



T. C.

ORDU ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRBİN OLARAK KULLANILAN SANTRİFÜJ
POMPALARDA ASENKRON JENERATÖRÜN YÜK
KONTROL TASARIMI**

OSMAN FIRAT ALKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI

ORDU 2019

T.C.
ORDU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI

**TÜRBİN OLARAK KULLANILAN SANTRİFÜJ
POMPALARDA ASENKRON JENERATÖRÜN YÜK
KONTROL TASARIMI**

OSMAN FIRAT ALKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ORDU 2019

TEZ ONAY

Osman Fırat ALKAN tarafından hazırlanan "TÜRBİN OLARAK KULLANILAN SANTRİFÜJ POMPALARDA ASENKRON JENERATÖRÜN YÜK KONTROL TASARIMI" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 18.07.2019 tarihinde yapılmış ve jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman
Dr.Öğr. Üyesi Sibel AKKAYA OY

Jüri Üyeleri

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Sibel Akkaya OY
Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği
Ordu Üniversitesi

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Ali Ekber Özdemir
Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği
Ordu Üniversitesi

Üye
Prof. Dr. Ercan Nurcan Yılmaz
Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik
Mühendisliği
Gazi Üniversitesi

İmza



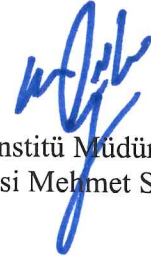




03 / 09 / 2019 tarihinde enstitüye teslim edilen bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 06 / 09 / 2019 tarih ve 2019 / 571 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Enstitü Müdürü
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Sami GÜLER



TEZ BİLDİRİMİ

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan ve kullanılan intihal tespit programının sonuçlarına göre; bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.



Osman Fırat ALKAN

Bu çalışma Ordu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün BY-1735 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

TÜRBİN OLARAK KULLANILAN SANTRİFÜJ POMPALARDA ASENKRON JENERATÖRÜN YÜK KONTROL TASARIMI

OSMAN FIRAT ALKAN

ORDU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ, 84 SAYFA

(TEZ DANIŞMANI: Dr. Öğr. Üyesi Sibel AKKAYA OY)

Bu araştırmada, türbin olarak kullanılan santrifüj pompanın jeneratör olarak kullanılan asenkron makinesinin, şebekeden izole olarak çalışırken değişken yük koşullarındaki performansının yükseltilmesi için elektronik kontrol kartı tasarlanmıştır. Kendinden ikazlı çalışan üç fazlı asenkron makine ile tek fazlı yüklerin beslenmesi incelenmiş balast yük sürücü kartı hazırlanmış ve test edilmiştir. Yük kontrol kartının asenkron jeneratör uç gerilimini kontrol etmesi için PID kontrol sistemi kullanmıştır.

PID kontrolü algoritmasında balast yükün oransal kontrolünü sağlayan PWM modülasyonun başarılı şekilde çalıştığı ve jeneratör çıkış gerilimini istenilen gerilim seviyesinde ve frekansında tutabildiği tespit edilmiştir. Kontrol ve sürücü kartının oluşturduğu harmonik bozulmanın limitler dahilinde olduğu ve jeneratör sargılarında fazladan bir ısınmaya yol açmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Santrifüj Pompaların Türbin Olarak Kullanılması, Üç Faz Jeneratörün Tek Fazlı Yüklerde Kullanımı, Yük Kontrol Kartı Tasarımı

ABSTRACT

LOAD CONTROL DESIGN FOR ASYNCHRONOUS GENERATORS IN CENTRIFUGAL PUMPS USED AS TURBINES

OSMAN FIRAT ALKAN

**ORDU UNIVERSITY INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED
SCIENCES**

RENEWABLE ENERGY

MASTER THESIS, 84 PAGES

(SUPERVISOR: Assist. Prof. Dr. Sibel AKKAYA OY)

In this research, the electronic load control unit has designed on offline asynchronous generator at centrifugal pumps as turbines to improve electrical performance during variable load conditions. Feeding of single phase loads by self-excited three-phase asynchronous machines was examined and ballast load driver card was prepared and tested. The PID control system is used to control load driver board for adjusting generator terminal voltages.

In the PID control algorithm, it has been determined that it works very successfully with PWM modulation which provides proportional control of ballast load and can keep generator output voltage at desired voltage level and frequency. It has been found that the harmonic distortion caused by control and driver card is within the limits and does not cause any additional heating in the generator windings.

Key Words: Use of Centrifugal Pumps as Turbine, Use of Three Phase Generators in Single Phase Loads, Load Control Card Design.

TEŐEKKÖR

Bu alıőmanın konusunun belirlenmesinden sonuçlanmasına kadar yardımını ve anlayıőını esirgemeyen danışman hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi Sibel AKKAYA OY'a teşekkür ederim.

Aynı zamanda beni sürekli destekleyen ailem, eőim Elif ve oğlum Yusuf Yiğit'e teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ	I
ÖZET	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİL LİSTESİ	VII
ÇİZELGE LİSTESİ	IX
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	X
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Özeti.....	3
1.3 Hipotez.....	6
2. GENEL BİLGİLER	8
2.1 Asenkron Makineler.....	8
2.2 Asenkron Makinenin Matematik Modeli.....	8
2.2.1 Asenkron Makina Rotor Kısmı Manyetizma Akımı.....	12
2.2.2 Asenkron Makina Stator Gerilimi Matematik Modeli.....	13
2.2.3 Asenkron Makina Rotor Gerilimi Matematik Modeli.....	16
2.2.4 Asenkron Makina Dinamik Denklem Modeli.....	17
2.3 Asenkron Makinelerin Çalışma İlkesi.....	18
2.3.1 Asenkron Makina Jeneratör Çalışma Eşdeğer Devresi.....	20
2.3.2 Şebeken Bağımsız Çalışan Asenkron Jeneratör.....	22
2.4 Santrifüj Pompaların Türbin Olarak Kullanımı.....	25
2.4.1 Türbin Olarak Çalışan Pompanın Denklemleri.....	29
2.5 Asenkron Jeneratör Kontrol Yöntemleri.....	31
2.5.1 Faz Açısı Sistemi İle Çalışan Kontrol Kartları.....	34
2.5.2 Kademeli Yükler Sistemi İle Çalışan Kontrol Kartları.....	35
2.5.3 Değişken Kare Dalga (Mark Space Ratio) Yöntemi ile Çalışan Kontrol Kartları.....	36
3. PID KONTROL SİSTEMLERİ	38
3.1 Oransal (P) Kontrol Yöntemi.....	38
3.2 Oransal İntegral (PI) Kontrol Yöntemi.....	41
3.3 Oransal Türev (PD) Kontrol Yöntemi.....	43
3.4 Oransal İntegral Türev (PID) Kontrol Yöntemi.....	45
4. MATERYAL ve YÖNTEM	48
4.1 Materyal.....	48
4.2 Yöntem.....	58
4.2.1 MATLAB Modelinin Oluşturulması.....	58
4.2.2 Deney Düzenliğinin Oluşturulması.....	63
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	67
5.1 MATLAB SIMULINK Modeli Sonuçları.....	67
5.2 Deney Seti Fiziki Ölçüm Sonuçları.....	69
5.2.1 Asenkron Jeneratör Boşta ve Yükteki Karakteristiği.....	69
5.2.2 Kontrol Sistemine Bağlı Değil İken Asenkron Jeneratör Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri.....	72

5.2.3	PID Algoritmali Kontrol Sistemi İle Asenkron Jeneratör Performansının İyileştirilmesi.....	74
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	80
6.1	Sonuçlar.....	80
6.2	Öneriler.....	81
7.	KAYNAKLAR.....	82
	ÖZGEÇMİŞ	84



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Türkiye Yıllara Göre Enerji Talebi (Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, 2018)	1
Şekil 2.1 Asenkron Makinenin Stator Dönüşüm Vektörleri	9
Şekil 2.2 Asenkron Makinenin Rotor Dönüşüm Denklemleri	10
Şekil 2.3 Rotor Manyetizma Akımının Vektörel Gösterimi	12
Şekil 2.4 Asenkron Makinede Oluşan Lorentz Kuvvetleri	18
Şekil 2.5 Asenkron Makinenin Çalışma Bölgeleri ve Kayma İlişkisi	20
Şekil 2.6 Asenkron Jeneratör Eşdeğer Devresi	21
Şekil 2.7 Asenkron Jeneratör Fazör Diyagramı	22
Şekil 2.8 Üç Fazlı Asenkron Jeneratör Uyarım Kondansatörü Bağlantısı	23
Şekil 2.9 Üç Fazlı Jeneratörde C-2C Bağlantısı	24
Şekil 2.10 C-2C Fazör Diyagramı	25
Şekil 2.11 Hidrolik Türbinler ve Santrifüj Pompaların (PAT) Türbin Olarak Kullanım Aralığı Kıyaslanması	26
Şekil 2.12 Türbin Olarak Kullanılan Pompanın (PAT) Düşü-Debi Grafiği	28
Şekil 2.13 Türbin ve Saha Eğrisi Kesişimi ile Çalışma Noktası Tespiti	28
Şekil 2.14 Değişik Yük Durumlarında Türbin Çalışma Noktası Değişimi	29
Şekil 2.15 Türbin Olarak Çalışan Pompanın Verim Eğrisi	31
Şekil 2.16 Temel Yük Kontrol Kartı Şematik Diyagram	33
Şekil 2.17 Yük ve Balast Arasında Yük Dağılımı ile Gücün Sabit Tutulması	33
Şekil 2.18 Faz Açık Kontrol Sistemi	35
Şekil 2.19 Kademeli Yük Kontrol Sistemi	36
Şekil 2.20 Değişken Kare Dalga Yöntemi	36
Şekil 2.20 Mark Space Ratio Sürücüsü	37
Şekil 2.21 Değişken Oranlarda Kare Dalga Sinyali	37
Şekil 3.1 Kapalı Devre Kontrol Sistemi Blok Şeması	38
Şekil 3.2 Oransal Kontrol Sistemi Örneği	39
Şekil 3.3 $K_p=1$ İken Su Seviyesi ve Valf Durumu Arasındaki İlişki Grafiği	40
Şekil 3.4 $K_p=2$ İken Su Seviyesi ve Valf Durumu Arasındaki İlişki	40
Şekil 3.5 Oransal Bandın Gösterimi	41
Şekil 3.6 PI Kontrol Sistemi Şeması	41
Şekil 3.7 Hata Sinyali ve İntegral Etkisi	42
Şekil 3.8 PI Kontrol Sistemi Çıkış Grafiği	43
Şekil 3.9 PD Oransal Türev Kontrol Sistemi Blok Şeması	44
Şekil 3.10 Hata Sinyali ve Türev Etkisi	45
Şekil 3.11 PID Oransal İntegral Türev Kontrol Sistem Şeması	46
Şekil 4.1 Deney Seti Şematik Gösterimi	48
Şekil 4.2 1 Nolu Pompa H-Q Eğrisi	49
Şekil 4.3 Jeneratör Yükü Olarak Kullanılan 230V 330W Akkor Flemanlı Ampul ...	50
Şekil 4.4 Balast Yük Sürücü Kartı	51
Şekil 4.5 Balast Yük Sürücü Kartı	52
Şekil 4.6 Arduino UNO Mikro Denetleyici	53
Şekil 4.7 Gerilim Ölçme Örnekleme Devresi Elektronik Şeması	54
Şekil 4.8 Gerilim Ölçme Örnekleme Devresi Fiziksel Görünüşü	54

Şekil 4.9 ACS712 Akım Sensörü Fonksiyon Blok Şeması	56
Şekil 4.10 ACS712 Akım Sensörü Fiziksel Görüntüsü	56
Şekil 4.11 Deneyde Kullanılan Ölçüm Aletleri	57
Şekil 4.12 Deney Setinin MATLAB SİMULİNK Modeli	58
Şekil 4.13 Hidrolik Türbin Alt Sistem Bloğu	59
Şekil 4.14 Türbin, Asenkron Jeneratör ve Uyarım (İkaz) Modellenmesi.....	60
Şekil 4.15 Asenkron Jeneratöre Bağlanan Müşteri Yüğü, Anahtarı ve Zamanlayıcısı	61
Şekil 4.16 PID Kontrol Algoritması Modeli.....	62
Şekil 4.17 Balast Yük Sürücü Kartı Modeli	63
Şekil 4.18 Balast Yük Sürücü Kartının Farklı Yüklerdeki Termal Resimleri	64
Şekil 4.19 Deney Setinin Pompa ve Türbin-Jeneratör Kısımına Ait Görüntü.....	64
Şekil 4.20 Düzenek ile Deney Yapılırken.....	65
Şekil 4.21 Deney Düzenegi Çalışır Halde İken Alınan Termal Resmi.....	66
Şekil 5.1 Asenkron Jeneratör Öz İkaz Grafiğı	67
Şekil 5.2 Asenkron Jeneratör Boşta Geriliminin Bir Periyodu.....	67
Şekil 5.3 Asenkron Jeneratöre 600W Yük Bağlandığında Uç Gerilimi Grafiğı	68
Şekil 5.4 Kontrol Sistemi Devrede İken Sistem Voltajının Dengelenmesi	68
Şekil 5.5 Gerilimde Oluşan Bozulma	69
Şekil 5.6 C=40Mf İken Boşta Çalışma Grafiğı.....	69
Şekil 5.7 C=30Mf İken Asenkron Jeneratör Boşta Çalışma Grafiğı	70
Şekil 5.8 Kısıtlı Tahrik Altında Asenkron Jeneratörün Yükte Çalışma Grafiğı	71
Şekil 5.9 Kontrol Sistemi Olmadan Değışken Yük Altındaki Asenkron Jeneratöre Ait Yük Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri	72
Şekil 5.10 600W Yükün Devre Dışı Kalması Anında Geçici Durum Grafiğı.....	73
Şekil 5.11 Kontrol Sistemi Devrede İken İlk Devreye Alma Esnasında Gerilim Grafiğı	74
Şekil 5.12 Aşırı Devirden Referans Gerilime Geçici Durum Grafiğı.....	75
Şekil 5.13 Kontrol Kartı Tepki Süresi	76
Şekil 5.14 Yük Atma Geçici Durum Dalga Şekli	76
Şekil 5.15 Yük Alma Geçici Durum Dalga Şekli	77
Şekil 5.16 Balast Yük ve Sürücü Kartı Akım Dalga Şekilleri.....	78
Şekil 5.17 Balast Yük Devre Dışı İken Harmonik Etki THD %0.88	79
Şekil 5.18 Balast Yük Devrede İken Harmonik Etki THD %0.917	79

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 2016-2017 Yılında Lisanssız Elektriğin Kaynak Bazında Gelişimi.....	2
Çizelge 3.1 PID Sistemde Kazançların Çıkış Sinyaline Etkisi	47
Çizelge 4.1 Tasarlanan Kontrol Kartının Maliyet Tablosu.....	55
Çizelge 5.1 IEEE519-2014 Harmonik Limit Değerleri	79

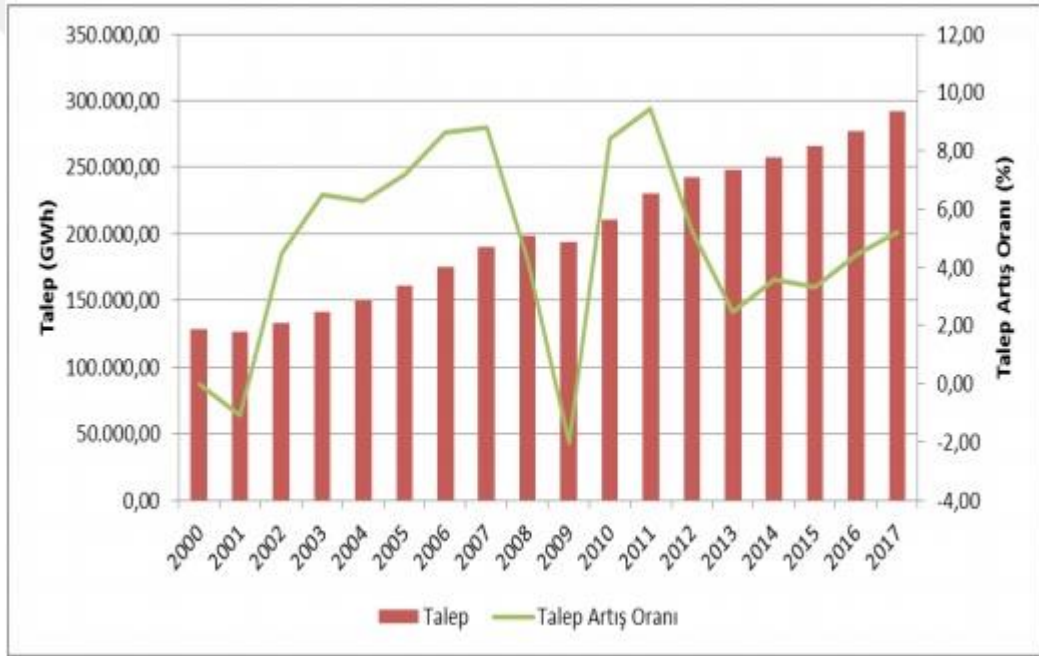


SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

ω_g	: Makine Dönüş Hızı
\underline{v}_s	: Durgun Referans Eksen Takımındaki Stator Gerilimi Vektörü
\underline{v}_r	: Durgun Referans Eksen Takımındaki Rotor Gerilimi Vektörü
$\underline{\Psi}_s$: Durgun Referans Eksen Takımındaki Stator Akısı Vektörü
$\underline{I}_{m\psi r}$: Rotor Mıknatıslanma Akımı Vektörü
r_a, r_β	: Rotor Manyetik Akı Eksenleri
$\underline{\Psi}_{mr}$: Rotor Mıknatıslanma Kaçak Akısı Vektörü
\dot{I}_{sD}	: Stator Akımı Vektörü Direk Eksen Bileşeni
\dot{I}_{rD}	: Rotor Akımı Vektörü Direk Eksen Bileşeni
\dot{I}_{mQ}	: Mıknatıslanma Akımı Kuadratür Eksen Bileşeni
\dot{I}_{sQ}	: Stator Akımı Vektör Direkt Eksen Bileşeni
L_{mx}	: Direkt x Ekseni Mıknatıslanma Endüktansı
L_{my}	: Kuadratür y Ekseni Mıknatıslanma Endüktansı
L_{xy}	: Çapraz Etkileşim Endüktansıdır
L_{sx}	: Referans Eksen Takımında Direkt Eksen Stator Öz Endüktansı
L_{sy}	: Referans Eksen Takımında Kuadrant Eksen Stator Öz Endüktansı
Ψ_{mD}	: Durgun Referans Takımında Mıknatıslanma Akısının Direkt Bileşeni
Ψ_{mQ}	: Durgun Referans Takımında Mıknatıslanma Akısının Kuad. Bileşeni
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
PID	: Oransal+İntegral+Türev kontrol sistemi
AC	: Alternatif Akım
V	: Volt
IGBT	: Gate Ucu İzole Çift Kutup Transistor(Isolated Gate Bipolar Transistor)

1. GİRİŞ

Dünya genelinde olduğu gibi, ülkemiz özelinde de temiz enerjilere olan ilgi artmaya devam etmektedir. Güneş ve Rüzgâr enerji tesislerinin sayısındaki hızlı artış aslında ülke yöneticilerinin de yenilenebilir enerji kaynaklarına verdikleri desteğin arttığına bir kanıtı olarak karşımıza çıkmaktadır. Hava kirliliği ve çevre kirliliği etkenlerinin bazı şehirlerde yaşamı ciddi manada zorlaştırması ve yaşam konforunu düşürmesi insanlığı daha temiz enerji üretim kaynaklarına yöneltirken, gittikçe artan bireysel enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji kaynakları yatırım maliyetlerinin nispeten yüksek olması yani maliyet baskıları yöneticileri ve yatırımcıları daha karlı olan kömür gibi geleneksel enerji üretim tesislerine yatırıma zorlamaktadır.



Şekil 1.1 Türkiye Yıllara Göre Enerji Talebi (Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, 2018)

Yenilenebilir enerji kaynakları maliyetlerinde hızlı bir düşüş de gözlenmektedir. Buna rağmen güneş ve rüzgâr gibi gün içerisinde arz miktarı değişen enerji santralleri enerji piyasası işletme mekanizmalarını zorlamaktadır. Şebeke düzenleyicileri yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretimdeki payını hızlı şekilde arttırmak konusunda temkinli davranmasının altında bu sebep yatmaktadır.

Geleneksel büyük hidroelektrik barajları ve kömür santrallerinin dezavantajı ise müşteriden uzağa kaynağa yakın kurulma zorunluluğudur. Enerji müşteriden uzakta

olduğu zaman iletim hattı kurulum ve işletme maliyetleri de enerji maliyetinde artışa yol açmaktadır.

Bu sebeple ülkemizde lisanssız üretim başlığı altında nispeten yeni bir mekanizma kurulmuştur. Bu mekanizmanın amacı elektrik enerjisi üretimini müşteriye yakın yerde yaparak daha küçük kaynakları üretime aktarabilmektir. Daha küçük kaynaklar ülke geneline yaygın olduğundan müşterilere yakındır ve iletim maliyetleri ve kayıpları çok daha azdır.

Çizelge 1.1 2016-2017 Yılında Lisanssız Elektrik Kaynak Bazında Gelişimi
(Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, 2018)

Kaynak Türü	2016		2017	
	Kurulu Güç (MWe)	Oran (%)	Kurulu Güç (MWe)	Oran (%)
Güneş (Fotovoltaik)	939,19	89,60	2.978,84	93,87
Doğal gaz	51,85	4,95	85,88	2,71
Biyokütle	36,42	3,47	66,72	2,10
Rüzgar	13,75	1,31	32,20	1,01
Hidrolik	5,78	0,55	8,69	0,27
Güneş (Yoğunlaştırılmış)	1,22	0,12	1,00	0,03
Genel Toplam	1.048,21	100,00	3.173,32	100,00

Çalışmamıza konu olan santrifüj pompaların türbin olarak kullanılması işte bu yerelde üretim ve küçük enerji kaynaklarının üretime kazandırılması ilkesine katkı sunacaktır. Şebekeden uzak, enerji dağıtım sistemi ulaştırma maliyetlerinin yüksek olduğu yerleşim yerlerindeki hidroelektrik kaynakları, bu cihazlar ile enerji kaynağına dönüştürülebilir. Santrifüj pompaların birkaç watt mertebesinde birkaç yüz kw mertebesine kadar kolayca tedarik edilebilir olması, yapı olarak sağlam bakım gerektirmeyen cihazlar olması ve tamirinden anlayan kişilerin çokluğu, bu cihazları enerji üretim kaynağı olarak iyi bir alternatif haline getirmektedir.

Ancak santrifüj pompaların asenkron makineler ile birlikte pazarda bulunabiliyor olması beraberinde bir problem de getirmektedir. Şebekeden bağımsız asenkron jeneratörlerin uç gerilimi ve frekansı şebeke yükü ile değişmektedir. Yükü değişen frekans ve gerilimin şebeke yerine kullanılması olanaksızdır.

Problemin çözümü ise yük kontrol mekanizmalarındadır. Jeneratörden talep edilen yükü takip ederek, yük değişimlerini sistemdeki balast yük ile kompanze eden bu

sistemler asenkron jeneratör üzerindeki yük değişimini sınırlayarak uç gerilimi ve frekanstaki kaymayı da baskılamaktadırlar. Böylece asenkron jeneratörlerin şebekeden bağımsız güç üniteleri olarak kullanımı mümkün hale gelmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, şebekeden bağımsız olarak çalışan üç fazlı asenkron jeneratörün tek fazlı yüklerde kullanımının sağlanması, talep edilen yükteki değişimlerde asenkron jeneratörün uç geriliminin ve frekansındaki değişimi sınırlayacak yük kontrol kartı tasarımının yapılması ve performans testlerinin gerçekleştirilmesidir.

1.2 Literatür Özeti

Fosil yakıtların herkese yetecek kadar olamaması ve dünya genelinde ekolojik korunmaya önem gösterilmesiyle, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi her gün artmaktadır. Elektrik şebeke sistemindeki baz enerjiyi üreten fosil yakıtlı sistemler ve atom enerji sistemlerine karşı gelişmenin temel kısmını rüzgâr enerji sistemleri oluşturmaktadır. Yenilenebilir rüzgâr enerji sistemleri üzerindeki bu çalışmalar, daha sağlam ve değerli enerji jeneratörleri yapılması konusunda istek uyandırmaktadır. Asenkron jeneratörlerin hafif ve sağlam yapısı sebebi ile bu tür uygulamalarda, senkron makinelere alternatif olarak sıkça kullanılmaktadır (Swarthi ve Nithiyanthan, 2017).

Şebekelerin ulaşamadığı tenha noktalardaki yerleşim yerlerindeki şebekelerde genellikle mikro ölçekte 100kW gücün altındaki hidroelektrik jeneratörler kullanılmaktadır. Kendinden uyarımla asenkron jeneratörlerin kullanımı ile bu tür makineler daha yapılabilir hale gelmektedir. Fakat frekans ve gerilim regülasyonu yapan karmaşık teçhizatların pahalılığı ve karmaşıklığı, ekstra maliyet olarak karşımıza çıkmaktadır (Smith, 1996).

Küçük sular üzerine kurulmuş türbinlerde gelen suyun değişimi kontrol edilememektedir. Bu sebeple jeneratör frekansını sabit tutmak için jeneratör yük kontrolünü yapmak daha kolay bir yol olarak ortaya çıkmaktadır. Yük kontrolü yapılmadığı zaman değişken yük altındaki asenkron jeneratörün aşırı devirlere çıkması veya geriliminin kaybolması sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu problem çözmek için yapılan çalışmalarda sürücü kontrollü elektronik anahtarlamalar ile

balast yük sürülmüş, jeneratör sabit yük altında çalıştırılması sağlanmıştır (Ekanayake, 2002).

Asenkron jeneratörlerin nonlinear modellemeleri yapılarak şebekeden bağımsız çalışmalarda nasıl daha stabil çalıştırılacağıın bulunması için de çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda AC gerilim DC ye çevrildikten sonra sürücü denetimli kondansatör vasıtası ile jeneratör uç gerili belirli sınırlar içinde tutulması sağlanmış ve maliyet etkin bir çözüm ortaya koyulmuştur (Scherer ve ark., 2011).

Asenkron jeneratör çıkış gerilimini, jeneratör çıkışına bağlanan kondansatörün inverter frekans regülasyonu ile sürülmesi ile kontrolünde, yapay sinir ağları yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu yöntemde her yük durumu için ayrı ayrı hesaplama yapmak yerine, kurulan düzenekte farklı çalışma noktalarında ne kadar kondansatör değerine ihtiyaç duyulduğu yapay sinir ağına öğretildikten sonra, gerçek zamanlı olarak yapay sinir ağı tarafından kontrol edilerek anahtarlama elemanı vasıtası ile jeneratör gerilimi ve frekansı değişken yük altında sabit tutulabilmektedir (Ünal ve Özdemir, 2019).

Rüzgâr gücünden elektriksel güç elde etmenin farklı yollarını inceleyen çalışmalar da yapılmıştır. Sürgevil tarafından yapılan çalışmada türbin hızı ve üretilen gerilimin frekansı ele alınan çalışmada 3 farklı yol ile kontrolün yapılabileceği belirtilmiştir. Bunlar;

Sabit hız sabit frekans dönüşüm sistemleri,

Değişken hız sabit frekans sistemleri,

Değişken hız, değişken frekans dönüşüm sistemleri

olarak sıralanmıştır. Bu çalışmalarda Değişken hız sabit frekans dönüşümü için bilezikli indüksiyon jeneratörün rotor dirençlerinin değişimi ile tork-hız eğrisinin değiştirildiği böylece şebekeye basılan enerjinin sabit tutulabildiği anlatılmaktadır. Değişken hız değişken frekans uygulamalarının şebekeden bağımsız sistemlerde kullanıldığı, üretilen enerjinin ac-dc çeviriciler vasıtası ile doğrultularak akü sistemlerinde depolamasında kullanıldığı belirtilmektedir (Sürgevil ve Akpınar, 2001).

İndüksiyon jeneratörlerin şebekeden bağımsız olarak çalışmasını konu edinen başka bir araştırmada, türbinin değişik hızlarında üretilen voltajın belirli sınırlar içerisinde tutulabilmesi için kademeli kondansatör grupları kullanılmıştır. Değişken yüklerde belirlenen voltaj değeri ile kıyaslanan aktüel gerilimi göre kontrol devresi kondansatör gruplarını devreye alıp çıkartarak gerilim istenilen sınırlarda tutmuştur (Süerkan ve Aras, 2000).

Çift beslemeli asenkron jeneratörün kontrolünü bulanık mantık sistemi kullanarak yapılan çalışmada sabit frekans ve sabit gerilim altında çalışan Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratörün kararlı durum analizi yapılmış, rüzgâr türbini ve asenkron jeneratörün zaman ekseninde matematiksel modellemeleri çıkartılmış, sabit olmayan rüzgâr hızında en yüksek elektriksel gücü elde etmek için bulanık mantık denetleyicisi kullanılmıştır (İskender ve Genç, 2009).

Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün denetim algoritmalarının belirlenmesi için matlab/simulink kullanılan bir çalışmada, jeneratörün frekans regülasyonu için bir kontrol döngüsü oluşturularak anahtarlama elemanı ile direnç kullanılmışken, jeneratörün gerilim regülasyonu için ise anahtarlama elemanı ve kondansatör kullanılmıştır. Böylece kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün hem uç gerilimi regülasyonu sağlamışken hem de frekans regülasyonu sağlamıştır (Çalışkan, 2005).

Elder (1984) tarafından yapılan bir çalışmada indüksiyon jeneratörün uç gerilini ayarlamak için tristör kontrollü indüktans ve tristör kontrollü kapasiteler kullanılmış, dengeli ve dengesiz yükler altında yapılan düzenek test edilerek regülasyon sağlanabildiği belirlenmiştir (Elder ve Boys, 1984).

Shing ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün değişik yük koşulları altında, tasarlanan kontrol devresi ile performansı incelenmiş ve akımda oluşan harmonikler ölçülmüştür. Elektronik Yük Kontrol kartı nominal gücünün %80'ne vardığında hat akımında oluşan harmonik THD %44,52 olarak ölçülmüştür (Shing ve ark., 2006).

Shing ve arkadaşlarının yaptığı bir başka çalışmada kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün ihtiyacı olan reaktif gücü karşılaması için STATCOM tabanlı bir kontrol sistemi kullanılmış ve sistemdeki elemanların nasıl seçilmesi gerektiği incelenmiştir.

Yapılan bu çalışmada STATCOM tipi kontrol sistemleri ile gerekli reaktif güç sağlanmıştır (Singh ve ark., 2004).

Dias ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada üç fazlı kendinden uyarımlı induksiyon jeneratörün terminal uçlarına bağlanan VSI tipi inverter ile tek fazlı bir güç kaynağı elde edilerek şebekeye güç aktarımı yapılmıştır. Steinmetz bağlantısı yapılmış bu düzenekte, üç fazlı jeneratörün uygun fiyat avantajı kullanılarak tek fazlı bir şebeke beslenmiştir (Dias ve ark., 2013).

Yapılan bir başka çalışmada asenkron jeneratörün kontrol kartında bulunan balast yükler vasıtası ile ısıtma sistemi çalıştırılmış ve balast yüke verilen enerjinin kazanımı sağlanmıştır (Yuvarajan ve Tariq, 2013).

Asenkron jeneratörün manyetik akısının lineer olduğu bölgede çalışmasını sağlayan bir kontrol sistemi sayesinde sabit uyarım kondansatörleri ile birlikte tasarlanan harici uyarım sistemi jeneratörün reaktif demandını takip ederek sistemin verimini üst bölgede tutulmasını sağlayan çalışmalar da mevcuttur. (Eduardo ve Bortolotto, 1999)

1.3 Hipotez

Asenkron makinelerin sağlam yapısının verdiği avantaj onları hem şebeke bağlantılı endüstriyel sistemlerde kullanılmasının, hem de şebekeden bağımsız bölgelerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Şebekeye bağlı çalışan asenkron makineler şebeke frekansı ile birlikte çalıştılarından ve uyarımlarını şebeke üzerinden karşıladıklarından uygulamada pek problem yaşatmazlar. Ancak jeneratör olarak çalışan asenkron makineler daha çok küçük sistemlerde kullanıldığından, genellikle şebekeden bağımsız çalışan uygulamalarda tercih edilirler. Bu tür bağımsız uygulamalarda asenkron jeneratörün çıkış yükündeki değişimler jeneratör uç geriliminde ve stator frekansında büyük değişimlere yol açar. Jeneratör frekans ve gerilimindeki değişimler, jeneratörün beslediği yükler, ikaz kondansatörleri ve bizzat jeneratörün kendisi için de uygun koşullar sağlamaz. Tercih edilen ise jeneratör frekans ve geriliminin mümkün olduğu kadar tasarlandığı anma değerlerde olmasıdır. Bu çalışmada jeneratör üstündeki yük değişimlerini ölçüp, jeneratör toplam yükünü sabit tutmak için gerekli balast yükü hesap eden ve devreye alan bir PID algoritma geliştirilmiştir. PID algoritmali kontrol devresinin sürdüğü sürücü kartı devresi balast

yükü beslemektedir. Böylece jeneratör üstündeki toplam yükteki değişim sınırlandırılarak, uç gerilimin ve frekansın aşırı değişimleri engellenmiştir. Kullanılan algoritma, asenkron makine dinamik modellenmesinden bağımsız çalışmaktadır. Bu sebeple küçük asenkron jeneratörlerde kullanılabilir yapıda ve maliyettedir.

Şebekeden uzak küçük güçlerdeki asenkron jeneratörler genelde tek fazlı yükleri beslemek için kullanılır. Kendinden ikazlı tek fazlı asenkron jeneratörlerin uyartım ve stabilite problemleri olduğundan (Smith, 2008) bu çalışmada üç fazlı jeneratörlerin tek fazlı kullanımı üzerine çalışılmıştır. Böylece piyasada bolca bulunan küçük güçteki üç fazlı jeneratörlerin tek fazlı çalışma altındaki performansı da ortaya çıkarılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Asenkron Makineler

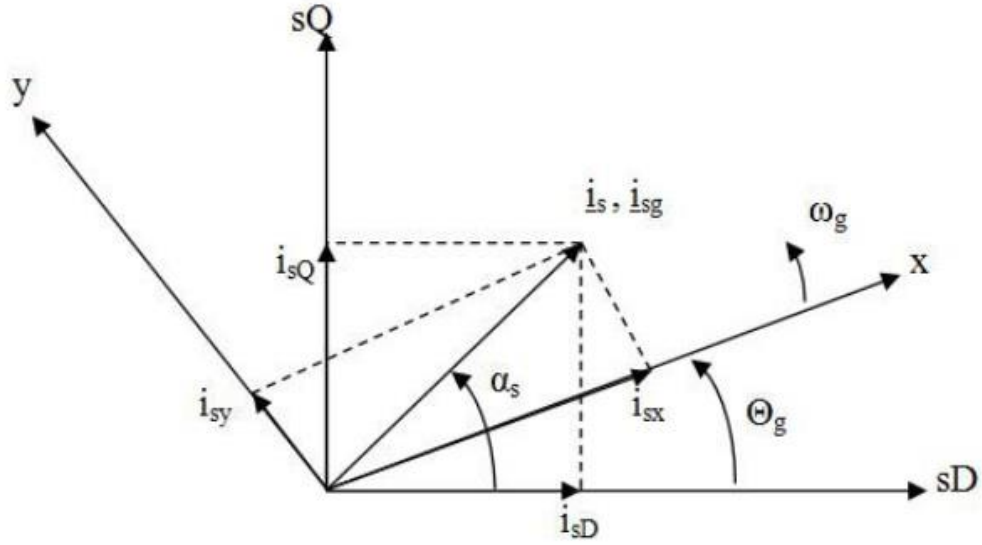
Asenkron makineler motor ve jeneratör olarak kullanılabilir. Motor çalışma durumunda stator sargılarından aldığı elektriksel enerjiyi, belirli bir kayıp ile rotorda mekanik enerji olarak verirler. Girişten elektrik enerjisi olarak giren güç, çıkıştan mekanik enerji formuna dönüşmüş olur. Jeneratör olarak çalışan asenkron makinelerde ise rotordan mekanik olarak alınan enerji, stator sargılarından elektrik enerjisi olarak alınır.

Motor olarak kullanımları çok yaygındır. Endüstride özel uygulamalar haricinde genellikle asenkron motorlar tercih edilir. Birkaç Watt mertebesinde birkaç Megawatt mertebesine kadar asenkron makineler imal edilmektedirler. Gerilim olarak da 100 Volt mertebesinde 30 kV mertebesine kadar gerilimlerde çalışan asenkron makineler bulunabilir.

Rotoru sargılı ve bilezikli makineler olduğu gibi, rotoru kısa devre (sincap kafes) makineler de vardır. Yapı olarak bilezikli makineler daha karmaşık, bakım gerektiren ve aşırı devirlere karşı duyarlı makinelerdir. Buna karşın değişken hız uygulamalarında bilezikli asenkron jeneratörün getirdiği avantajları kullanılması için özellikle rüzgâr türbin jeneratörü uygulamalarında sıkça tercih edilirler. Sincap kafes makineler ise rotorda kısa devre edilmiş çubuklardan oluşan katı bir yapı bulundurduğu için ve rotor bilezikleri olmadığı için aşırı devirlere daha dayanıklı ve bakımsız bir yapısı vardır ve daha uygun maliyetler ile bulmak mümkündür. Bu sebeple motor uygulamalarında daha çok tercih edilirler.

2.2 Asenkron Makinenin Matematik Modeli

ω_g hızında dönen asenkron makinenin genel referans eksen takımında vektör gerilim denklemlerinin elde edilişi şekil 2.1. de gösterilmiştir. Bu denklemler 3 faz sargılı iki kutuplu asenkron makina için verilmiştir. Hava aralığının düzgün olduğu varsayılmıştır. Rotor boşluğu kaynaklı harmonik bozulmalar önemsiz kabul edilmiştir. Stator ve rotor demir nüvesinin manyetik geçirgenliğinin sınırsız olduğu, manyetik akı dağılımının homojen olduğu ve nüve demir kayıplarının olmadığı göz önünde bulundurularak denklem oluşturulmuştur. Vektör gerilimleri (2.1) ve (2.2) de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Asenkron Makinenin Stator Dönüşüm Vektörleri

Genel referans eksen takımında Direk x ve Kuadratur y eksen takımları , ω_g hızında döner. Burada belirtilen $\omega_g = \frac{d\theta_g}{dt}$ dir. θ_g Referans eksen takımında görüldüğü üzere, referans eksen takımının x bileşeni (gerçel bileşen) ile durgun referans eksen takımının direkt eksen bileşeni sD arasındaki açıdır.

$$\underline{i}_{sg} = \underline{i}_s e^{-j\theta_g} = \underline{i}_{sx} + j\underline{i}_{sy} \quad (2.1)$$

Stator akımı vektörü referans eksen takımında yukarıdaki denklem (2.1) şeklindedir.

Stator akı vektörü ve gerilim vektörü de denklemleri (2.2) ve (2.3) ile ifade edilir.

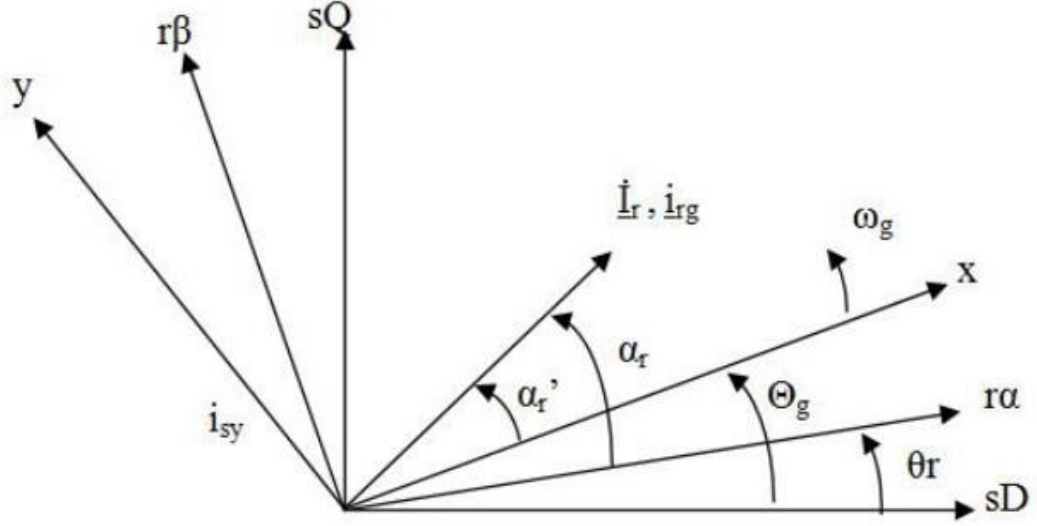
$$\underline{u}_{sg} = \underline{u}_s e^{-j\theta_g} = u_{sx} + ju_{sy} \quad (2.2)$$

$$\underline{\psi}_{sg} = \underline{\psi} e^{-j\theta_g} = \psi_{sx} + j\psi_{sy} \quad (2.3)$$

Denklem (2.1)'deki \underline{u}_{sg} durgun referans eksen takımındaki stator gerilimi vektörüdür. $\underline{\psi}_{sg}$ ise durgun referans eksen takımındaki stator akısı vektörünü gösterir.

Rotor akısı da aynı yaklaşım ile elde edilir. Daha sonra akım vektöründen rotor akısı ve rotor gerilimi denklemleri de ortaya çıkarılabilir. Bu denklemler kullanılarak, tüm

vektörler bir üç farklı eksen takımında gösterilebilir. Bunlar genel eksen, statora göre eksen ve rotora göre eksen takımlarıdır.



Şekil 2.2 Asenkron Makinanın Rotor Dönüşüm Denklemleri

Şekil 2.2 de bu üç referans eksen takımı da çizilmiştir. Γ_α ve Γ_β rotor manyetik akı eksenleridir. Γ_α stator referans eksenin direkt bileşeni SD den θ_r açısı kadar ileride çizilir. Bu vektör grafiklerine göre rotor akımı vektörü aşağıdaki gibi ortaya çıkmaktadır.

$$\underline{i}_r = |\underline{i}_r| e^{j\alpha_r} \underline{i}_{rg} = |\underline{i}_r| e^{j\alpha_r'} \quad (2.4)$$

Γ_α ile yani rotorla beraber dönen referans eksenin gerçel bileşeni ile genel referans eksen takımının gerçel bileşeni arasındaki açı $\theta_g - \theta_r$ (iki açı arasında kalan açı) olduğu için genel referans eksen takımına göre rotor akımı vektörü (2.5) denklemindeki gibi olacaktır.

$$\underline{i}_{rg} = |\underline{i}_r| e^{j\alpha_r'} \quad (2.5)$$

Burada

$$\alpha_r' = \alpha_r - (\theta_g - \theta_r) \quad (2.6)$$

olduğundan rotor akım vektörü (2.7) deki gibi ifade edilebilir.

$$\underline{i}_{rg} = |\underline{i}_r| e^{j\alpha r} e^{-j(\theta g - \theta r)} = \underline{i}_r e^{-j(\theta g - \theta r)} = i_{rx} + j i_{ry} \quad (2.7)$$

Benzer şekilde rotor akısı vektörü;

$$\underline{\psi}_{rg} = \underline{\psi}_r e^{-j(\theta g - \theta r)} = \psi_{rx} + j \psi_{ry} \quad (2.8)$$

ve rotor gerilimi vektörü;

$$\underline{u}_{rg} = \underline{u}_r e^{-j(\theta g - \theta r)} = u_{rx} + j u_{ry} \quad (2.9)$$

Şeklinde elde edilebilir. Stator ve rotor gerilim vektörleri genel referans eksenine göre yazılırsa (2.10) ve (2.11) denklemleri ortaya çıkacaktır.

$$\underline{u}_{sg} = R_s \underline{i}_{sg} + \frac{d\underline{\psi}_{sg}}{dt} + j \omega_g \underline{\psi}_{sg} \quad (2.10)$$

$$\underline{u}_{rg} = R_r \underline{i}_{rg} + \frac{d\underline{\psi}_{rg}}{dt} + j(\omega_g - \omega_r) \underline{\psi}_{rg} \quad (2.11)$$

$$\underline{\psi}_{sg} = L_s \underline{i}_{sg} + L_m \underline{i}_{rg} \quad (2.12)$$

$$\underline{\psi}_{rg} = L_r \underline{i}_{rg} + L_m \underline{i}_{sg} \quad (2.13)$$

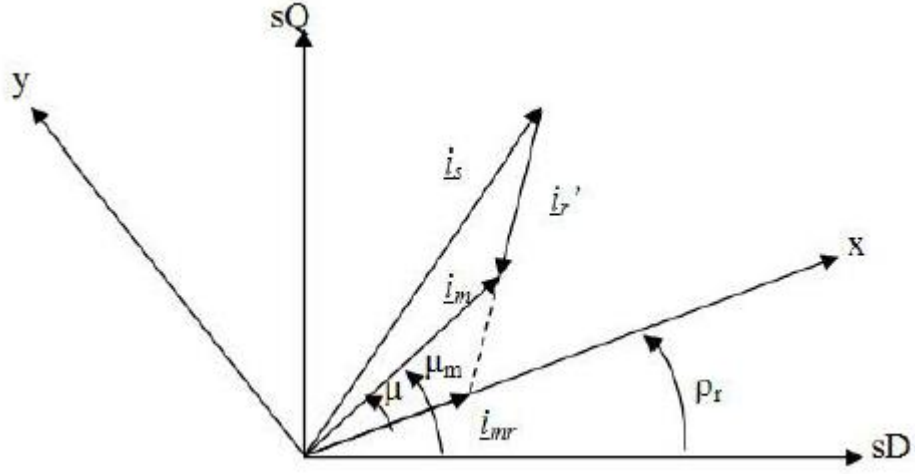
Stator ve rotor akımı vektörü cinsinden stator ve rotor akı vektörünün denklemleri (2.12) ve (2.13) deki gibi ortaya çıkacaktır. $\underline{\Psi}_{sg}$ (2.10) deki denklemden yerine koyulduğunda;

$$\underline{u}_{sg} = R_s \underline{i}_{sg} + \frac{d}{dt}(L_s \underline{i}_{sg}) + \frac{d}{dt}(L_m \underline{i}_{rg}) + j \omega_g (L_s \underline{i}_{sg} + L_m \underline{i}_{rg}) \quad (2.14)$$

$$\underline{u}_{rg} = R_r \underline{i}_{rg} + \frac{d}{dt}(L_r \underline{i}_{rg}) + \frac{d}{dt}(L_m \underline{i}_{sg}) + j(\omega_g - \omega_r)(L_r \underline{i}_{rg} + L_m \underline{i}_{sg}) \quad (2.15)$$

En sonunda (2.14) ve (2.15) denklemleri elde edilecektir.

2.2.1 Asenkron Makina Rotor Kısmı Manyetizma Akımı



Şekil 2.3 Rotor Manyetizma Akımının Vektörel Gösterimi

Rotorun kaçak indüktans ile mıknatıslanma endüktasının toplamı rotorun toplam öz endüktasını oluşturmaktadır. Bu durumda manyetizma akımının vektörü gerilim denklemi

$$|\underline{i}_{mr}| = \frac{L_r}{L_m} \underline{i}_r \psi_r + \underline{i}_s \psi_r = \frac{L_{rl}}{L_m} \underline{i}_r \psi_r + (\underline{i}_r \psi_r + \underline{i}_s \psi_r) = \frac{L_{rl}}{L_m} \underline{i}_r \psi_r + \underline{i}_m \psi_r \quad (2.16)$$

$$|\underline{i}_{mr}| = \underline{i}_s \psi_r + \underline{i}_r \psi_r = |\underline{i}_m| e^{j\mu} \quad (2.17)$$

şeklinde oluşacaktır. Rotor akımına göre referans eksen takımında rotor manyetizma akımı vektörü \underline{i}_{mr} dir. \underline{i}_m durgun referans eksenindeki manyetizma akımı vektörü iken $|\underline{i}_{mr}|$ ise onun genlik değerini verir.

μ_m , \underline{i}_m ' nin durgun referans eksen takımının x eksenine yaptığı açıdır. μ ise rotor akısı gerçel eksenine ile \underline{i}_m vektörünün arasındaki açıdır.

Rotor akısı eksen takımları ve durgun referans eksen takımları Şekil 2.3 de referans eksenleri oluşturmaktadır. \underline{i}_{mr} ve \underline{i}_m bu referans eksen grafiğinde gösterilmişlerdir.

Rotor akısı vektörü ile mıknatıslanma akımı vektörü eksenleri birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi kaçak endüktansın sıfırdan farklı bir değerde olmasıdır.

$$|\underline{i}_{mr}| = \left(\frac{L_{rl}}{L_m}\right) \underline{i}_r \psi_r + |\underline{i}_m| e^{j\mu} \quad (2.18)$$

\underline{i}_{mr} ve \underline{i}_m bağlantısı denklem (2.18) da görülmektedir.

2.2.2 Asenkron Makina Stator Gerilimi Matematik Modeli

Stator kaçak endüktansı L_{sl} sabittir. L_m ise stator nüvesi manyetik akı doyumuna göre değişecektir. L_{sl} ve L_m toplamı L_s stator özendüktansını değerini ortaya çıkarır. Bu durumda stator gerilim denklemi (2.19) de gösterildiği halini alır.

$$\underline{u}_{s\psi r} = R_s \underline{i}_{s\psi r} + L_{sl} \frac{d}{dt} (L_m |\underline{i}_m| e^{j\mu}) + j\omega_{mr} (L_{sl} \underline{i}_{\psi r} + L_m |\underline{i}_m| e^{j\mu}) \quad (2.19)$$

$$L_m = \frac{|\underline{\psi}_m|}{|\underline{i}_m|} = \frac{|\underline{\psi}_r|}{|\underline{i}_{mr}|} \quad (2.20)$$

$$L_m |\underline{i}_m| e^{j\mu} = \underline{\psi}_{mr} = L_m (\underline{i}_s + \underline{i}_r) e^{-j\rho} = \psi_{mx} + j\psi_{my} \quad (2.21)$$

Ψ_{mr} rotor mıknatıslanma kaçak akısı vektörü olup, genellikle rotor akısı ile eş eksenli değildir. ($\mu=0$ durumu hariç)

(2.19) denklemi gerçel ve sanal bileşenlerine ayrıldığında (2.22) ve (2.23) elde edilecektir.

$\frac{d\psi_{mr}}{dt}$ ifadesi statorgerilimlerinin direkt ve kuadratur eksenleri arasındaki etkileşimi ifade eder.

$$u_{sx} = R_s i_{sx} + L_{sl} \frac{di_{sx}}{dt} + \frac{d\psi_{mx}}{dt} - \omega_r (L_{sl} i_{sy} + \psi_{my}) \quad (2.22)$$

$$u_{sy} = R_s i_{sy} + L_{sl} \frac{di_{sy}}{dt} + \frac{d\psi_{my}}{dt} + \omega_r (L_{sl} i_{sx} + \psi_{mx}) \quad (2.23)$$

$$\psi_{mx} = L_m (i_{sx} + i_{rx}) = L_m i_{mx} \quad (2.24)$$

$$\psi_{my} = L_m (i_{sy} + i_{ry}) = L_m i_{my} \quad (2.25)$$

Rotor akısı ile yazılan referans eksen grafiğindeki mıknatıslanma akımı vektörünün gerçel eksen bileşeni \dot{I}_{mx} , sanal eksen bileşeni ise \dot{I}_{my} dir.(2.24) ve (2.25) numaralı denklemlerin zamana göre türevi alınınca (2.26) ve (2.27) nolu denklemler elde edilir. Ve denklem (2.23) ve (2.24) de kullanılır.

$$\frac{d\psi_{mx}}{dt} = \frac{d}{dt} (L_m i_{mx}) = L_m \frac{di_{mx}}{dt} + i_{mx} \frac{dL_m}{dt} \quad (2.26)$$

$$\frac{d\psi_{my}}{dt} = \frac{d}{dt} (L_m i_{my}) = L_m \frac{di_{my}}{dt} + i_{my} \frac{dL_m}{dt} \quad (2.27)$$

Zamana göre türevi alınan L_m endüktansı ile aşağıdaki denklem ortaya çıkacaktır;

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt} = \frac{(L_d - L_m)}{|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt} \quad (2.28)$$

Bu denklemdeki L_d denklem (2.29) daki gibidir. Ve dinamik endüktans olarak adlandırılır.

$$L_d = \frac{d|\psi_m|}{d|i_m|} \quad (2.29)$$

L_d doğrusal manyetik akı durumunda iken, L_m ye eşittir. Denklem (2.28) da, mıknatıslanma akımı vektörü genliği $|i_m|$ değeri direkt ve kuadratür eksenlerden meydana gelmektedir. Aynı zamanda stator ve rotor akımlarının direkt ve Kuadratür eksenlerini de içermektedir. dL_m/dt ifadesi de denkleme koyulduğunda;

$$\begin{aligned} \frac{d|i_m|}{dt} &= \frac{d}{dt} (i^2_{mx} + i^2_{my})^{1/2} = \frac{i_{mx}}{|i_m|} \frac{di_{mx}}{dt} + \frac{i_{my}}{|i_m|} \frac{di_{my}}{dt} \\ \frac{d|i_m|}{dt} &= \cos \mu \frac{di_{mx}}{dt} + \sin \mu \frac{di_{my}}{dt} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Denklemi (2.30) deki gibi elde edilecektir.

$$i_{mx} = |i_m| \cos \mu \quad (2.31)$$

ve

$$i_{my} = |i_m| \sin \mu \quad (2.32)$$

İfadeleri de formülde yerine koyulduktan sonra (2.26) ve (2.30) denklemleri yeniden düzenlendiğinde

$$\frac{d\psi_{mx}}{dt} = L_{mx} \frac{di_{mx}}{dt} + L_{xy} \frac{di_{my}}{dt} \quad (2.33)$$

$$\frac{d\psi_{my}}{dt} = L_{my} \frac{di_{my}}{dt} + L_{xy} \frac{di_{mx}}{dt} \quad (2.34)$$

Elde edilecektir. L_{mx} direkt x eksenı mıknatıslanma endüktansı, L_{my} kuadratür y eksenı mıknatıslanma endüktansı L_{xy} ise çapraz etkileşim endüktansıdır.

$$L_{mx} = L_d \cos^2 \mu + L_m \sin^2 \mu = L_d \cos^2(\mu_m - \rho_r) + L_m \sin^2(\mu_m - \rho_r) \quad (2.35)$$

$$L_{my} = L_m \cos^2 \mu + L_d \sin^2 \mu = L_m \cos^2(\mu_m - \rho_r) + L_d \sin^2(\mu_m - \rho_r) \quad (2.36)$$

$$L_{xy} = \frac{1}{2} [(L_d - L_m) \sin(2\mu)] = \frac{1}{2} (L_d - L_m) \sin[2(\mu_m - \rho_r)] \quad (2.37)$$

İken ve doğrusal manyetik akı bölgesinde

$$L_{xy} = 0 \text{ ve } L_d = L_{mx} = L_{my} = L_m \quad (2.38)$$

iken denklem (2.24) (2.25) (2.33) (2.34), denklem (2.22) ve (2.23)'de yerine koyulduğunda

$$u_{sx} = R_s i_{sx} + L_{sx} \frac{di_{sx}}{dt} + L_{mx} \frac{di_{rx}}{dt} + L_{xy} \left(\frac{di_{sy}}{dt} + \frac{di_{ry}}{dt} \right) - \omega_{mr} [L_{sl} i_{sy} + L_m (i_{sy} + i_{ry})] \quad (2.39)$$

$$u_{sy} = R_s i_{sy} + L_{sy} \frac{di_{sy}}{dt} + L_{my} \frac{di_{ry}}{dt} + L_{xy} \left(\frac{di_{sx}}{dt} + \frac{di_{rx}}{dt} \right) + \omega_{mr} [L_{sl} i_{sx} + L_m (i_{sx} + i_{rx})] \quad (2.40)$$

elde edilecektir. Bu denklemlerdeki L_{sx} ve L_{sy} referans eksen takımında direkt ve kuadrant eksenlere karşılık gelen stator öz endüktanslarıdır.

$$L_{sx} = L_{sl} + L_{mx} \quad (2.41)$$

$$L_{sy} = L_{sl} + L_{my} \quad (2.42)$$

Manyetik akı doyuma ulaştığında $L_{sx} \neq L_{sy}$ durumuna gelir. Akı doğrusal durumda iken $L_{sx} = L_{sy} = L_{sl} + L_m$ şekline gelecektir.

Rotor akısına göre referans eksen takımı hızı $\omega_{mr} = 0$ olsa bile U_{sx} ve U_{sy} birbirini etkilemeye devam eder. Denklem (2.39) ve (2.40) da bu durum görülmektedir.

Durgun referans eksen takımı ile rotor akşınına göre referans eksen takımı arasındaki açı $\rho_r = 0$ olduğunda,

$$\omega_r = \frac{d\rho_r}{dt} = 0 \quad (2.43)$$

Olacağından, (2.39) ve (2.40) denklemleri kullanılarak

$$u_{sD} = R_s i_{sD} + L_{sl} \frac{di_{sD}}{dt} + \frac{d\psi_{mD}}{dt} \quad (2.44)$$

$$u_{sQ} = R_s i_{sQ} + L_{sl} \frac{di_{sQ}}{dt} + \frac{d\psi_{mQ}}{dt} \quad (2.45)$$

Denklemlerine ulaşılabacaktır. Bu denklemdeki ψ_{mD} durgun referans takımında mıknatıslanma akısının direkt bileşeni, ψ_{mQ} ise kuadratür bileşenini göstermektedir.

$$\psi_{mD} = L_m i_{mD} = L_m (i_{sD} + i_{rD}) \quad (2.46)$$

$$\psi_{mQ} = L_m i_{mQ} = L_m (i_{sQ} + i_{rQ}) \quad (2.47)$$

$$\frac{d\psi_{mD}}{dt} = L_{mD} \frac{di_{mD}}{dt} + L_{DQ} \frac{di_{mQ}}{dt} \quad (2.48)$$

$$\frac{d\psi_{mQ}}{dt} = L_{mQ} \frac{di_{mQ}}{dt} + L_{DQ} \frac{di_{mD}}{dt} \quad (2.49)$$

Yukarıdaki denklemlerde, referans eksen takımında direkt ve kuadratur bileşenleri olarak, mıknatıslanma akımı i_{mD} , i_{mQ} , stator akımı i_{sD}, i_{sQ} , rotor akımı i_{rD}, i_{rQ} olarak tanımlanmıştır. Mıknatıslanma akımı bileşenleri ise L_{mD} ve L_{mQ} olarak gösterilmiştir. L_{dQ} ise stator sargı çapraz etkileşim endüktansı olarak tanımlanan değişkendir.

$$L_{mD} = L_d \cos^2 \mu_m + L_m \sin^2 \mu_m \quad (2.50)$$

$$L_{mQ} = L_m \cos^2 \mu_m + L_d \sin^2 \mu_m \quad (2.51)$$

$$L_{DQ} = (L_d - L_m) \sin \mu_m \cos \mu_m \quad (2.52)$$

Bu denklemler (2.44) deki yerlerine koyulduğunda,

$$u_{sD} = R_s i_{sD} + L_{sD} \frac{di_{sD}}{dt} + L_{mD} \frac{di_{rD}}{dt} + L_{DQ} \left(\frac{di_{sQ}}{dt} + \frac{di_{rQ}}{dt} \right) - \omega_r [L_{sQ} i_{sQ} + L_m (i_{sQ} + i_{rQ})] \quad (2.53)$$

$$u_{sQ} = R_s i_{sQ} + L_{sQ} \frac{di_{sQ}}{dt} + L_{mQ} \frac{di_{rQ}}{dt} + L_{DQ} \left(\frac{di_{sD}}{dt} + \frac{di_{rD}}{dt} \right) + \omega_r [L_{sD} i_{sD} + L_m (i_{sD} + i_{rD})] \quad (2.54)$$

nihai denklemler (2.53) (2.54) şeklinde ortaya çıkacaktır.

2.2.3 Asenkron Makina Rotor Gerilimi Matematik Modeli

Rotor kaçak endüktansı L_{rl} 'nin doyma ile birlikte sabit olduğu kabul edilecektir. Rotor öz endüktansı $L_r = L_{rl} + L_m$ nin toplamı şeklindedir. Daha önce ω_g olarak kullanılan dönüş hızı değeri yerine, rotor denklemlerinde ω_{mr} değeri yani rotor manyetik akısına göre referans eksen dönüş hızı denklemlerde kullanılacaktır.

Rotora göre referans eksen takımındaki rotor vektör gerilim denkleminde ω_{mr} sıfıra eşitlenip bileşenlerine ayrılırsa durgun referans eksen takımında rotor gerilim denklemleri elde edilebilir.

$$\underline{u}_{r\psi r} = 0$$

$$R_r \underline{i}_{r\psi r} + L_{rl} \frac{d\underline{i}_{r\psi r}}{dt} + \frac{d\underline{i}_{m\psi r}}{dt} + j(\omega_{mr} - \omega_r) (L_{rl} \underline{i}_{r\psi r} + \underline{\psi}_{m\psi r}) = 0 \quad (2.55)$$

$$u_{rD} = R_r i_{rD} + L_{rl} \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{d\psi_{mD}}{dt} + \omega_r (L_r i_{rq} + L_m i_{sQ}) = 0 \quad (2.56)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + L \frac{di_{rq}}{dt} + \frac{d\psi_{mQ}}{dt} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sD}) = 0 \quad (2.57)$$

(2.48) ve (2.49) nolu eşitlikleri (2.56) ve (2.57) denklemlerindeki yerlerine yazdığımızda, doyma durumu için nihai asenkron makina rotor gerilim denklemleri ortaya çıkmış olacaktır.

$\omega_{mr} = 0$ olduğu durumda gerçek ve sanal bileşenler yazılırsa,

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + L_{rd} \frac{di_{rd}}{dt} + L_{mD} \frac{di_{sD}}{dt} + L_{DQ} \left[\frac{di_{sQ}}{dt} + \frac{di_{rq}}{dt} \right] + \omega_r (L_r i_{rq} + L_m i_{sQ}) = 0 \quad (2.58)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + L_{rq} \frac{di_{rq}}{dt} + L_{mQ} \frac{di_{sQ}}{dt} + L_{DQ} \left[\frac{di_{sD}}{dt} + \frac{di_{rd}}{dt} \right] - \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sD}) = 0 \quad (2.59)$$

2.2.4 Asenkron Makina Dinamik Denklem Modeli

Denklem (2.58) ve (2.59) da, durgun referans eksen takımındaki direkt ve Kuadratür eksen öz endüktansları

$$L_{rd} = L_{rl} + L_{mD};$$

$$L_{rq} = L_{rl} + L_{mQ};$$

$$L_r = L_{rl} + L_m;$$

Şeklinde belirlenir. Doyma anında $L_{rd} \neq L_{rq} \neq L_r$ olacaktır. (2.53) (2.54) (2.58) (2.59)

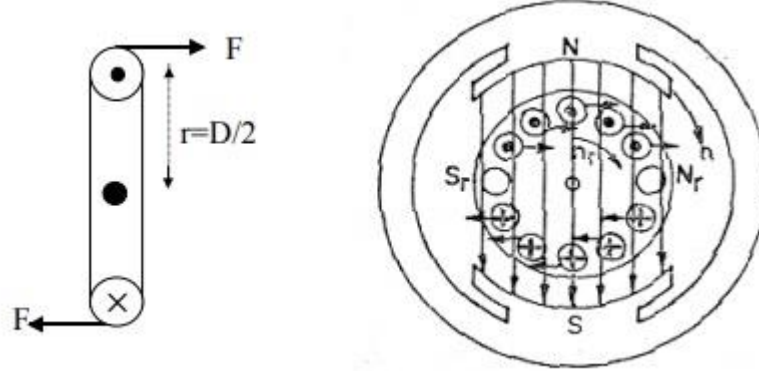
ifadeleri birleştirilerek matris şeklinde yazıldığında

$$\begin{bmatrix} u_{sD} \\ u_{sQ} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + L_{sD}^p) & L_{DQ}^p & L_{mD}^p & L_{DQ}^p \\ L_{DQ} & (R_s + L_{sQ}^p) & L_{DQ}^p & L_{mQ}^p \\ L_{mD} & (\omega_r L_m + L_{DQ}^p) & (R_r + L_{rd}^p) & (\omega_r L_r + L_{DQ}^p) \\ (-\omega_r L_m + L_{DQ}^p) & L_{mQ}^p & (-\omega_r L_m + L_{DQ}^p) & (R_r + L_{rd}^p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Üç fazlı asenkron makinanın genel referans eksen takımındaki dinamik denklemi (2.60) daki gibi ortaya çıkmış olur.

2.3 Asenkron Makinelerin Çalışma İlkesi

Makinenin stator sargılarına uygulanan üç fazlı alternatif gerilimin oluşturduğu alternatif akım, ϕ_m akısı oluşturur. Bu akı stator hava aralığında döner haldedir. Bu döner alan içerisinde kalan rotor sargıları üzerinde bir gerilim ve akım oluşur. Döner manyetik alan içerisinde bulunan iletkenlerden akan akım sebebi ile iletken üzerine bir kuvvet etki etmeye başlar. Bu kuvvete Lorentz kuvveti denir.



Şekil 2.4 Asenkron Makinede Oluşan Lorentz Kuvvetleri

Şekil 3.2 de görüleceği üzere rotor sargılarının karşılıklı iki tarafında ters yönde dönme kuvveti oluştuğu için, rotor dönmeye başlar. Rotorun erişebileceği son hız senkron hızdır. Bu senkron aşağıdaki gibi hesap edilir.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.61)$$

Rotor motor çalışma esnasında bu hıza asla ulaşamaz. Çünkü stator döner alan hızı ile rotor hızı aynı olduğu noktada rotor sargılarında bir gerilim endüklenmez ve kuvvet sıfırlanır. Bu sebeple motor çalışmada rotor devri stator döner alan hızında her zaman küçüktür. Aradaki hız farkı ise rotora uygulanan frenleme torkuna göre değişecektir.

Stator döner alanı hızı ile rotor devri arasındaki bu hız farkına kayma denir. Yani rotor hızının stator hızına göre ne kadar değişim gösterdiğinin bir göstergesidir. “s” ile gösterilir ve motor çalışmada 0 ila 1 arasındadır. Kayma yüzdesel olarak da ifade edilebilir.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.62)$$

Döner alan hızının referans yönünde rotor mili dönüş hızı arttırılırsa ve senkron hız üzerinde bir devirde döndürülürse, kayma negatif bir değer alır. Böyle bir durumda stator akımı 180 derece yön değiştirir ve akım şebekeye doğru akar. Bu duruma jeneratör çalışma denir. Ve ancak rotor mili dışarıdan uygulanan bir güç ile döndürüldüğünde meydana gelir.

Jeneratör çalışmasında kayma, rotoru döndüren kuvvetin devrine bağlı olarak $-\infty < s < 0$ arasında olacaktır.

Motor çalışmada ise elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilir. Rotor dönüş yönü ile makine döner alan yönü aynı yöndedir. Rotor devri sıfır ile stator döner alan hızı arasında bir bölgede çalışırsa, bu çalışma moduna motor çalışma bölgesi denir. Bu çalışmada makinenin kayıpları ve rotordaki mekanik enerjiyi karşılayacak kadar bir elektrik enerjisi stator sargılarından çekilecektir.

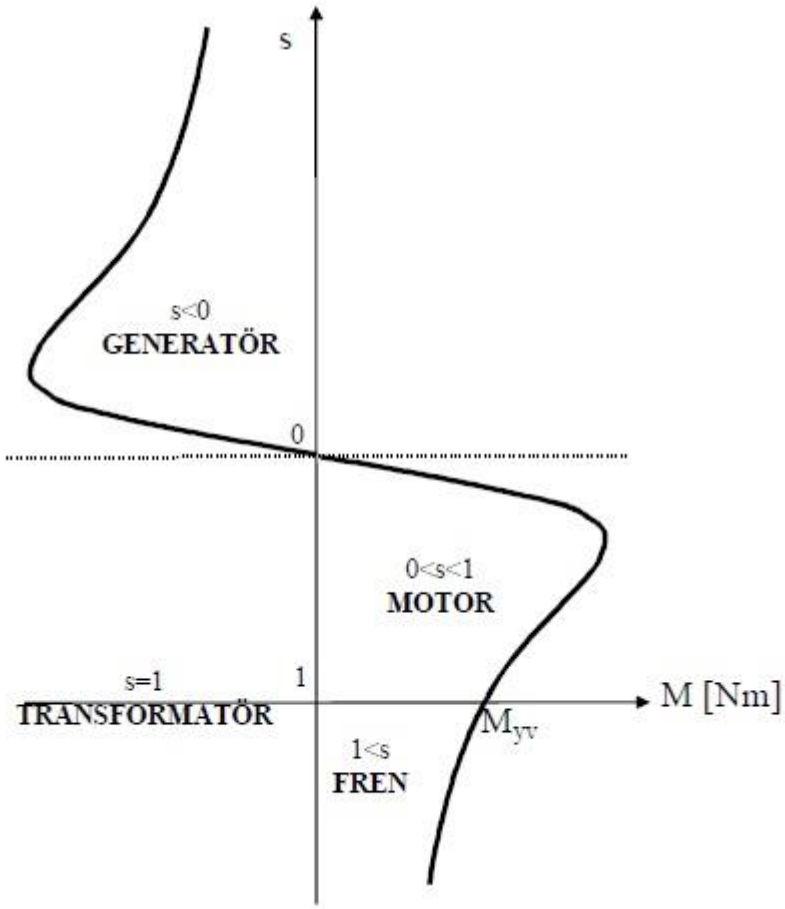
Kayma $0 < s < 1$ bölgesindedir.

Eğer rotora bağlanan yük çok büyük ise ve rotor mekanik gücü bu fren gücünü yenemiyorsa, rotor hareketsiz kalacaktır. Bu durumda kayma $s=1$ dir. Statora uygulanan gerilim ve akım, aynı transformatörde olduğu gibi rotor sargılarında çevirim katsayısına göre dönüşecektir. Bu yüzden bu şekilde çalışmaya transformatör çalışması denir.

Fren çalışmasında ise, dönüş halindeki asenkron motorda stator sargılarına bağlı iki fazın yönü değiştirilir ise, stator sargısındaki döner alan hızı $n_s, - n_s$ olarak yön değiştirecektir. Bu durumda rotorun dönüş yönüne ters yönde bir durdurma kuvveti oluşur ki bu fren moment dir. Bu durumda makinenin kayması

$$s = \frac{-n_s - n}{-n_s} = 1 + \frac{n}{n_s} \quad +1 < s < +\infty \quad (2.63)$$

Şeklinde olacaktır. Bu durumda rotor dönüş yönü hızlı bir şekilde sıfır olur. Rotor tam durduktan sonra da ters yönde hızlanmaya başlar. Asenkron makinenin devrinin sıfır olduğu duruma kadar geçen süreye fren çalışma bölgesi denir.



Şekil 2.5 Asenkron Makinenin Çalışma Bölgeleri ve Kayma İlişkisi

2.3.1 Asenkron Makina Jeneratör Çalışma Eşdeğer Devresi

Şebekeye bağlı olarak çalışan asenkron jeneratörde $s < 0$ dir.

$$V_s = R_s \dot{I}_s + j \frac{m_s}{2} X_{s\sigma} \dot{I}_s + j \frac{m_s}{2} X_{sm} (\dot{I}_s - \dot{I}_r) \quad (2.64)$$

$$0 = \frac{R_r}{s} \dot{I}_r + j \frac{m_r}{2} \dot{X}_{r\sigma} \dot{I}_r - j \frac{m_s}{2} X_{sm} (\dot{I}_s - \dot{I}_r) \quad (2.65)$$

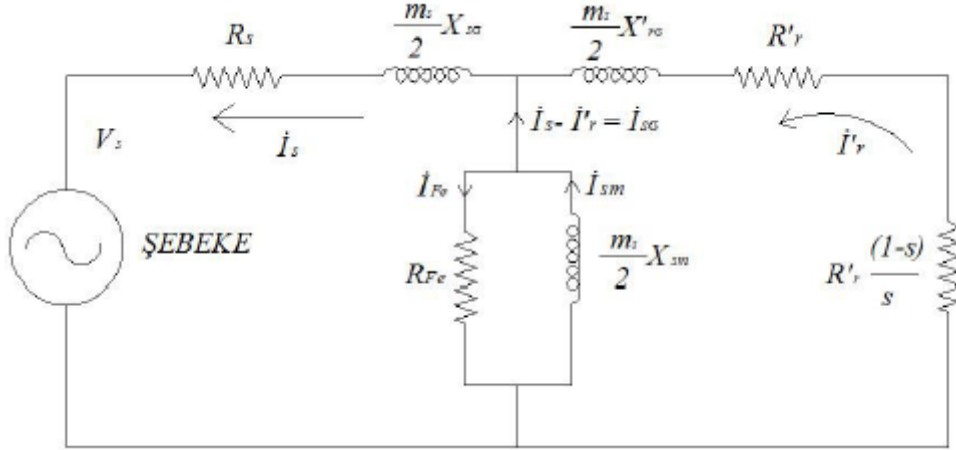
$$V_s = R_s \dot{I}_s + j \frac{m_s}{2} X_{s\sigma} \dot{I}_s + j \frac{m_s}{2} X_{sm} (\dot{I}_s - \dot{I}_r) \quad (2.66)$$

$$0 = \frac{R_r}{-s} \dot{I}_r + j \frac{m_r}{2} \dot{X}_{r\sigma} \dot{I}_r - j \frac{m_s}{2} X_{sm} (\dot{I}_s - \dot{I}_r) \quad (2.67)$$

$$-\frac{R_r}{-s} \dot{I}_r = j \frac{m_r}{2} \dot{X}_{r\sigma} \dot{I}_r - j \frac{m_s}{2} X_{sm} (\dot{I}_s - \dot{I}_r) \quad (2.68)$$

Denklem (2.64) ve (2.65) de $s < 0$ alınırsa (2.66) ve (2.67) elde edilebilir. Bu durumda rotora ait fazor denklemini de (2.68) deki gibi olacaktır.

Kaymanın sıfırdan küçük olması yani jeneratör çalışma bölgesinde iken, rotor denklemindeki $\frac{\hat{R}_r}{s} \hat{I}_r$ değeri negatif bir direnç gibi olacaktır. Yani bir üreteç gibi davranacaktır ve rotor akımının faz yönünü değiştirecektir.



Şekil 2.6 Asenkron Jeneratör Eşdeğer Devresi

Asenkron jeneratör eşdeğer devresi Şekil 2.6 da, fazör diyagram da şekil 2.7 de verilmiştir. Bu şekillere fazör denklemlerinde olmayan demir kayıpları ve sürtünme kayıpları daha iyi anlaşılması için sonradan eklenmiştir.

Fazör diyagramında,

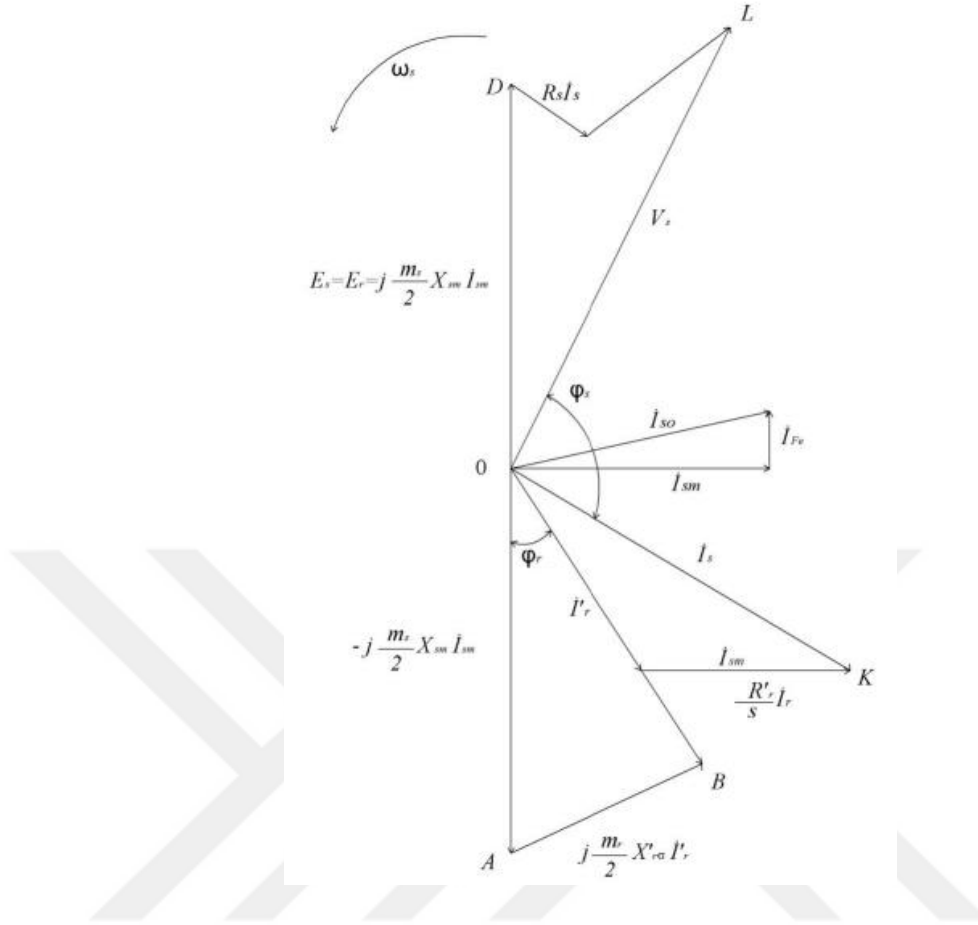
$$\hat{R}_r, R_s, \hat{I}_{sm}, X_{sm}, \frac{m_s}{2} X_{s\sigma}, \frac{m_r}{2} \hat{X}'_{r\sigma}, s, a = \frac{K_s N_s}{K_r N_r}$$

Değerleri biliniyor ise,

$$V_s, \hat{I}_r, \hat{I}_s, \psi_{sg}, \psi_{rg}$$

$$V_s, \hat{I}'_r, \hat{I}_s, \varphi_{sg}, \varphi_{rg}$$

değerleri bulunabilir.



Şekil 2.7 Asenkron Jeneratör Fazör Diyagramı

Fazörler fazör diyagramında ok yönünde bir dönüş sergilerler. Asenkron makine jeneratör modda çalışırken sargılarda endüklenen gerilim E_s , her zaman jeneratör uç gerilimi V_s den bir miktar önde bulunur.

2.3.2 Şebeken Bağımsız Çalışan Asenkron Jeneratör

Asenkron jeneratörler normalde mıknatıslanma akımı I_{sm} 'yi şebekeden çekerler. Endüktif bir karakterde olan bu akımı şebeke veya bir kondansatörden çekemezse makinede mıknatıslanma oluşmayacaktır. Bu yüzden şebekeden bağımsız çalışan asenkron jeneratörlerin terminal uçlarına kondansatör bağlanması zorunludur. Asenkron makinenin şebekeden bağımsız jeneratör modunda çalışması için gerekli koşullar;

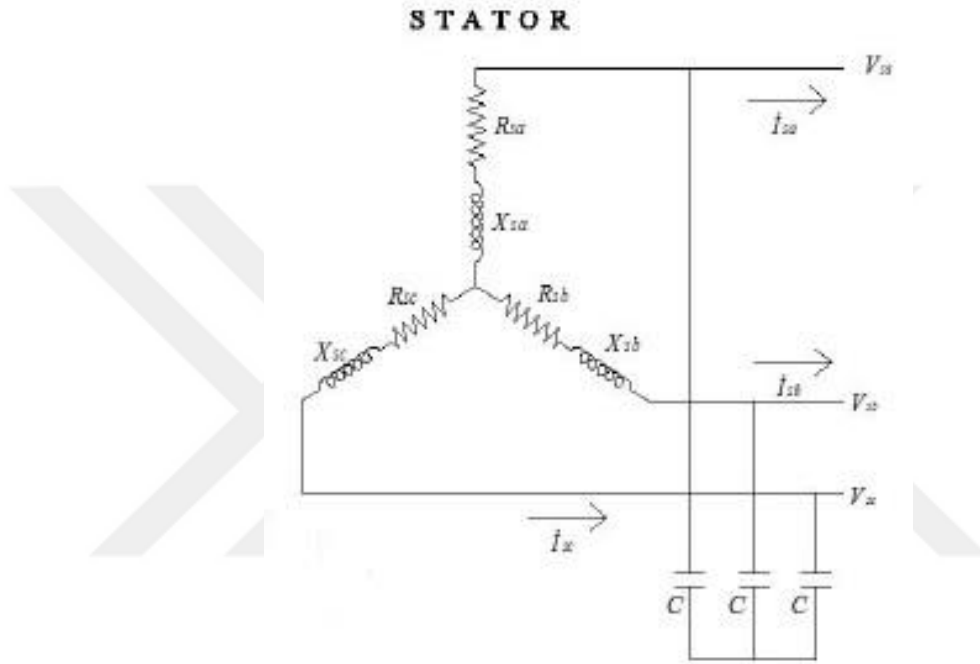
Makinenin rotorunun senkron hızın üstünde döndürülmesi,

Daha önceden rotorunda az miktarda kalıcı mıknatıslanma kalmış olması,

I_{sm} mıknatıslanma akımının stator sargılarına sağlanmasıdır.

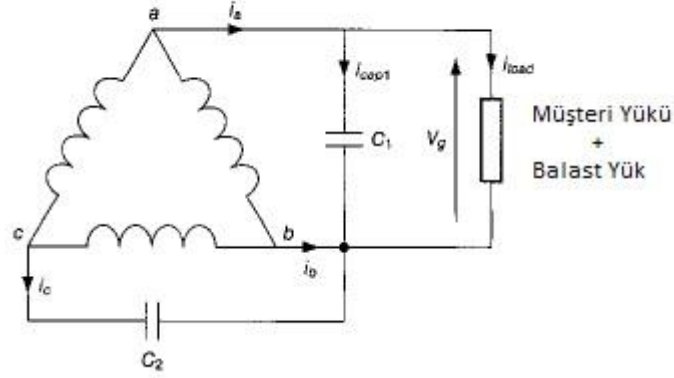
Eğer asenkron makinenin daha önce motor çalışması esnasında rotorunda kalıcı mıknatıslanma oluşmuş ise, diğer şartlar sağlandığında stator terminallerinde uç gerilimi oluşacaktır. Eğer kalıcı mıknatıslanma yok ise stator uçlarına düşük gerilimli DC gerilim birkaç saniyelikliğine bağlanarak bu mıknatıslanma oluşturulabilir.

Asenkron jeneratör uçlarına üç fazlı yükler bağlanacak ise jeneratör terminallerine de eşit kapasitelere sahip uyarma kondansatörü bağlamak gerekecektir.



Şekil 2.8 Üç Fazlı Asenkron Jeneratör Uyarım
Kondansatörü Bağlantısı

Eğer üç fazlı asenkron jeneratör tek fazlı yükleri beslemek için kullanılacak ise o zaman şekil 2.9'da görülen C-2C kondansatör bağlantısı kullanmak gerekecektir. Bu bağlantı şeklinde üç fazlı asenkron jeneratörün nominal gücünün %80'i ne kadar güç alınabilir (Smith N. , 2008).



Şekil 2.9 Üç Fazlı Jeneratörde C-2C Bağlantısı

Bu çalışmada tek fazlı yüklerin üç fazlı jeneratör vasıtası ile beslenmesi konu alınmıştır. Bu sebeple balast yük ve müşteri yükü aynı stator terminallerine bağlanmıştır.

Şekil 3.6 da gösterilen bağlantıda;

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{cap1} + \bar{I}_{load} \quad (2.69)$$

$$\bar{I}_b = -(\bar{I}_a - \bar{I}_c) \quad (2.70)$$

Şeklinde olacaktır.

Bu bağlantı şeklinde asenkron jeneratörün sargılarında üç fazlı çalışmadaki gibi dengeli bir akım akacaktır. Fazör diyagram şekil 3.7 de gösterildiği gibi olacaktır. V_a , V_b ve V_c dengeli ve aralarındaki açı farkı eşit olur.

$\Theta=60^\circ$ ve $|\bar{I}_c| = |\bar{I}_a|$ olur.

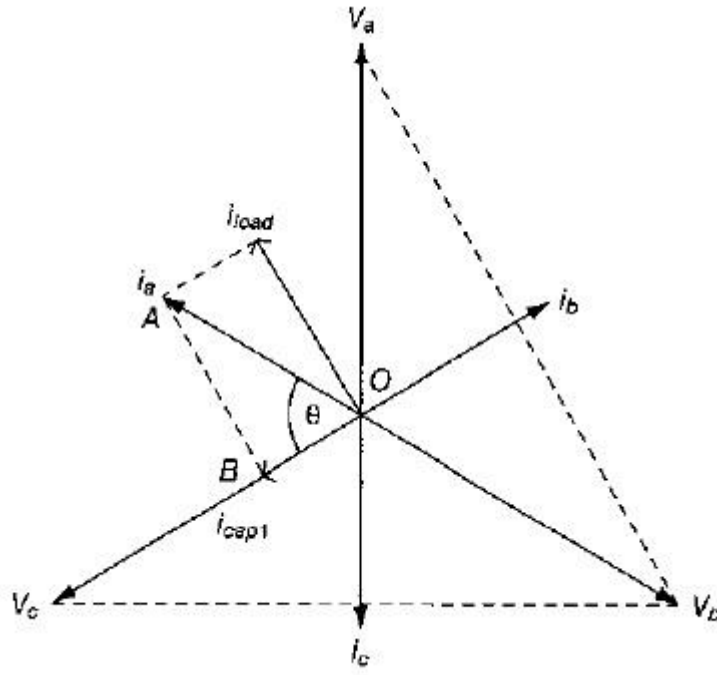
$$|\bar{I}_c| = 2 \cdot |\bar{I}_{cap1}| \quad (2.71)$$

$$|\bar{I}_{load}| = \sqrt{3} \cdot |\bar{I}_{cap1}| \quad (2.72)$$

C_1 kondansatör değeri denklem(2.72) den bulunacaktır. C_2 ise denklem (2.71) de görüleceği üzere $2C$ değerine eşit olur.

C-2c bağlantıya sahip asenkron jeneratörde çıkış gücü denklem (2.73) den elde edilir.

$$V_g \cdot \bar{I}_{load} = \sqrt{3} \cdot V_g \cdot \bar{I}_{cap1} = \sqrt{3} \cdot V_{g2} \cdot \omega C_1 \quad (2.73)$$



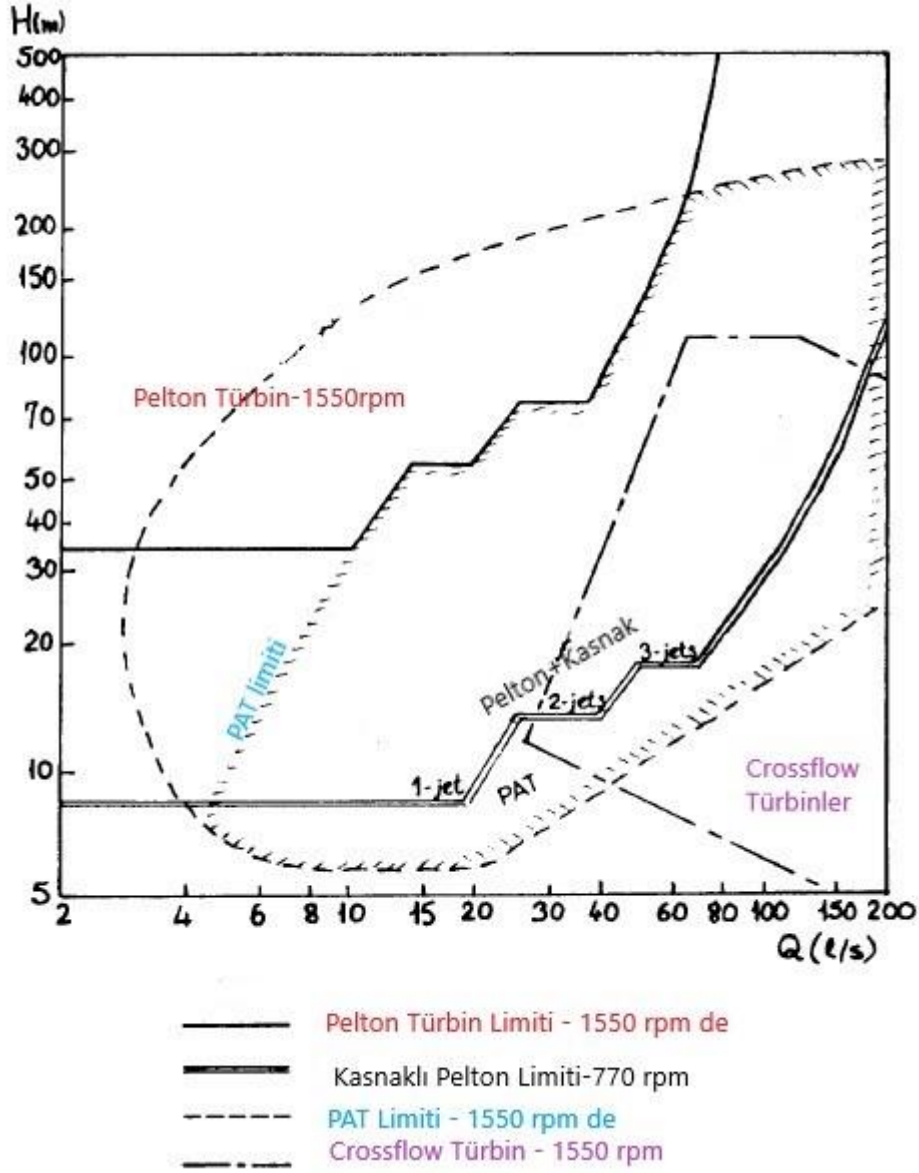
Şekil 2.10 C-2C Fazör Diyagramı

2.4 Santrifüj Pompaların Türbin Olarak Kullanımı

Küçük güçlerdeki hidroelektrik üretiminde standart santrifüj pompaların geleneksel hidrolik türbinler yerine kullanılmasının birçok avantajı bulunmaktadır.

- Pompa – motor ünitesi doğrudan türbin-jeneratör ünitesi olarak kullanılabilir.
- Çok değişken düşü ve debide çeşitleri bulunur.
- Fiyatları düşüktür.
- Çarkları, contaları ve motorların yedek parçaları yaygındır.
- Boru bağlantıları standarttır.

Santrifüj pompalarda çark doğrudan rotor şaftına bağlı olduğu için aktarma organı kaybı bu makineler için geçerli değildir. Bu aynı zamanda aktarma organı bakımlarının da olmayacağı manasına gelir. Bu tür sistemler şebekeden bağımsız çalışan jeneratörlerin yaşaması muhtemel aşırı devirlere de oldukça dayanıklıdır.



Şekil 2.11 Hidrolik Türbinler ve Santrifüj Pompaların (PAT) Türbin Olarak Kullanım Aralığı Kıyaslanması

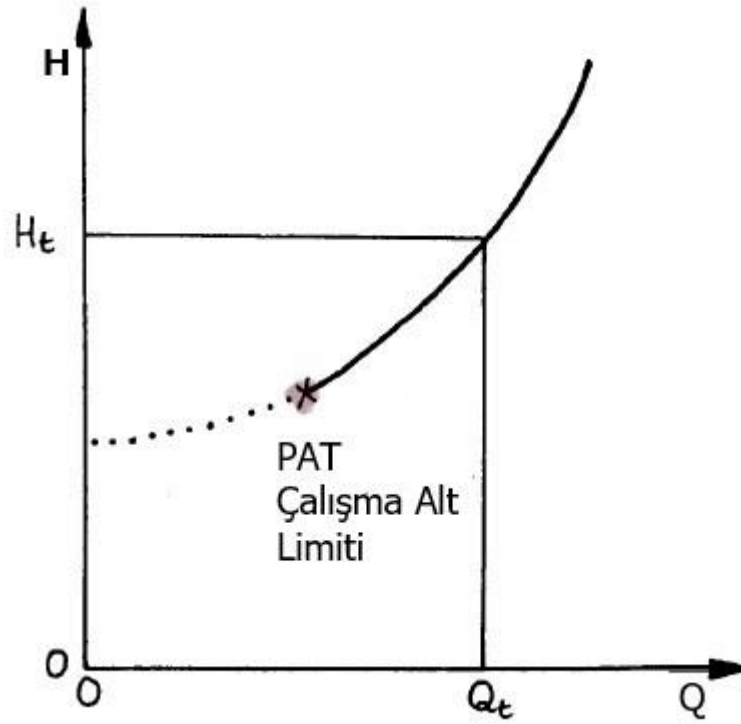
Değişik tipteki pompalar incelendiğinde ters çalışmada pompa olarak kullanımları ve verimlilik verileri ortaya çıkarılmıştır. Bu deneyimlere göre uçtan emişli santrifüj pompalar türbin olarak kullanıma en uygun olan türdür. Çift emişli olan modelleri ise daha az verimlidir. Salyangoz tipi yerine dairesel tipteki pompalar ise türbin olarak kullanıma uygun değildir. (Smith N. , 2008)

Türbin olarak kullanılacak santrifüj pompaların seçimi sırasında bazı detaylara dikkat edilmesinde fayda vardır.

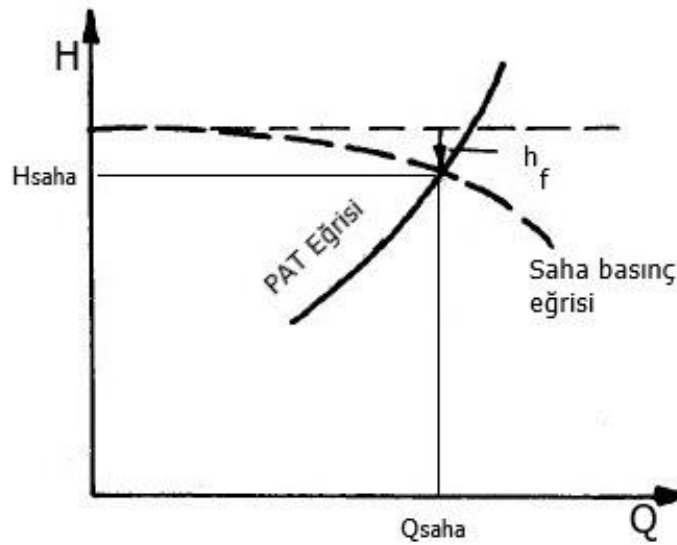
- a) Pompaların emiş kısımları açıldığı zaman çark ile salyangoz arasındaki boşluğun fazla olması, bu boşluktan kaçak su akışının fazla olmasına sebep olacaktır. Bu tür pompalar türbin olarak kullanıldıklarında verimsizliğe sebep olacaktır.
- b) Salyangoz kısmındaki döküm kalitesi suyun sürtünmesine etki edeceği için pürüzsüz olmasına dikkat edilmelidir. Aksi hale sürtünme kayıpları oluşacaktır.
- c) Pompa çarkında plastik malzemedan kaçınmakta fayda vardır. Bronz veya döküm demir çark malzemesi türbin uygulaması için uygun olacaktır.
- d) Şaft malzemesi sert olmalıdır. Bıçakla kolay çizilemeyen sertlikte bir malzeme olursa kolayca deforme olmadan uzun süre hizmet verebilecektir.
- e) Türbin olarak çalışan pompalarda aksiyel yükler daha az olacaktır. Ancak radial yükler daha fazla etki edecektir. Bu sebeple yeterince sağlam yataklaması olan pompaların tercih edilmesi gerekir.
- f) Pompa seçimi yapılırken yüksek hızlı pompalar seçilirse daha hafif ve küçük olacaklardır. Ancak düşük hızlı pompalar daha pahalı olmalarına karşılık çarkları ve yataklamaları daha az yıpranırlar ve daha uzun süre hizmet ederler.

Türbin olarak kullanılan santrifüj pompaların debileri, düşü arttıkça artacaktır. Bu tür makinelerde geleneksel türbinlerde var olan debi ayar kanatçıkları olmadığı için, türbinin hangi güçte çalışacağını, hidrolik sistemin kayıpları çıkıldıktan sonra kalan net düşü miktarı belirleyecektir. Şekil 2.12 de türbin olarak kullanılan santrifüj pompanın düşü- debi ilişkisi grafiği gösterilmiştir.

Şekil 2.12 deki H-Q grafiğine, sahanın net düşüsünü de gösterir bir başka eğri eklemek de mümkündür. Böylece bu iki eğrinin kesiştiği noktada türbinin hangi debi ve düşüde çalışacağı hesaplanabilecektir. Bu grafiğin örneği şekil 2.13 de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Türbin Olarak Kullanılan Pompanın (PAT) Düşü-Debi Grafiği

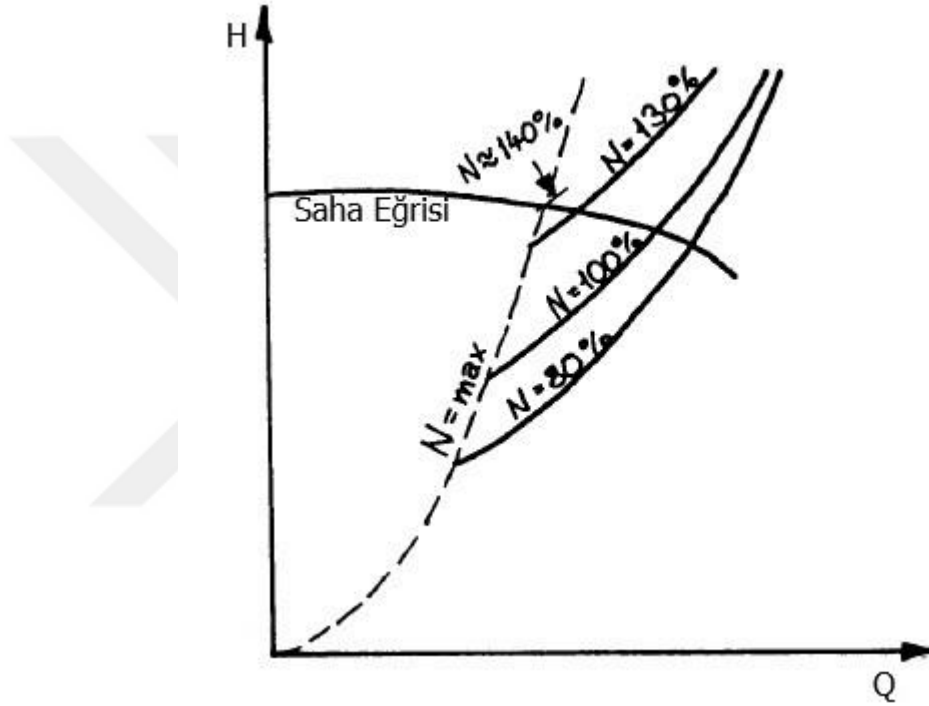


Şekil 2.13 Türbin ve Saha Eğrisi Kesişimi ile Çalışma Noktası Tespiti

Şekil 2.13 de H_{saha} olarak çizilen yükseklik, memba tarafındaki su alma yapısının su seviyesi ile, türbin mansap kuyruksuyu su seviyesi arasındaki yükseklik farkından, cebri boru sürtünme ve türbülans kayıplarının çıkartılarak hesaplanmış olan değerdir. Grafikten de görülebileceği üzere debi arttıkça sürtünme ve türbülans kayıpları da

artmakta ve h_f kayıp yüksekliği kadar düşüde azalma olmaktadır. Hsaha ve türbin Q-H grafiğinin kesişim noktası, sistemdeki türbinin gerçekte hangi debide çalışacağını bize gösterir ve çalışma noktası olarak adlandırılır.

Santrifuj pompalar türbin olarak kullanıldıklarında, debi ayarı için bir mekanik yapıları olmadığı için, türbine bağlı yük ile türbin hızında değişim oluşmaktadır. Değişen yük durumları için türbin eğrileri grafiğe işlendiğinde, her türbin yükü için farklı bir çalışma noktası ortaya çıkacaktır.



Şekil 2.14 Değişik Yük Durumlarında Türbin Çalışma Noktası Değişimi

Türbinin dizayn çalışma noktasının %20 altında ve %30 üzerinde iki farklı yük durumuna ait değerler de grafiğe eklendiğinde şekil 2.14 deki gibi bir durum ortaya çıkmaktadır. Grafikte görüldüğü üzere yük azaldıkça türbin hızı artmaktadır. Eğer türbin üzerindeki yük sıfır ise bu durumda türbinin çıkabileceği en yüksek hıza türbin kaçış hızı (runaway) denir. Ve kaçış hızının grafikte görülen saha şartlarında nominal hızın %140'ı kadar olduğu görülmektedir.

2.4.1 Türbin Olarak Çalışan Pompanın Denklemleri

Türbin olarak çalışan santrifuj pompalarda en verimli çalışma noktası yaklaşık aynı olmasına rağmen, çıkış gücü ve debisinde değişiklikler oluşmaktadır. Çalışma düşüsü

giriş su yüksekliği ile çıkış su yüksekliği arasındaki farktan, kayıpların düşülmüş değeridir. Bu değer pompanın kısmı yükte çalışmasına göre değişiklik gösterecektir. Bir pompa türbin olarak kullanılacakken, saha debi-düşü değerlerinde iken, türbinin en verimli bölgesine yakın bir noktada çalışacak şekilde seçimi yapılmalıdır.

$$Q_t = \frac{Q_{bep}}{\eta_{max}}, H_t = \frac{H_{bep}}{\eta_{max}}, \eta_t = \eta_{max} \quad (2.74)$$

Denklem (2.74) deki Q_t türbin olarak çalışan pompanın en verimli noktadaki debisini, Q_{bep} pompa olarak çalışmada en verimli çalışma noktası debi değerini, η_{max} pompanın en yüksek verim değerini, H_{bep} en verimli çalışma bölgesi düşüsünü, H_t türbin olarak çalışan pompanın düşü değerini göstermektedir.

Bu ideal denklemlerde $\frac{Q_t}{Q_{bep}}$ ve $\frac{H_t}{H_{bep}}$ değerleri aynı sonucu veriyor olsa da, uygulamada bu değerler arasında bir miktar fark oluşmaktadır. Düşü oranı türbin çalışma modunda debi oranından daha fazla olduğu ölçülmektedir. (Smith N. , 2008)

Eğer türbin hızı pompa hızına eşit ise, pompa değerlerini türbin değerlerine çevirmek için denklem (2.75) kullanılmalıdır.

$$Q_t = \frac{Q_{bep}}{\eta_{max}^{0,8}}, H_t = \frac{H_{bep}}{\eta_{max}^{1,2}} \quad (2.75)$$

Fakat genellikle türbin çalışma hızı ile pompa çalışma hızları aynı olamamaktadır. Bu sebeple doğru sonuca ulaşmak için başka denklemlerin de hesaba katılması gerekmektedir. Affinity Kanunu denilen eşitlikler, bir santrifüj pompanın debi, düşü, devir sayısı ve gücü gibi değişkenlerinin diğer değişkenler ile aralarındaki ilişkisini gösterir. Bu eşitliklere göre;

Akış (Q) pompa devri ile orantılıdır (N),

Düşü (H) pompa devrinin karesi ile orantılıdır (N^2),

Güç (P) pompa devrinin küpü ile orantılıdır (N^3),

İşte bu eşitsizlikler ile pompa veya türbinin en verimli çalışma bölgesinin belirlenmesi mümkün olur.

$$Q_t(N = N_t \text{ iken}) = \frac{N_t}{N_p} \times Q_t(N = N_p \text{ iken}) \quad (2.76)$$

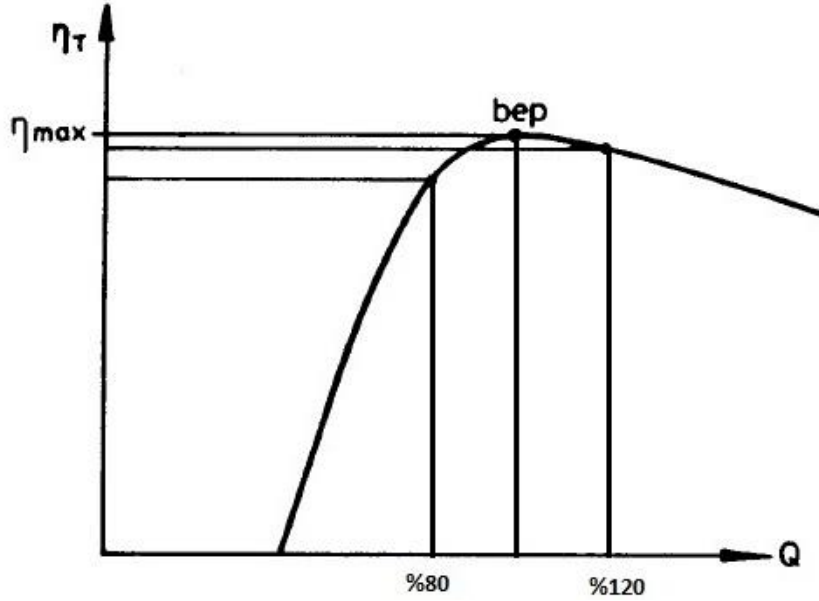
$$H_t(N = N_t \text{ iken}) = \left[\frac{N_t}{N_p} \right]^2 \times H_t(N = N_p \text{ iken}) \quad (2.77)$$

(2.76) ve (2.77) denklemlerindeki

N_p pompa durumundaki santrifüj makinenin devir sayısı, N_t ise türbin durumundaki santrifüj makinenin devir sayısını göstermektedir. Bu eşitlikler denklem (2.75) ile birleştirildiğinde (2.78) elde edilir.

$$Q_t = \frac{N_t}{N_p} \frac{Q_{bep}}{\eta_{max}^{0,8}}, \quad H_t = \left[\frac{N_t}{N_p} \right]^2 \frac{H_{bep}}{\eta_{max}^{1,2}} \quad (2.78)$$

Şekil 2.15 de türbin olarak çalışan bir santrifüj pompanın verim eğrisi görülmektedir. Dizayn debisinde maksimum verimi elde eden türbin, dizayn debisinin üzerine çıkıldıkça gücü artmasına rağmen verimde azalmaya başlar. Yine de dizayn debisinin %120 fazlasındaki verim, dizayn debisinin %80'ninden daha fazla olacaktır.



Şekil 2.15 Türbin Olarak Çalışan Pompanın Verim Eğrisi

2.5 Asenkron Jeneratör Kontrol Yöntemleri

Asenkron jeneratörler genellikle şebeke bağlantılı sistemlerde kullanılırlar. Şebekeye bağlı çalışmalarının getirdiği bazı kolaylıklar bulunmaktadır. Stator gerilim kaynağına bağlı olduğu için zaten mıknatıslanma akımı şebekeden alınmaktadır. Şebekeye bağlı çalışmanın getirdiği bir avantaj da frekansın şebeke tarafından kontrol edilmesidir.

Asenkron jeneratörler hidrolik türbinler gibi sürekli ve sabit bir tork ile beslenebiliyor ise, enerji üretmesi şebeke senkron devrinin üzerine çıkması yeterli olacaktır. Ancak günümüzde asenkron jeneratörlerin hafif ve sağlam yapısı sebebi ile genellikle rüzgâr türbinlerinde kullanıldığını görmekteyiz.

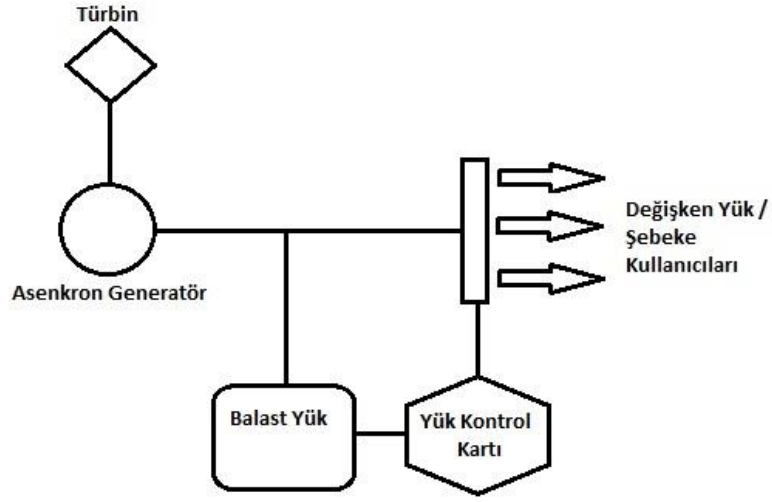
Rüzgâr türbinlerinde asenkron jeneratörün devri rüzgâr hızı ile sürekli olarak değişeceği için çıkış frekansını ve gücünü kontrol altına tutmak için özel yöntemler ile rotoru sargılı asenkron jeneratör kullanmak yaygındır. Rotor sargılarına uygulanan gerilimin frekansı değiştirilerek asenkron jeneratör stator gerilim uç frekansını kontrol etmek mümkündür.

Bununla beraber rotoru kısa devre asenkron jeneratörlerin ürettiği enerji doğrultma işleminden geçirildikten sonra inverterler vasıtası ile de şebekeye verilen sistemler de vardır.

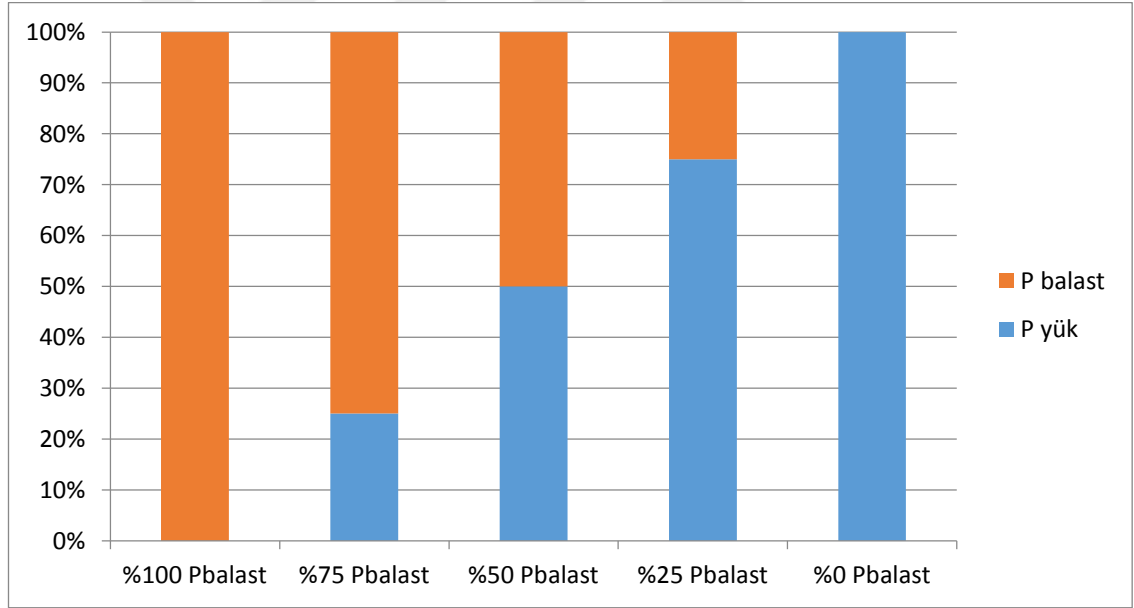
Şebekeden bağımsız çalışan asenkron jeneratörleri kontrol etmek ise daha zordur. Mıknatıslanma akımının sağlanması gerekliliği, stator gerilim ve frekansının jeneratör devrine ve değişken yük durumunda etkilenmesi kontrol işlemini zorlaştırmaktadır.

Santrifüj pompaların türbin jeneratör seti olarak kullanılması ise daha çok şebekeden uzak yerlerde ve maliyet etkin işlerde karşımıza çıkmaktadır. Bu tür sistemlerde kontrol sisteminin çok karmaşık ve hassas olması, bakım ve işletme zorluklarını da beraberinde getirmektedir. Bu tür kullanımlarda kontrol yönteminin ucuz, sağlam ve bakım gereksiniminin olamaması gerekir ki, asenkron jeneratörlerin senkron jeneratöre olan avantajları kaybedilmemiş olsun.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan kontrol yöntemi asenkron jeneratör çıkış yükünün sabit tutulması sureti ile jeneratör çıkış geriliminde ve frekansında meydana gelen değişimin sınırlandırılmasına dayanmaktadır.



Şekil 2.16 Temel Yük Kontrol Kartı Şematik Diyagram



Şekil 2.17 Yük ve Balast Arasında Yük Dağılımı ile Gücün Sabit Tutulması

Şekil 2.17 de görüleceği üzere temel yük kontrol kartının yapması gereken, jeneratöre bağlı değişken yük durumlarında, yükteki değişim büyüklüğünde ama ters yönde bir balast yük devreye alıp çıkartarak, toplam jeneratör gücünün sabit kalmasını sağlamaktır.

Bazı yük kontrol kartlarında asenkron jeneratörün ikazlama miktarı, ikazlama kapasitör bankları ile değiştirilerek voltaj regülasyonu sağlarken, bir taraftan da

rezistif yük bankaları ile de frekans regülasyonu yapabilmektedir. Bu tür kontrol kartları yapı olarak daha karmaşık ve işletmesi zordur. Bu durum asenkron jeneratörün pratikliği, işletme kolaylığı ve ucuzluğu mantığına aykırı düşmektedir. Asenkron jeneratör için tasarlanan kontrol kartının geniş kullanım alanına ulaşması için basit ve işlevsel olmalı, bakım gereksinimi az ve erişilebilir bir fiyatı olmalıdır.

Zaten asenkron jeneratörün yapısı gereği, terminal uç gerilimini referans kabul ederek rezistif yükleri balast olarak kullanıp jeneratör gerilimini sabit tuttuğunuzda, aynı zamanda jeneratör frekansı da sabitlenmiş olmaktadır.

Jeneratör yüküne rezistif bir yük bağlandığında, jeneratör terminal geriliminde bir düşme olacaktır. Yük kontrol kartı bu gerilim düşmesini hissederek gerekli müdahaleyi yapar ve aynı miktarda balast yükü devre dışı bırakır. Yük kontrol kartı durumu algılayıp işlemi gerçekleştirene kadar geçici bir süre frekans ve gerilimde düşme olacaktır, ancak kısa süre sonra gerilim de frekans da eski orijinal durumlarına dönecektir. Jeneratör yükü ise yük değişiminden önceki durumla aynı değerde olacaktır.

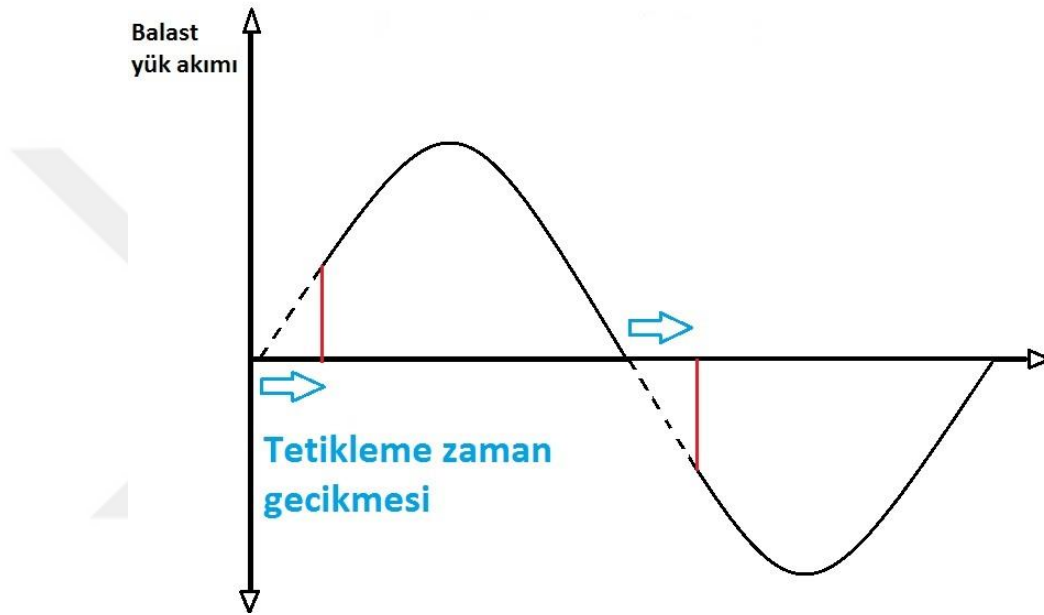
Eğer jeneratöre Endüktif bir yük bağlanırsa, terminal geriliminde yine bir düşme olacaktır ve yük kontrol kartı yine gerilimi eski haline getirmek için balast yüklerin bir kısmını devreden çıkartacaktır. Bu düşüş eskisinden jeneratör yükünde ve dolayısı ile türbin yükünde bir düşmeye yol açar ve türbin hızında ve jeneratör frekansında bir yükselme olur. Jeneratör frekansı yükseldiğinde jeneratör mıknatıslanma akımı düşer ve kapasitelere giden akım artar. Sonuç olarak terminal gerilimi eski haline geri gelecektir. Bu durumda frekanstaki artış miktarı sınırlı kalacaktır ve %10 sınırının altında kalacaktır. Bu durum güç faktörü 0,9 olan yükler için geçerlidir. Eğer çok daha büyük Endüktif yükler bağlanır ise, kapasitif düzeltme zorunlu hale gelecektir.

2.5.1 Faz Açısı Sistemi İle Çalışan Kontrol Kartları

Triak veya tristörlerin gecikmeli şekilde tetiklenmesi ile rezistif balast yükler üzerindeki gerilim değişeceğinden, değişken bir yük kontrolü sağlamak mümkün olmaktadır. Her yarım periyot için α miktarındaki bir gecikme değerine sahip ve açısı 0 ila 180 derece arasında değişebilen tetikleme ile anahtarlama elemanları sürülmektedir.

Bu kontrol yöntemi genellikle senkron jeneratörlerde kullanılan yük kontrol yöntemidir. Bu işlemde gerilim ve akım arasında zaman gecikmesi olması asenkron jeneratör için istenilen bir durum değildir çünkü jeneratör frekansında değişime yol açmaktadır.

Bir diğer dezavantajı ise tetiklemeden kaynaklı gerilim bozulmalarının yaşanmasıdır ki buda jeneratörün fazladan ısınması manasına gelmektedir. Bu dezavantajı telafi etmek için jeneratör gücü daha büyük seçilmelidir.

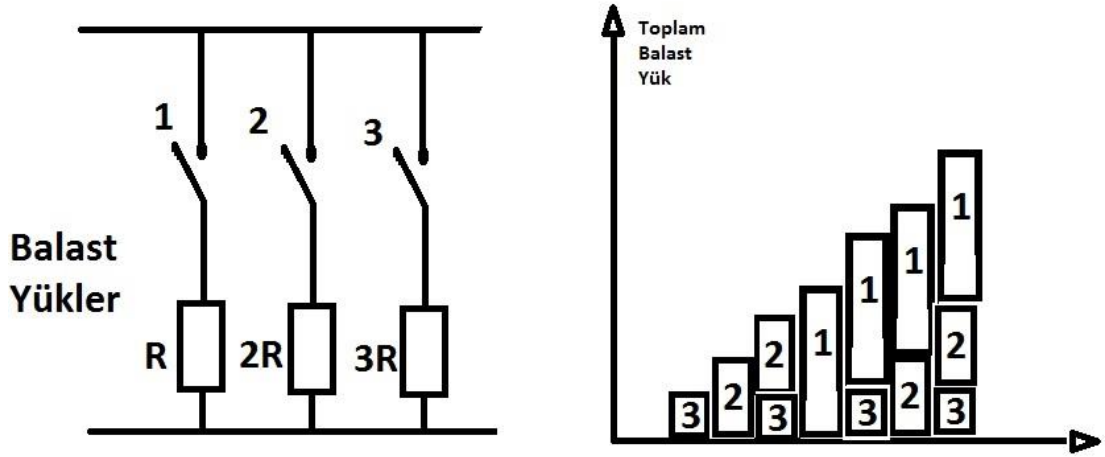


Şekil 2.18 Faz Açığı Kontrol Sistemi

2.5.2 Kademeli Yükler Sistemi İle Çalışan Kontrol Kartları

Bu mantıkta çalışan yük kontrol kartları, farklı büyüklüklere sahip balast yükleri farklı kombinasyonlarda devreye alarak değişken balast güç elde ederler. Binary mantığı ile boyutlandırılan balast yük kademeleri, en büyük miktardaki değişimi en az sayıda balast yük bankası ile yapmayı sağlamaktadır.

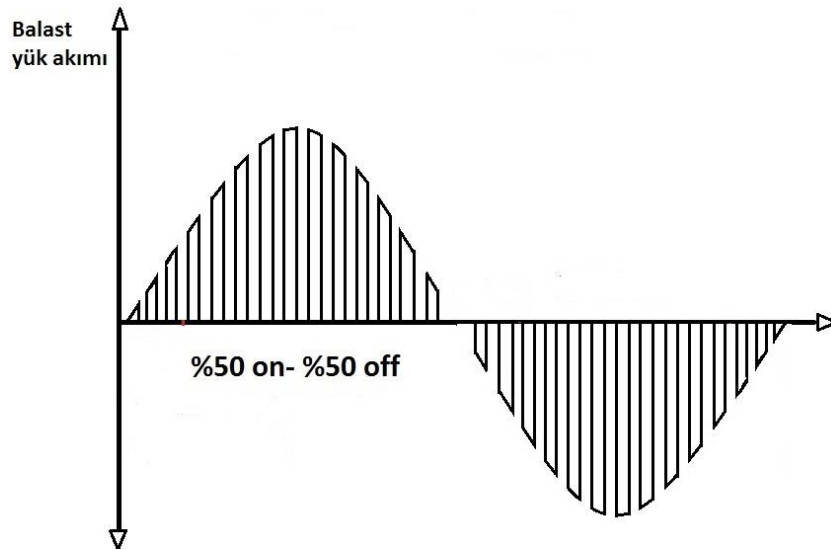
Bu kontrol yönteminin avantajı, jeneratör voltajında harmonik bozulmaya sebep olmamasıdır. Dezavantajı ise birçok kademeli anahtarlama elemanına ve balast yük bankasına ihtiyaç vardır. Buna rağmen istenilen kadar çok kademe sağlanamayacağı için jeneratörün gerilim regülasyonu daha geniş bir bandın içerisinde ancak sabit tutulabilmektedir. Bunun sonucu olarak voltaj regülasyonu performansı diğer kontrol yöntemlerine nazaran iyi değildir.



Şekil 2.19 Kademeli Yük Kontrol Sistemi

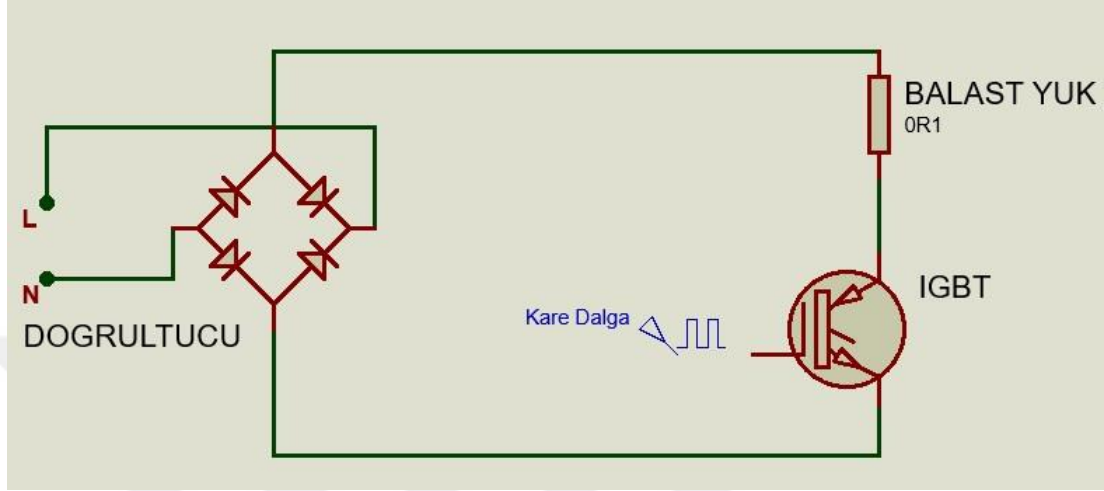
2.5.3 Değişken Kare Dalga (Mark Space Ratio) Yöntemi ile Çalışan Kontrol Kartları

Bu tip kontrol kartları basit yapıları sayesinde tek bir balast yükü istenilen değişken aralıklarda balast yük olarak kullanır. Kare dalga formunda ürettiği sinyal ile doğrultucunun arkasına bağlanmış bir transistor anahtarlama elamanı olarak kullanılır. Transistor kare dalganın genişliğine göre balast yükü enerjilendirir veya enerjisiz bırakır. Böylece balast yük 0-100% arasında değişebilen aralıklarda yüklenebilmektedir.



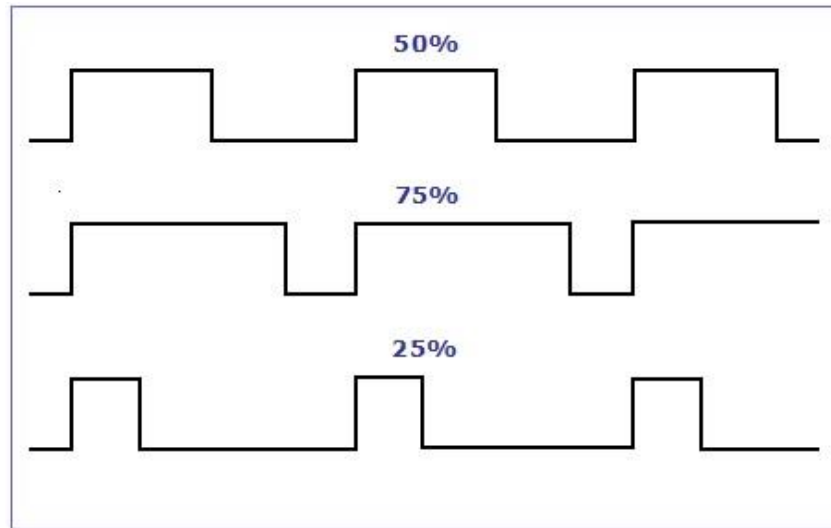
Şekil 2.20 Değişken Kare Dalga Yöntemi

Bu tür yük kontrol kartlarının avantajı voltaj regülasyonunun başarılı olmasıdır. Aynı zamanda bağlantıları basittir ve sağlamdır. Bu sebeple dünya üzerinde birçok şebekeden bağımsız asenkron jeneratörün yük kontrol kartında bu yöntem kullanılmaktadır.



Şekil 2.20 Mark Space Ratio Sürücüsü

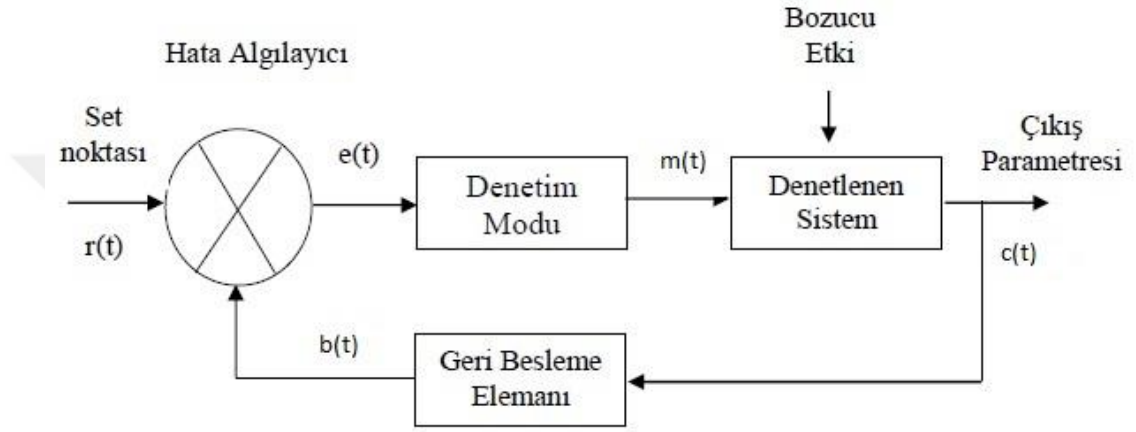
Bu modülasyon tekniği tek fazlı jeneratörlerde uygulanabildiği gibi, üç fazlı jeneratörlerde de uygulayabilmektedir. Sadece kontrol kartındaki doğrultucu sistemdeki diyot sayıları artırılarak üç fazlı jeneratörün kontrolünü yapmak mümkündür.



Şekil 2.21 Değişken Oranlarda Kare Dalga Sinyali

3. PID KONTROL SİSTEMLERİ

PID kontrol yöntemi kapalı çevrim kontrol sistemidir. Kapalı çevrim sistemlerde çıkış elemanı üzerinden alınan çıkış sinyalinin değerlendirilebilir kısmı, belirlenen bir referans değeri ile karşılaştırılır. Elde edilen hata sinyaline ve kontrol edilen sistemin gereksinimlerine göre bir denetim sinyali oluşturulur. Denetim modu ünitesi P, PI veya PD kontrol modlarından bir veya birkaçını kullanacak şekilde oluşturulabilir.



Şekil 3.1 Kapalı Devre Kontrol Sistemi Blok Şeması

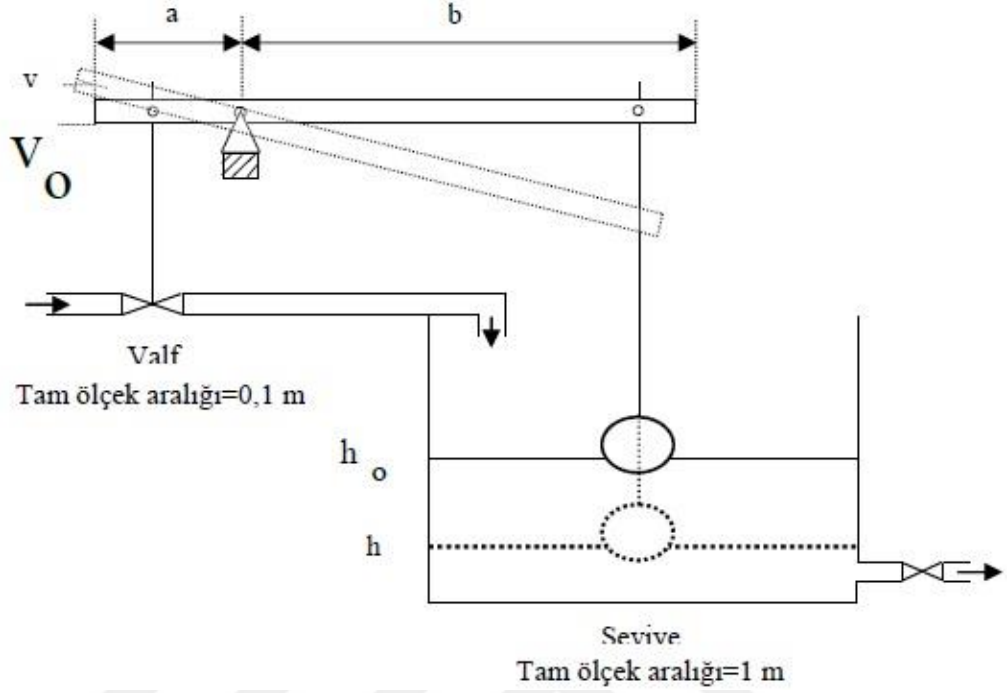
Kapalı devre kontrol yönteminin açık devre kontrol yönteminden farkı, açık devre kontrol sisteminde oluşan histerisis bölgelerinin oluşmamasıdır. Kapalı devre kontrol sistemleri hızlı çalışırlar bu yüzden hızlı cevabın önemli olduğu sistemlerde kullanılmaları avantajlıdır.

3.1 Oransal (P) Kontrol Yöntemi

P tipi Oransal kontrol sistemlerinde kontrolör, çıkışındaki hata sinyali $e(t)$ ile orantılı bir çıkış sinyaline sahiptir ve çıkış sinyali süreklidir. Kontrolör, ölçme devresinden aldığı mevcut çıkış sinyali bilgisine göre yeni bir çıkış sinyali üretir ve sürücü elemana bu sinyali iletir. Sürücünün yeni sinyale vereceği tepki sistem çıkışında bir çıkış sinyali üretecek ve çıkış sinyalini takip eden ölçme devresi ise yeni çıkış sinyalini tekrar kontrolöre gönderecektir. Böylece kapalı çevrim tamamlanmış olur.

Denetlenen denetim sistemi ile son çıkış sinyali arasında sabit bir ilişki vardır. Şekil 3.2 de oransal kontrol sistemine örnek bir uygulama gösterilmiştir. Bu uygulamada su deposu seviyesi şamandıra ile mekanik olarak ölçülmekte ve bir kaldıraç kolu

vasıtası ile depo önündeki vananın açıklığı değiştirilmektedir. Kaldıraç kolunun oranı sistemin kazancıdır.

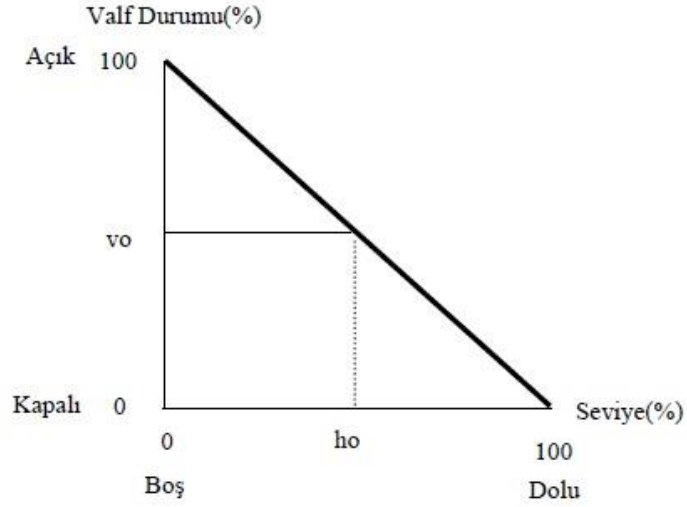


Şekil 3.2 Oransal Kontrol Sistemi Örneği

Bu örnekte hata sinyali (e)= h_0-h dır. İstenilen su seviyesi h_0 dır. İstenilen su seviyesindeki valf pozisyonunda v_0 dır.

$$Kazanç (Kp) = \frac{1000(v-v_0)}{100(h_0-h)} = 10 \frac{(v-v_0)}{(h_0-h)} = 10 \left(\frac{a}{b}\right) \quad (3.1)$$

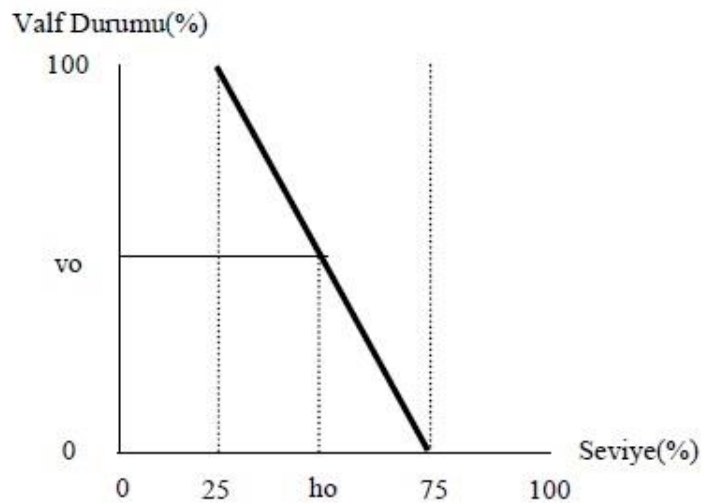
Eğer b kolu a kolunun 10 katı yapılırsa $K_p=10(0.1)=1$ olacaktır. Ve giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki etki şekil 3.3 de görüldüğü gibi ortaya çıkar. Oransal kazanç $K_p=1$ iken çıkış su seviyesi %0 iken valf pozisyonu %100, çıkış su seviyesi %100 iken giriş valf pozisyonu ise %0 olacaktır.



Şekil 3.3 $K_p=1$ İken Su Seviyesi ve Valf Durumu Arasındaki İlişki Grafiği

Eğer b kolu a kolunun 5 katı yapılırsa kazanç $K_p=2$ olacaktır. Böyle bir durumda şekil 6.4 de görüleceği şekilde su seviyesi %25 iken vana tam açık konuma gelecek, su seviyesi %75 e ulaştığında ise vana seviyesi tam kapanacaktır. Bu kazanç oranı ile depo seviyesinde düşme yaşandığında vana daha erken açılacağı için istenilen h_0 seviyesine ulaşma süresi azalacaktır ama h_0 seviyesi civarındaki su seviyesi salınımı artacaktır.

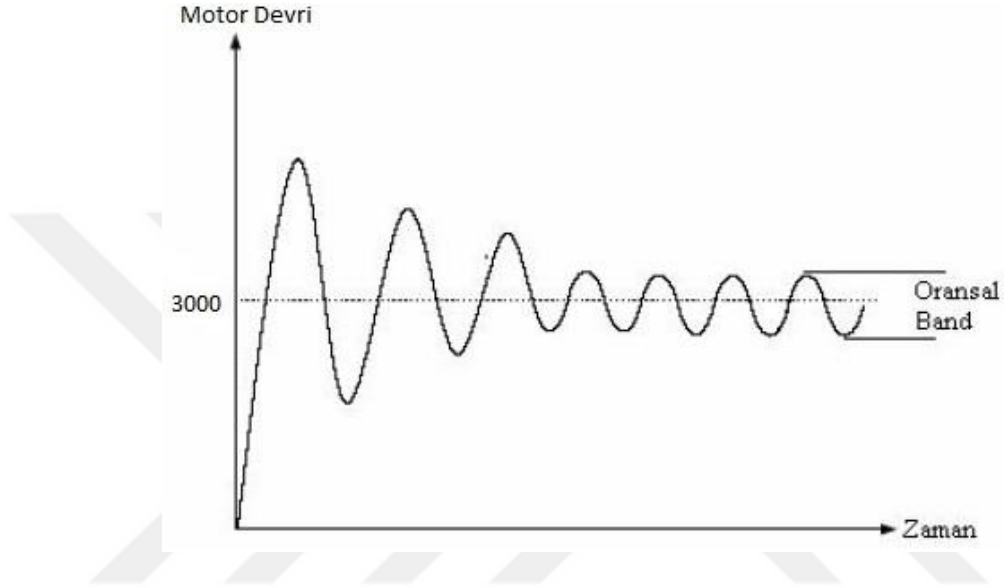
Sonuç olarak K_p kazanç miktarı arttığında hata sinyali daha kısa sürede telafi edilir ama sürekli durum hatasında artış olur.



Şekil 3.4 $K_p=2$ İken Su Seviyesi ve Valf Durumu Arasındaki İlişki

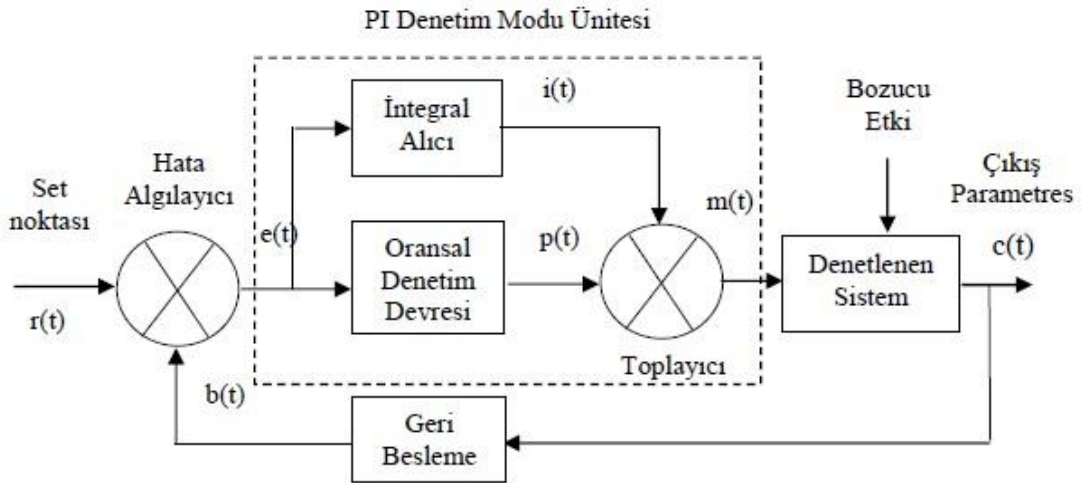
K_p değeri sistemde osilasyona sebep vermeyecek en büyük değere ayarlanmalıdır.

Oransal kontrol sistemlerinde çıkış sinyalinde sürekli osilasyonlar oluşmaktadır. Bu kalıcı hataya Oransal Bant adı verilir ve PB ile temsil edilir. Örnek olarak 3000 devirde sabit tutulmak istenilen bir DC motorun oransal kontrol sistemi motoru 2900 ve 3100 devirleri arasında tutabiliyor ise bu oransal sistemin oransal bandı $PB=200/3000=0,066$ yani %6.6 dır.



Şekil 3.5 Oransal Bandın Gösterimi

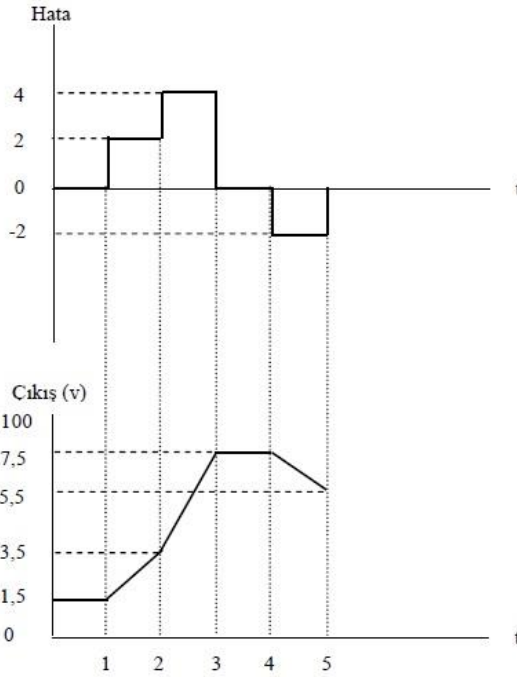
3.2 Oransal İntegral (PI) Kontrol Yöntemi



Şekil 3.6 PI Kontrol Sistemi Şeması

İntegral kontrol sisteminde, kontrolör çıkış sinyalini, sistemdeki hata miktarının integralini alarak düzenler. Çıkış hatasının integralinin alınması, çıkış sinyalindeki kalıcı durum hatasının sönmüneceği bir kontrol çıkış sinyali üretilmesi demektir.

Sistemde hata olduğu sürece çıkış sinyalinde de bir değişim olacaktır. Şekil 3.7 de sistem hatasını ve kontrol sistemi integral etkisini gösteren grafik görülmektedir.



Şekil 3.7 Hata Sinyali ve İntegral Etkisi

İntegral etkisinin dez avantajı sistem çıkış sinyalinin osilasyon eğilimde artışa sebep olmasıdır. Oransal sistemin kazancı integral etki ile birleştiğinde, K_p değeri azaltılmalıdır. Ayrıca çıkış hata sinyali set değerine ulaştığında oransal etki sıfırlanmasına rağmen, eski hatalardan kaynaklı integral etki çıkış sinyalinden etki etmeye devam eder.

İntegral kontrol sistemin çıkış sinyali $\dot{I}(t)$ aşağıdaki gibi gösterilir.

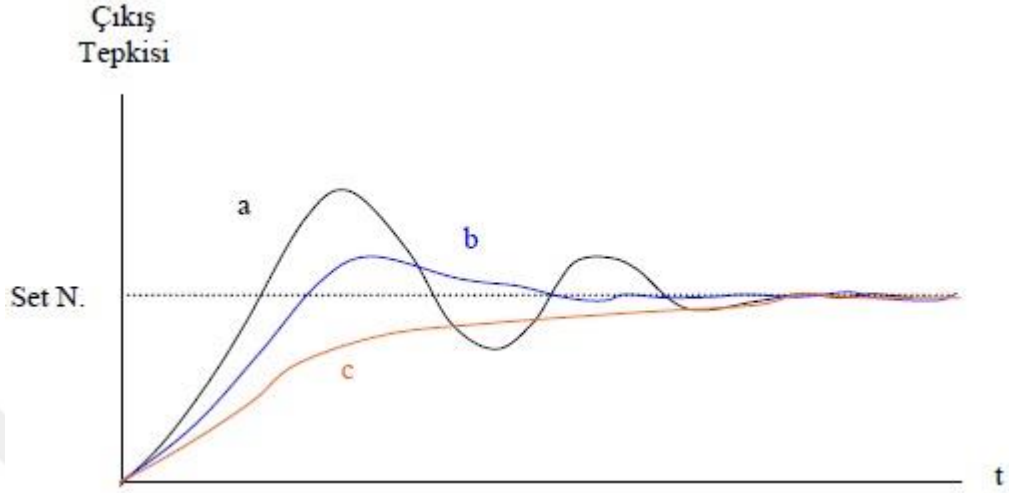
$$\dot{I}(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.2)$$

$$p(t) = K_p e(t) \quad (3.3)$$

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + V_0 \quad (3.4)$$

Şekil 3.8 de PI oransal integral kontrol algoritması kullanan bir kontrol sisteminin çıkış grafikleri ve aralarındaki farklar görülmektedir. C eğrisinde integral zaman sabiti çok uzun olduğu için yani integral kazancı düşük olduğu için ($t_i=1/K_i$) sistemdeki çıkış kalıcı hatasının sönümlenmesinde çok uzun sürmektedir. A eğrisinde ise integral zaman sabiti çok kısadır, yani kalıcı durum hatası çok kısa

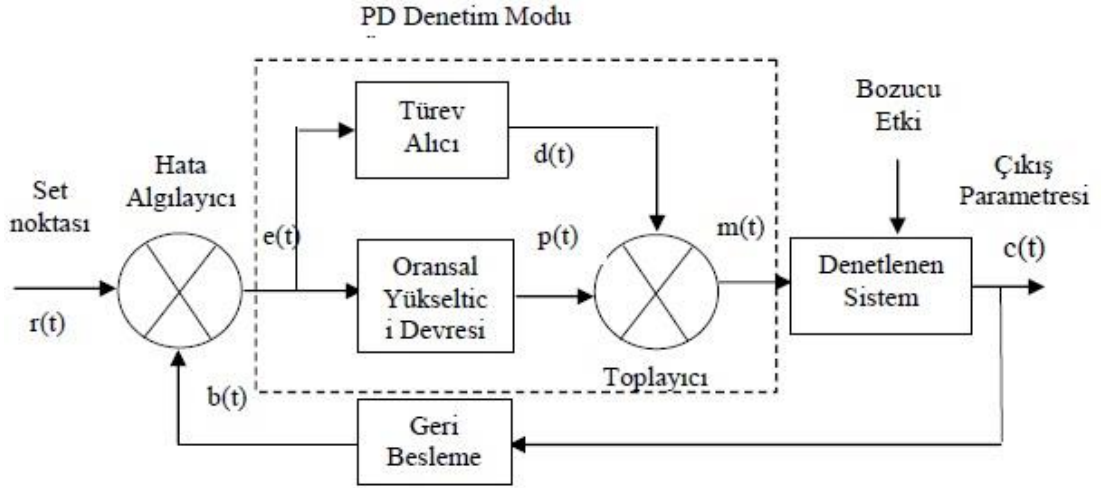
sürede telafi edilir ama sistem osilasyonu bir miktar devam eder. B eğrisi ise optimum değerdir. Sistem az miktarda set değerini üstüne çıkar ama kısa sürede kalıcı hatayı bertaraf eder.



Şekil 3.8 PI Kontrol Sistemi Çıkış Grafiği

3.3 Oransal Türev (PD) Kontrol Yöntemi

Kontrol sisteminin türev etkisi, hata sinyalinin değişim hızı miktarına göre çıkış sinyalini değiştirmektedir. Referans set değeri veya ölçülen hata sinyalinden bir tanesi değiştiğinde türev etkisi aktif hale gelecek ve çıkış sinyalinde bir etkiye sahip olacaktır. Eğer hata sinyalinde sabit bir hata var ise, türev etkisi bu hatayı bertaraf etmeye yarayan herhangi bir düzeltme işlemi gerçekleştiremez. Bu sebeple genellikle oransal veya oransal integral kontrol sistemleri ile birlikte kullanılırlar ve tek başına türev kontrol sistemi olarak kullanılamaz.



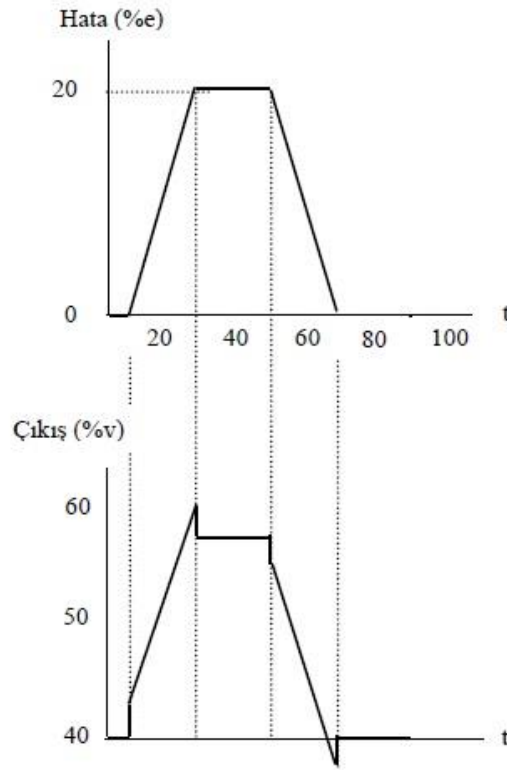
Şekil 3.9 PD Oransal Türev Kontrol Sistemi Blok Şeması

PD kontrol sisteminde Set bilgisi ile geri beslemeden ölçülen sinyal arasındaki farkın türevi alınır. Türevin asıl etkisi kontrol sisteminden kaynaklı üst aşım (overshoot) ve alt düşüm (undershoot) etkisini azaltmasıdır. Türev kontrol sistemi oransal kontrol sistemi ile birlikte kullanıldıklarında sistemin osilasyon eğiliminde azalma görülür ve daha yüksek kazanç değerlerine çıkılabilmeye olanak sağlanmış olur. Türev etkisi hata sinyalinin gelecekteki büyüklüğünü hisseder ve henüz hata sinyalinde artış oluşmadan türev etki hatadaki artışı sönmüleyecek bir etki ortaya koyar. Bundan dolayı hızlı cevap verilmesi gereken sistemlerde türev etkinin oransal sistemler ile kullanılmasının faydası ortaya çıkar. PD oransal türev kontrol sisteminin eşitlikleri aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

$$d(t) = Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

$$p(t) = Kp e(t) \quad (3.6)$$

$$m(t) = Kp e(t) + Kd \frac{de(t)}{dt} + V0 \quad (3.7)$$

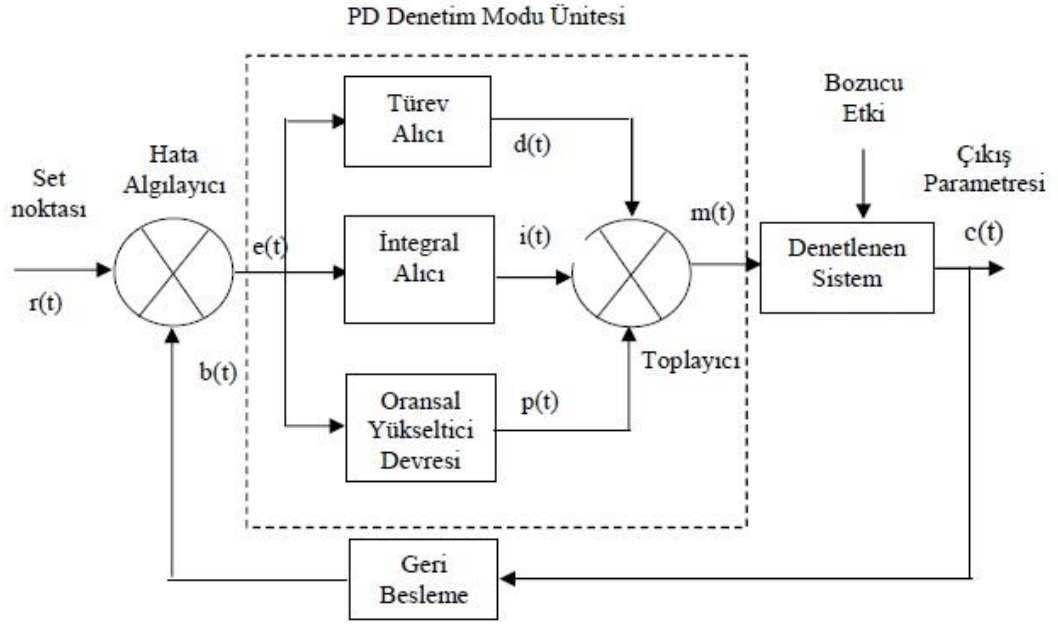


Şekil 3.10 Hata Sinyali ve Türev Etkisi

3.4 Oransal İntegral Türev (PID) Kontrol Yöntemi

Oransal, integral ve türev bileşenleri ihtiva eden kontrol sistemlerine PID kontrol sistemleri denilir. İntegral fonksiyonu büyük yük değişimlerinin oluşturacağı hatayı bertaraf etmek için kullanılır. Türev fonksiyonu da sistemin osilasyona girme eğilimini azaltan bir karakter oluşturur. Türev yöntemi, eğer sistemdeki ani yük değişimleri fazla ise sistem kararlı çalışması için kullanılır. Eğer tasarlanan kontrol kartında bir veya iki kontrol fonksiyonları sistem kontrolünde istenilen kontrol performansını sunamıyor ise PID kontrol fonksiyonunu kullanmak gerekir.

PID kontrol sisteminde hata sinyalinin $e(t)$ nin türevi ve integrali alınır. Oransal kazançtan geçen hata sinyali ile türev ve integral den geçen hata sinyalleri toplanır. Türev fonksiyonu üst ve alt aşımı önlerken, kalıcı hatayı da integral sistemi önlediği için, oransal kazanç K_p de normalin üstünde değerler kullanılması mümkün olacaktır.



Şekil 3.11 PID Oransal İntegral Türev Kontrol Sistem Şeması

PID sisteminin eşitlikleri şu şekilde oluşur;

$$d(t) = Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (3.8)$$

$$p(t) = Kp e(t) \quad (3.9)$$

$$i(t) = Ki \int_0^t e(t) dt \quad (3.10)$$

$$m(t) = Kp e(t) + Ki \int_0^t e(t) dt + Kd \frac{de(t)}{dt} + V0 \quad (3.11)$$

PID denetim sistemlerinin uygulamaları günümüzde her alanda karşımıza çıkmaktadır. Araçların hız kontrol sistemlerinde, drone ve uçakların otokontrol devrelerinde, fırınlarda sıcaklık sabitleme istendiğinde ve daha birçok sistemde PID kullanılmaktadır. PID devresini veya algoritmasını sisteme eklenmesi kadar kazançlarının doğru ayarlanması da sistem kararlılığı için çok önemlidir.

Yükselme zamanı sisteme ilk enerji verilmesinden istenilen set değerinin %90'nına ulaşılması için geçen süredir. Oransal kontrol kazancının artırılması bu süreyi kısaltırken, integral kazancı ve türev kazancının bu süreye etkisi çok azdır. Oransal ve integral kazançlar ofset değeri yani aşım miktarını artırırken, türev bu aşımı azaltır. Oturma zamanı ise çıkış sinyalinin istenilen set değerinin kabul edilebilir bir sınır içerisine girdiği süredir. Bu sürenin azalmasını türev fonksiyonu sağlar. Ama

türev fonksiyonu kalıcı durum hatasına etki edemez. Kalıcı durum integral fonksiyonunun düzelttiği bir bölgedir.

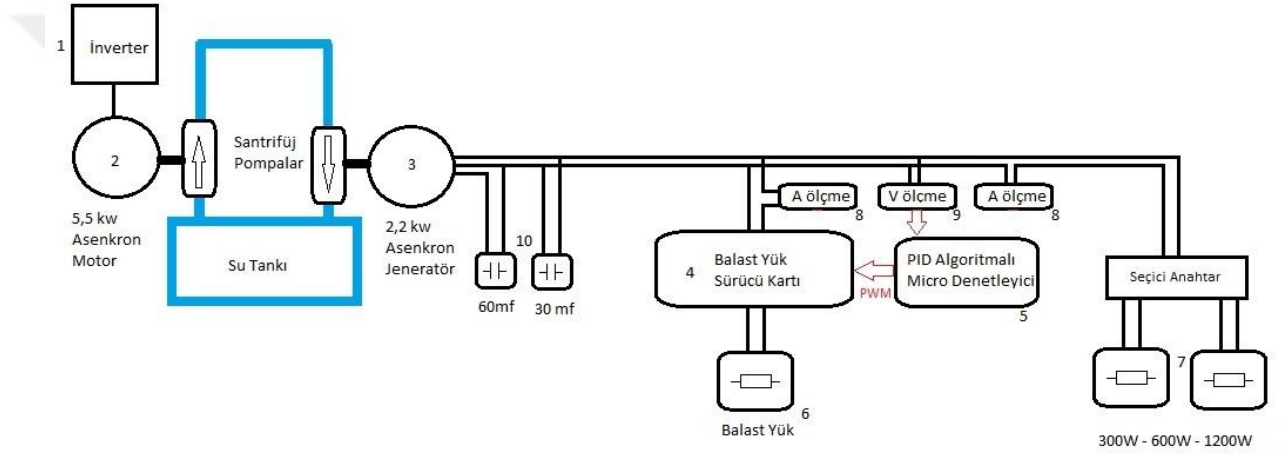
Çizelge 3.1 PID Sistemde Kazançların Çıkış Sinyaline Etkisi

KONTROLÖR	KAZANÇ	YÜKSELME ZAMANI	AŞIM	OTURMA ZAMANI	KALICI DURUM HATASI
ORANSAL	K_p	Azaltır	Arttırır	Biraz arttırır	Azaltır
İNTEGRAL	K_i	Biraz azaltır	Arttırır	Arttırır	Yok eder
TÜREV	K_d	Biraz değiştirir	Azaltır	Azaltır	Çok az etkiler

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1 Materyal

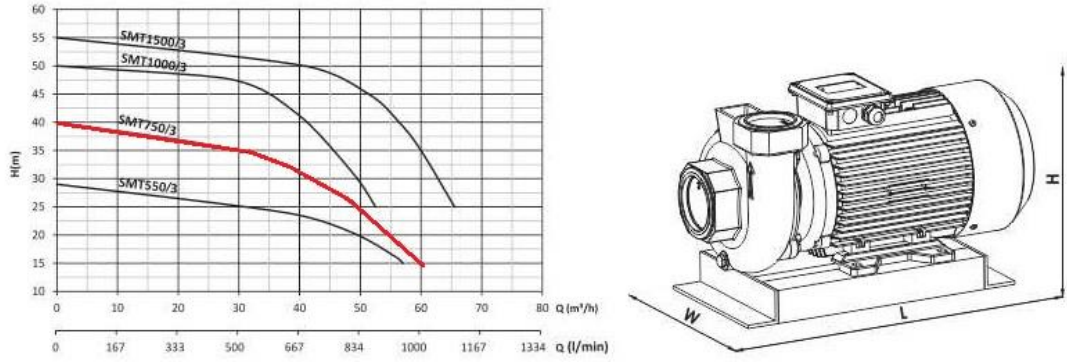
Bu çalışma türbin olarak çalışan santrifuj pompaları ve türbine akupule asenkron jeneratörleri konu almaktadır. Deney setinde iki adet santrifuj pompa kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi su deposundan emdiği suyu basınçlandırarak boru hattına vermek ile görevli olan pompadır. 5,5 kW gücünde ve 2900 dv/dk. hızında çalışan bu pompa, gerçek hayatta su alma yapısından türbine kadar gelen basınçlı hidrolik su kaynağını temsil etmektedir. Şekil 4.1 deki şematik gösterimde 2 numara ile işaretlenmiştir.



Şekil 4.1 Deney Seti Şematik Gösterimi

Bu pompayı değişken hızlarda sürülmesine imkân verecek 5,5 kW gücündeki inverter ile kontrolü sağlanmaktadır. Inverter şematikte 1 numara ile gösterilmiştir.

2 numaralı pompa' nin 1 numaralı inverterden çekeceği 5,5 kW elektrik gücü karşılığında pompa çıkış flanşında sağlayacağı optimum su yüksekliği 35m ve su debisi 30m³/saat olduğu pompa üreticisinin şekilde 4.2 de verilen pompa H-Q eğrisinden görülebilmektedir.



Şekil 4.2 1 Nolu Pompa H-Q Eğrisi

H-Q eğrisinden elde edilen veriler ile pompa çıkışının hidrolik gücü hesap edilirse;

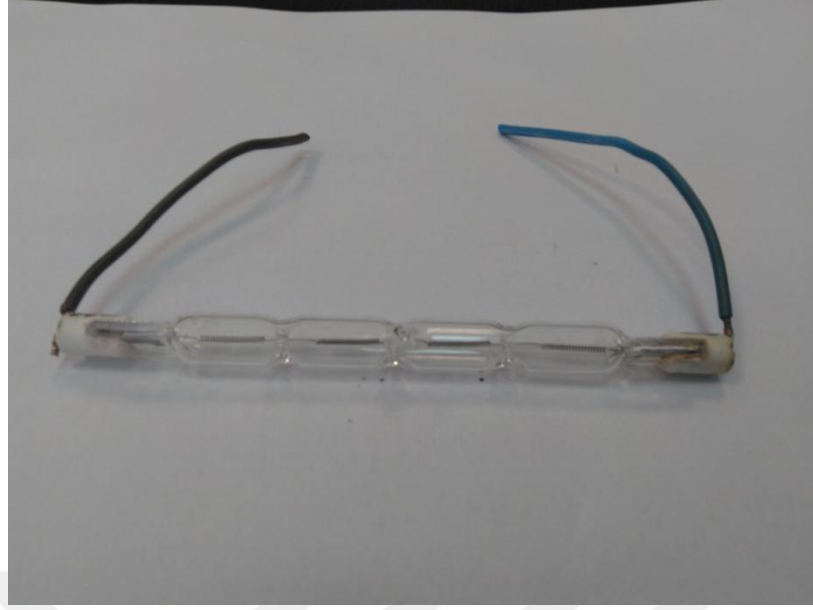
$$P_{hidrolik} = m \cdot g \cdot h$$

$$P_{hidrolik} = 35,9,81 \cdot \frac{30}{3600} = 2,861 \text{ kW}$$

olarak bulunur. Pompadan çıkan ve basınçlı su akışı ile türbin olarak çalışan 3 numaralı pompaya ulaşan suyun, hidrolik yol boyunca boru yüzeyinde ve dönüş köşelerinde sürtünme ve türbülans kayıplarına uğradığı bilinmektedir. Yani türbin girişine ulaşan suyun hidrolik gücü ile inverterden çekilen elektriksel güç arasında yaklaşık yarı yarıya güç kayıpları olduğu kabul edilmiştir.

İşte bu yüzden türbin olarak çalışan 3 nolu pompa gücü 2 nolu pompa gücünün yarısı gücünde seçilmesi gerekir. Deney setimizde 2,2 kW gücünde ve 2900 dev/dk. hızında bir pompa, türbin-jeneratör seti olarak çalışması için kullanılmıştır. 3 nolu pompanın miline bağlı asenkron makine deney setinde asenkron jeneratör olarak vazife görmektedir. Bu pompa 3 fazlı sargıya sahiptir ve çalışma gerilim 400V dur. Cos Q si 0,83 dür ve sargı termal sınıfı F dir. Deney sırasında motor sargıları üçgen bağlanmıştır.

Şematikte 3 numara ile gösterilen asenkron jeneratörün terminal uçlarına kendisini ikaz edebilmesi için çeşitli deneylerde 30µf, 40µf, 50µf ve 60µf kondansatörler bağlanmıştır. Çalışma frekansı ve gerilimi testlerinden sonra uygun kondansatörlerin 30µf ve 60µf olduğuna karar verilerek bu şekilde deneylere devam edilmiştir. Bu kondansatörler şematikte 10 numara ile gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Jeneratör Yüğü Olarak Kullanılan 230V 330W
Akkor Flemanlı Ampul

3 numaralı asenkron jeneratör şebekeden bağımsız çalışmaktadır. Terminal uçlarına bağlı değişken yükler şematikte 7 numara ile işaretlenmiştir. Değişken yük olarak seçici anahtarlara bağlı olan 330w gücünde bir akkor flemanlı ampul ve 600-1200W yük kademeleri seçilebilen elektrik sobası kullanılmıştır. Şekil 4.3 de resmi görülmektedir.

Jeneratör üzerindeki yükü sabit tutmak için, yük olmadığı veya kısmi yük olduğu durumlarda, toplam yükü nominal yüke tamamlayacak balast yük, şematikte 6 numara ile işaretlenmiştir. Balast yük tanesi 230V 500w değerinde paralel iki akkor flemanlı ampulünden ibarettir. Şekil 4.3 deki ampullerden iki adet kullanılmıştır.

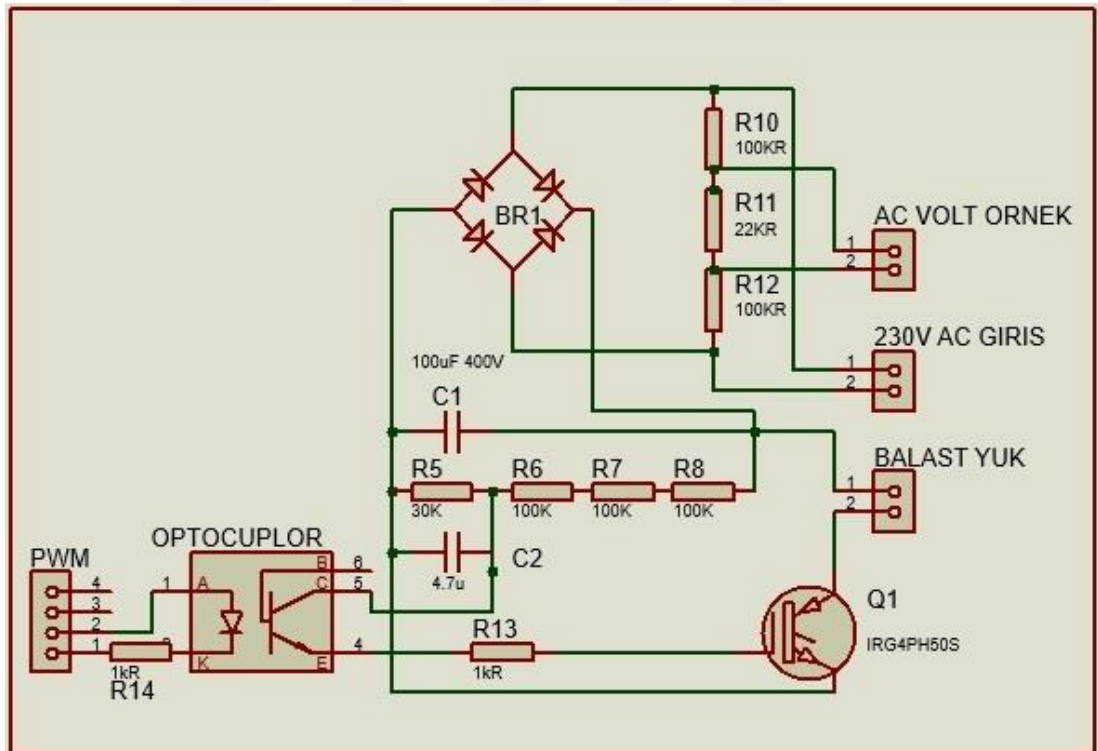
Balast yükün nominal gücü 1000W dır. Fakat deneyin amacı balast yükü %0 ila %100 güç arasında istenilen aralıktaki bir güç değerinde çalıştırabilmektir. Bunun birkaç farklı yöntemi 2.5. bölümde ifade edilmişti. Bu çalışmada deney setimizde Mark-Space Ratio olarak literatürde bahsedilen yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde asenkron jeneratörden elde edilen alternatif akım bir köprü doğrultucu vasıtası ile doğru akıma dönüştürülür ve kondansatör vasıtası ile regüle edilir. Daha sonra kondansatör uçlarına bağlı IGBT ile vasıtası ile balast yükleri beslemektedir. Seçilen IGBT'nin sürülmesi için kondansatörün DC geriliminden gerilim bölücü dirençler ile alınan 36V kullanılmaktadır. Ayrıca mikro denetleyici kontrol devresinden gelen

5V'luk PWM kare dalga sinyalini güç devresinin yüksek gerilimlerinden izole etmek için bir optoküplör kullanılarak, optik olarak izolasyon sağlanmıştır.

Sürücü kartına gelen AC voltajı başka bir gerilim bölücü direnç devresi ile örnekleyerek onda bir oranında düşürülmüş ve osiloskop girişlerinden okunabilecek maksimum 30V'luk sınırın altına inmesi sağlanmıştır. Bu gerilim bölücü dirençler 100k Ω 'luk iki adet ve 22k Ω luk bir adet direnç ile sağlanmıştır.

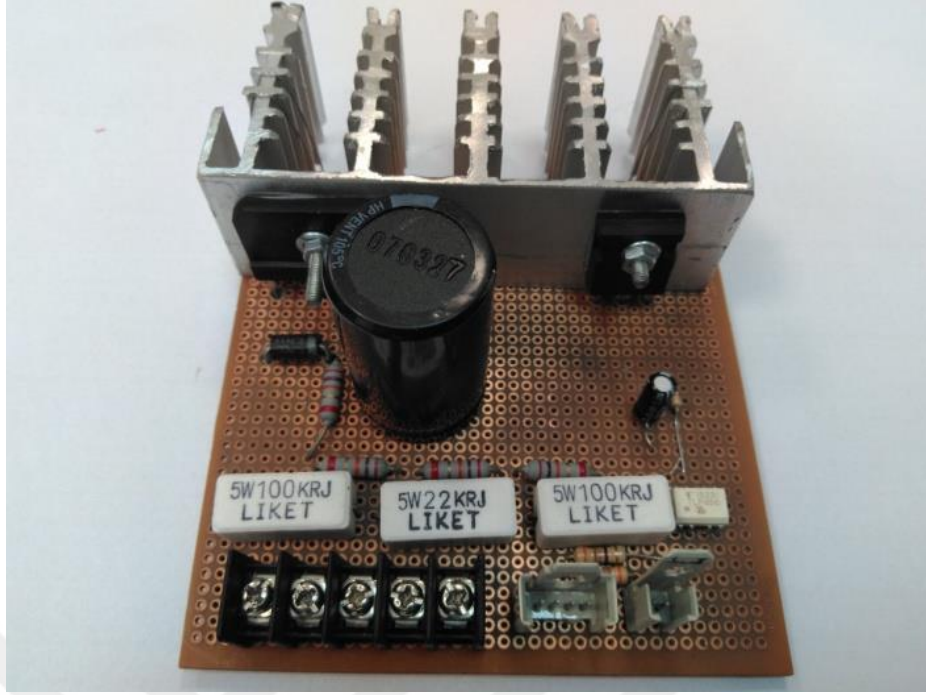
PWM sinyali mikro denetleyicinin dijital çıkış pininden alınarak, 1k Ω luk akım sınırlayıcı direnç üzerinden optik izolatörün giriş ucuna bağlanmıştır. İzolatörün çıkış ucu da yine akım sınırlayıcı direnç üzerinden geçirilerek IGBT anahtarlama elemanının sürülmesinde kullanılmıştır.

Balast sürücü kartının AC voltaj girişi, jeneratörün 30 μ f'lık kondansatörünün bağlandığı iki faz çıkışına bağlanmıştır. Bu iki faz aynı zamanda yük besleme terminalleridir.



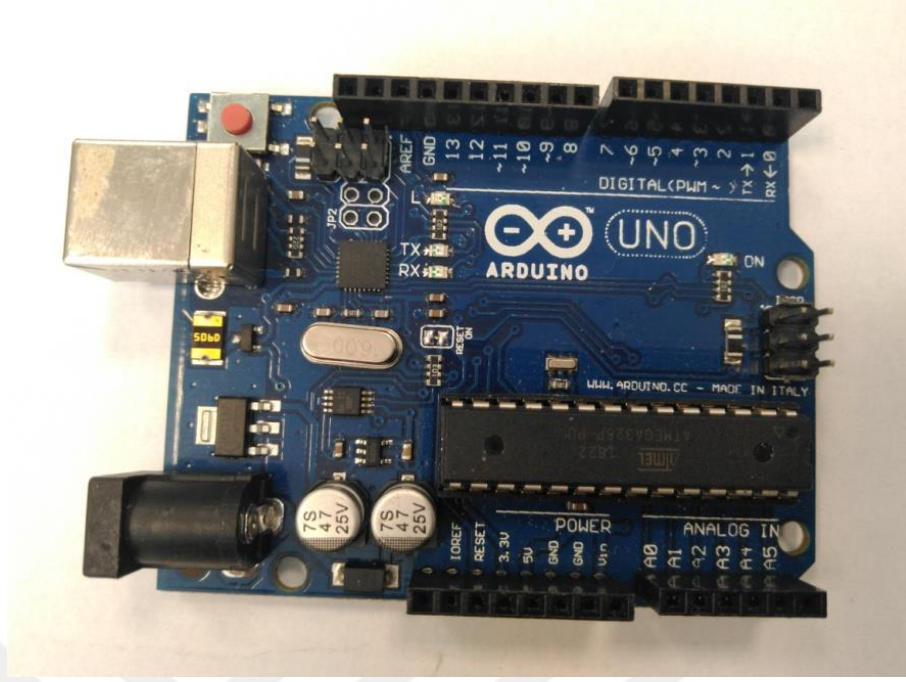
Şekil 4.4 Balast Yük Sürücü Kartı

Balast yükün bağlanacağı klemensler kart üzerinde bırakılmış olup balast yük sürücü kartı üzerinde monteli değildir. Balast yük, sürücü kartına balast yük klemensleri üzerinden bağlanmaktadır.



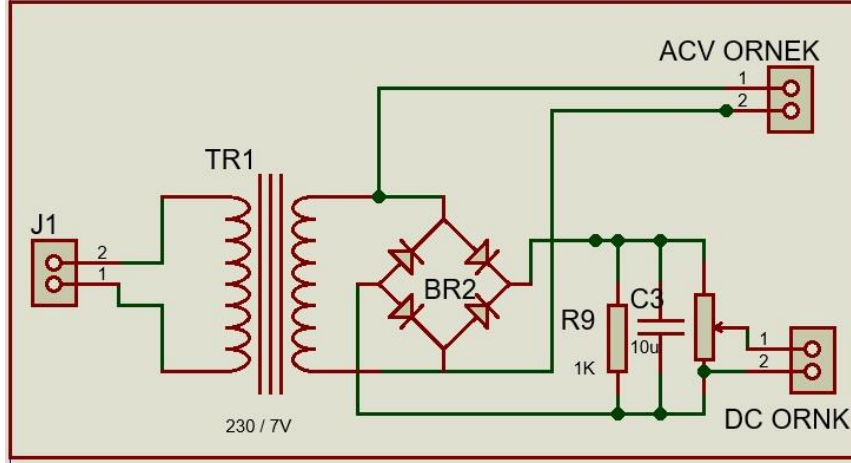
Şekil 4.5 Balast Yük Sürücü Kartı

Çalışmamızda asenkron jeneratörün gerilimini ölçerek gerilimin referans değer ekseninde kalmasını sağlayacak mikro denetleyici olarak arduino Uno kartı kullanılmıştır. Bu kartın üzerinde 6 adeti PWM çıkış olarak ayarlanabilen dahili 14 dijital giriş çıkış portu ve 6 adet analog giriş portu bulunmaktadır. Üzerinde dahili gerilim regülatörü ile beraber gelmektedir. 6-20 VDC besleme voltajı aralığında çalışabilmektedir. Eğer dışarıdan bir besleme gerilimi uygulanmayacak ise, USB portu vasıtası ile de kendini besleyebilmektedir. 32KB Flash hafızası bulunmaktadır. Çalışma hızı 16MHz dir.

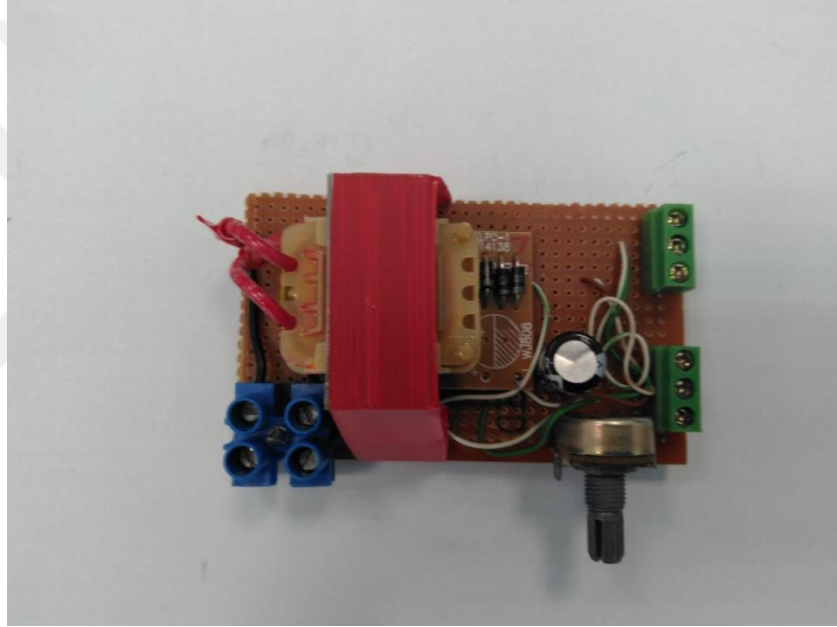


Şekil 4.6 Arduino UNO Mikro Denetleyici

Deney setinde kullanılan mikro denetleyiciye asenkron jeneratör çıkış terminal voltajının örnekleme periyodunun verilmesi gerekmektedir. Örnekleme işlemi için 230/7 V trafo ile birlikte köprü diyot ve ayarlanabilen 100K Ω 'luk tripot direnç kullanılmıştır. Tripot direnç ile örnekleme devresinin çıkış gerilimi ayarlanmasına imkân sağlamaktadır. Örnekleme devresinde iki çıkış bulunmaktadır. Bir tanesi 100K Ω luk tripot ile bölünen DC gerilim çıkışıdır ki bu gerilim mikro denetleyiciye bağlanmak için tasarlanmıştır. Devrenin diğer örnekleme çıkışı ise trafonun 7V luk çıkışındaki AC gerilimi osiloskop vasıtası ile ölçmeye yararmaktadır. Gerilim ölçme devresi şematik resimde 9 numara ile işaretlenmiştir. Devrenin elektronik şeması şekil 4.7 de, fiziksel görünüşü ise şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Gerilim Ölçme Örnekleme Devresi Elektronik Şeması

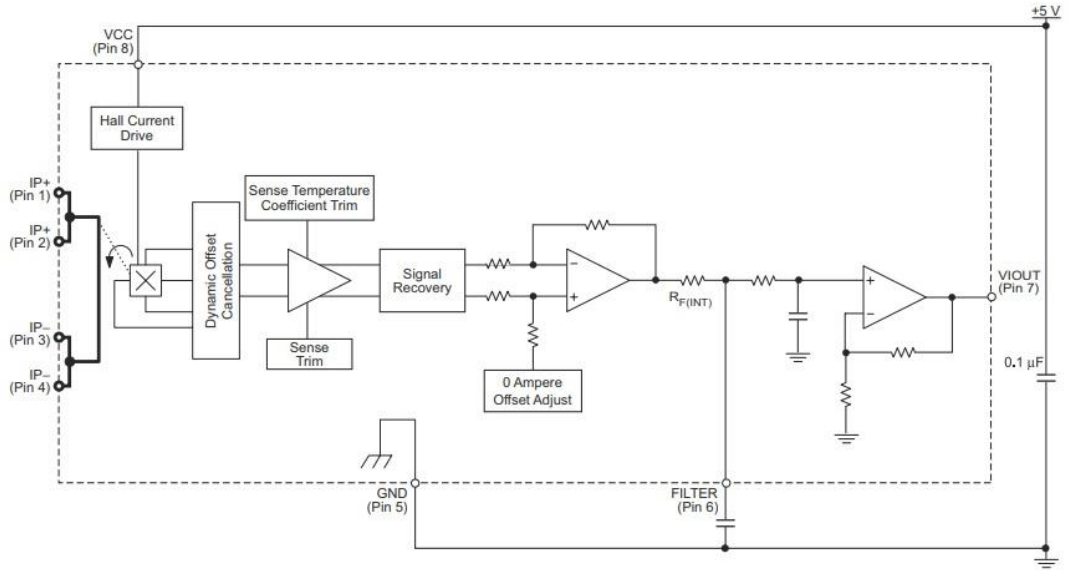


Şekil 4.8 Gerilim Ölçme Örnekleme Devresi Fiziksel Görünüşü

Çizelge 4.1 Tasarlanan Kontrol Kartının Maliyet Tablosu
(İNT-EL Elektronik San. ve Tic. LTD. ŞTİ, 2019)

KULLANILAN ELEMAN	2019 FİYATI (TL)
Arduino Uno R3	21,09
IRG4PH50S N IGBT	21,47
35A Köprü Diyot	4,13
TLP350 Optokuplör	5,97
100uf 400V kondansatör	5,84
4.7uf 35V Kondansatör	0,13
13x25 Plaket	12,66
Çeşitli dirençler (Yaklaşık)	5
Soğutucu	2,27
Soket ve kablolar (Yaklaşık)	5
Gerilim örnekleme için 7V adaptör	18,17
Toplam Tutar	101,73

Deney setinde yük ve balast yük akımlarını ölçmek için iki adet akım dönüştürücü devre kullanılmıştır. Bu devrelerden bir tanesi yük akımını ölçmektedir ve 30A ölçme kapasitesi vardır. Diğer akım sensörü ise 20A ölçmek için tasarlanmıştır. ACS712 marka bu akım sensörleri, devreden geçen akımı manyetik etkisi (Hall Effect) sayesinde ölçmektedir. Hem DC hem de AC akımı ölçmektedir. Bu sensörlerin 3 adet pini bulunmaktadır. Bunlardan 2 tanesi Vcc ve Gnd dir. Diğer uç ise analog çıkış pinidir. Giriş güç akım uçlarından hiç akım akmazken analog çıkış pininde sabit bir voltaj okunur. Giriş uçlarında akım akınca, çıkış voltajında akımın yönüne göre $+66\text{mV/A}$ 'lik voltaj değişikliği oluşmaktadır (30 amperlik modelde). 20A ölçme kapasitesine sahip modelde ise yine akımın yönüne bağlı olarak $+100\text{mV/A}$ değere sahip gerilim değişikliği meydana gelir. Bu voltaj değişikliği mikro denetleyici tarafından okunur ve mV/A dönüştürme oranı hesap edilerek devrenin akım ucundan geçen akım hesap edilir. ACS712 akım sensörünün fonksiyon blok şeması şekil 4.9 da verilmiştir. Bu akım sensörleri deney seti şematik diyagramında 8 numara ile işaretlenmiştir.



Şekil 4.9 ACS712 Akım Sensörü Fonksiyon Blok Şeması



Şekil 4.10 ACS712 Akım Sensörü Fiziksel Görüntüsü

Deney setinde test esnasındaki akım gerilim ve sinyal dalga şekillerinin yakalanması, genlik, frekans ve tepe değeri gibi büyüklüklerinin ölçülmesi ve bazı durumlarda sinyal değişikliklerinin kayıt altına alınması için INSTRUSTAR marka bilgisayara USB portu vasıtası ile bağlanabilen ve bilgisayara yüklenen yazılım ile gerekli ekran görüntülerinin alınabildiği bir PC osiloskop kullanılmıştır. Bu osiloskop ile birlikte gelen yazılım olan MultiVirAnalyzer da bilgisayara yüklenerek test esnasında kullanılmıştır.

Ayrıca yine gerilim ve frekans ölçümlerinde sıkça Fluke multimetre kullanılmıştır. Deney esnasında jeneratör sargı sıcaklığı, jeneratör yüzey sıcaklığı ve sürücü devre sıcaklıkları Fluke termal kamera kullanılarak ölçülmüştür.



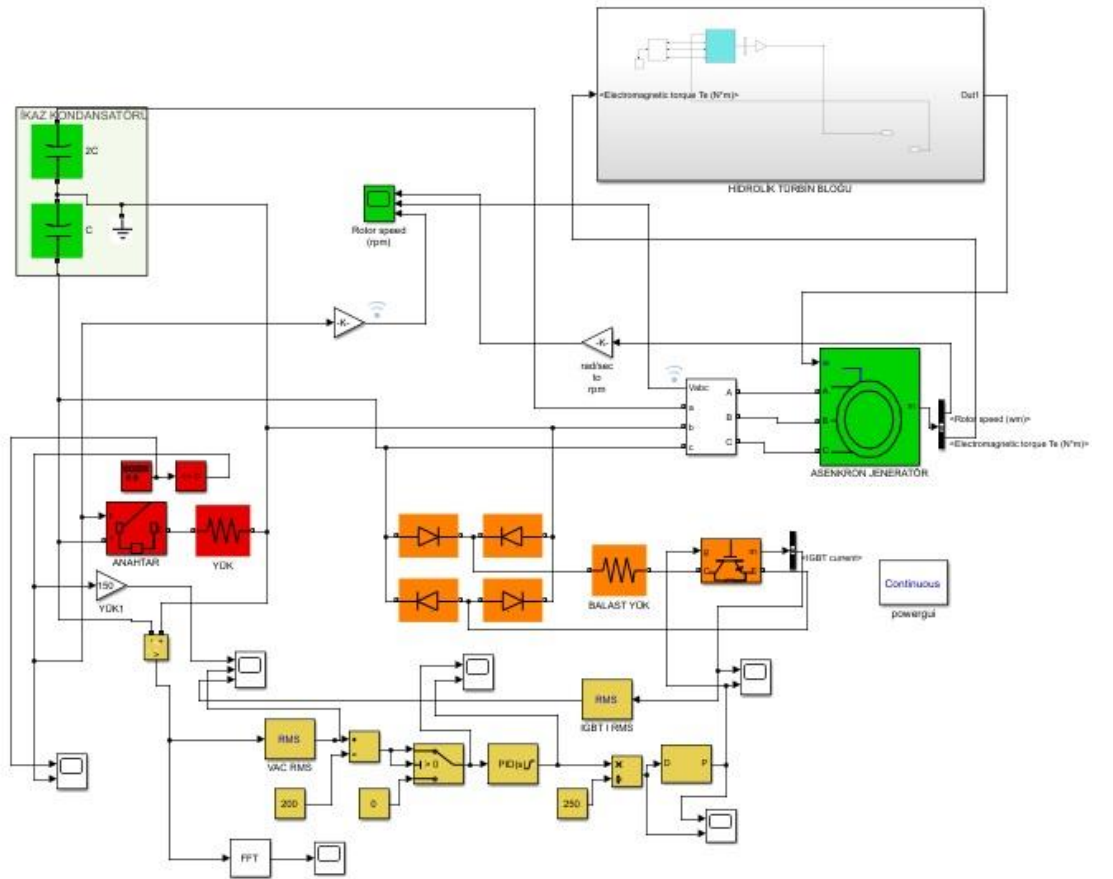
Şekil 4.11 Deneyde Kullanılan Ölçüm Aletleri

4.2 Yöntem

4.2.1 MATLAB Modelinin Oluşturulması

Çalışma için hazırlıklara geçmişte çıkan yayınların incelenmesi ile başlanmıştır. Farklı ülke ve üniversitelerde yayınlanan çalışmalar, dergilerde çıkan makaleler ve konu ile alakalı kitaplar incelenmiştir.

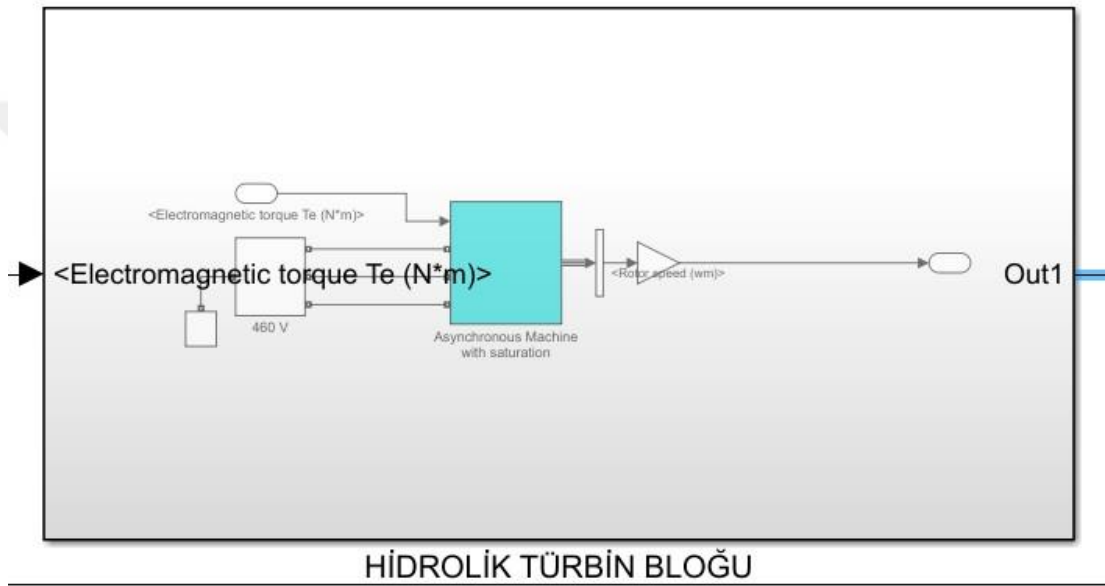
Asenkron jeneratörün matematiksel olarak modellenmesi ile alakalı bilgiler toplanmıştır. MATLAB R2019A programı temin edilerek asenkron jeneratörün modelin oluşturulmasına başlanmıştır.



Şekil 4.12 Deney Setinin MATLAB SIMULINK Modeli

SIMULINK modeli hazırlanırken türbin yerine geçen santrifuj pompanın bir modelinin tahrik edici ünite olarak sisteme eklenmesi gerekmektedir. SIMULINK kütüphanesinde hidrolik türbin için hazırlanmış bir hazır bir model olmadığı için, genel literatür çalışmalarında da tercih edildiği üzere, başka bir motoru tahrik sistemi olarak modele eklenmesine karar verilmiştir.

5,5kw gücünde 3000 rpm asenkron makine SIMULINK kütüphanesinden seçilerek modele eklenmiştir. Bu motorun sabit devirde dönmesini sağlamak için 460V 50Hz alternatif akım güç kaynağı modele eklenmiştir. 460 V seçilmesinin sebebi motor sargı geriliminin 460V olmasıdır. Bu motorun mekanik mil hızı, alt sistemin çıkış portu olarak tanımlanmıştır. Motorun mekanik yükü ise giriş portu olarak tanımlanmıştır. Bu gerilim kaynağı ve asenkron motor bir alt sistem olarak kaydedilmiş ve Hidrolik Türbin Bloğu adıyla alt model olarak tanımlanmıştır.(şekil 4.13)

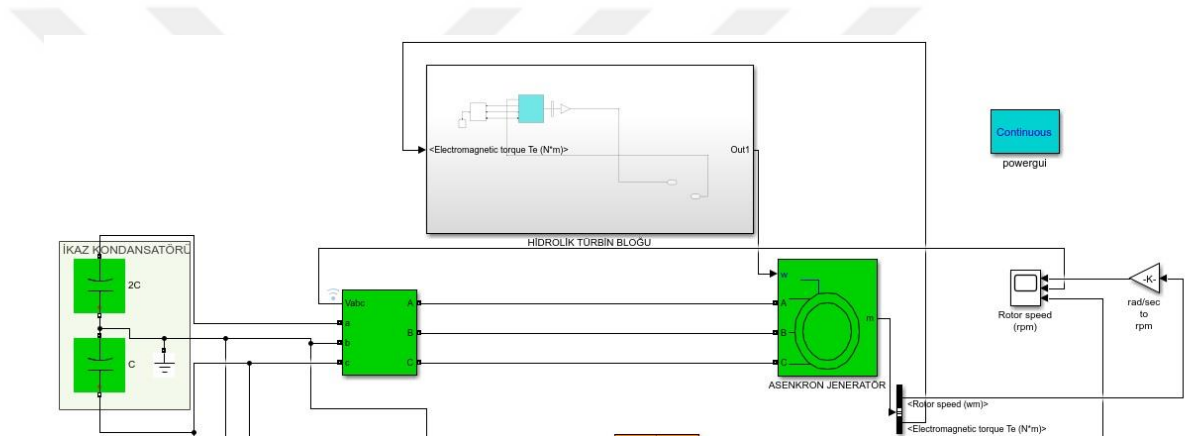


Şekil 4.13 Hidrolik Türbin Alt Sistem Bloğu

Hidrolik Türbin Bloğu çıkış hız portu, deneyde asenkron jeneratör olarak çalışacak olan asenkron makine bloğunun hız giriş inputuna bağlanmıştır. Asenkron makine şebekeden bağımsız jeneratör olarak çalışacağı için kendisini ikazlayacak daimi kondansatörlere ihtiyacı vardır. Normalde 3 fazlı çalışan asenkron jeneratörlerde her faza eşit büyüklükte kapasite değerine sahip kondansatör bağlamak gerekir. Ancak bu çalışmada üç fazlı jeneratörler ile tek fazlı yüklerin beslenmesi irdelendiği için, özel bir bağlantı seçilmesi gerekmektedir. C-2C bağlantısı denilen bu yöntem ile üç fazlı jeneratörleri tek fazlı jeneratör gibi çalıştırarak, aynı zamanda dengeli yüklenmesi de sağlanmış olmaktadır. Daha önceki bölümlerde şekil 2.9 da bu konudan bahsedilmiştir. C-2C bağlantısına uygun olacak şekilde SIMULINK modeline de biri 30 μ f diğeri 60 μ f kapasite değerine sahip kondansatör grupları eklenmiştir. Kondansatörler ve asenkron jeneratör arasına jeneratör terminal

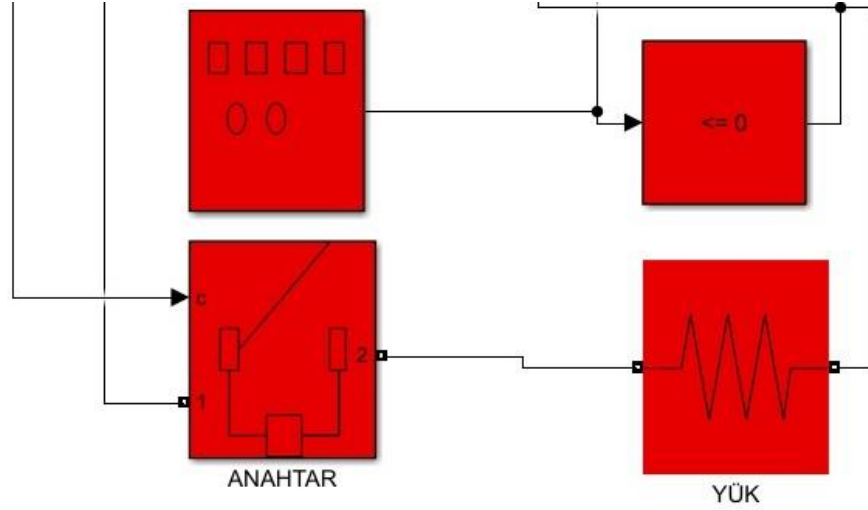
gerilimlerini ölçmeye yarayan gerilim ölçüm bloğu yerleştirilmiş ve ölçüm çıkışı bir göstergeye bağlanmıştır.

Model bu hali ile boşa çalışma gerilimi üretecek hale gelmiştir. Ancak artık manyetizmanın modele tanıtılması için, asenkron jeneratörün rotor akım başlangıç hesabı değeri olarak 1A girilmesi gerekmektedir. Böylece fiziksel deneyde kondansatörler ile birlikte ilk manyetizmayı oluşturacak olan artık manyetizma modele eklenmiş olmaktadır. Modele Powergui hesaplama bloğu da eklenip, sürekli durum analizi seçilerek deneyin modellenmesi denenmiştir. Asenkron jeneratörün boşa çalışma gerilim karakteristiği bu deney sonucu ile elde edilmiştir.



Şekil 4.14 Türbin, Asenkron Jeneratör ve Uyartım (İkaz) Modellenmesi

Asenkron jeneratörün değişken yük altındaki karakteristiğini incelemek için müşteri yükünün sisteme tanıtılması gerekmektedir. Bu deney için müşteri yükü bir ideal anahtar üzerinden C (30 μ F) kondansatörünün uçlarına bağlanmıştır. Bu kondansatör gerilimi tek fazlı yükleri besleyen jeneratör gerilimidir. İdeal anahtarın anahtarlama süresinin ayarlanması için zamanlama devresi eklenmiş ve istenilen sürelerde müşteri yükünün jeneratöre bağlanması ve ayrılması sağlanmıştır. Bu şekilde asenkron jeneratörün değişken yük altındaki performans deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.15 Asenkron Jeneratöre Bağlanan Müşteri Yüğü, Anahtarı ve Zamanlayıcısı

Değişen yük durumunda asenkron jeneratör uç gerilimindeki, frekansındaki ve jeneratör devrindeki değişimler gözlenmiş ve kayıt altına alınmıştır.

Değişen müşteri yükü esansında asenkron jeneratör gerilim ve frekansındaki değişimleri engelleyecek olan kontrol kartı PID algoritmasını içermektedir. PID algoritmasının sistem gerilimini sabit tutmak için hedef referans gerilim 230V olarak belirlenmiştir. SIMULINK PID modeli asenkron jeneratör uç geriliminin etkin değerini ölçmeli ve referans gerilim ile karşılaştırarak hatayı bulmalıdır. Bu işlemleri yapabilmesi için jeneratör terminal gerilim bloğu çıkışı RMS bloğuna girilmiş ve bu bloğun çıkışı da hata tespitinin yapılabilmesi için 230 V ile kıyaslanmıştır.

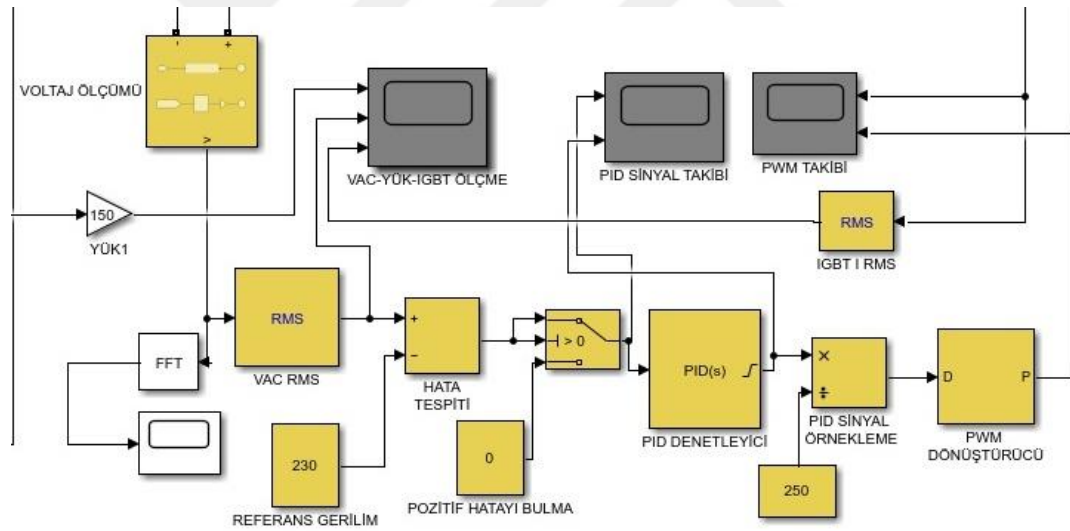
Sistem gerilimi 230V değerine ulaşmadan balast yükün devreye girmesini önlemek için hata değerinin pozitif bileşeninin hesap edilmesi gerekmektedir. Bu işlemi modellemek için bir şartlı anahtar bloğu modele eklenmiştir. Bu blok hatanın negatif değerlerinde çıkış portuna 'sıfır' değeri çevirirken, hatanın pozitif olduğu durumlarda hatanın kendisini çıkış portuna aktarmaktadır. Böylece sadece sistem gerilimi 230V'un üzerine çıktığında PID algoritması balast yükü devreye almaya başlayacaktır.

PID algoritması için SIMULINK kütüphanesinde mevcut olan PID bloğu modele eklenmiştir. Girişine hata sinyali bağlanmıştır. PID algoritması içerisinde KP, Ki ve KD kazanç miktarları seçilebilmektedir. Ayrıca sinyal filtreleme, çıkış sinyali alt sınırı ve üst sınırı belirlenmesi işlemleri yapılabilmektedir. Filtreleme özelliği

tanımlaması yapılmamıştır. Çıkış sinyali alt sınırı 0, üst sınırı ise 250 olarak tanımlanmıştır.

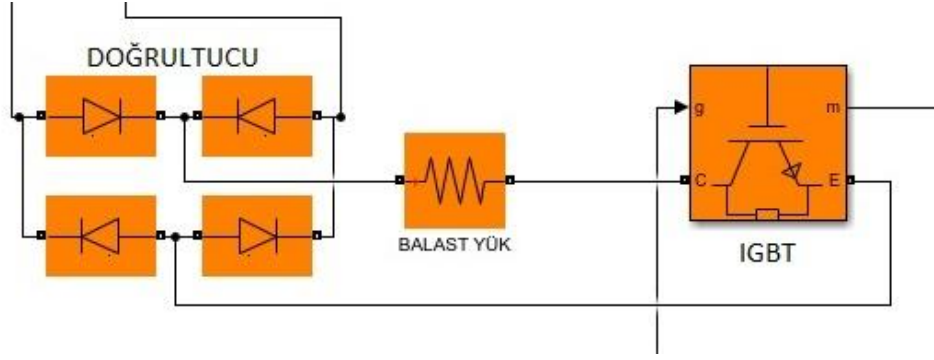
PID bloğu çıkışına, balast yükü sürececek olan IGBT nin oransal anahtarlama için gerekli PWM sinyali üreteç bloğu bağlanmıştır. PWM bloğu giriş sinyali 0 ila 1 değerleri arasında olmalıdır ki, çıkış PWM görev zamanı (duty cycle) 0-100% arasında olabilsin. Bu şartı sağlamak için PID algoritması çıkış sinyali 250 değerine bölünerek, PWM dönüştürücü bloğuna gelen sinyalin en fazla 1 değerine sahip olması sağlanmıştır.

PWM dönüştürücü bloğun çıkış sinyali artık IGBT'yi sürmek için kullanılacağından doğrudan IGBT elemanının Gate ucuna bağlanmıştır. Deney setinde kullanılan mikro denetleyici Arduino Uno PWM sinyali frekansı da yapılan testlerde 500 Hz olarak ölçüldüğünden, PWM dönüştürücü anahtarlama frekansı da 500Hz olarak seçilmiştir.



Şekil 4.16 PID Kontrol Algoritması Modeli

Balast yükün sürülmesi için jeneratörün terminal çıkış gerilimi diyotlar ile doğrultulmuş ve IGBT üzerinden balast yükün oransal kontrolü modelleme üzerinde sağlanmıştır. Balast yük 1000W olarak belirlenmiştir. Farklı oransal kazanç (K_p), integral kazanç (K_i) ve türev kazancı (K_d) değerleri denenerek, çıkış tepki süresi, sürekli hal gerilim durumu ve oransal bant değerleri irdelenerek en iyi PID parametreleri tespit edilmiştir.



Şekil 4.17 Balast Yük Sürücü Kartı Modeli

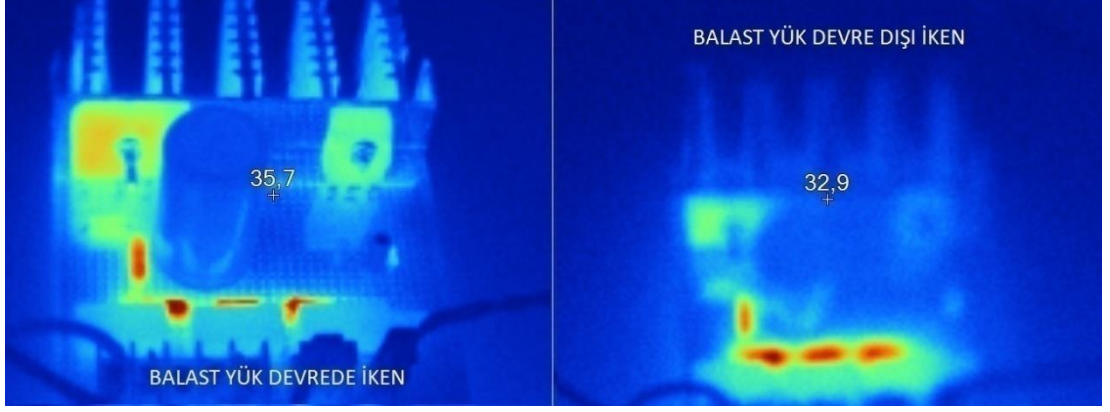
4.2.2 Deney Düzeneyinin Oluşturulması

Simülasyon hazırlandıktan sonra deney seti kurulumu yapılmıştır. Deney setinde kullanılacak elektrik panosu hazırlanmış, pompa ve borulama tesisatları bağlanmıştır. Türbin olarak kullanılacak pompanın asenkron jeneratör olarak kullanılacak motorunun terminal uçlarına bağlanacak kondansatörün yaklaşık değeri tespit edilmiştir. Farklı kondansatör değerlerinde çalışma gerilimi ve frekansı incelenerek testlerde kullanılacak kondansatörlerin 30 ve 60 μf olmasına karar verilmiştir.

Deney setinde yük kontrol algoritmasının yükleneceği mikro denetleyici temin edilerek, akım ölçümü, voltaj ölçümü ve PID algoritmasının yazılması işleri tamamlanmıştır.

Deney seti için hazırlanan gerilim örnekleme devresi ve balast yük sürücü devrelerinin çizimi ve testi için Proteus 8 elektronik çizim ve simülasyon programı tercih edilmiştir.

PID algoritmasının kontrol edeceği balast yük sürücü devresi hazırlanmış ve bağımsız olarak test edilerek, deney öncesi performansı ortaya çıkartılmıştır. Üzerindeki diyot ve IGBT gibi çok ısınan elemanlara yerleştirilen soğutucunun kapasitesinin yeterli geldiğinden emin olmak için termal kamera kullanılarak sürücü kartının sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Herhangi bir parçanın elemanın izin verilen çalışma sıcaklığını aşmadığından emin olunmuştur.



Şekil 4.18 Balast Y¼k S¼r¼c¼ Kartının Farklı Y¼klerdeki Termal Resimleri

Hazırlanan balast y¼k s¼r¼c¼ devresi deney setine bağlanmıştır. Voltaj ¼rneklemeye devresi hazırlanarak deney seti d¼zeneėine eklenmiş ve en son olarak PID algoritmasına sahip kart denetleyicisi sisteme entegre edilmiştir.



Şekil 4.19 Deney Setinin Pompa ve T¼rbine-Jenerat¼r Kısımına Ait G¼r¼nt¼

Deney setine t¼m bileşenler eklendikten sonra, test aŐamasına geçilmiŐtir. Ana pompayı s¼ren 5 kW g¼c¼ndeki Omron marka inverterin frekansı değiştirilerek t¼rbine olarak kullanılan pompanın debisi ve devri ayarlanmıŐ b¼ylece asenkron jenerat¼r olarak kullanılan motorun devri değiştirilerek boşta çalışma gerilimleri ve frekansları kayıt altına alınmıştır.

Daha sonra kontrol kartı devreye alınmadan farklı b¼y¼kl¼klerdeki rezistif y¼kler boşta çalışan jenerat¼r¼n terminaline bağlanarak, frekanstaki ve gerilimdeki d¼Őmeler kaydedilmiŐtir.

Aynı şekilde yük altında çalışan asenkron jeneratörün frekans ve gerilim değerleri kayıt edilerek, yük atma işlemlerinden sonra gerilim ve frekanstaki artış miktarları kayıt altına alınmıştır.

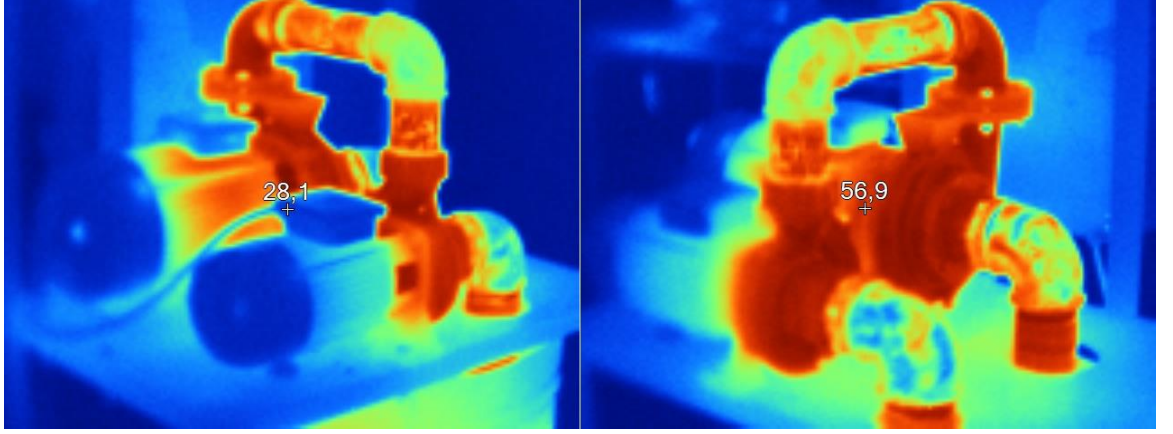
Nihayetinde PID algoritmasına sahip kontrol kartı aktif hale getirilerek, jeneratörün ilk çalışmadan itibaren terminal geriliminin set değerinde sabit hale geldiği test edilmiştir.

Farklı büyüklüklerdeki yüklerin, kontrol kartı ile kontrol edilen ve yüksüz halde çalışan jeneratörün uçlarına bağlanması ile devir ve frekansın istenilen sınırlarda kalıp kalmadığı irdelenmiştir.

MATLAB SIMULINK ortamında test edilerek elde edilen kazanç parametreleri deney seti PID kontrolcüsüne girilmiş ve sistem performansı incelenmiştir. Birkaç PID kazanç düzeltmesi ardından yük alma ve yük atma durumlarındaki geçici durum ve sürekli durum kararlılıkları kayıt altına alınmıştır.



Şekil 4.20 Düzenek ile Deney Yapılırken



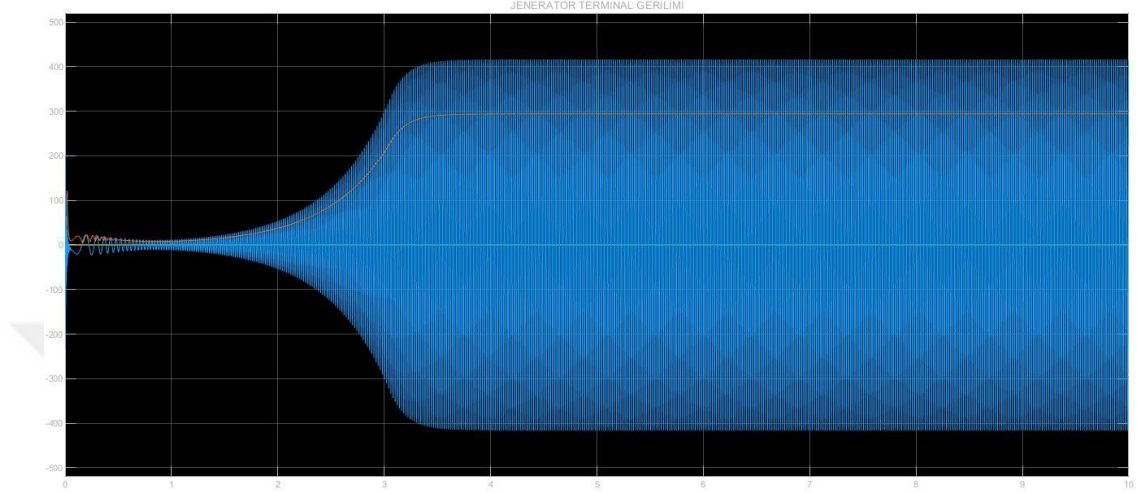
Şekil 4.21 Deney Düzeneği Çalışır Halde İken Alınan Termal Resmi



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

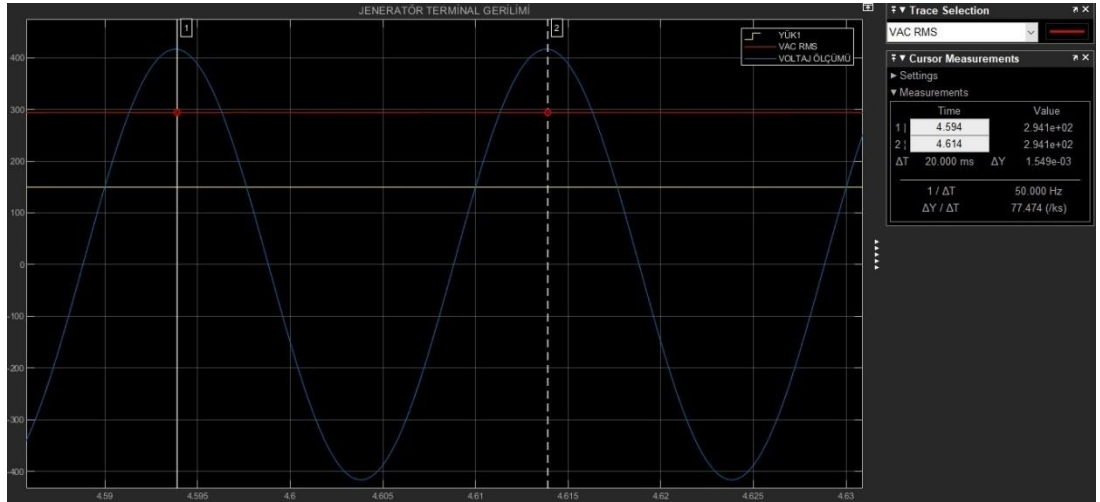
5.1 MATLAB SIMULINK Modeli Sonuçları

Deney setinin MATLAB SIMULINK modelinde yüksüz durumdaki asenkron jeneratörün uç gerilimi grafiği şekil 5.1 deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.1 Asenkron Jeneratör Öz İkaz Grafiği

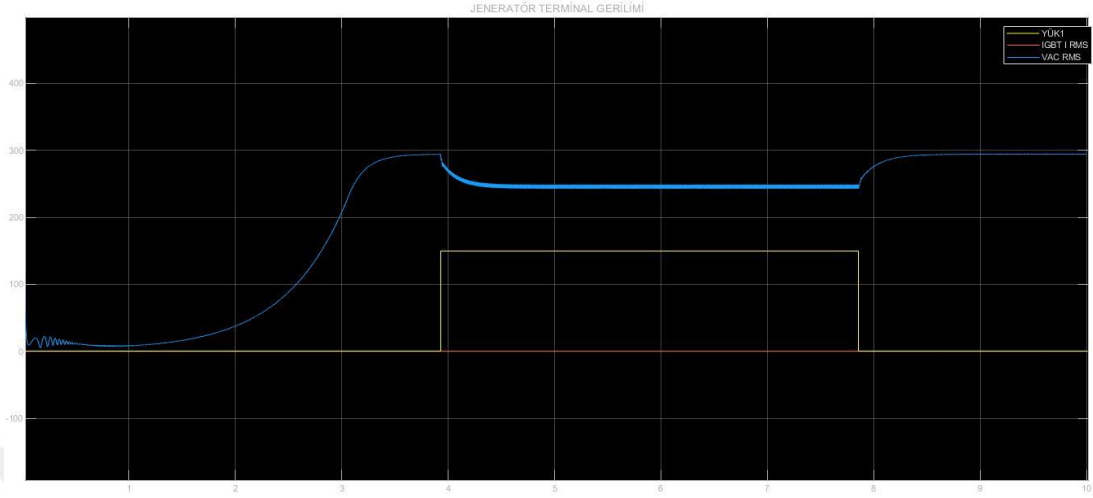
Grafik büyütülüp tam bir periyodun genliği ölçüldüğünde maksimum değerinin 416,4V olduğu, etkin değerinin 294,2V olduğu ve frekansının 50 Hz olduğu görülmektedir.(Şekil 5.2)



Şekil 5.2 Asenkron Jeneratör Boşta Geriliminin Bir Periyodu

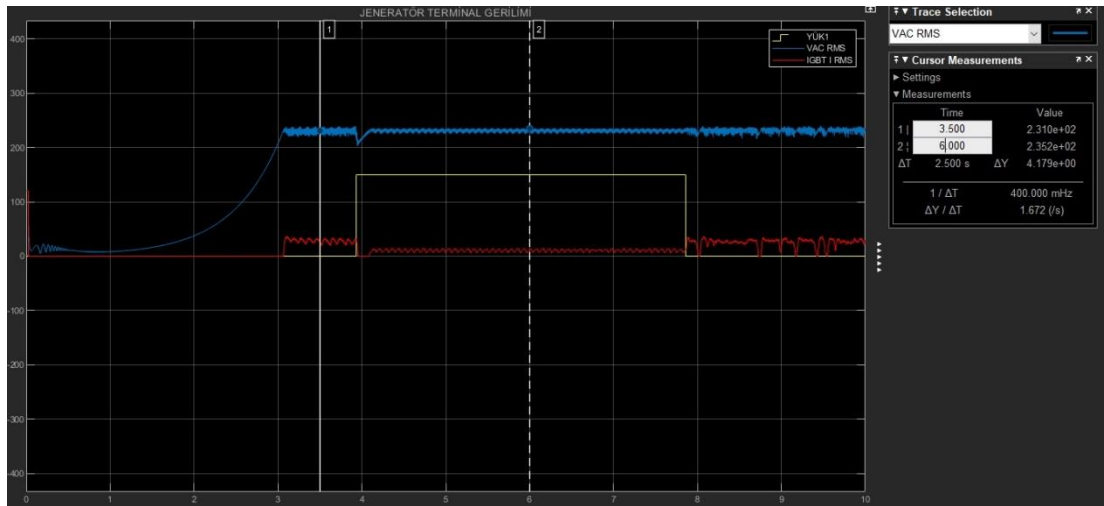
Herhangi bir kontrol düzeneği aktif hale getirilmeden asenkron jeneratör uçlarına 600W'lık bir yük bağlandığı zaman gerilimde düşme meydana geldiği görülmektedir. Gerilimin etkin değeri 242.6V, frekansını ise 48.54 Hz'e düştüğü görülmektedir.

Voltaj etkin değerindeki düşüş %17,6 ve frekansta 1,46 Hz düşme meydana gelmiştir. (Şekil 5.3)

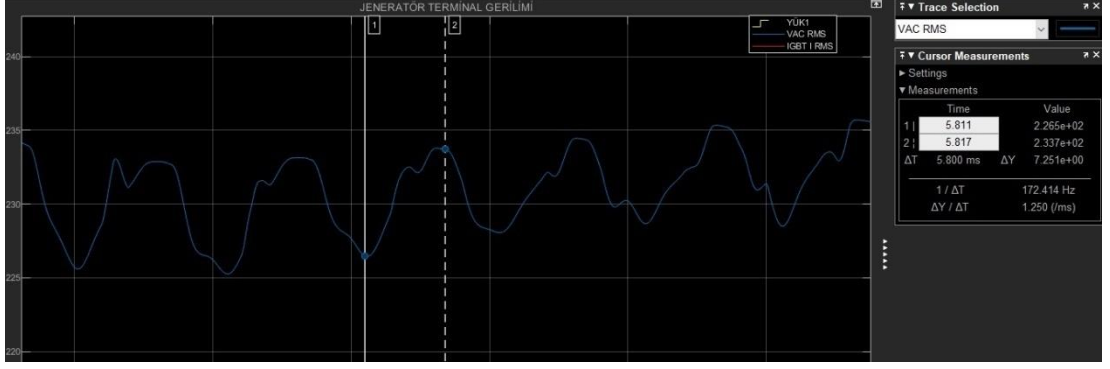


Şekil 5.3 Asenkron Jeneratöre 600W Yük Bağlandığında Uç Gerilimi Grafiği

Kontrol sistemi etkin hale getirildiğinde PID sistemi balast yükü oransal olarak devreye alarak sistem geriliminin 230V mertebesinde sabit tutmaktadır. Müşteri yükü devreye girdiğinde sistem gerilimi 230V mertebesinde sabit kalmaktadır. Oransal Bant hatası PID nin K_p kazancından ve IGBT nin anahtarlama devrede oluşturduğu harmonik bozulmadan kaynaklı 7V (%3) değerinde bir dalgalanma ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.4 Kontrol Sistemi Devrede İken Sistem Voltajının Dengelenmesi

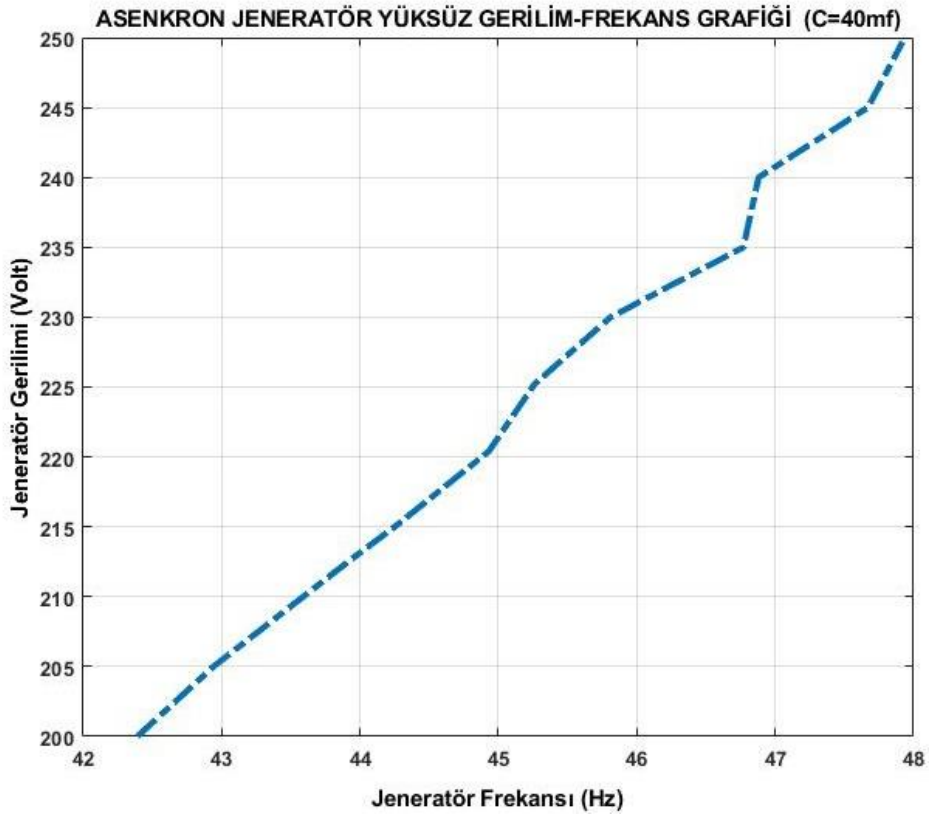


Şekil 5.5 Gerilimde Oluşan Bozulma

5.2 Deney Seti Fiziki Ölçüm Sonuçları

5.2.1 Asenkron Jeneratör Boşta ve Yükteki Karakteristiği

Asenkron jeneratör herhangi bir kontrole tabi tutulmadığı durumlarda, boşta ve yükteki karakteristiğinin belirlenmesi için bazı testler gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak C-2C ikaz kondansatörleri için 40-80 μ f bağlanarak deneme yapılmıştır. 230V hedef gerilimin 46Hz civarında indükleniyor olmasından dolayı, kondansatör değerinin düşürülmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. (Şekil 5.6)

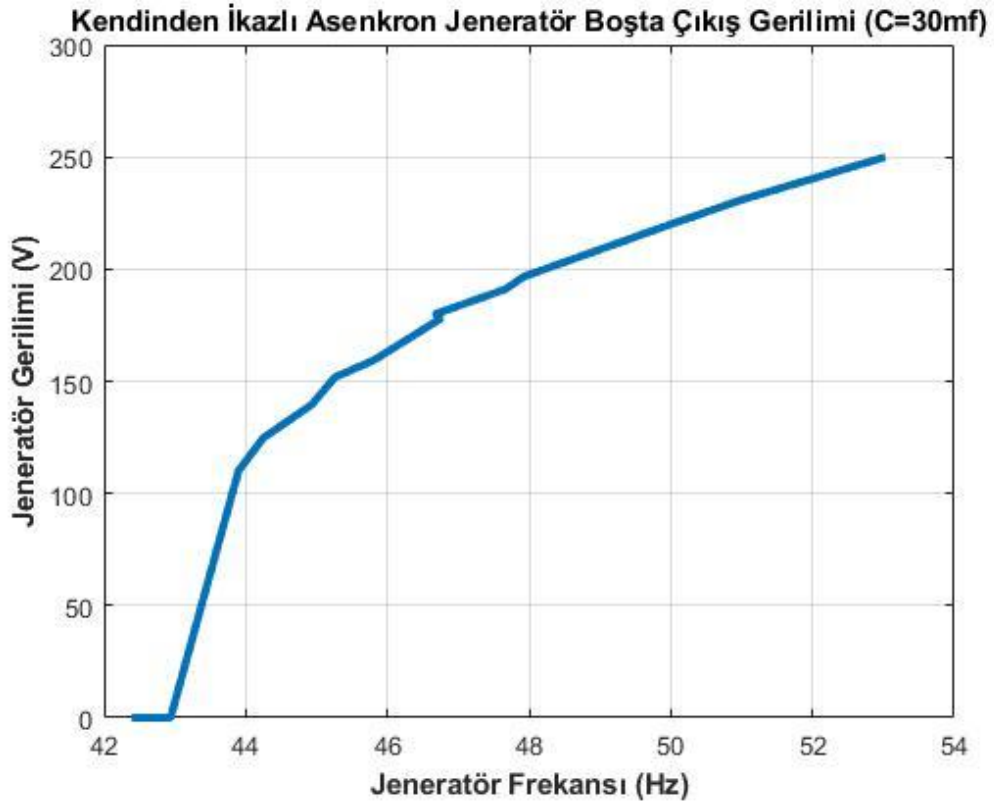


Şekil 5.6 C=40Mf iken Boşta Çalışma Grafiği

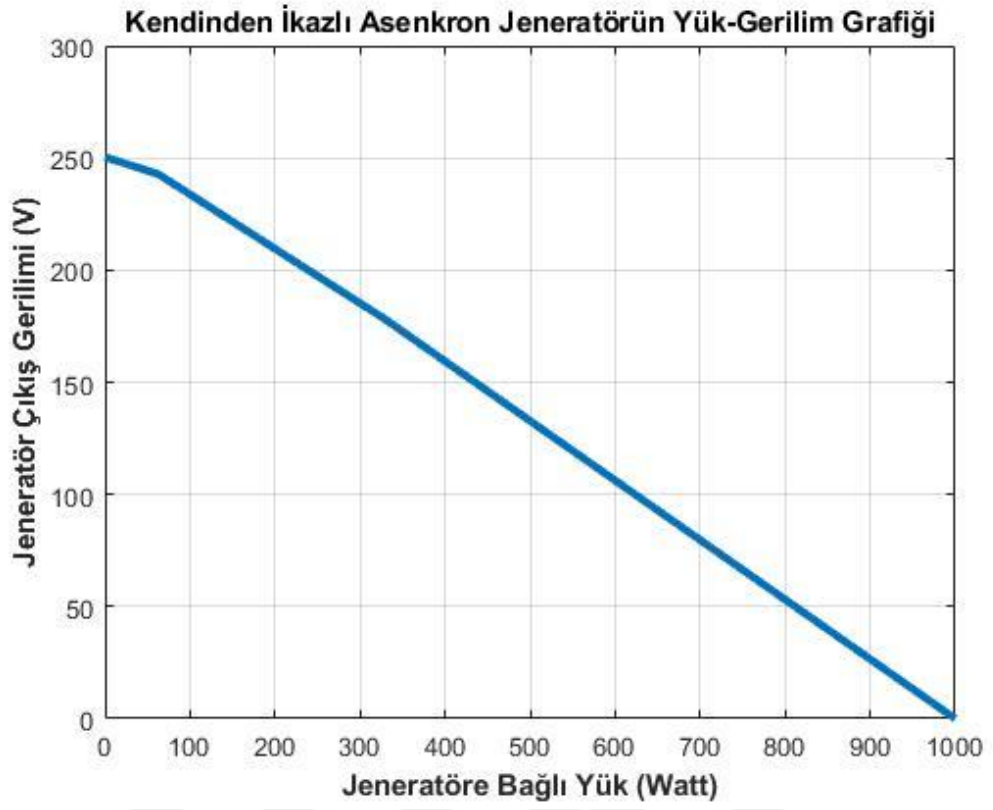
Piyasada ara değerde kondansatör bulunamadığı için 30µf'lık kondansatör temin edilerek, boşta çalışma gerilimi deneyi tekrar yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde 43 Hz frekans değerinin altına inildiğinde jeneratör terminal geriliminin kaybolduğu görölmüştür. 53 Hz frekans değerinde ise 250 V değerine ulaşılmıştır.

230V hedef çalışma gerilimi değerine 50Hz' in biraz üzerinde ulaşıldığı görölmüştür. Bu değerler seçilen kondansatör değerinin doğru olduğunu göstermiştir. Diğer deneyler 30µf +60µf (C-2C) kondansatörler ile devam edilmiştir. (şekil 5.7)

Jeneratörün yükte çalışma grafiğini elde etmek için tahrik edilen jeneratör uçlarına farklı güçlerde rezistanslar bağlanarak çıkış gerilimindeki değişim kayıt altına alınmıştır. Bu deney esnasında asenkron jeneratörün aşırı devire çıkmasının önlenmesi için türbine verilen hidrolik güç kısıtlanmıştır. Bu yüzden 300W'lık bir müşteri yükünde dahi jeneratör terminal gerilimi 180V'un altına düşmektedir. (şekil 5.8)

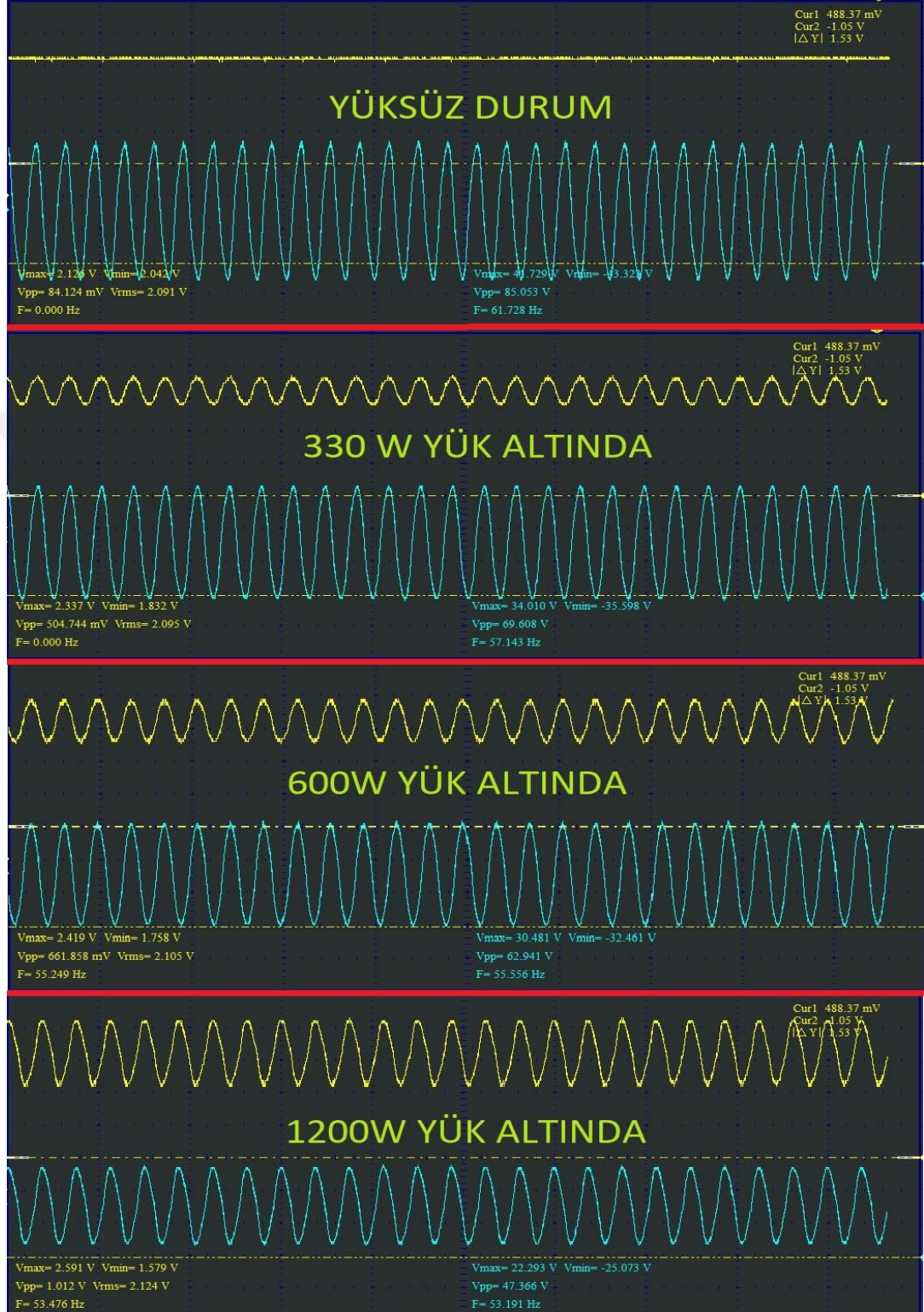


şekil 5.7 C=30Mf İken Asenkron Jeneratör Boşta alışma Grafiği



Şekil 5.8 Kısıtlı Tahrik Altında Asenkron Jeneratörün Yükte Çalışma Grafiği

5.2.2 Kontrol Sistemine Bağlı Değil İken Asenkron Jeneratör Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri

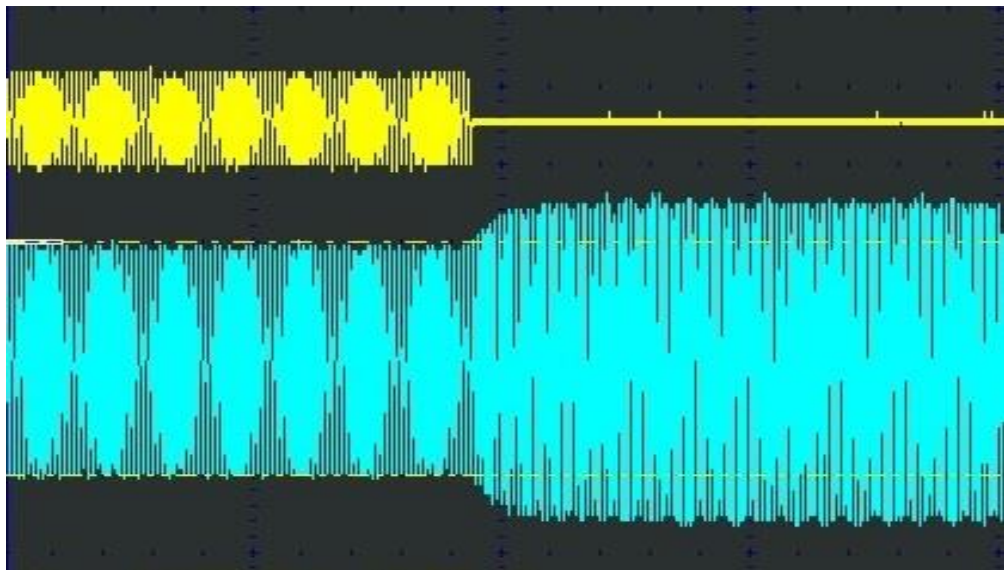


Şekil 5.9 Kontrol Sistemi Olmadan Değişken Yük Altındaki Asenkron Jeneratöre Ait Yük Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri

Türbin olarak çalışan santrifuj pompalarda asenkron jeneratör kontrol sistemine bağlı değilken, terminallerine bağlanan farklı değerlerdeki yüklerin akım ve gerilim dalga şekilleri incelenmiştir. Şekil 5.9 incelendiğinde türbin olarak çalışan pompaya bağlı asenkron jeneratörün terminallerine herhangi bir yük bağlanmadığında 310,3V değere ulaştığı ve 230V sınırlarını gösteren yatay eksen çizgilerinin dışına çıktığı görülmektedir. Sarı renk ile gösterilen dalga şekli yük akımını temsil ederken, mavi renk ile gösterilen dalga şekli yük gerilimini yani jeneratör terminal gerilimini temsil etmektedir. 330W gücünde yük bağlandığında 254V değeri jeneratör terminal uçlarında okunurken, 600W yük altında çıkış geriliminin 230V hedef değerde olduğu ve yatay çizgilerin sınırında seyrettiği görülmektedir. 1200W gücünde bir yük terminal uçlarına bağlandığında jeneratör uç gerilimi 171V değerine kadar inmektedir.

Aynı zamanda grafiklerde görüleceği üzere jeneratör uç gerilimi frekansı yüksüz durumda 61,7Hz değerine kadar yükselmiştir. En düşük ölçülen frekans 53 Hz civarındadır. Gerilimin frekansındaki değişim %16.3 tür. Böyle yüksek frekans ve gerilim değişimlerinin oluştuğu kontrolsüz türbin jeneratör sistemlerinde, eğer jeneratör hassas elektronik devrelere sahip yükler besliyor ise, yüklerin zarar görmesi kaçınılmaz olacaktır.

Şekil 5.9 daki yük akım ve gerilim dalga şekilleri jeneratörün bahsi geçen yüklerdeki sürekli durum halini göstermektedir.



Şekil 5.10 600W Yükün Devre Dışı Kalması Anında Geçici Durum Grafiği

Şekil 5.10 da türbin olarak çalışan santrifuj pompaya bağlı asenkron jeneratörün 600W yük altına girdiğinde oluşan geçici durum grafikleri gösterilmektedir. Sarı renk ile temsil edilen yük akımı kesildiği anda yani yük devre dışı kaldığı anda, jeneratör uç geriliminde ani yükselme yaşanmaktadır.

5.2.3 PID Algoritmali Kontrol Sistemi İle Asenkron Jeneratör Performansının İyileştirilmesi

Türbin olarak çalışan santrifuj pompaya bağlı asenkron jeneratörün, değişken yük altındaki gerilim ve frekans sapmalarını giderecek bir kontrol sistemi tasarlanmış ve deney setine bağlanmıştır.

Asenkron jeneratör durur halde iken türbine gelen su tahriki ile dönmeye başladığı anda gerilim indükleniyorken, gerilim değeri 230 V değerini aşmaya başlaması ile kontrol sistemi müdahale ederek sistem gerilimini 230V'da sabit tuttuğu görülmektedir.

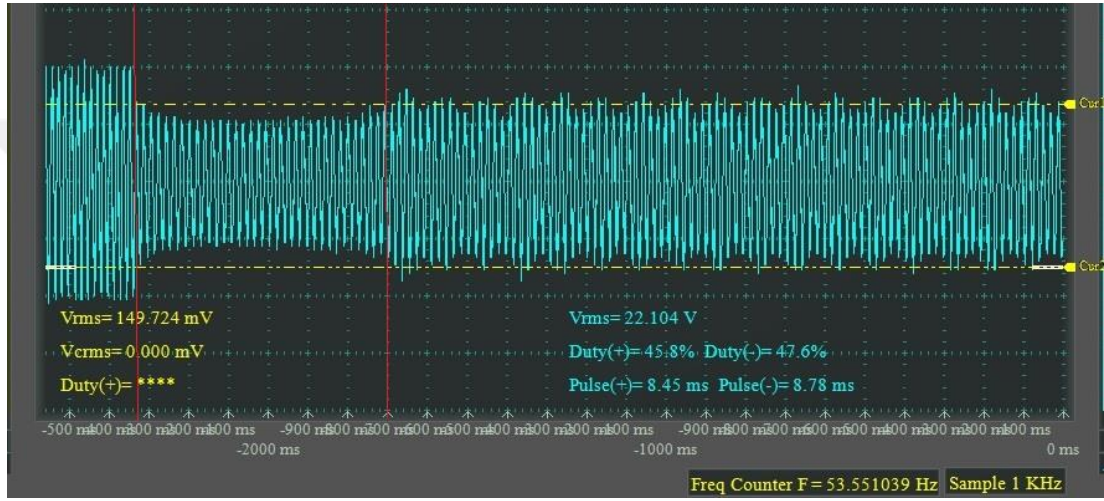


Şekil 5.11 Kontrol Sistemi Devrede İken İlk Devreye Alma Esnasında Gerilim Grafiği

Jeneratörün gerilim indüklemeye başlamasının ardından 230 V referans çizgisini aştığı anda PID algoritması tepki vermeye başlamaktadır. İlk tepki ile kısa süreli gerilimde hızlı bir düşme yaşandıktan sonra kontrol kartı gerilimi referans değerler arasında tutmaktadır. 230V referans çizgisi dışında kalan ince çizgiler, gerilimin ana harmonik bileşeni olmayıp, anahtarlama elemanının etkisi ile ortaya çıkan harmonik bozulma etkileridir.

Şekil 5.12 de, asenkron jeneratör aşırı devir esnasında iken ve terminal gerilimi 300V değeri üzerinde seyrederken, tasarlanan kontrol kartının devreye alınması ile

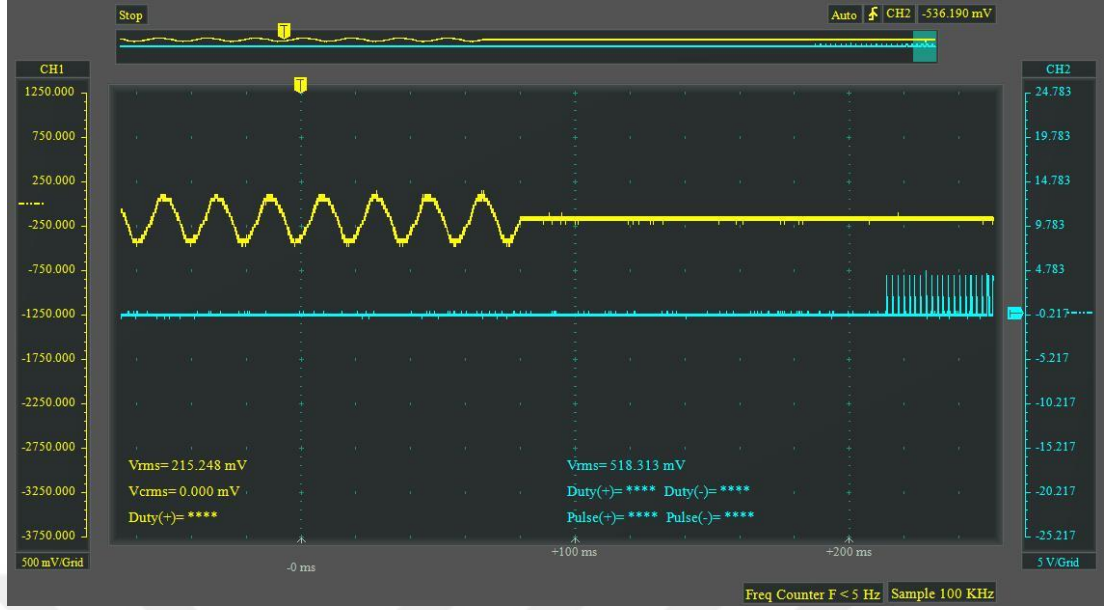
jeneratör uç gerilimi 230V referans gerilimi seviyesine gelerek sürekli durum halini kazanmıştır. Kırmızı renk ile işaretlenen geçici durum dengesizlik süresi 600ms dir. Bu süre sonunda PID algoritması sistem gerilimindeki düzeltmeyi yapmayı başarmıştır. Bu durum kontrol kartı için en zorlu testtir. Çünkü jeneratör aşırı devreye zaten ulaşmış haldedir, aşırı gerilim değerinde ve doyum halindeki makinenin ataletinde göz önüne alırsak, PID algoritmasının düzeltme yapmak için önceden alabileceği bir aksiyon bulunmamaktadır. Bu durumda dahi tasarlanan kontrol kartı kısa sürede istenilen regülasyonu sağlayabilmektedir.



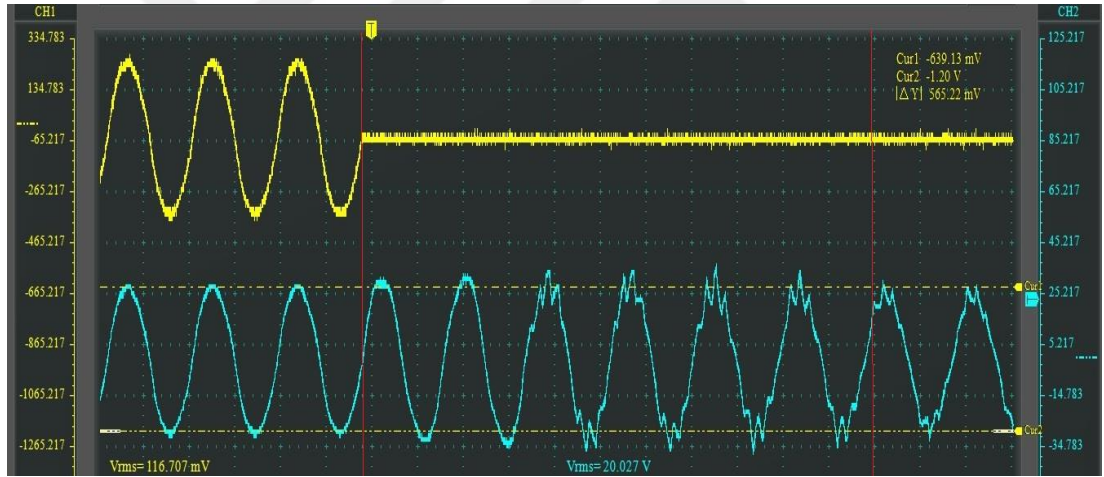
Şekil 5.12 Aşırı Devirden Referans Gerilime Geçici Durum Grafiği

Kontrol kartının işlevini değerlendirebilmek için asenkron jeneratörün yük alma ve yük atma anındaki geçici durum kabiliyetini irdelemek gerekir. Yük alma anında jeneratör gerilimindeki azalmayı ölçerek hızlı şekilde balast yükü gerektiği oranda devre dışı bırakması gerekir. Yük alma anında da jeneratör gerilimindeki ani yükselmeyi ölçerek hızlı şekilde balast yüke gereken oranda gerilim uygulayarak devreye alması gerekmektedir.

Şekil 5.13 te yük altında çalışan asenkron jeneratörün yük atması esnasında, kontrol kartının balast yükü devreye almak için uyguladığı PWM kare dalga sinyali görülmektedir. Yük akımı kesildikten yani jeneratör yük attıktan çok kısa süre sonra kontrol kartı düzeltme tepkisi vermeye başlamıştır. Kontrol kartının gerilimdeki artmayı ölçmesi ve duruma tepki vermesi yaklaşık 150ms sürmüştür. Bu sürenin bir kısmı asenkron jeneratörün geriliminin yükselmesi için gerekli süredir.



Şekil 5.13 Kontrol Kartı Tepki Süresi



Şekil 5.14 Yük Atma Geçici Durum Dalga Şekli

Şekil 5.14 de 600W'lık bir yük bir yükün asenkron jeneratörden ayrılması esnasında ortaya çıkan geçici durum dalga şeklini göstermektedir. Sarı renk ile temsil edilen yük akımı kesildikten sonra, yani yük atma işlemi gerçekleştikten sonra sadece 2 periyod içerisinde yani 40ms içerisinde düzeltme işlemine başlamış ve toplam 5 periyod yani 100ms içerisinde gerilimi istenilen referans çizgi içerisinde regüle etmeyi başarmıştır.

Bu grafikte kontrol kartının tepkisinin başlangıcını gerilim dalga şeklinde oluşan harmonik etkiden anlamak mümkündür. Başlangıçta balast yük sıfır olduğu için ve

jeneratörün tüm yükü müşteri yükünde olduğu için harmonik bozulma etkisi gerilim dalga şeklinde görülmezken, yük atma sonrası balast yükün devreye girmesi ile birlikte gerilim dalga şekli uç noktalarında harmonik bozulma etkisi görünür hale gelmektedir. Harmonik bozulma gerilim dalga şeklinde büyük bir bozulmaya sebep vermeyip, gerilim ana şeklinde bir değişiklik oluşturmamaktadır. Harmonik bozulmanın miktarı ile ilgili hesaplamalar çalışmaya eklenmiştir.



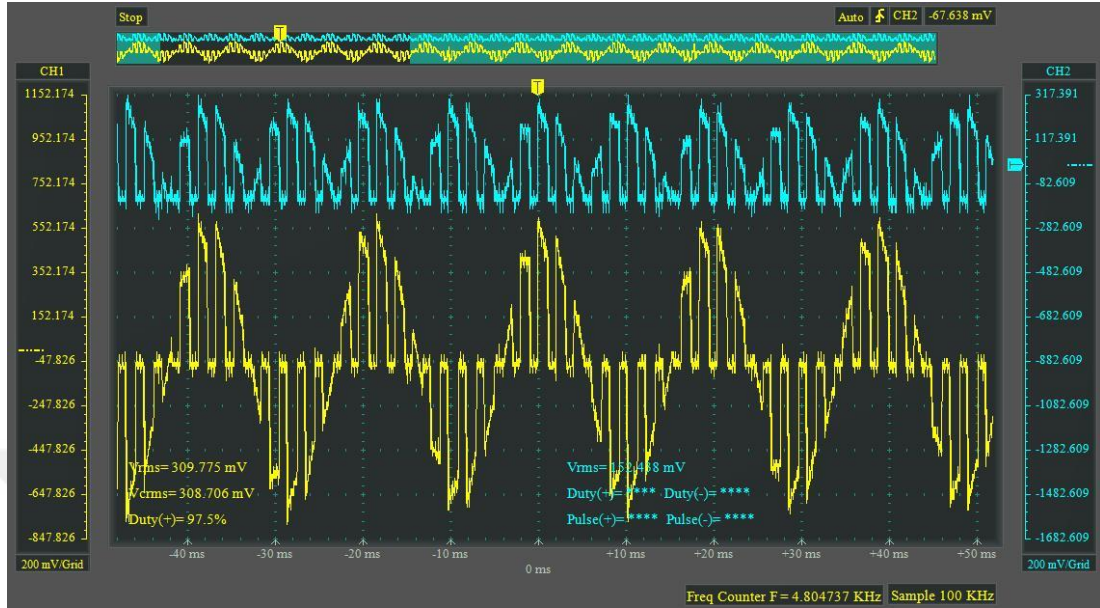
Şekil 5.15 Yük Alma Geçici Durum Dalga Şekli

Şekil 5.15 de kontrol kartı tarafından denetlenmekte olan asenkron jeneratöre 600W gücündeki yük bağlanması durumunda ortaya çıkan geçici durum dalga şekli görülmektedir. Şekil incelendiğinde yükün devreye alınması ile birlikte bir miktar gerilim düşmesi yaşandığı ve kontrol sisteminin gerilimi regüle etmesinin 9 periyodluk bir süre aldığı görülmektedir. Bu süre yaklaşık 180ms dir.

Yük atma esnasında 100ms olan regülasyon süresi, yük alma esnasında 180ms olmasının sebebinin, bağlanan yükün akımında süregelen artış olabileceği kanaatine varılmıştır. Yük atmada yük akımı aniden kesildiği için geçici durum daha kısa sürmekte iken, yük alma esnasında yük akımının sürekli halini alması bir kaç periyot sürmektedir. Şekil 5.15 de yük akımının artan bir seyir izleyerek yaklaşık 10 periyot sonunda sürekli haline ulaştığı görülmektedir.

Şekil 5.16 da balast yük akımı mavi renk ile temsil edilirken, sürücü kartının jeneratörden çektiği akım dalga şekli sarı renk ile temsil edilmiştir. Görüleceği üzere sürücü kartı alternatif akım karakterli iken, balast yükün çektiği akım doğrultucu

arkasında olduğu için doğru akım karakterine sahiptir. Her iki akım grafiğindeki kesiklikler, daha önce bahsedilen harmonik bozulma etkisine yol açan ana etmendir.



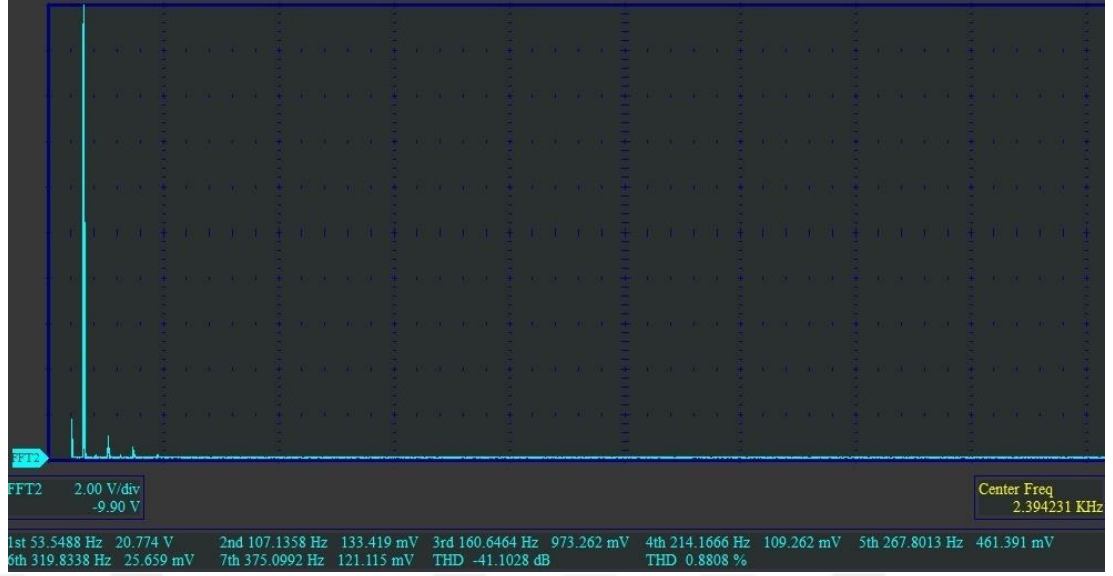
Şekil 5.16 Balast Yük ve Sürücü Kartı Akım Dalga Şekilleri

Tasarlanan kontrol kartı PWM dalga şekli ile IGBT elemanının akımını kontrol ettiği için harmonik bozulma kaçınılmazdır. Jeneratör gerilim dalga şekli uç noktalarında gözlemlenebilen bu bozulma etkisinin hesabı için FFT analiz yöntemi kullanılmaktadır ve bozulma etkisi THD% olarak hesap edilmektedir.

Kullanılan osiloskop programının THD% harmonik bozulma miktarı ölçme kabiliyeti bulunmaktadır. Şekil 5.17 de kontrol kartı devrede değilken yani harmonik bozulma etkisi yok iken hesap edilen THD% si ile şekil 5.18 de kontrol kartı devrede iken yani bozulma etkisi var iken ki THD% değeri hesaplarını ve FFT analiz grafikleri görülmektedir.

Her iki grafik altında iki duruma ait harmonik etkiler ve genlikleri ile birlikte %THD miktarları da görülmektedir. Balast yük devreye girdiğinde THD% miktarı 0.88 den 0.917'ye yükselmektedir. Yani toplamda %0.03 lük artış oluşmaktadır.

Çizelge 5.1 incelendiğinde IEEE519-2014 standardına göre kontrol sistemi kaynaklı harmonik bozulma uluslararası standartların izin verdiği limitler içerisinde olduğu görülmektedir. Bu sebeple kontrol kartının önlem alınması gereken miktarda harmonik kaynaklı bir problem oluşturduğundan bahsedilemez. (Şenel, 2015)



Şekil 5.17 Balast Yük Devre Dışı İken Harmonik Etki THD %0.88



Şekil 5.18 Balast Yük Devrede İken Harmonik Etki THD %0.917

Çizelge 5.1 IEEE519-2014 Harmonik Limit Değerleri

BARA VOLTAJİ	THD% LİMİTİ
V<1.0kV	8.0
1kV<V<69kV	5
69kV<V<161kV	2.5
161kV<V	1.5

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada türbin olarak kullanılan santrifüj pompalarda asenkron jeneratör olarak kullanılan üç fazlı motorların, şebekeden bağımsız çalışma durumlarında tek fazlı değişken yükleri beslerken yaşadıkları problemleri bertaraf etmek için tasarlanan yük kontrol kartının performansı değerlendirilmiştir.

Değişken tek fazlı yük durumlarında asenkron jeneratörün gerilim regülasyonu için PID algoritması ile çalışan kontrol kartı tasarlanmış, bu kartın performansı deneysel ve benzetim ortamında test edilmiştir ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Santrifüj pompaların türbin-jeneratör seti olarak kullanımı problemsiz ve kolaydır. Kontrol kartı olmadığı durumlarda yaşanan aşırı devirlerde türbin ve jeneratörde problem oluşmamıştır.
- Üç fazlı motorlarda tek fazlı yüklerin beslenmesi mümkün olup, bu tür çalışmalarda faz başına düşen güç aşılmadığı sürece jeneratörde herhangi bir aşırı ısınmaya sebebiyet vermemektedir.
- PID kontrol sistemi algoritması, asenkron jeneratörün uç gerilimi regülasyonunda gayet başarılı şekilde çalışmakta ve jeneratör performansında ciddi iyileşme sağlamaktadır.
- Kontrol kartı ve sürücü kartı kaynaklı gerilim bozulmaları düşük seviyede kalmaktadır, limitler içerisindedir ve güvenle kullanılabilir.
- Türbine uygulanan hidrolik kuvvetteki değişimlerde yük kontrol kartı sistemi sürekli kontrol altında tutarak jeneratör geriliminde yükselmeye müsaade etmemektedir.
- SIMULINK benzetim modelleme sonuçları deney sonuçları ile uyumaktadır.
- Deney setinde tahrik için kullanılan motorun hız kontrolü yapan inverter, asenkron jeneratörde fazlardan harmonik bozulmaya sebep olmaktadır ve sonuçları etkilemektedir.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada türbin olarak çalışan asenkron jeneratörler için tasarlanan yük kontrol kartı performansı incelenmiştir. Deneyde değişken yük olarak sadece rezistif yükler ile çalışılmıştır. Endüktif ve kapasitif yükler ile de çalışılarak sistem performansı incelenebilir.

Sistem gerilim ve frekans regülasyonu gayet iyi çalışmaktadır ama verimlilik ile alakalı bir ölçüm yapılmamıştır. Asenkron jeneratörün tek fazlı yüklerde çalışırken verimliliği incelenebilir.

Deney setlerinde hız kontrolü için inverter kullanılıyor ise harmonik etkisinin deney ölçümlerine etki etmemesi için özel önlemlerin alınması faydalı olacaktır.


7. KAYNAKLAR

- Çalışkan, A. (2005). Constant Voltage Constant Frequency Operation of a Self Excited Induction Generator. Master Thesis, METU, Graduate School of Natural and Applied Science, Electrical and Electronics Engineering, Ankara.
- Dias, J. A., dos Santos Jr., E. C., & Rocha, N. (2013). Low Cost Single-Phase Grid-Tie Generator. 2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 6-11 Oct, Lake Buena Vista, FL, USA.
- Döşer, T. L. (2014). Tek Başına Çalışan Asenkron Jeneratörlerin Bulanık Mantık Tabanlı Uç Gerilim Regülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Denizli.
- Eduardo, S., & Bortolotto, G. (1999). Voltage-Frequency Control of a Self Excited Induction Generator. IEEE Transactions on Energy Conversion, 3 September, Bahia Blanca, Argentina.
- Ekanayake, J.B. (2002). Induction Generators for Small Hydro Schemes. Power Engineering Journal, 16(2), 61-67.
- Elder, J.M., Boys, J.T., & Woodward, J.L. (1984). Self Excited Inductin Machine As A Small Low-Cost Generator. IEEE Proceedings C, 131(2), 33-41.
- Harvey, A, Brown, A. (1993). Micro-Hydro Design Manual. Intermediate Technology Puplication, United Kigndom, 374.
- İNT-EL Elektronik Sanayi ve Ticaret LTD. ŞTİ. (7 Ağustos 2019). www.direnc.net. (Erişim tarihi:7Ağustos 2019).
- İskender, İ., & Genç, N. (2009). Rüzgar Türbini ile Sürülen Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratörün İncelenmesi ve Bulanık Mantık Kontrol Yöntemiyle Maksimum Çıkış Gücünün Elde Edilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 343-350.
- Scherer, L. G., Camargo, R. F., & Humberto Pinheiro, C. R. (2011). Advances in the Modeling and Control of Micro Hydro Power Stations with Induction Generators. XI Brazilian Power Electronics Conference, 17-22 September, Phoenix, AZ, USA.
- Shing, B., Murthy, S., Madhusudan, Goel, M. & Tandon, A.K. (2006). A Steady State Analysis on Voltage and Frequency Control of Self Excited Induction Generator in Micro-Hydro System. 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems, 12-15 December, New Delhi, India.
- Shing, B., Muthy, S., & Sushma, G. (2004). Analysis and Design of STATCOM Based Voltage Regulator for Self-Excited Induction Generators. IEEE Transactions on Energy Conversion, December, Italy.
- Smith, N. (2008). *Motors As Generators*. Practical Actions, Warwickshire, United Kingdom, 112.
- Smith, N. P. (1996). Induction Generators for Stand-Alone Micro-Hydro Systems. Proceedings of International Conference on Power Electronics,

Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 8-11 January, New Delhi, India.

- Süerkan, R., & Aras, F. (2000). Küçük Ölçekli Uygulamalar İçin Kendinden Uyarımlı İndüksiyon Generatörünün Elektronik Kontrollü Olarak Uyarım Kapasitesinin Belirlenmesi. Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü.
- Sürgevil, T., & Akpınar, E. (2001). Rüzgar Gücünden Elektriksel Güç Elde Etmede Kullanılan Dönüşüm Sistemleri Ve Kontrol Teknikleri. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu İzmir, 18-21 Ocak, İzmir.
- Swarthi, V., & Nithiyanthan, K. (2017). Squirrel cage Induction Generator simulations on MATLAB/SIMULINK environment. Proceedings of ICRTE-2017, January, Coimbatore, TamilNadu, India.
- Şenel, C. (2015). Güç Kalitesi Problemleri ve Çözüm Yöntemleri. http://www.emo.org.tr/ekler/61deb408cb055eb_ek.pdf. - (Erişim tarihi: 7 Haziran 2019).
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2009). Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri. *MEGEP*. Ankara, 55s.
- Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı. (2018). Elektrik Piyasası 2017 Yılı Gelişim Raporu. Ankara, 88s.
- Ünal, S., & Ödemir, M. (2019). Tek Fazlı Asenkron Generatörün YSA Tabanlı Modellenmesi. http://www.emo.org.tr/ekler/77c703536718b95_ek.pdf. - (Erişim tarihi: 7 Haziran 2019).
- Yuvarajan, S., & Tariq, M. (2013). Simulink Based Modeling, Analysis and Simulation of Self Excited Induction Generator For Use In Remote Areas. *Istanbul University Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 13(1), 1623-1628.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Osman Fırat Alkan
Doğum Yeri	Artvin
Doğum Tarihi	05.11.1982
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	+905304434647
E-Posta Adresi	ofalkan@outlook.com
	
Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Fırat Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2005