



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON  
JENERATÖRÜN KONDANSATÖR  
ANAHTARLAMALI GERİLİM  
REGÜLASYONU**

**Ersin SELÇUK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ocak-2019**  
**KONYA**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Ersin SELÇUK tarafından hazırlanan “KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON JENERATÖRÜN KONDANSATÖR ANAHTARLAMALI GERİLİM REGÜLASYONU” adlı tez çalışması 04/01/19 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

#### Danışman

Doç. Dr. Hayri ARABACI

#### Üye

Doç. Dr. Bayram AKDEMİR

### İmza

.....  
.....  
.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

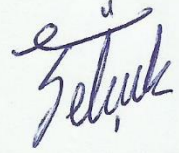
Prof. Dr. Yakup KARA  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Ersin SELÇUK

Tarih: 04/01/19

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANSTEZİ

#### KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON JENERATÖRÜN KONDANSATÖR ANAHTARLAMALI GERİLİM REGÜLASYONU

Ersin SELÇUK

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Hayri ARABACI**

**2019, 71 Sayfa**

**Jüri**

**Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA  
Doç. Dr. Hayri ARABACI  
Doç. Dr. Bayram AKDEMİR**

Bu çalışmada kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün gerilim regülasyonu kondansatör anahtarlama yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Gerilim regülasyonunun sağlanması için asenkron jeneratörün statoruna farklı değerlerdeki kondansatörler üçgen-paralel olarak bağlanmış ve bu kondansatörler röleler yardımıyla devreye alınıp çıkartılmıştır. Gerekli olan asgari kondansatör değeri ve artım oranları boşa ve kısa devre deneylerinden hesaplanarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada asenkron jeneratöre bağlanacak kondansatörün değeri ANFIS ve en küçük kareler yöntemi ile hesaplanmış ve bu iki yöntem karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu hata oranı düşük olan ANFIS yöntemi seçilmiş ve mikrodenetleyici ile kontrol edilen sistem gerçekleştirilmiştir. ANFIS tabanlı kontrol sistemi ile asenkron jeneratörün gerilim regülasyonu otomatik olarak yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Asenkron jeneratör, Gerilim regülasyonu, Kendinden uyarımlı asenkron jeneratör, Sürekli durum analizi, ANFIS, Bulanık mantık

**ABSTRACT**

**MS THESIS**

**VOLTAGE REGULATION OF SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR  
BY USING SWITCHING CAPACITOR**

**Ersin SELÇUK**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Electrical And Electronics Engineering**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hayri ARABACI**

**2019, 71 Pages**

**Jury**

**Assoc. Prof. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA**

**Assoc. Prof. Dr. Hayri ARABACI**

**Assoc. Prof. Dr. Bayram AKDEMİR**

In this study, voltage regulation of the self-excited asynchronous generator was carried out by capacitor switching. In order to ensure the voltage regulation, the capacitors of the asynchronous generator are connected in triangular-parallel with different values and these capacitors are switched on and off with the help of relays. The required minimum capacitor value and increment values were determined by calculating from the free and short circuit tests. In the experimental study, the value of the capacitor to be connected to the asynchronous generator was calculated by ANFIS and least squares method and these two methods were compared. The ANFIS method with low error rate was chosen and was carried out with a microcontroller. With the ANFIS based control system, voltage regulation of the asynchronous generator is automatically performed.

**Keywords:** Induction generator, Voltage regulation, Self-Excited Induction Generator, Steady-state analysis, ANFIS, Fuzzy logic

## ÖNSÖZ

Her zaman olduğu gibi bu tez çalışmamda da yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Hayri ARABACI'ya, bilgisi ve tecrübesiyle yanımda olduğu için teşekkürlerimi sunarım.

Yardımlarıyla beni mutlu eden sevgili EEM A.Ş. ailesine ve o ailenin değerli üyesi Bayram AKDEMİR'e de teşekkürlerimi sunuyorum.

Aynı zamanda desteğiyle hep yanımda olan motivasyonumu hep ayakta tutan sevgili eşime, bugünlere gelmemde emeği bulunan değerli aileme ve beni yetiştiren çok kıymetli öğretmenlerime teşekkür ederim.

İyi ki varsınız...

Ersin SELÇUK  
KONYA-2019



# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ASENKRON MAKİNELER</b> .....	<b>3</b>
2.1. Asenkron Motorlar .....	3
2.2. Asenkron Jeneratörler .....	4
2.2.1. Asenkron Jeneratörlerin Sınıflandırılması .....	6
2.2.2. Asenkron Jeneratörlerin Kullanım Alanları .....	10
2.2.3. Asenkron Jeneratörlerin Avantaj ve Dezavantajları .....	11
<b>3. KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON JENERATÖR</b> .....	<b>12</b>
3.1. KUAJ Çalışma Şekli .....	12
3.2. KUAJ Boşta Çalışma Deneyi.....	15
3.3. KUAJ Sürekli Durum Analizi.....	17
3.3.1. Düşüm Admitansları Yöntemiyle Sürekli Durum Analizi .....	20
3.3.2. Çevre Empedansları Yöntemiyle Sürekli Durum Analizi.....	21
3.3.3. KUAJ Sürekli Durum Analizinin İteratif Çözüm Yaklaşımıyla Gerçeklenmesi.....	23
<b>4. KUAJ GERİLİM REGÜLASYONU</b> .....	<b>28</b>
4.1. Regülasyon Yöntemleri.....	28
4.1.1. Kondansatör Anahtarlamalı Regülasyon.....	28
4.1.2. Tristör Anahtarlamalı Kapasitör ile Regülasyon.....	29
4.1.3. STATCOM ile Regülasyon.....	30
4.1.4. Regülasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması .....	31
4.2. Kondansatör Değerinin Hesaplanması .....	31
4.2.1. Bulanık Mantık Kavramı.....	32
4.2.2. En Küçük Kareler Yöntemi.....	35
<b>5. ÖNERİLEN SİSTEMİN OLUŞTURULMASI</b> .....	<b>36</b>
5.1. Önerilen Sistemin Blok Şeması .....	37
5.2. Kontrol Kartının Oluşturulması .....	38
5.2.1. Kullanılan Mikrodenetleyici .....	39
5.2.2. RS232 Haberleşme Protokolü .....	40
5.2.3. Gerilim Okuma Yöntemi.....	42

5.2.4.	Akım Okuma Yöntemi .....	43
5.2.5.	Frekans Okuma Yöntemi .....	44
5.3.	Rüzgâr Gücünün Simüle Edilmesi .....	44
5.4.	Kullanılan Jeneratörün Özellikleri .....	46
5.5.	Kondansatör Değerlerinin Bulunması .....	46
5.6.	Yük Bankasının Oluşturulması .....	49
5.7.	Sistemin Kurgulanması .....	50
5.8.	ANFIS'in sisteme eklenmesi.....	51
<b>6.</b>	<b>DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR .....</b>	<b>54</b>
<b>7.</b>	<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>56</b>
9.1.	Sonuçlar.....	56
9.2.	Öneriler .....	57
<b>KAYNAKLAR .....</b>		<b>58</b>
<b>EKLER .....</b>		<b>60</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>		<b>62</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$a$	: <i>Bağıl Frekans</i>
$b$	: <i>Bağıl Hız</i>
$C$	: <i>Kapasite</i>
$E_l$	: <i>Jeneratör Uç Gerilimi</i>
$E_a$	: <i>Bağıl Jeneratör Uç Gerilimi</i>
$f$	: <i>Frekans</i>
$f_b$	: <i>Baz Frekans (Nominal Frekans)</i>
$I_c$	: <i>Uyartım Kondansatörü Akımı</i>
$I_L$	: <i>Yük Akımı</i>
$I_m$	: <i>Mıknatıslanma Akımı</i>
$I_r$	: <i>Rotor Akımı</i>
$I_s$	: <i>Stator Akımı</i>
$R_r$	: <i>Rotor Direnci</i>
$R_s$	: <i>Stator Direnci</i>
$Z$	: <i>Empedans</i>
$Z_m$	: <i>Mıknatıslanma Empedansı</i>
$X_c$	: <i>Uyartım Kondansatörü Kapasitansı</i>
$X_m$	: <i>Mıknatıslanma Reaktansı</i>
$X_r$	: <i>Rotor Reaktansı</i>
$X_s$	: <i>Stator Reaktansı</i>

### Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
ANFIS	: Adaptive Nero Fuzzy Interference System
ÇÇAJ	: Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratör
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
KUAJ	: Kendinden Uyartımlı Asenkron Jeneratör
SKAJ	: Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda artan nüfus, gelişen teknoloji ve bu teknolojinin meydana getirdiği ihtiyaçlar enerji ihtiyacını artırmıştır. Bu ihtiyacın karşılanması geleneksel enerji kaynakları ile yeterli değildir. Bu yüzden çalışmalar alternatif enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır. Bu bağlamda rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları sıklıkla tercih edilmektedir. Kaynaklardan yararlanırken onları daha verimli, daha ekonomik ve çevreye zarar vermeden kullanmak öncelikler arasına girmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının zamanla değişkenlik göstermesinden dolayı bu enerji kaynaklarından elektrik enerjisi elde etmek için kullanılacak olan ekipmanların da bu değişkenliğe karşı uyum sağlayabilme yeteneğinin bulunması gerekir. Bu doğrultuda özellikle rüzgâr enerjisi güç dönüşüm sistemlerinde asenkron jeneratörlerin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Asenkron jeneratörün güç dönüşümü için sabit bir mekanik hıza ihtiyacı yoktur. Asenkron jeneratörler değişken hızlarda gerilim üretimini gerçekleştirebilirler (Fidan, 1996).

Asenkron jeneratörler 20. yüzyılın başlarından itibaren bilinmesine rağmen 1960-1970'lere kadar çok rağbet görmemiştir. Fakat 1970'lerde dünyada baş gösteren petrol kriziyle birlikte yeniden gündeme gelmiştir. Yüksek enerji maliyetinden dolayı enerjinin rasyonel kullanımı ve çeşitli işlemler sonucunda enerjinin geri kazanımı en önemli amaç haline gelmiştir. 1980'lerin sonunda dünya üzerindeki nüfusun yükselişi, gelişen ulaşım ve iletişim sistemleri, çevre ile ilgili endişelerin artması şebekeden bağımsız (standalone) birçok enerji üretim merkezi oluşturulması ihtiyacını doğurmuştur. 1990'larda bölgesel enerji üretimi fikri medya ve bilim çevrelerinde tartışılmaya başlanmıştır (Mahley ve Chauhan, 2008).

Asenkron jeneratörler (ASJ) özellikle rüzgâr, mikro/mini hidroelektrik santraller gibi geleneksel olmayan enerji sistemlerinde giderek artan bir kullanım içerisinde (Bansal, 2005). Asenkron jeneratörlerin seçilmesinin nedenleri, hem motor hem de jeneratör olarak rahatça çalıştırılabilmeleri, basit ve dayanıklı yapısı, kısa devrelere karşı kendini koruması, ucuzluğu vs. sayılabilir (Farret ve Simões, 2014). Ayrıca asenkron jeneratörler şebekeye kolaylıkla paralel bağlanabilirler yani senkronizasyon problemi yoktur. Bütün bu sebeplerden dolayı son yıllarda asenkron jeneratörler üzerine çalışmalar hız ve yoğunluk kazanmıştır (Fidan, 1996).

Bu iki şart sağlandığı takdirde asenkron makine jeneratör olarak çalışabilecektir. Şebekeye bağlı yani şebekeyle paralel çalışan asenkron jeneratörlerde bu miktatıslanma

akımı şebeke tarafından karşılanacaktır. Fakat şebekeden bağımsız (standalone) sistemlerde bu akımı karşılayacak harici bir kaynağa ihtiyaç vardır. Gerekli mıknatıslanma akımı stator terminallerine bağlanan kondansatör blokları sayesinde elde edilir. Stator terminallerine kondansatör blokları bağlanan, şebekeden izole bir şekilde çalışan asenkron jeneratörlere “Kendinden Uyarımlı Asenkron Jeneratörler” denir.

Özellikle elektrik şebekesinden uzak veya elektrik şebekesinin bulunmadığı kırsal yerleşim bölgelerinde, deniz fenerleri, deniz ve dağ evleri, yangın gözetleme kuleleri, mikrodalga istasyonları gibi yüklerin elektrik ihtiyacı genelde geleneksel bağımsız güç kaynakları tarafından sağlanmaktadır. Bu kaynaklar çoğunlukla sıvı fosil yakıt tüketen motor-jeneratör gruplarıdır. Fakat böyle sistemlerin; nakliye, yakıt maliyeti, bakım maliyeti vs. olacağından kullanımları ekonomik ve verimli değildir (Copçuoğlu, 2003). Günümüzde artık şebekeden bağımsız elektrik üretiminde fotovoltaiikle birlikte rüzgâr enerjisinin de kullanımının arttığı gözlemlenmektedir. Şebekeden bağımsız sistemlerde de kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün yaygınlaştığı görülmektedir.

Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörlerin en büyük dezavantajları değişken yüklerdeki düşük gerilim ve frekans regülasyonudur. Fakat günümüzde güç elektroniğindeki gelişmeler sayesinde bu sorunların üstesinden gelinebilmektedir (Ma, 2012).

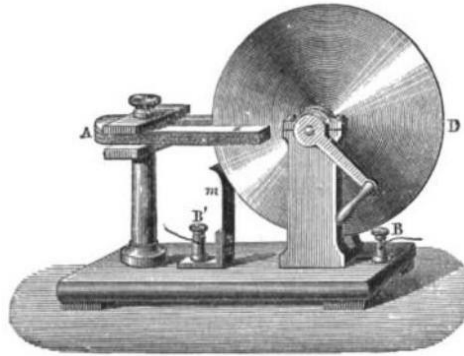
Bu çalışmada kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün gerilim regülasyonu kondansatör anahtarlama yöntemiyle değişken hız ve değişken yüklerde otomatik olarak yapılmıştır. Öncelikle asenkron jeneratörler hakkında bilgi verilmiş ve ilerleyen bölümlerde kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün sürekli durum analiz yöntemlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise KUAJ gerilim regülasyon çeşitleri anlatılmış ve gerekli olan kondansatör değerinin hesaplanması için kullanılan yöntemlere değinilmiştir. Beşinci bölümde ise önerilen sistemin çalışma mantığı hakkında bilgi verilmiş ve sistem oluşturulmuştur. Elde edilen veriler sonuç bölümünde verilmiştir.

## 2. ASENKRON MAKİNELER

Asenkron makineler, elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya tam tersi olarak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bu cihazlar girişine uygulanan enerjinin türüne göre motor ve jeneratör olarak iki gruba ayrılır. Asenkron makineler, motor olarak çalıştıklarında stator sargılarından aldığı elektrik enerjisini rotorundan mekanik enerji olarak dışarı aktarırken; jeneratör olarak çalıştıklarında ise rotorundan aldıkları mekanik enerjiyi stator sargılarında elektrik enerjisi olarak dışarı aktarır. Elektrik makineleri arasında en çok kullanılan, en sağlam, en ucuz ve az arıza yapmasından ötürü endüstride yaygın kullanılır. Asenkron makineleri senkron makinelerden ayıran farkı dönme hızının sabit olmamasıdır. Bu hız motor çalışma da senkron hızdan küçüktür. Bu yüzden bu makinelere asenkron makine adını almıştır. Asenkron makineler bir fazlı, iki fazlı, üç fazlı ve çok fazlı olarak üretilirler. Bu makineler günümüzde birçok yerde kullanılmaktadır.

### 2.1. Asenkron Motorlar

1831 yılında Micheal Faraday, elektromanyetik jeneratörlerin çalışma prensibini keşfetti. Bu tarihten itibaren jeneratörlerin gelişimi sürekli ilerleme kaydetti.



Şekil 2.1. İlk jeneratör olan Faraday diski

Asenkron makinenin tarihi ise, 1879 yılına kadar dayanır. Bu tarihte Walter Baily, ilk ilkel asenkron motoru üretti. Ardından 1887 yılında ise Nicola Tesla, Amerika'da ürettiği asenkron motorun patentini aldı.



Şekil 2.2. Tesla'nın ilk indüksiyon motor modeli, Tesla Müzesi, Belgrad

Asenkron motorun jeneratör olarak kullanabileceğini ilk olarak 1930 yılında, Potter ve Basset tarafından keşfedilmiştir. KUAJ'ın çalışma düzeni 80 – 90 yıldır bilinmesine rağmen ciddi çalışmalar son 20-30 yılda yoğunlaşmıştır. Teknolojinin de gelişmesiyle KUAJ'a olan ilgiyi artırmıştır. Asenkron jeneratörün geçmişi, 20. Yüzyılın başlarına kadar dayanır. Fakat 1960-1970'lerde kullanımdan kalkmıştır. 1973 yılında petrolün fiyatındaki çok büyük artışla birlikte, yeniden kullanıma başlanmıştır. Günümüzde enerji fiyatlarının çok yüksek olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları endüstriyel süreçlerin önemli bir parçası haline gelmiş ve asenkron jeneratör uygulamaları önem kazanmıştır.

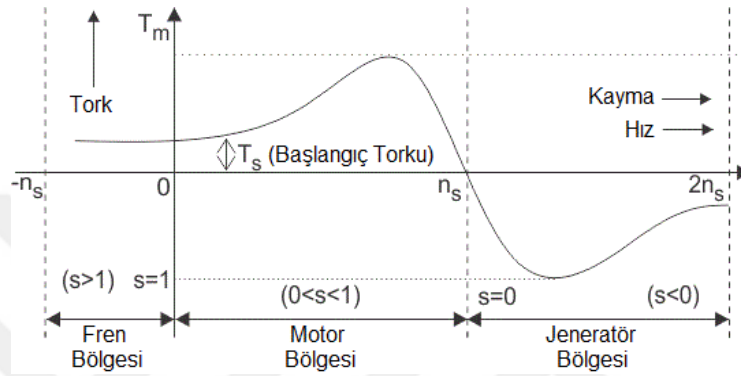
## 2.2. Asenkron Jeneratörler

Bir asenkron makine, *dışarıdan belirli bir kaynak ile belirli bir hızda döndürülürse* ve *kendini uyarması için gerekli olan mıknatıslanma akımı* temin edilirse, jeneratör olarak çalışmaya başlar. Jeneratör çalışmada güç kaynağı rotordan alınan mekanik güç olduğu için mıknatıslanma akımı ancak statordan sağlanabilir. Bu nedenle asenkron jeneratör olarak çalışma için stator sargı uçlarında ya endüktif akım sağlayacak ya da kapasitif akım alabilecek bir sistem bağlamak gerekecektir. Bu iki yoldan elde edilebilir;

1. Senkron jeneratörler tarafından beslenen bir şebekeye paralel bağlanırlar ve bu durumda şebekeden mıknatıslanma akımı sağlarlar.
2. Bir diğer yöntem ise asenkron jeneratörün özuyarımını stator uçlarına bağlanmış uygun değerli bir kapasite düzeneği ile elde etmektir.

Asenkron makinalar genellikle motor kullanım amaçlı olarak üretildiklerinden jeneratör başarımı düşüktür. Asenkron motorlarda manyetik malzemedeki en iyi şekilde yararlanmak için mıknatıslanma eğrisinin doğrusal bölge ile doyma bölgesini birleştiren diz noktasında çalışmak gerekir. Doyma bölgesinde çalışmada kullanılan demirin bağlı

geçirgenliği azalacak ve dolayısıyla motorun çalışması için daha fazla magnetomotor kuvvet gerekecektir. Doğrusal bölgede ise demir malzemedeki iyi bir biçimde yararlanılamayacaktır. Asenkron jeneratörlerin kararlı çalışması ise doyma bölgesinde çalışmayı gerektirir. Bu nedenle jeneratör olarak kullanılacak asenkron makina, doymuş mıknatıslanma akımlarında ve yüksek gerilimlerde çalışabilecek biçimde tasarlanmalıdır. Bu nedenle rotor direncini azaltmak ve jeneratör doyumcaya dek akı yoğunluğunu artırmak amaçlanmıştır.



Şekil 2.3. Asenkron makine moment-hız grafiği

Asenkron jeneratörün bir uyarma devresi olmadığından reaktif güç üretemezler. Aslında reaktif güç tüketir ve harici bir reaktif güç kaynağı stator manyetik alanı sağlamak üzere her zaman bağlı olmalıdır.

Bir asenkron jeneratörün en büyük avantajı basitliğidir. Bir asenkron jeneratör ayrı bir uyarma devresi gerektirmez ve belirli bir hızda sürekli olarak sürülme ihtiyacı yoktur. Asenkron jeneratörlerde belirli bir gerilim seviyesine ulaşmak için harici kondansatörler bu seviyeye karşılık gelen mıknatıslanma akımını sağlamalıdır.

Bir asenkron jeneratör ilk kez çalıştırıldığında (ilk kez dönmeye başladığında) kendi uyarma devresindeki artık mıknatıslık küçük bir gerilim üretir. Bu küçük gerilim, kapasitif bir akım üretir, bu akım gerilimi artırır, bu gerilim kapasitif akımı biraz daha artırır ve bu işlem gerilim tam olarak oluşuncaya kadar devam eder. Asenkron jeneratörün rotorunda artık akı yoksa o zaman gerilim oluşmayacaktır ve bir an için onu motor olarak döndürerek mıknatıslamak gerekir.

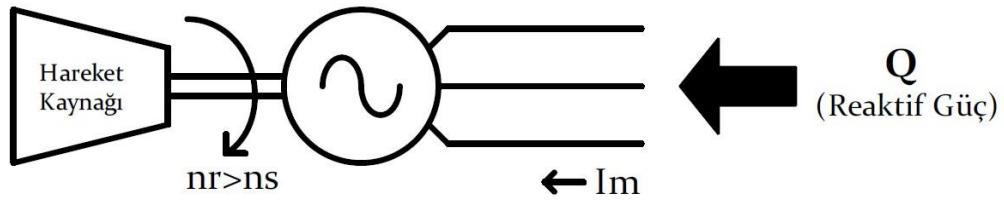
Eğer üç fazlı bir kondansatör grubu bir asenkron jeneratörün uçları arasına bağlanırsa, asenkron jeneratörün boştaki gerilimi, kondansatörün yük doğrusu ve jeneratörün mıknatıslanma eğrisinin keşişim noktası olacaktır. Asenkron jeneratörün en ciddi problemi gerilimin yük ve özellikle reaktif yükçe değişmesidir. Endüktif

yük durumunda gerilim düşmelerinin çok hızlı olmasına dikkat etmek gerekir. Örneğin bir asenkron motora yol vermek çok zordur. Yol verme sırasında kapasiteyi artırmak ve nominal şartlara ulaşıldığında kapasiteyi azaltmak için özel teknikler kullanılır.

Asenkron makinanın moment-hız grafiğinden dolayı değişen yük ile asenkron jeneratörün frekansı değişir. Ancak moment-hız karakteristiği normal çalışma aralığında çok kademeli olduğundan toplam frekans değişimi yüzde 5'den (<math><5\%</math>) daha az bir değere sınırlanır. Bu da kabul edilebilir. Asenkron jeneratörler basitlikleri ve çıkış gücünün kW başına küçük boyutlarından dolayı küçük rüzgar türbinleri için önerilir.

Bir asenkron makinenin jeneratör olarak çalışabilmesi için;

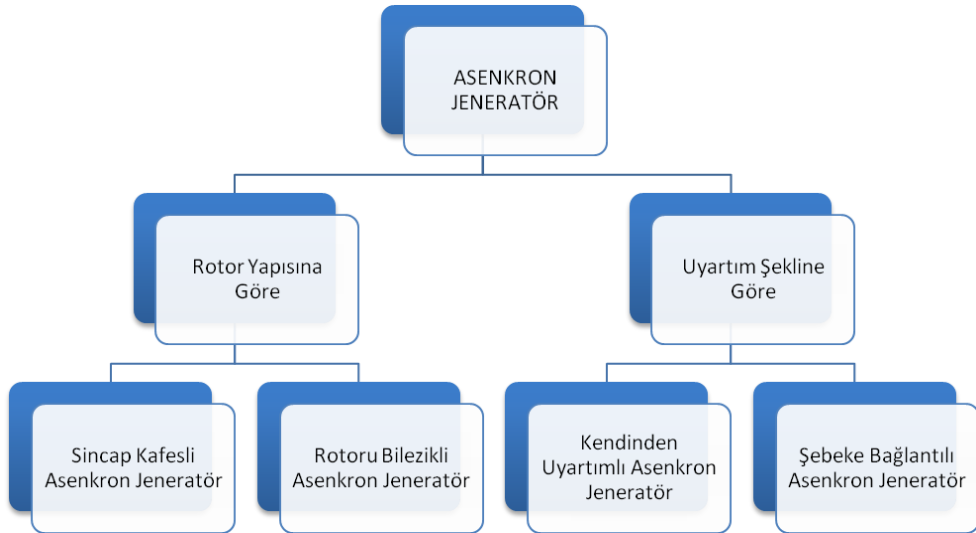
- Makinenin, bir hareket kaynağı tarafından senkron devrin üzerinde döndürülmesi gerekir.
- Reaktif gücün karşılanabilmesi için mıknatıslanma akımına ihtiyaç vardır.



Şekil 2.4. Asenkron makine için gereken bileşenler

### 2.2.1. Asenkron Jeneratörlerin Sınıflandırılması

Bir asenkron makine hem motor hem de jeneratör olarak çalıştırılabildiğinden hidroelektrik ve rüzgâr enerji üretim merkezlerinde tercih edilir. Asenkron makine çeşitli alanlarda farklı uygulamalarda kullanılır. Asenkron jeneratörlerin birçok açıdan sınıflandırılması mevcuttur (Farret ve Simões, 2014).

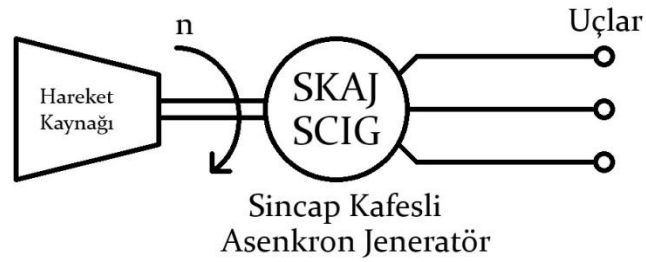


Şekil 2.5. Asenkron jeneratörün sınıflandırılması

### 2.2.1.1. Rotor Yapısına Göre Asenkron Jeneratör

Rotor yapısına göre asenkron jeneratörler, asenkron motorlarda olduğu gibi “Sincap kafesli asenkron jeneratör” ve “Rotoru sargılı asenkron jeneratör” olmak üzere ikiye ayrılır.

#### Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör

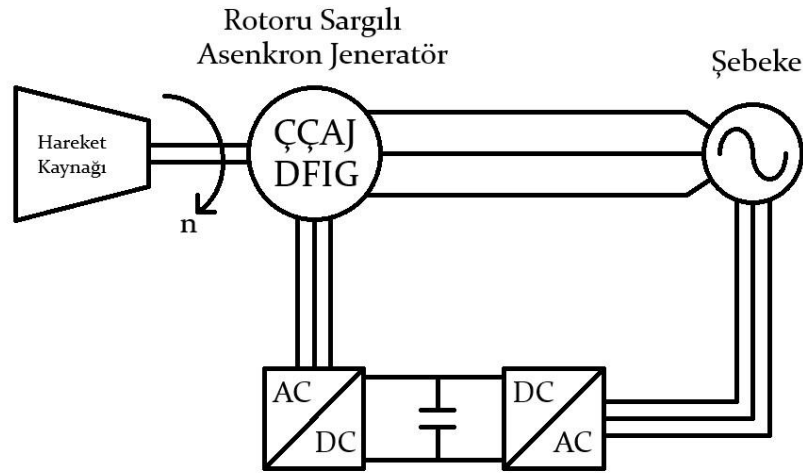


Şekil 2.6. Sincap kafesli asenkron jeneratör

Sincap Kafesli Asenkron Jeneratörler hem şebekeye bağlı (on-grid) hem de şebekeden bağımsız (off-grid) olarak çalışabilirler.



## Rotoru Sargılı Asenkron Jeneratör



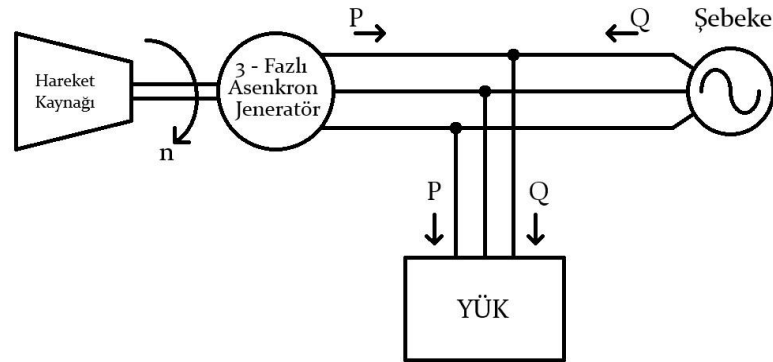
Şekil 2.7. Rotoru sargılı asenkron jeneratör

Rotoru sargılı Asenkron jeneratörler ise sadece şebekeye bağlı (on-grid) olarak çalışabilirler. Literatürde Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratör (Doubly-Fed Induction Generator) olarak da bilinir.

### 2.2.1.2. Uyarım Şekline Göre Asenkron Jeneratör

Asenkron makinenin jeneratör olarak çalışabilmesi için en önemli ihtiyaç mıknatıslanma akımıdır. Asenkron makinelerinin kendilerine ait uyarma devreleri bulunmadığından bu reaktif akım gereksinimi dışarıdan karşılanır. Böyle bir gereksinim iki yolla karşılanabilir. Şebekeye bağlı bulunan asenkron jeneratörde mıknatıslanma akımı şebeke tarafından karşılanır. Şebekeden bağımsız asenkron jeneratörlerde ise bu ihtiyaç kondansatör blokları yardımıyla giderilir (Ünal, 2002).

### Şebeke Bağlantılı Asenkron Jeneratör

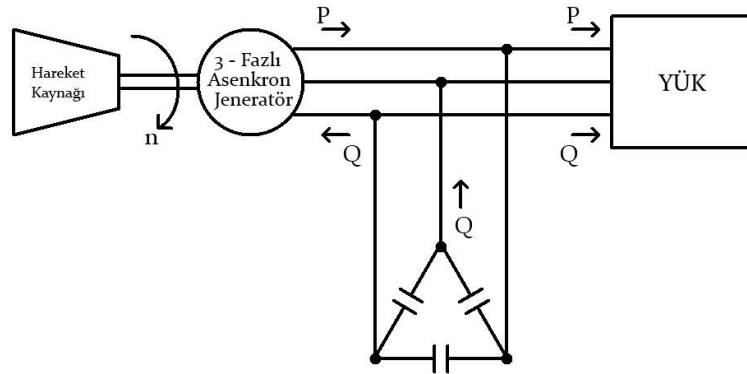


Şekil 2.8. Şebeke bağlantılı asenkron jeneratör

Şebekeye bağlı asenkron jeneratörler gerekli olan mıknatıslanma akımını şebekeden alır ve şebekeye/yüke sadece aktif güç verir.

Uyartımın çeşidine göre sınıflandırılan asenkron jeneratörlerden ilki şebeke bağlantılı asenkron jeneratördür. Şebekeye bağlı bulunan asenkron jeneratörler mıknatıslanma için gerekli reaktif gücü şebekeden alır ve şebekeye sadece aktif güç verir. Bu yüzden şebeke bağlantılı asenkron jeneratör olarak adlandırılır. Ayrıca otonom sistemler de denir. Bu sistemde jeneratör senkron hızın üzerinde hareket ettirilir ve bu yüzden kayma negatif olur (Mahley ve Chauhan, 2008). Şebeke bağlantılı asenkron jeneratörlerin ürettikleri gerilimin frekansı şebeke tarafından belirlenmektedir (Ünal, 2002).

### Kendinden Uyartımlı Asenkron Jeneratör



Şekil 2.9. Kendinden uyartımlı asenkron jeneratör

Kendinden uyarımlı asenkron jeneratör olarak sincap kafesli asenkron motorlar kullanılır. Jeneratör için gereken mıknatıslanma akımı statora bağlanan kondansatörlerden sağlanır. Asenkron jeneratörün güç faktörü düzeltimi kondansatörler tarafından sağlanır ve jeneratörün uç gerilimi harici güç sistemiyle kontrol edilebilir.

Kendinden uyarımlı asenkron jeneratör olarak sincap kafesli asenkron motor kullanılır. Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörlerde en önemli yapı stator terminallerine bağlanan kondansatör bloklarıdır. Bu kondansatörler gerekli uyarım akımını sağlarlar.

Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörlere bağlanan kondansatörler birçok parametreyi etkiler. Jeneratörün kendi kendini uyarma zamanı, üretilen gerilimin değeri ve frekansı kondansatör değerlerinden etkilenir, bu yüzden kondansatör seçimi çok önemlidir. Kondansatörler belirlenirken; jeneratörde maksimum verimi elde edecek değerler hesaplanarak seçilmelidir (Chan, 1993).

### **2.2.2. Asenkron Jeneratörlerin Kullanım Alanları**

- Asenkron jeneratörler özellikle elektrik şebekesinin uzatılmasının ekonomik olmadığı uzak bölgelerin elektrikleştirilmesinde ve kritik bölgelerin enerji ihtiyacını karşılamada kullanılmaktadır.
- Küçük ölçekli zirai uygulamalar
- Aydınlatma ve ısıtma yükleri
- Kütüphaneler
- Bilgisayar merkezleri
- Hastaneler
- Telefon santralleri
- Sinema salonları
- Konferans salonları
- Marketler
- Şantiye aydınlatması

### 2.2.3. Asenkron Jeneratörlerin Avantaj ve Dezavantajları

Dönen güç türbinlerine farklı tiplerde jeneratörler bağlanarak enerji üretimi gerçekleştirilebilir. Bunlar; paralel ve kompund DC jeneratörler, kalıcı mıknatıslı veya elektriksel uyarmalı senkron jeneratörler veya asenkron jeneratörlerdir. Doğru jeneratör seçimi geniş ölçekte birçok faktöre bağlı olarak değişir. Bu faktörlerden bazıları; uyartım kaynağı, yük tipi ve türbin hızıdır (Mahley ve Chauhan, 2008).

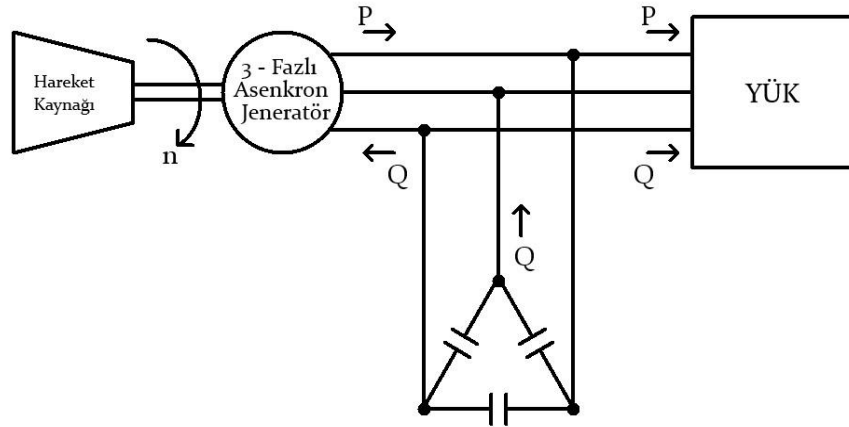
#### Avantajları

- + Basit ve dayanıklı yapısı
- + Bağımsız çalıştırılabilmesi
- + Ucuzluğu
- + Bakım gereksiniminin düşüklüğü
- + Aşırı yüklere karşı kendini koruyabilmesi

#### Dezavantajları

- Ciddi biçimde reaktif güç ihtiyacının bulunması
- Düşük güç faktörüne sahip olması

### 3. KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON JENERATÖR



Şekil 3.1. Kendinden uyartımlı asenkron jeneratör

#### 3.1. KUAJ Çalışma Şekli

Kendinden uyartımlı asenkron jeneratör olarak sincap kafesli asenkron motorlar kullanılır. Jeneratör için gereken mıknatıslanma akımı statora bağlanan kondansatörlerden sağlanır.

Kendinden uyartımlı asenkron jeneratörlerde, mıknatıslanma akımı bir kapasite grubundan elde edilir. Asenkron makineye bağlanan bu kondansatörlerin kapasite değerleri kendi kendini uyarma zamanını, üretilen gerilimin değerini ve frekansını etkilediği için rastgele seçilemez. Kapasiteler seçilirken maksimum verimin alınacağı kapasite değerinin hesaplanması gerekmektedir.

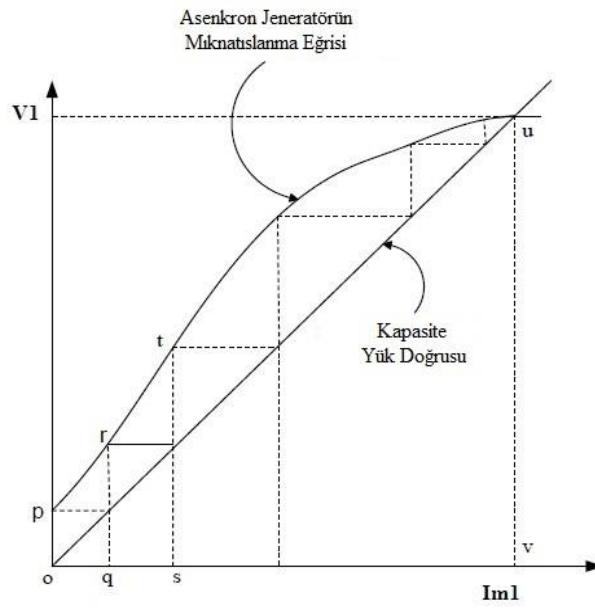
Asenkron jeneratörler içerisinde belki de en dikkat çekici olan çeşidi kendinden uyartımlı asenkron jeneratörlerdir. Çünkü şebekeye bağlanmadan basit bir şekilde enerji üretimi sağlayabilirler.

Kendinden uyartımlı asenkron jeneratörler Türkçe kaynaklarda birçok farklı isimle karşımıza çıkmaktadır. Bunlar; öz uyartımlı asenkron jeneratörler, kapasitör uyartımlı asenkron jeneratörler, sığaç uyartımlı asenkron jeneratörler, kondansatör uyartımlı asenkron jeneratörler olarak adlandırılırlar.

Asenkron makinelerin KUAJ olarak kullanılabileceğini ilk olarak 1930'larda Bassett ve Potter keşfetmişlerdir (Bassett ve Potter, 1935). Eğer belirli bir hızda makinenin uyartımı için gerekli ve yeterli endüktif güç ihtiyacı karşılanırsa bu asenkron makine jeneratör olarak çalışır. Kendinden uyartım olayı makine stator terminallerine

bağlanmış uygun değerdeki kapasitörlerle sağlanır. Kapasitörler tarafından üretilen endüktif reaktif güç makinenin uyarımında, makine kaçak reaktansı ve endüktif yük reaktansında harcanır (Ma, 2012).

KUAJ çalışma düzeni 80 yıldan fazladır bilinmesine rağmen sadece son 20-30 yılda araştırmacıların KUAJ hakkındaki çalışmaları ciddi bir şekilde artmıştır. Gerilim ve frekans kontrolündeki gelişmeler sayesinde son 30 yılda dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi fazlaşmıştır (Ma, 2012).



Şekil 3.2. Asenkron jeneratörün mıknatıslanma eğrisi ile kapasite yük doğrusu

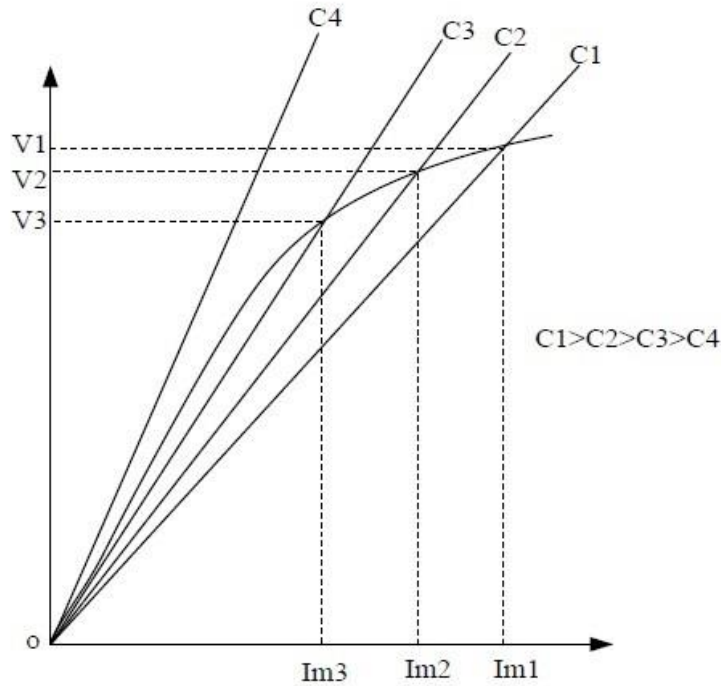
Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörlerde gerilim oluşumu DC şönt jeneratördeki gerilim oluşumu ile benzerdir. Eğer asenkron makine harici bir hareket kaynağı tarafından yeterli bir hızda döndürülürse ilk durumda Şekil 3.2’de görüldüğü artık mıknatısiyetten kaynaklı “p” kadar bir gerilim oluşur. Bu “p” gerilimi kondansatör uçlarına da etki ettiğinden kondansatör, “q” kadar bir reaktif akım meydana getirir. “q” akımı artık akıyı arttıracak şekilde bir akı üretir ve stator uçlarında “r” gerilimi oluşur. “r” gerilimi kondansatör akımının değeri “s” olacak kadar arttırır. “s” akımı da gerilimi bu kez “t” değerine ulaştırır. Daha çok gerilim daha çok mıknatıslanma akımını oluşturur. Bu şekilde birbirini etkileyen iki durum asenkron jeneratörün çekirdeği doyana kadar sürekli artarak devam eden bir gerilim oluşma süreci meydana getirir. Çekirdek doymaya başladığında boşa çalışma eğrisi, yatay düzleme paralel hale gelmeye başlar ve belli bir noktada kapasitörün yük eğrisiyle kesişir. Şekil 3.2’deki

karakteristiklerin kesişim noktası “u” noktasıdır. “u” noktası bu asenkron jeneratörün sürekli durumdaki çalışma noktasını belirtir. “u” noktasına karşılık gelen  $V_1$  gerilimi de asenkron jeneratörün sürekli durumdaki boşa çalışma gerilimidir (Gopikaramanan ve ark., 2014) (Arslan, 2010).

Asenkron jeneratörün çalışabilmesi için;

- KUAJ’ın statoruna uygun değerde kondansatörün bağlanması
- Makinenin artık mıknatısiyetinin bulunması gereklidir.

Asenkron jeneratör ilk kez çalıştırıldığında (ilk kez dönmeye başladığında) kendi uyarma devresindeki artık mıknatıslık küçük bir gerilim üretir. Bu küçük gerilim, kapasitif bir akım üretir, bu akım gerilimi artırır, bu gerilim kapasitif akımı biraz daha artırır ve bu işlem gerilim tam olarak oluşuncaya kadar devam eder. Asenkron jeneratörün rotorunda artık akı yoksa o zaman gerilim oluşmayacaktır ve bir an için onu motor olarak döndürerek mıknatıslamak gerekir.



Şekil 3.3. Farklı kapasitelerdeki kondansatörlerin akım-gerilim grafikleri

Asenkron jeneratörlere bağlanan kondansatörlerin kapasite değerleri, makinenin uyarım zamanını, uç geriliminin büyüklüğünü ve gerilimin frekansını etkilediğinden

rastgele seçilemez. Kondansatörler seçilirken, maksimum jeneratör veriminin elde edileceği kapasite değeri belirlenmelidir (Ünal, 2002).

Asenkron jeneratörlerin ürettiği gerilimin ve frekansın değerine etki eden faktörlerden biri de jeneratör uçlarına bağlanan yüküdür. Başta yüksüz çalışan bir asenkron jeneratöre bağlanan yükün endüktif özellikli olması durumunda jeneratör çıkış gerilimi ciddi bir şekilde düşer. Çünkü yük endüktif olduğundan çekeceği akım da endüktif olacaktır ve bu akımı da kondansatörlerden temin edecektir. Bu durumda kondansatör hem mıknatıslanma akımını hem de endüktif yükün akımını sağlamak zorundadır. Yani kondansatörün ürettiği endüktif akımın bir kısmı yükü beslerken diğer kısmı mıknatıslanma akımı ihtiyacını giderir. Mıknatıslanma akımı yüksüz durumdaki haline göre daha düşük bir seviye de olacaktır. Bu da uç geriliminin düşmesi anlamına gelir. Eğer kapasitif özellikli yük bağlanırsa kondansatörlerle birlikte kapasitif yüklerin de ürettiği endüktif akım mıknatıslanma akımını arttıracak dolayısıyla çıkış gerilimi de artacaktır. Rezistif yük bağlanması durumunda da uç gerilimi düşecektir fakat bu düşüş endüktif yükteki düşüşten az olacaktır (Ünal, 2002).

### 3.2. KUAJ Boşta Çalışma Deneyi

Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün sürekli durum analizi yapılırken asenkron makinenin tek fazlı eşdeğer devresi kullanılır. Sürekli durum analizinin yapılabilmesi için makine parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Bu parametreler ise deneylerle elde edilir. Parametreler elde edildikten sonra bu parametrelerin düzenlenmeye ihtiyacı vardır.

Bu deneyler;

Asenkron motor deneyleri ( $R_r$ ,  $R_s$ ,  $X_r$ ,  $X_s$ ,  $X_m$ )

- Asenkron Motor DA Deneyi
- Asenkron Motor Boşta Çalışma Deneyi
- Asenkron Motor Kilitli Rotor Deneyi

Asenkron jeneratör deneyleri ( $X_m$  Değişim Eğrisi)

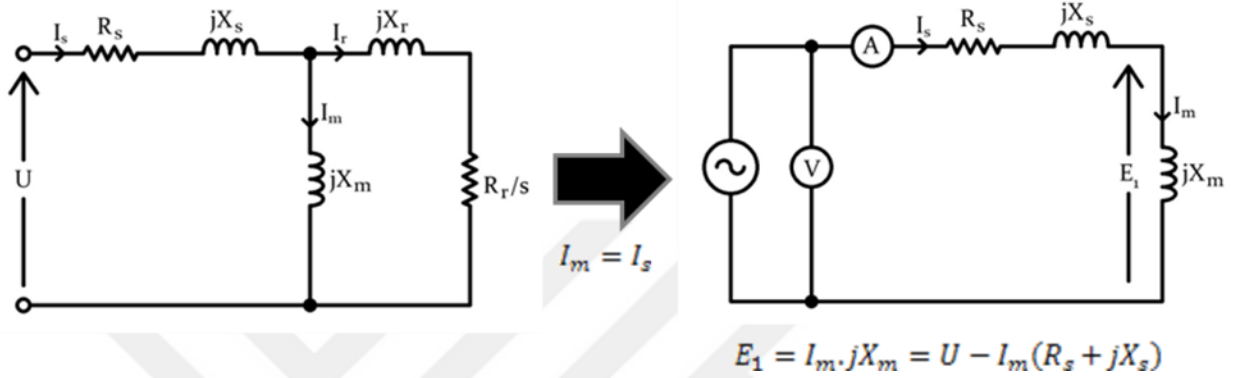
- Asenkron Jeneratör Boşta Çalışma Deneyi

Asenkron Motor Deneyleri ile Makinenin  $R_r$ ,  $R_s$ ,  $X_r$ ,  $X_s$  ve  $X_m$  değerleri bulunur. Asenkron makinenin parametreleri bilindiği farz edilirse burada sadece Asenkron jeneratörün boşta çalışma deneyi yapılır ve bu deney ile  $X_m$  değişim eğrisi elde edilir.



Asenkron jeneratörlerin boşa çalışma eğrisini elde etmek için, Asenkron makine, senkron hızda döndürülür. Bu durumda kayma sıfır olacağından asenkron makinenin rotorundan akım akmaz ve devre daha da sadeleşmiş olur.

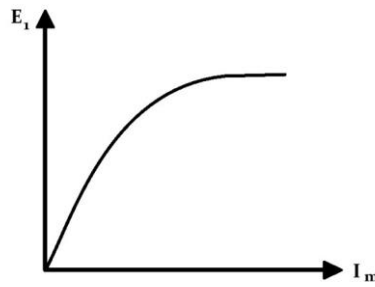
Daha sonra jeneratörün statoruna ayarlı AC gerilim uygulanarak bu gerilimlere karşılık gelen stator akımı okunur. Okunan değerlerle Jeneratörün Boşa Çalışma Eğrisi çizilir.



Şekil 3.4. Asenkron Jeneratör boşa çalışma deneyi

Aşağıdaki Şekil 3.5’de deney sonucunda elde edilen KUAJ boşa çalışma eğrisi görülmektedir. Bu eğri Denklem (3.1)’de kullanılarak elde edilir.

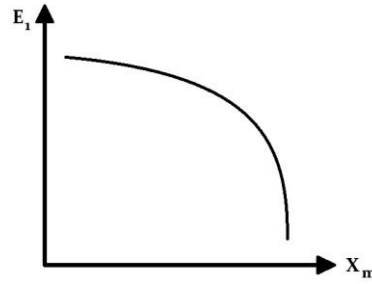
$$E_1 = I_m \cdot jX_m = U - I_m (R_s + jX_s) \quad (3.1)$$



Şekil 3.5. KUAJ boşa çalışma eğrisi

Daha sonra KUAJ boşa çalışma eğrisi kullanılarak Şekil 3.6’daki mıknatıslanma eğrisi çizilir. Bu eğri ise Denklem (3.2) yardımıyla çıkarılır.

$$X_m = \frac{U - I_m(R_s + jX_s)}{I_m} \quad (3.2)$$

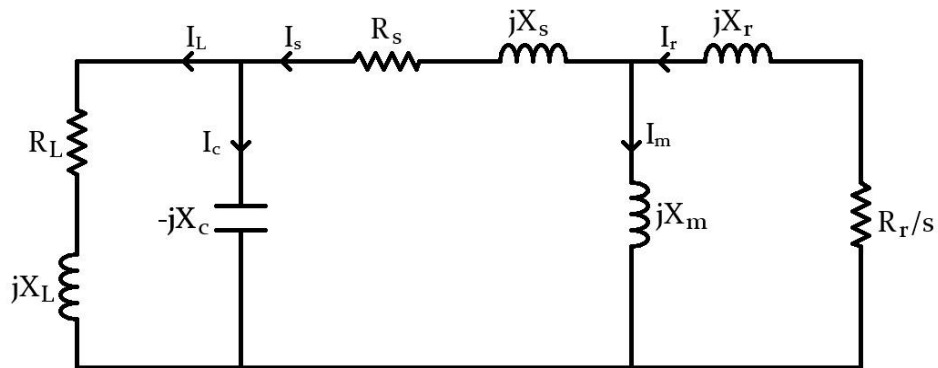


Şekil 3.6. KUAJ mıknatıslanma eğrisi

### 3.3. KUAJ Sürekli Durum Analizi

Asenkron jeneratörlerin sürekli durum analizi, asenkron jeneratör eşdeğer tek faz eşdeğer devresi kullanılarak yapılmaktadır. Sürekli durum analizinin, makinedeki dinamik değişimlere karşı makine davranışı hakkında net bir bilgi sağlayamaması en büyük dezavantajıdır. Fakat makinenin genel davranışı hakkında fikir verebilmesi açısından önemlidir. Dinamik analiz yardımıyla, makinenin hem sürekli durumdaki hem de geçici durumdaki davranışı hakkında geniş bir bilgi sahibi olunabilir (Katre ve Bapat, 2014).

Sürekli durum analizi yapılırken KUAJ'nin tek faz eşdeğer devresi kullanılır. Analizde kullanılacak makine parametreleri ve mıknatıslanma reaktansı değişim eğrisi gerekli deneyler sonucunda elde edilir. Şekil 3.7'de KUAJ tek faz eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.7. KUAJ tek faz eşdeğer devresi

Burada;  $R_s$  ve  $R_r$  stator ve rotor dirençlerini,  $X_s$  ve  $X_r$  stator ve rotor kaçak akı endüktanslarını,  $X_c$  kondansatör kapasitansını,  $R+jX$  yük empedansını,  $I_r$ ,  $I_s$ ,  $I_m$ ,  $I_c$  ve  $I_L$  akımları da sırasıyla; rotor, stator, mıknatıslanma, kondansatör ve yük akımlarını göstermektedir.

KUAJ sürekli durum analizinde kullanılan empedans temelli yöntemde işlemler per-unit (pu) değerlere göre yapılır. Öncelikle frekans ve hız büyüklüklerinin pu değerleri elde edilir.

Bilinen senkron hız ve kayma formülüne göre çalışma frekansı olan  $f$  aşağıdaki eşitliklerden elde edilebilir;

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (3.3)$$

$$f = \frac{p \cdot n_s}{60} \quad (3.4)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.5)$$

Eşitliklerdeki;  $n_s$  senkron hızı,  $f$  çalışma frekansını,  $n_r$  rotor devir sayısını,  $p$  çift kutup sayısını,  $s$  ise asenkron jeneratörün kaymasını belirtmektedir.

(3.5) eşitliğindeki  $n_s$  senkron hızı  $n_r$  rotor hızı cinsinden yazılıp (3.4) ifadesinde yerine konulursa frekans ve rotor hızı arasındaki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f = \frac{n_r \cdot p}{60(1-s)} \quad (3.6)$$

Jeneratör çalışmadaki kayma değeri, frekans ve devir sayısı cinsinden yazılabilir.

$$s = \frac{f - \frac{p \cdot n_r}{60}}{f} \quad (3.7)$$

Buraya kadar kaymanın frekans ve devir sayısına bağlı ilişkisi ve frekansın devir sayısına bağlı formülünü türetildi. Per-unit cinsinden çıkış frekansı elde etmek için

frekans değerleri, etiket değeri (nominal frekans değeri) frekansına ( $f_b$ ) bölünerek bulunur. Per-unit cinsinden çıkış frekansı (bağlı frekans) aşağıdaki gibi yazılır.

$$a = \frac{f}{f_b} \quad (3.8)$$

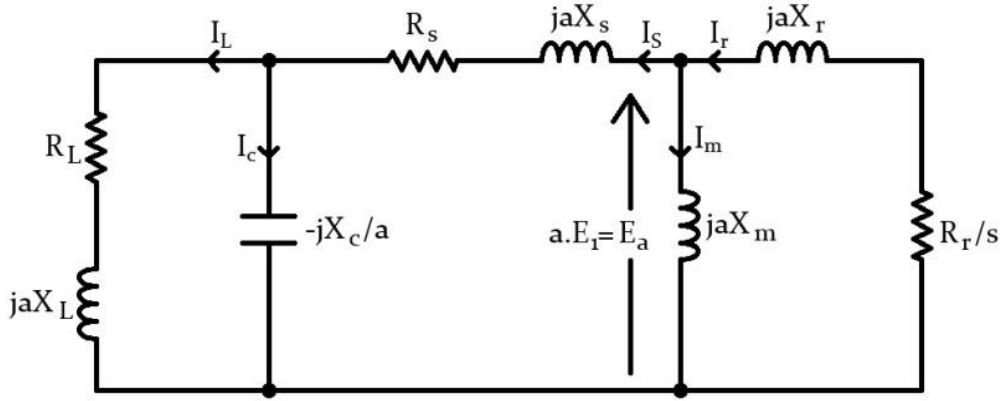
Burada;  $f_b$  baz frekans değeri (etiket frekansı),  $f$  ise çıkış frekansı,  $a$  ise bağlı çıkış frekansıdır.

(3.7)'deki kayma ifadesinde ( $p.n_r/60$ ) ifadesi  $f_r$  ile gösterilip; eşitliğin sol tarafındaki rasyonel kısmın pay ve paydası  $f_b$  ile bölünürse kayma denklemi de per-unit cinsinden yazılmış olur.

$$b = \frac{n_r \cdot p / 60}{f_b} = \frac{f_r}{f_b} \quad (3.9)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{f - f_r}{f} = \frac{\frac{f}{f_b} - \frac{f_r}{f_b}}{\frac{f}{f_b}} = \frac{a - b}{a} \quad (3.10)$$

Devrede frekansa bağlı değişkenler olan reaktansların değeri belli bir frekansa göre hesaplandığından bu reaktans ifadeleri asenkron jeneratör çıkış frekansını ( $f$ ) içerecek şekilde yeniden düzenlenmelidir. Yukarıdaki denklemlerdeki,  $f_b$  baz frekans değeri eşdeğer devredeki reaktansların hesaplandığı frekans değeridir. Örneğin  $X_s = 2\pi \cdot f_b \cdot L_s$  ve  $X_c = 1/(2\pi \cdot f_b \cdot C)$ 'dir. Bu reaktans ifadelerini bağlı çıkış frekansını içerecek biçimde yazabilmek için endüktanslar  $a$  ile çarpılır, kapasitanslar ise  $a$  ile bölünür. (Çünkü  $f = a \cdot f_b$ 'dir.) Ayrıca  $E_1$  gerilimi ise jeneratörün belli bir frekanstaki boşa çalışma gerilimidir ( $E_1 = \omega \cdot L_m \cdot I_m = 2\pi \cdot f_b \cdot L_m \cdot I_m$ ). Frekansa bağlı olarak  $E_1$  geriliminin değeri de değişir. Bu yüzden  $E_1$  gerilimini de çıkış frekansıyla bağlantılı şekilde yazabilmek için  $E_1 a$  ile çarpılır, bu çarpım  $E_a$  olarak alınır. ( $E_a = a \cdot E_1$ ) Tüm bu düzenlemeler yapıldıktan sonra KUAJ tek faz eşdeğer devresi Şekil 3.7'deki gibi olur.

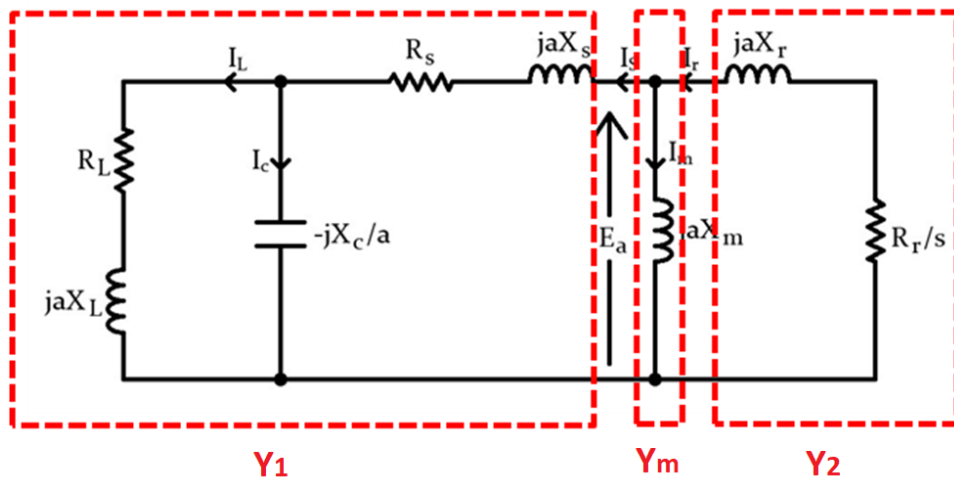


Şekil 3.8. KUAJ bağıl frekansa göre düzenlenmiş eşdeğer devre

Eşdeğer devrede genelde iki bilinmeyen bulunur. Bunlar çıkış frekansı ve mıknatıslanma reaktansıdır. Diğer parametreler sabit kabul edilir, demir kayıpları ve harmonikler ihmal edilerek sürekli durum analizi yapılır.

### 3.3.1. Düğüm Admitansları Yöntemiyle Sürekli Durum Analizi

Düğüm admitansları yönteminde Kirchoff akım yasası kullanılarak devre çözümlenir. Şekil 3.9’da hava aralığını temsil eden koldaki “z” düğümünde Kirchoff’un akım yasasına göre düğüme giren ve düğümden çıkan akımların toplamı birbirine eşittir. Bu durum aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir.



Şekil 3.9. KUAJ'nin admitans temelli çözümde kullanılan devresi

$$Y_{eş} = Y_1 + Y_m + Y_2 \quad (3.11)$$

$$E_a \cdot Y_{eş} = 0 \quad (3.12)$$

Burada;  $Y_{eş}$  eşdeğer admitansı ifade eder. (3.12) eşitliğindeki  $E_a$  gerilimi sıfıra eşit olamayacağına göre  $Y_{eş}=0$  olacaktır. Düğüm admitansları yönteminde bu eşitlik üzerine analize başlanır. Eşdeğer admitansın hem reel hem de imajiner kısımları ayrı ayrı sıfıra eşitlenir.

$$Re(Y_{eş}) = 0 \quad (3.13)$$

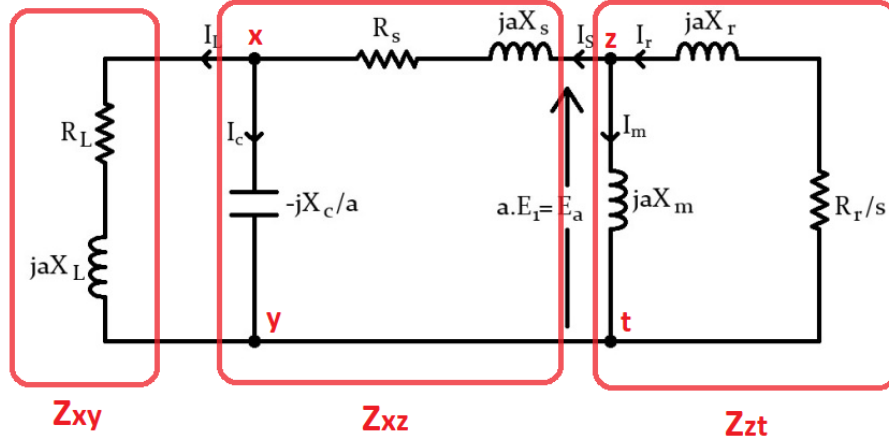
$$Im(Y_{eş}) = 0 \quad (3.14)$$

Reel kısmın uygun bir şekilde sadeleştirilmesiyle sadece  $a$  değişkenine bağlı bir denklem elde edilir. Çeşitli metotlarla çözüm yapılarak bu denklemin uygun  $a$  kökü bulunur. İmajiner kısmın sadeleştirilmesiyle  $a$  ve  $X_m$ 'e iki bilinmeyenli bir denklem ortaya çıkar. Reel kısmın çözülmesiyle elde edilen  $a$  değeri imajiner kısım denkleminde yerine konularak  $X_m$  değeri de hesaplanmış olur.

Bulunan  $X_m$  değerinden makinenin mıknatıslanma eğrisi yardımıyla  $E_1$  gerilimi elde edilir. Artık, önceden bilinen hız, kapasite değerleri ve mıknatıslanma eğrisiyle birlikte, bulunan  $a$  ve  $X_m$  değerleri kullanılarak eşdeğer devreyle ilgili diğer büyüklükler kolaylıkla elde edilebilir.

### 3.3.2. Çevre Empedansları Yöntemiyle Sürekli Durum Analizi

Bu yöntemde Kirchoff'un gerilim yasası kullanılarak analiz yapılır. Yasaya göre kapalı bir çevre içerisindeki gerilim düşümlerini toplamı sıfıra eşittir. Şekil 3.10'da ki devrenin eşdeğer empedansı bulunarak devre sadeleştirilirse bu devreye ait kirchoff yasası aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 3.10. KUAJ'nin empedans temelli çözümde kullanılan devresi

$$Z_{\text{çevre}} = Z_{xy} + Z_{xz} + Z_{zt} \quad (3.15)$$

$$I_{\text{çevre}} \cdot Z_{\text{çevre}} = 0 \quad (3.16)$$

Kendinden uyarım gerçekleşiyse çevre akımı sıfır olamayacağından çevrenin eşdeğer empedansı sıfıra eşit olacaktır.

$$Z_{\text{çevre}} = 0 \quad (3.17)$$

Eşitlik (3.16) reel ve imajiner kısımlarına ayrılıp bu kısımlar ayrı ayrı sıfıra eşitlenir.

$$\text{Re}(Z_{\text{çevre}}) = 0 \quad (3.18)$$

$$\text{Im}(Z_{\text{çevre}}) = 0 \quad (3.19)$$

(3.18) ve (3.19) denklemlerinin uygun şekilde sadeleştirilmesiyle ortaya  $a$  ve  $X_m$ 'e bağlı iki tane yüksek dereceli lineer olmayan denklem çıkar. Bu denklemler çeşitli yöntemlerle çözümlenerek  $a$  ve  $X_m$  değerleri bulunur.

$$p(a, X_m) = 0 \quad (3.20)$$

$$q(a, X_m) = 0 \quad (3.21)$$

$a$  ve  $X_m$  değerlerinin elde edilmesiyle devrede herhangi bir bilinmeyen değişken kalmamaktadır. Önceden bilinen veriler (hız, kapasite, mıknatıslanma reaktansı eğrisi vs.) ve hesaplanan  $a$  ve  $X_m$  değerlerinin kullanılmasıyla devreye ait istenen büyüklükler kolayca elde edilir.

Empedans temelli dönüşüm ve admitans temelli çözümdeki yaklaşım farkı  $a$  ve  $X_m$ 'in bulunmasına kadar izlenen yöntemlerin farkıdır. İki yöntemde elde edilen polinomların katsayıları ve dereceleri farklı olur.  $a$  ve  $X_m$  değerleri elde edildikten sonra yapılacak işlemler her ikisinde de yaklaşık olarak aynıdır. Her iki yöntem de yüksek dereceli denklemler içerir ve bu denklemlerin katsayılarının belirlenmesi aşaması zordur. Ayrıca eşdeğer devrede yapılan değişiklikler polinomların katsayılarını etkilemektedir. Örneğin; kompanzasyon için eklenen bir kondansatör, polinomların derecesini arttıracaktır. Empedans temelli ve admitans temelli çözümler bu tür ortak dezavantajlara sahiplerdir (Arya ve Chauhan, 2009).

### **3.3.3. KUAJ Sürekli Durum Analizinin İteratif Çözüm Yaklaşımıyla Gerçeklenmesi**

Literatürde en çok bilinen empedans temelli ve admitans temelli çözümlerin yüksek dereceli polinomlar içermesi analiz yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı bazı çalışmalarda bu çözüm yöntemleri modifiye edilerek birtakım iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir (Boldea ve Nasar, 2010). Bu çalışmada bilgisayar ortamında farklı bir yaklaşımla, analizi basitleştiren iteratif bir çözüm tekniği kullanılmıştır.

Boldea, asenkron makineleri anlattığı kitabında “İkinci Dereceden Kayma Denklemi Modelli Sürekli Durum Analizi” adını verdiği metotta KUAJ analizi yaparken çıkış frekansını biliyor kabul ederek bu frekansta bir gerilim çıkışı elde etmek için gerekli olan hız değerini hesaplayan bir yöntem kullanmıştır (Boldea ve Nasar, 2010). Bu metotta kayma değeri ikinci dereceden bir denklemin köklerinin bulunması sonucunda elde edilerek buradan hız değerine geçiş yapılmaktadır. Bu yöntemde, diğer yöntemlerin içerdiği yüksek dereceli denklemlerin bulunmaması çözümü daha da kolaylaştırmaktadır. Fakat asenkron jeneratör gibi çıkış gerilimi frekansının birçok etmene bağlı olarak değişebildiği bir makinede çıkış frekansını biliyor kabul etmek pratikte çok da mümkün olabilecek bir durum değildir. Boldea'nın çözüm yöntemine birkaç iyileştirme yapılarak bilinen hız ve kapasite değerlerinde asenkron jeneratörlerin sürekli durum performansları kolayca gözlemlenebilir. Bu çözüm yönteminde bağlı



frekansa değer verilerek kayma hesaplanacak, elde edilen sonuç ile rotor hızı kontrol edilerek hem  $a$  hem de  $s$  değerleri bulunacaktır.

Analizi basitleştirmek için yk, uyarım kondansatörü ve stator empedansları birleştirilerek tek empedans elde edilebilir (Boldea ve Nasar, 2010). Bu ifade eşitlik (3.22)'deki gibi yazılırsa reel kısmı eşitlik (3.23) ve imajiner kısmı ise eşitlik (3.24)'teki gibi elde edilir.

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (3.22)$$

$$R_1 = R_s + \frac{R_L X_L X_C - R_L \frac{X_C}{a} (aX_L - \frac{X_C}{a})}{R_L^2 + (aX_L - \frac{X_C}{a})} \quad (3.23)$$

$$X_1 = aX_s - \frac{X_L X_C (aX_L - \frac{X_C}{a}) + R_L^2 \frac{X_C}{a}}{R_L^2 + (aX_L - \frac{X_C}{a})} \quad (3.24)$$

Bu sadeleştirmelerle ortaya çıkan devrenin akım eşitliği yazılırsa;

$$I_r = I_s + I_m \quad (3.25)$$

Eşitlik (3.25) düğüm gerilimlerine göre yeniden yazılacak olursa;

$$\frac{E_a}{\frac{R_r}{s} + jaX_r} = \frac{E_a}{R_1 + jX_1} + \frac{E_a}{jaX_m} \quad (3.26)$$

Eşitlik (3.26)'da gerekli sadeleştirmeler yapılır ve sonrasında reel ve imajiner kısımları ayrı ayrı sıfıra eşitlenirse; reel kısım eşitliği (3.27) ve imajiner kısım eşitliği (3.28)'deki gibi olur.

$$\frac{sR_r}{R_r^2 + a^2 s^2 X_r^2} - \frac{R_1}{R_1^2 + X_1^2} = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{s^2 a X_r}{R_r^2 + a^2 s^2 X_r^2} - \frac{X_1}{R_1^2 + X_1^2} - \frac{1}{a X_m} = 0 \quad (3.28)$$

Eşitlik (3.27), kaymaya bağlı ikinci dereceden bir denklem yapısı elde edilecek bir biçimde düzenlenip sadeleştirilirse  $A.s^2+B.s+C$  ifadesi elde edilebilir. Bu yapının katsayıları (3.29) eşitliğindeki gibidir.

$$A = a^2 X_r^2 R_1 \quad B = R_r (R_1^2 + X_1^2) \quad C = R_1 R_r^2 \quad (3.29)$$

Eşitlik (3.28)'de iki tane bilinmeyen vardır. Bunlar  $a$  ve  $s$ 'dir. Eğer  $a$  biliniyorsa Eşitlik (3.29)'de ki denklemin  $s$  kökleri bulunur. Küçük olan kök değeri makinenin kayma değerini verecektir. Bu çözüm metodu için (Boldea ve Nasar, 2010) ve (Biglari ve Miraftabi, 2012)'de yazarlar istenilen bir frekans değeri için çözüm yoluna giderek  $a$  değerini yani bağıl frekansı biliyor kabul etmişlerdir. Buna göre çözüm yaparak kaymayı bulmuşlardır. Ancak döner alan frekansı; yüke, uyarım kondansatörüne ve rotor hızına bağlı olarak değişim gösterir. Jeneratörün belirli değerdeki yük, uyarım kondansatörü ve devir sayısında hangi frekansta gerilim üreteceğini bu denklemler çözülmeden bilemeyeceğimiz için  $a$  ve  $s$ 'yi aynı anda bulmak daha doğru bir analiz yapmamızı sağlayacaktır. Eğer rotor hızı biliniyorsa  $a$  ve  $s$  aynı anda bulunabilir.

(3.3), (3.4), (3.5) eşitlikleri düzenlenirse döner alan frekansı eşitlik (3.30)'da ki gibi hesaplanabilir.

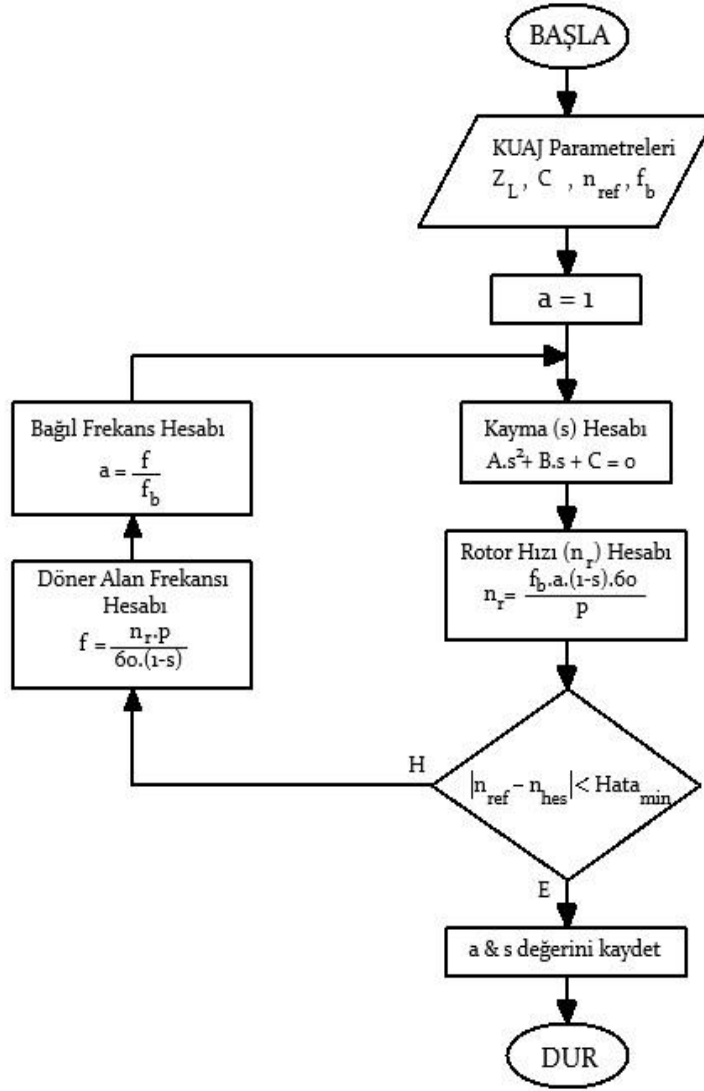
$$f = \frac{n_r p}{60(1-s)} \quad (3.30)$$

Burada;  $n$  rotor hızıdır ve birimi devir/dakika,  $p$  kutup çifti sayısıdır. Bağıl frekansın  $a$  ile gösterildiği eşitlik (3.8)'de verilmişti. Formülde;  $f$  çıkış gerilimi frekansı,  $f_b$  ise baz frekansdır.

Eğer  $a$  ve  $s$  hesaplandıktan sonra rotor hız değeri bulunmak istenirse (3.31) eşitliği yardımıyla devir/dakika cinsinden hesaplanabilir;

$$n = \frac{f_b \cdot a \cdot (1-s) \cdot 60}{p} \quad (3.31)$$

Eşitlik (3.29) ve eşitlik (3.31) kullanılarak  $s$ 'yi tek bilinmeyen haline getirme yöntemiyle çözüm yoluna gidilebilir. Fakat bu durumda kök kuvvetleri artacaktır ve dolayısıyla çözüm yöntemleri zorlaşacaktır. Bunun yerine analiz için basit yapıda bir iteratif çözüm yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımın akış şeması Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 3.10. KUAJ sürekli durum analizi için iteratif çözüm yaklaşımı akış diyagramı

İlk olarak asenkron jeneratör etiket değerleri, asenkron jeneratör eşdeğer devre parametreleri, yük, uyarım kondansatörünün değeri ve rotor hızı sisteme girilir.  $a$  değeri başlangıçta 1 olarak alınır. Karşılaştırmada kullanılmak üzere bir minimum hata değeri belirlenir. Eşitlik (3.29) kullanılarak  $s$  değeri hesaplanır. Bulunan  $s$  ve  $a$  (ilk çevrimde 1'dir) değerleri ile rotor devri eşitlik (3.31) yardımıyla hesaplanır. Gerçek

rotor hızı ile hesaplanan rotor hızı karşılaştırılır. Aradaki fark minimum hata değerinden büyükse, döner alan frekansı eşitlik (3.30)'dan ve  $a$  değeri de eşitlik (3.8)'den yeniden hesaplanır. Bu yeni  $a$  ve  $s$  değerleri tekrar işlem döngüsüne sokularak hata değeri minimum hata değerine ulaşıncaya kadar döngüsel hesaplamalara devam edilir. Minimum hata değerine ulaşıldığında  $a$  ve  $s$  değerleri bulunmuş demektir. Bu değerler ile ilk olarak eşitlik (3.32) kullanılarak mıknatıslanma reaktansı hesaplanır (Boldea ve Nasar, 2010).

$$X_m = \frac{R_r(R_1^2 + X_1^2)}{s a^2 X_r R_1 + a R_r X_1} \quad (3.32)$$

Mıknatıslanma eğrisi kullanılarak; hesaplanan mıknatıslanma reaktansına karşılık gelen hava aralığı gerilimi  $E_1$  bulunur. Mıknatıslanma eğrisi baz frekans değerinde elde edildiğinden  $E_1$  gerilimi  $a$  ile çarpılır.

$$E_a = a \cdot E_1 \quad (3.33)$$

Stator akımı, çıkış gerilimi aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır.

$$I_s = \frac{E_a}{R_1 + jX_1} \quad (3.34)$$

$$V_1 = E_a - I_s \cdot (R_s + jaX_s) \quad (3.35)$$

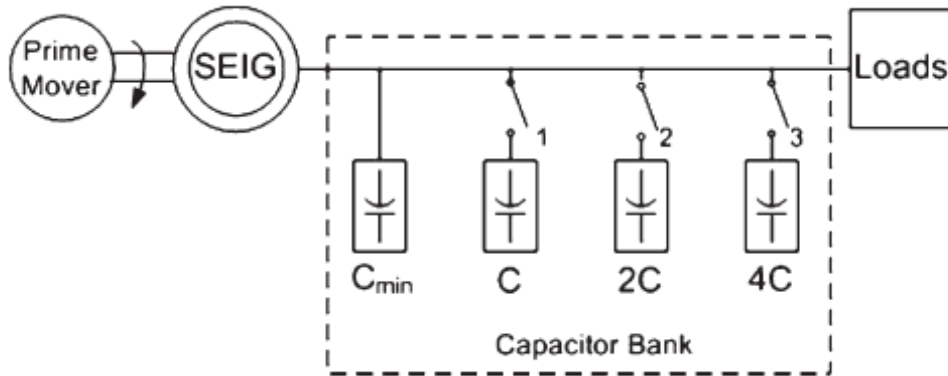
## 4. KUAJ GERİLİM REGÜLASYONU

### 4.1. Regülasyon Yöntemleri

Asenkron jeneratörün gerilim regülasyonunun yapılabilmesi için birden fazla yöntem mevcuttur. Bu yöntemler aşağıda sıralanmıştır.

#### 4.1.1. Kondansatör Anahtarlama Regülasyon

Bilinen en basit yöntemdir. Diğer yöntemlerin aksine maliyeti de düşüktür. Bu yöntemde asenkron jeneratörün stator uçlarına paralel kondansatörler bağlanarak gerilim regülasyonu yapılmaya çalışılır. Kondansatör değerleri genellikle  $C_{min}$  olarak belirlenen kondansatörün katlarıdır. Bu kondansatörler röle veya kontaktörler yardımıyla devreye alınıp çıkarılır.



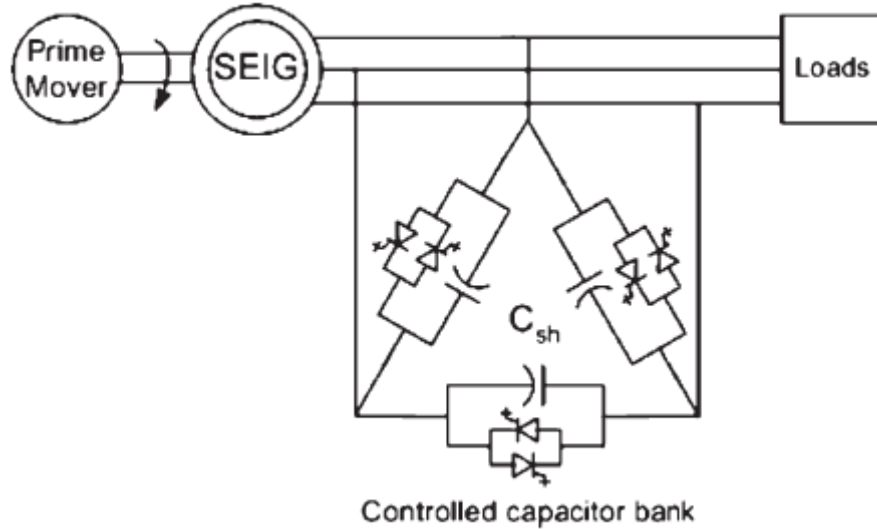
Şekil 4.1. KUAJ yapısında kondansatör kombinasyonu bağlantı şekli

Kondansatör kombinasyonu ve gerekliliği istenilen çözünürlüğe göre artırılabilir ve çeşitlendirilebilir. Böylece olası gerekli olan kapasite daha hassas ayarlanabildiği için regülasyon karakteristiği de oldukça hassas olarak elde etmek mümkün olur. Özellikle bu tür gereksinimlerde binary ağacı şeklinde bir dizilim basit ve etkili bir çözüm olur. Kapasite değerleri ikinin katları şeklinde  $C$ ,  $2C$ ,  $4C$  ... olarak belirlenir. Sadece 4 kapasite birimiyle geniş bir aralığı kapsamak mümkün olur. Bununla birlikte temel bir başlangıç değeri varsa bu değer statik olarak bağlı kalabilir. Kontaklara daha hassas kapasiteler bağlanarak daha fazla çözünürlük sağlanabilir. KUAJ sisteminde kalkınmak için en az bir baz kapasitörüne ihtiyaç duyulduğundan bu

asgari C olarak sisteme bağlanır. Diğer C değerleri ise yükün durumuna göre oluştuğundan sisteme sonradan ilave edilmektedirler.

#### 4.1.2. Tristör Anahtarlama Kapasitör ile Regülasyon

Tristör yapısı gereği akım esaslı kontrollü bir diyottur. Tristör Gerilimin pozitif olduğu bölgede iletme geçirilebilir ancak durma şartı zorlamalı bir durum yoksa akımın sıfırdan geçişi ile mümkündür. Bu doğal komutasyon olup özellikle faz kontrolü uygulamalarında (buradaki yapı içinde aynısı) doğal komutasyon kullanılır. Tristör pozitif bir çıkış ile iletme geçtiğinden, tristörden daha zorlu şartlara dayanabilen ve aynı zamanda (kısmende olsa) durdurabileceğimiz başka bir yarı iletken anahtarımız yoktur. Tristörün en büyük avantajlarından biri de özellikle açılıp kapanma esnasında statik yapısından dolayı bir ark oluşmayacağını garanti ettiğinden kontak aşınması türü problemler tristör temelli uygulamalarda görülmez.



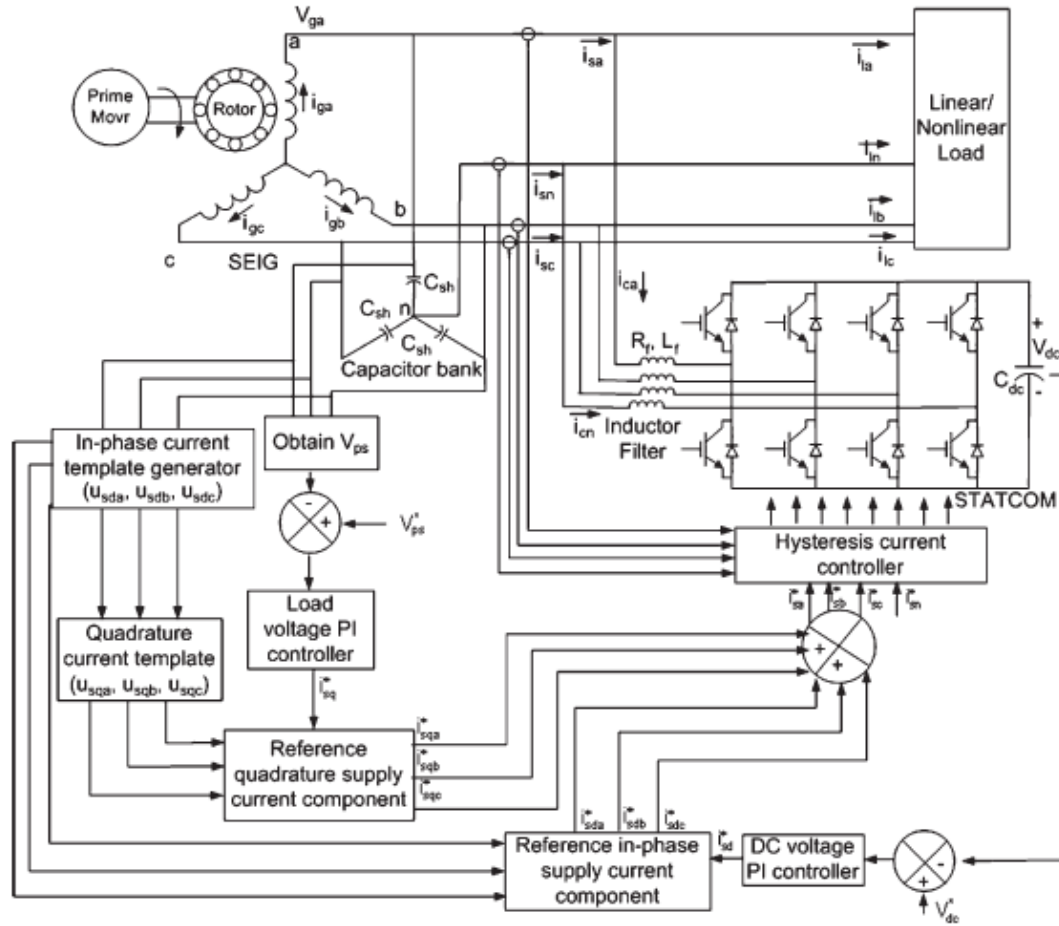
Şekil 4.2. KUAJ yapısında kondansatör kombinasyonunun tristör ile kontrol edilmesi

Tristörün getirdiği anahtarlama kolaylığından dolayı gerekli kapasite değeri C olası en büyük durumu içererek şekilde bağlanır. Gerekli olan C miktarı konsatörün ne kadar anahtralandığı ile ilgili olarak gelişir. Örneğin maksimum gereklilik için tristör sinüs eğrisinin sıfır dereceye yakın kısmında tetiklenir ki böylece tüm yarı periyot boyunca kapasite hatta bağlı kalsın. Diğer alternans içinde ters paralel bağlı olan tristör tetiklenir ve böylece bir tam sinüs değerinde kontrol sağlanmış olur. Örneğin

kapasitenin yarısının gerekli olduğu durumlarda 90 derece ve 270 derecelerde tetikleme yapılır. Tristörlerden pozitif alternanstaki 180 derecece, 270 tetiklenen ise sıfır derecede kendiliğinden (doğal kömütasyon) durur. Akımın bu değerde sıfırdan geçtiğini varsayarak söylüyoruz. Böylece gerekli ola kapasitif güç VARtristörlerin tetikleme açılarına bağlı olarak elde edildiğinden daha sessiz ve aşınmasız bir anahtarlama grubu oluşturulmuş olur.

#### 4.1.3. STATCOM ile Regülasyon

STATCOM ile gerilim regülasyonu karmaşık ve maliyetli bir sistemdir. Dolayısıyla bu yapı mikrodnetleyici yerine bilgisayarlarla kontrol edilir.



Şekil 4.3. STATCOM ile KUAJ gerilim regülasyonu sistem yapısı

#### 4.1.4. Regülasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Aşağıdaki tabloda üç farklı regülasyon yönteminin karşılaştırılması verilmiştir. Kondansatör anahtarlamalı gerilim regülasyonunun yapısının basit ve maliyetinin düşük olması tabloda görülmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada bu sistem seçilmiştir.

**Tablo 4.1.** Regülasyon yöntemlerinin karşılaştırılması

	Tepki Hızı	İşlemin Tekrarlanma İmkânı	Adımlar	Endüktif Kontrol	Aktif Güç Kontrolü	Maliyet
<b>Kondansatör Anahtarlamalı</b>	Yavaş	Sınırlı	Sabit	Yok	Yok	Düşük
<b>Tristör Anahtarlamalı</b>	Var	Var	Sabit	Yok	Yok	Orta
<b>STATCOM</b>	Hızlı	Sürekli	Sürekli	Var	Mümkün	Yüksek

#### 4.2. Kondansatör Değerinin Hesaplanması

Asenkron jeneratörün gerilim üretebilmesi için statoruna bağlanan kondansatörün belirli bir değerinde olması gerekir. Gerekli olan kondansatör kapasite değeri birçok etmenden etkilenmektedir. Bu etmenlerden en önemli iki tanesi; asenkron jeneratörün hızı ve devreye alınan yük miktarıdır. Bu iki etmenden herhangi birinin değişimi, devreye alınması gereken kondansatör miktarına da etkilemektedir. Rüzgâr hızının ve yük miktarının değişkenliği göz önüne alındığında asenkron jeneratörün gerilim regülasyonunun zorluğu da ortaya çıkmaktadır. Kondansatör değeri hesaplanmasında birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden iki tanesi aşağıda verilmiştir.



#### 4.2.1. Bulanık Mantık Kavramı

Bulanık mantık kuramı, gelenekselleşmiş kontrol sistemlerinden farklı olarak belirsiz veya kesin olmayan değerlerle ilgilenir. İlk olarak 1965 yılında Lotfi A. Zadeh'in yayınladığı makalenin sonucu ortaya çıkmış bir mantık yapısıdır. Bulanık mantık küme ve alt kümelerden oluşur. Klasik mantıkta bir eleman ya ilgili kümenin elemanı ya da o kümenin elemanı değildir. Sonuca matematiksel olarak bakıldığı zaman eleman ilgili kümenin elemanı olduğunda "1", elemanı olmadığı zaman "0" değerini alır. Bulanık kümeler klasik kümelerin aksine elemanların üyelik dereceleri  $[0, 1]$  aralığında sonsuz sayıda değişebilir. Klasik kümelerdeki, karanlık-aydınlık, sıcak-soğuk gibi kesin ifade bildiren var-yok ikilemleri bulanık mantıkta biraz aydınlık, biraz sıcak gibi ifadelerle esnek hale getirilerek gerçek dünyaya benzetilmeye çalışılır.

Bulanık mantık denetleyicilerin temeli, sözel ifadeler ve bunlar arasındaki mantıksal ilişkiler üzerine kurulmuştur. Bulanık mantık herhangi bir sisteme uygulanırken ilgili sistemin matematiksel modelinin bilinmesi şart değildir. Ancak sözel ifadelerin bilgisayar ortamına aktarılması matematiksel bir temele dayandığından bu matematiksel temel, bulanık kümeler kuramı ve bulanık mantık olarak adlandırılır (Takagi ve Sugeno, 1985). Bütün bu ifadelerden sonra bulanık mantığın avantajlarına bakıldığında, bulanık mantık matematiksel bir model gerek duymaz. Aynı zamanda programlaması basit ve anlaşılır olması bulanık mantığın en büyük avantajıdır. Lineer olmayan sistemlerin daha kolay modellenmesine olanak sağlar.

Bulanık mantık, yapay zekâ algoritmaları ve klasik kontrol yöntemleri arasında bir köprü oluşturmaktadır. Bulanık mantık, karmaşık kontrol problemlerinin çözümünde, klasik kontrol yöntemlerine göre, çoğu durumda, daha kesin sonuçlar verebilmektedir (Akyazi ve ark., 2012).

Bulanık mantığın ilk uygulaması, Mamdani'nin 1974 yılında bir buhar makinesinin bulanık mantık denetimini gerçekleştirilmesiyle başlar. Bundan bir yıl sonra Zadeh'in (Zadeh, 1965) bulanık küme kavramının denetleyicilere uygulama kuralları ve bulanık mantık denetleyiciler Mamdani tarafından yayınlanmıştır (Zadeh, 1965). Bir Hollanda şirketi 1980 yılında bir çimento fabrikasında, üç yıl sonrada Fuji su arıtma sistemlerinde bulanık mantık denetleyicileri kullanmaya başlamıştır. Omron şirketinin 1984'te başladığı çalışmalar birçok endüstriyel alanda uygulamaya konulmuştur. Japonya'da Sendai metrosu için Hitachi şirketinin geliştirdiği bulanık denetleme modeli, trenlerin farklı yükler altında ve farklı istasyonlarda durması ve hız

denetiminde; etkin, enerji açısından verimli ve yüksek rahatlık ölçüleri ile değerlendirilmiştir.

Bir başka bulanık mantık denetim modeli ise 1985 yılında geliştirilen Takagi ve Sugeno (Mamdani ve Assilian, 1975) modelidir. Mamdani prensiplerine benzer olmasına rağmen, bulanık çıkarım yöntemleri birbirinden farklıdır. Kural tablolarının oluşturulmasında uzman sistemlerden yararlanılması ve kararlılık incelemesi her iki model için de araştırmaların temel konularındandır (Takagi ve Sugeno, 1985). Tokyo’da 1990 yılında bir mini helikopter uygulamasında, yer konum algılaması ve uçuş kararlılığı konusunda önemli başarı elde edilmiştir. Bu yıllardan sonra, video kameralar, elektrikli süpürgeler, çamaşır makineleri gibi bireysel kullanıcılara sunulan bulanık mantık denetleyicili sistemler, oldukça beğeni kazanmıştır. Özellikle Japon şirketlerin bu konudaki rekabeti robot çalışmalarında da bulanık mantık denetim modelinin hızla girmesine ve gelişmesine neden olmuştur. El yazısı tanıma sistemlerinde Sony şirketi 1993 yılında ilk çalışmalarını The Palm Top sistemi ile tanıtmıştır. Isı denetim sistemlerinde önemli çalışmalar ise NASA tarafından yapılmıştır (İbrahim, 1997). İlk bulanık mantık destekleyici yonga Togai ve Watanabe tarafından duyuruldu. Arkasından Yamazaki ve Sugeno ve daha sonra da Yamakawa bulanık mantık tabanlı mikroişlemci denetim sistemlerini duyurdular (El-Hawary, 1998).

Bulanık mantık aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır.

**Normalizasyon:** Bu bölümde giriş ve çıkış değerleri normalizasyon işlemi yapılarak  $[-1, +1]$  aralığında çalışan bir yapıya dönüştürülür. Bu işlem denetleyici performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Her giriş ve her çıkış normalizasyon işlemine tabi tutulmalıdır.

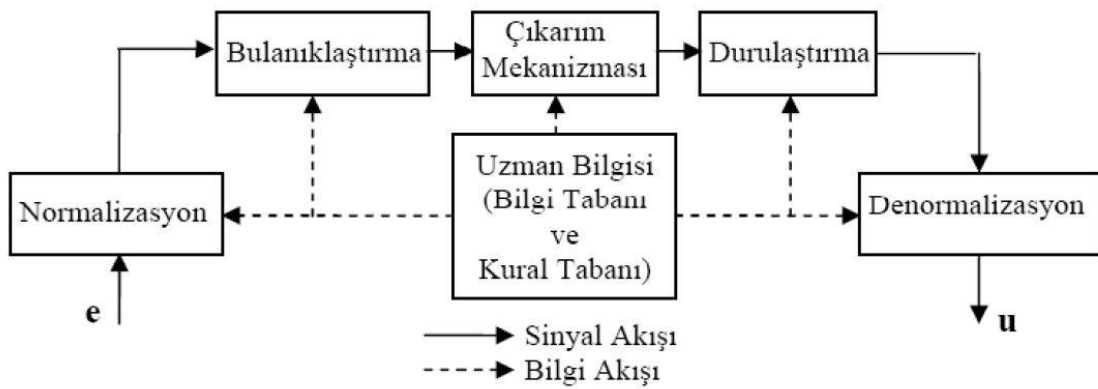
**Bulanıklaştırma:** Bu bölümde analog olan girdiler sözel nesnelere ifade edilmektedir. *Hızlı, yavaş, soğuk* gibi ya da daha genel bir ifadeyle çok büyük, büyük, sıfır, küçük, çok küçük şeklinde bir dizilim kullanılmaktadır. Bu sözel değişkenler sadece nesnenin sadece hangi kümeyle ait olduğu hakkında bilgi vermez, aynı zamanda nesnenin bir kümeyle olan üyelik derecesi hakkında da bilgi vermektedir.

**Çıkarım mekanizması:** Bu bölümde girdi olarak verilen sözel değişkenler bulanık mantık kurallarına (EĞER A ise O HALDE B yap gibi) çevrilmektedir. Örnek olarak “EĞER araba hızlı ise O HALDE gücü sıfır yap” gibi cümleler verilebilir. İki tip sonuç çıkarma metodu mevcuttur, Surgeno-tipi ve Mamdani-tipi. Mamdani-tipi metotta çıkışta bulanık bir küme olarak ele alınmaktadır. Surgeno-tipi ise çıkışa tekil cevaplar

vermektedir. Buda Surgeno-tipi sonuç çıkarma yöntemini modellemede ve matematiksel işlemlerde daha avantajlı konuma getirmektedir.

**Durulaştırma:** Bu bölümde sonuç çıkarma bölümünden alınan büyüklüğü belli sözel değişkenler analog değişkenlere geri çevrilmektedir. Temel olarak iki metot kullanılmaktadır. Maksimum durulaştırma metodunda çıkış en fazla ağırlığı olan sözel değişken olarak seçilirken, merkez durulaştırma metodunda, bütün çıkış fonksiyonlarının etkisi hesaba alınmaktadır.

**Denormalizasyon:** Bu bölümde değişkenler durulaştırma işleminden sonra sistemin çalışacağı ve anlayacağı çıkış değerlerine dönüştürülür.

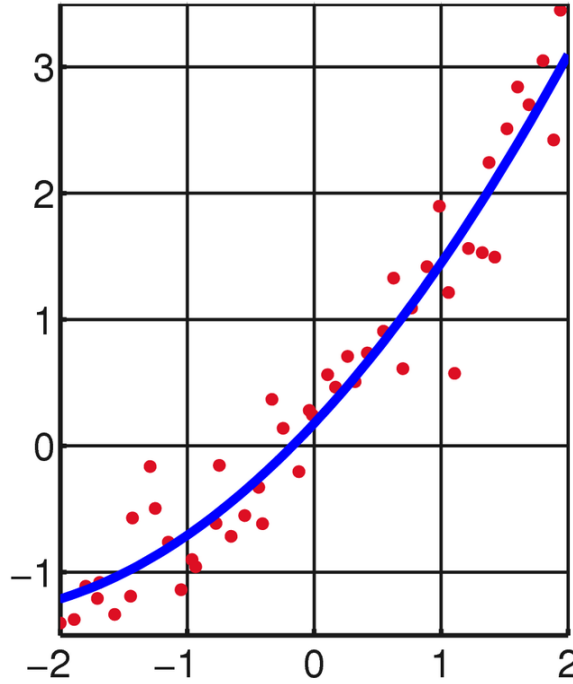


Şekil 4.4. Bulanık mantık genel yapısı

#### 4.2.2. En Küçük Kareler Yöntemi

En küçük kareler yöntemi, birbirine bağlı olarak değişkenlik gösteren iki fiziksel büyüklük arasındaki matematiksel bağlantıyı, mümkün olduğunca gerçeğe uygun bir denklem olarak yazmak için kullanılan, standart bir regresyon yöntemidir. Farklı bir ifade ile söylemek gerekirse ölçüm sonucu elde edilen veri noktalarına en yakın fonksiyon eğrisinin bulunmasını sağlayan yöntemdir. Gauss-Markov Teoremi'ne göre en küçük kareler yöntemi, regresyon için optimal yöntemdir.

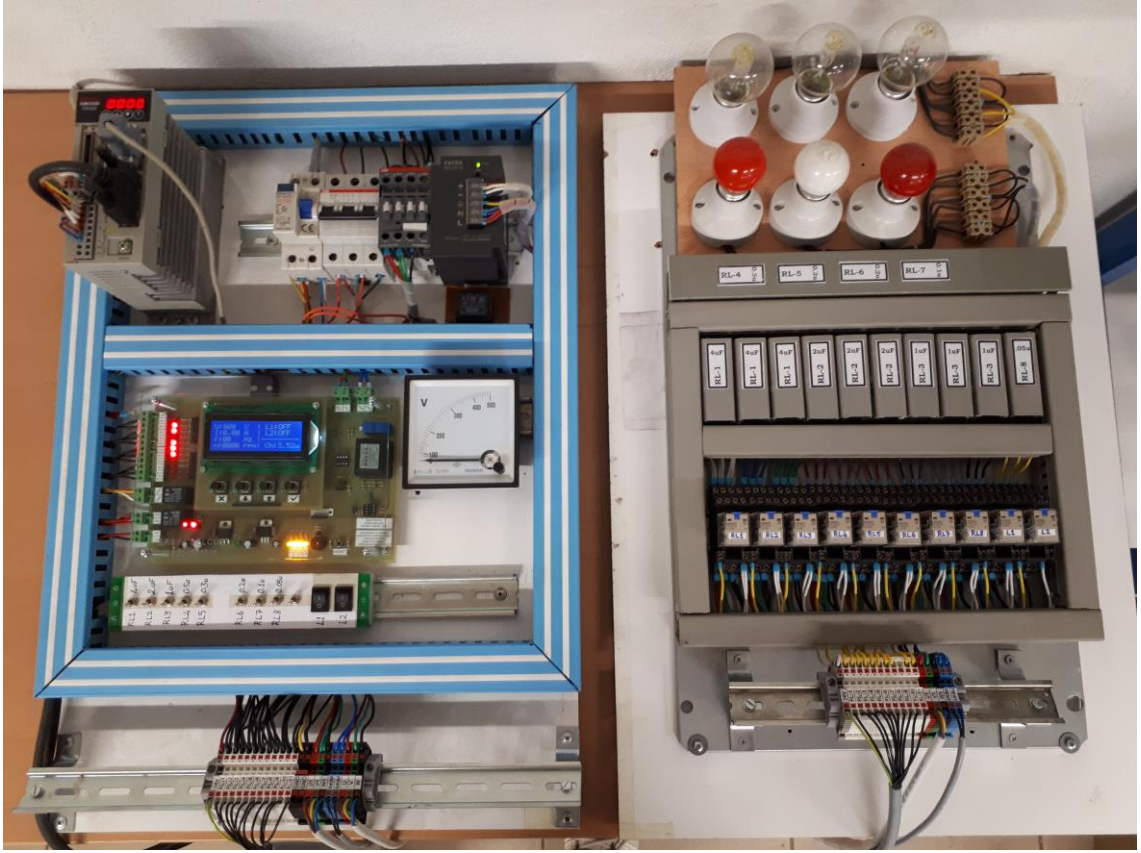
Gerçek ortamlarda herhangi bir uygulama ile toplanan veriler tablo haline getirilerek incelenir. Daha sonra bu veriler işlenir ve bir fonksiyon modellenmeye çalışılır. Hatta çoğu zaman bu veri tablosuna tam olarak uyan bir fonksiyon bulunamaz. Bunun yerine veri tablosuna uyan en uygun fonksiyon seçilir. Bu süreç ise regresyon analizi olarak adlandırılır. Regresyon analizi yaparken en çok kullanılan yöntemlerden biri en küçük kareler yöntemidir. Matematikçi C. F. Gauss'un 18 yaşındayken (1795) geliştirdiği bu yöntem, ilk kez 1801 de Cres asteroidinin yörüngesinin belirlenmesinde kullanılmış ve ilk kez Gauss'un toplu eserlerinin yayınlandığı ciltlerden ikincisinde 1809 yılında yayınlanmıştır. En küçük kareler yöntemi, tıp, finans, mühendislik, ziraat, biyoloji ve sosyoloji gibi çeşitli bilim dallarında çeşitli değişkenler arasındaki ilişkiler belirlenirken kullanılan en önemli araçlar arasındadır (Golayoğlu, 2013).



Şekil 4.5. En küçük kareler yöntemi için eğri örneği

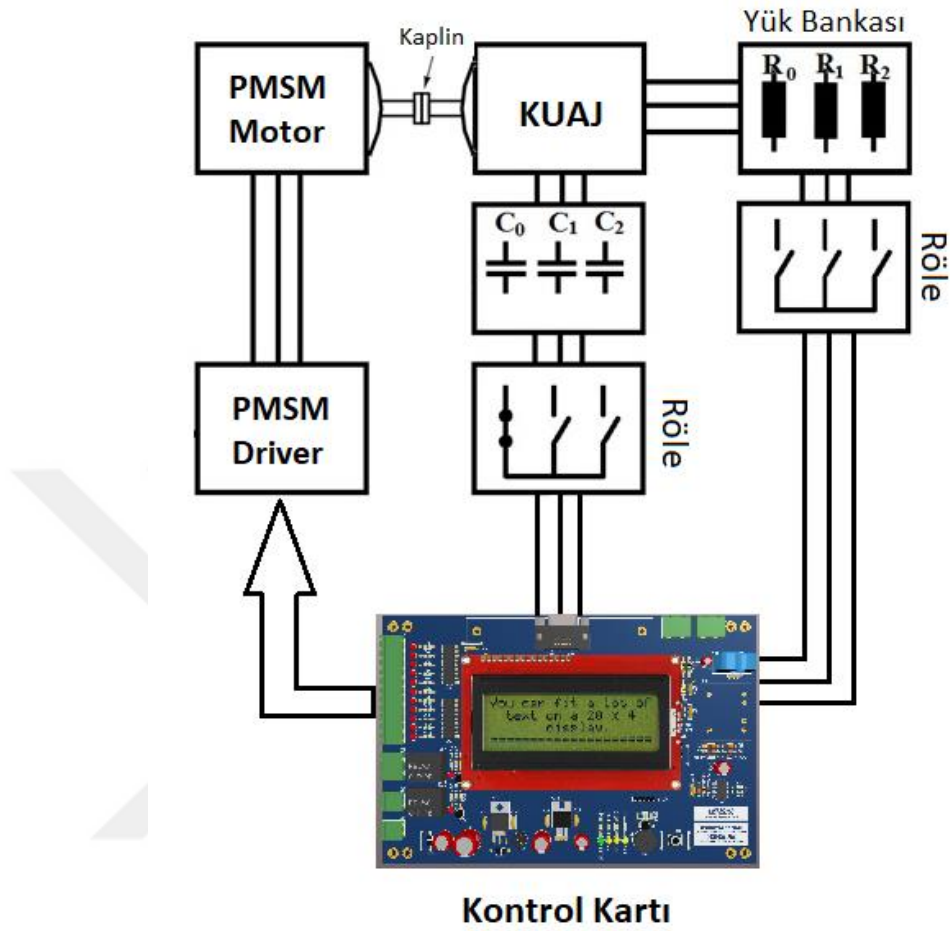
## 5. ÖNERİLEN SİSTEMİN OLUŞTURULMASI

Önerilen sistemin oluşturulması için rüzgâr gücü simüle edilmiş, rüzgâr gücünden elde edilen birincil hareket asenkron jeneratöre aktarılmıştır. Oluşan hareketle beraber asenkron jeneratörün statoruna kondansatörler üçgen – paralel olarak bağlanmıştır. Asenkron jeneratörün mili belirli bir hızda dönerken kontrol kartı tarafından gerekli olan kapasite miktarı hesaplanıp devreye alınmıştır. Jeneratörün çıkış gerilimi, yük akımı ve frekansı kontrol kartı tarafından sürekli takip edilmiştir.



Şekil 5.1. Önerilen sistemden bir fotoğraf

### 5.1. Önerilen Sistemin Blok Şeması



Şekil 5.2. Deney seti blok diyagramı

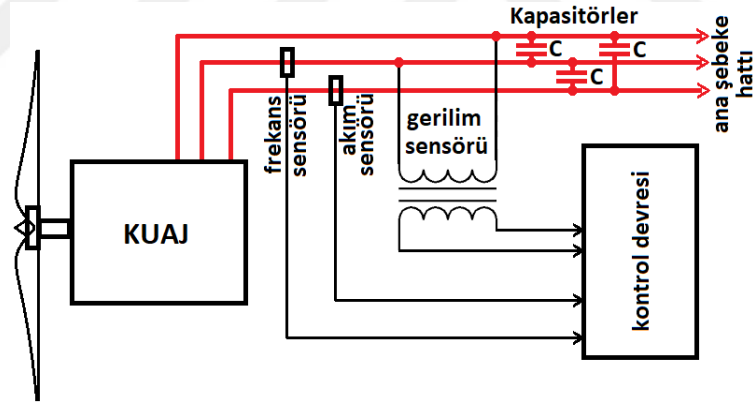
KUAJ'ın gerilim regülasyonu için yukarıdaki sistemin kurulması planlanmıştır. Burada Gerilim, akım ve hız bilgisine bakılarak gerilimin sabit tutulması için gereken kapasite miktarı kontrol kartı ile hesaplanmıştır. Değişken yük ile Asenkron jeneratörün davranışı incelenmiştir.

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi sistem bir adet kontrol kartı, 3 fazlı asenkron jeneratör, asenkron jeneratöre hareket verecek kaynak, kapasite bankası, yük Asenkron jeneratöre ait hız bilgisi, gerilim bilgisi ve akım bilgisi okunup alınan bu veriler kontrol kartı ile işlenip gerekli kapasite miktarı devreye alınmıştır.

## 5.2. Kontrol Kartının Oluşturulması

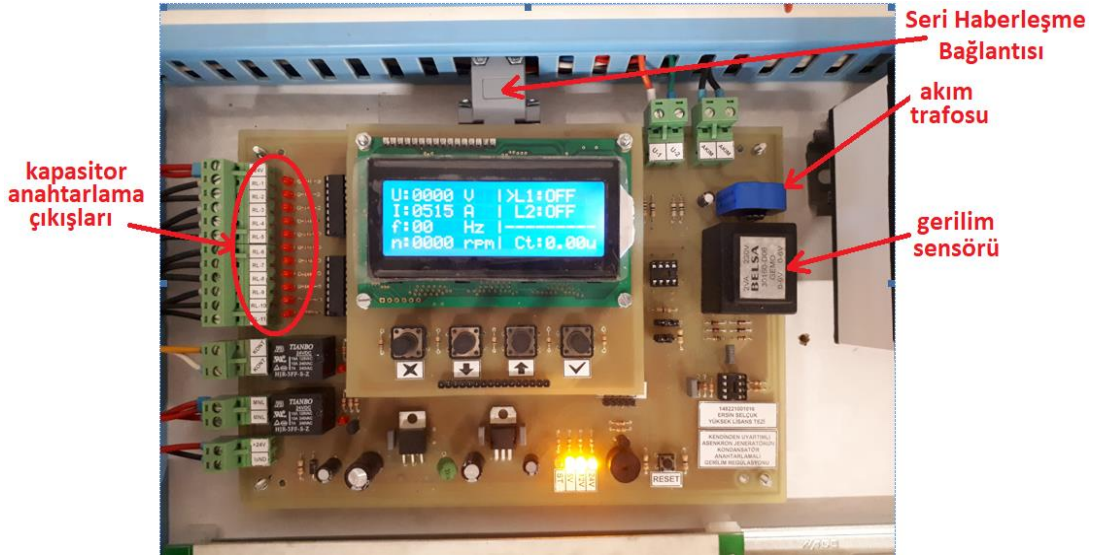
Oluşturulan kontrol kartı bir mikrodenetleyici ile asenkron jeneratör için gerekli olan kapasite miktarını hesaplayıp röleler yardımıyla devreye alır. Yanlış anahtarlama asenkron jeneratörün gerilim üretme aralığından uzaklaşmasına veya aşırı gerilim üretmesine ve bundan dolayı sistemi tahrip etmesine veya zorlanmasına neden olacağından anahtarlama (geçiş) noktalarının sağlıklı bir şekilde ayarlanmış olması gerekmektedir. Kontrol sistemi birden fazla parametreye bağlı olduğundan ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem gerilim regülasyonunun takibi için gerilim ölçümüne, yük akımının takibi için akım ölçümüne ve asenkron jeneratörün hız bilgisinin ölçülmesine ihtiyaç duymaktadır.

Anahtarlanmış olan kondansatörlerin de akımını görebilmek ve kümülatif bir yaklaşım için akım sensörleri jeneratör çıkışından hemen sonra bağlanmıştır. Böylece yük akımı ile kapasitör akımlarının ayrı ayrı ölçülmesine ihtiyaç kalmamıştır. Şekil 5.3'de sensör bağlantı noktaları gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Sensör noktalarının yerleri

Kondansatörlerin anahtarlama sistematığı binary sayma modeline göre oluşturulduğundan daha duyarlı bir kontrol organizasyonu oluşturmak mümkün olmuştur. Kontrol devresi üzerindeki bir LCD üzerinden akım ve gerilim değerlerini izlemek mümkündür. Akım ve gerilim değerlerinin okunması ve kıyaslanması pens ampermetre ve voltmetre ile program içerisinde bir çarpan katsayısı ile kalibre edilmiştir.



Şekil 5.4. Uygulama devresinin reel görünümü

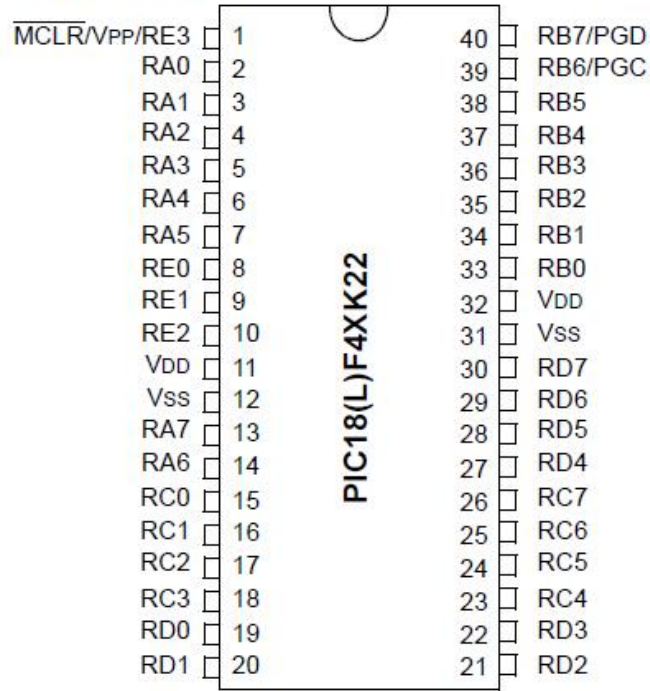
Kontrol kartı 24V besleme ile bağımsız bir kaynak üzerinden çalıştırılmıştır. Kondansatör kombinasyonları röleler üzerinden kontrol edilmektedir. Sistem bir deney seti ve ölçme düzeneği içermektedir. Gerekli birincil güç girişi yine kontrol devresi tarafından hızı ayarlanabilen bir PMSM (Permanent Magnet Senkron Motor) üzerinden sağlanmaktadır. PMSM motor kendi öz hız kontrol ünitesinin bir RS-232 seri haberleşme kanalı üzerinden tasarlanmış olan kontrol devresine bağlıdır. Kontrol devresi hız kontrolünün gerektirdiği komut düzeneği ve bir CRC (Cyclic Redundancy Check) üzerinden haberleşir.

### 5.2.1. Kullanılan Mikrodenetleyici

Bu çalışmada Microchip firmasına ait 8-bit PIC18F46K22 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Kullanılan Mikrodenetleyici sistemi kontrol etmenin yanında FUZZY yapısından çıkarım elde ederek optimum kondansatörü seçmekten sorumludur. Mikrodenetleyici girişine gelen akım, gerilim ve hız değerleri ile FUZZY yapısını besler ve sonucunda elde edilen hedef kondansatörü ya da kondansatörler grubunu anahtarlar. Mikrodenetleyici 64kB program hafızasına, 3896 bytes SRAM ve 1024 Bytes EEPROM hafızasına sahip olup, aynı zamanda 8 kanal analog girişi de mevcuttur. Analog yerleşme ve tarama hızı 10KHz kadar çıkabildiğinden ADC çevriminin sistemin performansını etkilemediği kabul edilmiştir.



### 40-pin PDIP



Copyright: Microchip Inc.

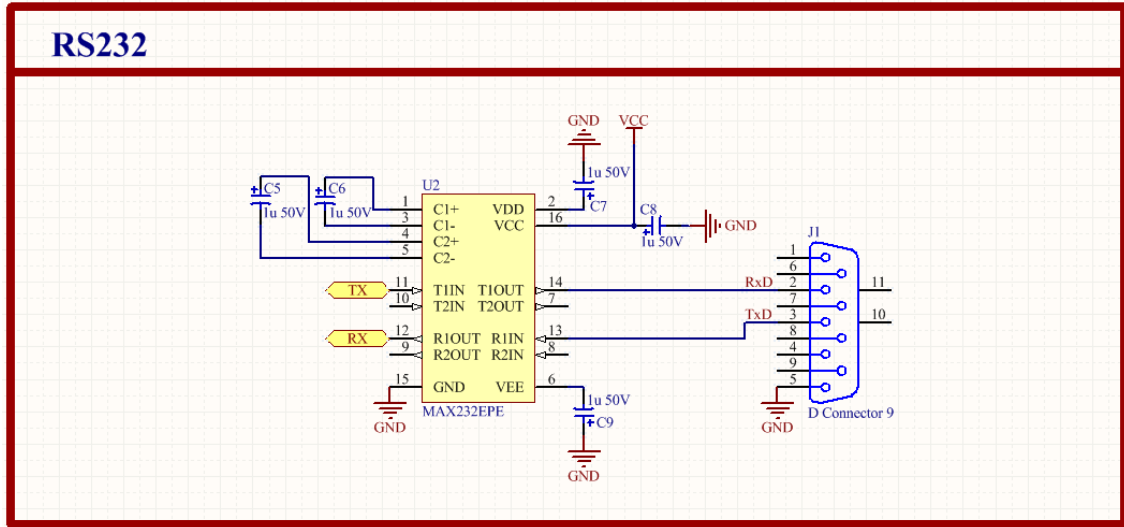
Şekil 5.5. Kullanılan mikrodeneleyici bacak yapısı ve kullanılan pinler

Şekil 5.5’de sistemin temel yapısını oluşturan Microchip firmasının ürünü görülmektedir. Çalışmamızda rahat programlama ve erişilebilirliğinden dolayı DIP kılıf yapısı tercih edilmiştir.

#### 5.2.2. RS232 Haberleşme Protokolü

Deney sisteminin ilk başlangıç noktası statik bir rüzgâr gücünün simüle edilmesi ile başlamaktadır. Rüzgâr gücünün sabit olması için PMSM yapısında bir motor KUAJ sistemine akuple edilmiştir. PMSM bir hız kontrolü üzerinden sürülmüştür. Sürme metodu için mikrodeneleyici ile inverter arasında seri haberleşme gerçekleştirilmiş ve haberleşme standart bir protokol üzerinden sağlanmıştır. Haberleşme protokolü bir RS-232 seviye dönüştürücüsü üzerinde sağlanır. RS-232 klasik 5 volt sistem gerilim gerilimi ile hedef arasında  $\pm 15V$  gerilim bandını kullanarak haberleşir. Böylece olası gürültülere karşı sistem daha dirençli hale gelmiş olur. Kontrol kartı ile PMSM hız kontrolü arasındaki haberleşme hız kontrolünün gerektirdiği bir protokol üzerinden

sağlanır. Şekil 5.6 yapılmış olan seri haberleşme devresine ilişkin şematik yapıyı göstermektedir.



Şekil 5.6. PMSM hız kontrolü ile kontrol kartı arasındaki seri haberleşme şematik çizimi

PMSM hız sürücüsünü kontrol edebilmek için PC ve sürücü arasında ki bağlantı aşağıda gösterilmiştir. Bir PC'ye bir den fazla sürücü bağlanabilmektedir.

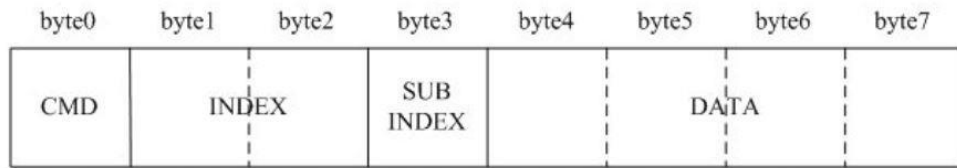
PC		FD Servo RS232(X3)
2 RxD	-----	TXD 2
3 TxD	-----	RXD 3
5 GND	-----	GND 5

Şekil 5.7. PMSM hız sürücüsü ile PC arasında ki bağlantı uçları

Sistem her iki yönlü de haberleşmesi gerektiğinden, Rx ve Tx uçları birbirleri ile çaprazlanır. GND yapısal olarak ortaktır.

Örneğin Şekil 5.8'de hostun sorduğu 8 baytlık bir soruya slave de 8 baytlık bir cevapla karşılık vermektedir.

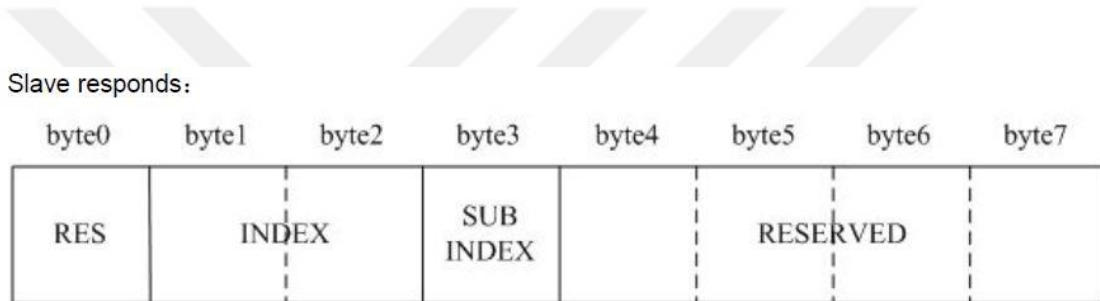
The host sends:



CMD Specifies the direction of data transfer and the volume of data.  
 23(0x16) Sends 4-byte data (bytes 4...7 contain 32 bits)  
 2b(0x16) Sends 2-byte data (bytes 4, 5 contain 16 bits)  
 2f(0x16) Sends 1-byte data (bytes 4 contains 8 bits)  
 INDEX Index in the object dictionary where data should be sent  
 SUB INDEX Subindex in object dictionary where data should be sent

Şekil 5.8. Host ile slave arasındaki bilgi akışında hostun soru sorma yapısını gösterir byte dizilimi

Yukarıdaki soruya slave olan cihazın burada sürücüdür cevabı ise Şekil 5.9'de gösterilmiştir.



RES: Displays slave response:  
 60(0x16) Data successfully sent  
 80(0x16) Error, bytes 4...7 contain error cause  
 INDEX 16-bit value, same as that sent by the master  
 SUBINDEX 8-bit value, same as that sent by the master  
 RES Reserved

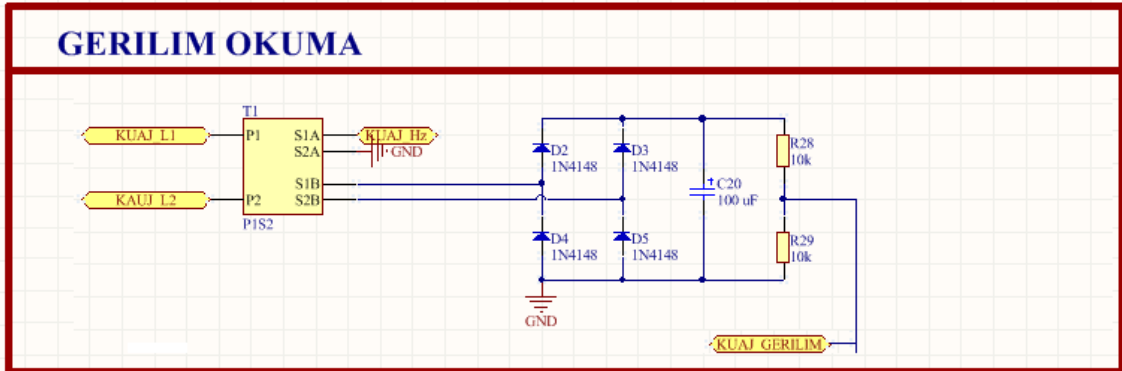
Şekil 5.9. Host ile slave arasındaki bilgi akışında slave'in yanıt byte dizilimi

Doğru senkronizasyon ve soru cevap silsilesi ile sistem birbirleri ile haberleşir ve gerekli değerler elde edilmiş olur.

### 5.2.3. Gerilim Okuma Yöntemi

Gerilim okuma yöntemi olarak transformatör tabanlı bir metot tercih edilmiştir. Transformatör okuma tarafı ile jeneratör arasında bir izolasyon sağlar. Fiziksel bir bağlantının olmayışı sistemi olası yüksek gerilim problemlerinden ve gürültüden korumuş olur. Transformatör olası en yüksek değere göre sarılmıştır. Deney düzeneğinde 440V-6Vac 6VA bir transformatör kullanılmıştır. Çıkış gerilimi doğrultup filtrelendikten sonra mikrodenetleyici girişine bağlanmıştır. Mikrodenetleyici girişine

filtrelenmiş DC gerilim  $V_{kuaj}/2$  olarak uygulanır. Şekil 5.10 tasarlanmış olan AC gerilim okumaya ilişkin şematik modeli göstermektedir.

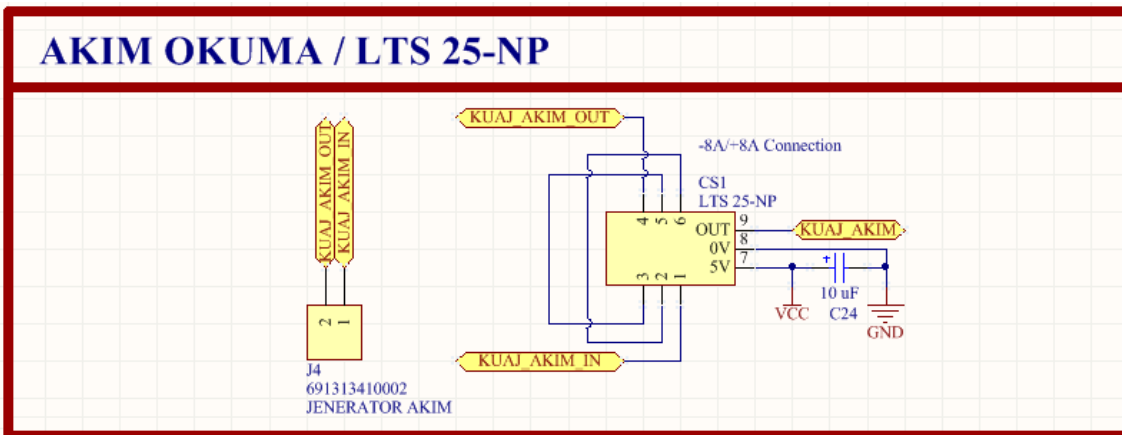


Şekil 5.10. KUAJ geriliminin mikrodenetleyiciye uygulamasına ait şematik çizim

Mikroişlemciye uygulanan gerilim 0-6 Volt AC gerilimin doğrultulup filtrelenmiş kadardır. Mikroişlemci gerçek değeri bulabilmek için bir k ( $k=30.43$ ) katsayısı ile çarpar. Böylece ekranda gösterilen değer gerçek değere kalibre edilmiş olur.

#### 5.2.4. Akım Okuma Yöntemi

Akım okuma yönteminde LTS25NP sensörü kullanılmıştır. Sensör DC ve AC akımda kullanılmaya uygun olup 25A RMS akım değerine kadar uygundur.



Şekil 5.11. KUAJ akımının mikrodenetleyiciye uygulamasına ait şematik çizim

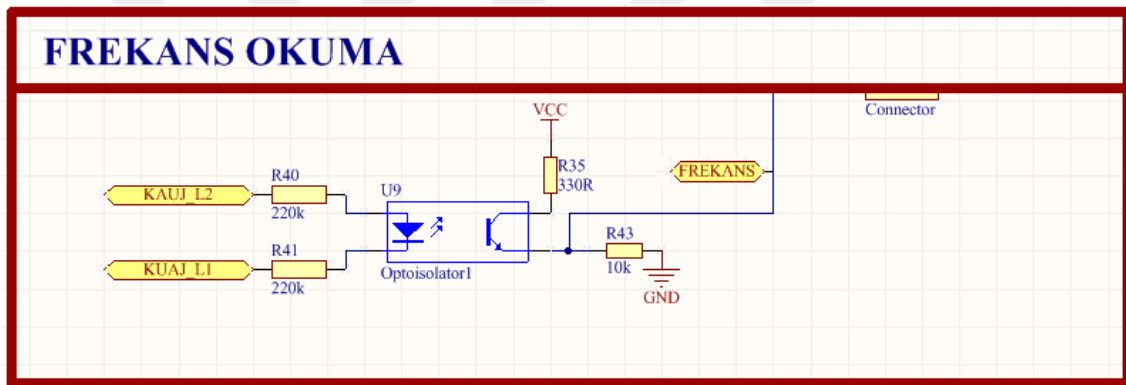
Ölçülen değer gerçek değeri sensörün transfer fonksiyonunda hesaplanabilir.

$$V_{out}=2.5 \pm(0.625 \times IP/ IP N) \text{ Volt} \quad (5.1)$$

Akım sensörü tek bir faza bağlanmış olup sistem yükünün dengeli ve eşit olduğu kabul edilmiştir. Böylece ölçülen akım değerinin diğer fazlarda da aynı değerde olduğu kabul edilmiş olup tüm denemeler ve kurgular eşit yüklerle denenmiştir.

### 5.2.5. Frekans Okuma Yöntemi

Frekans okuma için tek yönlü bir optokuplör aracılığı ile sinüs giriş geriliminin kare dalgaya dönüştürülmesi ile ölçülür. Kare dalga belirli bir zaman kesmesi ile okunan bir değerler orantılı olarak değer üretir. Bu üretilen değer bir referans değeri baz alınarak hangi frekansa denk geldiği bulunur.



Şekil 5.12. jeneratör frekansı okuma devresi

Optokuplör sürme direnci en yüksek olası gerilimde optokuplörün izin verdiği çalışma akımının altında kalacak şekilde seçilmiştir. Olası en yüksek gerilim 440Volt olarak öngörülmüştür (kapasitör gerilimlerinden dolayı).

### 5.3. Rüzgâr Gücünün Simüle Edilmesi

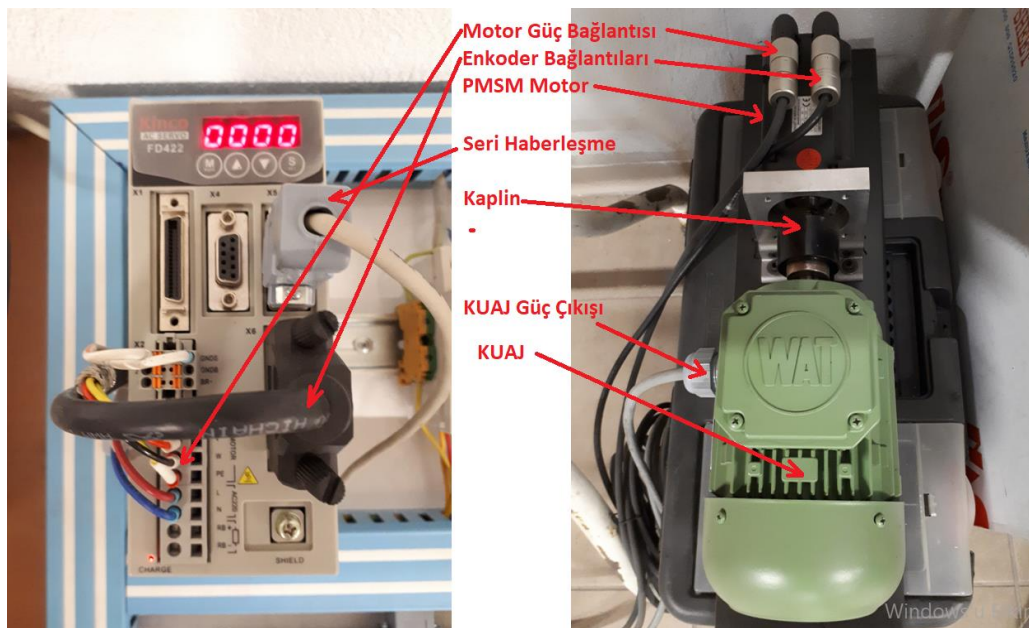
Asenkron jeneratörün birincil hareketini oluşturmak için PSMS senkron motor kullanılmıştır. PMSM karakteristiği gereği nominal yüküne kadar olan performansındaki devir değişiminin olmadığı kabul edilir. Bu tür motorlarda enkoder geri beslemesi ve mıknatıslı bir yapısı olduğundan ihtiyaç olunan torkun kaynağını güçlü mıknatıs yapısı oluşturmaktadır. Şekil 5.13’de PMSM motor ve KUAJ’ın akuple

edilmiş halini ve hız kontrol ünitesini göstermektedir. PMSM mıknatıslı bir yapısı olduğundan aynı güçteki KUAJ'dan daha küçük yapısı vardır.



Şekil 5.13. Jeneratör ve PMSM (soldaki) kuple edilmiş durumu

Dolayısıyla kalkış momenti ve gerekli moment miktarı diğer motor türlerine göre daha stabil ve her devirde üst değerlerdedir. Özellikle asenkron motorlarda görülen pull-up momenti düşmesi yoktur. Birincil hareketi oluşturan rüzgâr yükünü simüle etmek için PMSM motor ve bu motora uygun hız kontrolü kullanılmıştır. Motor hızı manuel veya mikrodenetleyici üstünden ayarlanabilmektedir. Şekil 5.14 KUAJ, PMSM motor ve hız kontrolünün mekanik bağlantılarını ve deney seti üzerindeki yerlerini göstermektedir.



Şekil 5.14. PMSM motor hız sürücüsü ve PMSM motor-KUAJ mekanik bağlantısı

PMSM motor sırtındaki enkoder kablosu ve motor güç kablosu olası gürültülerden etkilenmemek için ekranlı kablo kullanılarak bağlanmıştır. KUAJ ile PMSM motor mekanik bir kaplin üzerinden akuple edilerek olası mekanik sarsıntıların ve kasılmaların önüne geçilmiştir.

#### 5.4. Kullanılan Jeneratörün Özellikleri

Kullanılan sistemde 3 Fazlı sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır. Motor 3 Faz, 4 kutuplu, 50 Hz, 250W gücünde seçilmiştir. İlgili motorun etiket bilgileri Şekil 5.15’de verilmiştir.



Şekil 5.15. KUAJ için kullanılan asenkron jeneratörün etiket bilgileri

Jeneratör olarak kullanılan motor 3 faz, 4 kutup ve 1390 d/dk değerinde bir ASM’dir. Sargıları küçük güçlü bir motor grubuna dahil olduğundan yıldız modundadır. Dolayısıyla çalışma voltajı 380 Volttur. Nominal akımı 0,89A olup Cos(fi) ise 0,70 dir.

#### 5.5. Kondansatör Değerlerinin Bulunması

Kontrol devresinin kondansatör değerlerini anahtarlama noktaları için, öncelikle her bir kapasitede sistem manuel olarak çalıştırılmış ve alt üst noktaları belirlenmiştir. Belirlenen kapasite değerinde belirli bir akımın üzerine çıkıldığında, sistem otomatik olarak hangi kapasiteyi anahtarlayacağını belirlemekte ve sisteme kondansatör ilave etmekte veya çıkarmaktadır.

Kondansatörler üçgen bağlantı ile kullanılmış olup, bağlantı modeli gereği yükün dengeli yük olduğu varsayılmış ve tüm değerler dengeli varsayılarak karakterize

edilmiştir. KUAJ için gerekli olan kondansatör değeri devir düştükçe ve yük arttıkça artmakta, yük azaldıkça ve devir yükseldikçe ise azalmaktadır. Dolayısıyla buradaki bilinmezliğin ana kaynağını yük belirsizliği devamında ise birincil yükümüzü oluşturan rüzgâr gücü oluşturmaktadır. Dolayısı ile gerekli olan kalkınma kapasitesi rüzgâr gücü (devir), ve KUAJ çıkışındaki yük seviyesi belirleyecektir. Kapasite düşük ise elektrik üretebilmenin şartı devirin artması veya yükün sistemden atılması ile gerçekleşebilir. Burada gerekli olan kondansatör değerlerini belirlerken gerekli olan minimum ile maksimum limit şartlar öngörülmüştür. Gerekli olan minimum kapasite en yüksek birincil güç girişi ve minimum yük esnasında (KUAJ açık devre) olan olarak denenmiştir. Tersine en ağır durumda minimum birincil güç altına maksimum yük var iken gerekli olan kondansatör olarak öngörülmüştür. Ara değerler ise binary formatta bölünerek hesaplanmıştır.



Şekil 5.16. Kondansatör ve anahtarlama rölelerinin sistemdeki yeri

Kondansatörler ölçülen akım gerilim ve devire ilişkin bir fonksiyonlar arasında geçiş noktalarına eriştiğinde rölelerle anahtarlama yapılmıştır. Kondansatörler 2uF ile



4uF arasında değişen kondansatör değerlerinden oluşturulmuştur. Tablo 5.1. devirlere ilişkin kullanılan kondansatör değerleri ekteki tabloda verilmiştir.

**Tablo 5.1.** uygulanan devirlere ilişkin kullanılan kondansatör değerleri

Hız [rpm]	Gerilim [V]	Akım [A]	Kapasite [uF]	Yük [W]
1400	400	0,7	4	0
1400	385	0,62	3,69	0
1400	367	0,59	3,47	0
1400	285	0,35	3	0
1500	454	0,88	4	0
1500	443	0,8	3,69	0
1500	432	0,73	3,47	0
1500	393	0,58	3	0
1500	340	0,42	3,69	0
1500	242	0,28	3,47	0
1600	460	0,73	3	0
1600	431	0,6	3,69	0
1600	392	0,49	3,47	0
1600	305	0,34	2,22	0
1700	431	0,54	2,22	0
1700	345	0,37	2	0
1400	383	0,66	4	45
1400	352	0,58	3,69	45
1400	339	0,5	3,47	45
1400	219	0,26	3	45
1500	440	0,85	4	45
1500	426	0,77	3,69	45
1500	411	0,68	3,47	45
1500	368	0,52	3	45
1500	292	0,36	2,69	45
1600	442	0,69	3	45
1600	404	0,56	3,69	45
1600	350	0,43	3,47	45
1700	449	0,63	2,47	45
1700	397	0,49	2,22	45
1700	252	0,26	2	45

1400	364	0,62	4	84
1400	340	0,54	3,69	84
1400	304	0,45	3,47	84
1500	424	0,82	4	84
1500	410	0,74	3,69	84
1500	394	0,66	3,47	84
1500	328	0,46	3	84
1600	420	0,66	3	84
1600	370	0,52	3,69	84
1600	264	0,32	3,47	84
1700	417	0,58	2,47	84
1700	338	0,42	2,22	84

Tablo değerlerine dikkat edilirse KUAJ'dan yük atıldıkça sistemde kalan kondansatör gerilimin yükselmesine yol açmaktadır. Kondansatör gerilimi, yük akımı ve rüzgâr gücü arasındaki ilişkiyi belirlediğinden istenilen değer oluşması için kondansatörün bağlanması sonra değer sonucuna göre sistemden kondansatör değerinin çıkarılması gerekecektir. Buradaki handikap KUAJ'ın kalkınması için gerekli olan kapasite devamında sistem davranışı için problem teşkil edebilir. O yüzden kondansatör seçimi ve anahtarlaması sistem kararlılığı için çok önemlidir.

### 5.6. Yük Bankasının Oluşturulması

İki farklı yük asenkron jeneratörün statoruna paralel olarak bağlanmıştır. Bağlantı şekli olarak üçgen bağlantı kullanılmıştır. Asenkron jeneratörün çıkış gerilimi yük çeşidine göre farklılık göstermektedir. Özellikle reaktif güçlerde asenkron jeneratörün çıkış gerilimi ciddi oranda değişmektedir. Rezistif yüklerde jeneratörün çıkış gerilimi doğrusal bir düşüş göstermekle birlikte, endüktif yükte bu düşüş çok keskin olmaktadır. Bu çalışmada ise yük çeşidi olarak rezistif yük kullanılmıştır. Birinci kademe yükün gücü 45W iken; ikinci kademe yükün gücü 84W olarak belirlenmiştir.

### 5.7. Sistemin Kurgulanması

KUAJ sisteminde enerji üretimini temel noktası yük, gerilim ve akıma ilişkin elde edilen kapasite değerinin doğru olarak uygulanmasıdır. Eğer sistem kendi kendini uyardırma noktasını yakalayabilir ve hiçbir zaman bu limitin altına düşmez ise sürekli gerilim üretir. Bununla birlikte yükün değişmesinden hat regülasyonunun etkilenmemesi için sürekli olarak kondansatör değerinin kontrol altında tutulması gerekir ki sistemin en büyük handikaplarından biri budur. Yapılan testlerden elde edilen verilerden bir y doğrusu elde edilmeye çalışılmıştır. Sistemin davranışından en küçük kareler yöntemi ile sistemin fonksiyonu oluşturulmuştur. Elde edilen fonksiyon işletilince sistemin enerji üretmesi için gerekli olan kondansatör değeri elde edilmektedir.

$$y = 9.22508 - 0.005452x_1 + 0.005489x_2 + 0.003758x_3 \quad (5.1)$$

Burada,  $x_1$  devir (rpm),  $x_2$  üretilen gerilim ve  $x_3$  ise akımdır. Kapasitör değeri 1x, 2x, 4x şeklinde binary sayı formundan esinlenilerek sıralı olarak bağlanmıştır. Böylece sistemin daha hassas adımlarla tepki vermesi sağlanmıştır. Kapasitör değerleri üçgen formda 2, 0.47, 0.22, 3uF olarak kombine edilmişlerdir. Tablo 5.1 sistem için oluşturulan fonksiyon ve gerçekte olması gereken kondansatör değerlerinin örneklerini içermektedir. Elde edilen değerler ile fonksiyonun verilerine göre işletildiğinde oluşan hata değerleri de Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Minimum hata minimum yükte ve minimum hata ise 45Watt’lık yükte oluşmaktadır. En yüksek devir 1500d/dk’da en düşük hata ise 1400d/dk’da oluşmaktadır.

Sistemimizdeki başarı oranını yükseltmek ve daha kararlı bir yapı elde etmek için bir yapay zekâ modeli olan ANFIS eklenmiştir. ANFIS literatürde yaygın olarak kullanılan sayısal ifadeleri yorumlayabilen bir modeldir. FUZZY ile yapay sinir ağları modelinin pozitif taraflarını birleştiren ANFIS hem öğrenme hem de güçlü bir çıkarım sistemine sahiptir.

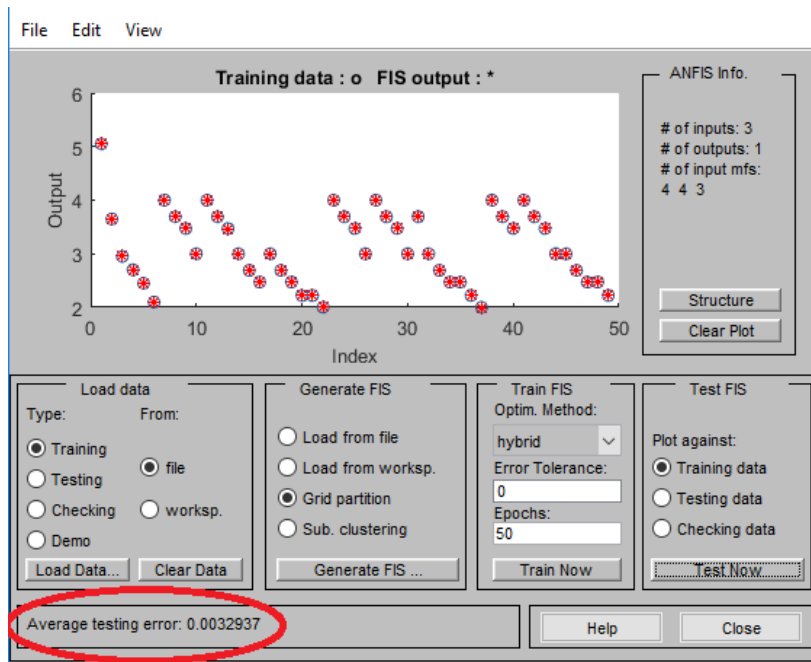
## 5.8. ANFIS'in sisteme eklenmesi

ANFIS girdileri için Tablo 5.1'deki reel değerler kullanılmıştır. Böylece ANFIS ile ara değerlerin oluşturulması amaçlanmış ve kondansatör anahtarlama yeteneği ve hassasiyeti artırılmıştır. Böylece sistemin ne zaman daha alt veya üst değeri seçeceği olgusu ANFIS ile değerlendirildiğinden elde edilen sonuçlar en küçük kareler yöntemi ile elde edilen değerlerden daha düzgün olarak elde edilmiştir. Tablo 5.2 ANFIS için ayarlanan modelin ayrıntılarını vermektedir. ANFIS yapısında lineer bir yaklaşım ve üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.

**Tablo 5.2.** Sistem için kullanılan ANFIS'in özellikleri

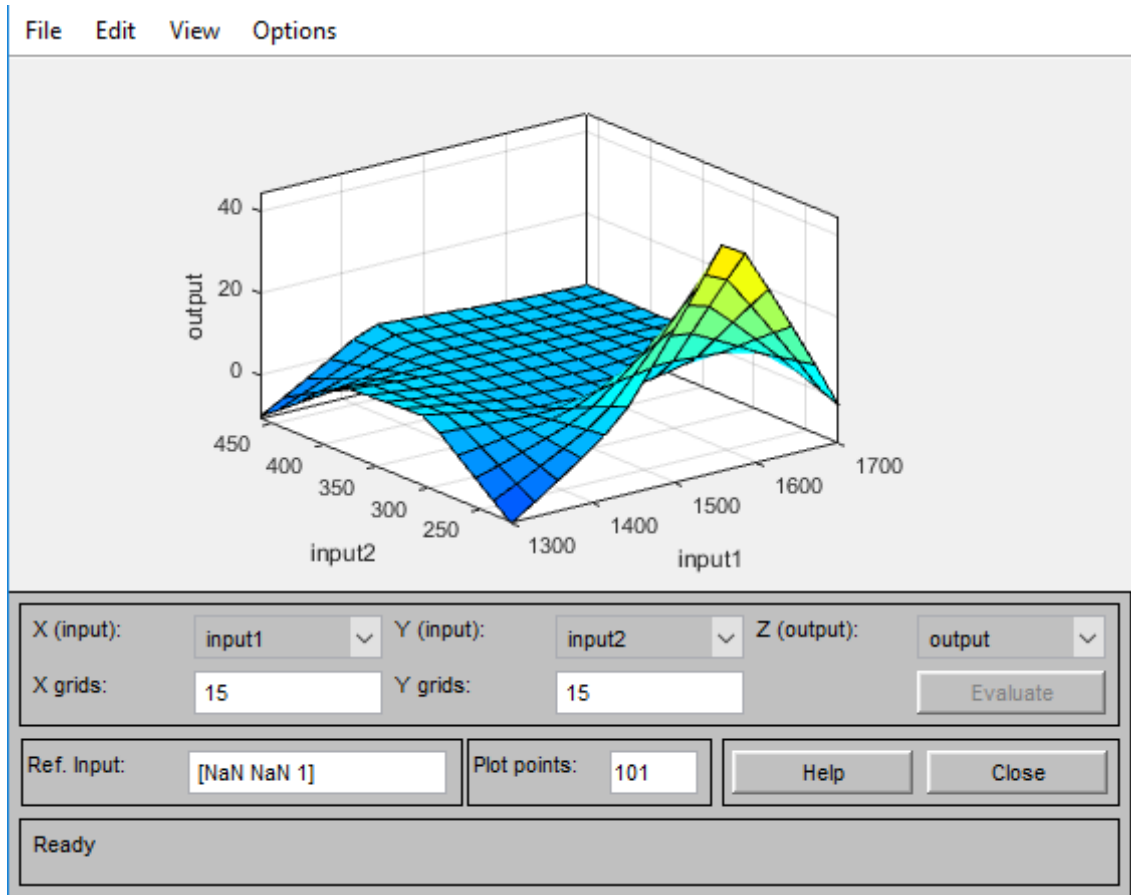
ANFIS'e AİT		
GİRİŞLER		ÇIKIŞLAR
Üyelik fonksiyonu	Üyelik yapısı	Çıkış Tipi
4,4,3	Üçgen	Lineer

Kullanılan giriş parametrelerine göre ANFIS'den elde edilen eğitme kalitesi oldukça iyi olup eğitme hatası binde 3,3 ün altında bulunmuştur.



**Şekil 5.17.** ANFIS programının eğitmeden sonraki elde edilen hata değerini gösterir arayüzü

Şekil 5.17'den görüleceği üzere eğitme datası ve elde edilen ANFIS'in başarısı oldukça yüksektir. Şekil 5.18'de ANFIS'ten elde edilen olay örtüsünü göstermektedir.



Şekil 5.18. İki değişkenle ilişkili olarak ANFIS arayüzünden elde edilen olay örtüsü

Olay örtüsünün herhangi bir lineer fonksiyonla ifade edilmesi mümkün değilken ANFIS sayesinde sistem parçalara ayrılmakta ve girişler ile çıkışlar arasında bir örtü oluşturulmaktadır. Böylece girdilere uygun optimum çıkartım bu örtü ile elde edilmektedir. Hedef problem olan kondansatörün anahtarlanması beklentisi giriş değişkenleri ile çıkış arasında lineer bir ilişki yoktur. ANFIS öğrenme modeliyle bu örüntü tanımlanabilmekte ve girişler ile çıkışlar arasında bir matematiksel bir denklem yazılmadan çıkışı kontrol edebilme modeli çıkarılabilmektedir. Eğitme dataları ile oluşturulan eğitme seti diğer olası çıkış değerleri için bir iskelet oluşturmakta ve ANFIS yapısındaki çıkarım modeli ile bize bir cevap önermektedir. Şekil 5.19'da oluşturulan ANFIS'in kural pencerelerini göstermektedir. Giriş 1 ile verilen d/d değeri 1500, Giriş 2'deki değer 340V ve Giriş 3'te verilen yük-1 değeri sonunda ANFIS 2,16uF'lık

kondansatörü anahtarlamamız gerektiğini önermektedir. Aşağıya doğru ilgili değerlerin üyelik fonksiyonlarını nasıl kestiği görülmektedir.



Şekil 5.19. Oluşturulan ANFIS'in kural penceresi

Kurgulanan ANFIS yapısı ile sistem daha kararlı hale getirilmiş ve sistem tepkisi iyileştirilmiştir.

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR

Yapılan KUAJ sistemi için her iki yöntem sistemin performansı için kurgulanmış ve reel verilerle kıyaslanmıştır. İlk metodumuzda KUAJ çözümüne en küçük kareler metodu ile oluşturulan bir fonksiyon ile çözüm aranmış ve girişler ve çıkışlar arasında kurgulanan bir fonksiyon yardımı ile kondansatörler anahtarlanmıştır. Elde edilen fonksiyon akım, rüzgâr devri ve terminal gerilimi arasındaki ilişki ile kondansatörü bulmaya çalışmaktadır. Elde edilen fonksiyonun ifadesi Eşitlik 6.1’de gösterilmiştir.

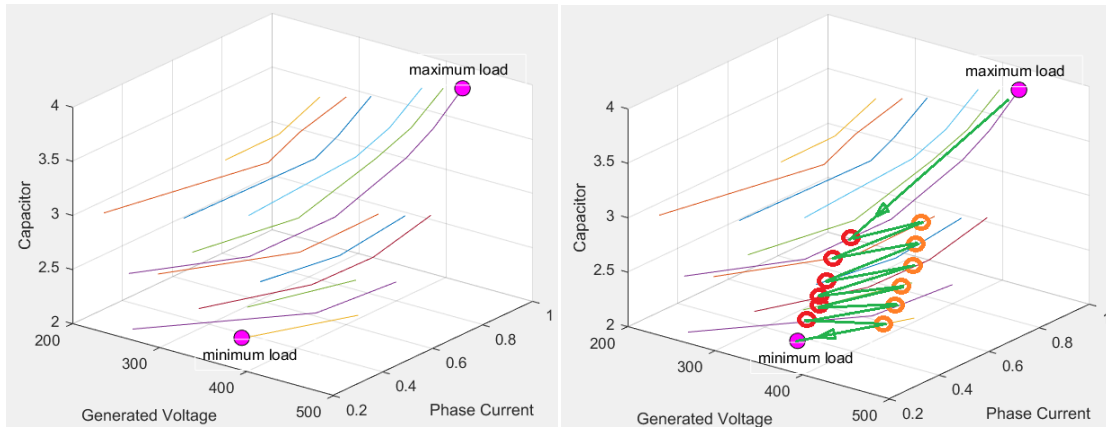
$$y = 9.22508 - 0.005452x_1 + 0.005489x_2 + 0.003758x_3 \quad (6.1)$$

Fonksiyon sonucunda oluşan regülasyon kalitesi için hedef gerilim olan 380V hat gerilimini ne kadar yakalayabildiğinin bir ölçüsü olarak değerlendirilmiştir. Tablo 6.1’de sapma gerilimlerini ve regülasyon değerlerini lineer yaklaşım için göstermektedir.

**Tablo 6.1.** EEK yöntemiyle elde edilen kondansatör değerlerinin minimum ve maksimum hata değerleri

	<b>Hız</b> [rpm]	<b>Gerilim</b> [V]	<b>Yük</b> [W]	<b>Kap.</b> [uF]	<b>Hesaplanan</b> <b>Kap. [uF]</b>	<b>Hata</b> [%]
<b>Min. Hata</b>	1500	411	45	3,47	3,4725	0,074
<b>Max. Hata</b>	1500	454	0	4	3,5395	13,009

Şekil 6.1.(a)’da bu lineer sisteme ilişkin maksimum ve minimum noktaları gösterirken Şekil 6.1.(b)’de ise maksimum yük ile minimum yük arasında gezinen voltaj değişimleri için anahtarlanan kondansatör değerleri gösterilmiştir. Her yük atımında sistem cevabı bir yengeç ürüyüşü ile minimum yüke doğru yaklaşmaktadır.



**Şekil 6.1.** Oluşturulan KUAJ yapısının davranışı (a) Maksimum ve minimum yük noktaları (b) Sistemin kondansatör yük davranışı

Aynı sistemin ANFIS yapısı ile gerçekleştirilmesi ile kondansatörlerin daha optimum zamanlarda anahtarlanabileceği öngörülmüş ve KUAJ uygulamasına yapay zekâ eklenerek lineer yaklaşımla kıyaslanmıştır. Gerçekten de ANFIS, lineer yaklaşımdan daha optimum sonuçlar üretmiş ve hat regülasyonu daha kararlı olmuştur. Tablo 6.2’de ANFIS’den elde edilen en kötü ve gerilim regülasyonu %3 olarak vermektedir.

**Tablo 6.2.** ANFIS yöntemiyle elde edilen kondansatör değerlerinin minimum ve maksimum hata değerleri

	<b>Hız</b> [rpm]	<b>Gerilim</b> [V]	<b>Yük</b> [W]	<b>Kap.</b> [uF]	<b>Hesaplanan Kap.</b> [uF]	<b>Hata</b> [%]
<b>Min. Hata</b>	1600	370	84	2,69	2,6989	0,33
<b>Max. Hata</b>	1400	385	0	3,69	3,6782	0,32

ANFIS, lineer yaklaşımdan daha kararlı çalışmakta ve girişler ile çıkışlar arasında daha optimum ilişki kurabilmektedir. ANFIS buna karşılık reel bir fonksiyon önermemekte yalnızca eğitme datalarından elde ettiği tecrübe ile bu sistemi yönetmektedir. Çıkarımlar göstermektedir ki ANFIS böyle bir uygulama için kayda değer nitelikte çıktılar verebilecek kabiliyettedir.



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 9.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün gerilim regülasyonu kondansatör anahtarlama yöntemiyle sağlanmıştır. Yıldız bağlı ASM motora üçgen bağlı kondansatör grubu ile kurgulanan KUAJ yapısı, rüzgâr yükünü simüle eden bir PMSM motor ile tahrik edilmiştir. KUAJ gücü 250W ve PMSM gücü ise 250Watt'dan daha yüksek olarak seçilmiştir. KUAJ, 0 ile 84W arasında değişken yüklerle yüklenerek kalkınmayı sağlayacak kondansatör değerleri ile denenmiş ve bu değerlerden bir lineer yaklaşım oluşturulmuştur. Lineer yaklaşımdan kondansatör adımlarını değişken yük ve devir sayılarında anahtarlanmış ve bu model ile %92'ye kadar bir başarı yakalanmıştır.

Lineer modelin oluşturduğu başarının R2 değeri 0,915 olarak hesaplanmıştır. R2 değeri iki olası olayın istatistiksel olarak ne kadar örtüştüğünün bir değeridir. Deneysel testlerden sonraki gerçek uygulamada hat regülasyonu %11,7 olarak ölçülmüştür.

Sistem davranışını iyileştirmek için yapay zekâ davranışı kontrol moduna eklenmiş ve ANFIS yardımı ile KUAJ'ın çalışması incelenmiştir. ANFIS literatürde özellikle lineer olmayan denklem sistemlerinin çözümünde kullanılan modellerden biridir. KUAJ testlerinde kullanılan reel veriler ANFIS için eğitime datası olarak kullanılmış ve geriye kalan davranış ANFIS ile kurgulanmıştır. ANFIS yapısından elde edilen regülasyon kalitesi %3 olarak ölçülmüştür.

ANFIS aynı yapıyı daha rahat kontrol edebilmekte ve hat regülasyonu daha kabul edilebilir bir değerde tutabilmektedir. ANFIS, KUAJ'ın yönetiminde kullanılabilecek bir yapay zekâ modeli olup gerçek veriler ile bu uygulamada kullanılmıştır.

## 9.2. Öneriler

Tasarlanan KUAJ modelinde, ANFIS ve lineer model kıyaslanmıştır. ANFIS'in lineer modelden daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Sistemin daha yüksek güçlerde de ANFIS ile denenmesi ANFIS-KUAJ sistemini güvenilirliğini artırtacak ve ANFIS'in KUAJ uygulamalarında ticari bir değer elde etmesine yol açabilecektir. Bununla birlikte daha çok sayıda kondansatör kombinasyonu, hat regülasyonu değerlerinin daha iyi olmasına yol açabilecek ve böylece arttırılmış kondansatör sayısı ve ANFIS ile KUAJ uygulamaları çok daha güvenilir hale gelebilecektir.



## KAYNAKLAR

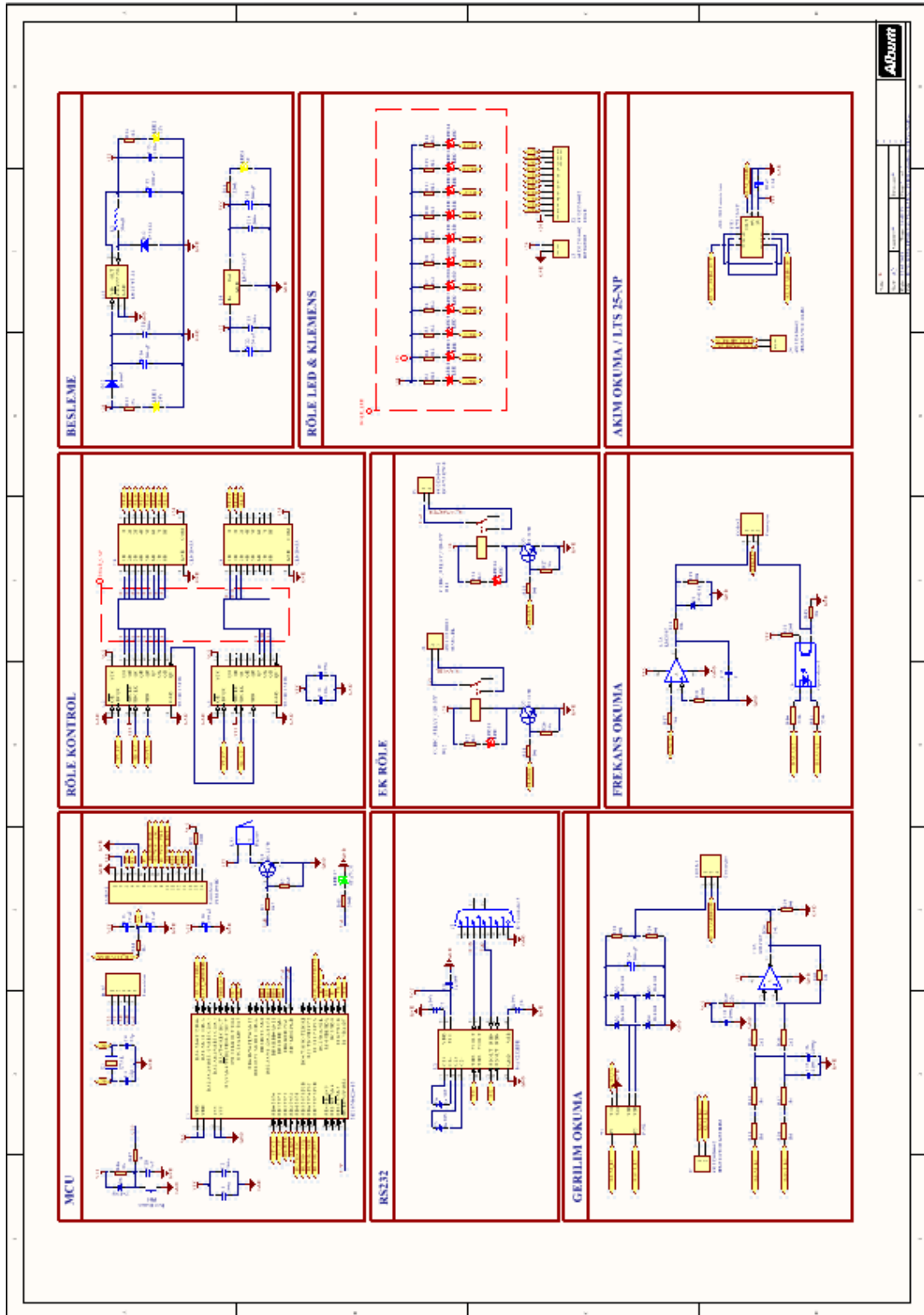
- Akyazi, O., Usta, M. A. ve Akpınar, A. S., 2012, A self-tuning fuzzy logic controller for aircraft roll control system, *International Journal of Control Science and Engineering*, 2 (6), 181-188.
- Arslan, F., 2010, Kapasitör uyarmalı asenkron generatörün optimal kapasitesinin hibrit genetik algoritma ile belirlenmesi, *Düzce Üniversitesi, Düzce*.
- Arya, M. K. ve Chauhan, Y. K. G., 2009, Steady State Analysis of Self-Excited Induction Generator for Balanced and Unbalanced Conditions.
- Bansal, R., 2005, Three-phase self-excited induction generators: an overview, *Ieee Transactions on Energy Conversion*, 20 (2), 292-299.
- Bassett, E. ve Potter, F., 1935, Capacitive excitation for induction generators, *Electrical Engineering*, 54 (5), 540-545.
- Biglari, A. ve Miraftabi, S. A., 2012, Steady-state analysis and voltage control of self-excited induction generator (SEIG), *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on*, 776-781.
- Boldea, I. ve Nasar, S. A., 2010, The induction machine handbook, CRC press, p.
- Chan, T., 1993, Capacitance requirements of self-excited induction generators, *Ieee Transactions on Energy Conversion*, 8 (2), 304-311.
- Copçuoğlu, O., 2003, Asenkron generatörlerin incelenmesi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Samsun*.
- El-Hawary, M. E., 1998, Electric power applications of fuzzy systems, Wiley-IEEE Press, p.
- Farret, F. A. ve Simões, M. G., 2014, Modeling and analysis with induction generators, CRC Press, p.
- Fidan, E., 1996, Sığaç uyartımlı asenkron generatör, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*.
- Golayoglu, A., 2013, DERS 7 - En Küçük Kareler Yöntemi [online], <http://www.kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2013/04/en-kucuk-kareler-yontemi-afet-golayoglu.pdf>: [11 Aralık 2018].
- Gopikaramanan, R., Sridevi, R. ve Kumar, C., 2014, Steady state analysis of SEIG using fuzzy logic approach, *Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), 2014 International Conference on*, 136-141.
- Ibrahim, A. M., 1997, Introduction to applied fuzzy electronics, Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, p.
- Katre, S. S. ve Bapat, D. V., 2014, Review of Literature on Induction generators And Controllers for pico Hydro Applications, *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 1 (1), 1-9.
- Ma, D., 2012, Self-excited induction generator: a study based on nonlinear dynamic methods.
- Mahley, S. ve Chauhan, Y. K. G., 2008, Steady state analysis of three-phase self-excited induction generator.
- Mamdani, E. H. ve Assilian, S., 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International journal of man-machine studies*, 7 (1), 1-13.
- Selçuk, E. ve Arabacı, H., 2017, Automatic Capacitor Switching For Self Excited Induction Generator Using Non-Linear Regression For Wind Power Application. International Conference on Engineering Technologies, ICENTE'17. Konya.

- Takagi, T. ve Sugeno, M., 1985, Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* (1), 116-132.
- Ünal, S., 2002, Kendinden uyarımlı asenkron generatörün geçici ve sürekli durum davranışının modellenmesi, *Fırat Üniversitesi, Elazığ*.
- Zadeh, L. A., 1965, Fuzzy sets, *Information and control*, 8 (3), 338-353.

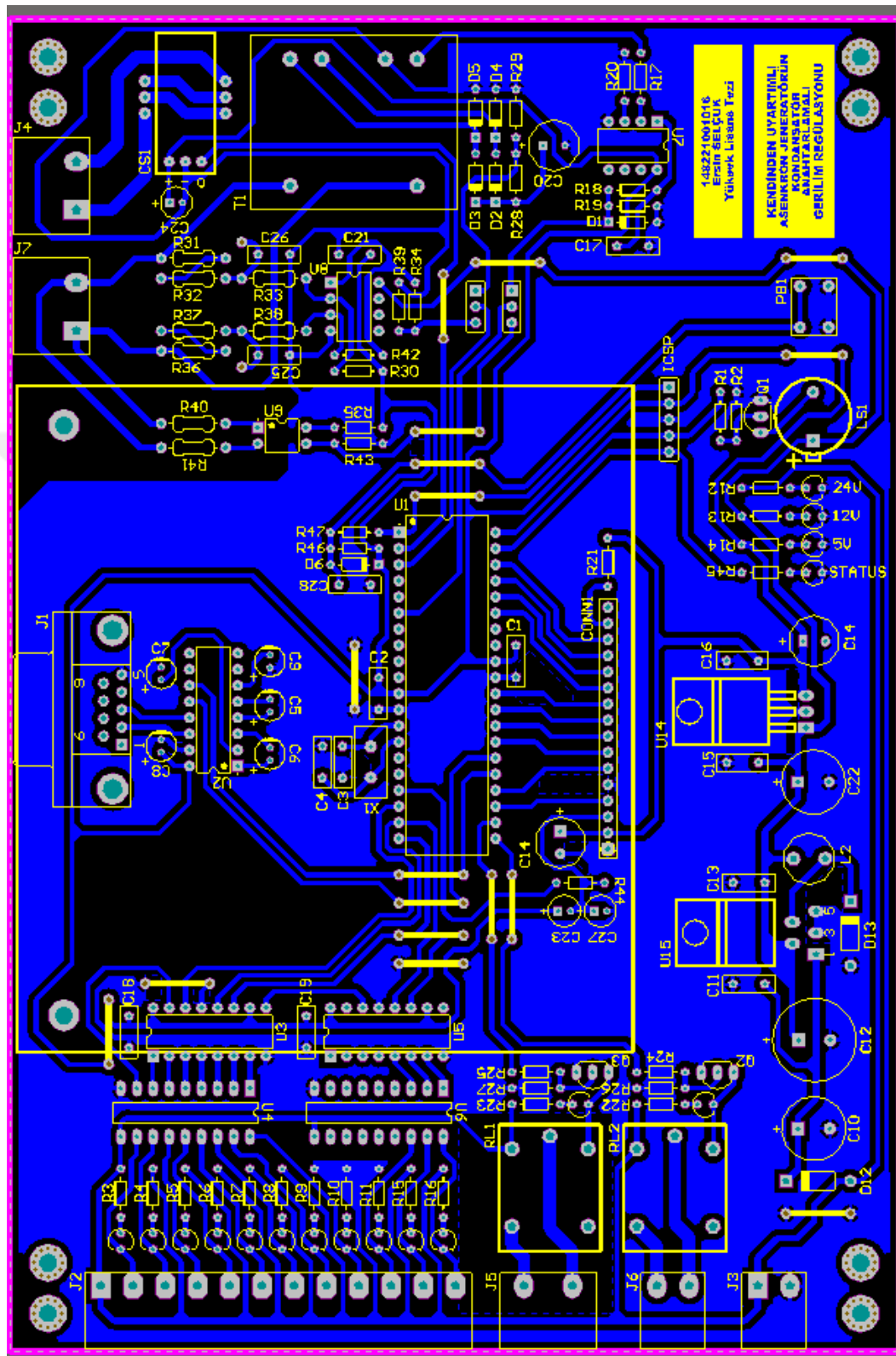


## EKLER

EK-1 Deney setinde kullanılan kontrol kartının şeması.



EK-2 Deney setinde kullanılan kontrol kartının PCB'si.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**AdıSoyadı** : Ersin SELÇUK  
**Uyruğu** : T.C  
**DoğumYeriveTarihi** : KULU - 02.05.1991  
**Telefon** :  
**Faks** :  
**e-mail** : mail@ersinselcuk.net

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	BitirmeYılı
Lise	: Kulu Lisesi, Kulu, KONYA	2009
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2014
YüksekLisans	: Konya Teknik Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2019
Doktora	:	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-Halen	EEM İTH. İHR. PAZ. A.Ş.	Elk. – Elt. Müh.

### UZMANLIK ALANI

PCB Tasarımı  
 Mikrodenetleyici Programlama  
 Asansör

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### YAYINLAR

Arabacı H. And Selçuk E., 2017, Automatic Capacitor Switching For Self Excited Induction Generator Using Non-Linear Regression For Wind Power Application, International Conference on Engineering Technologies, ICENTE'17, Konya