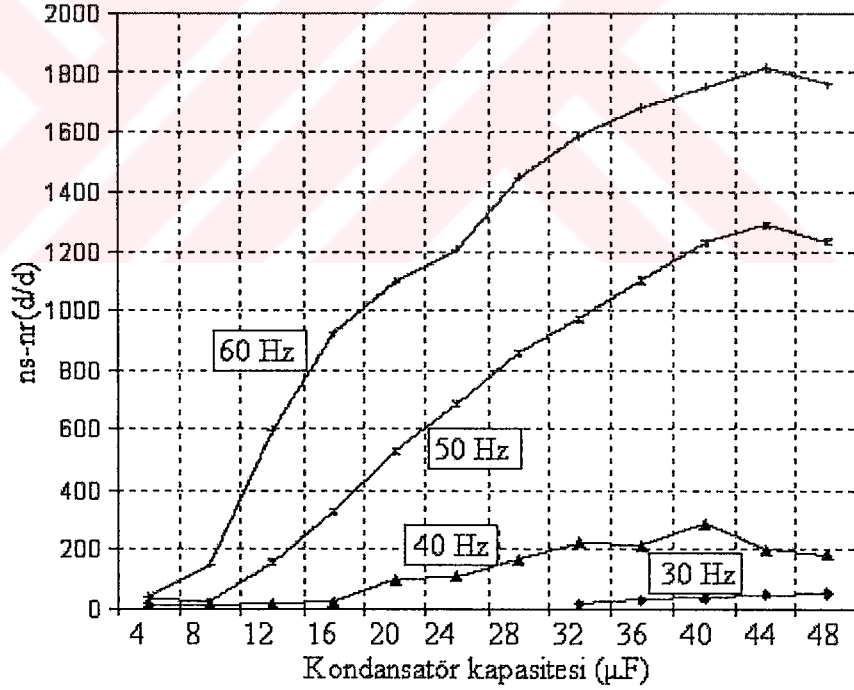


Şekil 5.10. Generatörün devir sayısından elde edilen frekans değişimi.





Şekil 5.11. Kondansatör reaktansından elde edilen frekans değişimi



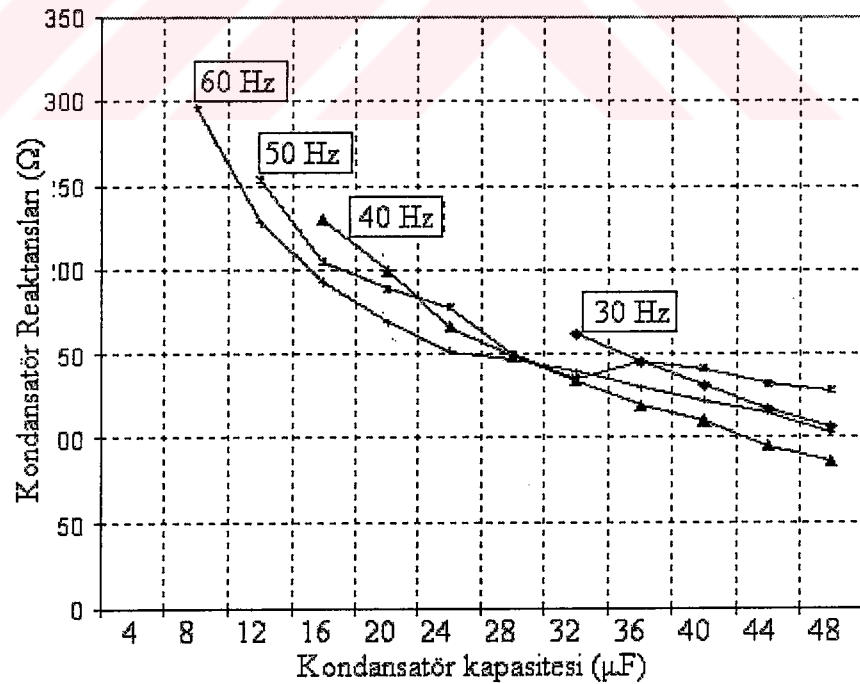
Şekil 5.12. Sürücü devir sayısı ile generator devir sayısı arasındaki fark

Şekil 5.12' de sistemin mekanik enerjisini sağlayan motor sürücüsünün frekansı kullanılarak hesaplanan devir sayısı ile generatorün milinden ölçülen arasındaki farklar görülmektedir. Eğrilerden görüleceği gibi düşük frekanslı (30 Hz-40 Hz) çalışmalarda iki değer arasındaki fark düşük olurken sürücü frekansı arttığında bu

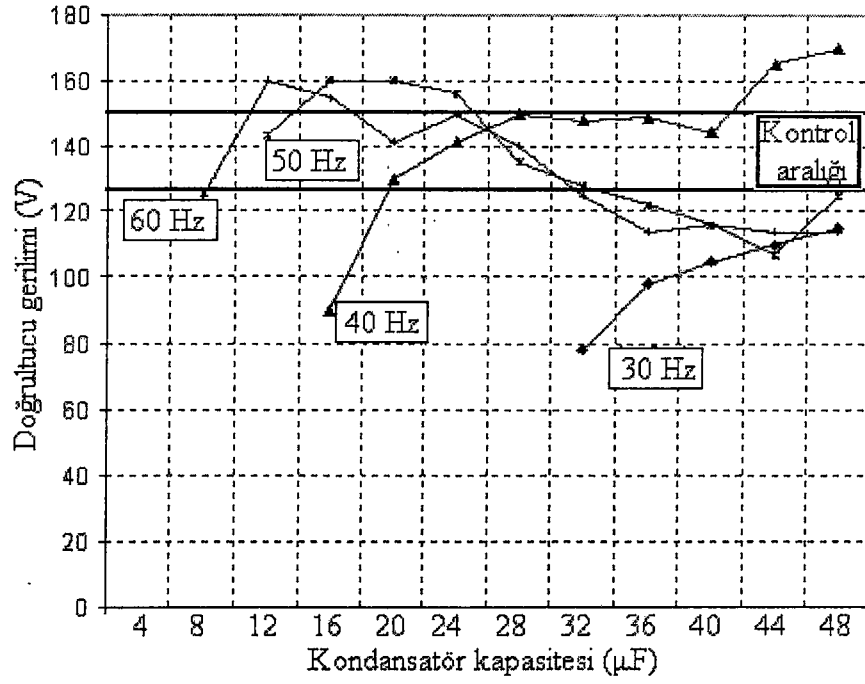
fark, generatörün gerilimindeki artış ve buna bağlı yük akımındaki yükselme sebebiyle artmaktadır. Generatör miline uygulanan kuvvet arttığı halde generatörün beslediği yükün artması nedeniyle generatör devir sayısı azalmaktadır.

Sistemin yüklü çalışması sırasında uyarım kondansatörleri empedansları ile kondansatör kapasitesi arasındaki ters orantı sebebiyle kapasite artışına karşılık reaktans azalması meydana gelmektedir. Bu değişim Şekil 5.13’de verilmektedir. Kondansatör kapasitesi ile kondansatör reaktansı arasında 30 Hz’lik çalışmada doğrusal bir değişim bulunurken daha yüksek frekanslarda bu doğrusallık bozulmaktadır. Bu olay ölçüm sırasında yapılan ölçüm hatalarıyla açıklanabilir.

Sistemin alternatif akım tarafındaki değişimler yukarıda verilmektedir. Doğru akım kısmında yapılan ölçümlerde doğru akım ölçü aletleri kullanılarak değerler Ek 1’de verilen yükte çalışma tablolarına kaydedildi. Bu değerler yardımıyla doğrultucu çıkış geriliminin, sürücü frekansı ve kondansatör kapasitesine göre değişimleri Şekil 5.14’de görüldüğü gibi meydana gelmektedir.



Şekil 5.13. Kondansatör reaktansının değişimi

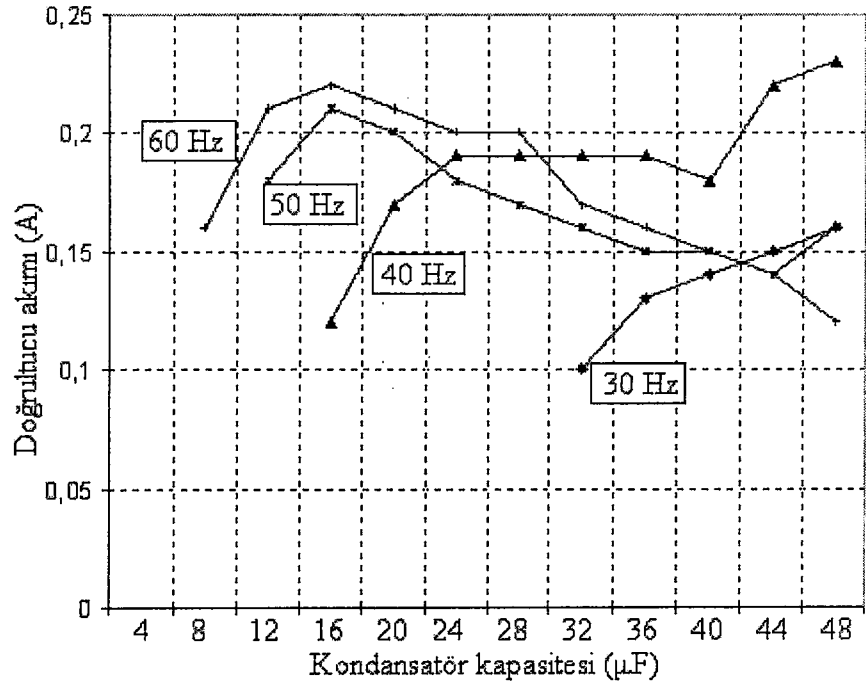


Şekil 5.14. Doğrultucu çıkış gerilimi ve denetim aralığı

Şekil 5.14'den görüleceği gibi 30 Hz meydana gelen değerler, sistemin akü gurubunu beslemek için yeterli gerilim üretmediğini göstermektedir. Sistem yüklü çalışma sırasında akü şarj edebilmek için 40 Hz sürücü frekansında ve  $n=2305$  d/d devir sayısında  $20\mu\text{F}$  uyarım kapasite değerinde çalışmak zorundadır. Bu değeri elde edebilmek için eğer generatör 30 Hz sürücü frekansına yakın bir mekanik güçle döndürülürse yüksüz olarak çalışmaktadır. Sistemin yüklenebilmesi için doğrultucu çıkış geriliminin 127 V'un üzerine çıkması gerekmektedir. Şekil 4.5.-Şekil 4.6.

Denetleyici 30 Hz sürücü frekansına gelen mekanik güç girişinde uyarım kapasitesinin tamamını devreye alır. Bu değerlerde doğrultucu çıkış gerilimi 127 V'un altında ise son kapasite değerinde beklemeden tekrar başlangıç konumuna döner ve en düşük kapasite değerinden tekrar yükseltmeye başlar. Bu anda sistemin mekanik giriş gücü motor sürücünün 40 Hz değerine karşılık gelen devir sayısı ile generatörü döndürürse doğrultucu şarj için gerekli gerilimi vermeye başlar.

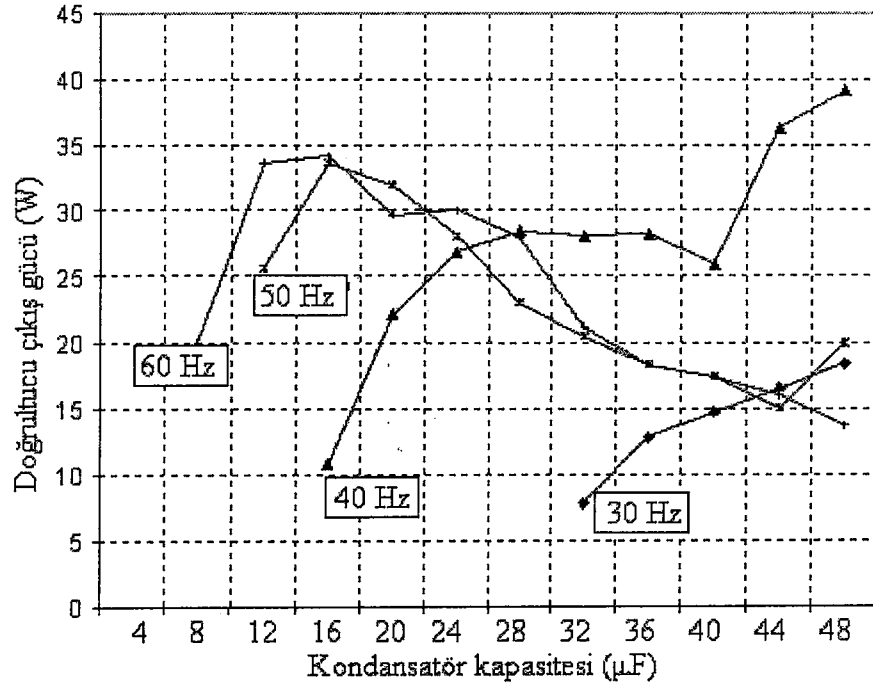
Sistemin akümülatör bağlanmadan üreteceği gerilimin yük üzerinden oluşturacağı akım değişimi Şekil 5.15'de verilmektedir.



Şekil 5.15. Doğrultucu çıkış akımı

Şekil 5.14. ve Şekil 5.15’de görüleceği gibi doğrultucu gerilimi ile doğrultucu akımı arasında benzerlik bulunmaktadır. Bu durum yükün sabit olduğunu belirtmektedir. Ancak sistemde yük olarak sadece akümülatör grubu bulunsaydı, akım ve gerilim değişmesi benzer olmayacaktı. Çünkü akümülatör içi direnci ve akümülatör gerilimi doğrultucu çıkış akımını etkilemektedir. Ayrıca akümülatör şarj oldukça, giriş gerilimi artsa bile şarj akımı aynı oranda artmamaktadır.

Şekil 5.16’da doğrultucu tarafında bulunan yükün çektiği güç değişimleri verilmektedir. Şekilden görüleceği gibi güç değerleri çok düşüktür. Bu sistemde yükün akümülatör ile birlikte besleneceği kabul edilmektedir. Ancak sistemin çalışması akümülatör olmadan yapıldığı için yük sadece doğrultucu çıkışından beslenmektedir. Yük akımı sadece generatör ve uyarım sistemine bağlı olmayıp yükün omik değerine de bağlıdır. Bu sebeple sistemden ölçülen değerlere göre hesaplanan güçlerin düşük çıkması normal kabul edilmektedir. Ancak yük akımının doğrultucu akımı değerinden büyük olması durumunda sistem zarar göreceği için bu deneyde yükün değeri düşük tutulmaktadır.



Şekil 5.16. Doğrultucu çıkışından alınan gücün değişimi

### 5.3. Sonuç

Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde kullanılan indüksiyon generatörleri kendi kendine uyarımın başlayabilmesi için terminal uçlarına bağlı bir kondansatör grubuna ihtiyaç duymaktadırlar. Ancak özellikle rüzgar türbinlerinin generatör devir sayısı rüzgar hızına bağlı olarak çok fazla değişkenlik gösterdiği için Bölüm 3’de açıklandığı gibi farklı her devir sayısı için farklı uyarım kondansatörüne gereksinimleri vardır. Bu kondansatör grubunun kapasitesi çok küçük güçlü generatörlerde birkaç tane olabildiği gibi daha büyük güçlerde maksimum hız ile minimum hız arasındaki ara devir sayısı veya frekans değerlerinde çok sayıda kondansatör grubu gerekmektedir. Bu olay her hız değişimi için bağımsız birer kapasite grubu yerine birbirinden farklı değerdeki kondansatörler ile sağlanması daha uygun olmaktadır.

Bu çalışmada, bir indüksiyon generatörü için uygun kapasite değerleri kabul edilebilir hız sınırları içinde ve çalışma koşullarında, denetimi sağlamak üzere, düşük maliyetli bir sistem tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sistemin çalışması sırasında, değerler alınırken akümülatör grubu devreye bağlanmamaktadır. Çünkü akümülatör

sabit bir yük olmayıp şarj oldukça akımı azalan bir yük özelliğine sahiptir. Bu sebeple omik direnci sabit olan bir alıcı kullanılmaktadır.

SEIG'ler genellikle şebekeden uzak ve küçük güçlü rüzgar sistemlerinde kullanılmaktadır. Böyle yerlerde, ulaşım sorunlarından kaynaklanan bakım zorluğu nedeniyle daha kararlı ve güvenli işletim sağlayan sistemlere gereksinim duyulmaktadır. Ancak sistemin kalite ve güvenilirliği arttıkça maliyeti de artacaktır. Bu durumda uzak yerlerde gereksinim duyulan küçük güçler için rüzgar uygulamaları ekonomik olmayacaktır. Bu tip uygulamalarda düşük maliyetli sistemler kullanılması ekonomiklik bakımından önemlidir. Ancak bu şekilde alternatif güç üretim sistemleri yaygın kullanım alanları bulacaktır.



Tablo 5.1. Sistemin boş çalışma ölçüm değerleri

Sürtüclü Frekanslı- Generatör Devri	4μ	8 μ	12 μ	16 μ	20 μ	24 μ	28 μ	32 μ	36 μ	40 μ	44 μ	48 μ
30 Hz	U <sub>f</sub> 0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,70	2,20	3,10	122,0	127,0	132,0
1797 d/d	U <sub>d</sub> 0,60	0,70	0,80	1,0	1,20	1,50	1,50	2,0	3,0	122,0	127,0	132,0
	I <sub>c</sub> 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,81	0,94	1,06
35 Hz	U <sub>f</sub> 0,0	0,0	0,0	1,50	1,90	2,60	3,90	139,0	147,0	152,0	155,0	158,0
2096 D/d	U <sub>d</sub> 1,30	1,60	1,90	2,60	3,50	3,70	3,90	144,0	153,0	155,0	162,0	166,0
	I <sub>c</sub> 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,93	1,15	1,33	1,50	1,67
40Hz	U <sub>f</sub> 0,0	0,0	0,0	0,90	136,0	149,0	171,0	179,0	184,0	190,0	193,0	196,0
2395D/d	U <sub>d</sub> 1,30	1,70	2,30	3,90	150,0	168,0	172,0	180,0	186,0	192,0	196,0	199,0
	I <sub>c</sub> 0,0	0,0	0,0	0,0	0,74	0,94	1,04	1,26	1,57	1,86	2,06	2,28
45Hz	U <sub>f</sub> 0,0	0,0	0,0	168,0	187,0	197,0	208,0	215,0	220,0	226,0	228,0	230,0
2692D/d	U <sub>d</sub> 1,80	2,50	4,0	170,0	192,0	200,0	208,0	216,0	222,0	226,0	230,0	232,0
	I <sub>c</sub> 0,0	0,0	0,0	0,70	1,0	1,30	1,51	1,80	2,09	2,46	2,74	3,02
50Hz	U <sub>f</sub> 0,0	0,0	0,0	216,0	230,0	240,0	243,0	249,0	253,0	257,0	256,0	256,0
2689 D/d	U <sub>d</sub> 1,80	2,80	5,80	211,0	226,0	237,0	244,0	251,0	256,0	260,0	261,0	260,0
	I <sub>c</sub> 0,0	0,0	0,0	1,14	1,54	1,88	2,17	2,52	2,89	3,28	3,60	3,81
55Hz	U <sub>f</sub> 0,0	0,0	113,0	253,0	267,0	276,0	278,0	282,0	285,0	283,0	281,0	269,0
3292 D/d	U <sub>d</sub> 2,70	5,0	225,0	271,0	290,0	300,0	303,0	306,0	310,0	309,0	305,0	298,0
	I <sub>c</sub> 0,0	0,0	0,89	1,46	1,92	2,38	2,74	3,18	3,64	4,10	4,28	4,50
60 Hz	U <sub>f</sub> 0,0	0,0	140,0	286,0	300,0	304,0	306,0	308,0	307,0	295,0	286,0	220,0
3584 D/d	U <sub>d</sub> 3,0	6,80	263,0	304,0	320,0	331,0	332,0	332,0	330,0	323,0	310,0	264,0
	I <sub>c</sub> 0,0	0,0	1,16	1,82	2,35	2,87	3,28	3,75	4,10	4,45	4,05	4,0
65Hz	U <sub>f</sub> 0,0	0,0	165,0	325,0	340,0	345,0	340,0	314,0	287,0	240,0	218,0	190,0
3890D/d	U <sub>d</sub> 1,40	4,20	306,0	357,0	337,0	347,0	350,0	333,0	290,0	250,0	224,0	200,0
	I <sub>c</sub> 0,0	0,0	1,45	2,24	2,85	3,45	3,80	3,93	3,30	3,15	2,50	2,36

Tablo 5.2.1. Yükte çalışma ölçüm ve hesaplama değerleri (30 Hz- 35 Hz)

f-n	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
C( $\mu$ F)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1783	1769	1765	1757	1750
n(d/d)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	29,7	29,5	29,4	29,3	29,2
$f_g$ (Hz)								30,6	30,4	30,2	30,9	31,2
$f(X_c)$ (Hz)								17	31	35	43	50
$n_s-n_r$ (d/d)								0,38	0,5	0,55	0,68	0,67
$I_g$ (A)								0,48	0,68	0,79	0,93	1,08
$I_e$ (A)								0,16	0,3	0,36	0,3	0,5
$I_v$ (A)								78	99	104	109	115
$U_f$ (V)								0,1	0,13	0,14	0,15	0,16
$I_d$ (A)								78	98	105	110	115
$U_d$ (A)								7,8	12,74	14,7	16,5	18,4
$P_d$ (W)								162,50	145,59	131,65	117,20	106,48
$X_c$ ( $\Omega$ )								30,62	30,38	30,24	30,88	31,15
$f_c$ (Hz)								-0,91	-0,90	-0,82	-1,59	-1,99
$f_g-f_c$ (Hz)												
f-n	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
C( $\mu$ F)	2080	2080	2096	2096	2096	2085	2077	2062	2043	2030	2010	2000
n(d/d)	34,7	34,7	34,9	34,9	34,9	34,8	34,6	34,4	34,1	33,8	33,5	33,3
$f_g$ (Hz)								35,2	34,7	34,6	33,6	33,2
$f(X_c)$ (Hz)								38	57	70	90	100
$n_s-n_r$ (d/d)								0,23	0,44	0,54	0,64	0,76
$I_g$ (A)								0,26	0,55	0,75	0,92	1,05
$I_e$ (A)								0,08	0,3	0,37	0,4	0,53
$I_v$ (A)								58	103	121	130	134
$U_f$ (V)								0,08	0,13	0,16	0,17	0,18
$I_d$ (A)								58	95	117	129	138
$U_d$ (A)								4,64	12,35	18,72	21,93	24,84
$P_d$ (W)								223,08	187,27	161,33	141,30	127,62
$X_c$ ( $\Omega$ )								35,69	35,43	35,25	34,66	34,62
$f_c$ (Hz)								-0,77	-0,68	-0,63	-0,61	-0,78
$f_g-f_c$ (Hz)												



Tablo 5.2.2. Yükte çalışma ölçüm ve hesaplama değerleri (40 Hz- 45 Hz)

F-n	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
40 Hz												
C( $\mu$ F)	2389	2389	2385	2377	2305	2293	2236	2176	2192	2118	2201	2220
n(d/d)	39,8	39,8	39,8	39,6	38,4	38,2	37,3	36,3	36,5	35,3	36,7	37,0
$f_g$ (Hz)				43,3	39,8	40,0	38,2	37,1	37,2	35,9	37,7	38,2
$f(Xc)$ (Hz)												
$n_s-n_r$ (d/d)	11	11	15	23	95	107	164	224	208	282	199	180
2400 d/d												
$I_g$ (A)				0,3	0,45	0,62	0,7	0,8	0,8	0,8	1,08	1,2
$I_e$ (A)				0,5	0,65	0,82	0,98	1,08	1,22	1,3	1,72	1,96
$I_y$ (A)				0,2	0,22	0,44	0,49	0,62	0,55	0,51	0,57	0,56
$U_f$ (V)				115	130	136	146	145	145	144	165	170
$I_d$ (A)				0,12	0,17	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,22	0,23
$U_d$ (A)				90	130	141	150	148	149	144	165	170
$P_d$ (W)				10,8	22,1	26,79	28,5	28,12	28,31	25,92	36,3	39,1
$X_c$ ( $\Omega$ )				230,00	200,00	165,85	148,98	134,26	118,85	110,77	95,93	86,73
$f_c$ (Hz)				43,27	39,81	40,00	38,17	37,06	37,22	35,94	37,73	38,25
$f_g-f_c$ (Hz)				-3,65	-1,39	-1,79	-0,91	-0,80	-0,68	-0,64	-1,04	-1,25
f-n	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
45 Hz												
C( $\mu$ F)	2687	2688	2676	2531	2411	2294	2150	2049	1988	1980	1791	1820
n(d/d)	44,8	44,8	44,6	42,2	40,2	38,2	35,8	34,2	33,1	33,0	29,9	30,3
$f_g$ (Hz)				48,9	45,9	41,4	39,6	34,7	33,0	34,8	32,1	28,8
$f(Xc)$ (Hz)												
$n_s-n_r$ (d/d)	13	12	24	169	289	406	550	651	712	720	909	880
2695 d/d												
$I_g$ (A)				0,27	0,5	0,58	0,52	0,7	0,47	0,63	0,64	0,7
$I_e$ (A)				0,35	0,6	0,76	0,86	0,9	0,92	0,98	1,02	0,98
$I_y$ (A)				0,2	0,3	0,3	0,34	0,35	0,32	0,5	0,34	0,39
$U_f$ (V)				95	130	146	144	135	132	130	115	113
$I_d$ (A)				0,11	0,17	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15	0,17
$U_d$ (A)				84	137	146	142	135	128	135	119	124
$P_d$ (W)				9,24	23,29	27,74	25,56	22,95	21,76	21,6	17,85	21,08
$X_c$ ( $\Omega$ )				271,43	216,67	192,11	167,44	150,00	143,48	134,02	114,29	115,31
$f_c$ (Hz)				48,89	45,93	41,44	39,62	37,91	34,68	33,00	34,83	28,77
$f_g-f_c$ (Hz)				-4,29	-3,75	-1,26	-1,39	-2,08	-0,53	0,13	-1,83	-1,56

Tablo 5.2.3. Yükte çalışma ölçüm ve hesaplama değerleri (50 Hz- 55 Hz)

f-n	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
50 Hz												
C( $\mu$ F)	2970	2976	2846	2674	2473	2315	2142	2028	1900	1770	1710	1768
n(d/d)	49,5	49,6	47,4	44,6	41,2	38,6	35,7	33,8	31,7	29,5	28,5	29,5
f <sub>g</sub> (Hz)			52,4	48,5	42,2	37,3	37,9	36,7	30,4	28,2	27,3	25,8
f(X <sub>c</sub> )(Hz)	30	24	154	326	527	685	858	972	1100	1230	1290	1232
n <sub>s</sub> -n <sub>r</sub> (d/d)			0,42	0,58	0,7	0,65	0,55	0,58	0,56	0,58	0,56	0,56
I <sub>g</sub> (A)			0,6	0,8	0,87	0,9	0,92	0,96	0,86	0,85	0,83	0,81
I <sub>c</sub> (A)			0,35	0,35	0,36	0,33	0,34	0,35	0,34	0,47	0,21	0,22
I <sub>y</sub> (A)			152	164	164	160	138	130	125	120	110	104
U <sub>f</sub> (V)			0,18	0,21	0,2	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,16
I <sub>d</sub> (A)			143	160	160	156	135	128	122	116	107	125
U <sub>d</sub> (A)			25,74	33,6	32	28,08	22,95	20,48	18,3	17,4	14,98	20
P <sub>d</sub> (W)			253,3	205,0	188,5	177,8	150,0	135,4	145,3	141,2	132,5	128,4
X <sub>c</sub> ( $\Omega$ )			52,4	48,5	42,2	37,3	37,9	36,7	30,4	28,2	27,3	25,8
f <sub>c</sub> (Hz)			-4,9	-4,0	-1,0	1,3	-2,2	-2,9	1,2	1,3	1,2	3,6
f <sub>r</sub> -f <sub>c</sub> (Hz)												
f-n												
55 Hz												
C( $\mu$ F)	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
n(d/d)	3278	3248	2976	2712	2444	2272	2180	1992	1920	1822	1786	1840
f <sub>g</sub> (Hz)	54,6	54,1	49,6	45,2	40,7	37,9	36,3	33,2	32,0	30,4	29,8	30,7
f(X <sub>c</sub> )(Hz)			54,6	47,3	43,7	41,8	39,2	36,2	33,5	31,4	31,5	30,9
n <sub>s</sub> -n <sub>r</sub> (d/d)	22	52	324	588	856	1028	1120	1308	1380	1478	1514	1460
I <sub>g</sub> (A)			0,62	0,65	0,66	0,55	0,6	0,55	0,54	0,6	0,66	0,6
I <sub>c</sub> (A)			0,7	0,78	0,78	0,85	0,89	0,91	0,91	0,93	1,01	1,07
I <sub>y</sub> (A)			0,4	0,42	0,3	0,33	0,3	0,33	0,29	0,35	0,47	0,49
U <sub>f</sub> (V)			170	164	142	135	129	125	120	118	116	115
I <sub>d</sub> (A)			0,23	0,22	0,18	0,17	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15
U <sub>d</sub> (A)			168	161	140	120	136	120	123	118	115	116
P <sub>d</sub> (W)			38,64	35,42	25,2	20,4	24,48	20,4	19,68	18,88	17,25	17,4
X <sub>c</sub> ( $\Omega$ )			242,86	210,26	182,05	158,82	144,94	137,36	131,87	126,88	114,85	107,48
f <sub>c</sub> (Hz)			54,64	47,33	43,73	41,77	39,24	36,23	33,54	31,37	31,51	30,87
f <sub>r</sub> -f <sub>c</sub> (Hz)			-5,04	-2,13	-3,00	-3,91	-2,90	-3,03	-1,54	-1,01	-1,74	-0,20

Tablo 5.2.4. Yükte çalışma ölçüm ve hesaplama değerleri (60 Hz- 65 Hz)

f-n	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
60 Hz	C( $\mu$ F)	3560	3450	3002	2672	2505	2393	2153	1918	1851	1781	1840
	n(d/d)	59,3	57,5	50,0	44,5	41,8	39,9	35,9	32,0	30,9	29,7	30,7
	$f_g$ (Hz)		67,3	58,2	51,7	47,2	43,6	38,6	34,0	32,5	31,3	32,0
	$f(Xc)$ (Hz)	40	150	598	928	1095	1207	1447	1682	1749	1819	1760
3590 d/d	$n_s-n_r$ (d/d)		0,3	0,52	0,55	0,62	0,64	0,66	0,6	0,62	0,7	0,82
	$I_g$ (A)		0,48	0,68	0,82	0,86	0,96	0,95	0,96	0,98	1,02	1,14
	$I_v$ (A)		0,2	0,25	0,34	0,38	0,35	0,28	0,4	0,34	0,38	0,39
	$U_f$ (V)		142	155	158	145	146	140	134	125	118	118
	$I_d$ (A)		0,16	0,21	0,22	0,21	0,2	0,2	0,17	0,16	0,14	0,12
	$U_d$ (A)		125	160	155	141	150	140	125	114	114	114
	$P_d$ (W)		20	33,6	34,1	29,61	30	28	21,25	18,24	17,4	13,68
	$X_g$ ( $\Omega$ )		295,83	227,94	192,68	168,60	152,08	147,37	139,58	130,21	122,45	115,69
	$f_c$ (Hz)		67,28	58,22	51,65	47,22	43,63	38,59	33,97	32,51	31,28	32,05
	$f_g-f_c$ (Hz)		-9,78	-8,18	-7,12	-5,47	-3,74	-2,71	-2,07	-1,66	-1,60	-1,38
f-n	C( $\mu$ F)	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	48
65 Hz	n(d/d)	3883	3883	3880	3840	3807	3788	3749	3704	3637	1651	1563
	$f_g$ (Hz)	64,7	64,7	64,7	64,0	63,5	63,1	62,5	61,7	60,6	31,2	26,1
	$f(Xc)$ (Hz)				70,6	67,8	63,4	57,7	57,3	62,6		
3900 d/d	$n_s-n_r$ (d/d)	17	17	20	60	93	112	151	196	263	2030	2337
	$I_g$ (A)		1,05	1,5	2,2	2,81	3,2	3,4	3,8	4,6		
	$I_v$ (A)		1,44	2,2	2,81	3,2	3,2	3,4	3,8	4,6		
	$I_x$ (A)		0,45	0,65	0,7	1,13	1,13	0,92	0,85	0,63		
	$U_f$ (V)		300	310	330	335	335	335	330	325		
	$I_d$ (A)		0,37	0,4	0,42	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43		
	$U_d$ (A)		276	306	325	331	331	327	326	320		
	$P_d$ (W)		102,12	122,4	136,5	145,64	143,88	143,44	137,6			
	$X_g$ ( $\Omega$ )				140,91	117,44	104,69	98,53	86,84	70,65		
	$f_c$ (Hz)				70,63	67,80	63,38	57,72	57,30	62,61		
	$f_g-f_c$ (Hz)				-6,63	-4,35	-0,24	4,76	4,43	-1,99		

## KAYNAKLAR

1. ARAS, F., SUERKAN, R., AMAC, A. E., EMADI, A., Determination of Excitation Capacitance for Isolated Induction Generator Using Low Cost Electronic Controller. EIT 2003, USA.
2. BOLDEA, I., NASAR, S. A., 2002, The Induction Machine Handbook, CRC Pres.
3. BOYLESTAD, R.;NASHELSKY, L.,1994. Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi. Evren Ofset A.Ş., (Çeviri) Page(s): 695-760.
4. CHAN, T.F., 1993, Capacitance Requirements of Self Excited Induction Generators. IEEE Trans. Energy Conversion, 8(2), Page(s): 304-311.
5. CHAN, T.F., 1995, Analysis of Self-Excited Induction Generators Using an Iterative Method. IEEE Trans. Energy Conversion, 10(3), Page(s): 502-507.
6. FISHER,J.M.,1991,Power Electronics. PWS-KENT Publishing Co. Missouri, Page(s): 207-247.
7. GENÇOĞLU, M. T., 2002, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Açısından Önemi. F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(2), Page(s): 57-64.
8. GIPE, P., 1993, Wind Power for Home and Business, Chelsa Green Publishing Co., Page(s): 21-58.
9. JOHNSON, G. L., 2001, Wind Energy Systems (Electronic Edition), Manhattan, USA, Page(s): (1.1-1.21)-(6.1-6.39).
10. LEVI,E.,LIAO,Y.W.,1998, An experimental investigation of self-excitation in capacitor excited induction generators, Electric Power Systems Research, 53, 2000, Page(s): 59-65.
11. LEVY, D., 1997, Stand alone induction generators, Electric Power Systems Research, Vol(41), Page(s): 191-201,
12. MALIK, N. H., 1987, Capacitance Requirements for Self Excited Induction Generators. IEEE Trans. Energy Conversion, 2(1), Page(s): 62-69.
13. MULJADI, E., BUTTERFIELD, C.P., BATAN, T., YILDIRIM, D., 1999, Understanding the Unbalanced-Voltage Problem in Wind Turbine Generation, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Arizona, USA.

14. MULJADI, E., SALLAN, J., SANZ, M., BUTTERFIELD, P. C., 1999, Investigation of Self-Excited Induction Generators for Wind Turbine Application. IEEE 30.-40. IAS Annual Meeting Industry Application Conference, Vol. (1), Page(s): 509-515.
15. MURTHY, S. S., SINGH, B. P., NAGAMANI, C., SATYANARANA, K. V. V., 1988, Studies on the Use of Conventional Induction Motors as Self-Excited Induction Generators. IEEE Trans. Energy Conversion, 3(4), Page(s): 842-848.
16. RAJAKARUNA, S., BONERT, R., 1993, A technique for steady-state analysis of a self-excited induction generator with variable speed, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol (8), No(4), Page(s): 757-761.
17. SMITH, N, 1999, Motors as Generators For Micro-Hydro Power. Intermediate Technology Publications Ltd, Page(s): 23-35.
18. SUERKAN, R.;ARAS, F., 2002, Küçük Ölçekli Uygulamalar İçin Kendinden Uyarımlı İndüksiyon Generatörünün Elektronik Kontrollü Olarak Uyarım Kapasitesinin Belirlenmesi. ELECO 2002, Page(s): 80-84.
19. WAMKEUE, R., KAMWA, I., 2002, Generalized modeling and unbalanced fault simulation of saturated self-excited induction generators, Electric Power Systems Research, 61, Page(s): 11-21.

## ÖZGEÇMİŞ

1963 yılında İzmit'te doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmit'te tamamladı. 1980 yılında girdiği Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünden 1985 yılında Elektrik Teknik Öğretmeni olarak mezun oldu. 1987-1992 yılları arasında Konya ili Kulu ilçesi Endüstri Meslek Lisesi'nde, 1992-1996 yılları arasında İzmit Anadolu Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nde Elektrik Bölümünde öğretmen olarak çalıştı. 1996-2001 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde uzman olarak görev yaptı.

2002 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Karamürsel Meslek Yüksekokulu'nda öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.