

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTORUN HIZININ SENSÖRSÜZ OLARAK
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Elektronik ve Hab. Müh. Levent BAYRAM

Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Danışman: Prof.Dr. Doğan Dibekçi

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTORUN HIZININ SENSÖRSÜZ OLARAK
BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektronik ve Hab. Müh. Levent BAYRAM**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04 Haziran 2007

Tezin Savunulduğu Tarih: 09 Ekim 2007

Tez Danışmanı
Prof.Dr.Doğan Dibekçi

(.....)

Üye
Yrd.Doc.Dr.Mehmet Yakut

(.....)

Üye
Yrd.Doc.Dr.Nur Bekiroğlu

(.....)

KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tezin sensörsüz asenkron motor uygulamaları konusunda çalışan araştırmacılara kaynaklık edeceğini umuyorum.

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında emeği geçen, öncelikle tez danışmanım Prof.Dr. Doğan Dibekçi, her türlü desteği veren çok değerli Yrd.Doç.Dr. Mehmet Yakut ve Ar. Gör. Murat Sönmez'e, aileme ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Asenkron Motorların Yapısı ve Özellikleri.....	1
1.2 Asenkron Motorların Çalışma Şekli	5
1.3 Asenkron Motor Çeşitleri	6
1.3.1 Sincap kafesli asenkron motorlar	6
1.3.2 Bilezikli asenkron motorlar	8
1.4 Asenkron Motorlarda Kayma	9
1.5 Asenkron Motorlara Yol Verme	10
1.5.1 Dirençle yol verme	10
1.5.2 Ototransformatör ile yol verme.....	10
1.5.3 Yıldız / Üçgen yol verme	10
1.5.3.1 Üç fazlı asenkron motorların yıldız (Y) bağlanması ve özelliği.....	11
1.5.3.2 Üç fazlı asenkron motorların üçgen (Δ) bağlanması ve özelliği.....	11
1.6 Üç Fazlı Asenkron Motorların Bağlantı Klemensinin Tanıtılması.....	12
1.7 Üç Fazlı Motorların Etiketindeki Bilgilerin Açıklanması.....	13
2. ASENKRON MOTOR MODELLERİ	15
2.1 Asenkron Motorun Dinamik Modeli.....	15
2.2 Asenkron Motorun (Devresi) Mekanik Modeline İlk Yaklaşım	18
2.3 Kalıcı Durum ve Geçiş Modeli (abc-dq0 Transformation)	21
2.3.1 abc-dq0 dönüşümü	21
2.4 Asenkron Motorun Matematiksel Modeli	23
3. SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORUN BOŞTA, KISA DEVRE VE YÜKTE ÇALIŞMA DENEYİ.....	25
3.1 Asenkron Motorun Yapısı ve Çalışma Prensibi	25
3.2 Eşdeğer Devre.....	27
3.3 Asenkron Motorun Boşta Çalışma Deneyi.....	30
3.4 Asenkron Motorun Kilitli Rotor Deneyi	32
4. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORUN DENEY DÜZENEGİ	35
5. YAPILAN TESTLER VE ALINAN VERİLER	40
5.1 12.00 Hz den 15.00 Hz'e Periyodik Artımlı Test Sonuçları	40
5.2 15.00 Hz den 17.50 Hz'e periyodik artımlı test sonuçları.....	42
5.3 17.50 Hz' den 20.00 Hz' e Periyodik Artımlı Test Sonuçları	44
5.4 365 RPM'de Yüksüz ve Yüklü Olarak Yapılan Deney Sonuçları.....	46
5.5 455 RPM' de Yüksüz ve Yüklü Olarak Yapılan Deney	48
5.6 535 RPM de Yüksüz ve Yüklü Olarak Yapılan Deney.....	50
5.7 613 RPM de Yüksüz ve Yüklü Olarak Yapılan Deney.....	52

6. YSA İLE HIZ KESTİRİMİNİN YAPILMASI	54
6.1 Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)	54
6.2 YSA Kullanılarak Asenkron Motor Hızının Belirlenmesi	56
6.2.1 12Hz-15Hz aralığında kestirim sonuçları	59
6.2.2 15Hz-17,5Hz aralığında kestirim sonuçları	60
6.2.3 17,5Hz-20Hz aralığında kestirim sonuçları	62
6.2.4 355RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları.....	63
6.2.5 455RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları.....	64
6.2.5 535RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları.....	65
6.2.6 613RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları.....	67
7. SONUÇ	72
KAYNAKLAR	73
EK.A YAPAY SİNİR AĞLARI.....	75
A.1. Yapay Sinir Ağı Hücresi.....	77
A.2. Aktivasyon Fonksiyonları.....	78
A.3. Yapay Sinir Ağları Modelleri	80
A.4. Yapay Sinir Ağlarının Eğitilmesi.....	81
A.5. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme Algoritmaları.....	82
A.5.1. Geri Yayınım Öğrenme Algoritması.....	83
A.5.2. Levenberg- Marquardt Algoritması.....	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Sincap kafesli asenkron motor görünümü	2
Şekil 1.2 Stator	4
Şekil 1.3 Rotor – Stator çifti ve Rotor	5
Şekil 1.4 Sincap kafesli asenkron motor elemanları.....	7
Şekil 1.5 Yıldız Bağlantı.....	11
Şekil 1.6 Üçgen Bağlantı.....	12
Şekil 1.7 Asenkron motor klemensi.....	13
Şekil 1.8 Yıldız bağlantı.....	13
Şekil 1.9 Üçgen bağlantı	13
Şekil 1.10 Motor Etiketi.....	14
Şekil 2.1 T-Modelinin Blok Diyagramı	16
Şekil 2.2 x-Eksen Denkleminin Blok Diyagramı	19
Şekil 2.3 (2.16) Denkleminin Mekanik Modeli.....	20
Şekil 2.4 Trigonometrik ilişki.....	22
Şekil 3.1 Asenkron motorun bir fazına ait indirgenmemiş eşdeğer devre	27
Şekil 3.2 (a) T tipi eşdeğer devre , (b) L tipi eşdeğer devre.....	29
Şekil 3.3 Transformatör eşdeğer devresine benzetilmiş asenkron motor	29
Şekil 3.4 Asenkron motorun boştta çalışma için eşdeğer devresi	30
Şekil 3.5 Asenkron motorun kısa devre çalışma eşdeğer devresi.....	32
Şekil 4.1 Tasarlanan deney düzeneği görünüşü 1	35
Şekil 4.2 Tasarlanan deney düzeneği görünüşü 2.....	35
Şekil 4.3 Deney düzeneği.....	36
Şekil 4.4 Asenkron motor sürücüsü (inverter)	37
Şekil 4.5 Akım trafoları	38
Şekil 4.6 Deney düzeneği.....	39
Şekil 5.1 12.00-15.00 Hz aralığı RPM grafiği.....	40
Şekil 5.2 12.00-15.00 Hz aralığı Akım grafiği.....	40
Şekil 5.3 12.00-15.00 Hz aralığı U fazı gerilimi grafiği	41
Şekil 5.4 12.00-15.00 Hz aralığında DC motor gerilim ve akımı.....	41
Şekil 5.5 15.00-17.50 Hz aralığı RPM grafiği.....	42
Şekil 5.6 15.00-17.50 Hz aralığı Akım grafiği.....	42
Şekil 5.7 15.00-17.50 Hz aralığı U fazı gerilimi grafiği	43
Şekil 5.8 15.00-17.50 Hz aralığında DC motor gerilim ve akımı.....	43
Şekil 5.9 17.50-20.00 Hz aralığı RPM grafiği.....	44
Şekil 5.10 17.50-20.00 Hz aralığı Akım grafiği	44
Şekil 5.11 17.50-20.00 Hz aralığı U fazı gerilimi grafiği	45
Şekil 5.12 17.50-20.00 Hz aralığında DC motor gerilim ve akımı.....	45
Şekil 5.13 365 RPM hızında hız grafiği.....	46
Şekil 5.14 365 RPM hızında Akım grafiği.....	46
Şekil 5.15 365 RPM’de U fazı gerilimi grafiği	47
Şekil 5.16 365 RPM hızında DC motor gerilim ve akımı.....	47
Şekil 5.17 455 RPM’de hız grafiği	48
Şekil 5.18 455 RPM hızında Akım grafiği.....	48

Şekil 5.19	455 RPM'de U fazı gerilimi grafiği	49
Şekil 5.20	455 RPM hızında DC motor gerilim ve akımı.....	49
Şekil 5.21	535 RPM'de hız grafiği	50
Şekil 5.22	535 RPM hızında Akım grafiği.....	50
Şekil 5.23	535 RPM'de U fazı gerilimi grafiği	51
Şekil 5.24	535 RPM hızında DC motor gerilim ve akımı.....	51
Şekil 5.25	613 RPM'de hız grafiği	52
Şekil 5.26	613 RPM hızında Akım grafiği.....	52
Şekil 5.27	613 RPM'de U fazı gerilimi grafiği	53
Şekil 5.28	613 RPM hızında DC motor gerilim ve akımı.....	53
Şekil 6.1	Tek saklı katmanlı İleri Beslemeli YSA.....	54
Şekil 6.2	Asenkron motor için YSA tabanlı hız kestiricisi	56
Şekil 6.3	Yapay sinir ağı eğitim sonuçları	57
Şekil 6.4	Eğitim sonucu oluşan YSA.....	58
Şekil 6.5	YSA girişlerinin önem durumları	58
Şekil 6.6	12Hz-15Hz aralığında RPM grafiği	59
Şekil 6.7	15Hz-17Hz aralığında RPM grafiği.....	61
Şekil 6.8	17,5Hz-20Hz aralığında RPM grafiği	62
Şekil 6.9	355 RPM'de yüksüz ve yüklü olarak yapılan kestirim	64
Şekil 6.10	455 RPM'de yüksüz ve yüklü olarak yapılan kestirim	65
Şekil 6.11	535 RPM'de yüksüz ve yüklü olarak yapılan kestirim	66
Şekil 6.12	613 RPM'de yüksüz ve yüklü olarak yapılan deneyin RPM grafiği	67
Şekil 6.13	1. fazın akım grafiği (3000 örn. , 150ms.).....	67
Şekil 6.14	2. fazın akım grafiği (3000 örn. , 150ms.).....	68
Şekil 6.15	3. fazın akım grafiği (3000 örn. , 150ms.).....	68
Şekil 6.16	1. fazın gerilim grafiği (3000 örn. , 150ms.).....	69
Şekil 6.17	2. fazın gerilim grafiği (3000 örn. , 150ms.).....	69
Şekil 6.18	3. fazın gerilim grafiği (3000 örn. , 150ms.).....	70
Şekil 6.19	613 RPM yüksüz-yüklü-yüksüz olarak yapılan kestirim	70
Şekil A.1	Basit bir sinir hücresi.....	75
Şekil A.2.	Sinir sisteminde bilgi akışı.....	76
Şekil A.3	Temel yapay sinir ağı hücresi.	77
Şekil A.4	Eşik aktivasyon fonksiyonu.	78
Şekil A.5	Doğrusal aktivasyon fonksiyonu.....	79
Şekil A.6	Logaritma Sigmoid aktivasyon fonksiyonu.....	79
Şekil A.7	İleri Beslemeli Yapı.....	80
Şekil A.8	Geri beslemeli yapı.....	81
Şekil A.9	İleri beslemeli çok katmanlı sinir ağı.	83

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1 Γ -modeli ile T-modeli arasındaki bağıntılar	17
Tablo 3.1 Boşta çalışma deney ölçüm sonuçları	32
Tablo 3.2 Rotoru kilitli kısa devre çalışma deney ölçüm sonuçları	34
Tablo 4.1 Üç faz asenkron motorun etiket değerleri	36
Tablo 4.2 DC motorun etiket değerleri	36
Tablo 6.1 12Hz 15Hz aralığında rotor hızı kestirim sonuçları.....	60
Tablo 6.2 15Hz 17,5Hz aralığında rotor hızı kestirim sonuçları.....	61
Tablo 6.3 17,5Hz - 20Hz aralığında rotor hızı kestirim sonuçları.....	63
Tablo 6.4 355RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları	64
Tablo 6.5 355RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları	65
Tablo 6.6 535RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları	66
Tablo 6.7 613RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları	71

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

R_s :	stator faz sargı direnci [Ω]
$R_s(S.Ç)$:	stator faz sargı direnci süreli çalışma [Ω]
R_h :	iki çubuk arasındaki halka parçası direnci [Ω]
$R_ç$:	çubuk direnci [Ω]
M_{ss} :	stator faz sargıları arası karşıt endüktans [H]
M_{rr} :	rotor çubukları arası ortak endüktans [H]
μ_0 :	boşluğun magnetik geçirgenliği
g :	hava aralığı [m]
A :	hava aralığı kesiti [m^2]
N_r :	rotor çubuk sayısı
N_s :	stator sargı sayısı
M :	rotor sayısı = rotor faz sayısı
$[\varphi_s]$:	Stator akı vektörü
$[\varphi_r]$:	Rotor akı vektörü
V :	Faz başına uygulanan gerilim (V)
V_a :	A fazına ait gerilim değeri (V)
V_b :	B fazına ait gerilim değeri (V)
V_c :	C fazına ait gerilim değeri (V)
I_a :	A fazına ait akım değeri (A)
I_b :	B fazına ait akım değeri (A)
I_c :	C fazına ait akım değeri (A)
\dot{I}_s :	Stator akımı(A)
\dot{I}_{ds} :	d eksenini izdüşümü stator akımı(A)
\dot{I}_{qs} :	q eksenini izdüşümü stator akımı(A)
\dot{I}_r :	rotor akımı(A)
\dot{I}_{dr} :	d eksenini izdüşümü rotor akımı(A)
\dot{I}_{qr} :	q eksenini izdüşümü rotor akımı(A)
λ_r :	rotor kaçak akısı(Wb)
λ_{qr} :	q eksenini izdüşümü rotor kaçak akısı(Wb)
λ_{dr} :	d eksenini izdüşümü rotor kaçak akısı(Wb)
λ_s :	stator kaçak akısı(Wb)
λ_{qs} :	q eksenini izdüşümü stator kaçak akısı(Wb)
λ_{ds} :	d eksenini izdüşümü stator kaçak akısı(Wb)
w :	anlık açısal hız değeri(rad/sn)
w_r :	rotor hızı(rad/sn)
T_e :	Elektriksel tork(N.m)
T_L :	Yüklenen tork(N.m)
L_m :	mıknatıslanma endüktansı(H)
L_r :	rotor kaçak akı endüktansı(H)

R_1 :	Faz başına stator sargı direnci (Ω)
X_1 :	Faz başına stator sargısı kaçak reaktansı (Ω)
R_2 :	Faz başına rotor sargı direnci (Ω)
X_2 :	Kilitli rotor durumunda faz başına rotor sargı kaçak reaktansı(Ω)
X_m :	Faz başına mıknatıslama reaktansı (Ω)
R_{Fe} :	Faz başına demir direnci(Ω)
n_s :	Stator sargısının döner alan hızı (d/dk)
n_r :	Rotor sargısının döner alan hızı (d/dk)
k_{wl} :	Stator sargısı için sargı faktörü
k_{w2} :	Rotor sargısı için sargı faktörü
Φ_m :	Faz başına mıknatıslama akısı (Wb)
E_1 :	Stator sargısında faz başına endüklenen e.m.k. (V)
E_{20} :	Rotor kilitli durumda iken rotor sargısında faz başına emk (V)
E_2 :	Herhangi bir n_r hızında rotor sargısında faz başına emk (V)
I_1 :	Faz başına stator sargı akımı (A)
I_2 :	Faz başına rotor sargı akımı (A)
I_0 :	Faz başına boşa çalışma akımı (A)
I_{fe} :	Faz başına demir kaybı akımı (A)
I_m :	Faz başına mıknatıslama akımı (A)
$P(k)$:	Hata kovaryans matrisi
Q :	Süreç gürültü kovaryans matrisi
R :	Ölçüm gürültü kovaryans matrisi

ASENKRON MOTOR HIZININ SENSÖRSÜZ OLARAK BELİRLENMESİ

Levent BAYRAM

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Hız kestirimi

Özet: Günümüzde endüstride kullanılan motorlar arasında %95 paya sahip olan asenkron motorlar, eskiden sadece şebeke frekansında yani sabit hızda kullanılabilirdi fakat son yirmi yıl boyunca yarıiletken teknolojisinin gelişimiyle, mevcut asenkron motorları değişken hız çalışmasına tamamen uygun hale getirilmiştir.

Asenkron motorlar genellikle açık çevrim frekans inverterleri ile sürülürler. Açık çevrim sürülen asenkron motorlar yükte meydana gelen değişime karşılık verememekte ve, yüke göre değişen hızda üretim kalitesinde çok büyük kayıplara neden olmaktadır. Bu sorunları aşabilmek için vektör denetimli asenkron motorlar kapalı çevrim çalıştırılmışlardır. Bu yöntemin dezavantajı, asenkron motorun rotor hızı ölçülü olmak zorundadır, bu ölçüm için takometre yada ardışıl sayıcı (incremental encoder) gibi bir hız sensörüne ihtiyaç vardır. Hız sensörünün fiyatı, 10 kW dan daha küçük olan asenkron motor için en az motorun kendi fiyatıyla aynıdır. Motordaki sensörün montajı da birçok uygulamada engel teşkil etmektedir.

Hızın ölçülmesi yerine kestirilmesi hem fiyat hem de kullanım açısından çok büyük kolaylıklar sağlayacaktır. Hız sensörü kullanmadan inverter çıkışındaki gerilim ve akımların ölçülmesi ile hız kestirilebilir.

Bu tezde bir asenkron motorun, hızının ve konumunun sensörsüz olarak belirlenmesi ile ilgili modellerin, oluşturulan gerçek sistem üzerinde denemeleri yapılmıştır.

SPEED ESTIMATION of SENSORLESS INDUCTION MOTOR

Levent BAYRAM

Keywords: Induction machine, Speed estimation

Abstract: The induction motor is the most widely used electrical motor in industrial applications. The majority of induction machines are used in constant speed drives, but during the last decades the introduction of new semiconductor devices has made variable speed drives with induction machines available.

Variable speed induction motors are usually fed by open loop frequency inverters. The rotor speed of the machine is not measured, and a change in load torque will result in a change in speed. The dynamic performance is weak and problems such as oscillations are common.

All those properties are obtained with vector controlled induction machines. The drawback of this method is that the rotor speed of the induction machine must be measured, which requires a speed sensor of some kind, for example a resolver or an incremental encoder. The cost of the speed sensor, at least for machines with ratings less than 10 kW, is in the same range as the cost of the motor itself. The mounting of the sensor to the motor is also an obstacle in many applications. A *sensorless* system where the speed is *estimated* instead of *measured* would essentially reduce the cost and complexity of the drive system.

This work focuses on observers estimating speed for induction machines.

1.GİRİŞ

Günümüzde endüstride kullanılan motorlar arasında %95 paya sahip olan asenkron motorlar, eskiden sadece şebeke frekansında yani sabit hızda kullanılabiliyordu fakat son yirmi yıl boyunca yarıiletken teknolojisinin gelişimiyle, mevcut asenkron motorları değişken hız çalışmasına tamamen uygun hale getirilmiştir.[1]

Asenkron motorlar genellikle açık çevrim frekans inverterleri ile sürülürler. Açık çevrim sürülen asenkron motorlar yükte meydana gelen değişime karşılık verememekte ve ,yüke göre değişen hızda üretim kalitesinde çok büyük kayıplara neden olmaktadır. Bu sorunları aşabilmek için vektör denetimli asenkron motorlar kapalı çevrim çalıştırılmışlardır. Bu yöntemin dezavantajı, asenkron motorun rotor hızı ölçülü olmak zorundadır, bu ölçüm için takometre ya da ardışıl sayıcı (incremental encoder) gibi bir hız sensörüne ihtiyaç vardır. Hız sensörünün fiyatı, 10 kW dan daha küçük olan asenkron motor için en az motorun kendi fiyatıyla aynıdır. Motordaki sensörün montajı da birçok uygulamada engel teşkil etmektedir.

Hızın ölçülmesi yerine kestirilmesi hem fiyat hemde kullanım açısından çok büyük kolaylıklar sağlayacaktır. Hız sensörü kullanmadan inverter çıkışındaki gerilim ve akımların ölçülmesi ile hız kestirilebilir.

Bu tezde bir asenkron motorun, hızının ve konumunun sensörsüz olarak belirlenmesi ile ilgili modellerin, oluşturulan gerçek sistem üzerinde denemeleri yapılmıştır.

1.1 Asenkron Motorların Yapısı ve Özellikleri

Elektrik motoru elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir elektrik makinesidir.

Asenkron motorların elektrik motorları arasındaki payının %95 kadar olduğu tahmin edilmektedir. Bu rakam asenkron motorların önemini belirtmeye yeter.

Çalışma ilkesi bakımından asenkron motorlara indüksiyon motorları da denir.

Asenkron motorların üstünlükleri;

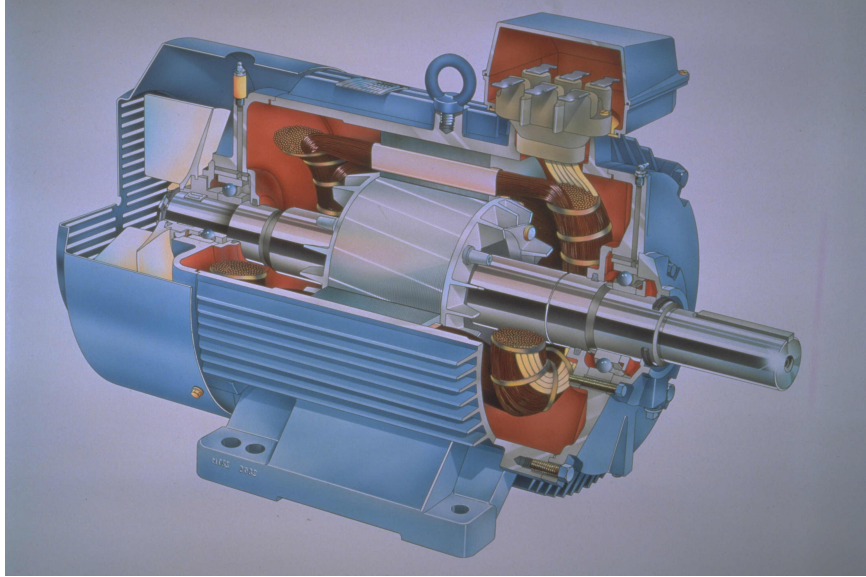
I. Sürekli bakım istemez. (En az bakım maliyeti olan elektrik motorudur.)

II. Yük altında devir sayıları çok değişmez

III. Fiyatı diğerlerine oranla ucuzdur.

IV. Çalışma anında ark (kıvılcım) üretmez

Yukarıdaki maddelerden de anlaşılacağı gibi yapımı en kolay, en dayanıklı, işletme güvenliği en yüksek, bakım gereksinimi en az olan elektrik motorudur. Bu özellikler, asenkron motorların endüstride en çok kullanılan motorlar olmalarına sebep olmuştur.



Şekil 1.1 Sincap kafesli asenkron motor görünümü

Asenkron makineler endüstride genellikle motor olarak çalıştırılırlar, fakat belirli koşulların sağlanması durumunda generatör olarak da çalıştırılabilirler. Asenkron makineleri senkron makinalardan ayıran en büyük özellik, dönme hızının sabit olmayışıdır. Bu hız motor olarak çalışmada senkron hızdan küçüktür. Makinanın asenkron oluşu bu özelliğinden ileri gelmektedir.

Asenkron motorlar genel olarak stator ve rotor olmak üzere iki kısımdan yapılmışlardır. Stator, asenkron motorun duran kısmıdır. Rotor ise dönen kısmıdır.

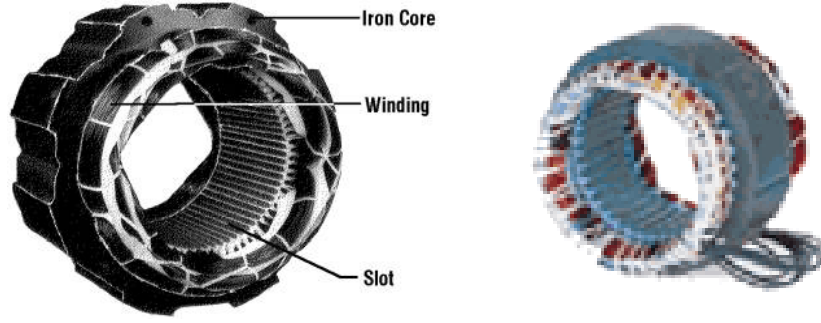
Asenkron motorun rotoru, kısa devreli rotor (sincap kafesli rotor) ve sargılı rotor (bilezikli rotor) olmak üzere iki çeşittir. Asenkron motor, rotorun yapım biçimine göre bilezikli ve kafesli asenkron motor olarak tanımlanır.

Rotor ve Stator saç paketlerinin yapılması için 0,35 - 1,5 mm kalınlığında, tek yada çift taraflı yalıtılmış saç levhalar makas tezgahlarında şeritler halinde kesilir. Bu şekilde oluşturulan saç şeritler şerit çekirdekli trafoların ve makinaların yapımında başka bir işleme gereksinilmeden derhal kullanılabilir. Makastan çıkan saç şeritler çok seri - çalışan kalıp - kesme presine verilir. Dakikada 300 - 500 kesme yapan 500 000 kp'lık presler stator ve rotor saç profillerini bir dizi - kesme halinde arka arkaya çıkartır.

Rotor ve stator saç profilleri birbirinin boşluğunu dolduracak şekilde kesildiğinden (kalıpla), üretim sonu kırpıntı parça miktarı çok azdır. Büyük çaplı rotor ve stator saç paketleri genellikle tek - kesmede çıkartılır. Bunun için, önceden hazırlanmış disk şeklindeki saçlar üst üste gelecek şekilde yerleştirilir. Bu şekilde yerleştirilmiş saç tabakaları kalıp - kesme presinde tek bir hamlede kesilir. Sargıların yerleştirilmesi için gerekli oluklar makinelerde açılır. İşlem görece parça miktarı fazla değil ise oluk açma otomatında oluklar tek tek açılır. Büyük sayıdaki parça miktarları ve büyük çaplı saçlar için her seferinde 5-6 oluk açabilen otomatlardan yararlanılmaktadır. Oluk açma otomatlarından gelen saçlar özel sayıcı terazilerde tartılır, istif makinesinde üst üste tabakalandırılır ve 5 - 10 kp/cm² lik bir basınç altında saç paketi halinde birleştirilir.

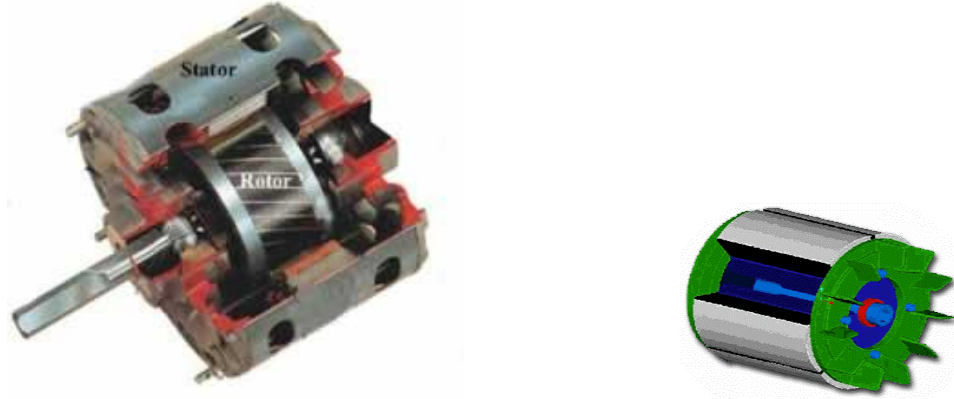
Stator ve rotor sargı oluklarına uygulamada genellikle karton döşenmektedir. Yalıtım amacıyla döşenen kartonun görevi: Oluk içindeki pürüzleri örtmek ve sargı tellerini hasarlardan korumaktır. Karton ile yalıtılan oluklara sargılar döşenir. Stator ve rotor sargıları tek kat yada çift kat sarımlı yapılırlar. Tek katlı sargılarda her oluk içinde her bir sargının yalnız bir kenarı, buna karşın çift katlı sargılarda çift sayıda bobin kenarı (genellikle iki) bulunur. Stator Sargıları: Tek katlı sargılarda, önceden bir sargı makinasında hazırlanmış ve izole edilmiş sargı paketleri açık oluklara tek tek yerleştirilir. Büyük gerilimli statorlarda açık oluklu saç paketleri kullanılır. Yarı açık oluklara sargılar özel kalıp yada şablonlar yardımıyla tek tek döşenmektedir. Tam kapalı oluklar içine, teller statorun alın tarafından başlayarak, ipliğin iğneye

geçirildiği gibi tek tek geçirilir. Sonra bu teller sargı haline getirilir. Oldukça uğraşılı bu tür sarım yerine özel sargı paketleri de kullanılmaktadır. Bu sargı paketlerindeki iletkenler sadece daha önceden hazırlanmış taraflarından oluklara sokulur. Bu şekilde olukların diğer tarafından dışarı çıkan sargı başları birbirleriyle sert lehim ya da kaynak suretiyle birleştirilir.



Şekil 1.2 Stator

Şayet oluklara az sayıda ve büyük kesitli iletkenler sokulacaksa, çubuk şeklindeki iletkenler kullanılır. Bunlar sonradan kendi aralarında vidalarla ya da lehimlemek suretiyle birleştirilir. Tahta yada fiberden yapılmış oluk kamaları (yada takozları) oluk ağızlarını kapatmaya yarar. Oluklardan dışarı çıkan sargı başları pamuk yada cam pamuğu ile sıkıca sarılarak yalıtılır. Sargıların devre bağlantıları sağlandıktan sonra stator bir fırın içinde 100 °C civarında kurutulur ve sonra yalıtkan vernik emdirilir. Vernik emdirme işlemi havasız bir ortam içinde yapılır. Bunun için önce stator bir vakum kabı içine yerleştirilir ve kap sıkıca kapatılarak havası çekilir. Sonra kabın üstünde bulunan vernik musluğu açılarak içeriye vernik gönderilir. Ortam havasız olduğundan içeriye gönderilen vernik sargıların en küçük aralıklarına dahi nüfuz eder. Vernik emdirme işleminden sonra stator tekrar kurutma fırınına sokulur ve burada son kurutma işlemi yapılır. Rotor sargıları elde yada makinede sarılır. Bunun dışında uygulanacak bütün işlemler stator sargılarında olduğu gibidir.



Şekil 1.3 Rotor – Stator çifti ve Rotor

Rotoru sincap kafesli asenkron motorun ve bilezikli asenkron motorun statoru aynı şekilde yapılmıştır. Asenkron motorun statoru; gövde, stator-saç paketleri ve stator sargılarından oluşmuştur. Rotoru bilezikli asenkron motorun rotoru stator içinde yataklanmıştır. Rotor mili üzerinde rotor saç paketi ve döner bilezikler bulunur. Rotor saç paketi üzerine açılmış oluklara rotor sargıları döşenmiştir. Sincap kafesli asenkron motorun ise rotor saç paketi oluklarında sargılar yerine alüminyum yada bakırdan yuvarlak ve kanatçık şeklinde çubuklar bulunur. Bu çubuklar her iki ucundan kısa devre bilezikleriyle elektriksel olarak kısa devre edilmiştir.

Bilezikli asenkron motorun yararı, ek dirençler yardımı ile kalkış akımının istendiği kadar azaltılabilmesi, kalkış ve frenleme momentinin arttırabilmesidir. Şebekelerin çok güçlenmesi ile kalkış akımını sınırlamanın önemi azalmıştır, fakat yüksek kalkış momenti ve uzun kalkış süresi bazı tahriklerde bilezikli asenkron motorun uygulamasını gerektirebilir.

1.2 Asenkron Motorların Çalışma Şekli

Asenkron motorun stator sargılarından geçen akım manyetik döner alan üretir. Bu döner alanın etkisi altında kalan rotor sargıları üzerinde alternatif gerilimler indüklenir. Rotor sargıları kısa devre edilmiş ise, bu sargılar üzerinden geçen akımlar rotor döner alanını oluşturur. Rotor döner alanı ile stator döner alanının karşılıklı etkimesi sonucu rotor dönmeye başlar.

Bazı motorlarda stator içte, rotor dışta bulunur. Ancak dönen parça yine rotordur. Oto frenlerinin kontrol edildiği sistemlerde, bazı yürüyen merdivenlerde ve özel aspiratörlerde kullanılan bu tür motorlar yukarıda anlatılan asenkron motor prensibine göre çalışır.

Rotordan beslemeli motorlarda, içte bulunan rotor döner bilezikler üzerinden akım şebekesine bağlanır. Buna karşın stator sargıları kısa devre edilmiştir. Doğrudan doğruya akım şebekesinden beslenen rotor üzerinde bir döner alan oluşur. Bu döner alan stator sargıları üzerinde endüksiyon nedeni ile bir akım ve bunun sonucu stator döner alanını ortaya çıkarır. Ancak bu kez rotor kendi döner alanının ters yönünde (lenz kuralı) döner.

1.3 Asenkron Motor Çeşitleri

1.3.1 Sincap kafesli asenkron motorlar

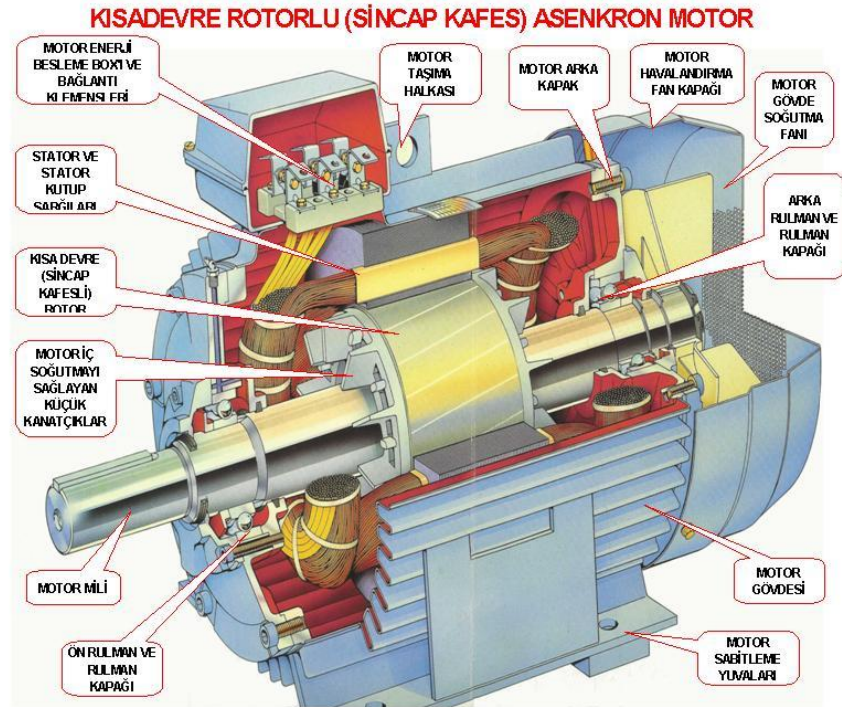
Sincap kafesli (kısa devre rotorlu) asenkron motorlar işletme anında bilezikleri kısa devre edilmiş rotoru bilezikli motorlarla hemen hemen aynı özellikleri gösterir. Kısa devre rotorunun ilk döndürme momenti daha küçük ve ilk akım çekişi daha büyüktür.

Kısa devre rotorlu motorları ilk akım çekişi : anma akımının 8-10 katı büyüklükte olmaktadır. Geçit momentini küçük tutmak amacı ile rotor çubukları yatık ya da V-basamakları halinde tertiplenirler. Bazı kafes rotorlu motorların rotorları ilk devre bağlama anında yüksek bir etkin direnç ve motor yüksek devire geldikten sonra küçük bir etkin direnç gösterir. Bir tur kendinden yol verme dirençli olan bu rotorlarda ilk devre bağlama anında akım çekişi küçük ve ilk döndürme momenti büyük olmaktadır. Bunun sonucu motor daha yumuşak yol alır. Motor yüksek devire ulaştığında rotor direnci kendiliğinden küçülür ve yüklenmeler karşısında devir sayısı değişikliklerini büyük ölçüde önler. Bu tur otomatik direnç ayarlı bir rotor, deri etki prensibine göre çalışır. Ve bunlara bu nedenle deri etkili rotor da denir. Deri etkili rotorların sac paketi üzerinde alt alta iki sincap kafesi bulunur. Alttaki kafes işletme kafesi; üstteki kafes yol verme kafesi olarak anılmaktadır. İlk devre bağlama anında hem işletme kafesinin, hem de yol verme kafesinin çubukları üzerinden alternatif akımlar geçer. Üzerinden akım geçiren çubuklar çevresinde magnetik alanlar oluşur. Her bir

çubuğun magnetik alanı hem kendisine hem de komşu çubuğa etkiyerek çubuk dirençlerinin yükselmesine neden olur (deri etkisi). İşletme kafesinin çubukları altta bulunduğundan, bunların alan çizgileri daha çok demir üzerinden geçmekte ve magnetik akının büyük olmasından dolayı dirençleri daha büyük olmaktadır. Rotor devir sayısı arttıkça, motor frekansı düşer ve deri etkisi akım frekansı ile doğru orantılı olduğundan çubukların direnci küçülür.

Deri etkili rotorların ilk döndürme momentleri büyük ve ilk adım çekişleri küçüktür. Bunların en büyük sakıncalı tarafı, oluk kesitlerinin, yani diğer bir deyişle hava aralıklarının oldukça büyük olmasıdır. Bu nedenle bunlarda akı kaçakları büyük, güç faktörü ve verimi küçük olmaktadır.

Daha hafif ve ucuz olan kafes rotorlu motorlar çok az bir bakıma gereksinim duyarlar ve fırçaları olmadığından kıvılcım; yani parazit oluşturmazlar. Bu üstünlüklerinden dolayı rotoru bilezikli motorlara yağ tutulur. Sincap kafesli asenkron motorlardan, örneğin: iş makinelerinde, kaldırma düzenlerinde ve tarım makinelerinde yararlanılmaktadır.



Şekil 1.4 Sincap kafesli asenkron motor elemanları

1.3.2 Bilezikli asenkron motorlar

Bilezikli asenkron motorun döndürme momenti, stator ve rotorda oluşan döner alanların magnetik akılarına bağlıdır. Magnetik akılar sargılardan çekilen akımlarla doğru orantılı olduklarından, döndürme momentinin, motorun akım çekişine bağlı olduğu sonucuna varılır.

Döner bilezikler kısa devre edildiği takdirde, rotor akımı devresinde rotor sargılarının tepkin direnci (indüktansı) büyük ölçüde söz konusudur. Endüktif direnç halinde, rotorda indüklenen gerilim ile rotor akımı arasındaki faz farkı 90^0 olmaktadır. Ortaya çıkan bu faz farkı rotor döner alanını 90^0 kaydırır ve rotor döner alan kutupları ile stator döner alanının özdeş kutupları tam olarak karşı karşıya gelir. Bunun sonucu yalnızca rotor mili yönünde etkiyen bir kuvvet ortaya çıkar ve rotorun dönmesi artık söz konusu olmaz. Ancak, anlatılan bu oluşumlar sadece bir varsayımdır. Yani sargıların sadece tepkin direnci göz önüne alınarak ileri sürülmüştür. Oysaki, sargıların çok küçük dahi olsa, bir miktar etkin direncinden dolayı gerilim ile akım arasındaki faz farkı 90^0 den daima küçüktür. Bu nedenle rotor durmaz, ancak döndürme momenti en küçük değerine ulaşır.

Diğer bir açıdan rotor devir sayısının yükselmesi rotorda indüklenen gerilimi düşürdüğü ve bunun sonucu rotor akımı ile döndürme momentinin tekrar azaldığı söylenebilir. Faz farkı küçülmesi ağır bastığında, döndürme momenti büyüyecek, buna karşın indüklenen gerilim ağır basarsa, döndürme momenti küçülecektir.

Bugün uygulamada bulunan asenkron motor talimatlarına göre, motoru sükunet durumdan çıkarmak için gerekli moment ilk döndürme momenti ve en büyük döndürme momenti devrilme momenti olarak tanımlanır. Motorun anma devri ile dönmesi anında milinden uygulayacağı döndürme momentine anma momenti denilir. Devrilme momenti anma momentinin en az 1,6 katı büyüklüğünde olmalıdır.

Bazı motorlarda döndürme momenti motorun yol almasından sonra ikinci kez düşmektedir. Motorun yol almasından sonra ortaya çıkan en küçük moment geçit-momenti olarak anılmaktadır. Nitekim rotor akım devresine yol verme dirençlerinin bağlanmasıyla, rotor devresinin etkin direnci büyütülmekte ve dolayısıyla akım ile

gerilim arasındaki faz farkı küçük tutulmaktadır. Bunun sonucu çok küçük devir sayılarında döndürme momenti büyük olur. Buna karşın, devir sayısı yükseldikçe rotordan geçen akım şiddeti azalır.

Yol verme dirençlerinin üzerinden geçen akım nedeniyle, ısı kayıplarının ortaya çıkması istenmeyen bir oluşumdur. Dirençler yerine bobinlerin yol verme devresinde kullanılması daha büyük sorunlar getirir. Çünkü bobin üzerinde indüktans nedeni ile oluşan faz farkı motordaki faz farkını büyültmekte ve bunun sonucu yol alma momenti düşmektedir. Bu nedenle sakıncalarına rağmen dirençlerin kullanılması zorunlu olmaktadır.

Rotoru bilezikli asenkron motorların kalkış akımları nominal akımlarından çok büyük olmadığından, bu motorlar, örneğin : büyük su pompaları, tas kırma makineleri ve büyük takım tezgahları gibi yüksek güç gereksinen makinelerin işletmesinde tercih edilir. Bilezikli rotorun ilk döndürme momenti çok büyük olduğundan, büyük vinçler gibi çok kuvvetli yükler altında devamlı çalışacak makinelerin kuvvet üreten kesimlerinde bu motorlardan yararlanılmaktadır. Ayrıca devir sayıları ayarlanabildiğinden kren ve ayarlı makine tezgahlarında sık sık kullanılmaktadır.

1.4 Asenkron Motorlarda Kayma

Alternatif akım motorlarında moment, biri stator üzerinde, diğeri de rotor üzerinde oluşan iki elektrik alanının etkileşimi sonucu ortaya çıkar. Sabit bir momentin üretilmesi için, bu iki alanının, motorun hava aralığında eş zamanlı (senkronize) bir durumda olması gerekir ve üretilen momentin büyüklüğü aralarındaki faz farkı ile belirlenir. Dengeli üç fazlı bir sistemle beslenen uç fazlı bir sargı düzgün bir şekilde dönen bir alan meydana getirebilir. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan asenkron motorların çoğu bu nedenle üç fazlıdır.

Asenkron motorlarda dönen stator alanı kısa devre edilmiş rotor sargılarında, ikisi arasındaki bağıl hızla orantılı bir frekansta akımların indüklenmesine neden olur. Motor bilezikli türden ise rotor üzerindeki sargı, sincap kafesli ise kafes, üç fazlı bir sargıdan beklenen bir şekilde, rotor alanı olarak adlandırılan bir ikinci alan oluşturur. Rotor alanıyla stator alanının hızlarının toplamının senkron hızla eşit olması gerekir. Senkron hız ile rotor hızı arasındaki fark kayma olarak bilinir. Yani rotor

hızının senkron hızına göre bağıl hızı bize kaymayı verir. Kayma S sembolü ile gösterilir.

1.5 Asenkron Motorlara Yol Verme

Üç fazlı asenkron motorlar ilk hareket (kalkış) anında normal akımlarının 6 - 10 katı fazla akım çekerler. Bu aşırı akım küçük güçlü bir motorda şebekeye pek bir zarar vermez. Ancak gücü 4 kW tan büyük olan bir motorun ilk anda 6 - 10 kat fazla akım çekerek çalışmaya başlaması bir çok olumsuz etki (tesislerin geriliminin kısa süreli olarak anormal derecede düşmesi, hatların aşırı yüklenmesi vb. gibi) ortaya çıkarır. İşte bu nedenle 4 kW tan büyük güçteki motorları ilk kalkış anında az akım çekerek çalıştırmak gerekir. Günümüzde büyük güçlü motorların ilk kalkış akımını kabul edilebilir düzeye indirebilmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Düşük kalkınma akımıyla çalıştırmada kullanılan bazı yöntemler şöyle sıralanabilir:

1.5.1 Dirençle yol verme

Bu yöntemde motorun devresine ilk önce krom-nikelden üretilmiş dirençler sokulur. Bu sayede motor düşük gerilim altında az akım çekerek çalışmaya başlar. 2 - 4 saniye sonra dirençler devreden çıkarılır. Uygulamada çok az kullanılan bir yöntemdir.

1.5.2 Ototransformatör ile yol verme

Motorun devresine ilk önce kademeli çıkışlı ototransformatörü sokulur. Bu sayede motor düşük gerilim altında az akım çekerek çalışmaya başlar. 2 - 4 saniye sonra ototransformatörü devreden çıkarılır. Uygulamada çok az karşılaşılan bir yöntemdir.

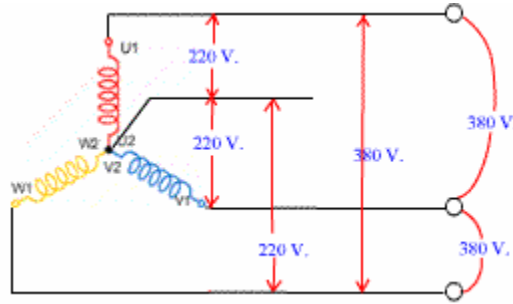
1.5.3 Yıldız / Üçgen yol verme

Uygulamada en çok kullanılan yöntemdir. Stator sargıları önce yıldız şeklinde bağlanır. Bu sayede 380 volta dayanacak şekilde üretilmiş sargılara 220 volt

uygulanmış olacağından motor düşük akım çekerek çalışmaya başlar. 2 - 4 saniye sonra yıldız bağlantısı kaldırılıp üçgen bağlantıya geçilir.

1.5.3.1 Üç fazlı asenkron motorların yıldız (Y) bağlanması ve özelliği

4 kW tan küçük güce sahip üç fazlı asenkron motorlarda uygulanan yıldız bağlama son derece basittir. Motor klemensine çıkarılan uçların adları U-V-W ve X-Y-Z'dir. Bu uçlardan U-V-W'yi ya da X-Y-Z'yi birbirine köprülediğimizde yıldız bağlantıyı yapmış oluruz. Yıldız bağlanan bir motora 380 voltluk şebeke gerilimini uyguladığımızda her bir faz sargısına 220 voltluk gerilim düşer. Başka bir deyişle, bir motor yıldız bağlanarak çalıştırılacak şekilde üretilmişse bu motorun bobinleri 220 voltluk bir gerilime dayanabilir. Yıldız bağlanarak çalıştırılması gereken bir motor yanlışlıkla üçgen bağlanarak çalıştırılacak olursa sargılara 380 volt uygulanmış olacağından motor yanar.



Şekil 1.5 Yıldız Bağlantı

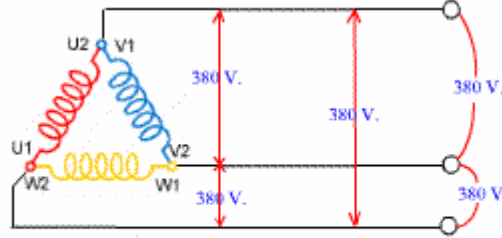
1.5.3.2 Üç fazlı asenkron motorların üçgen (Δ) bağlanması ve özelliği

4 kW tan büyük güce sahip üç fazlı asenkron motorlarda uygulanan üçgen bağlamada stator sargıları birbirine seri bağlanır. Daha sonra üç sargının seri olarak bağlandığı noktalara R-S-T uygulanır.

Üçgen bağlı olarak çalışacak şekilde üretilmiş motorların sarımları 380 volta dayanacak şekilde üretilmiştir. Üçgen bağlanması gereken motor yanlışlıkla yıldız bağlanarak çalıştırılırsa motor yanmaz. Ancak motor düşük verimde çalışır.

Motor etiketinde bulunan güç ve gerilim değerlerine bakılarak sargıların yıldız mı yoksa üçgen mi bağlanacağı şöyle anlaşılır:

- I. Motor gücü 4 kW tan (5 HP) küçükse motor yıldız bağlanarak çalıştırılır.
- II. Etiketinde / 220/380 volt değeri bulunan motor üçgen bağlı olarak çalıştırılmak istenirse fazlar arası 220 volt gerilim bulmak gerekir. Türkiye'de fazlar arası gerilim 380 volt olduğundan motor yıldız bağlanarak çalıştırılır.



Şekil 1.6 Üçgen Bağlantı

1.6 Üç Fazlı Asenkron Motorların Bağlantı Klemensinin Tanıtılması

Üç fazlı asenkron motorların statoruna yapılan sarımların uçları klemens kutusuna (bağlantı terminali) çıkarılır. Klemens kutusu dışardan gelen besleme uçlarının kolayca bağlanabilmesini sağlayacak şekilde dizayn edilir. Klemens kutusunda bulunan harflerin anlamları şunlardır:

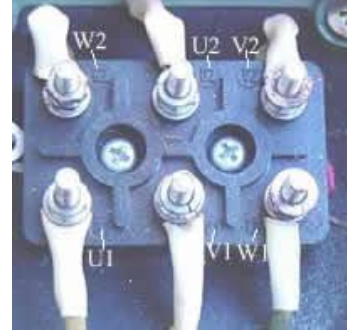
R fazı için: Giriş ucu: U, Çıkış ucu: X

S fazı için: Giriş ucu: V, Çıkış ucu: Y

T fazı için: Giriş ucu: W, Çıkış ucu: Z harfleriyle gösterilir.

Üç fazlı asenkron motorların klemens kutusunda altı adet uç bulunur. Bu uçlar motorun

gücü göz önüne alınarak yıldız ya da üçgen şeklinde bağlandıktan sonra R-S-T ile besleme yapılır. Yıldız ya da üçgen bağlantısı yapılmamış üç fazlı asenkron motor asla çalışmaz.



Şekil 1.7 Asenkron motor klemensi



Şekil 1.8 Yıldız bağlantı



Şekil 1.9 Üçgen bağlantı

1.7 Üç Fazlı Motorların Etiketindeki Bilgilerin Açıklanması

Sanayide yaygın olarak kullanılan motorların özellikleri gövdeye konmuş olan bilgi etiketlerinde bulunur.

Motor etiketinde bulunan bilgiler şöyle sıralanabilir:

a. Motoru üreten kuruluşun adı

(Gamak, Siemens, Asea, BBC, vb.)

- b. Motorun kullanıldığı akım (DC, AC)
- c. Motorun tipi
- ç. Motorun seri numarası
- d. Motorun bağlantı şekli
- e. Motorun normal (nominal, anma) akımı
- f. Motorun güç katsayısı (Cos j)
- g. Motorun normal (nominal, anma) gerilimi
- ğ. Motorun gücü (watt ya da beygir gücü cinsinden)
- h. Frekansı
- ı. Dakikadaki devir sayısı (d/d, rpm)
- i. Motorun dayanabileceği maksimum sıcaklık
- j. Motor ağırlığı
- k. Motorun üretim yılı

°		TİP : GM 132526 °	
3 - AC MOTOR		Nr : 1065179	
Δ	380 V	14,8 A	
10 HP	7,5 kW	Cos φ: 0,9	
2880	D/D	50 Hz	
2-985	Iz K1 B	B 3	IP 44 °

Şekil 1.10 Motor Etiketi

2. ASENKRON MOTOR MODELLERİ

2.1 Asenkron Motorun Dinamik Modeli

Standard vektör denklemleri (2.1)-(2.2) stator (sabit) ve rotor (hareketli) akım ve akı bağlantılarını ifade ederler, stator ve rotor sızıntı (kayıp) indüktansları L_{sl} ve L_{rl} olup bunları da içermektedir, denklemler aşağıda yazılmıştır. (Kovács, 1984),

$$\Psi_S^T = (L_{sl} + L_m)i_S^T + L_m i_r^T \quad (2.1)$$

$$\Psi_r^T = L_m i_S^T + (L_{rl} + L_m)i_r^T \quad (2.2)$$

Üstte yazılan T harfinden dolayı bazen T Model olarak da ifade edilir. Denklemlerin bu kullanımında gerekenden fazla kullanılan bir parametre yeniden düzenlenip sadece bir tane kayıp indüktans olarak yeniden düzenlenebilir. (Slemon ve ark. 1980 ,Peterson 1991) Sadece bir kayıp indüktansla T-Modelinin yerini tutan denklemler;

$$\Psi_s = L_M (i_s + i_r) \quad (2.3)$$

$$\Psi_r = \Psi_s + L_L i_r \quad (2.4)$$

Stator akısı Ψ_s ve rotor akısı Ψ_r için diferansiyel vektör denklemleri, burada stator referans alınarak düzenlemiştir ve tork (devir meydana getiren kuvvet, dönme momenti) denklemini her iki model için de aynıdır,

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = u_s - R_s i_s \quad (2.5)$$

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = jz_p \omega \Psi_r - R_r i_r \quad (2.6)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_{load} \quad (2.7)$$

Buradaki ω rotorun (rotorun kısa devre, kontak hızıdır) mekanik açısal hızıdır. Vektörlerin çapı, statik gerilim vektör büyüklüğünün nötr gerilim safhasının tepe değerine eşit olarak belirlenmiştir (chosen) ve vektör akımının büyüklüğü tepe değeri noktasına eşittir. Bu ölçüyle, motorun dönme momenti T ile ifade edilebilir. (Kovács, 1984)

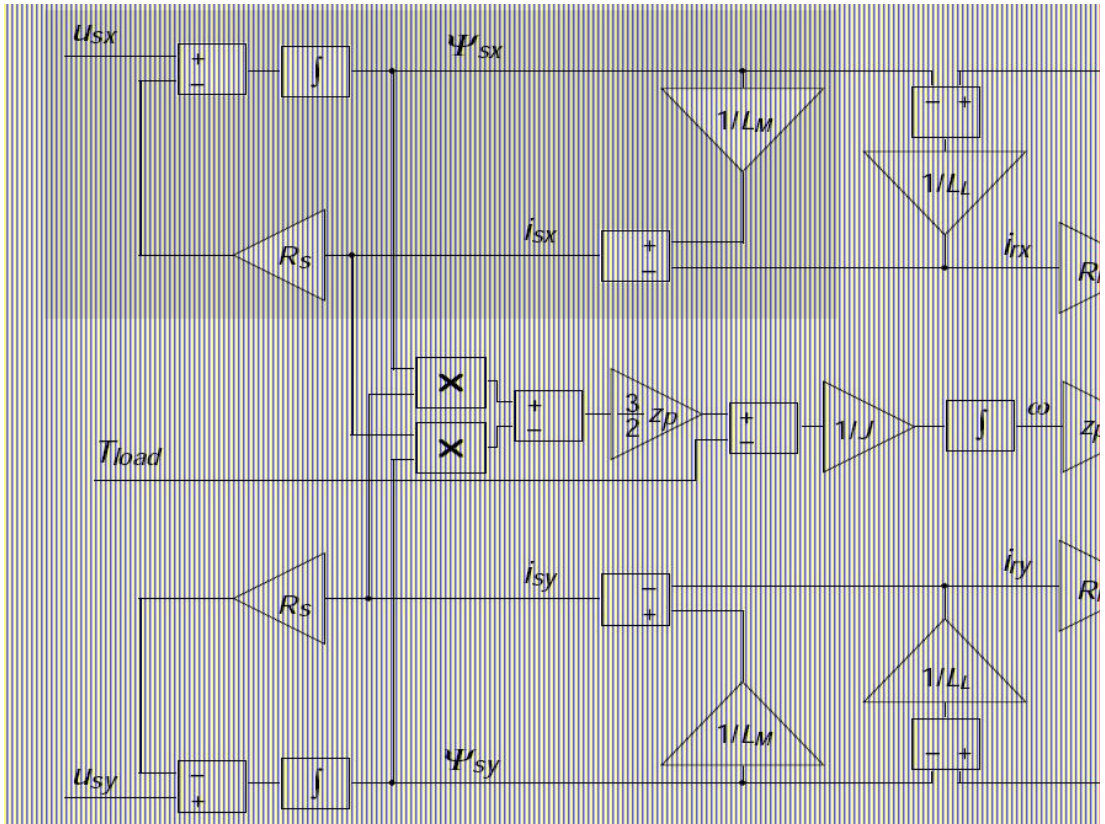
$$T = \frac{3}{2} z_p \Im(\Psi_s^* i_s) = \frac{3}{2} z_p \Im(i_r^* \Psi_r) = \frac{3}{2} z_p \Im(i_r^* \Psi_r) \quad (2.8)$$

Buradaki Z_p kutup çiftinin numarasıdır. Bu incelemenin her yerinde, gerilim, akım ve akı vektörleri karmaşık numaralar olarak simgelenmektedirler. Bir vektörün

karmaşık bileşenleri $V = V_x + jV_y$, $V^* = V_x - jV_y$ olarak ifade edilir ve \Im ise sanal kısmı(bölümü) ifade eder. Sanal bölüm ifadesi; $\Im(v^*w) = v_x w_y - v_y w_x$

Bu karmaşık ifadenin değişkenleri olan v ve w çapraz sonuç vektör büyüklükleri olan V ve W ile eşittir.

T-Modelinin A blok diyagramı gösterilmiştir, (2.3)-(2.7) denklemleri şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 T-Modelinin Blok Diyagramı

İki modelin değişken ve parametreleri arasındaki bağıntılar, 2.1 Tablosunda tanımlanmıştır.

Tablo 2.1 Γ -modeli ile T-modeli arasındaki bağıntılar.

	Bir kaçak indüktans Modeli ile (Γ)		İki kaçak indüktans Modeli ile(T)
Mıknatıslanma İndüktansı	L_M	=	$\frac{L_M}{k_\gamma}$
İndüktans Kaybı	L_L	=	$\frac{L_{sl}}{k_\gamma} + \frac{L_{rl}}{k_\gamma^2}$
Statör(sabit) Direnci	R_s	=	R_s^T
Rotor(Hareket) Direnci	R_r	=	$\frac{R_r^T}{k_\gamma^2}$
Statör Akısı	Ψ_S	=	Ψ_S^T
Rotor Akısı	Ψ_r	=	$\frac{\Psi_r^T}{k_\gamma}$
Statör Akımı	\dot{I}_S	=	\dot{I}_S^T
Rotor Akımı	\dot{I}_r	=	$k_\gamma \dot{I}_r^T$

$$k_\gamma = \frac{L_m}{L_m + L_{sl}}$$

Eğer $L_{sl} = L_{rl}$ ise aynı zamanda ;

$$k_\gamma = \sqrt{\frac{L_M}{L_M + L_L}}$$

Matris olarak gösterim de ise Γ -modeli aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{d\Psi}{dt} = A(\omega)\Psi + Bu_s \quad (2.9)$$

$$i_s = C\psi \quad (2.10)$$

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -R_s \left(\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_L} \right) & \frac{R_s}{L_L} \\ \frac{R_r}{L_L} & \frac{-R_r}{L_L} + jZ_p \omega \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_L} & -\frac{1}{L_L} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{sx} + j\Psi_{sy} \\ \Psi_{rx} + j\Psi_{ry} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

(2.9) ile tanımlanmış olan denklem sistem lineer olmayan bir sistemdir, rotor hızı olarak ifade edilen ω ise değişkendir.

Doyma, induktanslarda değişkenlere bağlıdır ve dirençler ısı derecesine bağlı olarak değişir, ekstra lineersizlikler ortaya çıkarır.

2.2 Asenkron Motorun (Devresi) Mekanik Modeline İlk Yaklaşım

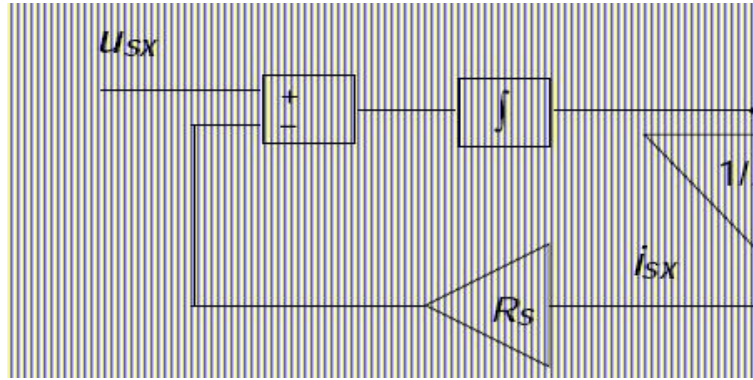
Matris ve denklemlerde bir dinamik modelin içsel davranışına (hareketine) sınırlı bir anlayış verilmiştir. (Török ve ark., 1985 , Peterson 1991). Asenkron motorun mekanik eşit modeli daha anlaşılır olması açısından kullanılabilir. Rotor akımının kullanımına ilişkin basitleştirilmiş bir örnekte, akımın sıfır olduğu kabul edilirse (2.3) ve (2.5) de verilen denklemler;

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = u_s - R_s i_s = u_s - \frac{R_s}{L_M} \Psi_s \quad (2.15)$$

Sıfır rotor akımıyla, denklemin (2.15) x ve y eksenleri arasında ters bir rotatif kuvvet yoktur. X ekseninin (gerçek eksen) A Blok Diyagramındaki denklem,

$$\frac{d\Psi_{sx}}{dt} = u_{sx} - R_s i_{sx} = u_{sx} - \frac{R_s}{L_M} \Psi_{sx} \quad (2.16)$$

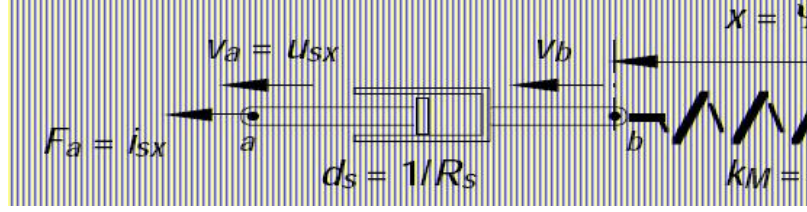
Bu denklemin devre modeli Şekil 2.2 de gösterilmiştir. Esasında bu devre yapısı Şekil 2.1 deki gölgelendirilmiş kısımdaki devredir.



Şekil 2.2 x-Eksen Denkleminin Blok Diyagramı

Mekanik modeli, bir bobin bir yay olarak ifade edilir. Yayın uzunluğu bobindeki akı bağlantısına eşittir ve yaydaki zorlama (kuvvet) hareketi bobinin akımını temsil etmektedir. Direnç yapışkan bir kapak (ses veya elektronik sinyalleri azaltan araç) olarak tanımlanabilir. Kapak sonundaki hız farkı direnç üzerindeki gerilime eşittir.

(2.16) denkleminin mekanik modeli şekil 2.3 de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 (2.16) Denkleminin Mekanik Modeli

Bu mekanik sistem ifadesi;

$$F_{yay} = k_M x \quad (2.17)$$

$$F_{körüük} = d_s (v_a - v_b) \quad (2.18)$$

$$F_a = F_{yay} = F_{körüük} \quad (2.19)$$

$$v_b = \frac{dx}{dt} \quad (2.20)$$

(2.19)-(2.20) denklemlerinin birleştirilmesi aşağıda verilmiştir

$$\frac{dx}{dt} = v_a - \frac{k_M}{d_s} x \quad (2.21)$$

Bir başka kullanımla, Şekil 2.3 de gösterilen (2.21) denklemini, (2.16) denklemine eşittir.

2.3 Kalıcı Durum ve Geçiş Modeli (abc-dq0 Transformation)

Asenkron motorunun geçiş modeline ulaşmak için abc-dq0 dönüşümü kullanılır.

2.3.1 abc-dq0 dönüşümü

abc-dq0 dönüşümü abc sistemini döner dq0 sistemine dönüştürür. Krause ve ark. [25] herhangi bir açısal hızda veya durağan halde değişen indüktansların bir referans dönüş bölgesine (frame) göre stator ve rotor değişkenleri dikkate alınarak elimine edilebildiğini belirtmişlerdir. Bu referans bölgesi uygun olarak belirlenen dönüşüm hızıyla bütün transformasyonlar belirlenir. Eğer sistem dengedeysen 0 (sıfır) bileşeni 0 (sıfır) 'a eşit olacaktır[25].

Durağan devre elemanlarının 3 faz değişkenlerinin dönüşümlerini formüle eden değişkenlerin değişimi [25]:

$$f_{qd0s} = K_s f_{abcs} \quad (2.22)$$

Şöyle ki:

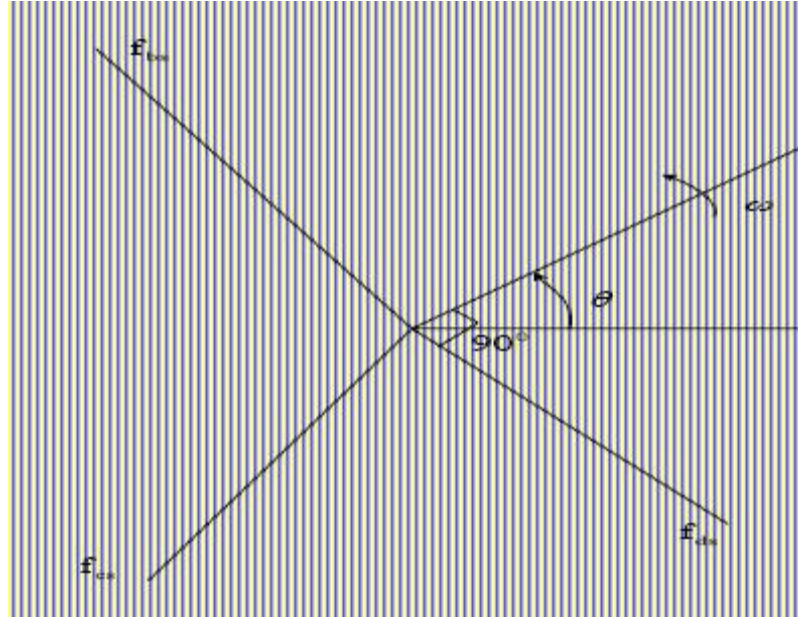
$$f_{qd0s} = \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{0s} \end{bmatrix}; f_{abcs} = \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix}; K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}; \quad (2.23)$$

$$\theta = \int_0^t w(\zeta) d\zeta + \theta(0); \zeta \text{ integralde etkisiz elemandır.}$$

Ters dönüşüm için:

$$(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

(2.23)' te, f ; voltaj, akım, akı bağıntısı veya elektrik yükünü ifade eder. S durağan devre ile birlikte görülen parametreler, transformasyon değişkenlerini ifade eder. Asenkron motorların zamanla değişen rotor sargı parametrelerini dönüştürmekte yukarıdaki dönüşüm matrisi kullanılabilir. Değişkenler arasındaki transformasyon denklemleri trigonometrik olarak şekil 2.4 te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Trigonometrik ilişki

f_{qs} ve f_{ds} değişkenleri dikey eksen boyunca ω açısal hız olmak üzere ω 'e göre döner. Bundan dolayı f_{as} , f_{bs} ve f_{cs} (anlık nicelikleri zamanın herhangi bir fonksiyonu olmak üzere) 120° derecelik açılarla yörünge boyunca sıralanırlar. q_s ve d_s voltaj, akım, akı bağıntısı ve elektrik yüklerinin dalga şekli belirli referans bölgesinde açısal hıza bağlıdır.

2.4 Asenkron Motorun Matematiksel Modeli

Asenkron motorun matematiksel modelinin çıkarılmasında, v_{qs} , v_{ds} -stator gerilimleri, v_{qr} , v_{dr} -rotor gerilimleri, λ_{qs} , λ_{ds} -stator akı halkalamaları, λ_{qr} , λ_{dr} -rotor akı halkalamaları, ω_e -senkron hız, ω_r -rotor elektriksel hızı, L_s -stator indüktansı, R_s -stator direnci, L_r -statora indirgenmiş rotor indüktansı, R_r -statora indirgenmiş rotor direnci olmak üzere, R.H. Park tarafından önerilen d-q dönüşümü herhangi bir referans çatıda aşağıdaki gibi elde edilebilir.[11]

$$I_{qd0s} = S(\varphi)I_{abcs} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\varphi) & \sin(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} I_{abcs} \quad (2.25)$$

Burada, $I_{qs}=[i_{qs} \ i_{ds} \ i_{0s}]^T$, $I_{qs}=[i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T$ ve φ ise I_{qs} ile I_{as} arasındaki açıdır.

Senkron referans çatısında motorun durum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir,

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \lambda_{ds} \quad (2.26)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs} \quad (2.27)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2.28)$$

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (2.29)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J} (T_e - T_y) \quad (2.30)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (2.31)$$

Bu denklemlerdeki stator ve rotor akı halkalamaları aşağıdaki gibidir

$$\lambda_{ds} = L_{ls}i_{ds} + L_M(i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.32)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls}i_{qs} + L_M(i_{dq} + i_{qr}) \quad (2.33)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr}i_{dr} + L_M(i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.34)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr}i_{qr} + L_M(i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.35)$$

Motorun ürettiği elektriksel moment ise,

$$T_e = \frac{3PL_m}{4L_r} (\lambda_{dr}i_{qs} - \lambda_{qr}i_{ds}) \quad (2.36)$$

olarak elde edilir. Senkron referans çatıda q-eksen rotor akı halkalaması sıfır olduğundan ($\lambda_{qr}=0$) elektriksel moment,

$$T_e = \frac{3PL_m}{4L_r} (\lambda_{dr}i_{qs}) \quad (2.37)$$

olarak yeniden elde edilir. Senkron hız ise,

$$\omega_e = \omega_r + \frac{\tau_r}{L_m} \frac{\lambda_{dr}^e}{i_{qs}^e} \quad (2.38)$$

olarak bulunur.

3. SİNCAP KAFESLİ ASEKRON MOTORUN BOŞTA, KISA DEVRE VE YÜKTE ÇALIŞMA DENEYİ

3.1 Asenkron Motorun Yapısı ve Çalışma Prensibi

Üç fazlı asenkron motorlarda stator yapısı değişmediği halde, rotor bir kafes, diğeri bilezikli olmak üzere başlıca iki tipte yapılır. Sincap kafesli motorlarda, rotorda oluklara yerleştirilen iletkenler silindirin her iki ucundan kısa devre edilirler. Sanayide ve diğerk birçok alanda büyük çoğunlukla kullanılan kafesli tip asenkron motor yapımı en kolay, en dayanıklı, işletme güvenliği en yüksek, bakım gereksinimi en az ve yaygın elektrik motorudur.

Asenkron motorun çalışma ilkesi, döner alan prensibine dayanır. Üç fazlı stator sargısından üç fazlı, dengeli bir alternatif akım geçerse hava aralığında sabit genlikli bir döner alan oluşur. Oluşan döner alanın hızı, üç faz akımlarının frekansı ve motorun kutup sayısı tarafından belirlenir. Bu hıza “senkron hız (n_s)” denir ve Denklem 3.1.deki gibi hesaplanır.

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (3.1)$$

Stator sargısı üç fazlı gerilimle beslendiğinde hava aralığında oluşan döner alan başlangıçta durmakta olan rotor iletkenlerini senkron hız ile keser. Faraday yasasına göre, döner alanın kestiği iletkenlerde gerilimler endüklenir. Endüklenen gerilimin değeri Denk.3.2. ile hesaplanır.

$$e = \vec{B} \cdot l \cdot \vec{v} \quad (3.2)$$

Burada; B manyetik akı yoğunluğu, l iletken boyu, v iletkenin manyetik alanı kestiği hızdır. Rotor devresi iletkenleri yapısı itibarıyla kısa devre olduklarından, bu iletkenlerde Endüklenen gerilim ile orantılı bir akım akmaya başlar. Akımın akması

sonucunda manyetik alan içersindeki iletkene Biot-Savart yasasına göre bir kuvvet etki eder. (Denklem 3.3.)

$$\vec{F} = \vec{B}.i.l \quad (3.3)$$

İletkenlere etkiyen bu kuvvet sayesinde, rotorda bir dönme momenti de üretilmiş olur.

$$\vec{M} = \vec{F}.r \quad (3.4)$$

Burada \vec{F} kuvvet, r rotor yarıçapıdır. Üretilen bu momentin etkisi ile rotor hızlanmaya başlar ve yükün değerine göre bir çalışma hızına (n_r) ulaşır. Rotorun dönüş yönü döner alanın dönüş yönü ile aynı olur. Dönüş yönünü değiştirmek için iki fazın yeri değiştirilir. Rotor hızlandıkça döner alan ile arasındaki hız farkı azalır ve döner alan rotor iletkenlerini birim zamanda daha az kesmeye başlar. Bunun sonucunda endüklenen gerilim azalır. Dolayısıyla rotor iletkenlerindeki akım azalır. Motor momenti de azalan akım sebebi ile azalır ve başlangıçtaki ivmeye göre daha düşük bir ivme ile hızlanmaya devam eder. Karşıt kuvvetlerin eşit olduğu noktada ivmelenme sıfır olur ve rotor sabit hızda dönmeye devam eder.

Rotor hızı senkron hıza yaklaştıkça üretilen moment sıfıra doğru azalır ve senkron hızda sıfır olacağından rotor kendi başına senkron hıza ulaşamaz. Yabancı bir tahrik makinası ile senkron hıza ulaştırılırsa rotor iletkenleri döner alan tarafından kesilmez. Böylece herhangi bir gerilim endüklenmez ve iletkenlerden herhangi bir akım akmaz. Bu çalışma moduna motorun teorik boşa çalışması denir ve boşa çalışma deneyi bu şartlarda yapılır. Motorun miline yük bağlanmadan çalıştırılması durumu da boşa çalışma olarak adlandırılmakla birlikte bu gerçek bir boşa çalışma değildir. Motor bu durumda ilaveten sürtünme ve vantilasyon kayıplarını da karşılar.

Rotor hızı sıfır iken, yani motor durmakta iken (kalkış anı) döner alan rotor iletkenlerini maksimum hızda keser. Bu sebeple Endüklenen gerilim maksimum değerde olur. Bu çalışma modu transformatörün çalışmasına benzemektedir.

Bilindiği üzere asenkron motorun manyetik yapısının transformatörden en önemli farkı manyetik alan yolu üzerinde iki hava aralığının bulunmasıdır. Bu sebepten asenkron motorun transformatörlere göre daha fazla mıknatıslanma akımı çekerler. Statoru primer, rotoru sekonder gibi kabul edilirse ilk enerji verildiği anda asenkron motor sekonderi kısa devre edilmiş transformatör gibi düşünülebilir. Transformatörlerin nominal gerilimde sekonderinin kısa devre edilmesi sakıncalı olduğu gibi asenkron motorun da rotoru kilitli iken nominal gerilimin uzun süre uygulanması sakıncalıdır.

Döner alan hızı ile rotor hızı arasındaki farka “kayma hızı ($n_s - n_r$)” , kayma hızının döner alan hızına oranına “kayma (s)” denir. Genelde yüzde olarak verilir ve kararlı halde motorun davranışını belirleyen temel bir büyüklüktür. Denklem 3.5. ile tanımlanır.[1]

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

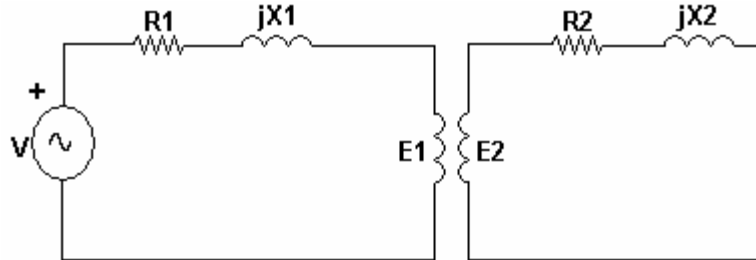
$$n_r = \frac{60 \cdot f_r}{p} \quad (3.6)$$

$$f_r = s \cdot f_s \quad (3.7)$$

Denklem 3.7. den görüldüğü gibi rotorda endüklenen gerilimin frekansı kayma ile doğru orantılıdır

3.2 Eşdeğer Devre

Üç fazlı asenkron motorun bir fazına ait indirgenmemiş eşdeğer devresi ve devre parametreleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1 Asenkron motorun bir fazına ait indirgenmemiş eşdeğer devre

- V : Faz başına uygulanan gerilim (V)
- R_1 : Faz başına stator sargı direnci (Ω)
- X_1 : Faz başına stator sargısı kaçak reaktansı (Ω)
- R_2 : Faz başına rotor sargı direnci (Ω)
- X_2 : Kilitli rotor durumunda ($s = 1$) faz başına rotor sargı kaçak reaktansı (Ω)
- X_m : Faz başına mıknatıslama reaktansı (Ω)
- R_{Fe} : Faz başına demir direnci (Ω)
- n_s : Stator sargısının döner alan hızı (d/dk)
- n_r : Rotor sargısının döner alan hızı (d/dk)
- k_{w1} : Stator sargısı için sargı faktörü
- k_{w2} : Rotor sargısı için sargı faktörü
- Φ_m : Faz başına mıknatıslama akısı (Wb)
- E_1 : Stator sargısında faz başına endüklenen e.m.k. (V)
- E_{20} : Rotor kilitli durumda iken rotor sargısında faz başına endüklenen emk (V)
- E_2 : Herhangi bir n_r hızında rotor sargısında faz başına endüklenen emk (V)
- I_1 : Faz başına stator sargı akımı (A)
- I_2 : Faz başına rotor sargı akımı (A)
- I_0 : Faz başına boşta çalışma akımı (A), $I_0 = I_{fe} + I_M$
- I_{fe} : Faz başına demir kaybı akımı (A)
- I_m : Faz başına mıknatıslama akımı (A)

Stator ve rotorda endüklenen gerilimin değeri,

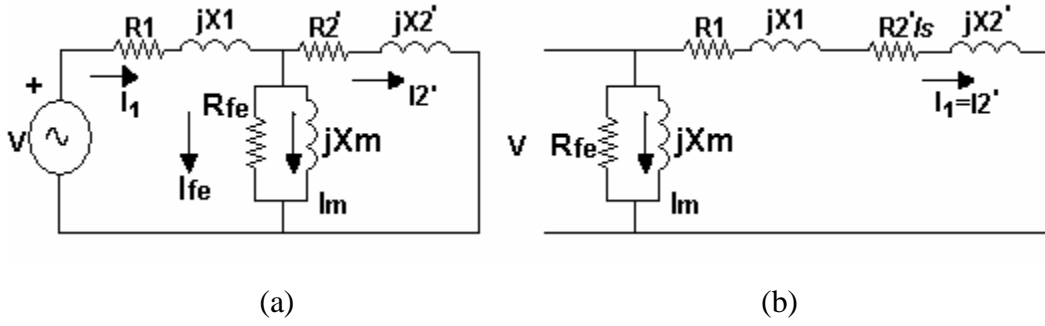
$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot k_{w1} \Phi_m \quad (3.8)$$

$$E_{20} = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot k_{w2} \Phi_m \quad (3.9)$$

$$E_2 = s \cdot E_{20} \quad (3.10)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanabilir.

Üç fazlı asenkron motorun bir fazının statora indirgenmiş T tipi ve L tipi eşdeğer devreleri şekil 3.2. de verilmektedir.

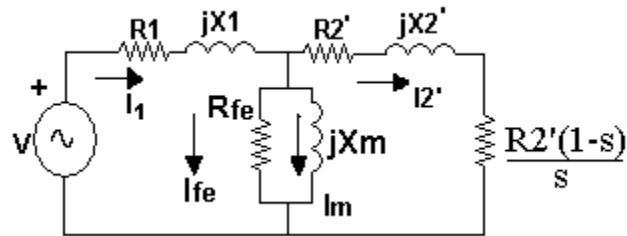


Şekil 3.2 (a) T tipi eşdeğer devre , (b) L tipi eşdeğer devre

Eşdeğer devrelerin transformatör eşdeğer devrelerine benzetilmesi ile devrenin analizi daha da kolaylaştırılabilir. Bu amaçla eşdeğer devredeki $\left(\frac{R_2'}{s}\right)$ in rotora aktarılan güce karşılık düşen toplam eşdeğer direnç olduğu düşünülerek bu direnç, Denk.3.11. deki gibi bakır kayıplarına ve mekanik güce karşı gelecek iki kısma ayrılabilir.

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + \frac{R_2' \cdot (1-s)}{s} \quad (3.11)$$

Bu sayede asenkron motor, aynı parametrelere sahip bir transformatörün çıkışına $\frac{R_2' \cdot (1-s)}{s}$ değerinde bir yük bağlanmış gibi analiz edilebilir (Şekil 3.3.). Bu yük, gerçekte mekanik güç oluşumunu temsil eden direnci, R_2' ise rotor bakır kayıplarını oluşturan direnci gösterir.

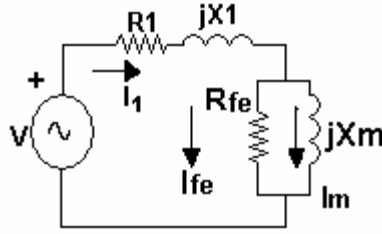


Şekil 3.3 Transformatör eşdeğer devresine benzetilmiş asenkron motor

3.3 Asenkron Motorun Boşta Çalışma Deneyi

Asenkron motorun rotoru yardımcı tahrik makinası ile senkron hızda döndürülürse rotor iletkenlerinden herhangi bir akım akmaz ve bu teorik boşta çalışma olarak tarif edilir. Benzer şekilde asenkron motorun transformatör eşdeğer devresinden (Şekil 3.3) çıkışa bağlanan yük sonsuz olur ise; $Z_y = \infty$; $I_2' = 0$ $I_1 = I_0$ olur.

$Z_y = \infty$ olması için $\frac{R_2' \cdot (1-s)}{s} = \infty$ olmalıdır. Bu da $s = 0$ ile sağlanır. $s = 0$ olması $n_r = n_s$ olmasıdır. Bu durumda I_2' akımı sıfır olur ve şebekeden sadece boşta çalışma akımı (I_0) çekilir. Boşta çalışma için şekil 3.4. teki eşdeğer devre çizilebilir.



Şekil 3.4 Asenkron motorun boşta çalışma için eşdeğer devresi

Asenkron motorlar için boşta çalışma akımı (I_0) nominal akımların (tam yük akımı) %30-%50 si kadardır. Bu kadar büyük olmasının sebebi, stator ile rotor arasında hava aralığının bulunmasıdır. Boşta çalışma şebekeden hem aktif hem de reaktif güç çekilir. Şekil 3.4. ten ;

$$P_0 = P_{cu0} + P_{fe} = I_0^2 \cdot R_1 + \frac{E_1^2}{R_{fe}} \quad (3.12)$$

$$Q_0 = I_0^2 \cdot X_1 + \frac{E_1^2}{X_m} \quad (3.13)$$

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (V_0 \cdot I_0) \quad (3.14)$$

$$E \angle \theta = V \angle 0 - I_0 \angle \varphi_0 \cdot (R_1 + jX_1) \quad (3.15)$$

$$P_{fe} = \frac{E_1^2}{R_{fe}} \quad (3.16)$$

$$Q_m = \frac{E_1^2}{X_m} \quad (3.17)$$

$$R_{fe} = \frac{P_{fe}}{E_1^2} \quad (3.18)$$

$$X_m = \frac{Q_m}{E_1^2} \quad (3.19)$$

Eğer $E_1 = V_1$ alınırsa ;

$$P_0 = P_{fe} \quad (3.20)$$

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (V_0 \cdot I_0) \quad (3.21)$$

$$I_{fe} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (3.22)$$

$$I_m = I_0 \sin \varphi_0 \quad (3.23)$$

$$P_0 = \frac{V_1^2}{R_{fe}}, \quad R_{fe} = \frac{P_0}{V_1^2} \quad (3.24)$$

$$Q_0 = \frac{V_1^2}{X_m}, \quad X_m = \frac{Q_0}{V_1^2} \quad (3.25)$$

şeklinde bulunur. Bulunan iki sonuç karşılaştırılarak $E_1 = V_1$ kabul edildiğinde yapılan hata miktarı görülebilir. Bu kayıplar bir faz için hesaplanmaktadır. M faz sayısı ile çarpılarak toplam kayıplar bulunur. Ayrıca akımlar sargı akımı olduğundan dolayı motorun yıldız veya üçgen bağlantısına göre hesaplamalara dikkat edilmelidir. Asenkron motorunun eşdeğer devre parametrelerinden X_m ve R_{fe} hesaplanabilmesi için boşa çalışma deneyi yapılır. Gerekli ölçümler alınarak denklem (3.12-3.19) ile X_m ve R_{fe} hesaplanır.

İleriki bölümde anlatılacak olan deney düzeneğinde kullanılan asenkron motorun elektriksel parametrelerini hesaplamaya yönelik olarak motorun boşa çalışma deneyleri yapılmıştır. Boşa çalışma deneyi için;

1. Asenkron motoru senkron hızda döndürebilecek DC bir motor
 2. Güç ölçümlerini yapabilecek wattmetre
- ile boşa çalışma deneyi gerçekleştirilmiştir.

Aşağıdaki deney düzeneği ile asenkron motor miline bağlanan DC motor n_s senkron hızında döndürülerek deney sonuçları alınmıştır.

Deney düzeneği kurularak alınan ölçüm sonuçları tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1 Boşta çalışma deney ölçüm sonuçları

Faz gerilimi(V)	378
Faz akımı (A)	3.16
Güç(W)	155
Cosφ	0.08

Buna göre;

$$P_0 = P/3 = 155/3 = 51.7; \cos \varphi = 0.08 \Rightarrow \varphi = 85.41 \quad \tan \varphi = 12.45$$

$$Q_0 = P_0 \tan \varphi = 51.7 \cdot 12.45 = 643.7$$

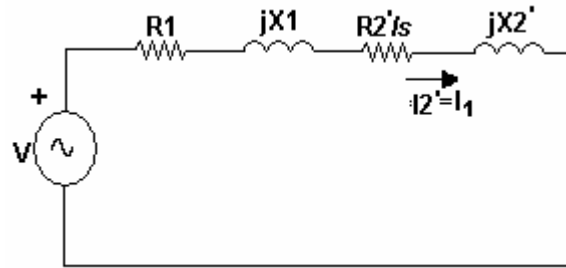
$$X_m = \frac{U^2}{Q_0} = \frac{(378/\sqrt{3})^2}{643.7} = 73.96 \Omega, \quad R_{fe} = \frac{U^2}{P_0} = \frac{(378/\sqrt{3})^2}{51.7} = 920 \Omega$$

3.4 Asenkron Motorun Kilitli Rotor Deneyi

Asenkron motorun rotorunu kilitleyerek transformatörün kısa devre çalışmasına benzer olarak özellikleri incelenebilir. Statordaki döner alan kısa devre edilmiş ve durmakta olan rotor iletkenlerini senkron hızda keserek rotor akımlarının geçmesine neden olur. Kısa devre çalışma transformatör eşdeğer devresine benzetilerek

asekron motor T tipi eşdeğer devresinden $Z_y = 0$ olması için $\frac{R_2' \cdot (1-s)}{s} = 0$

olmalıdır. Burada $s=1$ ile sağlanmaktadır. $s=1$ olması için $n_r=0$ gerektiği açıktır. Bu durum sekonderi kısa devre edilmiş transformatöre benzer. Kısa devre deneyi eşdeğer devresi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.5 Asenkron motorun kısa devre çalışma eşdeğer devresi

Şekil 3.6 teki kısa devre gerilimi V_k rotor kilitli iken stator akımını nominal yapacak değerdedir ve nominal gerilimden çok küçük bir gerilim olduğundan X_m ve R_{fe} nin etkisi ihmal edebilecek kadar azdır. Şebekeden çekilen aktif güç;

$$P_k = V_k I_k \cos \varphi_k \quad (3.26)$$

veya

$$P_k = I_1^2 (R_1 + R_2') \quad (3.27)$$

$$\cos \varphi_k = P_k / (V_k I_k) \quad (3.28)$$

$$R_k = R_1 + R_2' \quad (3.29)$$

$$R_2' = R_k - R_1 \quad (3.30)$$

Reaktif güç içinde benzer hesaplamalar yapılırsa;

$$Q_k = V_k I_k \sin \varphi_k \quad (3.31)$$

$$Q_k = I_1^2 (X_1 + X_2') \quad (3.32)$$

$$X_k = \frac{Q_k}{I_1^2} \quad (3.33)$$

$$X_k = X_1 + X_2' \quad (3.34)$$

$$X_1 \cong X_2 \quad (3.35)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_k}{2} \quad (3.36)$$

Gerekli büyüklükler ölçülerek ve Denk. (3.26-3.35) kullanılarak R_k ve X_k hesaplanabilir. Kilitli rotor deneyinde farklı gerilimler için motorun kalkış akımı ve kalkış momenti de elde edilir. Teorik olarak kalkış momenti L tipi eşdeğer devreden

$$M = \frac{3R_2'V^2}{\omega_s (R_k^2 + X_k^2)} \quad (3.37)$$

olarak hesaplanabilir.

Benzer şekilde asenkron motorun rotoru kilitli kısa devre deneyi yapılmak üzere aşağıdaki deney düzeneği kurulmuştur.

Deney düzeneği kurularak alınan ölçüm sonuçları tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.2 Rotoru kilitli kısa devre çalışma deney ölçüm sonuçları

Deney No:	1	2	3
Faz gerilimi(V)	268	260	270
Faz akımı (A)	20.8	21.2	21.9
Güç(W)	6120	6060	6450
Cosφ	0.63	0.64	0.63

Yukarıdaki tabloya göre;

$$R_{k1} = \frac{P_{k1}}{3I_k^2} = \frac{6120}{3(20.8)^2} = 4.71 \Omega$$

$$R_{k2} = \frac{P_{k2}}{3I_k^2} = \frac{6060}{3(21.2)^2} = 4.49 \Omega$$

$$R_{k3} = \frac{P_{k3}}{3I_k^2} = \frac{6450}{3(21.9)^2} = 4.48 \Omega$$

$$P_k = P \cdot \cos \varphi_k \Rightarrow P = P_k / \cos \varphi_k = (6120) / 0.63 = 9714.3 W$$

$$Q_k = P \cdot \sin \varphi_k \Rightarrow 9714.3 \cdot 0.77 = 7544.1 W$$

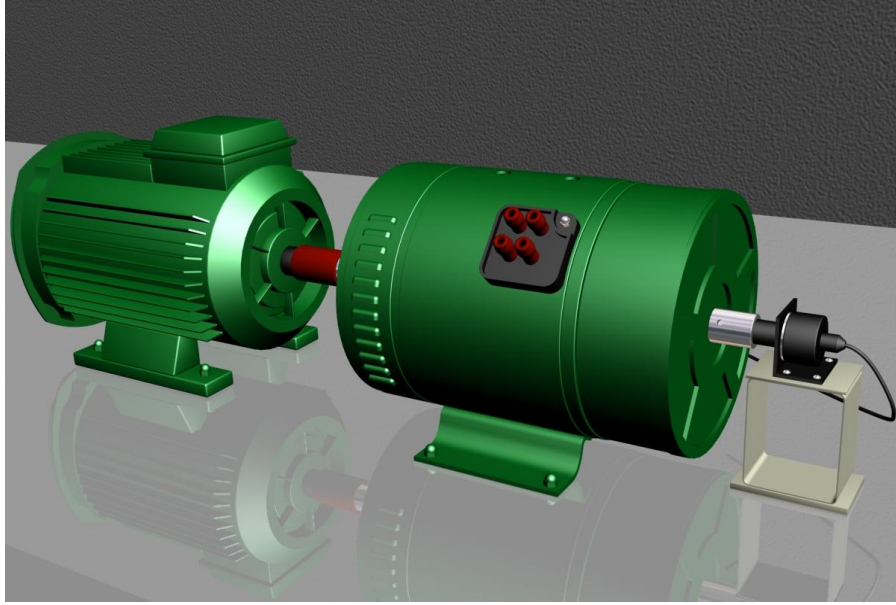
$$X_{k1} = \frac{Q_{k1}}{3I_k^2} = \frac{7544.1}{3(20.8)^2} = 5.81 \Omega$$

$$X_{k2} = \frac{Q_{k2}}{3I_k^2} = \frac{7274.1}{3(21.2)^2} = 5.391 \Omega$$

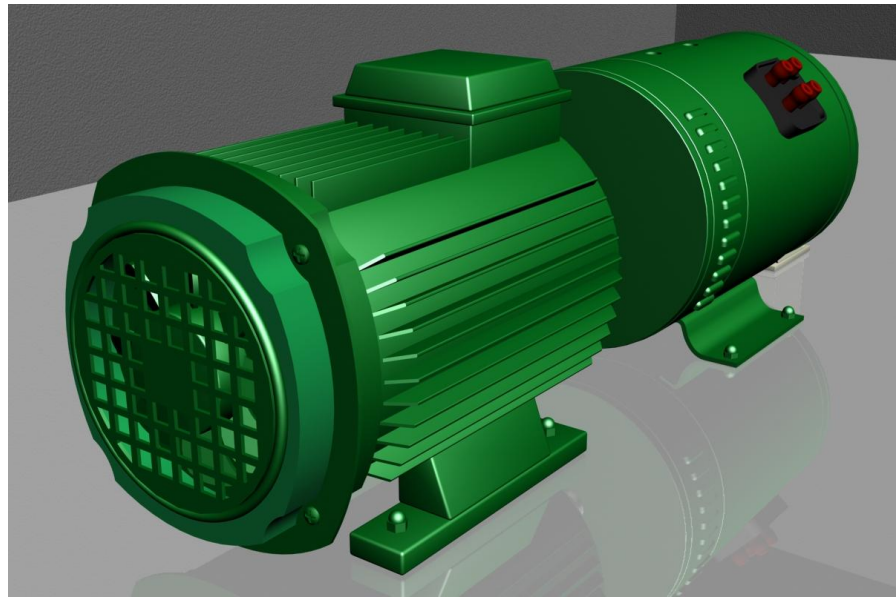
$$X_{k3} = \frac{Q_{k3}}{3I_k^2} = \frac{7974.7}{3(21.9)^2} = 5.541 \Omega$$

4. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORUN DENEY DÜZENEĞİ

Sincap kafesli asenkron motorun hızının sensörsüz olarak belirlenebilmesi için aşağıdaki gibi deney düzeneği düşünülmüştür.



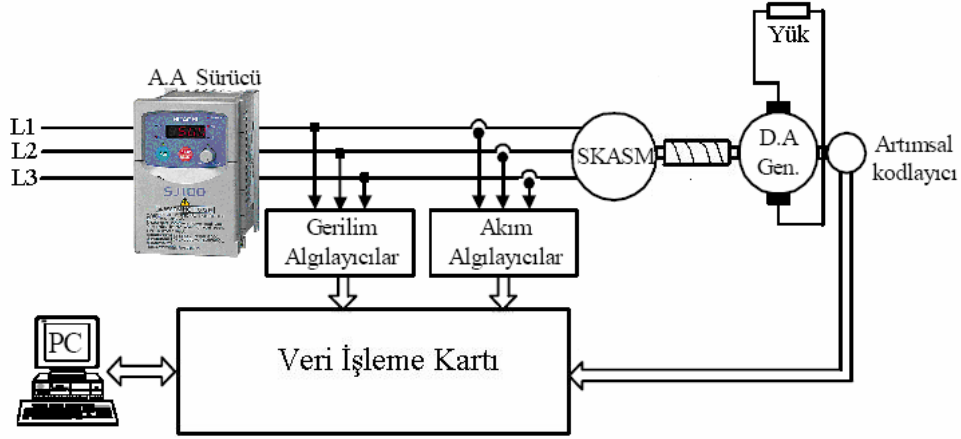
Şekil 4.1 Tasarlanan deney düzeneği görünüşü 1



Şekil 4.2 Tasarlanan deney düzeneği görünüşü 2

Deney setini gerçeklemek için;

2.2Kw'lık Sincap kafesli asenkron motor,Inverter,DC motor,Ardışıl kodlayıcı,Akım trafoları,Veri toplama kartı ve omik yük ile deney düzeneği oluşturulmuştur.



Şekil 4.3 Deney düzeneği

Asenkron motorumuzun etiket değerleri;

Tablo 4.1 Üç faz asenkron motorun etiket değerleri

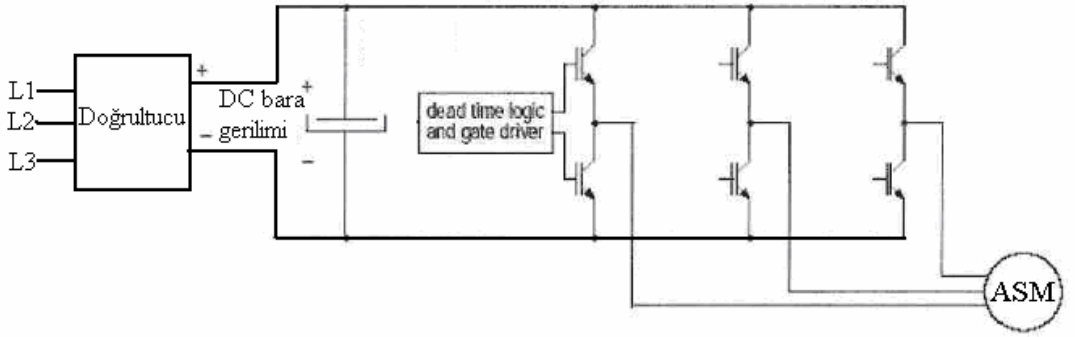
Δ 220	Y 380
Coşp	0.81
KW	2.2
d/dak	1420

Tablo 4.2 DC motorun etiket değerleri

HP	2
V	200
Vexc	200
KW	1.5

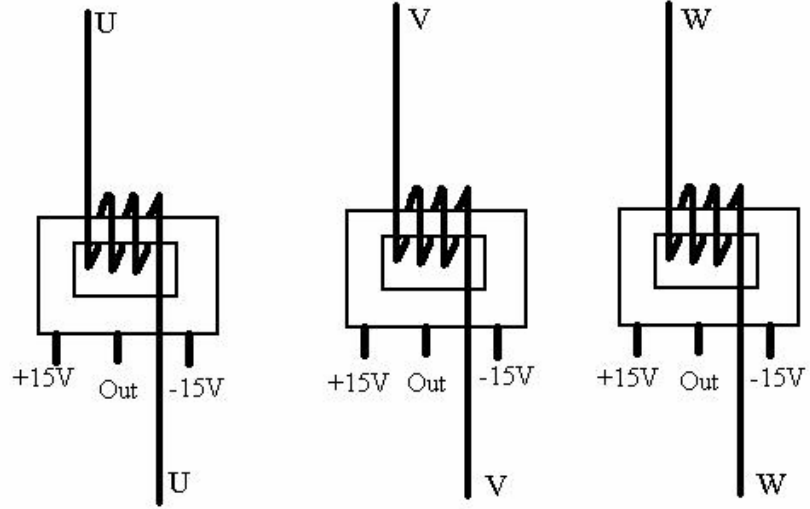
Yapılan deneylerde motorun boşa ve yükte farklı hızlarda denemeleri yapılmıştır. Asenkron motoru değişik hızlarda çalıştırmak için Hitachi marka inverter kullanılmıştır. Yükte çalışmayı sağlayamak için ise ikinci bir motor olarak ta

dışardan uyarmalı DC motor seçilmiştir. Asenkron motor ve DC motor, milleri aynı eksen de olacak şekilde akuple edilmiştir. DC motorun yük olarak çalıştırılması için armatür sargı uçlarına omik yük bağlanarak çalıştırılır. Uyarma sargılarına uygulanan gerilim, motor mili uçlarındaki gerilme kuvvetini artırır. Aynı şekilde endüvi uçlarındaki yük değeri ve üzerinden geçen akım şiddetiyle orantılı olarak mil motor mili uçlarındaki gerilme kuvveti artar. Böylece asenkron motorun yükte çalışması sağlanmış olur. DC motor uyarma gerilimi belli bir seviyenin altında motor yüklenmez. Motor bu durumda boşta çalışmış olur. Asenkron motorun değişik frekans değerlerinde sürebilecek inverter devresi aşağıda gösterilmiştir. Deney düzeneği aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.4 Asenkron motor sürücüsü (inverter)

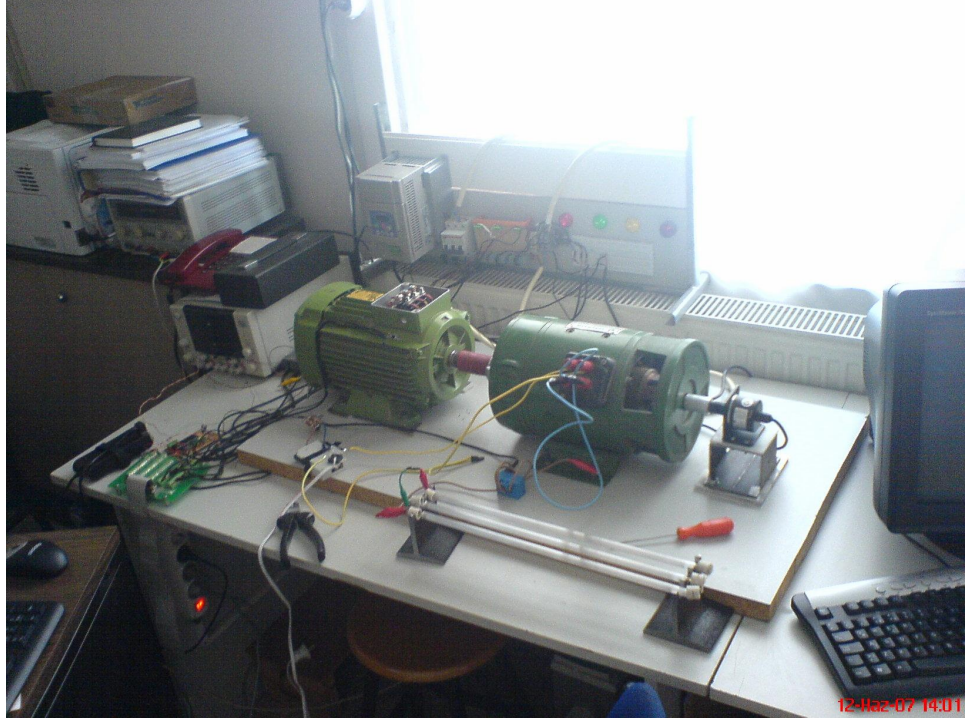
Asenkron motorun nominal akımı 4,5 A'dır. Veri toplama kartı akım girişi ise 0-20mA'dır. Akım algılama işi için veri toplama kartına sinyal koşullandırma yapmak gereklidir. $4,5 \text{ A}/1000=4,5\text{mA}$ olduğundan ölçüm aralığı maksimum skalaya göre oldukça düşük kalmaktadır. Bu sebeple akım trafosu içerisinde kablo 4 defa dolaştırılmış ve ölçüm hassasiyeti arttırılmıştır. Akım algılayıcısı olarak +-15 Vdc simetrik beslemeli 1/1000 akım trafoları kullanılmıştır. Bu akım trafoları U,V,W fazlarının herbirine yerleştirilerek herbir faz için akım bilgisi alınmıştır.



Şekil 4.5 Akım trafoları

Aynı şekilde Veri toplama kartı gerilim girişi de 0-10V'tur. Asenkron motorun faz gerilimleri ise 380V'tur. Gerilim algılayıcılarını veri toplama kartına girmek içinde sinyal koşullandırma yapmak gerekmektedir. Gerilim algılayıcısı sinyal koşullandırma devresi için gerilim bölücü direnç kullanılmıştır (47,5ohm). Çevrim oranı 1/47,5 tur.

Asenkron motorun rotor hızını okumak için 500 adımlık enkoder kullanılmıştır. Farklı rotor hızlarında dönerken enkoderdan alınan hız bilgisi Veri toplama Kartı'nın ilgili girişlerine bağlanmıştır.

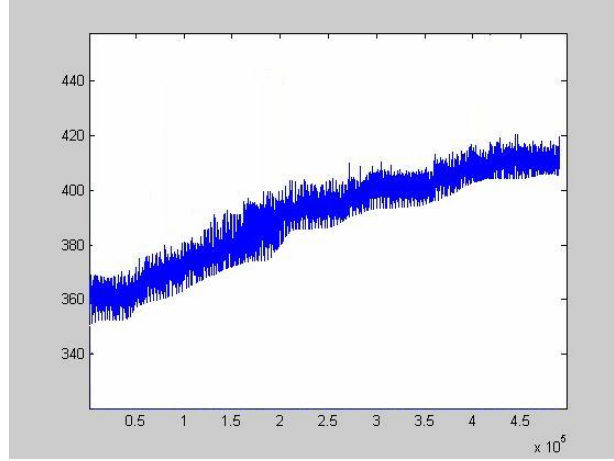


Şekil 4.6 Deney düzeneği

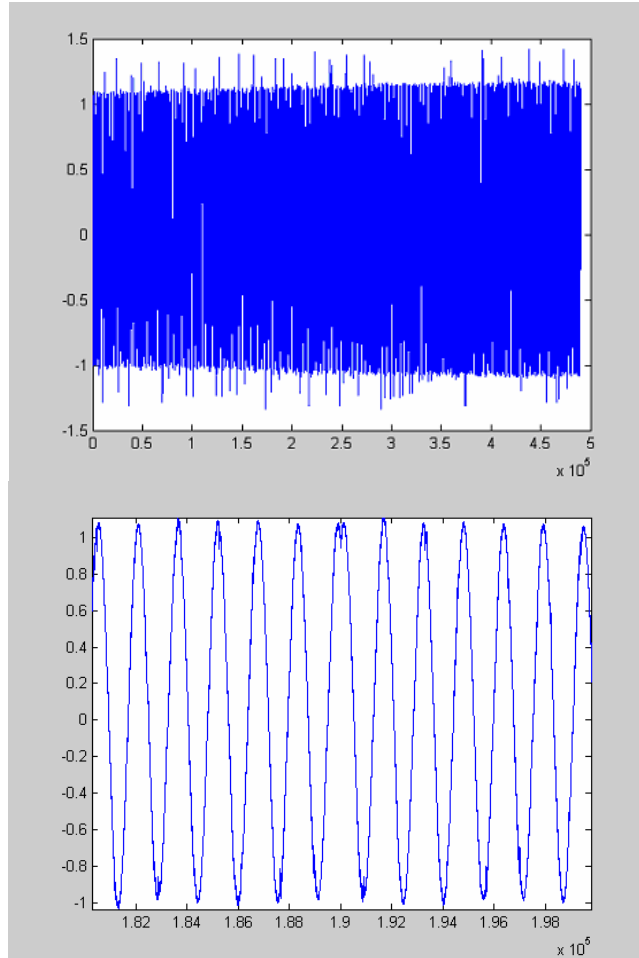
Asenkron motorun yüklü ve yüksüz durumda farklı deney hızlarında ölçülen gerilim, akım ve hız bilgisi niceliklerini 10 sn lik zaman aralıklarında diske kaydedilmiştir.

5. YAPILAN TESTLER VE ALINAN VERİLER

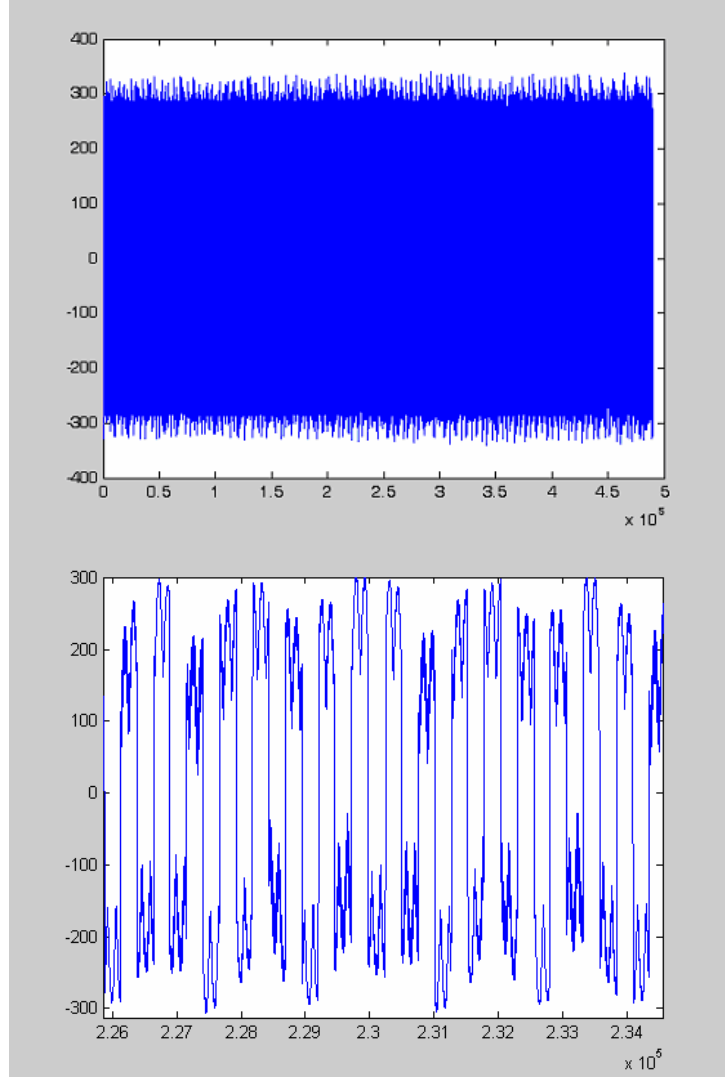
5.1 12.00 Hz den 15.00 Hz'e Periyodik Artımlı Test Sonuçları



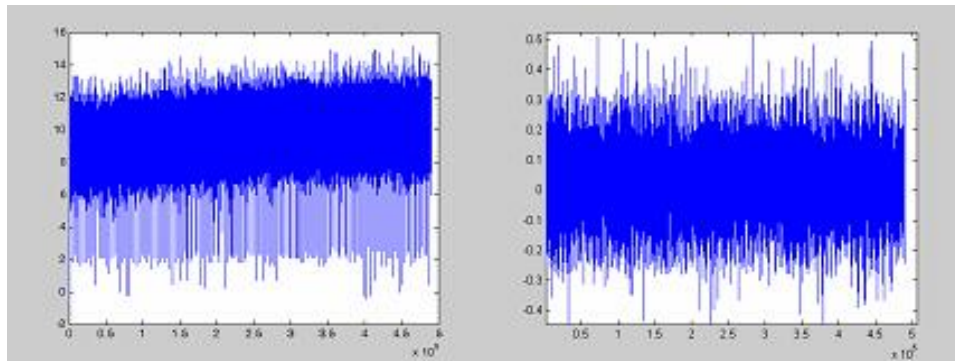
Şekil 5.1 12.00-15.00 Hz aralığı RPM grafiği



Şekil 5.2 12.00-15.00 Hz aralığı Akım grafiği

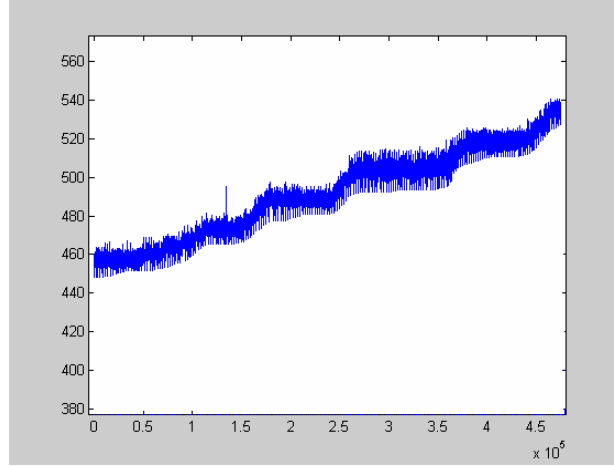


Şekil 5.3 12.00-15.00 Hz aralığı U fazı gerilimi grafiği

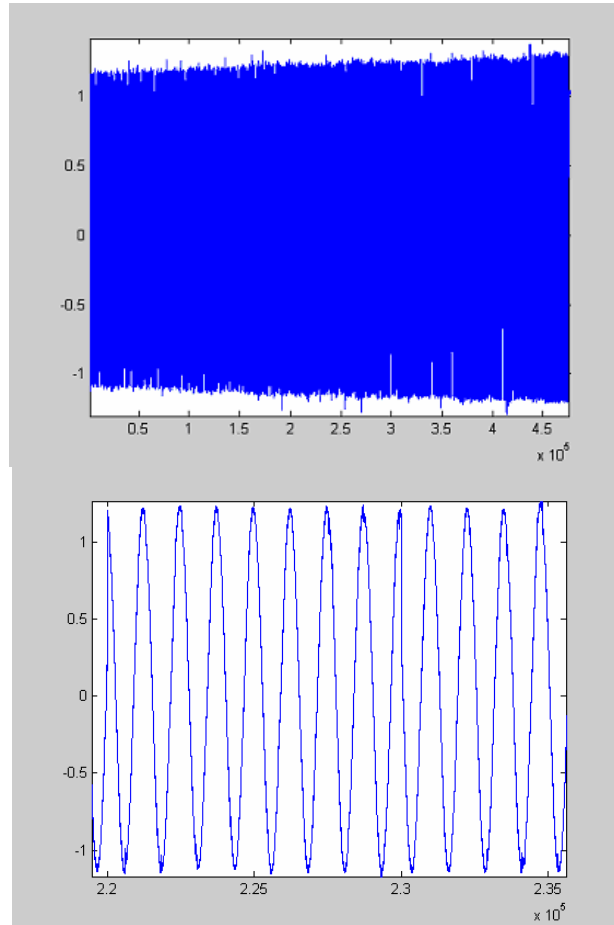


Şekil 5.4 12.00-15.00 Hz aralığında DC motor gerilim ve akımı

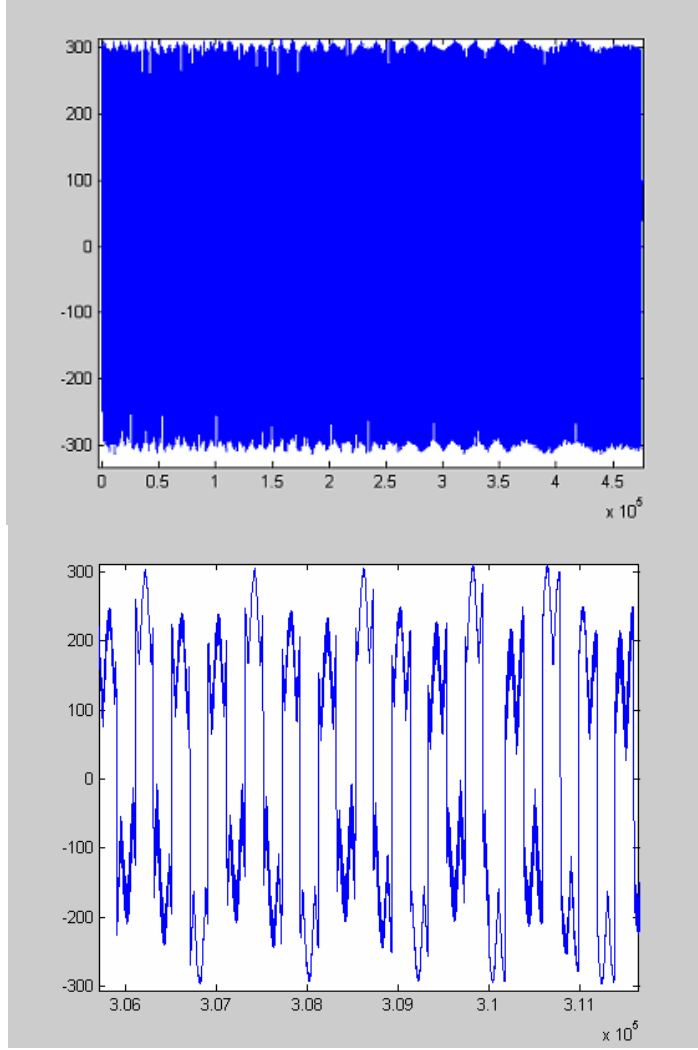
5.2 15.00 Hz den 17.50 Hz'e periyodik artımlı test sonuçları



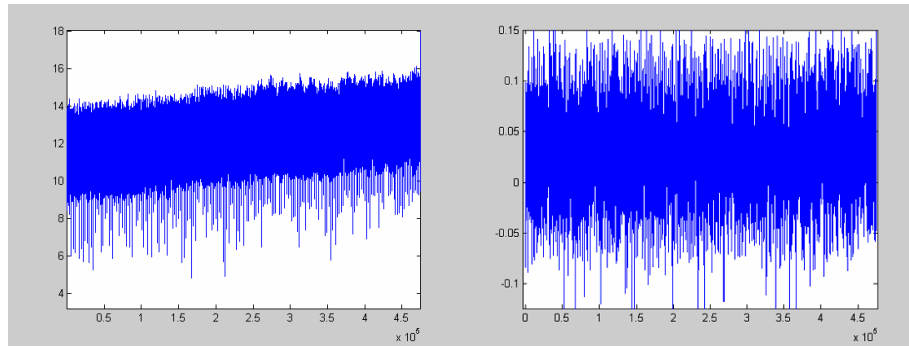
Şekil 5.5 15.00-17.50 Hz aralığı RPM grafiği



Şekil 5.6 15.00-17.50 Hz aralığı Akım grafiği

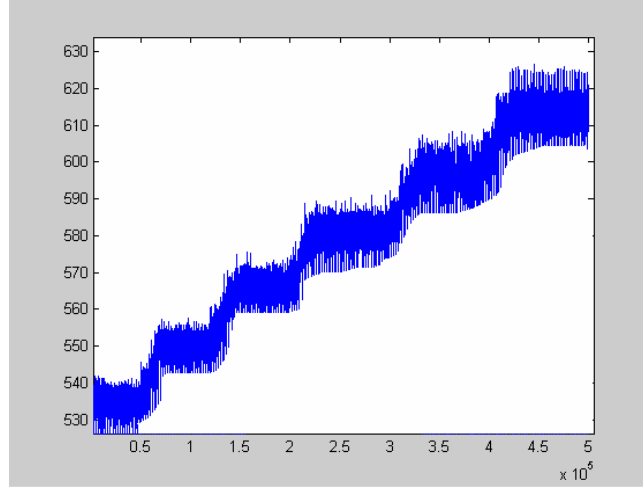


Şekil 5.7 15.00-17.50 Hz aralığı U fazı gerilimi grafiği

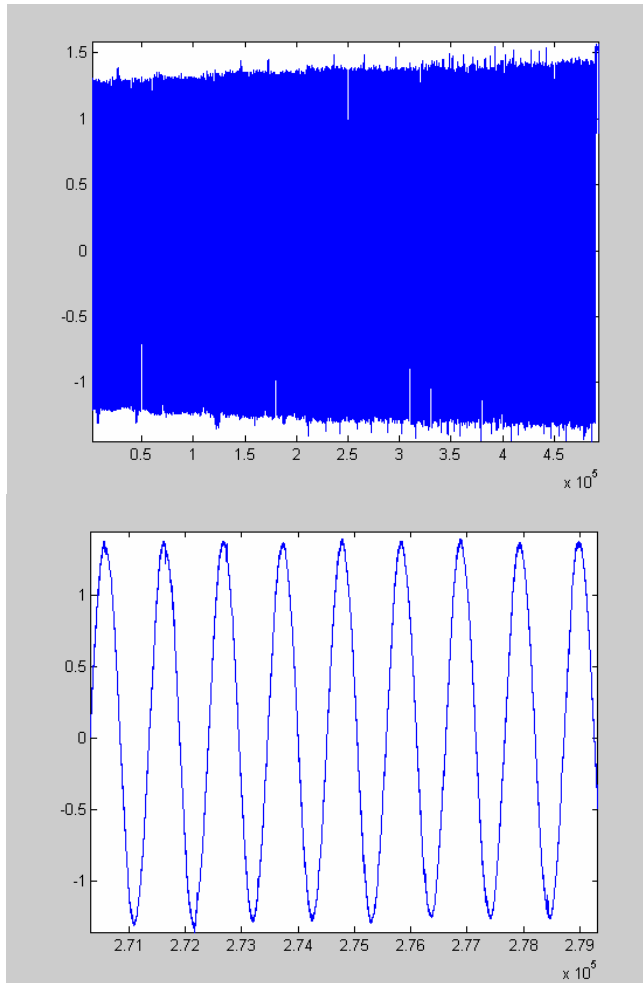


Şekil 5.8 15.00-17.50 Hz aralığında DC motor gerilim ve akımı

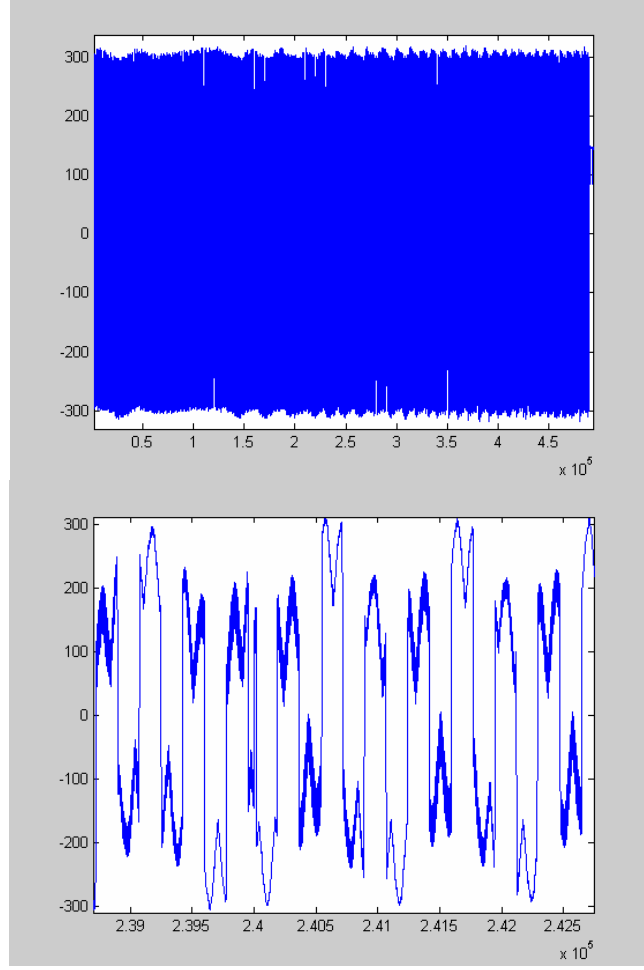
5.3 17.50 Hz' den 20.00 Hz' e Periyodik Artımlı Test Sonuçları



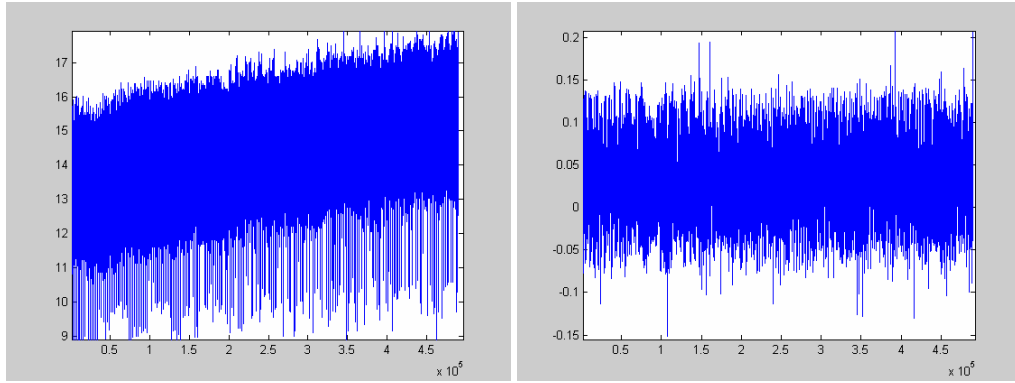
Şekil 5.9 17.50-20.00 Hz aralığı RPM grafiği



Şekil 5.10 17.50-20.00 Hz aralığı Akım grafiği

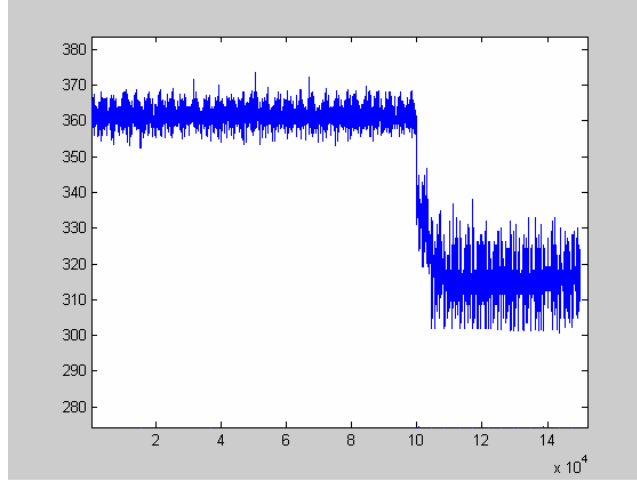


Şekil 5.11 17.50-20.00 Hz aralığı U fazı gerilimi grafiği

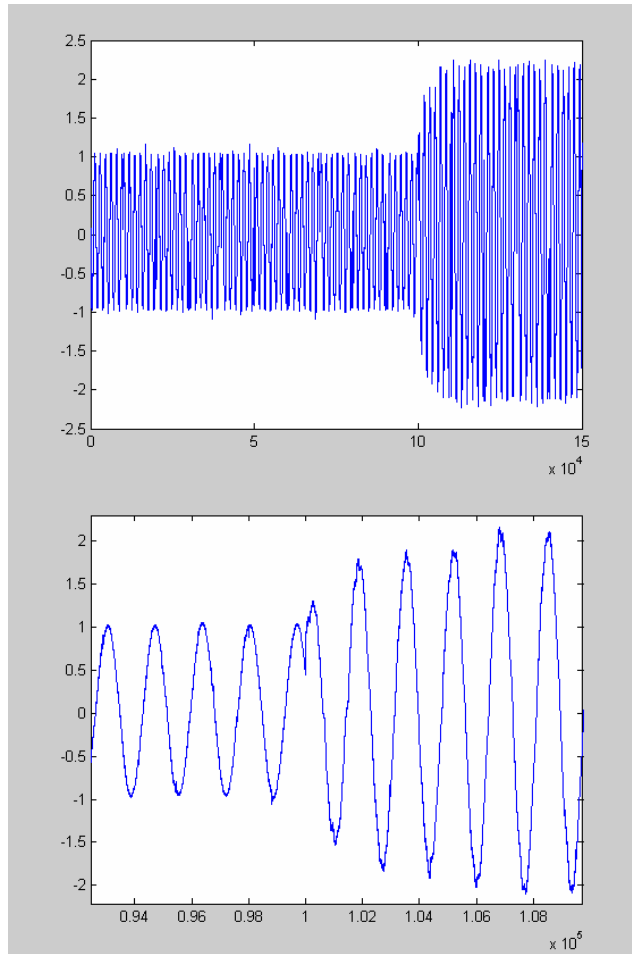


Şekil 5.12 17.50-20.00 Hz aralığında DC motor gerilim ve akımı

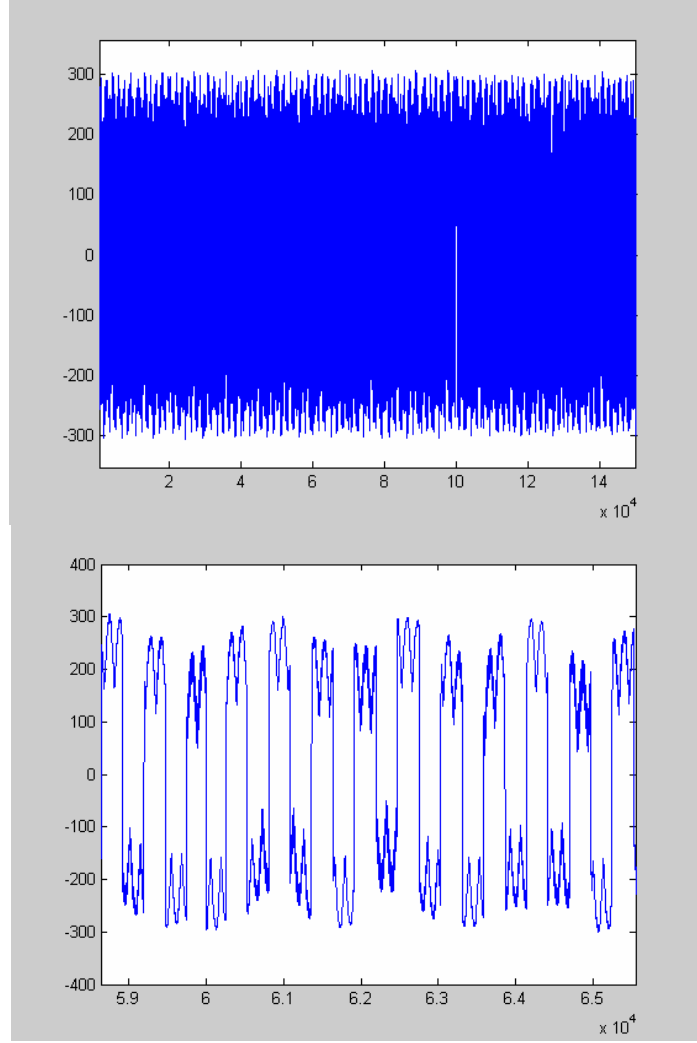
5.4 365 RPM'de Yüksüz ve Yüklü Olarak Yapılan Deney Sonuçları



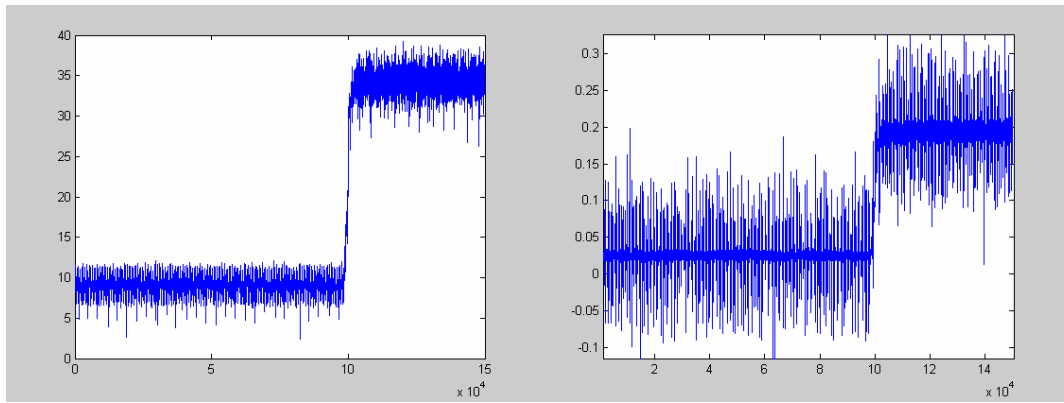
Şekil 5.13 365 RPM hızında hız grafiği



Şekil 5.14 365 RPM hızında Akım grafiği

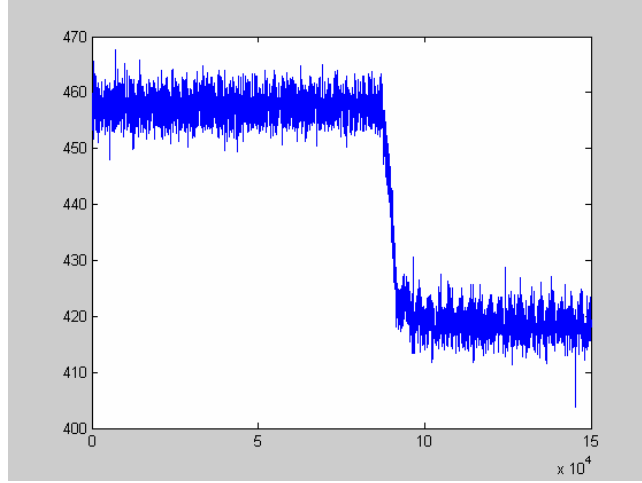


Şekil 5.15 365 RPM'de U fazı gerilimi grafiği

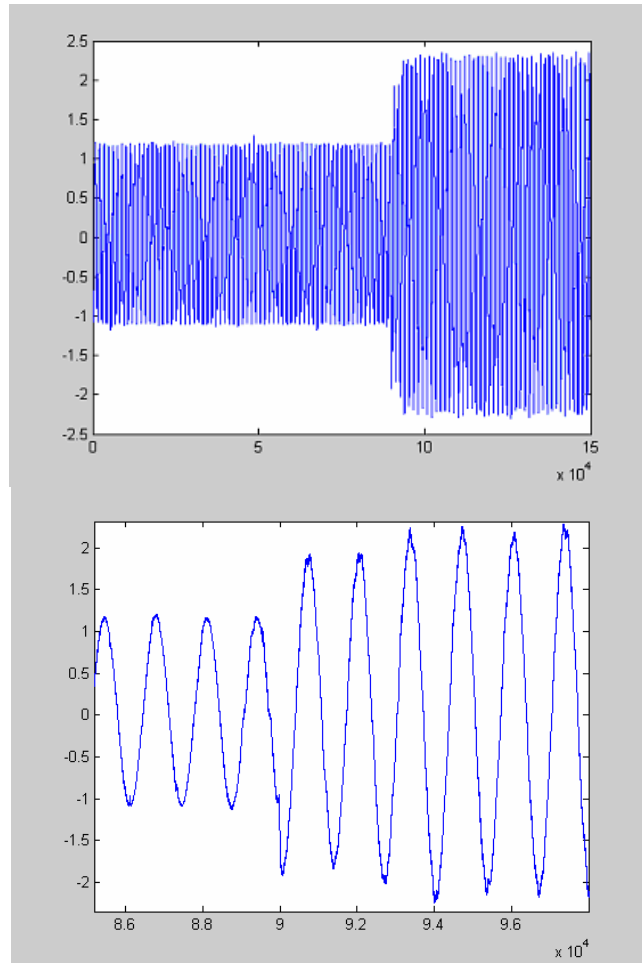


Şekil 5.16 365 RPM hızında DC motor gerilim ve akımı

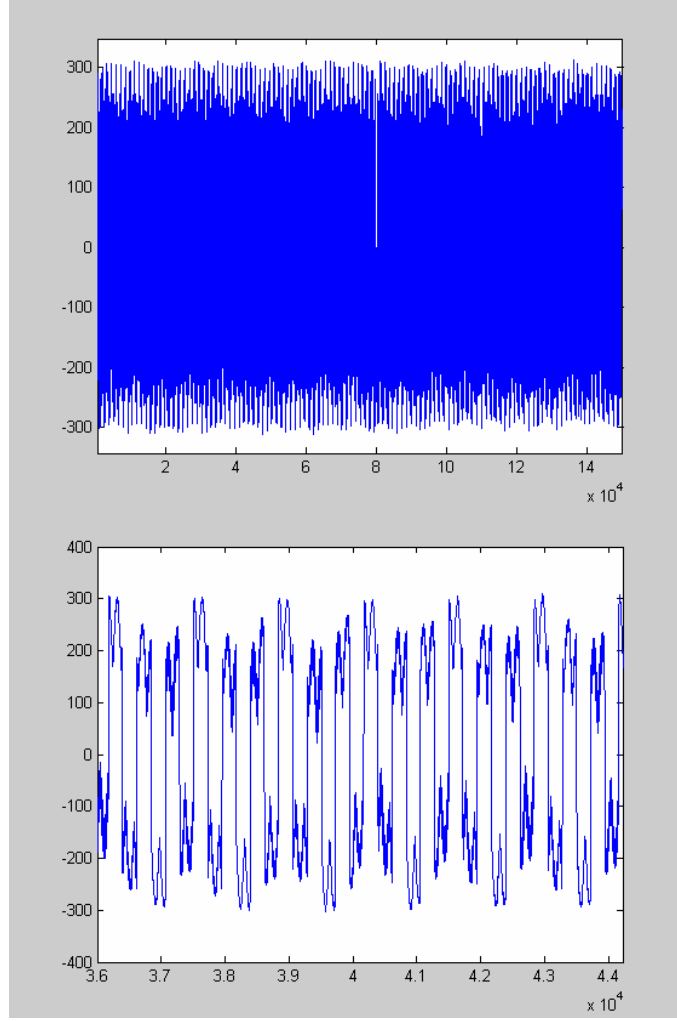
5.5 455 RPM' de Yüksüz ve Yüklü Olarak Yapılan Deney



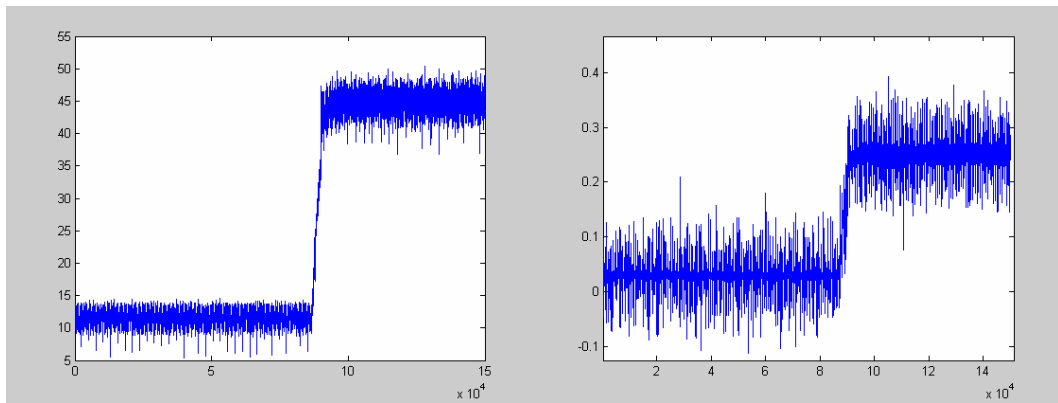
Şekil 5.17 455 RPM'de hız grafiği



Şekil 5.18 455 RPM hızında Akım grafiği

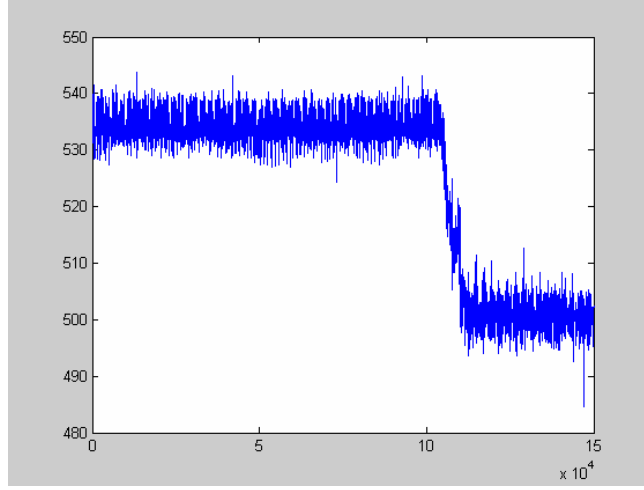


Şekil 5.19 455 RPM'de U fazı gerilimi grafiği

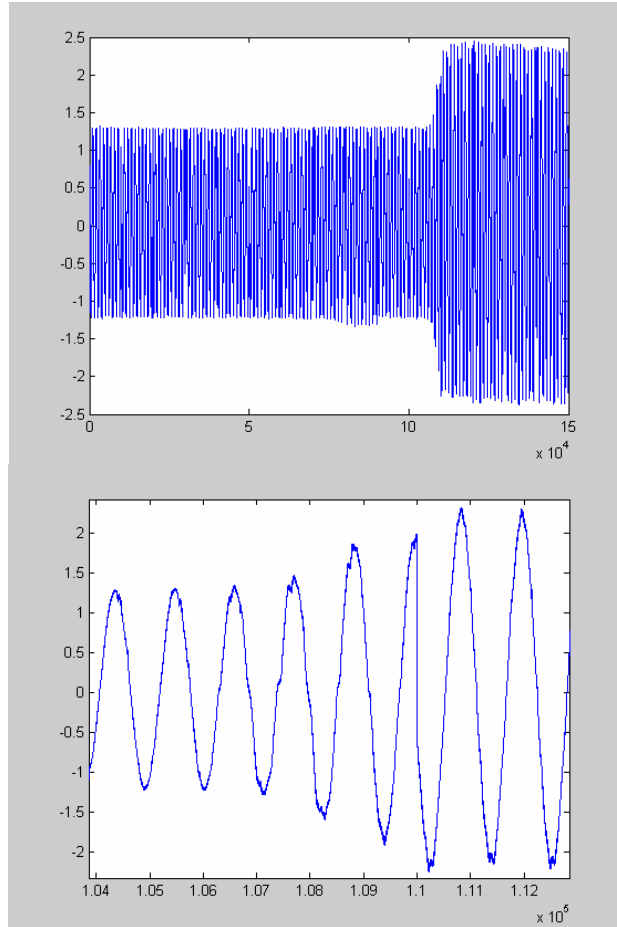


Şekil 5.20 455 RPM hızında DC motor gerilim ve akımı

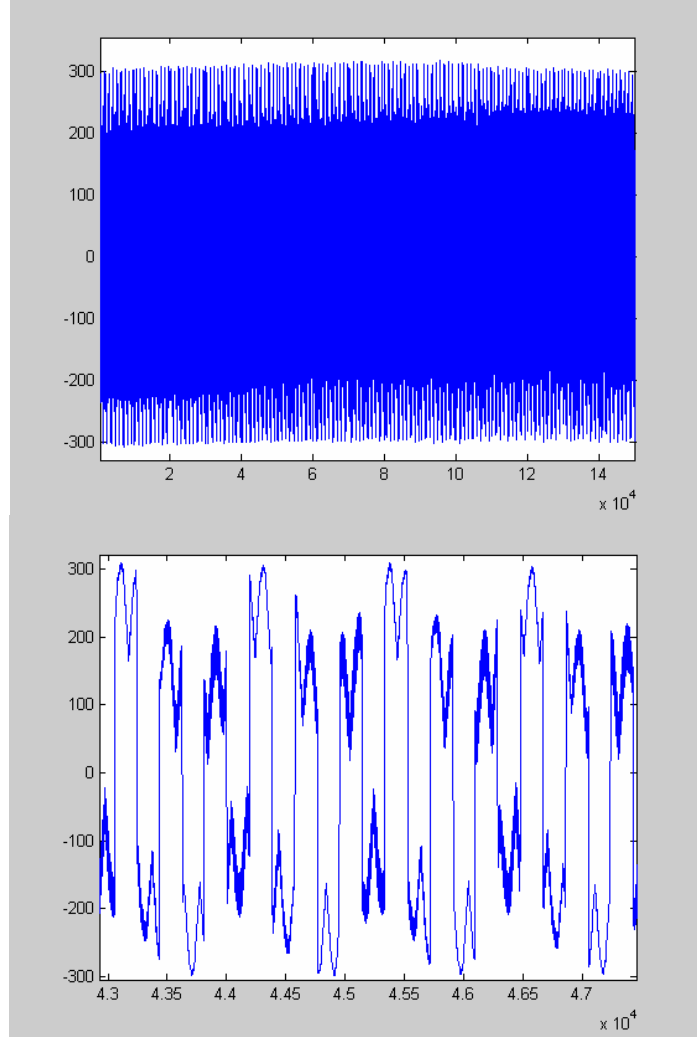
5.6 535 RPM de Yüksüz ve Yüklü Olarak Yapılan Deney



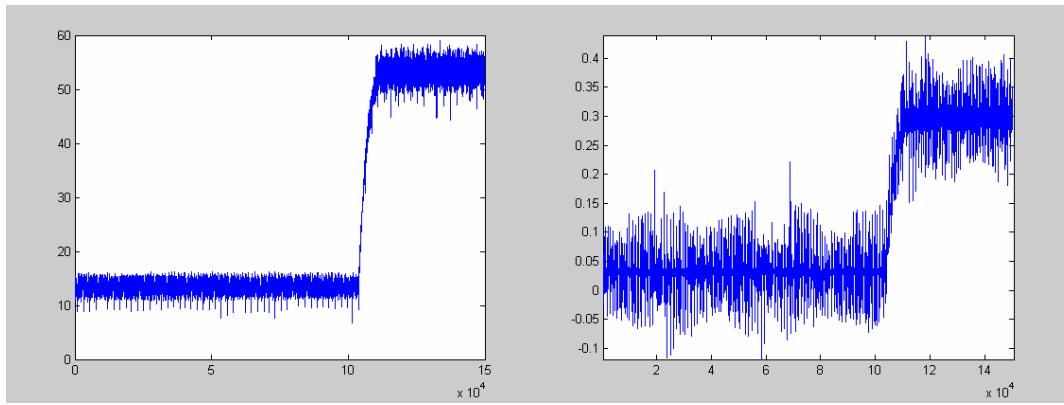
Şekil 5.21 535 RPM'de hız grafiği



Şekil 5.22 535 RPM hızında Akım grafiği

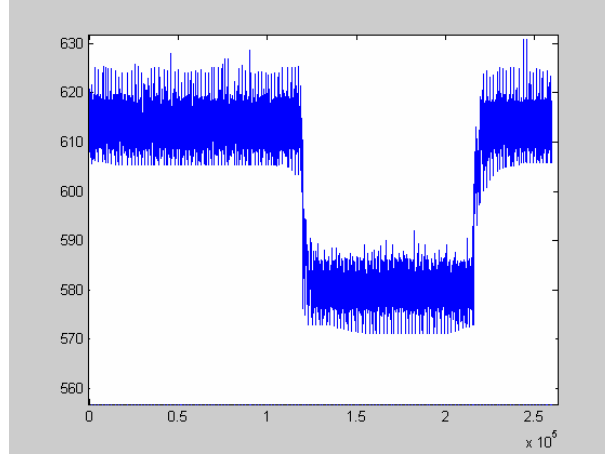


Şekil 5.23 535 RPM’de U fazı gerilimi grafiği

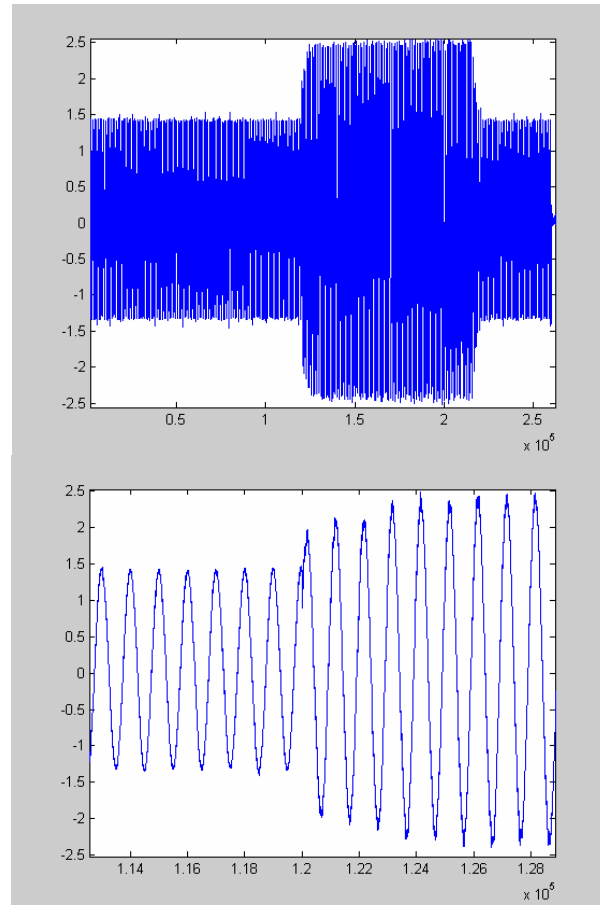


Şekil 5.24 535 RPM hızında DC motor gerilim ve akımı

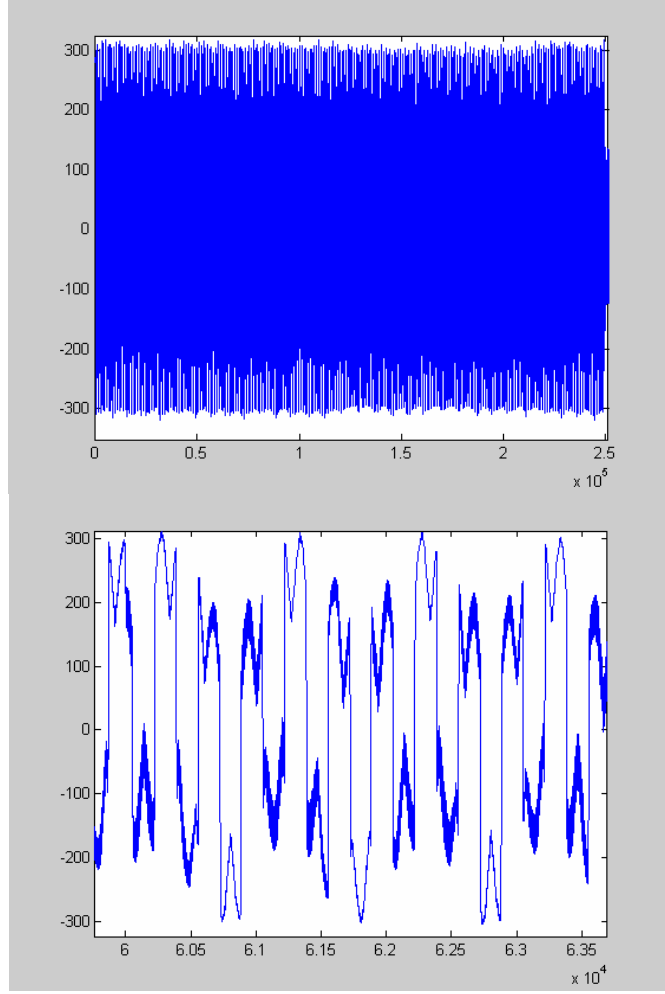
5.7 613 RPM de Yüksüz ve Yüklü Olarak Yapılan Deney



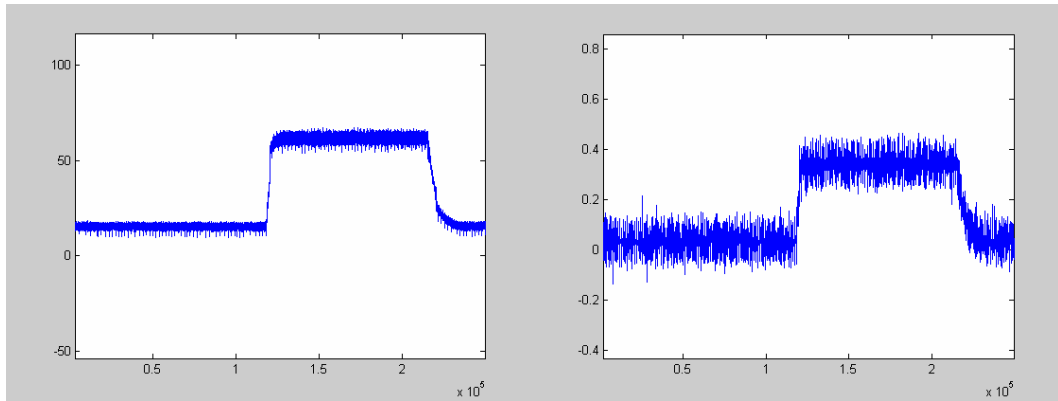
Şekil 5.25 613 RPM'de hız grafiği



Şekil 5.26 613 RPM hızında Akım grafiği



Şekil 5.27 613 RPM'de U fazı gerilimi grafiği



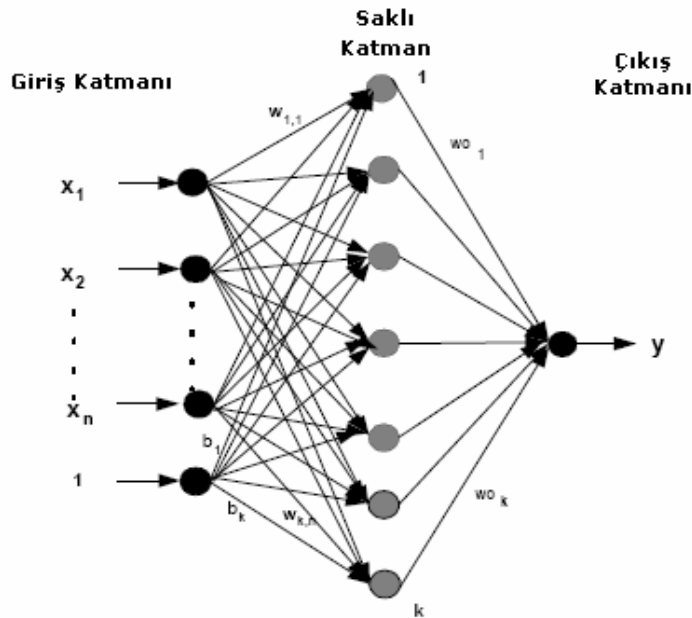
Şekil 5.28 613 RPM hızında DC motor gerilim ve akımı

6.YSA İLE HIZ KESTİRİMİNİN YAPILMASI

Genelde, asenkron motorların geçici ve kalıcı durum analizleri motor parametrelerini kullanarak matematiksel model ile uzay vektör teorisini kullanarak yapılır.[2,3,5,10,12,14,16,23] Stator ve rotor akı bağlantıları, rotor hızı, yük tork vb gibi değişken motor büyüklüklerini kestirmek için normalde 2.4'te bahsedilen matematiksel model kullanılır. Bununla birlikte, bu motor büyüklükleri bir YSA kullanılarak matematiksel model olmaksızın kestirilebilir.[15,21,24]

6.1 Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

Bir YSA , içyapı, eğitim veya öğrenme algoritmaları ve aktivasyon fonksiyonlarından oluşur.İç yapı olarak belirtilen sınırlar arası bağlantılar olarak açıklanabilir. Bu yapı bir giriş katmanı, bir çıkış katmanı ve genellikle bir ya da daha çok saklı katman oluşur. Şekil 6.1'de en sık kullanılan, ileri beslemeli bir gizli katmanlı YSA verilmiştir. Verilen ağın katmanları belirli ağırlıklarla haberleşme hatları ile bağlanmıştır. Bu ağırlıklar öğrenme algoritması sonucunda oluşturulmuştur.



Şekil 6.1 Tek saklı katmanlı İleri Beslemeli YSA

Çıkış düğümü j olan saklı katman ;

$$h_j = g\left(\sum_{i=1}^n w_{ji} \bullet x_i + b_j\right) \quad (6.1)$$

YSA çıkışı ;

$$y = \sum_{i=1}^k (wo_i \bullet h_i) \quad (6.2)$$

Buradaki w_{ji} girişlerin, saklı katmandaki j düğümüne, ağırlık bağlantılarıdır, b_j düğümdeki bias, ve wo_i saklı katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlıklardır.

YSA'lar öğrenme algoritmalarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

- Ağırlıkları Belirli YSA (Fixed Weight ANNs): Herhangi bir öğrenmeye ihtiyaç duymaz.
- Eğitici-siz YSA (unsupervised ANNs): Bu ağlar sadece giriş verileri ile öğrenirler. Ağın öğrenme tecrübesi bir önceki girişe bakarak artar. Eğitici olmadan öğrenme “yaparak öğrenme” olarak ta adlandırılır. Dışarıdan herhangi bir müdahale olmaksızın, saklı katmandaki nöronlar kendi kendine organize olurlar. Girdi vektörüne karşılık, örnek çıktılar ağa verilmez.
- Eğitici-li Öğrenme : En çok kullanılan YSA tipidir. Bu YSA'da sisteme hem giriş hem de çıkış verisi girilir. Ağırlıklar ve bias her giriş/çıkış verisine göre güncellenir. Çok katmanlı kestiriciler (Multi Layer Perceptron) bu gruba dahildir. Eğitici-li öğrenmede, istenilen çıktı değeri ile sinir ağı çıkışı arasındaki fark hata ölçüsüdür ve ağıdaki ağırlıkları güncellemekte kullanılır. İstenilen çıktı değerleri genelde vektörel olarak ilişkilendirilerek örnek değerler olarak YSA'ya verilir. Bu örnek değerlere eğitim kümesi denir.

Çok katmanlı kestiriciler uygulamada en çok kullanılan YSA'lardır. ÇKK'lar model tanıma, kontrol, sınıflandırma gibi işlerde sıklıkla kullanılırlar. Mühendislik uygulamalarında kullanılan adımlar aşağıda verilmiştir.

- 1- Giriş Seçimi – Model çıkarımı : Model tanımanın ilk adımı. YSA'nın biçimine direk olarak etki eder.
- 2- Eğitim verileri : Eğitim verileri iyi kestirim sonuçları için çok önemlidir.
- 3- YSA Seçimi : Kaç giriş, kaç çıkış, saklı neronlar, saklı katmanlar, v.b.?

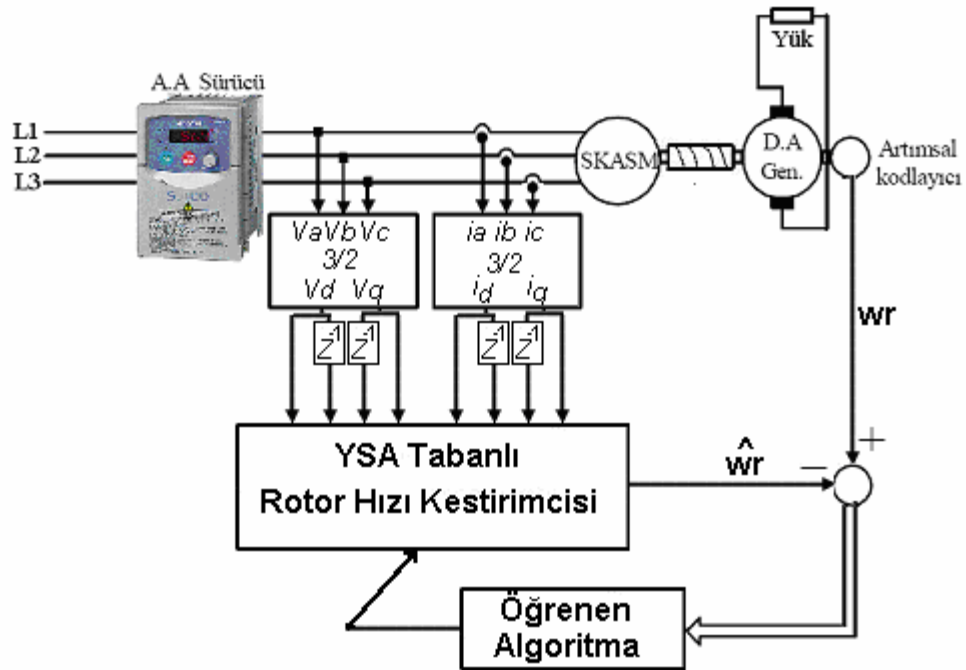
- 4- YSA'nın eğitilmesi
- 5- Testler

İki türlü eğitim algoritması kullanılabilir, bunlardan biri iteratif yöntem diğeri ise yığın yöntemi. İteratif yöntemde ağırlıklar ve biaslar her bir giriş değeri için güncellenmekte, yığın yönteminde ise ağırlıklar ve biaslar tüm eğitim seti girildikten sonra güncellenmektedir. Biz çalışmalarımızda iteratif yöntemi kullandık.

YSA'lar ile ilgili daha detaylı bilgileri EK A'da bulabilirsiniz.

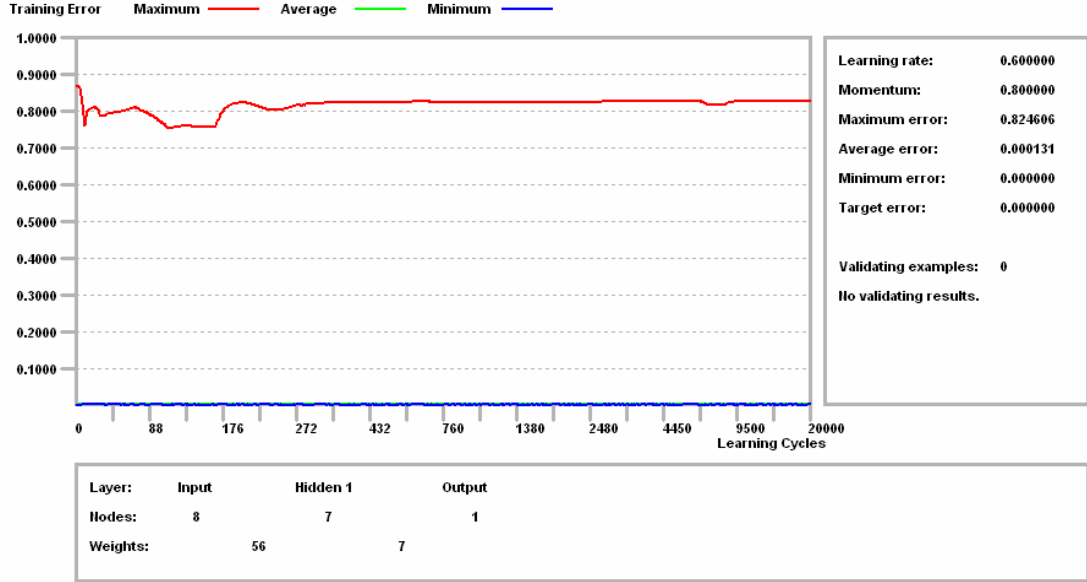
6.2 YSA Kullanılarak Asenkron Motor Hızının Belirlenmesi

Şekil 6.2'de YSA kullanılarak rotor hızı kestirimi yapılan sistemin şeması verilmiştir. Motorun akım ve gerilim bilgilerinin abc-dq0 dönüşümü yapılarak DC bileşenleri kullanılmış bu sayede kestirim sonuçlarının yüksek doğrulukta olması sağlanmıştır. Abc-dq0 dönüşümleri ile ilgili detaylı bilgi daha önceden verilmiştir. YSA'nın gerçekleşmesi için EasyNN programı kullanılmıştır.



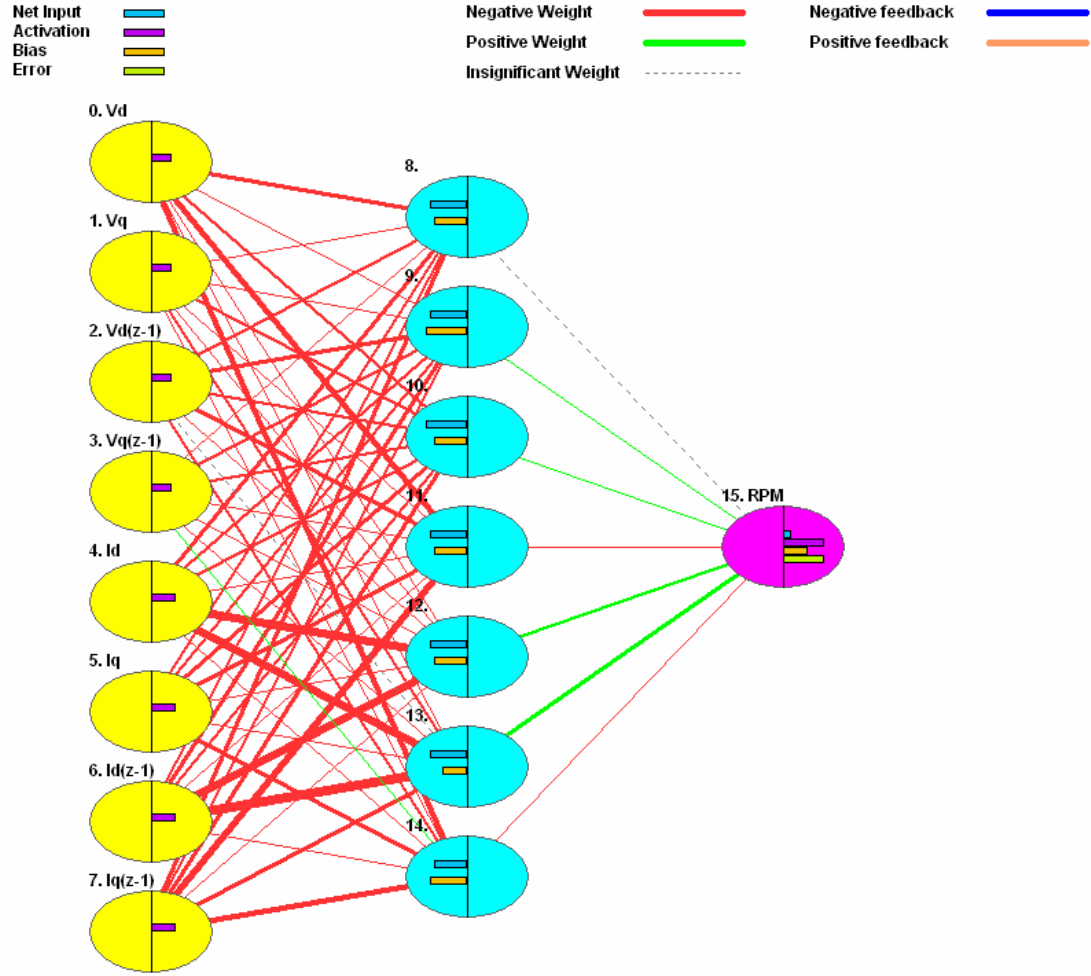
Şekil 6.2 Asenkron motor için YSA tabanlı hız kestiricisi

Yapay sinir ağı ile hız kestirimi yapmak için daha önce grafikleri verilmiş datalar ile yapay sinir ağı eğitilmiştir. Eğitim için 2 milyon 518 bin 984 x 9'luk bir matris kullanılmıştır. 8 giriş sütunu $V_d, V_d(z-1), V_q, V_q(z-1), I_d, I_d(z-1), I_q, I_q(z-1)$ ve 1 çıkış sütunu RPM kullanılmıştır.



Şekil 6.3 Yapay sinir ağı eğitim sonuçları

Eğitim için 20bin çevrim seçilerek eğitim başlanmıştır. Yukarıdaki grafikte maksimum hata, ortalama hata ve minimum hata kalemlerinin değişimleri vardır. Eğitim ilk başladığında 0,000823 olan ortalama hata eğitim sırasında azalarak 1000. çevrimde 0,000200'ün altına düşmüştür. 20bin çevrim sonunda ortalama hata 0,000132 olarak elde edilememiştir. Eğitim sonucunda ortaya çıkan YSA ve girişlerin kestirim önemleri aşağıda verilmiştir. Kullanılan programın İngilizce olması nedeniyle grafiklerdeki tanımlamalar İngilizce olarak yer almaktadır.



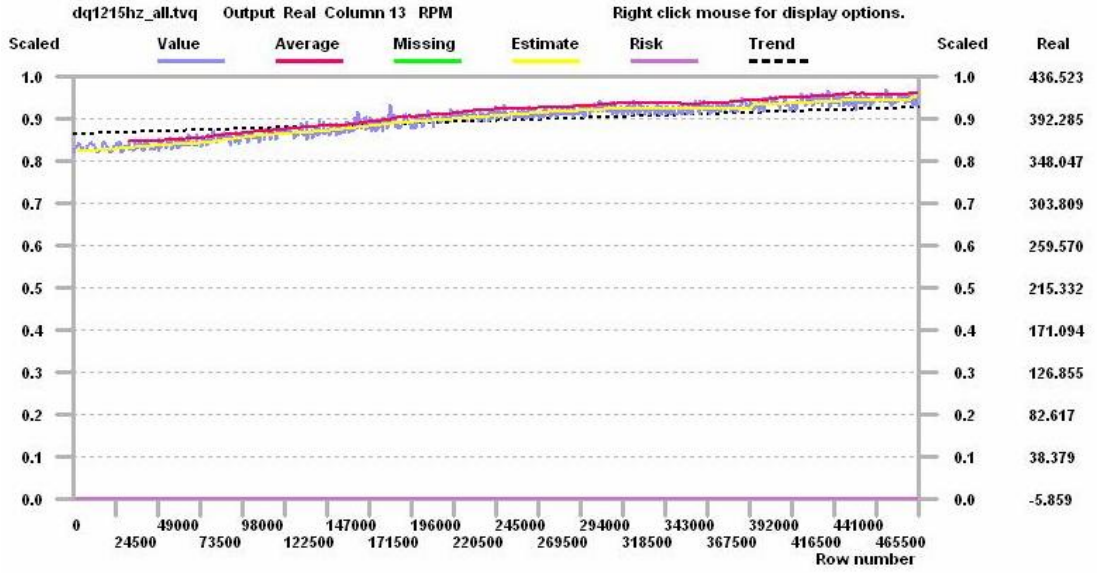
Şekil 6.4 Eğitim sonucu oluşan YSA

Column	Input Name	Importance	Relative Importance
7	Id	9.9730	
11	Iq(z-1)	9.1881	
10	Id(z-1)	9.0794	
1	Vd	7.5523	
8	Iq	7.3978	
4	Vd(z-1)	6.1224	
5	Vq(z-1)	4.0163	
2	Vq	3.6042	

Şekil 6.5 YSA girişlerinin önem durumları

6.2.1 12Hz-15Hz aralığında kestirim sonuçları

Bu deneyde asenkron motor inverter ile 12Hz den başlayarak sürülmüştür. Veri alma işlemi bu aşamada başlatılmıştır. Motor 12Hz de 3sn sürüldükten sonra frekans 12,5Hz'e çıkarılmıştır. Hızlanma rampası sona erip 12,5Hz'e ulaşılmış ve daha sonra frekans 13Hz'e çıkarılmıştır. Bu işlemler tekrar edilerek en son 14,5 Hz de işlem sona erdirilmiştir. Bu deneyde alınan verilere ait grafikler daha önce verilmişti. Bu bölümde alınmış verilerin YSA ile kestirilen veri ile aralarındaki ilişki verilecektir. Saniyede 20bin veri aldığımız deney setinde bu deneye ilişkin 498bin 999 veri mevcut. Aşağıdaki tabloda örnek numaraları, o andaki dönüş hızı ve kestirim sonucunda oluşan dönüş hızı gösterilmiştir. Tablo oluşturulurken ardışık iki örnek numarası kullanılmıştır.



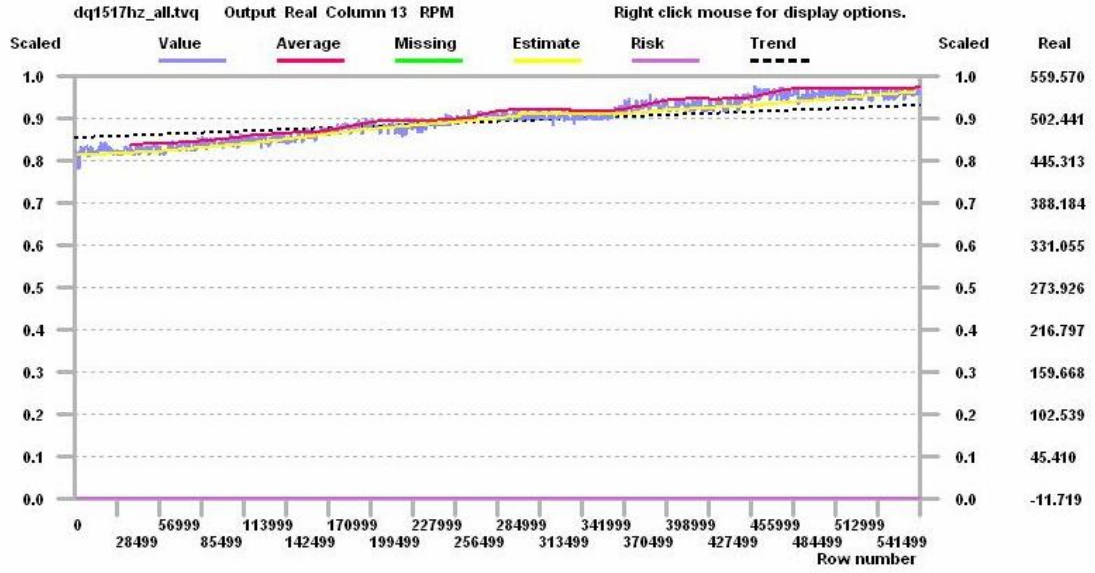
Şekil 6.6 12Hz-15Hz aralığında RPM grafiği

Tablo 6.1 12Hz 15Hz aralığında rotor hızı kestirim sonuçları

Örnek Numarası	Referans Hz	Referans RPM	Ölçülen RPM	Kestirilen RPM	HATA
1	12	359,04	356,45	364,12	-7,68
2	12	359,04	366,21	364,79	1,42
125350	12,5	374	372,07	378,45	-6,38
125351	12,5	374	381,83	378,56	3,27
225462	13	388,96	391,6	396,78	-5,18
225463	13	388,96	400,39	397,17	3,22
325574	13,5	403,92	399,41	403,26	-3,85
325575	13,5	403,92	404,29	403,61	0,68
428127	14	418,88	405,27	413,76	-8,49
428128	14	418,88	417,96	414,04	3,92
489984	14,5	433,84	416,99	424,19	-7,20
489985	14,5	433,84	427,96	424,57	3,39

6.2.2 15Hz-17,5Hz aralığında kestirim sonuçları

Bu deneyde asenkron motor inverter ile 15Hz den başlayarak sürülmüştür. Veri alma işlemi bu aşamada başlatılmıştır. Motor 15Hz de bir süre sürüldükten sonra frekans 15,5Hz'e çıkarılmıştır. Hızlanma rampası sona erip 15,5Hz'e ulaşılmış ve daha sonra frekans 16Hz'e çıkarılmıştır. Bu işlemler tekrar edilerek en son 17,5 Hz de işlem sona erdirilmiştir. Saniyede 20bin veri alınan deney setinde bu deneye ilişkin 569 bin 998 veri mevcuttur. Aşağıdaki tabloda örnek numaraları, o andaki dönüş hızı ve kestirim sonucunda oluşan dönüş hızı gösterilmiştir. Tablo oluşturulurken ardışık iki örnek numarası kullanılmıştır.



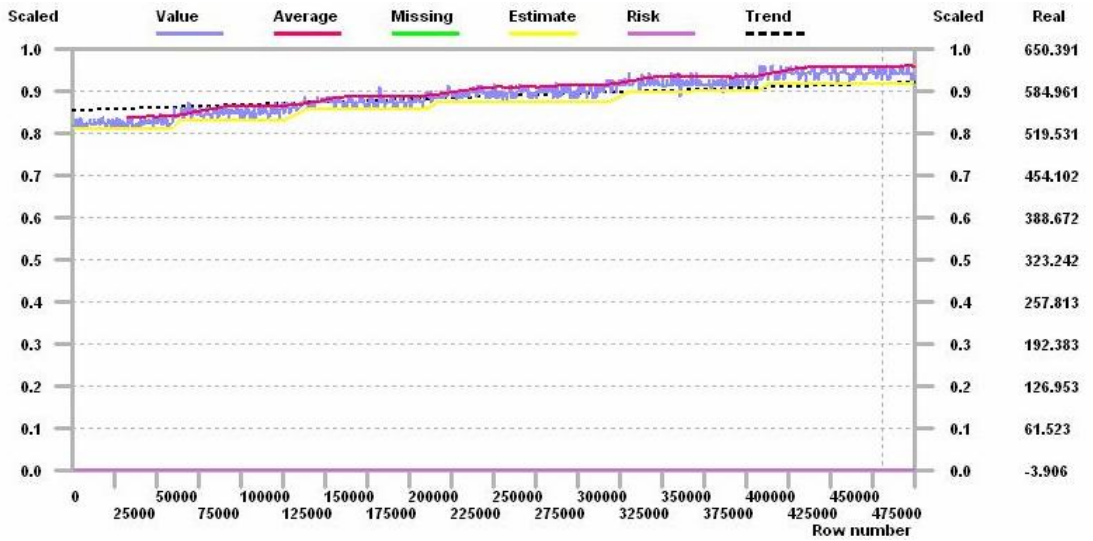
Şekil 6.7 15Hz-17Hz aralığında RPM grafiği

Tablo 6.2 15Hz 17,5Hz aralığında rotor hızı kestirim sonuçları

Örnek Numarası	Referans Hz	Referans RPM	Ölçülen RPM	Kestirilen RPM	HATA
1	15	448,8	457,03	455,66	1,37
2	15	448,8	456,05	455,75	0,3
126874	15,5	463,76	468,75	469,56	-0,81
126875	15,5	463,76	474,6	470,74	3,86
197885	16	478,72	487,3	483,79	3,51
197886	16	478,72	480,46	482,91	-2,45
205466	16,5	493,68	488,28	491,53	-3,25
205466	16,5	493,68	494,14	491,88	2,26
370206	17	508,64	505,85	507,67	-1,82
370207	17	508,64	511,71	507,66	4,05
569997	17,5	523,6	533,2	526,76	6,44
569998	17,5	523,6	527,34	525,98	1,36

6.2.3 17,5Hz-20Hz aralığında kestirim sonuçları

Bu deneyde asenkron motor inverter ile 17,5Hz den başlayarak sürülmüştür. Veri alma işlemi bu aşamada başlatılmıştır. Motor 17,5Hz de bir süre sürüldükten sonra frekans 18Hz'e çıkarılmıştır. Hızlanma rampası sona erip 18Hz'e ulaşılmış ve daha sonra frekans 18,5Hz'e çıkarılmıştır. Bu işlemler tekrar edilerek en son 20 Hz de işlem sona erdirilmiştir. Bu deneyde alınan verilere ait grafikler daha önce verilmişti. Bu bölümde alınmış verilerin YSA ile kestirilen veri ile aralarındaki ilişkilere bakılacaktır. Saniyede 20bin veri aldığımız deney setinde bu deneye ilişkin 569 bin 998 veri mevcut. Aşağıdaki tabloda örnek numaraları, o andaki dönüş hızı ve kestirim sonucunda oluşan dönüş hızı gösterilmiştir. Tablo oluşturulurken ardışık iki örnek numarası kullanılmıştır.



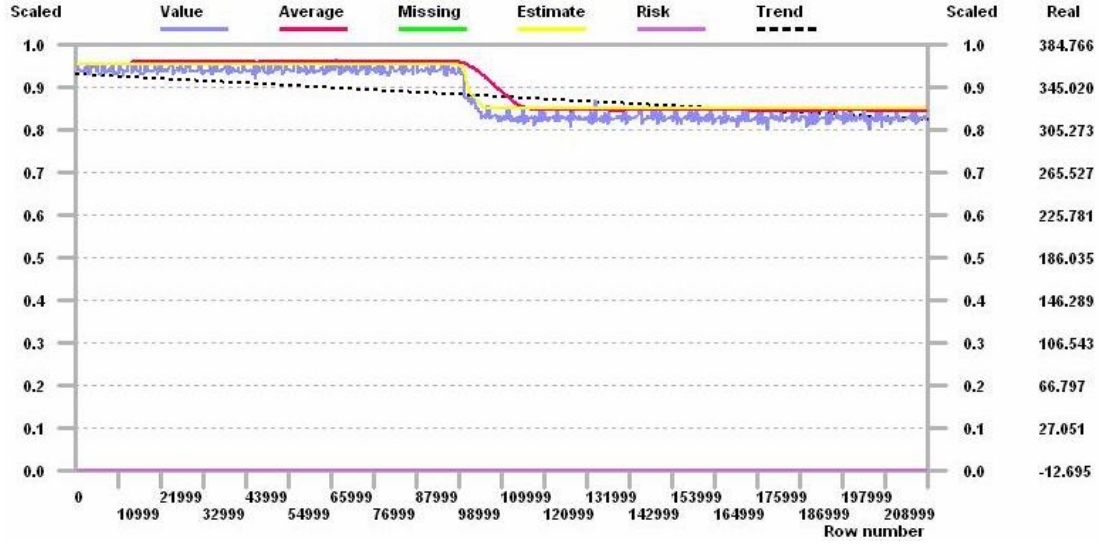
Şekil 6.8 17,5Hz-20Hz aralığında RPM grafiği

Tablo 6.3 17,5Hz - 20Hz aralığında rotor hızı kestirim sonuçları

Örnek Numarası	Referans Hz	Referans RPM	Ölçülen RPM	Kestirilen RPM	HATA
1	17,5	523,6	528,32	525,88	2,44
2	17,5	523,6	532,22	526,15	6,07
62288	18	538,56	541,2	536,7	4,50
62289	18	538,56	546,87	537,13	9,74
133721	18,5	553,52	555,66	549,67	5,99
133722	18,5	553,52	566,4	550,32	16,08
205466	19	568,48	564,45	563,55	0,90
205467	19	568,48	573,24	564,19	9,05
289868	19,5	583,44	580,07	578,56	1,51
289869	19,5	583,44	591,79	579,29	12,50
480882	20	598,4	601,56	595,36	6,20
480883	20	598,4	611,78	596,27	15,51

6.2.4 355RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları

Bu deneyde asenkron motor inverter ile 12Hz'de sürekli olarak sürülmüştür. Deney esnasında inverter üzerinde herhangi bir hız değişikliği yapılmamıştır. Veri alma işlemi başlatılmış yaklaşık 5sn. sonrada asenkron motor şaftına bağlı olan DC motorun uyarım sargıları rezistans ile yüklenmiştir. Motor yüklü halde iken 5sn. daha çalıştırılmış ve deney sona erdirilmiştir. Bu deneyde alınan verilere ait grafikler daha önce verilmişti. Bu bölümde alınmış verilerin YSA ile kestirilen veri ile aralarındaki ilişkilere bakılacaktır. Saniyede 20bin veri aldığımız deney setinde bu deneye ilişkin 219 bin 998 veri mevcut. Aşağıdaki tabloda örnek numaraları, o andaki dönüş hızı ve kestirim sonucunda oluşan dönüş hızı gösterilmiştir. Tablo oluşturulurken ardışık iki örnek numarası kullanılmıştır.



Şekil 6.9 355 RPM’de yüksüz ve yüklü olarak yapılan kestirim

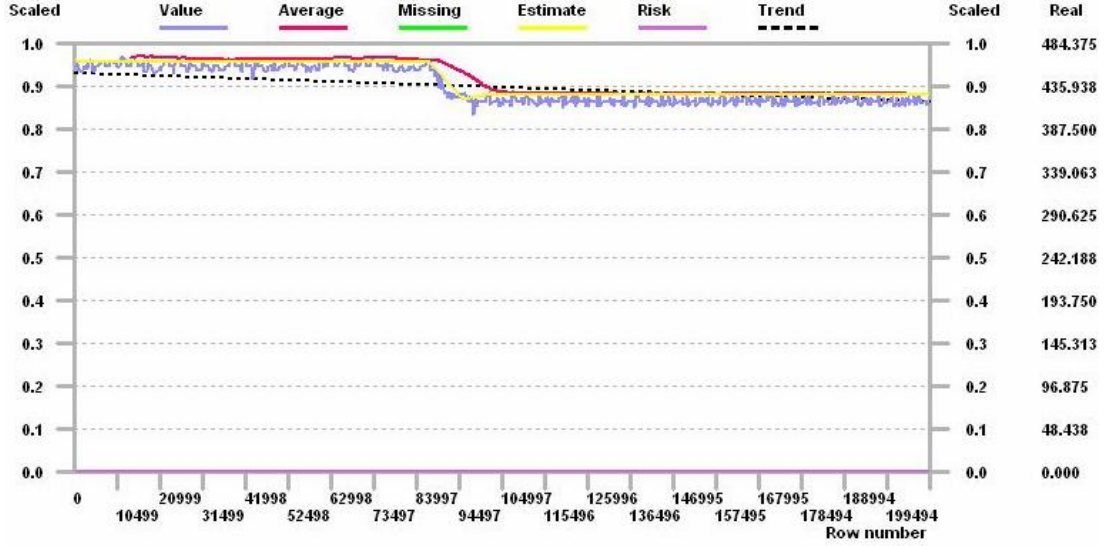
Tablo 6.4 355RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları

Örnek Numarası	Referans Hz	Referans RPM	Ölçülen RPM	Kestirilen RPM	HATA
1	12	359,04	366,21	364,69	1,52
2	12	359,04	356,44	364,17	-7,73
54090	12	359,04	359,37	364,2	-4,83
54091	12	359,04	357,42	364,05	-6,63
126807	12	359,04	318,35	327,39	-9,04
126807	12	359,04	315,42	327,1	-11,68
219997	12	359,04	320,31	327,43	-7,12
219998	12	359,04	321,28	327,4	-6,12

6.2.5 455RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları

Bu deneyde asenkron motor inverter ile 15Hz’de sürekli olarak sürülmüştür. Deney esnasında inverter üzerinde herhangi bir hız değişikliği yapılmamıştır. Veri alma işlemi başlatılmış yaklaşık 5sn. sonrada asenkron motor şaftına bağlı olan DC motorun uyarım sargıları rezistans ile yüklenmiştir. Motor yüklü halde iken 5sn. daha çalıştırılmış ve deney sona erdirilmiştir. Bu deneyde alınan datalara ait grafikler daha önce verilmişti. Bu bölümde alınmış dataların YSA ile kestirilen data ile aralarındaki ilişkilere bakacağız. Saniyede 20bin veri aldığımız deney setinde bu deneye ilişkin 209 bin 993 veri mevcut. Aşağıdaki tabloda örnek numaraları, o

andaki dönüş hızı ve kestirim sonucunda oluşan dönüş hızı gösterilmiştir. Tablo oluşturulurken ardışık iki örnek numarası kullanılmıştır.



Şekil 6.10 455 RPM’de yüksüz ve yüklü olarak yapılan kestirim

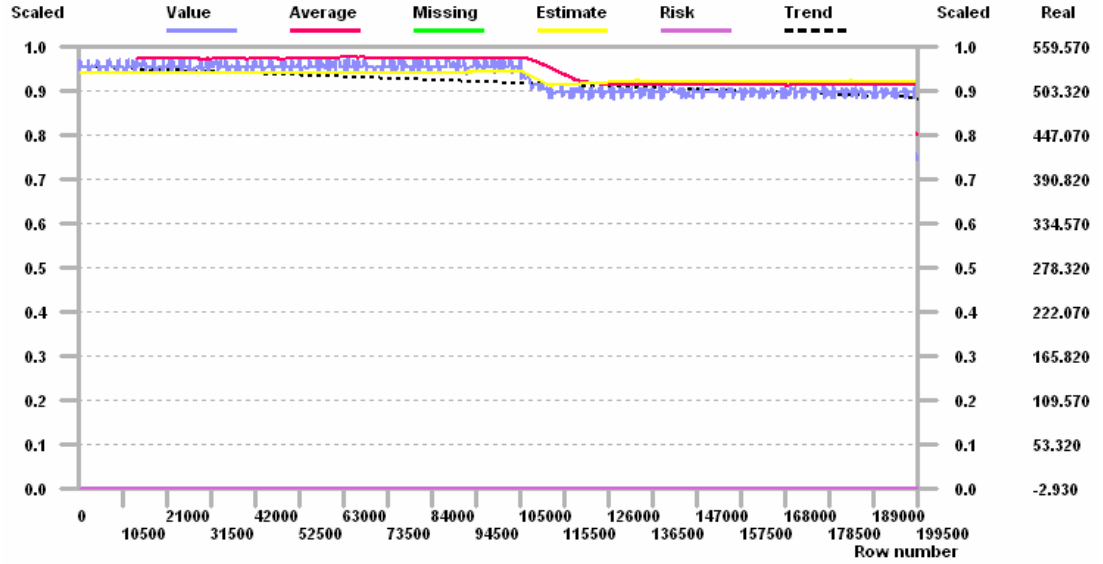
Tablo 6.5 355RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları

Örnek Numarası	Referans Hz	Referans RPM	Ölçülen RPM	Kestirilen RPM	HATA
3	15	448,8	459,96	460,87	-0,91
4	15	448,8	453,12	460,55	-7,43
54088	15	448,8	452,14	460,6	-8,46
54089	15	448,8	461,91	460,79	1,12
126807	15	448,8	417,96	425,16	-7,20
126807	15	448,8	416,99	424,75	-7,76
209991	15	448,8	413,08	424,28	-11,20
209992	15	448,8	414,06	424,59	-10,53

6.2.5 535RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları

Bu deneyde asenkron motor inverter ile 18Hz’de sürekli olarak sürülmüştür. Deney esnasında inverter üzerinde herhangi bir hız değişikliği yapılmamıştır. Veri alma işlemi başlatılmış yaklaşık 5sn. sonrada asenkron motor şaftına bağlı olan DC motorun uyarım sargıları rezistans ile yüklenmiştir. Motor yüklü halde iken 5sn. daha çalıştırılmış ve deney sona erdirilmiştir. Bu deneyde alınan datalara ait grafikler

daha önce verilmişti. Bu bölümde alınmış dataların YSA ile kestirilen data ile aralarındaki ilişkilere bakacağız. Saniyede 20bin veri aldığımız deney setinde bu deneye ilişkin 199 bin 998 veri mevcut. Aşağıdaki tabloda örnek numaraları, o andaki dönüş hızı ve kestirim sonucunda oluşan dönüş hızı gösterilmiştir. Tablo oluşturulurken ardışık iki örnek numarası kullanılmıştır.



Şekil 6.11 535 RPM’de yüksüz ve yüklü olarak yapılan kestirim

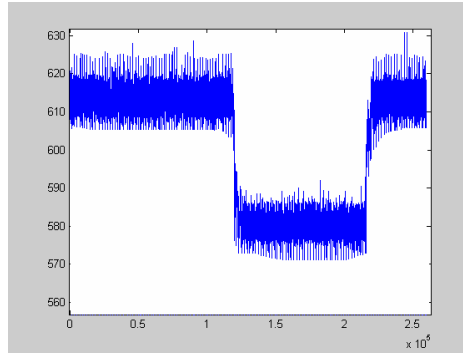
Tablo 6.6 535RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları

Örnek Numarası	Referans Hz	Referans RPM	Ölçülen RPM	Kestirilen RPM	HATA
1	18	538,56	529,29	525,98	3,31
2	18	538,56	540,03	527,76	12,27
54764	18	538,56	529,29	525,54	3,75
54619	18	538,56	541,01	527,9	13,11
126262	18	538,56	500,97	514,51	-13,54
125180	18	538,56	506,83	515,17	-8,34
199996	18	538,56	507,81	514,78	-6,97
199997	18	538,56	500	514,59	-14,59

6.2.6 613RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları

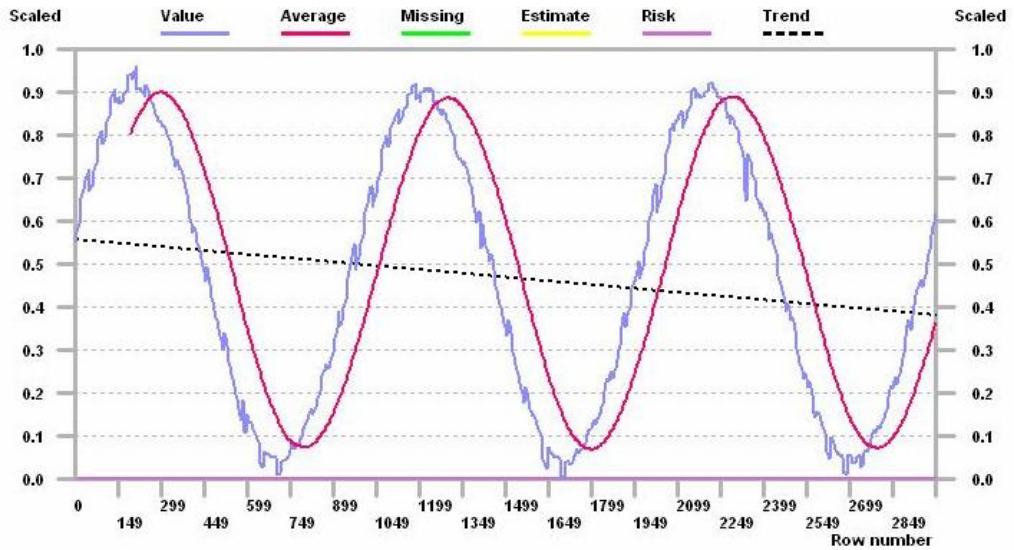
Bu testte 12,5 sn. boyunca datalar toplanmıştır. Saniyede 20bin örnek alınmış 12,5sn. de 250bin örnek alınmıştır. Test sırasında önce motor yüksüz olarak çalıştırılmış daha sonra yüklenmiş daha sonra tekrar yüksüz duruma getirilmiştir.

Aşağıda bu test ile ilgili RPM değişim grafiği verilmiştir.

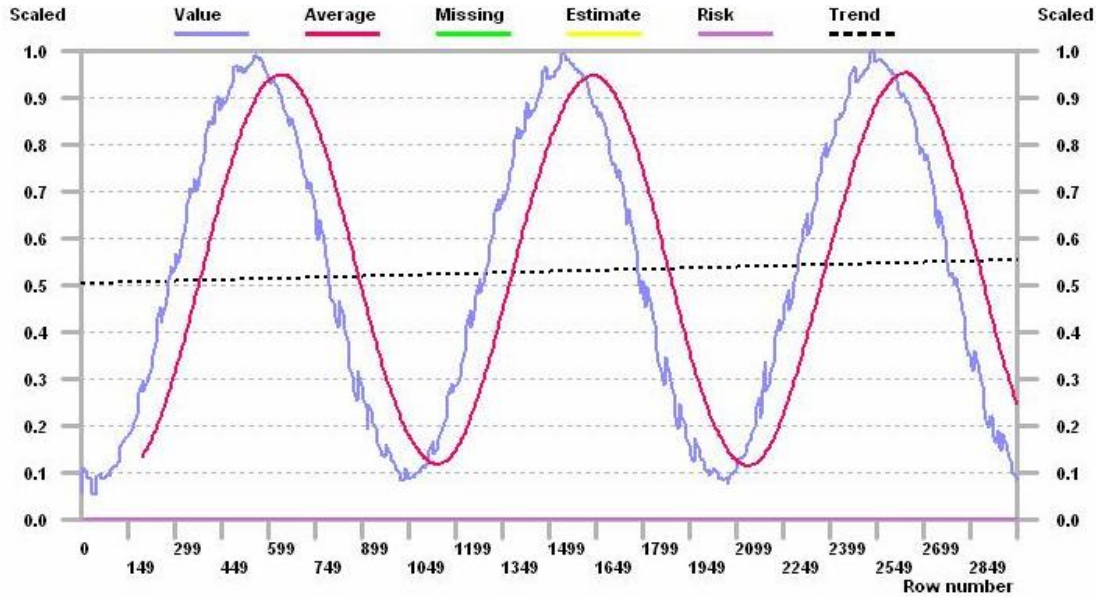


Şekil 6.12 613 RPM’de yüksüz ve yüklü olarak yapılan deneyin RPM grafiği

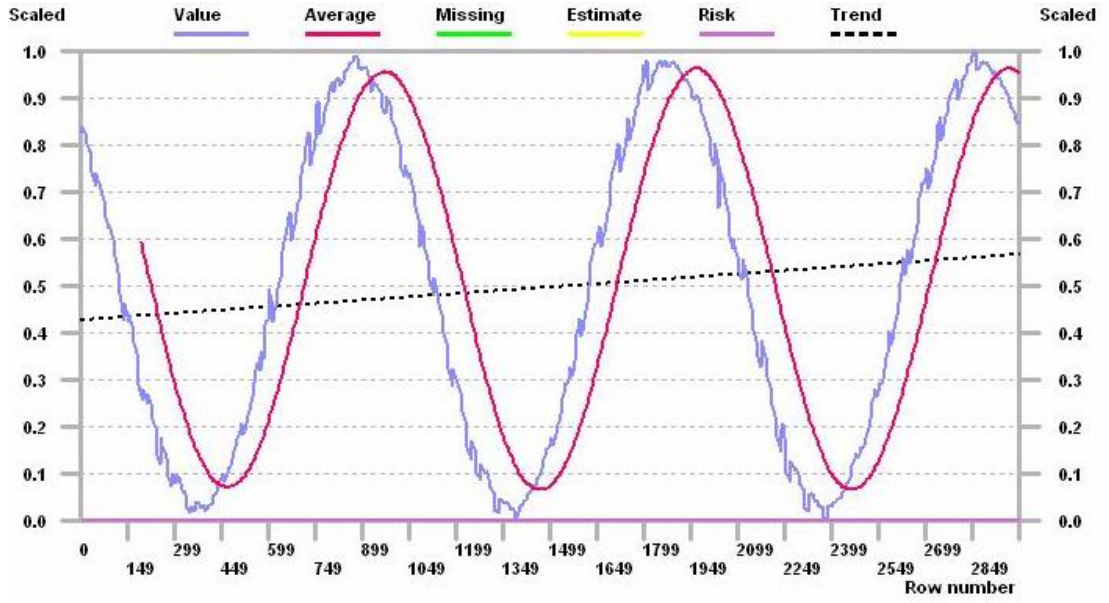
3000 örnek için ($3000/20000= 0,15\text{sn.} = 150\text{ms.}$) akım ve gerilim sinyallerinin değişimleri aşağıda verilmiştir;



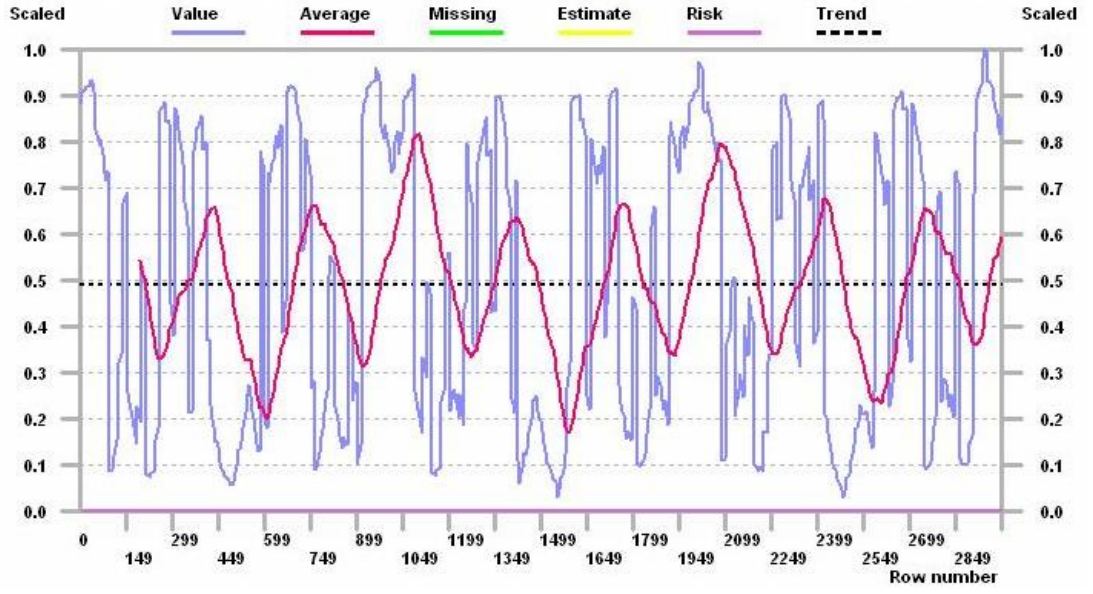
Şekil 6.13 1.fazın akım grafiği (3000 örn. , 150ms.)



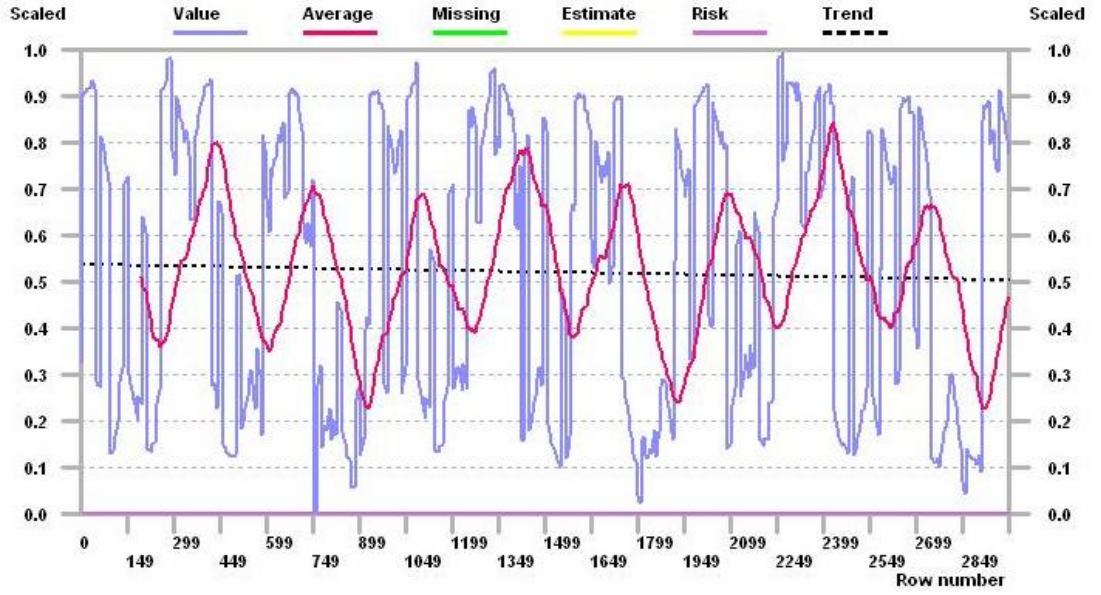
Şekil 6.14 2.fazın akım grafiği (3000 örn. , 150ms.)



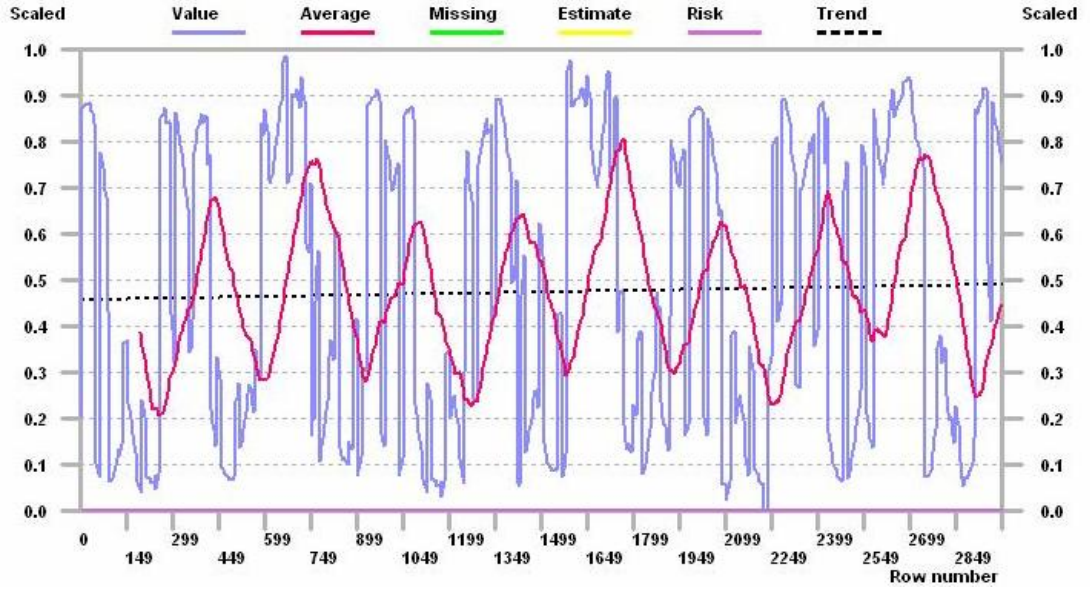
Şekil 6.15 3. fazın akım grafiği (3000 örn. , 150ms.)



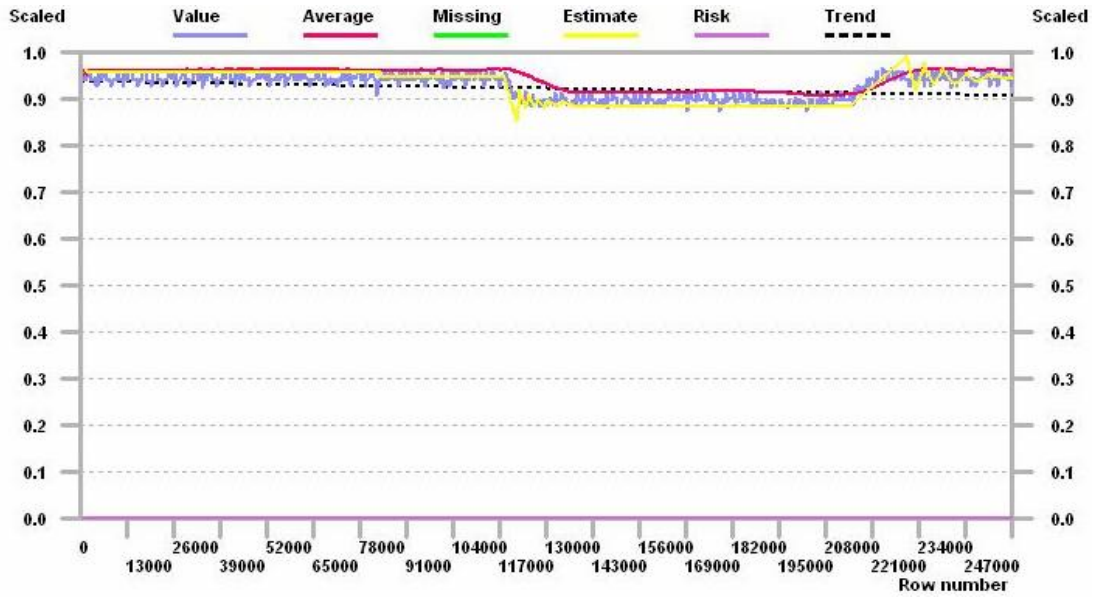
Şekil 6.16 1. fazın gerilim grafiği (3000 örn. , 150ms.)



Şekil 6.17 2. fazın gerilim grafiği (3000 örn. , 150ms.)



Şekil 6.18 3. fazın gerilim grafiği (3000 örn. , 150ms.)



Şekil 6.19 613 RPM yüksüz-yüklü-yüksüz olarak yapılan kestirim

Tablo 6.7 613RPM hızında yüksüz ve yük ile yapılan kestirim sonuçları

Örnek Numarası	Referans Hz	Referans RPM	Ölçülen RPM	Kestirilen RPM	HATA
1	20,5	613,36	609,38	608,47	0,91
2	20,5	613,36	621,12	608,98	12,14
54618	20,5	613,36	601,56	607,75	-6,19
54619	20,5	613,36	602,54	608,13	-5,59
125180	20,5	613,36	582,04	568,28	13,76
125180	20,5	613,36	581,06	568,28	12,78
186566	20,5	613,36	574,22	567,41	6,81
186567	20,5	613,36	590,82	567,79	23,03
239997	20,5	613,36	610,36	608,5	1,86
239998	20,5	613,36	616,22	608,52	7,70

7. SONUÇ

Bu tezde asenkron motorun rotor hızının hız sensörü olmaksızın kestirilmesine yönelik detaylı çalışma aktarılmıştır. Rotor hızı kestirimi için Yapay Sinir Ağları kullanılmış, sistem simülasyon ortamında gerçek verilerle gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yüksüz durum ile ilgili çalışmaların yanı sıra yüklü durumlarla ilgili çalışmalarda yapılmıştır. Geçen yirmi yıldır vektör kontrollü sürücüler üzerine oldukça yoğun çalışmalar yapılmıştır[9,11,13,23]. Önceleri kapalı çevrim ile yapılan kontroller son zamanlarda sensörsüz vektör kontrolü ile rahatlıkla yapılabilmektedir. Sensörsüz vektör kontrolünde autotuning yapılarak motor parametreleri ölçülür ve kestirim motor parametrelerine göre matematiksel model üzerinden yapılır. Bundan sonraki çalışmalar için ise Intelligent Sensorless Vector Control adı altında yeni bir kontrol yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu kontrol sisteminde motor dirençlerinin ölçülmesine gerek olmadığı gibi autotuning işlemine de gerek duyulmamaktadır. Yapılan yapay sinir ağı kestirim düzeneği inverter içerisine yerleştirildiğinde 3 faz gerilimi ayrı ayrı ölçmeye gerek olmayıp, sadece DC hat voltajı ölçülerek kestirim işlemi gerçekleştirilebilir. Ayrıca Yapay sinir ağları ile asenkron motorlar ile ilgili bir diğer çalışmada sistem arızalarının tespiti için yapılmaktadır. Örneğin bir pompa motor çiftinde motor uçlarına giden akım ve gerilimler ölçülerek, öğrenme algoritması ile belli bir süre YSA eğitilmekte daha sonra pompa motor çiftinde meydana gelebilecek arızalar ile ilgili önceden bilgi verilmektedir(rulman arızası,yatak arızası,motor arızası v.b.).

Yapılan deneyler sonucunda asenkron motorun rotor hızının YSA ile yüksek doğrulukta kestirim edilebildiği görülmüştür.

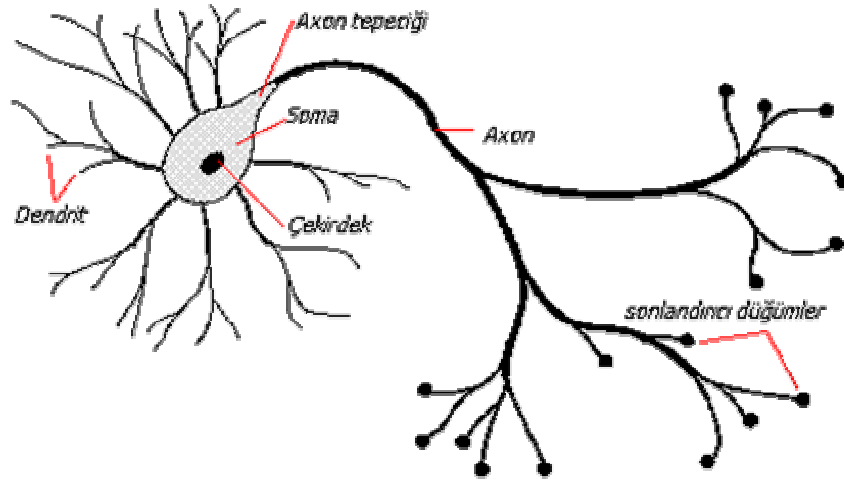
KAYNAKLAR

- [1] İlhami ÇETİN, W.Scuisky. “Elektrik Motörleri” 1. Kısım. *İstanbul 1987*
- [2] Aiello, M., Cataliotti, A., & Nuccio, S. (2002). “A fully-automated procedure for measuring the electrical parameters of an induction motor drive with rotor at standstill”. *In Proceedings of 2002 IEEEIAS annual meeting* (pp. 681–685).
- [3] Barrero, F., Perez, J., Millan, R., & Franquelo, L. G. (1999). “Selfcommissioning for voltage-referenced voltage-fed vector controlled induction motor drives”. *In Proceedings of 1999 IEEE-IECON’99 annual meeting* (pp. 1033–1038).
- [4] Belini, A., Figalli, G., & Cava, L. (1985). “A discrete feedback suboptimal control for induction motor drives”. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 422–428.
- [5] Buja, G. S., Menis, R., & Valla, M. I. (2000). “MRAS identification of the induction motor parameters in PWM inverter drives at standstill”. *In Proceedings of 2000 IEEE-IECON annual meeting* (pp. 1041–1047).
- [6] Couto, E. B., & Aguiar, M. L. (1998). “Parameter identification of induction motors using DC step excitation at standstill”. *ISIE ’98, Proceedings of the IEEE international symposium* (pp. 468–471).
- [7] Ioannou, P. A., & Sun, J. (1996).” Robust adaptive control”. *Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Press.*
- [8] Karayaka, H. B., Marwali, M. N., & Keyhani, A. (1997). “Induction machine parameter tracking from test data via PWM inverters”. *In Proceedings of 1997 IEEE-IAS annual meetings* (pp. 227–233).
- [9] Khambadkone, A. M., & Holtz, J. (1991). “Vector-controlled induction motor drive with a self-commissioning scheme”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 38(3), 322–327.
- [10] Michalik, W., & Devices, W. (1998). “Standstill estimation of electrical parameters in motors with optimal input signals”. *In Proceedings of 1998 IEEE circuits and systems* (pp. 407–413).
- [11] Kim, Y.-R., S.-K. Sul, M.-H. Park (1994), "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor using Extended Kalman Filter", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 5, September/October 1994, pp. 1225-1233.

- [12] Moon, S. I., & Keykani, A. (1994). "Estimation of induction machine parameters from standstill time-domain data". *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 30(6), 1609–1615.
- [13] Novotny, D. W., & Lipo, T. A. (1996). "Vector control and dynamics of AC drives". *New York: Oxford Press*.
- [14] Peixoto, Z. M. A., & Seixas, P. F. (2000). "Electrical parameter estimation considering the saturation effects in induction machines". *In Proceedings of 2000 IEEE-PESC annual meeting* (pp. 1563–1568).
- [15] S.Haykin, "Neural Networks a Compressive Foundation". *IEEE Press*, New York, 1994.
- [16] Rasmussen, H., Knudsen, M., & Tonnes, M. (1996). "Parameter estimation of inverter and motor model at standstill using measured currents only". *In Proceedings of ISIE '96* (pp. 331–336).
- [17] Benchaib, A., Rachid, A., Auderzet, E., Tadjine, M., "Real-time sliding-mode observer and control of an induction motor", *IEEE Transaction on Industry Applications*, 46, 128-138, (1999).
- [18] Sastry, S., & Bodson, M. (1989). "Adaptive control: stability, convergence and robustness". *Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Press*.
- [19] Vas, P. (1993). "Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines". *New York: Oxford Science Publications*.
- [20] Sugimoto, H., S. Tamai (1987), "Secondary Resistance Identification of an Induction Motor Applied Model Reference Adaptive System and its Characteristics", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-23, no. 2, March/April 1987, pp. 296-303.
- [21] Vas, P. (1996). "Vector control of AC machines". *Oxford: Clarendon Press*.
- [22] Willis, J. R., Brook, G. J., & Edmonds, J. S. (1989). "Derivation of induction motor models from standstill frequency responses test". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 4(4), 608–615.
- [23] Tajima, H., Y. Hori (1993), "Speed Sensorless Field-Orientation Control of the Induction Machine", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 1, January/February 1993, pp. 175-180.
- [24] Alberto Del Angel, ,Mevludin Glavic,Louis Wehenkel "Using Artificial Neural Networks to Estimate Rotor Angles and Speeds from Phasor Measurements", University of Liège/*BELGIUM*
- [25] Paul.C.Krause, Oleg Wasynczuk and Scott D. Sudhoff, "Analysis of Electric Machinery", *IEEE Press*, 1994, ch. 3-4.

EK.A YAPAY SİNİR AĞLARI

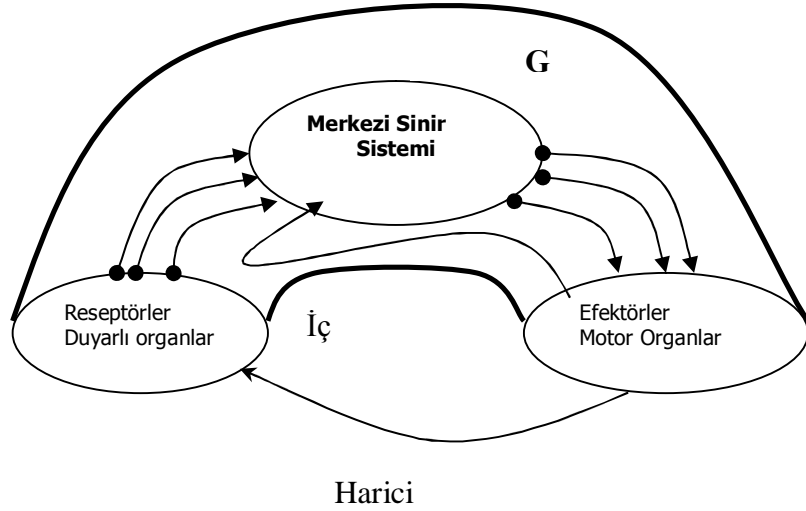
Biyolojik sinir ağının temel inşa bloğu olan basit bir sinir hücresi nöron olarak adlandırılır. Aşağıdaki şekilde şematik diyagramı gösterilen tipik sinir hücresi üç ana bölümden oluşur. Soma olarak adlandırılan hücre gövdesi, akson ve dendritler. Dendritler dendritik ağaç biçimindedir, nöron gövdesi civarında uzun çalılar görünümündedirler. Dendritler üzerinden girişler alınır, soma tarafından girişler işlenir. Nörondaki sinyalleri taşıyan uzun bir sinirsel bağlantı halindeki akson ise, işlenen girişleri çıkışa aktarır. Akson dendrit bağlantısı ise synapse olarak adlandırılır. Synapse nöronlar arasında elektrokimyasal bağlantıyı sağlamaktadır.



Şekil A.1 Basit bir sinir hücresi

Bir insanın beyin korteksinde yaklaşık 10 milyar nöron ve yaklaşık 60 trilyon synapse veya bağlantının bulunduğu tahmin edilmektedir. Sonuçta beyin son derece verimli bir yapıdır. Özellikle beyin enerjik verimliliği, her saniyede her bir işlem için yaklaşık 10^{-16} joule'dur, bu değer bugünün en iyi bilgisayarlarında yaklaşık 10^{-6} joule'dur. Beyin son derece kompleks, doğrusal olmayan ve paralel bir bilgisayardır. Beynin nöronları organize etme yeteneği böylece kesin hesaplamaları

gerçekleştirmesi (örüntü tanıma, algılama gibi) bugünün en hızlı sayısal bilgisayarlarından daha hızlıdır. Diğer taraftan bir sinir hücresinin tepki hızı günümüzün bilgisayarlarına göre oldukça yavaş olmakla birlikte duyusal bilgileri son derecede hızlı değerlendirebilmektedir. Bu nedenle insan beyni; öğrenme, birleştirme, uyarılma ve genelleştirme yeteneği nedeniyle son derece karmaşık, doğrusal olmayan ve paralel dağılmış bir bilgi işleme sistemi olarak tanımlanabilir. Bir hipoteze göre nöronlar birbirleriyle elektriksel sinyaller aracılığıyla haberleşmektedir. Ayrıca, nöronlar kimyasal bir ortamda çok yoğun beyinsel faaliyetleri yerine getirmektedirler. Böylece beyni, biyokimyasal işlemlerin gerçekleştiği son derece yoğun bir elektriksel ağ gibi düşünebilir. Çok büyük sinir ağı çok karmaşık ve ayrıntılı bir yapıyla bir birine bağlıdır. Ağa giriş duyarlı algılayıcılar (reseptörler) ile sağlanır. Reseptörler uyarıyı gövdeye götürürler. Uyarım elektriksel sinyaller biçimindedir. Nöron ağının içine bilgi taşınması ve merkezi sinir sisteminde bilginin işlenmesi sonucu efektörler kontrol edilir. Bundan sonra insan cevabını çeşitli eylemler şeklinde verir. yukarıda belirtildiği gibi sinir sisteminde bilgi akışı üç ana kısımda oluşmaktadır: reseptörler, sinir ağı ve efektörler. (Şekil A.2)



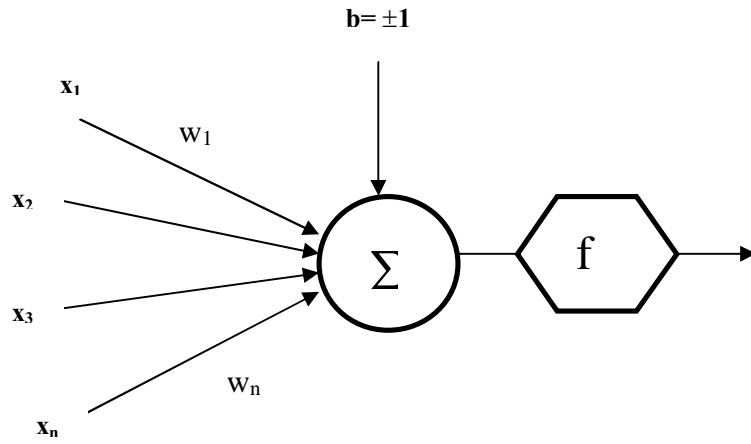
Şekil A.2. Sinir sisteminde bilgi akışı

Şekilde görüldüğü gibi bilgi işlenmekte, değerlendirilmekte ve merkezi sinir sisteminde depolanan bilgiyle karşılaştırılmaktadır. Gerekli olduğunda komutlar o yerde üretilir ve motor organlara iletilir. Motor organlar eylemi doğrulayan geri

beslemeli bağlantılarla merkezi sinir sistemini yönetir ve denetlerler. İç ve dış geri beslemeli kontrolün ikisi de komutlarla gerçekleştirilir. Görüldüğü tüm sinir sisteminin yapısı kapalı-çevrim bir kontrol sistemini andırmaktadır.

A.1. Yapay Sinir Ağı Hücresi

Temel bir yapay sinir ağı hücresi biyolojik sinir hücresine göre çok daha basit bir yapıya sahiptir. En temel nöron modeli aşağıdaki şekilde görülmektedir. Yapay sinir ağı hücresinde temel olarak dış ortamdaki ya da diğer nöronlardan alınan veriler yani girişler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıkışlar bulunmaktadır. Dış ortamdaki veri ağırlıklar aracılığıyla nörona bağlanır ve bu ağırlıklar ilgili girişin etkisini belirler. Toplam fonksiyonu ise net girişi hesaplar, net giriş, girişlerle bu girişlerle ilgili ağırlıkların çarpımının bir sonucudur. Aktivasyon fonksiyonu işlem süresince net çıkışını hesaplar ve bu işlem aynı zamanda nöron çıkışını verir. Genelde aktivasyon fonksiyonu doğrusal olmayan (nonlineer) bir fonksiyondur. Şekilde görülen b bir sabittir, bias veya aktivasyon fonksiyonunun eşik değeri olarak adlandırılır. Nöronun matematiksel modeli şöyledir.



Şekil A.3 Temel yapay sinir ağı hücresi.

$$\text{Çıkış, } o = f(W.X + b)$$

şeklinde nöron çıkışı hesaplanır. Buradaki W ağırlıklar matrisi, X ise girişler matrisidir. n giriş sayısı olmak üzere;

$$W = w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$$

$$X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

Şeklinde yazılabilir. Formalize edersek;

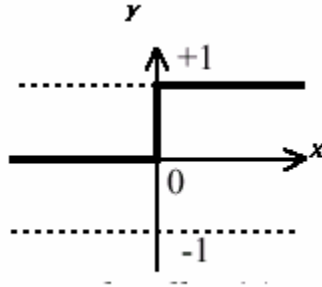
$$net = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b \text{ ve } o = f(net)$$

$$o = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \text{ şeklinde de yazılabilir.}$$

Yukarıdaki formülde görülen f aktivasyon fonksiyonudur. Genelde nonlinear olan aktivasyon fonksiyonunun çeşitli tipleri vardır.

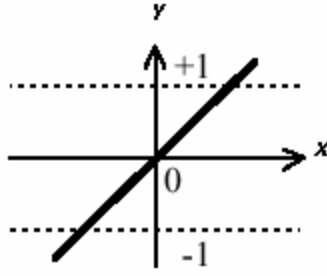
A.2. Aktivasyon Fonksiyonları

Aşağıdaki şekilde eşik aktivasyon fonksiyonunun grafiği görülmektedir. Eşik aktivasyon fonksiyonu eğer net değeri sıfırdan küçükse sıfır, sıfırdan daha büyük bir değer ise net çıkışında $+1$ değeri verir. Eşik aktivasyon fonksiyonunun -1 ile $+1$ arasında değişeni ise signum aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılır. Signum aktivasyon fonksiyonu, net giriş değeri sıfırdan büyükse $+1$, sıfırdan küçükse -1 , sıfıra eşitse sıfır değerini verir.



Şekil A.4 Eşik aktivasyon fonksiyonu.

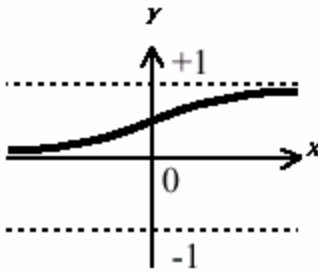
Aşağıdaki şekilde doğrusal aktivasyon fonksiyonu görülmektedir. Lineer aktivasyon fonksiyonunun çıkışı girişine eşittir. Sürekli çıkışlar gerektiği zaman çıkış katmanındaki aktivasyon fonksiyonunun lineer aktivasyon fonksiyonu olabildiğine dikkat edilmelidir.



Şekil A.5 Doğrusal aktivasyon fonksiyonu

$f(x) = x$ şeklinde ifade edilir.

Aşağıdaki şekilde logaritma sigmoid transfer fonksiyonu görülmektedir. Lojistik fonksiyon olarak da adlandırılmaktadır. Bu fonksiyonunun lineer olmamasından dolayı türevi alınabilmektedir böylece daha sonraki bölümlerde görülecek olan geri yayınlımlı ağlarda kullanmak mümkün olabilmektedir.



Şekil A.6 Logaritma Sigmoid aktivasyon fonksiyonu.

Lojistik fonksiyonu,

$$f(x) = \text{lojistik}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta x)}$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki β eğim sabiti olup genelde bir olarak seçilmektedir. Diğer bir aktivasyon fonksiyonu olan hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu da lineer olmayan türevi alınabilir bir fonksiyondur. +1 ile -1 arasında çıkış değerleri

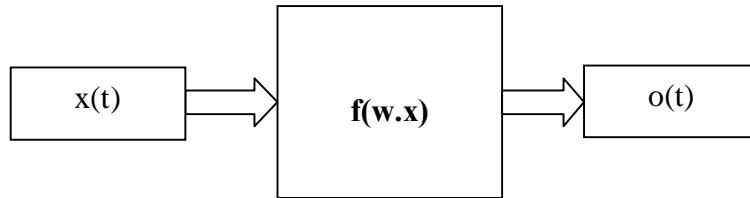
üreten bu fonksiyon lojistik fonksiyona benzemektedir. Denklemini aşağıda görüldüğü gibidir.

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Bu aktivasyon fonksiyonlarından başka fonksiyonlar da vardır. Yapay sinir ağına hangi aktivasyon fonksiyonunun kullanılacağı probleme bağlı olarak değişmektedir. Yukarıda verilen fonksiyonlar en genel aktivasyon fonksiyonlarıdır.

A.3. Yapay Sinir Ağları Modelleri

En basit ve en genel yapay sinir ağları tek yönlü sinyal akışını kullanırlar. Yapay sinir ağı modelleri temel olarak iki grupta toplanmaktadır. İleri beslemeli yapay sinir ağları ve geri beslemeli yapay sinir ağları. İleri beslemeli yapay sinir ağlarında gecikmeler yoktur, işlem girişlerden çıkışlara doğru ilerler. Çıkış değerleri öğreticiden alınan istenen çıkış değeriyle karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilerek ağı ağırlıkları güncellenir.

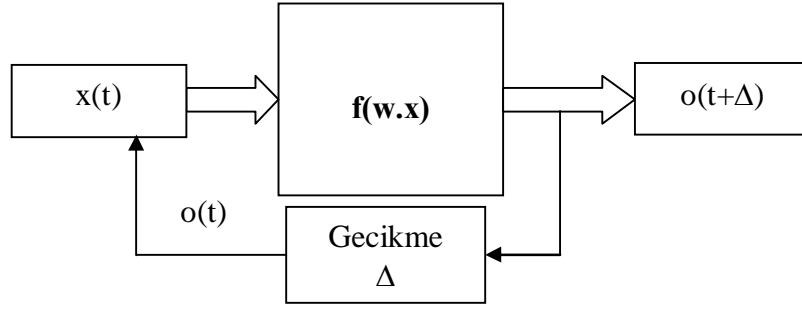


Şekil A.7 İleri Beslemeli Yapı

Geri beslemeli yapay sinir ağlarında ise tıpkı kontrol uygulamalarında olduğu gibi gecikmeler söz konusudur. Geri beslemeli nöral ağı, çıkışlar girişlere bağlanarak ileri beslemeli bir ağıdan elde edilir. Ağı t anındaki çıkışı $o(t)$ ise, $t + \Delta$ anındaki çıkışı ise $o(t + \Delta)$ 'dir. Buradaki Δ sabiti sembolik anlamda gecikme süresidir. İleri beslemeli yapay sinir ağları notasyonu kullanılarak $o(t + \Delta)$ şöyle yazılabilir.

$$o(t + \Delta) = f [W.o(t)]$$

bu formül aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir. Dikkat edilmesi gereken nokta başlangıç anında $x(t)$ 'ye ihtiyaç duyulmasıdır. Başlangıç anında $o(0) = x(0)$ 'dir.



Şekil A.8 Geri beslemeli yapı.

A.4. Yapay Sinir Ağlarının Eğitilmesi

İnsan beyni doğumdan sonraki gelişme sürecinde çevresinden duyu organlarıyla algıladığı davranışları yorumlar ve bu bilgileri diğer davranışlarında kullanır. Yaşadıkça beyin gelişir ve tecrübelenir. Artık olaylar karşısında nasıl tepki göstereceğini çoğu zaman bilmektedir. Fakat hiç karşılaşmadığı bir olay karşısında yine tecrübesiz kalabilir. Yapay sinir ağlarının öğrenme sürecinde de, tıpkı dış ortamdan gözle veya vücudun diğer organlarıyla uyarıların alınması gibi dış ortamdan girişler alınır, bu girişlerin beyin merkezine iletilerek burada değerlendirilip tepki verilmesi gibi yapay sinir ağında da aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek bir tepki çıkışı üretilir. Bu çıkış yine tecrübeyle verilen çıkışla karşılaştırılarak hata bulunur. Çeşitli öğrenme algoritmalarıyla hata azaltılıp gerçek çıkışa yaklaşılmaya çalışılır. Bu çalışma süresince yenilenen yapay sinir ağının ağırlıklarıdır. Ağırlıklar her bir çevrimde yenilenerek amaca ulaşmaya çalışılır. Amaca ulaşmanın veya yaklaşmanın ölçüsü de yine dışarıdan verilen bir değerdir. Eğer yapay sinir ağı verilen giriş-çıkış çiftleriyle amaca ulaşmış ise ağırlık değerleri saklanır. Ağırlıkların sürekli yenilenip istenilen sonuca ulaşılan kadar geçen zamana öğrenme adı verilir. Yapay sinir ağı öğrendikten sonra daha önce verilmeyen girişler verilip, sinir ağı çıkışıyla gerçek çıkışı yaklaşımı incelenir. Eğer yeni verilen örneklere de doğru yaklaşıyorsa sinir ağı işi öğrenmiş demektir. Sinir ağına verilen örnek sayısı optimum değerden fazla ise sinir ağı işi öğrenmemiş ezberlemiştir. Genelde eldeki örneklerin yüzde sekseni ağına verilip ağı eğitilir, daha sonra geri kalan

yüzde yirmilik kısım verilip ağın davranışı incelenir diğer bir deyişle ağ böylece test edilir.

A.5. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme Algoritmaları

1990'lı yıllardan bugüne gelinceye kadar birçok öğrenme algoritması geliştirilmiştir. Öğrenme algoritmaları temelde üç grupta toplanmaktadır. Eğitici öğrenme, eğitici öğrenme ve takviyeli öğrenme algoritmaları.

Eğitici (supervised) öğrenmede, her bir örnekleme zamanında giriş uygulandığında sistemin arzu edilen cevabı y eğitici tarafından sağlanır. Arzu edilen çıkış y ile sinir ağı çıkışı o arasındaki fark hata ölçüsüdür ve ağ parametrelerini güncellemekte kullanılır. Ağırlıkların güncellenmesi süresince eğitici ödüllendirme-cezalandırma şemasını ağa uygulayarak hatayı azaltır. Bu öğrenme modelinde giriş ve çıkış örnekleri kümesi eğitim kümesi olarak adlandırılır.

Eğitici öğrenmede, eğitici öğrenmedeki gibi arzu edilen y çıkışları bilinmemektedir. Bu yüzden kesin bir hata bilgisini ağın davranışını değiştirmekte kullanmak mümkün değildir. Cevabın doğruluğu veya yanlışlığı hakkında bilgi sahibi olunmadığı için öğrenme, girişlerin verdiği cevaplar gözlenerek başarıya ulaşılır. Aslında eğitici öğrenme demek doğru değildir, çünkü eğitici öğrenme gerçekte mümkün değildir. Eğitcinin her öğrenme adımında dahil olmamasına rağmen, amaçları ayarlamaktadır.

Takviyeli öğrenmede, ağın davranışının uygun olup olmadığını belirten bir öz yetenek bilgisine ihtiyaç duyulur. Bu bilgiye göre ağırlıklar ayarlanır. Gerçek zamanda öğrenme yöntemi olup deneme-yanılma esasına göre sinir ağı eğitilmektedir.

Birçok öğrenme algoritmasının bulunmasından dolayı bu kısımda sadece en popüler öğrenme algoritması olan Geri Yayınım Algoritması ve Levenberg-Marquardt öğrenme algoritmaları anlatılacaktır.

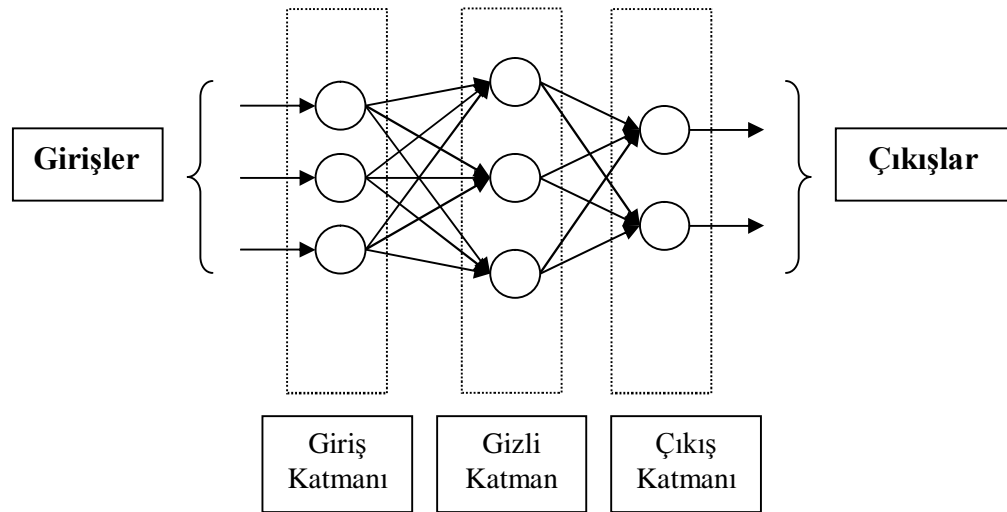
Geri yayılım algoritması eğitici öğrenmede kullanılan en genel algoritmadır. Basit olması ve iyi bir öğrenme kapasitesine sahip olması birçok alana uygulanmasını sağlamıştır.

A.5.1. Geri Yayılım Öğrenme Algoritması

Geri yayılım algoritması, sinir ağının eğitici sınıfına giren genel bir algoritmadır. Daha öncede belirtildiği gibi girişlerle çıkışlar arasındaki hata sinyali bulunarak, ağırlıklar bu hata sinyaliyle güncellenmektedir. Hata yani $e(k)$, arzu edilen çıkış (gerçek çıkış - $y(k)$) ile sinir ağının çıkışı ($o(k)$) arasındaki farktır.

$$e(k) = y(k) - o(k)$$

Aşağıdaki şekilde birçok sinir hücresinin bir birine bağlandığı ileri yönlü çok katmanlı bir yapay sinir ağı görülmektedir. Giriş katmanı ile çıkış katmanı arasındaki katman veya katmanlar gizli katman olarak adlandırılır. Sinir ağlarında kaç tane gizli katman kullanılacağı ve her bir gizli katmanda kaç nöron olacağı bugüne kadar belirlenememiştir, probleme göre değişen bu nitelikler deneme-yanılma yoluyla bulunur.



Şekil A.9 İleri beslemeli çok katmanlı sinir ağı.

Şekildeki çok katmanlı ağı düşünürsek;

k+1. katmanda i. birime net giriş;

$$n^{k+1}(i) = \sum_{j=1}^{S_k} w^{k+1}(i, j) o^k(j) + b^{k+1}(i) \quad (\text{A.1})$$

Birim i'nin çıkışı şöyle olacaktır.

$$o^{k+1}(i) = f^{k+1}(n^{k+1}(i)) \quad (\text{A.2})$$

M katmanlı bir ağı matris biçiminde ifade edilirse;

$$\underline{o}^0 = \underline{x} \quad (\text{A.3})$$

$$\underline{o}^{k+1} = f^{k+1}(W^{k+1} \underline{o}^k + \underline{b}^{k+1})$$

$$k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (\text{A.4})$$

Ağın temel görevi giriş-çıkış çiftleri arasındaki ilişkiyi öğrenmektir.

$$\{(\underline{x}_1, \underline{y}_1), (\underline{x}_2, \underline{y}_2), \dots, (\underline{x}_Q, \underline{y}_Q)\}$$

Ağın performansı şöyledir;

$$E = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q (\underline{y}_q - \underline{o}_q^M)^T (\underline{y}_q - \underline{o}_q^M) = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \underline{e}_q^T \underline{e}_q \quad (\text{A.5})$$

Buradaki \underline{o}_q^M , q. giriş (\underline{x}_q) olduğunda ağın çıkışıdır, $\underline{e}_q = \underline{y}_q - \underline{o}_q^M$ ise q.girişin

hatasıdır. Standart geri yayılım algoritması için yaklaşık adım düşümü algoritmasını kullanır. Performans indeksiyle şöyle yaklaşılır;

$$E = \frac{1}{2} \underline{e}_q^T \underline{e}_q \quad (\text{A.6})$$

burada toplam karelerin toplamı tek giriş-çıkış çifti için karesel hatayla yer değiştirilir. Yaklaşık adım (eğim) düşümü algoritması bundan sonra şöyle olur;

$$\Delta w^k(i, j) = -\alpha \frac{\partial E}{\partial w^k(i, j)} \quad (\text{A.7})$$

$$\Delta b^k(i) = -\alpha \frac{\partial E}{\partial b^k(i)} \quad (\text{A.8})$$

burada α öğrenme oranıdır, şöyle tanımlanır;

$$\delta^k(i) \equiv \frac{\partial E}{\partial n^k(i)} \quad (\text{A.9})$$

performans indeksinin duyarlılığı k.katmanda i. birimin net girişinde değiştirilir. Şimdi (1),(6) ve (9) kullanılarak,

$$\frac{\partial E}{\partial w^k(i,j)} = \frac{\partial E}{\partial n^k(i)} \frac{\partial n^k(i)}{\partial w^k(i,j)} = \delta^k(i) o^{k-1}(j) \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{\partial E}{\partial b^k(i)} = \frac{\partial E}{\partial n^k(i)} \frac{\partial n^k(i)}{\partial b^k(i)} = \delta^k(i) \quad (\text{A.11})$$

Hassaslık yeterliği aşağıdaki yinelemeli ilişkiyle de gösterilebilir.

$$\underline{\delta}^k = \underline{\dot{F}}^k(n^k) W^{k+1} \underline{\delta}^{k+1} \quad (\text{A.12})$$

burada;

$$\underline{\dot{F}}^k(n^k) = \begin{bmatrix} \dot{f}^k(n^k(1)) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dot{f}^k(n^k(2)) & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & \dot{f}^k(n^k(Sk)) \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

ve

$$f^k(n) = \frac{df^k(n)}{dn} \quad (\text{A.14})$$

$$\underline{\delta}^M = -\underline{\dot{F}}^M(n^M)(y_q - o_q) \quad (\text{A.15})$$

Tüm öğrenme algoritmalarında şu adımlar izlenir. İlk önce (A.3)-(A.4) kullanılarak giriş ileri yönde yayılır, sonra (A.15) ve (A.12) kullanılarak geri yayılır ve son olarak ağırlıklar ve denge (A.7), (A.8), (A.10) ve (A.11) kullanılarak güncellenir.

A.5.2. Levenberg- Marquardt Algoritması

Geri yayılım algoritması (GYA) çok kullanılmasına rağmen bazı dezavantajları bulunmaktadır. GYA sonuca çok yavaş olarak yaklaşmaktadır. Ayrıca lokal minimuma yakalanma riski de vardır. Geri yayılım, bir adım düşme algoritmasıyken, Levenberg -Marquardt (LM) algoritması Newton metoduna bir yaklaşımdır. LM algoritması, Newton metodunun hızıyla, adım düşme metodunun sağlamlığının bileşkesidir.

LM öğrenme algoritması minimumu araştırma metotlarının ikincisidir. Her bir iterasyon adımında hata yüzeyine parabolik yaklaşımla yaklaşılır ve parabolün minimumu o adım için çözümü oluşturur. $E(x)$ fonksiyonuna sahip olduğumuzu ve x parametresine göre minimize etmek istediğimizi düşünelim. Newton metodunda şöyle olacaktır.

$$\Delta \underline{x} = -[\nabla^2 E(\underline{x})]^{-1} \nabla E(\underline{x}) \quad (\text{A.16})$$

burada $\nabla^2 E(\underline{x})$ ifadesi Hessian matrisidir ve $\nabla E(\underline{x})$ ise eğimdir. $E(\underline{x})$ 'in karelerin toplamı fonksiyonu olduğunu farz edelim.

$$E(\underline{x}) = \sum_{i=1}^N e_i^2(\underline{x}) \quad (\text{A.17})$$

bundan sonra şöyle gösterilebilir.

$$\nabla E(\underline{x}) = J^T(\underline{x}) \underline{e}(\underline{x}) \quad (\text{A.18})$$

$$\nabla^2 E(\underline{x}) = J^T(\underline{x}) J(\underline{x}) + S(\underline{x}) \quad (\text{A.19})$$

burada $J(x)$ Jacobian matristir.

$$J(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1(\underline{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_1(\underline{x})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial e_2(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2(\underline{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_2(\underline{x})}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_N(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_N(\underline{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_N(\underline{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

ve

$$S(\underline{x}) = \sum_{i=1}^N e_i(\underline{x}) \nabla^2 e_i(\underline{x}) \quad (\text{A.21})$$

Gauss-Newton metodu için $S(\underline{x}) \approx 0$ kabul edilir ve (A.16) güncellenerek şu hale gelir.

$$\Delta \underline{x} = [J^T(\underline{x})J(\underline{x})]^{-1} J^T(\underline{x})e(\underline{x}) \quad (\text{A.22})$$

Levenberg-Marquardt modifikasyonu ile Gauss-Newton metodu şöyle olur.

$$\Delta \underline{x} = [J^T(\underline{x})J(\underline{x}) + \mu I]^{-1} J^T(\underline{x})e(\underline{x}) \quad (\text{A.23})$$

μ parametresi, bir adımda $E(\underline{x})$ artımı sonucunda bir faktörle (β) ile çarpılır, bir adım $E(\underline{x})$ azaltışında, μ parametresi β 'ya bölünür. μ büyükse algoritma adım düşümü ($1/\mu$ adımı ile) olur, küçük μ parametresi için algoritma Gauss-Newton olur.

Bu algoritmadaki anahtar adım Jacobian matrisinin hesaplanmasıdır. Yapay sinir ağı tasarım probleminde Jacobian matristeki terimler geri yayılım algoritmasının basitçe değiştirilmesiyle hesaplanabilir. Tasarım problemi için performans indeksi (A.5)'te verilmiştir. Bu, (A.17)'deki eşitlikte kolayca görülebilir. Burada $\underline{x} = [w^1(1,1)w^1(1,2)\dots w^1(S1,R)b^1(S1)w^2(1,1)\dots b^M(SM)]^T$ ve $N=Qx SM$. Standart geri yayılım algoritması terimleri şöyle hesaplanır;

$$\frac{\partial E}{\partial w^k(i,j)} = \frac{\partial \sum_{m=1}^{SM} e_q^2(m)}{\partial w^k(i,j)} \quad (\text{A.24})$$

Levenberg-Marquardt algoritması için Jacobian matrisin elemanları şöyle hesaplanabilir.

$$\frac{\partial e_q(m)}{\partial w^k(i, j)} \quad (\text{A.25})$$

bu terimler standart geri yayılım algoritması kullanılarak son katmanda bir değişiklik ile hesaplanabilir.

$$\Delta^M = -\dot{F}^M(\underline{n}^M) \quad (\text{A.26})$$

(A.26)'daki matrisin her bir kolonu bir vektördür, Jacobianın bir satırını üretmek için ağ geri yayımlıdır.

Sonuç olarak Levenberg-Marquardt algoritması çok hızlı olarak çözüme ulaşmasına rağmen çok fazla bellek gerektirmektedir. Geri yayılım algoritması ise sonuca yavaş ulaşmakta ve daha az bellek gerektirmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini tamamladıktan sonra 1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümüne başladı. 2003' de mezun oldu ve 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde Fen Bilimleri Enstitüsünden yüksek lisansa başladı. 2003 yılından bu yana ABC Enser Otomasyon ve Güvenlik teknolojileri A.Ş.'de Uygulama Mühendisi olarak çalışmaktadır. İstanbul'da ikamet etmektedir.