

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

DENGESİZ GERİLİMLER ALTINDA
ASENKRON MOTOR DERATASYONU

Merve ŞEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2013

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

DENGESİZ GERİLİMLER ALTINDA
ASENKRON MOTOR DERATASYONU

Merve ŞEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Murat Erhan BALCI

GEBZE
2013



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21.01.2013 tarih ve 2013/03... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07.02.2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan 101021013 numaralı Y.Lisans Öğrencisi Merve ŞEN'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. M. Erhan BALCI

ÜYE

: Doç. Dr. M.Hakan HOCAOĞLU

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Bahtiyar DURSUN

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Not: Formdaki boşluklar mutlaka Ms Word ortamında doldurulacak.

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: DENGESİZ GERİLİMLER ALTINDA ASENKRON MOTOR DERATASYONU

YAZAR ADI: MERVE ŞEN

Gerilim dengesizliği; üç faz gerilimlerine ait etkin değerlerin birbirine eşit olmaması ve/ veya bu gerilimlere ait faz açıları arasında 120°'er derece fark olmaması biçiminde ifade edilen bir güç kalitesi sorunudur.

Dengesiz gerilimler asenkron motorlarda mekanik titreşimlere ve aşırı ısınmalara yol açar. Bunun sonucunda ise asenkron motorlar beklenen ömürlerinden daha kısa sürede işletme dışında kalırlar. Bu zararları önlemenin en pratik yolu; dengesiz gerilimlerle beslenen asenkron motorların anma değerinin altında çıkış güçlerinde yüklenmeleri veya deratasyon yapılmasıdır. Buna göre literatürdeki çalışmalarda; gerilim dengesizlik faktörü (VUF), kompleks gerilim dengesizlik faktörü (CVUF), faz gerilimi dengesizlik oranı (PVUR) ve hat gerilimi dengesizlik oranı (LVUR) gibi gerilim dengesizlik indisleri tanımlanmış ve bu indisler cinsinden ölçülen farklı dengesizlik seviyeleri altında asenkron motorlara ait deratasyon eğrileri sunulmuştur. Bu çalışmalarda deratasyon eğrileri çıkarılırken; dört farklı metot dikkate alınmıştır. Bunlar; dengesiz gerilimler altında çekilen en büyük stator faz akımının motorun anma akım değerine indirgenmesi, dengesiz gerilimler altında çekilen stator faz akımlarının ortalamasının motorun anma akım değerine indirgenmesi, dengesiz gerilimler altında ölçülen toplam kaybın motorun anma kayıp değerine indirgenmesi ve NEMA standardında sunulan deratasyon eğrisidir.

Bu tezde ilk olarak; yukarıda bahsedilen gerilim dengesizliği indislerinin, asenkron motorlarda farklı değerlerde kayıplara sebep olan çeşitli dengesiz gerilimler için aynı değerleri aldığı dolayısıyla bu indislerin deratasyon eğrilerinin belirlenmesinde tek başına yeterli olmadığı gösterilmiştir. Bu boşluğu doldurmak için CVUF indisi ve IEEE standardı 1459-2010'da yer alan eşdeğer gerilim etkin değeri (V_e) tanımı; dengesizliğin ölçülmesinde birlikte dikkate alınmıştır. Böylece, farklı V_e değerlerinde dengesiz gerilimler için CVUF indisinin genliği ve açısının asenkron motor performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca V_e - CVUF

parametreleri ile deratasyon miktarı (deratasyon faktörü) arasındaki ilişki ve deratasyon işleminin asenkron motor performansına etkileri analiz edilmiştir.

Son olarak; standartlarda izin verilen en kötü gerilim dengesizlik şartları için dört farklı deratasyon metoduna göre elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: DERATING OF INDUCTION MOTOR UNDER UNBALANCED VOLTAGES

AUTHOR: MERVE ŞEN

Voltage unbalance is a power quality problem that can be explained as unequal three phase voltage rms values and/or any shift in the phase angle separations of the three-phase voltages from 120 degrees.

Unbalanced supply voltages cause mechanical vibrations and overheating in the windings of the induction machines. These negative effects result in faster aging of the machine when compared to its expected life. To prevent the damages in the most practical way, the induction motor is loaded under its rated power. Accordingly, in the literature, the voltage unbalance measurement indices such as Voltage Unbalance Factor (VUF), Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF), the Phase Voltage Unbalance Rate (PVUR) and the Line Voltage Unbalance Rate (LVUR) have been defined, and derating curves of the induction motor are presented for different voltage unbalance levels, which are measured in terms of such indices. In these studies, four different methods are taken into account to obtain the derating curves. These methods are: for unbalanced supply voltages, keeping maximum stator phase current of the induction motor under its rated current, keeping average value of the stator phase currents of the induction motor under its rated current, keeping the motor losses under its rated losses and NEMA derating curve.

In this thesis, firstly, it is shown that the fore-mentioned voltage unbalance indices have the same values in the several unbalanced voltage conditions, which cause the different losses in the induction motor. As a result, it is concluded that they are not alone sufficient to determine the derating curves. To fulfil this gap, CVUF index and the equivalent voltage rms value definition (V_e), which is placed in IEEE standard 1459-2010, are collectively employed for the quantification of voltage unbalance. Thus, the effects of the magnitude and angle of CVUF on the induction motor's performance are investigated under unbalanced voltages with

different V_e values. In addition, the variation of derating factor is parametrically analysed for various CVUF and V_e values. The effects of derating on the induction motor's performance is also presented in this thesis.

Finally, the results of four different derating method are comparatively evaluated for the worst unbalanced voltage cases, which are permitted in the standards.

TEŞEKKÜR

Tez konumun araştırılması ve yazımı sırasında sabırla yardımını ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Murat Erhan Balcı'ya,

Tez çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen meslek arkadaşım Araştırma Görevlisi Onur Öztürk'e,

Finansal olarak bu tezin tamamlanmasında desteği bulunan TÜBİTAK'a,

Hayatın her alanında desteklerini üzerimde hissettiğim annem Nurşen ŞEN'e, babam Derviş ŞEN'e ve zorlu Yüksek Lisans sürecimde sabır ve özveri ile her an yanımda bulunan Osman Çağrı KURT'a,

teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	iii
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	4
1.2. Tezin Sınırları	5
1.3. Tezin İçeriği	6
2. GERİLİM DENGESİZLİK İNDİSLERİ	7
2.1. NEMA Standardı Tanımı	7
2.2. IEEE Standardı Tanımı	7
2.3. IEC Standardı Tanımı	8
2.4. Kompleks Gerilim Dengesizlik Faktörü	8
2.5. Analiz	9
2.6. Sonuçlar Ve Değerlendirme	12
3. ASENKRON MAKİNEİNİN DİNAMİK ANALİZİ	14
3.1. Asenkron Makinenin Yapısı ve Çalışma Prensibi	14
3.2. Asenkron Makinenin Dinamik Modeline Ait Gerilim-Akım Denklemleri	19
3.3. Matlab-Simulink Dinamik Analiz Dosyası	21
3.4. Sonuçlar Ve Değerlendirme	25

4. DENGESİZ GERİLİMLERİN ASENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ	26
4.1. CVUF İndisinin Mutlak Değerinin Asenkron Motor Performansına Etkisini Gösteren Analiz Sonuçları	26
4.2. CVUF İndisinin Açısının Asenkron Motor Performansına Etkisini Gösteren Analiz Sonuçları	32
4.3. Sonuçlar Ve Değerlendirme	36
5. DERATASYONUN ASENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ	37
5.1. Test Gerilimleri İçin Asenkron Motor Deratasyonu	37
5.2. Deratasyonun Asenkron Motor Performansına Etkisini Gösteren Analiz Sonuçları	39
5.3. Sonuçlar Ve Değerlendirme	41
6. FARKLI DERATASYON METOTLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	42
6.1. Farklı Gerilim Seviyelerinde Deratasyon Bakımından En Kötü Dengesizlik Şartlarının Belirlenmesi	43
6.2. Belirlenen En Kötü Dengesizlik Şartları İçin Farklı Metotlara Göre Deratasyon Sonuçları	45
6.3. Sonuçlar Ve Değerlendirme	46
7. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR	47
8. KAYNAKÇA	51
ÖZGEÇMİŞ	54
EK-1	55
EK-2	56

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

CVUF	Kompleks Gerilim Dengesizlik Faktörü
DF	Deratasyon Faktörü
LVUR	Hat Gerilimi Dengesizlik Oranı
PVUR	Faz Gerilimi Dengesizlik Oranı
VUF	Gerilim Dengesizlik Faktörü
f_s	Senkron Frekans (Hz)
f_n	Anma Frekansı (Hz)
I_{ds}	d Ekseni Stator Akımı (A)
I'_{dr}	d Ekseni Statora İndirgenmiş Rotor Akımı (A)
I_e	Eşdeğer Akım Etkin Değeri (A)
I_{qs}	q Ekseni Stator Akımı (A)
I'_{qr}	q Ekseni Statora İndirgenmiş Rotor Akımı (A)
$I'_{ra}, I'_{rb}, I'_{rc}$	Statora İndirgenmiş Rotor Akımı Etkin Değerleri (A)
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	Stator Akımı Etkin Değerleri (A)
I_+	Pozitif Sıra Akımı (A)
I_-	Negatif Sıra Akımı (A)
L_{ls}	Stator Kaçak İndüktansı
L'_{lr}	Statora İndirgenmiş Rotor Kaçak İndüktansı
L_m	Çekirdeğin Manyetik İndüktansı
L'_r	Statora İndirgenmiş Rotor Sargısı İndüktansı
L_s	Stator Sargısı İndüktansı
n_s	Senkron Devir (d/dk)
n_r	Rotor Devri (d/dk)
p	Kutup Çifti Sayısı
P_g	Giriş Aktif Gücü (kW)
$P_ç$	Çıkış Gücü (kW)
P_n	Anma Gücü (kW)
R_s	Faz Başına Stator Sargı direnci (Ω)
R'_r	Faz Başına Statora İndirgenmiş Rotor Sargı Direnci (Ω)
S	Görünür Güç (kVA)
gf	Güç Faktörü
s, s_d	Kayma ve Devrilme Kayması

M, M_d	Moment ve Devrilme Momenti (Nm)
V_a, V_b, V_c	Faz-nötür Gerilimlerinin Etkin Değerleri (V)
$\theta_{Va}, \theta_{Vb}, \theta_{Vc}$	Faz-nötür Gerilimlerinin Faz Açıları ($^{\circ}$)
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	Hat (Faz-Faz) Gerilimlerinin Etkin Değerleri (V)
V_{ds}	d Ekseni Stator Gerilimi (V)
V'_{dr}	d Ekseni Statora İndirgenmiş Rotor Gerilimi (V)
V_e	Eşdeğer Gerilim Etkin Değeri (V)
V_n	Anma gerilimi (V)
V_{qs}	q Ekseni Stator Gerilimi (V)
V'_{qr}	q Ekseni Statora İndirgenmiş Rotor Gerilimi (V)
V_+	Pozitif Sıra Gerilimi (V)
V_-	Negatif Sıra Gerilimi (V)
w	Stator Akımlarının Senkron Açısız Hızı (rad/sn)
w_r	Rotor Akımlarının Açısız Hızı (rad/sn)
θ_{V+}	Pozitif Sıra Geriliminin Açısı ($^{\circ}$)
θ_{V-}	Negatif Sıra Geriliminin Açısı ($^{\circ}$)
θ_V	CVUF İndisinin Açısı ($\theta_{V-} - \theta_{V+}$)
θ	Stator Açısı
ϕ_{qs}	q Ekseni Stator Akısı (Wb)
ϕ_{ds}	d Ekseni Stator Akısı (Wb)
ϕ'_{dr}	d Ekseni Statora İndirgenmiş Rotor Akısı (Wb)
ϕ'_{qr}	q Ekseni Statora İndirgenmiş Rotor Akısı (Wb)
B	Rotor Açısı
H	Verim
$\Delta P_{sa}, \Delta P_{sb}, \Delta P_{sc}$	Fazlara Ait Sargı Kayıpları (kW)
ΔP_s	Toplam Sargı Kaybı (kW)
ΔP_{sn}	Toplam Sargı Kaybının Anma Değeri (kW)
θ_+	Pozitif Sıra Gerilimi ve Akımı Arasındaki Faz Farkı
θ_-	Negatif Sıra Gerilimi ve Akımı Arasındaki Faz Farkı
ΔM	Çıkış Momentinin En Büyük ve En Küçük Değerleri Arasındaki Fark
Δp_g	Giriş Ani Gücünün En Büyük ve En Küçük Değerleri Arasındaki Fark

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. VUF=% 5 için türetilen dengesiz hat gerilimlerinin değişimi.	10
2.2. $CVUF(\%)$ 'un $5\angle -130^\circ$ olduğu durumlar için hat gerilimlerinin değişimi.	11
2.3. LVUR'un % 5 olduğu durumlar için hat gerilimlerinin değişimi.	11
2.4. $V_e=0.9$ pu ve $CVUF(\%) = 5\angle -130^\circ$ için hat gerilimlerinin değişimi.	12
3.1. Asenkron makinenin yapısı.	14
3.2. Asenkron makinenin stator parçası.	15
3.3. a) Rotor bilezikleri b)Sargılı (bilezikli) rotor.	15
3.4. Sincap kafesli rotor.	16
3.5. Asenkron makinenin dört bölgede çalışması.	18
3.6. Asenkron makinenin dinamik modeline ait d ve q eşdeğer devreleri.	19
3.7. Asenkron motorun dengesiz gerilimler altında dinamik analizinde kullanılacak Matlab-Simulink dosyası.	23
3.8. Simulink asenkron motor arayüzünün konfigürasyon menüsü.	24
3.9. Simulink asenkron motor arayüzünün parametreler menüsü.	24
4.1. Test gerilimleri için elde edilen VUF- η eğrileri.	28
4.2. Test gerilimleri için (a) $VUF - \Delta P_{sa}$, (b) $VUF - \Delta P_{sb}$ ve (c) $VUF - \Delta P_{sc}$ eğrileri.	30
4.3. Test gerilimleri için elde edilen VUF- gf eğrileri.	31
4.4. Test gerilimleri için elde edilen VUF- $\Delta M/M$ eğrileri.	31
4.5. Test gerilimleri için elde edilen $ \theta_V $ - η eğrileri.	33
4.6. Test gerilimleri için elde edilen $ \theta_V $ - gf eğrileri.	34
4.7. Test gerilimleri için elde edilen $ \theta_V $ - $\Delta M/M$ eğrileri.	34
4.8. Test gerilimleri için (a) $ \theta_V - \Delta P_{sa}$, (b) $ \theta_V - \Delta P_{sb}$ ve (c) $ \theta_V - \Delta P_{sc}$ eğrileri.	35
5.1. Test gerilimleri için elde edilen VUF- DF eğrileri.	37
5.2. Test gerilimleri için elde edilen $ \theta_V $ - DF eğrileri.	38
5.3. DF=% 40- % 100 aralığı için $\Delta P_{sa}/\Delta P_{sn}(\%)$, $\eta(\%)$, gf(%)'nin değişimi.	39

5.4. DF=%40-%100 aralığı için $\Delta M/M(\%)$, $\Delta p_g/P_g(\%)$ ve $I_-/I_n(\%)$ ve $I_+/I_n(\%)$ 'nin değişimi.	40
6.1. NEMA standardının sunduğu; LVUR – DF eğrisi.	42
6.2. Test gerilimleri için elde edilen $ \theta_v $ - DF eğrileri.	44
6.3. Deratasyon bakımından en kötü dengesizlik şartlarında TK, OA ve NEMA metotlarına göre hesaplanan DF değerleri.	45
6.4. Deratasyon bakımından en kötü dengesizlik şartlarında TK, OA ve NEMA metotlarına göre yapılan deratasyonlar sonrasında çekilen en büyük stator faz akımı değerleri.	46

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Asenkron makinenin kayma değerine göre çalışma şekilleri.	17
4.1. $V_e = 200V$ seviyesi için çeşitli VUF değerlerinde test gerilimleri.	27
4.2. $V_e = 220V$ seviyesi için çeşitli VUF değerlerinde test gerilimleri.	27
4.3. $V_e = 240V$ seviyesi için çeşitli VUF değerlerinde test gerilimleri.	28
4.4. $V_e = 220V$ ve $VUF = \% 2.5$ için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.	32
4.5. $V_e = 220V$ ve $VUF = \% 5$ için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.	33
6.1. $V_e = 200V$ ve $VUF = \% 5$ için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.	43
6.2. $V_e = 240V$ ve $VUF = \% 5$ için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.	44

1. GİRİŞ

Gerilim dengesizliği faz gerilimlerinin etkin değerlerinin birbirine eşit olmaması ve/ veya faz gerilimlerinin açıları arasında 120°'er derece faz farkı olmaması sonucu meydana gelen bir güç kalitesi sorunudur [1]. Gerilim dengesizliğinin ana sebebi eşit güçlerde olmayan tek fazlı yüklerin sistemde yer almasıdır. Bununla birlikte havayı hatların transpoze edilmemesi, güç sistem arızaları, gerilim regülatörlerinin düzgün çalışmaması gibi durumlar gerilim dengesizliğinin oluşmasında diğer sebeplerdir [1], [2].

Endüstri ve sanayide yaygın olarak kullanılan asenkron motorlar gerilim dengesizliğinden en fazla etkilenen elektrik makinalarıdır. Gerilim dengesizliğinin asenkron motorların verim, güç faktörü ve ürettiği moment gibi parametreleri üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu literatürde yapılan birçok çalışma ile ortaya konmuştur [2]-[8]. Bu olumsuz etkilerin sebebi dengesiz gerilimlerin sahip olduğu pozitif ve negatif sıra bileşenlerinin asenkron motor rotorunu ters yönlerde döndürecek manyetik akılar meydana getirmesidir [8]. Bu durum asenkron motorun çıkış momentinde dalgalanmalar dolayısıyla motorda mekanik titreşimlere sebep olur. Ayrıca negatif sıra gerilim bileşeninin meydana getirdiği manyetik akı, rotoru normal dönüş yönüne ters yönde döndürmeye çalıştığından dengesiz gerilimler ile beslenen asenkron motorlar anma çıkış güçlerinde yüklendiklerinde anma akımlarının üzerinde akım çekerler. Bir başka ifadeyle dengesiz gerilimler ile beslenen asenkron motorlar anma çıkış güçlerinde yüklendiklerinde anma kayıplarının üzerinde kayıplara sahip olurlar ve bu durum asenkron motorun aşırı ısınmasına sebep olur. Gerilim dengesizliğine bağlı bu mekanik titreşimler ve aşırı ısınma sonucunda ise asenkron motorlar arızalanır yada beklenen ömürlerinden daha kısa sürede işletme dışında kalırlar [6].

Elektrik motorlarının işletme standartlarını belirleyen ve bunları yayınlayan iki temel kurum IEC (International Electrotechnical Commission) ve NEMA (National Electrical Manufacturers Association)'dır. IEC Avrupa tabanlı bir kuruluş iken NEMA Amerikan standartlarını oluşturan bir kuruluştur. Gerilim dengesizliği miktarını ölçmek amacıyla NEMA standart MG1 [9] ve IEC standart

60034-26 [10] tarafından iki farklı indis tanımlanmıştır. Bu indislerden NEMA standardında tanımlanan gerilim dengesizlik indisi (line voltage unbalance rate (LVUR): hat gerilimi dengesizlik oranı); hat gerilimlerinin ortalaması referans gerilim seviyesi kabul edilerek, “hat gerilimlerinin bu referans gerilim seviyesine göre bağıl sapma miktarlarının azami değeri” biçiminde açıklanmıştır. Ayrıca aynı standartta;

- Asenkron motorların % 5 ve üzerinde LVUR değerlerine sahip gerilimler altında çalıştırılmaması gerektiği belirtilmiş,
- % 1-5 arası LVUR değerlerine sahip dengesiz besleme gerilimlerinde asenkron motorların aşırı ısınmasını önlemek için anma güç değerlerinin altında çıkış güçlerinde yüklenmeleri (deratasyon yapılmaları) gerektiği vurgulanmış, buna göre dengesiz gerilimler altında asenkron motorun azami yüklenme miktarı (derating factor (DF)) LVUR cinsinden ifade edilmiştir.
- Son olarak; % 1’den küçük LVUR değerleri için asenkron motorun deratasyonunun gerekmediği ifade edilmiştir.

Konu üzerine önemli bir diğer standart olan IEC standardının tanımladığı gerilim dengesizlik indisi (voltage unbalance factor (VUF): gerilim dengesizlik faktörü) ise üç faz gerilimlerinin; negatif- sıra bileşeni genliğinin pozitif sıra bileşeni genliğine oranı biçiminde açıklanmıştır. Bu standart asenkron motorların çalıştırılmaması gereken VUF seviyesini % 2 ve üzeri olarak ifade etmiştir.

IEEE (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)’nin hazırladığı IEEE standart 112 [11] NEMA standardının gerilim dengesizlik indisi tanımını kabul etmiş fakat hat (faz-faz arası) gerilimleri yerine faz gerilimlerini indisin hesaplanmasında dikkate almıştır.

Türkiye’de Enerji Piyasası Denetleme Kurulu (EPDK) tarafından 12.09.2006 tarihinde yayımlanan Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliğin [12] 22. Maddesine göre “ölçüm periyodu boyunca

(ölçüm periyodu standartta 1 hafta olarak tanımlanmaktadır) ölçülen gerilim negatif bileşeni etkin değerlerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının en az %95'inin pozitif bileşenlere oranı en fazla % 2 olmalıdır. Tek fazlı veya iki fazlı yüklerin beslendiği noktalarda bu oran % 3'e kadar çıkabilir" şeklinde gerilim dengesizliğinin ölçümü ve sınırlandırılması açıklanmıştır. "EPDK'nın bu yaklaşımı IEC standardı esas alınarak oluşturulmuştur" [13].

Bu standartlara paralel olarak literatürde yapılan çalışmalardan bazıları asenkron motorlarda farklı değerlerde kayıplara veya aşırı ısınmalara sebep olan çeşitli dengesiz gerilimler için; yukarıda bahsedilen gerilim dengesizlik indislerinin aynı değerde olabileceğini diğer bir ifadeyle bu indislerin teklik özelliklerinin olmadığını göstermiştir [4], [14]. Bu durum NEMA, IEC ve IEEE standartlarında tanımlı indislerin gerilim dengesizliğine bağlı asenkron motor kayıplarındaki artışın tahmini dolayısıyla asenkron motorların dengesiz besleme gerilimlerinde deratasyonu için tek başına bir gösterge olamayacağını işaret etmiştir.

Bu eksikliği gidermek amacıyla [15]'de üç faz gerilimlerinin; negatif sıra bileşen fazör değerinin pozitif sıra bileşen fazör değerine oranı bir gerilim dengesizlik indisi (complex voltage unbalance factor (CVUF): kompleks gerilim dengesizlik faktörü) olarak tanımlanmıştır. Fakat daha sonra yayınlanan bir çalışma [16], düşük ve aşırı gerilim seviyelerinde meydana gelen dengesizlik durumlarında aynı CVUF değerlerinin ölçülebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte aynı çalışma ortalama gerilim seviyesi ile CVUF'un tek bir dengesizlik durumunu tanımlamak için birlikte kullanılabileceğini belirtmiştir. Böylece çeşitli CVUF ve ortalama gerilim seviyeleri için DF değerleri, ölçüm ve simülasyon temelli analizlerle hesap edilmiştir. [17]'de yapılan analizlerde ise pozitif sıra geriliminin genliği; faz gerilimlerinin ortalaması ile bir katsayının çarpımı biçiminde ifade edilmiştir. Bu sayede düşük ve aşırı gerilim dengesizlik durumları tanımlanan katsayının sırasıyla 1'den küçük ve 1'den büyük olmasına göre ayırt edilmiştir. Böylece çeşitli gerilim dengesizlik durumları için asenkron motorun DF değerleri belirlenmiştir.

Asenkron motorlara gerilim dengesizliğinin etkileri ve dengesizlik şartlarında bu makinelerin deratasyonu üzerine yapılan analizlerde genellikle;

ölçüm sonuçları [2], [3], [18] asenkron makinenin pozitif/ negatif sıra eşdeğer devreleri [15]-[17], dinamik modeli [3], [19] ve detaylı ısı modelleri [20]-[23] kullanılmıştır. Detaylı ısı modellerin kullanıldığı çalışmalarda çeşitli gerilim dengesizlik durumları için DF değerleri tespit edilirken; motor sargılarındaki ısınmanın izin verilen ısınma değerini aşmaması kriter olarak kabul edilmiştir. Diğer taraftan eşdeğer devre ve dinamik modelin kullanıldığı çalışmalarda dört farklı metoda göre çeşitli gerilim dengesizlik durumları için DF değerleri tespit edilmiştir [3]:

- Dengesiz gerilimler altında ölçülen en büyük stator faz akımının motorun anma akım değerine indirgenmesi; Azami Akım (AA) metodu,
- Dengesiz gerilimler altında ölçülen stator faz akımlarının ortalamasının motorun anma akım değerine indirgenmesi; Ortalama Akım (OA) metodu,
- Dengesiz gerilimler altında ölçülen toplam kaybın motorun anma kayıp değerine indirgenmesi; Toplam Kayıp (TK) metodu,
- NEMA standardının sunduğu deratasyon eğrisine göre DF'nin belirlenmesi; NEMA metodu.

Yukarıda özetlenen çalışmalardan görülmektedir ki; gerilim dengesizliğinin ölçülmesi ve asenkron motorların dengesiz besleme gerilimleri altında deratasyonu konuları halen gelişim sürecinde olan bir literatüre sahiptir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında hedeflenen çıktılar;

- Farklı gerilim seviyelerinde CVUF indisinin genliği ve açısının, asenkron motorun verim, güç faktörü ve çıkış momenti salınımı gibi performans kriterlerine etkisinin analiz edilmesi,

- Farklı gerilim seviyelerinde CVUF indisinin genliği ve açısı ile deratasyon miktarı (deratasyon faktörü, DF) arasındaki ilişkinin incelenmesi,
- Deratasyonun asenkron motor performansına etkisinin analiz edilmesi,
- Standartlarda izin verilen en kötü gerilim dengesizlik şartlarında AA, OA, TK ve NEMA metotlarına göre elde edilen deratasyon sonuçlarının karşılaştırmalı olarak analiz edilmesidir.

1.2 Tezin Sınırları

Tez içerisinde var olan sınırlar;

- Analiz sonuçları simülasyon temelli olup simülasyon için asenkron motorun dinamik modeli kullanılacaktır,
- Dinamik model oluşturulurken demir kayıpları dikkate alınmayacaktır,
- Analiz sonuçları asenkron motorun sabit moment çalışma durumu için elde edilecektir.

1.3 Tezin İçeriği

Tezin ikinci bölümünde; literatürde yaygın olarak bilinen gerilim dengesizlik indislerinin ifadeleri sunulmuş ve bu indislerin çeşitli dengesiz gerilim şartları için teklikleri veya diğer bir deyişle dengesizlik durumunu belirleme yetenekleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

nc blmde; asenkron makinenin yapısı ve çalışma prensibi anlatıldıktan sonra analizlerde kullanılan Matlab/ Simulink [24] dosyasında yer alan asenkron motorun dinamik modeli ve hesap blokları tanıtılmıştır.

Dördüncü blmde; farklı gerilim seviyelerinde CVUF indisinin genliği ve açısının asenkron motorun verim, g faktörü ve çıkış momentı salınımı gibi performans kriterlerine etkisi incelenmiştir.

Beşinci blmde; farklı gerilim seviyelerinde CVUF indisinin genliği ve açısı ile deratasyon faktörü arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca deratasyonun asenkron motor performansına etkisi analiz edilmiştir.

Altıncı blmde ise standartlarda izin verilen deratasyon bakımından en kötü gerilim dengesizlik şartlarında AA, OA, TK ve NEMA metotlarına göre elde edilen deratasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Sonuç bölümünde ise daha önceki bölümlerde elde edilen analiz ıktıları özetlenmiş ve tezde gerçekleştirilen çalışmanın devamında yapılabilecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

2.GERİLİM DENGESİZLİK İNDİSLERİ

Gerilim dengesizliğinin ölçümü için üç önemli uluslararası kuruluşa ait üç farklı indis tanımı vardır. Bunlar; NEMA standardında tanımlı hat gerilim dengesizlik oranı, IEEE 112 standardında tanımlı faz gerilim dengesizlik oranı ve IEC 60034-26 standardında tanımlı gerilim dengesizlik faktörü indisleridir. Bu üç gerilim dengesizlik indisi tanımına ek olarak ayrıca [15] çalışmasında kompleks gerilim dengesizlik faktörü tanımı yapılmıştır. Bahsedilen dört farklı gerilim dengesizlik indisinin ifadeleri bu bölümde verilecektir. Ayrıca bu indislerin çeşitli dengesiz gerilim şartları için teklikleri veya diğer bir deyişle dengesizlik durumunu belirleme yetenekleri karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir.

2.1.NEMA Standardı Tanımı

NEMA standardı tarafından tanımlanmış olan ve literatürde hat gerilim dengesizlik oranı (LVUR) ismiyle de bilinen gerilim dengesizlik indisinin ifadesi (2.1)'de verilmiştir. Bu ifadeye göre LVUR indisi; hat gerilimleri etkin değerlerinin ortalama hat gerilimi değerinden azami sapma miktarının bağıl değeri olarak izah edilebilir [25].

$$LVUR(\%) = \frac{Azami \left[|V_{ab} - V_{ort}|, |V_{bc} - V_{ort}|, |V_{ca} - V_{ort}| \right]}{V_{ort}} \times 100, \quad V_{ort} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (2.1)$$

2.2.IEEE Standardı Tanımı

NEMA ile IEEE standartlarının gerilim dengesizlik indisi tanımları aynı ifadelere sahip olup aradaki fark NEMA standardının tanım ifadesinde hat gerilimlerinin, IEEE standardının tanım ifadesinde ise faz gerilimlerinin dikkate alınmasıdır [25]. Buna göre IEEE standardında yer alan ve literatürde faz gerilim dengesizlik oranı (PVUR) olarak da bilinen indisin hesabı (2.2)'de verilmiştir:

$$PVUR(\%) = \frac{Azami \left[|V_a - V_{ort}|, |V_b - V_{ort}|, |V_c - V_{ort}| \right]}{V_{ort}} \times 100, \quad V_{ort} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (2.2)$$

Diğer taraftan hat gerilimleri sıfır sıra bileşeni içermemesine rağmen faz gerilimleri sıfır sıra bileşeni içerebilir. Gerilimin sıfır sıra bileşeni ise asenkron motor gibi nötür bağlantısı olmayan üç fazlı yüklerin performansına etki etmez. Bu sebeple gerilim dengesizliğinin asenkron motorların performansına etkisinin analizinde, faz gerilimleri dikkate alınarak hesaplanan PVUR'un uygun bir gösterge olmadığı açıktır.

2.3. IEC Standardı Tanımı

IEC standardı gerilim dengesizliği indisi tanımını yaparken simetrik bileşenleri kullanmıştır. Böylece literatürde gerilim dengesizlik faktörü (VUF) olarak bilinen IEC standardına ait gerilim dengesizlik indisi; gerilimin negatif sıra bileşeninin (V_-) pozitif sıra bileşenine (V_+) oranı biçiminde ifade edilmiştir:

$$VUF(\%) = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (2.3)$$

2.4. Kompleks Gerilim Dengesizlik Faktörü

[15]'de pozitif ve negatif sıra gerilimlerinin genlikleri (V_+ ve V_-) yanında açılarının (θ_{V_+} ve θ_{V_-}) da asenkron motorların dengesizlik altında azami yüklenme miktarına etki ettiği görülmüştür. Bunun neticesinde aynı çalışmada kompleks gerilim dengesizlik faktörü (CVUF) tanımlanmıştır:

$$CVUF(\%) = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \angle (\theta_{V_-} - \theta_{V_+}) = VUF(\%) \angle \theta_V, \quad \theta_V = \theta_{V_-} - \theta_{V_+} \quad (2.4)$$

Buraya kadar ifadeleri verilen gerilim dengesizlik indislerinden PVUR haricindekilerin teklikleri çeşitli dengesiz gerilimler için aşağıda karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2.5. Analiz

Bir gerilim dengesizlik indisinin teklik özelliğine sahip olması “her bir farklı gerilim dengesizlik durumu için farklı bir değer alması” manasına gelmektedir. Teklik özelliğine sahip bir dengesizlik indisi; asenkron motorlarda farklı değerlerde kayıplara veya aşırı ısınmalara sebep olan çeşitli dengesiz gerilimler için farklı değerler alacağından, gerilim dengesizliğine bağlı asenkron motor kayıplarındaki artışın tahmini dolayısıyla asenkron motorların dengesiz besleme gerilimlerinde deratasyonu için güvenilir bir gösterge olacaktır.

Teklik analizinde kullanılan dengesiz gerilimlerin türetilmesinde IEEE std. 1459-2010 [26]’da tanımlı olan eşdeğer gerilim etkin değeri (V_e) dikkate alınmıştır.

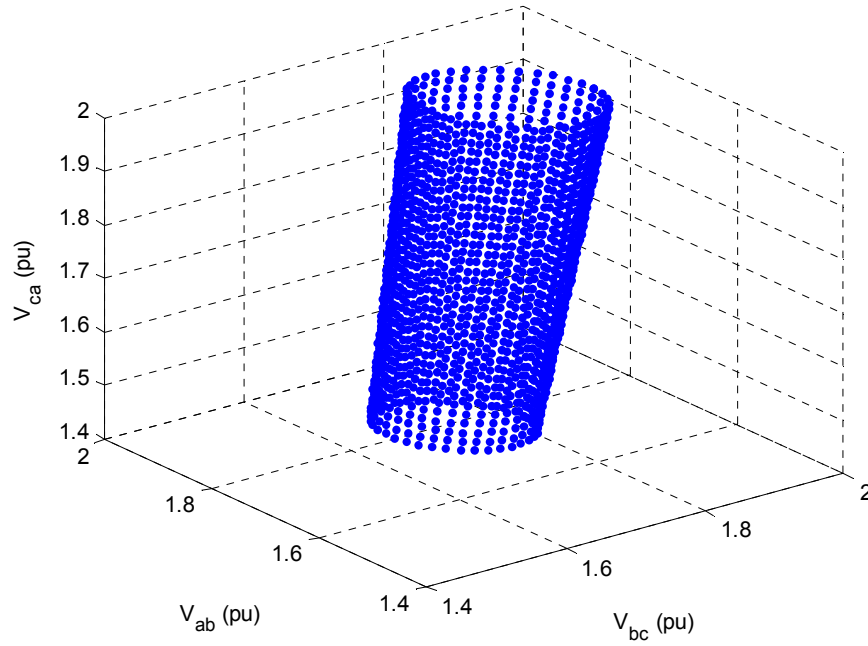
$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} = \sqrt{V_+^2 + V_-^2} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)’de verilen V_e ifadesi V_+ ve $VUF(\%)$ indisi cinsinden;

$$V_e = V_+ \sqrt{1 + \left(\frac{VUF(\%)}{100} \right)^2} \quad (2.6)$$

biçiminde yazılabilir. Bu ifadeye göre $VUF=5\%$ için V_e değeri 0.9 pu ile 1.1 pu arasında değiştirilmiştir. Dengesiz gerilimler türetilirken pozitif sıra geriliminin açısı 0° ’de sabit tutulmuş, negatif sıra geriliminin açısı ise 0° ile 360° arasında değiştirilmiştir. Ayrıca türetilen dengesiz gerilimlerin sıfır sıra bileşeni yoktur.

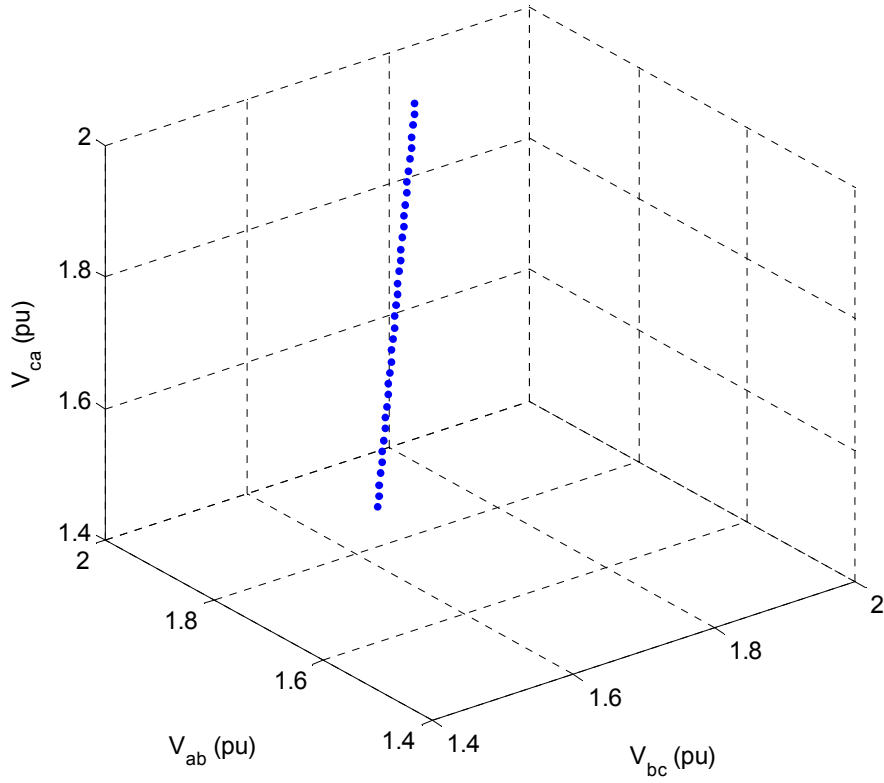
Yukarıda belirtilmiş esaslara göre türetilen hat gerilimlerinin değişimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



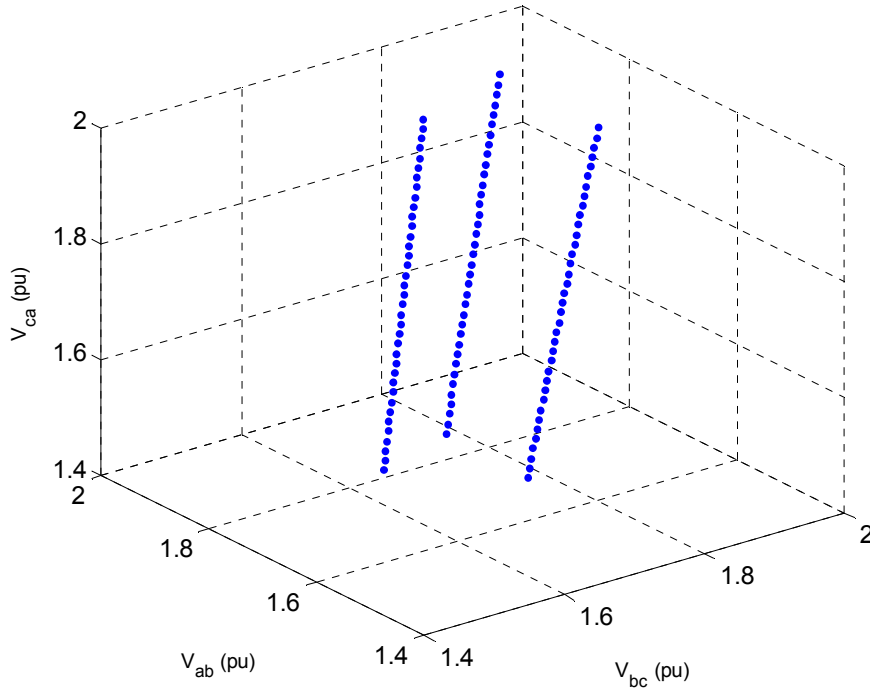
Şekil 2.1: VUF=% 5 için türetilen dengesiz hat gerilimlerinin değişimi.

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi VUF=% 5 için çok sayıda dengesiz gerilim durumunun olduğu diğer bir ifadeyle VUF’un teklik özelliğine sahip olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi farklı gerilim seviyelerinde ve farklı simetrik bileşen açıları için aynı VUF değerini sağlayan dengesiz gerilimlerin olmasıdır.

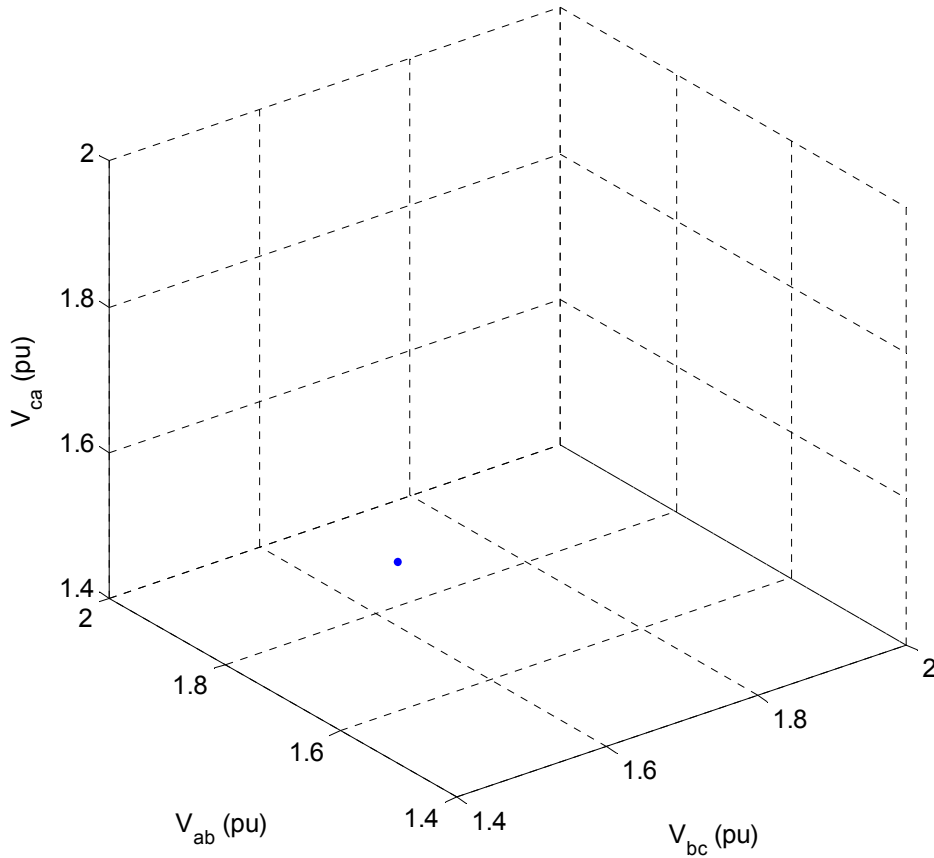
Diğer taraftan türetilen dengesiz gerilim durumlarından $CVUF(\%)$ ’un $5\angle -130^\circ$ ve LVUR’un % 5 olduğu durumlar belirlenerek, bunlarda hat gerilimlerinin değişimi sırasıyla Şekil 2.2 ve Şekil 2.3’de verilmiştir. Bu şekillerden CVUF ve LVUR’un da VUF indisi gibi teklik özelliğine sahip olmadıkları görülmektedir. Bununla birlikte CVUF’un diğer iki indise göre gerilim dengesizlik durumlarını belirlemede daha başarılı olduğu açıktır. Ayrıca Şekil 2.2’den aynı CVUF’un gözlemlendiği dengesizlik durumları arasında gerilim seviyesi (V_e) farkı olduğu anlaşılmaktadır. Buradan yola çıkılarak aynı gerilim seviyesi, örneğin; $V_e=0.9$ pu için Şekil 2.2’deki durumlar bir daha elemeyi geçirilirse bir başka ifadeyle V_e ile CVUF birlikte dengesiz gerilim durumlarının belirlenmesinde kullanılırsa Şekil 2.4’de verilen grafik elde edilir.



Şekil 2.2: $CVUF(\%)$ 'un $5 \angle -130^\circ$ olduğu durumlar için hat gerilimlerinin değişimi.



Şekil 2.3: $LVUR$ 'un 5% olduğu durumlar için hat gerilimlerinin değişimi.



Şekil 2.4: $V_e=0.9$ pu ve $CVUF(\%) = 5\angle -130^\circ$ için hat gerilimlerinin değişimi.

Şekil 2.4'den görülmektedir ki $V_e=0.9$ pu ve $CVUF(\%) = 5\angle -130^\circ$ için tek bir gerilim dengesizlik durumu vardır. Bu sebeple V_e ile $CVUF$ 'un gerilim dengesizlik durumlarının belirlenmesinde kullanımı başarılıdır.

2.6.Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu bölümde yapılan niteliksel ve niceliksel analizlerden;

- VUF, CVUF, PVUR ve LVUR indislerinin teklik özelliğine sahip olmadığı bir başka ifadeyle bu indislerin herhangi bir değeri için birden fazla dengesiz gerilim

durumunun karşılık geldiği; dolayısıyla bu indislerin gerilim dengesizliğinin miktarına bağlı deratasyon faktörü eğrilerinin çıkarılmasında tek başına kullanılmasının doğru olmayacağı,

- Bununla birlikte tek bir gerilim seviyesi (V_e) ve CVUF değerine tek bir gerilim dengesizlik durumunun karşılık geldiği,

görülmüştür.

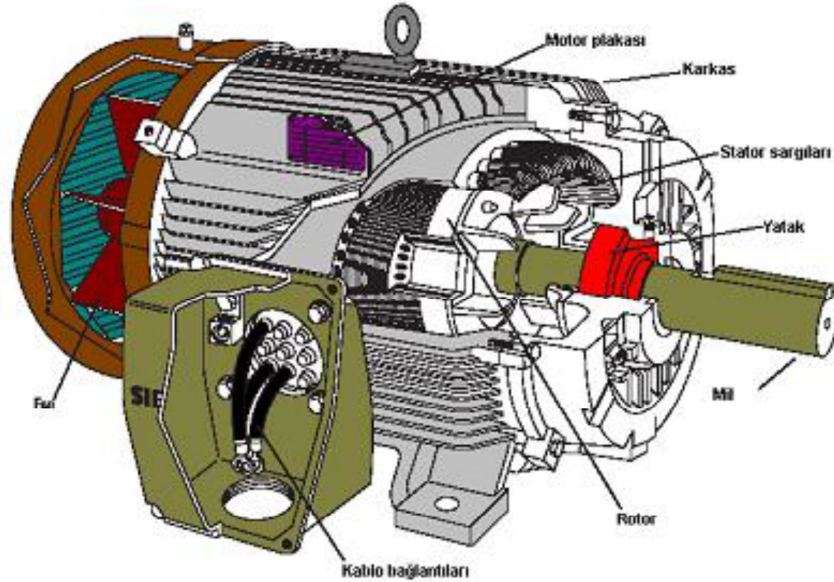
Yukarıda belirtilen sonuçlar doğrultusunda bu tezin ileriki bölümlerinde sunulacak analizlerde gerilim dengesizlik durumları V_e ve CVUF cinsinden ifade edilecektir ve bu parametrelere göre asenkron motor deratasyon eğrileri çıkarılacaktır.

3.ASENKRON MAKİNEİN DİNAMİK ANALİZİ

Bu bölümde asenkron makinelerin yapısı, çalışması, dinamik modeline ait gerilim-akım denklemleri ile Matlab-Simulink [24] dinamik analiz dosyası hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca analizler için modellenen asenkron motor tanıtılacaktır.

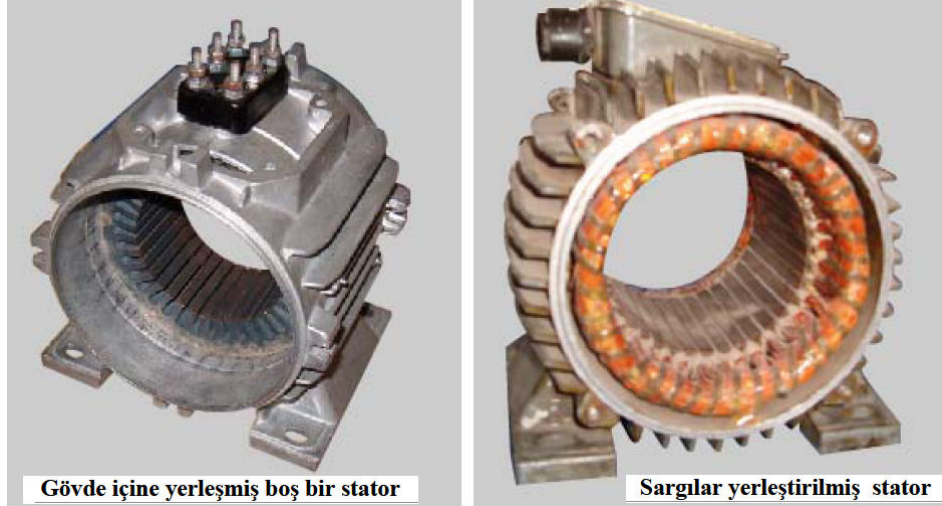
3.1. Asenkron Makinenin Yapısı ve Çalışma Prensipleri

Asenkron makineler generatör veya motor olarak çalışabilen döner elektrik makinaları olup; temelde yapısal olarak duran kısım (stator) ve dönen kısım (rotor) olmak üzere iki ana parçadan oluşur [27]. Eğer asenkron makinenin stator sargılarına elektrik enerjisi uygulanıyor ve milinden mekanik enerji alınıyorsa, bu çalışma şekline “**motor çalışma**” denir. Tam tersi enerji akışında ise makina “**generatör**” olarak çalışır. Bununla birlikte asenkron makineler çeşitli hızlarda çalışabilme özelliklerinden dolayı endüstride yaygın biçimde motor olarak kullanılmaktadır. Asenkron makine, stator ve rotor parçaları dışında gövde ve kapaklar, yatak ve rulmanlar, soğutma pervanesi ve klemens tablosu gibi kısımlardan oluşur (Şekil 3.1).



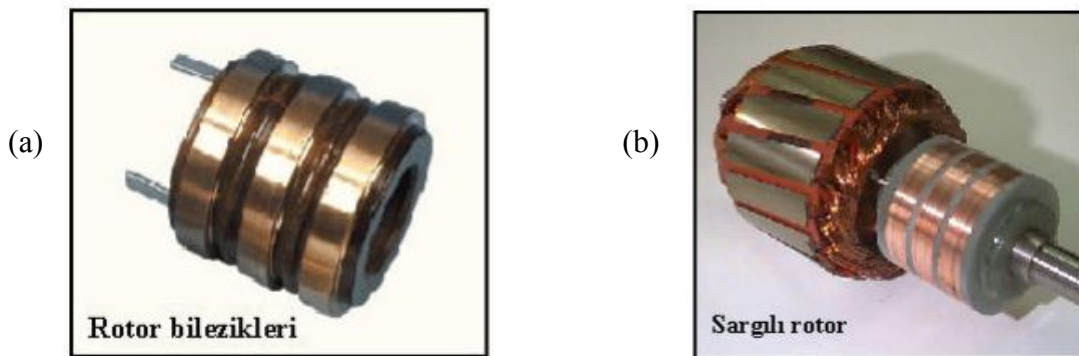
Şekil 3.1: Asenkron makinenin yapısı [28].

Stator; alüminyum ya da demirden yapılmış çok ince saçların özel kalıplarda preslenip paketlenmesiyle üretilir (Şekil 3.2). Bu parçanın iç kısmında bakır telden yapılan sarımlar bulunur. Sarımların görevi alternatif gerilim uygulandığında döner manyetik alan doğurarak rotorun dönmesini sağlamaktır.



Şekil 3.2: Asenkron makinenin stator parçası [29].

Asenkron makinenin rotor kısmı da stator gibi paketlenmiş ince saçlardan meydana gelir. Asenkron makinelerde rotor, sincap kafesli ve sargılı (bilezikli) rotor olmak üzere iki çeşittir. Şekil 3.3’de gösterilen sargılı rotorda oluklar içine 120° açı farkıyla üç fazlı sargılar yerleştirilir.

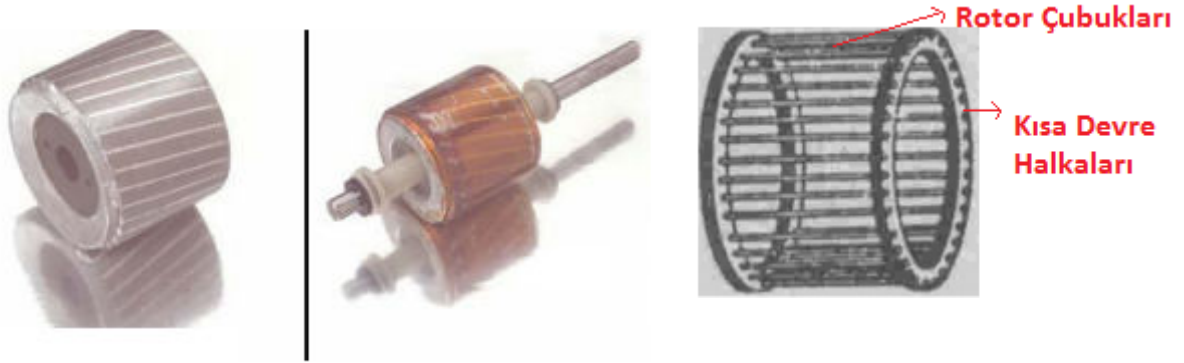


Şekil 3.3: a) Rotor bilezikleri b) Sargılı (bilezikli) rotor [29].

Üç fazlı rotor sargılarının birer ucu yıldız olarak bağlanır. Diğer uçları ise rotor miline yerleştirilmiş bileziklere bağlanır. Asenkron motora yol verme ve hız ayarı amacıyla

bileziklere temas eden fırçalar yardımıyla dış kaynaktan genliği yada frekansı değiştirilebilen gerilim uygulanabilir veya direnç bağlanabilir.

Sincap kafesli rotorlarda ise rotor sargısı, oluklara yerleştirilen çıplak çubuklar ve bu çubukları her iki uçtan kısa devre eden kısa devre halkalarından oluşur (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Sincap kafesli rotor [29].

Asenkron motorlar alternatif akımla çalışan elektrik makinaları olup dengeli üç faz gerilimler altında bu makinelerin stator sargılarından dengeli üç fazlı alternatif akımlar akar. Stator sargılarından akan bu akımlar stator-rotor arasındaki hava boşluğunda döner alan meydana getirir. Bunun neticesinde rotor sargılarında gerilim indüklenir ve böylece bu sargılardan alternatif akım akar. Stator sargılarından akan akımlardan dolayı stator döner alanı, rotor sargılarından akan akımlardan dolayı rotor döner alanı meydana gelir. Bu iki döner alanın karşılıklı etkileşimi ise rotorda bir dönme momenti doğurur. Stator döner alanının hızına **senkron hız (n_s)** denir. Senkron hızın şebeke frekansı (f_s) ve makinenin kutup çifti sayısı (p) cinsinden ifadesi;

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

biçimindedir. Asenkron motor, yükte çalışırken hiçbir zaman senkron hıza (n_s) erişemez. Çünkü bu hızda stator döner alan hızı, rotorun hızına eşit olacağından iletkenlerde gerilim ve akım, dolayısıyla döndürme momenti oluşmaz. Asenkron makinenin rotor dönme hızı (n_r) ile stator döner alanı hızı (n_s) arasındaki ilişki **kayma (s)** olarak tanımlanır:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.2)$$

Kayma değeri Tablo 3.1’den de görüldüğü gibi makinanın çalışma şekline ve yüklenme miktarına bağlıdır.

Tablo 3.1: Asenkron makinenin kayma değerine göre çalışma şekilleri.

Senkron hız-Rotor Hızı ilişkisi	Kayma (s)	Çalışma Şekli
$n_r < n_s$	$0 < s < 1$	Motor Çalışma
$n_r > n_s$	$s < 0$	Generatör Çalışma
N	$s > 1$	Fren Çalışma
$n_r = n_s$	$s \approx 0$	Boşta Çalışma
$n_r = 0$	$s = 1$	Kilitli rotor (kısa devre) Çalışma

Asenkron makine yol almaya başladığı esnada, rotor durmaktadır. Trafoda olduğu gibi rotor sargılarında bir gerilim üretir. Ancak rotora uygulanan fren momenti, oluşan döndürme momentinden büyükse rotor dönemez. Bu çalışma şekline **asenكرون makinenin kilitli rotor (kısa devre) çalışması** denir ($s=1$).

Asenkron makinenin mili boşta dönerken rotor hızı senkron hıza çok yakındır. Dolayısıyla makinenin kayması çok küçük olup yaklaşık sıfırdır. Bu durumda rotor sargılarından akım akmayacaktır. Makinenin güç üretmediği bu çalışma şekli **asenكرون makinenin boşta çalışması** olarak tanımlanır ($s=0$).

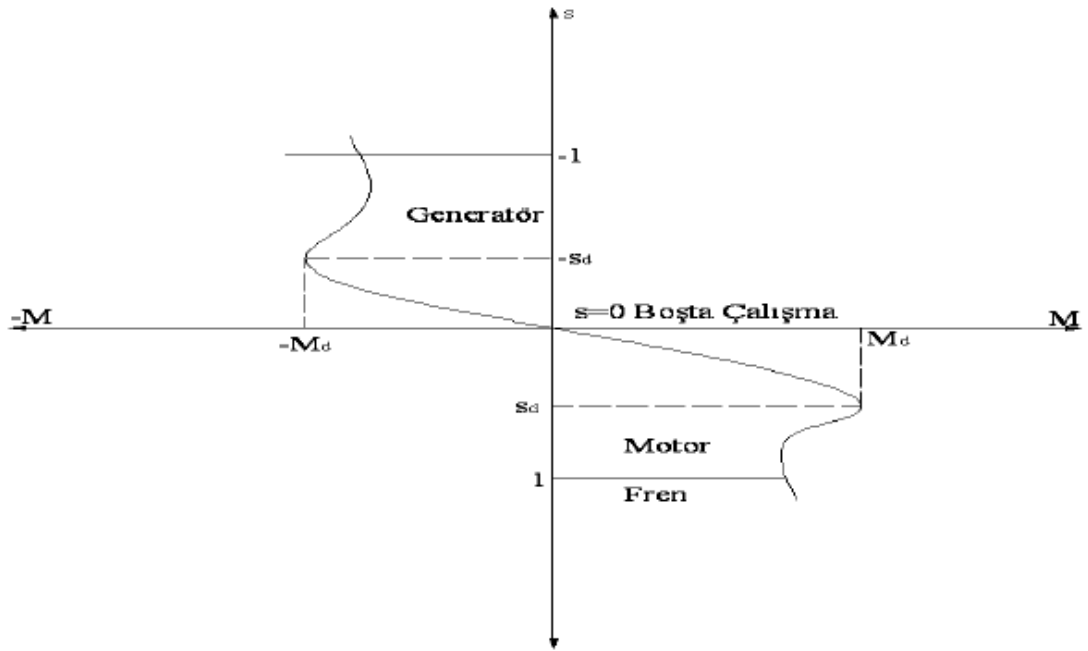
Harekete başladıktan sonra, sürekli çalışma noktasına ulaşıncaya kadar ve ulaştığında ki çalışma şekli **asenكرون makinenin motor çalışması** olarak adlandırılır. Bu çalışma durumunda, elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Dolayısıyla makine mekanik enerji üretmek ve muhtelif kayıplarını karşılamak için şebekeden bir güç çekmektedir ($0 < s < 1$)

Asenkron makine dışarıdan bir tahrik makinası ile döndürüldüğünde senkron hızın üzerine çıkar. Bu şartlar altında makinede endüklenen gerilim şebeke geriliminden büyük olacağı için akım 180° yön değiştirerek şebekeye doğru akacaktır. Mekanik enerjinin

elektriksel enerjiye dönüştürüldüğü bu çalışma şekline **asenكرون makinenin generatör çalışması** denir ($s < 0$).

Çalışmakta olan bir asenkron makinede, üç faz akımının iki fazının yeri değiştirilecek olursa döner alanın yönü değişir. Böylece makineye döndüğü yönün aksinde fren momenti uygulanmış olur. Bu çalışma şekline **asenكرون makinenin fren çalışması** denir ($s > 1$).

Yukarıda açıklanan durumlara göre; Şekil 3.5’de asenkron makinenin farklı kayma aralıklarında çeşitli işletme durumları gösterilmiştir.

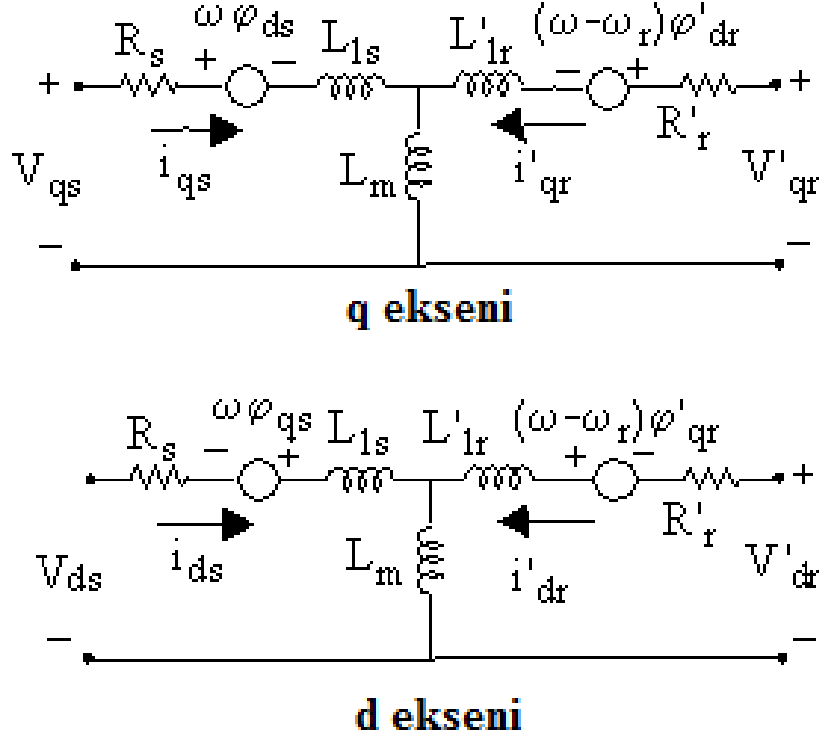


Şekil 3.5: Asenkron makinenin dört bölgede çalışması [13].

Şekil 3.5’den görüldüğü gibi, moment ile kayma arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Şekildeki M_d ; **devrilme momentini** ifade etmektedir. Devrilme momenti asenkron makinenin ulaşabileceği maksimum moment değeri olup bu moment değerinde makinenin sahip olduğu kayma değerine **devrilme kayması (s_d)** adı verilir.

3.2. Asenkron Makinenin Dinamik Modeline Ait Gerilim-Akım Denklemleri

Asenkron makinenin dinamik modeline [27] ait denklemler Şekil 3.6'da verilen d ve q eşdeğer devreleri yardımıyla elde edilmiştir.



Şekil 3.6: Asenkron makinenin dinamik modeline ait d ve q eşdeğer devreleri [24].

Şekil 3.6'da verilen d ve q eşdeğer devrelerinde Kirchoof gerilim kanununa göre (3.3)-(3.6) numaralı denklemler yazılır. Bu denklemlerde V_{qs} , V_{ds} , i_{qs} ve i_{ds} ; q ile d eksenleri için stator gerilimleri ve akımlarıdır, V'_{qr} , V'_{dr} , i'_{qr} ve i'_{dr} ise; q ile d eksenleri için statora indirgenmiş rotor gerilimleri ve akımlarıdır. Ayrıca denklemlerde yer alan w stator akımlarının senkron açısal hızını, w_r rotor akımlarının açısal hızını, R_s stator sargı direncini, R'_r statora indirgenmiş rotor sargı direncini ifade eder.

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + w \varphi_{ds} \quad (3.3)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - w \varphi_{qs} \quad (3.4)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} + (w - w_r) \varphi'_{qr} \quad (3.5)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \phi'_{dq} - (w - w_r) \phi'_{dr} \quad (3.6)$$

d ve q eşdeğer devrelerdeki L_{ls} ve L'_{lr} sırasıyla stator ve statora indirgenmiş rotor kaçak indüktanslarıdır. L_m ise çekirdeğin manyetik indüktans değeridir. Bu parametreler cinsinden stator sargısı indüktansı (L_s) ve statora indirgenmiş rotor sargısı indüktansı (L'_r) (3.7) ve (3.8)'den hesap edilebilir:

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (3.7)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (3.8)$$

Böylece (3.3)-(3.6)'da bulunan d ve q eksen manyetik akıları (ϕ_{qs} , ϕ_{ds} , ϕ'_{qr} ve ϕ'_{dr}) (3.9)-(3.12)'de verilen biçimde ifade edilirler:

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (3.9)$$

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (3.10)$$

$$\phi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (3.11)$$

$$\phi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (3.12)$$

Yukarıda verilenlere ek olarak Park dönüşümü yardımıyla stator ve statora indirgenmiş rotor gerilimlerinin faz-faz arası değerleri ile d-q bileşenleri arasındaki ilişki;

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 \cos \theta & \cos \theta + \sqrt{3} \sin \theta \\ 2 \sin \theta & \sin \theta - \sqrt{3} \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 \cos \beta & \cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta \\ 2 \sin \beta & \sin \beta - \sqrt{3} \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V'_{abr} \\ V'_{bcr} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

biçiminde yazılabilir. Ayrıca stator ve statora indirgenmiş rotor akımlarının d-q bileşenleri ile a-b-c faz değerleri arasındaki geçiş aşağıda verilen ifadelere göre yapılır:

$$\begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\cos \theta + \sqrt{3} \sin \theta & -\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} I'_{ar} \\ I'_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta & -\sqrt{3} \cos \beta - \sin \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I'_{qr} \\ I'_{dr} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$I_{cs} = -I_{as} - I_{bs} \quad (3.17)$$

$$I'_{cr} = -I'_{ar} - I'_{br} \quad (3.18)$$

Bu ifadelerdeki θ ve β stator ve rotor açılarıdır.

3.3. Matlab-Simulink Dinamik Analiz Dosyası

Asenkron motorun dengesiz gerilimler altında dinamik analizinde kullanılacak Matlab-Simulink dosyası Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu simulink dosyası gerilim kaynakları, asenkron motor bloğu ve ölçüm bloklarından oluşmaktadır.

Ölçüm blokları; faz-nötür / hat (faz-faz) gerilimlerinin etkin değerleri ile stator / rotor akımlarının etkin değerlerinin ölçüldüğü RMS blokları, faz-nötür gerilimleri ile stator akımlarının pozitif/negatif sıra bileşenlerinin ölçüldüğü bloklar ve makinanın ürettiği moment ile rotor hızının ortalama değerlerini (M ve ω) hesaplayan MEAN bloklarından oluşmaktadır. Analizler sırasında etkin değer, ortalama değer ve sıra bileşenlerine ait genlik/ aç değeri gösterge (DISPLAY)'lerden okunmuştur. Üretilen moment ve rotor hızının ani değerleri ve maksimum/ minimum değerleri ise osiloskop (SCOPE)'lerden okunmuştur.

Yukarıda belirtilen ölçümler yardımıyla ayrıca asenkron motorun kaynaktan çektiği aktif güç (P_g) ve görünür güç (S) ile güç faktörü (gf) IEEE std. 1459-2010'a göre;

$$P_g = 3V_+ I_+ \cos(\theta_+) + 3V_- I_- \cos(\theta_-) \quad (3.19)$$

$$S = 3V_e I_e = 3\sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \sqrt{\frac{I_{sa}^2 + I_{sb}^2 + I_{sc}^2}{3}} \quad (3.20)$$

$$gf = \frac{P_g}{S} \quad (3.21)$$

ifadeleriyle hesaplanmıştır.

Asenkron makinanın çıkış gücü (P_ζ) ve verimi (η), (3.22) ve (3.23)'de verilen ifadelerden hesaplanmıştır:

$$P_\zeta = \frac{1}{T} \int M(t) \omega(t) dt \quad (3.22)$$

$$\eta(\%) = 100 \frac{P_g}{P_s} \quad (3.23)$$

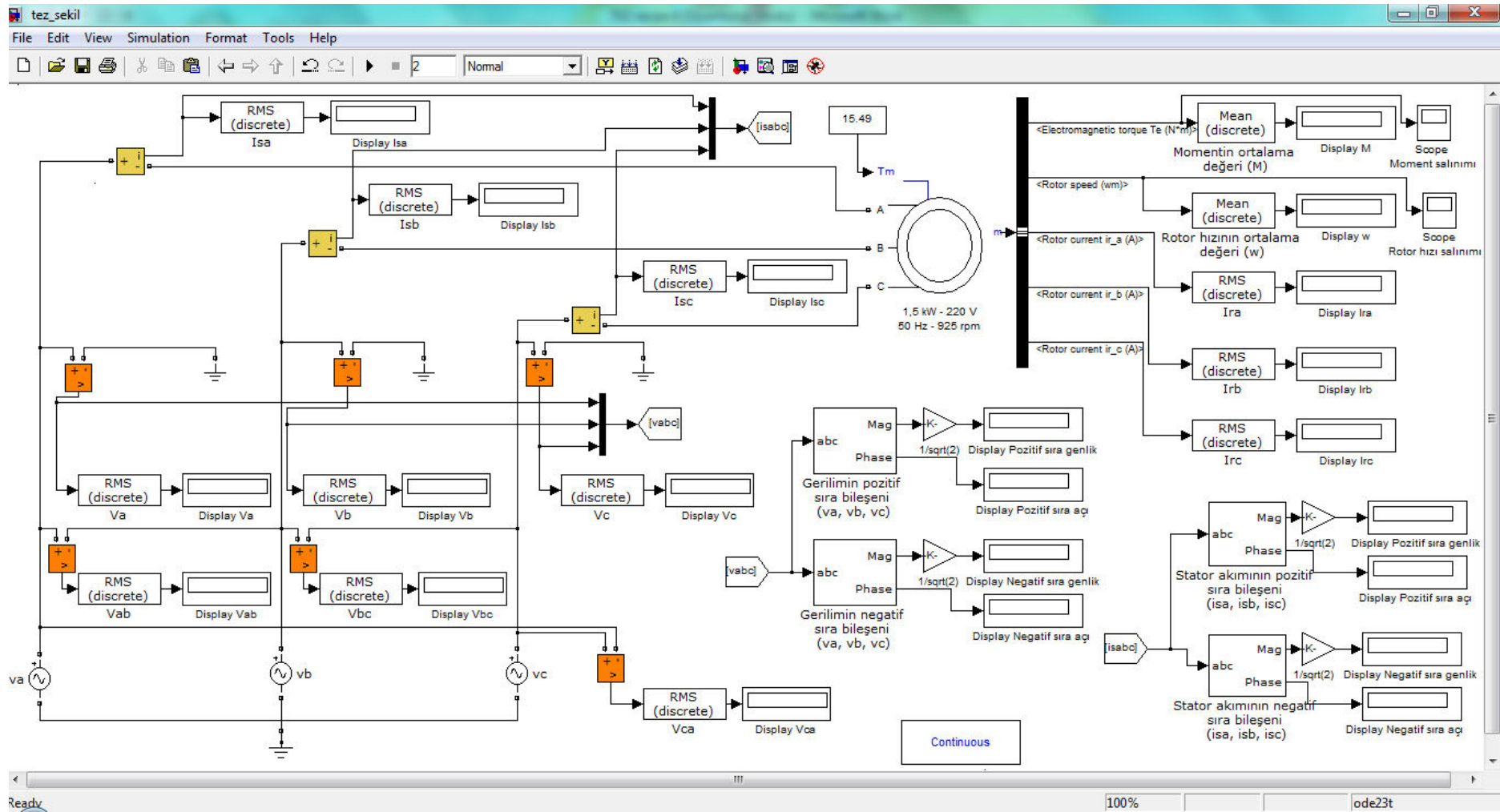
a, b ve c fazlarına ait sargılarda ölçülen stator (I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}) ve statora indirgenmiş rotor ($I_{ra}', I_{rb}', I_{rc}'$) akımlarının etkin değerleri yardımıyla, her bir faza ait sargı kayıpları ($\Delta P_{sa}, \Delta P_{sb}, \Delta P_{sc}$) ve toplam sargı kaybı (ΔP_s) (3.24) ve (3.25)'de verilen ifadelerle göre hesaplanmıştır;

$$\Delta P_{sa} = I_{sa}^2 R_s + (I_{ra}')^2 R_r', \Delta P_{sb} = I_{sb}^2 R_s + (I_{rb}')^2 R_r', \Delta P_{sc} = I_{sc}^2 R_s + (I_{rc}')^2 R_r' \quad (3.24)$$

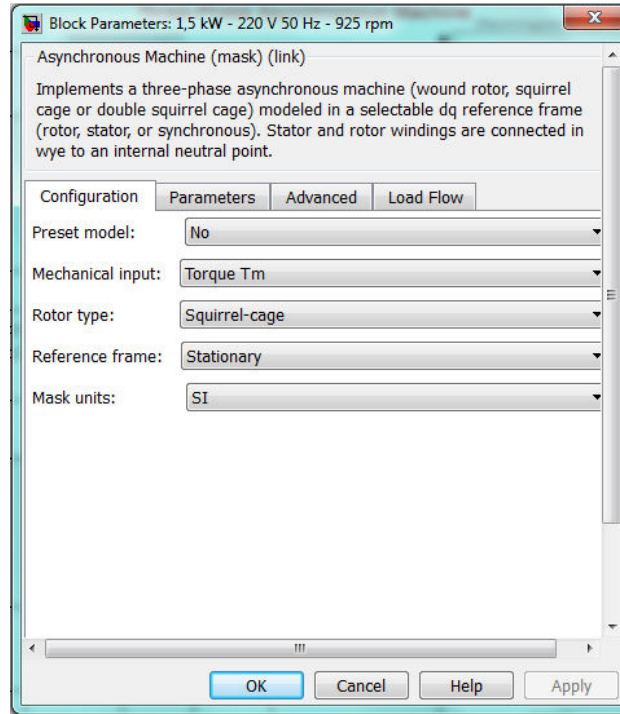
$$\Delta P_s = \Delta P_{sa} + \Delta P_{sb} + \Delta P_{sc} \quad (3.25)$$

Gerilim kaynağı bloklarında uygulanacak her bir dengesiz gerilim durumu için gerilimin tepe değeri (volt biriminde) ve faz açısı (derece biriminde) girilmiştir. Ayrıca tüm dengesizlik durumlarında gerilim kaynağının frekans değeri 50 Hz olarak belirlenmiştir.

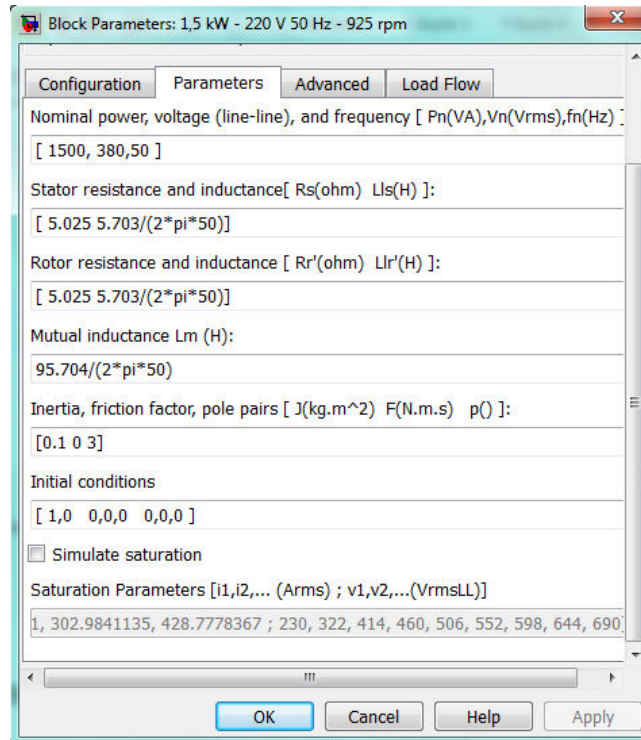
Simulink dosyasında yer alan asenkron motor bloğunun konfigürasyon (configuration) ve parametreler (parameters) menüleri Şekil 3.8 ve 3.9'da verilmiştir. Konfigürasyon menüsünden asenkron makinanın rotor tipi ve sabit hız / sabit moment çalışma biçimi seçilir. Diğer taraftan asenkron makinanın; anma gerilimi (V_n), anma gücü (P_n) ve anma frekansı (f_n), kutup çifti sayısı (p), stator ve rotor sargı empedans parametreleri ($R_s, L_{ls}, R_r', L_{lr}'$) ile çekirdeğin manyetik indüktans değeri (L_m) parametreler menüsünden girilir. Bu menüden ayrıca motorun doyma eğrisi de girilebilir.



Şekil 3.7: Asenkron motorun dengesiz gerilimler altında dinamik analizinde kullanılacak Matlab-Simulink dosyası.



Şekil 3.8 : Simulink asenkron motor arayüzünün konfigürasyon menüsü [24].



Şekil 3.9: Simulink asenkron motor arayüzünün parametreler menüsü [24].

Şekil 3.8 ve 3.9’da yer alan karakteristik ve parametreler, bu tez kapsamında yapılan analizlerde kullanılan asenkron motor modeline aittir. Bu şekillerden analizlerde dikkate alınan asenkron motorun; stator sargılarının yıldız bağlı ve rotorunun sincap kafesli olduğu, ayrıca anma değerlerinin 1500W, 380V ve 50 Hz olduğu, kutup çifti sayısının ise 3 olduğu görülmektedir.

Modellenen asenkron motorun sargı empedans ve manyetik indüktans parametreleri, ekler kısmında verilen kilitli rotor ve boşa çalışma deney sonuçlarından hesaplanmıştır. Makinanın doyma eğrisi ise modelleme sırasında dikkate alınmamıştır.

Son olarak; analizler sırasında asenkron motorun sabit moment çalışma şeklinde çalıştırılması sebebiyle Şekil 3.8’de mekanik giriş (mechanical input) Torque seçilmiştir.

3.4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Tezin bu kısmında ileriki bölümlerde sunulacak analizlerin daha iyi anlaşılabilmesi için asenkron makinelerin yapısı, çalışma prensibi, dinamik modeline ait denklemler ve dinamik modelin Simulink analiz dosyası anlatıldıktan sonra analizlerde kullanılacak asenkron motor tanıtılmıştır.

4. DENGESİZ GERİLİMLERİN ASENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde gerilim dengesizliğinin asenkron motorun verim, güç faktörü, çıkış momentindeki salınımına etkisinin Matlab-Simulink'te yer alan dinamik model yardımıyla analiz edilmesi amaçlanmıştır. Dinamik model oluşturulurken ekler kısmında boşa çalışma ve kilitli rotor deney sonuçları verilen 1.5kW'lık asenkron motor dikkate alınmıştır. Çıkış momentindeki salınım; makinanın yol alması tamamlandıktan sonra ürettiği momentin en büyük ve en küçük değerleri arasındaki farkın ($\Delta M = M_{maks} - M_{min}$) üretilen momentin ortalama değerine (M) oranı biçiminde ölçülmüştür: $\Delta M/M$.

Yukarıda belirtilen hususlar doğrultusunda gerilim dengesizliğinin asenkron motor performansına etkilerini analiz ederken iki farklı parametrik analiz yapılmıştır. Çeşitli test gerilimleri altında yapılan bu iki farklı parametrik analiz durumu sırasıyla;

- CVUF indisinin mutlak değeri ($|CVUF| = VUF = V_-/V_+ \cdot 100$) ile asenkron motorun verimi (η), güç faktörü (gf), çıkış moment salınımı ($\Delta M/M$) ve sargı kayıpları (ΔP_{sa} , ΔP_{sb} ve ΔP_{sc}) arasındaki ilişkinin analizi,
- CVUF indisinin açısı ($Açı(CVUF) = \theta_v$) ile asenkron motorun yine aynı büyüklükleri arasındaki ilişkinin analizidir.

4.1. CVUF İndisinin Mutlak Değerinin Asenkron Motor Performansına Etkisini Gösteren Analiz Sonuçları

CVUF indisinin mutlak değerinin asenkron motorun verim, güç faktörü, çıkış moment salınımı ve sargı kayıplarına etkisinin analizi sırasında üç farklı etkin değer seviyesinde (

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} = 200, 220, 240V) \quad \text{ve} \quad \text{çeşitli CVUF mutlak değerlerine (}$$

$VUF = \%0 - \%5$) sahip test gerilimleri asenkron motora uygulanmıştır. Test gerilimlerinin faz-nötür etkin değerleri ve faz açıları ile bu test gerilimlerine ait pozitif ve negatif sıra bileşenleri ve açıları Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’de verilmiştir. Testler sırasında asenkron motorun ürettiği momentin ortalama değeri, anma moment değerinde (15.49 N.Mt.) sabit tutulmuştur.

Tablo 4.1: $V_e = 200V$ seviyesi için çeşitli VUF değerlerinde test gerilimleri.

VUF(%)	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{V+} (^\circ)$	$\theta_{V-} (^\circ)$	$V_a(V)$	$V_b(V)$	$V_c(V)$	$\theta_{Va} (^\circ)$	$\theta_{Vb} (^\circ)$	$\theta_{Vc} (^\circ)$
0	200	0	0	0	200	200	200	0	-120	120
0.5	199.99	1.00	0	0	200.99	199.50	199.50	0	-120.24	120.24
1	199.99	2.00	0	0	201.99	198.99	198.99	0	-120.49	120.49
1.5	199.97	3.00	0	0	202.97	198.49	198.49	0	-120.75	120.75
2	199.96	3.99	0	0	203.95	197.99	197.99	0	-121.00	121.00
2.5	199.93	4.99	0	0	204.93	197.48	197.48	0	-121.25	121.25
3	199.91	5.99	0	0	205.90	196.98	196.98	0	-121.51	121.51
3.5	199.87	6.99	0	0	206.87	196.47	196.47	0	-121.76	121.76
4	199.84	7.99	0	0	207.83	195.96	195.96	0	-122.02	122.02
4.5	199.79	8.99	0	0	208.78	195.45	195.45	0	-122.28	122.28
5	199.75	9.98	0	0	209.73	194.94	194.94	0	-122.54	122.54

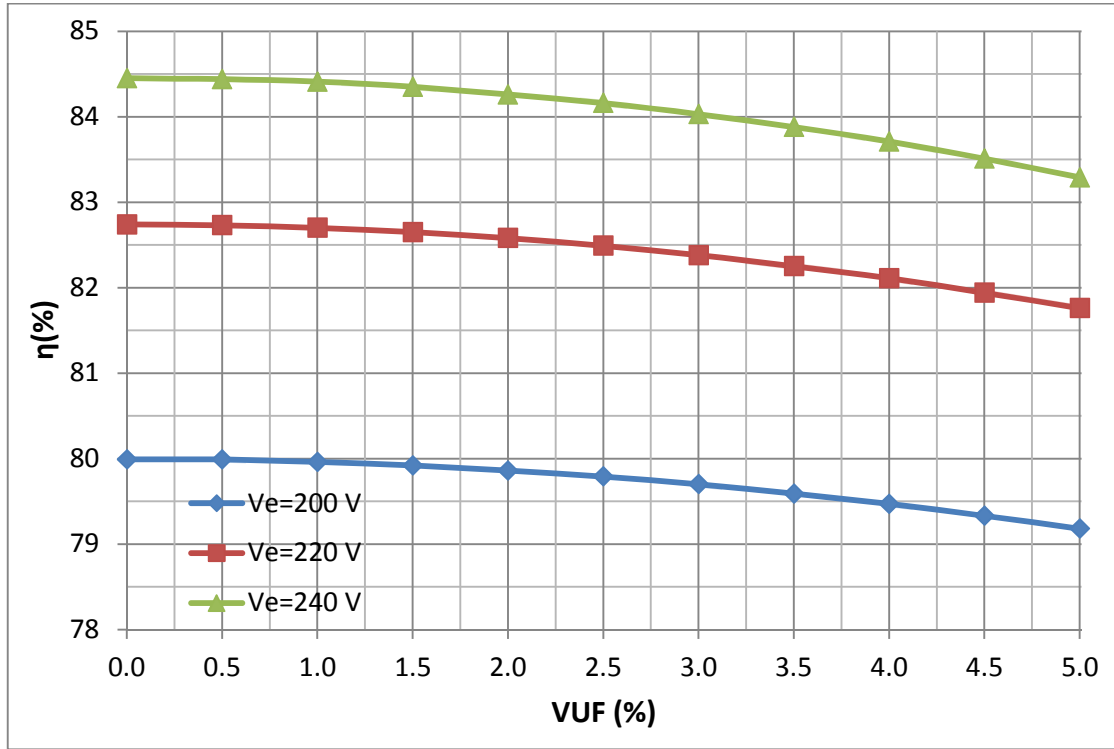
Tablo 4.2: $V_e = 220V$ seviyesi için çeşitli VUF değerlerinde test gerilimleri.

VUF(%)	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{V+} (^\circ)$	$\theta_{V-} (^\circ)$	$V_a(V)$	$V_b(V)$	$V_c(V)$	$\theta_{Va} (^\circ)$	$\theta_{Vb} (^\circ)$	$\theta_{Vc} (^\circ)$
0	220	0	0	0	220	220	220	0	-120	120
0.5	219.99	1.10	0	0	221.09	219.44	219.44	0	-120.24	120.24
1	219.98	2.20	0	0	222.18	218.89	218.89	0	-120.49	120.49
1.5	219.97	3.30	0	0	223.27	218.34	218.34	0	-120.75	120.75
2	219.95	4.39	0	0	224.35	217.79	217.79	0	-121.00	121.00
2.5	219.93	5.49	0	0	225.42	217.23	217.23	0	-121.25	121.25
3	219.90	6.59	0	0	226.49	216.67	216.67	0	-121.51	121.51
3.5	219.86	7.69	0	0	227.56	216.12	216.12	0	-121.76	121.76
4	219.82	8.79	0	0	228.61	215.56	215.56	0	-122.02	122.02
4.5	219.77	9.89	0	0	229.66	215.00	215.00	0	-122.28	122.28
5	219.72	10.98	0	0	230.71	214.44	214.44	0	-122.54	122.54

Tablo 4.3: $V_e=240V$ seviyesi için çeşitli VUF değerlerinde test gerilimleri.

VUF(%)	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{V+} (^\circ)$	$\theta_{V-} (^\circ)$	$V_a(V)$	$V_b(V)$	$V_c(V)$	$\theta_{V_a} (^\circ)$	$\theta_{V_b} (^\circ)$	$\theta_{V_c} (^\circ)$
0	240	0	0	0	240	240	240	0	-120	120
0.5	239.99	1.20	0	0	241.19	239.39	239.39	0	-120.24	120.24
1	239.98	2.40	0	0	242.38	238.79	238.79	0	-120.49	120.49
1.5	239.97	3.60	0	0	243.57	238.19	238.19	0	-120.75	120.75
2	239.95	4.79	0	0	244.75	237.58	237.58	0	-121.00	121.00
2.5	239.92	5.99	0	0	245.92	236.98	236.98	0	-121.25	121.25
3	239.89	7.19	0	0	247.08	236.37	236.37	0	-121.51	121.51
3.5	239.85	8.39	0	0	248.24	235.76	235.76	0	-121.76	121.76
4	239.80	9.59	0	0	249.40	235.15	235.15	0	-122.02	122.02
4.5	239.75	10.78	0	0	250.54	234.54	234.54	0	-122.28	122.28
5	239.70	11.98	0	0	251.68	233.93	233.93	0	-122.54	122.54

Bu tablolarda verilen test gerilimleri için elde edilen VUF- η eğrileri Şekil 4.1'de verilmiştir.

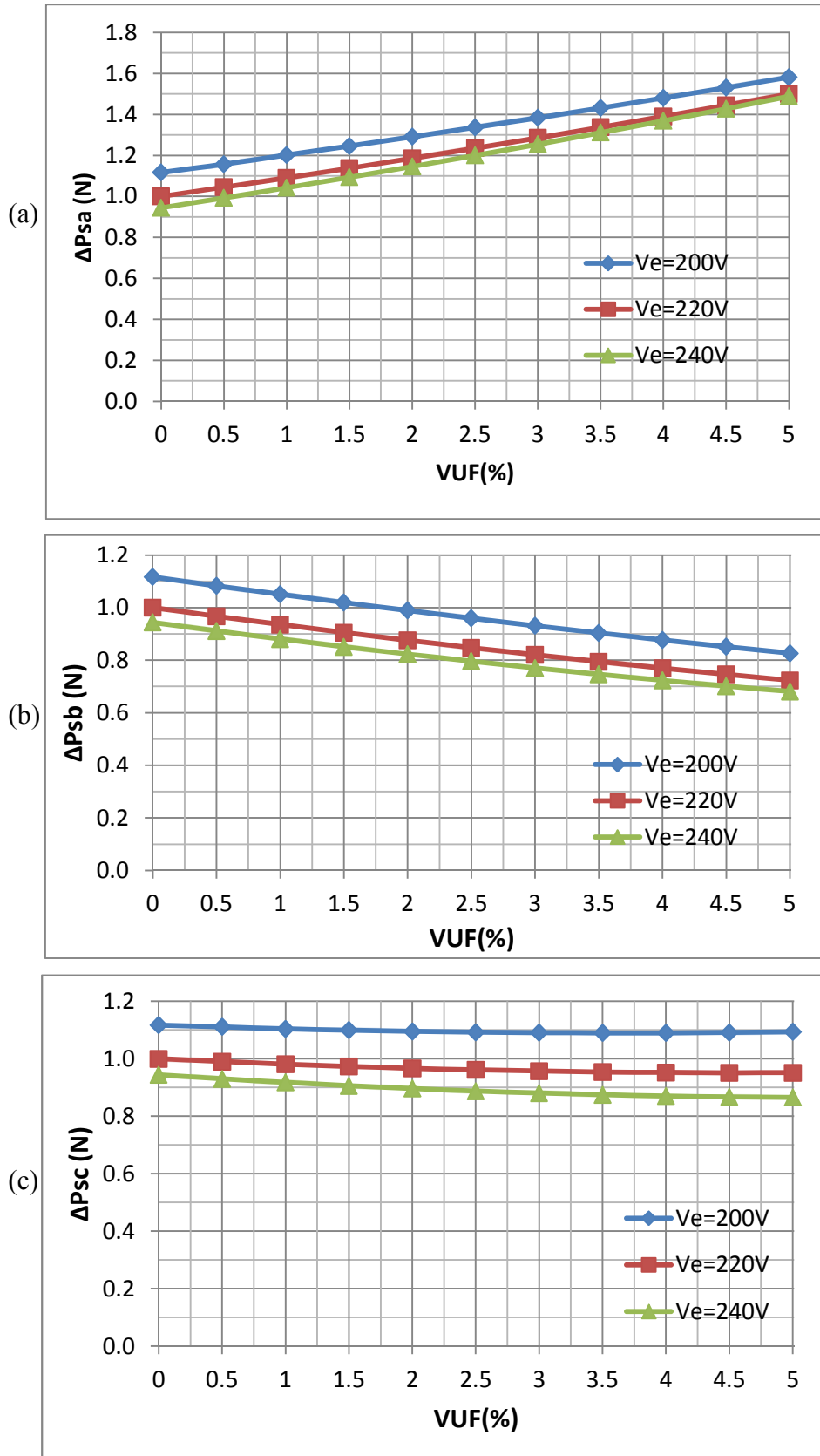
Şekil 4.1: Test gerilimleri için elde edilen VUF- η eğrileri.

Şekil 4.1'den üç farklı gerilim seviyesinde de VUF'un artışıyla asenkron motorun veriminin (η) azaldığı görülmektedir. Dengesizliğin asenkron motorun çekirdek kayıplarına etkisinin ihmal edildiği ve testler sırasında asenkron motorun ürettiği momentin ortalama değerinin sabit tutulduğu (diğer bir ifadeyle makinanın çıkış gücünün yaklaşık olarak sabit olduğu) dikkate alındığında, bu sonuç VUF'taki artışın asenkron motorun toplam sargı kaybını arttırdığını işaret eder. Bununla birlikte aynı VUF değerleri için $V_e=240V$ seviyesinde (aşırı gerilim durumunda) en yüksek verimin ölçüldüğü, $V_e=200V$ seviyesinde (alçak gerilim durumunda) ise en düşük verimin ölçüldüğü görülmektedir.

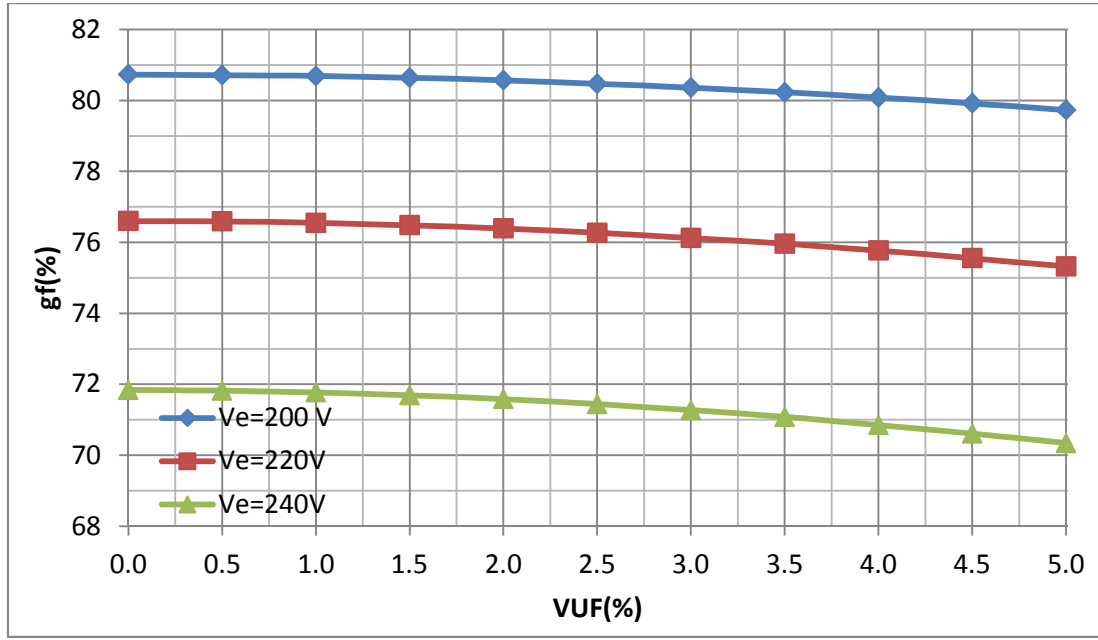
Test gerilimleri altında asenkron motorun sargı kayıplarının normalize değerleri ($\Delta P_{sa}(N), \Delta P_{sb}(N), \Delta P_{sc}(N)$) hesaplanarak, Şekil 4.2'de $VUF-\Delta P_{sa}$, $VUF-\Delta P_{sb}$, $VUF-\Delta P_{sc}$ eğrileri verilmiştir. Bu eğriler VUF'taki artışın; fazlardan birinin (a fazının) sargı kaybında artışa sebep olmasına rağmen diğer bir fazın (b fazı) sargı kaybında azalmaya sebep olduğunu üçüncü fazın (c fazı) sargı kaybına ise önemli derecede etki etmediğini göstermiştir.

VUF indisinin asenkron motor performansına etkilerini incelemek için son olarak $VUF-gf$ ve $VUF-\Delta M/M$ eğrileri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir.

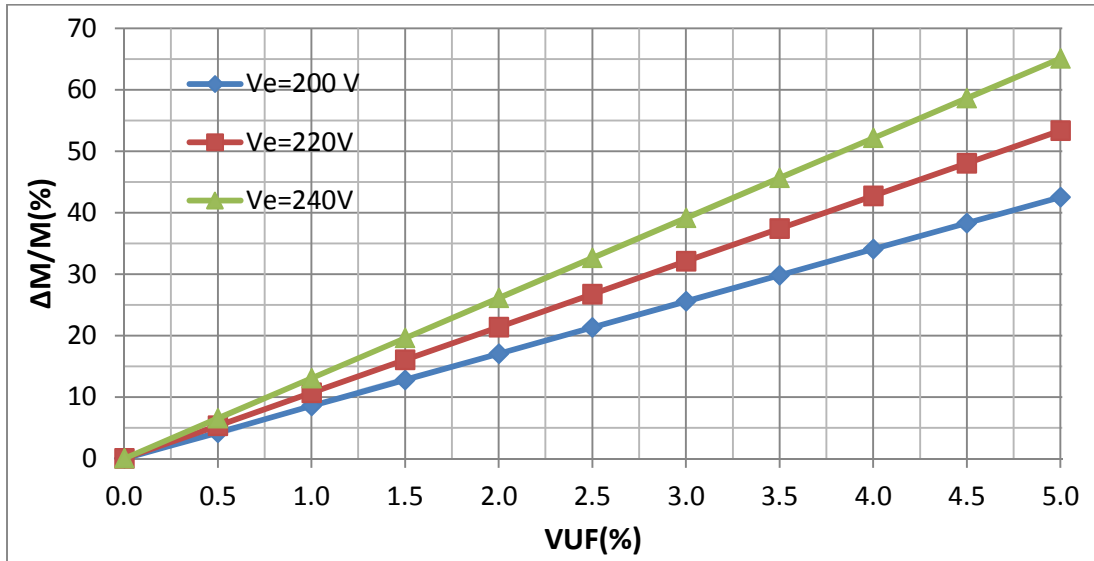
Şekil 4.3 asenkron motorun güç faktörünün ($gf(\%)$) VUF ve V_e ile ters orantılı olarak değiştiğini, Şekil 4.4 ise asenkron motorun çıkış momentindeki salınımın bağlı değerinin ($\Delta M/M(\%)$) VUF ve V_e ile doğru orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Ayrıca dengeli gerilim durumunda asenkron motorun çıkış momentinin salınmadığı Şekil 4.4'den görülmektedir.



Şekil 4.2: Test gerilimleri için (a) VUF- ΔP_{sa} , (b) VUF- ΔP_{sb} , (c) VUF- ΔP_{sc} eğrileri.



Şekil 4.3: Test gerilimleri için elde edilen VUF- gf eğrileri.



Şekil 4.4: Test gerilimleri için elde edilen VUF- $\Delta M/M$ eğrileri.

4.2. CVUF İndisinin Açısının Asenkron Motor Performansına Etkisini Gösteren Analiz Sonuçları

CVUF indisinin açısının (θ_v) asenkron motorun verim, güç faktörü, çıkış momenti salınımı ve faz sargı kayıplarına etkilerinin analizi için; $V_e=220V$ seviyesinde ve iki farklı VUF değerinde ($VUF = \%2.5$ ve $VUF = \%5$), çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri asenkron motora uygulanmıştır. CVUF açısı değiştirilirken pozitif sıra gerilimin açısı (θ_{v+}) 0° 'de sabit tutulup negatif sıra gerilimin açısı (θ_{v-}) $0^\circ - 330^\circ$ aralığında 30° adımlarla arttırılmıştır. Test gerilimlerinin faz-nötür etkin değerleri ve faz açıları ile bu test gerilimlerine ait pozitif ve negatif sıra bileşenleri ve açıları Tablo 4.4 ve Tablo 4.5' de verilmiştir. Bu test gerilimleri altında asenkron motorun ürettiği ortalama moment anma moment değerinde (15.49 N.Mt.) sabit tutulmuştur.

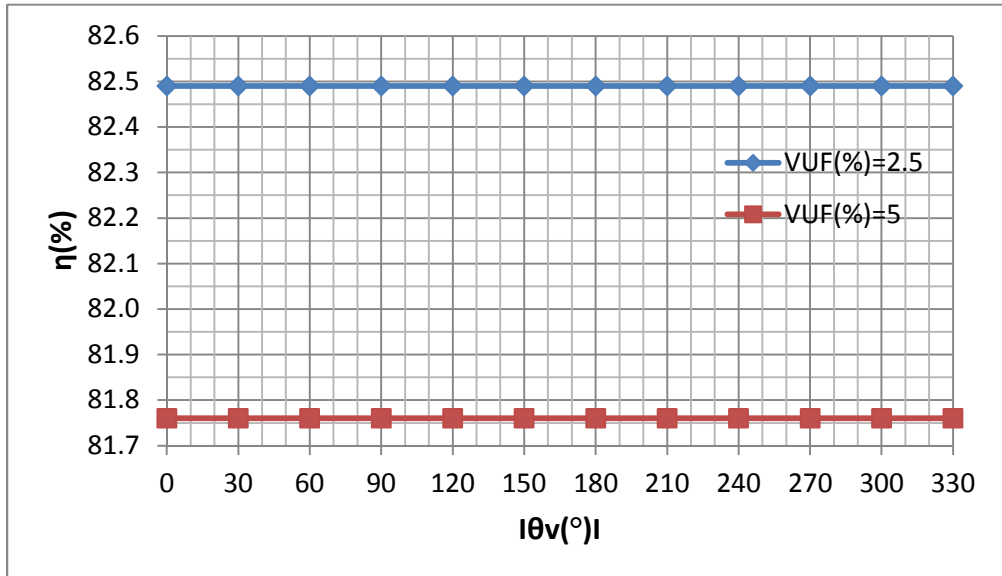
Tablo 4.4: $V_e=220V$ ve $VUF = \% 2.5$ için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.

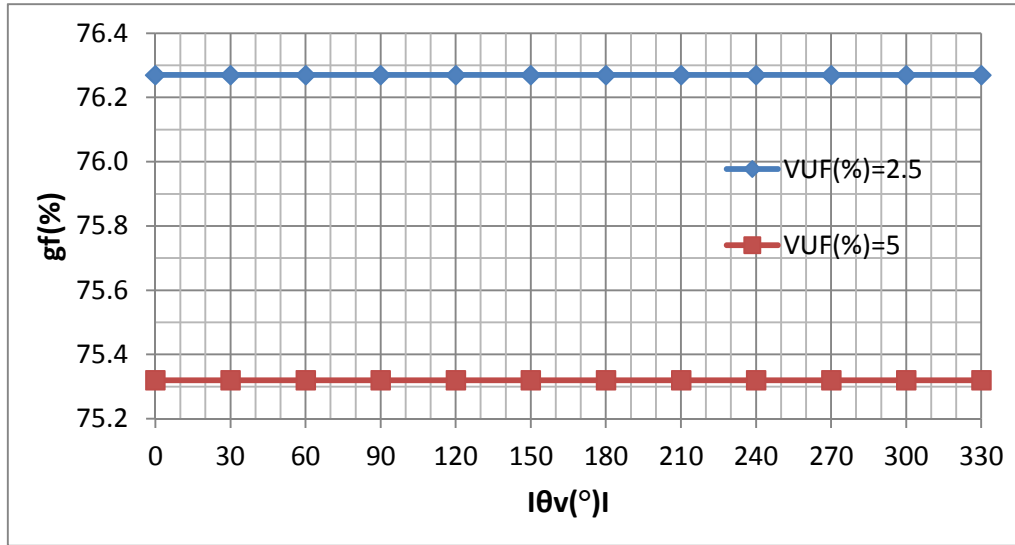
VUF	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{v+} (^\circ)$	$\theta_{v-} (^\circ)$	$V_a(V)$	$V_b(V)$	$V_c(V)$	$\theta_{va} (^\circ)$	$\theta_{vb} (^\circ)$	$\theta_{vc} (^\circ)$
2.5	219.93	5.49	0	0	225.42	217.23	217.23	0.00	-121.25	121.25
			0	-30	224.70	215.18	220.00	-0.70	-120.73	121.43
			0	-60	222.73	214.43	222.73	-1.22	-120.00	121.22
			0	-90	220.00	215.18	224.70	-1.43	-119.26	120.70
			0	-120	217.23	217.23	225.42	-1.25	-118.74	120.00
			0	-150	215.18	220.00	224.70	-0.73	-118.56	119.29
			0	-180	214.43	222.73	222.73	0.00	-118.77	118.77
			0	-210	215.18	224.70	220.00	0.73	-119.29	118.56
			0	-240	217.23	225.42	217.23	1.25	-120.00	118.74
			0	-270	220.00	224.70	215.18	1.43	-120.70	119.26
			0	-300	222.73	222.73	214.43	1.22	-121.22	120.00
			0	-330	224.70	220.00	215.18	0.70	-121.43	120.73

Tablo 4.5: $V_e=220V$ ve $VUF= \% 5$ için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.

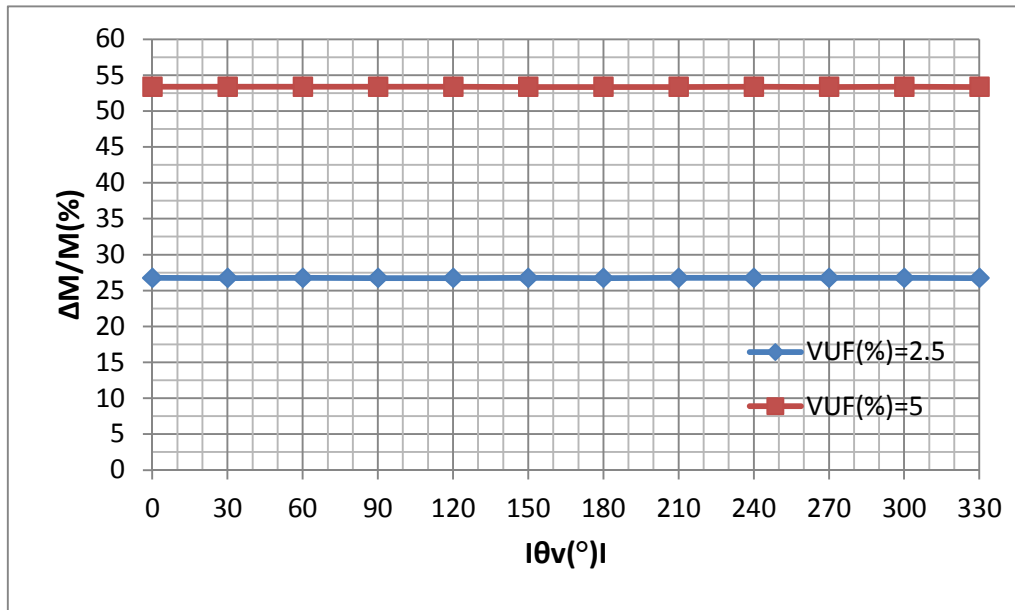
VUF	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{v+} (^\circ)$	$\theta_{v-} (^\circ)$	$V_a(V)$	$V_b(V)$	$V_c(V)$	$\theta_{va} (^\circ)$	$\theta_{vb} (^\circ)$	$\theta_{vc} (^\circ)$
5	219.72	10.98	0	0	230.71	214.44	214.44	0.00	-122.54	122.54
			0	-30	229.30	210.28	220.00	-1.37	-121.49	122.86
			0	-60	225.42	208.74	225.42	-2.41	-120.00	122.41
			0	-90	220.00	210.28	229.30	-2.86	-118.50	121.37
			0	-120	214.44	214.44	230.71	-2.54	-117.45	120.00
			0	-150	210.28	220.00	229.30	-1.49	-117.13	118.62
			0	-180	208.74	225.42	225.42	0.00	-117.58	117.58
			0	-210	210.28	229.30	220.00	1.49	-118.62	117.13
			0	-240	214.44	230.71	214.44	2.54	-120.00	117.45
			0	-270	220.00	229.30	210.28	2.86	-121.37	118.50
			0	-300	225.42	225.42	208.74	2.41	-122.41	120.00
			0	-330	229.30	220.00	210.28	1.37	-122.86	121.49

Bu tablolarda verilen test gerilimleri için elde edilen $|\theta_v|$ - η , $|\theta_v|$ - gf ve $|\theta_v|$ - $\Delta M/M$ eğrileri sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu üç şekilden CVUF’un açısından (θ_v) asenkron motorun verim($\eta(\%)$), güç faktörü (gf(%)) ve çıkış momenti salınımı bağlı değerinin ($\Delta M/M(\%)$) etkilenmediği görülmektedir.

Şekil 4.5: Test gerilimleri için elde edilen $|\theta_v|$ - η eğrileri.



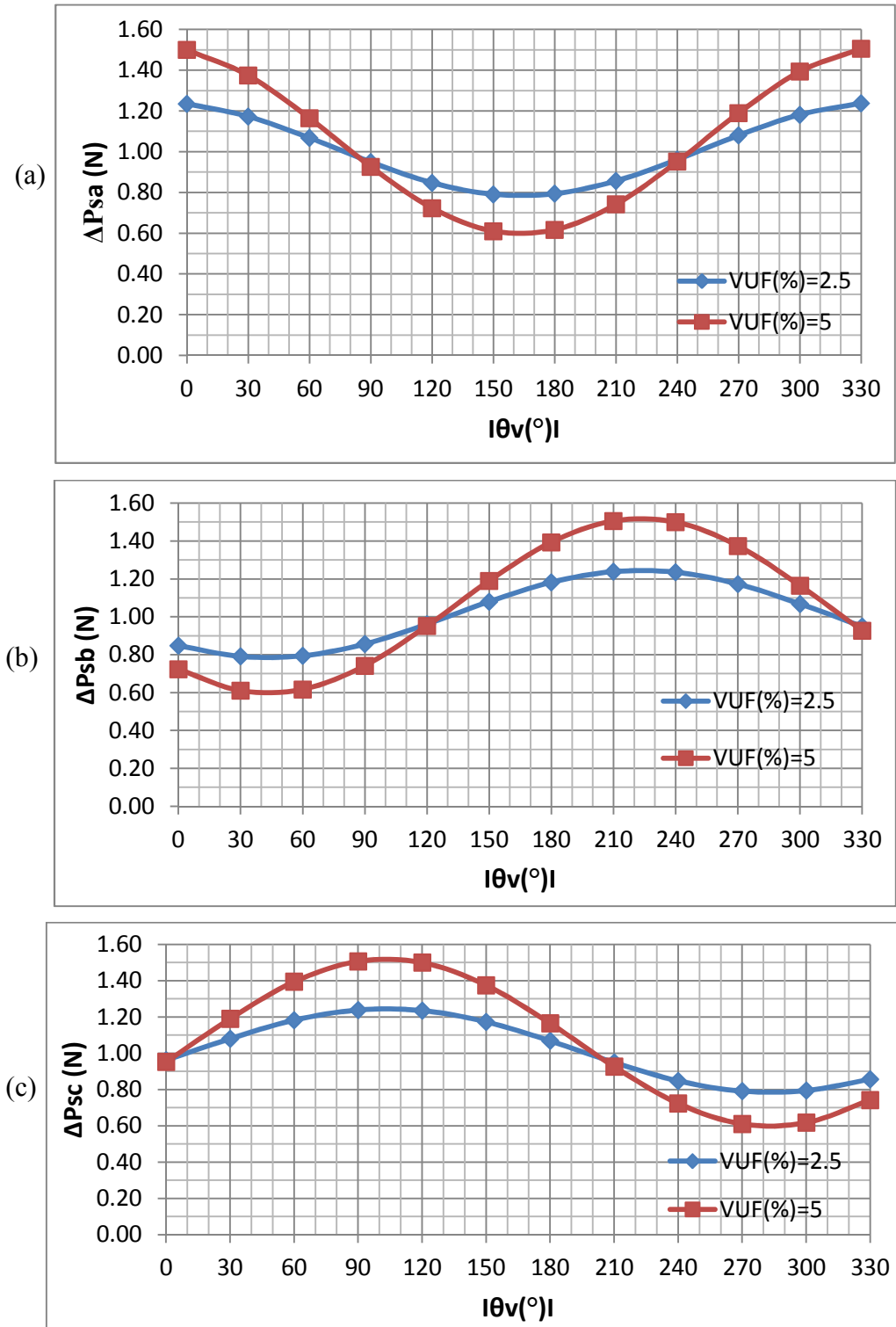
Şekil 4.6: Test gerilimleri için elde edilen $|\theta_v|$ - gf eğrileri.



Şekil 4.7: Test gerilimleri için elde edilen $|\theta_v|$ - $\Delta M/M$ eğrileri.

Testler sırasında makinanın ürettiği ortalama momentin (çıkış gücünün) sabit tutulduğu dikkate alınırsa verimin θ_v 'den etkilenmemesi durumu toplam sargı kayıplarının θ_v 'den bağımsız olduğunu işaret etmektedir.

Test gerilimleri altında asenkron motorun sargı kayıplarının normalize değerleri ($\Delta P_{sa}(N)$, $\Delta P_{sb}(N)$, $\Delta P_{sc}(N)$) hesaplanarak, Şekil 4.8'deki $|\theta_v|$ - ΔP_{sa} , $|\theta_v|$ - ΔP_{sb} ve $|\theta_v|$ - ΔP_{sc} eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 4.8: Test gerilimleri için (a) $|\theta_v|$ - ΔP_{sa} , (b) $|\theta_v|$ - ΔP_{sb} , (c) $|\theta_v|$ - ΔP_{sc} eğrileri.

Şekil 4.8’de sunulan eğriler CVUF indisinin açısındaki (θ_v) değişimin fazlara ait sargı kayıplarında salınımlar meydana getirdiğini göstermektedir. Ayrıca fazlara ait sargı kayıplarında gözlenen bu salınımlar VUF= % 5 durumunda VUF= % 2.5 durumuna göre daha büyüktür.

4.3. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu bölümde elde edilen analiz çıktıları aşağıda verilen biçimde özetlenebilir:

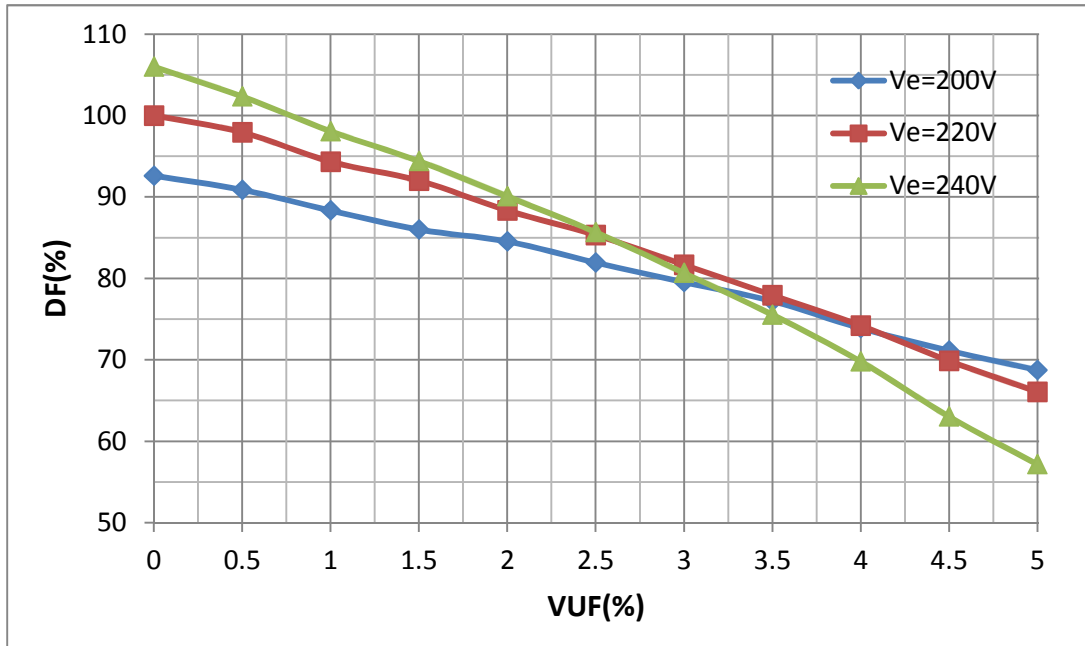
- CVUF indisinin mutlak değerinin bir başka deyişle VUF indisinin artışı; asenkron motorun çıkış momenti salınımlarında artışa, güç faktörü ve veriminde ise azalmaya sebep olur.
- VUF indisinin artışından her bir faza ait sargı kayıpları ayrı ayrı etkilenmiştir. Buna göre VUF’un artışıyla en az bir faza ait sargı kaybı artış gösterirken geriye kalan fazlara ait kayıplar azalabilir veya değişmeyebilir.
- Aynı VUF değeri için gerilim seviyesindeki artış güç faktörü ve çıkış momenti salınımları üzerinde olumsuz etki yaparken, verim ve toplam sargı kayıpları üzerinde olumlu etki yapmıştır.
- CVUF indisinin açısındaki değişimden asenkron motorun verimi, toplam sargı kaybı, güç faktörü ve çıkış momentindeki salınım etkilenmemiştir. Bununla birlikte CVUF indisinin açısındaki değişimin her bir faza ait sargı kaybının iki sınır değer arasında dalgalanmasına yol açtığı görülmüştür.

5. DERATASYONUN ASENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde öncelikle Tablo 4.1- 4.5’de verilen test gerilimleri için asenkron motor deratasyonunun gerçekleştirilmesi; böylece farklı gerilim seviyelerinde CVUF indisinin genliği ve açısı ile deratasyon faktörü arasındaki ilişkinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu bölümde, deratasyonun asenkron motor performansına etkisi analiz edilecektir.

5.1. Test Gerilimleri için Asenkron Motor Deratasyonu

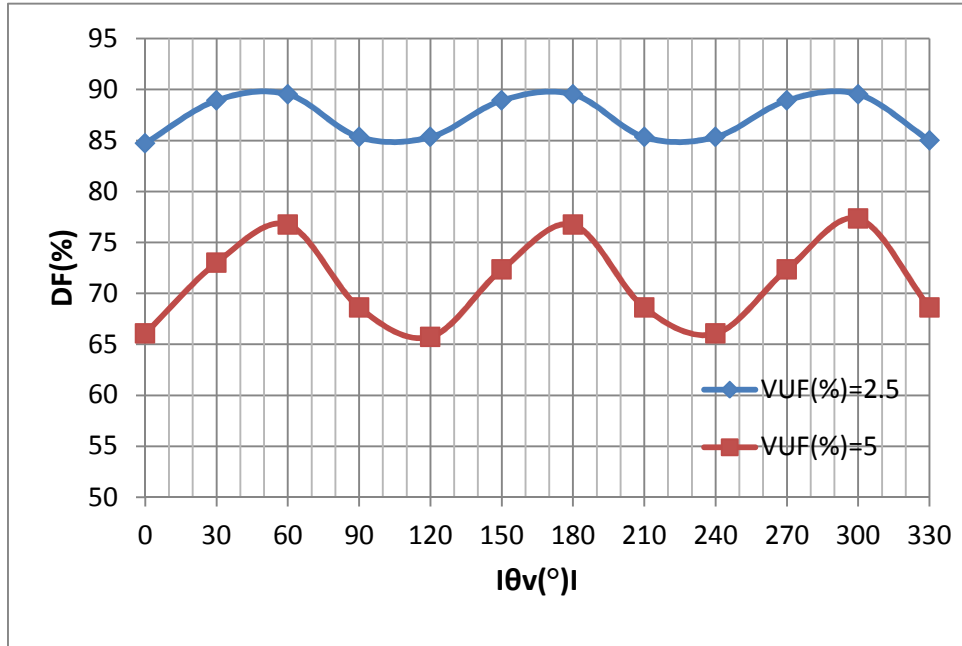
Bu kısımda öncelikle gerilim seviyesi ile dengesizliğin birlikte deratasyona etkisinin incelenmesi planlanmıştır ve üç farklı gerilim seviyesi ($V_e = 200V, 220V, 240V$) ile çeşitli VUF değerlerine (% 0-% 5) sahip test gerilimleri için deratasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre elde edilen VUF- DF eğrileri Şekil 5.1’de verilmiştir. Deratasyon için literatürde yaygın olarak bilinen AA metodu dikkate alınmıştır. Analizlerde kullanılan test gerilimleri bir önceki bölümde yer alan Tablo 4.1, Tablo 4.2 ile Tablo 4.3’de verilmiştir.



Şekil 5.1: Test gerilimleri için elde edilen VUF- DF eğrileri.

Şekil 5.1’den dengeli gerilim altında ($VUF = \% 0$) asenkron motorun; $V_e = 240V$ gerilim seviyesi için anma gücünden daha fazla yüklenebildiği ($DF = \% 106$), $V_e = 220V$ gerilim seviyesi için anma gücünde yüklenebildiği ($DF = \% 100$) ve $V_e = 200V$ gerilim seviyesi içinse anma gücünden daha az yüklenebildiği ($DF = \% 92.6$) görülmektedir ($DF_{200} < DF_{220} < DF_{240}$). Aynı şekil bütün gerilim seviyeleri için VUF değerinin artışıyla DF’nin azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte VUF- DF eğrilerinin eğimlerinin gerilim seviyesinin artışıyla daha büyüdüğü görülmektedir. Böylece $VUF = \% 3$ ’den sonraki gerilim dengesizlik seviyeleri için DF’ler arasındaki sıralama $DF_{240} < DF_{220} < DF_{200}$ biçiminde değişmiştir. Son olarak; test edilen en yüksek gerilim dengesizlik durumunda ($VUF = \% 5$) DF değerlerinin büyükten küçüğe sırasıyla $V_e = 200V$ için $\% 68.7$, $V_e = 220V$ için $\% 66.1$ ve $V_e = 240V$ için $\% 57.2$ olduğu görülmektedir.

Yukarıda sunulan analiz sonuçlarına ek olarak CVUF indisinin açısının (θ_v) deretasyona etkisinin incelenmesi amacıyla Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’de verilen test gerilimleri altında asenkron motorun deretasyon faktörü (DF) değerleri hesaplanmıştır. Böylece $V_e = 220V$ gerilim seviyesinde $VUF = \% 2.5$ ve $\% 5$ değerleri için elde edilen $|\theta_v|$ - DF eğrileri Şekil 5.2’de sunulmuştur.

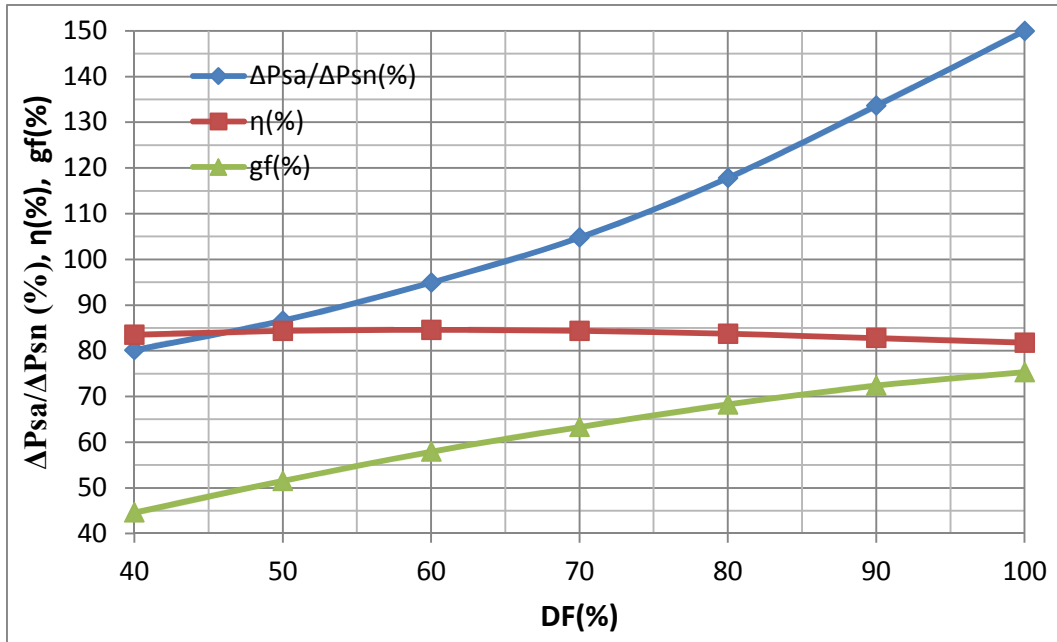


Şekil 5.2: Test gerilimleri için elde edilen $|\theta_v|$ - DF eğrileri.

Şekil 5.2, VUF= % 2.5 için θ_v 'nin değişimiyle DF'nin % 85 ile %90 arasında salındığını göstermektedir. Bununla birlikte DF eğrisi VUF= % 5 için % 65 ile % 78 arasında salınmaktadır. Her iki VUF seviyesi için DF eğrileri; $|\theta_v| = 60^\circ, 180^\circ, 300^\circ$ 'de azami değerlerine ve $|\theta_v| = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ 'de en küçük değerlerine ulaşmaktadır.

5.2. Deretasyonun Asenkron Motor Performansına Etkisini Gösteren Analiz Sonuçları

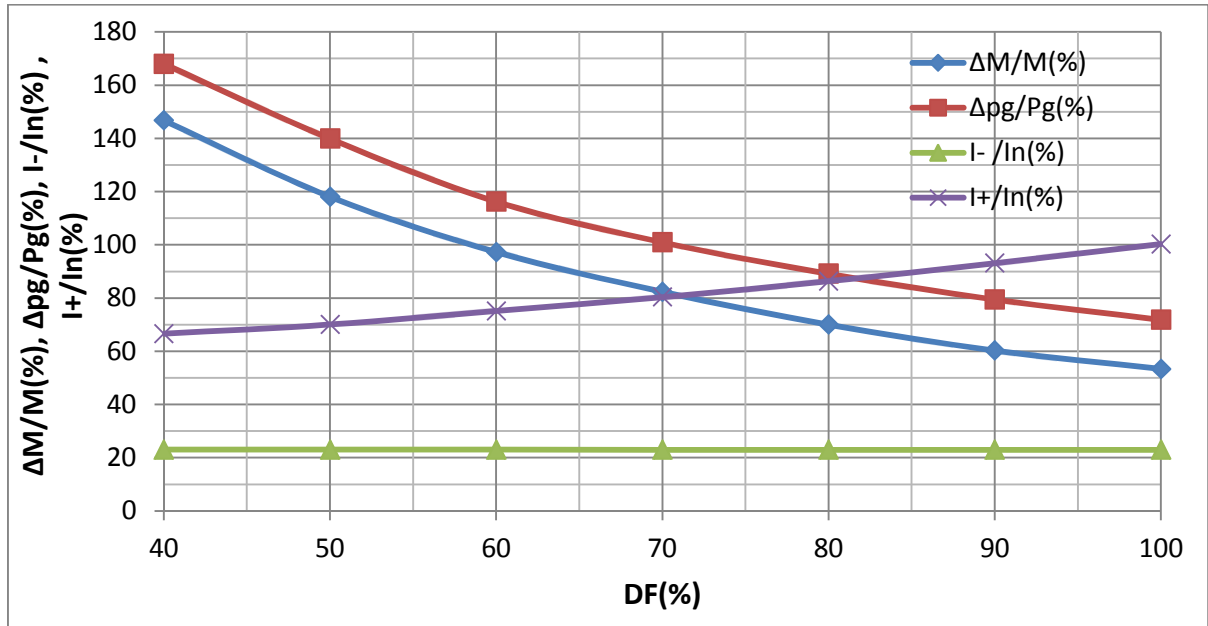
Deretasyonun asenkron motor performansına (verim, güç faktörü ve çıkış momenti salınımına) etkisini analiz etmek amacıyla; Tablo 4.2'nin son satırında yer alan $V_e=220V$ ve VUF= %5 değerlerine sahip dengesiz faz gerilimleri altında asenkron motorun deretasyon faktörü (DF) % 40 ile %100 arasında değiştirilmiştir. DF'nin bu değişim aralığı için en büyük etkin değerde akım çekilen fazın (a fazı) sargı kaybının, verimin, güç faktörünün değişimi Şekil 5.3'de verilmiştir. Şekilde a fazı sargı kaybı anma sargı kaybının yüzdesi cinsinden ($\Delta P_{sa}/\Delta P_{sn}(\%)$) çizdirilmiştir.



Şekil 5.3: DF=% 40- % 100 aralığı için $\Delta P_{sa}/\Delta P_{sn}(\%)$, $\eta(\%)$, gf(%)'nin değişimi.

Şekil 5.3'den deratasyon miktarı arttıkça veya DF azaldıkça $\Delta P_{sa}/\Delta P_{sn}(\%)$ eğrisinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca $\Delta P_{sa}/\Delta P_{sn}$ 'nin % 100 olduğu yani en büyük etkin değerde olan faz akımının anma akımına indirgendığı durum için DF değerinin % 66 civarında olduğu görülmektedir. Diğer taraftan verimin (η) değişim eğrisi; DF'nin % 60 civarında olduğu durumda azami değerine ulaşan bir parabol biçimindedir. Bu değişim dengeli şartlardaki asenkron motorun yüklenme miktarı- verim eğrisiyle aynı karakteristiğe sahiptir. Güç faktörü ($gf(\%)$) ise DF'nin azalmasıyla azalan bir değişime sahiptir.

Asenkron motorun performans kriterlerinden sonuncusu olan çıkış momenti salınımının ortalama momentin yüzdesi cinsinden değeri ($\Delta M/M(\%)$) Şekil 5.4'de sunulmuştur. Ayrıca $\Delta M/M(\%)$ değişim eğrisini daha iyi açıklayabilmek amacıyla; motorun giriş ani gücünün salınımının giriş gücünün yüzdesi cinsinden değerine ($\Delta P_g/P_g(\%)$) ait değişim eğrisi ile stator akımlarının negatif ve pozitif sıra bileşenlerinin anma akımının yüzdesi cinsinden değerlerine ($I_-/I_n(\%)$ ve $I_+/I_n(\%)$) ait değişim eğrileri aynı şekilde çizdirilmiştir.



Şekil 5.4: DF=%40-%100 aralığı için $\Delta M/M(\%)$, $\Delta P_g/P_g(\%)$, $I_-/I_n(\%)$ ve $I_+/I_n(\%)$ 'nin değişimi.

Şekil 5.4'den DF'nin azalmasıyla yani motor daha az yüklendikçe asenkron motorun çektiği akımın pozitif sıra bileşeninin ($I_+/I_n(\%)$) azaldığı buna karşılık negatif sıra

bileşeninin (I_-/I_n (%)) yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmektedir. Bu durum literatürde iyi bilinen ve ekler kısmında sunulmuş olan asenkron motor pozitif ve negatif sıra eşdeğer devreleri [15] yardımıyla izah edilebilir. Buna göre asenkron motor daha az yüklendikçe (kaymanın (s) küçülmesi) sonucu; pozitif eşdeğer devredeki R'_r/s direncisinin büyüyeceği (akımın pozitif sıra bileşeninin azalacağı), fakat $s \ll 2$ olması sebebiyle negatif sıra eşdeğer devredeki $R'_r/(2-s)$ direncinin dolayısıyla akımın negatif sıra bileşeninin yaklaşık olarak sabit kalacağı görülür. DF'nin azalmasıyla motorun çektiği akımın negatif ve pozitif sıra bileşenlerinde meydana gelen bu değişim neticesinde çıkış momenti ve şebekeden çekilen ani gücün salınımlarının bağıl değerlerinde ($\Delta M/M$ (%) ve $\Delta p_g/P_g$ (%)) artış meydana gelir.

5.3. Sonuçlar Ve Değerlendirme

Bu bölümde yapılan analizlerden;

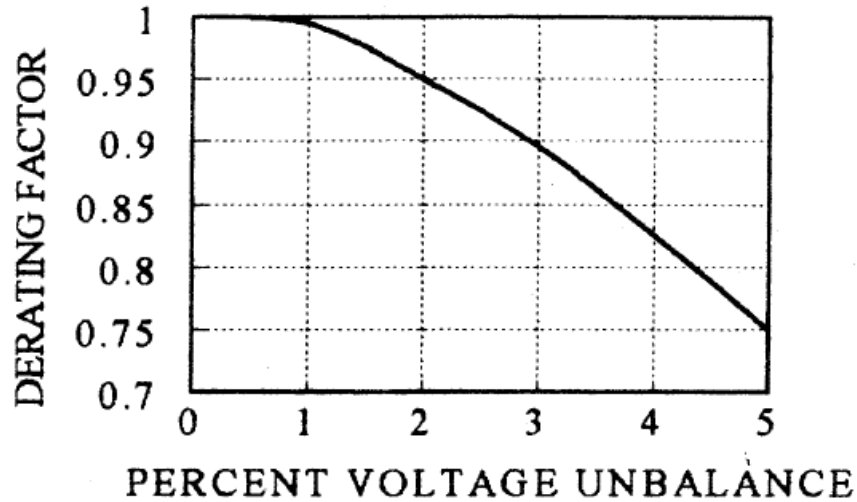
- Asenkron motorların dengesiz gerilimler altında deretasyonu için gerilim seviyesi (V_e) ile CVUF'un birlikte dikkate alınmasının gerektiği,
- VUF ile deretasyon faktörü (DF) arasında ters orantılı bir ilişki olduğu,
- Buna karşılık DF'nin θ_r 'nin değişimiyle iki sınır değer arasında salındığı dolayısıyla aynı VUF ve V_e değerleri için DF'nin bir en büyük bir de en küçük değerinin olduğu,
- Verimin DF'nin değişimiyle parabolik bir eğri çizdiği,
- Deretasyonla asenkron motorun güç faktörünün azaldığı ve çıkış momentindeki salınının büyüdüğü,

sonuçlarına varılmıştır.

6. FARKLI DERATASYON METOTLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi asenkron motorların dengesiz gerilimler altında deratasyonu için dört metot literatürde yer almaktadır:

- AA metodu: Dengesiz gerilimler altında ölçülen en büyük sator faz akımının motorun anma akım değerine indirgenmesi,
- OA metodu: Dengesiz gerilimler altında ölçülen stator faz akımlarının ortalamasının motorun anma akım değerine indirgenmesi,
- TK metodu: Dengesiz gerilimler altında ölçülen toplam kaybın motorun anma kayıp değerine indirgenmesi,
- NEMA metodu: NEMA standardının sunduğu; LVUR– DF (Derating Factor) eğrisine göre DF'nin belirlenmesi (Şekil 6.1). Bu noktada bir karışıklığa mahal vermemek için; LVUR indisinin literatürde Yüzde Gerilim Dengesizliği (Percent Voltage Unbalance) ismiyle de anıldığını belirtmek gerekir [14].



Şekil 6.1: NEMA standardının sunduğu; LVUR – DF eğrisi [14].

AA metodu literatürde en çok kabul görmüş deratasyon metodudur. Bununla birlikte daha pratik olması sebebiyle başta NEMA metodu olmak üzere diğer üç metot hala kullanılmaktadır.

Bu bölümde deratasyon bakımından en kötü dengesizlik şartlarında yukarıda sıralanmış olan dört farklı deratasyon metodunun sonuçlarının karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amaçlanmıştır.

6.1. Farklı Gerilim Seviyelerinde Deratasyon Bakımından En Kötü Dengesizlik Şartlarının Belirlenmesi

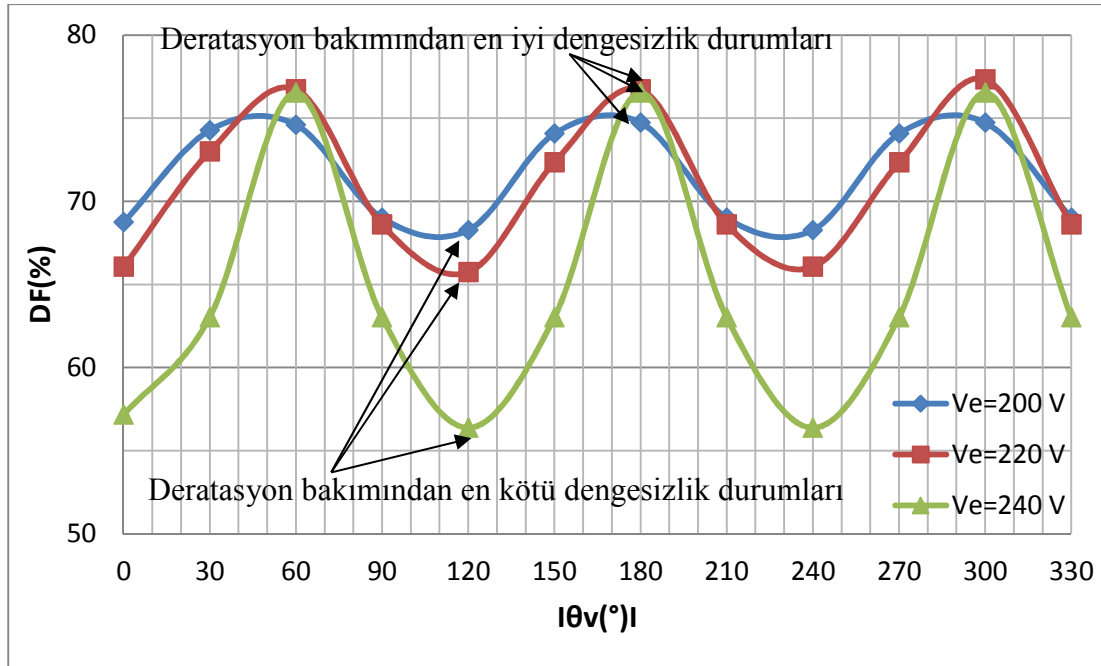
Deratasyon bakımından en kötü dengesiz gerilim durumlarını belirlerken izin verilen en büyük VUF değeri (% 5) dikkate alınmıştır. Bununla birlikte gerilim seviyesi (V_e) ve CVUF'un açısının (θ_v) deratasyona etkisinin görülmesi VUF= % 5 için deratasyon bakımından en kötü dengesiz gerilimlerin belirlenmesi için gereklidir. Daha önceki bölümlerde AA metodu dikkate alınarak, $V_e=220$ V seviyesinde VUF= % 5 için $|\theta_v|$ 'nin 0° - 330° aralığında deratasyon sonuçları elde edilmişti. Bu kısımda Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilen gerilim durumları için testler yapılarak; $V_e=200$ V ve $V_e=240$ V eşdeğer etkin değerlerinde, VUF= % 5 ve $|\theta_v|=0^\circ-330^\circ$ aralığı için DF değerleri hesap edilmiştir. Bu hesap edilen DF değerleri ve daha önce $V_e=220$ V için Şekil 5.2'de verilmiş sonuçlar mukayese için hep birlikte Şekil 6.2' de sunulmuştur.

Tablo 6.1: $V_e=200$ V ve VUF= % 5 için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.

VUF	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{v+} (^\circ)$	$\theta_{v-} (^\circ)$	$V_a(V)$	$V_b(V)$	$V_c(V)$	$\theta_{va} (^\circ)$	$\theta_{vb} (^\circ)$	$\theta_{vc} (^\circ)$
5	199.751	9.988	0	0	209.74	194.95	194.95	0.00	-122.54	122.54
			0	-30	208.46	191.17	200.00	-1.37	-121.49	122.86
			0	-60	204.93	189.76	204.93	-2.41	-120.00	122.41
			0	-90	200.00	191.17	208.46	-2.86	-118.50	121.37
			0	-120	194.95	194.95	209.74	-2.54	-117.45	120.00
			0	-150	191.17	200.00	208.46	-1.49	-117.13	118.62
			0	-180	189.76	204.93	204.93	0.00	-117.58	117.58
			0	-210	191.17	208.46	200.00	1.49	-118.62	117.13
			0	-240	194.95	209.74	194.95	2.54	-120.00	117.45
			0	-270	200.00	208.46	191.17	2.86	-121.37	118.50
			0	-300	204.93	204.93	189.76	2.41	-122.41	120.00
			0	-330	208.46	200.00	191.17	1.37	-122.86	121.49

Tablo 6.2: $V_e=240V$ ve $VUF= \% 5$ için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.

VUF	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{V+} (^\circ)$	$\theta_{V-} (^\circ)$	$V_a(V)$	$V_b(V)$	$V_c(V)$	$\theta_{V_a} (^\circ)$	$\theta_{V_b} (^\circ)$	$\theta_{V_c} (^\circ)$
5	239.701	11.985	0	0	251.69	233.94	233.94	0.00	-122.54	122.54
			0	-30	250.15	229.40	240.00	-1.37	-121.4	122.86
			0	-60	245.91	227.72	245.91	-2.41	-120.00	122.41
			0	-90	240.00	229.40	250.15	-2.86	-118.50	121.37
			0	-120	233.94	233.94	251.69	-2.54	-117.45	120.00
			0	-150	229.40	240.00	250.15	-1.49	-117.13	118.62
			0	-180	227.72	245.91	245.91	0.00	-117.58	117.58
			0	-210	229.40	250.15	240.00	1.49	-118.62	117.13
			0	-240	233.94	251.69	233.94	2.54	-120.00	117.45
			0	-270	240.00	250.15	229.40	2.86	-121.37	118.50
			0	-300	245.91	245.91	227.72	2.41	-122.41	120.00
			0	-330	250.15	240.00	229.40	1.37	-122.86	121.49

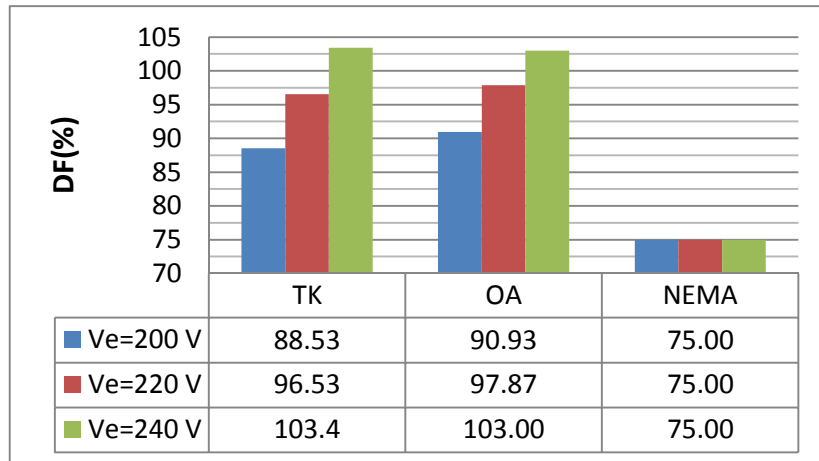
Şekil 6.2: Test gerilimleri için elde edilen $|\theta_v|$ - DF eğrileri.

Şekil 6.2 den $VUF=\% 5$ ve üç farklı gerilim seviyesi ($V_e=200\text{ V}$, 220 V , 240 V) için DF'nin en yüksek olduğu (deratasyon bakımından en iyi olan) durumların $|\theta_v|$ 'nin 60° - 180° - 300° değerlerinde gerçekleştiği, DF'nin en düşük olduğu (deratasyon bakımından en kötü olan) durumların ise $|\theta_v|$ 'nin 0° - 120° - 240° değerlerinde gerçekleştiği görülmektedir. Bununla birlikte, $VUF=\% 5$ için üç farklı gerilim seviyesinde gözlenen deratasyon bakımından en iyi

olan durumlarda; deratasyon faktörleri $DF_{200V}=\% 74.73$, $DF_{220V}=\%76.7$ ve $DF_{240V}=\% 76.53$ 'dür. Yine aynı VUF ve V_e şartlarında gözlenen deratasyon bakımından en kötü olan durumlarda; deratasyon faktörleri $DF_{200V}=\% 68.73$, $DF_{220V}=\%65.7$ ve $DF_{240V}=\% 57.2$ 'dir.

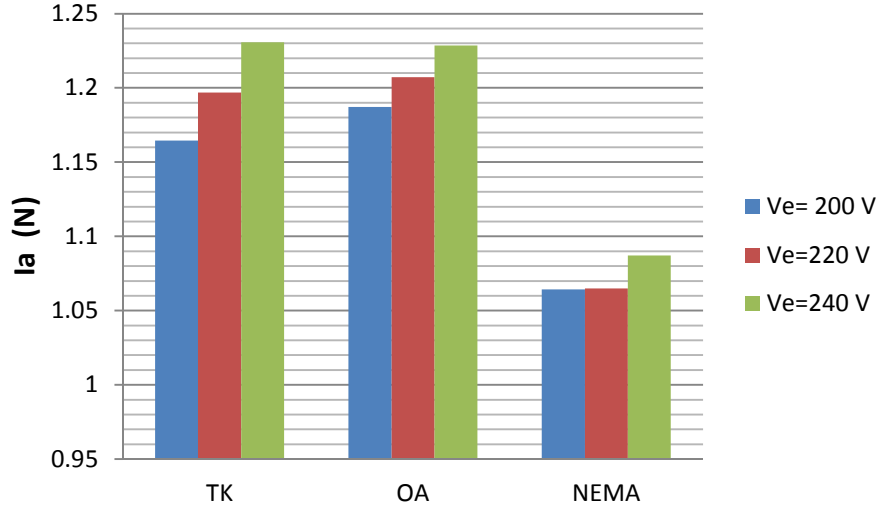
6.2. Belirlenen En Kötü Dengesizlik Şartları için Farklı Metotlara Göre Deratasyon Sonuçları

Bir önceki kısımda üç farklı gerilim seviyesi için AA metoduna göre belirlenen deratasyon bakımından en kötü dengesizlik şartlarında TK, OA ve NEMA metotlarıyla hesaplanan DF değerleri Şekil 6.3'de verilmiştir. Bu şekilden deratasyon bakımından en kötü dengesizlik şartları için TK metoduna göre $DF_{200V}=\% 88.53$, $DF_{220V}=\% 96.53$ ve $DF_{240V}=\% 103.4$, OA metoduna göre $DF_{200V}=\% 90.93$, $DF_{220V}=\% 97.87$ ve $DF_{240V}=\% 103$, NEMA metoduna göre $DF_{200V}=DF_{220V}=DF_{240V}=\% 75$ değerlerinin hesap edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar dikkate alınan dengesizlik şartları için TK ve OA metotlarına göre yapılan deratasyonlarla AA metoduna göre yapılan deratasyon arasında çok büyük farklar olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan NEMA metoduna göre $VUF=\% 5$ için hesap edilen DF değeri, AA metodunun üç farklı gerilim seviyesinde aynı VUF değeri için deratasyon bakımından en iyi durumda verdiği DF değerleri civarındadır.



Şekil 6.3: Deratasyon bakımından en kötü dengesizlik şartlarında TK, OA ve NEMA metotlarına göre hesaplanan DF değerleri.

Deratasyon bakımından en kötü dengesizlik şartlarında TK, OA ve NEMA metotlarına göre yapılan deratasyon sonrasında çekilen en büyük stator faz akımı değerleri normalize edilerek Şekil 6.4’de sunulmuştur. Normalizasyonda motorun anma akım değeri dikkate alınmıştır.



Şekil 6.4: Deratasyon bakımından en kötü dengesizlik şartlarında TK, OA ve NEMA metotlarına göre yapılan deratasyonlar sonrasında çekilen en büyük stator faz akımı değerleri.

Şekil 6.4’den analizde dikkate alınan en kötü dengesizlik şartları için TK, OA ve NEMA metotlarına göre yapılan deratasyonlardan sonra ölçülen en büyük stator faz akımı değerlerinin anma akım değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum ilgili faz sargılarında aşırı ısınma meydana getirecek dolayısıyla motorun beklenen ömründe kısaltmalara sebep olacaktır.

6.3. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu bölümde yapılan analizlerden;

- AA metodunun diğer metotlara göre daha emniyetli olduğu,
- TK ve OA metotlarına göre hesap edilen DF değerleri ile AA metoduna göre hesaplanan DF değerleri arasında çok büyük farklar olduğu,
- NEMA metodunun hassas bir deratasyon için yeterli olmadığı,

görülmüştür.

7. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Gerilim dengesizliği faz gerilimlerinin etkin değerlerinin birbirine eşit olmaması veya faz gerilimlerinin açıları arasında 120 şer derece faz farkı olmaması sonucu meydana gelen bir güç kalitesi sorunudur.

Bu tez çalışmasında yapılan literatür çalışmaları neticesinde ilk olarak; gerilim dengesizliğinin endüstride yaygın olarak kullanılan asenkron motorların performansına olumsuz etkilerinin olduğu görülmüştür.

Bu noktada literatürde yapılan çalışmaların asenkron motorların dengesiz gerilimler altında aşırı ısınmasını engellemek amacıyla, gerilim dengesizliğinin miktarına bağlı olarak motor çıkış gücünün ayarlanması (deratasyon) yoluna gittiği, ayrıca bu çalışmalarda genellikle dört farklı metoda göre deratasyon işleminin yapıldığı belirlenmiştir:

- AA metodu: Dengesiz gerilimler altında ölçülen en büyük sator faz akımının motorun anma akım değerine indirgenmesi,
- OA metodu: Dengesiz gerilimler altında ölçülen stator faz akımlarının ortalamasının motorun anma akım değerine indirgenmesi,
- TK metodu: Dengesiz gerilimler altında ölçülen toplam kaybın motorun anma kayıp değerine indirgenmesi,
- NEMA metodu: NEMA standardının sunduğu; LVUR– DF (Derating Factor) eğrisine göre DF'nin belirlenmesi.

Diğer taraftan bu deratasyon işlemi neticesinde gerilim dengesizlik miktarının ölçülmesinde NEMA, IEC ve IEEE standartlarında tanımlı gerilim dengesizlik indisleri (LVUR, VUF, PVUR) dikkate alınmıştır. Fakat literatürdeki bazı çalışmalar asenkron motorlarda farklı değerlerde kayıplara veya aşırı ısınmalara sebep olan çeşitli dengesiz gerilimler için; yukarıda bahsedilen gerilim dengesizlik indislerinin aynı değerde olabileceğini göstermiştir. Bu durum NEMA, IEC ve IEEE standartlarında tanımlı indislerin gerilim dengesizliğine bağlı asenkron motor kayıplarındaki artışın tahmini dolayısıyla asenkron motorların dengesiz besleme gerilimlerinde deratasyonu için tek başına bir gösterge

olamayacağını işaret etmiştir. Böylece gerilim dengesizliği miktarının ölçülmesinde kullanılmak üzere yeni arayışlara gidilmiş ve kompleks gerilim dengesizlik indisi (CVUF) tanımlanmıştır. Fakat farklı gerilim seviyelerinde aynı CVUF değerine sahip bir çok gerilim dengesizlik durumu olması sebebiyle; gerilim dengesizliğinin ölçülmesi için ortalama gerilim ve pozitif sıra gerilimi gibi büyüklüklerle birlikte CVUF indisi dikkate alınmıştır.

Bu tez çalışmasında CVUF ile IEEE std. 1459-2010'da tanımlı olan eşdeğer gerilim etkin değeri (V_e) gerilim dengesizlik durumlarının belirlenmesinde dikkate alınmıştır. V_e 'nin pozitif ve negatif sıra bileşenler cinsinden ifadesi dikkate alınarak CVUF ve V_e ikilisinin her hangi bir durumunun tek bir gerilim dengesizlik durumunu işaret ettiği (teklik özelliğinin olduğu) niteliksel ve niceliksel analizlerle gösterilmiştir. Ayrıca, bu iki büyüklüğün çeşitli kombinasyonları için türetilen dengesiz gerilimlerin asenkron motorun performansına etkileri; asenkron makinenin dinamik modeli kullanılarak incelenmiştir. Böylece aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır;

- CVUF indisinin mutlak değerinin bir başka deyişle VUF indisinin artışı; asenkron motorun toplam sargı kaybı ve çıkış momentı salınımında artışa, güç faktörü ve veriminde ise azalmaya sebep olur.
- VUF indisinin artışından her bir faza ait sargı kayıpları ayrı ayrı etkilenmiştir. Buna göre VUF'un artışıyla en az bir faza ait sargı kaybı artış gösterirken geriye kalan fazlara ait kayıplar azalabilir veya değişmeyebilir.
- Aynı VUF değeri için gerilim seviyesindeki artış güç faktörü ve çıkış momentı salınımı üzerinde olumsuz etki yaparken, verim ve toplam sargı kayıpları üzerinde olumlu etki yapmıştır.
- CVUF indisinin açısındaki değişimden asenkron motorun verimi, toplam sargı kaybı, güç faktörü ve çıkış momentindeki salınım etkilenmemiştir. Bununla birlikte her bir faza ait sargı kayıplarının CVUF indisinin açısındaki değişimden ayrı ayrı etkilendiği böylece bazı fazlara ait sargı kayıplarının izin verilen azami sargı kaybının (anma akımındaki sargı kaybının) üzerine çıktığı görülmüştür.

- Bir önceki sonuçtan yola çıkılarak toplam sargı kaybının yerine fazlara ait sargı kayıplarının deretasyonda dikkate alınmasının daha doğru olacağı ifade edilebilir.

Ayrıca bir önceki analizde dikkate alınan gerilim dengesizliği durumları altında aynı asenkron motor için AA metoduna göre deratasyon eğrileri veya deratasyon faktörü (DF) değerleri elde edilmiş, deratasyon ile asenkron motor performansının değişimi analiz edilmiştir. Bu analizler neticesinde;

- Asenkron motorların dengesiz gerilimler altında deretasyonu için gerilim seviyesi (V_e) ile CVUF'un genliği (VUF) ve açısı (θ_v)'nin birlikte dikkate alınmasının gerektiği,
- VUF ile deretasyon faktörü (DF) arasında ters orantılı bir ilişki olduğu,
- Buna karşılık DF'nin θ_v 'nin değişimiyle iki sınır değer arasında salındığı dolayısıyla aynı VUF ve V_e değerleri için DF'nin bir en büyük bir de en küçük değerinin olduğu,
- Verimin DF'nin değişimiyle parabolik bir eğri çizdiği,
- Deretasyonla asenkron motorun güç faktörünün azaldığı ve çıkış momentindeki salınımın büyüdüğü,

görülmüştür.

Son olarak; deratasyon bakımından en kötü dengesiz gerilim şartlarında aynı asenkron motor için AA, OA, TK ve NEMA metotlarına göre elde edilen deratasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalı analizler;

- AA metodunun diğer metotlara göre daha emniyetli olduğunu,
- TK ve OA metotlarına göre yapılan deratasyonlarla AA metoduna göre yapılan deratasyon arasında çok büyük farklar olduğunu,
- NEMA metodunun hassas bir deratasyon için yeterli olmadığını,

göstermiştir.

Gelecek çalışmalarda, CVUF ve V_e cinsinden DF eğrilerinin pratik olarak elde edilmesi için deney tasarım yöntemleri temelli algoritmalar oluşturulması planlanmaktadır.

8. KAYNAKÇA

- [1] E. F. Fuchs, M. A. S. Masoum, “Power Quality in Power Systems and Electrical Machines”, Elsevier Academic Press, 2008.
- [2] C. A. Reineri, J. C. Gómez, E. B. Balaguer and M. Morcos, “Experimental study of induction motor performance with unbalanced supply,” *Electric Power Comp. and Syst.*, Vol. 34, No. 7, pp. 817-829, 2006.
- [3] A. Jalilean, R. Roshanfekr, “Analysis of three-phase induction motor performance under different voltage unbalance conditions using simulation and experimental results,” *Electric Power Comp. and Syst.*, Vol. 37, No. 3, pp. 300-319, 2009.
- [4] Ching-Yin Lee, “Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three phase induction motor,” *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 14, No. 2, pp. 202–208, 1999.
- [5] A. Jalilian, S. Perera, V. Gosbell, “Three-phase induction motor performance under unbalanced voltage conditions,” in *Proc. 16th Int. Power System Conf.*, Vol. 5, pp. 1–8, Tehran, Iran, 2001.
- [6] P. Pillay, M. Manyage, “Loss of life in induction machine operating with unbalanced supplies,” *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 21, No. 4, pp. 813–822, 2006.
- [7] P. G. Kini, R. C. Bansal, and R. S. Aithal, “Performance analysis of centrifugal pumps subjected to voltage variation and unbalance,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 2, pp. 562–569, 2008.
- [8] P. Donolo, G. Bossio, C. De Angelo, “Analysis of voltage unbalance effects on induction motors with open and closed slots”, *Energy Conv. and Manag.*, Vol. 52, No. 5, p.p. 2024-2030, 2011.
- [9] NEMA Standard MG1-1998, “Motor and Generators, Part 14.36: Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Polyphase InductionMotors”, (Revision 3, 2002), 2002.
- [10] IEC Standard 60034-26, “Rotating Electrical Machines, Part 26: Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Three-Phase Induction Motors”, 2002.

- [11]IEEE Standard 112, “IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”, 1991.
- [12]Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliği”, <http://www.epdk.gov.tr>, Erişim Tarihi: 15.02.2011.
- [13]F. Işık, “Gerilim Dengesizliklerinin Asenkron Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi”, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [14]Ching-Yin Lee, Bin-Kwie Chen, Wei-Jen Lee, Yen-Feng Hsu, “Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition”, *Electric Power Syst. Res.*, Vol. 47, No. 3, pp. 153-163, 1998.
- [15]Y. J. Wang, “Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 16, No. 3, pp. 270–275, 2001.
- [16]J. Faiz, H. Ebrahimpour, “Precise derating of three phase induction motors with unbalanced voltages”, *Energy Conv. and Manag.*, Vol. 48, No. 9, p.p. 2579-2586, 2007.
- [17]M. Anwari, A. Hiendro, “New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under- and overvoltage unbalance”, *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 25, No. 3, pp. 619-625, 2010.
- [18]J. M. Apsley, “Derating of multiphase induction machines due to supply imbalance,” *IEEE Trans. on Industry Appl.*, Vol.46, No.2, pp.798-805, 2010.
- [19]D. Mirabbasi, G. Seifossadat, M. Heidari, “Effect of unbalanced voltage on operation of induction motors and its detection,” in *Proc. ELECO 2009 Conf.*, pp.I-189-I-192, Bursa, Turkey, 2009.
- [20]P. Gnacinski, “Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over or undervoltages”, *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 23, No. 2, pp. 363–371, 2008.

- [21]P. Gnacinski, “Derating of an induction machine under voltage unbalance combined with over or undervoltages”, *Energy Conv. and Manag.*, Vol. 50, No. 4, pp. 1101-1107, 2009.
- [22]X. M. López- Fernández, A. P. Coimbra, J. A. D. Pinto, C. L. Antunes, M. P. Donsión, “Thermal analysis of an induction motor fed by unbalanced power supply using a combined Finite Element – Symmetrical Components formulation,” in *Proc. POWERCON’98*, Vol. 1, pp. 620-624, Beijing, China, 1998.
- [23]J. A. D. Pinto, A. P. Coimbra, C. L. Antunes, X. M. L. Fernandez, M. P. Donsion, “Influence of the neutral in the thermal performance of a three-phase induction motor under unbalanced power supply using the finite element approach,” *COMPEL*, Vol. 17, No. 1–3, pp. 378–381, 1998.
- [24]Matlab Programı, “User Manuel”, www.mathworks.com, Erişim Tarihi: 15.10.2012.
- [25]P. Pillary, M. Manyage, “Definitions of voltage unbalance”, *IEEE Power Eng. Rev.*, Vol. 21, No. 5, pp.50 -51, 2001.
- [26]IEEE Std. 1459 – 2010, “IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions”, 2010.
- [27]M. K. Sarıoğlu, M. Gökaşan, S. Boğosyan, “Asenkron makineler ve kontrolü”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [28]SIEMENS, “Siemens Motor Kataloğu”,www.siemens.com, Erişim Tarihi: 01.03.2011.
- [29]MEGEP Metal Teknolojileri, “Asenkron Motorlar”, www.megep.meb.gov.tr, Erişim Tarihi: 14.02.2013.
- [30]MEGEP Elektrik-Elektronik Teknolojisi, “AC ve DC Makineler”, www.megep.meb.gov.tr, Erişim Tarihi: 14.02.2013.

ÖZGEÇMİŞ

Merve ŞEN, 19.10.1985 yılında Amasya’da doğdu. 2004 yılında Amasya Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2006 yılında girmeye hak kazandığı Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden 2010 yılında mezun oldu. 2010 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Yüksek Lisans öğrenimi süresince TÜBİTAK Proje Araştırmacısı olarak çalıştı. Eylül 2012’den itibaren Amasya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

EK-1

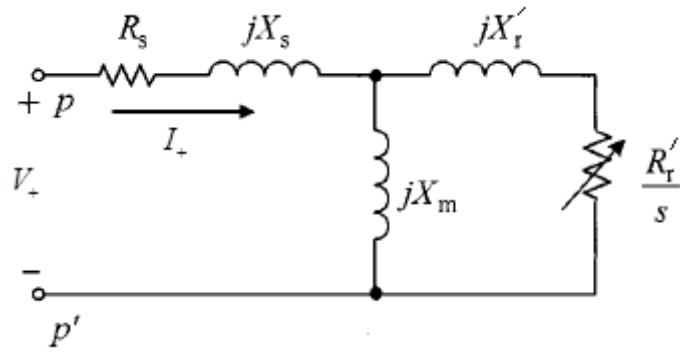
Bu tezde modellenen 3 fazlı, sincap kafesli asenkron motora ait boşta çalışma ve kilitli rotor deney sonuçları aşağıda verilmiştir:

- a) Boşta alışma deney sonuçları; $P_{oc} = 319 \text{ W}$, $I_{oc} = 2.35 \text{ A}$.
- b) Kilitli rotor deney sonuçları; $P_{sc} = 415 \text{ W}$, $V_{sc} = 97.68 \text{ V}$.

EK-2

Asenkron motorun pozitif ve negatif sıra eşdeğer devreleri [15] aşağıda sunulmuştur:

(a) Pozitif sıra eşdeğer devre;



(b) Negatif sıra eşdeğer devre;

