

126940

**KAFESLİ ASENKRON MOTORLARIN DİNAMİK ISIL
MODELİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Filiz GÜRGÖZE
Enstitü No:504011053**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Ocak 2003**

**Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. A.Faik MERGEN

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Emin TACER (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Oktay AYBAR (Y.T.Ü.)

ARALIK 2002

126940

ÖNSÖZ

Gerek eğitim, gerek meslek yaşantımda beklentilerimin ötesinde destek ve anlayış gördüğüm tez danışmanım A.Faik MERGEN'e çok teşekkür ediyorum.

Yıllardır her ihtiyaç duyduğumda, gereksindiğim yardımı bulacağımı bilmenin rahatlığıyla kapısını çaldığım Araş.Gör.Murat İmeryüz'e bir kere daha teşekkür borçluyum.

Burak Çatlı ve Gökhan Şimşek'e tüm yardımları için teşekkür etmek isterim. Burak Çatlı'ya en sıkıntılı anımda sunduğu donanım desteği ve Gökhan Şimşek'e deneysel çalışma sırasındaki büyük emeği için özellikle teşekkür ediyorum.

Aralık 2002

Filiz Gürgöze

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi

BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
----------------------	---

BÖLÜM 2. ASENKRON MOTORDA ISI AKTARIMI VE ISIL

MODELLER.....	7
2.1. Isı Aktarım Yolları	7
2.1.1. İletim.....	7
2.1.2. Konveksiyon	10
2.2. Isıl Modeller.....	11
2.2.1. Sayısal Alan Çözümüne Dayalı Modeller	11
2.2.2. Kabuk Modelleri	12
2.2.3. Toplu Parametrelili Modeller.....	13
2.3. Asenkron Motorun Toplu Parametrelili Modeli	13
2.3.1. Gövde.....	14
2.3.2. Stator Demiri.....	14
2.3.3. Stator Dişleri	14
2.3.4. Stator Sargısı	14
2.3.5. Sargı Başları.....	14
2.3.6. Hava Aralığı.....	15
2.3.7. Kapak Boşluğu Havası	15
2.3.8. Rotor Sargısı	15
2.3.9. Rotor Demiri	15
2.3.10. Mil	16
2.4. Temel Silindirik Bileşen.....	18

BÖLÜM 3. ASENKRON MOTORUN DİNAMİK ISIL MODELİ VE MODEL PARAMETRELERİNİN HESABI

3.1. Asenkron Motorun Dinamik Isıl Modeli	23
3.1.1. Elektriksel Model	23
3.1.2. Mekanik Model	35
3.1.3. Isıl Model.....	37
3.2. Isıl Model Parametrelerinin Hesabı	40
3.2.1. Stator Yalıtımı Isıl Direnci ve Isıl Kapasitesinin Hesabı	40
3.2.2. Stator Demiri Isıl Direnci ve Isıl Kapasitesinin Hesabı	42
3.2.3. Rotor Sargısı Isıl Direnci ve Isıl Kapasitesinin Hesabı	44
3.2.4. Hava Aralığı Isıl Direncinin Hesabı	46
3.3. Rotor Sargısındaki Sıcaklık Artışının Isıl Limit eğrileri Kullanılarak belirlenmesi	46

3.3.1. Stator Isıl Limit Eğrileri.....	46
3.3.2. Rotor Isıl Limit Eğrileri.....	46
3.3.3. Kaymaya Bağlı Isıl Limit Eğrileri.....	47
3.3.4. Isıl Eşdeğer Devrenin Belirlenmesi.....	48
3.4. Isıl Limit Zamanının Belirlenmesi.....	51
BÖLÜM 4. ASENKRON MOTORLARDAKİ KALKIŞ	54
BÖLÜM 5. SİMULASYON SONUÇLARI.....	63
BÖLÜM 6. SONUÇ	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ	75



TABLO LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo 1.1	Yalıtım sınıfları.....	2
Tablo 2.1.1	Elektrik devreleri ile ısı iletimi arasındaki benzeşim.....	9
Tablo 2.1.2	Bazı mühendislik malzemelerinin ısı iletkenlikleri.....	11
Tablo 2.1.3	Bazı mühendislik malzemelerinin yoğunluk ve özısıları.....	11



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	Asenkron motorun dinamik ısı model akış şeması.....	6
Şekil 2.2.2.1	Asenkron motorun kabuk modeli.....	13
Şekil 2.3.1	Asenkron motorun toplu parametrelili ısı eşdeğer devresi.....	16
Şekil 2.3.2	Asenkron motorda ısı akışı.....	17
Şekil 2.4.1	Temel silindirik bileşen.....	18
Şekil 2.4.2	Eksenel ve radyal ısı aktarımı.....	18
Şekil 2.4.3	Temel silindirik bileşene ilişkin indirgenmiş ağ.....	18
Şekil 3.1.1	Asenkron motorun dinamik ısı modeli.....	23
Şekil 3.1.1.1	3 fazlı asenkron motorun stator ve rotoru.....	24
Şekil 3.1.1.2	abc-dqo eksenleri arasındaki bağıntı.....	26
Şekil 3.1.3.1	Stator ısı eşdeğer devresi.....	38
Şekil 3.1.3.2	Rotor ısı eşdeğer devresi.....	38
Şekil 3.1.3.3	Stator ve rotor arasındaki ısı aktarımı.....	39
Şekil 3.2.1.1	Eşdeğer oluk kesiti.....	40
Şekil 3.2.2.1	İşletme sıcaklığından itibaren ısı limit eğrisi.....	47
Şekil 3.2.2.2	Ortam sıcaklığından itibaren ısı limit eğrisi	47
Şekil 3.3.3.1	Kaymaya bağlı ısı limit eğrisi.....	48
Şekil 3.3.4.1	Bir iletkenindeki ısı artışının elektriksel eşdeğeri	48
Şekil 3.3.4.2.a	Isı limit eğrisi.....	50
Şekil 3.3.4.2.b	Birim sıcaklık eğrisi.....	50
Şekil 4.1.a	Yüksüz serbest kalkışta stator akımı.....	54
Şekil 4.1.b	Yüksüz serbest kalkışta birim hız.....	54
Şekil 4.2.2.a	20 N.m yük için kalkış akımı.....	55
Şekil 4.2.2.b	20 N.m için birim hız	55

Şekil 4.3	Stator akımının hıza göre değişimi	55
Şekil 4.4	Akım yığılmalı motorlarda moment eğrileri	58
Şekil 4.5	Röle açma karakteristiği ile ısı limit eğrisi arasındaki uyumsuzluk nedeniyle hatalı açma	62
Şekil4.6	Röle açma karakteristiği ile ısı limit eğrisi	62
	arasındaki uyumsuzluk nedeniyle yetersiz koruma.....	62
Şekil 5.1.a	Nominal yükte stator sargısı ısı artışı.....	66
Şekil 5.1.b	Nominal yükte rotor sargısı ısı artışı.....	67
Şekil 5.1.c	Nominal yükte deneysel olarak belirlenen stator sargı sıcaklığı artışı.....	67
Şekil 5.2.a	Boşta çalışmada stator sargısı ısı artışı.....	68
Şekil 5.2.b	Boşta çalışmada rotor sargısı ısı artışı.....	68
Şekil 5.2.c	Boşta çalışmada deneysel olarak belirlenen stator sargı sıcaklığı artışı.....	69
Şekil 5.3.a	Aşırı yükte stator sargısı ısı artışı.....	69
Şekil 5.3.b	Aşırı yükte rotor sargısı ısı artışı.....	70
Şekil 5.3.c	Aşırı yükte deneysel olarak belirlenen stator sargı sıcaklığı artışı.....	70

SEMBOLLER

Ψ : Isı akı alanı

q : ısı yoğunluğu

λ : ısı iletkenlik katsayısı

h : konveksiyon katsayısı

h' : cebri konveksiyon katsayısı

Q : ısı

A : alan

L : uzunluk

θ : sıcaklık

R_I : ısı direnç

R_C : konveksiyon ısı direnci

c : özısı

C_I : ısı kapasite

v : rotorun çevresel hızı

V : hacim

r_1 : stator dış çapı

r_2 : dış dibi yarıçapı

r_3 : stator iç yarıçapı

r_4 : eşdeğer stator sargısı yarıçapı

r_5 : rotor dış çapı

r_8 : eşdeğer rotor sargı yarıçapı

K_{dqo}^s : herhangi bir K büyüklüğünün sabit dqo eksen takımına indirgenmiş değeri

K'_{dq0} : herhangi bir K büyüklüğünün senkron hızda dönen dq0 eksen takımına indirgenmiş değeri

K' : rotora ilişkin herhangi bir K büyüklüğünün statora indirgenmiş değeri

K_t : herhangi bir K büyüklüğünün birim değeri

ω : açısal hız

ρ : yoğunluk

τ : ısı zaman sabiti

ν : kinematik viskozite

Θ : weber – sarım cinsinden toplam akı

ψ : V-s cinsinden toplam akı

ϕ_e : eşdeğer oluk yayı

ϕ_p : oluk adımı

KAFESLİ ASENKRON MOTORUN DİNAMİK ISIL MODELİ

ÖZET

Asenkron motorda koruma, temelde motorun öngörülen ömrünü tamamlayabilmesi için alınan önlemlerin tümüdür. Motor ömrü sargı yalıtımının ömrüyle birebir ilişkilidir ve sargı yalıtımının ömrünü etkileyen en önemli faktör sıcaklıktır. Motor sıcaklığının doğrudan ölçümü, makinanın karmaşık geometrisi, makina parçalarının farklı fiziksel özelliklere sahip olması, bu parçalar arasında ısı aktarımının farklı yollardan meydana gelmesi, ısıl kaynakların makina içinde dağılmış olması ve motorun hareketli kısımlar içermesi gibi pek çok nedenden dolayı yüksek maliyetli ve zordur. Ayrıca sıcaklık artışının son derece hızlı olduğu kısadevre, faz kaybı, aşırı yüklenme gibi durumlarda doğrudan sıcaklık ölçümü için kullanılan, ısıl zaman sabitleri yüksek ölçüm araçları sıcaklıktaki ani artışı takip edemez. Bu nedenle asenkron motorun ısıl davranışını hızlı ve yüksek doğrulukta tespit edebilecek, aynı zamanda mümkün olduğunca sadeleştirilmiş ısıl modeller araştırmacıların ilgi odağı olmuştur.

Bu çalışmada asenkron motorun ısıl modeli ısı aktarımı ile elektrik devreleri arasında kurulan benzeşimden yararlanılarak oluşturulmuştur. Elektriksel direnç, kapasite ve akım kaynağının yerini modelde ısıl direnç, ısıl kapasite ve motorun kayıpları almaktadır.

Asenkron motorda sıcaklık artışının kritik olduğu noktalar stator ve rotor sargıları ile stator sargı başlarıdır. Küçük ve orta güçlü makinalarda stator sargıları ile sargı başlarının sıcaklığı birbirine eşit kabul edilebilir. Dolayısıyla model, stator ve rotor sargısındaki sıcaklık artışını belirlemeye yönelik oluşturulmuştur. Stator sargısı, rotor sargısı ve stator laminasyonu modelde birer düğümle temsil edilmektedir. Her bir düğüm noktası makinanın kayıplarını temsil eden bir akım kaynağı, bir ısıl direnç ve bir ısıl kapasite içermektedir. Statorla rotor arasındaki ısı aktarımı dördüncü bir ısıl dirençle temsil edilmektedir. Modelin bilgisayar ortamında simülasyonu ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

DYNAMIC THERMAL MODELLING OF SQUIERREL CAGE INDUCTION MOTORS

SUMMARY

Protection of induction motors is essentially, sum of the precautions to prevent motor from the aging before the time that expected as its life. Life of an induction motor is almost equal to insulation life which is dependendent upon temperature closely. Because of some restrictions as the complex geomtetry of motor, different physical properties of materials those are used in construction for several parts of motor, different modes of heat transfer, distributed heat sources, centrifugal and tangential forces act on any monitoring system implemented on rotor and time delay of tthermocuples, measuring motor temperature directly is expensive and difficult. On account of this, simplified thermal models that can be used for estimating motor temperature quickly and with a high accuracy have a great importance for both designers and users.

In this work, thermal modelling of induction motor is achieved by using analogy between the heat transfer and electrical circuits which are very familiar and easy to analyse. Electrical resistance, capacitance and current source are replaced with thermal resistance, thermal capacitance and losses, respectively.

The model presented, aims to estimate temperature rise of stator and rotor windings which are the most critical points of machine. Thermal network of induction motor includes three nodes, one of them represents stator winding, second one represents rotor winding and the third one does stator core.

With an experimental study, results of theoretical study is verified.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Hızla artan dünya nüfusu ve sanayileşmedeki yüksek ivme, mevcut doğal kaynakların hızla tüketimi ve alternatiflerinin üretilmesinde yaşanan sorunlar, artan enerji maliyetleri gibi pek çok faktör bugün bir mühendislik probleminin salt teknik olmaktan öte, aynı zamanda bir ekonomi problemi olduğu gerçeğine daha yoğun biçimde odaklanmayı gerektirmektedir. Bir ekonomi problemi ise temelde, sınırlı kaynakların yüksek talebi karşılayabilecek yeterlilikte organize edilmesidir.

Bir elektrik makinasının bu bakış açısı çerçevesinde ele alınması, mümkün olan minimum malzemeyle en yüksek güç/moment/verim/güvenilirlikte bir tasarımın gerçekleştirilebilmesi demektir.

Makine boyutları, başka bir deyişle kullanılan malzeme miktarı ile güç arasındaki ilişki büyüme yasaları tarafından belirlenir. Buna göre L makine boyutunu ve P gücü temsil etmek üzere, ikisi arasındaki ilişki $P \sim L^4$ biçimindedir[1]. Yani makina gücünün iki katına çıkarılabilmesi için boyutların 1.2 katına çıkması yeterli olacaktır. Bunun üzerinde bir artış “aşırı boyutlandırma” olarak adlandırılır ve gereksiz demir, bakır, yalıtkan vb. harcanması, birim gücün maliyetinin artması anlamına gelir. Ancak burada verilen güç ve boyut değerlerinde makinanın maksimum akı ve akım yoğunluğunda, başka bir deyişle limit değerlerinde çalıştığı kabul edilmektedir. Büyüme kurallarına uygun olarak tasarlanmış bir makine, örneğin nominal gücün az da olsa üstünde bir güç vermek zorunda kaldığında, akım yoğunluğu limit değerinin üzerine çıkacak ya da milinde aşırı bir yük momenti bulunan motoru mekanik olarak zarar görebilecektir. Bu tür zorlanmalar makine ömrünün beklenenden daha kısa olmasına ve hizmet sürecinin kesintiye uğrayarak enerji veriminin azalmasına yol açacaktır.

Sanayide en yaygın olarak kullanılan elektrik makinaları kafesli asenkron motorlardır. Pratikte bu motorun ömrü yalıtım malzemesinin ömrüne eşit kabul edilebilir. Makinada meydana gelen bakır kayıpları, demir kayıpları, sürtünme ve

havalandırma kayıpları nedeniyle oluşan ısı artışı, yalıtımın mekanik ve elektriksel özelliklerini bozar. Denklem 1.1 yalıtım ömrünün sıcaklıkla ters orantılı olarak değişimini vermektedir.

$$L_y = L_{y0} 2^{-(\theta_2 - \theta_1) / \Delta\theta} \quad (1.1)$$

Yukarıdaki denklemde L_0 , θ_1 sıcaklığında L , ise θ_2 sıcaklığında yalıtım ömrüdür. Yalıtımın uzun ömürlü olabilmesi için izin verilen sınır sıcaklık değerleri aşılmamalıdır. Bu değerler üzerindeki her $\Delta\theta$ sıcaklık artışı yalıtkan ömrünü yarıya düşürecektir. $\Delta\theta$ sıcaklık artış birimi, yalıtım sınıfına göre belirlenmiştir, ve 8-10 K arasında bir değere sahiptir. Elektrik makinalarındaki yalıtım sınıfları Tablo 1.1 de verilmiştir.

Tablo 1.1 Yalıtım sınıfları

Yalıtım sınıfı	En yüksek ısınım (°C)	Malzeme
A	60	Pamuk,kağıt
F	100	Mika,epoksi
B	80	Mika,epoksi,asfalt,şellak
H	125	Cam yünü, silikon

Tablo 1.1 de verilen en yüksek ısınımlar 40 °C ortam sıcaklığı ve deniz seviyesinden 1000 metreye kadar yükseklikler için verilmiştir. Ayrıca A sınıfı yalıtım için 5 K, B sınıfı yalıtım için 10 K, F ve H sınıfı yalıtım için 15 K güvenlik sınırı öngörülmüştür. Buna göre, örneğin F sınıfı yalıtkan için izin verilen en yüksek sıcaklık 155 °C olarak belirlenir. İzin verilen en yüksek sıcaklık, ortam sıcaklığının 40 – 45 °C arasında olması durumunda 5 °C, 45-50 °C ortam sıcaklığı içinse 10 °C daha düşük olacaktır.

Küçük güçlü ve/veya alçak gerilimde çalışan makinalarda B, F, H sınıfı yalıtım, büyük güçlü ve / veya yüksek gerilimli makinalarda B sınıfı yalıtım kullanılır.

Elektrik motorları, plakalarında verilen anma gücünde sürekli olarak çalışmak üzere boyutlandırılmıştır, ancak asansörler, çamaşır makinaları, vinçler gibi pek çok uygulamada motor kısa süreli olarak yüklenir ve sargı sıcaklıkları izin verilen maksimum değere ulaşamaz. Bu tip bir uygulama için gerekli momenti sağlayabilecek, anma gücü daha düşük bir motor seçilebilir. Aksi takdirde motor izin verilen maksimum sıcaklık değerinden çok daha düşük bir sıcaklıkta çalışmış olur ki, bu, makinada ısınmanın meydana geldiği etkin kısımların ya da soğutucu yüzeylerin gereğinden daha fazla boyutlandırılması, başka bir deyişle malzeme ve enerji veriminin düşük olmasıyla eşanlamlıdır. Bu sakıncayı gidermek üzere elektrik motorları için standartlarda belirlenen sekiz işletme türü vardır.

S1: Makinanın anma gücünde sürekli olarak çalıştığı, en yaygın işletme tipidir. Motorun gücü sürekli çalışmada izin verilen en yüksek sıcaklığı geçmeyecek biçimde seçilir. Pratikte ısıl zaman sabitinin üç katı bir süre, makinanın işletme süresi t_b olarak kabul edilebilir. Eğer motor ortam sıcaklığında kalkış yapıyorsa, kalkış ne denli ağır olursa olsun ısıl açıdan bir risk oluşturmaz. Ancak, işletme sıcaklığında bulunan bir motorun kalkışı izin verilen maksimum sıcaklığın geçilmesine yol açabilir.

S2 : Makinanın anma gücünde kısa süreli olarak çalıştığı, dolayısıyla sargı sıcaklığının sınır değere ulaşmadığı işletme tipidir. Makinanın gerilimsiz durumda dinlenme süresi, sargı sıcaklığının ortam sıcaklığından maksimum 2 K yüksek olacak şekilde soğumaya yetecek kadar uzun olmalıdır. İşletme süresi t_b , ısıl zaman sabitinin üç katından küçük, dinlenme süresi t_p soğuma zaman sabitinin üç katından büyük olmalıdır. Soğuma zaman sabiti, ısıl zaman sabitinin yaklaşık 1.5-2 katıdır.

S3: Dönen kısımların toplam eylemsizlik momentinin küçük olması nedeniyle yol verme ve elektriksel frenlemenin ısınmayı etkilemediği işletme türüdür. Bağlı işletme süresi t_r , işletme süresinin dönem süresine oranıdır. S3 tipi işletme için dönem süresi anma gücü ile sürekli olarak yüklenme süresi t_L ve dinlenme süresi t_p nin toplamıdır. Buna göre t_r Denklem 1.2 ile verilir.

$$t_r = \frac{t_L}{t_L + t_p} \quad (1.2)$$

S4: Frenlemenin serbest yavaşlama ya da mekanik fren aracılığıyla gerçekleştiği, ancak yol almanın sıcaklığı etkilediği işletme türüdür. t_y yol alma zamanı olmak üzere S4 tipi işletme için bağıl işletme süresi Denklem 1.3 ile verilmiştir.

$$t_r = \frac{t_L + t_y}{t_L + t_p + t_y} \quad (1.3)$$

S5: Bu işletme tipinde S4 tipi işletmeden farklı olmak üzere elektriksel frenleme ısınmayı etkiler. t_f elektriksel frenleme zamanı olmak üzere S5 tipi işletme için bağıl işletme süresi Denklem 1.4 ile verilmiştir.

$$t_r = \frac{t_L + t_y + t_f}{t_L + t_p + t_y + t_f} \quad (1.4)$$

S6: Bu tip işletmede dönem süresi sabit yükleme süresi t_L ile boşta çalışma süresi t_o nun toplamıdır. Motor yüksüz çalışma süresince yeterince soğuyabilir. Bağıl işletme süresi Denklem 1.5 ile verilmiştir.

$$t_r = \frac{t_L}{t_L + t_o} \quad (1.5)$$

S7: Bağıl işletme süresi 1 olup, her bir dönem yol alma süresi, sabit yüklenme süresi ve elektriksel frenleme süresinden oluşur.

S8: Motorun kesintisiz olarak, periyodik değişken hızlarda çalıştırıldığı işletme türüdür. Dönem süresi sabit hızda sabit yükle yüklenme süreleri ile aralardaki hızlanma ya da yavaşlama sürelerinden oluşur.

Motorun işletme taleplerine uygun olarak seçilmesi durumunda elektriksel, ısı ve mekanik zorlanmalar istisnai olaylar olarak kabul edilir. Dolayısıyla “olasılık” boyutundaki zorlanmalara karşı tedbir olarak makinanın aşırı boyutlandırılması genel ekonomik eğilimler açısından yanlış olacaktır. Bunun yerine optimum boyutlandırılmış motorun, ek yöntemlerle olası risklere karşı korunması yoluna gidilir.

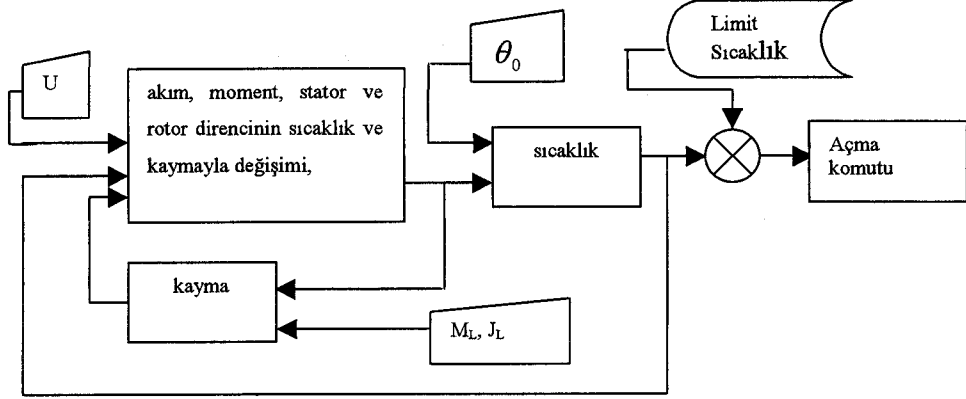
Motor korumasında kullanılan röleler, sigortalar, devre kesicileri aşırı yüklenme, kısadevre, faz kaybı, gerilim yükselmeleri gibi durumlarda oluşacak aşırı akımlar ve bu akımların yol açacağı ısı zorlanma, yalıtkan delinmesi, iletken ya da yalıtkanın aşırı sıcaklık nedeniyle yanması gibi tehlike durumlarında motoru devreden çıkarmak suretiyle riski ortadan kaldırır.

Uygun bir koruma yönteminin seçilmesi makinanın belirli başlangıç koşulları altında dinamik elektriksel mekanik ve ısı davranışının doğru biçimde belirlenmesini gerektirir. Aksi takdirde motor ya yetersiz korunacak ya da gereksiz yere devre dışı kalarak çalışması kesintiye uğrayacaktır.

Motor koruması temelde bir ısınma problemidir. Motordaki sıcaklık dağılımının bilinmesi, bu nedenle gerek tasarımcı gerek kullanıcı açısından büyük önem taşır. Motorun karmaşık bir geometriye sahip olması, kullanılan malzemelerin farklı ısı özellikler taşıması, ısı kaynaklarının, yani kayıpların makine içinde dağılmış olması ve motorun hareketli parçalar içermesi nedeniyle sıcaklık ölçümünü termistörler aracılığıyla doğrudan yapmanın maliyeti çok yüksektir. Bunun yanı sıra rotora yerleştirilmiş bir sensör yüksek merkezkaç kuvvetlerinin etkisi altında zarar görebilir. Ayrıca ölçü aletlerinin büyük zaman sabitleri sıcaklık değişiminin hızlı olduğu kısadevre, faz kaybı gibi durumlarda sıcaklıktaki değişimi algılamakta geç kalacaktır[2]. Bu nedenle araştırmacılar motorun ısı davranışını temsil edebilecek modeller üzerinde yoğunlaşmıştır. Doğrudan sıcaklık ölçümünün maliyetini yükselten faktörler, modelleme aşamasında da yüksek bilgisayar donanım maliyetleri ve çözümleme sürecinin çok uzun olması biçiminde kendini gösterir. Isı analiz, dolayısıyla motor korumasının maliyetinin azaltılabilmesi için, motor davranışını en iyi biçimde temsil edebilen, kullanıcının ihtiyacını karşılamakta yeterli, ancak bunların yanı sıra mümkün olduğunca sadeleştirilmiş ısı modellerin oluşturulması gereklidir.

Motor koruması açısından iki noktanın, stator ve rotor sargı sıcaklıklarının kestirilebilmesi önemlidir. Büyük güçlü motorlarda, rotorun daha sınırlayıcı olduğu bilinmektedir[3]. Yol alma, yüksek eylemsizlik momentli sistemlerin tahriki, aşırı yüklenme, kısadevre , faz kaybı gibi ısı açıdan riskli durumlarda bu noktalardaki sıcaklığın bilinmesi için, motorun elektiriksel, mekanik ve ısı parametreleri, yük momenti, giriş gerilimi ve başlangıç sıcaklığı bilgilerini kullanarak motorun akım,

direnç, kayıp gücü, moment ve hızı ile bunlara bağlı olarak sargı sıcaklığını hesaplamakta kullanılan bir modelin genel yapısı Şekil 1.1 de verilmiştir.



Şekil 1.1 Asenkron motorun dinamik ısıl modeli akış şeması

Bölüm 2 elektrik motorlarının ısı analizine ilişkin temel kavramlar ve modelleme yollarını içermektedir.

Bölüm 3 de, Şekil 1.1 de görülen her bir blok ayrıntılı biçimde açıklanmış, kapalı tipte motorlar için ısıl model parametrelerinin hesabı anlatılmıştır.

Bölüm 4, asenkron motorun kalkışını, kalkış sırasında makinanın maruz kaldığı zorlanmalar açısından incelemekte ve motor korumasına ilişkin bilgi vermektedir.

Bölüm 5 de, 3 kW, 380 V, 4 kutuplu, IP 54 tipi korumalı bir motora ilişkin simülasyon sonuçları verilmiş ve bu sonuçlar aynı motordan elde edilen deneysel verilerle kıyaslanmıştır.

Çalışmanın son bölümünde sonuçlar değerlendirilmiş ve geliştirici öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. ASENKRON MOTORDA ISI AKTARIMI VE ISIL MODELLER

Elektrik makinaları enerji dönüşümü yapan sistemlerdir. Enerji dönüşümü sırasında, örneğin bir elektrik motorunun şebekeden aldığı elektriksel enerjiyi mekanik enerjiye çevirmesi işleminde, bir miktar enerji ısı biçiminde kaybolur. Bu kayıplar demir kayıpları, sürtünme ve vantilasyon kayıplarından oluşan sabit kayıplar ve yük akımına bağlı kayıplar olarak iki temel grupta toplanır. Her iki tip kayıp sonucu oluşan ısı enerjisinin bir kısmı makinenin çeşitli kısımlarında, bu kısımların özgül ısı, yoğunluk ve hacimleri tarafından belirlenen miktarlarda depolanır, bir kısmı da ısının üretildiği makine parçalarından makinenin diğer kısımlarına ve çevreye iletilerek dağıtılır. Elektrik makinelerinin soğutulmasında kullanılan düzenekler ısı üretimi, depolanması ve dağıtılması arasında denge sağlayarak, makinenin yalıtım sınıfı tarafından belirlenen sınırlar içinde kararlı çalışma sıcaklığına ulaşılmasını sağlar. Bir elektrik makinesinin ısı tasarımı açısından, makinenin hangi koşullarda ne büyüklükte bir kayıp enerjisi oluşturacağı, bu enerjinin hangi miktarlarda makine içinde depolanacağı ya da makinenin diğer parçalarına ve/veya çevreye hangi yollardan hangi miktarda yayılacağı bilgisine sahip olmak gerekir.

2.1. ISI AKTARIM YOLLARI

Elektrik makinelerinde ısı aktarımı iletim, konveksiyon ve radyasyon aracılığıyla olur. Makinenin katı parçaları için iletim yöntemi baskındır, akışkanlardaki aktarım ise konveksiyon yöntemiyle olmaktadır. Radyasyonla ısı iletimi elektrik makinelerinde ihmal edilebilir

2.1.1. İletim

Isı enerjisinin katı maddelerde aktarımı, genel olarak ısınma sonucu enerjisi artan atomların titreşim hareketlerindeki artış ve bu artışın komşu atomlara iletilmesi yoluyla olur. İletim yöntemini tanımlayan iki temel kural vardır. Bunlardan ilki akı alanının diverjansının bir bölge içindeki ısıya eşit olmasıdır. Bu kuralın matematiksel ifadesi denklem 2.1.1.1. de verilmiştir.

$$\Delta\Psi = q \quad (2.1.1.1)$$

Isı akı alanı Ψ normal yönde birim alan başına ısı iletimi, q ise ısı kaynağının yoğunluğudur. İkinci kural izotropik bir bölgede her noktadaki ısı akısının o noktadaki sıcaklık gradyanı ile doğru orantılı olduğunu belirtir. Bu kuralın matematiksel ifadesi denklem 2.1.1.2. de verilmiştir. Orantı katsayısı λ ısı iletkenlik ve θ sıcaklıktır. – işareti termodinamiğin ikinci yasasından kaynaklanır ve ısıнын yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru aktığını ifade eder.

$$\Psi = -\lambda \nabla \theta \quad (2.1.1.2)$$

Isıl iletkenliğin sabit olduğu kabulüyle, ısı akı vektörünün ifadesi Denklem 2.1.1.1. de yerine yazılırsa Denklem 2.1.1.3. de verilen Poisson eşitliği elde edilir.

$$\nabla^2 \theta = -\frac{\gamma}{\lambda} \quad (2.1.1.3)$$

Denklem 2.1.1.3 de sıcaklık (θ) yerine elektrik potansiyeli (U), ısı kaynağı yoğunluğu (γ) yerine elektriksel yük yoğunluğu (ρ) ve ısı iletkenlik (λ) yerine geçirgenlik (ε) yazılırsa elektrostatik alanlar için geçerli Poisson denklemi elde edilir. Başka bir deyişle ısı akışı ve elektrostatik alan problemleri arasında bir benzeşim kurmak mümkündür.

Denklem 2.1.1.3. bir boyutlu ısı akışı için ele alındığında Denklem 2.1.1.4 de verildiği biçimi alır.

$$\psi = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2.1.1.4)$$

Her birinin alanı A , aralarındaki mesafe x , sıcaklıkları θ_1 ve θ_2 olan iki paralel yüzey arasındaki ortamdan iletilecek ısı miktarı Denklem 2.1.1.5 de verilmiştir.

$$Q = \psi A = \lambda A \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{x} \quad (2.1.1.5)$$

Denklem 2.1.1.5. elektrik devrelerindeki ohm kanununa benzer biçimde yazılabilir. Bu, Denklem 2.1.1.6 ile verilmiştir.

$$Q = \frac{\Delta\theta}{R_I} \quad , \quad R_I = \frac{x}{\lambda A} \quad (2.1.1.6)$$

Denklem 2.1.1.6 deki R , ısı dirençtir ve birimi $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ dır

Tablo 2.1.1 ısı iletimi ile elektrik devreleri arasındaki benzeşimin özetini vermektedir.

Tablo 2.1.2. de ise bazı maddelerin ısı iletkenlikleri bulunmaktadır.

Tablo 2.1.1 Elektrik devreleri ile ısı iletimi arasındaki benzeşim

Elektriksel Büyüklük	Sembol	Isıl Büyüklük	Sembol
Gerilim düşümü	ΔU	Sıcaklık farkı	$\Delta \theta$
Elektriksel direnç	R_e	Isıl direnç	R_I
Elektrik yükü	Q_e	Isıl enerji	Q_I
Kapasite	C_e	Isıl kapasite	C_I
Akım	I	Isı akış oranı	Q

Tablo 2.1.2 Bazı mühendislik malzemelerinin ısı iletkenlikleri

Malzeme	λ (W/cm.K)
Bakır	3.937
Alüminyum	2.165
Demir	0.669
Mika	0.02

Sıcaklığı zamanla değişmekte olan ya da bir ısı kaynağı içeren bir cismin dx kalınlığı için enerji korunumu denklemi, sol yandan alınan enerji + cismin içinde üretilen enerji = cismin içindeki enerji değişimi + sağ yana iletilen enerji, biçimindedir. Bu denklemin matematiksel ifadesi Denklem 2.1.1.7 ile verilmiştir.

$$-kA \frac{\partial \theta}{\partial x} + \dot{q} A dx = \rho c A \frac{\partial \theta}{\partial x} dx + \left\{ -(kA \frac{\partial \theta}{\partial x})_{x+dx} \right\} \quad (2.1.1.7)$$

Bu denklemde yer alan ρc ifadesi birim hacim için “ısı kapasite” olarak tanımlanır.

ρ (kg/m^3) cismin yoğunluğu, c ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$) cismin özısıısı olmak üzere ısı kapasitenin

birimi $(J/ ^\circ C)$ olarak verilir ve bir cismin sıcaklığını belirli bir dereceye çıkarmak için cisme verilmesi gereken ısı enerjisini gösterir. Buna göre $V (m^3)$ hacim olmak üzere ısı kapasitenin genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$c = \rho c V \quad (2.1.1.8)$$

Tablo 2.1.3 elektrik makinalarının konstrüksiyonunda kullanılan bazı iletken, yalıtkan ve magnetik malzemelerin yoğunlukları ve özısıları verilmiştir.

Tablo 2.1.3 Bazı mühendislik malzemelerinin yoğunlukları ve özısıları

	Özısı	Yoğunluk
Bakır	385	8960
Demir	420	7870
Çinko	389.8	7130
Alüminyum	900	2700

2.1.2. Konveksiyon

Isı aktarımında konveksiyon , doğal ve cebri (yapay) konveksiyon olmak üzere iki grupta incelenir.

Doğal konveksiyon ısınmış bir cismin yakınındaki akışkanın, örneğin havanın, yerini yoğunluğu daha fazla olan soğuk havaya bırakarak yükselmesi ile olur. Bu yolla kaybolan ısı Denklem 2.1.2.1. de verilmiştir.

$$Q = hA(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.1.2.1)$$

Burada h konveksiyon ısı iletim katsayısı, A yayıcı yüzeyin alanı ve θ_1 , θ_2 yayıcı yüzeyin ve akışkanın sıcaklıklarıdır. Konveksiyon ısı iletim katsayısı ısınmış olan cisimle ortamın sıcaklıkları arasındaki fark, ısınmış cismin yapısal detayları ve yönü, soğutucunun fiziksel özellikleri gibi birçok değişkene bağlıdır.

Cebri konveksiyon soğutucu maddenin ısınmış cisim etrafında dolanımının, sözgelimi bir fan yardımıyla, yapay yollardan olmasıdır. Isı iletim katsayısı doğal

konveksiyondaki belirleyici değişkenlerin yanısıra soğutucunun hızı, akışın türbülanslı ya da laminar akış oluşu gibi faktörlere de bağlıdır. Denklem 2.1.2.2 cebri konveksiyon için ısı iletim katsayısının belirlenmesinde kullanılan yaklaşımlardan birini göstermektedir [4].

$$h'=h(1+C_a v^n) \quad (2.1.2.2)$$

h' ve h sırasıyla yapay konveksiyon ve doğal konveksiyon katsayıları C_a deneysel olarak belirlenen bir sabit, v akışkanın ısınmış yüzeye göre hızı ve n 0.5 ile 1 arasında bir sabittir.

Konveksiyonla ısı aktarımı ve elektriksel devreler arasındaki benzeşimi göstermek için Denklem 2.1.2.1 in yeniden düzenlenmiş hali Denklem 2.1.2.3. de verilmiştir.

$$Q = \frac{\Delta\theta}{R_c} , \quad R_c = \frac{1}{hA} \quad (2.1.2.3)$$

Burada R_c konveksiyon ısı direncidir. Birimi $^{\circ}\text{C/W}$ dır.

2.2. ASENKRON MOTORUN ISIL MODELLERİ

Elektrik makinelerinin ısı analizinde kullanılan modeller belli başlangıç koşulları altında makinenin ısı davranışını, makinedeki sıcaklık dağılımını öngörebilmek için kullanılır. Bir ısıl modelin kurulmasında öncelikle elektrik makinesi, yük ve çevre koşullarının fiziksel bir modeli oluşturulur. Daha sonra bu fiziksel model matematiksel olarak ifade edilecek ve sayısal çözüm yöntemlerinden biri kullanılarak çözümleme yapılacaktır. Fiziksel modelin oluşturulmasında, tasarımcının öncelikleri dikkate alınarak sistemin belirleyici fiziksel özelliklerini koruyan, mümkün olduğunca sadeleştirilmiş bir yapı oluşturulması gerekir. Aksi takdirde çözüm için gerekli donanım ve yazılım masrafları ile harcanacak zaman çok büyük boyutlara varacaktır.

Elektrik makinelerinin ısı analizinde kullanılan modeller: sayısal alan çözümüne dayanan modeller, toplu parametrelili modeller ve kabuk modeller olmak üzere üç ana grupta toplanır.

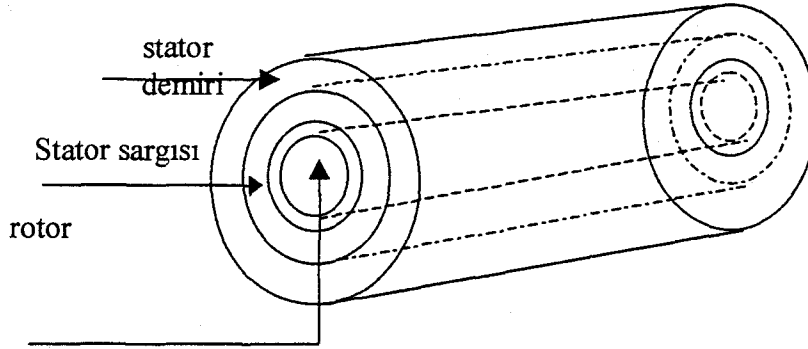
2.2.1. Sayısal Alan Çözümüne Dayalı Modeller

Alan kavramı belirli bir bölgede sürekli dağılıma sahip skalar ya da fiziksel bir büyüklüğü ifade eder. Elektrik makinalarının ısı dağılımı skalar bir alandır. Her türlü alan incelemesi için fiziksel problemin tanımı Maxwell denklemleriyle yapılabilir. Maxwell denklemleri kullanılarak tanımlanan fiziksel bir sisteme ilişkin kısmi türevli denklemlerin analitik çözümü, kompleks sistemler için neredeyse olanaksızdır. Dolayısıyla sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi, Monte Carlo yöntemi gibi çeşitli sayısal yöntemlere başvurulur. Maxwell denklemlerinin uygulandığı alan problemleri elektrokinetik, elektrostatik, magnetostatik, magnetodinamik problemler olmak üzere dört ana başlık altında toplanır. Elektrik makinalarında ısı dağılımının incelenmesi elektrokinetik bir problemidir. Elektrokinetik bir problemde makinadaki akım dağılımını bulmak amaçlanmaktadır. Bu yöntemde sistem Laplace denklemiyle tanımlanır. İletkenden akan akım hesaplanırken iletken sınır koşulları Neumann sınır koşulları ile, uçlar ise iki Dirichlet koşuluyla verilir[5,6]. Elektrik makinalarının ısı analizinde ilk kullanılan sayısal çözümleme yöntemi sonlu farklar yöntemidir. Sonrasında sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan çalışmalara literatürde sıkça rastlanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi makine geometrisinin Maxwell denklemleri ve sınır koşulları ile tanımlanacak yüksek sayıda alt elemandan oluşan bir ağı indirgenmesi suretiyle uygulanır. Söz konusu elemanların, makinanın karmaşık geometrisi, farklı ısı iletim yollarının bir arada bulunması, ısı kaynaklarının geometri içine dağılmış olması gibi nedenlerle yüksek sayılara ulaşması dolayısıyla, araştırmacılar makinanın en önemli noktalarında yaklaşık bir sıcaklık dağılımı belirlemeye yönelik basitleştirilmiş modellere yönelmişlerdir[7]. Örneğin kimi araştırmacılar sadece statoru ya da sadece rotoru ele almıştır. Bazı çalışmalarda sargı iletkeni ve yalıtkanını temsil eden tek bir ısı iletim katsayısı kullanılmıştır. Yüksek donanım maliyetleri ve zaman ihtiyacı nedeniyle üç boyutlu modelleme yerine iki boyutlu modellemeye yönelinmiştir.

2.2.2. Kabuk Modelleri

Kabuk modelinde makina içiçe geçmiş eşmerkezli ve farklı ısı özelliklere sahip silindirik yapılarla tanımlanır. Makinanın ısı analizi silindirler arasındaki ısı akışına indirgenmiştir. Örneğin motor rotor, stator sargısı ve stator demiriyi temsil eden üç kabuğa indirgenebilir. Bu model hava aralığının düzgün kabul edilebildiği asenkron

motor, fırçasız doğru akım motoru gibi makinalara uygulanabilir. Hava aralığı boyunca ısı aktarımı saf iletim yoluyla olmaktadır. Şekil 2.2.2.1 de söz konusu model görülmektedir.



Şekil 2.2.2.1 Asenkron makinanın kabuk modeli

2.2.3. Toplu Parametrelî Modeller

Bölüm 2.1. de bahsedildiği üzere bir elektrik motorunda iletim ve konveksiyon yoluyla ısı aktarımı ile elektriksel büyüklükler arasında bir benzeşim kurmak mümkündür. Bu modelleme yönteminde motor belirli sayıda alt kısma ayrılarak, her bir alt kısmın ısı direnci ve ısı kapasitesi geometriye, boyutlara ve kullanılan malzemenin türüne göre hesaplanır. Herbir alt parça için ve bu parçalar arasında hangi yolla ısı iletiminin söz konusu olduğu belirlenir. Böylece motorun ısı davranışını temsil eden bir elektriksel eşdeğer devre oluşturularak Kirchhoff yasaları uyarınca bu devrenin çözümü yapılır. Bölüm 2.3 de asenkron motorun toplu parametrelî ısı eşdeğer devresi ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.3. ASENKRON MOTORUN TOPLU PARAMETRELİ MODELİ

Toplu parametrelî ısı modelin oluşturulması için asenkron motor, geometrisi ve malzeme özellikleri göz önüne alınarak on alt bileşene ayrılabilir. Herbir bileşenin ısı direnci ve ısı kapasitesinin hesaplanmasının ardından bu direnç ve kapasite elemanları gene makinanın geometrisine uygun olarak birleştirilir. Modellemede makinanın mil eksenine göre ve radyal planda simetrik olduğu kabul edilir.

2.3.1. Gövde

Makinanın dış yüzeyindeki soğutma kanallarını ve kapakları da içine alacak şekilde homojen sıcaklık dağılımına sahip bir yapı olarak ele alınır. Stator demiri ve gövde arasındaki temas direnci yoluyla statordan gelen ısı, ortama tek bir direnç üzerinden dağıtılır. Gövde ile ortam arasındaki ısı aktarımı konveksiyon yoluyla meydana gelir.

2.3.2. Boyunduruk

Stator dışleri çıkarıldıktan sonra geride kalan silindirik yapıdır. Makinanın demir kayıplarının yaklaşık %70 i bu kısımda oluşmaktadır. Dolayısıyla modellemeye boyunduruğa ilişkin düğüme bir ısı kaynak bağlanmalıdır. Boyunduruk ile stator dışleri, stator sargısı ve gövde arasında iletim yoluyla ısı aktarımı meydana gelmektedir.

2.3.3. Stator Dışleri

Isıl olarak paralel bağlı bir dizi silindirik yapı biçiminde ele alınır. Radyal yönde stator demiri, eksenel yönde ise kapak boşluğu havası ile ısı bağlantıyı sağlayan dirençlerin yanısıra stator sargısından kaynaklanan çevresel ısı aktarımını temsil eden ek bir dirençle modellenir. Demir kayıplarının %30 unun dışlerde meydana geldiği kabul edilir.

2.3.4. Stator Sargısı

Sargı iletkenleri ve yalıtımını temsil eden i içe geçmiş eř merkezli silindirik yapılar biçiminde modellenir. Eksenel yöndeki ısı aktarımı sadece iletken kısımda meydana gelir. Radyal yönde ise sargı, iletkenliği yalıtkan malzemenin ısı iletkenliğinden daha büyük, homojen ve kesidi oluk kesit alanına eşit silindirik bir yapı olarak ele alınır. Stator sargısında oluşan bakır kayıpları modelde bir ısı kaynakla temsil edilir.

2.3.5. Sargı Başları

Stator sargısının oluk dışına uzanan, ve halka biçimli bir yapı oluşturan kısımdır. Oluk sargısından aktarılan ve sargı başlarındaki bakır kayıpları nedeniyle oluşan toplam ısı enerjisi kapak boşluğu havasına aktarılır. Asenkron motorlarda ısı ıdan

en çok zorlanan bölüm sargı başlarıdır. Küçük güçlü makinalarda oluk sargısı ve sargı başlarının sıcaklığı eşit kabul edilebilir [10].

2.3.6. Hava Aralığı

Rotor yüzeyi ile stator dişleri ve stator sargısı arasındaki bağlantıyı sağlar. Stator oluklarının hava aralığında yaratabileceği hava girdapları bu bölgedeki ısı aktarımını etkileyecektir. Bu nedenle hava aralığındaki ısı aktarımı incelenirken hava akışının niteliği belirlenmelidir.

2.3.7. Kapak Boşluğu Havası

Kapak boşluğu içinde dolaşan hava eşit bir sıcaklık dağılımına sahiptir. Rotor soğutma kanallarıyla olan ısı aktarımı hariç, temasta olduğu tüm yüzeylerle ısı aktarımı için tek bir konveksiyon katsayısı kullanılır.

2.3.8. Rotor Sargısı

Rotor sargısı rotor demirinin çevresini saran ve hacmi kafes çubuklarının toplam hacmine eşit tek parça bir silindir olarak modellenir. Rotor sargısına ilişkin düğüm rotordaki bakır kayıplarını temsil eden bir ısı kaynakıdır. Rotor sargısı ile rotor demiri arasında iletim yoluyla ısı aktarımı olurken, sargı yüzeyinden hava aralığı ve kapak boşluğu havasına konveksiyon yoluyla ısı aktarımı gerçekleşir.

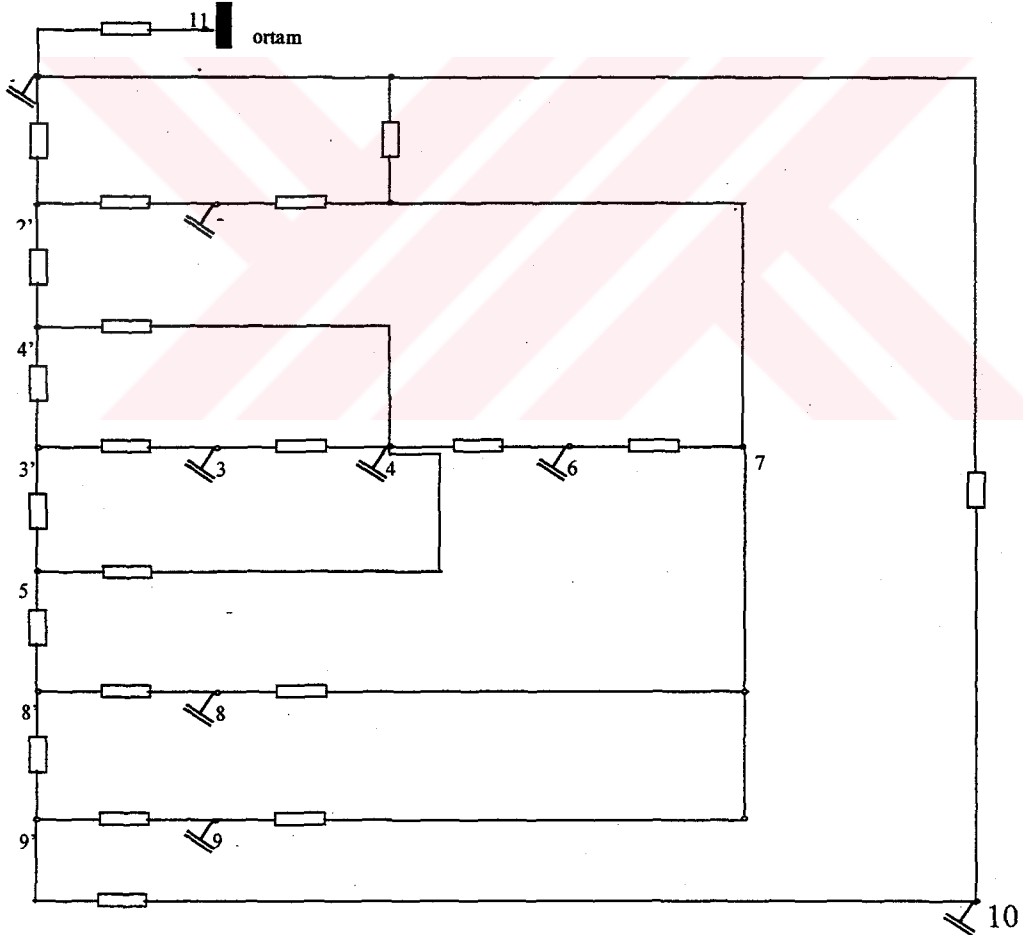
2.3.9. Rotor Demiri

Rotor demiri homojen bir silindir olarak ele alınır. Bölüm 2.3.8 de anlatıldığı biçimde rotor sargısını temsil eden silindirin çapının belirlenmesiyle rotor çekirdeğinin geometrisi de belirlenmiş olur. Asenkron motorun sürekli hal çalışmasında rotordaki demir kayıpları ihmal edilir. Motorun yol alması sırasında düşük devir hızlarında rotor demir kayıpları büyük değerlere ulaşabilir. Ancak çok büyük eylemsizlik momentine sahip sistemlerin tahriki dışında, yol alma zamanının son derece kısa olması nedeniyle rotorda oluşabilecek demir kayıplarının modelde bir ısı kaynağı olarak temsil edilmesine gerek yoktur.

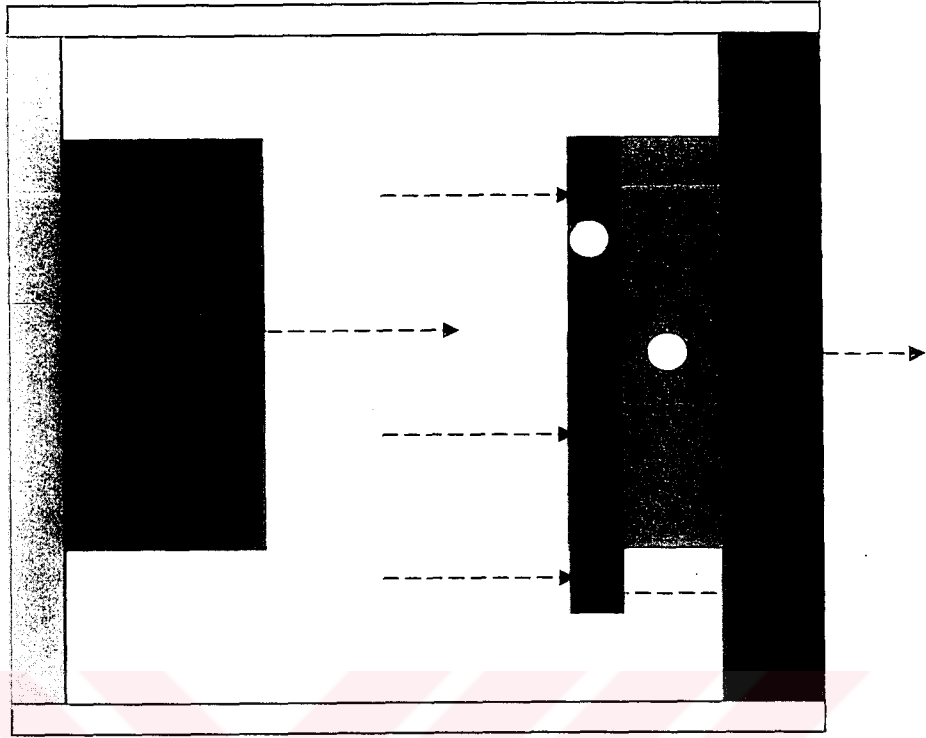
2.3.10. Mil

Rotor demiri ve yataklar üzerinden rotor gövdesi ile ısı bağlantısı olan içi dolu silindirik bir yapıdır.

Hava aralığı ve kapak boşluğu havası hariç her bir alt bileşen birer ısı kapasite elemanına sahiptir. Isıl dirençlerin ve kapasitelerin motorun hesaplanmasına ilişkin ayrıntılar literatürde verilmiştir[8-11] . Bölüm 3.1.3 de bu çalışmada kullanılan devre elemanların hesabına değinilecektir. Şekil 2.3.1 asenkron motorun toplu parametrelili eşdeğer devresini göstermektedir. Şekil 2.3.2 ise asenkron motorun alt kısımları arasındaki ısı akışını göstermektedir



Şekil 2.3.1 Asenkron motorun toplu parametrelili ısı eşdeğer devresi

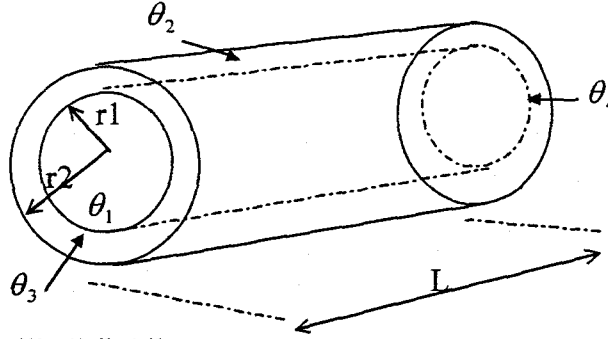


- GÖVDE
- STATOR DEMİRİ
- STATOR DİŞLERİ
- STATOR SARGISI
- SARGI BAŞI
- ROTOR SARGISI
- ROTOR DEMİRİ
- MİL
- YATAKLAR
- İLETİM YOLUYLA ISI AKTARIMI
- > KONVEKSİYON YOLUYLA ISI AKTARIMI
- ⊗ BAKIR KAYIPLARI
- DEMİR KAYIPLARI

Şekil 2.3.2 Asenkron motorda ısı akışı

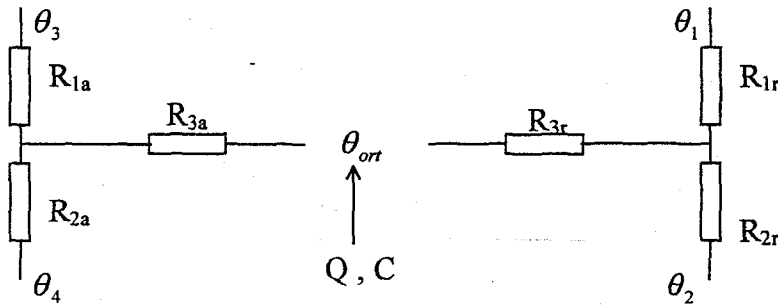
2.4. TEMEL SİLİNDİRİK BİLEŞEN

Asenkron motorun toplu parametrelili modelini oluşturan bileşenler incelenirken, herbir alt bileşenin yaklaşık olarak bir silindir biçiminde modellenebileceği görülmüştü. Bütün bileşenlerin incelenmesine temel oluşturmak üzere, Şekil 2.4.1 de görülen silindirik yapı “temel silindirik bileşen” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.4.1 Temel silindirik bileşen

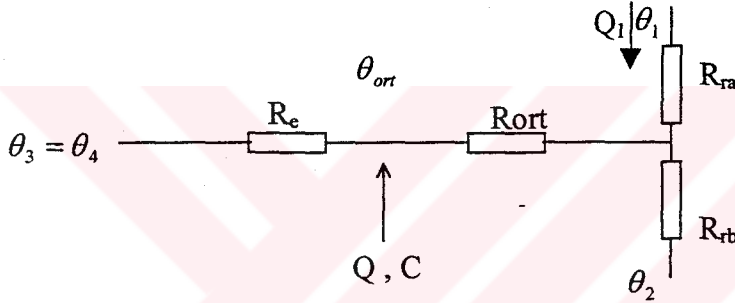
Temel silindirik bileşene dayanarak yapılan modelleme bazı kabullere dayanır. Bu kabullerin ilki, eksenel ve radyal yöndeki ısı aktarımının birbirinden bağımsız olmasıdır. Çevresel ısı aktarımı ise ihmal edilir. Bir diğer kabul ısı kapasitenin ve ısı kaynaklarının geometri boyunca düzgün olarak dağılmış olmasıdır. Son olarak, gerek eksenel gerek radyal yöndeki ısı akışına ilişkin tek bir ortalama sıcaklık değeri tanımlanır. Bu kabullere göre, eksenel ve radyal yöndeki bağımsız ısı aktarımı Şekil 2.4.2.de verilen ağla modellenir.



Şekil 2.4.2 Eksenel ve radyal ısı aktarımı

Yukarıdaki şekillerde θ_1 ve θ_2 sırasıyla silindirin dış ve iç yüzey sıcaklıkları, θ_3 ve θ_4 silindirin iki taban yüzeyinin sıcaklıklarıdır. Silindirin merkezi radyal düzleme göre simetrik olduğu kabuluyla θ_3 ve θ_4 birbirine eşittir. Merkezi düğümün sıcaklığı θ_{ort} ise temel silindirik bileşene ilişkin kabullerde belirtilen ortalama sıcaklıktır. Silindirin içinde ısı üretimi olduğu durumda, merkezi düğümün sıcaklığı ortalama sıcaklıktan daha büyüktür. Bu durum negatif değerli R_{3e} ve R_{3r} ile temsil edilir.

Eksenel ve radyal yöndeki ısı akışına ilişkin ortalama sıcaklık değerleri aynı olduğuna göre Şekil 2.4.2 de ayrı ayrı gösterilen bu iki akış birleştirilebilir. Şekil 2.4.3 de temel silindirik bileşene ilişkin indirgenmiş ağ modeli verilmiştir.



Şekil 2.4.3 Temel silindirik bileşene ilişkin indirgenmiş ağ

Şekil 2.4.3 de görülen dirençlerin değeri aşağıdaki denklemlerle verilmiştir.

$$R_e = R_{1e} + 2R_{3e} \quad (2.4.1)$$

$$R_{ra} = 2R_{1r} \quad (2.4.2)$$

$$R_{rb} = 2R_{2r} \quad (2.4.3)$$

$$R_{ort} = 2R_{3r} \quad (2.4.4)$$

Isıl dirençlerin hesabı için sıcaklığın yarıçapsal doğrultudaki değişimini veren ifade elde edilmelidir. Denklem 2.4.5 silindirik koordinatlarda sürekli halde bir boyutlu ısı iletimine ilişkindir. Bu denklemin temel silindirik bileşen için geçerli sınır koşullarıyla çözülmesiyle Denklem 2.4.6 bulunur.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(r \frac{d\theta}{dt} \right) + \frac{q}{\lambda} = 0 \quad (2.4.5)$$

Sınır koşulları

$$1) \quad r = r_1 \text{ için} \quad \frac{d\theta}{dr} = -\frac{Q_1}{\lambda 2\pi r_1 L}$$

$$2) \quad r = r_2 \text{ için} \quad \theta(r_2) = \theta_2$$

$$3) \quad r = r_1 \text{ için} \quad \theta_{\max} = \theta_1$$

$$\theta(r) = \theta_2 + \frac{Q}{2L\pi\lambda(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{r_2^2 - r^2}{2} + r_1^2 \ln \frac{r}{r_2} \right) + \frac{Q}{2L\pi\lambda} \ln \frac{r}{r_2} \quad (2.4.6)$$

V silindirin hacmi olmak üzere, ortalama sıcaklık değeri, yukarıdaki denklemde verilen sıcaklığın hacim içerisinde integre edilmesiyle bulunur.

$$\theta_{ort} = \frac{1}{V} \int_0^V \theta(r) dV$$

Ortalama sıcaklığın ifadesi Denklem 2.4.7 da verilmiştir.

$$\theta_{ort} = \theta_2 + \frac{Q}{4\pi\lambda L(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{2} - r_1^2 \left(1 - \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \right) - \frac{Q_1}{4L\pi\lambda} \left(\frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 \right) \quad (2.4.7)$$

Şekil 2.4.2 de radyal ısı akışı için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\theta_1 = \theta_2 + R_{1r} Q_1 + R_{2r} Q_1 \quad (2.4.8)$$

$$\theta_{ort} = \theta_2 + R_{2r} Q_1 \quad Q=0 \text{ için} \quad (2.4.9)$$

$$\theta_{ort} = \theta_2 + R_{2r} Q_1 = \theta_2 + (R_{ort} + R_{2r}) Q + R_{2r} Q_1 \quad (2.4.10)$$

$\theta(r)$ ve θ_{ort} değerleri yukarıdaki denklemlerde yerine yazıldığında ısı direnç ifadeleri elde edilir.

Q= 0 için

$$R_{2r} = \frac{1}{4\lambda L \pi} \left(1 - \frac{2r_1^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2^2 - r_1^2} \right) \quad (2.4.11)$$

$$R_{1r} = \frac{1}{4\lambda L \pi} \left(\frac{2r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2^2 - r_1^2} - 1 \right) \quad (2.4.12)$$

Q ≠ 0 için

$$R_{3r} = \frac{-1}{8\lambda L \pi (r_2^2 - r_1^2)} \left(r_1^2 + r_2^2 - \frac{4r_1^2 r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2^2 - r_1^2} \right) \quad (2.4.13)$$

Eksenel yöndeki ısı aktarımına ilişkin diferansiyel denklem, kartezyen koordinatlarda Poisson denklemidir. Temel silindirik bileşen için sınır koşulları aşağıda verilmiştir.

Sınır koşulları

1) $x=0$ için $Q(x) = \lambda A \left(\frac{d\theta}{dx} \right) = \theta_3$

2) $Q(x=L) = \lambda A \left(\frac{d\theta}{dx} \right) = \theta_4$

İçinde ısı üretimi olan bir silindirde eksenel ısı aktarımına ilişkin poisson denklemi Denklem 2.4.14 de verilmiştir.

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{q}{\lambda} = 0 \quad (2.4.14)$$

Denklem 2.4.14 ün verilen sınır koşulları kullanılarak çözümüyle sıcaklığın silindirin eksenel boyunca değişimi $R_0 = \frac{L}{\lambda A}$ ve $Q = qAL$ olmak üzere Denklem 2.4.15 de gösterildiği biçimde bulunur.

$$\theta(x) = \theta_4 + \frac{QR_0}{2} \left(1 - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right) + Q_1 R_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (2.4.15)$$

Denklem 2.4.15 nın eksenel uzunluk boyunca integrasyonu ile ortalama sıcaklığın Denklem 2.4.16 ile verilen ifadesi bulunur.

$$\theta_{ort} = \theta_4 + \frac{QR_0}{3} + \frac{Q_1 R_0}{2} \quad (2.4.16)$$

Şekil 2.4.3 için yazılan Denklem 2.4.17 ile Denklem 2.4.16 nın eşitlenmesiyle eksenel ısı akışına ilişkin dirençler elde edilir.

$$\theta_{ort} = \theta_4 + Q(R_{3e} + R_{2e}) + Q_1 R_{2e} \quad (2.4.17)$$

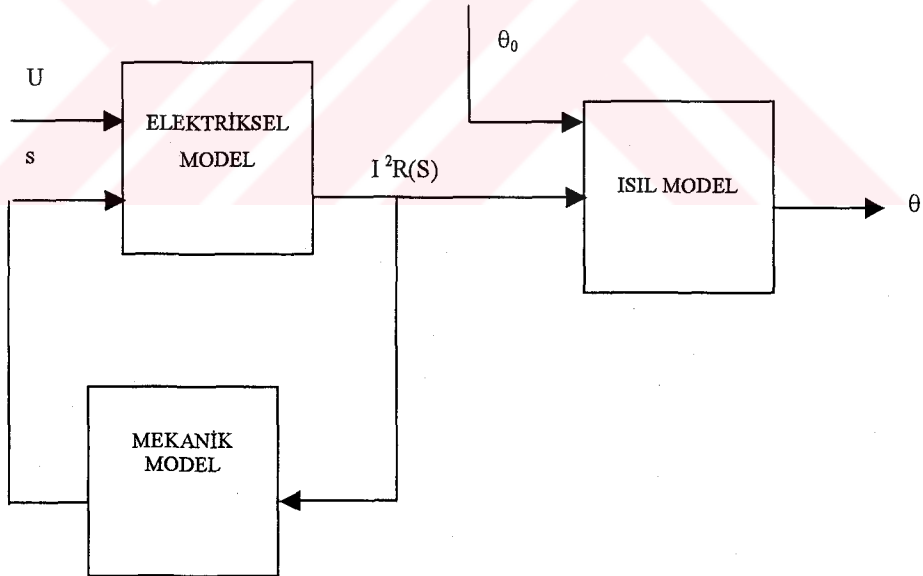
$$R_{3a} = -\frac{L}{6\pi\lambda(r_2^2 - r_1^2)} \quad (2.4.18)$$

$$R_{1e} = R_{2e} = \frac{L}{2\pi\lambda(r_2^2 - r_1^2)} \quad (2.4.19)$$

BÖLÜM 3. ASENKRON MOTORUN DİNAMİK ISIL MODELİ VE MODEL PARAMETRELERİNİN HESABI

3.1. ASENKRON MOTORUN DİNAMİK ISIL MODELİ

Bir elektrik motorunda ısınma makinanın gerilim, direnç, akım, eylemsizlik momenti, motor momenti gibi elektriksel ve fiziksel parametrelerine, işletme tipine, yüke ve çevre koşullarına bağlıdır. Dolayısıyla ısı analiz için kullanılacak modelin tüm bu parametreler ve değişimleri hakkında bilgi içermesi gerekir. Şekil 3.1. de verilen model motorun elektriksel, mekanik ve ısı kısımlarını ve bu üç kısmın birbiri üzerindeki etkilerini içeren etkileşimli bir ısıl modeldir.

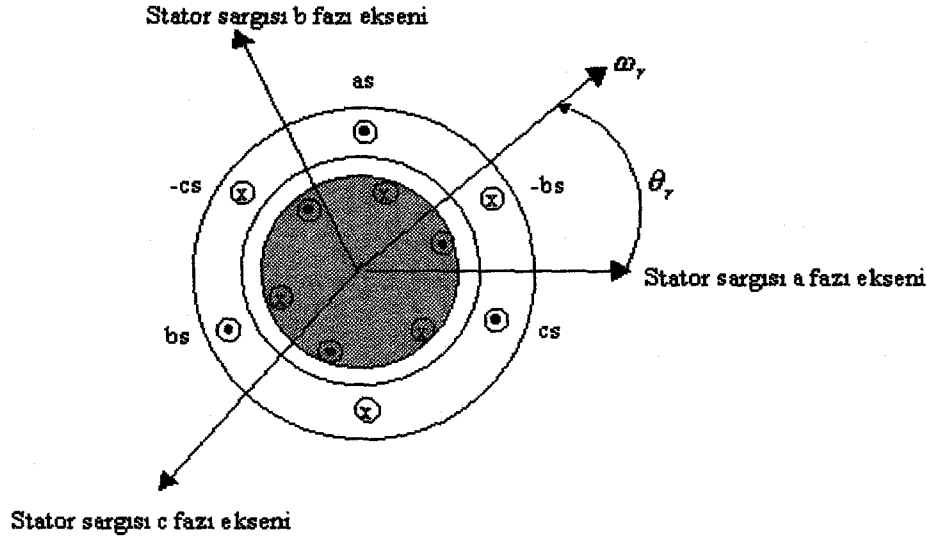


Şekil 3.1.1 Elektrik motorunun dinamik ısıl model akış şeması

3.1.1. Elektriksel Model

Şekil 3.1. de görüldüğü üzere asenkron makinanın ısıl modelinin girişi, motorun akımı ve direnci oluşturmaktadır. Bu büyüklükler motora ilişkin elektriksel eşdeğer devre tarafından belirlenir.

Şekil 3.1.1.1. asenkron makinanın stator ve rotorunu göstermektedir.



Şekil 3.1.1.1 Üç fazlı asenkron motorun rotor ve statoru

Asenkron motorun stator ve rotoruna ilişkin gerilimler Denklem 3.1.1.1 -3.1.1.2 de verilmiştir.

Stator gerilim denklemleri

$$U_{as} = i_{as} r_s + \frac{d\Theta_{as}}{dt} \text{ V}, \quad U_{bs} = i_{bs} r_s + \frac{d\Theta_{bs}}{dt} \text{ V}, \quad U_{cs} = i_{cs} r_s + \frac{d\Theta_{cs}}{dt} \text{ V} \quad (3.1.1.1)$$

Rotor gerilim denklemleri

$$U_{ar} = i_{ar} r_r + \frac{d\Theta_{ar}}{dt} \text{ V}, \quad U_{br} = i_{br} r_r + \frac{d\Theta_{br}}{dt} \text{ V}, \quad U_{cr} = i_{cr} r_r + \frac{d\Theta_{cr}}{dt} \text{ V} \quad (3.1.1.2)$$

Yukarıdaki denklemlerde her eşitliğin sağındaki ikinci terim toplam akının zamana göre değişimini göstermektedir. Bu terimlerin sargı endüktansı ve akımı cinsinden yazılmış, matris formundaki ifadeleri Denklem 3.1.1.3 de ve sargı endüktanslarının matris formunda gösterimi Denklem 3.1.1.5 de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Theta_s^{abc} \\ \Theta_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_r^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \text{wb-sarım} \quad (3.1.1.3)$$

Yukarıdaki denklemde

$$\Theta_s^{abc} = (\Theta_{as}^a, \Theta_{bs}^b, \Theta_{cs}^c)^t, \Theta_r^{abc} = (\Theta_{ar}^a, \Theta_{br}^b, \Theta_{cr}^c)^t \quad (3.1.1.4)$$

$$i_s^{abc} = (i_s^a, i_s^b, i_s^c)^t, i_r^{abc} = (i_{ar}^a, i_{br}^b, i_{cr}^c)^t$$

olarak tanımlanmıştır. Stator ve rotorun özendüktans matrisleri ile statorla rotor arasındaki karşıt endüktans matrisi sırasıyla Denklem 3.1.1.5, 3.1.1.6 ve 3.1.1.7 de verilmiştir.

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{sm} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{sm} \end{bmatrix} \quad (3.1.1.5)$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rm} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rm} \end{bmatrix} \quad (3.1.1.6)$$

$$L_{sr}^{abc} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (3.1.1.7)$$

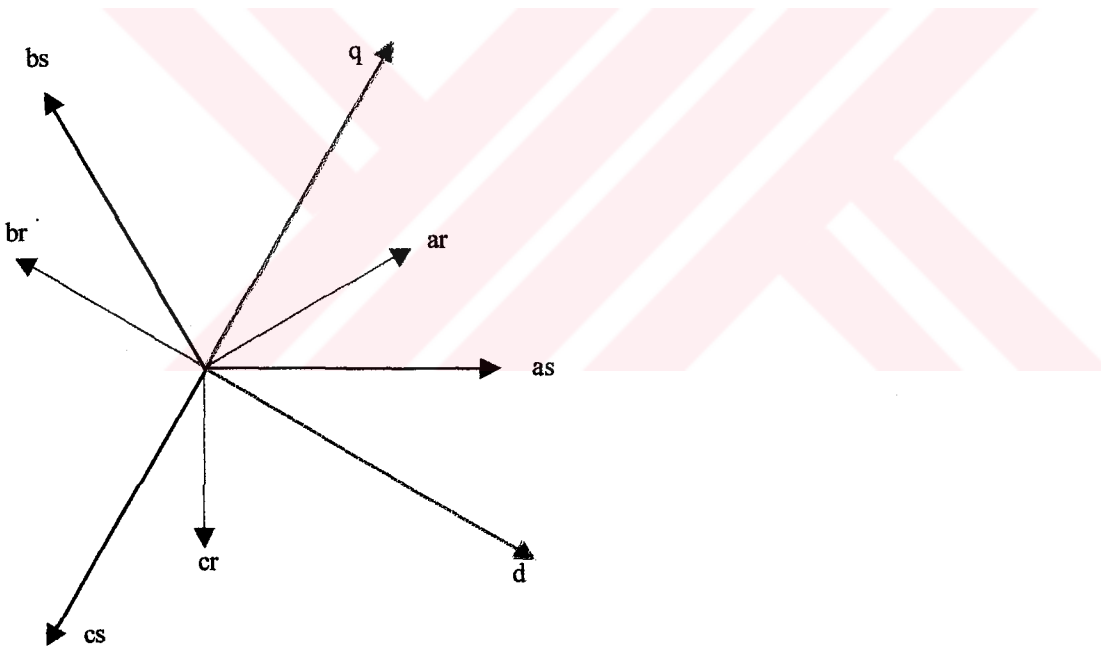
Makinanın her bir sargısının birinci dereceden bir diferansiyel denklemle ifade edildiği ve bu denklemlerin sargılar arasındaki karşıt endüktanslar nedeniyle birbirleriyle bağımlı oldukları, buraya kadar yazılmış olan denklemlerden anlaşılmaktadır. Aynı zamanda rotor ve stator sargıları arasındaki karşıt endüktansın rotor açısına bağlı olarak değişmesi denklem sisteminin çözümünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle asenkron makinelerin geçici durum incelenmesi için, zamanla değişen katsayılı diferansiyel denklemlerin sabit katsayılı denklemlere dönüştürmek üzere bazı yöntemler geliştirilmiştir.

Asenkron makinaların geçici durum incelenmesinde yaygın olarak sargıların ya sabit bir eksen takımına ya da senkron hızda dönen bir denklem takımına indirgenmesi yöntemi benimsenir. Bunun için öncelikle makinanın, rotor dönüş yönünde herhangi bir ω hızında dönmekte olan eksen takımına göre denklemleri yazılacaktır.

X, makinanın gerilim, akım, ya da akısını temsil etmek üzere, abc eksen takımından dq0 eksen takımına dönüşümüne ilişkin genel ifade Denklem 3.1.1.8 de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_d \\ X_o \end{bmatrix} = [T_{gdo}(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.1.1.8)$$

Şekil 3.1.1.2 abc ve herhangi bir ω hızında dönmekte olan qd0 eksen takımları arasındaki bağıntıyı göstermektedir.



Şekil 3.1.1.2 abc ve dq0 eksenleri arasındaki bağıntı

Şekil 3.1.1.2 de stator a fazı eksenini a_s ile rotor a fazı eksenini a_r arasındaki açı θ_r , a_s ile q eksenini arasındaki açı θ ' dir. Bu iki açı sırasıyla Denklem 3.1.1.9 ve Denklem 3.1.1.10 da verilmiştir. dq eksen takımının hızı ω , rotor hızı ω_r olmak üzere dq eksen takımı ve rotor aynı yönde hareket etmektedirler.

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r dt + \theta_r(o) \quad (3.1.1.9)$$

$$\theta'(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta'(o) \quad (3.1.1.10)$$

Denklem 3.1.1.8 de yer alan qdo dönüşüm matrisinin açılımı Denklem 3.1.1.11 ile ters matris ise Denklem 3.1.1.12 ile verilmiştir.

$$T_{gdo}(\theta') = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta' & \cos(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta' + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta' & \sin(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta' + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.1.1.11)$$

$$[T_{gdo}(\theta')]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \sin(\theta') & 1 \\ \cos(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta' + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta' + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.1.12)$$

Denklem 3.1.1.1 de verilen stator gerilim denklemleri ,Denklem 3.1.1.2 de verilen rotor gerilim denklemleri ve dgo dönüşüm matrisi Denklem 3.1.1.8 de yerine yazılırsa, $\omega = \frac{d\theta'}{dt}$ olmak üzere dgo eksen takımına göre gerilim denklemleri elde edilir. dgo eksen takımında stator gerilim denklemleri Denklem 3.1.1.13 ile, rotor gerilim denklemleri Denklem 3.1.1.14 ile verilmiştir.

$$U_s^{qdo} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Theta_s^{qdo} + d\Theta_s^{qdo} + r_s^{qdo} i_s^{qdo} \quad (3.1.1.13)$$

$$U_r^{qdo} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Theta_r^{qdo} + d\Theta_r^{qdo} + r_r^{qdo} i_r^{qdo} \quad (3.1.1.14)$$

Yukarıdaki denklemlerde yer alan stator direnci matrisinin açılımı Denklem 3.1.1.15 de gösterildiği gibidir. d simgesi ise zamana göre türev alma işlemcisidir.

$$r_s^{gdo} = r_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.15)$$

Benzer şekilde elde edilen dqo eksen takımında stator ve rotor akıları Denklem 3.1.1.16 da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \\ \Psi_{os} \\ \Psi_{qr}' \\ \Psi_{dr}' \\ \Psi_{or}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i_{qr}' \\ i_{dr}' \\ i_{or}' \end{bmatrix} \quad (3.1.1.16)$$

Burada rotor büyüklükleri statora indirgenmiştir. Herhangi bir L_r rotor parametresinin statora indirgenmesi, stator sarım sayısı N_s ve rotor sarım sayısı N_r olmak üzere Denklem 3.1.1.17 de gösterildiği gibidir. Denklem 3.1.1.18 ise I_r rotor akım değerinin statora indirgenmesini göstermektedir.

$$L_r' = \frac{N_s}{N_r} L_r \quad (3.1.1.17)$$

$$I_r' = \frac{N_s}{N_r} I_r \quad (3.1.1.18)$$

Asenkron motorların dinamik analizinde, makinaya ilişkin büyüklüklerin gerçek değerleri yerine birim değer olarak adlandırılan ve bir büyüklüğün gerçek değerinin, o büyüklük için temel değer olarak kabul edilen bir sayıya bölünmesiyle bulunan birimsiz bir değer kullanılır. Asenkron motor için temel değerler Denklem 3.1.1.19 da verilmiştir.

$$V_t = U_m \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$S_t = S_n$$

$$I_t = \frac{2S_t}{3V_t} \quad (3.1.1.19)$$

$$Z_t = \frac{V_t}{I_t}$$

$$\omega_t = \omega_s = 2\pi f_n$$

$$M_t = \frac{pS_t}{\omega_t}$$

Yukarıdaki eşitliklerde p motorun kutup sayısı, U_m faz arası gerilimin tepe değeridir.

Buraya kadar olan denklemlerde toplam akı weber - sarım olarak ifade edilmiş, ayrıca enduktanslar H değeriyle tanımlanmıştı. Bu iki büyüklük yerine sırasıyla Denklem 3.1.1.20 ve Denklem 3.1.1.21 de tanımlanan değerler yazılırsa Denklem 3.1.1.22 ve Denklem 3.1.1.23 de verilen stator ve rotor gerilim denklemleri ile Denklem 3.1.1.24 de verilen toplam akı matrisi elde edilir.

$$\psi = \omega_s \Theta \quad V \quad (3.1.1.20)$$

$$x = \omega_s L \quad \Omega \quad (3.1.1.21)$$

$$U_{ds} = \frac{d}{\omega_d} \psi_{ds} - \frac{\omega}{\omega_s} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \quad (3.1.1.22)$$

$$U_{qs} = \frac{d}{\omega_s} \psi_{qs} + \frac{\omega}{\omega_s} \psi_{ds} + r_s i_{ss}$$

$$U_{os} = \frac{d}{\omega_s} \psi_{os} + r_s i_{os}$$

$$U_{qr} = \frac{d}{\omega_b} \psi_{qr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi_{dr} + r_r i_{qr}$$

$$U_{dr} = \frac{d}{\omega_s} \psi_{dr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_s} \right) \psi_{qr} + r_r i_{dr} \quad (3.1.1.23)$$

$$U_{or} = \frac{d}{\omega_s} \psi_{or} + r_r i_{or}$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{os} \\ \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (3.1.1.24)$$

Denklem 3.1.1.22, Denklem 3.1.1.23 ve Denklem 3.1.1.24 de $\omega = 0$ yazılırsa asenkron motorun sabit dqo eksen takımına indirgenmiş denklemleri bulunur. Bu denklemler Denklem 3.1.1.25 ve Denklem 3.1.1.26 ve Denklem 3.1.1.27 de verilmiştir.

$$U_{qs}^s = \frac{d}{\omega_s} \psi_{qs}^s + r_s i_{sq}^s$$

$$U_{ds}^s = \frac{d}{\omega_s} \psi_{ds}^s + r_s i_{ds}^s \quad (3.1.1.25)$$

$$U_{qr}^{s'} = \frac{d}{\omega_s} \psi_{qr}^{s'} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \psi_{dr}^{s'} + r_r i_{qr}^{s'}$$

$$U_{dr}^{s'} = \frac{d}{\omega_s} \psi_{dr}^{s'} + \frac{\omega_r}{\omega_s} \psi_{qr}^{s'} + r_r i_{dr}^{s'} \quad (3.1.1.26)$$

$$U_{or} = \frac{d}{\omega_s} \psi_{or} + r_r i_{or} \quad U_{os} = \frac{d}{\omega_s} \psi_{os} + r_s i_{os}$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs}^s \\ \psi_{ds}^s \\ \psi_{0s}^s \\ \psi_{qr}'^s \\ \psi_{dr}'^s \\ \psi_{0r}'^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x_{lr}' + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x_{lr}' + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{lr}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{0s}^s \\ i_{qr}'^s \\ i_{dr}'^s \\ i_{0r}'^s \end{bmatrix} \quad (3.1.1.27)$$

Denklem 3.1.1.25 ve 3.1.1.26 da kullanılan s üst indisi denklemlerin durmakta olan bir eksen takımına göre yazıldığını göstermektedir. r üst indisi ise senkron hızda dönen eksen takımına göre yazılmış denklemleri belirtir. Denklem 3.1.1.22, Denklem 3.1.1.23 ve Denklem 3.1.1.24 de $\omega = \omega_s$ yazıldığında asenkron motorun senkron hızda dönen dqo eksen takımına indirgenmiş denklemleri bulunacaktır. Denklem 3.1.1.28 ile verilen rotor gerilim denklemleri hariç, her iki durum için yazılacak bütün denklemler birbirinin aynı olacaktır.

$$U_{qr}^r = \frac{p}{\omega_s} \psi_{qr}^r + \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \psi_{dr}^r + r_r' i_{qr}^r \quad (3.1.1.28)$$

$$U_{dr}^r = \frac{p}{\omega_s} \psi_{dr}^r - \left(\frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \right) \psi_{qr}^r + r_r' i_{dr}^r$$

Denklem 3.1.1.30, Denklem 3.1.1.29 da verilen tanımlar ve Denklem 3.1.1.27 kullanılarak elde edilen toplam akı eşitliklerini ile bunlara bağlı olarak stator ve rotor dq eksenli akımlarını göstermektedir .

$$\psi_{mq}^s = x_m (i_{qs}^s + i_{qr}'^s) = x_M \left(\frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}'^s}{x_{lr}'} \right)$$

$$\psi_{md}^s = x_m (i_{ds}^s + i_{dr}'^s) = x_M \left(\frac{\psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{U_{dr}^r}{x_{lr}'} \right) \quad (3.1.1.29)$$

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x_{lr}'}$$

olmak üzere

$$\begin{aligned}\psi_{qs}^s &= x_{ls} i_{qs}^s + \psi_{mq}^s \Rightarrow i_{qs}^s = \frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} \\ \psi_{ds}^s &= x_{ls} i_{ds}^s + \psi_{md}^s \Rightarrow i_{ds}^s = \frac{\psi_{ds}^s - \psi_{md}^s}{x_{ls}} \\ \psi_{qr}^s &= x_{lr} i_{qr}^s + \psi_{mq}^s \Rightarrow i_{qr}^s = \frac{\psi_{qr}^s - \psi_{mq}^s}{x_{lr}} \\ \psi_{dr}^s &= x_{lr} i_{dr}^s + \psi_{md}^s \Rightarrow i_{dr}^s = \frac{\psi_{dr}^s - \psi_{md}^s}{x_{lr}}\end{aligned}\tag{3.1.1.30}$$

Buraya kadar anlatılanlar uyarınca abc eksen takımında faz gerilimleri U_a , U_b , U_c olan bir asenkron motorun sabit dqo eksen takımında yazılmış stator gerilim denklemleri Denklem 3.1.1.31 ile verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}U_{qs} &= \frac{3}{2}U_{ays} - \frac{1}{3}U_{bys} - \frac{1}{3}U_{cys} - U_y \\ U_{ds} &= \frac{1}{\sqrt{3}}U_{cys} - U_{bys} \\ U_{os} &= \frac{1}{3}(U_{ays} + U_{bys} + U_{cys}) - U_y\end{aligned}\tag{3.1.1.31}$$

Yukarıdaki denklemde U_y yıldız bağlı stator sargısının yıldız noktasının kaynağın yıldız noktasına göre gerilimi ve U_{ay} , U_{by} , U_{cy} stator faz gerilimlerinin stator yıldız noktasına göre değeridir. Her iki yıldız noktası arasında Z_y değerinde bir empedans bulunmaktadır. Faz gerilimlerinin dengeli ve sinüzoidal olması durumunda $U_y = 0$ olacak ve denklemlerde yer alan gerilim değerleri U_{as} , U_{bs} ve U_{cs} ile değiştirilecektir. Bu durumda Z_y empedansı ve stator akımının sıfır bileşeni de sıfıra eşit olacaktır.

Rotor gerilimleri, dengeli ve sinüzoidal gerilim kaynakları kabulüyle, senkron hızda dönen eksen takımına göre yazıldığında Denklem 3.1.1.32 elde edilir. Rotor gerilimlerinde dengesizlik olması durumunda dengesiz stator gerilimleri durumunda söylenenler burada da geçerli olacaktır.

$$U'_{qr} = \frac{2}{3}U'_{ar} - \frac{1}{3}U'_{br} - \frac{1}{3}U'_{cr}$$

$$U'_{dr} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U'_{cr} - U'_{br}) \quad (3.1.1.32)$$

$$U'_{or} = \frac{1}{3}(U'_{ar} + U'_{br} + U'_{cr})$$

Senkron hızda dönen eksen takımında yazılmış rotor denklemlerinin durmakta olan bir eksen takımına dönüştürülmesi için Denklem 3.1.1.33 de verilen bağıntılar kullanılır.

$$U'^s_{qr} = U'^r_{qr} \cos \theta_r + U'^r_{dr} \sin \theta_r$$

$$U'^s_{dr} = -U'^r_{qr} \sin \theta_r + U'^r_{dr} \cos \theta_r \quad (3.1.1.33)$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt + \theta_r(o)$$

Isıl analiz için gerekli büyüklükleri abc eksen takımına göre yazılmış olan akım denklemleridir. Akımların dqo eksen takımından abc eksen takımına dönüştürülmesi Denklem 3.1.1.34, Denklem 3.1.1.35 ve Denklem 3.1.1.36 da gösterilmiştir.

$$i_{as} = i^s_{qs} + i^s_{os}$$

$$i_{bs} = \frac{1}{2}i^s_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}i^s_{ds} + i^s_{os} \quad (3.1.1.34)$$

$$i_{cs} = \frac{1}{2}i^s_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}i^s_{ds} + i^s_{os}$$

$$i'^r_{qr} = i^s_{qs} \cos \theta_r - i^s_{ds} \sin \theta_r \quad (3.1.1.35)$$

$$i'^r_{dr} = i^s_{qs} \sin \theta_r + i^s_{ds} \cos \theta_r$$

$$i'_{ar} = i'_{qr} + i'_{or}, i'_{br} = -\frac{1}{2}i'_{ar} - \frac{\sqrt{3}}{2}i'_{dr} + i'_{or}, i'_{cr} = \frac{1}{2}i'_{qr} + \frac{\sqrt{3}}{2}i'_{dr} + i'_{or} \quad (3.1.1.36)$$

Asenkron motorun gerek dinamik gerek sürekli hal analizinde önemli bir büyüklük olan kayma bağıl rotor hızının senkron hıza oranı olarak tanımlanır. Denklem 3.1.1.37 bu tanımın matematiksel ifadesidir.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3.1.1.37)$$

Asenkron motorun rotor direnci kayma tarafından belirlenir. Bu etki özellikle akım yığılmalı motorlar olarak adlandırılan yüksek çubuklu rotor kafeslerine sahip motorlarda kendisini gösterir. Akım yığılmalı motorlarda rotor akım ve kaçak akısının oluşun üst kısımlarında daha yoğun olacak şekilde düzensiz dağılması nedeniyle rotor direnci artar. Deri etkisi olarak da adlandırılan bu olay, kafes çubuk yüksekliğine ve rotorun kaymasına bağlı olup, rotor frekansının yüksek olduğu kalkış ve frenleme durumlarında etkilidir. Rotor frekansının küçük olduğu nominal çalışma noktasında etkisizdir. Kalkış sırasında, başka bir deyişle yüksek kayma değerlerinde, rotor direnci büyüktür ve nominal hıza yaklaştıkça rotor direnci azalır. Denklem 3.1.1.38 rotor direncinin kalkış sırasında kaymaya bağlı olarak değişimini göstermektedir.

$$r'_r = (r'_{ry} - r'_m)s + r'_{rn} \quad (3.1.1.38)$$

Yukarıdaki denklemde r'_m nominal kaymadaki rotor direnci ve r'_r herhangi bir kaymadaki rotor direncidir. r'_{ry} ise kısıadevre durumundaki rotor direnci olup, Denklem 3.1.1.39 ile hesaplanır.

$$r'_{2k} = \frac{m_k}{i_k^2} \quad (3.1.1.39)$$

Yukarıdaki denklemde m_k kısıadevre momentinin, i_k ise nominal gerilimde kısıadevre akımının birim değerleridir.

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \theta_1) + \theta_1 - \theta_0 \quad (3.1.1.40)$$

3.1.2. Mekanik Model

Toplam altı sargıya sahip 3 fazlı bir asenkron motorun abc eksen takımında yazılmış giriş gücünün abc eksen takımında yazılan ani değer ifadesi denklem 3.1.2.1de verilmiştir.

$$P_g = U_{sa} i_{as} + U_{bs} i_{bs} + U_{cs} i_{cs} + U_{ar} i_{ar} + U_{br} i_{br} + U_{cr} i_{cr} \quad (3.1.2.1)$$

Stator ve rotor gerilimlerine ilişkin Bölüm 3.1.1 de verilen değerler yerlerine yazılırsa dq0 eksen takımı için giriş gücünün ani değeri Denklem 3.1.2.2 de olduğu gibi elde edilir.

$$P_g = \frac{3}{2} (U_{qs} i_{qs} + U_{ds} i_{ds} + U_{os} i_{os} + U_{qr} i_{qr} + U_{dr} i_{dr} + U_{or} i_{or}) \quad (3.1.2.2)$$

Stator ve rotor gerilimlerinin Denklem 3.1.1.25 ve Denklem 3.1.1.26 de verilen değerleri yukarıdaki denklemde yerlerine yazıldığında, $i^2 r$ çarpanı içeren terimler, $id\psi$ çarpanı içeren terimler ve $i\psi\omega$ çarpanı içeren terimler olmak üzere üç tip terim elde edilir. İlk gruptaki terimler motorun bakır kayıplarını, ikinci gruptaki terimler motorda magnetik alanda depo edilen enerjinin değişimini, üçüncü gruptaki terimler ise mekanik güce dönüştürülen elektriksel gücü göstermektedir. Bu son gruptaki terimlerin toplamının motorun mekanik açısal hızına bölünmesi, dq0 eksen takımında motorda endüklenen momenti verir. Denklem 3.1.2.3 momentin Newton-metre cinsinden matematiksel ifadesini içermektedir.

$$M_m = \frac{3}{4\omega_s} P \left[\omega (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr}) \right] \quad (3.1.2.3)$$

Yukarıdaki denklemde, eşitliğin sağ yanındaki parantez içinde bulunan ilk terim, Denklem 3.1.1.16'nın yardımıyla, aşağıda verildiği şekilde düzenlenebilir.

$$\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} = -(\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr}) = L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (3.1.2.4)$$

Buna göre motorda endüklenen moment için aşağıdaki denklemle verilen eşitlikler yazılabilir. Bu eşitliklerde motor momentini Newton-metre cinsinden verilmiştir.

$$M_m = \frac{3}{4}P(\lambda'_{qr}i'_{dr} - \lambda'_{dr}i'_{qr}) = \frac{3}{4}P(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) = \frac{3}{4}PL_m(i'_{dr}i_{qs} - i'_{qr}i_{ds}) \quad (3.1.2.5)$$

Dönme hareketi yapan sistemlerin dinamiğine ilişkin temel denklem eylemsizlik momentinin, ivmelendirici momente eşitlenmesiyle bulunur. Denklem 3.1.2.6 da verilen bu denklemde, M_m motor momentini, M_L motorun milindeki yük momentini göstermektedir. J eylemsizlik momenti olarak adlandırılır ve dönme hareketi yapmakta olan bir sistemin hız değişimine karşı direncini gösterir.

$$M_m - M_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.1.2.6)$$

Denklem 3.1.2.6 nın Denklem 3.1.1.19 da verilen M_t ifadesine bölünmesiyle motor momenti, yük momenti, eylemsizlik momenti ve motor hızının birim değerleri elde edilmiş olunur.

$$\frac{2J\omega_s}{P} \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \right) = m_m - m_L \quad (3.1.2.7)$$

Denklem 3.1.2.8 le verilen eylemsizlik momentinin birim değerinin yukarıdaki denklemde yerine yazılmasıyla Denklem 3.1.2.9 elde edilir. H eylemsizlik sabiti olarak da adlandırılır ve senkron hızda dönmekte olan kütlelerin kinetik enerjisinin, anma görünür gücüne oranı olarak tanımlanır.

$$H = \frac{J\omega_s^2}{2S_i} \quad (3.1.2.8)$$

$$2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \right) = m_m - m_L \quad (3.1.2.9)$$

Isıl analizde Denklem 3.1.2.5 in Denklem 3.1.2.4 de yerine yazılmasıyla bulunan ifadenin zamana göre integre edilmesi ile motorun bağıl hızı hesaplanmaktadır. Bu değer, Denklem 3.1.1.37 de kullanılarak motorun kayması ve buna bağlı olarak Denklem 3.1.1.38 e göre rotor direnci elde edilir.

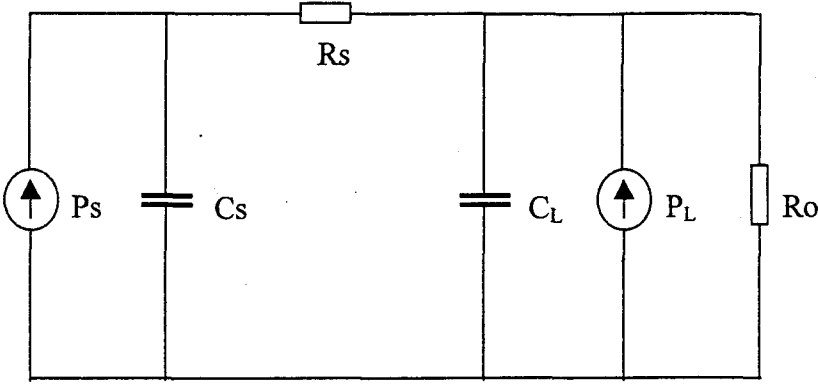
3.1.3. Isıl Model

Modelin ısı kısmı temelde toplu parametrelili bir modeldir ve kabuk modeline de benzerlikler taşır. Bölüm 1.3 de asenkron motorun toplu parametrelili modeli verilmişti. Zaman, yazılım ve donanım tasarrufu açısından bu model üzerinde de çeşitli sadeleştirilmeler ön görülebilir. Sözgelimi kim araştırmacılar tarafından [3,11,12] stator ve rotor ısı açıdan bağımsız birer devre olarak ele alınmış, her bir devre birer ısı kapasite ve frekansla değişen birer ısı direnç elemanı ile tanımlanmıştır. Kimi çalışmalarda [13] benzer bir yaklaşımla sadece rotor devresi incelenmiştir. Başka bir yaklaşım [14] stator ve rotorun ısı açıdan kuplajlı devreler olarak kabul edilip her iki parça birer ısı kapasite ve birer dirençle modellenirken bu iki kısım arasında da ısı aktarımını temsil eden bir direnç kullanılması biçiminde olmuştur. Bir diğer çalışmada ısı açıdan bağımsız rotor ve stator devrelerinin herbiri için tek bir ısı kapasite ve frekansla değişen bir ısı direnç, birim değer cinsinden tanımlanmıştır[16].

Özellikle kalkış anında motorun korunmasına yönelik çalışmalarda iki noktanın sıcaklığının bilinmesi büyük önem taşır. Bu noktalar stator ve rotor sargılarıdır. Isıl model bu noktalardaki ısı artışını belirlemek üzere oluşturulmuştur.

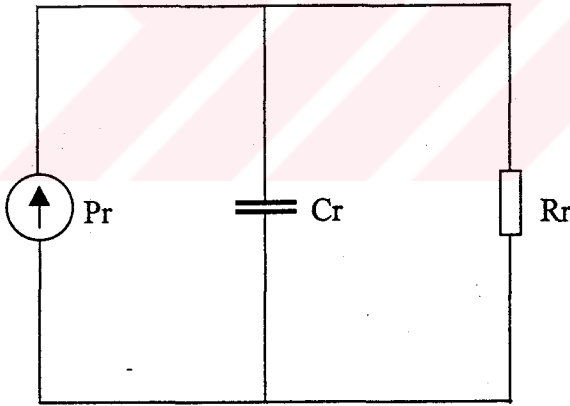
Hava aralığının rotor ve stator arasında ısı bir bariyer olduğu kabul edilir. Özellikle ısınma açısından adiabatik olan, başka bir deyişle ısı üretiminin yüksek, ısı kaybının ise düşük olduğu kalkış sürecinde, hava aralığının ısı aktarımına engel olarak kabul edilmesi hiçbir sorun yaratmayacaktır. Yapılabilecek bir diğer kabul stator sargısından uç sargısı yönünde ısı aktarımının ihmal edilmesidir. İletken kısımların ısı dirençleri yaltnklara göre çok düşüktür. Öte yandan, rotor sargısı ile rotor laminasyonu ve laminasyon ile mil arası ısı dirençler, rotor sargısı-hava aralığı geçiş direncine göre çok büyüktür. Dolayısıyla, rotor bakır kayıplarına nazaran çok küçük olan sürtünme kayıpları ve kalkış sırasında rotor laminasyonunda oluşacak kısa süreli ve düşük değerli demir kayıplarının da ihmalıyla rotor devresi için sadece rotor sargısı ve hava aralığı arasında bir ısı aktarımı söz konusu olacaktır.

Bu kabuller baz alınarak stator için Şekil 3.1.3.1, rotor için Şekil 3.1.3.2 elde edilir.



Şekil 3.1.3.1 Stator ısı eşdeğer devresi

R_s direnci stator yalıtkanının laminasyon sacına ısı aktarım direncidir. C_s ise iletkenin ısı kapasitesidir. Stator sargısı bakır kayıpları P_s , laminasyonun demir kayıpları ise P_L akım kaynakları ile temsil edilmektedir. R_o direnci laminasyon sacı ile ortam arasındaki ısı aktarımı ile ilgilidir ve demir kısmın iletim direnciyle, demir kısımla ortam arasındaki konveksiyon direncinin toplamıdır. Son olarak C_L gövde ve dışların toplam ısı kapasitesidir.



Şekil 3.1.3.2 Rotor ısı eşdeğer devresi

P_r : rotor bakır kayıpları

R_r : hava aralığı geçiş ısı direnci

C_r : rotor sargısı ısı kapasitesi

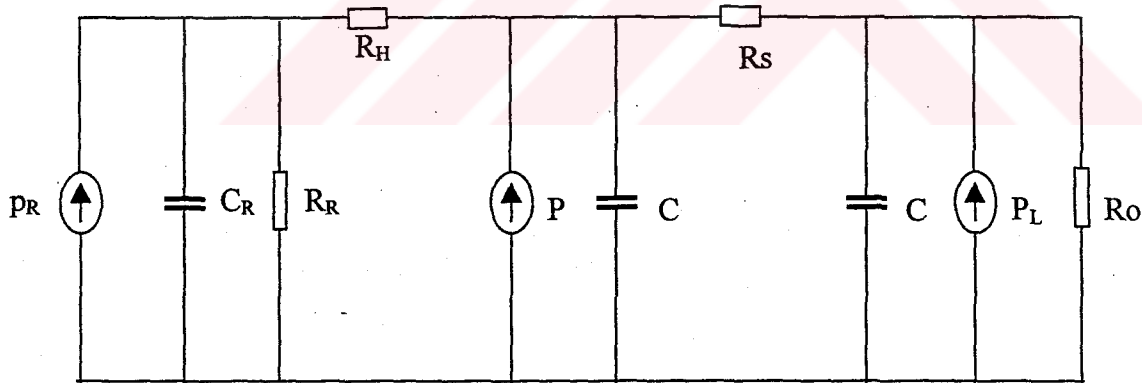
olmak üzere Denklem 3.1.3.1. stator sargısında, Denklem 3.1.3.2 stator laminasyonunda ve Denklem 3.1.3.3 rotor sargısındaki sıcaklık artışını göstermektedir.

$$\dot{S} = \frac{1}{C_s} P_s - \frac{1}{R_s C_s} S + \frac{1}{R_s C_L} N \quad (3.1.3.1)$$

$$\dot{N} = \frac{1}{C_L} P_L + \frac{1}{R_s C_L} S - \frac{R_s + R_o}{R_s R_o C_L} N \quad (3.1.3.2)$$

$$\dot{Z} = \frac{1}{C_r} P_r - \frac{1}{R_r C_r} Z \quad (3.1.3.3)$$

Stator ve rotor devrelerinin birbirinden bağımsız olduğu model, yol alma sırasındaki ısınmayı incelemek için daha uygundur. Ancak uzun süreli bir ısınmanın incelenmesi için rotorla stator arasında gerçekleşen ısı aktarımını tanımlamak gereklidir. Rotordaki bakır kayıpları sonucu açığa çıkan ısı enerjisi hava aralığının ısıl direnci üzerinden stator sargılarına aktarılır. Şekil 3.1.3.3 statorla rotor arasındaki ısı bağlantısını göstermektedir.



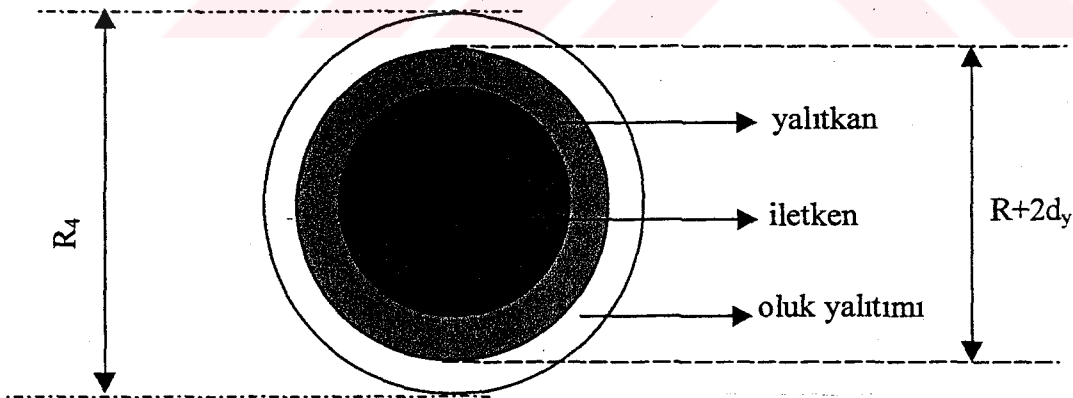
Şekil 3.1.3.4 Asenkron motorun stator ve rotoru arasındaki ısı aktarım

3.2. ISIL MODEL PARAMETRELERİNİN HESABI

Isıl model parametrelerinin hesabı Bölüm 2.3.2 de anlatılan temel silindirik bileşen esas alınarak yapılmaktadır. Ancak burada stator ve rotor yarı uzunlukları için değil, tüm uzunluğa ilişkin parametreler verilecektir. Yarı uzunluk için yapılan modellemeye kayıp gücün de yarısı kullanılmaktadır. Dolayısıyla, tüm uzunluk için verilen parametreler ve kayıp gücün tamamı kullanılarak yapılan sıcaklık hesabı da bir öncekiyle aynı sonucu verecektir.

3.2.1. Stator Yalıtımı Isıl Direncinin Ve Stator Isıl Kapasitesinin Hesabı

Stator yalıtımının ısı direnci Bölüm 2.3.1.4 de tanımlanan, kesidi oluk kesitine eşit silindirik yapıya ilişkin direnç olup iki direncin toplamından oluşur. Bu silindirik yapı, iletken ve onu çevreleyen ısı iletim katsayısı k_y olan yalıtım ile oluk yalıtkanından oluşmaktadır. Dirençlerin ilki, iletken çapı R ve yalıtkan kalınlığı d_y olmak üzere çapı $R+2d_y$, ısı akışına dik uzunluğu L olan iletkenin etrafındaki yalıtkan tabakasının direncidir. İkinci ısı direnç d_o kalınlığında ve L uzunluğundaki oluk yalıtkanının direncidir. Oluk yalıtkanının ısı iletim katsayısı k_o ile gösterilmektedir. Şekil 3.2.1.1 oluktaki iletken ve yalıtkan tabakaların eşdeğer kesitini göstermektedir.



Şekil 3.2.1.1 Eşdeğer oluk kesiti

İletken ve onu çevreleyen yalıtkanın direnci Denklem 3.2.1.1 de gösterilen şekilde hesaplanır.

$$R_{S1} = \frac{d_y}{\pi L k_y (R + 2d_y)} = \frac{1}{2\pi L k_y \left(1 + \frac{R}{2d_y}\right)} \quad (3.2.1.1)$$

Oluk yalıtımı ısıl direncinin hesabı Denklem 3.2.1.2 ile verilmiştir.

$$R_{S1} = \frac{d_o}{\pi L k_o R_4} \quad (3.2.1.2)$$

Statorda n adet oluk bulunduğuna göre toplam stator yalıtımı ısıl direnci aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$R_S = \frac{4}{3} \frac{1}{\pi L k_y n \left(1 + \frac{R}{2d_y}\right)} + \frac{d_o}{\pi L k_o n R_4} \quad (3.2.1.3)$$

Bu denklemin sağ tarafındaki ilk terimin paydasında yer alan $1 + \frac{R}{2d_y}$ ifadesi doluluk oranı olarak adlandırılır ve oluktaki toplam bobin alanının, bu alandan bakır kesidi çıkarıldıktan sonra kalan alana bölümüne eşit alınacaktır. Denklemin sağ tarafındaki $\frac{4}{3}$ katsayısının kullanılma nedeni şu şekilde açıklanabilir: Silindirik sargı modeli etrafında sıcaklık eşit olarak dağıldığı için R_{S1} direnci (eşitliğin sağ yanındaki ilk terim) paralel bağlı dört direncin eşdeğeri olarak düşünülebilir. Bu durumda paralel bağlı her bir direncin değeri R_{S1} direncinin dört katı olacaktır. Rotorla stator arasında ısı kuplaj bulunduğunda paralel dirençlerden biri hava aralığı ile stator sargısı arasındaki konveksiyon direncine seri bağlı olarak ele alınır ve dolayısıyla dirençlerin geri kalan üçünün eşdeğeri kullanılır. Oluk yalıtkanı direnci de paralel bağlı dört direncin eşdeğeri olarak ele alınabilse de literatürde yapılan çalışmalarda oluk yalıtkanının ayrı olarak ele alınması eğilimi baskındır.

Stator sargısının ısıl kapasitesi Denklem 3.2.1.4 ile verilmiştir.

$$C_S = c_{cu} \rho_{cu} A_{cu} L n \quad (3.2.1.4)$$

Yukarıdaki denklemde c_{cu} bakırın özgül ısısı, ρ_{cu} bakırın özgül ağırlığı ve A_c bakır kesitidir.

3.2.2. Stator Laminasyonunun Isıl Direnci Ve Isıl Kapasitesi

R_L ısıl direnci üç ısıl direncin toplamından oluşmaktadır; stator boyunduruğunun ortalama sıcaklığa ilişkin düğümünden gövdeye kadar olan demir kısmın direnci, laminasyon-gövde temas direnci, ve gövdeden ortama ısı aktarımına ilişkin konveksiyon direnci.

Bu dirençler sırasıyla Denklem 3.2.2.1, Denklem 3.2.2.2 ve Denklem 3.2.2.3 ile verilmiştir.

$$R_{L1} = \frac{1}{k_{fe} L \pi} \left(1 - \frac{2r_2^2 \ln \frac{r_1}{r_2}}{r_1^2 - r_2^2} \right) \quad (3.2.2.1)$$

$$R_{L2} = \frac{1}{\pi h_c L r_1} \quad (3.2.2.2)$$

$$R_{L3} = \frac{1}{h_{1r} A} \quad (3.2.2.3)$$

r_1 stator dış çapı

r_2 : dış dibi yarıçapı

k_{fe} : laminasyon sacının ısıl iletkenliği

A : gövdenin hava ile temas eden yüzeyi

h_c ısıl temas katsayısı olup, gövdeyle laminasyon arasındaki sıkı geçme temas basıncının fonksiyonudur. Gövde ve laminasyon boyutları ile malzeme özellikleri kullanılarak basınç değerine ilişkin kestirim yapılabilir. Temas basıncının düşük değerleri için deneysel olarak elde edilen eğrilerden faydalanılır[8].

h_{1r} gövde ile ortam arasındaki ısı geçişine ilişkin konveksiyon katsayısıdır. R_{L3} direnci deneysel yöntemle hesaplanır. Sabit bir yük momenti altında ısısal dengeye

ulaşıncaya kadar çalışan motorun toplam kayıpları ve sıcaklık artışı ölçülerek Denklem 3.2.2.4 de yerine yazılarak gövde-ortam geçiş direnci bulunabilir.

$$Q = h_{lr} A (\theta_2 - \theta_1) \quad (3.2.2.4)$$

θ_1 motorun başlangıç sıcaklığı (ortam sıcaklığı), θ_2 ise deney sonundaki sıcaklığıdır.

Denklem 3.2.2.5, ortalama sıcaklık düğümü ile yukarıdaki denklemde verilen R_{L1} ısıl direnci arasına Bölüm 2.3.2 de anlatıldığı üzere bağlı bulunan negatif direncin değerini vermektedir

$$R_{L4} = \frac{-1}{2kL\pi(r_1^2 - r_2^2)} \left(r_1^2 + r_2^2 - \frac{4r_1^2 r_2^2 \ln \frac{r_1}{r_2}}{r_1^2 - r_2^2} \right) \quad (3.2.2.5)$$

Laminasyonun ısıl kapasitesi Denklem 3.2.2.6 ile verilmektedir.

$$C_L = c_{fe} \rho_{fe} \pi L (r_1^2 - r_2^2) + \frac{c_{fe} \rho_{fe} \pi L \phi_e (r_2^2 - r_3^2)}{\phi_p} \quad (3.2.2.6)$$

Yukarıdaki denklemde

c_{fe} : laminasyon sacının özgül ısısı

ρ_{fe} : laminasyon sacının özgül ağırlığı

r_3 : dış iç yarıçapı

ϕ_e : eşdeğer dış yayı uzunluğu

ϕ_p : dış adımı

olmak üzere denklemin sağ tarafındaki ilk terim stator gövdesinin, ikinci terim stator dişlerinin ısıl kapasitesidir.

3.2.3. Rotor Isıl Direnci Ve Isıl Kapasitesinin Hesabı

Rotor sargısı, rotor yüzeyini çevreleyen kesintisiz alüminyum bir silindirik tabaka olarak ele alınmaktadır. Bu silindirin eşdeğer çapı r_8 , hacmi kafes çubuklarının toplam hacmine eşit olacak şekilde hesaplanır. Isıl direnci Denklem 3.2.3.1 de verilmiştir.

$$R_{R1} = \frac{1}{kL_{al}\pi} \left(1 - \frac{2r_{81}^2 \ln \frac{r_5}{r_8}}{r_5^2 - r_8^2} \right) \quad (3.2.3.1)$$

Denklem 3.2.3.2, ortalama sıcaklık düğümü ile Yukarıdaki denklemde verilen ısı direnci arasına Bölüm 2.3.2 de anlatıldığı üzere bağlı bulunan negatif direncin değerini vermektedir.

$$R_{R2} = \frac{-1}{2k_{al}L\pi(r_5^2 - r_{81}^2)} \left(r_5^2 + r_8^2 - \frac{4r_8^2 r_5^2 \ln \frac{r_5}{r_8}}{r_5^2 - r_8^2} \right) \quad (3.2.3.2)$$

Rotor yüzeyi ile hava aralığı arasındaki ısı aktarımı Denklem 3.2.3.3 ile tanımlanan konveksiyon direnci üzerinden olur.

$$R_{R3} = \frac{1}{2\pi_s L h_{2r}} \quad (3.2.3.3)$$

h_{2r} konveksiyon katsayısı hava aralığının boyutları, havanın fiziksel parametreleri ve hızı ile akışın karakterine bağlıdır. Stator oluklarının hava aralığında yaratabileceği hava girdapları bu bölgedeki ısı aktarımını etkileyecektir. Bu nedenle hava aralığındaki ısı aktarımı incelenirken hava akışının niteliği belirlenmelidir. Denklem 3.2.3.4 deki koşul sağlandığında hava akışının laminar olduğu kabul edilir[4].

$$Re \leq 41.1 \sqrt{\frac{r_r}{\delta}} \quad (3.2.3.4)$$

Bu denklemde δ Hava aralığının radyal uzunluğu(m), r_r rotor yarıçapıdır(m). Re hava aralığının Reynold sayısı olup Denklem 3.2.3.5 ile tanımlanmıştır.

$$Re = \frac{\delta * v}{\nu} \quad (3.2.3.5)$$

Denklem 3.2.3.5 de v rotorun çevresel hızı (m/s) , ν ise havanın kinematik viskozitesidir (m^2/s).

Reynold sayısının değeri laminar akış kabulüyle Denklem 3.2.3.6 ve Denklem 3.2.3.7 de gösterildiği gibi, boyutsuz bir büyüklük olan ve N_{Nu} ile gösterilen Nusselt sayısını belirler.

$$N_{Nu} = 2, \quad Re \leq 41.1 \quad (3.2.3.6)$$

$$N_{Nu} = 0.23 Re^{0.63} Pr^{0.23} \quad (3.2.3.7)$$

Pr ile gösterilen Prandtl sayısı aşağıdaki denklemle tanımlanır.

$$Pr = \frac{c\nu}{\lambda} \quad (3.2.3.8)$$

c ve λ sırasıyla havanın öz ısı ve ısı iletkenliğidir.

Rotor yüzeyi ile hava aralığı arasındaki ısı akışına ilişkin konveksiyon katsayısı Denklem 3.2.3.9 ile verilmiştir.

$$h = \frac{N_{Nu} \lambda}{\delta} \quad (3.2.3.9)$$

Yukarıdaki denklemlerde r_5 , rotor dış yarıçapı ve k_{al} , alüminyumun ısı iletkenlik katsayısıdır. Rotorun toplam ısı direnci R_R ve ısı kapasitesi C_R aşağıda verilmiştir.

$$R_R = R_{R1} + R_{R2} + R_{R3} \quad (3.2.3.10)$$

$$C_R = c_{al} \rho (a_l \pi L (r_5^2 - r_8^2) + V_h) + c_{fe} \rho_{fe} L A_{diş} \quad (3.2.3.11)$$

3.2.4. Hava Aralığı Isıl Direncinin Hesabı

Bu direnç bir konveksiyon ve biri iletim direncinin toplamından oluşacaktır. İlk direnç hava aralığından stator sargısına aktarılan ısıya ilişkindir. Konveksiyon alanı olarak stator oluk alanı kullanılacaktır. Bu direnç konveksiyon ısı direncinin Denklem 2.1.2.3 ile verilen genel ifadesi ve rotora ilişkin konveksiyon katsayısı kullanılarak bulunur. İkinci ısı direncin değeri Referans [8] den alınmıştır.

$$R_H = \frac{1}{h_{2r} 2\pi r_3} \frac{A_{diş}}{A_{diş} + A_{oluk}} + \frac{1}{2\pi \lambda_y L F n} \quad (3.2.4.1)$$

3.3. ROTOR SARGISINDAKİ BİRİM SICAKLIK ARTIŞININ ISIL LİMİT EĞRİLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Isıl limit eğrileri motorun risk altında olduğu kısadevre, aşırı yüklenme gibi çeşitli durumlarda güvenli olarak çalışmaya devam edebileceği süreyi gösteren akım-zaman grafikleridir. Üretici tarafından bu eğrilerin belirlenmiş olması durumunda makinanın ısı parametrelerinin belirlenmesinde ısı limit eğrilerinden faydalanılabilir.

3.3.1. Stator Isıl Limit Eğrileri

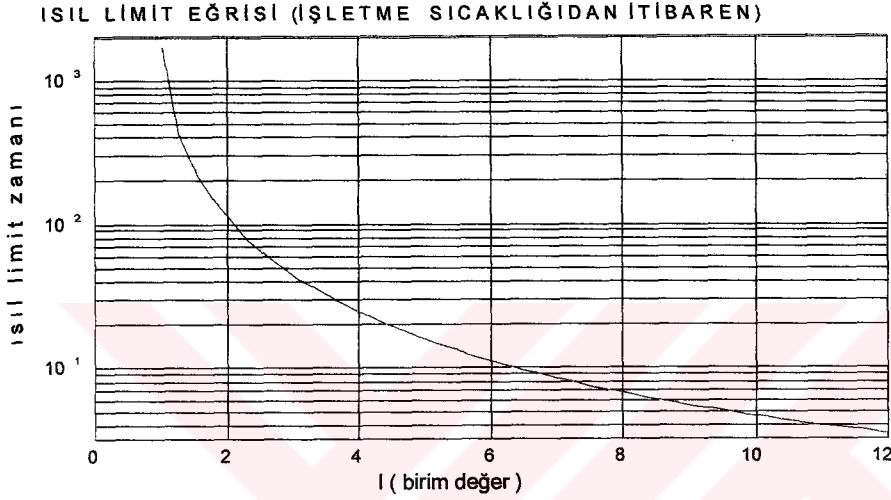
Belirli başlangıç koşulları ve sabit bir akım değeri için, sabit akımın uygulanmasıyla, stator sargı sıcaklığının yalıtım sınıfına göre belirlenen sınır değerine ulaşması arasında geçen süreyi gösteren eğrilerdir. Sabit akımın uygulanmaya başladığı anda motorun ortam ya da işletme sıcaklığında olmasına göre iki ayrı eğri elde edilecektir.

3.3.2. Rotor Isıl Limit Eğrileri

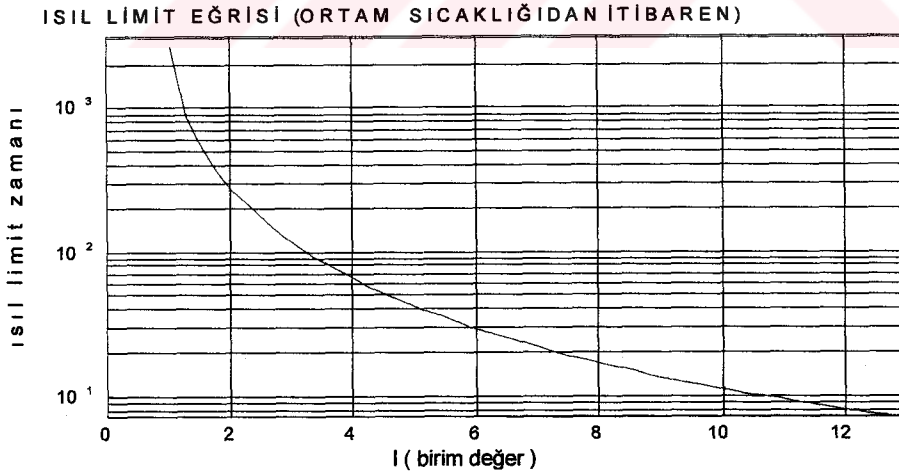
Stator limit eğrilerine benzer biçimde başlangıç sıcaklığının işletme ya da ortam sıcaklığı olmasına göre iki ayrı durum için çizilirler. Eğri üzerindeki noktalar birim kayma için hesaplanmıştır. Başka bir deyişle rotor limit eğrileri hızın sıfır ve akımın (stator ısı limit eğrilerindekine benzer şekilde) sabit olduğu durumda rotor sargısının

sıcaklığının, sınır değere ulaşma süresini belirler. Şekil 3.2.2.1 motorun başlangıçta işletme sıcaklığında olduğu duruma, Şekil 3.2.2.2 ise motorun başlangıçta ortam sıcaklığında olduğu duruma ilişkindir. İkinci eğri verilmemişse, t_i işletme sıcaklığından itibaren, t_o ortam sıcaklığından itibaren ısı limitine ulaşma süresi olmak üzere Denklem 3.2.2.1 e göre t_o bulunabilir[17].

$$\frac{t_i}{t_o} \cong 1.2 \quad (3.2.2.1)$$



Şekil 3.2.2.1 İşletme sıcaklığından itibaren ısı limit eğrisi

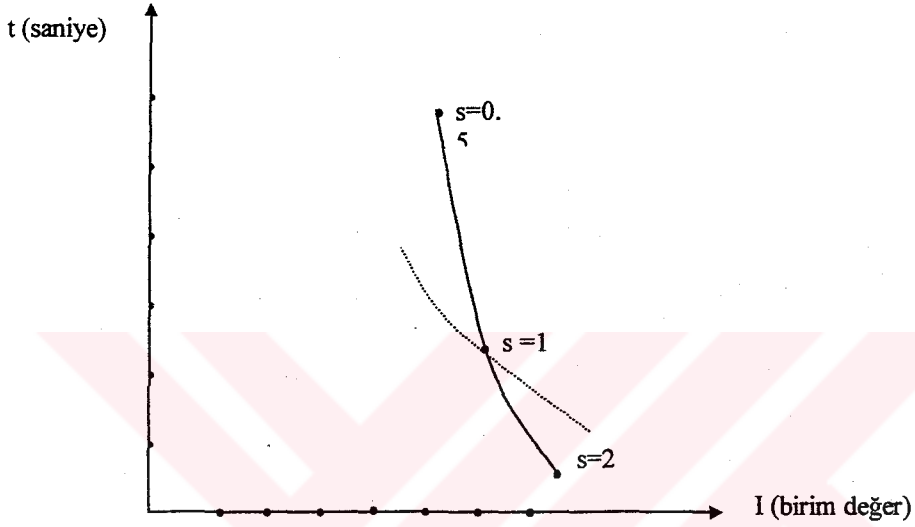


Şekil 3.2.2.2 Ortam sıcaklığından itibaren ısı limit eğrisi

3.3.3. Kaymaya Bağlı Isıl Limit Eğrileri

Bu eğriler belirli bir giriş geriliminde ve başlangıç sıcaklığında sabit bir hızla dönmekte olan motorun, bu hız ve gerilim değerleri tarafından belirlenen akımda

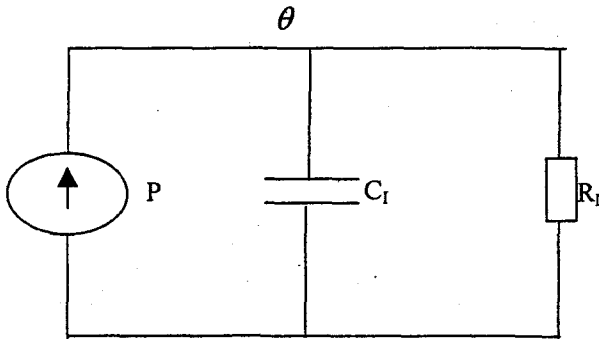
sınır sıcaklığa ulaşması için gerekli zamanı gösteren eğrilerdir. Eğri üzerindeki her nokta aynı başlangıç sıcaklığı ve giriş gerilimi için farklı hızlarda sınır sıcaklığa ulaşma zamanını vermektedir. Şekil 3.3.3.1 de bu eğrilere bir örnek gösterilmiştir. Kesikli çizgiyle gösterilen eğri rotor ısı limit eğrisidir. Bu eğriler, gerek rotor direncinin deri etkisi sonucu değişmesi ve gerek rotor kayıplarının hızın artmasıyla beraber azalması nedeniyle, rotora ilişkin ısı girişinin kaymayla olan değişimini gözönünde bulundurma amacıyla oluşturulan eğrilerdir.



Şekil 3.3.3.1 Kaymaya bağlı ısı limit eğrileri

3.3.4. Isıl Eşdeğer Devrenin Belirlenmesi

Bölüm 3.1.3 de asenkron motorun stator ve rotoru için elde edilen ısı eşdeğer devreler, en genel haliyle bir ısı kaynağına bağlı herhangi bir iletkendeki sıcaklık artışı için, Bölüm 2.1.1 de ısı devreleri ile elektrik devreleri arasında kurulan benzeşim den yararlanılarak Şekil 3.3.4.1 de gösterilmiştir.



Şekil 3.3.4.1 Bir iletkendeki ısı artışının elektriksel eşdeğer devresi

Burada ısı kaynağı $P = I^2 r$, I iletkenden akan akım, r iletken direnci, C_I iletkenin ısı kapasitesi, R_I iletkenin ısı direnci ve θ iletkendeki ısı artışıdır.

Bu şekilde bir elektrik devresi için zaman sabiti Denklem 3.3.4.1 de verildiği gibidir.

$$\tau = RC \quad (3.3.4.1)$$

İletkendeki sıcaklık artışı, Denklem 3.3.4.2 de verilmiştir..

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{I^2 r}{C_I} - \frac{\theta}{R_I C_I} \quad (3.3.4.2)$$

Denklem 3.3.4.2 sabit kayıp için, ısı kayıpları ihmal edilmek şartıyla çözülürse Denklem 3.3.4.3 elde edilir.

$$\theta = \frac{I^2 r}{C_I} t \quad (3.3.4.3)$$

Herhangi bir yükleme durumundaki motor akımı nominal I_n akımının çarpanı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I = k I_n \quad (3.3.4.4)$$

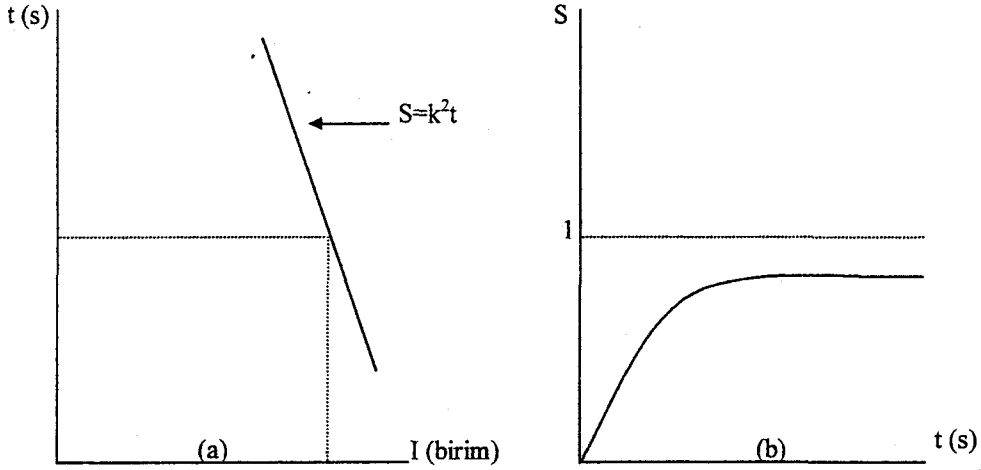
Denklem 3.3.4.4, Denklem 3.3.4.3 de yerine yazılır ve düzenlenirse Denklem 3.3.4.5 elde edilir.

$$\theta \frac{C_I}{I_n^2 r} = k^2 t \quad (3.3.4.5)$$

$\frac{C_I}{I_n^2 r}$ terimi sabit bir değer olduğuna göre Denklem 3.3.4.5 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S = k^2 t \quad (3.3.4.6)$$

Denklem 3.3.4.6 da verilen ifade logaritmik bir birim akım-zaman eksen takımına taşındığında eğimi 2 olan bir ısı limit eğrisi tanımlar. S terimi zaman ekseninde ifade edildiğindeyse, temel sıcaklık izin verilen en büyük sargı sıcaklığı olmak üzere, birim sıcaklığı gösterir. Bu iki eksen takımı Şekil 3.3.4.2.a ve Şekil 3.3.4.2.b de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 3.3.4.2.a)Isıl limit eğrisi b) Birim sıcaklık eğrisi

Kısadevre durumunda iletken sıcaklığının ortam sıcaklığından izin verilen maksimum sıcaklığa çıkma süresi t_0 ve birim kısadevre akımı i_k olmak üzere , maksimum sıcaklık için Denklem 3.3.4.7 elde edilir.

$$S_{\max} = i_k^2 t_0 \quad (3.3.4.7)$$

Aynı akım için işletme sıcaklığından izin verilen maksimum sıcaklığa çıkma süresi t_i ise, S_i işletme sıcaklığı olmak üzere aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$S_{\max} = i_k^2 t_i + S_i = i_k^2 t_0 \quad (3.3.4.8)$$

Denklem 3.3.4.8 den hareketle, işletme sıcaklığı için Denklem 3.3.4.9 elde edilir.

$$S_i = i_k^2 (t_0 - t_i) \quad (3.3.4.9)$$

S_i iletkenin işletme akımı, yani birim akım aktığı durumda iletkenin ulaşacağı sıcaklık olduğuna göre Şekil 3.3.1 de verilen devredeki direncin ifadesi elde edilmiş olur.

$$R_I = i_k^2 (t_0 - t_i) \quad (3.3.4.10)$$

Bir asenkron motorun rotor direncinin kaymaya bağı olarak değişimi Bölüm 3.1.1. de incelenmişti. Nominal rotor akımında rotor sıcaklığının işletme sıcaklığına ulaşma zamanı t_n olmak üzere Denklem 3.3.4.9, rotor direncinin kaymaya bağı değerleri kullanılarak yeniden yazılırsa Denklem 3.3.4.11 elde edilir.

$$i_k^2 r_1 (t_o - t_i) = r_0 t_n \quad (3.3.4.11)$$

$t = \tau$ için sargı sıcaklığı, belirli bir sabit akımda ulaşabileceğı son değerin % 63.21 ine ulaşacaktır. Bu değ er Denklem 3.3.4.11 de yerine yazılırsa

$$0.6321 i_k^2 r_1 (t_o - t_i) = 0.6321 r_0 \tau \quad (3.3.4.12)$$

ifadesi elde edilir.

Denklem 3.3.4.12 den hareketle rotor dirençleri arasında Denklem 3.3.4.13 ile verilen bağıntı yazılabilir.

$$\frac{r_1}{r_0} = \frac{\tau}{i_k^2 (t_o - t_i)} \quad (3.3.4.13)$$

$\tau = RC$ olduğı bilindiğıne göre ısı l kapasitenin değ eri 3.3.4.14 de verildiğı gibidir.

$$C_f = \frac{r_1}{r_0} \quad (3.3.4.14)$$

Isıl direnç ve ısı l kapasitenin Denklem 3.3.4.10 ve Denklem 3.3.4.14 ile bulunan değ erleri Denklem 3.3.4.2 de yerine yerleştirilir. ve P yerine birim kayıp gücü yazılırsa, iletkendeki sıcaklık artışı birim değ er cinsinden elde edilir.

3.4. ISIL LİMİT ZAMANININ HESABI

Gerek Bölüm 3.2, gerek Bölüm 3.3 e göre hesaplanan ısı l devreler için ısı l limit zamanının bulunması Denklem 3.3.4.2 den hareketle yazılan Denklem 3.4.1 in zamana göre zamana göre çözümüyle elde edilir..Isıl limit zamanı Denklem 3.4.2 ile verilmiştir.

$$\theta = I^2 r R_I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3.4.1)$$

$$t = \tau \ln \left(\frac{I^2 r R_I}{I^2 r R_I - \theta} \right) \quad (3.4.2)$$

Motorun herhangi bir I akımı için ortam sıcaklığından ısı limitine ulaşma zamanının bulmak için Denklem 3.4.2 de $\theta = \theta_m - \theta_o$ yazılır. I_m Denklem 3.4.1 e göre , $t \rightarrow \infty$ için sargı sıcaklığını izin verilen maksimum sıcaklığa ulaştıran akım olmak üzere maksimum sıcaklığın ifadesi denklem 3.4.3 ile verilmiştir. Bu ifadenin Denklem 3.4.2 de yerine yazılmasıyla Denklem 3.4.4 elde edilir.

$$\theta_m = I_m^2 r R_I + \theta_o \quad (3.4.3)$$

$$t = \tau \ln \left(\frac{I^2 r R_I}{I^2 r R_I - I_m^2 r R_I} \right) = \tau \ln \left(\frac{I^2}{I^2 - I_m^2} \right) \quad (3.4.4)$$

Motorun nominal akımı I_n olmak üzere işletme sıcaklığı için , Denklem 3.4.3.ve Denklem 3.4.4 e benzer şekilde Denklem 3.4.5 ve Denklem 3.4.6 elde edilir.

$$\theta_i = I_n^2 r R_I + \theta_o \quad (3.4.5)$$

$$t = \tau \ln \left(\frac{I^2 r R_I}{I^2 r R_I - I_n^2 r R_I} \right) = \tau \ln \left(\frac{I^2}{I^2 - I_n^2} \right) \quad (3.4.6)$$

Yukarıdaki denklemler ancak $I > I_m$ şartını sağlayan akımlar için çözümlüdür.

Herhangi bir I akımı için işletme sıcaklığından ısı limitine ulaşma zamanı, aynı akım için ortam sıcaklığından izin verilen maksimum sıcaklığa ulaşma süresinden, yine aynı akım için ortam sıcaklığından işletme sıcaklığına çıkartılarak bulunur. Buna göre işletme sıcaklığından ısı limitine ulaşma süresi için Denklem 3.4.7 elde edilir.

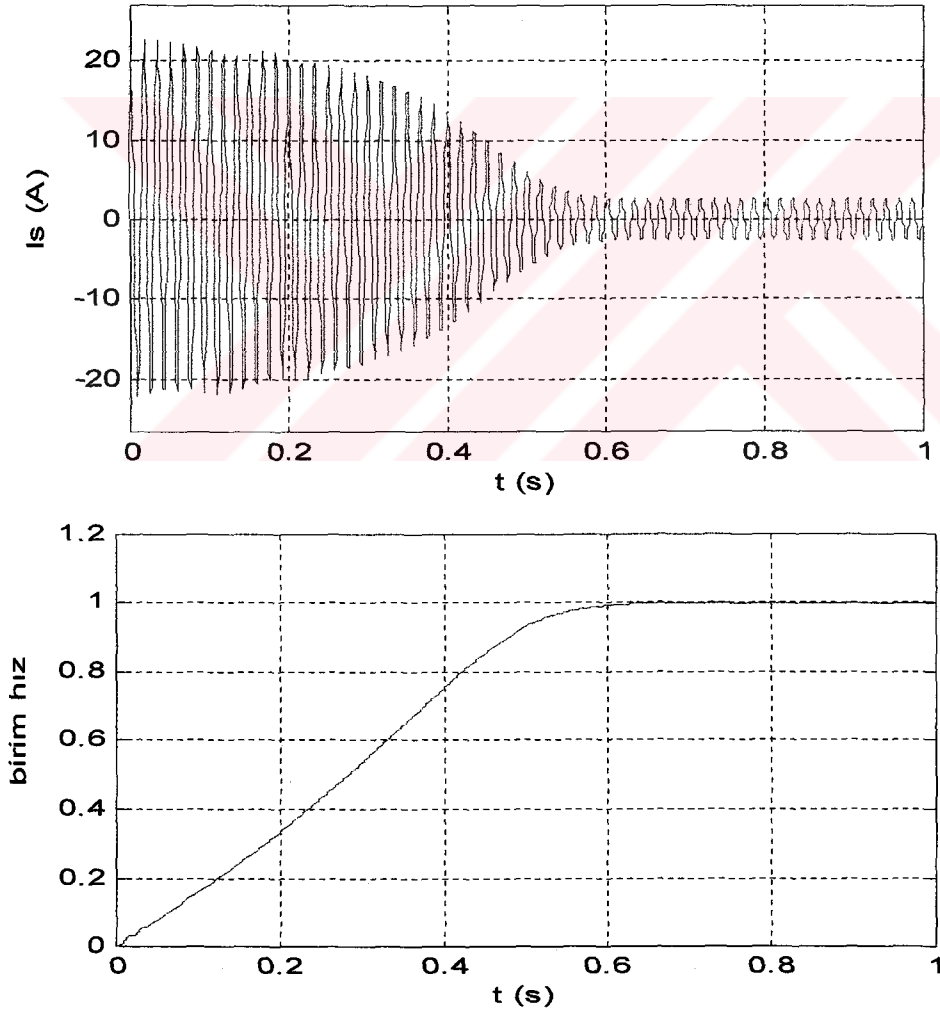
$$T = \tau \ln \left(\frac{I^2}{I^2 - I_m^2} \right) - \tau \ln \left(\frac{I^2}{I^2 - I_n^2} \right) = \tau \ln \left(\frac{I^2 - I_n^2}{I^2 - I_m^2} \right) = \tau \ln \left(\frac{I^2 - 1}{I^2 - SF^2} \right) \quad (3.4.7)$$

SF, motorun servis faktörünü göstermektedir ve Denklem 3.4.8 ile tanımlanmıştır. Servis faktörü NEMA standartlarına göre, motorun belirli şartların sağlanması durumunda nominal çıkış gücünün üzerinde verebileceği gücü belirleyen bir çarpandır. Örneğin 1 kW gücünde bir motorun servis faktörü 1.25 olarak belirtilmişse o motor belirli şartların sağlanması kaydıyla 1.25 kW güç verebilir. “Belirli şartlar” NEMA standartlarına göre, motorun akım ve geriliminde normalde izin verilen sapmaların bulunmamasını ve motorun tam olarak plakasında yazılı gerilim ve frekans değerlerini sağlayabilen kararlı bir şebekeye bağlı olarak çalışıyor olmasını ifade eder. Bunu haricinde Bölüm 1 de anlatılan S2, S3, ve S6 tipi işletmelerde de motor servis faktörünün belirlediği oranda fazla yüklenebilir. Ancak imalatçı firma, servis faktörü oranında fazla yüklenmiş motorun maksimum akımını da belirtmek durumundadır. En yaygın olarak 1, 1.15 ve 1.25 servis faktörü kullanılır. Servis faktörü 1 den büyük olduğu durumda motor plakasında belirtilmelidir.

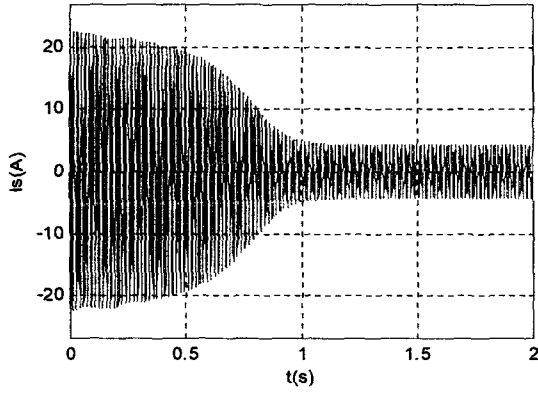
$$SF = \frac{I_m}{I_n} \quad (3.4.8)$$

BÖLÜM 4. ASENKRON MOTORLARDA KALKIŞIN İNCELENMESİ

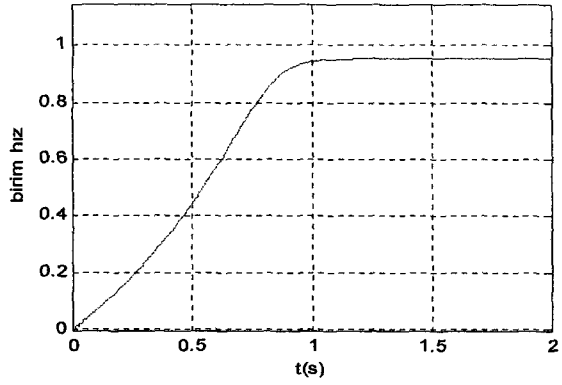
Stator sargılarına gerilim uygulanmasıyla serbest olarak kalkışa geçen bir asenkron motorun kaynaktan çektiği akım , nominal akımının 2-8 katı değerlere ulaşabilir. Şekil 4.1.a ve b 3 kW, 380 V,50 Hz bir motorun yüksüz durumda serbest kalkışına ilişkin akımın ve hızın zamana göre değişimini, Şekil 4.2.a ve b ise aynı motorun 20 N.m lik bir yüke bağlı olarak kalkışını göstermektedir. Sürtünme kayıpları ihmal edildiğinden boşta çalışmada hız birim değere ulaşabilmiştir.



Şekil 4.1 Yüksüz serbest kalkışta a)stator akımı b)birim hız



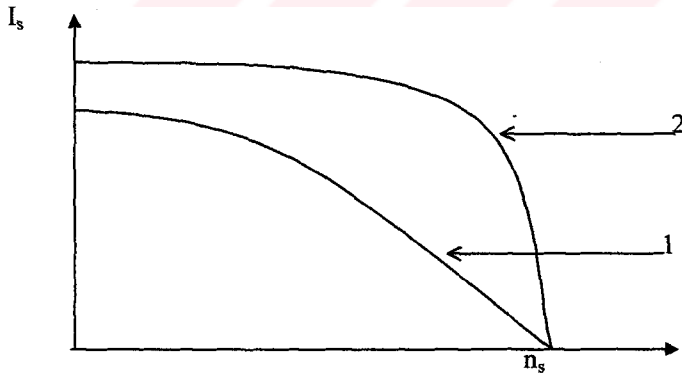
(a)



(b)

Şekil 4.2 20 N.m yük için serbest kalkışta a)stator akımı b)birim hız

Yukarıdaki şekillerde kalkışı incelenen motorun gücünün ve sistemin toplam eylemsizlik momentinin düşük olması nedeniyle kalkış sırasında kısa bir an için yüksek akım çekilmektedir. Büyük güçlü ve eylemsizlik momenti yüksek olan motorlarda ise kalkış süresi artacağı için uzun bir süre yüksek akımların çekilmesi söz konusu olacaktır. Şekil 4.3 büyük ve küçük güçlü motorlarda stator akımının hıza göre değişimini göstermektedir. 1 no'lu eğri küçük güçlü bir asenkron motora, 2 nolu eğri ise büyük güçlü bir asenkron motora aittir.



Şekil 4.3 Stator akımının hıza göre değişimi

Stator akım özdeşlerindeki farklılığın tek nedeni kalkış sürelerinin farklı olması değildir. Denklem 4.1 asenkron motorun statora indirgenmiş rotor akımını vermektedir.

$$I_r' = \frac{U_s}{\sqrt{\left(r_s + \frac{r_r'}{s}\right)^2 + (x_{s\sigma} + x_{r\sigma}')^2}} \quad (4.1)$$

Rotor direncinin küçük olduğu büyük güçlü motorlarda büyük kayma değerleri için akımın kaymadan hemen hemen bağımsız olduğu görülebilir. Stator akımı, rotor akımı ile boşa akımın toplamı olduğuna göre aynı durum stator akımı için de geçerlidir. Kaymanın azaldığı yüksek hız bölgesinde ise akım, kaymayla doğru, dirençle ters orantılı olacaktır. Dolayısıyla büyük güçlü motorlarda kalkıştan sonra stator akımı yüksek değerini uzun bir süre koruyacak ve nominal hıza yaklaştığında akım hızla azalacaktır. Asenkron motorda kalkış akımının azaltmak için ;

1) giriş gerilimi azaltılır

2) rotor direnci artırılır

Bilezikli asenkron motorlarda rotora bilezikler üzerinden bağlanan dirençler kullanılır. Kafesli motorlarda ise direnç ancak akım yığılması yoluyla artırılır. Dolayısıyla kafesin yüksek çubuklu olması ya da ikili-üçlü kafes kullanılması gereklidir. İkili-üçlü kafeslerde de rotor direnci akım yığılması ilkesine göre artırılmaktadır. Ancak bu tip motorlarda akım yığılması etkisi rotor çubuğunun yüksekliğine bağlı olarak oluşan girdap akımlarına dayanmaz. Rotorda dışta yüksek dirençli fakat kaçak endüktansı küçük, küçük kesitli bir kafes bulunur. Kalkışta yüksek rotor frekansının etkisiyle akım dış kafese doğru kayarak kalkış akımını azaltır ve kalkış momentini artırır. Nominal çalışmada ise rotor frekansının küçük olması nedeniyle kaçak reaktanslar önemsizdir ve akım dağılımını rotor dirençleri belirler. Dolayısıyla akım daha çok büyük kesitli düşük dirençli iç kafesten geçer. Asenkron motorda, hızın sıfır, kaymanın 1 olduğu durumdaki moment motorun kalkış momentidir. Maksimum moment değeri “devrilme momenti” olarak adlandırılır ve bu moment değerine ulaşılan kayma değeri de “devrilme kayması”dır.

Bir asenkron motorda “kalkış iyiliği”, kalkış momentinin anma momentine oranının, kalkış akımının anma akımına oranına bölümüyle elde edilen bir sayıyla ifade edilir

ve bu sayının mümkün olduğunca büyük olması istenir. Aşağıdaki denklem momentlerin oranıyla akımların oranı arasındaki bağıntıyı göstermektedir.

$$\frac{M_y}{M_N} = s_N \frac{r_{ry}}{r_m} \left(\frac{I_{sy}}{I_{sN}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Asenkron motorda anma kaymasının artan güçle beraber azaldığı bilinmektedir. Dolayısıyla Denklem 4.2 büyük güçlü motorlarda kalkış momentinin azalışının bir başka ifadesidir.

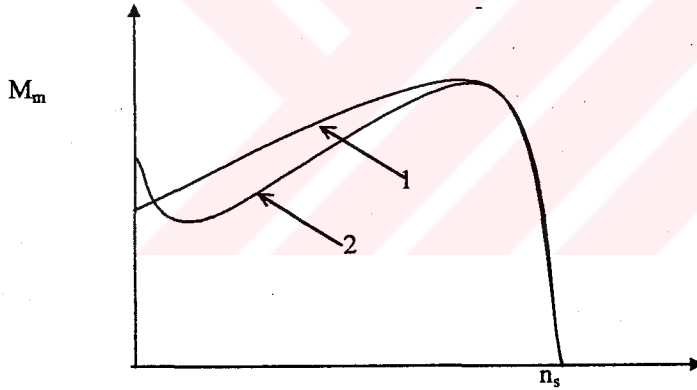
Motor akımının sınırlanması amacıyla motora düşük gerilimle yol verilebilir. Bu, temel olarak ototransformatörler ya da tristörlü güç elektroniği devreleri kullanılarak gerilimin düşük bir değerden nominal değerine kadar ayarlanması biçiminde olur. İyi bilinen bir yöntem de “yıldız-üçgen” yol vermedir. Bu yöntem nominal işletmesinde stator sargıları üçgen bağlı olan motorlara uygulanabilir. Yol verme aşamasında stator sargılarının yıldız bağlı olması nedeniyle sargılar üzerinden geçen akım, sargıların üçgen bağlı olması durumunda geçecek akımdan oranında küçük olacaktır. Ancak Denklem 4.2 ye göre moment de 1/3 oranında azalacaktır. Motorun bir yüke bağlı olarak kalkış yapması gereken durumda, düşük gerilimle kalkış sırasında motorun yükü tahrik edememesi sorunu ortaya çıkabilir. Bunun yanısıra momentin azalması nedeniyle motorun kalkış süresi artacaktır. Bu durum Denklem 4.3 ile ifade edilir. Burada u statora uygulanan gerilimin birim değeridir. Nominal stator gerilimi temel değer olarak alınmıştır. t_{yu} düşük gerilimde, t_{yn} ise nominal gerilimde motorun kalkış süresidir. m_m motor momentinin birim değerini göstermektedir.

$$t_{yu} = t_{yn} \frac{1 - m_m}{u^2 - m_m} \quad (4.3)$$

Stator geriliminin azaltılmasıyla stator akımı azalacak da olsa kalkış akımı hala nominal akımın çok üzerindedir ve yol alma zamanının artmasıyla özellikle büyük güçlü motorlar uzun süreli yüksek akımlara maruz kalacaktır.

Büyük güçlü motorlarda akım yığılması rotor akımını sınırlamasının yanısıra momenti artırıcı etkiye de sahiptir. Şekil 4.4 akım yığılmalı motorların moment özeğrisini göstermektedir. 1 no’lu eğri ideal durumu göstermektedir. Ancak gerçekte akım yığılmasıyla moment artışı arasındaki ilişki bu denli ideal değildir. Büyük

güçlü akım yığılmalı motorlarda $s < s_k$ bölgesinde akım yığılmasını etkisi henüz baskın değildir[çetii]. Dolayısıyla motor momentinin Şekil 4.4 de 1 no''lu eğriyle verilen biçimi yaklaşık olarak geçerlidir. Ancak kaymanın daha büyük olduğu bölgede moment eğrisi değişebilir. Bu değişimin en önemli nedenleri hava aralığındaki magnetik alan ve rotor ampersarımındaki titreşimlerin yol açtığı moment üsttitreşimleri ve yalıtımın yetersiz olduğu kafeslerde rotor akımının bir kısmı rotor demiri üzerinden geçerek yol açtığı rotor ek kayıplarıdır. Bu kayıplar nedeniyle motor momenti anma çalışma bölgesinde azalırken, durma ve yavaşlama sırasında artabilir. Başka bir deyişle kaymanın 0.4 – 1 değerleri için motor momenti azalırken , 1 – 2 değerleri için artacaktır. Kalkış sırasında motor kaymasının 1 den küçük olduğu göz önüne alınırsa, kalkışın hemen ardından momentin azaldığı görülmektedir. Bu durum “semerleşme” olarak da isimlendirilir. Semerleşme nedeniyle motor momentinin yük momentinden daha düşük olması ya da her iki eğrinin yüksek kayma bölgesinde kesişmesi motorun nominal hıza ulaşmasına engel olacak, kalkış başarıyla gerçekleşmediği için, motor yüksek akımlar nedeniyle ısıl açıdan zorlanacaktır.



Şekil 4.4 Akım yığılmalı motorlarda ideal ve gerçek moment özdeşleri

Büyük güçlü motorlarda sıcaklığın limit değerine hızla yaklaşması “ büyüme yasaları” ile de açıklanabilir. Büyüme yasaları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Magnetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluğunun sabit okalması kabulüyle, motor gücü makine boyutunun 4. kuvvetiyle doğru orantılıdır.

$$P \sim L^4$$

- Makinanın kütlesi, boyutun üçüncü kuvvetiyle doğru orantılıdır.

$$m \sim L^3 \sim P^{3/4}$$

- Maliyet kütleyle doğru orantılı olduğuna göre, birim gücün maliyeti, artan güçle azalır.

$$m/P \sim P^{-1/4}$$

- Kayıplar kütleyle doğru orantılı olduğuna göre, artan güçle beraber verim artacaktır.

$$\eta = 1 - \frac{P_v}{P_g} \quad \frac{P_v}{P_g} \sim \frac{L^3}{L^4} \sim \frac{1}{L} \sim P^{-1/4}$$

Buna göre, motor gücü iki katına çıktığında kütle 1.68 kat, boyutlarsa 1.189 kat artacaktır. Makinanın ısı kapasitesi makinanın boyutları (dolayısıyla kütlesi) tarafından belirlendiğine göre, büyük güçlü makinalarda ısı kapasite görelisi olarak düşük ve makinanın sürekli hal sıcaklığına ulaşması daha çabuk olacaktır.

Gerek üretici gerek kullanıcı açısından, motorun uzun bir ömre sahip olması ve bu ömür süresince çalışmasının aksamaması beklenir. Bütün risklerden arınmış bir motor yapılabilecek bile olsa, aşırı boyutlandırılmış ve maliyeti son derece yüksek bir motor olacaktır. Bunun yerine, kabul edilebilir minimum maliyet ve maksimum güvenceyle üretilmiş bir motorun, güvenliği daha da arttıracak ek yöntemlerle korunması tercih edilir.

Elektrik motorları, motor açısından risk yaratacak aşırı yüklenme durumlarına karşı aşırı-yük röleleriyle korunur. Bir aşırı-yük rölesi, önceden belirlenmiş bir değerde devreyi açarak motoru veya sürücü devresini korur. Yaygın olarak kullanılan tip aşırı-akım röleleridir. Aşırı akım röleleri NEMA(National Electrical Manufacturers Association) ve IEC (International Electrotechnical Commission) standartlarına göre açma sınıflarına göre gruplandırılır. Açma sınıfı, aşırı yüklenme durumu meydana geldiğinde rölenin devreyi açması gereken süreyle ilgilidir. Bir aşırı yük rölesi sınıfının belirttiği rakamdan daha küçük ya da eşit bir zaman içinde devreyi açmak zorundadır. Örneğin 10 Sınıfı bir rölenin nominal akımının en az 6 katı (maksimum 10 kat olmak üzere) bir akım söz konusu olduğunda açma süresi maksimum 10 sn ya da bunun altında olmalıdır. Minimum 6 – maksimum 10 birimlik aşırı akım için açma

süreleri aşağıda verilmiştir. Bu aralığın dışında kalan daha yüksek kısadevre akımları için gecikmesiz çalışan magnetik açıcı elemanlar kullanılır.

10A Sınıfı 2-10 s

10 Sınıfı 4-10 s

20 Sınıfı 6-20 s

30 Sınıfı 9-30 s

10 ve 20 Sınıfı röleler motor korumasında yaygın olarak kullanılır. 10 Sınıfı röleler kısa devre durumunda sargı sıcaklığı izin verilen maksimum sıcaklığa hızla ulaşan motorların korunmasında uygunken, 20 Sınıfı röleler uzun yol alma sürelerine ihtiyaç duyan motorlar için uygundur.

Sınıfı ne olursa olsun, rölenin nominal akımının 2 katı akımları 8 dakikanın altında açması beklenir.

Aşırı akım rölelerinin devreyi açmasını gerekli kılan durumlar;

- Yük momentinin aşırı yükselmesi nedeniyle rotorun dönmekte zorlanması ve durması
- Yol alma ya da frenleme zamanının çok uzun olması
- Kaynak gerilimi veya frekansının çok düşük ya da yüksek olması
- Faz kayıpları
- Yetersiz soğutma
- Sürücü devrelerinin anahtarlama frekansının çok yüksek olması

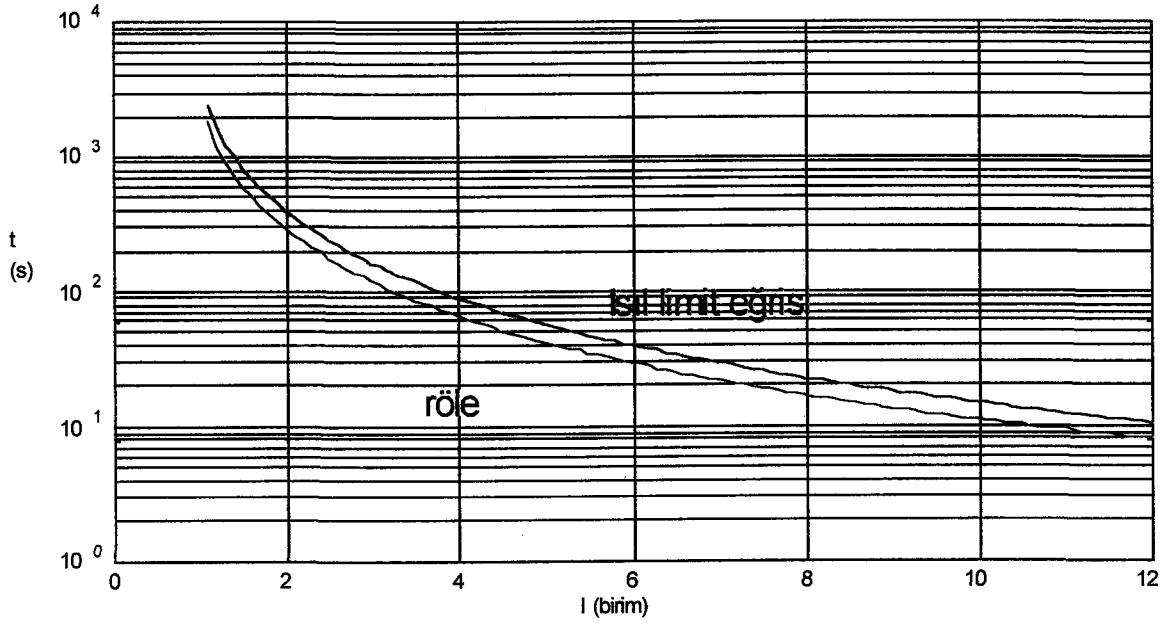
olarak sıralanabilir.

Yukarıda sayılan durumların hiç biri oluşmadığı halde röle açma komutu veriyorsa bu hatalı açma olarak tanımlanır. Hatalı açmanın en yaygın olarak görüldüğü durum, yükleme nedeniyle motorun son hızına ulaşmasının uzun zaman aldığı

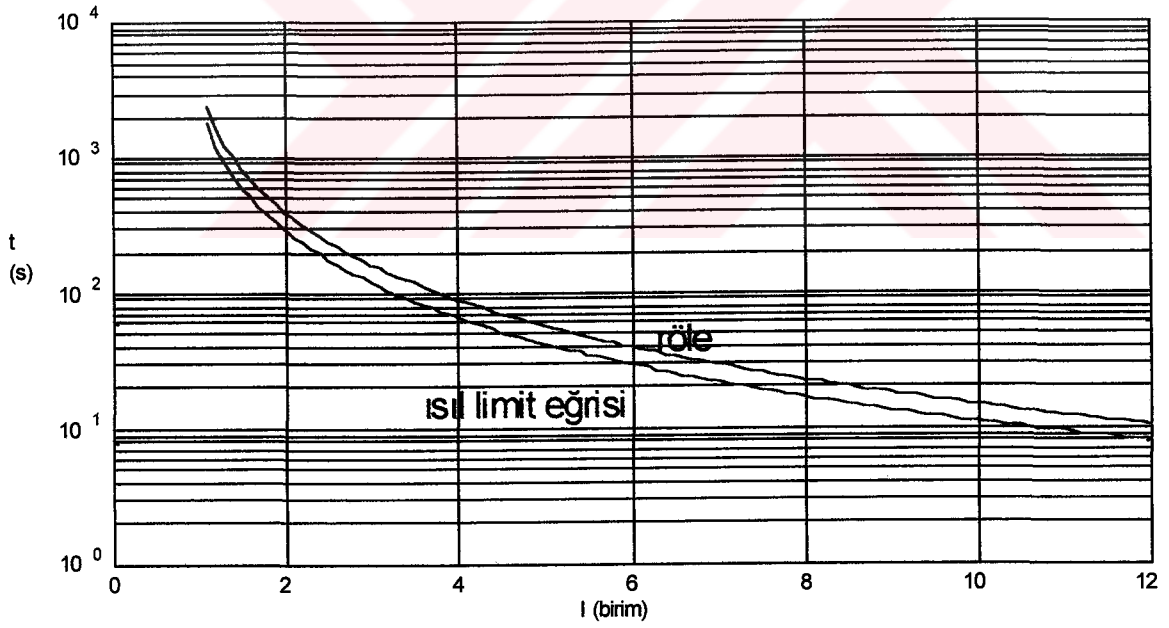
uygulamalardır. Büyük güçlü motorlarda nominal hızın %90-95 i değerine ulaşınca kadar akımın kısa devre akımına yakın bir değerde yaklaşık olarak sabit kaldığı Şekil 4.2 den görülebilir. Buna göre, motorun yavaş ivmelendiği durumlarda, uzun bir süre boyunca kaynaktan yüksek akımlar çekilmesi röle tarafından kısa devre durumu olarak algılanabilir ve hatalı açma komutu verilir. Oysa motorun kalkış sırasında çektiği kısadevre akımı mertebesindeki akımlar, gerçek kısadevre akımları kadar motoru zorlamamaktadır. Bunun bir nedeni, motor nominal hıza yaklaşırken akımın hafifçe azalması, bunun yanı sıra akım yığılmalı motorlarda da rotor direncinin azalması nedeniyle rotor bakır kayıplarının azalmasıdır. Bir diğer neden kısadevre durumunda elektriksel enerjinin tamamı makine içinde ısı enerjisine dönüştürülürken, yol almada enerjinin bir kısmının motorun ivmelenmesi için kullanılmasıdır. Bu nedenle yol alma sırasında motor ısı limitine ulaşmayacaktır.

Geleneksel aşırı akım röleleri ısıyla farklı genleşme katsayılarına sahip bimetal elemanların kullanılması temeline dayanır. Karakteristikleri, Bölüm 3.3 de anlatılan ısı limit eğrilerine benzer i^2t eğrileriyle ifade edilir. Burada önemli olan rölenin karakteristiği ile motorun ısı limit eğrilerinin birbirine uyumlu olmasıdır. Şekil 4.5 rölenin açma karakteristiğinin motorun ısı limit eğrisinin altında kaldığı ve bu nedenle hatalı açmanın meydana gelebileceği bir duruma ilişkindir. Şekil 3.4.6 ise röle açma karakteristiğinin motor ısı limit eğrisinin üzerinde olduğu yetersiz koruma durumuna ilişkindir.

Öte yandan daha yeni bir yöntem olarak yarı iletken teknolojisine dayanan programlanabilir elektronik koruma rölelerinde, rölenin açma karakteristiği olarak motorun dinamik ısı modelinden elde edilen ısı limit eğrileri kullanılmaktadır. Dolayısıyla röle karakteristiği ve motorun ısı limit eğrisi arasında uyumsuzluktan söz edilemez.



Şekil 4.5 Röle açma karakteristiği ile motor ısı limit eğrisi arasındaki uyumsuzluk sonucu hatalı açma



Şekil 4.5 Röle açma karakteristiği ile motor ısı limit eğrisi arasındaki uyumsuzluk sonucu yetersiz koruma

BÖLÜM 5. SİMULASYON SONUÇLARI

Aşağıda plaka değerleri, boyutları verilen ve ısı parametreleri hesaplanan asenkron motorun, boşa çalışmada, nominal yük akımı ve geçici aşırı akım altında stator ve rotor sargılarında meydana gelen ısınma simüle edilmiş ve sonuçlar stator sargısının deneysel olarak belirlenmiş sıcaklığıyla kıyaslanmıştır.

PLAKA DEĞERLERİ

3 kW, 380 V, 50 Hz, 2p=4

pf=0.8

$J=0.0091 \text{ kgm}^2$

$r_s = r_r = 1.25 \text{ ohm}$, $x_s = x_r = 2.869 \text{ ohm}$, $X_m = 68.7$, $r_{fe} = 561.87$

MOTOR BOYUTLARI

Stator dış yarıçapı $r_1 = 75 \text{ mm}$

Diş dış yarıçapı $r_2 = 60 \text{ mm}$

Stator iç yarıçapı $r_3 = 45 \text{ mm}$

Rotor dış yarıçapı $r_5 = 44,8 \text{ mm}$

Rotor diş dibi yarıçapı 28.65 mm

$L = 135 \text{ mm}$

$\delta = 0.4 \text{ mm}$

Stator laminasyon alanı 8180 mm^2

Stator oluk alanı 84.32 mm^2

Stator oluk sayısı $n = 36$

Rotor laminasyon alanı 4162 mm^2

Rotor oluk alanı 44.91 mm^2

Rotor oluk sayısı 28

Stator iletken kesidi 1.5 mm^2 , 36 spir

$2d_y = 0.18 \text{ mm}$

$d_o = 1 \text{ mm}$

STATOR YALITIMI ISIL DİRENCİ

Toplam bakır alanı $1.5 \cdot 32 = 48 \text{ mm}^2$

Toplam sargı alanı $\left(\frac{1.4 + 0.18}{2} \right)^2 \pi \cdot 32 = 70.58 \text{ mm}^2$

Doluluk oranı $\frac{70.58}{(70.58 - 54)} = 4.3$

Oluk alanı $\pi \cdot r_4^2 = 84.32 \text{ mm}^2 \Rightarrow r_4 = 5.18 \text{ mm}$

$$R_s = \frac{4}{3} \frac{1}{\pi \cdot 135 \cdot 0.0002 \cdot 36 \cdot 4.3} + \frac{1}{\pi \cdot 135 \cdot 0.00036 \cdot 10.1} = 0.12 (^\circ\text{C/W})$$

STATOR SARGISI ISIL KAPASİTESİ

$$C_s = 8.96 \cdot 0.385 \cdot 48 \cdot 36 \cdot 135 \cdot 10^{-3} = 900$$

STATOR LAMİNASYONU ISIL DİRENCİ

$$R_{L1} = \frac{1}{\pi \cdot 135 \cdot 0.0669} \left(1 - \frac{2 \cdot 60^2 \ln \frac{75}{60}}{75^2 - 60^2} \right) = 0.007$$

Referans [8] den bulunan h_c değeri ile nüve-karkas temas direnci aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R_{L2} = \frac{1}{\pi * 50 * 135 * 150} = 0.314$$

$$R_{L3} = \frac{1}{h_{1r} A} = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{Q} = \frac{40 - 19}{418.5} = 0.042$$

$$R_{L4} = -\frac{1}{2\pi * 0.0669 * 135(75^2 - 60^2)} \left(75^2 + 60^2 - \frac{4 * 75^2 * 60^2 \ln \frac{75}{60}}{75^2 - 60^2} \right) = -0.003$$

$$R_L \cong 0.34$$

STATOR LAMİNASYONU ISIL KAPASİTESİ

Denklem 3.2.2.6'nın sağ tarafındaki ilk iki terim sırasıyla statör demiri ve dişlerin ısı kapasiteleridir. Bu iki terimin toplamı laminasyonun ısı kapasitesini verecektir. Laminasyonun toplam hacmi bilindiğine göre ısı kapasitesi hacim*özellik*öz ısı çarpımından bulunabilir. Eşitliğin sağ yanındaki üçüncü terim karkas, kanatlar ve kapakların toplam ağırlığıdır.

$$C_L = 7.87 * 10^{-3} * 0.444 * 135 * 8180 + 6400 * 0.9 = 9700$$

ROTOR ISIL DİRENCİ

$$R_{R1} = \frac{1}{0.09 * 135 * \pi} \left(1 - \frac{2 * 40.08^2 \ln \frac{44.8}{40.08}}{44.8^2 - 40.08^2} \right) = 0.0028$$

Denklem 3.2.3.2 den

$$R_{R2} = -\frac{1}{2\pi * 0.09 * 135(44.8^2 - 40.08^2)} \left(44.8^2 + 40.08^2 - \frac{4 * 44.8^2 * 40.08^2 \ln \frac{44.8}{40.08}}{44.8^2 - 40.08^2} \right)$$

$$= -0.00088$$

Fan veriminin yaklaşık %80 olduğu kabulüyle

HAVA ARALIĞI ISIL DİRENCİ

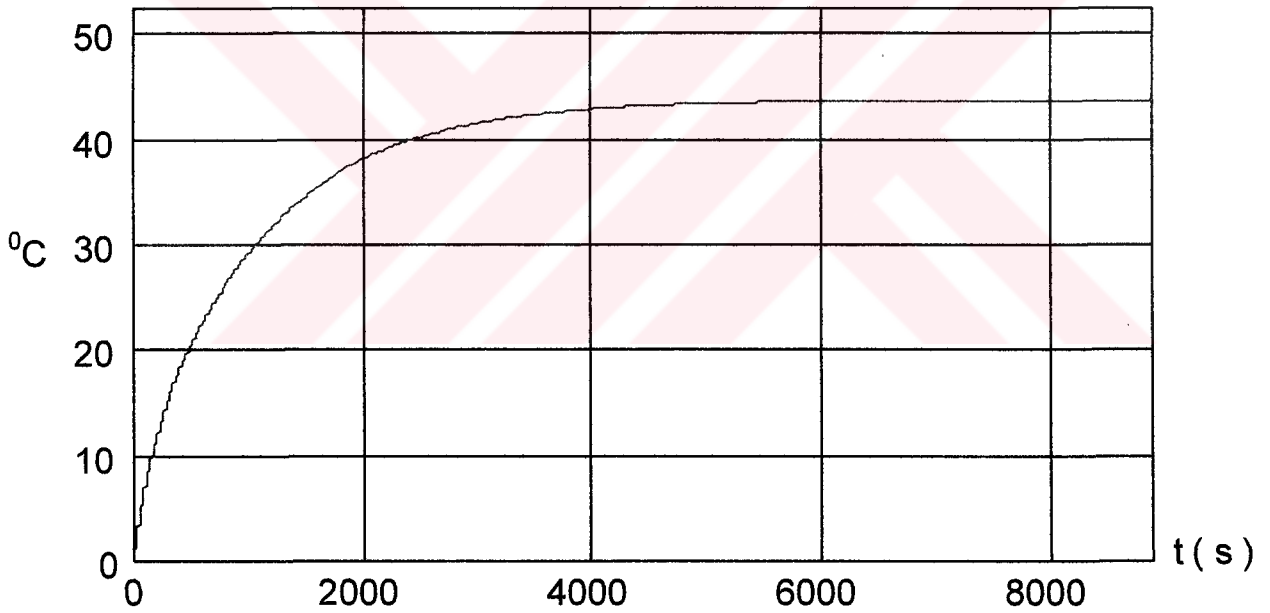
$$R_H = \frac{1}{h_{2r} 2\pi r_3} \frac{A_{diş}}{A_{diş} + A_{otuk}} + \frac{1}{2\pi \lambda_y L F n} =$$

$$\frac{1}{53.36 * 90 * 135 * \pi} \frac{1818}{4850} + \frac{1}{2 * \pi * 0.0002 * 135 * 4.3 * 36} = 0.222$$

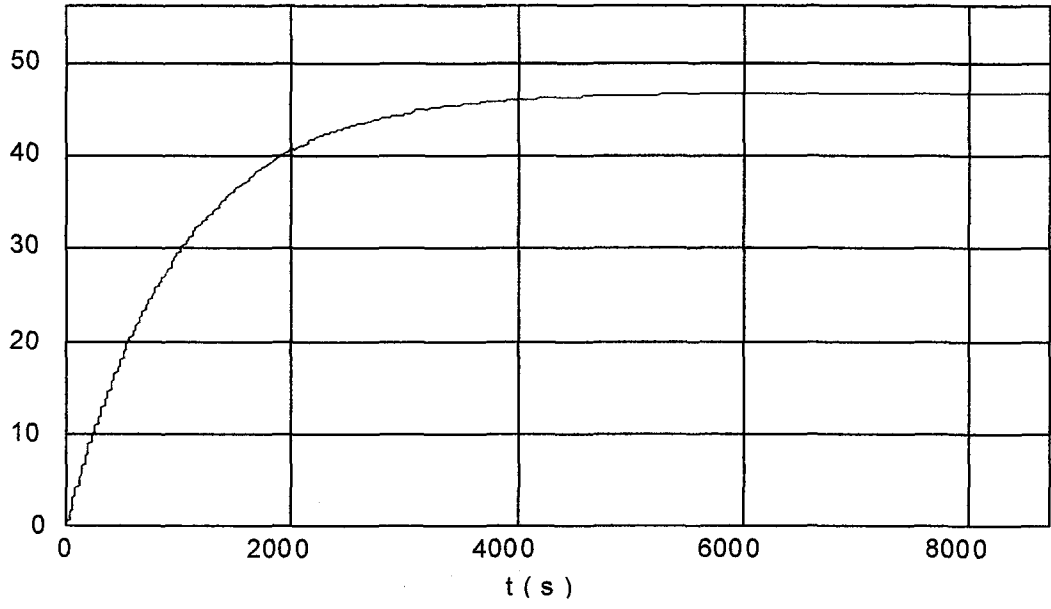
Motorun ısı parametreleri aşağıda topluca verilmiştir.

$$R_S = 0.12, \quad R_L = 0.35, \quad R_R = 0.5, \quad R_H = 0.225$$

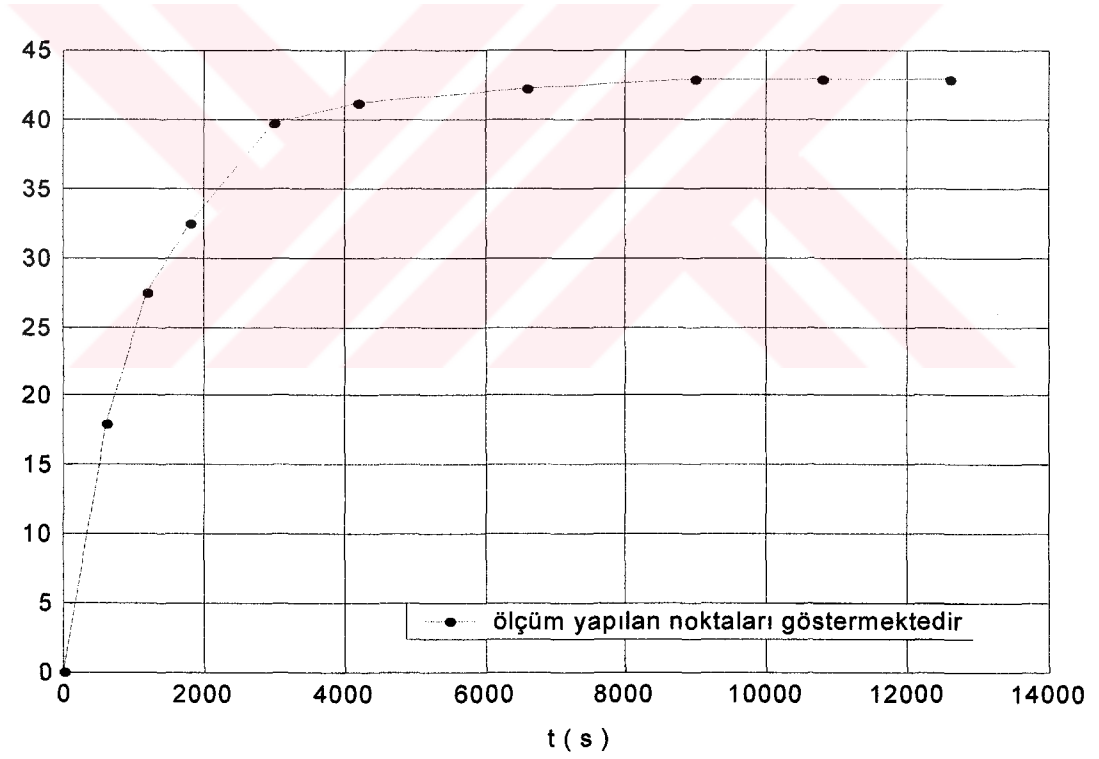
$$C_S = 900, \quad C_R = 2000, \quad C_L = 9400$$



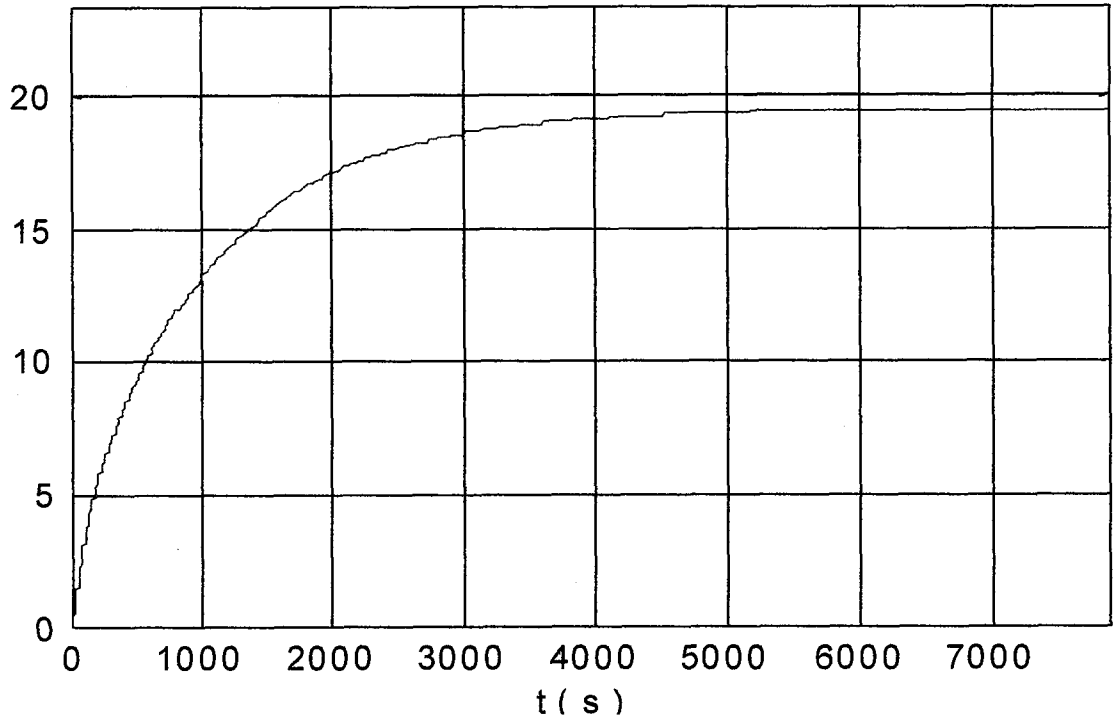
Şekil 5.1.a Nominal yük akımında stator sargısındaki sıcaklık artışı (°C)



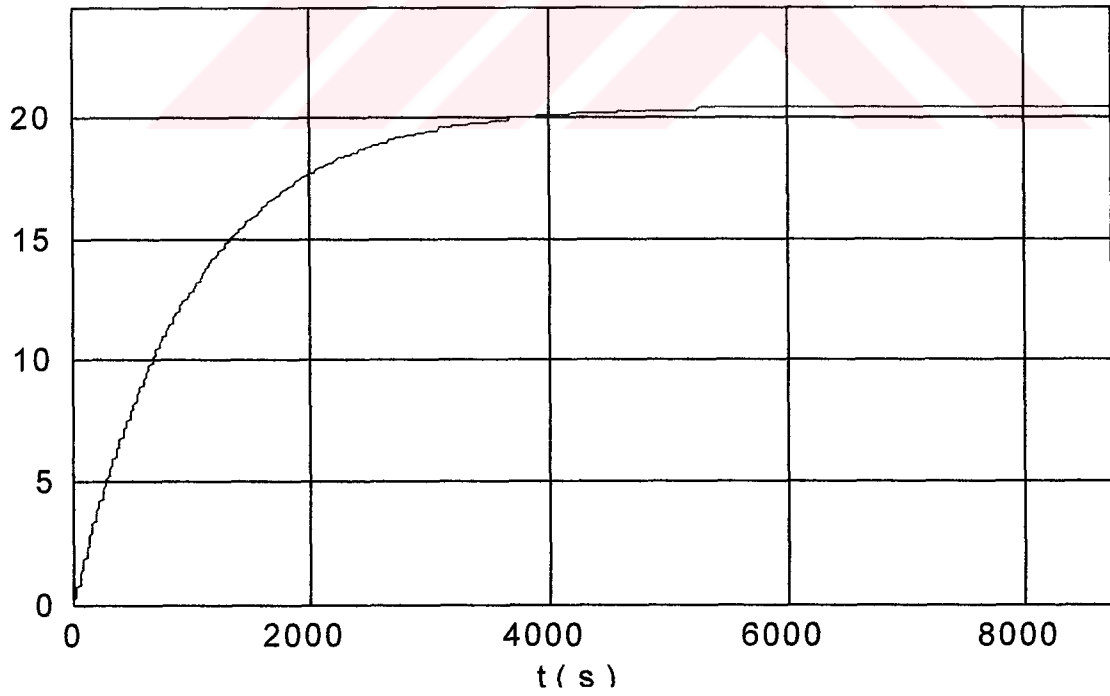
Şekil 5.1.b Nominal yük akımında rotor sargısındaki sıcaklık artışı ($^{\circ}\text{C}$)



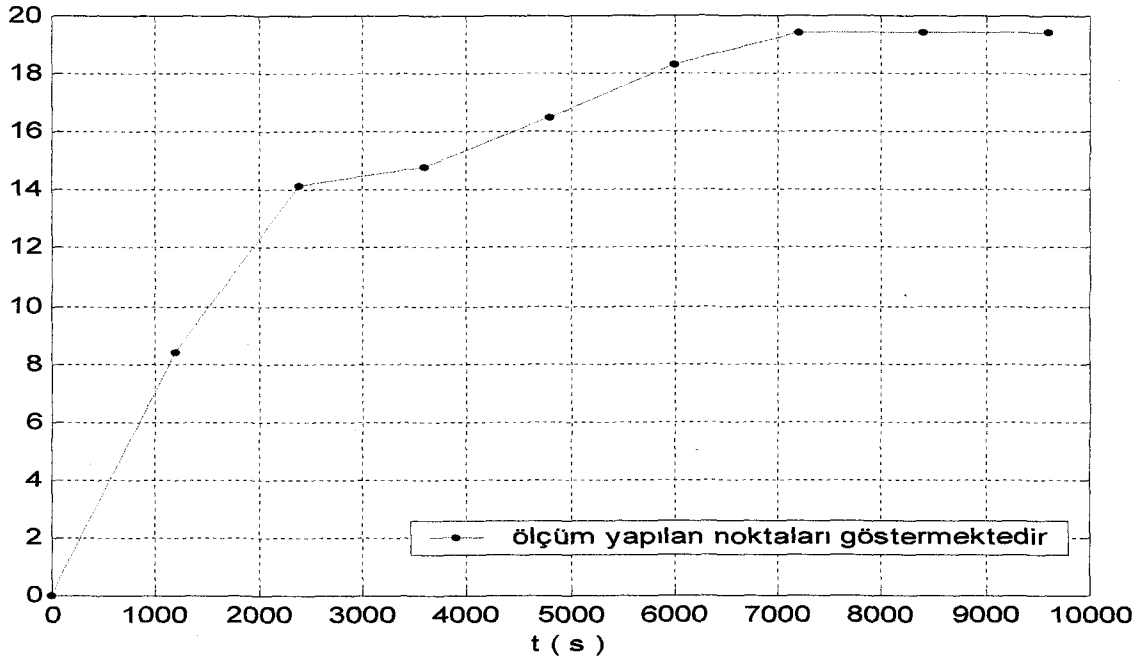
Şekil 5.1.c Nominal yükte deneysel olarak bulunan stator sargı sıcaklığı artışı ($^{\circ}\text{C}$)



Şekil 5.2.a Boşta çalışmada stator sargısındaki sıcaklık artışı ($^{\circ}\text{C}$)

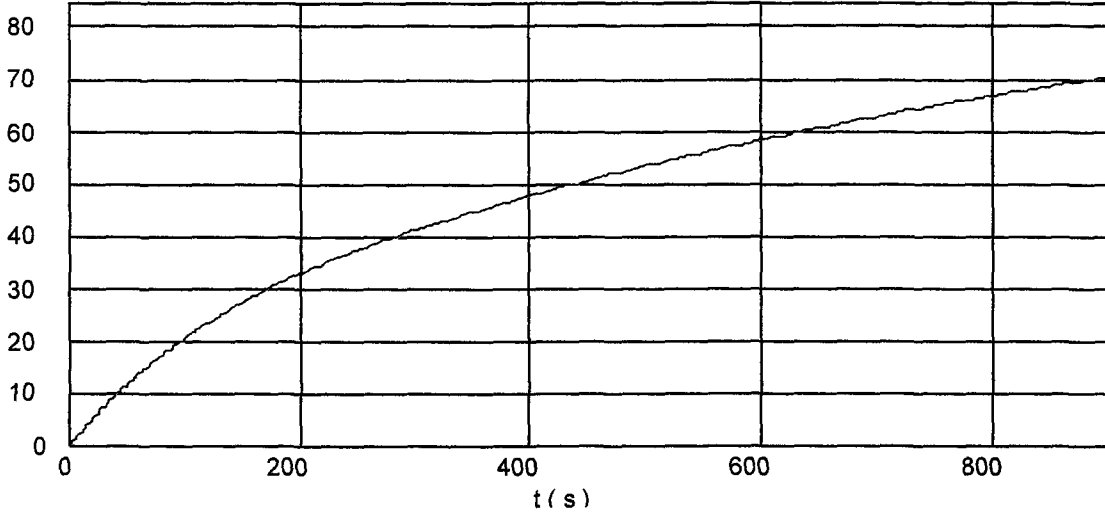


Şekil 5.2.b Boşta çalışmada rotor sargısındaki sıcaklık artışı ($^{\circ}\text{C}$)

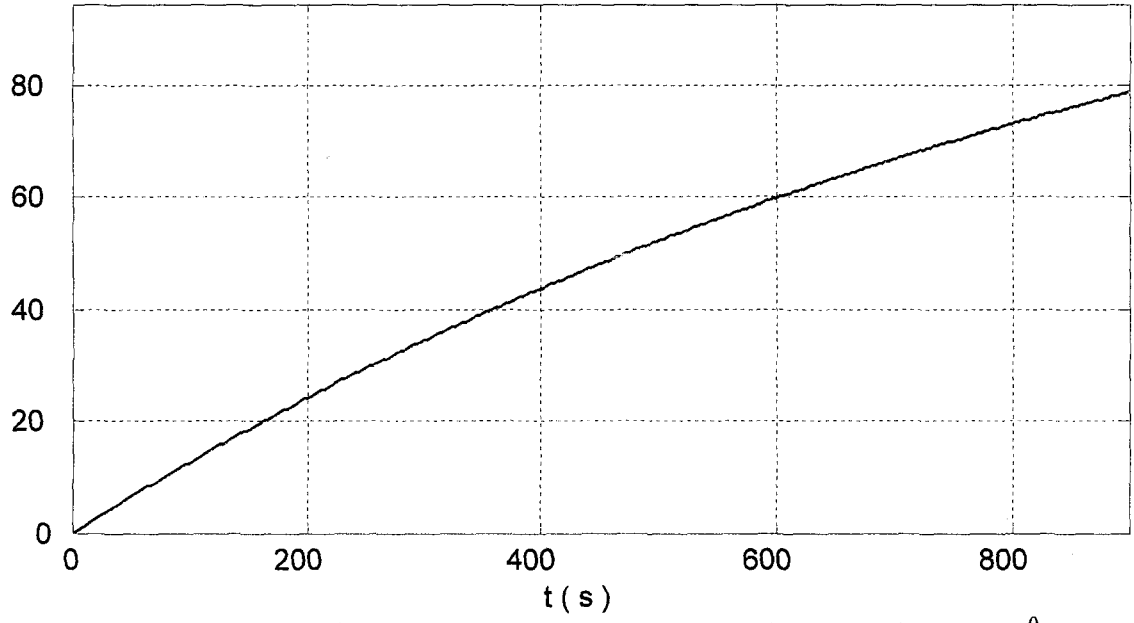


Şekil 5.2.c Boşta çalışmada deneysel olarak bulunan stator sargı sıcaklığı artışı ($^{\circ}\text{C}$)

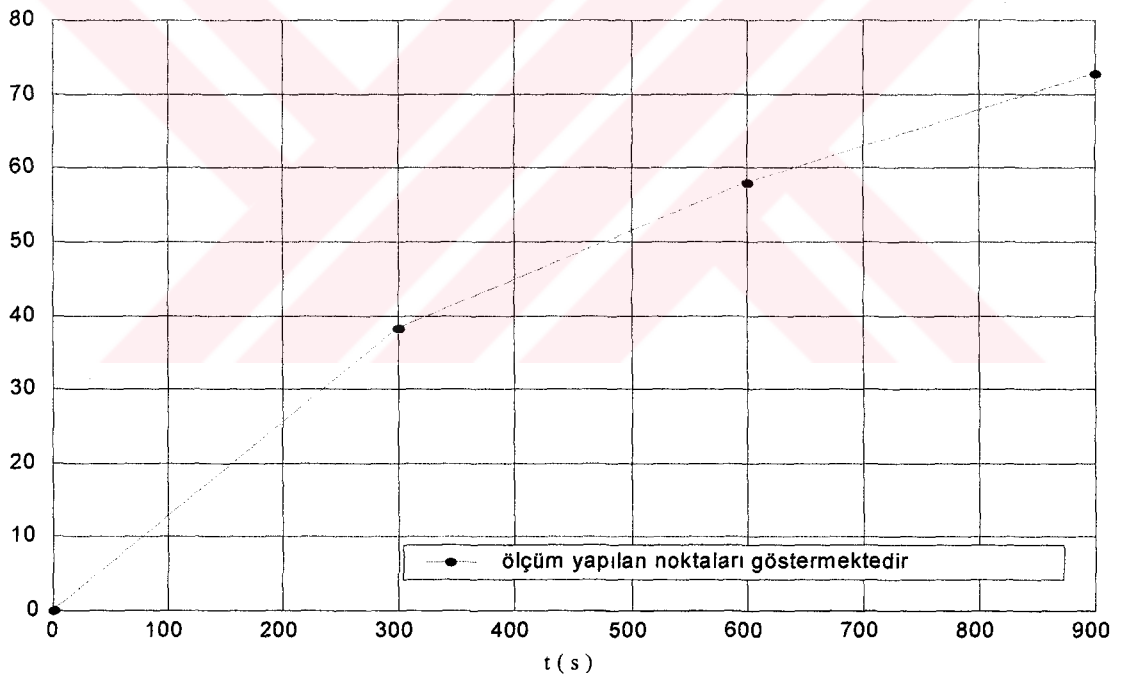
Makinanın kısa devreli aşırı yükleme durumundaki ısınmasını deneysel olarak incelemek üzere motora boşta yol verilmiş ve anma hızına ulaştığı anda ısınmasına izin verilmeden 8.2 amperlik yük uygulanmıştır. Şekil 5.3 kısa süreli aşırı yüklenme durumuna ilişkin simulasyon sonuçlarını ve stator sargısının deneysel olarak belirlenen sıcaklık artışını göstermektedir. Grafiklerde $t = 0$ anı motorun aşırı yüklenmeye maruz kaldığı andır.



Şekil 5.3.a Kısa süreli aşırı yüklenmede stator sargısındaki sıcaklık artışı ($^{\circ}\text{C}$)



Şekil 5.3.b Kısa süreli aşırı yüklenmede rotor sargısındaki sıcaklık artışı (°C)



Şekil 5.3.a Kısa süreli aşırı yüklenmede stator sargısında deneysel olarak belirlenen sıcaklık artışı (°C)

BÖLÜM 6. SONUÇ

Bu çalışmada stator ve rotor sargı sıcaklıklarını motor boyutlarına ve makinanın çeşitli kısımlarında kullanılan malzemelerin fiziksel parametrelerine dayanan bir ısı model oluşturulmuştur. Yapılan simulasyonda elde edilen sonucun deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmasıyla stator sargı sıcaklığının büyük bir doğrulukla belirlenebildiği görülmüştür. Rotor sıcaklığı deneysel olarak belirlenememişse de, stator sargı sıcaklığı rotor sargı sıcaklığına bağlı olduğuna göre, stator sargı sıcaklığının doğru olarak belirlenebilmesi, rotora ilişkin olumlu bir tablo çizmektedir.

Stator sargı sıcaklığını etkileyen önemli büyüklüklerden biri olan stator – gövde sıkı geçme temas direncinin belirlenmesi daha önce yapılmış olan benzer çalışmalarda olduğu gibi, bir sorun olarak belirmektedir. Öncelikle, bu noktadaki ısıl direncin belirlenebilmesi için sıkı geçme işleminden önce ve sonra boyutlar hakkında mikrometrik hassas ölçümlerin yapılması gereklidir. Bu konuda üretici firmanın işbirliği zorunludur. Ayrıca aynı parti içinde de olsa üretilen motorların bu açıdan standart olup olmayacağı da bir problem olarak ortaya çıkabilmektedir. Stator demiri - gövde sıkı geçme noktasındaki ısıl iletkenlik katsayısını veren deneysel eğrilerin çok güvenilir olmadığı çeşitli çalışmalarda öne sürülmüştür[8,17]. Genel eğilim, deneysel olarak elde edilen sonuçlara göre bu noktaya ilişkin direnç değeri üzerinde düzeltme yapılmasının uygun ve gerekli olacağı yönündedir.

Model bazı kabuller ve kimi ısıl direnç ve kapasite elemanlarının ihmali üzerine oturtulmuştur. Daha fazla parametreyi, örneğin aksel akışta laminasyon sacları arasındaki yalıtım malzemesini ya da soğutma kanallarını modele dahil etmek ve düğüm noktası sayısını arttırmak modelin hassasiyetini arttıracaktır. Ancak bu, güçlü bir donanım gerektirmektedir.

Çalışma bir asenkron motorun ısıl davranışını belirlemeye yönelik genel bir bakış sunmaktadır. Modelin doğruluğu deneysel olarak sınanmıştır. Modeli makinanın deneysel olarak gerçekleşmesi zor ve tehlikeli olabilecek kısadevre, aşırı yüklenme, faz kaybı gibi çeşitli durumlara uygulamak ve bu durumlara ilişkin ısı limit

eğrilerini elde ederek motorun ısı davranışının ayrıntılı bir tablosunu oluşturmak mümkündür. Bu tablo hem üretici hem kullanıcı açısından perspektif sağlayıcı olabilecektir.

Asenkron motorun toplu parametrelili ısı modeli üzerine daha önce yapılan çalışmalarda [8,9,10], simulasyon sonuçlarıyla deneysel veriler arasında yaklaşık %10 luk bir hata sınırı içinde kalan farklılık, kabul edilebilir hata olarak belirlenmiş ve modellemenin başarılı olduğu kabul edilmiştir. Bölüm 5 de verilen simulasyon sonuçları ve deneysel çalışma verilerinin kıyaslanmasıyla, bu çalışmada elde edilen sonuçların kabul edilebilir hata sınırları içinde kaldığı görülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Çetin İ., Schuisky I. W.**, Elektrik Motörleri, 1987, Fatih Yayınevi, İstanbul
- [2] **Grainger L.G., Mcdonald M.C.**, “Increasing Refiner Production By Using Motor Thermal Capacity For Protection And Control”, Ieee Trans. On Ind. App., 1997, Vol.33, No.3, S.857-861
- [3] **Eltom A.H., Moharari N.S.**, “Motor Temperature Estimation Incorporating Dynamic Rotor Empedance”, Ieee Trans. On En. Conv., Vol.6, No.1, March 1991, S.107-113
- [4] **Gürdal O.**, Elektrik Makinalarının Tasarımı, 2001, Atlas Yayın, İstanbul
- [5] **Kalenderli Ö.**, Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ders Notu, 1999, İtü
- [6] **Garg V.K., Raymond J.**, “Magneto Thermal Coupled Analysis Of Canned Induction Motor” , Ieee Trans. On En. Conv., Vol.5, No.1, 1990, S.110-114
- [7] **Xypeteras J., Hatziathanassiou V.**, “Thermal Analysis Of An Electrical Machine Taking Into Account The Iron Losses And Deep Bar Effect”, Ieee Trans. On En. Conv., 1999, Vol.14, No.5, S.996-1003
- [8] **Mellor P.H., Roberts D., Turner D.R.**, “Lumped Parmeter Thermal Model For Electrical Machines Of Tefc Design”, Iee Proceedings B, 1991, Vol.138, No.5, S.205-218
- [9] **Bousbaine A., McCormick M., Lowi W.F.**, “Insitu Determination Of Thermal Coefficient For Electrical Machines”, Ieee Trans. On En.Conv., 1991, Vol.10, No.3, S.385-391

- [10] Bousbaine A., "Thermal Modelling Of Induction Machinesbased On Accurate Loss Density Distribution", Electric Machines And Power Systems, 1993, Vol.27, S.311-324
- [11] Sarıkaya P., 1999, "Kafesli Asenkron Motorlarda Isınmanın İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İtÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [12] Zocholl S.E., Schweitzer E.O., "Thermal Protection Of Induction Motors Enhanced By Interactive Electrical And Thermal Models", Ieee Trans. On Pow.Appl. And Systems, 1984, Vol.Pas-103, No.74, S.1479-1486
- [13] Zocholl S.E., " Motor Analysis And Thermal Protection", Ieee Trans. On Power Delivery, 1990, Vol.5, No.3, S.1275-1280
- [14] Moreno J.F., Hidalgo F.P., Martinez M.D., "Realisation Of Tests To Determine The Parameters Of The Thermal Model Of An Induction Motor" , Iee Proceedings – Electr.Pow.Appl., Vol.148, No.5, 2001, S.393 – 397
- [15] Woodruff N., "Economical Motor Protection Using Microcomputer Technology", Ieee Trans. On Ind.Appl., Vol.Ia – 20, No.5, S.1334
- [16] Boys J.T., Miles M.J., "Emprical Thermal Model For Inverter Driven Cage Induction Machines", Iee Proceedings – Electr.Pow.Appl., Vol.141, No.6, S.360 – 372
- [17] İkizli O., Elektrik Makinalarında Dağılma Kayıpları Ve Isınma, 1962, İtÜ Kütüphanesi, İstanbul
- [18] Zocholl S.E., Schweitzer E.O., "Aspects Of Overcurrent Protection For Feeders And Motors", [Www.Selinc.Com/Techpprs.Htm](http://www.selinc.com/Techpprs.Htm)
- [19] Smith J., " Choosing Between Iec And Nema Motor Controls", Plant Enginnering, 2001, Vol.55, No.3

ÖZGEÇMİŞ

Filiz Gürgöze ilk ve orta dereceli eğitimini Balıkesirde tamamladı. 1992 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Programında lisans eğitimine başladı. 1996 yılındaki mezuniyetinin ardından bir süre Başkurt Motor Kablo San.A.Ş motor üretim bölümünde kalite kontrol şefi olarak çalıştı. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Makinaları Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen bu görevini sürdürmektedir.



**Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BAŞKANLIĞI**