

84337

T.C.

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SENKRON MAKİNALARDA UYARTIM AKIMININ DALGA BİÇİMİNİN
KARARLILIK SINIRINA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

NEVZAT ONAT

DANIŞMAN VE KOORDİNATÖR: Yrd. Doç. Dr. Fevzi KENTLİ

JURİ ÜYESİ

: Prof. Dr. İrfan GÜNEŞ

JURİ ÜYESİ

: Yrd. Doç. Dr. Ejel VAYVAY

JURİ ÜYESİ

: Yrd. Doç. Dr. Fevzi KENTLİ

ELEKTRİK EĞİTİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İSTANBUL 1999

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	I
TEŞEKKÜR	V
ŞEKİL LİSTESİ	VI
TABLO LİSTESİ.....	X
SEMBOL LİSTESİ.....	XI
ÖZET	XIII
ABSTRACT	XIV
BÖLÜM: 1. GİRİŞ	1
1.1. Senkron Makinalar.....	1
1.2. Senkron Makina Türleri	2
1.2.1. Yuvarlak Kutuplu (Turbo, Silindirik Kutuplu) Senkron Makinalar	2
1.2.2. Çıkık Kutuplu Senkron Makinalar	2
1.3. Senkron Makinalarda Döner Alan	2
1.4. Senkron Makinalarda Kararlılık	8
1.4.1. Geçici Hal Kararlılığı	9
1.4.2. Sürekli Hal Kararlılığı	9
1.4.3. Dinamik Hal Kararlılığı.....	9
1.4.3.1. Dinamik Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler	11
1.4.3.1.a.) Yükün Çeşidi.....	11
b.) Motor Mekanik Yükünün Yüzdesi.....	11
c.) Motor Mekanik Yükünün Karakteristiği.....	12
d.) Motorun Rotor ve Mekanik Yükünün Ataleti.....	13
e.) Yük Kısa Devre Seviyesi	14
f.) Generatör Dinamiklerinin Etkisi	15
g.) İletim Hattının Uzunluğu	15
1.5. Senkron Makinalarda Kararlılık Sorunu	16
1.6. Çalışmanın Amacı.....	18
BÖLÜM: 2. SENKRON MAKİNALARDA HAVA ARALIĞINDAKİ MAGNETİK AKI VE HARMONİK ANALİZİ.....	20
2.1. Senkron Makinalarda Hava Aralığındaki Magnetik Akı	20

2.1.1. Çıkıntılı Kutuplu S. Makinalarda Hava Aralığındaki Magnetik Akı.....	20
2.1.2. Yuvarlak Kutuplu (Turbo) S. Makinalarda Hava Aralığındaki Magnetik Akı.....	25
2.1.2.1. Rotorda Bir Çift Oluğun Bulunması Durumunda Akının Şekli.....	25
2.1.2.2. Rotorda Bir Kutup Altındaki Bobinlerin 2/3'üne Uyarma Bobinleri Yerleştirilip 1/3'ünün Boş Bırakılması Durumunda Akının Şekli.....	26
2.1.2.3. Uyarım Sargısının Bütün Oluklara Yerleştirilmesi Durumunda Akının Şekli.....	26
2.2. Hava Aralığındaki Magnetik Akının Fourier Serisi İle Harmonik Analizi.....	27
2.2.1. Genel Bilgi.....	27
2.2.2. Yuvarlak Kutuplu Senkron Makinalarda Uyarma Alanının Harmonik Analizi.....	29
2.2.2.1. Rotorda Bir Çift Oluğun Bulunması Durumu.....	29
2.2.2.2. Rotorda Bir Kutup Altındaki Bobinlerin 2/3'üne Uyarma Bobinleri Yerleştirilip 1/3'ünün Boş Bırakılması Durumu ...	30
2.2.2.3. Uyarım Sargısının Bütün Oluklara Yerleştirilmesi Durumu	31
2.3. Senkron Generatörde Endüklenen emk'in Hesaplanması.....	31
BÖLÜM: 3. SENKRON MOTORLAR.....	35
3.1. Senkron Motor Karakteristikleri.....	35
3.1.1. Ayar Karakteristiği	35
3.1.2. Senkron Motorun “V” Eğrileri.....	36
3.2. Senkron Motorlarda Güç, Moment ve Moment Açısı	41
3.2.1. İç Güç (Mekanik Güç)	42
3.2.2. Giriş Gücü.....	45
3.2.3. Döndürme Momenti	46
3.2.4. Senkron Motorlarda Maksimum Güç İçin Şartlar	48
3.2.5. Maksimum Uyarım.....	50
3.2.6. Maksimum Güç Şartlarında Akım.....	51
3.2.7. Maksimum Güç İçin Senkron Reaktansın Değeri.....	51

3.2.8. Yuvarlak Kutuplu Senkron Motorlarda Maksimum Yük Açısı İle Zıt EMK Arasındaki Bağntı.....	52
3.2.9. Çıkıntılı Kutuplu Senkron Makinalarda Güç ve Momentin Hesaplanması	55
3.2.10. Çıkıntılı Kutuplu Senkron Motorun Döndürme Momenti.....	57
3.2.11. Çıkıntılı Kutuplu Senkron Motorların Kararlılığı ve Maksimum Döndürme Momenti Açısı	58
3.3. Yük Değişmesinin Senkron Motora Etkisi.....	60
3.4. Uyarım Akımı Değişiminin Senkron Motora Etkisi.....	63
BÖLÜM: 4. DENEY ARACI OLARAK KULLANILAN SENKRON MAKİNANIN ÖZELLİKLERİ.....	66
4.1. Makinanın Etiket Değerleri ve Sarım Şekli	66
4.2. Endüvi ve Kutup Yapısı ve Ölçü Bobinleri.....	67
4.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Güç Kaynakları	68
4.4. Senkron Makinayı Döndürmek İçin Kullanılan Tahrik Makinası.....	70
BÖLÜM: 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	72
5.1. Senkron Makinanın Hava Aralığındaki Dalga Şeklinin Belirlenmesi....	72
5.1.1. Doğru Akımla Uyarım Durumu	73
5.1.2. Titreşimli Doğru Akımla Uyarım Durumu.....	75
5.1.3. Yarı Doğrultulmuş Kare Dalga İle Uyarım Durumu.....	77
5.1.4. Yarı Doğrultulmuş Sinüsoidal Akımla Uyarım Durumu.....	79
5.1.5. Tam Doğrultulmuş Sinüsoidal Akımla Uyarım Durumu	81
5.2. Endüvide Endüklenen Gerilimin Uyarım Akımının Dalga Biçimi İle Değişiminin İncelenmesi	83
5.2.1. Uyarım Akımının Doğru Akım Olması Durumunda.....	84
5.2.2. Titreşimli Doğru Akımla Uyarım Durumunda	87
5.2.3. Uyarım Akımının Yarı Doğrultulmuş Kare Dalga Olması Durumunda.....	88
5.2.4. Uyarım Akımının Yarı Doğrultulmuş Sinüsoidal Akım Olması Durumunda.....	90
5.2.5. Tam Doğrultulmuş Sinüsoidal Akımla Uyarımda	91
5.2.6. Değişik Uyarım Akımları İçin Endüvi Gerilimlerinin Biçimi.....	92

5.3. Senkron Makinada Kararlılık (Kopma) Sınırının Uyarım Akımının	
Dalga Biçimiyle Değişiminin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler	94
5.3.1. Doğru Akımla Uyarımda Elde Edilen “V” Eğrileri	94
5.3.2. Titreşimli Doğru Akımla Uyarımda Elde Edilen “V” Eğrileri	97
5.3.3. Yarı Doğrultulmuş Kare Dalga İle Uyarımda Elde Edilen “V”	
Eğrileri	98
5.3.4. Yarı Doğrultulmuş Sinüsoidal Akım İle Uyarımda Elde Edilen	
“V” Eğrileri	98
5.3.5. Tam Doğrultulmuş Sinüsoidal Akımla Uyarımda Elde Edilen	
“V” Eğrileri	99
5.4. Senkron Makinanın Yüklenecek Kararlılık (Kopma) Sınırının	
Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler	102
SONUÇ	104
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	108

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamı gerçekleştirirken, benden hiç bir zaman yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Fevzi KENTLİ'ye şükranlarımı ve saygılarımı sunarım. Ayrıca deneysel malzemelerimin temininde gösterdikleri ilgiden dolayı Sayın Cemal GİRGİN ve Bilal HAKARAYAN'a, bilgisayarla ilgili problemlerimde yardımcı olan değerli arkadaşım Gökhan KOÇYİĞİT'e teşekkürü borç bilirim.

Göztepe/İSTANBUL

Nevzat ONAT



ŞEKİL LİSTESİ

Şek. 1.1. Senkron makinalarda döner alan ve statorda endüklenen gerilimler.....	6
Şek. 1.2. Bir bozucu etki sonrası sistemin dinamik kararlılığı. (β :Yük açısı, t :Zaman (s.), t_0 - t_1 aralığında mekanik regülatörler devre dışıdır.)	10
Şek. 1.3. Geçici halde kararlı ancak dinamik olarak kararsız sistem (β :Yük açısı, t :Zaman (s.)).....	10
Şek. 1.4. Çeşitli yüklerde bozucu etki sonrası uç geriliminin zamanla değişimi (t :Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.)).....	11
Şek. 1.5. Asenkron motor yükünün farklı yüzdeleri için bozucu etki sonrası gerilimin zamanla değişimi (t :Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.)).....	12
Şek. 1.6. Farklı mekanik yükler için bozucu etki sonrası sistem geriliminin zamanla değişimi (t :Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.))	13
Şek. 1.7. Motor atalet sabitinin farklı değerleri için asenkron motor yükünün gerilim cevapları (t :Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.)).....	13
Şek. 1.8. Farklı yük kısa devre seviyeleri için bozucu etki sonrası sistem geriliminin zamanla değişimi (t :Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.)).....	14
Şek. 1.9. Farklı yapıdaki generatör baraları için bozucu etki sonrası gerilimin zamanla değişimi (t :Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.))	15
Şek. 1.10. Farklı uzunluktaki iletim hatları için bozucu etki sonrası gerilimin zamanla değişimi.....	16
Şek. 2.1. Kutup ayağının şekline göre endüklenen gerilimin değişimi.....	21
Şek. 2.2. Potansiyel çizgileri.	22
Şek. 2.3. Bir kutup başındaki potansiyel çizgileri.	23
Şek. 2.4. Çıkıntılı kutuplu makinanın uyarma alan eğrileri.	24
Şek. 2.5. Rotorda bir çift oluğun bulunması durumunda hava aralığı birinci harmonik dalga şekli.	25
Şek. 2.6. Bir kutup altındaki bobinlerin 2/3'üne uyarma bobinleri yerleştirilip 1/3'ünün boş bırakılması durumunda hava aralığındaki manyetik akının şekli.....	26
Şek. 2.7. Uyartım Sargısının bütün oluklara yerleştirilmesi durumunda hava aralığı manyetik alanının şekli.	26
Şek. 2.8. Manyetik alanın açısal hızla değişimi.....	33

Şek. 3.1. Senkron Motor Ayar Karakteristiği.....	36
Şek. 3.2. V eğrilerini elde etmek için gerekli deney bağlantı şeması.	37
Şek. 3.3. Yük akımı ve $\cos\phi$ 'nin uyartımla değişimleri.....	37
Şek. 3.4. Senkron makinanın "V" eğrileri.....	39
Şek. 3.5. Çeşitli yük durumlarında uyartım akımı ile güç katsayısının değişimi.	40
Şek. 3.6. $\cos\phi$ 'nin yüklerle değişimi.....	40
Şek. 3.7. Motor ve generetör çalışma durumları için uyartım akımları.	41
Şek. 3.8. Yuvarlak kutuplu senkron makina eşdeğer devresi ve $\cos\phi$ geri vektör diyagramı.	41
Şek. 3.9. Empedans üçgeni.....	43
Şek. 3.10. Yük açısının güçle değişimi.	44
Şek. 3.11. Senkron motorda yol alma ve sargı moment eğrileri.....	49
Şek. 3.12. Maksimum güç şartına göre empedans üçgeni.	49
Şek. 3.13. ($\beta=\gamma$) ve $\cos\phi=1$ için vektör diyagramı.....	51
Şek. 3.14. Endüktif çalışan senkron motorun vektör diyagramı.....	53
Şek. 3.15. Çıkıntılı kutuplu senkron makinanın $\cos\phi$ geri vektör diyagramları.....	55
Şek. 3.16. Çıkıntılı kutuplu senkron makina güç eğrisi.	56
Şek. 3.17. Senkron makinanın generatör ve motor çalışma durumlarındaki vektör diyagramları.	60
Şek. 3.18. Yük değişiminin senkron motora etkisinin vektöryel görünüşü.	62
Şek. 3.19. Sabit yüklü senkron motorda uyartım akımı değişmesi ile meydana gelen endüktif, omik ve kapasitif çalışma durumları için vektör diyagramları...64	64
Şek. 4.1. Deney aracı olarak kullanılan senkron makinanın endüvi sarım şeması.	69
Şek. 4.2. Senkron makina endüvisinin perspektif görünüşü.	70
Şek. 4.3. Senkron makina kutbunun ölçekli görünüşü.....	71
Şek. 5.1. Hava aralığındaki magnetik alanı belirlemek için gerekli deney bağlantı şeması.....	73
Şek. 5.2. Kare dalganın tam doğrultulmasından elde edilen ve uyartım sargısına uygulanan doğru akımın osiloskop görüntüsü.	74
Şek. 5.3. Şek. 5.2.'deki doğru akımla uyartımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	74
Şek. 5.4. Şek. 5.2.'deki doğru akımla uyartımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	75

Şek. 5.5. Uyarım akımı olarak kullanılan titreşimli doğru akım.	76
Şek. 5.6. Titreşimli doğru akımla uyarımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	76
Şek. 5.7. Titreşimli doğru akımla uyarımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	77
Şek. 5.8. Uyarım için kullanılan yarı doğrultulmuş kare dalganın osiloskoptan alınmış görüntüsü.	78
Şek. 5.9. Yarı doğrultulmuş kare dalga ile uyarımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	78
Şek. 5.10. Yarı doğrultulmuş kare dalga ile uyarımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	79
Şek. 5.11. Kutuplara uygulanan yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımın osiloskop görüntüsü.....	80
Şek. 5.12. Yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	80
Şek. 5.13. Yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	81
Şek. 5.14. Uyarım sargılarına uygulanan tam doğrultulmuş sinüsoidal akımın dalga şekli.....	82
Şek. 5.15. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	82
Şek. 5.16. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.	83
Şek. 5.17. Senkron generatörün endüvisinde endüklenen gerilimin şeklini elde etmek için gerekli deney şeması.....	84
Şek. 5.18. (a) İdeal senkron makinada uyarım akımının ideal doğru akım olması durumunda (b) teorik olarak endüvi sargılarında endüklenen gerilimin dalga şekli.....	86
Şek. 5.19. Deneysel çalışmalarda kullanılan senkron makinada net doğru akımla yapılan uyarım sonucu endüviden elde edilen dalga şekli.....	86
Şek. 5.20. (a) Titreşimli doğru akımla uyarım durumunda (b) bilgisayardan elde edilen faz geriliminin şekli.....	87

Şek. 5.21. Titreşimli uyartım durumunda endüvide endüklenen bir faz geriliminin osiloskop görüntüsü.....	88
Şek. 5.22. (a) Uyartımın kare dalga olması durumunda (b) endüvide endüklenen gerilimin dalga şekli.	89
Şek. 5.23. Uyartımın yarı doğrultulmuş kare dalga olması durumunda s. makinadan elde edilen dalga şekli.....	89
Şek. 5.24. (a) Uyartımın yarı doğrultulmuş sinüsoidal akım olması durumunda (b) endüklenen gerilim.	90
Şek. 5.25. Yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyartımda endüvide endüklenen gerilimin şekli.....	91
Şek. 5.26. (a) Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyartımda (b) endüvi geriliminin değişimi.....	91
Şek. 5.27. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla durumunda endüvi bir faz geriliminin osiloskop görüntüsü.....	92
Şek. 5.28. (a) Uyartımın rampa fonksiyonu olarak değişmesi durumunda (b) elde edilen gerilimin dalga şekli.	93
Şek. 5.29. (a) Uyartımın üçgen dalga olması durumunda (b) endüvi geriliminin değişimi.....	93
Şek. 5.30. Net doğru akımla uyartımda elde edilen “V” eğrileri.....	96
Şek. 5.31. Titreşimli doğru akımla uyartımda elde edilen “V” eğrileri.	98
Şek. 5.32. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyartımda elde edilen “V” eğrileri.	100
Şek. 5.33. Boşta çalışmada üç ayrı uyartım akımı şekli için elde edilen “V” eğrileri.	101
Şek. 5.34. Yarı yükte çalışmada üç ayrı uyartım akımı şekli için elde edilen “V” eğrileri.	101
Şek. 5.35. %85 yükte çalışmada üç ayrı uyartım akımı şekli için elde edilen “V” eğrileri.	102

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Değişik kutup sayıları ve stator akımlarının frekansına göre senkron dönme sayısı (n_s)	1
Tablo 5.1. Net doğru akımla uyarıtımda alınan değerler	95
Tablo 5.2. Titreşimli doğru akımla uyarıtımda kaydedilen değerler	97
Tablo 5.3. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarıtımda alınan değerler.....	99



SEMBOL LİSTESİ

f	:Şebeke frekansı (50Hz.) (1/s.)
p	:Çift kutup sayısı
n_s	:Senkron devir sayısı (1/dk.)
n	:Rotor devir sayısı (1/dk.)
n_n	:Anma devir sayısı (1/dk.)
ω_s	:Senkron açısal hız (1/s.)
β	:Yük açısı
t	:Zaman (s.)
U_r	:Sistem gerilimi (V)
U	:Generatör uç gerilimi (V)
M_y	:Yük momenti (Nm.)
M_{y0}	:İlk kalkınma momenti (Nm.)
M_{yn}	:Anma yük momenti (Nm.)
H	:Motor atalet sabiti
P_{max}	:Senkron makinanın maksimum gücü (W)
M_e	:Generatör momenti (Nm.)
M_d	:Döndürme momenti (Nm.)
E	:Statorda endüklenen gerilim (V)
E_r	:Bileşke gerilim (V)
U_{ϕ}	:Şebeke gerilimi (V)
I	:Endüvi akımı (A)
I_y	:Yük akımı (A)
I_u	:Uyartım akımı (A)
X_s	:Senkron reaktans (Ω)
Z_s	:Senkron empedans (Ω)
X_e	:Enerji iletim hattı reaktansı (Ω)
ϕ	:Akım ile gerilim arasındaki açı
γ	:Empedans açısı
R_e	:Endüvi etkin direnci (Ω)
γ_{elk}	:Bobinler arası elektriki açı
γ_{geom}	:Bobinler arası geometrik açı

α_{elk}	:Oluklar arası elektriki açısı
δ	:Hava aralığı
τ_p	:Kutup adımı (m.)
ϕ	:Magnetik akı (Wb.)
B	:Magnetik akı yoğunluğu (T)
l	:Alan yayılma uzunluğu (m.)
μ	:Magnetik geçirgenlik (H/m)
v	:Hız (m/s.)
T	:Periyot (s.)
a_0, a_n, b_n	:Fourier serisi katsayıları
k_a	:Adım katsayısı
k_d	:Dağıtım katsayısı
k_f	:Form katsayısı
N	:Sarım sayısı
U_1	:Birinci sargı gerilimi (V)
U_2	:İkinci sargı gerilimi (V)
C	:Faz ve kutup başına oluk sayısı
Y_x	:Oluk adımı
P_{mil}	:Mil gücü (W)
P_g	:Giriş gücü (W)
P_{mek}	:Mekanik güç (iç güç) (W)
P_{k0}	:Boştaki kayıplar (W)
P_{Cu}	:Bakır kayıpları (W)
P_{Fe}	:Demir kayıpları (W)
I_a	:Aktif akım (A)
I_r	:Reaktif akım (A)

ÖZET

Güç sistemlerinin temel elemanı olan senkron makinaların kararlı çalışması oldukça önemli olup araştırmacılar tarafından çok çeşitli yönleriyle araştırılmıştır. Senkron generatörler genellikle bir iletim hattı üzerinden şebeke sistemlerine bağlı olarak çalıştığı için kararlılık analizleri genellikle bu bütünü kapsayacak şekilde yapılmaktadır.

Tezde senkron makina tek olarak ele alınmakta ve uyartım akımı değişiminin kararlılığa etkisi incelenmektedir. Bilindiği gibi senkron makinalar genellikle doğru akımla uyarılmalıdırlar. Bu akımın genliği değiştirilerek motor çalışmada makinanın endüktif, omik veya kapasitif çalışması sağlanabilir. Generatör çalışmada ise makinanın ürettiği gerilimin genliği ayarlanabilir. Bu çalışmada uyartım akımının genliğinin yanısıra dalga biçimi de değiştirilerek kararlılık sınırının değişimi deneysel olarak incelenmiştir.

1. Bölüm'de senkron makinalar genel olarak tanıtılmakta ve kararlılığa etki eden faktörler verilmektedir. 2. Bölüm'de senkron makinaların harmonik analizi yapılarak makina parametreleri elde edilmiştir. 3. Bölüm'de ise senkron motorların uyartım akımı ile ilgili yönü ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Daha sonraki bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan senkron makina ve diğer yardımcı elemanlar tanıtılmıştır. Son bölümde ise makina üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ve senkron makinanın kopma sınırının uyartım akımı dalga biçimiyle nasıl değiştiği deneysel verilerle açıklanmıştır.

ABSTRACT

In power systems, stability of synchronous machines is very important. For this reason, different aspects of this matter have been investigated by researchers. Stability analyses for synchronous machines are made together with transmission lines models because these machines are connected to power systems with transmission lines.

In thesis, synchronous machine is examined separately and the effect of changing of excitation current on stability is searched. As known, synchronous machines have to be excited with d.c. current to provide the rotor field. Synchronous motor with constant load adjusted to operate at unity, leading and lagging power factor, by adjusting the field excitation current. In synchronous generators, the amplitude of generated voltage is function of excitation current. In this study, the changing of stability limit is investigated as experimentally in changing the amplitude and wave shape of excitation current.

In first section, synchronous machines are introduced generally and stability factors are given. In second section, harmonic analysis of synchronous machines are done and parameters are found. In third section, synchronous motors are examined detailed. In later section, synchronous machine and equipments are used in experiment are introduced. In last section, experiments and the effect of excitation current on stability are explained.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Senkron Makinalar

Senkron makinalar, genelleştirilmiş makina türünden olan makinalardır. Bu makinalar, generatör ve motor olarak çalışmak üzere imal edilirler. Bundan başka, bağlı olduğu şebekeye çok büyük kapasite gösterebilen dinamik kapasite olarak çalışmak üzere de yapılabilirler.

Frekansı sabit bir şebekeden çalışan bütün senkron makinaların enerji dönüşümü yapabilmesi için gerek ve yeter koşul, bunların senkron hız denilen sabit bir hızda dönmeleridir. Açısal hızı ω_s ile gösterelim. Bu açısal hıza ilişkin olan bir dakikadaki senkron dönme sayısı n_s olsun. Senkron makinanın stator akımlarının frekansı f_e , makinanın kutup sayısı $2p$ ise

$$n_s = \frac{60 \cdot f_e}{p} \quad (1.1)$$

dir. Burada p ve f_e belli olduğuna göre, senkron dönme sayısının değeri belirlenmiş olur. Tablo 1.1.'de değişik kutup sayıları ve frekansları için senkron dönme sayıları gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Değişik kutup sayıları ve stator akımlarının frekansına göre senkron dönme sayısı (n_s)

f_e [Hz]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60	600	400
p çift kutup	1	2	3	4	5	6	10	20	30	1	2	2
n_s [1/dk]	3000	1500	1000	750	600	500	300	150	100	3600	18000	12000

Senkron makinaların değeri sabit olan bir dönme sayısında çalışmaları, endüstride motor olarak kullanılma olanaklarını kısıtlar. Öte yandan senkron makinalar, elektrik enerjisi üretiminde, büyük enerji üretim merkezlerinde (santrallarda) generatör olarak hemen hemen her zaman kullanılan makinalardır. Generatör olarak çok büyük güçlerde imal olunmaktadırlar. Bugün 1.635000 KVA

gücünde rotoru yuvarlak senkron makinalar imal edilmekte ve 2.500000 KVA gücünde olan makinaların da projeleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

1.2. Senkron Makina Türleri

Senkron makinalar, genelleştirilmiş makinalardan olduğu gibi stator ve rotor çevrelerinin düzgün olup olmayışına göre başlıca iki türde yapılırlar:

1.2.1. Yuvarlak Kutuplu (Turbo, Silindirik Kutuplu) Senkron Makinalar

Yuvarlak kutuplu makinalar, generatör olarak çalıştıklarında genellikle bir türbin ile döndürüldüklerinden, bunlara turbo generatörler de denir. Yuvarlak kutuplu makinalar genellikle küçük kutup sayısı ve yüksek senkron dönme sayısı için yapılırlar. Turbo generatörler yüksek hızlı olduğundan rotor çapı küçük, eksenel boyu ise büyüktür ve $2p=4$ kutuplu olarak da yapılmaktadır.

1.2.2. Çıkık Kutuplu Senkron Makinalar

Çıkık kutuplu makinalar, generatör olarak çalışmada genellikle bir su türbini ile döndürülürler. Bu nedenle su barajları ile elektrik üretiminde çıkık kutuplu senkron generatörler kullanılır. Çıkık kutuplu makinalar genellikle küçük kutup sayısında ve küçük senkron hızları için imal edilirler. Çıkık kutuplu generatörlerin maksimum güçleri yuvarlak kutuplu makinaların gücünden daha düşüktür. Bu makinaların kutup sayıları $2p : 4, 6, 8, \dots, 60$ olabilir. [1]

Senkron makinalar, elektrik enerjisi üretiminde, büyük enerji üretim merkezlerinde generatör olarak hemen hemen her zaman kullanılırlar. Buralarda üretilen enerjinin iletimi için, oldukça uzun (400 kV.'un üstünde) yüksek gerilim hatları kullanmak gereklidir. Ancak, artan elektrik enerjisi gereksinmesi ile orantılı olarak, enterkonekte sistemlerde önemli sorunlar ortaya çıkmıştır.

Bu sorunlardan en önemlisi, çok karmaşık ve enterkonekte enerji iletim hatlarına bağlı olan senkron makinaların geçici ve sürekli hal çalışmalarında ortaya çıkan kararlılık (stabilite) sorunudur.

1.3. Senkron Makinalarda Döner Alan

Bir N-S mıknatısının kuvvet çizgileri N kutbundan çıkar ve mıknatıs gövdesi içinden geçerek tekrar N kutbuna vararak kapalı bir yol meydana getirir. Bu mıknatısı N-S kutup bölgeleri simetri (nötr) eksenini etrafında ω_s açısal hızı ile

döndürelim. Mıknatısın kuvvet çizgileri ve bu çizgilere teğet olan magnetik alan da aynı hızla dönecektir.

Bir N-S mıknatısının sürekli olarak döndürülmesi ile mıknatısın tüm alanı döner. Bu alana döner alan denir.

Elektrik makinalarında döner alan, hareket eden N-S mıknatısları yardımı ile elde edilebileceği gibi, belli koşulları sağlayan akımları taşıyan ve duran sargılar tarafından da meydana getirilebilir. Bir fazlı yada çok fazlı asenkron, senkron ve kollektörlü alternatif akım makinalarının statorlarında bulunan sargılar belli koşullar altında hava aralığında döner alan meydana getirirler. Döner alan, makinaların kutup sayısı ve stator akımlarının frekansı ile belirlenen ω_s senkron hızı ile makina içinde döner.

Burada üç fazlı sargılarda döner alanı inceleyeceğiz. Üç fazlı sargılar aralarında uzayda $\gamma_{el}=120^\circ$ lik faz farkı bulunan sargılardır ve faz sayısı $m=3$ 'tür. Bu

sagının karakterize edilmesi için aralarında $\gamma_{el} = \frac{2\pi}{3}$ radyanlık açılar bulunan üç eşit

bobine aralarında yine $\frac{2\pi}{3}$ radyanlık faz farkları olan eşit genlikli sinüsoidal

gerilimlerle besleyelim. Bu üç bobinin her birisi yalnız başına kendi eksenleri üzerinde titreşen alternatif alanlar meydana getirirler. Buna karşılık, bobinlerin üçünün de bir arada meydana getirdiği toplam alan uzayda doğrultusunu değiştirerek döner ve dönüş açısal hızı senkron hıza eşittir. Şek. 1.1'de gösterildiği gibi pozitif akımların faz bobinlerinde meydana getirdikleri akı ya da alanların şekilde gösterilmiş olan B_a , B_b ve B_c yönlerinde olduğunu kabul edelim. Şimdi t_0 , t_1 , t_2 , t_3 , t_4 ve t_5 anlarında üç fazlı bobinin toplam alanlarını bulalım. Bunu yapabilmek için seçilen her t anı için akımların değerleri işaretleri ile birlikte Şek. 1.1'deki sinüsoidal alternatif akımlardan bulunur. Şekilde görülen her faz bobininin seçilen t anlarındaki alanları taşıdıkları akımın işaret ve genlikleri göz önüne alınarak ayrı ayrı çizilir. Pozitif işaretli akımların bobin eksenini üzerinde okla gösterilen yönde alan oluşturduğu kabul edilir. Örneğin, $t=t_1$ anında bu alan ya da akı yoğunlukları B_{a1} , B_{b1} ve B_{c1} olarak gösterilmiştir. Daha sonra faz bobinlerinin toplam alanı, her faz bobininin meydana getirdiği alanlarının toplamı ile bulunur.

$$\vec{B}_1 = \vec{B}_{a1} + \vec{B}_{b1} + \vec{B}_{c1} \quad (1.2)$$

Bu işlemler her t anı için uygulanarak $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ anlarında bulunan toplam B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 döner alan endüksiyonları şekilde görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi döner alanın doğrultu değiştirerek döndüğü ve genliğinin sürekli sabit kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte genliğin bir bobin alanının maksimumunun 1,5 katı olduğu görülür.

Döner alanın dönme açısal hızını aynı şekilden bulunabilir. Şekilde t_0 anından t_5 anına kadar alınan açı radyan olarak $\omega_s = (t_5 - t_0) = \pi$ radyandır. Aynı zamanda t_0 anındaki B_0 akısı ile t_5 anındaki B_5 akı vektörü arasındaki açı da π radyandır. Benzer şekilde t_1 anındaki alınan açı $\omega_s = (t_0 - t_1) = \pi/3$ radyan olduğunda B vektörü de $\pi/3$ radyanlık yol alır. O halde akımlar $\gamma_{el} = \frac{\pi}{3}, \pi, \dots$ kadar bir açı kayması yaptığında döner alan vektörü de $\gamma_{geo} = \frac{\pi}{3}, \pi, \dots$ olarak aynı oranda dönmektedir. Toplam kutup sayısı $2p$ olan bir makinada $\gamma_{el} = p\gamma_{geo}$ olduğundan, $2p$ kutuplu makinada akım dalgaları γ_{el} kadar yer değiştirdiğinde, döner alan vektörü geometrik olarak $\gamma_{geo} = \frac{\gamma_{el}}{p}$ kadar yer değiştirir. Bu son bağıntının türevi alınacak olursa döner alan açısal hızı,

$$\omega_s = \frac{d(\gamma_{geo})}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d(\gamma_{el})}{dt} = \frac{\omega_{el}}{p} \quad (1.3)$$

olarak bulunur. $\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$ ve $\omega_{el} = 2\pi f_e$ olduğundan, bu değerler 1.3 nolu denklemde yerine konduğunda,

$$\frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi f_e}{p} \Rightarrow n_s = \frac{60 f_e}{p} \quad (1.4)$$

elde edilir. Bu bağıntıdan, döner alan açısal hızının senkron açısal hıza eşit olduğu görülür.

Yukarıda üç fazlı bobinden oluşan sistemin toplam alanını bulmak için uyguladığımız metodu iki fazlı ve çok fazlı sargılara da uygulanabilir. Bu uygulamalar sonucunda elde edilen sonuçlar çok fazlı sargıların hangi koşullar altında döner alan meydana getireceğini göstermiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre: $m > 1$ olmak üzere m fazlı bir alternatif akım sargısında genliği

sabit olan bir döner alan meydana gelebilmesi için gerek ve yeter koşul sargıların eksenleri arasında uzayda $2\pi/m$ radyanlık elektriksel açının bulunması, sargıların taşıdığı akımların arasında zaman içinde $2\pi/m$ radyanlık açının var olması ve akımların genliklerinin eşit ve faz sargılarının da aynı özelliklerde yapılmasıdır. Döner alan meydana getiren en küçük faz sayısı $m=2$ 'dir. Bir fazlı sargı ise ancak sargı eksenini üzerinde yön değiştiren bir alternatif alan meydana getirir.

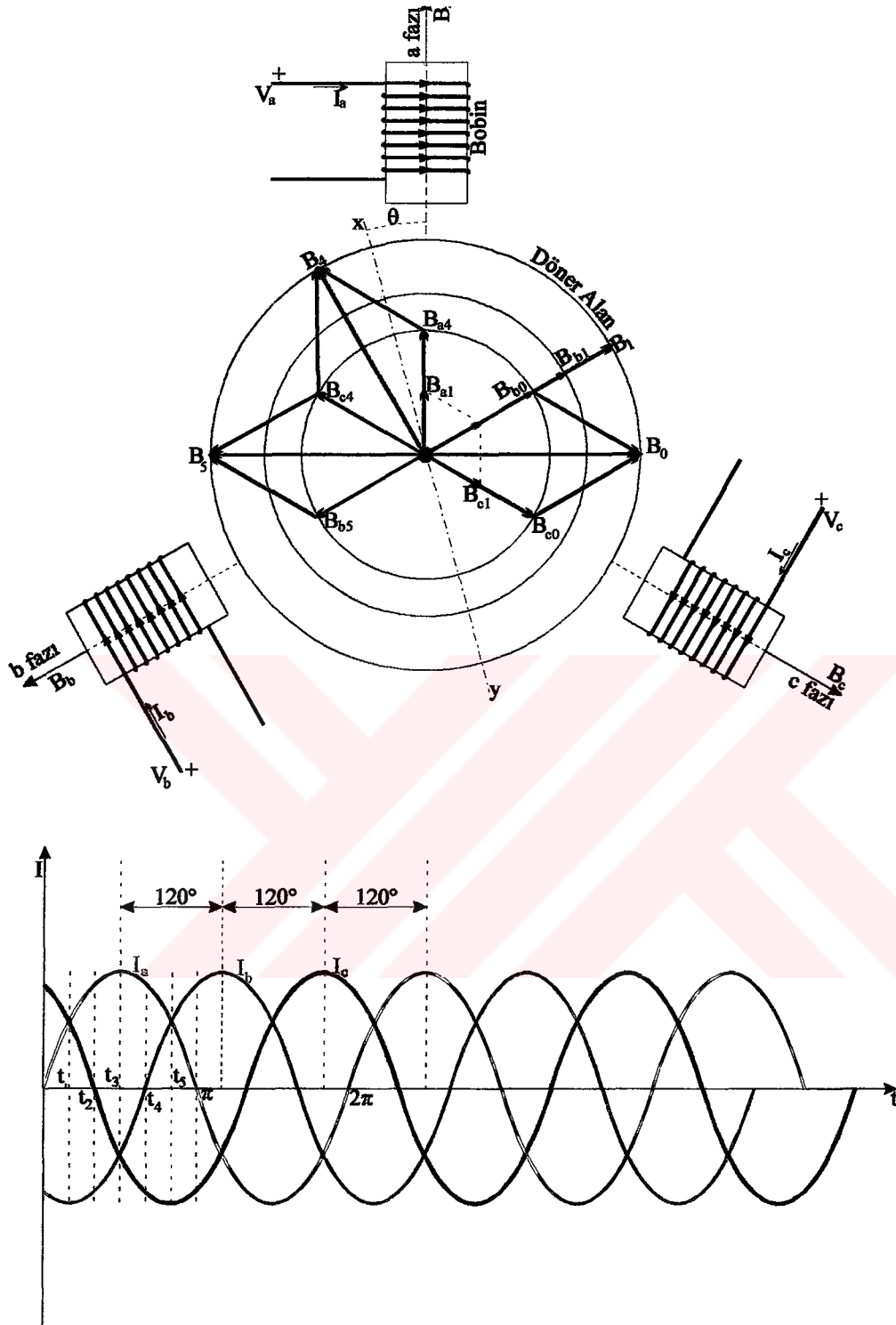
Geometrik olarak bulunan sonuçları analitik yoldan da bulmak mümkündür. Şek. 1.1.'de a fazı ekseninden dönüş yönünde θ açısı kadar kaymış olan x—y doğrultusunda her üç fazın oluşturduğu toplam alanı hesaplayalım. x—y doğrultusundaki toplam alan, her üç faz bobininin kendi eksenleri üzerinde meydana getirdiği alanların x—y doğrultusu üzerindeki izdüşümlerinin toplamı alınarak bulunur.

$$B_{x,y}(\theta,t) = \sum_{i=a,b,c} B_i(\theta,t) = B_a(\theta,t) + B_b(\theta,t) + B_c(\theta,t) \quad (1.5)$$

olur. Burada, $B_a(\theta,t)$ göz önüne alınan t anında a fazının, $B_b(\theta,t)$ b fazının ve $B_c(\theta,t)$ de c fazının magnetik endüksiyon vektörlerinin x—y doğrultusundaki izdüşümleridir. Faz bobinlerinin kendi eksenleri üzerinde meydana getirdiği $B_a(t)$, $B_b(t)$, $B_c(t)$ magnetik endüksiyon vektörlerinin x—y doğrultusundaki izdüşümleri;

$$\begin{aligned} B_a(t,\theta) &= B_a(t)\cos\theta \\ B_b(t,\theta) &= B_b(t)\cos(\theta - 120^\circ) \\ B_c(t,\theta) &= B_c(t)\cos(\theta - 240^\circ) \end{aligned} \quad (1.6)$$

dır. Burada $B_a(t)$ a fazının $i_a = I_m \cos\omega_e t$ akımı, $B_b(t)$ b fazının $i_b = I_m \cos(\omega_e t - 120^\circ)$ akımı ve $B_c(t)$ de $i_c = I_m \cos(\omega_e t - 240^\circ)$ akımı tarafından meydana getirilir. Faz sargılarının taşıdıkları bu akımlar üç fazlı sargılar olup genlikleri de eşittir. O halde faz akımlarının meydana getirdikleri magnetik endüksiyonlar,



Şek. 1.1. Senkron makinalarda döner alan ve statorda endüklenen gerilimler.

$$\begin{aligned}
 B_a(t) &= B_m \cos \omega_e t & \omega_e &= 2\pi f_e \\
 B_b(t) &= B_m \cos(\omega_e t - 120^\circ) & 2p &= 2 \Leftrightarrow p=1 \\
 B_c(t) &= B_m \cos(\omega_e t - 240^\circ) & &
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

olarak ifade edilebilir. (1.7) eşitliğindeki değerler (1.6) denkleminde yerine konursa,

$$B_a(t, \theta) = B_m \cos \omega_e t \cos \theta$$

$$B_b(t, \theta) = B_m \cos(\omega_e t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$B_c(t, \theta) = B_m \cos(\omega_e t - 240^\circ) \cos(\theta - 240^\circ)$$

olur. Bu değerlerin (1.5) nolu denklemde yerine konmasıyla ;

$$B_{x-y}(\theta, t) = B_m [\cos \theta \cos \omega_e t + \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega_e t - 120^\circ) + \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega_e t - 240^\circ)] \quad (1.8)$$

denklemini elde edilir. Trigonometrinin

$$\cos(p) \cos(q) = \frac{1}{2} \cos(p+q) + \frac{1}{2} \cos(p-q) \quad \text{eşitliğinden yararlanılarak}$$

(1.8) nolu bağıntı;

$$B_{x-y}(\theta, t) = \sum_{i=a,b,c} B_i(\theta, t) = \frac{1}{2} B_m [\cos(\theta - \omega_e t) + \cos(\theta - \omega_e t) + \cos(\theta - \omega_e t)] \\ + \frac{1}{2} B_m [\underbrace{\cos(\theta + \omega_e t - 240^\circ) + \cos(\theta + \omega_e t) + \cos(\theta + \omega_e t - 120^\circ)}_0] \quad (1.9)$$

olarak yazılabilir. Bu bağıntının ikinci terimi sıfırdır. Böylece, göz önüne alınan üç faz bobininin a fazı ekseninden dönüş yönünde ölçülen ve θ açısı ile belirtilen x—y eksenini doğrultusundaki toplam magnetik endüksiyonu;

$$B_{x-y}(\theta, t) = \frac{3}{2} B_m \cos(\theta - \omega_e t) \quad (1.10)$$

olur. $B_{x-y}(\theta, t)$ iki değişkenli bir fonksiyondur. Bu fonksiyondan görüleceği gibi bir θ açısında ya da hava aralığının belli bir noktasında, toplam magnetik akı yoğunluğu vektörünün genliği, zaman içinde kosinüs fonksiyonuna göre değişir. Diğer yandan herhangi bir t anı gözönüne alınırsa $0 \leq \theta \leq 2\pi$ arasında olan hava aralığının bütün noktalarında alan θ açısına göre gene kosinüs fonksiyonuna göre değişir. Buna göre $B_{x-y}(\theta, t)$ genliği sabit ve $3/2 B_m$ olan, saat ibresi yönünde hareket eden bir yürüyen dalga ya da döner alandır.

Buraya kadar anlattıklarımıza dayanarak şunu ifade edebiliriz: Üç fazlı aralarında $2\pi/3$ radyanlık açı bulunan alternatif akımlar, yine aralarında $2\pi/3$ radyanlık açı bulunan özdeş üç sargıya uygulandığında, bu sargıların oluşturduğu

toplam magnetik alan sabit genlikli ve saat ibresi yönünde senkron açısal hızla dönen bir döner alan oluşturur. Şu halde şayet genliği sabit ve senkron açısal hızla dönen sabit bir magnetik alan bu sargılar etrafında döndürülürse üç fazlı sargılarda aralarında $2\pi/3$ radyanlık açı bulunan eşit genlikli akımlar endükler. Bu senkron generatörlerin çalışma prensibini oluşturur. Senkron generatörlerin üç fazlı sinüsoidal gerilim üretebilmesi için makinanın statoruna sabit ve zaman içinde yön değiştirmeyen yani doğru gerilim uygulanır. Bu gerilim rotorda sabit magnetik alan oluşturur. Bu alanın makinanın kutup sayısı ve üreteceği gerilimin frekansı ile değişen senkron açısal hızla döndürülmesiyle Şek. 1.1.'de görülen sinüsoidal akımlar elde edilir. [1]

1.4. Senkron Makinalarda Kararlılık

Büyük bir güç sistemine bağlı bir senkron generatörün gerçek çalışmasında, güç girişi su türbünü, buhar türbünü v.b. gibi ilk hareket verici bir eleman tarafından kontrol edilir. Bu nedenle makinanın yük açısı giriş gücü ve çıkış gücünü dengeleyene kadar büyüme gösterecektir (kayıpların etkisi ihmal edimiştir.). Eğer ilk hareket gücü çok büyük olursa veya muhtemelen eşdeğer sistem empedansı çok büyük olursa sistemdeki değişiklikler sebebiyle, hattaki bir arızayı takiben, maksimum güç çıkışı girişten büyük olabilir. Bu durumda generatör açısı artan yüklerle birlikte artmaya devam edecektir. Generatör, hız kontrolörleri tarafından giriş gücü azalana kadar sistemdeki yükselen yük açısı ile birlikte senkronizmden ayrılabilir.[5]

Senkron generatörlerin giriş enerjileri mekanik regülatörlerle ayarlanır. Elektronik elemanlara göre daha büyük zaman sabitlerine sahip olan mekanik regülatörler, büyük bir bozucu etkiyi takip eden birkaç saniyelik süre içinde hemen devreye giremezler. İşte böyle arızalardan sonra makinanın davranışının bilinmesi gerekir. Bozucu etki sonrası makinaların davranışlarına göre kararlılık sınıflandırması genellikle üç ana grupta toplanır.

- 1.) Geçici Hal Kararlılığı
- 2.) Sürekli Hal Kararlılığı
- 3.) Dinamik Hal Kararlılığı

Şimdi bu kararlılık tanımlarını kısaca yapalım.

1.4.1. Geçici Hal Kararlılığı

Senkronizmanın ani olarak kaybına neden olan ani yük değişimleri, enerji iletim hatlarındaki kısa devreler gibi büyük bozucu etkilere karşı sistem cevabının sınırlı kalması “geçici hal kararlılığı” olarak adlandırılır. Geçici hal durumunda bozucu etkiden sonraki birkaç saniyelik süre için sistemin dinamik analizi yapılır. Bu süre içinde regülatörlerin devrede olmadığı varsayılır. Başka bir deyişle analizin yapıldığı bu kısa zaman aralığında tahrik sistemlerinin verdiği mekanik gücün değişmeyip sabit kaldığı varsayılır. Enerji sistemi büyük bir etkiye maruz kaldığında sistemdeki senkron makinaya ait rotor (yük) açısının ilk salınımları büyük öneme sahiptir. Sistemin senkronizmada kalma yeteneği ya da kararlı çalışması, ilk salınımdan sonraki salınımların birincisinden daha küçük olmaları ile belirlenir.

Geçici hal kararlılık limiti, ani yük değişimi, sistem hatası veya anahtarlama işlemi gibi geçici olaylara maruz kaldığında senkron makinanın taşıyabildiği ve senkronizmada kalabildiği maksimum güçtür.[6]

1.4.2. Sürekli Hal Kararlılığı

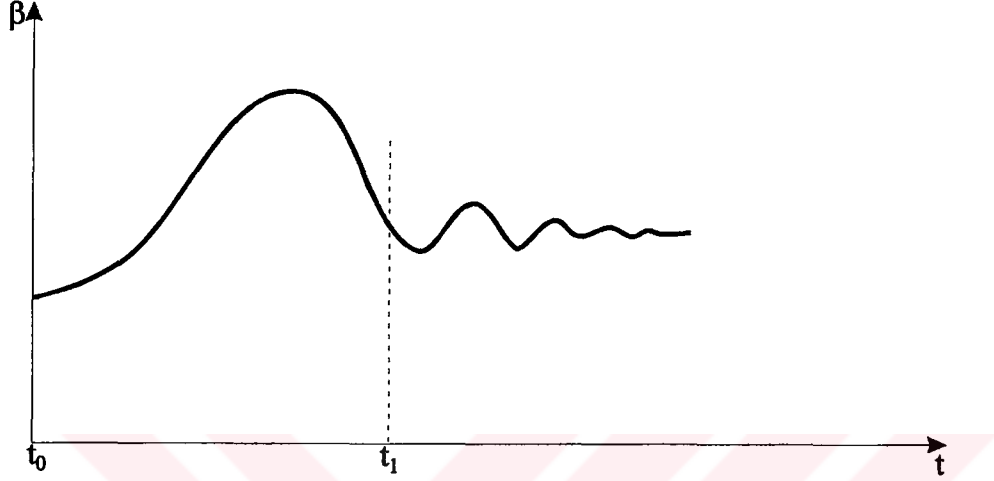
Beklenen yük değişimleri ya da küçük bozucu etkilere karşı sistem cevabının sürekli halde sınırlı kalması “sürekli hal kararlılığı” olarak adlandırılır. Eğer sistem kararlı ise, geçici bir etki sonrası sistemin başlangıçtaki işletme şartlarına dönerek çalışmasını sürdürmesi, kalıcı bir etki sonrası ise geçici bir süre sonra yeni işletme şartlarında çalışmasını sürdürmesi beklenir. Dinamik hal kararlılık analizi ile, sistemin geçici olay sonrası davranışı ve ulaşacağı sürekli hal çalışma durumu arasındaki geçiş sağlandığından; dinamik ve sürekli hal kararlılık analizleri aynı anlamda alınarak inceleme yapılır.

Yukarıdaki incelemelerden de görüldüğü gibi, genel makina kararlılığı yalnız dengeli işlemeyi değil, bir karışıklık sonrası aynı durumu tekrar elde etme yeteneğini de ilgilendirir.

1.4.3. Dinamik Hal Kararlılığı

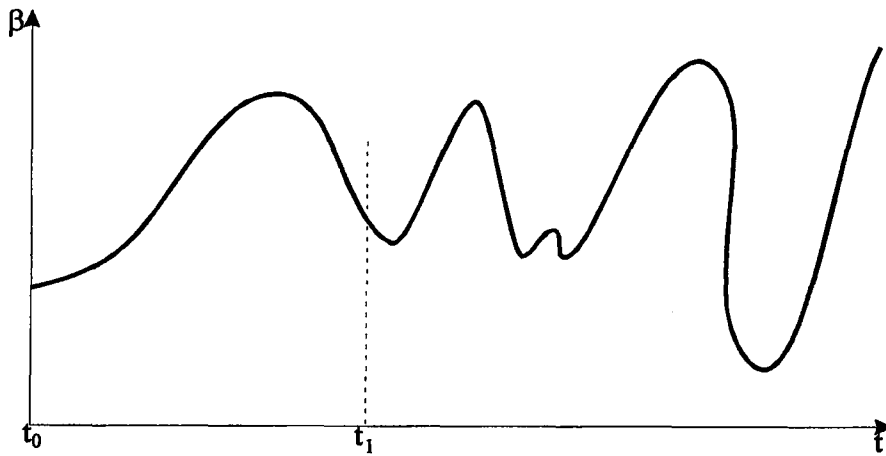
Geçici olay süresinden sonra mekanik regülatörlerin de devrede olduğu birkaç dakikalık sürede sistemin bozucu etkilere karşı cevabının sınırlı kalması “dinamik hal kararlılığı” olarak adlandırılır. Geçici halden sonra mekanik regülatörler hemen devreye girerek giriş-çıkış enerjileri arasındaki dengeyi sağlamak

amacıyla mekanik enerjiyi arttırır ya da azaltırlar. Bu dengeleme esnasında tabii olarak salınımlar oluşacaktır. Eğer sistem dinamik olarak kararlı ise salınımları genlikleri giderek küçülecek ve sistem belli bir süre sonra sürekli çalışma şartlarına ulaşacaktır.(Şek. 1.2)



Şek. 1.2. Bir bozucu etki sonrası sistemin dinamik kararlılığı. (β :Yük açısı, t :Zaman (s.), t_0 - t_1 aralığında mekanik regülatörler devre dışıdır.)

Büyük bir bozucu etkiye maruz kalan bir sistem geçici olay süresince kararlı olmasına rağmen dinamik olarak kararsız olabilir. (Şek. 1.3.)

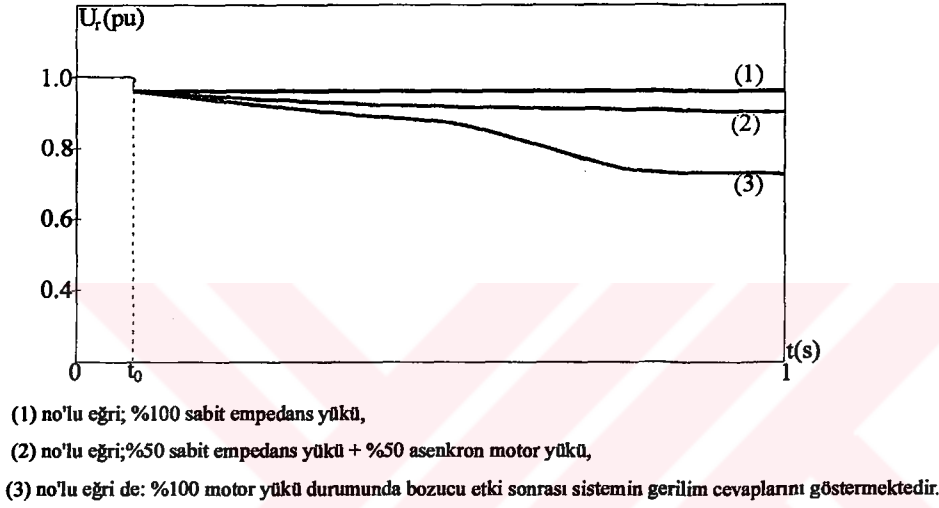


Şek. 1.3. Geçici halde kararlı ancak dinamik olarak kararsız sistem (β :Yük açısı, t :Zaman (s.))

1.4.3.1. Dinamik Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler

1.4.3.1.a.) Yüklün Çeşidi

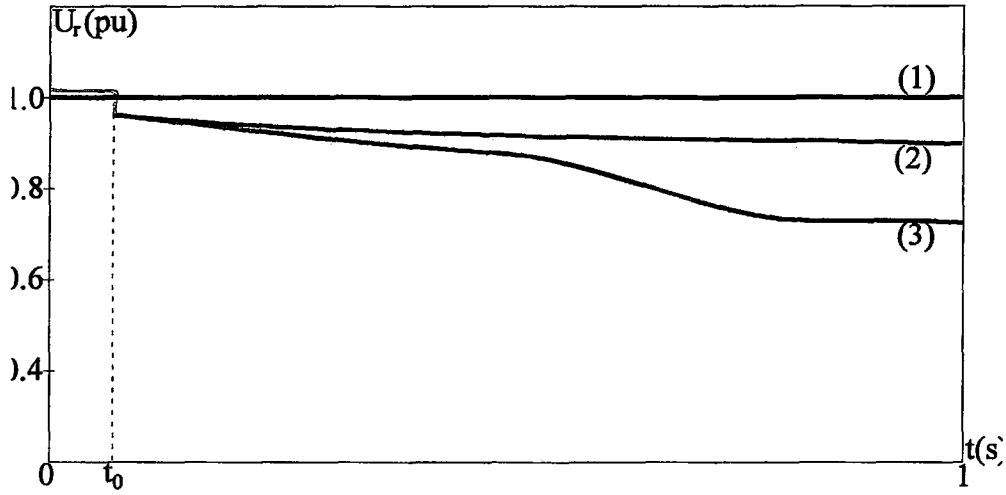
Enerji sistemlerinde yükler ağırlıklı olarak sabit empedans ve sabit motor yükleri şeklinde olmaktadır. Bunlardan, sabit motor yükünün gerilim kararlılığına olan olumsuz etkisi, sabit empedans yükünün ise gerilim dalgalanmalarına uyumlu cevabı bilindiğinden, bu iki yük tipinin aynı yük barasındaki yüzdelikli ağırlıklarına göre gerilim kararlılığına olan etkileri Şek. 1.4.'te görülmektedir.



Şek. 1.4. Çeşitli yüklerde bozucu etki sonrası uç geriliminin zamanla değişimi
(t:Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.))

b.) Motor Mekanik Yükünün Yüzdesi

Burada yükün tamamen asenkron motor yükü olduğu ve motorun mekanik yükünün sabit momentli olduğu öngörülmektedir. Bu mekanik yükleri besleyen motorların sisteme tam yükün %25, %50, %100'ü şeklinde sisteme bağlandığında gözönüne alınan iletim hattındaki bozucu etki için %50 yüklenmenin üstü kritik durum sergilemektedir.



(2) no'lu eğri; %50 yükleme, (1) no'lu eğri; %25 yükleme,
 (3) no'lu eğri: %100 yükleme durumunda bozucu etki sonrası
 sistemin gerilim cevaplarını göstermektedir.

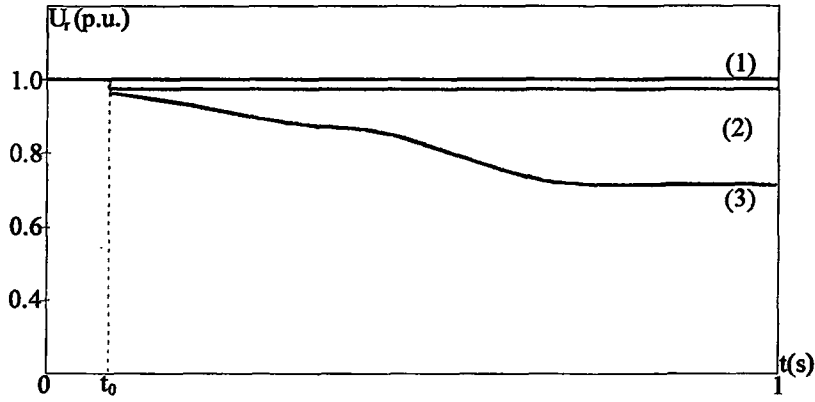
Şek. 1.5. Asenkron motor yükünün farklı yüzdeleri için bozucu etki sonrası gerilimin zamanla değişimi (t:Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.))

c.) Motor Mekanik Yükünün Karakteristiği

Motorun mekanik yük momentini tanımlayan, değişken bir üstel (z) değeriyle farklı yük karakteristiklerinin etkisi incelenebilir.

$$M_y = M_{y0} + (M_{yn} - M_{y0}) \left(\frac{n}{n_n} \right)^z \text{ ifadesinde, } M_y \text{ yük momentini, } M_{yn} \text{ anma}$$

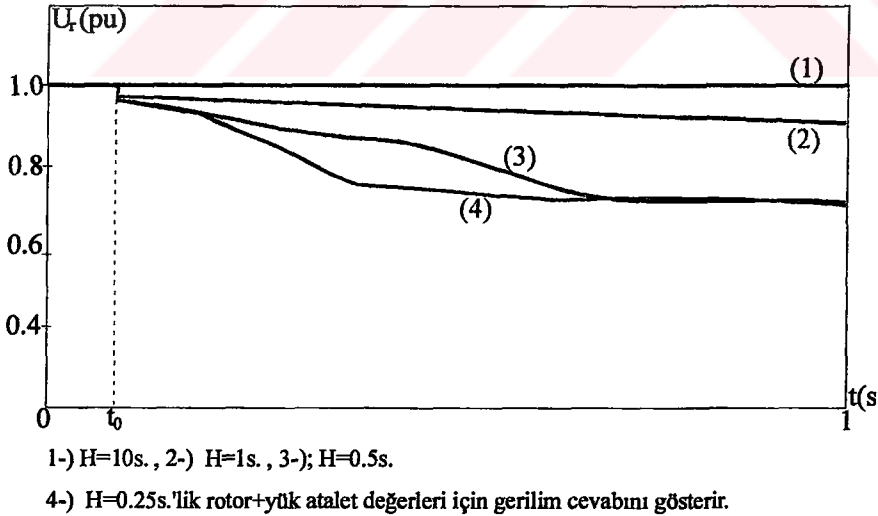
yük momentini, n devir sayısını, n_n anma devir sayısını; Şek. 1.6.'de ise, (1) no'lu eğri $z=2$ durumu için havalandırıcılar, santrifüj pompalar gibi momentle karesel değişen yükleri, (2) no'lu $z=1$ durumunda motor - generatör setleri, girdap akımlı frenler gibi momentle doğru orantılı yükleri, (3) no'lu eğri ise $z=0$ durumu için konveyör, kaldırma makinaları, talaşlı takım tezgahları gibi sabit momentli yük durumundaki sistem geriliminin değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi, sabit momentli yükler gerilim çökmesinde en fazla etkiye sahiptir.



Şek. 1.6. Farklı mekanik yükler için bozucu etki sonrası sistem geriliminin zamanla değişimi (t:Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.))

d.) Motorun Rotor ve Mekanik Yükünün Ataleti

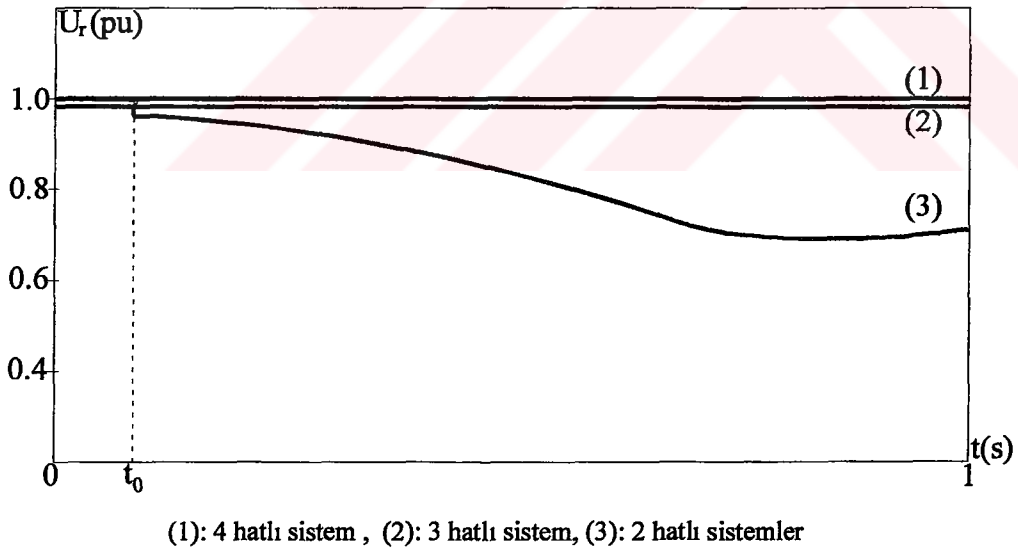
Burada, motor mekanik yükünün sabit momentli olduğu göz önüne alınmış ve rotor yük ataletlerine farklı değerler verilerek yükün gerilim cevapları elde edilmiştir. Şek. 1.7.'den görüleceği üzere, düşük atalet momentleri daha hızlı gerilim çökmelerine neden olmaktadır. Oysa, büyük atalet momentlerinde bozucu etki sonrasında bile motor işletmede kalabilmektedir.



Şek. 1.7. Motor atalet sabitinin farklı değerleri için asenkron motor yükünün gerilim cevapları (t:Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.))

e.) Yük Kısa Devre Seviyesi

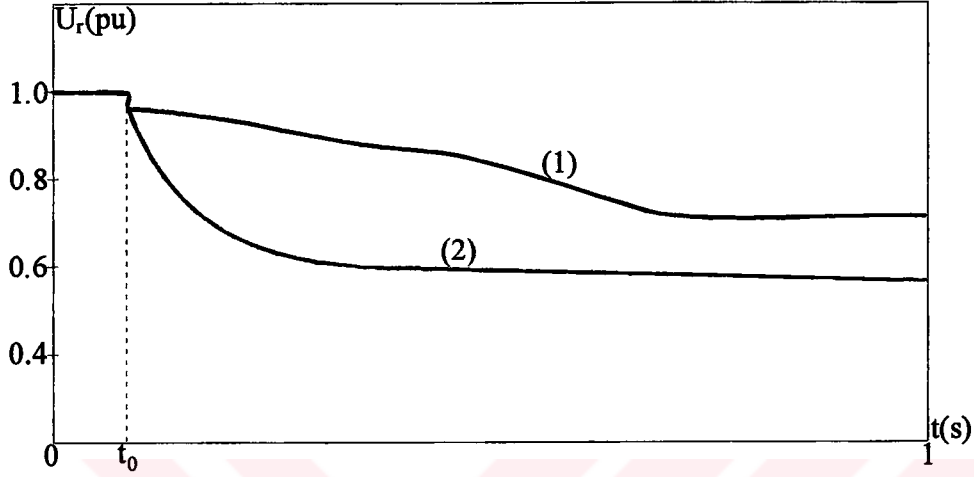
Geçici gerilim kararlılığını etkileyen faktörler arasında, yüklerin öz etkileri dışında önemli bir etken de, üretim ile yük baraları arasındaki empedanstır. Bu empedans aynı zamanda yükün kısa devre seviyesini belirtir. Bu etkiyi incelemek için, yükün, sabit mekanik momentli asenkron motor yükü olduğu ancak iletim hattı parametrelerinin değişeceği varsayılmaktadır. İlk olarak, paralel iki hattan birinin devre dışı olması gözönüne alalım. Bu durumda, seri empedans orijinal değerinin %200'ne çıkarken şönt admitans %50'sine düşmektedir. Daha sonra ise a) , b) dört, paralel iletim hattını da gözönüne alarak, her birinden birer hattın devre dışı olduğu varsayılmıştır. Böylelikle, a) için seri empedans orijinal değerinin %150'sine çıkmakta, şönt admitans ise %66'sına düşmekte, b) için seri empedans orijinal değerinin %133'ne çıkmakta, şönt admitans %75'ine inmektedir. Buna göre şek. 1.8.'den görüleceği gibi, kısa devre seviyesi küçüldükçe gerilim kararlılığı artmaktadır. Bunun nedeni, düğümlerdeki (baralardaki) reaktif güç/gerilim duyarlılığının, yaklaşık olarak kısa devre akım seviyesine orantılı olmasından kaynaklanmaktadır.



şek. 1.8. Farklı yük kısa devre seviyeleri için bozucu etki sonrası sistem geriliminin zamanla değişimi (t :Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.))

f.) Generatör Dinamiklerinin Etkisi

Daha önce gözönüne alınanlara benzer koşullar altında, besleme kaynağının sonsuz güçlü güçlü bara olması ya da kaynak empedansının gözönüne alınması durumlarının gerilim kararlılığı açısından etkileri Şek. 1.9.'de açıkça görülmektedir.

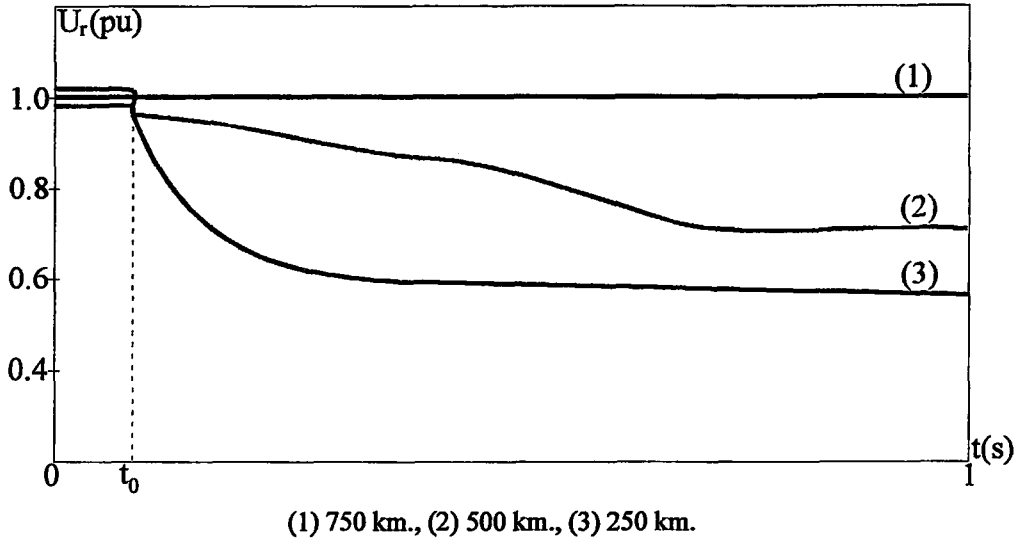


(1): sonsuz güçlü bara, (2): gerçek durum

Şek. 1.9. Farklı yapıdaki generatör baraları için bozucu etki sonrası gerilimin zamanla değişimi (t :Zaman(s.), U_r :sistem gerilimi (p.u.))

g.) İletim Hattının Uzunluğu

Burada, hat kapasiteleri ihmal edilmeksizin 750 km, 550 km ve 250 km'lik paralel hatların birinin devre dışı kalması sonucunda, asenkron motor yükünün gerilim cevapları görülmektedir. Bu durumda 750 km'lik hatta kritik güce ulaşılmadığından ve yüksek kapasitesi nedeniyle, daha iyi bir durum göstermektedir. Diğer hatlar ise kapasiteleri nedeniyle daha düşük hat sonu gerilimlerine sahip olduklarından ve bozucu etki sonrası bu hatlara bağlı asenkron motor yükünün neden olduğu artışı gerilim düşümü sonucunda, daha kötü durumlar sergilemektedir.



Şek. 1.10. Farklı uzunluktaki iletim hatları için bozucu etki sonrası gerilimin zamanla değişimi.

[9]

1.5. Senkron Makinalarda Kararlılık Sorunu

Sistem modeli olarak sonsuz büyük güçlü bir şebekeye, bir iletim hattı üzerinden bağlı bir senkron makinayı düşünelim. Senkron makinadan alınacak maksimum güç değeri, stator omik direnci ihmal edilerek;

$$P_{1\max} = \frac{U.E}{X_s} \quad (1.11)$$

olarak verilir. Bu durumda herhangi bir yük açısı için güç değeri,

$$P_1 = P_{1\max} \sin \beta \quad (1.12)$$

olacaktır. Makina yükündeki bir değişiklik, yük açısında (β) bir değişikliğe neden olur. Makinanın P_a yükünde β_a açısı ile çalıştığını varsayalım. Yük aniden P_b değerine ve denge açısı da β_b 'ye yükseltsin. Rotorun β_a 'dan β_b 'ye hızlanması bir zaman aralığını kapsar ve bu esnada artan bir kinetik enerji ortaya çıkar. Bunun sonucu olarak dönme hızı nominal senkron hızın üzerine çıkar. Yük açısı β_b 'yi aşarak daha ileri daha ileri bir β_c değerine gelebilir. Bu değer kritik açı değeri $\beta=90^\circ$ 'nin ötesinde olabilir.

Generatörlerde endüklenen M_e momenti;

$$M_e = \frac{3.E.I}{X_s.\omega_r} \sin\beta \quad (1.13)$$

dır. Burada ;

E : Endüvide endüklenen gerilim (V)

I : Stator akımı (A)

X_s : Endüvinin toplam reaktansı (senkron reaktans) (Ω)

ω_r : Rotor senkron açısal hızı (1/sn.)

β : Elektriksel güç açısı

M_e : Generatörde indüklenen moment (Nm)

dir. Eğer generatör ideal ise, $M_e=M_d$ dır. M_d ise döndürme momentidir.

Sonsuz büyük güçlü şebekeyle paralel çalışan senkron generatörün miline uygulanan giriş gücü ya da moment, bir tahrik makinası ile kontrol edilir. Bu kontrol işleminde, tahrik momentini büyütülürse, makina kayıpları göz önüne alınmadığında, generatörün elektrik yanından alınan elektrik gücü, mekanik yanından verilen giriş gücüne eşit olana dek büyür. Ancak sistemdeki belli bazı çalışma koşulları nedeniyle, örneğin enerji iletim hattı reaktansı X_e 'yi etkileyen ani yüklemeler ve kısa devrelerde, generatörün uçlarından çekilen güç azalır ve tahrik makinasından verdiği güçten küçük kalır. Bu durumda, generatörde bir ivmelendirme momentini üretilmiş olacağından yük açısı β büyümeye başlar. Adı geçen büyüme ivmelendirme momentini var oldukça sürer ve tahrik makinası giderek senkron generatörü daha fazla zorlar. Generatör senkronizmadan çıkar senkron üstü yüksek hızlara yükselerek tahrik makinasının hızlanmasına yol açar.

Sonsuz büyük güçlü şebeke ile paralel çalışan senkron generatörlerde, yük açısı β 'ya ilke olarak iki yoldan etki etme olanağı vardır : Uyarma ve döndürme momentini. Kararlı olarak sabit bir tahrik gücünde çalışan bir senkron generatörde uyarma akımı büyüdüğünde yük açısı β küçüktü olsa bir değişikliğe uğrar, buna karşılık, döndürme momentinin büyütülmesi, bu açının büyütülmesine yol açar. Bundan başka gene belli bir senkron makinada makinanın yapısal özelliğine bağlı olan X_s senkron reaktansı da, yük açısı β 'ya etki eder. X_s senkron reaktansının doyma ile değişmediği varsayılırsa, değeri sabittir ve bu değer, ancak makinanın yapımı esnasında ayarlanabilir. Bu nedenle, yük açısı β 'nın işletmede bu yolla kontrolü olanaksızdır. Öte yandan, generatörde uyarma akımını değiştirmek esas olarak etkin

olmayan (reaktif) gücü ve generatörün uç gerilimini değiştirdiği, tahrik momentini değişikliğinin ise, etkin (aktif) gücü değiştirdiği bilinmektedir. Buradan şu sonuç çıkmaktadır ; yük açısı β 'nın kontrolü için, generatörün ya sabit bir etkin (aktif) güç vermesinden, ya da uç gerilimi sabit tutulmasından vazgeçmek zorunluluğu vardır.

Enerji sistemlerinde oldukça uzun yüksek gerilim iletim hatlarının kullanılması nedeniyle oluşan kapasitif akımının varlığı kararlılık açısından önemli bir sorundur. Bu akımların artması sistemli büyük değerlerde etkin olmayan (reaktif) güç oluşturur ve yüksek gerilim enerjisi iletim hatları üzerinden şebekeye bağlanan senkron generatörü kapasitif olarak çalışmaya iter. İşte bu nedenle β 'nın küçük değerlerinde bile, senkron generatörün kararlılık sorunu ortaya çıkar.

Döndürme momentine etkiyerek yük açısı β 'nın kontrolü, tahrik makinasının kontrolüne gitmek demektir. Bu kontrol işleminde, tahrik makinasını kontrol devresi dinamik davranış bakımından yavaş olduğu için sonuç olarak etkin (aktif) gücün kontrolü da istenilen hızlılıkta yapılamamaktadır. Buna karşılık bu günün yarı iletken güç elektroniği ile uyarma akımı, gereken bir hızlılıkta değiştirilebilmekte ve gerek gerilim gerekse yük açısı β 'nın zaman içinde istenilen biçim ve hızlılıkta kontrolü sağlanabilmektedir. İşte bu nedenle otomatik uyarma kontrolü, modern güç sistemlerini kararlılığını iyileştirme ve devam ettirme bakımından en etkin yöntemlerden biri olmuştur. Otomatik uyarma kontrolünün önemi ve bunun makinanın kararlılığı üzerine etkisi literatürdeki çalışmalardan da anlaşılmaktadır[2]

Ayrıca senkron makinaların demir doyumunun etkisi de kararlılığı önemli ölçüde etkiler. Demir doyumunun karşıt mıknatıslık etkisi meydana getirdiği ve bu zıt manyetizmanın etkisinin dikkate değer boyutlarda olduğu araştırmacılar tarafından son yıllarda ortaya konmuştur. Doyma etkisinin de göz önüne alınarak yapılan kararlılık analizlerinin deneysel sonuçlara daha yakın olduğu, doyma etkisinin ihmal edildiği analizlerin sonuçlarının daha yetersiz kaldığı yapılan incelemelerde görülmüştür. Doyma etkisi ancak yüksüz durumda ihmal edilebilecek kadar küçüktür.[8]

1.6. Çalışmanın Amacı

Görüldüğü gibi senkron makinaların kararlılıklarına etkiyen birçok faktör vardır. Bu tezde adından da anlaşılacağı gibi uyartım akımının ve bu akımın dalga

şeklinin kararlılığa etkisi incelenecektir. Bilindiği gibi senkron makinaların uyarımları doğru akımla yapılmaktadır. Literatürdeki hemen hemen bütün senkron makina analizleri uyarımın doğru akım olduğu varsayılarak yapılmaktadır. Ayrıca makinaların sarımları yapılırken harmonikleri yok etmek amacıyla yapılan adım ve dağıtım katsayıları da bu şarta uygun olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada uyarım akımı çeşitli dalga şekillerinde (yarı ve tam doğrultulmuş sinüs dalgası, yarı doğrultulmuş kare dalga gibi) kutuplara uygulanacak ve makinanın kararlılığına ne yönde etki ettiği araştırılacaktır. Doğru gerilimle uyarılan kutupların stator sargıları etrafında senkron devirle döndürülmesiyle statorda endüklenen gerilimin dalga şekliyle, yukarıda bahsedilen değişik dalga şekillerinin endüklediği gerilimlerin şekli karşılaştırılarak normlara uygun olup olmadığı araştırılacaktır.

BÖLÜM 2

SENKRON MAKİNALARDA HAVA ARALIĞINDAKİ MAGNETİK AKI VE HARMONİK ANALİZİ

2.1. Senkron Makinalarda Hava Aralığındaki Magnetik Akı

2.1.1. Çıkıntılı Kutuplu S. Makinalarda Hava Aralığındaki Magnetik Akı

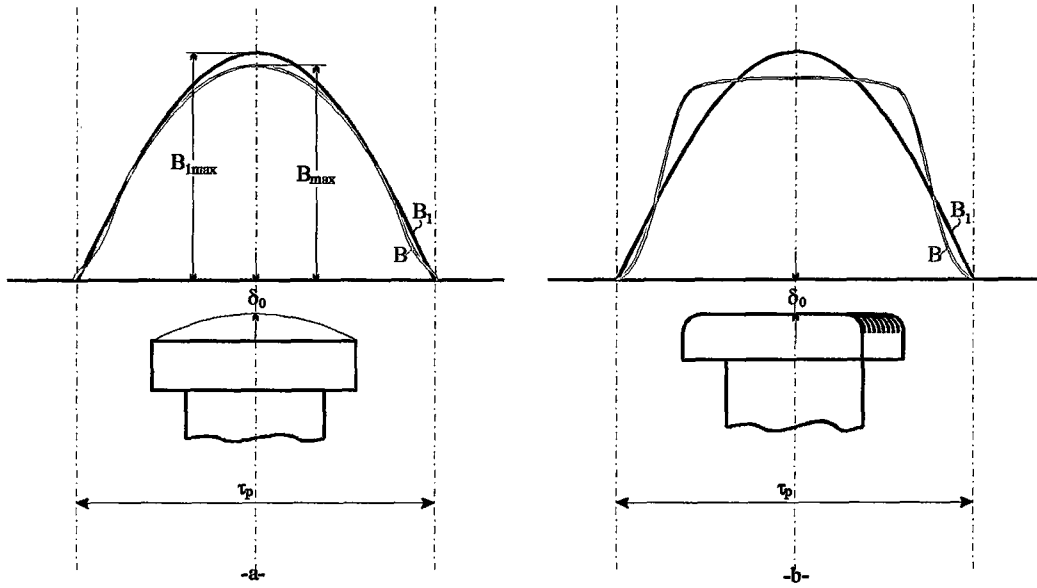
Şek. 2.1.a ve b'de çıkıntılı kutuplu senkron makinadaki akının dalga şekilleri görülmektedir. a şeklinde kutup başının bir daire merkezli yay şeklinde yapılmasıyla hava aralığındaki magnetik akı şekli (B) sinüs eğrisine çok benzer. b şeklinde ise kutup başını eğri yapmak suretiyle hava aralığı akısını sinüs eğrisine yaklaştırıldığı görülmektedir.

Bilindiği gibi hava aralığındaki magnetik akı stator çevresine yayılmış olan sargılarda aynı genlikte ve şekilde bir emk endüklemektedir. Bu nedenle hava aralığındaki dalga şeklinin bilinmesi son derece önemlidir.

Şayet makina generatör olarak çalışacaksa üretilen emk'in yönetmeliklerde belirlenen şekle uygun olması gerekir. Aksi halde makina işletmeye alınmaz ve üretici firmaya iade edilir.

Motor çalışmada ise endüvide endüklenen zıt emk, motorun momentini, yük açısını ve gücünü etkiler. Dolayısıyla makinanın kararlı çalışması zıt emk'e bağlıdır denilebilir.

Şek. 2.1.'deki dalga şekilleri kutuplara doğru gerilim uygulanması durumunda elde edilen eğrilerdir. Tezin adından da anlaşıldığı gibi kutuplara uygulanan gerilimin dalga şeklinin değiştirilmesi durumunda motor çalışmadaki büyüklüklerin ne şekilde değiştiği araştırılacaktır. Ancak öncelikle normal çalışmada, yani kutuplara uyarma gerilimi olarak doğru gerilim uygulanması durumunda endüklenen zıt emk ve harmoniklerin araştırılması gerekir. Bunun için bu dalga şekilleri Fourier serilerine açılarak analiz edilir.



Şek. 2.1. Kutup ayağının şekline göre endüklenen gerilimin değişimi.

Bu tip makinalarda hava aralığının endüvi çevresi boyunca sabit kalmamasından magnetik iletkenlik de endüvi çevresince değişir. Ohm kanununun magnetik devrelere uygulanmasından biliyoruz ki, $\phi = \mu.F$ 'dir. Amper sarımdan giderek ϕ 'yi dolayısıyla B 'yi hesap etmemiz için μ 'nün endüvi çevresi boyunca bölgesel değerlerinin bilinmesi gerekir. Bunun hesap yolu ile bulunması mümkündür fakat çok yorucu ve zaman alıcıdır.

Hava aralığı endüksiyon eğrisinin çıkartılmasında alan resimlerinden faydalanılır. Bu resimlerin matematik olarak incelenmesi büyük güçlükler doğurur. Halbuki bazı temel kurallardan faydalanarak alan şekillerini çizim yolu ile basit şekilde elde etmek mümkündür. Burada potansiyel çizgilerinden faydalanılır. Bu çizgiler daima alan çizgilerine dik olarak uzanırlar ve üzerinden akım geçen iletkende son bulurlar.

Potansiyel çizgileri, üzerinden akım geçen bölge dışında sabit magnetik potansiyelli çizgilerdir.

Şek. 2.2.'de çıkık kutuplu senkron makinanın endüvi ile kutup ayağı yüzeyi arasındaki hava aralığında ve kutuplar arası boşluğundaki alan ve potansiyel çizgilerinden meydana gelen alan resimleri görülmektedir. Buradan görüleceği üzere, kuvvet çizgileri kutup tabanından endüviye doğru uzanmakta ve potansiyel çizgileri de bunlara dik gitmektedirler. Kutup tabanı ile endüvi sınır çizgilerini de potansiyel

izgilerine sokabiliriz. Çünkü çok büyük olmayan endksiyonlarda yakınıda üzerinden akım geçen sargı bulunmadığı takdirde, kuvvet çizgileri demiri dik olarak terk ederler.

Şek. 2.3.'den herhangi bir alan tüpü ele alalım. Bu tüpün akısı Őuna eşittir.

$$\phi = \beta \cdot B_{ort} \cdot l \quad (2.1)$$

Burada l alanın yayılma uzunluğudur. Şimdi kutup tabanı ile endüvi arasındaki magnetik gerilimden giderek magnetik geçirgenliği hesaplayalım. Magnetik gerilimi F ile ifade edersek,

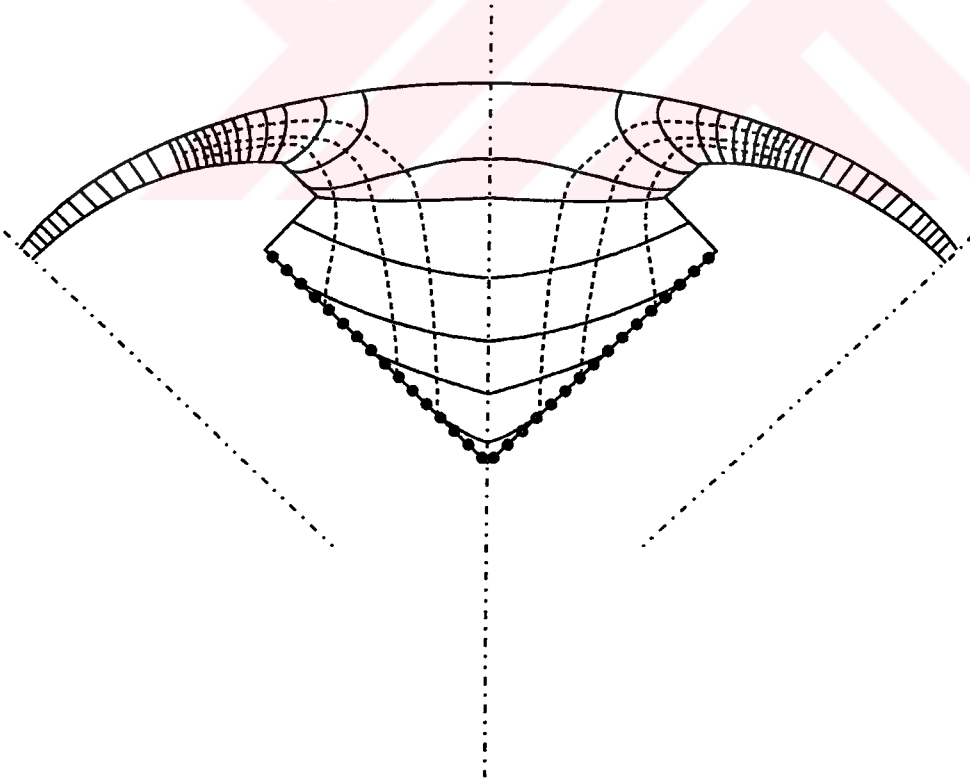
$$B_{ort} = \mu_0 \cdot H_{ort} = \mu_0 \cdot \frac{F}{\delta} \quad (2.2)$$

dir. Bu durumda trbn akısı;

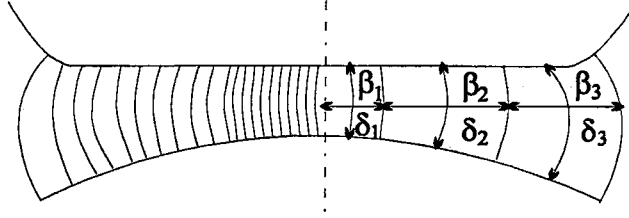
$$\phi = \mu_0 \cdot \frac{\beta \cdot l}{\delta} \cdot F \quad (2.3)$$

olur. Söz konusu tbn magnetik geçirgenliği,

$$\mu = \frac{\phi}{F} = \mu_0 \cdot l \cdot \frac{\beta}{\delta} \quad (2.4)$$



Şek. 2.2. Potansiyel izgileri.



Şek. 2.3. Bir kutup başındaki potansiyel çizgileri.

olarak bulunur. Tübün ortalama genişliğinin (β), ortalama uzunluk (δ)'ye eşit olması sağlanırsa bu takdirde magnetik geçirgenlik,

$$\mu = \mu_0 . l \quad (2.5)$$

olur. Bu suretle potansiyel çizgileri arasındaki bütün tüpler aynı magnetik geçirgenlik ve dolayısıyla aynı magnetik dirençde olurlar. Böyle bir tüpe birim tüp denir. Kağıt düzlemine dik l uzunluğundaki ve birim tüpler tarafından işgal edilmiş olan bütün hacim alanındaki geçirgenlik,

$$\mu = \mu_0 . m . l \quad (2.6)$$

dir. Burada “m” alan resmindeki potansiyel çizgileri arasında bulunan birim tüp sayısıdır.

Burada şu çizim metoduna uyulmalıdır. Potansiyel çizgileri ile alan çizgileri karesel olarak $\beta = \delta$ olacak şekilde öyle tertiplenmelidir ki, söz konusu boşluk tamamen dolsun ve eşit gerilim farkları gösteren potansiyel çizgileri akım taşıyan bölgelerde son bulsunlar. Yalnız şu husus unutulmamalıdır ki, karesel yapı, $\beta = \delta$, ancak akım taşıyan bölge dışında vardır.

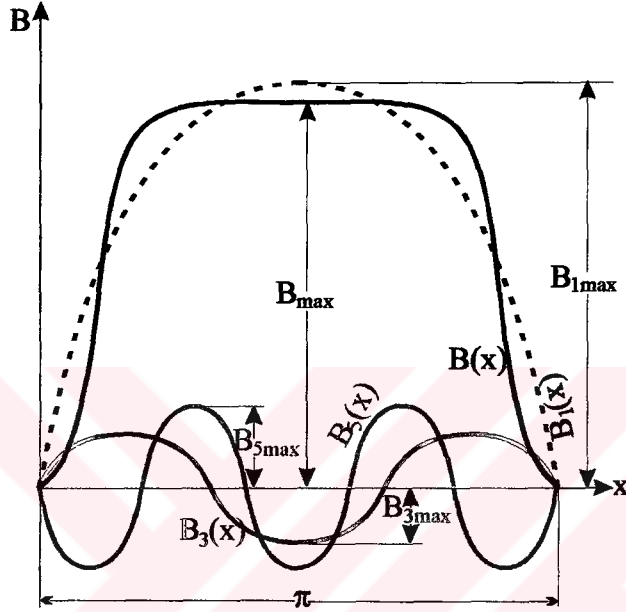
Şek. 2.1.a’da bu esasa göre çizilmiş çıkık kutuplu bir senkron makinaya ait hava aralığı alan resmi görülmekte olup, basitleştirmek amacı ile uyarma bobinleri kutup çekirdeği dış yüzeylerine çok ince kesitli iletken şeritleri olarak yerleştirilmiş şekilde gösterilmiştir.

Potansiyel çizgilerinin gidişi ve sona erdiği noktalar eşit gerilim farkları esasına göre tesbit olunur. Bundan sonra bu potansiyel çizgilerine dik alan çizgilerinin çizilmesinde karesel yapı esası göz önünde tutulur.

Ayrıca yapımı bitmiş makinalarda B eğrisi deneysel olarak bulunabilir. Endüksiyon eğrisinin deneysel olarak bulunmasında endüvide oluklardan birine bütün oluk bryunca bir iletken yerleştirilir. Kutup tekerleğinin sabit bir devir sayısı ile döndürülmesi sonucu oluğa yerleştirilmiş iletken,

$$e = B l v \text{ (volt)} \quad (2.7)$$

gerilimi endüklenir. Burada endüvi uzunluğu l ve hız v sabit olduğundan endüklenen gerilimin zamana göre değişimini B eğrisi tayin eder. Yani belirli bir ölçek farkı ile osiloskopta tesbit edilen “e” geriliminin değişimi B ’nin değişimini verir. Şek. 2.4.’de bir çıkık kutuplu makinaya ait uyarma alanı eğrisi ile birinci, üçüncü ve beşinci harmonikleri gösterilmiştir.



Şek. 2.4. Çıkıntılı kutuplu makinanın uyarma alan eğrileri.

Şimdi endüvi çevresine yayılmış olan alan eğrisine ait Fourier serisini yazalım.

$$B(x) = B_{1\max} \cdot \sin x + B_{3\max} \cdot \sin 3x + B_{5\max} \cdot \sin 5x + \dots + B_{v\max} \cdot \sin vx \quad (2.8)$$

Burada v . terimin genliği,

$$B_{v\max} = \frac{4}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} B(x) \cdot \sin vx \cdot dx \quad (2.9)$$

dir. Şek. 2.4.’den görüldüğü gibi, birinci harmonik yarı dalga uzunluğu τ_p ise

v ’inci harmoniğin yarı dalga uzunluğu da $\frac{\tau_p}{v}$ ’ye eşittir. Şu halde p çift kutuplu bir makina çevresinde p sayıda magnetik alan dalgası bulunurken v ’inci harmonik bakımından endüvi çevresine yayılacak magnetik alan dalga sayısı $\gamma \cdot p$ olacaktır. Elektriki olarak endüvi çevresi elektriki açı bakımından birinci harmonikte $p \cdot 360^\circ$ ’a

eşit iken, v 'inci harmonikte bu açı $v.p.360$ 'a eşit olacaktır. Bu düşünceden giderek endüvi çevresinde açı cinsinden aralarında γ_{geom} gibi bir uzaklık bulunan iki nokta arasındaki elektriki faz farkı birinci harmonikte $p.\gamma_{geom} = \gamma_1$ ve v 'inci harmonikte de $v.p.\gamma_{geom} = \gamma_v$ olacaktır.

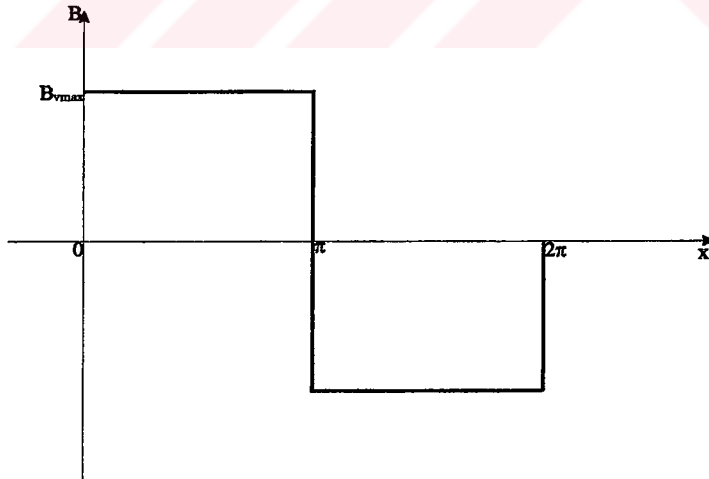
2.1.2. Yuvarlak Kutuplu (Turbo) S. Makinalarda Hava Aralığındaki Magnetik Akı

Yuvarlak rotorlu makinalardan söz ederken buradaki uyarma alanının değeri bobinlerin uyarma alanlarının toplamına eşittir. Her biri bir çift oluk içerisine yerleştirilmiş olan bu bobinlerin uyarma alanları birer dikdörtgen oluşturur. Bu dikdörtgenlerin toplamlarının trapez (yamuk) şeklinde bir alan eğrisi verir. Trapez şeklindeki bu alan eğrisinin Fourier analizi nispeten daha basit bir yoldan gidilerek yapılabilir. Önce kısmi uyarma alanlarının, yani dikdörtgenlerin analizi yapılır. Daha sonra aralarındaki faz farkları göz önüne alınarak Fourier ifadeleri yazılmış olan dikdörtgen alan eğrileri ile toplanır.

2.1.2.1. Rotorda Bir Çift Oluğun Bulunması Durumunda Akının Şekli

Böyle bir duruma ait alan eğrisinin birinci harmonik şekli aşağıdaki gibidir.

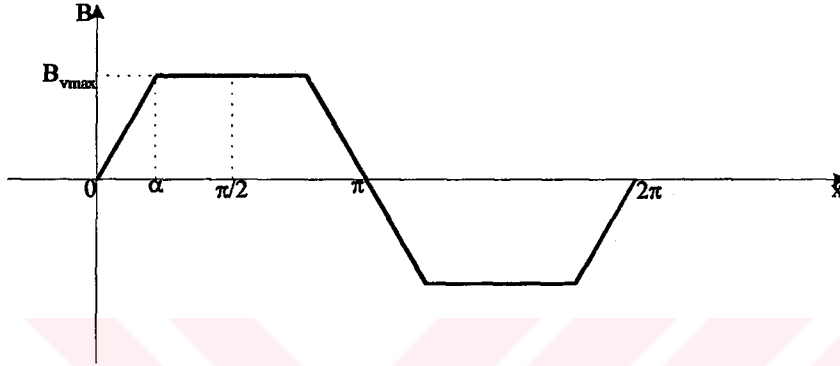
Bu eğrinin açı cinsinden yarım periyot uzunluğu π radyandır.



Şek. 2.5. Rotorda bir çift oluğun bulunması durumunda hava aralığı birinci harmonik dalga şekli.

2.1.2.2. Rotorda Bir Kutup Altındaki Bobinlerin 2/3'üne Uyarma Bobinleri Yerleştirilip 1/3'ünün Boş Bırakılması Durumunda Akının Şekli

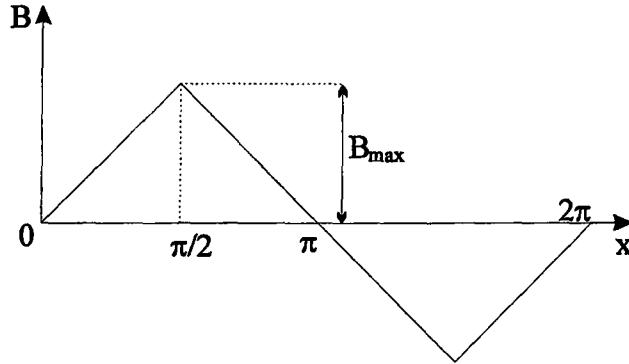
Burada meydana gelecek alan eğrisi basamaklı yamuk şeklinde olacaktır. Her çift kutba düşen q çift oluk sayısının çok büyük olduğu ve dolayısıyla basamaklı yamuk yerine düz kenarlı bir yamuk eğrisinin var olduğu kabul edilir. Böyle bir eğri aşağıda görülmektedir.



Şek. 2.6. Bir kutup altındaki bobinlerin 2/3'üne uyarma bobinleri yerleştirilip 1/3'ünün boş bırakılması durumunda hava aralığındaki manyetik akının şekli.

2.1.2.3. Uyarım Sargısının Bütün Oluklara Yerleştirilmesi Durumunda Akının Şekli

Bu durumda meydana gelecek hava aralığı manyetik alanının şekli basamaklı üçgen olacaktır. Oluk sayısının çok fazla olduğu varsayılarak bunun düz kenarlı bir üçgen olduğu kabul edilebilir.



Şek. 2.7. Uyarım Sargısının bütün oluklara yerleştirilmesi durumunda hava aralığı manyetik alanının şekli.

2.2. Hava Aralığındaki Magnetik Akının Fourier Serisi İle Harmonik Analizi

2.2.1. Genel Bilgi

Elektirik makinalarında rastlanan akım, gerilim, magnetik akı gibi büyüklükler zamanın veya uzaklığın periyodik fonksiyonu olarak değişirler. Bu değişimler her zaman sinüs formunda olmayabilir. Bu şekilde periyodik değişim göstererek belirli zaman aralıklarında aynı noktadan geçen bir dalga Fourier'e göre sinüs ve cosinüs dalgaların toplamı şeklinde ifade edilir.

$$f(x) = \underbrace{a_0}_{0} \cdot \underbrace{\cos(0x)}_1 + a_1 \cdot \cos(1x) + a_2 \cdot \cos(2x) + \dots + a_n \cdot \cos(nx) + \underbrace{b_0}_{0} \cdot \underbrace{\sin(0x)}_0 + b_1 \cdot \sin(1x) + b_2 \cdot \sin(2x) + \dots + b_n \cdot \sin(nx) \quad (2.10)$$

Bu ifade;

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(nx) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(nx) \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada;

a_0 =Dalganın ortalama değerini,

$a_n \cdot \cos(nx)$ =Cosinüs dalgasının genliğini ve frekansını

$b_n \cdot \sin(nx)$ =Sinüs dalgasının genliğini ve frekansını ifade eder.

İşte herhangi bir dalganın yukarıdaki açılımlarını elde etmeye dalganın

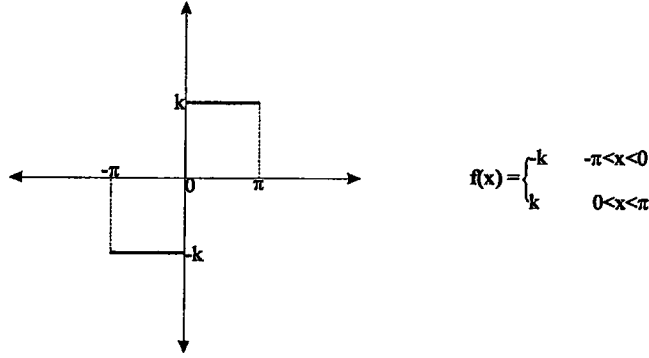
Fourier Serisine açılımı denir. Katsayılar ise;

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot dx \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \cos(nx) \cdot dx \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin(nx) \cdot dx \end{aligned} \quad (2.12)$$

şeklinde bulunur.

Senkron makinaların uyarma alanları periyodik fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar "x" eksenine ve orjine göre simetriktir. Bu nedenle $a_0=0$ olur. Ayrıca cosinüslü terimler ve çift harmonikler bulunmaz. Bu ifadenin doğruluğunu örnek bir problem üzerinde gösterelim.

Örnek Problem: Aşağıdaki gibi verilen bir fonksiyonun Fourier Serisine açılımını yapınız.



$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^0 -k \cdot dx + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} k \cdot dx = \frac{1}{2\pi} \left[-kx \right]_{-\pi}^0 + \frac{1}{2\pi} \left[kx \right]_0^{\pi} = \frac{1}{2\pi} (k \cdot 0 - k \cdot (-\pi)) + \frac{1}{2\pi} (k \cdot \pi - k \cdot 0)$$

$$a_0 = -\frac{k}{2} + \frac{k}{2} = 0$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 (-k) \cdot \cos(nx) \cdot dx + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} k \cdot \cos(nx) \cdot dx = \frac{1}{\pi} \left[-\frac{k}{n} \sin(nx) \right]_{-\pi}^0 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{k}{n} \sin(nx) \right]_0^{\pi}$$

$$a_n = \frac{-k}{\pi \cdot n} \underbrace{(\sin(0 \cdot n) - \sin(-n \cdot \pi))}_0 + \frac{k}{\pi \cdot n} \underbrace{(\sin(n \cdot \pi) - \sin(n \cdot 0))}_0 = 0$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 (-k) \cdot \sin(nx) \cdot dx + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} k \cdot \sin(nx) \cdot dx = \frac{1}{\pi} \left[-\frac{k}{n} (-\cos(nx)) \right]_{-\pi}^0 + \frac{1}{\pi} \left[-\frac{k}{n} \cos(nx) \right]_0^{\pi}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[\frac{k}{n} (\cos(n \cdot 0) - \cos(-n \cdot \pi)) - \frac{k}{n} (\cos(n \cdot \pi) - \cos(n \cdot 0)) \right]$$

$$n = 0 \Rightarrow b_0 = 0$$

$$n = 1 \Rightarrow b_1 = \frac{4 \cdot k}{\pi}$$

$$n = 2 \Rightarrow b_2 = 0$$

$$n = 3 \Rightarrow b_3 = \frac{4 \cdot k}{3 \cdot \pi}$$

$$n = 4 \Rightarrow b_4 = 0$$

$$n = 5 \Rightarrow b_5 = \frac{4 \cdot k}{5 \cdot \pi}$$

$$n = 6 \Rightarrow b_6 = 0$$

$$n = 7 \Rightarrow b_7 = \frac{4 \cdot k}{7 \cdot \pi}$$

$$f(x) = \underbrace{a_0 \cdot \cos(0 \cdot x)}_0 + \underbrace{a_1 \cdot \cos(1 \cdot x)}_0 + \underbrace{a_2 \cdot \cos(2 \cdot x)}_0 + \dots + \underbrace{a_n \cdot \cos(nx)}_0 + \underbrace{b_0 \cdot \sin(0 \cdot x)}_0 + b_1 \cdot \sin(1 \cdot x) + \underbrace{b_2 \cdot \sin(2 \cdot x)}_0 + \dots + b_n \cdot \sin(nx)$$

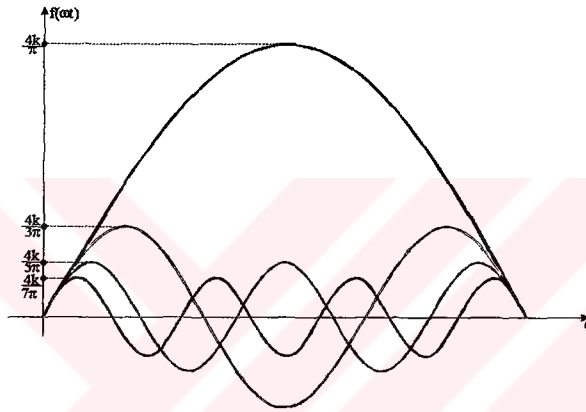
Buna göre $f(x)$ fonksiyonu

$$f(x) = \frac{4k}{\pi} \sin x + \frac{4k}{3\pi} \sin 3x + \frac{4k}{5\pi} \sin 5x + \frac{4k}{7\pi} \sin 7x$$

$$f(x) = \frac{4k}{\pi} \left[\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \frac{1}{7} \sin 7x \right]$$

şeklinde yazılır.

Aşağıda $x = \omega t$ için fonksiyonun hesaplanan harmonik eğrileri görülmektedir.



2.2.2. Yuvarlak Kutuplu Senkron Makinalarda Uyarma Alanının Harmonik Analizi

2.2.2.1. Rotorda Bir Çift Oluğun Bulunması Durumu

Bu durum için hava aralığı manyetik akısının şekli dikdörtgen biçimindedir (Şek. 2.5). Bu eğri x eksenini ile koordinat başlangıcına göre simetrik olduğundan, tek dereceden sinüs terimlerini içerir ve böyle bir eğriye ait Fourier serisinin v 'inci teriminin genliği aşağıdaki gibi bulunur.

$$B_{v \max} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B(x) \cdot \sin vx \cdot dx \quad (2.13)$$

veya

$$B_{v \max} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B(x) \cdot \sin vx \cdot dx \quad (2.14)$$

2.13 numaralı denklemde $B(x) = B$ yazılacak olursa,

$$B_{v\max} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B \sin vx \cdot dx = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{B}{v} \left| -\cos vx \right|_0^{\pi} = \frac{4 \cdot B}{v \cdot \pi} \quad (2.15)$$

Aynı şekilde 2.14 nolu denklemi de kullanarak $B_{v\max}$ değerini bulabiliriz.

$$B_{v\max} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B \sin vx \cdot dx = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{B}{v} \left| -\cos vx \right|_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{4 \cdot B}{v \cdot \pi} \quad (2.16)$$

Buradan Şek. 2.5'deki eğriye ait Fourier serisi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$B(x) = \frac{4}{\pi} B \left[\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots + \frac{1}{v} \sin vx + \dots \right] \quad (2.17)$$

2.2.2.2. Rotorda Bir Kutup Altındaki Bobinlerin 2/3'üne Uyarma Bobinleri Yerleştirilip 1/3'ünün Boş Bırakılması Durumu

Bu durumda hava aralığı akısının biçimini gösteren Şek. 2.6'daki eğri x eksenine ve koordinat başlangıcına nazaran simetriktir. Özellikle yuvarlak rotorlu senkron makinaların rotor sargılarında rastlanan böyle bir alan eğrisinin 0 ile $\pi/2$ arasında integralinin alınması gerekir. Bu değerler arasında eğri iki kısımdan oluşur. Birinci kısım 0- α aralığı, ikinci kısım ise α - π aralığıdır. Bu iki kısım ayrı ayrı incelenerek toplanır ve toplam sonucu 4 ile çarpılır. Buna göre,

$$B_{v\max} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\alpha} \frac{B_{\max}}{\alpha} x \cdot \sin vx \cdot dx + \frac{4}{\pi} \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} B_{\max} \cdot \sin vx \cdot dx \quad (2.18)$$

Denklemin birinci kısmına kısmi integral uygulanırsa;

$$\begin{aligned} \int_0^{\alpha} x \cdot \sin vx \cdot dx &= \left| -\frac{x}{v} \cos vx \right|_0^{\alpha} - \int_0^{\alpha} -\frac{1}{v} \cos vx \cdot dx \\ \frac{B_{\max}}{\alpha} \int_0^{\alpha} x \cdot \sin vx \cdot dx &= \frac{B_{\max}}{\alpha} \left| -\frac{x}{v} \cos vx + \frac{1}{v^2} \sin vx \right|_0^{\alpha} \\ &= \frac{B_{\max}}{v} \left[-\cos v\alpha + \frac{1}{v\alpha} \sin v\alpha \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.18 denkleminin ikinci kısmı için ise şu işlemler yapılır.

$$B_{\max} \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \sin vx \cdot dx = \frac{B_{\max}}{v} \left| \cos vx \right|_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha} = \frac{B_{\max}}{v} \cos v\alpha \quad (2.20)$$

Şimdi 2.19 ve 2.20 denklemlerinden elde edilen eşitlikleri 2.18 denkleminde yerine koyalım. Bu durumda 2.18 denklemi,

$$B_{v\max} = \frac{4 B_{\max}}{\pi v} \left[-\cos v\alpha + \frac{1}{v\alpha} \sin v\alpha + \cos v\alpha \right] \quad (2.21)$$

$$B_{v\max} = \frac{4 B_{\max}}{\pi v} \frac{1}{v\alpha} \sin v\alpha = \frac{4 B_{\max}}{\pi \alpha v^2} \sin v\alpha$$

olarak yazılabilir. Bu bağıntıyı trapez şeklindeki alan eğrisi için Fourier serisine açacak olursak,

$$B(x) = \frac{4 B_{\max}}{\pi \alpha} \left[\sin \alpha \cdot \sin x + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \cdot \sin 3x + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \cdot \sin 5x + \dots + \frac{1}{v^2} \sin v\alpha \cdot \sin vx + \dots \right] \quad (2.22)$$

2.22 denklemi trapez şeklindeki bir eğriye sahip alanın yalnız tek dereceli harmonikleri içeren Fourier serisini değişik harmoniklerin genlikleriyle birlikte vermektedir. Görüldüğü gibi trapez şeklindeki alan eğrisi çok avantajlıdır. Çünkü yüksek değerlikli harmonikler kuvvetli bir şekilde bastırılmaktadır.[3]

2.2.2.3. Uyarım Sargısının Bütün Oluklara Yerleştirilmesi Durumu

Bu durumda hava aralığı manyetik akısının şekli üçgen olmaktadır. Üçgen alan bir önceki konuda incelenen trapez alanın özel bir halidir. Şek. 2.7.'de görülen bu alan da Fourier serisine açılabilir. Burada trapez alanda α ile gösterilen büyüklük $\pi/2$ 'ye eşittir.

Bu durumda trapez alanın Fourier serisinde $\alpha = \pi/2$ konmak suretiyle,

$$v = 2n - 1 \Rightarrow \sin v\alpha = \sin \frac{v\pi}{2} = 1$$

$$v = 2n + 1 \Rightarrow \sin v\alpha = \sin \frac{v\pi}{2} = -1$$

olur. Burada “n” tam ve tek bir sayıdır. Şu halde üçgen alanın Fourier serisi aşağıdaki gibi açılabilir.

$$B(x) = \frac{8 B_{\max}}{\pi^2} \left[\sin x - \frac{1}{9} \sin 3x + \frac{1}{25} \sin 5x - \dots \right] \quad (2.23)$$

2.3. Senkron Generatörde Endüklenen emk'in Hesaplanması

Hava aralığında oluşan döner alan stator sargısında $e = B.l.v$ (V) gerilimini indükler. 1. harmoniğin gerilimi ise,

$$e_1 = B_1.l.v \text{ (V)} \quad (2.24)$$

dır.

$v = \text{hız} = \frac{\text{yol}}{\text{zaman}}$ olduğuna göre magnetik alanın bir alternans yapana kadar

aldığı yol τ_p ve geçen zaman da yarım periyoda ($T/2$) eşittir. Bu durumda,

$$v = \frac{\tau_p}{T/2} \quad (2.25)$$

$T = \frac{1}{f}$ değeri 2.25 denkleminde yerine konursa,

$$v = \frac{\tau_p}{1/2f} = \tau_p 2f \quad (2.26)$$

olarak bulunur. Bu değer 2.24'e uygulanırsa $e_1 = B_1 l \tau_p 2f$ olur. Magnetik alan eğrisinin Fourier serisine açılımından,

$$B = \frac{4B'}{\pi} \left(\text{Sin}x + \frac{1}{3}\text{Sin}3x + \frac{1}{5}\text{Sin}5x + \dots \frac{1}{n}\text{Sin}x \right) \quad (2.27)$$

olarak bulunmuştur. Bu durumda 1. harmonik akısı $B_1 = \frac{4B'}{\pi} \text{Sin}x$ olacaktır.

$x = \omega t$ olduğundan

$$B_1 = \frac{4B'}{\pi} \text{Sin}\omega t \quad (2.28)$$

olarak yazılabilir. Bu durumda stator sargılarında endüklenen gerilimin ani değeri ;

$$e_1 = \frac{4B'}{\pi} l \tau_p 2f \text{Sin}\omega t \text{ (V)} \quad (2.29)$$

olarak bulunur. Maksimum ve etkin değerleri ise sırasıyla;

$$E_{1\max} = \frac{4B'}{\pi} l \tau_p 2f \quad (2.30)$$

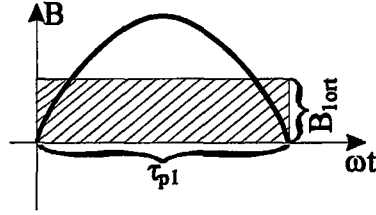
$E_{\text{eff}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}$ ve $\frac{4B'}{\pi} = B_{1\max}$ olduğundan,

$$E_{\text{eff}} = 2 \frac{4B'}{\pi} \frac{1}{\sqrt{2}} l \tau_p f$$

$$E_{\text{eff}} = \frac{2l}{\sqrt{2}} \tau_p f B_{1\max} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}}$$

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{2} B_{1\max} l \tau_p f \quad (2.31)$$

olarak bulunur. Şek. 2.8.'de $S_1 = B_{1ort} \tau_{p1}$ olduğundan,



Şek. 2.8. Manyetik alanın açısal hızla değişimi.

$$B_{1ort} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} B_{1max} \sin \omega t . d\omega t$$

$$B_{1ort} = \frac{1}{\pi} B_{1max} \int_0^{\pi} \sin \omega t . d\omega t$$

$$B_{1ort} = \frac{B_{1max}}{\pi} [-(\cos \pi - \cos 0)]$$

$$B_{1ort} = \frac{2B_{1max}}{\pi} \quad (2.32)$$

olarak ortalama magnetik akı değeri bulunmuş olur. Bu durumda;

$$S_1 = \frac{2}{\pi} B_{1max} \tau_{p1} \text{ olur. } \Phi_{1max} = S_1 l \text{ denkleminde}$$

$$\Phi_{1max} = \frac{2}{\pi} B_{1max} \tau_{p1} l \quad (2.33)$$

elde edilir. Bu değerler 2.31 denkleminde yerine konursa,

$$E_{eff} = \sqrt{2} \frac{\pi}{2} \Phi_{1max} f \text{ (V) (N=1 sipir için)}$$

$$E_{eff} = 2,22 \Phi_{1max} f \text{ (V) (N=1 sipir için)} \quad (2.34)$$

$$E_{eff} = 2,22 . \Phi_{1max} . f . N \text{ (N sarım için)} \quad (2.35)$$

Bir sarımda 2 iletken bulunduğundan dolayı

$$E_{eff} = 2.2,22 . \Phi_{1max} . f . N$$

$$E_{eff} = 4,44 . \Phi_{1max} . f . N \text{ (V)} \quad (2.36)$$

olarak bir faz için endüklenen elektromotor kuvvet bulunur. Makinanın sargı özelliklerinin belirlediği adım katsayısı (k_a), dağıtım katsayısı (k_d) ve n. harmoniğin

akı olarak maksimum değerinin 1. harmoniğin maksimum değerine oranına eşit olan form faktörünün (k_f) de dikkate alınmasıyla;

$$E_{eff} = 4,44 \cdot \Phi_{1max} \cdot f \cdot N \cdot k_a \cdot k_d \cdot k_f \text{ (V)} \quad (2.37)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem senkron makinanın endüvisinde endüklenen emk'ti verir. Bu denklemde sabit frekansta endüklenen emk'ti değiştiren büyüklüğün sadece ϕ , dolayısıyla B magnetik akısı olduğu görölmektedir. Literatürde genellikle yukarıdaki son denklem kullanılır. Dikkat edilirse bu denklemin elde edilmesinde uyartım akımının tam bir doğru akım olduğu varsayılmakta ve hava aralığındaki magnetik alanın bir kare dalga şeklinde değiştiği kabul edilmektedir. Uçlardan alınan gerilimin 1. harmoniğini sinüsoidal yapmak için ise adım kısaltması veya bobinlerin dağıtılması gibi tedbirler alınmaktadır. Deneysel şalışmalarda kullanacağımız senkron makina da bu şekilde kutuplarına doğru akım uygulanacağı varsayılarak imal edilmiştir. Değişik dalgalı uyartım akımlarında adım kısaltması ve bobin dağıtılmasının da gerilimin şekline ne yönde etki ettiği deneysel olarak tez sonunda görölecektir.

BÖLÜM 3

SENKRON MOTORLAR

Bir yükü besleyen paralel bağlı iki alternatörden birinin mekanik enerjisi kesilirse, bu alternatör diğerinden kendi kayıplarını karşılayacak kadar bir akım çeker ve senkron devirle motor olarak çalışmasına devam eder. Senkron motor yapı olarak alternatörden farksızdır. Bu nedenle Bölüm 2’de belirtilen hava aralığı magnetik alanları ve endüklenen gerilimler için söylenenler senkron motorlar için de geçerlidir. Bu tezde yapılacak deneysel çalışmalar ve hesaplamalar motor çalışma durumu için yapılacaktır. Bu nedenle senkron motorların yük değişimi ve uyarım akımı değişimlerine nasıl tepki verdiğini incelemek yerinde olacaktır.

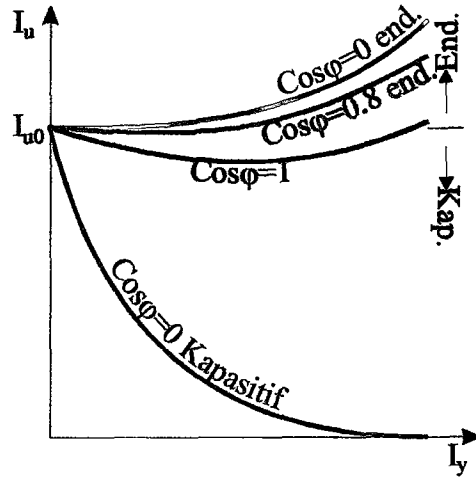
3.1. Senkron Motor Karakteristikleri

3.1.1. Ayar Karakteristiği

Senkron motorun sabit uç gerilimi, sabit $\cos\phi$ ve sabit moment altında uyarım akımı ile yük akımı arasındaki ilişkiye ‘ayar karakteristiği’ adı verilir. Bu eğrileri elde etmek için ayarlanabilen endüktif, kapasitif ve omik yüklere ihtiyaç vardır.

Genel olarak senkron motor ayar karakteristiği eğrileri Şek. 3.1.’de görülmektedir.

Ayar karakteristikleri $I_u=f(I_y)$ bağıntısını gösterir. Şekle dikkat edilirse belirli bir yük akımı için endüktif yükte kapasitif ve omik yüke göre daha fazla uyarım akımına gerek vardır. I_{u0} ise boş çalışmada anma uç gerilimi için gereken uyarım akımıdır.

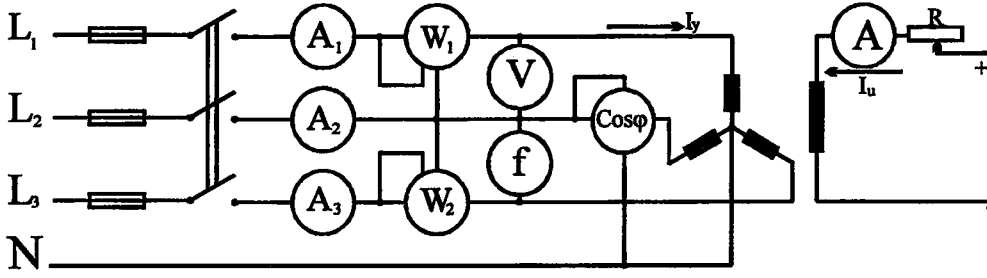


Şek. 3.1. Senkron motor ayar karakteristiği.

3.1.2. Senkron Motorun “V” Eğrileri

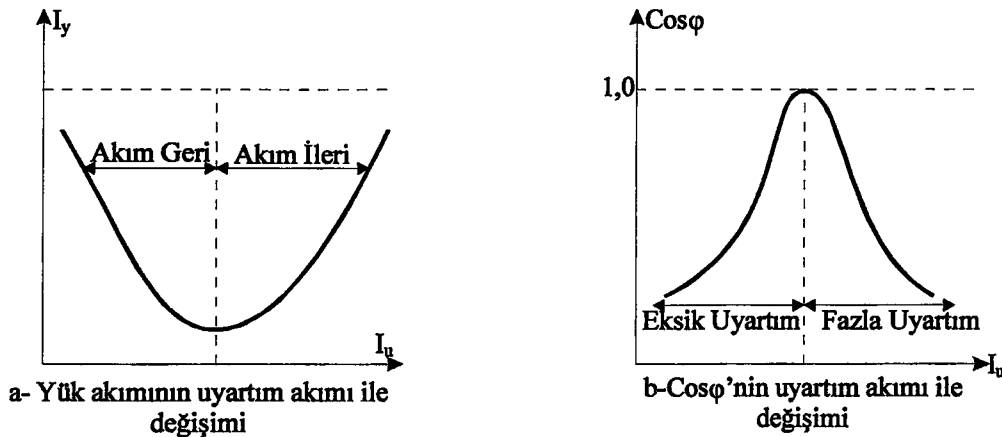
Senkron motorların “V” eğrileri; motora uygulanan şebeke geriliminin ve miline bağlanan yükün sabit tutularak endüvi akımı I_y ile uyarım akımı I_u arasındaki ilişkiyi gösterir. Ayrıca uygulanan gerilimin frekansı da sabit olmalıdır. Bu durumda motorun milinden çekilen güç $P = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_y \cdot \cos\phi$ 'dir. Diğer değerler sabit olduğuna göre, güç katsayısı $\cos\phi$ 'nin değişmesi yük akımını değiştirir. Daha önce de belirtildiği gibi, güç katsayısı $\cos\phi$, uyarım akımına bağlı olarak değiştirilebilir. Güç katsayısının büyümesi ile yük akımı küçülür. $\cos\phi$ 'nin en büyük değeri olan 1'de, yük akımı en küçüktür. Bu durumda senkron motor omik çalışmaktadır. Belli bir yükte çekilen en küçük yük akımına ait uyarım akımı değerinden daha küçük uyarım akımında senkron motor endüktif, daha büyük uyarım akımında ise kapasitif çalışır.

Uyarım akımı değiştikçe senkron motorun güç katsayısı ve yük akımı değişir. Bu sırada demir ve bakır kayıplarında meydana gelecek küçük dikkate alınmazsa; senkron motorun mil gücü sabit kalır. Bu deneyden elde edilecek eğriler V harfine benzediğinden bu eğrilere senkron motorun “V” eğrileri denir.



Şek. 3.2. V eğrilerini elde etmek için gerekli deney bağlantı şeması.

V eğrilerini elde etmek için Şek. 3.2.'deki bağlantı yapılır. Bu bağlantı yapıldıktan sonra senkron motor çalıştırılır. (Bu sırada motor boşa çalışmaktadır). Boştaki V eğrisini çizmek için motorun çektiği yük akımı, uyarım akımı ayarlanarak, en küçük değerine indirilir. Bu andaki $\cos\phi$ değeri de saptanmalıdır. Uyarım akımının bu değeri senkron motorun omik olarak çalışması için gereken akımdır. Bu uyarım akımı yavaş yavaş artırılır. Her kademe yük akımı ve $\cos\phi$ değerleri alınır. Yük akımı anma akımının 1.5 ile 2 katı oluncaya kadar uyarım akımı artırılmağa devam edilir. Bu çalışma değerleri kapasitif çalışma durumunu verir. Bundan sonra tekrar en küçük yük akımını veren uyarım akımına gelinir. Bu uyarım akımından daha küçük uyarım değerlerinde senkron motor endüktif çalışmaktadır. Gene uyarım akımı yavaş yavaş azaltılır. Her kademe yük akımı ve $\cos\phi$ cetvel şeklinde yazılır. Bundan sonra senkron motor çeşitli yüklerde yüklenip aynı şekilde uyarım akımı ayarlanarak yük akımı ve $\cos\phi$ değerleri saptanır. Bundan sonra uyarım akımı yatay eksen, yük akımı veya $\cos\phi$ değerleri de düşey eksen üzerinden işaretlenerek senkron motorun V eğrileri çizilir.



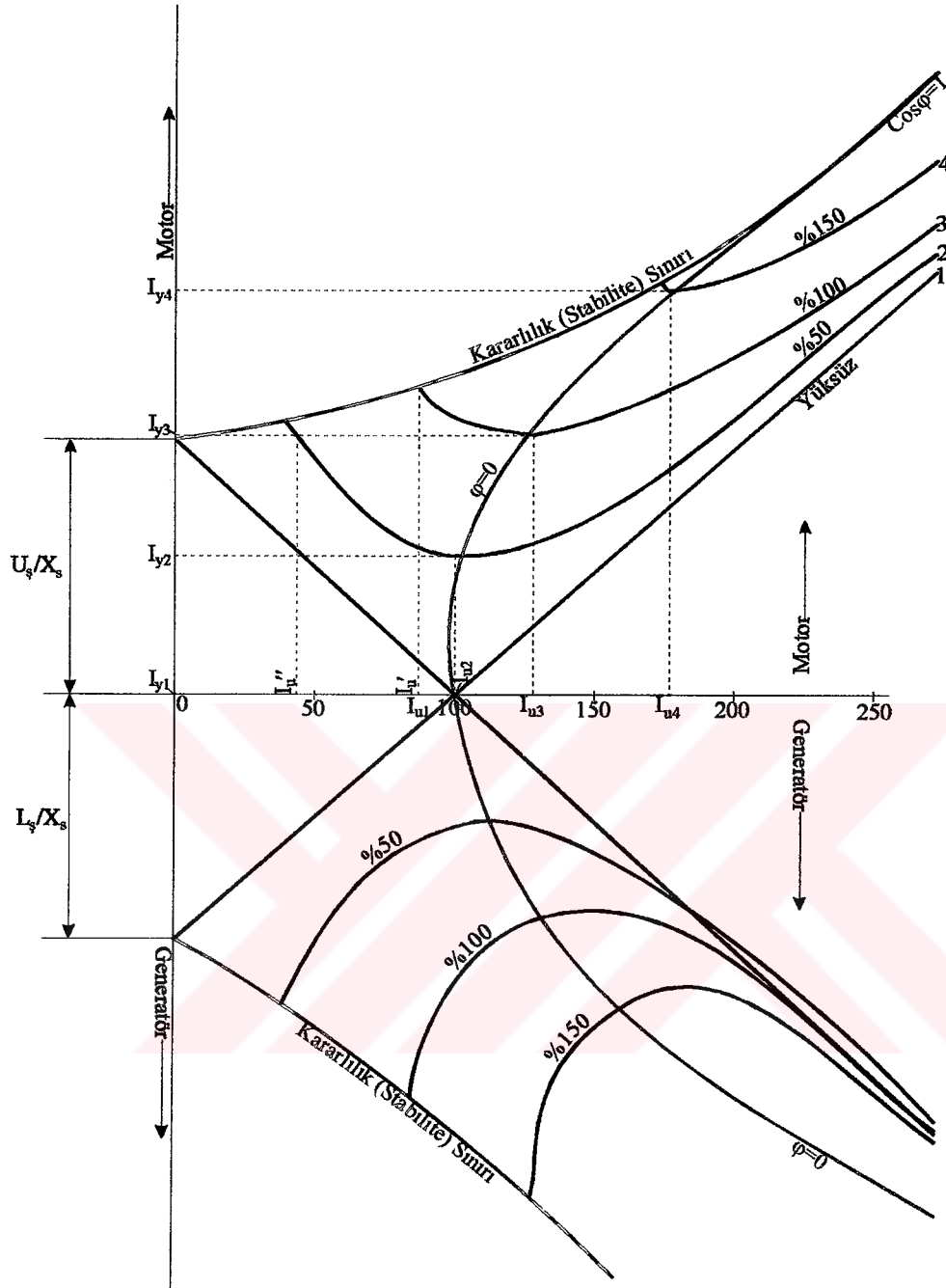
Şek. 3.3. Yük akımı ve $\cos\phi$ 'nin uyarımla değişimleri.

Senkron motorun istenen yük kademelerinde V eğrileri bir arada çizildiğinde, eğrilerin farklı oldukları görülür. Şek. 3.4.'de boştaki eğrinin yükteki eğriden daha farklı olduğu görülüyor. 1 nolu eğri boşta, 2 nolu eğri yarı yükte, 3 nolu eğri tam yükte ve 4 nolu eğri de $1,5.P_{anma}$ yükündeki V eğrileridir. Görüldüğü gibi her yük kademesinde omik çalışma durumları için değişik uyartım akımına gerek vardır. Senkron motor boşta iken omik durum için I_{u1} uyartımı gerekirken, yarı yükte omik durum için daha büyük I_{u2} uyartımına gerek vardır. Tam yükte ise aynı durum için daha büyük uyartım akımı I_{u3} gerekir. Motorun yükü anma yükünden fazla olduğundan gerekli uyartım akımı daha artar ve I_{u4} olur. Bunun nedeni endüvi reaksiyonunun çeşitli yükler için farklı olması ve doymanın artmasıdır. Boştaki endüvi reaksiyonu ile yüklü durumdaki endüvi reaksiyonu farklı olduğundan, uç gerilimin sabit kalabilmesi için (örneğin omik durumda) yüklü durumda, boştakinden daha fazla uyartım akımına gerek vardır. $I_{u4} > I_{u3} > I_{u2} > I_{u1}$ dir. Yük altında çalışan bir senkron motorda, uyartım, anma değerinden fazla ise motor akımı I_y , uç gerilimi U_s 'den ileride olup, senkron motor kapasitif çalışır. Uyartım akımı, küçükse, akım I_y , gerilimden geride olup, motor bu defa endüktif çalışır.

Uyartım akımı çok geniş sınırlar içinde azaltılıp artırılmaz. Örneğin Şek. 3.4.'da tam yük için uyartım akımı I_u' den ve yarı yük için I_u'' den küçük olamaz. Aksi halde motor kararlılık sınırını geçip kilitlenme durumundan ayrılır. Bu anda motordaki yük momenti, motor momentinden fazladır. Senkron motorların çoğunda anma yükünün %40'ına kadar olan küçük yüklerde uyartım sıfır olduğu halde motor senkronizmden kopmayabilir.

Boşta ve çeşitli yük değerlerinde omik durum için gerekli yük akımları farklıdır. Boşta kayıpları karşılayacak kadar olan I_{y1} akımı, senkron motor yüklendikçe I_{y2} , I_{y3} , I_{y4} değerlerini almaktadır. Bu durumda senkron motordaki bakır kayıpları ve çok az da olsa demir kayıpları artar.

Şek. 3.5.'de ise uyartım akımının değişmesi ile çeşitli yük kademelerindeki güç katsayısı değerleri görülmektedir. Eğrilerin tepe değerleri daima $\cos\phi=1$ değerinden geçer. $\cos\phi$ değerlerini saptamak için cosömetre yoksa devreye iki vatmetre bağlanarak (aron vatmetresi) $\cos\phi$ değerleri aşağıdaki formüllerle bulunur.



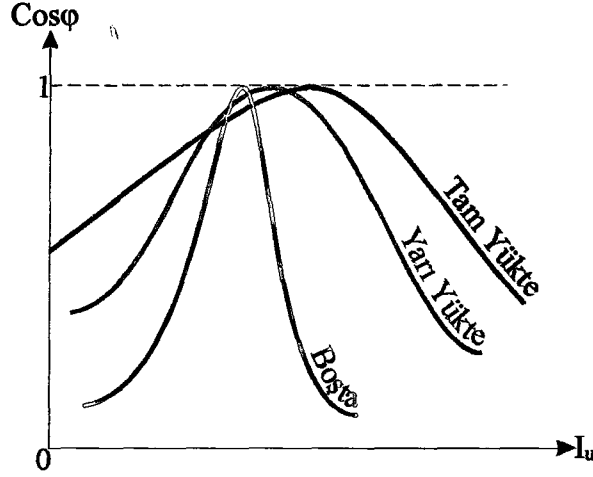
Şek. 3.4. Senkron makinanın “V” eğrileri.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_1 + P_2}{\sqrt{3} U_s I_y} \text{ veya } \operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \cdot \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \quad (3.1)$$

Bu formülde $\cos \varphi = 0.5$ için $P_2 = 0$

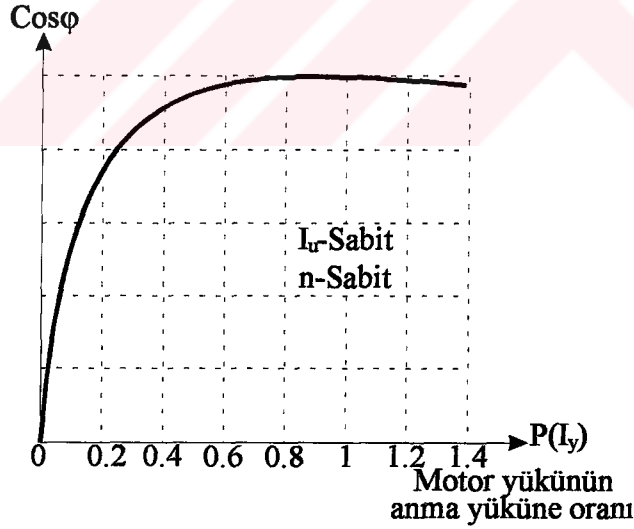
$\cos \varphi > 0.5$ için $P_2 > 0$

$\cos \varphi < 0.5$ için $P_2 < 0$ dır



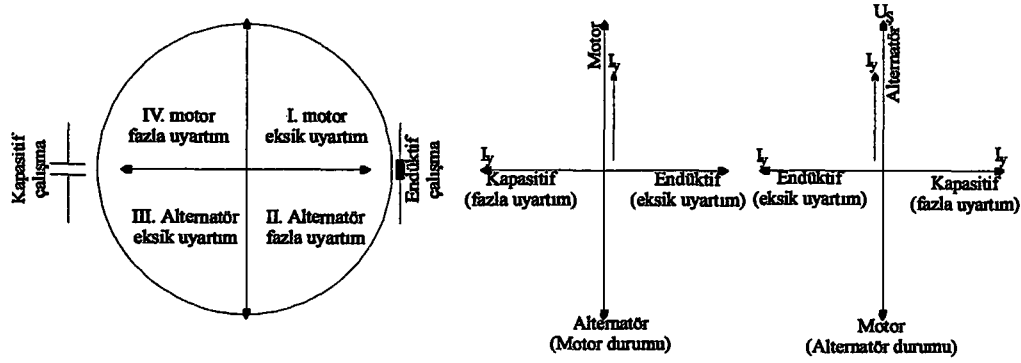
Şek. 3.5. Çeşitli yük durumlarında uyarım akımı ile güç katsayısının değişimi.

V eğrileri Şek. 3.4.'de görüldüğü gibi hem motor hem de alternatör olarak çalışırken çıkartılabilir. Senkron motorun sabit uyarım ve değişik yük durumunda güç katsayısının değişmesi de Şek. 3.6.'da görülmektedir. Eğride en iyi güç katsayısının tam yük ve tam yüke yakın yüklerde olduğu, motor anma yükünden daha fazla yüklendikçe $\cos\phi$ 'nin azaldığı görülmüyor. Küçük yüklerde de güç katsayısı bir hayli kötüdür.



Şek. 3.6. $\cos\phi$ 'nin yükle değişimi.

Senkron makina alternatör olarak çalışırken, fazla uyarım, alternatörün endüktif çalışmasına; eksik uyarım ise kapasitif çalışmasına neden oluyordu. Motor durumunda ise fazla uyarım kapasitif, eksik uyarım da endüktif çalışmaya neden olur. Şek. 3.7.'de bunlar görülmektedir.



Şek. 3.7. Motor ve generetör çalışma durumları için uyarım akımları.

3.2. Senkron Motorlarda Güç, Moment ve Moment Açısı

Senkron motorlarda giriş gücü, motorun şebekeden çektiği güçtür. Senkron motor tarafından oluşturulan iç güç (mekanik güç) ise, motorda indüklenen zıt emk, yük akımı ve bu iki büyüklük arasındaki açının kosinüsünün çarpımı ile bulunur.

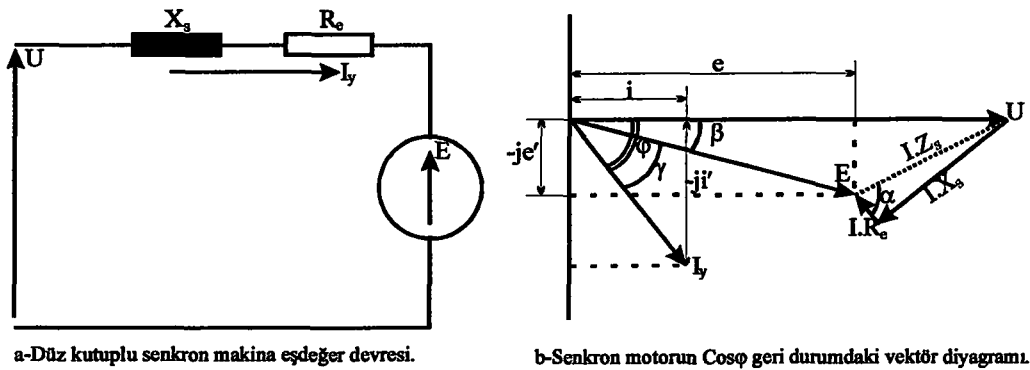
Giriş gücü,

$$P_g = U \cdot I_y \cdot \cos \varphi \quad (3.2)$$

İç (mekanik) güç ise;

$$P_i = E \cdot I_y \cdot \cos \gamma \quad (3.3)$$

olarak ifade edilebilir. Şek. 3.8.a'da silindirik kutuplu bir senkron motorun eşdeğer devresi ve b'de ise $\cos \varphi$ geri duruma ait vektör diyagramı görülmektedir.



Şek. 3.8. Yuvarlak kutuplu senkron makina eşdeğer devresi ve $\cos \varphi$ geri vektör diyagramı.

Eşdeğer devredeki R_a etkin direnci, X_s ise senkron faz reaktansını belirler. Burada senkron makina, motor olarak çalıştığından enerji, şebekeden endüklenen zıt

emk'te ters yönde akar. Alternatör olarak çalışma durumunda ise enerji endüklenen zıt emk'den şebekeye doğru akar. Eşdeğer devrede $Z_s^2 = R^2 + X_s^2 = R + jX_s$ olarak ifade edilir. Eşdeğer devreye Kirşof'un gerilimler kanununu uygularsak,

$$\bar{U} - \bar{I}_y \bar{X}_s - \bar{I}_y \bar{R} - \bar{E} = 0 \quad (3.4)$$

ifadesini yazabiliriz. Buradan;

$$\bar{U} - \bar{E} - \bar{I}_y \bar{Z}_s = 0 \Rightarrow \bar{I}_y = \frac{\bar{U} - \bar{E}}{\bar{Z}_s} \quad (3.5)$$

olarak bulunur. I_y akımı motorun bir fazından geçen yük akımıdır. Akım ifadesini kutupsal koordinat sistemine göre ve zıt emk'ti de dikkate alarak yazarsak,

$$\bar{I}_y = \frac{U.e^{j\beta} - E.e^{j0}}{Z_s.e^{j\alpha}} \quad (3.6)$$

olarak belirtilir. Bu ifade düzenlenecek olursa,

$$\bar{I}_y = \frac{U.e^{j\beta}}{Z_s.e^{j\alpha}} - \frac{E.e^{j0}}{Z_s.e^{j\alpha}} = \frac{U}{Z_s} e^{j(\beta-\alpha)} - \frac{E}{Z_s} e^{j(-\alpha)}$$

olur. Şek. 3.8.'de $E = e - je'$ ve $\bar{I}_y = i - ji'$ olarak görülmektedir. Bu değerlerin akım eşitliğinde yerine konmasıyla,

$$I_y = \frac{U - (e - je')}{Z_s} = \frac{U - (e - je')}{R + jX_s} \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitliğin pay ve paydasını $R - jX_s$ ile çarparsak,

$$I_y = \frac{[U - (e - je')](R - jX_s)}{(R + jX_s)(R - jX_s)} = \frac{U.R - e.R + je'.R - jU.X_s + je.X_s + e'.X_s}{R^2 + X_s^2} \quad (3.8)$$

olarak akım eşitliği bulunmuş olur.

3.2.1. İç Güç (Mekanik Güç)

$Z_s^2 = R^2 + X_s^2$ ve $I_y = i - ji'$ ve iç güç (mekanik güç) eşitliği

$P_i = ei + e'i'$ olarak bilindiğine göre,

$$i - ji' = \frac{(U.R - e.R + e'.X_s) - j(U.X_s - e.X_s - R.e')}{R^2 + X_s^2}$$

ve iç güç ise,

$$P_i = \frac{e(U.R - e.R + e'.X_s) - e'(U.X_s - e.X_s - R.e')}{R^2 + X_s^2} \quad (3.9)$$

olarak yazılabilir. $e = E \cos \beta$ $e' = E \sin \beta$ olduğundan bu

değerlerin(3.9) denkleminde yerine konmasıyla,

$$P_i = \frac{E \cos \beta \cdot U \cdot R - E \cos \beta \cdot E \cos \beta \cdot R + E \cos \beta \cdot E \sin \beta \cdot X_s + E \sin \beta \cdot U \cdot X_s - E \sin \beta \cdot E \cos \beta \cdot X_s - E \sin \beta \cdot E \sin \beta \cdot R}{R^2 + X_s^2}$$

yazılır. Bu denklemi düzenleyelim.

$$P_i = \frac{E \cdot U \cdot R \cos \beta - E^2 \cdot R (\overbrace{\cos^2 \beta + \sin^2 \beta}^1) + E^2 \cdot X_s \sin \beta \cos \beta - E^2 \cdot X_s \sin \beta \cos \beta + E \cdot U \cdot X_s \sin \beta}{R^2 + X_s^2}$$

$$P_i = \frac{E \cdot U (R \cos \beta + X_s \sin \beta) - E^2 \cdot R}{R^2 + X_s^2}$$

Şek. 3.9.'dan $R = Z_s \cos \gamma$, $X_s = Z_s \sin \gamma$ eşitlikleri yerine konursa,

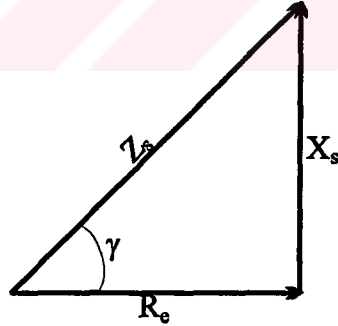
$$P_i = \frac{U \cdot E (Z_s \cos \gamma \cos \beta + Z_s \sin \gamma \sin \beta) - E^2 \cdot Z_s \cos \gamma}{R^2 + X_s^2} \text{ elde edilir.}$$

Trigonometrik olarak,

$\cos \gamma \cos \beta + \sin \gamma \sin \beta = \cos(\gamma - \beta)$ olduğuna göre;

$$P_i = \frac{U \cdot E \cdot Z_s [(\cos \gamma \cos \beta + \sin \gamma \sin \beta) - E^2 \cos \gamma]}{Z_s^2} \quad (3.10)$$

$$P_i = \frac{U \cdot E \cos(\gamma - \beta) - E^2 \cos \gamma}{Z_s}$$



Şek. 3.9. Empedans üçgeni.

olarak iç güç bulunur. Ancak büyük güçlü senkron makinalarda R_s çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Bu durumda $\gamma = 90^\circ$ ve $\cos \gamma = 0$ olacağından iç güç;

$$P_i = \frac{U \cdot E (\overbrace{\cos \gamma \cos \beta}^0 + \overbrace{\sin \gamma \sin \beta}^1) - E^2 \cos \gamma}{\sqrt{R^2 + X_s^2}}$$

$$P_i = \frac{U.E}{X_s} \sin\beta \quad (3.11)$$

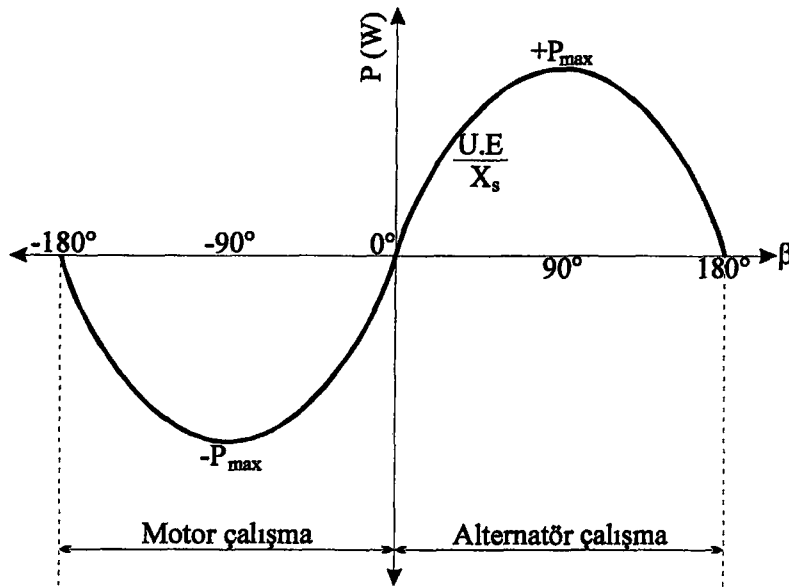
olarak iç güç eşitliği bulunur. Bu eşitlikte β açısına döndürücü moment açısı denir. Etkin direnç R 'nin dikkate alınmadığı durumda iç güç giriş gücüne eşit olur. Çünkü giriş gücü iç güçle bakır kayıp gücünün toplamıdır. ($P_g = P_i + P_{Cu}$). $R=0$ olduğunda bakır kayıp gücü $P_{Cu}=0$ olacağından giriş gücü iç güce eşit olur. (3.11) denkleminde iç gücün senkron reaktans ile ters, döndürücü moment β nin sinüsü ile doğru orantılı olduğu görülür. Bu eşitliğe göre sabit uyarım ve şebeke gerilimi altında, döndürücü moment açısında bir değişiklik olmadıkça iç güçte bir değişiklik olmaz. Bu durum hem generatör hem de motor çalışma için geçerlidir.

β açısı alternatörlerde pozitif motorlarda ise negatif değerlidir. Yani giriş gücü pozitif olduğu zaman senkron makina alternatör, negatif olduğu zaman ise motor olarak çalışır. Zıt emk E , şebeke gerilimi U ve senkron reaktans X_s sabit olduğunda güç ifadesi sadece $\sin\beta$ ile değişir. Bu değişim bir sinüs eğrisi şeklindedir. Eğrinin maksimum değeri $\beta=90^\circ$ de iken olur.

$P_i = \frac{U.E}{X_s} \sin\beta$ olduğundan eğrinin genliği $\frac{U.E}{X_s}$ ve maksimum iç güç,

$$P_{i\max} = \frac{U.E}{X_s} \text{ Watt/faz} \quad (3.12)$$

olarak bulunur.



Şek. 3.10. Yük açısının güçle değişimi.

3.2.2. Giriş Gücü

Şek. 3.8.'den U gerilimi dikkate alınarak akım ifadesi yazılırsa, $I_y = \frac{U.e^{j0} - E.e^{j(-\beta)}}{Z_s.e^{j\gamma}}$

Giriş gücü faz başına,

$$P_g = U I_y \cos \varphi \quad (3.13)$$

Akımı aktif ve reaktif bileşenlerine ayırarak ifadeleri tekrar yazalım.

$$\tilde{I}_y = \frac{U}{Z_s} e^{j(-\gamma)} - \frac{E}{Z_s} e^{j(-\beta-\gamma)}$$

$$I_y = \frac{U}{Z_s} [\cos(-\gamma) - j \sin \gamma] - \frac{E}{Z_s} [\cos(-\beta-\gamma) - j \sin(\beta+\gamma)]$$

$$\cos(-\beta-\gamma) = \cos -(\beta+\gamma) = \cos(\beta+\gamma) \quad ; \quad \cos -\gamma = \cos \gamma$$

olduğuna göre akımın aktif bileşeni,

$$I_a = I_y \cos \varphi = \frac{U}{Z_s} \cos \gamma - \frac{E}{Z_s} \cos(\beta+\gamma) \text{ olarak yazılabilir. Bu değer (3.13)}$$

denkleminde yerine konursa,

$$P_g = U \left[\frac{U}{Z_s} \cos \gamma - \frac{E}{Z_s} \cos(\beta+\gamma) \right] \quad (3.14)$$

elde edilir. Şek. 3.8.'e göre,

$$-\cos(\beta+\gamma) = \cos[180 - (\beta+\gamma)] = \cos(90 - \beta + 90 - \gamma)$$

$$\gamma + \theta = 90^\circ \quad 90 - \gamma = \theta$$

$$\cos(90 - \beta + 90 - \gamma) = \cos[90 - (\beta - \theta)] = \sin(\beta - \theta)$$

olduğundan,

$$P_g = \frac{U^2}{Z_s} \cos \gamma + \frac{EU}{Z_s} \sin(\beta - \theta) \quad \cos \gamma = \frac{R}{Z_s}$$

$$P_g = \frac{U^2}{Z_s} \frac{R}{Z_s} + \frac{EU}{Z_s} \sin(\beta - \theta)$$

$$P_g = \frac{U^2 R}{Z_s^2} + \frac{EU}{Z_s} \sin(\beta - \theta) \quad (3.15)$$

olarak giriş gücü ifadesi elde edilmiş olur. Daha önce de belirtildiği gibi etkin direnç R ihmal edilirse $R=0$ ve $\theta=0$ olur ve giriş gücü iç güce eşit olur.

Etkin direnç dikkate alınmadığı zaman sıfır güç için döndürücü moment açısı $\beta=0$ olur. Direnç dikkate alınır, boşta çalışan motorda $\beta>0$ 'dır. Bu durumda maksimum güç $\sin\beta=1$ olmayacağından, Cosinüsü R/Z_s olan bir açıda meydana gelir.

Tam yüklü ve $\cos\phi=1$ olan bir senkron motorda, döndürücü moment açısı $\beta=20^\circ$ ise, $\sin\beta=0,34$ olduğundan ve maksimum döndürücü moment açısı $\beta=90^\circ$ de yani $\sin\beta=1$ de meydana geldiğinden, senkron motorun senkronizmden kurtulma momentinin, tam yük momentine oranı $1/0,34=3$ olur. $\beta=30^\circ$ ise $\sin\beta=0,5$ ve oran $1/0,5=2$ olur. Bu değer teorik bir orandır. Gerçekte çok küçükte olsa bir etkin direnç olduğundan, kurtulma döndürücü moment değeri bu değerlerden biraz daha küçüktür.

3.2.3. Döndürme Momenti

Senkron motorun döndürme momenti,

$$M = \frac{P_{mek}}{\omega} \quad \omega = 2\pi.n \quad (1/s) \quad (3.16)$$

eşitliği ile bulunur. Burada; M, Nm olarak moment, P_{mek} , watt olarak iç güç ve n 1/dk. olarak devir sayısını ifade eder.

Görüldüğü gibi moment, motorda meydana gelen mekanik güç ile doğru orantılıdır. Senkron motorlarda mekanik güç, sürtünme ve kayıplardan dolayı milden alınan güçten büyüktür. Etkin direnç R'nin ihmal edildiği durumlarda ise mekanik güç giriş gücüne eşit olur. (3.12) denklemindeki iç güç ifadesini (3.16) formülünde yerine koyarsak,

$$M = \frac{U.E}{n.X_s} \sin\beta \quad Nm. \quad (3.17)$$

olur. m fazlı bir makina için moment ifadesi,

$$M = \frac{m.U.E}{n.X_s} \sin\beta \quad Nm. \quad (3.18)$$

olarak elde edilir. %100 uyarımlı bir senkron motorda R direnci dikkate alınmazsa $\frac{E}{X_s} = I_k$ olur. Bu durumda,

$$M = \frac{U I_s}{n} \sin \beta \text{ olur. } e_k = \frac{U_k}{U_n} \text{ olarak kısa devre geriliminin anma gerilimine}$$

oranı olarak verilirse, kısa devre akımı $I_k = I_y \frac{100}{\%e_k}$ olarak ifade edilebilir. Bu

durumda moment eşitliği,

$$M = \frac{m U I_y \cdot 100}{n \%e_k} \sin \beta \quad (3.19)$$

olur. $U I_y$ değeri volt-amper cinsinden görüntür gücü verir. Bu değerin KVA cinsinden değerini $m=3$ faz için (3.19) denkleminde koyarsak,

$$M = \frac{3 \cdot 1000 \cdot S_{KVA} \cdot 100}{n \%e_k} \sin \beta = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot S_{KVA}}{n \%e_k} \sin \beta \quad (3.20)$$

Denklemden görüldüğü gibi maksimum moment değeri $\beta=90^\circ$ ve $\sin \beta=1$ iken meydana gelir. Maksimum moment ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot S_{KVA}}{n \%e_k} \quad (3.21)$$

Şebeke gerilimi ve zıt emk cinsinden 3 faz için moment,

$$M_{\max} = \frac{3 U \cdot E}{n X_s} \sin \beta \quad (3.22)$$

olarak yazılabilir. Buna göre momentin değişimi de sinüs eğrisi biçimindedir. Senkron motorun etkin direnci R dikkate alınmadığı durumda moment

$M = \frac{P_g}{n} = \frac{U I_y \cos \varphi}{n}$ şeklinde yazılabilir. $I_y \cos \varphi = I_a$ olarak akımın aktif bileşeni olduğuna göre,

$$M = \frac{U I_a}{n} \quad (3.23)$$

olacaktır. Sabit şebeke gerilimi ve devir sayısında $\frac{U}{n}$ ifadesi de sabit olur. Bu sabiti bir K sembolü ile gösterirsek moment ifadesi,

$$M = K \cdot I_a \quad (3.24)$$

olarak elde edilir. Burada moment akımın aktif bileşeninin bir fonksiyonudur. Senkronizmden kurtulma momenti $\beta=90^\circ$ 'de meydana gelir. Bu andan itibaren senkron makina senkronizmden kurtulur. Makina alternatör ise devir sayısı çok

yükselir. Motor ise kısa devreli çubukları yoksa durur. Emniyetli bir çalışma için makina anma yükünün en fazla 1,5-2 katı kadar yüklenebilir. Senkron motorun yol alma momenti, kısa devre çubuklarının dirençleri ve endüvi döner alanı ile orantılıdır. Yapım esnasında yol alma momenti, motorun kullanılacağı işe göre hesaplanır. Senkron motor, asenkron motor olarak yol alırken uyarım sargıları bir direnç üzerinden veya direkt olarak kısa devre edilir. Bu sargıların direnci büyük olduğundan senkron motorun kalkınma momentleri de büyük olur.

Şek. 3.11.a'da uyarım sargıları açık, bir direnç üzerinden kısa devre edilmiş ve direkt kısa devreli durumda yol alma momenti eğrileri görülmektedir. Şek. 3.11.b'de ise uyarım sargısı ve kısa devre çubuklarının momenti ile toplam moment eğrileri görülmektedir.

Uyarım sargılarının momente etkisi, başlangıçta bu sargılarda endüklenen gerilimin frekansı fazla olduğundan küçüktür. Sargının reaktansı (X_L) başlangıçta omik direncinden büyüktür. Motor yol aldıkça R , X_L 'den daha büyük olmaya başlar ve sargının momente etkisi artar. Asenkron motorların yol alma akımları kullanım yerlerine göre nominal akımlarının %400'üne kadar çıkabilir.

3.2.4. Senkron Motorlarda Maksimum Güç İçin Şartlar

Senkron motorlarda maksimum güç, sabit U , E , R ve X_s altında, iç gücün döndürücü moment açısı β 'ya göre türevinin sıfır olduğu zaman meydana gelir.

$$\frac{dP_i}{d\beta} = 0 \quad P_i = \frac{U.E(R.\cos\beta + X_s.\sin\beta) - E^2.R}{Z_s^2} \quad \text{olduğuna göre bu}$$

ifadenin β 'ya göre türevini alalım.

$$\frac{dP_i}{d\beta} = \frac{U.E(-R.\sin\beta + X_s.\cos\beta).Z_s^2 - \overbrace{0.U.E(R.\cos\beta + X_s.\sin\beta)}^0}{Z_s^4}$$

$$\frac{dP_i}{d\beta} = \frac{U.E}{Z_s^2} (X_s.\cos\beta - R.\sin\beta) = 0$$

$$X_s.\cos\beta - R.\sin\beta = 0$$

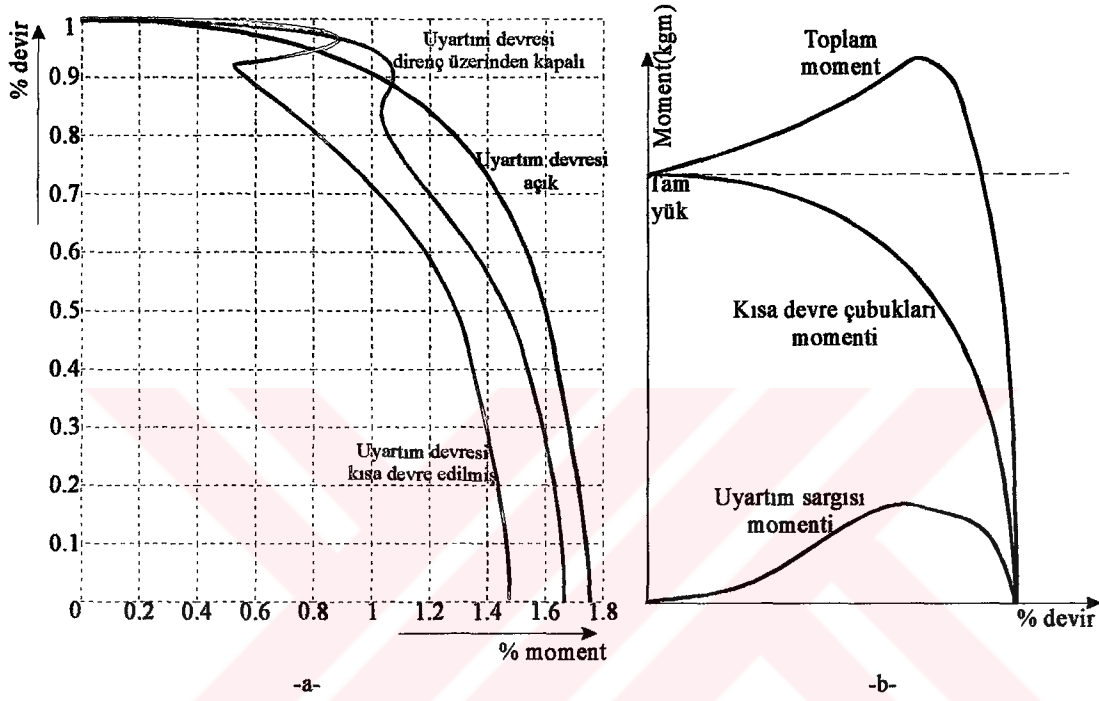
Bu durumda,

$$\frac{X_s}{R} = \frac{\sin\beta}{\cos\beta} = \tan\beta \quad \text{olarak elde edilir. Şu halde,}$$

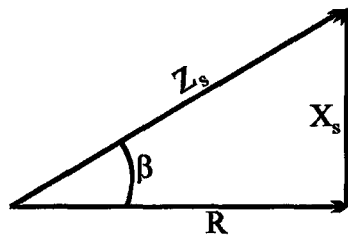
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{X_s}{R} \quad (3.25)$$

olmaktadır. Görüldüğü gibi sabit şebeke gerilimi ve uyarım akımında döndürücü moment açısı $\beta = \operatorname{Arctg} \frac{X_s}{R}$ olduğu zaman meydana gelmektedir.

Maksimum güç şartına göre çizilen empedans üçgeni Şek. 3.12.'de görülmektedir.



Şek. 3.11. Senkron motorda yol alma ve sargı moment eğrileri.



Şek. 3.12. Maksimum güç şartına göre empedans üçgeni.

Bu üçgende $\sin \beta = \frac{X_s}{Z_s}$ ve $\cos \beta = \frac{R}{Z_s}$ olduğundan,

$$\begin{aligned}
P_{\max} &= \frac{U.E(R\frac{R}{Z_s} + X_s\frac{X_s}{Z_s}) - E^2.R}{Z_s^2} = \frac{U.E(\frac{R^2}{Z_s} + \frac{X_s^2}{Z_s}) - E^2.R}{Z_s^2} \\
P_{\max} &= \frac{U.E(\frac{R^2 + X_s^2}{Z_s}) - E^2.R}{Z_s^2} = \frac{U.E(\frac{Z_s^2}{Z_s}) - E^2.R}{Z_s^2} = \frac{U.E.Z_s - E^2.R}{Z_s^2} \\
P_{\max} &= \frac{U.E}{Z_s} - \frac{E^2.R}{Z_s^2} \quad (3.26)
\end{aligned}$$

olarak maksimum güç ifadesi elde edilir. Bu güç aşıldığında senkron motor senkronizmden kurtulur.

Uyartım akımının maksimum gücü verebilen değeri maksimum gücün zıt emk'te göre türevinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilir.

$$\begin{aligned}
\frac{dP_{\max}}{dE} &= \frac{U.Z_s - 0.U.E}{Z_s^2} - \frac{2.E.R.Z_s^2 - 0.E^2.R}{Z_s^4} = \frac{U}{Z_s} - \frac{2.E.R}{Z_s^2} = 0 \\
\frac{U}{Z_s} &= \frac{2.E.R}{Z_s^2} \Rightarrow E = \frac{U.Z_s}{2.R} \quad (3.27)
\end{aligned}$$

olarak gerilim değeri bulunur. Bu gerilim motora maksimum gücü veren gerilimdir. Ancak motorun çalışabileceği maksimum gerilim değildir. Gerilimin bu değeri (3.26)'deki maksimum güç ifadesinde yerine konursa,

$$\begin{aligned}
P_{\max} &= \frac{U}{Z_s} \left(\frac{U.Z_s}{2.R} \right) - \frac{R}{Z_s^2} \left(\frac{U.Z_s}{2.R} \right)^2 = \frac{U^2}{2.R} - \frac{U^2}{4.R} \\
P_{\max} &= \frac{U^2}{4.R} \text{ watt/faz} \quad (3.28)
\end{aligned}$$

olarak maksimum güç ifadesi bulunur.

3.2.5. Maksimum Uyartım

Senkron makinanın motor olarak çalışabileceği maksimum uyartım, makinadan elde edilen gücü sıfır yapan uyartım değeridir. Bundan daha yüksek uyartım değeri motoru alternatör durumuna sokar.

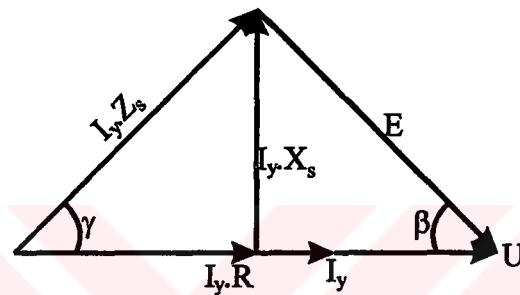
$$\begin{aligned}
P &= \frac{U.E}{Z_s} - \frac{E^2.R}{Z_s^2} = 0 \Rightarrow \frac{U.E}{Z_s} = \frac{E^2.R}{Z_s^2} \\
U.E.Z_s^2 &= Z_s.E^2.R \Rightarrow E.R = U.Z_s
\end{aligned}$$

(3.29)

Bu uyarım değeri maksimum uyarımdır. Uyarımın minimum değeri sıfır olmakla beraber bu uyarımda motor senkronizmden kurtulmayabilir

3.2.6. Maksimum Güç Şartlarında Akım

Senkron motorlarda maksimum güç, β döndürücü moment açısının iç empedans açısı γ 'ya eşit olduğu zaman meydana gelir ($\beta=\gamma$). Şek. 3.13.'de ($\beta=\gamma$) ve $\cos\varphi=1$ için vektör diyagramı görülmektedir. Burada $E = I_y \cdot Z_s$ dir.



Şek. 3.13. ($\beta=\gamma$) ve $\text{Cos}\varphi=1$ için vektör diyagramı

$$\cos \gamma = \frac{U/2}{E} = \frac{U}{2.E}$$

$$\cos \gamma = \frac{I_y \cdot R}{I_y \cdot Z_s} = \frac{R}{Z_s}$$

$$\frac{R}{Z_s} = \frac{U}{2.E} \Rightarrow E = \frac{U.Z_s}{2.R}$$

(3.30)

3.2.7. Maksimum Güç İçin Senkron Reaktansın Değeri

Bu değer U, E ve R sabit iken güç denkleminin X_s 'ye göre türevinin sıfıra eşitlenmesiyle bulunur.

$$P = \frac{U.E}{Z_s} - \frac{E^2.R}{Z_s^2} = \frac{U.E}{\sqrt{R^2 + X_s^2}} - \frac{E^2.R}{R^2 + X_s^2} = \frac{U.E.\sqrt{R^2 + X_s^2} - E^2.R}{R^2 + X_s^2}$$

$$\frac{dP}{dX_s} = \frac{(R^2 + X_s^2)U.E - \frac{2X_s}{2\sqrt{R^2 + X_s^2}} - (U.E.\sqrt{R^2 + X_s^2} - E^2.R).2X_s}{(R^2 + X_s^2)^2} = 0$$

Bu ifadenin her pay ve paydasını $\frac{2X_s}{(R^2 + X_s^2)^2}$ ile sadeleştirirsek,

$$\frac{-U.E.\sqrt{R^2 + X_s^2}}{2} + E^2.R = 0 \quad (3.31)$$

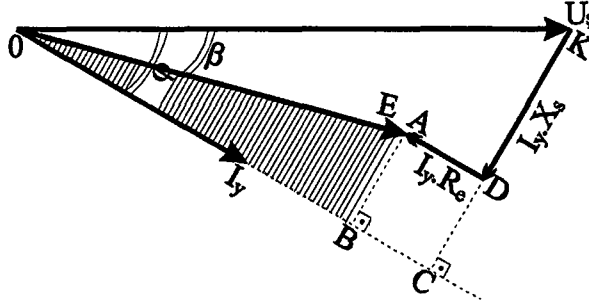
$$X_s^2 = R^2 \cdot \left(4 \frac{E^2}{U^2} - 1\right)$$

olarak maksimum güç için gerekli senkron reaktansın değeri elde edilir. Bu ifadeden %100 uyartım yani $U=E$ durumunda maksimum uyartım için senkron reaktansın $X_s = \sqrt{3}.R \cong 1,73.R$ olması gerektiği görülür. Bu sonuçlar teorik olup, makinanın işletme durumunda bazı değişiklikler olmaktadır.

3.2.8. Yuvarlak Kutuplu Senkron Motorlarda Maksimum Yük Açısı İle Zıt EMK Arasındaki Bağntı

Bu tezde senkron makinanın kararlılık sınırının uyartım akımının değişimiyle olan ilişkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle formül 3.31'de maksimum gücü veren yük açısı bağıntısı makinanın endüvisinde endüklenen gerilim (E) cinsinden ifade etmek gerekir. 2.44 nolu bağıntıda elde edildiği gibi senkron motorda endüklenen emk sabit frekanslı bir şebekede manyetik akının (ϕ) fonksiyonu olarak değişmektedir. Şayet maksimum yük açısı da zıt emk cinsinden ifade edilirse uyartım akımı ile yük açısı arasındaki ilişki görülebilir. Zira manyetik akı da uyartım akımının bir fonksiyonudur. Burada senkron motorun endüktif çalışma durumu için ifade elde edilecektir. Diğer çalışma şekilleri için de aynı yöntem kullanılarak sonuca gidilir.

Senkron motorun $\cos\phi$ 'nin geri olduğu endüktif çalışma durumu için vektör diyagramı Şek. 3.14.'de görülmektedir.



Şek. 3.14. Endüktif çalışan senkron motorun vektör diyagramı.

Görüldüğü gibi motora uygulanan şebeke gerilimi ile yük akımı arasında bir faz farkı vardır. Vektör diyagramına göre; $\vec{U}_s - \vec{I}_y \vec{R}_e - \vec{I}_y \vec{X}_s - \vec{E} = 0$ olarak yazılır.

$$\vec{E} = \vec{U}_s - \vec{I}_y \vec{Z}_s \quad \vec{I}_y = I_y (\cos \varphi - j \sin \varphi) \quad Z_s = R_e + jX_s$$

$$E = (U_s - I_y R_e \cos \varphi - I_y X_s \sin \varphi) + j(I_y R_e \sin \varphi - I_y X_s \cos \varphi)$$

$$E = \sqrt{(U_s - I_y R_e \cos \varphi - I_y X_s \sin \varphi)^2 + (I_y R_e \sin \varphi - I_y X_s \cos \varphi)^2}$$

olarak yazılabilir. Başka bir yoldan giderek zıt emk ifadesini bulalım. Şek.

3.14.'den

$$\overline{OC} = U_s \cos \varphi \quad ; \quad \overline{BC} = I_y R_e \quad ; \quad \overline{KD} = I_y X_s \quad ; \quad \overline{KC} = U_s \sin \varphi$$

$$E = \sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{OB}^2}$$

$$\overline{AB} = U_s \sin \varphi - I_y X_s \quad ; \quad \overline{OB} = U_s \cos \varphi - I_y R_e$$

$$E = \sqrt{(U_s \cos \varphi - I_y R_e)^2 + (U_s \sin \varphi - I_y X_s)^2} \quad (3.32)$$

olarak zıt emk elde edilir. Şimdi bu ifade de 3.25 bağıntısından elde edilen

$X_s = R_e \tan \beta$ ifadesini yerine yazarsak:

$$E^2 = (U_s \cos \varphi - I_y R_e)^2 + (U_s \sin \varphi - I_y R_e \tan \beta)^2 \text{ ifadesi elde edilir. Bu}$$

ifadenin açılımıyla;

$$E^2 = U_s^2 \cos^2 \varphi - 2 I_y R_e U_s \cos \varphi + I_y^2 R_e^2 + U_s^2 \sin^2 \varphi - 2 I_y R_e U_s \sin \varphi \tan \beta + I_y^2 R_e^2 \tan^2 \beta$$

olur. Bu ifadenin düzenlenerek sıfıra eşitlenmesiyle;

$$(I_y^2 R_e^2 \tan^2 \beta) - (2 I_y R_e U_s \sin \varphi \tan \beta) + (U_s^2 - 2 I_y R_e U_s \cos \varphi + I_y^2 R_e^2 - E^2) = 0$$

ifadesi elde edilebilir. Bu ifadede;

$$I_y^2 R_e^2 = a$$

$$-2 I_y R_e U_s \sin \varphi = b$$

$$U_s^2 - 2 I_y R_e U_s \cos \varphi + I_y^2 R_e^2 - E^2 = c$$

olarak bir katsayı ile ifade edilirse denklem $ax^2 + bx + c$ şeklinde ikinci dereceden bir bilinmeyenli denklem şekline dönüşmüş olur. Bu denklemin kökleri

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \text{ ifadesi ile elde edilir. Bilindiği gibi burada } \Delta = b^2 - 4.a.c \text{ olarak}$$

yazılır. Bu formülün yukarıdaki ifadeye uygulanmasıyla,

$$\tan\beta = \frac{U_s \cdot \sin\varphi \pm \sqrt{U_s^2 \cdot \sin^2\varphi - U_s^2 - I_y \cdot R_e^2 + 2I_y \cdot R_e U_s \cdot \cos\varphi + E^2}}{I_y \cdot R_e} \quad (3.33)$$

olarak zıt emk ile yük açısı arasındaki ilişki bulunmuş olur. Bu ilişki aynı yöntemin moment formülüne uygulanmasıyla da elde edilebilir. Daha önce 3.22 bağıntısında yuvarlak kutuplu senkron makinanın şebeke gerilimi ve zıt emk

cinsinden ifadesi $M_{\max} = \frac{3.U.E}{n.X_s} \sin\beta$ olarak verilmişti. Bu ifadede 3.25

bağıntısından elde edilen $X_s = R_e \cdot \tan\beta$ ifadesinin yerine konmasıyla;

$$M_{\max} = \frac{3.U.E}{n.R_e} \cdot \frac{\sin\beta}{\tan\beta} \text{ ifadesi elde edilebilir. } \frac{\sin\beta}{\tan\beta} = \cos\beta \text{ olduğundan}$$

maksimum momenti veren yük açısının değeri;

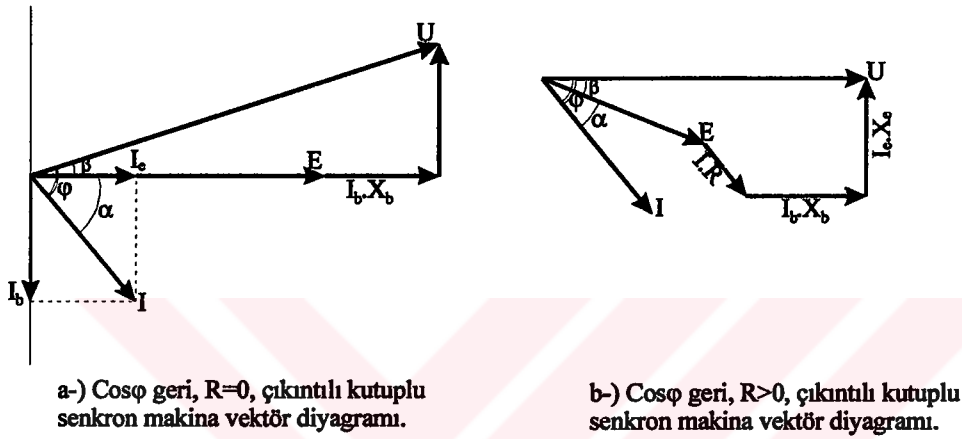
$$\cos\beta = \frac{M_{\max} \cdot n.R_e}{3.U.E} \quad (3.34)$$

olarak elde edilmiş olur.

Herhangi bir yük akımı için yuvarlak kutuplu senkron makinanın maksimum momenti verebilecek yük açısı E değerine bağlıdır. Zıt emk ise manyetik akının fonksiyonu olduğuna göre makinanın kararlılık sınırını manyetik akının belirlediği söylenebilir. 2. Bölümde senkron makinanın endüvisinde endüklenen emk'tin hava aralığındaki manyetik alanın şekliyle yakından ilişkili olduğunu görmüştük. Tezin son bölümünde yapılan deneylerle bu durum deneysel olarak da gözlenecektir. Böylece senkron makinanın uyarım akımı değişiminin E gerilimine dolayısıyla yük açısına yaptığı etkiler incelenmiş olacaktır.

3.2.9. Çıkıntılı Kutuplu Senkron Makinalarda Güç ve Momentin Hesaplanması

Çıkıntılı kutuplu senkron motorların dirençleri dikkate alınmadığı ve alındığı durumlarda vektör diyagramları Şek. 3.15.'de görüldüğü gibidir. Akımın I_b bileşeninin meydana getirdiği $I_b.X_b$ gerilim düşümü I_e akımından 90° ileride, akımın I_e bileşeninin meydana getirdiği $I_e.X_e$ gerilim düşümü de aynı şekilde I_e 'den 90° ileride çizilmiştir.



Şek. 3.15. Çıkıntılı kutuplu senkron makinanın $\cos\phi$ geri vektör diyagramları.

Hesaplamalarda motorun etkin direncini ihmal edilerek ($R=0$), motorun sabit gerilim ve frekanslı bir şebekeye bağlandığı kabul edilecektir. Çıkıntılı kutuplu motorun gücü; $P=U.I.\cos\phi$ dir. $R=0$ kabul edildiğinden $P_i = P_g = P$ yazılmıştır.

$\phi = \alpha + \beta$ olduğundan;

$$P = U.I.\cos(\alpha + \beta) \text{ ve}$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos\alpha.\cos\beta + \sin\alpha.\sin\beta$$

$$P = U.I.(\cos\alpha.\cos\beta + \sin\alpha.\sin\beta) = U.I.\cos\alpha.\cos\beta + U.I.\sin\alpha.\sin\beta$$

yazılabilir. Şek. 3.15.'e göre,

$$U.\sin\beta = I_e.X_e = I.\cos\alpha.X_e$$

$$U.\cos\beta = E + I_b.X_b \Rightarrow I_b.X_b = U.\cos\beta - E \quad ; \quad I_b = I.\sin\alpha \Rightarrow I.\sin\alpha.X_b = U.\cos\beta - E$$

$$I.\sin\alpha = \frac{U.\cos\beta - E}{X_b} ; I.\cos\alpha = \frac{U.\sin\beta}{X_e}$$

$$P = U \left(\frac{U \sin \beta}{X_e} \right) \cos \beta - U \left(\frac{U \cos \beta - E}{X_b} \right) \sin \beta = \frac{U^2 \sin \beta \cos \beta}{X_e} - \frac{U^2 \sin \beta \cos \beta}{X_b} + \frac{U E \sin \beta}{X_b}$$

$$P = U^2 \sin \beta \cos \beta \left(\frac{X_b - X_e}{X_b X_e} \right) + \frac{U E \sin \beta}{X_b} \quad (3.35)$$

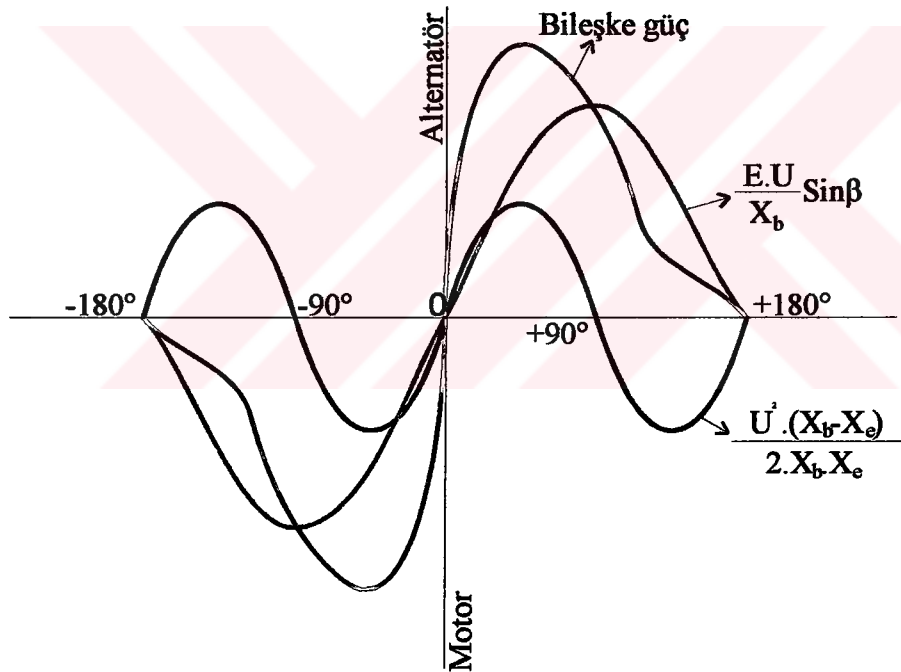
olarak bulunur. 1. Terimin pay ve paydası 2 ile çarpılırsa;

$$P = U^2 \cdot 2 \sin \beta \cos \beta \left(\frac{X_b - X_e}{2 X_b X_e} \right) + \frac{U E \sin \beta}{X_b} \text{ olur. } 2 \sin \beta \cos \beta = \sin 2\beta \text{ 'dır.}$$

Buna göre;

$$P = \left(\frac{U E}{X_b} \right) \sin \beta + \frac{U^2 (X_b - X_e)}{2 X_b X_e} \sin 2\beta \text{ Watt/faz (3.36)}$$

olarak güç ifadesi bulunur.



Şek. 3.16. Çıkıntılı kutuplu senkron makina güç eğrisi.

Düz kutuplu senkron motorun gücü $R=0$ için;

$$P = \left(\frac{U E}{X_b} \right) \sin \beta \text{ olarak ifade edilir. Görüldüğü gibi çıkıntılı kutuplu senkron}$$

motorun ilk terimi bu ifadeye eşittir. Buna ilaveten çıkıntılı kutuplu senkron motorda ayrıca bir güç terimi daha vardır. Bu, hava aralığındaki manyetik akının neden

olduğu relüktans döndürme momentinin karşılığıdır. Çıkıntılı kutuplu makinayı düz kutupludan ayıran bir özelliktir. Şek. 3.16.'da çıkıntılı kutuplu bir senkron makinanın güç eğrisi bileşke ve bileşenlerle birlikte görülmektedir.

3.2.10. Çıkıntılı Kutuplu Senkron Motorun Döndürme Momenti

Senkron motorun moment ifadesi;

$$M = \frac{P_{mek}}{\omega} \quad Nm. \quad (3.37)$$

olarak yazılabilir. Üç faz toplam momenti;

$$M = \frac{3 \cdot P_{mek}}{\omega} \quad Nm \text{ olur. Görüldüğü gibi senkron motorun momenti gücü ile}$$

doğru orantılıdır. Çıkıntılı kutuplu makina için bulunan güç eşitliği yukarıdaki ifadede yerine konursa;

$$M = \frac{3}{\omega} \left[\frac{U \cdot E}{X_b} \cdot \sin \beta + \frac{U^2 \cdot (X_b - X_e)}{2 \cdot X_b \cdot X_e} \cdot \sin 2\beta \right] \quad Nm. \quad (3.38)$$

olarak bulunur.

Döndürme momentinin değişim eğrisi aynen Şek. 3.16.'daki gibidir. Motor çalışma durumu negatif bir döndürme momenti açısı meydana getirir. Senkron reaktans X_s teorisi burada sakıncalı olduğu için ancak düz kutuplu senkron makinalara uygulanır. Formüllerden görüleceği gibi, motor olarak çalışan çıkıntılı kutuplu makinanın normal çalışma sınırları arasında, döndürme momenti açısının her bir derecesi başına elde edilen döndürme momenti, düz kutuplu makinaya göre daha fazladır. Ayrıca maksimum döndürme momenti $\beta=90^\circ$ 'de meydana gelmez. Daha küçük açılarda meydana gelir.

Moment ifadesindeki ikinci terim, relüktans döndürme momentidir. Endüvi döner kutupları ile, rotor kutuplarının kilitlenmesinin küçük bir relüktansla elde edilmesini hava aralığındaki alan momenti sağlamaya çalışır. Makinada gerçekte etkin direnç sıfır olmadığından elde edilen moment ve güç, formüllerden bulunan değerlerden biraz daha küçüktür. $X_b=X_e$ olduğunda çıkıntılı kutuplu senkron makina momenti ve gücü düz kutupluya eşit olur. Denklemlerdeki ikinci terim uyarımla ilgili değildir. Bunun anlamı; motorda uyarım akımı olmadığı zaman dahi bir moment ve güç meydana geleceğidir. Bu şekilde yalnız relüktans momenti ile çalışan

motorlar yapılmıştır. Bu motorlara “relüktans motorları” denir. Bu motorların momentleri küçük olup, anma yükünde güç katsayıları 0,3-0,4 arasındadır.

3.2.11. Çıkıntılı Kutuplu Senkron Motorların Kararlılığı ve Maksimum Döndürme Momenti Açısı

Çıkıntılı kutuplu motorun güç ifadesi,

$$P = \left(\frac{U.E}{X_b} \right) \sin\beta + \frac{U^2.(X_b - X_e)}{2.X_b.X_e} \sin 2\beta \text{ olarak bulunmuştur. Bu eşitliğin}$$

döndürücü moment açısı β 'ya göre türevi alınarak bulunan ifadeye “kararlılık faktörü”, “sertlik” veya “bağlantının sıkılığı” adları verilir. Buna göre;

$$\frac{dP}{d\beta} = \frac{U.E.\cos\beta.X_b - 0.U.E.\sin\beta}{X_b^2} + \frac{U^2.(X_b - X_e).2.\cos 2\beta.2.X_b.X_e - 0.U^2.(X_b - X_e)\sin 2\beta}{4.X_b^2.X_e^2}$$

$$\frac{dP}{d\beta} = \frac{U.E}{X_b} \cos\beta + \frac{U^2(X_b - X_e)}{X_b.X_e} \cos 2\beta$$

olarak bulunur. Düz kutuplu motorlarda ise

$$P = \frac{U.E}{X_s} \sin\beta \text{ ifadesinin } \beta \text{'ya göre türevi,}$$

$$\frac{dP}{d\beta} = \frac{U.E}{X_s} \cos\beta \text{ 'dır. Bu ifade çıkıntılı kutuplu senkron motorun kararlılık}$$

faktörünün ilk terimidir. Çıkıntılı kutuplu senkron motorda bu terimden başka ikinci bir terimin bulunması, düz kutupluya göre kararlılık veya bağlantı sıkılığının daha büyük olduğunu gösterir.

Çıkıntılı kutuplu senkron motor için bulunan eşitliğin sağ tarafı sıfıra eşitlenerek maksimum döndürme momenti açısı bulunur.

$$\frac{U.E}{X_b} \cos\beta + \frac{U^2(X_b - X_e)}{X_b.X_e} \cos 2\beta = 0 \text{ Burada } \frac{U.(X_b - X_e)}{X_e} = B \text{ dersek;}$$

$$\frac{U.E}{X_b} \cos\beta + \frac{U}{X_b} B \cos 2\beta = 0 \text{ olur.}$$

Bu ifadenin düzenlenmesiyle;

$$\frac{U}{X_b} (E \cos\beta + B \cos 2\beta) = 0 \Rightarrow \frac{U}{X_b} = 0 \Leftrightarrow E \cos\beta + B \cos 2\beta = 0 \text{ eşitlikleri}$$

bulunur.

$\cos 2\beta = \cos^2 \beta - \sin^2 \beta$ olduğundan,

$E \cos \beta + B(\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) = 0$ olarak düzenlenir. Bu ifadede

$\sin^2 \beta = 1 - \cos^2 \beta$ olarak yerine yazılırsa;

$$E \cos \beta + B(\cos^2 \beta - (1 - \cos^2 \beta)) = E \cos \beta + B \cos^2 \beta - B + B \cos^2 \beta = 0$$

Bu ifadede gerekli düzenlemeler yapıldığında;

$$2B \cos^2 \beta + E \cos \beta - B = 0 \text{ şeklinde ikinci dereceden bir denklem elde}$$

edilir. Bu denlemin köklerinden biri bize maksimumu döndürme momenti açısının Cosinüsünü verecektir.

İkinci dereceden bir denklem $ax^2 + bx + c$ ve bu denklemin kökleri

$$x_1, x_2 = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \text{ olmaktadır. } \Delta \text{ ise } b^2 - 4ac \text{ 'ye eşittir. Bu ifadeleri yukarıdaki}$$

denkleminimize uygularsak;

$$\Delta = E^2 - 4 \cdot 2B \cdot (-B) = E^2 + 8B^2 \text{ ve maksimum döndürme momenti açısı}$$

β 'nin kosinüsü,

$$\cos \beta = \frac{-E \pm \sqrt{E^2 + 8B^2}}{4B} \quad (3.39)$$

olarak bulunur. Bu eşitlik etkin direnç R dikkate alınmadığı durumdaki maksimum döndürme momenti açısını verir.[4]

Bu ifadede yer alan B terimi sabit büyüklüklerden oluştuğundan oluştuğundan değişmez. Bu durumda senkron motorun kararlılık faktörünün endüvisinde endüklenen E gerilimine bağlı olduğu söylenebilir. Bölüm 2'de senkron makinanın endüvisinde endüklenen gerilimin hava aralığındaki magnetik alan (B) şekline bağlı olduğu bulunmuştu. Bu eğriler matematiksel olarak incelenerek makinanın endüvisinde endüklenen emk; $E_{eff} = 4,44 \cdot \Phi_{1\max} \cdot f \cdot N_s \cdot k_a \cdot k_d \cdot k_f$ (2.37) olarak elde edilmişti. Bu bağıntıda frekans sabit olduğu takdirde magnetik akı haricindeki terimlerin makinanın yapısına bağlı olduğu görülür. Bu durumda makinada endüklenen gerilim ve buna bağlı olan kararlılık faktörü magnetik akı ϕ 'nin fonksiyonu olarak değişir.

3.3. Yük Değişmesinin Senkron Motora Etkisi

Senkron makina alternatör olarak, gerekli senkronizm şartları yerine getirildikten sonra şebekeye paralel bağlandığında, endüvisinde endüklenen gerilim şebeke gerilimine eşit olur. Alternatör bu durumda şebekeden hiğbir akım çekmediği gibi şebekeye bir akım da vermez. Endüvi sargılarından bir akım geçmesi için bir gerilim farkı olması gerekir. Alternatör gerilimi E_a ile şebeke gerilimi U_s 180° faz farklı ve mutlak değerce birbirlerine eşit olduklarından bileşkeleri sıfır olur. Bu durumda çalışmakta olan alternatörün, dndrtc makinası durdurularak alternatöre verilen mekanik güç kesilecek olursa bu durumda makina senkron motor olarak çalışır. Bu sırada şebeke gerilimi U_s ile endüvi sargılarında endüklenen zıt emk E , 180° faz farklı değildir. Motorun sürtünme, rüzgar ve demir kayıplarından dolayı boş çalışmada bile U_s ile E arasında β açısı kadar bir faz farkı oluşur. Aralarında $180^\circ - \beta$ kadar faz farkı olan bu iki gerilimin bileşkesi (E_r), kendisinden yaklaşık 90° geride bir I_y akımının geçmesine neden olur. Motorun sürtünme, rüzgar ve demir kayıpları faz başına $P = U_s I_y \cos \varphi$ kadar olup çok küçüktür. β açısından dolayı motorun hızında bir azalma söz konusu değildir. Motor senkron hızda dönmesine devam eder. β açısının büyüklüğü motorun yükü ve uyartım akımına bağlıdır.



şek. 3.17. Senkron makinanın generatör ve motor çalışma durumlarındaki vektör diyagramları.

Senkron motora yükün etkisini incelemek için uyartım akımının her an $U_s = E$ olacak şekilde sabit tutulduğunu varsayacağız. Bu durumda β açısı yalnızca yükle değişir. Motorun yükü arttıkça β geri kalma açısı da büyür. Her yük artışında $U_s = E$ olduğundan, E 'nin yükle değişimi bir daire çizer. şek. 3.18.'de bu durum görülmektedir. Bileşke emk değeri E_r 'de yine dairesel değişecektir. Çünkü $\vec{U}_s + \vec{E} = \vec{E}_r$ 'dir. U_s sabit olduğu için dairesel değişen E ile vektörel toplamı yine

daireesel değişir. E_r 'nin çizdiği dairenin çizdiği dairenin yarıçapı U_ϕ veya E_3 olup daire merkezi 0'dır.

Senkron motorun endüvi sargı direncini reaktansına göre çok küçük olduğu için dikkate almazsak, β açısı 90° 'ye kadar büyüyebilir. β açısının daha fazla büyümesi durumunda motor miline bağlı yük çok fazla artacağından, motor kilitlenme durumundan ayrılabilir. Omik direnç dikkate alındığında β açısı 90° bile olamaz. Senkron motor kilitlenme durumundan ayrıldığında eğer rotorunda kısa devre çubukları yoksa durur ve şebekeye kısa devre olur. Kısa devre çubukları varsa, asenkron motor olarak çalışmaya devam eder. şek. 3.18.'de görüldüğü gibi endüvi

akımı I_y 'nin değişimi de daireeseldir. Çünkü $I_y = \frac{E_r}{Z_s} \cong \frac{E_r}{X_s}$ olarak ifade edilir. Z veya

X_s sabit olduğuna göre daireesel olarak değişen E_r nin oluşturduğu I_y akımı da daireesel olarak değişecektir.

Motorun giriş gücü;

$$P_g = U_\phi \cdot I_y \cdot \cos \varphi \quad (3.40)$$

dir. Motor üç fazlı ise

$$P_g = 3 \cdot U_\phi \cdot I_y \cdot \cos \varphi \quad (3.41)$$

olur. Motorun toplam mekanik gücü ise,

$$P_{mek} = 3 \cdot U_\phi \cdot I_y \cdot \cos \gamma \quad \text{ve} \quad \gamma = \beta - \varphi \quad (3.42)$$

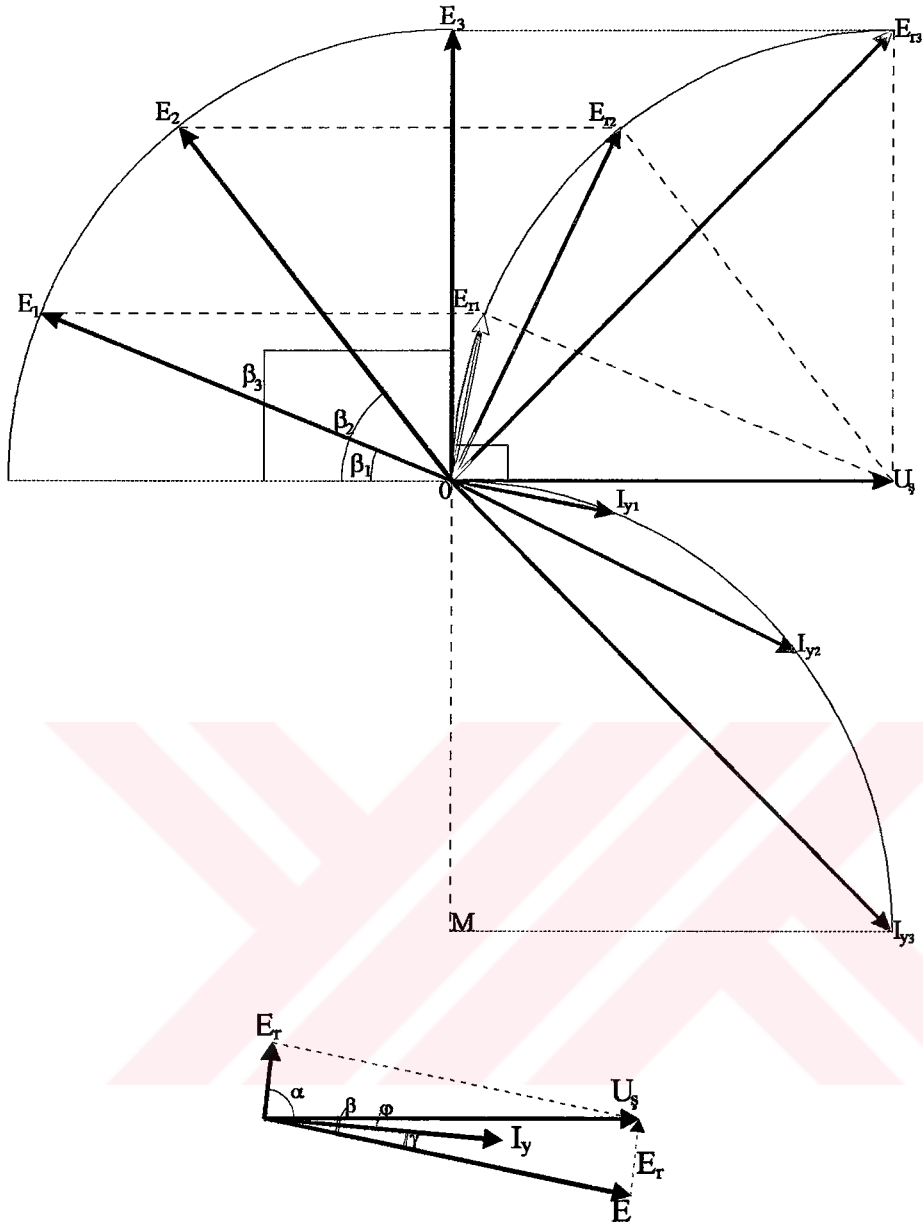
olarak bulunur.

Görüldüğü gibi senkron motor miline uygulanan mekanik yük artışını hızını azaltmadan fakat endüvi döner alan ekseni ile kutup ekseni arasındaki geri kalma açısının büyümesi ile karşılamaktadır. Bu nedenle β açısına yük açısı da denir. Motor mekanik gücünden boştaki kayıpları (sürtüme, vantilasyon ve demir kaybı) çıkartılırsa motor mil gücü bulunabilir.

$$P_{mil} = P_{mek} - P_{k0} \quad (3.43)$$

Motorun şebekeden çektiği güçten, bu yükteki bakır kayıpları çıkartılarak motorun iç gücü veya mekanik gücü bulunur.

$$P_{mek} = P_g - P_{Cu} \quad (3.44)$$



Şek. 3.18. Yük değişiminin senkron motora etkisinin vektöryel görünüşü.

Senkron motorlar millerine uygulanan yükün artışını şebekeden çektikleri gücü arttırarak karşılarlar. Ancak bu yüklemenin aşırı olması durumunda artık magnetik alan etkisi motoru senkronizmde tutamaz ve motor senkron devirden çıkar. Bu istenmeyen bir durumdur. Motorun asenkron çubukları veya sargıları yoksa motor durur. Aksi halde asenkron olarak çalışmasına devam eder. Ancak bu durumda çalışmaya devam edip yükü karşılaması beklenemez.

3.4. Uyarım Akımı Değişiminin Senkron Motora Etkisi

Daha önce uyarım akımının motorun endüvisinde endüklenen zıt emk'ti şebeke gerilimine eşit olacak şekilde sabit olduğunu varsayarak yük artışının motora etkisini incelemiştik. Bu durumdaki uyarıma %100 uyarım denir.

Şek. 3.19.'da senkron motorun iç devresine göre çizilmiş vektör diyagramı görülmektedir. Bu diyagramda şebeke gerilimi U_s sabittir. Senkron motorun geri güç katsayılı sabit bir yükü vardır. Yükün meydana getirdiği geri kalma açısı β ile gösterilmiştir. I_y yük akımı I_a aktif ve I_r reaktif bileşenlerine ayrılmıştır.

Şek. 3.19.a'da senkron motor %100 uyarımlı veya tam uyarımlı çalışmaktadır. Bu durumda çalışan senkron motorun uyarım akımının azaltılması ile endüvideki zıt emk azalır. Bileşke emk E_r ise artacaktır. Şek. 3.19.b'de bu durum görülmektedir. Artan E_r emk'tine bağlı olarak I_y akımı da artış göstermiştir. Fakat akımın aktif bileşeni yine I_a 'ya eşittir ($I_a=I_{a1}$). Burada akımın artmasına rağmen U_s ile I_y arasındaki açı büyümüş ve dolayısıyla güç katsayısı küçülmüştür. Bu nedenle güç sabit kalmıştır. I_y akımı U_s geriliminden geride olduğundan motor endüktif olarak çalışmaktadır.

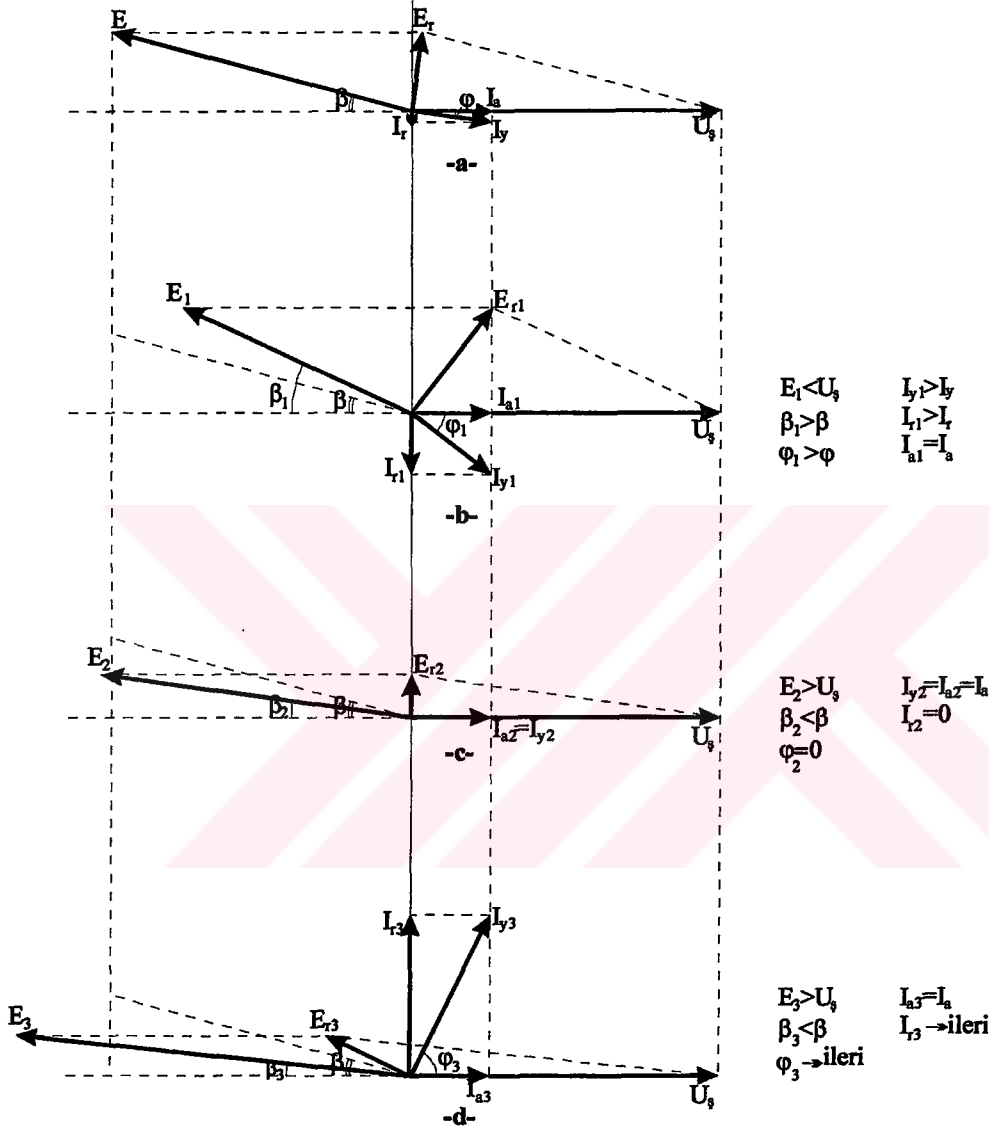
$$U_s \cdot I_y \cdot \cos \varphi = U_s \cdot I_y \cdot \cos \varphi_1 \quad I_{y1} > I_y \quad \cos \varphi_1 < \cos \varphi \quad (3.45)$$

Bu arada β açısı da biraz büyümüş ve β_1 değerini almıştır. Bu artışın nedeni akımın mıknatıslama bileşeni I_r 'nin artarak I_{r1} değerini almasıdır. Uyarım akımı azaldığından dolayı I_r akımı etkin uyarımı arttıracak büyüklükte olmalıdır.

Uyarım akımını arttıracak olursak Şek. 3.19.c'de görüldüğü gibi endüvi sargılarında endüklenen E emk'ti artar ve E_2 değerini alır. U_s ile E'nin vektöryel toplamı olan E_r de E_{r2} değerine ulaşmıştır. Yük akımı I_{y2} değerine ulaşmasına rağmen akımın reaktif bileşeni sıfır olduğundan ve motor yükü değişmediğinden şebekeden yalnız aktif akım çekilmektedir. Bu durumda akımla gerilim arasındaki açı $\varphi_2=0$ 'dır. Bu şebeke gerilimi ile akımın aynı fazda olması demektir. Yani omik çalışma durumuna gelinmiştir. β açısı biraz küçülerek β_2 değerini almıştır.

Senkron motorun uyarım akımı daha fazla arttırılarak, omik çalışma durumundan kapasitif çalışma durumuna geçilebilir. Bu durumda zıt emk artarak U_s 'den daha büyük olur. $E_3 > U_s$. Motor yükünde bir değişiklik olmamıştır. $I_{a3}=I_a$. Yük açısının reaktif bileşeni U_s 'den ileri geçtiğinden β açısı küçülerek β_3 değerine ulaşmıştır. Çünkü iç reaksiyonlar etkin uyarımı $E=U_s$ olacak şekilde düzenler. Motor

akımı I_{y3} U_ϕ 'den ileride olduğundan motor kapasitif olarak çalışmaktadır. Bu çalışma durumlarında β açısındaki değişimler çok küçük olduğundan β sabit olarak kabul edilebilir.



Şek. 3.19. Sabit yüklü senkron motorda uyarım akımı değişmesi ile meydana gelen endüktif, omik ve kapasitif çalışma durumları için vektör diyagramları.

Yukarıdaki açıklamalardan şu sonuçlar çıkarılabilir: Senkron motorun uyarım akımını ayarlamak suretiyle motor kapasitif, omik veya endüktif çalışma durumlarına geçirilebilir. Burada senkron motorun yükü sabit veya motor boşta olmalıdır. Yükün değişmesi daha önce kapasitif çalışan motoru endüktif çalışma durumuna geçirebilir. Senkron motor omik olarak çalışırken çektiği yük akımı en

küçük değerdedir. Şebekelerin $\cos\phi$ değerlerinin düzeltilmesi işlemlerinde sekron motorlar kullanılmaktadır (senkron kompanzatör). Bu motorların uyartım akımı ayarlanarak, motor gücünün yeterli olması durumunda istenen $\cos\phi$ değeri elde edilebilir. Yük akımı ile güç katsayısı ters orantılı olarak değişir. $\cos\phi$ 'nin 1 olduğu omik çalışma durumunda yük akımı sadece kayıpları karşılayacak kadar olup, çok küçüktür.



BÖLÜM 4

DENEY ARACI OLARAK KULLANILAN SENKRON MAKİNANIN ÖZELLİKLERİ

4.1. Makinanın Etiket Değerleri ve Sarım Şekli

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan senkron makinanın özellikleri ayrıntılı bir şekilde tanıtılacaktır.

Aşağıda makinanın etiketi verilmiştir.

SYNCHRONOUS MACHINE		3-Phase	MV1008-25
Generator	1,2kVA X 0,8	Ser. number	9181
Motor	1,0kW	Temp. Class	B(130°C)
Y220V. 3,5A. Δ127V. 6,0A.		Protection Class	(IP23)
50Hz. 1500rpm.		Duty Type	S2 30min.
Excitation DC 220V. 1,4A.		Norm	IEC34-1
TERCO		STOCKHOLM	SWEDEN

Etiketinden de görüldüğü gibi senkron makina 4 kutuplu olup, uyartım akımı düzgün doğru akım olarak kabul edilmiş ve dizaynı buna göre yapılmıştır. Makina duran endüvili, yuvarlak kutuplu, 3 fazlı ve 36 olukludur.

Endüvi sargısı Şek. 4.1’de görüldüğü gibi eşit adımlı ve yarım kalıp bir sargıdır.

$$\begin{aligned}
X &= 36 & c &= \frac{X}{2p.m} = \frac{36}{4.3} = 3 & \alpha_{elk} &= \frac{360.p}{X} = \frac{360.2}{36} = 20^\circ \\
2p &= 4 & & & & (4.1) \\
m &= 3 & Y_x &= \frac{X}{2p} = \frac{36}{4} = 9 & (1-10)
\end{aligned}$$

Burada;

c: Faz ve kutup başına oluk sayısı

Y_x : Sargı oluk adımı

α_{elk} : Oluklar arasındaki elektriki açı

Şekilden de görüldüğü gibi sarımda adım kısaltması yapılmamış ve oluk adımı 9 olarak alınmıştır. Böylece adım katsayısı $k_a=1$ 'dir. Dağıtım katsayısı k_d ise;

$$k_d = \frac{\sin \frac{c \cdot \alpha_{elk}}{2}}{c \cdot \sin \frac{\alpha_{elk}}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{20}{2}} = \frac{\sin 30}{3 \cdot \sin 10} = \frac{0,5}{3 \cdot 0,17364} = 0,9598$$

olarak bulunur.

Başlangıçta makinanın asenkron çalışabilmesi için kutup başlarına kısa devre çubukları yerleştirilmiştir. Bu çubuklar kutuptaki olukların içine bakır iletkenler yerleştirilerek oluşturulmuştur. Uyarım sargıları silindirik kutup oluklarının tamamına yerleştirilmiştir.

4.2. Endüvi ve Kutup Yapısı ve Ölçü Bobinleri

Senkron makinanın endüvisinin perspektif görüntüsü Şek. 4.2.'de görülmektedir. Endüvi sarım sayısı oluklara yerleştirilen ölçü bobinleri yardımıyla hesaplanmıştır. Şekilde a-a' ve b-b' olarak gösterilen ölçü bobinleri endüvi oluklarına deneysel çalışmalarda kullanılmak amacıyla yerleştirilmiştir. a-a' sargısının adımı kutup adımı kadardır. Ayrıca bu bobin tam bir faz sargısının üzerine gelecek şekilde konumlandırılmıştır.

Bu durumda endüvinin bir oluğundaki sarım sayısı ölçü bobini yardımıyla bulunabilir. Ölçü bobininin sarıldığı olukta yer alan faz sargısı ile ölçü bobininin konumu sekonderi 1 sarımlı bir transformatör gibidir. Bu durumda sargı gerilimleri biliniyorsa dönüştürme oranından faz sargısının bir çift oluktaki sarım sayısı bulunabilir.

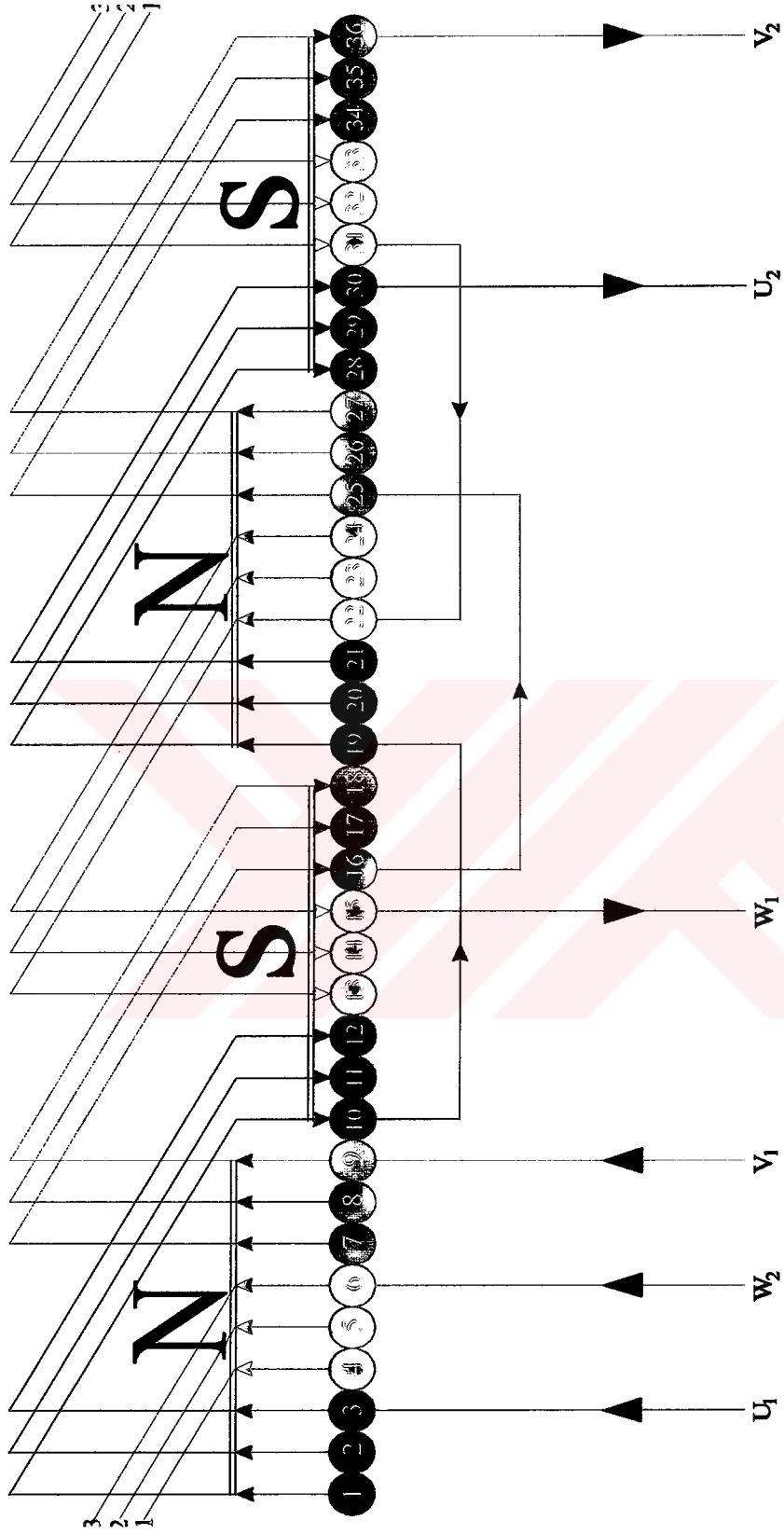
Bu amaçla endüvi sargısına 17,17 V'luk bir gerilim uygulandığında ölçü bobininden 0,12 V'luk bir gerilim alınmıştır. Bu durumda,

$$\frac{U_1}{U_2} \cong \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{17,17}{0,12} \cong \frac{N_1}{1} \Rightarrow N_1 \cong \frac{17,17}{0,12} \cong 146 \text{ sarım} \text{ olarak makinanın endüvi}$$

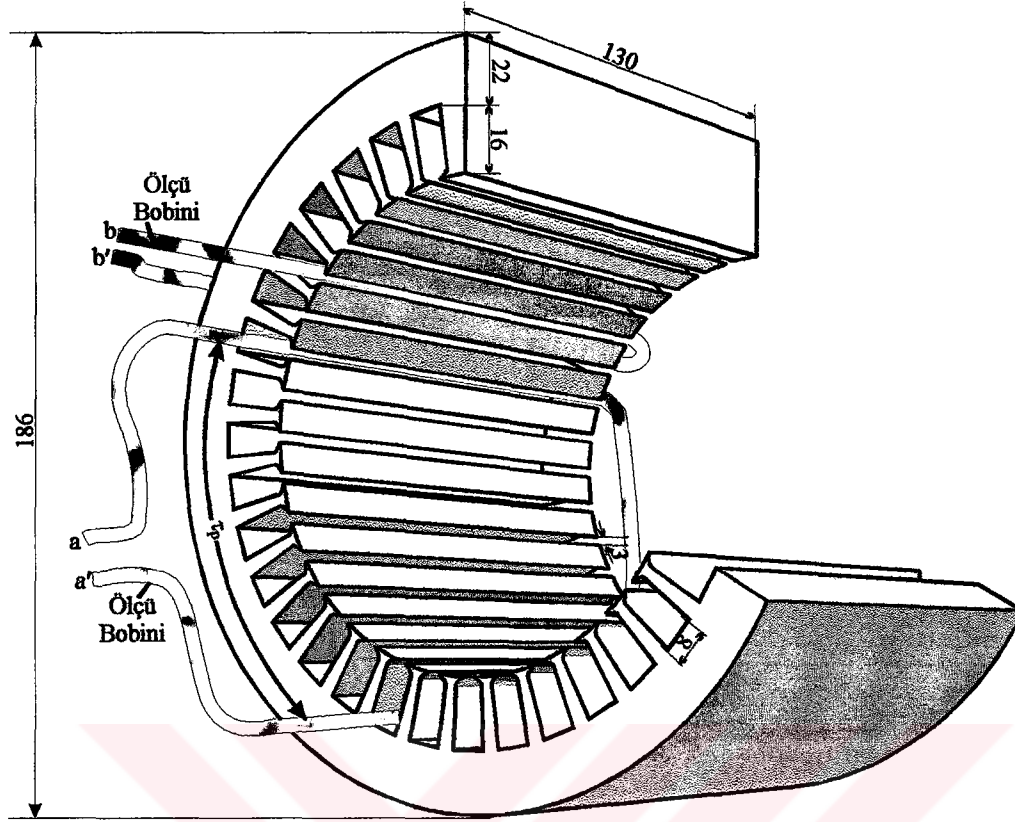
sargılarının bir çift oluğundaki sarım sayısı bulunur. Şek. 4.2.'de görülen ölçü bobinleri daha sonraki bölümlerde yer alan deneysel çalışmalarda da kullanılmıştır.

4.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Güç Kaynakları

Deneysel çalışmalarda d.c. uyartım gerilimini elde etmek için 0-250 V arası ayarlı gerilim üreten 10 A akımlı bir güç kaynağı kullanılmıştır. Deneylerde 0-380 V fazlar arası ayarlı gerilim sağlayan 10 A akımlı iki adet varyak kullanılmıştır. Bunlardan biri senkron makinanın motor çalışmasında endüviye üç fazlı gerilim uygulamak için, diğeri ise uyartım sargılarına yarı ve tam doğrultulmuş sinüsoidal gerilim uygulamak amacıyla kullanılmıştır. Çalışmalarda gerekli kare dalga 24 V'luk doğru gerilimi 220V'luk kare dalga çıkışa çeviren 500W'luk bir inverterdan elde edilmiştir. Bu kaynak kutup sargılarına yarı doğrultulmuş kare dalga uygulamak ve tam doğru akıma yakın bir akım elde etmek amacıyla kullanılmıştır.



Şek.4.1. Deney aracı olarak kullanılan senkron makinanın endüvi sarım şeması.

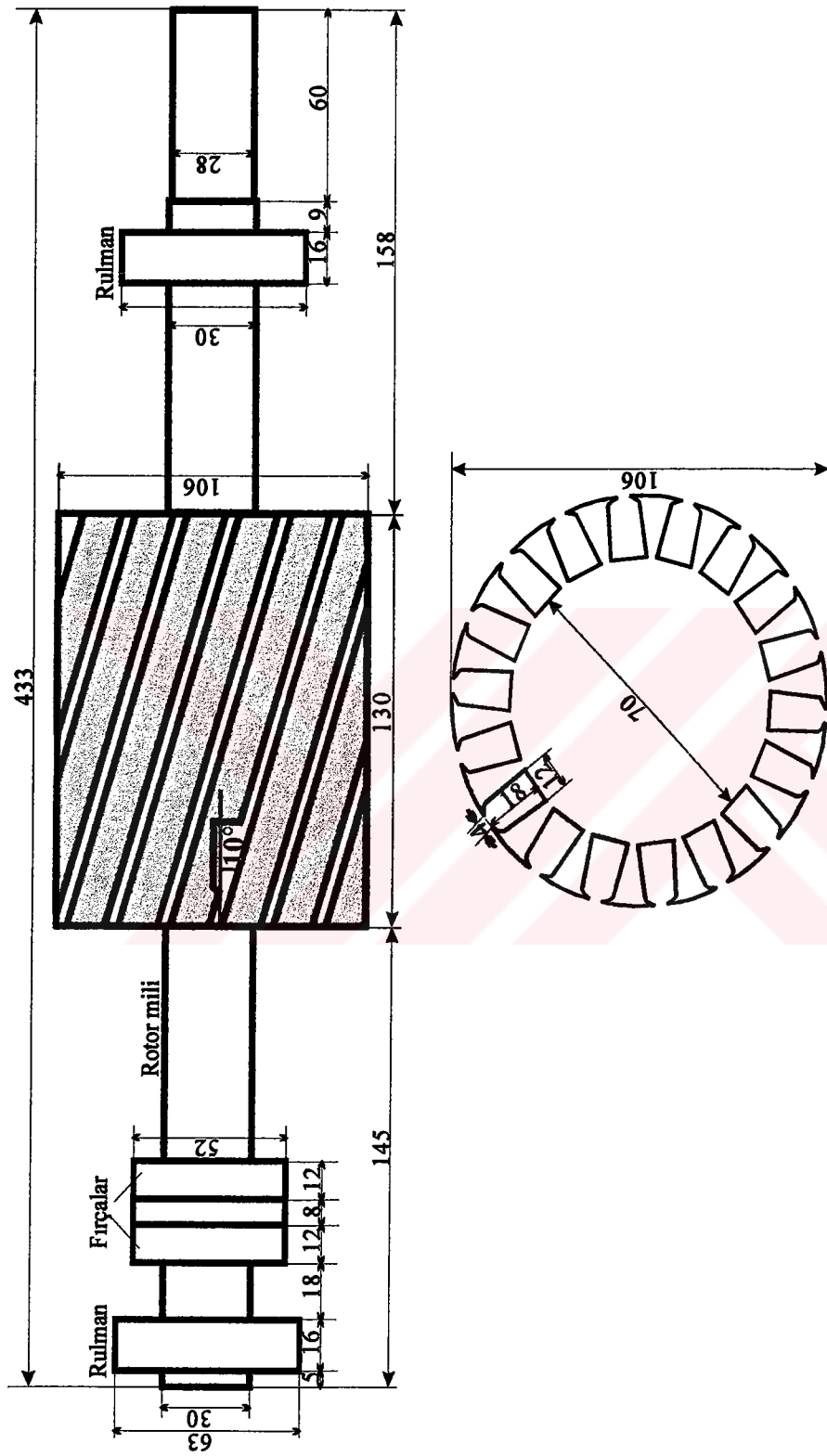


Şek. 4.2. Senkron makina endüvisinin perspektif görünüşü.

4.4. Senkron Makinayı Döndürmek İçin Kullanılan Tahrik Makinası

Deneylerde senkron makinayı generatör olarak kullanmada tahrik doğru akım kompond motoru tarafından sağlanmıştır. Aşağıda bu makinanın etiket bilgileri verilmiştir. Deneyler esnasında senkron makinanın generatör çalışması durumunda kompond motor yabancı uyartımlı motor olarak kullanılmıştır.

DC-MACHINE		MV 1006-225	
Generator	1,2kW 1400rpm.	Ser. No	8755
Shunt motor	1,0kW 1400rpm.	Temp. class	B (130°C)
Serie motor	1,0kW 1150rpm.	Protection class	(IP23)
Rotor	DC 220V 6,0A	Duty type	S2 30min.
Excitation	DC 220V 0,55A	Norm	IEC 34-1
TERCO		STOCKHOLM SWEDEN	



Şek.4.3 Senkron makina kutbunun ölçekli görünüşü.

BÖLÜM 5

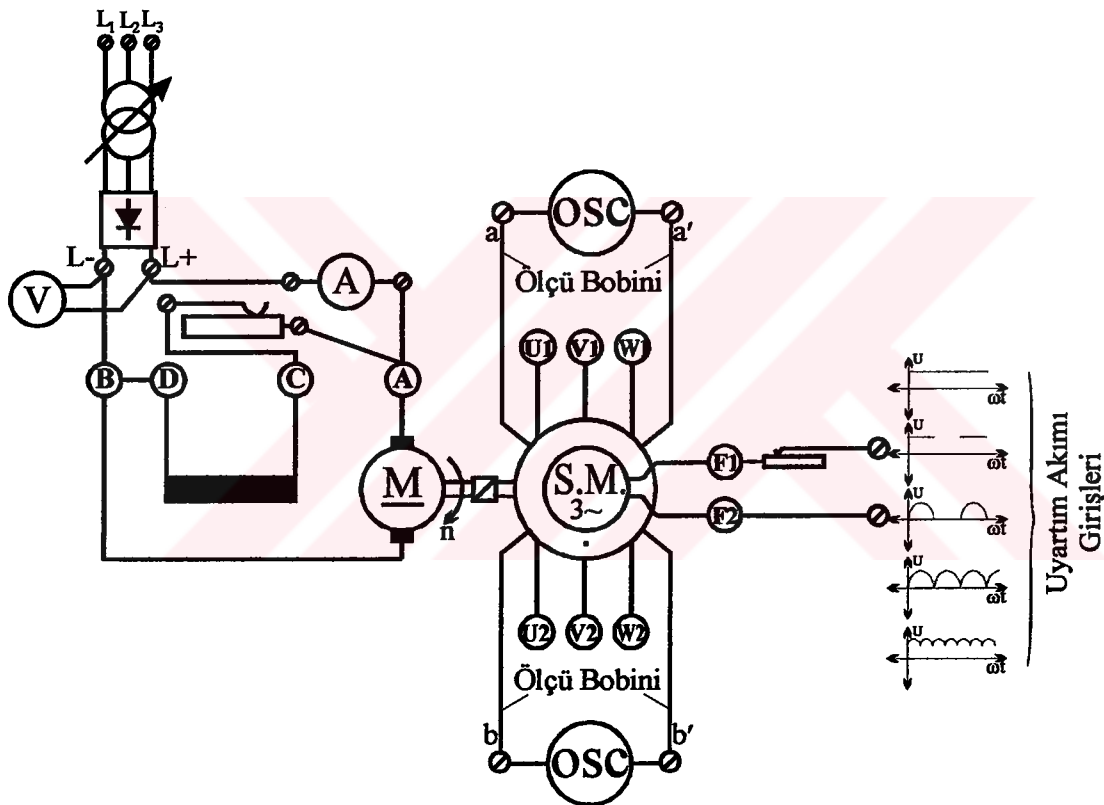
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tezin bu bölümünde bir önceki bölümde tanıtılan senkron makina üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve elde edilen veriler üzerinde durulacaktır. Bu deneyler üç ana başlık altında toplanabilir. Öncelikle uyartım akımının dalga şeklinin değişiminin hava aralığındaki magnetik alanın değişimine nasıl etki ettiği deneysel olarak araştırılmıştır. Daha sonra senkron makina generatör olarak çalıştırılarak ve uyartım akımının dalga şekli değiştirilerek üretilen gerilimin dalga şeklinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Son olarak senkron makinanın motor çalışma durumunda makinanın kararlılık sınırının uyartım akımının dalga şekliyle nasıl değiştiği araştırılmıştır.

5.1. Senkron Makinanın Hava Aralığındaki Dalga Şeklinin Belirlenmesi

Bunun için makinanın endüvi sargılarının üzerine Şek. 4.2.'te görüldüğü gibi oluk adımı kadar bir adıma sahip tek sarımlık bir bobin yerleştirilmiştir. Şek. 5.1.'deki devre kurularak senkron makina doğru akım makinası tarafından sabit bir devir sayısı ile döndürmüş ve kutuplarına çeşitli şekillerde uyartım gerilimi uygulanmıştır. Bu durumda endüvideki ölçü bobininde $e = B l v$ ifadesine göre bir gerilim endüklenecektir. Bu gerilimin biçimi ve genliği hız ve iletken boyu sabit olduğundan tamamen magnetik alanın değişimine bağlıdır. Dolayısıyla bu gerilimin dalga şekli de hava aralığındaki magnetik alanın şekline bağlıdır. 2. Bölümde açıklandığı gibi hava aralığındaki magnetik alanın şekli uyartım akımı ile değişir. Bu durumda a-a' bobininden elde edilen gerilimin şekli bize hava aralığındaki magnetik alanın şeklini verir. Çünkü Şek. 4.2.'de görüldüğü gibi a-a' bobininde $k_a = k_d = 1$ 'dir. İkinci ölçü bobini (b-b') ise sadece kontrol amacıyla ve boyunduruk akısını görmek amacıyla endüviye yerleştirilmiştir. Bu bobinden elde edilen değerler de aşağıda yeralmaktadır.

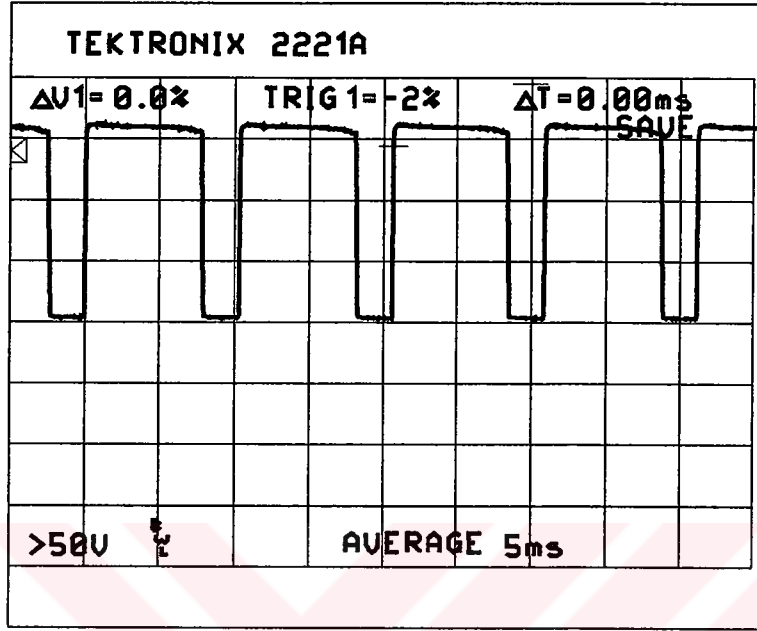
Osiloskopla yapılan tüm ölçümlerde Tektronix 2221A tipi hafızalı osiloskop kullanılmıştır. Elde edilen şekiller Procomm iletişim programıyla “plt” formatında bilgisayara aktarılarak Corel Draw 7.0 çizim programıyla grafiğe dönüştürülmüştür. Şimdi her dalga şekli için alınan ölçümleri sırasıyla inceleyelim.



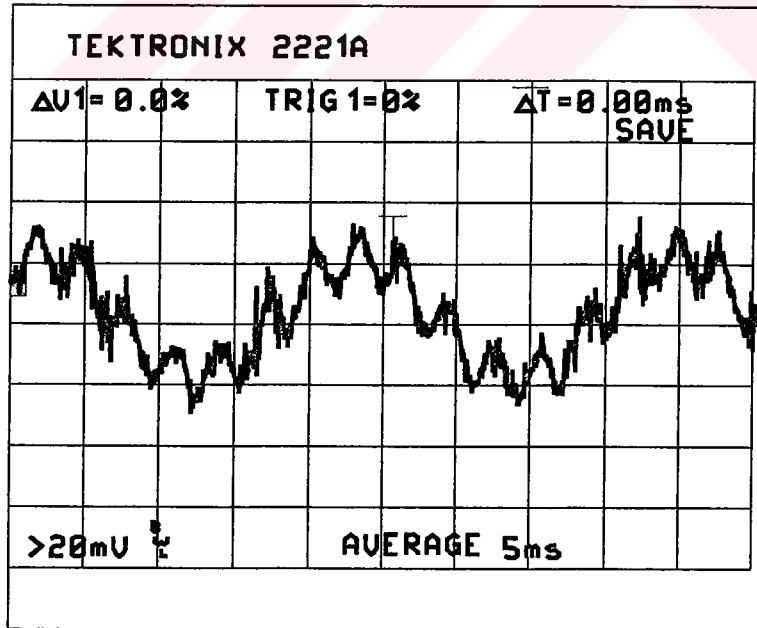
Şek. 5.1. Hava aralığındaki magnetik alanı belirlemek için gerekli deney bağlantı şeması.

Bu çalışma durumu senkron makinanın arzulanan çalışma durumudur. Bu deneyde 220V'luk doğru gerilim kullanılmıştır. İdeal doğru gerilim yalnızca akülerden elde edilebildiği için deneyde elde bulunan kare dalga osilatörünün ürettiği

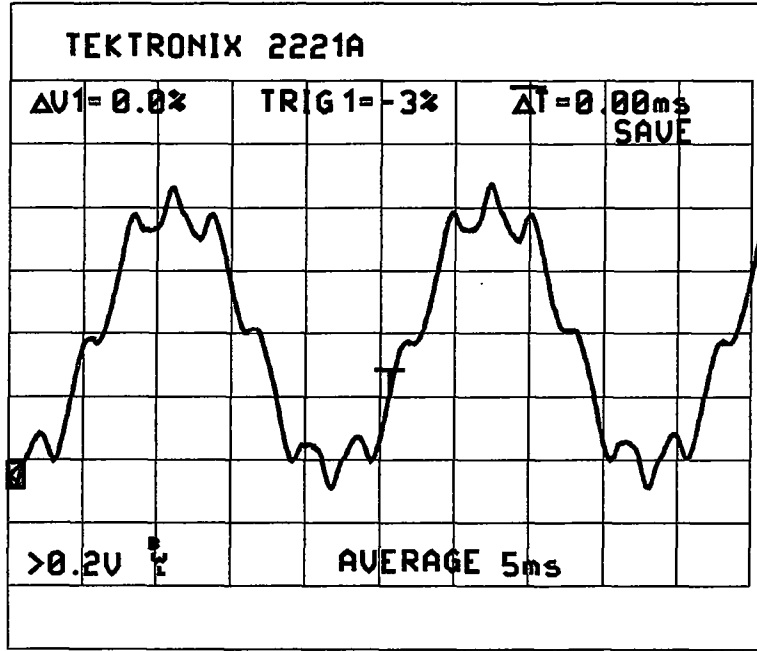
gerilim tam doğrultulmak suretiyle ideale çok yakın bir doğru gerilim elde edilmiştir. Uyarıtım akımının doğru akım olması durumunda a-a' ve b-b' bobinlerinden ölçülen gerilimin şekli aşağıdaki gibidir.



Şek. 5.2. Kare dalganın tam doğrultulmasından elde edilen ve uyarıtım sargısına uygulanan doğru akımın osiloskop görüntüsü.



Şek. 5.3. Şek. 5.2.'deki doğru akımla uyarıtımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.

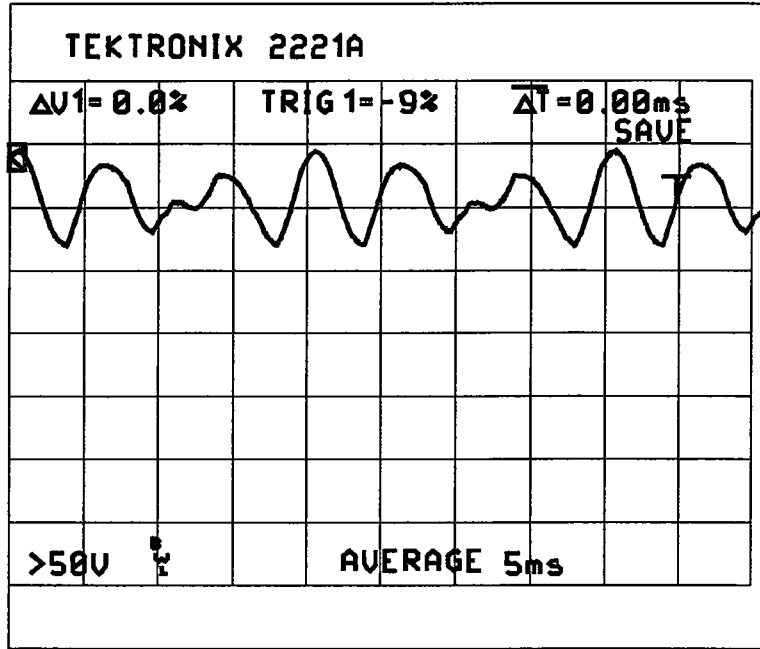


Şek. 5.4. Şek. 5.2.'deki doğru akımla uyarıtımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.

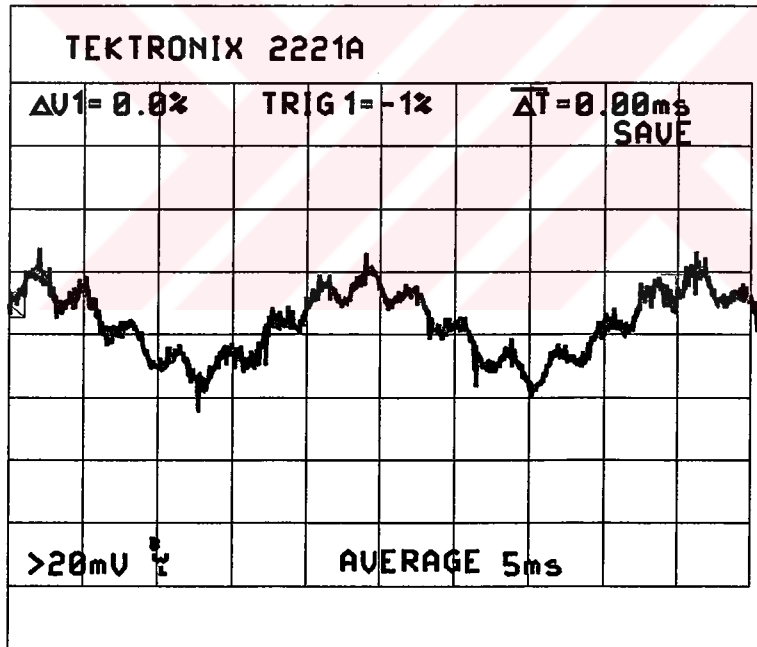
Şek. 5.3.'te görüldüğü gibi senkron makinanın uyarıtım akımının tam doğru akım olması durumunda makinanın hava aralığındaki magnetik alanın şekli basamaklı üçgen olmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi deney aracı olarak kullanılan senkron makinanın uyarıtım sargısı kutbun tüm çevresine açılmış oluklara yerleştirilmiştir. Bu şekilde sarılmış bir uyarıtım sargısına doğru akım uygulandığında hava aralığındaki akının şekli basamaklı üçgen olmaktadır [3]. a-a' bobininden elde edilen gerilimin şekli de bunu doğrulamaktadır. Şekildeki titreşimler kare dalganın tam doğrultulmasıyla ideal bir doğru akım elde edilememesinden kaynaklanmaktadır. Tek oluğa yerleştirilmiş b-b' bobininden elde edilen gerilim ise (Şek. 5.4.) basamaklı bir sinüs dalgasına benzemektedir.

5.1.2. Titreşimli Doğru Akımla Uyarıtım Durumu

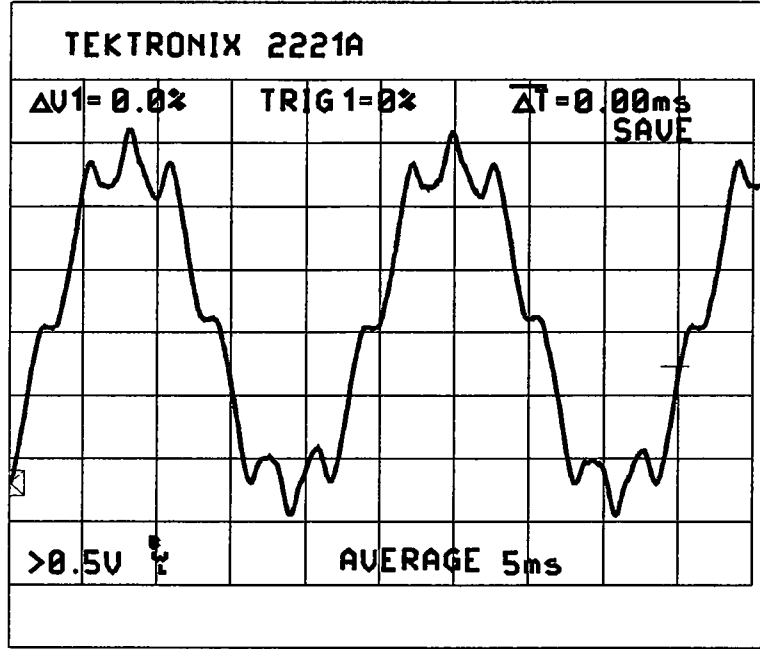
Bu deneyde makinanın uyarıtım sargısına güç kaynağından elde edilen titreşimli doğru gerilim uygulanmıştır. Bu gerilim üç fazlı sinüsoidal akımın diyotlar vasıtasıyla doğrultulmasından elde edilmiştir. Bu tip doğru akımlar filtre edilse bile tam bir doğru akım özelliği kazanamazlar. Nitekim bu güç kaynağından alınan gerilimin şekli de (Şek. 5.5.) bunu doğrulamaktadır. Ölçü bobinlerinden elde edilen gerilimlerin şekilleri aşağıda görülmektedir.



Şek. 5.5. Uyarım akımı olarak kullanılan titreşimli doğru akım.



Şek. 5.6. Titreşimli doğru akımla uyarımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.



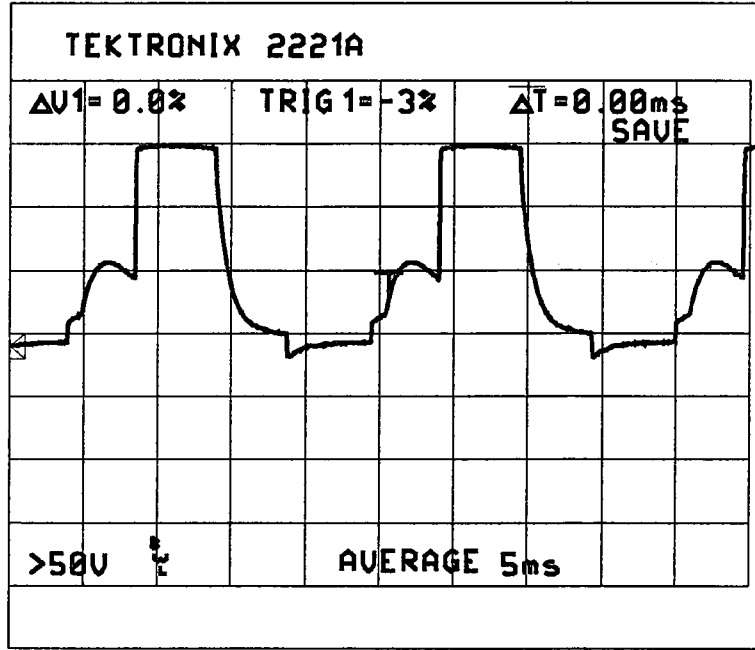
Şek. 5.7. Titreşimli doğru akımla uyarıtımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.

Titreşimli doğru akımla uyarıtımda da hava aralığındaki manyetik alanın şekli basamaklı üçgen görünümündedir. Tam doğru akım ile uyarıtım durumuna göre elde edilen şekillerde çok küçük farkların dışında önemli bir fark yoktur.

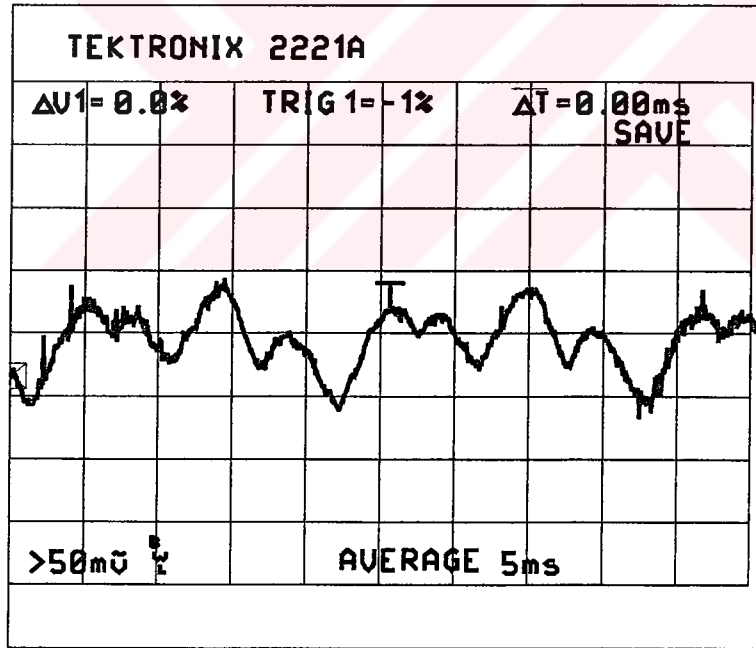
5.1.3. Yarı Doğrultulmuş Kare Dalga İle Uyarıtım Durumu

Bu deneyde senkron makina kutuplarına 220 V. gerilimli 50 Hz. frekanslı yarı doğrultulmuş kare dalga bir gerilim uygulanmıştır. Uygulanan kare dalganın şekli Şek. 5.8.'de görülmektedir. Şek. 5.9. ve Şek. 5.10. ise ölçü bobinlerindeki gerilimin dalga şekli görülmektedir.

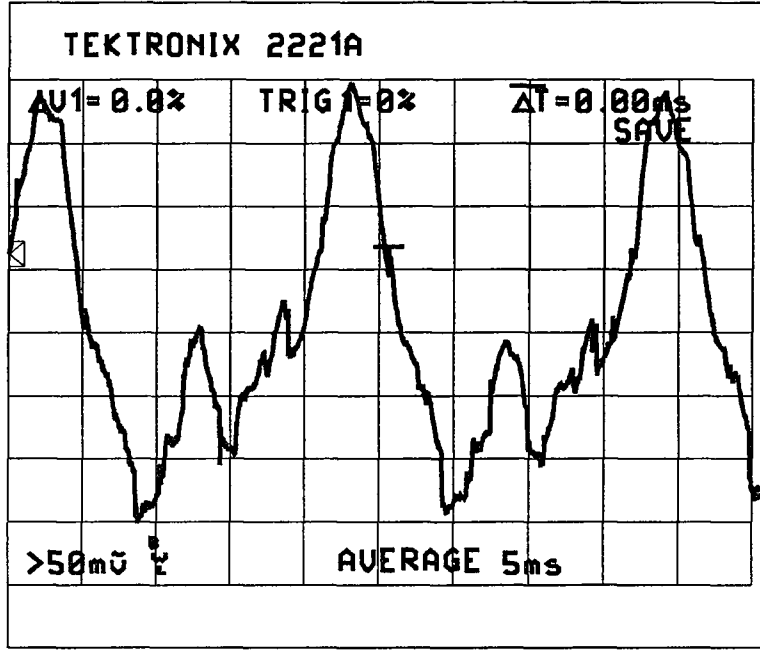
Burada kare dalganın yarı doğrultulmuş şekilde kutuplara uygulanmasının sebebi senkron makinanın bundan sonraki uygulamalarda bu tip dalga ile uyarılma zorunluluğudur. Uyarıtım sargısı yönü sabit gerilimlerle beslenmelidir. Aksi halde senkron makinanın senkron olarak çalışması gerçekleşmez. Bu nedenle de kare dalga bir diyot vasıtasıyla tek yönlü dalga haline getirilerek kutuplara uygulanmıştır. Aynı uygulama sinüsoidal akımla uyarıtımda da yapılmıştır.



Şek. 5.8. Uyarıtım için kullanılan yarı doğrultulmuş kare dalganın osiloskoptan alınmış görüntüsü.



Şek. 5.9. Yarı doğrultulmuş kare dalga ile uyarıtımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.

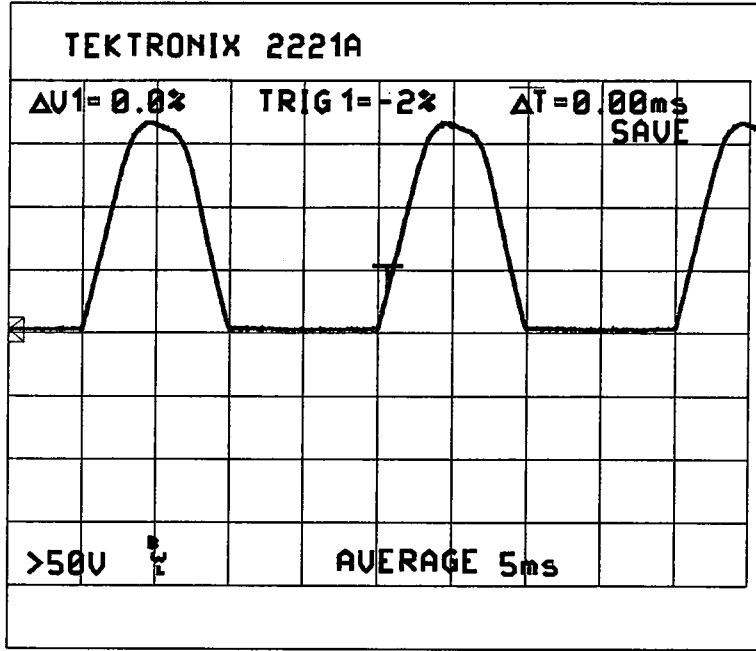


Şek. 5.10. Yarı doğrultulmuş kare dalga ile uyarımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.

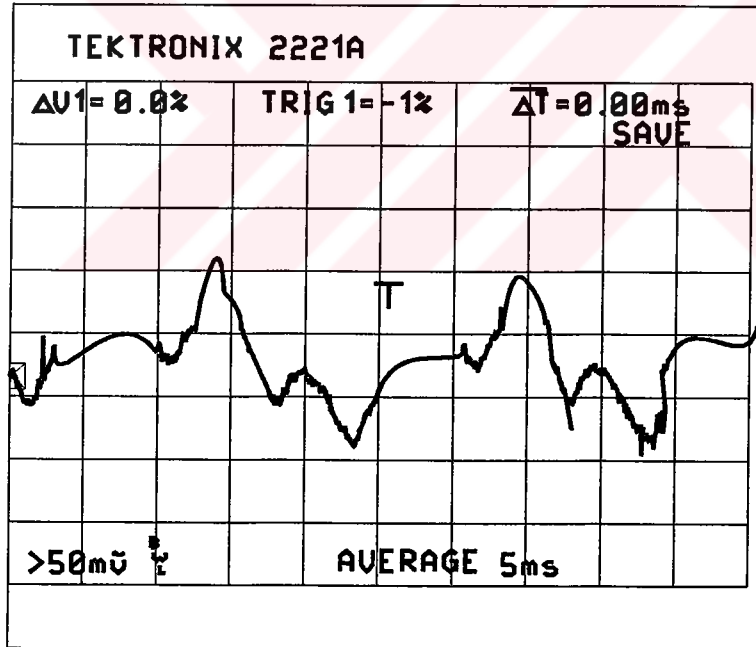
Uygulanan dalga şekline dikkat edilirse ideal doğru akımın kesintiye uğramış şekli olduğu görülür. Bu kesinti hava aralığı magnetik alanını da olumsuz etkilemiştir. Hava aralığındaki magnetik alanın şeklindeki bu aşırı bozulmanın makinanın endüvisinde endüklenen gerilimi de olumsuz etkileyeceği açıktır.

5.1.4. Yarı Doğrultulmuş Sinüsoidal Akımla Uyarım Durumu

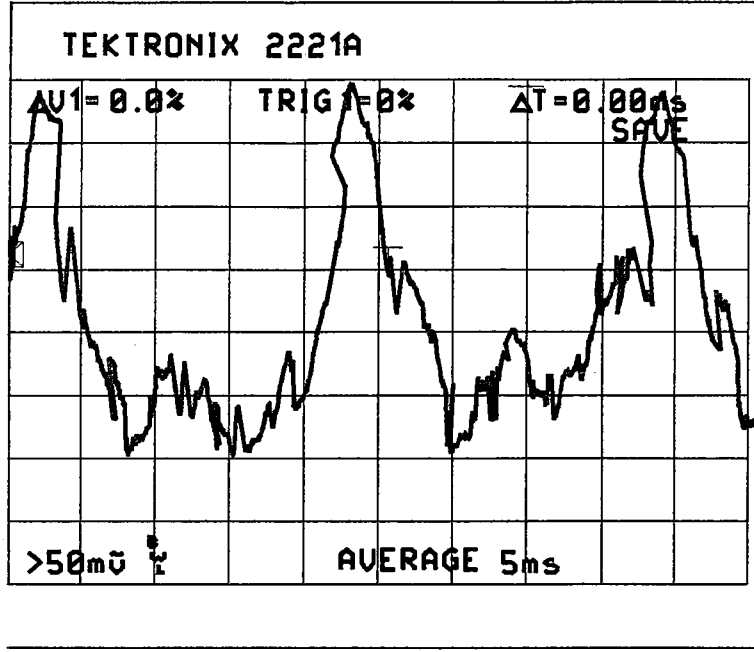
Bu uygulamada kutuplar 220 V., 50 Hz. değerinde yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarılmıştır. Şek. 5.11.'de uygulanan akımın dalga şekli görülmektedir. Ölçü bobinlerinde indüklenen gerilimlerin dalga biçimleri ise Şek. 5.12. ve Şek. 5.13.'de verilmiştir.



Şek. 5.11. Kutuplara uygulanan yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımın osiloskop görüntüsü.



Şek. 5.12. Yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarıtımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.

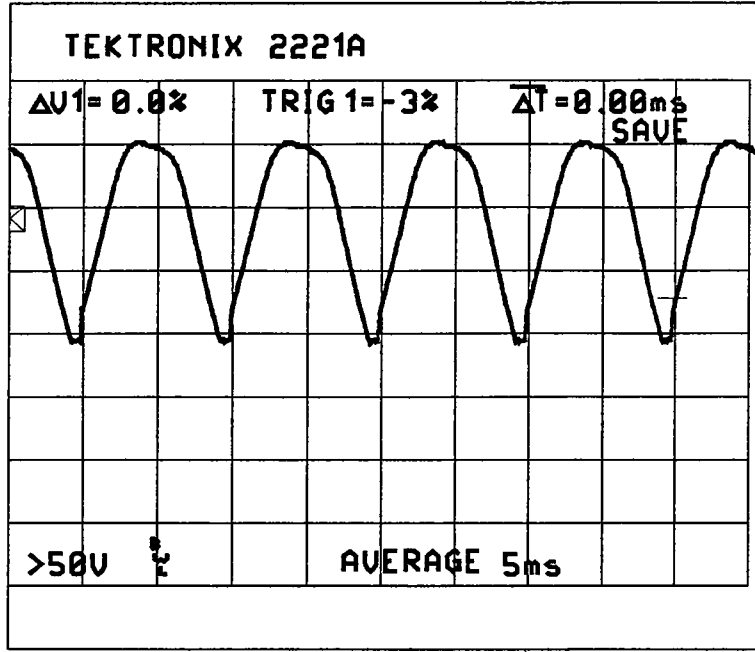


Şek. 5.13. Yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyartımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.

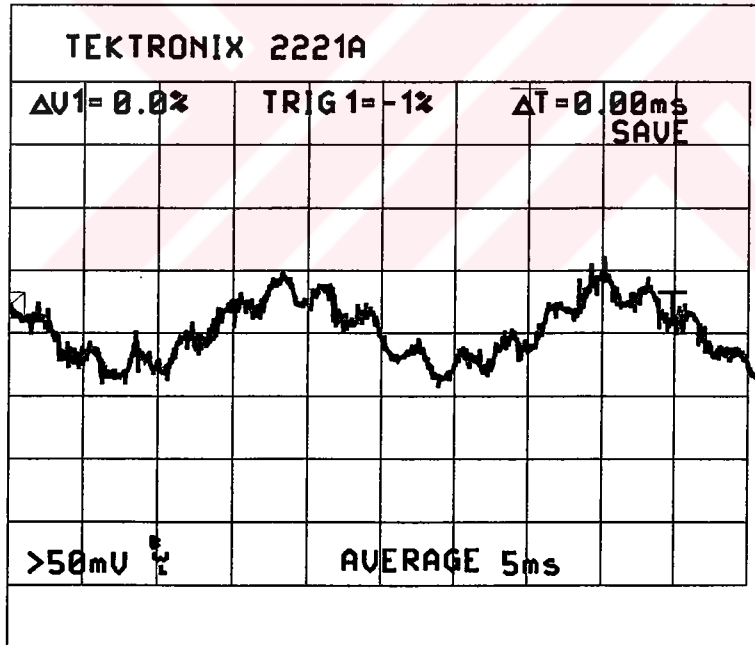
Bu uyartım şekli için de kare dalga ile uyartım durumu için söylenenler tekrar söylenebilir. Yarı doğrultulmuş sinüs dalgası kare dalgaya göre daha kötü bir doğru akımdır. Bu nedenle hava aralığındaki bozulmalarda ufak değişiklikler gözlenmektedir. Bu uyartım durumunda da hava aralığındaki magnetik alanın şekli aşırı bir bozulmaya uğramıştır. Bu bozulmanın etkileri daha sonraki uygulamalarda görülecektir.

5.1.5. Tam Doğrultulmuş Sinüsoidal Akımla Uyartım Durumu

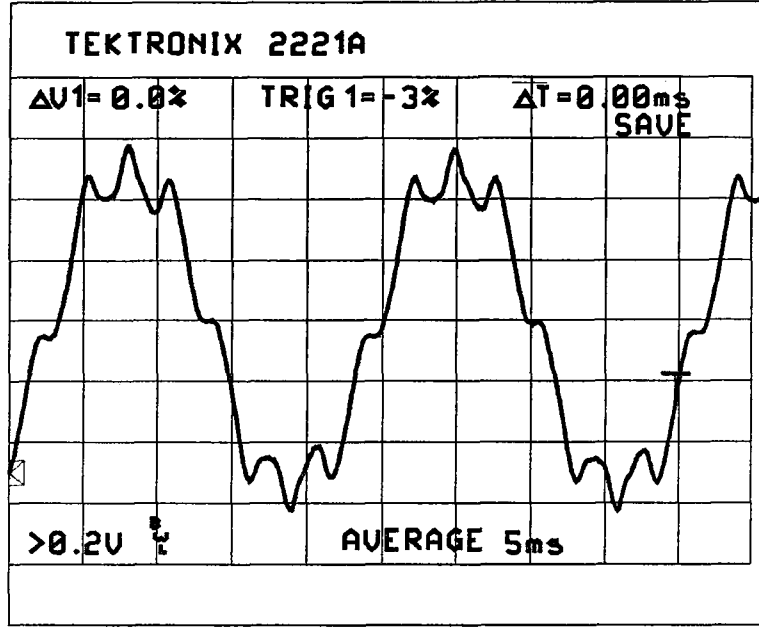
Bu uygulamada 220 V., 50 Hz. değerinde sinüsoidal gerilim köprü diyot kullanılarak tam doğrultulmuş ve kutuplara uygulanmıştır. Bu uyartım durumu aslında titreşimli doğru akımla uyartıma benzer. Bu dalga şekli bir fazlı sinüs dalgasının doğrultulmasından elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda görülmektedir.



Şek. 5.14. Uyarım sargılarına uygulanan tam doğrultulmuş sinüsoidal akımın dalga şekli.



Şek. 5.15. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarımda a-a' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.



Şek. 5.16. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarımda b-b' bobininden elde edilen gerilimin dalga şekli.

Bu tip uyarımda hava aralığındaki magnetik alanın şekli basamaklı üçgene çok yakındır. Bunun nedeni uygulanan tam doğrultulmuş sinüsoidal akımın da ideal doğru akımla kıyaslanmasa da sonuçta bir doğru akım olmasıdır. Özellikle titreşimli doğru akıma bir çok yönden benzemektedir. Nitekim b-b' bobininde endüklenen gerilimin de tıpkı titreşimli doğru akımla uyarımdaki şekle benzediği görülmektedir.

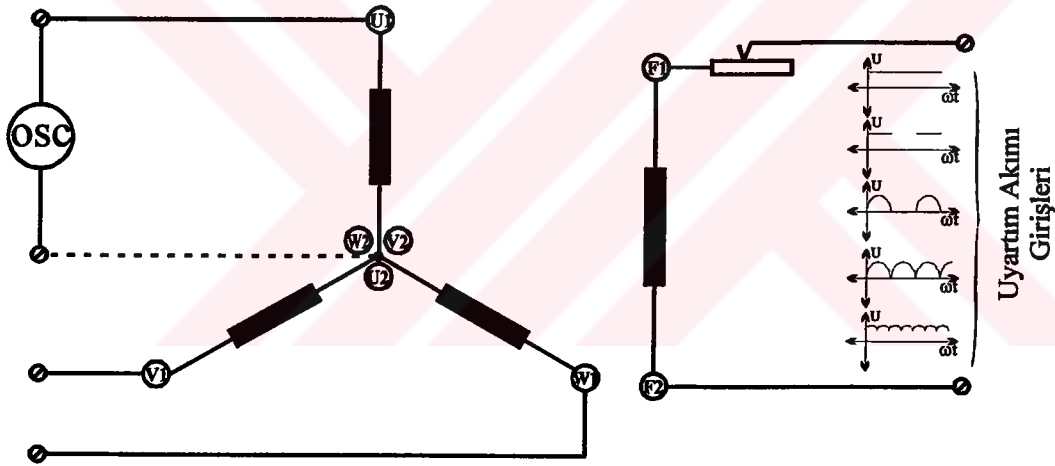
Uygulamalar sonucunda hava aralığı manyetik alan şeklinin kutuplara uygulanan doğru gerilimin düzgünlüğü ilgili olduğu söylenebilir. Çünkü uyarım akımının şekli net doğru akımdan saptığı ölçüde a-a' bobininde endüklenen gerilimin şekli de bozulmaktadır. Özellikle kesintili doğru akımlarda (yarı doğrultulmuş kare ve sinüsoidal dalgalar) bu bozulmanın arttığı görülmektedir.

5.2. Endüvide Endüklenen Gerilimin Uyarım Akımının Dalga Biçimi İle Değişiminin İncelenmesi

Bu bölümde deney aracı olarak kullanılan senkron makina generatör olarak çalıştırılarak değişik uyarımlarda endüvi sargılarında endüklenen gerilimin şekli incelenmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi senkron makineler genellikle generatör olarak alternatif gerilim üretimi için kullanılırlar. Ürettikleri gerilim ilgili yönetmeliklerde belirtilen sinüs dalgası biçiminde olmalıdır. Aksi halde makinanın üretimine izin verilmez ve üretici firmaya iade edilir. Bu nedenle senkron makinanın

ürettiği gerilimi sinüsoidal gerilime yaklaştırmak için çeşitli tedbirler alınır. Ayrıca senkron makinaların dizaynı uyartım sargılarına net doğru akım uygulanacağı kabul edilerek yapılır. Sarım özellikleri de bu ön koşula göre belirlenir. Bölüm 1’de bu şekilde sarılmış bir senkron makinanın kutuplarına doğru akım uygulanarak kutbun senkron devirle döndürülmesiyle hava aralığındaki döner alanın ve endüvide endüklenen gerilimlerin şekli ayrıntılı bir şekilde incelenmişti. (Şek. 1.1.). Bu nedenle burada uyartımın net doğru akım olması durumu tekrar edilmeyecektir. Yalnızca doğrultulmuş kare dalga ve sinüs dalgasıyla uyartım durumları ele alınacaktır.

Deney aracı olarak kullanılan senkron makina da uyartım akımının net doğru akım olması durumuna göre dizayn edilmiştir. Deneylerde makinanın sargı özellikleri değiştirilmeyecektir. Bu deneyler için kullanılacak deney bağlantı şeması şek.5.17’de görülmektedir.



Şek. 5.17. Senkron generatörün endüvisinde endüklenen gerilimin şeklini elde etmek için gerekli deney şeması

5.2.1. Uyartım Akımının Doğru Akım Olması Durumunda

Bu durumun ayrıntılı analizi Bölüm 1’de yapıldığı için burada sadece alınan deneysel sonuçlar verilecektir.

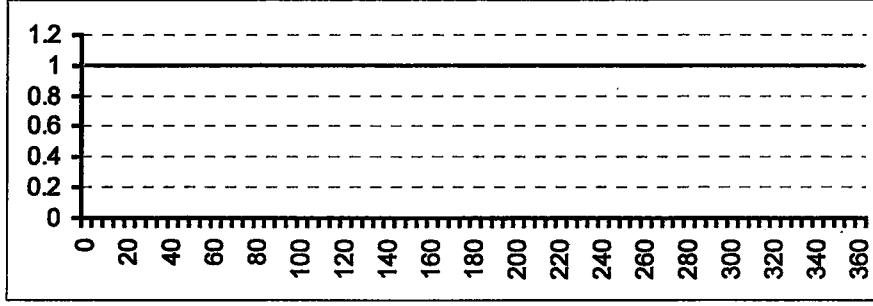
Uyartım akımının net doğru akım olarak uygulanması ve kutbun senkron hızla döndürülmesi durumunda ideal bir senkron makinanın endüvisinde, eşit genlikli ve aralarında $2\pi/3$ radyanlık açılar bulunan tam sinüsoidal akımlar endüklenecektir.

Bu durumda meydana gelen olaylar ve sinüsoidal gerilim endüklenmesinin nedenleri yukarıda açıklanmıştır. Burada söylenenler ideal bir makina için geçerlidir. Böyle bir makina imali mümkün olmadığından deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile çizimle bulunan sonuçlar arasında az da olsa farklılıklar vardır.

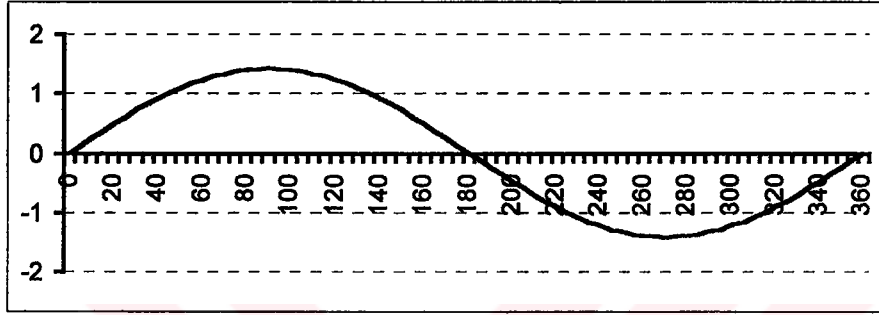
Uyartım akımının dalga şeklinin sabit değerli bir doğru akım olması durumunda endüklenen gerilimlerin dalga şeklinin tam sinüsoidal olduğu yukarıdaki bölümlerde açıklanmıştı. Bu veriden hareketle bilgisayar kullanılarak uyartım akımının değişiminin endüvi gerilimini nasıl etkilediği bulunabilir. Deneysel çalışmada aynı beş dalga şekli kutuplara uygulanmış ve teorik çalışmada bilgisayardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kutuplara değişik dalga şekilleri uygulandığında bilgisayardan elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur. Bilgisayar çizimleri için Microsoft Excel programı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan makinanın uyartım gerilimi 220 V. D.C olduğundan bu değer diğer dalga şekillerinde de ortalama değer olarak alınmış ve grafiklerde 1 sabitiyle belirlenmiştir. 220 V (maximum)'luk uyartım gerilimi endüvide yaklaşık 311 V maksimum değerli sinüsoidal alternatif gerilimler endüklemektedir. Bu durumda endüklenen gerilimlerin grafiklerdeki değeri 1,4144 birime karşılık gelmektedir.

Şek. 5.18.'de ideal senkron makinada uyartım akımının ideal doğru akım olması durumunda teorik olarak endüvi sargılarında endüklenen gerilimin dalga şekli gösterilmiştir. Şek. 5.19.'da ise deneysel olarak elde edilen dalga şekilleri görülmektedir. Deneysel çalışmada uyartım akımı olarak ideal doğru akıma çok yakın olan ve biçimi Şek. 5.2.'de verilen kare dalganın tam doğrultulmasından elde edilen akım kullanılmıştır.

Görüldüğü gibi net doğru akımla uyartımda Bölüm 1'de de değinildiği gibi endüvide sinüsoidal gerilimler endüklenmektedir. Deneyde uygulanan uyartımın tam bir doğru akım olmaması nedeniyle endüvi geriliminde de küçük bozulmalar görülmektedir.

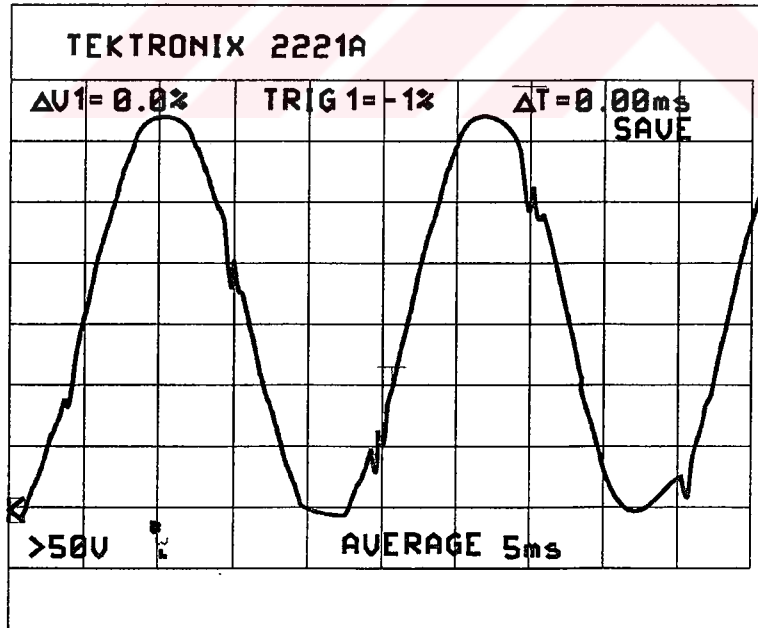


(a)



(b)

Şek. 5.18. (a) İdeal senkron makinada uyarım akımının ideal doğru akım olması durumunda (b) teorik olarak endüvi sargılarında endüklenen gerilimin dalga şekli

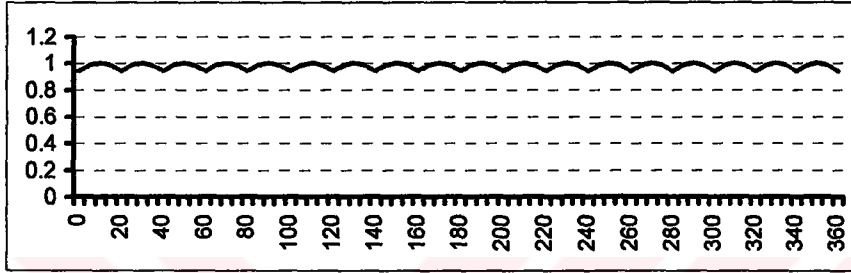


Şek. 5.19. Deneyisel çalışmalarda kullanılan senkron makinada net doğru akımla yapılan uyarım sonucu endüviden elde edilen dalga şekli.

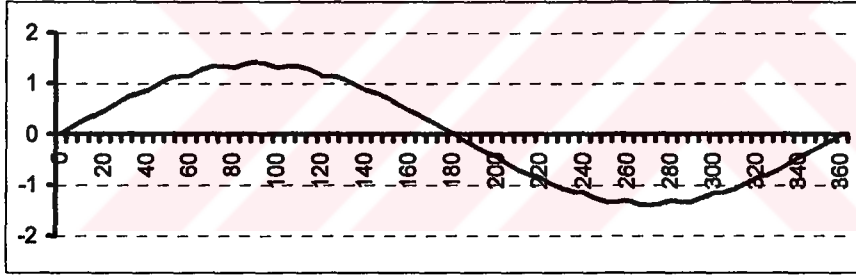
5.2.2. Titreşimli Doğru Akımla Uyartım Durumunda

Bu aşamada uyartım sargılarına d.c. güç kaynağından alınan ve biçimi Şek. 5.5.'de verilen titreşimli doğru gerilim uygulanmıştır. Bu durumda bilgisayar çizimleri ve osiloskoptan alınan endüvi gerilimlerinin dalga biçimleri aşağıda verilmiştir.

Bu uyartım durumunda da makina sargılarından sinüsoidal gerilimler alınmaktadır. Ancak ideal doğru akıma nazaran uyartımın şekli daha bozuk olduğu için endüklediği gerilimde de küçük bozulmalar meydana gelmektedir.

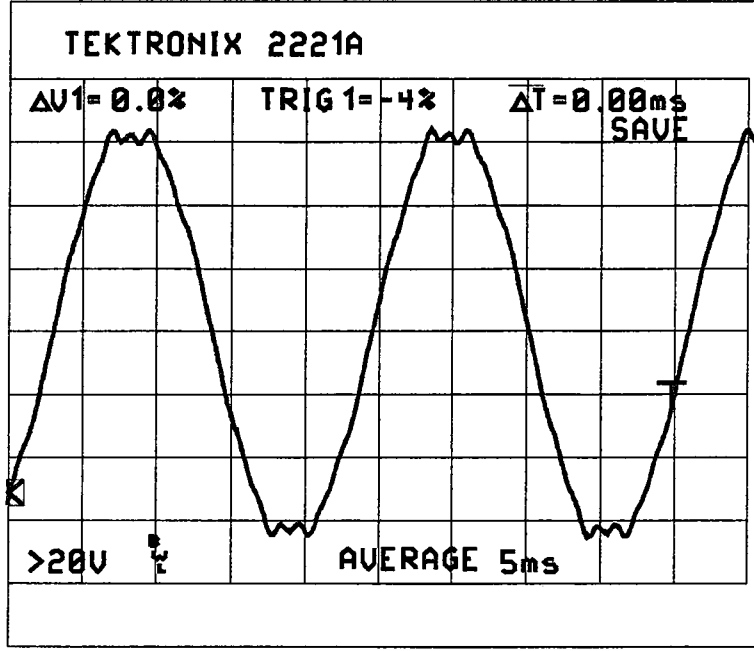


(a)



(b)

Şek. 5.20. (a) Titreşimli doğru akımla uyartım durumunda (b) bilgisayardan elde edilen faz geriliminin şekli.

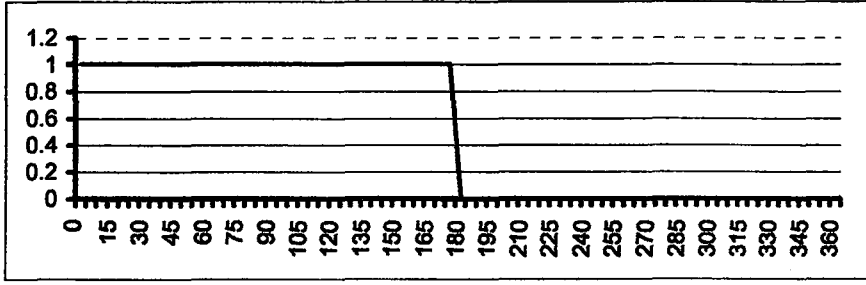


Şek. 5.21. Titreşimli uyartım durumunda endüvide endüklenen bir faz geriliminin osiloskop görüntüsü.

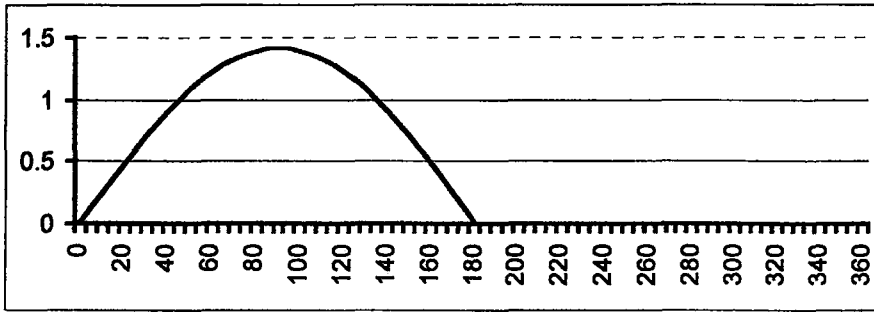
5.2.3. Uyartım Akımının Yarı Doğrultulmuş Kare Dalga Olması Durumunda

Yarı doğrultulmuş kare dalga, doğru akımın kesintiye uğramış halidir. Deneysel çalışmalarda kutuplara uygulanan kare dalga'nın frekansı 50 Hz'dir. Yarı doğrultulmuş kare dalga için bilgisayardan alınan teorik ve makinedan elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda verilmiştir. Bilgisayar görüntüleri ideal kare dalga içindir. Bu eğriler Bölüm 1'de açıklanan geometrik yöntemle de elde edilebilir. Deneyde uyartım akımı olarak kullanılan kare dalga'nın biçimi daha önce Şek. 5.8.'de verilmişti. S. makinedan elde edilen bir faz geriliminin biçimi ise Şek. 5.23.'de görülmektedir.

Bu uyartım şeklinin hava aralığındaki magnetik alanı da oldukça olumsuz etkilediği görülmüştü. Aynı olumsuzluğun endüvi geriliminin şekline de yansıdığı Şek. 5.23.'te açıkça görülmektedir. Bu şekilde gerilim üreten bir makina standartlara uygun sinüsoidal gerilim üretmediği için senkron generatör olarak kullanılamaz. Dolayısıyla yarı doğrultulmuş kare dalga'nın uyartım akımı olarak kullanılması, senkron makinanın generatör çalışması için uygun değildir.

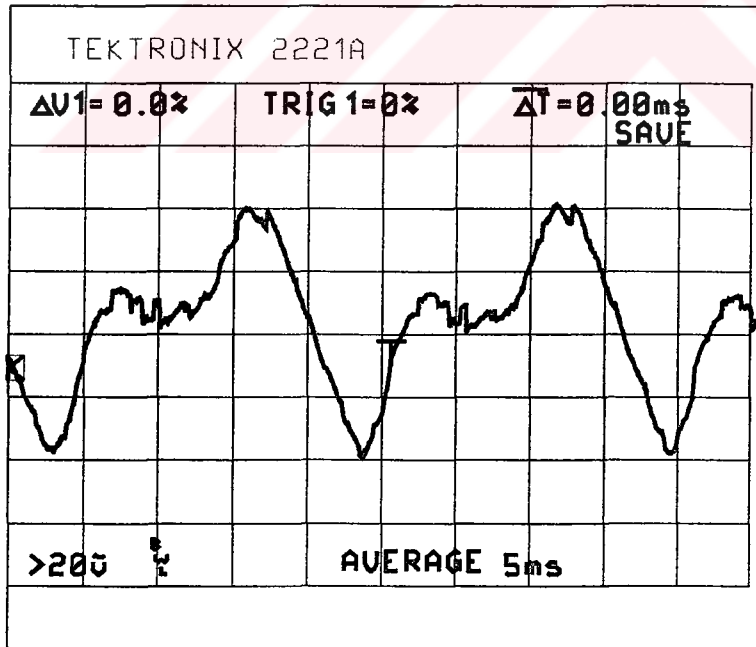


(a)



(b)

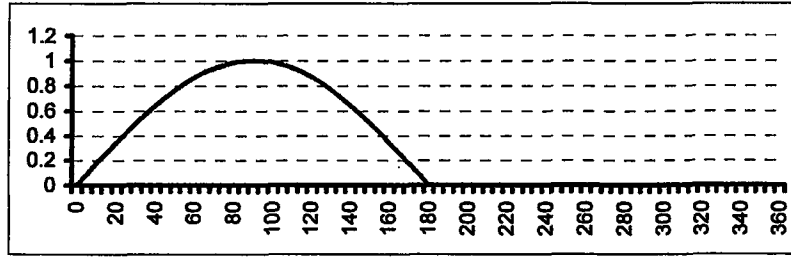
Şek. 5.22. (a) Uyarımın kare dalga olması durumunda (b) endüvide endüklenen gerilimin dalga şekli.



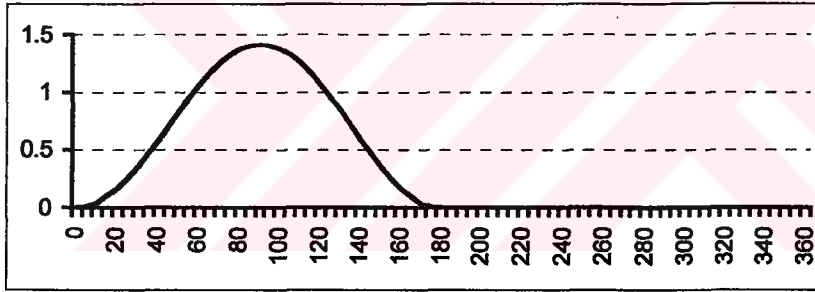
Şek. 5.23. Uyarımın yarı doğrultulmuş kare dalga olması durumunda s. makinadan elde edilen dalga şekli.

5.2.4. Uyarıtım Akımının Yarı Doğrultulmuş Sinüsoidal Akım Olması Durumunda

Bu aşamada uygulanan sinüsoidal gerilimin frekansı kare dalgada olduğu gibi 50 Hz'dir. Bu durumda bir önceki konuda kare dalga için söylenenler burada da geçerlidir. Uyarıtımın yarı doğrultulmuş sinüsoidal akım olması durumunda s. makinada endüklenen gerilimin dalga şekli Şek. 5.24.'te görülmektedir. Deneyde kullanılan yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımın biçimi ise daha önce Şek. 5.11.'de verilmişti. Endüviden elde edilen faz geriliminin görüntüsü Şek. 5.25.'de verilmiştir.



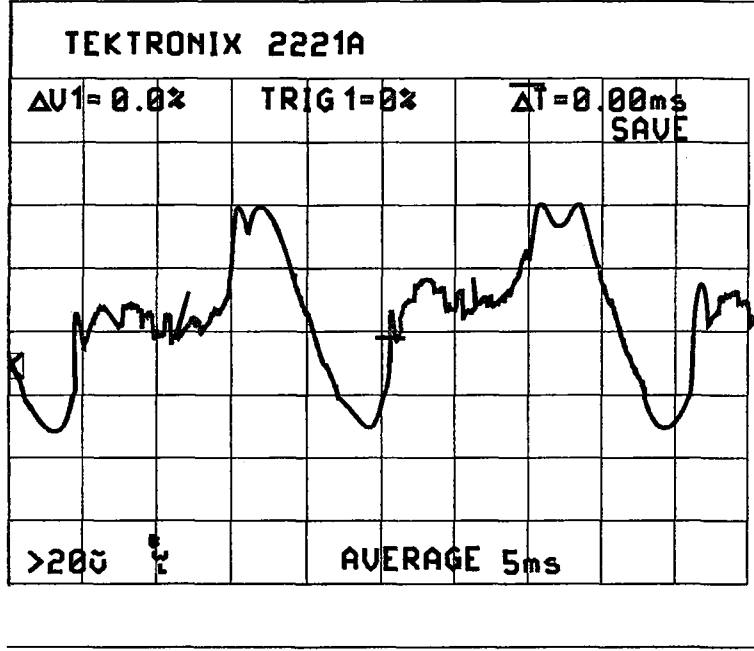
(a)



(b)

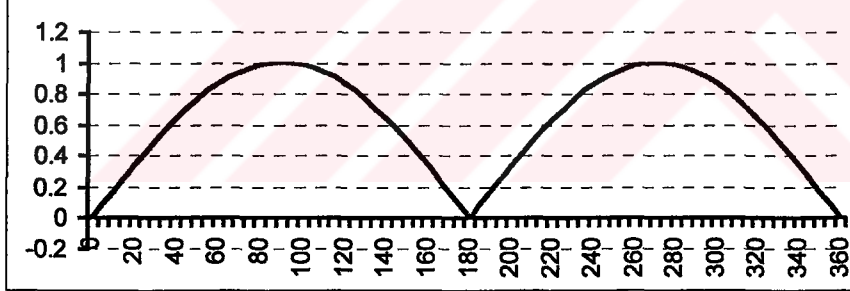
Şek. 5.24. (a) Uyarıtımın yarı doğrultulmuş sinüsoidal akım olması durumunda (b) endüklenen gerilim.

Bu uyarıtım durumu için de endüvi gerilimlerinin şekli sinüsoidal olmaktan çok uzaktır. Dolayısıyla bu biçimde bir uyarıtım akımının senkron makinada uyarıtım akımı olarak kullanılmaması gerekir.

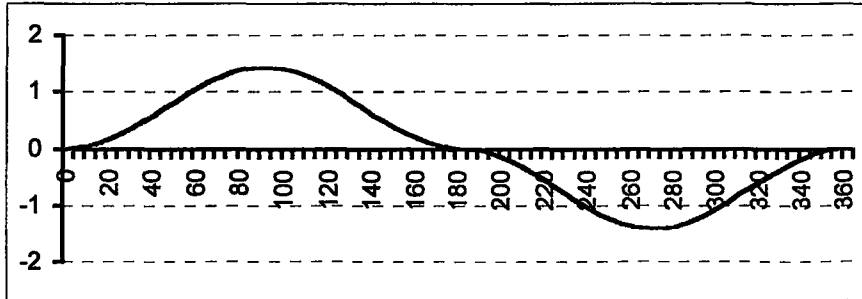


Şek. 5.25. Yarı doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyartımda endüvide endüklenen gerilimin şekli.

5.2.5. Tam Doğrultulmuş Sinüsoidal Akımla Uyartımda

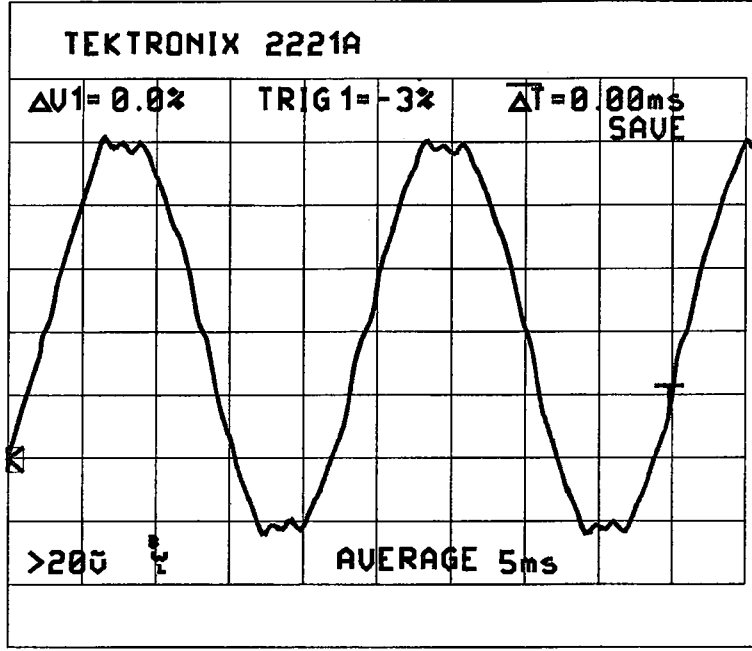


(a)



(b)

Şek. 5.26. (a) Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyartımda (b) endüvi geriliminin değişimi.



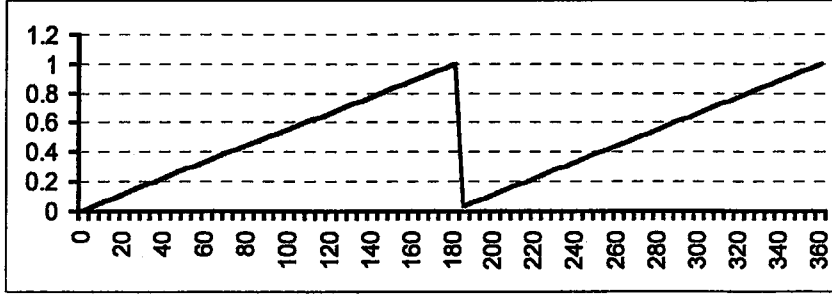
Şek. 5.27. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla durumda endüvi bir faz geriliminin osiloskop görüntüsü.

Bu aşamada uyartım sargısına tam doğrultulmuş sinüsoidal akım uygulanmıştır. Deneyde kullanılan sinüsoidal akımın biçimi Şek. 5.14.'te verilmiştir. Yukarıda bu uyartım için bilgisayardan alınan teorik ve makinadan alınan deneysel veriler ayrı ayrı görülmektedir.

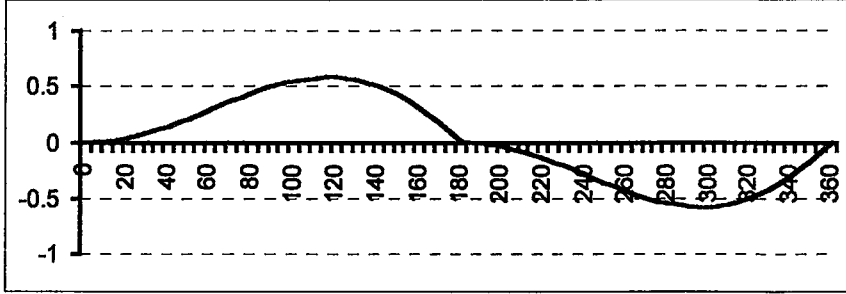
Tam doğrultulmuş sinüsoidal akım endüvi sargılarında sinüsoidal gerilime yakın bir gerilim endüklemektedir. Titreşimli ve tam doğru akımla uyartımda elde edilen gerilimlere göre eğride bozulmalar görülse de kabul edilebilir ölçülerdedir.

5.2.6. Değişik Uyartım Akımları İçin Endüvi Gerilimlerinin Biçimi

Bu bölümde sadece teorik olarak bilgisayardan elde edilen veriler kullanılacaktır. Deneysel olarak bu dalga şekilleri ile işlem yapılmamıştır. Bilgisayara girilen değişik şekilli uyartım akımları için elde edilen endüvi gerilimleri aşağıda verilmiştir. Uygulanan uyartım gerilimlerinin frekansları 50 Hz olarak alınmıştır.

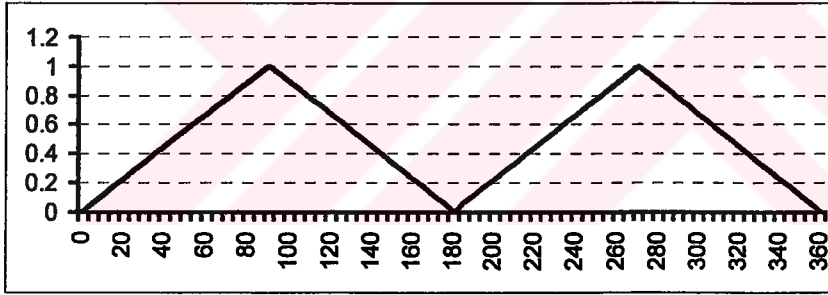


(a)

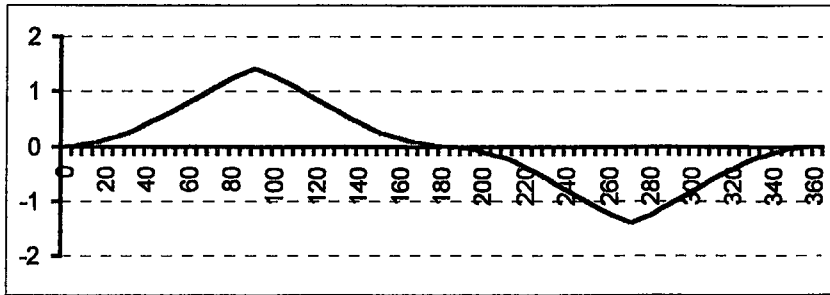


(b)

Şek. 5.28. (a) Uyarımın rampa fonksiyonu olarak değişmesi durumunda (b) elde edilen gerilimin dalga şekli.



(a)



(b)

Şek. 5.29. (a) Uyarımın üçgen dalga olması durumunda (b) endüvi geriliminin değişimi.

Alınan bilgisayar verileri ve yapılan uygulamalar senkron generatörlerin ürettikleri gerilimin dalga şeklinin hava aralığındaki alan şekliyle, dolayısıyla uyartım sargısına uygulanan doğru akımın kalitesiyle yakından ilgili olduğunu ortaya koymuştur.

Deneyler göstermiştir ki, senkron generatörlerden kaliteli bir sinüsoidal gerilim elde edebilmek için kutuplara uygulanan uyartımın mümkün olduğu kadar ideal doğru akıma yakın olması gerekir. Mümkünse uyartım akımı aküden sağlanmalıdır. Bu mümkün olmuyorsa doğrultucudan veya doğru akım generatöründen alınan gerilimin filtre edilmesiyle doğru akıma yaklaştırılması gerekmektedir.

5.3. Senkron Makinada Kararlılık (Kopma) Sınırının Uyartım Akımının Dalga Biçimiyle Değişiminin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler

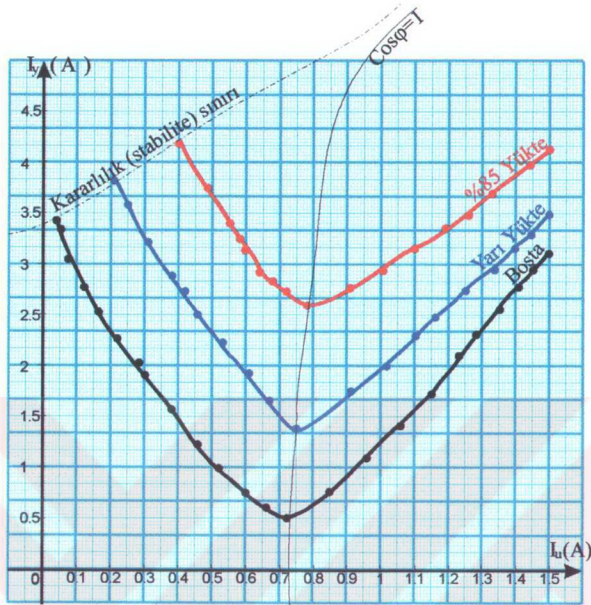
Tezin bu bölümünde senkron makina motor olarak çalıştırılarak 3. Bölümde anlatılan “V” eğrileri uyartım akımının dalga biçimleri değiştirilmek suretiyle ayrı ayrı elde edilmiştir. Deneyle ilgili bağlantı şeması Şek. 3.2’de verildiği gibidir. 3. Bölümde Şek. 3.4’de görülen “V” eğrileri hem generatör hem de motor çalışma için uyartımın net doğru akım olması durumunda elde edilen eğrilerdir. Burada sadece motor çalışma durumu incelenecektir. Deneyler esnasında senkron makina yıldız bağlıdır ve fazlararası 220 V’la beslenmektedir. Çizilen “V” eğrileri arasındaki farkların daha kolay belirlenebilmesi için bütün uyartım akım değerleri için elde edilen eğriler aynı ölçekli koordinat düzlemlerinde çizilmiştir. Deney esnasında devir sayısı ve şebeke gerilimi sürekli sabit tutulmuştur.

5.3.1. Doğru Akımla Uyartımda Elde Edilen “V” Eğrileri

Bu bölümde senkron makinaya elde mevcut bulunan kare dalganın tam doğrultulmasıyla elde edilen ve ideal doğru akıma çok yakın olan bir uyartım akımı uygulanmıştır. Bu kare dalganın osiloskop görüntüsü Şek. 5.2.’de verilmiştir. Boşta ve iki ayrı yükleme durumunda kaydedilen değerler ve bu değerlerle çizilen “V” eğrileri Tablo 5.1 ve Şek. 5.30.’da görülmektedir.

Tablo 5.1. Net doğru akımla uyarımda alınan değerler

Yük Durumu	n (d/dk)	U _s (V)	M (Nm)	I _u (A)	I _y (A)	Açıklama
Bosta	1500 (Sabit)	220 (Sabit)	0 (Sabit)	1.5	3.14	Kapasitif Çalışma
				1.45	2.93	
				1.41	2.76	
				1.35	2.55	
				1.28	2.3	
				1.23	2.1	
				1.15	1.75	
				1.06	1.44	
				0.96	1.1	
				0.85	0.71	
				0.72	0.5	Cosφ=1
				0.66	0.6	Endüktif Çalışma
				0.6	0.75	
				0.52	1	
				0.46	1.22	
				0.38	1.58	
				0.3	1.88	
				0.28	2.02	
				0.22	2.25	
				0.16	2.57	
				0.12	2.78	
				0.07	3.03	Kopma Nok.
				0.05	3.37	
				0.04	3.4	
Yarı Yükte	1500 (Sabit)	220 (Sabit)	3.1 (Sabit)	1.5	3.5	Kapasitif Çalışma
				1.45	3.3	
				1.4	3.15	
				1.34	2.92	
				1.25	2.7	
				1.16	2.48	
				1.1	2.28	
				1.02	2	
				0.91	1.73	
				0.75	1.38	Cosφ=1
				0.67	1.65	Endüktif Çalışma
				0.61	1.93	
				0.53	2.22	
				0.46	2.5	
				0.42	2.7	
				0.38	2.87	
				0.31	3.22	
				0.25	3.55	
				0.21	3.8	
				0.21	3.8	Kopma Nok.
%85 Yükte	1500 (Sabit)	220 (Sabit)	4.5 (Sabit)	1.5	4.12	Kapasitif Çalışma
				1.44	3.97	
				1.38	3.8	
				1.33	3.68	
				1.26	3.48	
				1.19	3.35	
				1.1	3.15	
				1.01	2.95	
				0.91	2.78	
				0.78	2.6	Cosφ=1
				0.72	2.7	Endüktif Çalışma
				0.68	2.8	
				0.64	2.91	
				0.6	3.14	
				0.58	3.25	
				0.55	3.42	
				0.49	3.73	
				0.4	4.18	
				0.4	4.18	Kopma Nok.



Şek. 5.30. Net doğru akımla uyartımda elde edilen “V” eğrileri.

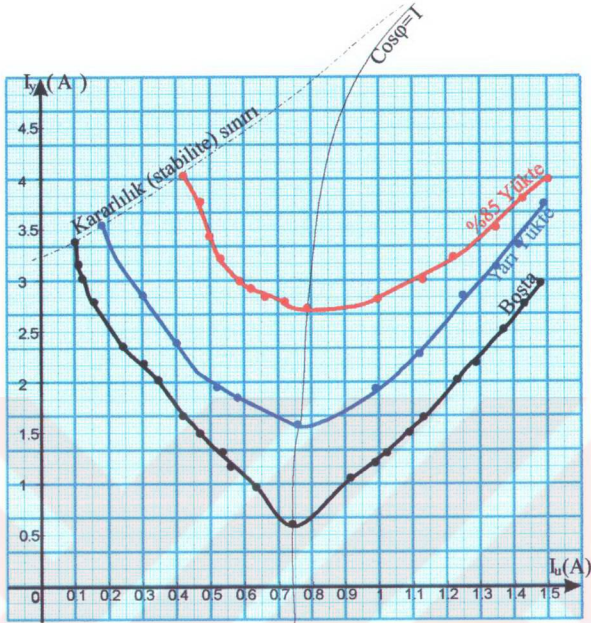
Bilindiği gibi senkron makinalar uyartım akımı değişimiyle omik, endüktif ve kapasitif çalışma durumlarına geçebilirler. Omik çalışmada şebekeden en düşük akımı çekerler. Gerek endüktif, gerekse kapasitif yüklemde belli bir yük değerine kadar senkron devirle dönerek kararlı çalışırlar. Bu yük değerinden sonra senkronizmden kopar ve dururlar. Bu deneylerde amaç makinanın senkronizmden koptuğu anı belirlemektir. Kopma olayı makinanın düşük uyartım akımlarında (endüktif çalışma durumu) mümkün olmuş, ancak kapasitif çalışma durumunda güç kaynaklarının gerilimlerinin yetersizliği nedeniyle uyartım akımı kopma noktasına kadar artırılmamıştır. Şek. 3.4.’de de görüldüğü gibi sadece endüktif çalışma durumunda kararlılık sınırı belirlenmiştir.

5.3.2. Titreşimli Doğru Akımla Uyarımda Elde Edilen “V” Eğrileri

Bu durumda kutuplara Şek. 5.5.’de görülen titreşimli doğru akım uygulanmıştır. Kaydedilen değerler ve çizilen Eğriler Tablo 5.2 ve Şek. 5.31’de görülmektedir.

Tablo 5.2. Titreşimli doğru akımla uyarımda kaydedilen değerler

Yük Durumu	n (d/dk)	U _s (V)	M (Nm)	I _u (A)	I _y (A)	Açıklama
Bosta	1500 (Sabit)	220 (Sabit)	0 (Sabit)	1.48	2.92	Kapasitif Çalışma
				1.43	2.73	
				1.37	2.52	
				1.29	2.2	
				1.23	2.01	
				1.13	1.65	
				1.09	1.5	
				1.02	1.3	
				0.99	1.21	
				0.91	1.11	
				0.74	0.63	Cosφ=1
				0.64	1	Endüktif Çalışma
				0.56	1.21	
				0.53	1.31	
				0.47	1.5	
				0.42	1.7	
				0.34	2.01	
				0.3	2.2	
				0.24	2.43	
				0.16	2.8	
				0.12	3.06	
Yarı Yükte	1500 (Sabit)	220 (Sabit)	3.1 (Sabit)	0.11	3.17	Kopma Nok.
				0.1	3.4	
				1.49	3.7	Kapasitif Çalışma
				1.42	3.42	
				1.35	3.15	
				1.25	2.84	
				1.12	2.3	
				0.99	1.92	Endüktif Çalışma
				0.76	1.6	
				0.58	1.85	
				0.52	1.92	
				0.4	2.45	
%85 Yükte	1500 (Sabit)	220 (Sabit)	4.5 (Sabit)	0.3	2.86	Kopma Nok.
				0.18	3.53	
				1.5	3.95	Kapasitif Çalışma
				1.43	3.77	
				1.35	3.51	
				1.22	3.2	
				1.13	3.02	
				1	2.8	
				0.79	2.7	Cosφ=1
				0.72	2.72	Endüktif Çalışma
				0.66	2.82	
				0.62	2.91	
				0.59	3	
				0.53	3.22	
				0.5	3.46	
				0.47	3.75	Kopma Nok.
				0.42	4.01	



Şek. 5.31. Titreşimli doğru akımla uyarımda elde edilen “V” eğrileri.

5.3.3. Yarı Doğrultulmuş Kare Dalga İle Uyarımda Elde Edilen “V” Eğrileri

Bu aşamada senkron motorun kutuplarına Şek. 5.8’de görülen yarı doğrultulmuş kare dalga uygulanmıştır. Bu tür uyarımda senkron makinanın senkron çalışmayı sağlayamadığı görülmüştür. Böylece bu tür uyarımda makina boşta dahi kilitlenmediğinden “V” eğrisi çıkartılamamıştır.

5.3.4. Yarı Doğrultulmuş Sinüsoidal Akım İle Uyarımda Elde Edilen “V” Eğrileri

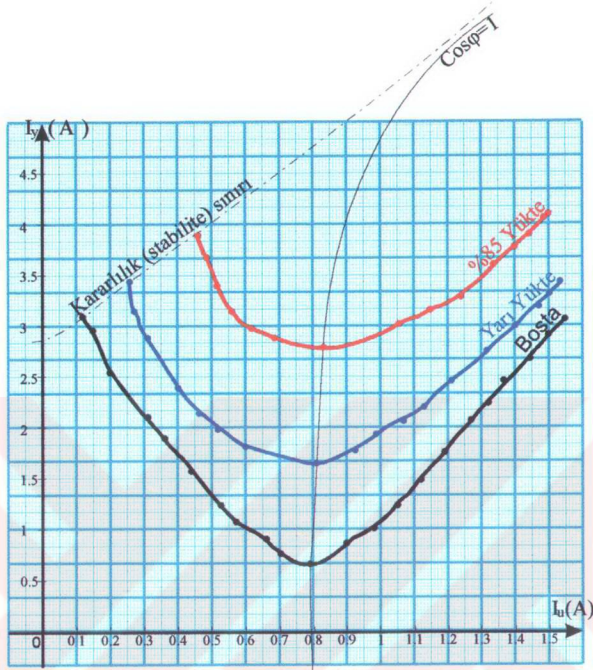
Bu deneyde senkron makina kutuplarına Şek. 5.11.’de görülen yarı doğrultulmuş sinüs dalgası uygulanmıştır. Bu uygulamada da makinanın senkron çalışmaya geçmediği ve sürekli olarak kararsız çalıştığı gözlenmiştir. Bu nedenle bu akım şekli için de “V” eğrileri elde edilememiştir.

5.3.5. Tam Doğrultulmuş Sinüsoidal Akımla Uyarımda Elde Edilen “V” Eğrileri

Bu uygulamada senkron motorun uyarım sargılarına köprü diyot kullanılarak tam doğrultulmuş sinüsoidal alternatif akım uygulanmıştır. Uygulanan akımın dalga şekli Şek. 5.14.’te görüldüğü gibidir. Bu uyarımda kaydedilen değerler ve bu değerlerle çizilen “V” eğrileri aşağıda görülmektedir.

Tablo 5.3. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarımda alınan değerler.

Yük Durumu	n (d/dk)	U _s (V)	M (Nm)	I _a (A)	I _y (A)	Açıklama
Bosta	1500 (Sabit)	220 (Sabit)	0 (Sabit)	1.55	3.05	Kapasitif Çalışma
				1.5	2.85	
				1.44	2.64	
				1.38	2.42	
				1.32	2.2	
				1.27	2.02	
				1.19	1.73	
				1.12	1.49	
				1.05	1.23	
				0.98	1	
				0.9	0.8	Cosφ=1
				0.79	0.65	
				0.7	0.69	Endüktif Çalışma
				0.66	0.8	
				0.57	1.04	
				0.53	1.21	
				0.44	1.53	
				0.37	1.84	
				0.32	2.29	
				0.2	2.52	
				0.15	2.92	Kopma Nok.
				0.12	3.01	
Yarı Yükle	1500 (Sabit)	220 (Sabit)	3.1 (Sabit)	1.53	3.42	Kapasitif Çalışma
				1.5	3.34	
				1.47	3.21	
				1.4	3	
				1.32	2.74	
				1.21	2.41	
				1.13	2.2	
				1.07	2.02	
				0.99	1.85	
				0.93	1.75	Cosφ=1
				0.81	1.64	
				0.6	1.79	Endüktif Çalışma
				0.52	1.99	
				0.46	2.16	
				0.4	2.42	
				0.31	2.85	
				0.27	3.16	Kopma Nok.
				0.25	3.53	
%65 Yükle	1500 (Sabit)	220 (Sabit)	4.5 (Sabit)	1.5	4.07	Kapasitif Çalışma
				1.49	4.05	
				1.44	3.88	
				1.4	3.77	
				1.34	3.61	
				1.24	3.35	
				1.15	3.17	
				1.06	3	Cosφ=1
				0.83	2.81	
				0.69	2.88	Endüktif Çalışma
				0.62	2.98	
				0.56	3.19	
				0.52	3.44	
				0.49	3.66	Kopma Nok.
				0.47	3.86	

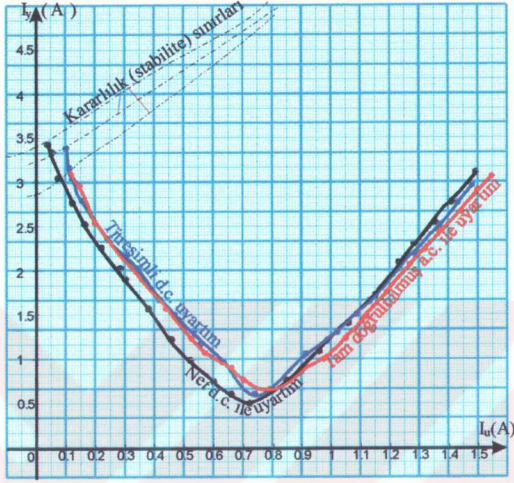


Şek. 5.32. Tam doğrultulmuş sinüsoidal akımla uyarımda elde edilen “V” eğrileri.

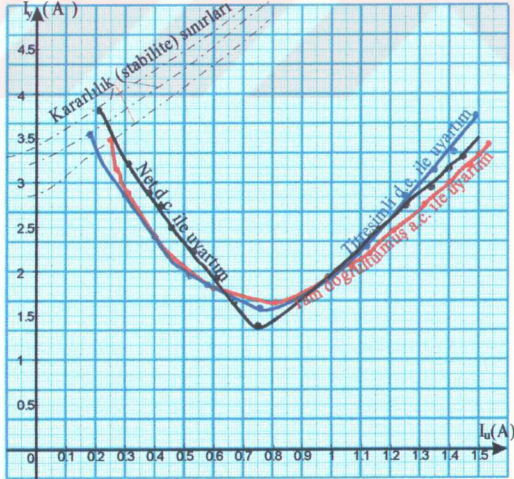
Şek.5.30, 5.31 ve 5.32’de verilen eğriler aynı ölçekli koordinat düzleminde olduklarından bunların hepsini birlikte göstermek karşılaştırma yapmak için yararlı olacaktır. Aşağıdaki şekillerde üç yükleme durumu için üç değişik uyarımda elde edilen “V” eğrileri bir arada gösterilmiştir.

Bölüm 3’te senkron motorda yük açısı β ’nin motorun endüvisinde endüklenen zıt emk E ile doğru orantılı olduğu matematiksel olarak bulunmuştur. Bölüm 2’de ise motorun endüvisinde endüklenen zıt emk’nin hava aralığındaki magnetik alanın şekli ile bağıntılı olduğu belirtilmişti. Bu bölümün başında yapılan deneylerde ise makinanın kutuplarına uygulanan doğru akımın kalitesinin gerek hava aralığındaki magnetik alanın şeklini, gerekse endüvi sargılarında endüklenen emk’te etkilediği gözlenmişti. Bu gözlemler sonucunda senkron makinalarda uyarım akımı

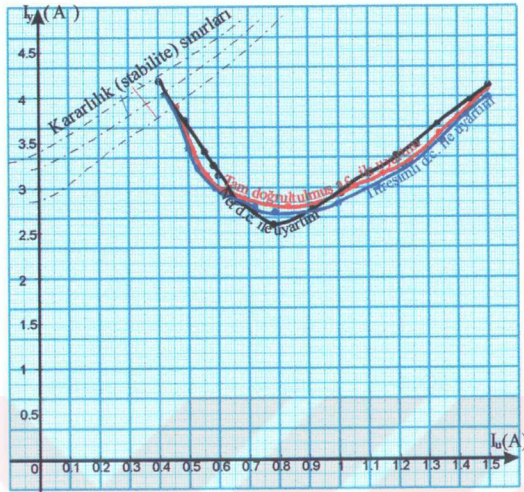
dalga şekli ideal doğru akıma ne kadar yakınsa yukarıdaki değişkenlerin de o kadar istenen ölçülerde olduğu görülmüştür.



Şek. 5.33. Boşta çalışmada üç ayrı uyarım akımı şekli için elde edilen “V” eğrileri.



Şek. 5.34. Yarı yükte çalışmada üç ayrı uyarım akımı şekli için elde edilen “V” eğrileri.



Şek. 5.35. %85 yükte çalışmada üç ayrı uyarım akımı şekli için elde edilen “V” eğrileri.

Uyarımın net d.a.’dan sapmasının olumsuz etkileri “V” eğrileri deneylerinde de görülmüştür. Her üç çalışma durumunda yapılan ölçümlerde omik çalışma noktalarının uyarımın kalitesine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Karşılaştırma yapılan şekillere dikkat edilirse, net doğru akımla uyarım durumunda omik çalışmadaki yük akımı ve uyarım akımı diğer uyarım tiplerine göre daha küçük değerdedir. Endüktif çalışmadaki kopma noktası da yine tam doğru akımla uyarımda diğer uyarımlara göre daha küçük uyarım akımlarında gerçekleşmektedir. Ayrıca yarı doğrultulmuş kare dalga ve sinüsoidal gerilimle beslemelerde makinanın senkronizme dahi geçmemesi kararlılık sınırının uyarımın kalitesine bağlı olduğunu göstermiştir.

5.4. Senkron Makinanın Yüklerek Kararlılık (Kopma) Sınırının Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler

Bu bölümde senkron makina motor olarak çalıştırılmış ve miline akuplre bir dinamo bağlanarak yükleme yapılmıştır. Bu esnada makina milinden alınan momentle şebekeden çekilen yük akımı izlenmiş ve makinanın hangi moment değerinde senkronizmden ayrıldığı belirlenmiştir. Bu deneylerde de diğer deneylerde kullanılan

üç değişik uyartım akımı için kopma noktası belirlenmiştir. Her üç uyartımda da uyartım gerilimi ortalama değer olarak makinanın nominal uyartım gerilimi olan 220 V değerinde sabit tutulmuştur. Deneyde gözlenmek istenen değer makinanın senkronizmden kopma anı olduğu için, ara değerlerin burada gösterilmesine gerek duyulmamıştır. Makinanın kopma noktası çok hassas ölçülemediğinden bu değere en yakın kararlı çalışma değeri kopma noktası olarak alınmıştır. Gerçek kopma değerleri alınan değerlerden biraz daha yüksektir.

Bu deneyler sonucunda senkron motorun tam doğru akım ile uyartımda şebekeden 8.1 A çekerken 12.2 Nm'lik yükte senkronizmden koptuğu görölmüştür. Titreşimli doğru akım ile uyartımda ise bu değer 7.2 A yük akımı için 11.3 Nm olarak belirlenmiştir. Tam doğrultulmuş sinüs dalgasıyla uyartımda ise kopma noktasının 6,5 A akımda 10 Nm'ye gerilediğı gözlenmiştir.

Göröldüğü gibi senkron motorlar nominal yük değerlerinin yaklaşık 2 katına kadar kararlı çalışmalarını sürdürmektedirler. Yüklenerek belirlenen kopma noktaları da uyartımın dalga şekline bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Aynı gerilim değerine sahip uyartımların şekli değiştikçe makinanın taşıyabileceğı maksimum yük değeri de değişmektedir.

SONUÇ

Çağımızda giderek artan enerji ihtiyacı çok büyük güçlü senkron makinaların üretilmesi sonucunu doğurmaktadır. Ayrıca üretim merkezlerinin yerleşim yerlerinden uzakta olma zorunluluğu üretilen enerjinin çok yüksek gerilimli uzun iletim hatlarıyla taşınması zorunluluğunu getirmektedir. Enerji üretiminin ve dağıtımının büyümesi önemli işletme ve kontrol sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Bu sorunlardan en önemlisi enerji sisteminin kararlılık sorunudur. Enerji sistemlerinde kararlılık; bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin bozucu etki sonrası tekrar bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönme yeteneği olarak açıklanır. Literatürde iletim sistemi senkron makina ve enerji iletim hattından oluşan bir yapı olarak ele alınmış ve çeşitli kararlılık analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu tezde ise senkron makina tek olarak ele alınmış ve kararlılığına uyartım akımının etkileri araştırılmıştır.

Senkron makinalarda uyartım akımı doğru akımdır. Bu akımın, makinanın hava aralığındaki magnetik alanı dolayısıyla endüvi sargılarında endüklenen gerilimi belirlediği bilinmektedir. Senkron makinalar gerek yuvarlak kutuplu, gerekse çıkıntılı kutuplu olarak imal edilmiş olsun taşıyabilecekleri maksimum bir yük değeri vardır. Makina yüklendikçe kutupta oluşan sabit magnetik alanla endüvide oluşan döner alan arasındaki makinayı senkronizmde tutan magnetik kuvvet çizgileri giderek gerilir. Makinanın yük açısı (β) giderek artar. Bu açı belli bir değere kadar artabilir. Bu değer aşıldığında kuvvet çizgileri artık makinayı senkronizmde tutamaz ve kopar. İşte makinayı senkronizmde tutan yük açısının maksimum değerinin tezde elde edilen (3.33), (3.34) ve (3.39) denklemleriyle sabit şebeke gerilimi ve makina parametreleri altında zıt emk (E) ile değiştiği ortaya konmuştur. Böylece zıt emk'nin kararlılık üzerindeki etkisi matematiksel olarak gösterilmiş olmaktadır. Makina endüvisinde endüklenen emk ise -gerek generatör, gerekse motor çalışmada olsun manyetik akının (ϕ) fonksiyonu olan uyartım akımı ile değişir. Bu da 2.Bölümde (2.37) nolu bağıntı ile ortaya konmuştur.

Bu matematiksel verilere dayanarak deney aracı olarak kullanılan senkron makinaya değişik dalga şekillerine sahip sabit genlikli uyartım gerilimleri uygulanarak çeşitli açılardan etkileri araştırılmıştır. Öncelikle uyartımın dalga şeklindeki değişimin hava aralığı akısına olan etkileri incelenmiştir. Bu incelemeler

sonucunda uyartım akımının tam doğru akım olması durumunda en ideal hava aralığı magnetik alanının elde edildiği görülmüştür. Hava aralığı alanının şekli uyartım akımının doğru akım olma özelliği ne kadar bozulursa o kadar ideal durumdan uzaklaşmaktadır.

Makina endüvisinde endüklenen gerilim hava aralığı magnetik alanı tarafından oluşturulduğu için uyartım akımı etkileri benzer şekilde kutup gerilimine de yansımıştır. Uyartım sargısına uygulanan doğru gerilimin ideale yakınlığı oranında endüviden daha iyi sinüsoidal gerilimler elde edildiği görülmüştür. Uyartımın doğru akım özelliği bozuldukça endüvi sargılarından alınan gerilimin şekli de bozulmaktadır.

Uyartım akımı dalga şeklinin zıt emk'ne olan etkisi kararlılık sınırı üzerinde de aynı oranda görülmektedir. Zira daha önce de belirtildiği gibi yük açısının maksimum değeri her iki tip senkron makinada da endüvide endüklenen emk ile değişmektedir. Uyartım akımı dalga şekli değiştirilerek yapılan "V" eğrisi deneylerinde makinanın tam doğru akımda diğer doğru akım şekillerine göre daha yüksek yük akımlarına kadar senkronizmde kalabildiği görülmüştür. Halbuki uyartımın şekli bozuldukça makinanın aynı yük için senkronizmden kopması daha çabuk olmuştur. Hatta kare dalga ve sinüsoidal akımın yarı doğrultulmasıyla elde edilen en kötü doğru akımlarda makinanın hiç senkron çalışmaya geçmemesi yukarıda alınan sonuçları desteklemektedir.

Kararlılık sınırının uyartım akımı ile değişimi makina yüklenmek suretiyle de gözlenmiş ve benzer sonuçlar alınmıştır. Sabit genlikli fakat değişik dalga şekline sahip uyartım akımlarının kutuplara uyagulanarak, makinanın yüklenmesi ve kopma noktasının belirlenmesi için yapılan deneylerde tam doğru akımla uyartımın en ideal uyartım durumu olduğu ve diğer dalga şekillerine göre makinanın daha fazla yükü taşıyabildiği gözlenmiştir.

Senkron makinaların kutuplarını uyarmak için gerekli doğru akım ya akülerden, ya sinüsoidal akımın doğrultulmasından veya doğru akım dinamolarından elde edilmektedir. Bu tez sonucunda senkron makinalar için en ideal uyartım akımının akülerden elde edilen doğru akım olduğu deneysel olarak da kanıtlanmıştır. Dinamolardan elde edilen akım da uyartım akımı olarak kullanılabilir. Ancak sinüsoidal akımın doğrultulmasıyla elde edilecek doğru akımla uyartım yapılacaksa

mutlaka tam doğrultma yapılmalıdır. Ayrıca doğrultulan akımın filtre edilerek ideal doğru akım şekline yaklaştırılması yararlı olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] SARIOĞLU K., Elektrik Makinalarının Temelleri II “Senkron Makinalar”, İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi, İstanbul, 1972
- [2] TACER M. E, Enerji Sistemlerinde Kararlılık
- [3] BODUROĞLU T., Elektrik Makinaları Dersleri “Döner Alternatif Akım Makinalarına Giriş, İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi, İstanbul 1990
- [4] PEŞİNT A., Senkron Makinalar
- [5] CONCORDIA C, Power System Engineering (Synchronous Machines), Wiley, London, 1951
- [6] ADKINS B, The General Theory of Electrical Machines, Chapman and Hall, 1957
- [7] CHAO-RONG CHEN & YUAN-YIH HSU, Synchronous Machine Steady-State Stability Analysis Using An Artificial Neural Network, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 6, No.1, p12-20 March 1991
- [8] EL-SERAFİ A.M. & ABDALLAH A.S., Effect Of Saturation On The Steady-State Stability Of A Synchronous Machine Connected TO An Infinite Bus System, IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol 6, No.3, p514-521, September 1991
- [9] YALÇIN M. A., Enerji İletim Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul, Temmuz 1995

ÖZGEÇMİŞ

Nevzat ONAT 08.11.1973 yılında Manisa'nın Turgutlu ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini burada tamamladı. 1991 yılında yapılan ÖSYS sınavı sonucu Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'nü kazandı. 1995 yılında buradan mezun oldu. 1995-96 öğretim yılında M.E.B. Hatay Kırıkhan Endüstri Meslek Lisesi'nde teknik öğretmen olarak göreve başladı. Aynı yıl M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nce açılan yüksek lisans sınavı sonucu Elektrik Eğitimi Bölümü'nde lisans üstü eğitime hak kazandı. 7.7.1997 tarihinde M.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen bu göreve devam etmektedir.

01.07.1999

İstanbul

İZMİR
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANLARI MERKEZİ