T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MALİYET KISITI ALTINDA YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU VE YÜKSEK HIZLI ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTOR TASARIMI

HARUN ETÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. ATİYE HÜLYA OBDAN

İSTANBUL, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MALİYET KISITI ALTINDA YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU VE YÜKSEK HIZLI ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTOR TASARIMI

Harun ETÇİ tarafından hazırlanan tez çalışması 21.10.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Atiye Hülya OBDAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Atiye Hülya OBDAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Kamuran Nur BEKİROĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Derya Ahmet KOCABAŞ

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasındaki katkılarından dolayı değerli danışman hocam Doç. Dr. Atiye Hülya OBDAN'a, çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen tüm ELK Motor ailesine teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan anneme ve babama, çalışmalarım sırasında en büyük destekçim olan eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Ekim, 2019

Harun ETÇİ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Hipotez 4

BÖLÜM 2

ASENKRON MOTORLAR 5

2.1 Asenkron motorun yapısı 6
2.2 Stator 7
2.3 Rotor 8
2.4 Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi 9

BÖLÜM 3

SABİT FREKANS ASENKRON MOTOR TASARIMI 11

3.1 Stator Çekirdeğinin Boyutlandırılması 13
3.2 Stator Sargılarının Hesaplanması 15
3.3 Stator Oluklarının Boyutlandırılması 18
3.4 Rotor oluklarının hesaplanması 20
3.5 Asenkron Motorun Kayıpları 23
3.6 Stator Bakır kayıpları 24
3.7 Stator Demir Kayıpları 25

3.8 Rotor Bakır kayıpları 26
3.9 Sürtünme ve vantilasyon kayıpları 27
3.10 Ek kayıplar 27
3.11 Asenkron Motorun Verimi 28

BÖLÜM 4

DEĞİŞKEN HIZLI MOTOR TASARIMI VE OPTİMİZASYONU 29

4.1 Servo sürücüler 30
4.2 Genel Sürücüler 31
4.3 Sabit Güç Bölgesinde Çalışan Değişken Hızlı Uygulamalar 32
4.4 Değişken Hızlı Asenkron Motor Tasarımında Dikkate Alınacak Parametreler 34
4.4.1 Motor Uçlarına Gelen Gerilimde Düşme 34
4.4.2 Deri Etkisinin Azaltılması 35
4.4.3 Motor Veriminin Arttırılması 36
4.4.4 Devrilme Momentinin Artırılması 38
4.4.5 Gerilim ayarıyla geniş sabit güç hız bölgesi elde etme 40
4.4.6 Motor boyutlarının büyütülmesi 40
4.4.7 Faz geriliminin arttırılması 41
4.4.8 Çok geniş sabit güç hız bölgesi $w_{max}/w_b > 4$ 42
4.5 Optimizasyon 43
4.6 Uygulama 46
4.6.1 Sabit frekans için tasarlanan motorun değişken frekans için optimizasyonu 50

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER 59

KAYNAKLAR 63

ÖZGEÇMİŞ 66

SİMGE LİSTESİ

J	Akım yoğunluğu
K_{y1}	Bobin adım katsayısı
τ	Bobin oluk adımı
I_o	Boşta çalışma akımı
P_{fe}	Demir kaybı
I_w	Demir kayıp akımı
R_c	Demir, sürtünme ve vantilasyon direnci
$1+K_{st}$	Diş doyma kat sayısı
α_{ec}	Elektriksel açı
C_0	Esson sabiti
W_1	Faz başına sarım sayısı
V_{1ph}	Faz gerilimi
m	Faz sayısı
q	Faz-kutup başına oluk sayısı
f_1	Frekans
P_{in}	Giriş gücü
I_{1n}	Hat akımı
g	Hava aralığı
S_{gap}	Hava aralığı görünür gücü
F_{mg}	Hava aralığı magneto motor kuvveti
B_g	Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu
μ_0	Havanın manyetik geçirgenliği
K_D	İç çap dış çap oranı
P_{LL}	İlave kayıplar
s	Kayma
p_1	Kutup çifti sayısı
ϕ	Manyetik akı
α_i	Manyetik akı yoğunluğu şekil faktörü
I_m	Mıknatıslanma akımı

X_m	Mıknatıslanma reaktansı
P_n	Nominal güç
n_1	Oluk başına sarım sayısı
L	Paket boyu uzunluğu
λ	Paket oranı
a_p	Paralel tel sayısı
ω_r	Rotor akımlarının açısal frekansı
P_r	Rotor bakır kaybı
I_b	Rotor bara akımı
B_{cr}	Rotor boyunduruk manyetik akı yoğunluğu
h_{cr}	Rotor boyunduruk yüksekliği
b_{tr}	Rotor diş genişliği
F_{mtr}	Rotor dişi magneto motor kuvveti
B_{tr}	Rotor dişi manyetik akı yoğunluğu
Z_2	Rotor empedansı
L_2	Rotor endüktansı
K_1	Rotor magneto motor kuvvet faktörü
D_{milmax}	Rotor mili maksimum çapı
τ_r	Rotor oluk adımı
b_{or}	Rotor oluk ağzı genişliği
h_{or}	Rotor oluk ağzı yüksekliği
J_b	Rotor oluk akım yoğunluğu
A_b	Rotor oluk alanı
d_2	Rotor oluk dip çapı
N_r	Rotor oluk sayısı
d_1	Rotor oluk üst çapı
h_r	Rotor oluk yüksekliği
I_{er}	Rotor uç halkası akımı
K_{fe}	Sac paketi doluluk oranı
K_{q1}	Sargı dağıtım katsayısı
J_s	Stator akım yoğunluğu
I_1	Stator akımı
P_{scu}	Stator bakır kaybı
A_{st}	Stator brüt oluk alanı
D_{out}	Stator dış çapı
b_{ts}	Stator diş genişliği
F_{mts}	Stator dişi magneto motor kuvveti
B_{ts}	Stator dişi manyetik akı yoğunluğu
H_{ts}	Stator dişi manyetik alan şiddeti değeri
V_1	Stator gerilimi
D_{is}	Stator iç çapı

b_{os}	Stator oluk ağzı genişliği
h_{os}	Stator oluk ağzı yüksekliği
h_w	Stator oluk boğum yüksekliği
K_{fill}	Stator oluk doluluk oranı
b_{s2}	Stator oluk içi genişliği boyunduruk tarafı
b_{s1}	Stator oluk içi genişliği oluk ağzı tarafı
N_s	Stator oluk sayısı
K_E	Stator sargı direnci gerilim düşümü katsayısı
K_{w1}	Stator sargı faktörü
R_1	Stator sargısı bir faz direnci
X_1	Stator sargısı bir faz kaçak reaktansı
I_2	Statora indirgenmiş rotor akımı
R_2'	Statora indirgenmiş rotor direnci
X_2'	Statora indirgenmiş rotor kaçak reaktansı
P_{fw}	Sürtünme ve vantilasyon kaybı
d_{cu}	Tel çapı
A_{cu}	Tel kesit alanı
P_T	Toplam kayıp güç
η	Verim

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current
DC	Direct Current
FEA	Finite Elements Analyze
HVAC	Heating Ventilating Air Conditioning
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Ingress Protection
MMF	Magneto motor kuvvet
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
VSD	Variable Speed Drive

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 (a) Ferraris'nin asenkron motoru, (b) Tesla'nın asenkron motoru 6
Şekil 2. 2 Asenkron motoru oluşturan parçalar 7
Şekil 2. 3 Asenkron motorun statoru 8
Şekil 2. 4 Bakır bara ve uç halkasına sahip sincap kafes rotor 9
Şekil 2. 5 Transformatör eşdeğer devresi 10
Şekil 2. 6 Asenkron motor eşdeğer devresi 10
Şekil 3. 1 18.5 kW 400 V 50 Hz IE3 motora ait etiket bilgileri 12
Şekil 3. 2 Asenkron motor tasarım algoritması 13
Şekil 3. 3 Çeşitli stator oluk geometrileri: trapez formu ve yuvarlak form 18
Şekil 3. 4 Stator oluk ölçüleri harflendirilmesi 18
Şekil 3. 5 Stator sacının B-H karakteristiğinin grafiği 20
Şekil 3. 6 Rotor oluk geometrileri 21
Şekil 3. 7 Rotor oluk ölçüleri harflendirilmesi 22
Şekil 3. 8 Asenkron motorda güç akış diyagramı 24
Şekil 3. 9 Örnek hysteresis eğrisi 25
Şekil 3. 10 Değişik elektriksel sacların akı yoğunluğuna göre demir kayıpları 26
Şekil 3. 11 4 kutup motorların çıkış gücü bazında verim sınıfı dağılımı 28
Şekil 4. 1 Standart tasarım asenkron motorun inverter ile çalışması durumunda elde edilen moment, gerilim ve akım değerlerinin frekansa göre değişim grafiği 30
Şekil 4. 2 Standart 50 Hz motorun frekansa göre moment değişimi 31
Şekil 4. 3 İnverter, motor ve yükten oluşan tahrik sistemi 34
Şekil 4. 4 Düşük deri etkisi gösteren rotor oluk şekilleri 36
Şekil 4. 5 Moment hız eğrileri standart ve büyük boyuttaki motor için 41
Şekil 4. 6 Asenkron motorun inverter ile çalışması durumunda elde edilen moment, gerilim, güç, akı ve akım değerlerinin frekansa göre değişim grafiği 41
Şekil 4. 7 230 V 50 Hz için tasarlanan motorun farklı gerilim ve frekanslarda moment hız eğrileri 42
Şekil 4. 8 Y-Δ bağlantı geçişi ile sabit güç bölgesinin genişletilmesi 43
Şekil 4. 9 Optimizasyon algoritması akış diyagramı 45
Şekil 4. 10 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi 48
Şekil 4. 11 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen güç-hız eğrisi 48

Şekil 4. 12 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun şebekeden besleme ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi 49
Şekil 4. 13 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun laminasyon geometrisi 49
Şekil 4. 14 100 Hz çalışma için optimize edilen 16 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi 52
Şekil 4. 15 100 Hz çalışma için optimize edilen 16 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen güç-hız eğrisi 52
Şekil 4. 14 100 Hz çalışma için optimize edilen 17 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi 53
Şekil 4. 15 100 Hz çalışma için optimize edilen 17 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen güç-hız eğrisi 53
Şekil 4. 14 100 Hz çalışma için optimize edilen 18 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi 54
Şekil 4. 15 100 Hz çalışma için optimize edilen 18 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen güç-hız eğrisi 54
Şekil 4. 16 100 Hz çalışma için optimize edilen 16 sarım sayılı motorun 2D SEY yöntemiyle analiz sonuçları 55
Şekil 4. 17 100 Hz çalışma için optimize edilen 17 sarım sayılı motorun 2D SEY yöntemiyle analiz sonuçları 55
Şekil 4. 18 100 Hz çalışma için optimize edilen 18 sarım sayılı motorun 2D SEY yöntemiyle analiz sonuçları 56
Şekil 5. 1 100 Hz çalışma için optimize edilen motorun test edilmesi sırasındaki görüntüsü 61

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1 Kutup sayısına göre paket oranı λ değerleri 14
Çizelge 3. 2 Kutup sayısına göre iç çap dış çap oranı K_D değerleri 14
Çizelge 3. 3 Stator sargılarında kullanılan tel çapları ve izolasyonlu tel çapları 17
Çizelge 3. 4 Stator ve rotor oluk sayısı kombinasyonları 21
Çizelge 4. 1 Elektriksel sacların sınıflarına göre kalınlık, direnç ve demir kaybı değerleri 37
Çizelge 4. 2 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun temel parametreleri ve ANSYS yazılımındaki simülasyon çıktıları 46
Çizelge 4. 3 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun ANSYS yazılımındaki simülasyon sonucu elde edilen eşdeğer devre parametreleri, akı yoğunlukları, motor kayıpları ve motoru oluşturan malzemelerin ağırlıkları 47
Çizelge 4. 4 100 Hz çalışma için optimize edilen 3 farklı sarım sayısına sahip motorun temel parametreleri ve ANSYS yazılımındaki simülasyon çıktıları 57
Çizelge 4. 5 100 Hz çalışma için optimize edilen 3 farklı sarım sayısına sahip motorun ANSYS yazılımındaki simülasyon sonucu elde edilen eşdeğer devre parametreleri, motor kayıpları ve motoru oluşturan malzemelerin ağırlıkları 58
Çizelge 5.1 Referans ve optimize edilen motorun ANSYS yazılımındaki simülasyon sonucu elde edilen değerlerinin karşılaştırma tablosu 60
Çizelge 5.2 Referans ve optimize edilen motorun test edilmesi sonucu elde edilen hız moment karakteristikleri 61

ÖZET

MALİYET KISITI ALTINDA YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU VE YÜKSEK HIZLI ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTOR TASARIMI

Harun ETÇİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Atiye Hülya OBDAN

Yaklaşık yüz yıl gibi uzun bir geçmişe sahip olan asenkron motorlar endüstride hareket enerjisinin temel taşı haline gelmiştir. Bununla beraber üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve güç elektroniği devreleri kullanılarak kontrolünün kolaylaşması asenkron motorların pazardaki payını arttırmıştır. Özellikle sincap kafesli asenkron motorların dışardan uyartım gerektirmemeleri, buna bağlı olarak fırça ve bilezik gibi bakıma ihtiyaç duyan parçalarının bulunmaması bu motorların önemli avantajları arasında yer almaktadır. Ayrıca, sincap kafesli asenkron motorların herhangi bir güç elektroniği devresine ihtiyaç duymadan doğrudan şebekeye bağlı olarak kullanılabilmesinin de motorun yaygınlaşmasına büyük katkıları vardır. Malzeme teknolojisindeki ilerlemeler, üretim tekniklerinin gelişmesi ve bunların yanı sıra teknolojinin gelişimine bağlı olarak motor tasarımının kolaylaşması asenkron motorlarda yüksek verim seviyelerine ulaşılmasını sağlamıştır. Günümüzde asenkron motorlar IEC standardının tanımladığı IE3, IE4 verim seviyelerinde üretilebilmektedir.

Motor pazarındaki tüm bu gelişmeler devam ederken yarı iletken teknolojisinde de büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Yarı iletken teknolojisinin gelişimi ile inverterlerin boyutları ve maliyetleri azalmıştır. Tüm bu gelişmelere bağlı olarak motorlarda hız kontrolü uygulamaları endüstride giderek yaygınlaşmıştır. Üç fazlı inverterden beslenen sincap kafesli asenkron motorlar, hız kontrolüne ihtiyaç duyulan uygulamalarda geniş bir pazar payına sahip olmaya başlamıştır. Özellikle elektrikli araçlarda kullanılan

motorlarda, cer motorlarında, pompa ve kompresör motorlarında değişken hız ve yüksek hız uygulamaları sıklıkla kullanılmaktadır. Asenkron motorlarda hız kontrolü motora uygulanan gerilimin frekansının değiştirilmesi yöntemiyle gerçekleşmektedir. Asenkron motorun yapısı gereği motora uygulanan gerilim ve frekansın oranı (V/f) sabit tutulduğu sürece motor moment kaybetmeden yüksek hızlarda çalışabilmektedir. Ancak, inverterler yapısı gereği şebeke giriş geriliminden daha fazla çıkış gerilimi verememektedir. Özellikle yüksek hız uygulamalarında inverter çıkış geriliminin, şebeke giriş geriliminin üzerine çıkamaması ve bu duruma bağlı olarak skaler kontroldeki V/f oranının düşmesi nedeniyle asenkron motorun momentinde azalma meydana gelmektedir. Yüksek hızlarda moment değerinde azalma istenmediği durumlarda kullanıcılar daha büyük güçlü standart motorların kullanımına yönelmektedir. Büyük güçlerdeki standart motorların kullanımı ise ilk yatırım maliyetlerini arttırmaktadır. Ayrıca, standart motorların kullanımı boyutlarının büyük olması sebebiyle elektrikli araçlar, raylı sistemler ve kompresör uygulamaları gibi motorun bulunacağı hacmin sınırlı olduğu uygulamalarda tasarımcılara zorluk teşkil etmektedir. Bu çalışmada, belirtilen dezavantajların önüne geçmek ve kullanıcılara boyut ve maliyet açısından avantaj sağlamak için, skaler kontrol yönteminin kullanıldığı değişken hızlı uygulamalara yönelik yüksek güç yoğunluğuna sahip üç fazlı sincap kafesli motor tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Motorun tasarımında geniş bir frekans bandında çalışma hedeflenirken, motorun boyutlarının ve aktif malzeme maliyetinin minimum seviyede kalmasına dikkat edilmiştir. Yapılan tasarım çalışması ile IEC 100 gövde büyüklüğünde 3 kW 50Hz 3000 d/d motorun, 100 Hz frekans 6000 d/d çalışma sırasında moment kaybı yaşamadan yaklaşık 6 kW güç verebilmesi sağlanmıştır. Böylelikle motorun sabit moment çalışma bölgesi 0-50 Hz bandından 0-100 Hz bandına genişletilmiş olup, IEC 132 gövde motorun standart gücü olan 5,5 kW gücün boyut olarak çok daha küçük bir yapıya sahip IEC 100 gövde büyüklüğündeki motorda elde edilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Üç Fazlı İnverter, Skaler Kontrol, Değişken Hızlı Sistemler, Asenkron Motor Tasarımı

ABSTRACT

DESIGN OF HIGH SPEED AND HIGH POWER DENSITY THREE PHASE INDUCTION MOTOR UNDER COST CONSTRAINT

Harun ETÇİ

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Atiye Hülya OBDAN

Asynchronous motors with a long history of nearly a hundred years have become the cornerstone of motion energy in industry. In addition, the development of the production techniques of asynchronous motors and the controlling of asynchronous motors with power electronics circuits has increased the usage of asynchronous motor in the market. In particular, squirrel cage asynchronous motors do not require external excitation and therefore no need for maintenance parts such as brushes are among the important advantages of squirrel-cage asynchronous motors. In addition, the use of squirrel cage asynchronous motors can be directly connected to the grid without the need for an inverter, power electronics circuits. The advancement of material technology, the development of production techniques, as well as the simplification of motor design due to the development of the technology, have resulted in high efficiency levels in asynchronous motors. Today, asynchronous motors can be produced at IE3, IE4 efficiency levels defined by IEC standard.

While all these developments in the motor market continued, great progress was also made in semiconductor technology. The development of semiconductor technology has reduced the size and costs of the inverters. Due to all these developments, speed control applications in drive systems have become increasingly widespread in the industry. Asynchronous motors, which are used with inverter, have started to have a

large market usage in applications where speed control is needed. Variable speed and high speed applications are frequently used in electric vehicles motors, traction motors (railway), pumps and compressor motors. In asynchronous motors, speed control is performed by changing the frequency of the voltage applied to the motor. Due to the structure of the asynchronous motor, the motor can operate without loss of torque at high speed as long as the ratio of voltage and frequency (V/f) applied to the motor is kept constant. However, the inverters do not provide more output voltage than the mains input voltage. Especially in high speed applications, the inverter output voltage cannot exceed the mains input voltage and due to the decrease in the V/ f ratio in the scalar control, resulting in loss of torque in the asynchronous motor. In cases where torque loss is not desired at high speeds, users are turning to the use of standard motors with greater output power. The use of standard motors in large powers increases initial investment costs. Furthermore, the use of standard motors is a challenge for designers in applications where the volume of the motor is limited, such as electric vehicles, rail systems and compressor applications, due to the large size of the motor. In this study, the design and optimization of three phase squirrel cage motors with high power density for variable speed applications using scalar control has been realized in order to avoid these disadvantages and to give users an advantage in terms of size and cost. In the design of the motor, a wide frequency range was targeted, while the motor size and the active material cost were kept to a minimum. By making design work, IEC 100 frame size 3 kW 50 Hz 3000 rpm motor is able to give 5.5 kW output power without loss of torque during operation at 100 Hz 6000 rpm. In this way constant torque region of the motor is extended from 0-50 Hz to 0-100 Hz and IEC 132 frame size motor's standard power can be taken from IEC 100 frame size which has smaller size structure.

Keywords: Three Phase Inverter, Scalar Control, Variable Speed Drives, Induction Motor Design

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Asenkron motorlar; doğrudan bir fazlı ya da üç fazlı alternatif akım şebekesinden beslenebilmesi, çalışmaları sırasında elektrik arkı meydana gelmemesi, tam yükteki verimlerinin yüksek olması, dayanıklı, yüksek güvenilirliğe sahip, bakım gerektirmeyen yapısı ve düşük maliyetleri nedeniyle, hem sanayide hem de ev aletlerinde en çok kullanılan motor türü haline gelmiştir. Bilezikli ve sincap kafesli olmak üzere yapısal olarak ikiye ayrılırlar. Bilezikli makinalar, maliyetli oluşu ve rotorunda el sargısına ihtiyaç duyulması sebebi ile çok daha az tercih edilirler. Bununla beraber sincap kafesli makinalar ise üretim kolaylığı, uzun ömürlü oluşu ve dolayısıyla düşük maliyeti sayesinde çok yaygınlaşmışlardır.

Asenkron motorlar keşfedilmesinden bugüne boyutlar ve verimlilik açışından büyük değişimler göstermiştir. Asenkron motorların gelişimine eş zamanlı olarak yarı iletken teknolojisinde hızlı gelişmeler kaydedilmiştir. Elektrikli araçlar, raylı ulaşım sistemleri, HVAC (iklimlendirme sistemleri), fan, pompa ve kompresör uygulamaları, robotlar vb. sistemlerde motorların değişken hızlarda kullanıldığı başlıca uygulamalardandır.

Değişken hızlı motor uygulamaları giderek yaygın hale gelmektedir. Fakat asenkron motor üreticileri motorların direkt olarak şebekeyle çalışabilmesi için motor tasarımlarını sabit bir şebeke frekansı ve gerilimine göre yapmaktadır. Bu durum değişken hızlı uygulamalarda, özellikle şebeke frekansından daha yüksek frekans uygulamalarında inverterin şebeke geriliminden daha yüksek gerilim verememesi sebebiyle motorun yeterli momenti üretememesine yol açmaktadır. Moment kaybını önlemek adına kullanıcılar daha büyük güçlü motor kullanımına yönelmektedir. Büyük güçte motor kullanımı sebebiyle tahrik sisteminin ilk yatırım maliyetleri artmakta ve

sistemin boyutları büyümektedir. Özellikle ulaşım araçları, kompresör uygulamaları gibi uygulamalarda boyutların büyümesi sistem tasarımı açısından büyük zorluk teşkil etmektedir.

Tezin 2. bölümünde asenkron motorların geçmişi, yapısı, temel eşdeğer devresi ele alınmıştır. Asenkron motoru oluşturan ana parçalar olan stator ve rotor tanımlanmıştır.

Tezin 3. bölümünde ise sabit bir şebeke frekansı için asenkron motor tasarımı ele alınmıştır. Rotor ve stator laminasyon tasarımları detaylı olarak işlenmiştir. Ayrıca asenkron motorlardaki kayıpların dağılımları anlatılmıştır.

Tezin 4. bölümünde ise değişken hızlı uygulamalar kategorize edilmiştir. Sonrasında değişken hızlı uygulamalar için asenkron motor tasarımında sabit frekans motor tasarımına göre ne gibi farklılık olması gerektiği ele alınmış ve optimizasyon algoritması ortaya konulmuştur. Optimizasyon algoritması referans motor üzerinde uygulanarak sonlu elemanlar yöntemiyle optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

5. ve son bölümde ise SEY yöntemiyle yapılan optimizasyon sonuçları ile referans motorun değerleri kıyaslanmıştır. Ayrıca, hem referans motorun hem de optimize edilen motorun imalatı gerçekleştirilerek testleri yapılmıştır. Test sonuçları ile de optimizasyonun başarıya ulaştığı gösterilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Zhao ve diğerleri [1] yaptığı çalışmada inverter beslemeli değişken hızlı sistemler için asenkron motoru tasarımını ve tasarımına yönelik bir bilgisayar programı çalışması üzerinde durmuştur.

R.Rao ve M. Ramamoorty [2] çalışmasında değişken hızlı çalışma için inverter beslemeli 3 fazlı bir sincap kafesli asenkron motor için tasarım optimizasyon prosedürü geliştirmiştir. Sinüzoidal olmayan gerilimden kaynaklanan ek kayıpların toplam kayıpların önemli bir yüzdesi olduğu ve büyük bir bölümünün rotor çubuklarından olduğunu ortaya koymuştur. Derin çubuk rotorun kaçak reaktansının çok yüksek olması sebebiyle inverterle beslenen bir endüksiyon motorda gerekli olmadığını göstermiştir.

Alberto Tessarolo ve diğerleri [3] asenkron motor ve değişken hızlı sürücü konusunda sistem seviyesinde bir boyutlandırma yaklaşımı çalışması yapmıştır. Optimum maliyet ve performans açısından inverter ve motorun beraber ele alınması gerektiği üzerinde durulmuştur.

Gang Cui ve diğerleri [4] yüksek verimli değişken frekanslı asenkron motor tasarımının optimizasyonunu sonlu elemanlar yöntemiyle ele almıştır. Farklı oluk geometriyle sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir.

Matthias Centner ve Uwe Schäfer [5] farklı elektriksel sac türlerine göre yüksek hızlı asenkron motorun optimize tasarımı ile ilgili çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında M270-35 sac ile Vacoflux 50 adlı iki malzemeyle kıyas yapmışlardır. Vacoflux 50 adlı malzeme ile daha yüksek verimlilik elde edilmiştir. Ancak, Vacoflux 50 motor maliyetinin yaklaşık olarak 10 kat artmasına neden olmuştur.

Steven L. Mecker [6] yaptığı çalışmada asenkron motorların sürücüyle değişken hızlarda kullanımını ele almıştır. Motor izolasyonunda inverterle çalışma sonucu meydana gelebilecek zafiyetleri detaylı bir şekilde ele almış ve motor soğutma sisteminin VSD ile uyumlu hale getirilmesi konusuna değinmiştir.

M.J. Melfi [7] çalışmasında değişken hızlı uygulamalar için asenkron motorun en uygun kutup sayısının belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında optimum kutup sayının birçok parametreye bağlı olduğunu ortaya koymuş ve 4 kutuplu motorun geniş bir çalışma alanında iyi sonuçlar vereceğini belirtmiştir.

D. T. Mcguiness ve diğerleri [8] değişik rotor tiplerinin yüksek hızlı asenkron motor uygulamaları performans karşılaştırmasını gerçekleştirmiştir. FEA(SEY) yöntemi kullanarak 2D analizlerle farklı tiplerdeki rotorları kıyaslamışlardır.

1.2 Tezin Amacı

Asenkron motorlar çeşitli üstün özelliklerinden dolayı sanayide sıklıkla kullanmaktadır. Özellikle pozisyon kontrolüne gerek duyulmayan hız kontrol uygulamalarında yaklaşık %80-%85'inde asenkron motorların kullanıldığı tahmin edilmektedir [9]. Bu uygulamaların başında fan, kompresör uygulamaları, elektrikli ulaşım sistemler

gelmektedir. Hız kontrol yöntemi olarak uygulama kolaylığı sebebiyle açık çevrim V/f skaler kontrol yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır.

Piyasada aktif olarak satılan elektro marketlerde, motor bayilerinde bulunabilen üreticilerin kataloglarında yer alan asenkron motorlar temel tasarım itibariyle sabit bir şebeke frekansı ile çalışmaya uygun olarak imal edilmektedir. Sabit şebeke frekansına göre tasarlanan motorlarla yapılan hız kontrol uygulamalarında, asenkron motor ve inverterlerin yapısı gereği motorun çalışma frekansının üzerine çıkıldığında moment kaybı meydana gelmektedir.

Bu tezde asenkron motorun skaler kontrol için optimizasyonu 2D SEY gerçekleştirilerek, bahse konu moment kaybının önüne geçmek, motorun güç yoğunluğunu arttırmak, motor performansını iyileştirmek ve tüm bunları gerçekleştirirken motor maliyetini sabit tutmak amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, hız kontrol uygulamalarında kullanıma uygun yeni bir değişken hızlı asenkron motorun tasarımı gerçekleştirilmiş ve prototip uygulaması hayata geçirilmiştir. Geliştirilen optimizasyon sonucu yapılan tasarımın yüksek güç yoğunluklu olması, böylelikle kullanıcılarına boyut ve maliyet anlamında kazanç sağlaması, aynı zamanda yüksek frekanslarda bile (örneğin 100Hz) motorun moment kaybetmeden çalışabilmesi literatüre orijinal katkı olarak sunulmuştur.

Geliştirilen optimizasyon algoritması ile sabit şebeke frekansında çalışmak üzere yapılan motor tasarımları değişken frekans uygulamaları için kolaylıkla optimize edilerek, kullanıcılara büyük hacimdeki düşük güç yoğunluklu motorlar yerine küçük boyutlara sahip motorların tasarlanmasının önü açılacaktır. Böylelikle kullanıcıların ihtiyaç duyduğu çalışma frekansı bölgelerine göre motorlar yeniden optimize edilerek optimal çözümler sunulabilmesi yapılan çalışmanın orijinal katkılarının arasındadır.

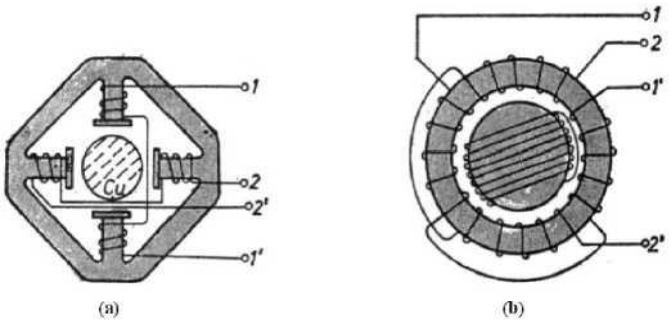
Tez kapsamında geliştirilen optimizasyon sabit bir şebeke frekansı için tasarlanmış bir motor üzerinde uygulanarak yeni bir motor tasarımı yapılmış ve test aşamaları gerçekleştirilerek tasarım doğrulanmıştır.

BÖLÜM 2

ASENKRON MOTORLAR

Asenkron motorlar; devir sayılarının yük değişimlerinden daha az etkilenmesi, fiyatlarının ucuz olması, moment hız karakteristiğinin düzgün, bakım ve kullanımının kolay olması ve doğrudan şebekeden çalışabilmesi gibi özellikleri ile günümüz sanayisinde en çok kullanılan motor türlerinden biridir. Asenkron motorların elektrik motorları arasındaki kullanım payı %90 civarındadır. Üç fazlı asenkron motorlarda stator yapısı değişmezken, rotorun yapım şekline göre bilezikli ve kafesli asenkron motor olmak üzere iki tip asenkron motor bulunmaktadır. İmalatının kolay, dayanıklı, işletme güvenliği yüksek ve bakım gereksiniminin az olması nedeniyle kafesli asenkron motor en yaygın kullanılan elektrik makinasıdır. Bu yüzden yerleşim yerlerinde, endüstride ve ticari alanlardaki birçok uygulamada büyük bir çoğunlukla sincap kafesli asenkron motor kullanılır [15].

Asenkron motorlar 1800'lü yılların sonlarına doğru icat edilmiştir. İlk defa asenkron motorun patentleri Galileo Ferraris tarafından 1885 yılında ve Nicola Tesla tarafından 1886 yılında alınmıştır. Patenti alınan iki motor da iki fazlı yapıya sahipti. Ferraris 'in motorun rotoru silindir şeklinde bakır çubuktan oluşurken, Tesla'nın motorunda kısa devre edilmiş rotor sargıları mevcuttur.



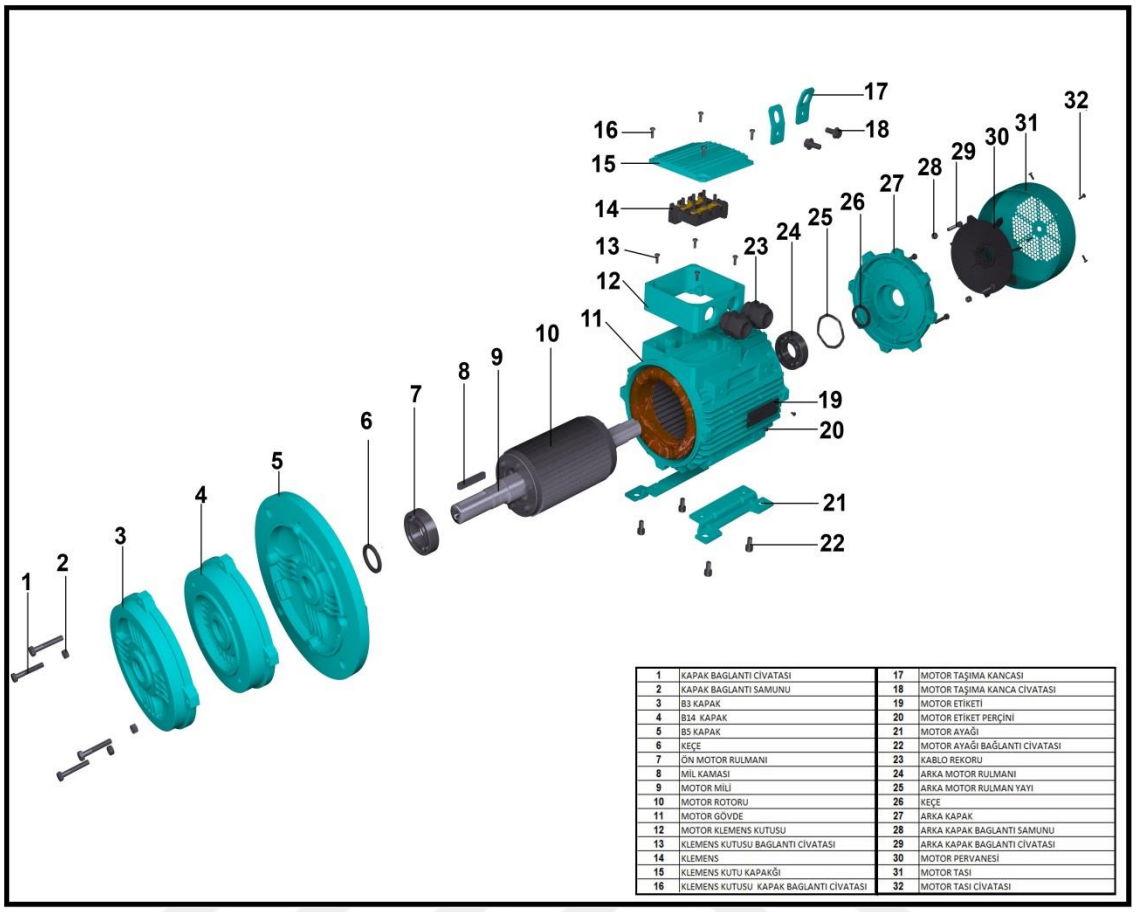
Şekil 2. 1(a) Ferraris'nin asenkron motoru, (b) Tesla'nın asenkron motoru

Asenkron motorun temel olarak çalışma prensibi şu şekildedir: Stator sargılarına verilen 3 fazlı AC gerilim hava aralığında döner alan meydana getirir. Meydana gelen döner alan rotor baralarında veya sargılarında gerilim indükler. İndüklenen gerilim sebebiyle rotor baralarında akım akmaya başlar ve moment oluşur.

Asenkron motorun senkron motorlara en önemli avantajı ise asenkron motorların şebekeden direkt olarak kalkış yapabilmesidir. Asenkron motorlar genellikle 1 fazlı ve 3 fazlı olarak üretilirler. Kabaca sincap kafesli (kısa devre rotorlu) ve bilezikli asenkron motorlar olarak ikiye ayrılırlar.

2.1 Asenkron motorun yapısı

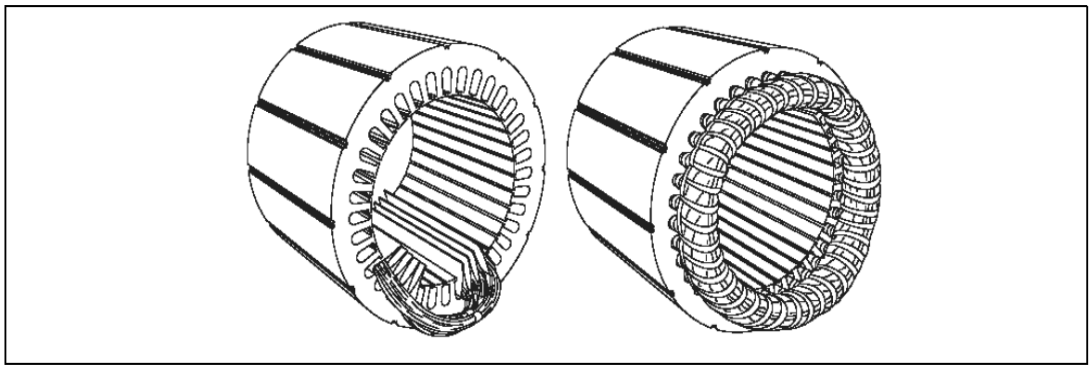
Asenkron motorlar stator ve rotor olmak üzere iki ana bölümden meydana gelir. Bu iki ana bölümün yanı sıra gövde, kapak rulman, pervane, mil, klemens, klemens kutusu gibi diğer parçaları da içermektedir.



Şekil 2. 2 Asenkron motoru oluşturan parçalar [19]

2.2 Stator

İngilizce “stationary” kelimesinden türemiş olan stator durağan, hareketsiz parça anlamına gelmektedir. Stator sargı ve sac paketinden oluşmaktadır. Yaygın olarak 0.5 mm kalınlığında silisli, non-orinted (yönsüz) elektriksel saclardan meydana gelmektedir. Sargılar ise emaye bobin telinin gerekli sarım sayısınca sarılması yöntemiyle elde edilmektedir. Motorun kutup sayısını sargının yapısı belirlemektedir.

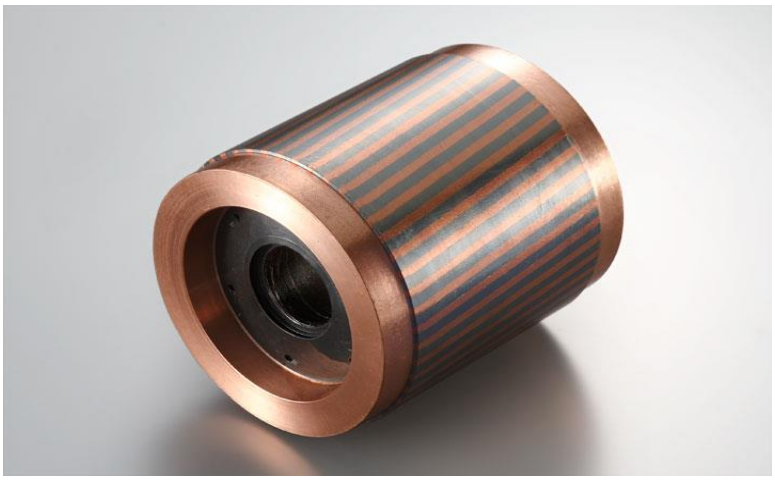


Şekil 2. 3 Asenkron motorun statoru [20]

2.3 Rotor

Rotor, alüminyum veya bakırdan yapılmış eşit aralıklı çubuklarla (baralar) tıpkı statorda olduğu gibi elektriksel sac laminasyonlarından oluşur. En popüler rotor tipinde (sincap kafesli rotor), bu baralar uç halkası kullanılarak mekanik ve elektriksel olarak uçlara bağlanır. Asenkron motorların neredeyse % 90'ı sincap kafesli rotorlara sahiptir. Bunun nedeni sincap kafesli rotorun basit ve sağlam bir yapıya sahip olmasıdır. Rotor, iletkenleri taşımak için eksenel olarak yerleştirilmiş paralel oluklara sahip bir silindirik lamine çekirdekten oluşur. Her olukta bakır, alüminyum veya alaşımlı çubuk bulunur. Bu rotor çubukları, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi uç halkalar vasıtasıyla her iki ucunda daimi olarak kısa devre yapar. Bu yapı, rotora adını veren bir sincap kafesinin görünüşünü andırır.

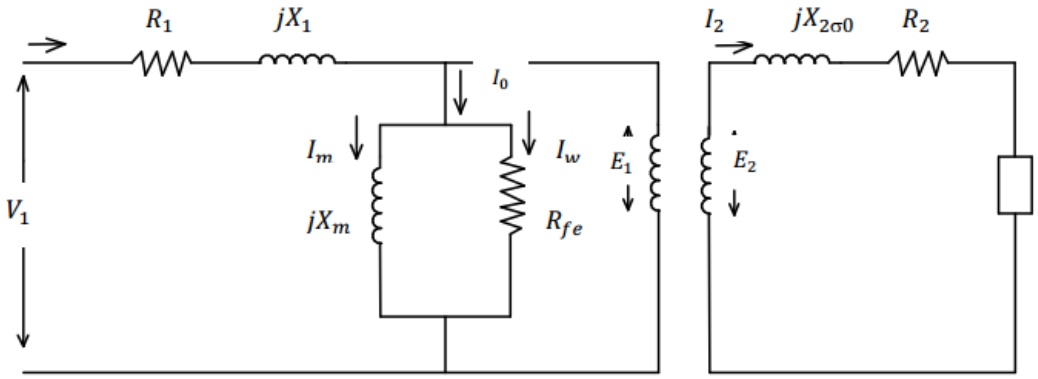
Rotor olukları mile tam olarak paralel değildir. İki ana sebepten dolay rotor baralarına açı verilir. Birinci neden, manyetik gürültüyü azaltarak motoru sessizce çalıştırmak ve oluk harmoniklerini azaltmaktır. İkinci sebep, rotorun kilitlenme eğilimini azaltmaya yardımcı olmaktır. Rotor dişleri ile stator dişleri arasındaki doğrudan manyetik çekim nedeniyle rotor dişleri stator dişlerinin altında kilitli kalma eğilimindedir.



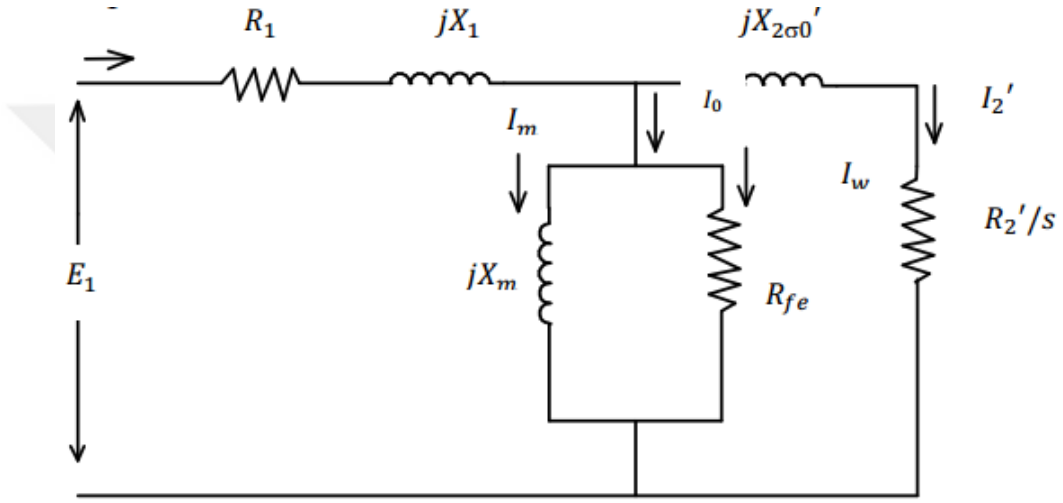
Şekil 2. 4 Bakır bara ve uç halkasına sahip sincap kafes rotor

2.4 Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi

Asenkron motorun eşdeğer devresi ile transformatörün eşdeğer devresi büyük oranda birbirine benzerlik göstermektedir. Transformatörün ve asenkron motorun eşdeğer bir faz eşdeğer devresi Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da verilmiştir. Transformatörün primer sargısının sinüs biçimli gerilimle beslenmesi sonucu oluşan sinüs biçimli manyetik alanı haklayan sekonder sargıda Faraday yasasına göre bir gerilim endüklenir. Bu durum sargıya düşen akının zamana göre değişimi akımın değişken olmasından kaynaklanır. Asenkron motorda ise oluşan alanın değeri sabit olup makine içinde konumu değişmektedir. Bu durumda manyetik alanın kendinden farklı hızda hareket eden (ya da duran) sargılarda değişken alan etkisi meydana getirmesi söz konusudur. Sargılar alan ile aynı hızda dönerse endükleme olmaz. Bu sebeple rotorda endüklenen gerilim ve frekans bahsedilen hız farkına bağlıdır [25].



Şekil 2. 5 Transformatör eşdeğer devresi [25]



Şekil 2. 6 Asenkron motor eşdeğer devresi [25]

Statora V_1 geriliminin uygulanması ile mıknatıslanma X_m reaktansı , primer ve sekonder devreyi bağlayan ϕ_m akısını oluşturur ve I_m mıknatıslanma akımının geçmesini sağlar. Hava aralığında zamana göre değişen bu akı, rotorda I_2 akımını oluşturacak bir emk indükler. Rotor büyüklüklerinin bulunması stator büyüklüklerine göre daha zordur. Çünkü rotor döner alana göre n_2 değişken hızı ile döner. Bunun sonucunda birçok büyüklük kaymanın fonksiyonu olur. Motor hızının etkisi eşdeğer devredeki (R_2/s) parametresi ile belirlenir. Rotor dururken *s=1* olduğu için bu gerilim de f_1 frekansında olur [25].

BÖLÜM 3

SABİT FREKANS ASENKRON MOTOR TASARIMI

Sabit bir şebeke frekansında çalışacak asenkron motorların tasarımında öncelikle motordan beklentilerin ortaya konulması gerekmektedir. Bu beklentiler motor tasarımının başlangıcı olan tasarım girdilerini oluşturacaktır. Motor tasarım girdileri şu şekildedir:

- Motor nominal gücü (5.5 kW, 7.5kW, 11kW vb.)
- Kutup sayısı(2, 4, 6 kutup vb.)
- Şebeke gerilimi(400V, 460V vb.)
- Şebeke frekansı(50Hz, 60Hz vb.)
- Faz sayısı(1 fazlı, 3fazlı vs.)
- Bağlantı şekli (yıldız veya üçgen)
- Hedeflenen cos ϕ değeri
- Hedeflenen verim sınıfı(IE2,IE3,IE4 vb.)
- Hedeflenen verim sınıfına bağlı verim değeri (%90,1 vb.)
- Kilitli rotor momentinin nominal momente oranı (2.5 kat gibi)
- Kilitli rotor akımının nominal akıma oranının maksimum (6 kat gibi)
- Devrilme momentinin nominal momente oranı (3.0 kat gibi)
- İzolasyon sınıfı (B, F, H vb.)

- Sızdırmazlık Sınıfı (IP65, IP55 vb.)

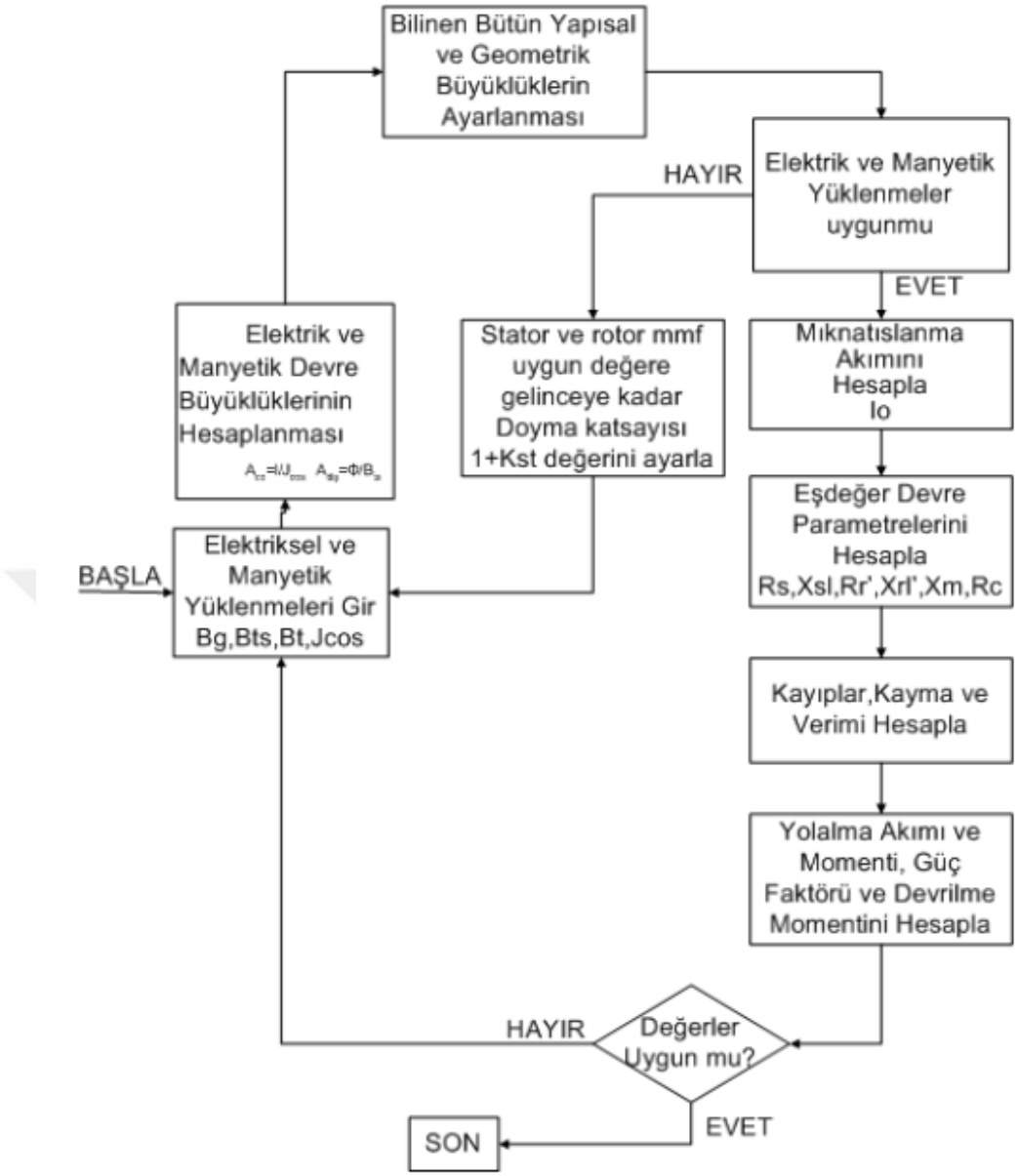
Tasarım girdilerinin oluşturacak bu parametreler aynı zamanda motor üreticileri tarafından katalog ve etiketlerde beyan edilmektedir.



Şekil 3. 1 18.5 kW 400 V 50 Hz IE3 motora ait etiket bilgileri

Şekil 3.1'deki motor etiketinde belirtildiği üzere motor tasarımında kodu 60034 ile başlayan IEC standartları serisinden faydalanılmaktadır. Motor verimin sınıflandırılmasında IEC 60034-30 ve motor veriminin bulunabilmesi için uygulanacak test ve yöntemleri belirlenmesinde IEC 60034-2-1 standardı referans alınmaktadır.

Sabit frekans için tasarlanacak asenkron motorlarda Şekil 3.2'deki algoritma uygulanacaktır. İlk etapta elektriksel ve manyetik yüklenmeler ve bu yüklenmelere bağlı ihtiyaç duyulan gerekli alanlar ortaya konulacaktır. Sonrasında ise stator iç çapı D_{is}, stator dış çapı D_{out}, sac paket boyu L gibi boyutlar belirlenecektir. Belirlenen boyutlara akım ve akı yoğunluklarının uygunluğu kontrol edilip, mıknatıslanma akımının hesaplanması adımına geçiş yapılacaktır. Mıknatıslanma akımından sonra ise eşdeğer devre parametreleri, kayıplar verim vb. tasarım girdilerinde beklentileri oluşturan değerler hesaplanacaktır. Bu değerler tasarım girdileriyle kıyaslanarak tasarımın uygunluğu kontrol edilecektir. Tasarım uygun bulunursa algoritma sonlandırılacak, uygun bulunmaz ise döngü yeniden başlatılacaktır.



Şekil 3.2 Asenkron motor tasarım algoritması [13]

3.1 Stator Çekirdeğinin Boyutlandırılması

Stator çekirdeğinin boyutları belirlenirken D_{is}^2L değeri sabit tutularak hesaplamalar yapılmalıdır. Buna göre;

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2p_1 p_1\, Sgap}{\pi\, \lambda\, f_1 C_0}} \tag{3.1}$$

$$S_{gap} = \frac{P_n K_E}{\eta_n \cos\varphi_{1n}} \tag{3.2}$$

$$K_E = 0.98 - 0.005 p_1 \tag{3.3}$$

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \tag{3.4}$$

λ paket oranı kutup sayısında göre aşağıdaki tablodaki gibi alınabilir:

Çizelge 3. 1 Kutup sayısına göre paket oranı λ değerleri

$2p_1$	**2**	**4**	**6**	**8**
λ	0.6-1.0	1.2-1.8	1.6-2.2	2.0-3.0

D_{is} stator iç çapı belirlendikten sonra stator dış çapı D_{out} hesaplanır. D_{out} hesaplanırken ampirik yöntemlerle bulunmuş olan aşağıdaki tablodaki K_D stator iç çap ile dış çapın oranlarından faydalanılır:

Çizelge 3. 2 Kutup sayısına göre iç çap dış çap oranı K_D değerleri

$2p_1$	**2**	**4**	**6**	**8**
K_D	0.54 – 0.58	0.61 – 0.63	0.68 – 0.71	0.72 – 0.74

Motorun mekanik boyutları hesaplanırken dikkate alınması gereken bir diğer parametre stator ve rotor arasındaki hava aralığıdır. Hava aralığı yaklaşık olarak aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir:

$2p_1$=2 için $g = \left(0.1 + 0.02.\sqrt[3]{P_n}\right).10^{-3}$ (3.5)

$2p_1$>= 2 için $g = \left(0.1 + 0.012.\sqrt[3]{P_n}\right).10^{-3}$ (3.6)

Hava aralığı belirlenirken, hava aralığı gereğinden küçük olursa harmonik kayıpların artacağı, büyük olur ise akım artmasına sebep olarak güç faktörü ve verimi düşüreceği dikkate alınmalıdır.

3.2 Stator Sargılarının Hesaplanması

Stator oluk sayısı aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$N_s=2p_1qm$ (3.6)

Çift katmanlı bobinin y /τ değeri (bobin adım kısalması) temel stator MMF (magneto motor kuvvet) yüzey harmoniğini azaltacak şekilde seçilmelidir. Yan yana gelen iki oluk arasındaki elektriki açı α_{ec} aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\alpha_{ec} = \frac{2\pi p_1}{N_s} \quad (3.7)$$

Sargı dağıtım katsayısı K_{q1} ise şöyle bulunur:

$$K_{q1} = \frac{\sin\frac{\pi}{6}}{q\sin\frac{\pi}{6q}} \quad (3.8)$$

Bobin adım katsayısı K_{y1} şöyle bulunur:

$$K_{y1} = \sin\frac{\pi y}{2\tau} \quad (3.8)$$

Buradan stator sargı faktörü K_{w1} ise:

$K_{w1}= K_{q1} K_{y1}$ (3.9)

olarak bulunur.

B_g hava aralığı manyetik akı yoğunluğu Tesla cinsinden kutup sayısına göre yaklaşık 3.10'daki aralıkta yer almalıdır:

$$B_g = (0.5 - 0.75)T \qquad 2p_1 = 2$$
$$B_g = (0.65 - 0.78)T \qquad 2p_1 = 4 \quad (3.10)$$
$$B_g = (0.70 - 0.82)T \qquad 2p_1 = 6$$

Toplam akı ise ;

$$\phi = \alpha_i \tau L B_g \tag{3.11}$$

formülü ile hesaplanabilir.

Faz başına sarım sayısı ise:

$$W_1 = \frac{K_E V_{1ph}}{4 K_f K_{w1} f_1 \phi} \tag{3.12}$$

Oluk başına sarım sayısı :

$$n_1 = \frac{a_1 W_1}{p_1 q} \tag{3.13}$$

olarak hesaplanabilir.

Motorun nominal akımını şöyle bulabiliriz:

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3} V_1 \eta \, cos\varphi} \tag{3.14}$$

Motorun nominal akımı ve belirlenen akım yoğunluğundan yola çıkarak iletken kesiti hesaplanabilir. J akım yoğunluğu 7 A/mm^{2}değerinden daha küçük olarak çalışılmalıdır. Akım yoğunluğu düşüklüğüne bağlı olarak, stator bakır kayıpları da düşük olacaktır. Bu nedenle akım yoğunluğu olabildiğine düşük seçilmelidir. Tel kesit alanı şöyle hesaplanır:

$$A_{cu} = \frac{I_{1n}}{Js} \tag{3.15}$$

Telin alanından kolaylıkla tel çapına geçilebilir. Stator oluk alanı hesabında, stator oluklarında kullanılan tellerin çapına ek olarak telin ve oluğun izolasyon kalınlıkları dikkate alınmalıdır. Tel çapı mümkün olduğunca 1mm ve aşağısı çaplarda seçilmelidir. Tel çapı arttıkça sarım işlemi zorlaşacaktır. Hesaplanan tel çapının 1 mm'nin çok üstünde olduğu durumlarda paralel iletken kullanımı tercih edilmelidir. Bazı tel kesitleri için izolasyon kalınlıkları tabloda verilmiştir:

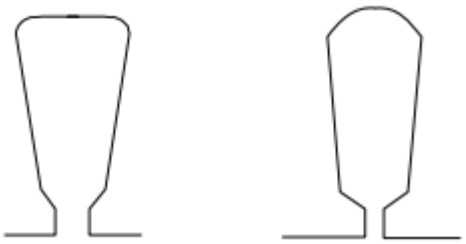
Çizelge 3. 3 Stator sargılarında kullanılan tel çapları ve izolasyonlu tel çapları

Tel çapı [mm]	İzolasyonla beraber tel çapı [mm]
0.3	0.327
0.32	0.348
0.33	0.359
0.35	0.3795
0.38	0.4105
0.40	0.4315
0.42	0.4625
0.45	0.4835
0.48	0.515
0.50	0.536
0.53	0.567
0.55	0.5875
0.58	0.6185
0.60	0.639
0.63	0.6705
0.65	0.691
0.67	0.7145
0.70	0.742
0.71	0.7525
0.75	0.749
0.80	0.8455
0.85	0.897
0.90	0.948
0.95	1.0
1.0	1.051
1.05	1.102
1.10	1.153
1.12	1.173
1.15	1.2035
1.18	1.2345
1.20	1.305
1.25	1.305
1.30	1.356

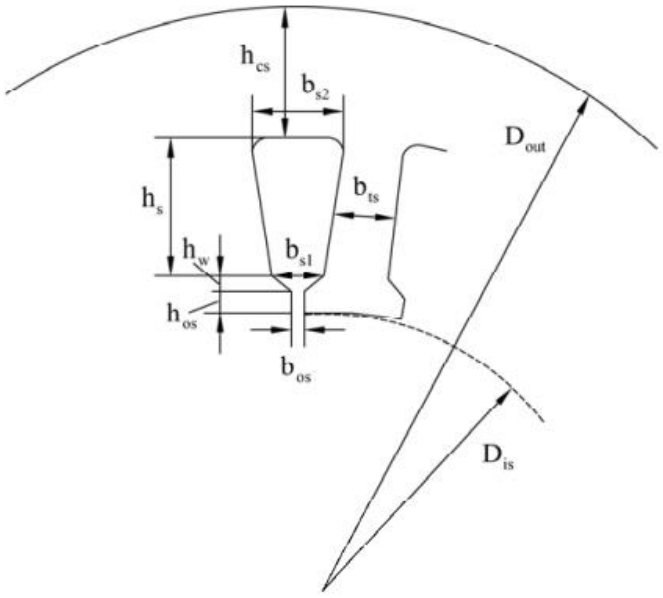
3.3 Stator Oluklarının Boyutlandırılması

Oluk başına sarım sayısı, paralel tel sayısı, telin izolasyon kalınlığı, oluk izolasyon kalınlığı gibi parametrelerden yola çıkılarak aktif kullanılacak olan oluk alanı belirlenebilir. Belirlenen aktif oluk alanı, brüt stator oluk alanın makine sargıları için maksimum %80'nine, el sargılar için ise maksimum %85'ine denk gelecek şekilde brüt stator oluk alanı hesaplanabilir. Daha yüksek doluluk oranları için sargıların oluğa yerleştirilmesi oldukça zor olacaktır. Brüt stator oluk alanı şöyle hesaplanır:

$$A_{st} = \frac{\pi a_p d_{cu}^2 n_s}{K_{fill}} \tag{3.16}$$



Şekil 3. 3 Çeşitli stator oluk geometrileri: trapez formu ve yuvarlak form



Şekil 3. 4 Stator oluk ölçüleri harflendirilmesi

Tecrübelere dayanarak stator oluklarındaki bazı uzunlukların dağılımları aşağıdaki gibidir:

b_{os}= 2...3 ≤ 8g mm (3.17)

h_{os}= 0.5...1 mm (3.18)

h_w= 1...4 mm (3.19)

Hava aralığındaki manyetik alanın tamamının dişler tarafından üretildiğini düşünürsek

$B_g \tau_s L \approx B_{ts} b_{ts} L K_{fe}$ (3.20)

Denklemine ulaşılır. Bu denklemden b_{ts} hesaplanabilir. Diğer bilinmeyenler ise aşağıdaki denklemlerden hesaplanır:

$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{is} + 2h_{os} + h_w)}{N_S} - b_{ts} \quad (3.21)$$

$$b_{s2} = \sqrt{4A_{st} tan\frac{\pi}{N_S} + b_{s1}^2} \quad (3.22)$$

$$h_s = \frac{2A_{st}}{b_{s1} + b_{s2}} \quad (3.23)$$

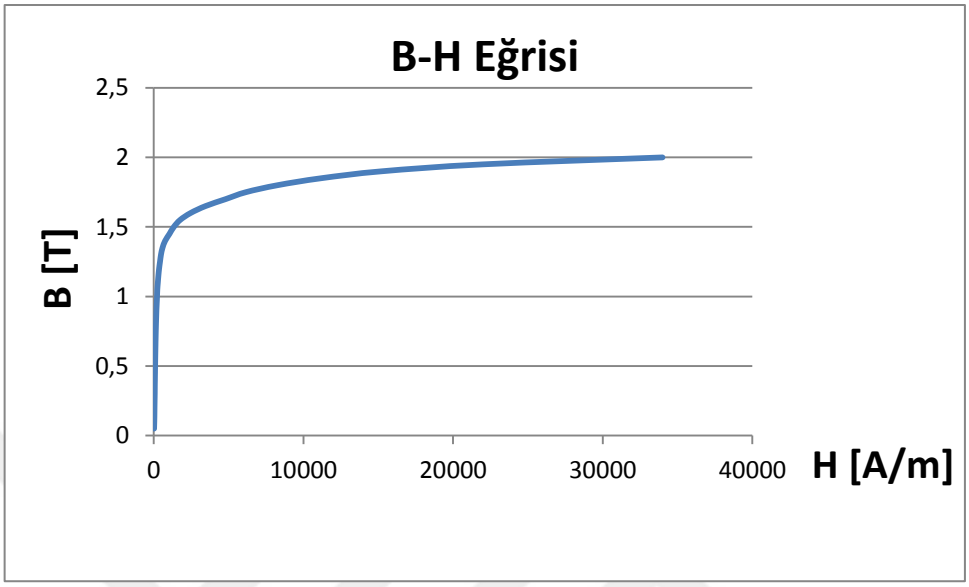
(1+K_{st}) diş doyma faktörünün stator ve rotor dişlerinde aynı magneto motor kuvvetini (MMF) ürettiği varsayılarak hesaplamalara devam edilir [13].

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}} \quad (3.24)$$

Buradan hava aralığı MMF'i aşağıdaki gibi bulunur:

$$F_{mg} \approx 1.2g\frac{B_g}{\mu_0} \quad (3.25)$$

F_{mts} değerinin hesaplanabilmesi için seçilen manyetik akı yoğunluğu B_{ts} değerine karşılık gelen H_{ts} manyetik alan şiddeti değeri statorda kullanılan sacın karakteristiğinden yola çıkılarak bulunur.



Şekil 3. 5 Stator sacının B-H karakteristiğinin grafiği

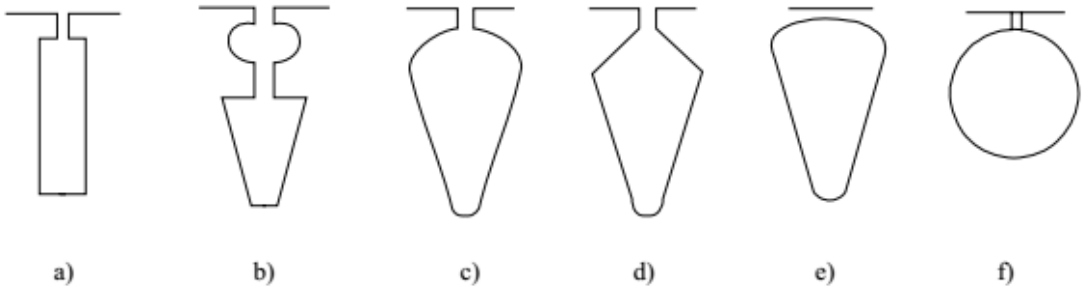
3.4 Rotor oluklarının hesaplanması

Rotor oluk sayısı belirlenirken stator ve rotor oluk sayısı beraber düşünülmeli parazitik momentleri, ek kayıpları, gürültüyü ve titreşimi en düşük seviyede tutacak oluk sayıları seçilmelidir. En uygun stator ve rotor oluk sayısı kombinasyonları çizelge 3.4'te verilmiştir:

Çizelge 3. 4 Stator ve rotor oluk sayısı kombinasyonları

2_{p1}	N_s	N_r
2	24 36 48	18, 20, 22, 28, 30, ,33,34 25,27,28,29,30,43 30,37,39,40,41
4	24 36 48 72	16,18,20,30,33,34,35,36 28,30,32,34,45,48 36,40,44,57,59 42,48,54,56,60,61,62,68,76
6	36 54 72	20,22,28,44,47,49 34,36,38,40,44,46 44,46,50,60,61,62,82,83
8	48 72	26,30,34,35,36,38,58 42,46,48,50,52,56,60
12	72 90	69,75,80 86,87,93,94

Rotor olukları da stator oluklarında olduğu gibi çeşitli şekillerde üretilmektedir:



Şekil 3. 6 Rotor oluk geometrileri((a)Dikdörtgen (b) çift kafes (c) damla (d) poligonal (e)kapalı damla (f) daire)

Rotor oluk alanını belirlerken ilk olarak rotor bara akımı I_b hesaplanmalıdır:

$$I_b = K_1 \frac{2mW_1K_{w1}I_{1n}}{N_{r1}} \tag{3.26}$$

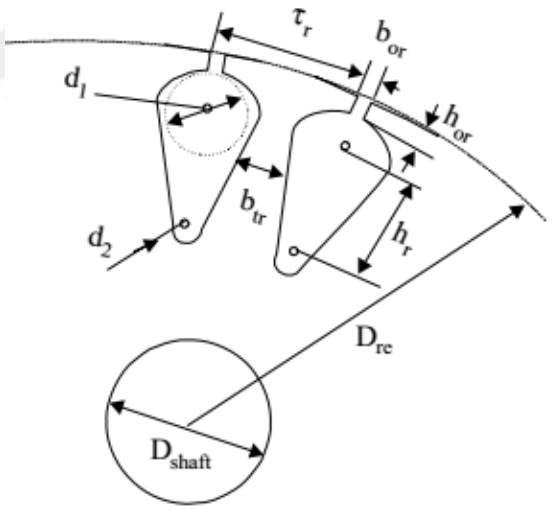
$$K_1 \approx 0.8cos\varphi_{1n} + 0.2 \tag{3.27}$$

Rotor bara akımından yola çıkılarak oluk alanı şöyle bulunur:

$$A_b = \frac{I_b}{J_b} \tag{3.28}$$

Rotor uç halkasından geçen akım I_{er} ise :

$$I_{er} = \frac{I_b}{2\ sin\frac{\pi p_1}{N_r}} \tag{3.29}$$



Şekil 3. 7 Rotor oluk ölçüleri harflendirilmesi

Rotor oluk adımı τ_r şöyle hesaplanır:

$$\tau_r = \frac{\pi(D_{is} - 2g)}{N_r} \tag{3.30}$$

Rotor diş genişliği b_{tr} :

$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{fe}B_{tr}} . \tau_r \quad (3.31)$$

$$d_1 = \frac{\pi(D_{is} - 2h_{or}) - N_r b_{tr}}{\pi + N_r} \quad (3.32)$$

$$d_2 = d_1 - 2h_r tan\frac{\pi}{N_r} \quad (3.33)$$

$$h_{cr} = \frac{\emptyset}{2LB_{cr}} \quad (3.34)$$

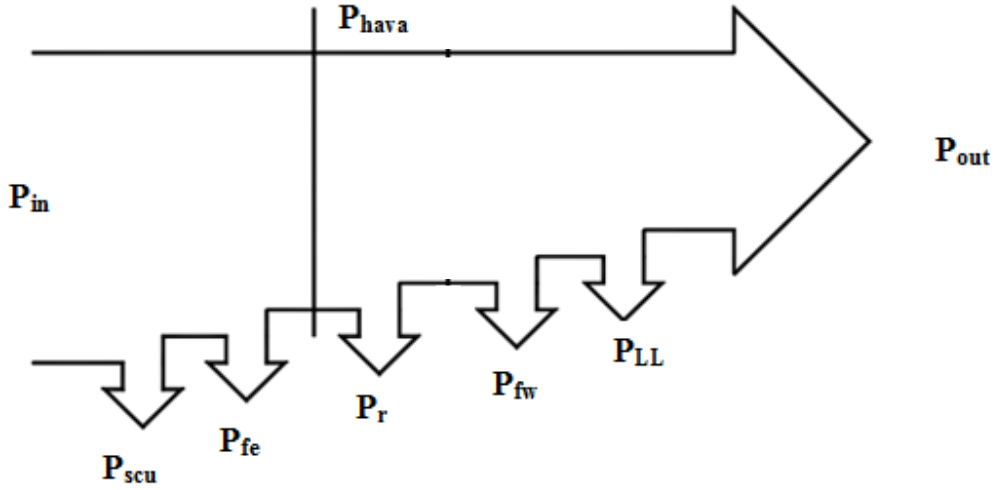
Maksimum mil çapı şöyle belirlenir:

$$D_{mil_{max}} \leq D_{is} - 2g - 2(h_{or} + h_r + h_{cr} + \frac{d_1 + d_2}{2}) \quad (3.35)$$

3.5 Asenkron Motorun Kayıpları

Asenkron motorda kayıplar stator bakır kayıpları, rotor bakır kayıpları, demir kayıpları, sürtünme kayıpları, vantilasyon kayıpları ve ek(kaçak) kayıplar olarak ayrılabilir.

$P_T = P_{scu} + P_r + P_{fw} + P_{fe} + P_{LL}$ (3.36)



Şekil 3. 8 Asenkron motorda güç akış diyagramı

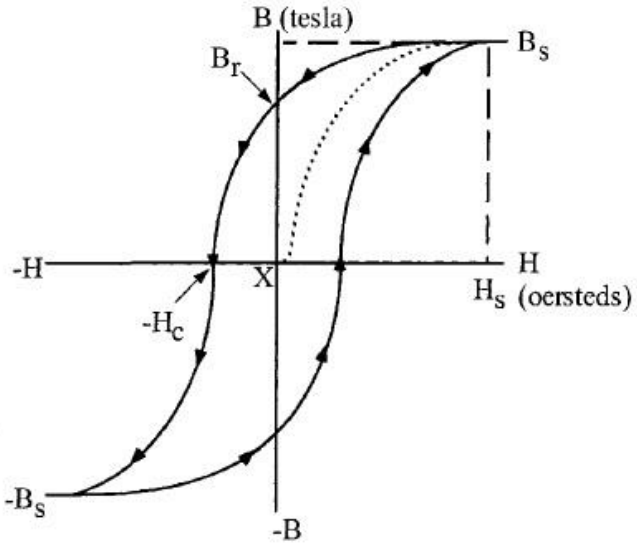
3.6 Stator Bakır kayıpları

P_{scu} olarak ifade edilen stator bakır kayıpları stator sargı direnciyle ve statordan geçen akımın karesiyle doğru orantılıdır. Motordaki kayıpların büyük bölümünü stator bakır kayıpları oluşturmaktadır. Motorun optimizasyonunda akımın düşük tutulması stator kayıplarının azalmasını sağlayacaktır. Ayrıca, kullanılan iletkenin öz direnci ve iletkenin kalınlığı stator bakır kayıplarında oldukça etkilidir. Stator sargılarında kullanılan iletkenin cinsi ve kalınlığı ile ilgili yapılacak iyileştirmeler motor maliyetini arttıracaktır. Ek olarak motor sarımında sargı başı yüksekliği düşük tutulması, sargıda kullanılan iletkenin uzunluğunun azalmasını sağlayacak ve stator direncinin düşmesine bağlı olarak stator kayıplarını azaltacaktır. Stator kayıplarındaki bir diğer parametre motorun sargı sıcaklığıdır. Motorun sargı sıcaklığı arttıkça sargı direnci R_s artacak, buna bağlı olarak stator bakır kayıpları da artacaktır.

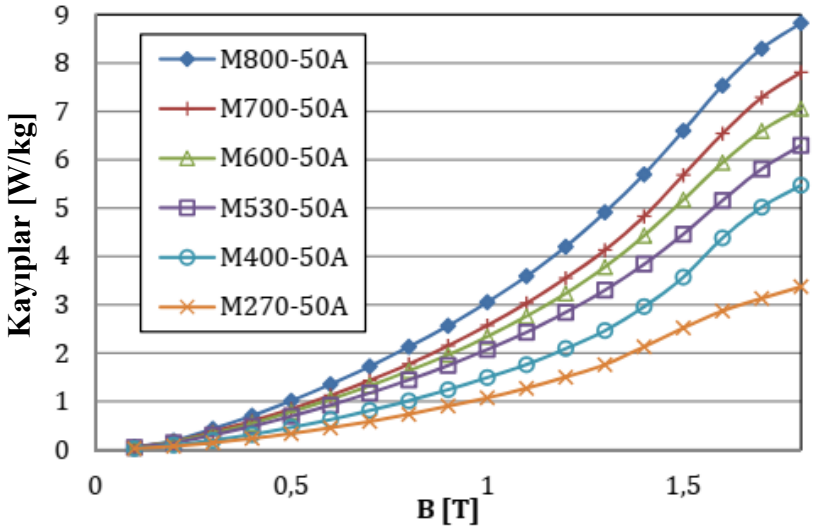
$$P_{scu} = 3\ x\ R_S\ x\ {I_s}^2 \tag{3.37}$$

3.7 Stator Demir Kayıpları

Değişken manyetik alan dolayısıyla meydana gelen histerezis ve eddy akımları sebebiyle stator sac paketlerinde kayıplar meydana gelmektedir. Stator sac paketlerinde kullanılan sacın kalitesiyle doğrudan ilgilidir. Ayrıca, demir kayıplarını azaltmak amacıyla motor imalatçıları yaygın olarak 0,5 mm kalınlığında üzeri vernik kaplı sac kullanmaktadır. Motorun optimizasyonunda stator paket boyunun olabildiğine düşük tutulması sac kayıplarının azalmasına yardımcı olacaktır. Sac üreticileri tarafından sacın kalitesi M470-50A, M700-50A, M330-50A gibi kodlamalarla ifade edilmektedir. Örneğin, M470-50A sacın 1,5T 50 Hz için demir kaybı 4,7 W/kg'dır. Demir kayıpları P_{fe} olarak ifade edilir.



Şekil 3. 9 Örnek hysteresis eğrisi



Şekil 3. 10 Değişik elektriksel sacların akı yoğunluğuna göre demir kayıpları [21]

3.8 Rotor Bakır kayıpları

Stator bakır kayıplarında olduğu gibi rotor bakır kayıpları rotor akımı ve baralarında kullanılan iletkenin cinsi, kesiti, uzunluğu ile doğrudan ilgilidir. Rotor akımları rotorun kaymasına bağlıdır. Rotorun kayması arttıkça rotor akımı ve frekansı artmaktadır. Sincap kafesli motorlarda rotor baraları enjeksiyon yöntemiyle elde edilmektedir. Yapılan enjeksiyonun kalitesi rotor baralarının iletkenliği üzerinde etkilidir. Rotor baralarında yaygın olarak alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyum yerine bakır kullanılması rotor kayıplarını azaltmaktadır. Ancak, motor maliyetinde artışa neden olmaktadır. Ek olarak bakırın eritilerek rotor oluklarına enjekte edilmesi, alüminyuma göre çok daha zordur. Rotorun sıcaklığının artması, rotorun bara direncini arttıracağından rotor kayıplarını arttıracaktır.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{3.38}$$

$$P_r = (P_{in} - P_{scu} - P_{fe}) \times s \tag{3.39}$$

3.9 Sürtünme ve vantilasyon kayıpları

Sürtünme kayıpları motorun rotorunun dönmesine karşı koyan mekanik sürtünmeler sebebiyle oluşmaktadır. Kullanılan rulmanın tipi, rulman gresi ve ortam sıcaklığı gibi faktörlerden doğrudan etkilenmektedir. Ayrıca, rulmanın yuvasının sıkılığı, motor kapaklarının sıkılığı gibi faktörlerden etkilenmektedir.

Vantilasyon kayıpları ise motorun soğutulmasında kullanılan mile doğrudan akuple pervane sebebiyle oluşan kayıplardır. Pervanenin yapısı, büyüklüğü, kanat sayısı kaybın büyüklüğüne doğrudan etki etmektedir. Motorun optimizasyonunda motorun sıcaklığını minimum seviyede tutacak kanat yapısı ve sayısı belirlenmeli, aynı zamanda pervanenin çektiği gücün motor verimini düşüreceği dikkate alınmalıdır. Motorun nominal çalışma sıcaklığı bakır kayıplarında doğrudan etkili olduğundan, motorun soğutma performansı motorun verimine büyük oranda etki göstermektedir.

3.10 Ek kayıplar

İngilizcesi “stray load loss” olarak ifade edilen ek kayıplar(ilave kayıplar), motorda meydana gelen harmonikler sebebiyle oluşmaktadır. Ek kayıpları analitik olarak hesaplamak ya da test sırasında ölçmek oldukça zordur [22]. Asenkron motorlarda ek kayıplar IEC60034-2-1 standardına göre kayıpların analizi metoduyla belirlenebilir [24].

Ek kayıpları azaltmak için şunlar yapılabilir:

- ✓ İnter bar akımları sınırlandırılmalıdır.
- ✓ Rotor baraları izole edilmelidir.
- ✓ Rotor yüzeyinin işlenmesi saclar arasında iletkenliğe sebep olacaktır. Buna bağlı olarak işleme yapılmaması verimi arttırabilir.
- ✓ Stator oluk sayısının arttırılması daha düzgün bir sinüs elde edilmesini sağlayarak harmonik kayıpları azaltacaktır.
- ✓ Hava aralığının arttırılması harmonik kayıpları azaltacaktır. Ancak hava aralığındaki artış akımın da artışına sebep olacağından hava aralığı optimum düzeyde arttırılmalıdır.

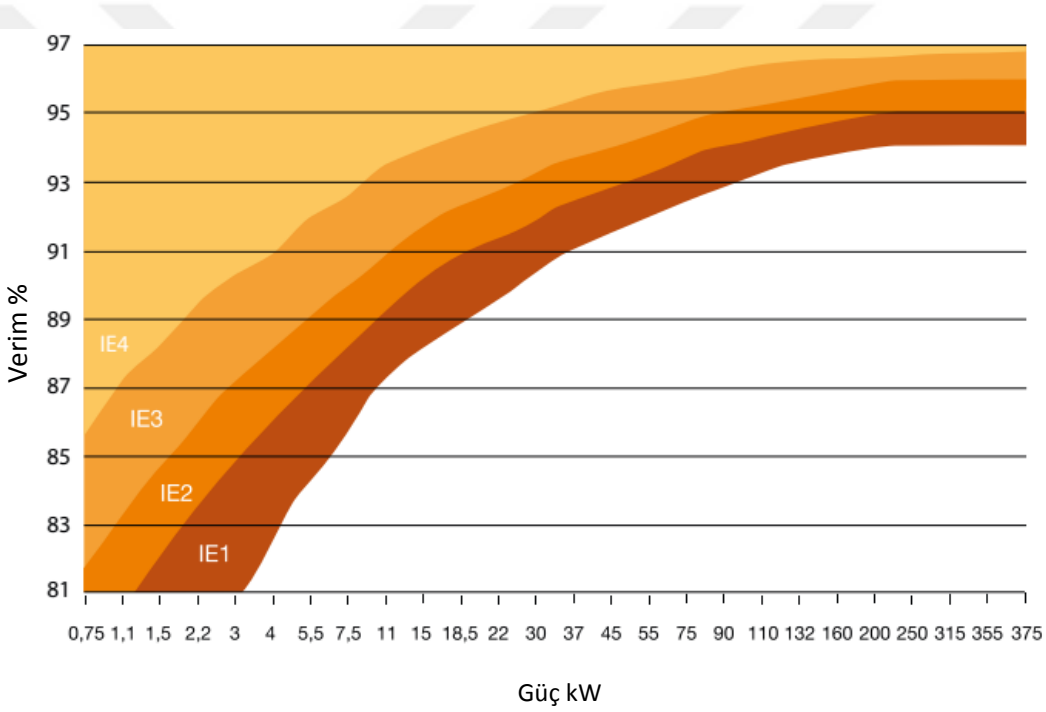
3.11 Asenkron Motorun Verimi

Asenkron motorun verimi çıkış gücü olan mil gücünün giriş gücüne oranı ile bulunabilir. Motorun giriş gücü, çıkış gücü ile kayıpların toplamına eşittir.

$$P_{in} = P_{out} + P_T \tag{3.40}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{3.41}$$

Asenkron motorların verim sınıfları IEC60034-30 standardında belirlenmiştir. Verim sınıfları düşük verim seviyesinden yüksek verim seviyesine doğru IE1,IE2,IE3,IE4 olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.11 4 kutup motorların çıkış gücü bazında verim sınıfı dağılımı [23]

BÖLÜM 4

DEĞİŞKEN HIZLI MOTOR TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

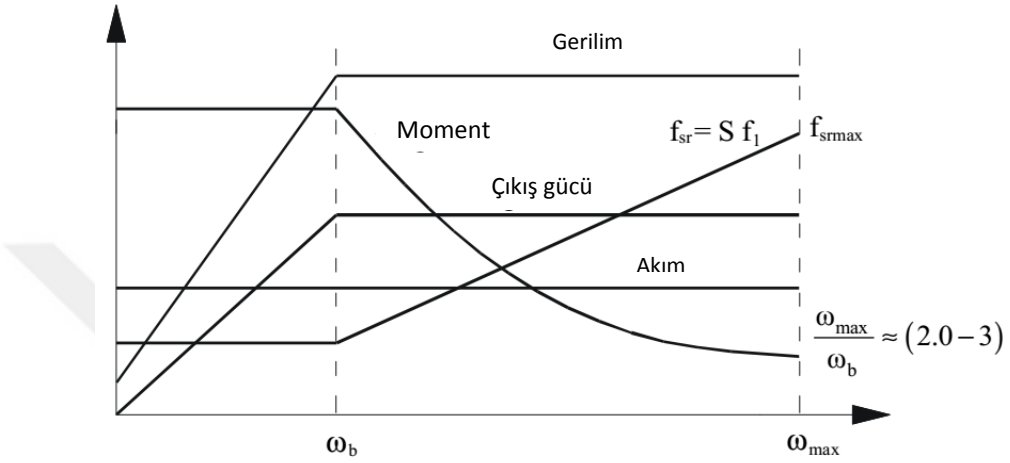
Sabit bir şebeke frekansında çalışmak üzere tasarlanan asenkron motorlarda tasarımcılar motorun etiket değerinde belirttikleri çıkış gücü için motorun nominal çalışma frekansında maksimum performans verebilmesini ve aynı zamanda minimum maliyetle üretilebilmesini temel tasarım hedefleri olarak belirlerler. Ek olarak, kalkış akımı ve momenti, devrilme momenti ve motorun nominal çalışma akımı motorun tasarımında dikkat edilen parametrelerdir. Farklı optimizasyon algoritmaları, farklı motor hesaplama ve modelleme teknikleri, farklı fonksiyonlar ve kısıtlamalar ortaya koyarak, belirli koşulları sağlayan optimal elektrik motoru tasarımını yapabilmek için şimdiye kadar çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir [10] , [11].

Farklı hız ve akı koşullarında geniş bir hız aralığında çalışmak için uygun olan değişken hızlı bir endüksiyon motorunun boyutlandırılması söz konusu olduğunda, standart motor tasarımına göre tasarım işlemi çok sayıda tasarım değişkenleri içermesi ve dikkate alınması gereken birçok diğer kısıtlamalar barındırması nedeniyle daha karmaşıktır [3].

Değişken hızlı asenkron motorlar yaygın olarak traksiyon uygulamalarında (raylı sistemler ve elektrikli araçlar), demir çelik endüstrisinde, tekstil sektörü uygulamalarında, fan ve kompresör uygulamalarında kullanılmaktadır [2]. Değişken hızlı uygulamalarda ihtiyaç duyulan geniş bir frekans bandında moment kaybı yaşamadan çalışabilme özelliğinin sağlanabilmesi için özel tasarım yapılması kaçınılmaz olmuştur [18].

Endüstrideki hız kontrolü uygulamaları yük momenti/hız eğrisine bağlı olarak 3 ana gruba ayrılabilir.

1. Servo sürücüler: Sabit güç hız aralığı olmayan sistemlerdir.
2. Genel sürücüler: Orta büyüklükte sabit güç hız aralığı ($\omega_{max} / \omega_b \leq 2$)
3. Sabit güç sürücüleri: Geniş sabit güç hız bölgesine sahip sistemler ($\omega_{max} / \omega_b \geq 2$)

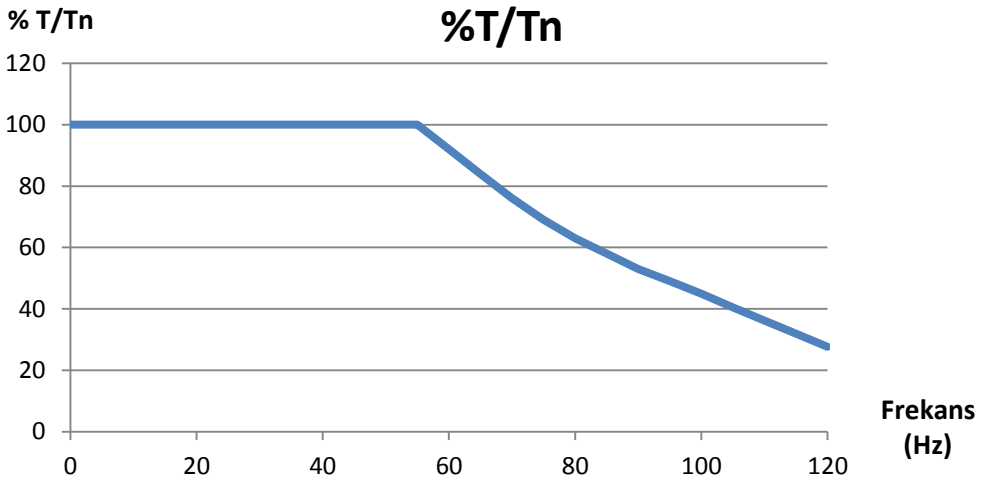


Şekil 4. 1 Standart tasarım asenkron motorun inverter ile çalışması durumunda elde edilen moment, gerilim ve akım değerlerinin frekansa(çalışma hızına) göre değişim grafiği [12]

4.1 Servo sürücüler

Robotlarda, takım tezgahlarında sıkça kullanılan servo sürücüler genelde baz hıza kadar sabit moment verebilen sistemlerdir. Baz hız (w_b) motorun nominal gerilim (V_n) ve frekansta (f_n) nominal güçte (P_n) ve momentte (T_n) sürekli olarak çalışabildiği ve sıcaklık artışının nominal düzeyde olduğu hızdır. Servo sistemler ani moment ve devir değişimlerine hızlı tepki verebilmeleriyle tanınırlar. Bu tip sistemlerde kullanılan motorların devrilme momentlerinin (T_b) nominal momentlerine (T_n) oranla yüksek olmaları gerekmektedir ($T_b > T_n$). T_b değeri büyüdükçe motorun cevap verme süresi kısalacaktır. Değişken hızlarda çalışan motorlarda sıcaklık artışı sınırlandırılmalıdır. Aşırı ısınma sargı izolasyonuna zarar vereceği gibi mekanik olarak hasarlara da sebep olacağından pozisyon kontrolünde hatalı okumalara sebep olabilir. Servo sistemler çok değişken hızlarda, özellikle baz hızdan daha düşük hızlarda kullanıldığından dolayı motor milinden bağımsız çalışan şebekeden besleme alan harici fanlarla soğutulurlar.

Bazı durumlarda ise sıvı ile soğutma kullanılabilmektedir. Genellikle belirli bir şebeke frekansı için (50 Hz veya 60 Hz) tasarlanmış standart motorlar bu uygulamalar için yeterli olmaktadır.



Şekil 4. 2 Standart 50 Hz motorun frekansa göre moment değişimi

4.2 Genel Sürücüler

Fan, kompresör ve pompa gibi değişken hız uygulamalarının çoğunluğunu kapsamaktadır. Referans hızın 0.1 ile 2 katı arasında hızlarda kullanılırlar. Baz hızın üstündeki hızlarda sabit güç sağlanır. ω_{max} / ω_b= 2' ye kadar olan aralıkta sabit güç çoğu zaman yeterlidir. Referans hızın üzerinde gerilim sabittir.

$$V_s = I_s R_s + j w_1 \Psi_s \quad (4.1)$$

$R_s \cong 0$ alınırsa (4.2)

$$\Psi_s \approx \frac{V_s}{\omega_1} \quad (4.3)$$

Baz hızının üstünde (ω_b) frekansa bağlı olarak hız (ω_1) artar iken gerilim sabit kalmaktadır. Sonuç olarak stator akı seviyesi azalır. Manyetik alan şiddetinde zayıflama meydana gelir. Her hız seviyesi için ani ivmelenmeler ve frenlemeler için motorda moment rezervi mevcuttur. Bu durumlarda motor yaklaşık %150 ile %200 arası yüklenebilir. Genel tahrik sistemlerinde mekanik enerjiyi elektrik enerjisinden üreten

asenkron motorun miline direkt akuple fanlar, asenkron motoru soğutmak için kullanılmaktadır.

Genel tahrik sistemlerinde kullanılan asenkron motorun verim seviyesi büyük bir öneme sahiptir. Bu sistemlerde genellikle F sınıfı (155^{o}C) izolasyona sahip, alçak gerilimle çalışan (maksimum 690 V) üç fazlı asenkron motorlar kullanılmaktadır.

4.3 Sabit Güç Bölgesinde Çalışan Değişken Hızlı Uygulamalar

Bu tip uygulamalar hibrit veya elektrikli araç motorlarında çoğunlukla kullanılmaktadır. Geniş bir alan zayıflama bölgesinde motorlar çalışmaktadır. Maksimum çalışma hızı baz hızın 2 katından daha büyüktür (ω_{max} / $\omega_b \geq 2$). Maksimum çalışma hızı baz hızın 3 ila 4 katı hatta bazı özel uygulamalarda 6 ila 7 katına ulaşabilmektedir. Geniş bir sabit güç aralığında asenkron motorun çalışabilmesi oldukça zordur. Çünkü çoğunlukla motorun sahip olduğu maksimum moment (devrilme momenti) (T_b) nominal momentin (T_n) yaklaşık 3 katı seviyelerindedir.

$$T_b \cong \frac{3p_1}{2L_{sc}} \mathrm{x} \left(\frac{V_{ph}}{\omega_1}\right)^2 \tag{4.4}$$

Yukarıdaki eşitliğe göre hız artar iken devrilme momentinin (T_b) değerinin sabit kalması veya artması için:

- Kutup sayısının artması
- Motora uygulanan gerilimin artması
- Kaçak reaktans L_{sc} değerinin azalması(motor boyutlarının büyümesi, özel oluk tasarımı vs.) gerekmektedir.

Bütün bu değişiklikler motor ve inverter maliyetlerinde artışa sebep olmaktadır. Bu sebeple doğru bir performans maliyet optimizasyonun elde edilebilmesi için süper yüksek hızlı uygulamalar ayrı değerlendirilmelidir.

Rotorun çevresel hızı 60-80m/s dolaylarına ulaştığında mekanik kısıtlamalar ortaya çıkmaktadır. Sincap kafesli asenkron motorlarda alüminyum enjeksiyon veya bakır çubuk kullanılması yöntemiyle elde edilen rotorlar bu tür yüksek hız uygulamaları için

sorunsuz çözümlerdir. Asenkron motorlar ürettikleri momentlerin artmasına paralel boyutsal olarak büyüme eğilimindedir. Fakat değişken hızlı uygulamalarda ise motorların küçük olması beklentisi ön plandadır. Yani birim hacim başına elde edilen gücün yoğunluğu sabit hız uygulamalarına göre daha yüksektir. Bu sebeple motorun üzerinde kayıplar sebebiyle oluşan ısı enerjisinin tahliye edilmesi önemli bir hale gelmektedir. Özellikle yüksek hızlarda çalışması istenen elektrikli araç motorlarında boyut ve ağırlık küçük tutulurken hacimsel güç yoğunluğu yüksek tutulmuştur. Bu uygulamalarda soğutmanın sağlanabilmesi için sıvı ile soğutma yöntemine başvurulmuştur.

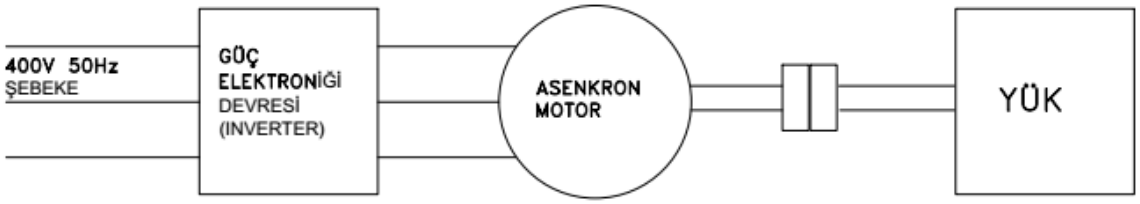
Son yıllarda değişken hızlı asenkron motor tasarımı çokça gündeme gelmesine rağmen dünya çapında belirli bir yöntem tam anlamıyla oluşmamıştır. Bu sebeple bu tezde temel olarak V/f oranın sabit tutulduğu uygulama olan skaler kontrol için değişken hızlı asenkron motor tasarımı aşağıdaki ana başlıklarla ele alınacaktır:

- Motor uçlarına gelen gerilimde düşme
- Deri etkisinin azaltılması
- Moment dalgalanmalarının azaltılması
- Motor verimin arttırılması
- Devrilme momentinin arttırılması
- Gerilim ayarıyla geniş sabit güç hız bölgesi elde etme
- Optimizasyon

4.4 Değişken Hızlı Asenkron Motor Tasarımında Dikkate Alınacak Parametreler

4.4.1 Motor Uçlarına Gelen Gerilimde Düşme

Asenkron motorlar günümüzde yaygın olarak motor, inverter (sürücü), redüktörden oluşan tahrik sistemlerinin bir parçası olarak kullanılmaktadır. Sabit hızlı uygulamalarda ise direkt olarak şebeke bağlantılı kullanılmaktadırlar.



Şekil 4. 3 İnverter (frekans evirici) , motor ve yükten oluşan tahrik sistemi

İnverter çıkışındaki gerilimin dalga şekli tam bir sinüs formunda değildir. İnverter çıkış gerilimindeki harmoniklerin frekansı ve genliği kontrol stratejisine(PWM), güç seviyesine bağlıdır. Harmonikler motorlarda ısınmaya sebebiyet vermektedir.

İnverterlerin çıkış gerilimi V_m, inverterin giriş uçlarındaki şebeke geriliminden Vg maksimum %10, ortalama olarak %5 mertebelerinde daha düşüktür.

$$V_m=V_g(1-v_{derat}) \; ; \; v_{derat}<0,1 \qquad (4.5)$$

İnverterin çıkış uçlarındaki gerilimin düşüşüne bağlı olarak motorda güç kaybı yaşanmaktadır. Motorun tasarımı aşamasında hesaba katılan Esson sabitinde C_0 değeri inverterdeki gerilim düşümüne bağlı olarak, %8 ile %12 arasında daha düşük alınmalıdır.

$$C_0`=C_0(1-p_{derat}) \; ; \; p_{derat} =(0,08-0,12) \qquad (4.6)$$

4.4.2 Deri Etkisinin Azaltılması

Değişken hızlı tahrik sistemlerinde gerilim ve frekans değişimine bağlı olarak hızın değişimi sağlanmaktadır. Değişken hızlı tahrik sisteminde kullanılan asenkron motorun kalkış moment ve akım değeri önemli değildir. Fakat moment ve hız değişimlerine sistemin cevap süresinin kısalması ve geniş bir aralıkta motorun sabit güçte çalışabilmesi için devrilme moment değerinin (T_b) büyük olması gerekmektedir. Bununla beraber devrilme momentinin motor boyutlarını büyütmeden arttırılması kolay bir işlem değildir [18].

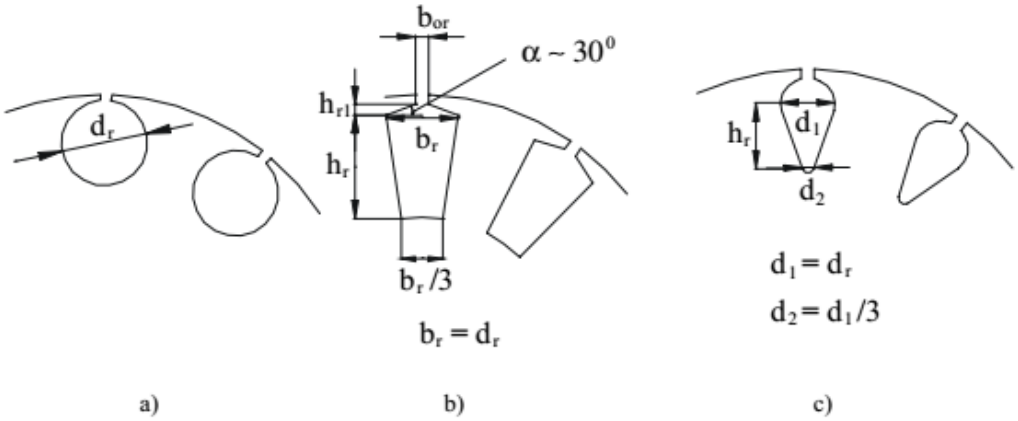
Rotor baralarında meydana gelen deri etkisi rotor direncinin yükselmesine sebep olarak kalkış akımının sınırlandırılması ve yüksek kalkış momentlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda rotor direncinin yüksek olması motorda ekstra kayıplara neden olmaktadır. Kalkış momenti ve kalkış akımının inverterle beslenen asenkron motorlarda sorun olmadığı dikkate alındığında rotor direncinin azaltılarak motorun veriminin arttırılması uygun olacaktır.

Deri etkisinden dolayı oluşan sargı kayıpları motorun çalışma frekansına, sargılarda kullanılan telin kesitine ve oluktaki pozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. İlk olarak temel çalışma frekansında (1. harmonik) rotor ve statorda oluşan deri etkisi azaltılmalı. Sonra inverterin anahtarlama frekansına göre rotor ve statorda oluşan deri etkisi kontrol edilmeli ve sınırlandırılmalıdır.

Rotor barasında meydana gelen deri etkisinin formülü :

$$\zeta = h\sqrt{\frac{S\omega_1\sigma_{cor}\mu_0}{2}} \tag{4.7}$$

Trapez formunda yuvarlak oluklar kullanılarak sabit diş akısı elde edilip deri etkisi azaltılabilir.



Şekil 4. 4 Düşük deri etkisi gösteren rotor oluk şekilleri((a) yuvarlak form (b) dikdörtgen form (c) trapez formu)

4.4.3 Motor Veriminin Arttırılması

Motor verimliliğinin arttırılması motor kayıpların azaltılmasına bağlıdır. Motor kayıpları kabaca stator ve rotor bakır kayıpları, demir kayıpları(nüve, sac paketi) ve uzay ve zaman harmoniklerine bağlı ek kayıplar olarak tanımlanabilir.

Bakır kayıpları iletken kesitiyle ters orantılı ve motor akımının karesiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Bakır kayıplarını azaltmaya yönelik olarak iletken kesitinin arttırılması motor boyutlarının büyümesine ve maliyetin artmasına neden olmaktadır.

Demir kayıplarının azaltmasına yönelik ise düşük demir kaybına sahip sac kullanımı ve/ veya manyetik akı yoğunluğunun azaltılması gerekmektedir. Akı yoğunluğunun azaltılması motor boyutlarını büyütmekte, demir kaybı düşük sac kullanımı ise motor maliyetlerini arttırmaktadır.

Çizelge 4.1 Elektriksel sacların sınıflarına göre kalınlık, direnç ve demir kaybı değerleri [15]

Sac Tipi	Maks. Demir Kaybı (W/kg) 50 Hz ve 1.5 T 'da	Kalınlık (mm)	Direnç (μΩ)
M235-35A	2,25	0,35	59
M270-35A	2,47	0,35	52
M330-35A	2,94	0,35	42
M330-50A	3,03	0,5	42
M400-50A	3,57	0,5	42
M530-50A	4,46	0,5	31
M600-50A	5,17	0,5	30
M700-50A	5,68	0,5	25
M800-50A	6,60	0,5	23
M700-100A	6,24	1	44
M800-100A	7,20	1	39

Ek kayıpların azaltılmasına yönelik ise aşağıdaki maddeler uygulanabilir:

- Oluk sayısının arttırılması oluk uzay harmoniklerinin azalmasına yardımcı olacaktır.
- Uzun paket boyuna sahip motorlarda rotor baralarının izole edilmesi ve rotora bara açısı verilmesi iç bara akımlarını azaltacaktır.
- Tek başına bara açısı verilmesi rotor baralarının izole olmaması durumunda iç bara akımlarını artışına neden olacaktır.
- Nr<Ns olduğu durumda bara açısı parazitik momentlerin azalmasına yardımcı olabilir.
- f_{1n}>300Hz olduğu durumlarda özel ince (0.1mm) laminasyon sacı kullanımı süper yüksek hızlı endüksiyon motorlarında çekirdek kayıplarının azaltılması açısında faydalı olacaktır.
- Kısa adımlı sargı kullanımı($y/\tau \approx 5/6$) parazitik momentlerin azalmasına yardımcı olacaktır.

- Motor sargılarında bobinlerin paralel bağlanması durumunda iç akımların dolaşması söz konusu olabilir. Bu durum sargılardaki kayıpların(bakır kayıplarının) artmasına neden olacaktır. Seri bağlantı tercih edilmelidir.
- Stator ve rotorda dar oluk ağzı kullanımı diş ve yüzey akı dalgalanmalarını ve ek kayıpları azaltmakta, fakat kaçak endüktansı arttırarak devrilme momentinde azalma meydana getirmektedir.
- Hava aralığının optimum düzeyde artırımı motorun verim ve güç faktöründen fazla ödün vermeden ek kayıpların azalmasına yardımcı olacaktır.
- Parazitik momentlerin azaltılması için uygun rotor ve stator oluk sayıları eşleştirilmelidir.
- Uzay ve zaman harmoniklerinin azaltılması için U formunda köprü rotor olukları kullanılabilir.

4.4.4 Devrilme Momentinin Artırılması

Çalışmanın diğer bölümlerinde bahsedildiği gibi devrilme momentinin yüksek olması motorun daha geniş bir sabit güç bölgesine sahip olmasına ve ani moment ihtiyaçlarına cevap verebilmesini sağlamaktadır [14]. Devrilme momentinin arttırılması kaçak endüktansların azaltılmasına bağlıdır.

$$L_{sl}= 2\mu_0 L n_s^2 p_1 q_1(\lambda_{ss}+\lambda_{zs}+\lambda_{ds}+\lambda_{end}) \quad (4.8)$$

$$L_{rl}=4m_1(W_1K_{w1})^2 x\ 2\mu_0 L_i(\lambda_b+\lambda_{er}+\lambda_{zr}+\lambda_{dr}+\lambda_{skew})/N_r \quad (4.9)$$

$$L_{sc} =L_{sl}+ L_{rl} \quad (4.10)$$

Yukarıdaki bağıntıların çok fazla değişken içermesi sebebiyle toplam kaçak endüktans L_{sc} değerinin analiz edilmesi çok kolay gözükmemektedir. Bu parametrelerden önemli etkiye sahip olanları şunlardır:

- Kutup Sayısı : $2p_1$
- Sac paket uzunluğu ile kutup adımı oranı L/τ
- Oluk diş genişlik oranı b_{ts}/b_{tr}

- Stator iç çapı
- Faz kutup başına stator oluk sayısı q_1
- Kutup çifti başına rotor oluk sayısı N_r/p_1
- Stator oluk en boy oranı h_{ss1r}/b_{s1r}
- Hava aralığı akı yoğunluğu B_g
- Stator ve rotorun baz moment değerindeki akım yoğunlukları

Genel olarak verim, devrilme momenti ve motor büyüklükleri dikkate alındığında 4 kutup motor kullanımı uygun gözükmektedir. Kutup sayısını stator iç çapı değiştirilmeden düşürülse bile daha uzun sargı adımına sebep olmaktadır. Bu sebeple sargı başı λ_{end} değeri büyümektedir.

2 kutup motor yerine 4 kutup motora geçildiğinde faz-kutup başına oluk değeri q_1 değeri artmakta, buna bağlı olarak λ_{ds} değeri düşmektedir. Böylelikle, paket boyu ne kadar uzun seçilirse seçilsin stator kaçak endüktansı 2 kutuptan 4 kutba geçildiğinde yarıya düşmektedir. Aynı rotorların kullanıldığını da varsayarsak L_{rl} rotor kaçak endüktansı çok fazla farklı olmayacaktır. Bu durum şu formülü ortaya koymaktadır:

$$T_b = \frac{3p_1 \, (\Psi_s)^2}{4 \, L_{sc}} \tag{4.11}$$

$$\Psi_s = \frac{V_{ph}}{\omega_1} \tag{4.12}$$

Diğer tüm değerlerin aynı kaldığı düşünüldüğünde (oluk sayısı, sarım sayısı, hava aralığı akı yoğunluğu, stator iç çap vs.)

$$\frac{(\Psi_s)_{2p=2}}{(\Psi_s)_{2p=4}} = 2 \tag{4.13}$$

4 kutup motorla 2 kutup motorun aynı hızda çalışabilmesi için 4 kutup motorda frekansın 2 katına çıkarıldığı göz önünde bulundurulduğunda;

$$\frac{(L_{sc})_{2p=2}}{(L_{sc})_{2p=4}} = 1.5 - 1.8 \tag{4.14}$$

Sonuç olarak ;

$$\frac{(T_b)_{2p=2}}{(T_b)_{2p=4}} = \frac{2}{1.5 - 1.8} \tag{4.15}$$

bu analizden yola çıkarak devrilme momentinin daha yüksek olması sebebiyle 2 kutuplu motorun daha iyi olduğu kanaatine varılabilir. Ek olarak, 2 kutup motorda 4 kutba göre güç faktörü ve verim anlamında daha iyi sonuçlar elde edilebilir [12].

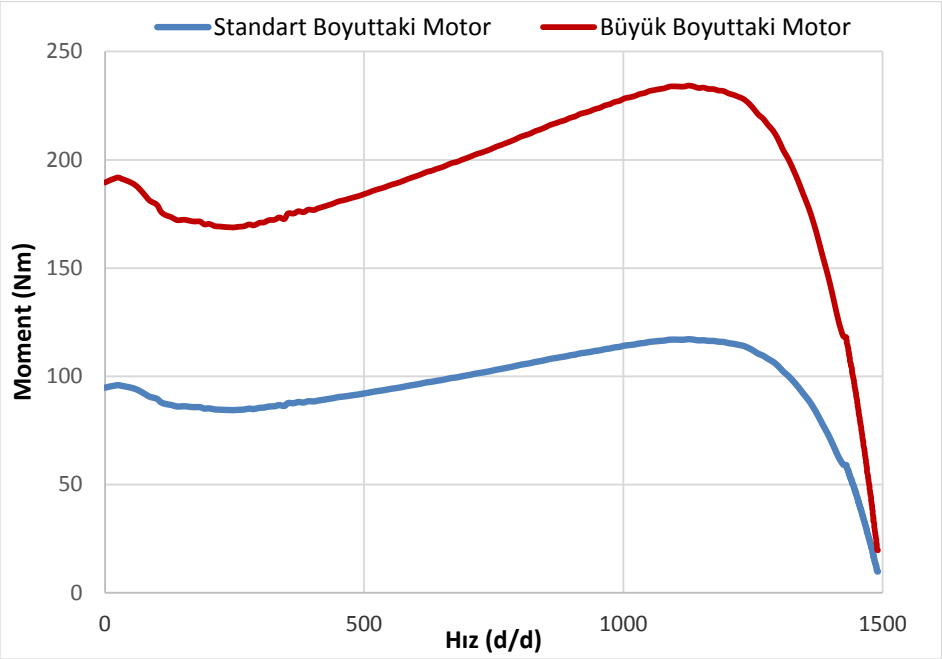
4.4.5 Gerilim ayarıyla geniş sabit güç hız bölgesi elde etme

Sabit güç hız bölgesi çoğu uygulamada 2 ile 5 arasında değişim göstermektedir. Asenkron motorun bu ihtiyaca cevap verebilmesi motorun baz hızdaki devrilme momentine bağlıdır [18].

$$\frac{T_b}{T_{en}} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\mathrm{b}}} = C_{\omega} \tag{4.16}$$

4.4.6 Motor boyutlarının büyütülmesi

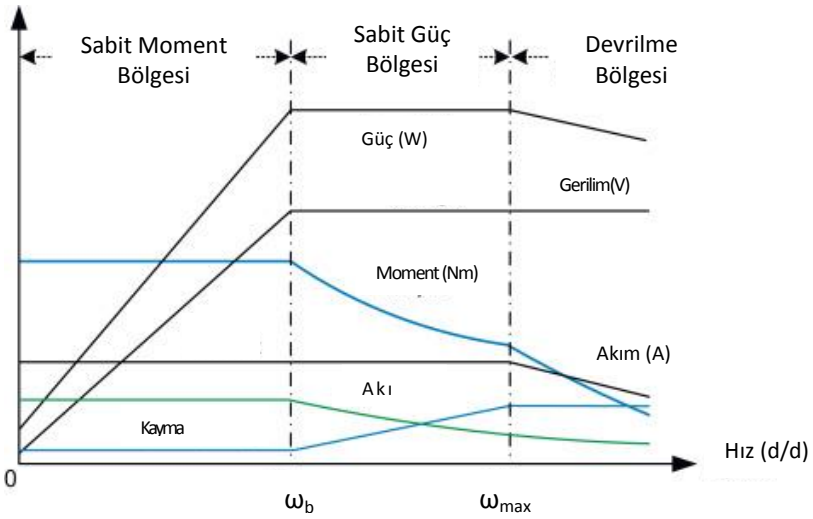
Standart asenkron motorlarda devrilme momenti nominal momentin yaklaşık 3 katı mertebesindedir. Daha büyük motor kullanımı geniş hız aralığı için iyi bir çözüm gibi gözükmesine rağmen makine boyutları ve maliyet açısından büyük dezavantajlara sahiptir.



Şekil 4. 5 Moment hız eğrileri standart ve büyük boyuttaki motor için

4.4.7 Faz geriliminin arttırılması

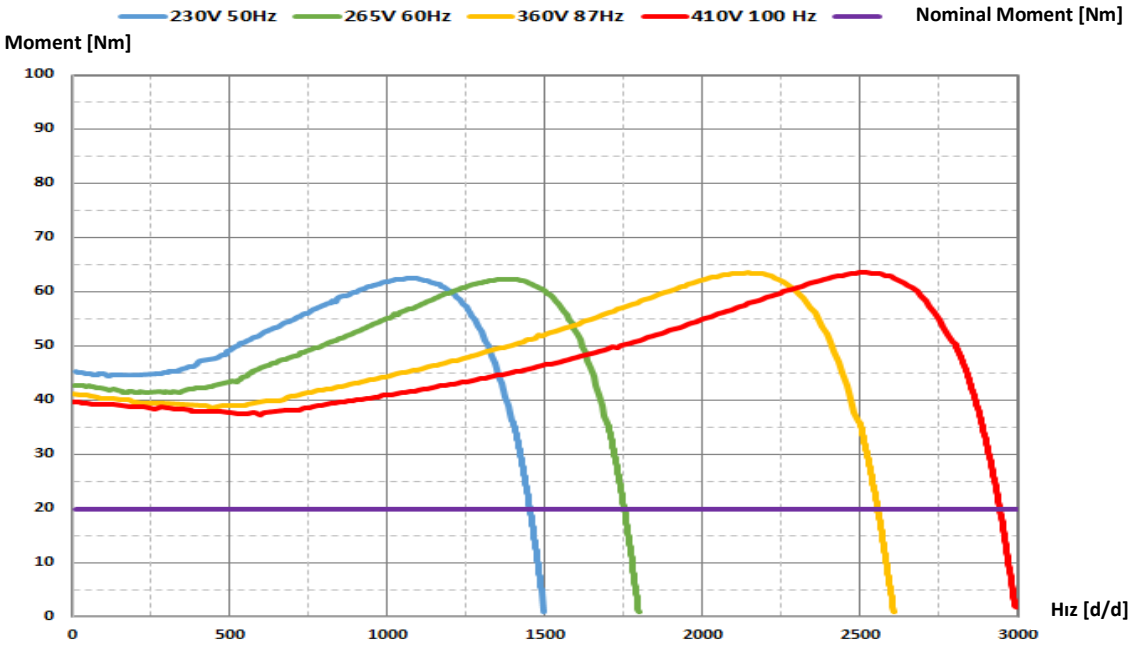
Bilindiği üzere inverterler giriş geriliminden daha yüksek bir çıkış gerilimi verememektedirler. Bu sebeple aşağıdaki moment hız, gerilim hız ve akım hız eğrileri oluşmaktadır.



Şekil 4. 6 Asenkron motorun inverter ile çalışması durumunda elde edilen moment, gerilim, güç, akı ve akım değerlerinin frekansa (çalışma hızına) göre değişim grafiği

Baz hızın üzerinde gerilim sabit kalmaktadır. Rotorun kayma frekansı f_{sr} baz hıza kadar sabit kalmakta, baz hızın üzerinde ise maksimum hıza kadar sürekli artış göstermektedir.

Motorun sabit momentle çalışması istenen tüm hız aralığında motor uçlarına gelen faz geriliminin frekansa bağlı olarak sürekli aynı oranda artması gerekmektedir. Ancak, baz hızın üzerindeki hızlarda inverter şebeke giriş geriliminden daha yüksek gerilim veremediğinden dolayı motor devrinin artışının beraberinde moment kaybı ortaya çıkmaktadır. Moment kaybı gerilim değerinin karesiyle orantı olarak meydana gelmektedir. Bu durumun önüne geçmek amacıyla motorun dizaynı yaklaşık olarak motorun baz hızı ile moment kaybı yaşamadan çıkmasının istendiği hızın oranı kadar düşük bir gerilimde çalışacak şekilde revize edilirse motorun güç ve moment kaybı oluşmadan çalışması sağlanabilir. Motorun çalışma geriliminin azaltılmasına paralel motorun akımının yükseleceği dikkate alınmalıdır.

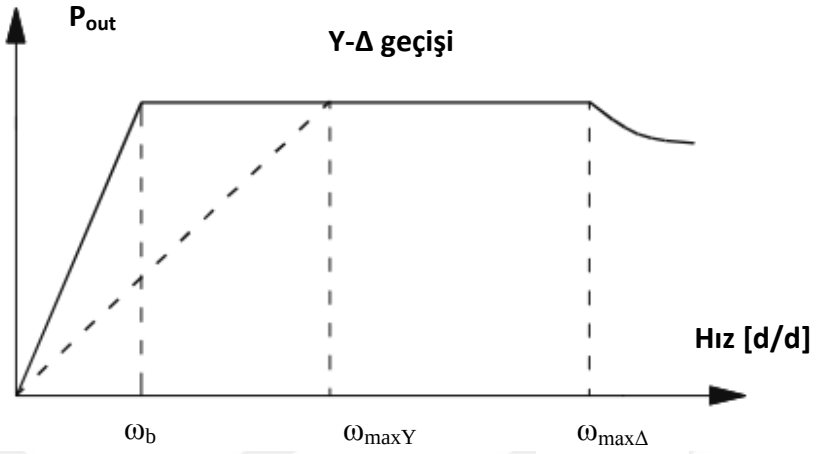


Şekil 4. 7 230V 50Hz için tasarlanan motorun farklı gerilim ve frekanslarda moment hız eğrileri

4.4.8 Çok geniş sabit güç hız bölgesi $w_{max}/w_b > 4$

Çok geniş sabit güç hız bölgesi elde etmek için çoğunlukla yukarıda anlatılan yaklaşımlar yeterli gelmemektedir. Motorun Y bağlantıdan Δ bağlantıya geçmesi faz

geriliminin $\sqrt{3}$ katına çıkmasını sağlayacaktır. Böylelikle ciddi anlamda sabit güç bölgesinin büyümesi sağlanacaktır.



Şekil 4. 8 Y-Δ Bağlantı geçişi ile sabit güç bölgesinin genişletilmesi

Motorun Y bağlantıdan Δ bağlantıya geçmesi bir manyetik anahtar yardımıyla (kontaktör) gerçekleştirilmelidir. Bu işlem esnasında inverter devreden çıkarılmalı, geçiş sağlandıktan sonra inverter tekrar devreye alınmalıdır. Böylelikle geçiş yumuşak bir şekilde sağlanmış olacak ve çok fazla moment salınımı ile karşılaşılmayacaktır.

Tüm bu çalışmalar esnasında motorun sıcaklık artışı takip edilmelidir. Örnek olarak elektrikli araçlarda motorun soğutmasının sağlanması için sıvı ile soğutma yöntemine başvurulmaktadır.

Ek olarak, yüksek frekans uygulamalarında rulman akımları sınırlandırılmalıdır. Çünkü rulman akımları rulmanların bileziklerine ve rulman bilyelerine zarar vererek rulmanın ömrünü kısaltmaktadır.

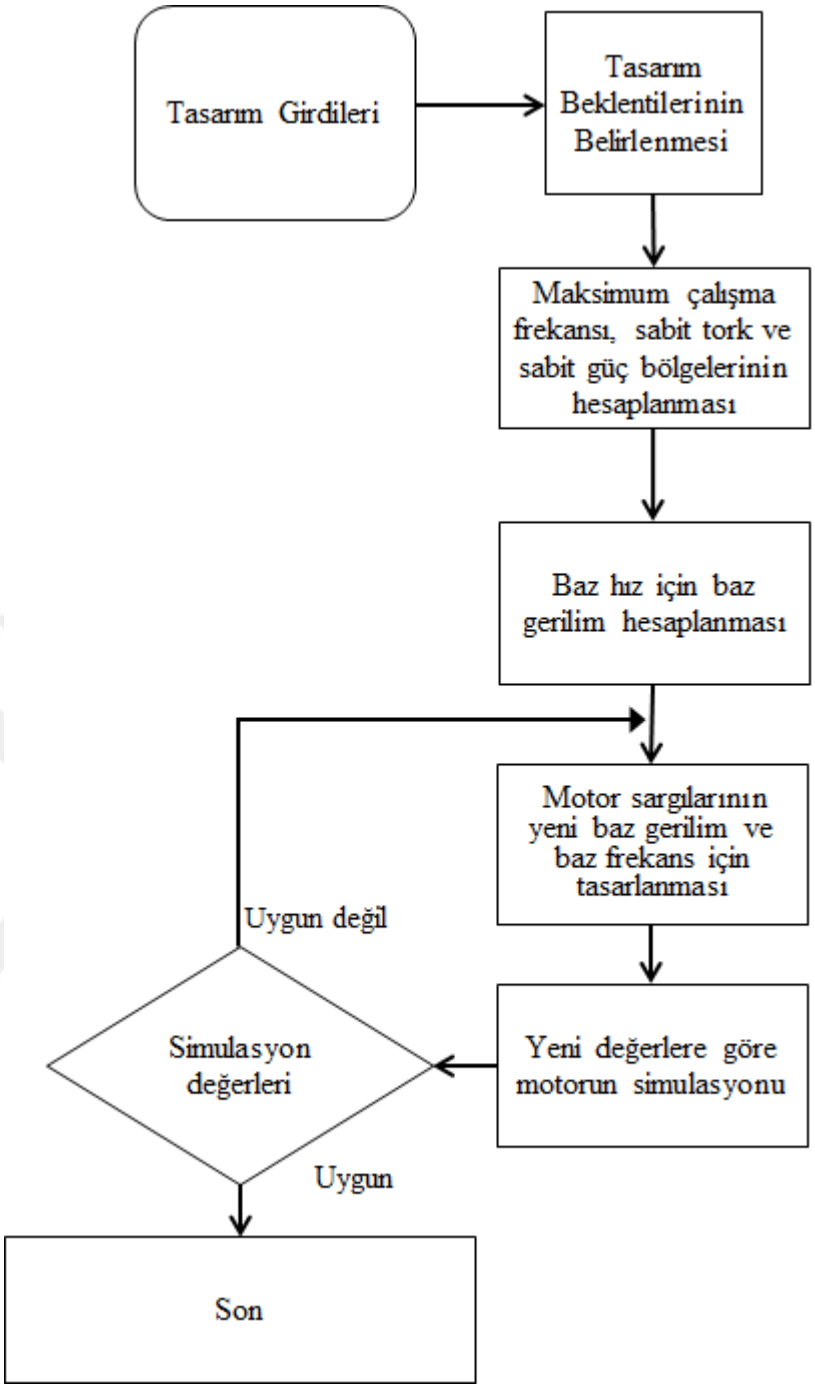
4.5 Optimizasyon

İnverter beslemeli bir endüksiyon motorunun uyarılmasının iki uç frekansı arasında çalışmasını etkileyen tasarım faktörler; rotor kaybı, kalkış akımı, devrilme momentidir. Maksimum frekansta, devrilme momenti sınırlayıcı bir faktördür. Sabit moment bölgesinde sürtünme, vantilasyon kayıpları ve demir kayıpları frekans değişimine bağlı olarak artacaktır. Minimum frekansta sınırlayıcı faktörler motor ısınmasını ve performansını büyük ölçüde etkileyen mıknatıslanma akımı ve kilitli rotor akımıdır.

Kilitli rotor akımı tam yük akımının 6 ila 10 katı olabilir [15]. Sabit güç bölgesinde motorun verimi yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. İnverter beslemeli skaler kontrol yöntemiyle sürülen asenkron motorun tasarımında geniş bir sabit güç ve sabit moment çalışma bölgesi elde etmek amacıyla temel olarak motorun baz çalışma frekansının daha yüksek bir frekansa taşınması yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem motorun tasarımı daha düşük bir gerilime göre optimize edilerek uygulanmaktadır. Motor sargıları daha düşük bir gerilime göre optimize edilirken, motorun çalışma akımının yükselmesi durumu söz konu olmaktadır. Bu sebeple motorda I^2R (bakır) kayıplarında artış meydana gelmektedir. Kayıpların artışının önüne geçilmesi amacıyla sargılarda kullanılan iletkenlerin kesitlerinin arttırılması gerekmektedir.

Sabit güç bölgesinin genişletilmesi amacıyla yapılacak diğer tüm uygulamalar asenkron motorun laminasyon tasarımında yapılacak değişikliklerle mümkündür. Ancak laminasyon tasarımında yapılacak değişikliklerin çok yüksek kalıp aparat maliyetlerine sebep olması nedeniyle standart bir çalışma frekansı için tasarlanmış motorun laminasyonunda değişikliğe gitmeden yapılabilecek modifikasyonlarla geniş bir frekans bandına çalışabilmesi için optimizasyon yapılabilmesi mümkündür.

Optimizasyonun akış diyagramı Şekil 4.9'da verilmiştir. Tasarım girdileri olarak daha önceden sabit bir frekans ve gerilim için tasarlanmış olan bir motorun laminasyon geometrisi ve ölçüleri, sargı bilgileri kullanılacaktır. Bir sonraki adımda, yapılacak yeni optimizasyon sonrası ortaya çıkacak tasarımdan beklenen değerler ortaya konulacaktır. Tasarım beklentilerden yola çıkarak motorun çalışma bölgeleri ortaya konulacak ve daha sonra motorun yeni baz hızı (baz frekansı) ve baz çalışma gerilimi hesaplanacaktır. Yeni gerilim ve frekans değerlerine göre motor sargılarının yeniden hesaplanması gerçekleştirilerek motorun tekrardan simüle edilmesi adımına geçilecektir. Motor simülasyonlarında ANSYS firmasının Maxwell programındaki Rmxprt ve Maxwell 2D modüllerinden faydalanılacaktır. Yapılan simülasyon sonucu ortaya çıkan sonuçlar tasarım beklentileriyle karşılaştırılacaktır. Sonuçlar uygun ise iterasyon sonlandırılacak, uygun değil ise motor sargılarının tasarlanması adımına geri dönülerek iterasyonlar tekrarlanacaktır.



Şekil 4. 9 Optimizasyon algoritması akış diyagramı

4.6 Uygulama

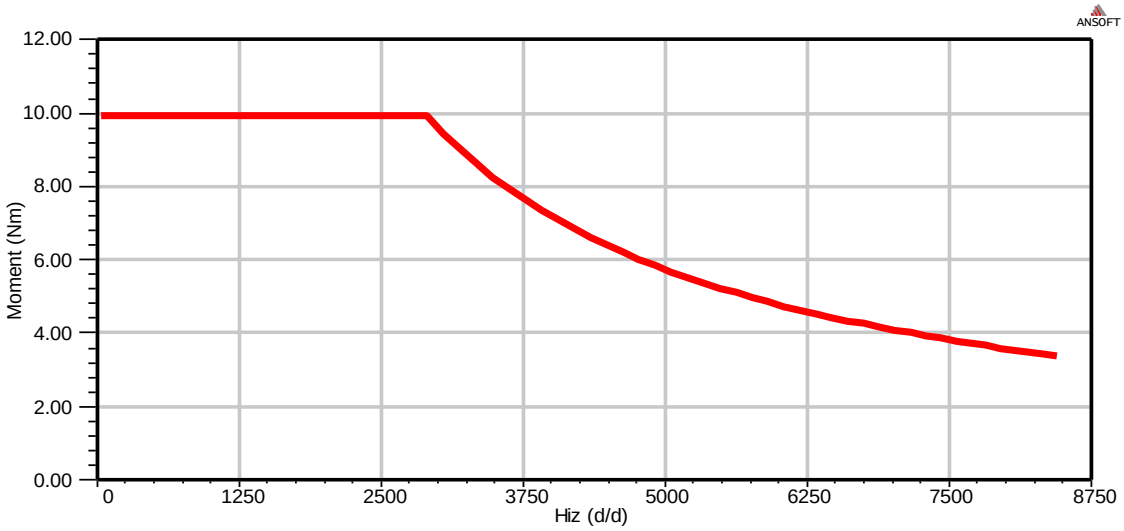
Teknik detayları aşağıda verilen 3 kW 2 kutuplu 50Hz için optimize edilen motorun 6000 d/d'ya kadar sabit moment üreterek (moment kaybetmeden), 15000 d/d 'ya kadar ise sabit güç bölgesinde çalışması istenmektedir.

Çizelge 4.2 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun temel parametreleri ve ANSYS yazılımındaki simülasyon çıktıları

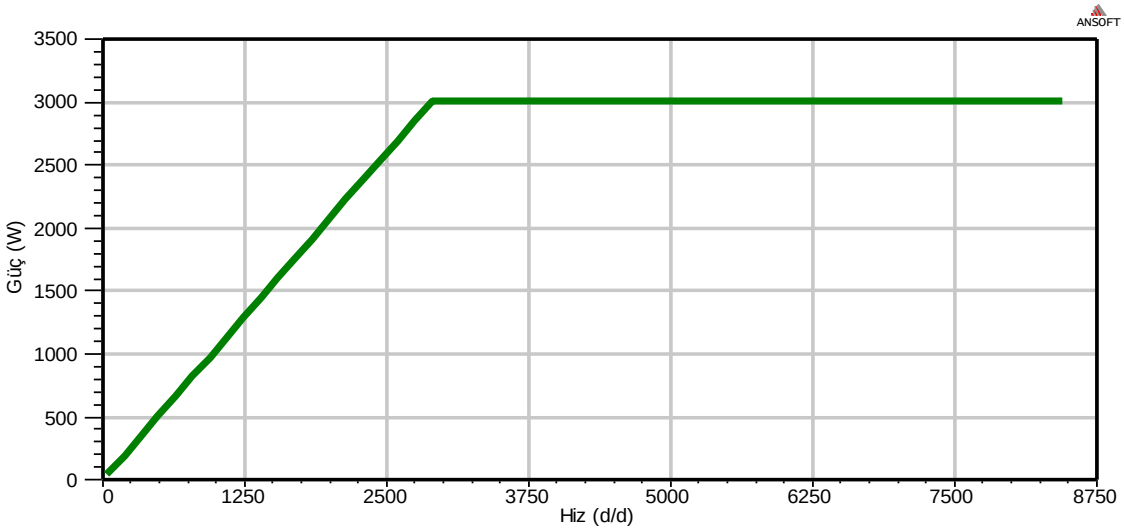
SİMÜLASYON GİRDİLERİ	Nominal Güç	3,0	(kW)
	Nominal Gerilim	400	(V)
	Frekans	50	(Hz)
	Kutup Sayısı	2	
	Stator Paket Boyu	80	(mm)
	Stator Oluk Sayısı	36	
	Rotor Oluk Sayısı	30	
	Stator Dış Çap	160,0	(mm)
	Stator İç Çap	92,0	(mm)
	Hava Aralığı	0,50	(mm)
SARGI	Oluk Başına Sarım Sayısı	35	
	Paralel Tel Sayısı	2	
	Tel çapı	0,730	(mm)
SİMÜLASYON ÇIKTILARI	Çıkış Gücü	3,0	(kW)
	Devir Sayısı	2892	(d/d)
	Stator Faz Akımı	5,47	(A)
	Güç Faktörü	0,93	
	Verim	84,65	(%)
	Devrilme Momenti Oranı	3,22	
	Kalkış Momenti Oranı	2,39	
	Kalkış Akımı Oranı	7,42	
	Nominal Moment	9,90	(Nm)
AKIM YOĞUNLUKLARI	Stator Akım Yoğunluğu	6,53	(A/mm^2)
	Rotor Barası Akım Yoğunluğu	4,71	(A/mm^2)

Çizelge 4.3 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun ANSYS yazılımındaki simülasyon sonucu elde edilen eşdeğer devre parametreleri, akı yoğunlukları, motor kayıpları ve motoru oluşturan malzemelerin ağırlıkları

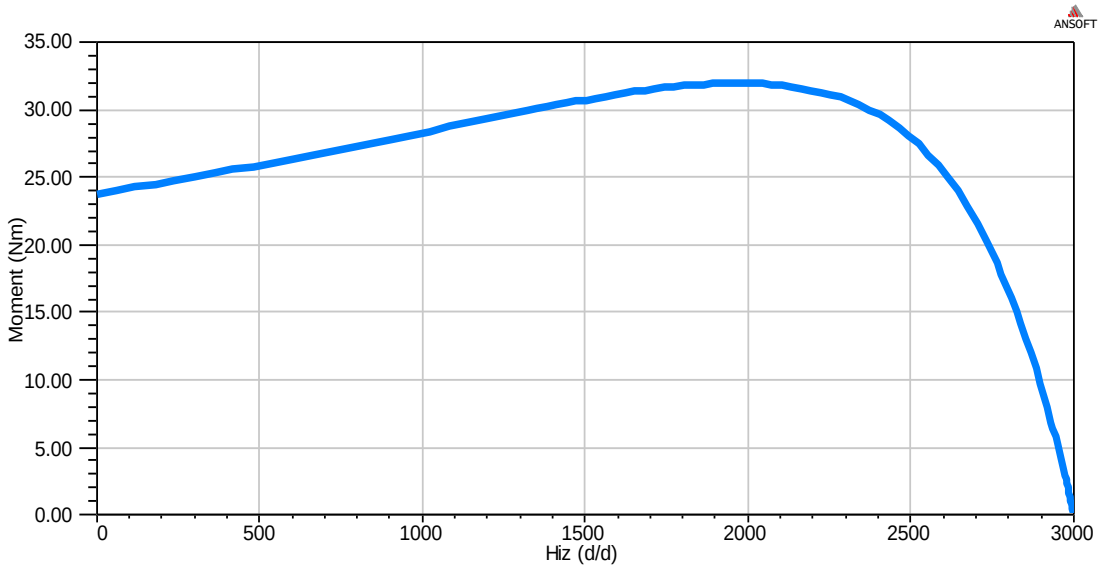
EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİ	Stator Direnci	3,02	(Ω)
	Rotor Direnci	1,51	(Ω)
	Stator Kaçak Reaktansı	2,14	(Ω)
	Rotor Kaçak Reaktansı	2,35	(Ω)
KAYIPLAR	Stator Bakır Kayıpları	271,1	(W)
	Rotor Bakır Kayıpları	113,7	(W)
	Demir Kaybı	71,5	(W)
	Stray Kayıpları	30,0	(W)
	Sürtünme ve Vantilasyon Kayıpları	60,0	(W)
	Toplam Kayıplar	546	(W)
AĞIRLIKLAR	Stator Bakır Ağırlığı	2,41	(kg)
	Rotor Barası Bakır Ağırlığı	0,91	(kg)
	Rotor Uç Halkası Bakır Ağırlığı	1,27	(kg)
	Brüt Sac Ağırlığı	12,6	(kg)



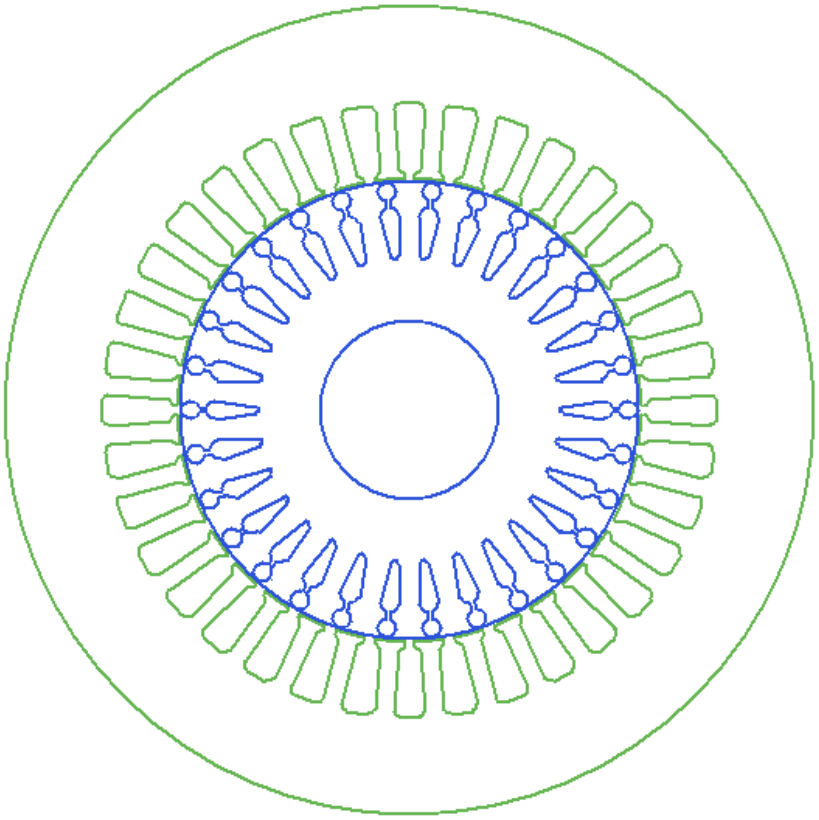
Şekil 4. 10 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi



Şekil 4. 11 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen güç-hız eğrisi



Şekil 4. 12 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun şebekeden besleme ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi



Şekil 4. 13 50 Hz çalışma için tasarlanmış referans motorun laminasyon geometrisi

Çizelge 4.2 ve 4.3'teki değerler ve şekil 4.10-13'te verilen grafikler incelendiğinde motorun IEC60034-30-1 standardına göre IE2 verim sınıfında 400V 50Hz şebeke ile çalışmaya uygun olarak dizayn edilmiş 9,9 Nm moment değerine sahip yaklaşık 8500 d/d hıza kadar çalışabilen 0-3000 d/d arasında sabit moment,3000-8500 d/d aralığında ise sabit güç verebilen IEC 100 gövde büyüklüğünde bir motor olduğunu göstermektedir [16] ,[17].

4.6.1 Sabit frekans için tasarlanan motorun değişken frekans için optimizasyonu

Tasarımın girdileri 4.6 bölümünde verilmiştir. Tasarım beklentileri ise 3kW 2 kutuplu 50Hz için optimize edilen motorun 6000 d/d'ya kadar sabit moment üreterek (moment kaybetmeden), 15000 d/d 'ya kadar ise sabit güç bölgesinde çalışmasıdır.

Elimizdeki bu verilere dayanarak motorun çalışma bölgelerinin frekanslarını belirleyelim:

$$\omega = \frac{120f}{p_1} \tag{4.31}$$

$$k = \frac{\omega_b}{\omega_b{}'} = \frac{f_b}{f_b{}'} \tag{4.32}$$

$$\frac{3000}{6000} = \frac{50}{f_b{}'} \tag{4.33}$$

$$f_b{}' = 100\ Hz \tag{4.34}$$

olarak motorun yeni baz frekansı belirlenir.

Maksimum çalışma frekansı:

$$15000 = \frac{120.\ f'_{\max}}{2} \tag{4.35}$$

$$f'_{\max} = 250\ Hz \text{ olarak bulunur.} \tag{4.36}$$

Motor tasarımı 100 Hz frekansta çalışmaya göre optimize edilirken inverterde meydana gelen gerilim düşümü ihmal edilecektir. Akustik ve ısıl analizler yapılmayacaktır.

Yeni frekans değerine göre oluk başına sarım sayısını yeniden hesaplarsak;

$$V = k\emptyset Nf \tag{4.41}$$

$$\frac{V_b}{V_b'} = \frac{k\emptyset N f_b}{k\emptyset N' f_b'} \tag{4.42}$$

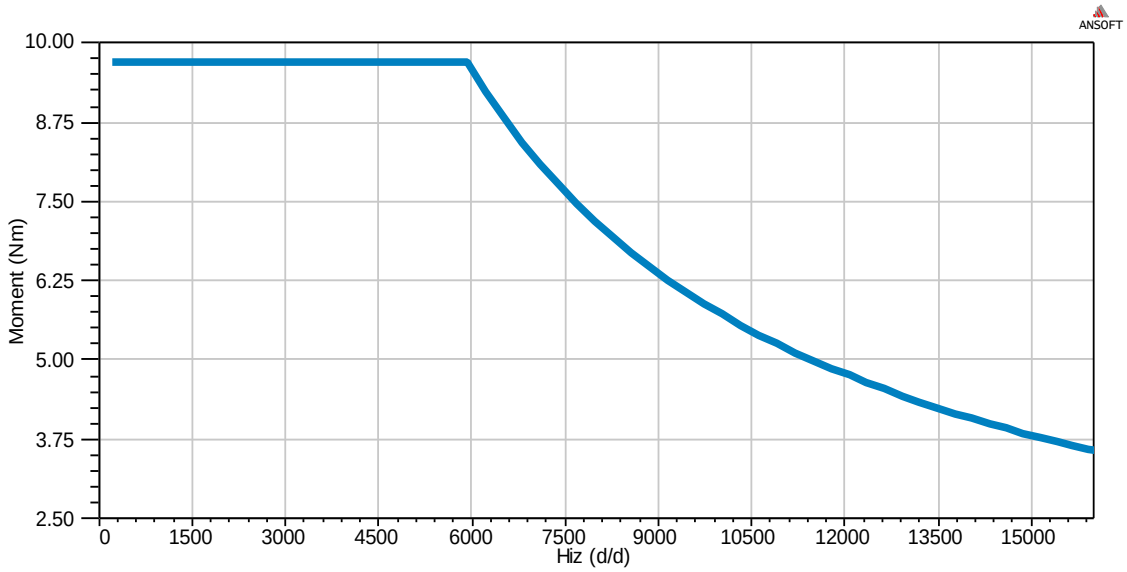
Ø ve k değeri sabit olduğundan;

$$\frac{400}{400} = \frac{35x50}{N'x100} \tag{4.43}$$

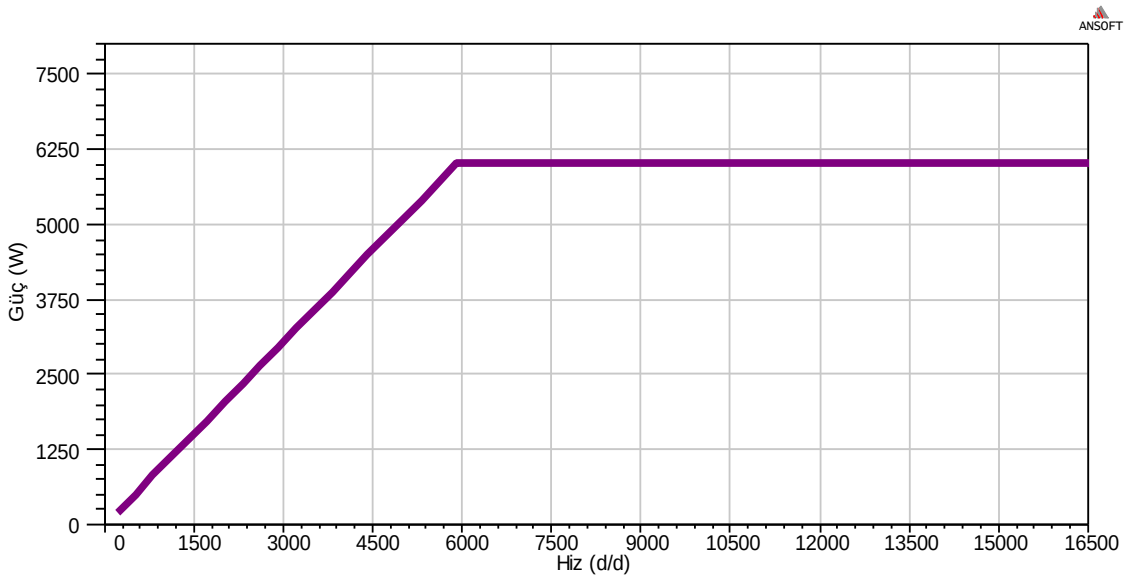
$$N' = 17{,}5 \text{ sarım olarak bulunur.} \tag{4.44}$$

Motorun stator sargılarındaki toplam bakır miktarı referans motorun bakır miktarıyla yaklaşık olarak aynı kalacak şekilde 16, 17 ve 18 sarım sayısı için analizleri gerçekleştirilecektir.

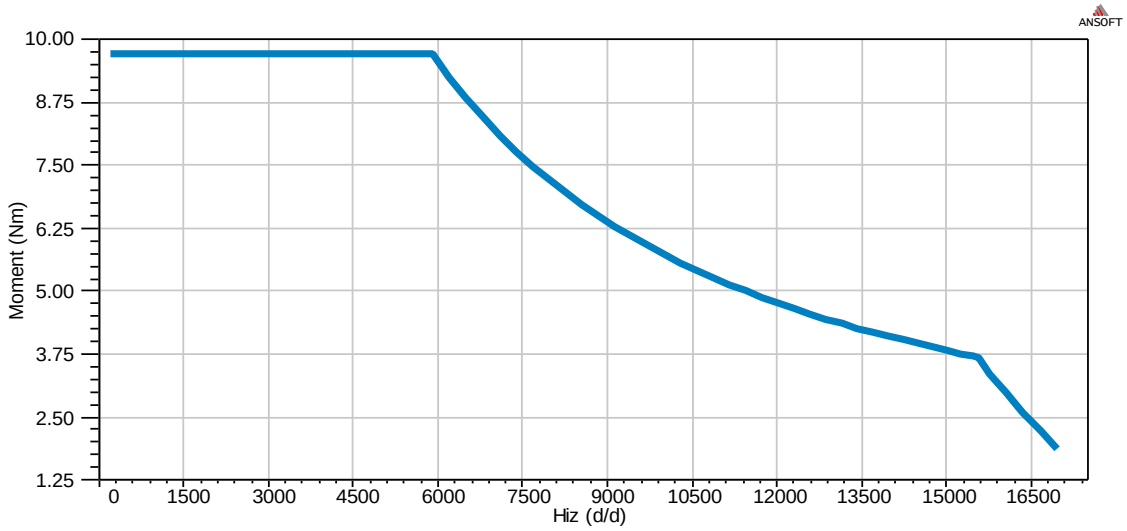
Bulunan değerlere göre ANSYS programında yeniden motorun simülasyonu yapılır ise aşağıdaki grafik ve tablolardaki değerler elde edilir:



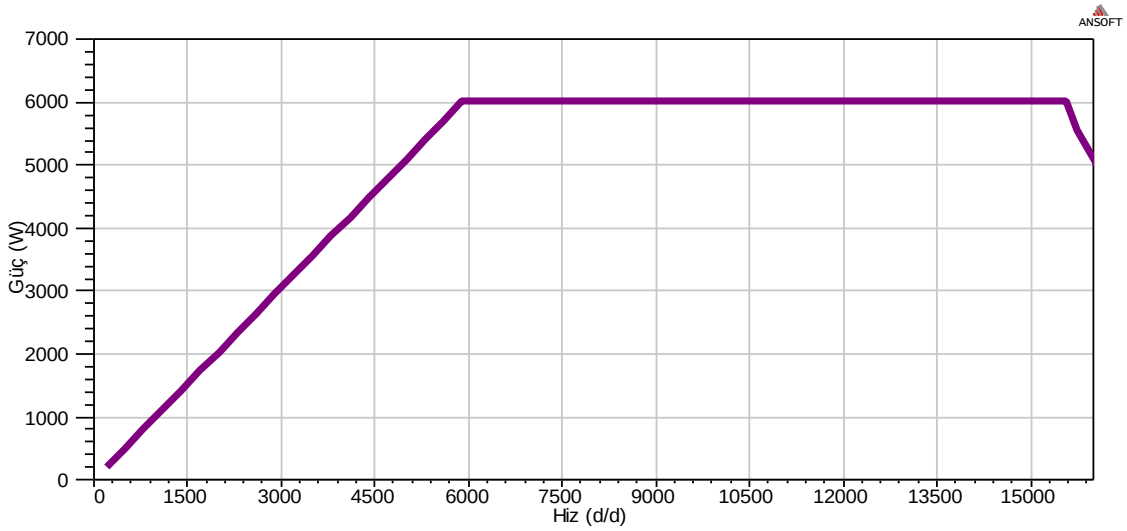
Şekil 4. 14 100 Hz çalışma için optimize edilen 16 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi



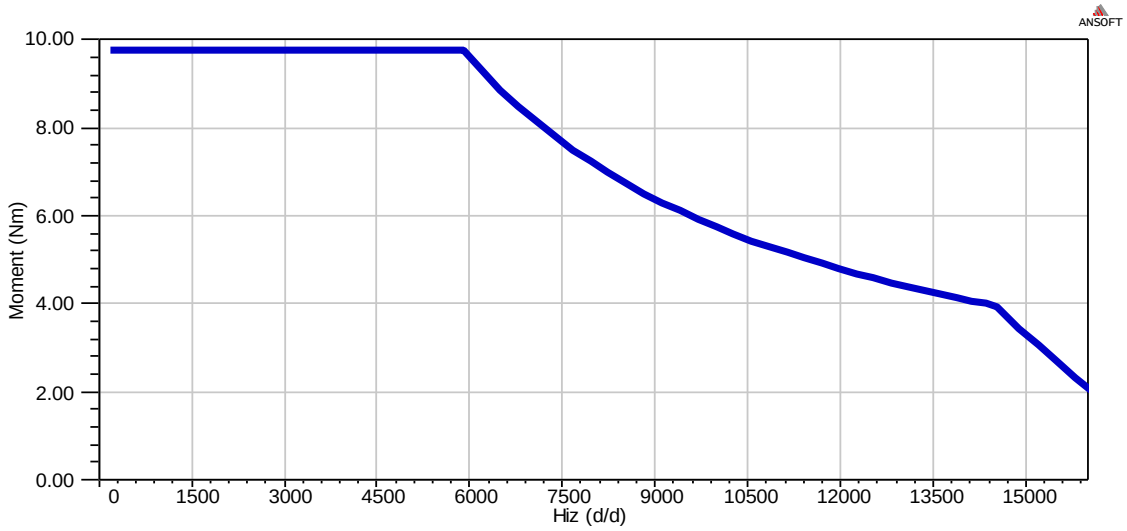
Şekil 4. 15 100 Hz çalışma için optimize edilen 16 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen güç-hız eğrisi



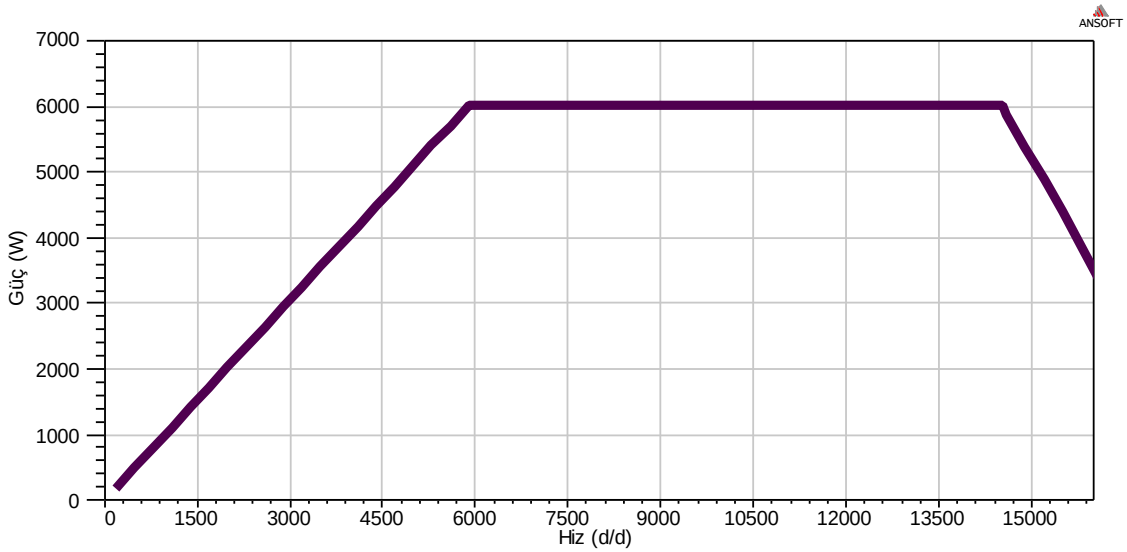
Şekil 4. 14 100 Hz çalışma için optimize edilen 17 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi



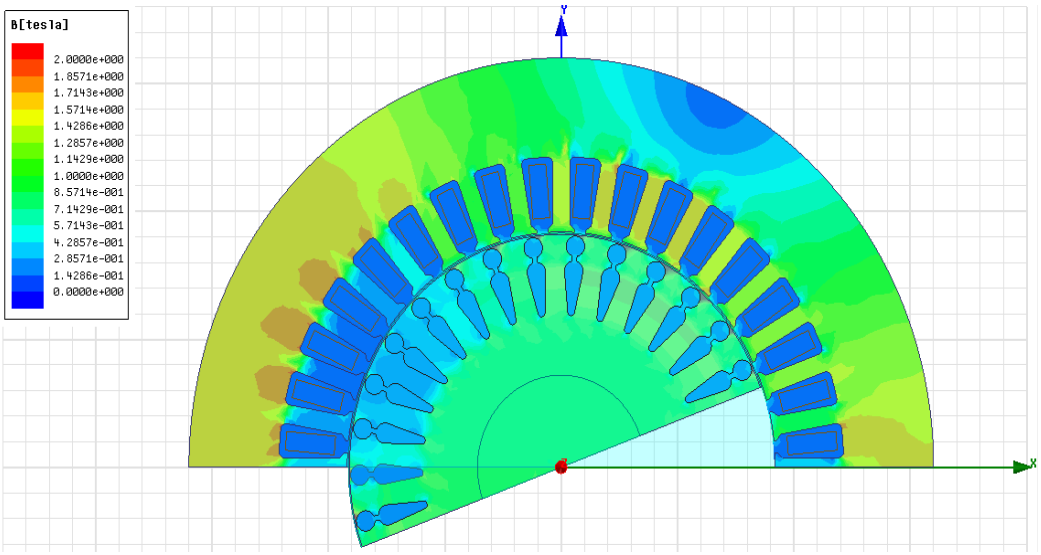
Şekil 4. 15 100 Hz çalışma için optimize edilen 17 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen güç-hız eğrisi



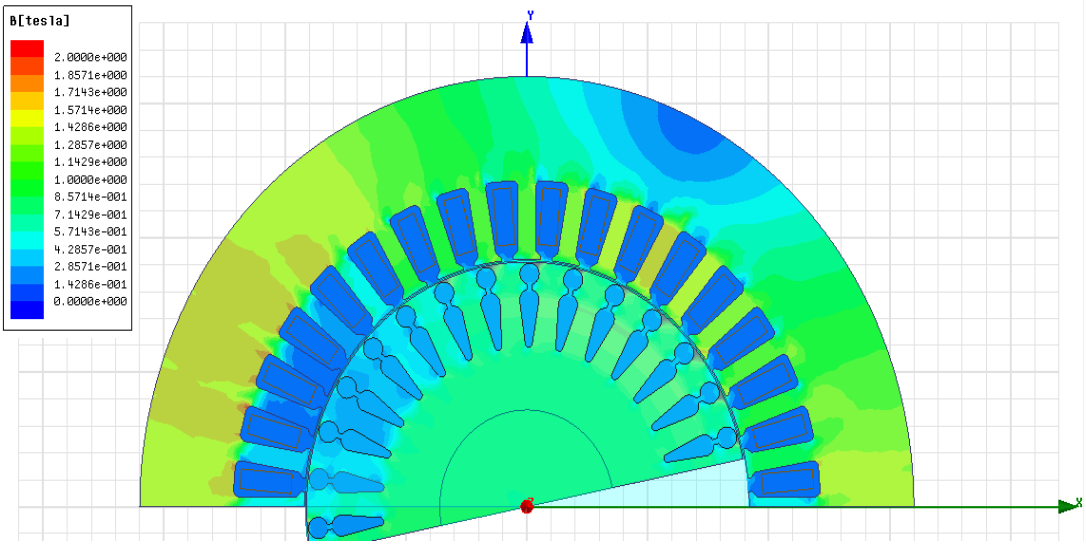
Şekil 4. 14 100 Hz çalışma için optimize edilen 18 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen moment-hız eğrisi



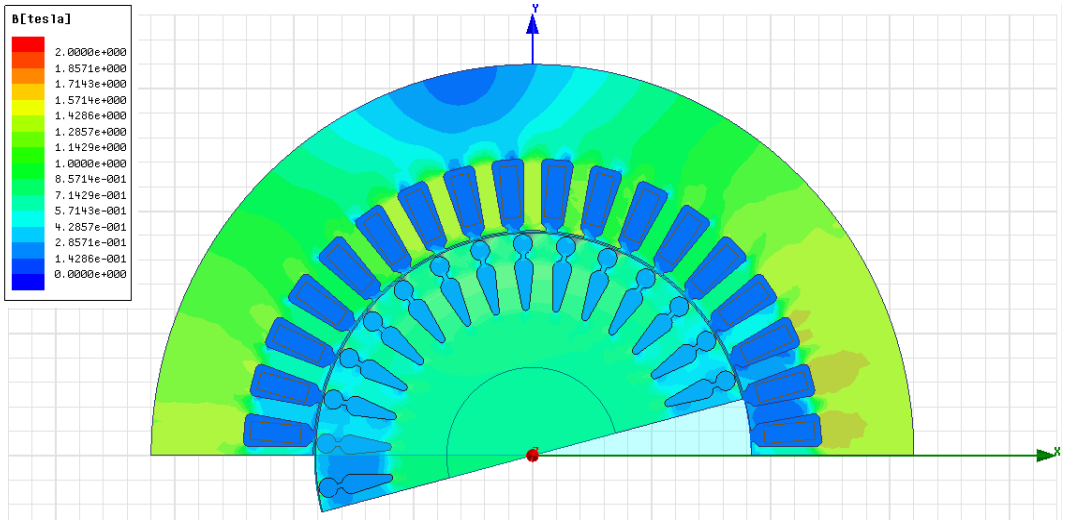
Şekil 4. 15 100 Hz çalışma için optimize edilen 18 sarım sayısına sahip motorun hız kontrol cihazı ile çalışması durumunda elde edilen güç-hız eğrisi



Şekil 4. 16 100 Hz çalışma için optimize edilen 16 sarım sayılı motorun 2D SEY yöntemiyle analiz sonuçları



Şekil 4. 17 100 Hz çalışma için optimize edilen 17 sarım sayılı motorun 2D SEY yöntemiyle analiz sonuçları



Şekil 4. 18 100 Hz çalışma için optimize edilen 18 sarım sayılı motorun 2D SEY yöntemiyle analiz sonuçları

Çizelge 4.4 100 Hz çalışma için optimize edilen 3 farklı sarım sayısına sahip motorun temel parametreleri ve ANSYS yazılımındaki simülasyon çıktıları

Sargı Sarım Sayılarına Göre Motorlar		**16 sarım**	**17 sarım**	**18 sarım**	
SİMÜLASYON GİRDİLERİ	Nominal Güç	6,0	6,0	6,0	(kW)
	Nominal Gerilim	400	400	400	(V)
	Frekans	100	100	100	(Hz)
	Kutup Sayısı	2	2	2	
	Stator Paket Boyu	80	80	80	(mm)
	Stator Oluk Sayısı	36	36	36	
	Rotor Oluk Sayısı	30	30	30	
	Stator Dış Çap	160,0	160,0	160,0	(mm)
	Stator İç Çap	92,0	92,0	92,0	(mm)
	Hava Aralığı	0,5	0,5	0,5	(mm)
SARGI	Oluk Başına Sarım Sayısı	16	17	18	
	Paralel Tel Sayısı	4	4	4	
	Tel çapı	0,765	0,74	0,72	(mm)
SİMÜLASYON ÇIKTILARI	Çıkış Gücü	6,00	5,99	6,00	(kW)
	Devir Sayısı	5915	5904	5892	(d/d)
	Stator Faz Akımı	12,23	11,31	10,82	(A)
	Güç Faktörü	0,82	0,88	0,92	
	Verim	85,73	86,02	86,06	(%)
	Devrilme Momenti Oranı	6,2	5,3	4,5	
	Kalkış Momenti Oranı	3,76	3,14	2,6	
	Kalkış Akımı Oranı	12,3	11,5	10,3	
	Nominal Moment	9,69	9,70	9,73	(nm)
AKIM YOĞUNLUKLARI	Stator Akım Yoğunluğu	6,65	6,57	6,64	(A/mm2)
	Rotor Barası Akım Yoğunluğu	4,21	4,48	4,77	(A/mm2)

Çizelge 4.5 100 Hz çalışma için optimize edilen 3 farklı sarım sayısına sahip motorun ANSYS yazılımındaki simülasyon sonucu elde edilen eşdeğer devre parametreleri, motor kayıpları ve motoru oluşturan malzemelerin ağırlıkları

Sargı Sarım Sayılarına Göre Motorlar		**16 sarım**	**17 sarım**	**18 sarım**	
EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİ	Stator Direnci	0,629	0,714	0,799	(Ω)
	Rotor Direnci	0,316	0,356	0,399	(Ω)
	Stator Kaçak Reaktansı	0,828	0,967	1,126	(Ω)
	Rotor Kaçak Reaktansı	0,887	1,044	1,229	(Ω)
KAYIPLAR	Stator Bakır Kayıpları	282,3	273,9	280,5	(W)
	Rotor Bakır Kayıpları	90,7	102,9	116,3	(W)
	Demir Kaybı	228,1	200,8	177,7	(W)
	Stray Kayıpları	60,0	60,0	60,0	(W)
	Sürtünme ve Vantilasyon Kayıpları	337,6	337,6	337,6	(W)
	Toplam Kayıplar	998,7	975,2	972,2	(W)
AĞIRLIKLAR	Stator Bakır Ağırlığı	2,42	2,41	2,41	(kg)
	Rotor Barası Bakır Ağırlığı	0,91	0,91	0,91	(kg)
	Rotor Uç Halkası Bakır Ağırlığı	1,27	1,27	1,27	(kg)
	Brüt Sac Ağırlığı	12,6	12,6	12,6	(kg)

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üç fazlı asenkron motorun değişken hızlı uygulamalarda skaler kontrol için optimizasyonu ele alınmış olup, motorun malzeme maliyetlerini artırmadan geniş bir hız aralığı için yeniden tasarımı ve optimizasyonu yapılmıştır.

Yapılan optimizasyonun ANSYS programındaki simülasyon sonuçları incelendiğinde 18 sarım sayısına sahip motorun 15000 d/d hıza kadar sabit güç veremediği görülmüştür. Bu nedenle 18 sarım sargılı motor uygun değildir.

Geriye kalan 17 ve 16 sarım sahip motorlar incelendiğinde ise iki motorunda analiz sonuçlarının tasarım beklentileri olan 6000 d/d hıza kadar sabit moment, 15000 d/d hıza kadar sabit güç beklentisini karşıladığı görülmüştür. Ancak 17 sarım sayısına sahip olan motorun 16 sarım sayısına sahip olan motora göre ;

- Verim değerinin daha yüksek olması,
- Akım değerinin daha düşük olması,
- Güç faktörü değerinin daha yüksek olması

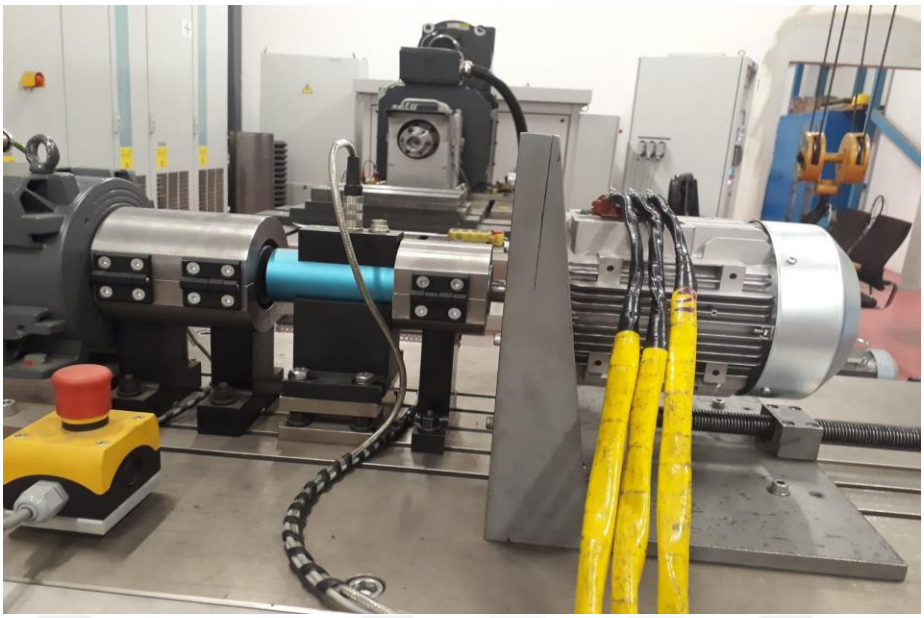
nedeniyle 17 sarım sayısına sahip motorun daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Bu nedenle Çizelge 5.1'de referans motor ile 17 sarım sayısına sahip motorun karşılaştırılması yapılmıştır.

Çizelge 5.1 Referans ve optimize edilen motorun ANSYS yazılımındaki simülasyon sonucu elde edilen değerlerinin karşılaştırma tablosu

Karşılaştırma Tablosu										
Motor Tipi	**Sabit Moment Çalışma Frekans Aralığı [Hz]**	**Sabit Güç Çalışma Frekans Aralığı [Hz]**	**Nominal Moment [Nm]**	**Verim %**	**Baz Gerilim [V]**	**Baz Frekans [Hz]**	**Çıkış Gücü [kW]**	**Hava Aralığı Akı Yoğunluğu [T]**	**Toplam Bakır Ağırlığı [kg]**	**Toplam Brüt Sac Ağırlığı [kg]**
Referans	0 - 50	50 - 142	9,90	84,65	400	50	3,0	0,63	2,41	12,6
Optimize Edilen	0 - 100	100 - 250	9,70	86,02	400	100	6,0	0,63	2,41	12,6

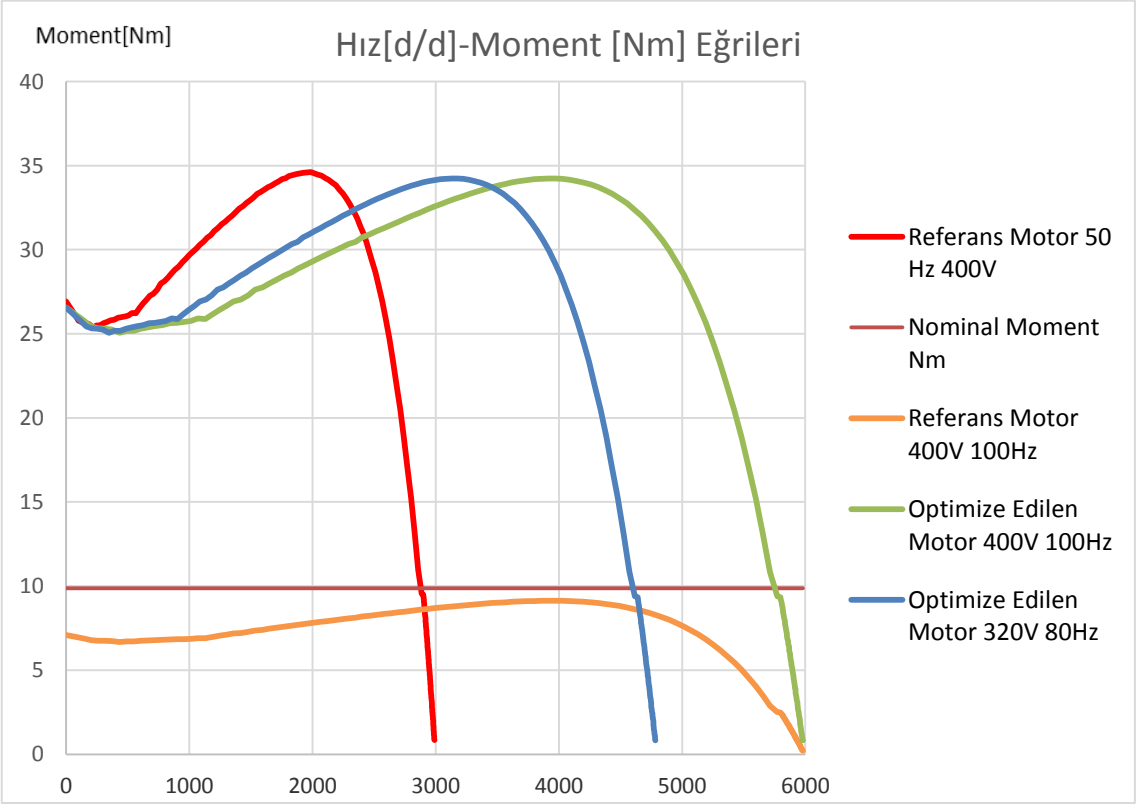
Çizelge 5.1'deki değerler göz önünde bulundurulduğunda yapılan optimizasyon sonucu motorun aktif malzeme miktarında artış olmadan(malzeme maliyeti değişmeden), sabit moment çalışma frekansı 2 katı seviyesine çıkarılmıştır. Ayrıca, IEC 100 gövde büyüklüğündeki motorun çıkış gücü 3 kW'tan 2 katı seviyesindeki, IEC 132 gövdenin standart gücü 5,5 kW'tan daha yüksek olan 6 kW güce verim kaybı olmadan arttırılmıştır. Böylelikle, geniş bir çalışma frekansı bandına sahip yüksek güç yoğunluklu bir motor elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları tasarım beklentilerini karşılamaktadır.

Ek olarak simülasyonun yanı sıra referans motorun 100 Hz'e göre optimize edilen motorun ELK Motor AŞ tarafından üretimi ve testleri gerçekleştirilmiştir. Motorun 100 Hz'e kadar moment kaybetmeden çalışabildiği test sonuçlarıyla gerçeklenmiştir.



Şekil 5. 1 100 Hz çalışma için optimize edilen motorun test edilmesi sırasındaki görüntüsü

Çizelge 5.2 Referans ve optimize edilen motorun test edilmesi sonucu elde edilen hız moment karakteristikleri



Yapılan test sonucunda ise optimize edilen motorun referans motora göre devrilme ve kalkış momentinin çok değişmediği ve hız moment eğrisinin 0-3000 d/d aralığından 0-6000 d/d aralığına düşüş olmadan taşınabildiği gözlemlenmiştir. Böylelikle 100 Hz'e kadar moment kaybetmeden çalışabilen, yüksek güç yoğunluğuna sahip bir motor elde edildiği test sonuçlarıyla ortaya konulmuştur. Motorun üretim maliyeti referans motorla aynı seviyede kalmıştır. Böylelikle kullanıcılara hem boyut hem de maliyet açısından büyük motor kullanımına göre önemli düzeyde avantaj sağlayan bir motor tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ek olarak referans motorun inverterle çalışma durumunda verebildiği moment ölçülmüştür. Referans motorun 400 V 100 Hz'de çalışması durumunda elde edilen moment eğrisinin nominal momentin bile altında kaldığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Zhao, Z., Xu, L., El-Antably, A., (1995).“Strategies and a Computer Aided Package for Design and Analysis of Induction Machines for Inverter-Driven Variable Speed Systems”, IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, 8-12 Oct. 1995, Orlando.

[2] Rao, K. S. R., Ramamoorty, M., (2003). “Design Optimization of Inverter Fed 3-Phase Squirrel Cage Induction Motor”, TENCON 2003 Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, 15-17 Oct. 2003, Bangalore.

[3] Tessarolo, A., Giulivo, D., Mezzarobba M., (2009). “A system-level approach to the optimal dimensioning of induction-motor variable-frequency drives”, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 8-10 Sept. 2009, Barcelona.

[4] Cui, G., Liu, L., Li, S., Yang, P., Yang, F., Chen, L., Dong J., (2014). “Optimization Design of High Efficiency Variable Frequency Induction Motor Based on Finite Element Analysis”, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 22-25 Oct. 2014, Hangzhou.

[5] Centner, M., Schäfer, U., (2010). “Optimized Design of High-Speed Induction Motors in Respect of the Electrical Steel Grade”, IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 57 , Issue: 1 , Jan. 2010):288-295.

[6] Mecker, S. L., (1992). “Considerations In Derating Induction Motors For Applications On Variable Frequency Drives”, Conference Record on Pulp and Paper Industry Technical Conference, 8-12 June 1992, Portland.

[7] Melfi, M.J., (1997). “Optimum Pole Configuration of Variable Speed AC Induction Motors”, IEEE Industry Applications Magazine (Volume: 3 , Issue: 6 , Nov/Dec 1997): 15-20.

[8] Mcguiness, D. T., Gulbahce, M. O., Kocabas, D. A.,(2015). “A Performance Comparison of Different Rotor Types for High-Speed Induction Motors”, 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 26-28 Nov. 2015, Bursa.

[9] Uzun H., (2013). Yüksek Verimli ve Standart Asenkron Motorların Farklı Hız Kontrol Yöntemleri Kullanılarak Karşılaştırılması, Y. Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[10] Fei, R., Fuchs, E. F., Huang, H., (1989). "Comparison of Two Optimization Techniques As Applied To Three-Phase Induction Motor Design", IEEE Transactions on Energy Conversion (Volume: 4 , Issue: 4 , Dec 1989): 651-660.

[11] Liu, X., Xu, W., (2007). "A Global Optimization Approach For Electrical Machine Designs", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 24-28 June 2007, Tampa.

[12] Boldea, I., Nasar, S. A., (2002). The Induction Machine Handbook, CRC Press, Washington.

[13] Kaygısız F., (2008). Asenkron Makinaların Matlab'da Tasarımı ve Analizi, Y. Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

[14] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans S. D., (2002). Electric Machinery, Sixth Edition, McGraw-HillPress.

[15] Tumbek, M., Oner, Y., Kesler S., (2015). Optimal Design of Induction Motor with Multi-Parameter by FEM Method, Department of Electric and Electronics Engineering, Pamukkale University, Kinikli, Denizli.

[16] IEC, 60034-30, (2014). Rotating Electrical Machines – Part 30: Efficiency Classes of Single-Speed, Three-Phase, Cage-Induction Motors (IE-code), First Edition, Geneva.

[17] TSE, TS EN 50347 Standard, (2005). Endüksiyon Motorları – Üç Fazlı, Standard Boyutlu Ve Çıkış Güçlü, Genel Amaçlı – Şasi Numaraları 56 ilâ 315 ve Flanş Numaraları 65 ilâ 740, Ankara

[18] Boldea, I., Nasar, S. A.,(2010). The Induction Machines Design Handbook, Crc Press, Second Edition, Washington.

[19] ELK Motor, Kullanma Kılavuzu, www.elkmotor.com.tr; 21.02.2019

[20] Microchip "AC Induction Motor Fundamentals AN887", 2003

[21] Gallego, A. R. (2014). Design and Optimization of an IE4 4-pole 7.5 kW Induction Motor, Yüksek Lisans Tezi, Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering ,Electrical Energy Conversion,Stockholm.

[22] Aoulkadi, M., (2011). Experimental Determination of Stray Load Losses in Cage Induction Machines, Doktora Tezi, Department of Electrical Energy Conversion at Darmstadt University of Technology, Darmstadt.

[23] ABB Technical Note,(2011). IEC 60034-30Standard on Efficiency Classes for Low Voltage AC Motors, https://new.abb.com/

[24] TSE, TS EN 60034-2-1,(2008). Döner Elektrik Makinaları - Bölüm 2-1: Döner Elektrik Makinasında Kayıpların ve Verimin Deneylerle Belirlenmesi İçin Standart Metotlar (Cer Taşıtları İçin Olan Makinalar Hariç),1. Baskı, Ankara.

[25] Gürleyen, E., (2013). Orta Güçlü Sincap Kafesli Asenkron Motor Tasarım Programı Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Harun ETÇİ

Doğum Tarihi ve Yeri : 04.05.1991, Adıyaman

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta :harunetci@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Adile Mermerci Anadolu L.	2008

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013- Devam Ediyor	ELK Motor A.Ş	Arge Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Etçi, H. ve Obdan, A. H., (2019). “Üç Fazlı Asenkron Motor Tasarımının Skaler Kontrol İçin Optimize Edilmesi”, International Aegean Symposium On Innovative Interdisciplinary Scientific Researches, 26-27 Mart 2019, İzmir