

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

178762

GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ VE ELEKTRİK
MAKİNELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Elektrik Müh. Özgür GÜNAY

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında

Hazırlanan

TE. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BİRİNCİ BAŞKANLIĞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Salih TACİ

Yrd. Doç. Dr. M. Salih TACİ

Prof. Dr. Asım KASAPÖĞÜ

İSTANBUL, 2002

Yrd. Doç. Dr. Yılmaz BİRBİR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	i
KISALTMA LİSTESİ.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜÇ KALİTESİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Güç Kalitesi Nedir?.....	3
2.2 Gerilim Kalitesi.....	5
2.3 Güç Kalitesinin Tarihsel Gelişimi.....	5
2.4 Güç Kalitesi Problemlerinin Ekonomik Açısından Önemi.....	6
3. GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ.....	9
3.1 Güç Kalitesi Problemlerinin Sınıflandırılması.....	9
3.1.1 Frekans Olayları.....	9
3.1.2 Gerilim Olayları.....	9
3.1.3 Dalga Şekli Olayları.....	10
3.2 Güç Kalitesi Problemlerinin Kaynakları.....	10
3.3 Güç Kalitesi Problemleri.....	13
3.3.1 Geçici Olaylar.....	13
3.3.1.1 Darbesel Geçici Olaylar.....	13
3.3.1.2 Salınımsal Geçici Olaylar.....	14
3.3.2 Kısa Süreli Gerilim Değişimleri.....	16
3.3.2.1 Gerilim Düşmesi.....	17
3.3.2.2 Gerilim Yükselmesi.....	19
3.3.2.3 Gerilim Kesilmesi.....	20
3.3.3 Uzun Süreli Gerilim Değişimleri.....	21
3.3.3.1 Aşırı Gerilim.....	21
3.3.3.2 Düşük Gerilim.....	21
3.3.3.3 Kalıcı Gerilim Kesintileri.....	22
3.3.4 Gerilim Dengesizliği.....	22
3.3.5 Dalga Şekli Distorsiyonu.....	23
3.3.5.1 DC Bileşen.....	24
3.3.5.2 Harmonikler.....	24

3.3.5.3	Ara Harmonikler.....	25
3.3.5.4	Çentik Etkisi.....	25
3.3.5.5	Gürültü.....	26
3.3.6	Gerilim Dalgalanması.....	26
3.3.7	Frekans Değişimleri.....	28
4.	HARMONİKLER.....	29
4.1	Harmonikli Elektriksel Büyüklükler.....	32
4.2	Akım ve Gerilim Harmonikleri.....	36
4.3	Toplam Harmonik Bozulması ve Efektif Değer.....	37
4.4	Güç ve Güç Faktörü.....	37
5.	GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN ELEKTRİK MAKİNELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	41
5.1	Harmoniklerin Elektrik Makinaları Üzerindeki Etkileri.....	42
5.1.1	Transformatör Üzerindeki Etkiler.....	42
5.1.1.1	Transformatörlerin Harmonik Bağımlı Modeli.....	44
5.1.1.1.1	Sinüsoidal Olmayan Yük Akımlarını Beslerken Transformatör Kapasitesini Belirlemekte Önerilen IEEE Uygulamaları.....	47
5.1.1.1.2	Kullanılan Kısaltmalar.....	48
5.1.1.1.3	Transformatör Kapasite Eşdeğeri.....	49
5.1.1.1.4	Önerilen Prosedürler.....	49
5.1.1.2	K-Faktör Transformatörleri.....	57
5.1.1.3.1	K-Faktörü.....	58
5.1.2	Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler.....	64
5.1.2.1	Asenkron Motorun Harmonik Bağımlı Modeli.....	67
5.1.2.2	Deri Etkisini (Skin Effect) Modellemenin Gerekliliği.....	70
5.1.2.3	Asenkron Motor Modellerinin Parametre Tanımlaması ve Karşılaştırılması.....	73
5.1.2.3.1	Modeller.....	73
5.1.2.3.2	Eşdeğer Devre Parametrelerinin Belirlenmesi.....	79
5.1.3	Kablolar ve İletim Sistemi Üzerindeki Etkiler.....	86
5.1.3.1	Kablo ve İletim Hattının Modellenmesi.....	88
5.1.4	Yüksek Frekanslı Geçici Gerilimlerin Elektrik Makinaları Üzerinde Etkileri.....	92
5.1.4.1	Teorik Düşünceler.....	93
5.1.4.2	Modeller.....	95
5.2	Harmonik Kayıpların Analizi.....	101
5.2.1	Harmoniklerin Sebep Oldukları Ek Omik Kayıplar.....	101
5.2.2	Harmoniklerin Sebep Olduğu Ek Demir Kayıpları.....	103
5.2.2.1	Histerezis Kayıpları.....	104
5.2.2.2	Fuko Akımı Kayıpları.....	105
5.2.2.3	Toplam Demir Kayıpları Formülleri.....	107
5.2.3	Kabloların ve Yüksek Gerilim Kondansatörlerinin Dielektrik Kayıpları.....	110
5.3	Deri Etkisi (Skin Effect) ve Yakınlık Etkisi (Proximity Effect).....	112
5.4	Dielektrik Zorlanmalar.....	115
5.4.1	Dielektrik Kayıplar.....	117
5.5	Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları.....	117
5.5.1	Paralel Rezonans.....	118
5.5.2	Seri Rezonans.....	121

5.5.3	Paralel ve Seri Rezonansı Önleyici Tedbirler.....	125
5.6	Asenkron ve Senkron Makinelerde Mekanik Salınımlar.....	126
6.	GÜÇ KALİTESİ STANDARTLARI.....	129
6.1	Standartlar ve Toleranslar.....	130
6.2	Statik Elektrik Standartları.....	131
6.3	Hassas Ekipmanların Yıldırım Düşmesinden Korunması Standardı.....	132
6.4	Topraklama Standartları.....	132
6.5	Kalıcı-Düzen Gerilim Standartları.....	133
6.6	Aşırı Gerilim Standartları.....	133
6.7	Düzeltilme Ekipmanı Standartları.....	134
6.8	Harmonik Standartları.....	134
6.9	IEEE Renkli Kitap Serileri.....	135
7.	GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN AZALTILMASI.....	137
7.1	Önlemler.....	137
7.2	Dalga Bastırıcıları.....	138
7.3	Yalıtım Transformatörleri.....	140
7.4	Harmoniklerin Filtrelenmesi.....	141
7.4.1	Pasif Filtreler.....	142
7.4.2	Aktif Filtreler.....	144
7.5	Kesintisiz Güç Kaynakları.....	144
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	148
	KAYNAKLAR.....	152
	ÖZGEÇMİŞ	155

SİMGE LİSTESİ

A_0	Sabit terim (doğru bileşen veya ortalama değer)
B	Gauss olarak endüksiyon
B_n	n. harmonik frekansına ait magnetik endüksiyon değeri
$\cos \phi$	Güç faktörü
C_s	Sistem kapasitesi
D	Distorsiyon gücü
E_1, E_2	Alan şiddetleri
f_{nom}	Nominal frekans
f_s	Seri rezonans frekansı
F_h	h. harmonik için harmonik akım dağıtım faktörü
G_{fe}	Demir çekirdeğin kg ağırlığı
h	Harmonik derecesi
I_0	Boşta çalışma akımı
I_1	Temel harmonik akımı efektif değeri
I_R	Nominal frekans ve yük koşulları altında efektif sine dalga akımı
I_d	Nüve kayıp akımı
I_δ	Dielektrik içerisinde ısı kaybını meydana getiren kayıp akım
I_{st}/I_{nom}	Bağlı çalışma akımı
k_{refm}	Motordaki gerçek yansıma faktörü
k_p	Yayılma faktörü
l_{cr}	Kritik uzunluk
L_m	Mıknatıslama endüktansı
L_s	Sistem endüktansı
P_{EC}	Sargı fuko akım kaybı
P_{fe}	Transformatör toplam demir kayıpları
P_H	Histerezis kayıpları
P_{LL}	Yük kaybı
P_{OSL}	Diğer akı kaybı
q_{Fe}	Demir nüve kesiti
R_{DC}	Doğru akım direnci
R_{AC}	Alternatif akım direnci
R_{fe}	Demir kayıplarına karşılık düşen direnç
R_h	İletkenin temel bileşen omik direnç değerine harmoniklerden dolayı eklenen direnç
R_p	Primer sargı direnci
R'_s	Primere indirgenmiş sekonder direnç
S_1	Omik yük gücü
S_C	Kapasitenin nominal gücü
s_n	Pozitif harmonik kaymaları

S_S	Şebekenin kısa devre gücü
S_T	Transformatör nominal gücü
T_n	Harmonik akımın faz başına momenti
T_{max}/T_{nom}	Bağıl maksimum tork
T_{st}/T_{nom}	Bağıl kalkış torku
T_{min}/T_{nom}	Bağıl minimum tork
U_1	Gerilim temel dalgasının tepe değeri
U_{nom}	Nominal gerilim
X_p	Primer sargı reaktansı
X_m	Mıknatıslanma reaktansı
X'_s	Primere indirgenmiş sekonder reaktansı
Z_C	Karakteristik empedans
Z_m	Motor empedansı
Z_T	Transformatör per unit empedansı
ω	Açısal frekans
ϕ_1	I_1 akımının gerilime göre faz açısı
ψ_m	Harmonik akı bileşenleri
ϵ_1, ϵ_2	Tabakaların dielektrik sabitleri
σ_h	Malzeme sabiti
Δ	Levha kalınlığı
ρ	Özgül direnç
η_{nom}	Verim

KISALTMA LİSTESİ

ADP	Automatic Data Processing
ANSI	American National Standards Institute
FIPS	Federal Information Processing Standards
HVDC	High-Voltage Direct-Current Systems
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
NEMA	National Equipment Manufacturers Association
NFPA	National Fire Protection Agency
NIST	National Institute of Standards and Technology; formerly National Bureau of Standards, Department of Commerce
SLG	Single-line-to-ground
SWC	Surge Withstand Capability
TDD	Toplam Talep Distorsiyonu
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon
TIF	Telephone Influence Factor
TVSS	Transient Voltage Surge Suppressors
UL	Underwriters Laboratories



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	Yıldırım düşmesi sonucu meydana gelen darbesel akım geçici hali.....	14
Şekil 3.2	Kapasitörlerin arka arkaya anahtarlanması sonucu oluşan salınımsal geçici akım hali.....	15
Şekil 3.3	Kapasitör gruplarının enerjilenmesinden dolayı oluşan düşük frekanslı salınımsal geçici olay.....	15
Şekil 3.4	Yüksüz bir transformatörün ferrezonansı ile meydana gelen düşük frekanslı salınımsal geçici olay.....	16
Şekil 3.5	Gerilim düşmesi.....	17
Şekil 3.6	Tek-faz-toprak arızasından kaynaklanan gerilim düşmesi.....	17
Şekil 3.7	Motor kalkışı ile meydana gelen geçici gerilim düşmesi.....	18
Şekil 3.8	Gerilim yükselmesi.....	19
Şekil 3.9	Tek-faz-toprak kısa devresi sonucu oluşan ani gerilim yükselmesi.....	19
Şekil 3.10	Kısa süreli gerilim kesilmesi.....	20
Şekil 3.11	Gerilim dengesizliği.....	22
Şekil 3.12	Evlere ait bir fider için dengesizlik değerleri.....	22
Şekil 3.13	Bozulmuş bir dalga örneği.....	23
Şekil 3.14	Ayarlanabilir hız kontrol sürücüsüne ait giriş akımı dalga şekli ve harmonik spektrumu.....	24
Şekil 3.15	Üç fazlı konverter nedeni ile meydana gelen çentik etkisi.....	25
Şekil 3.16	Gerilim dalgalanması.....	27
Şekil 3.17	Bir ark fırınının çalışmasıyla meydana gelen gerilim flikeri örneği.....	27
Şekil 4.1	Temel dalga, 3., 5., 7. harmonikler ile bunların bileşkesi olan bileşke dalga.....	30
Şekil 4.2	Dikdörtgen bir akım eğrisinin harmoniklere ayrılması.....	34
Şekil 4.3	Sinüs şeklinde olmayan ve periyodik olarak değişen gerilim (veya akım) eğrisi ile temel harmoniği.....	35
Şekil 4.4	Görünür güç bileşenleri arasındaki ilişki.....	40
Şekil 5.1	n. harmonik için ayrı kaçak akımlı eşdeğer devre.....	44
Şekil 5.2	Transformatörün T eşdeğer devresi.....	45
Şekil 5.3	Transformatörün harmonik akım veren eşdeğeri.....	45
Şekil 5.4	Demir kayıpsız transformatör eşdeğer devresi.....	46
Şekil 5.5	(a) Boşta akım kolu girişetoplanmış L eşdeğer devre, (b) Boşta akım kolu çıkışta toplanmış L eşdeğer devre.....	46
Şekil 5.6	K faktör hesaplanması ve transformatörün yeniden sınıflandırılması akış diyagramı.....	59
Şekil 5.7	Anahtarlama güç kaynağı yükü için akım dalga şekli ve spektrumu.....	59
Şekil 5.8	Flüoresan aydınlatma yükü için akım dalga şekli ve spektrumu.....	60
Şekil 5.9	AC ayarlanabilir-hız sürücüsüne ait akım dalga şekli ve spektrumu.....	60
Şekil 5.10	DC sürücü yüküne ait akım dalga şekli ve spektrumu.....	61
Şekil 5.11	Bir eviricide çıkış geriliminin değişimi.....	67
Şekil 5.12	Eşdeğer asenkron makine modeli (a), yaklaşık model (b), yüksek frekanslar için model (c) ve basit yük modeli (d).....	68
Şekil 5.13	n. harmonik için asenkron motorun genel eşdeğer devresi.....	69
Şekil 5.14	Deri etkisi olmadan akı dağılımı ve eşdeğer devre.....	70
Şekil 5.15	Deri etkili akı dağılımı ve eşdeğer devre.....	71
Şekil 5.16	Rotor frekansına bağlı olarak bağlı efektif rotor direnci.....	72
Şekil 5.17	Rotor frekansına bağlı olarak bağlı etkili rotor kaçak endüktansı.....	72
Şekil 5.18	Modellerin sınıflandırılması.....	74
Şekil 5.19	AC asenkron motor eşdeğer devreleri.....	76
Şekil 5.20	AC asenkron motorun deri etkisi düşünülerek çizilen eşdeğer devreleri.....	77

Şekil 5.21	AC asenkron motorun iki-faz vektör modeli.....	78
Şekil 5.22	AC asenkron motorun üç-faz vektör modeli.....	78
Şekil 5.23	Asenkron motor karakteristikleri ve parametrelerinin bilgisayar kontrollü belirlenmesi algoritması.....	84
Şekil 5.24	Karakteristiğin dört-nokta hata fonksiyonu.....	85
Şekil 5.25	Parametre tanımlamasının adım adım tahmininde bilgisayar kontrollü proses..	86
Şekil 5.26	Bir blokaj devresiyle ölçülen harmonik akımları.....	87
Şekil 5.27	Doğru akım direncine göre bakır elektrik direncinin çeşitli frekanslardaki artışı.....	89
Şekil 5.28	Kısa uzunluktaki bir iletim hattının n. harmonikte tek-hat diyagramı.....	91
Şekil 5.29	Orta uzunluktaki bir iletim hattının n. harmonikte tek-hat diyagramı.....	91
Şekil 5.30	Orta uzunluktaki bir iletim hattının n. harmonikteki tek-hat diyagramı.....	91
Şekil 5.31	Uzun bir iletim hattının n. harmonikte tek-hat diyagramı.....	92
Şekil 5.32	İnverter beslemeli AC sürücü güç devresi.....	93
Şekil 5.33	Kısa uzunlukta bir kabloda aşırı gerilimler simülasyonu için eşdeğer devre.....	95
Şekil 5.34	Motor uçlarındaki gerilim geçici olayı.....	96
Şekil 5.35	10 m'lik bir kablo için puls yükselme zamanının fonksiyonu olarak bağlı pik gerilimi.....	96
Şekil 5.36	Filtrelenmiş puls örneği.....	97
Şekil 5.37	İnverter beslemeli AC sürücüsünün yüksek frekans eşdeğer devresi.....	98
Şekil 5.38	Puls yayılma ve yansıma çalışması için inverter beslemeli motor sürücüsünün yüksek frekans eşdeğer devresi.....	98
Şekil 5.39	AC asenkron motor geçici gerilimi.....	99
Şekil 5.40	Kritik kablo uzunluklu AC asenkron motor geçici gerilimi.....	99
Şekil 5.41	Kablo uzunluğu kritikten uzun olduğunda AC motor geçici gerilimi.....	99
Şekil 5.42	Gerilim geçici olayın inverter ve AC motor üzerinde deneyle belirlenmesi.....	100
Şekil 5.43	Kablo uzunluğu 10 m olduğunda deneyle kaydedilmiş motor geçici gerilimi..	100
Şekil 5.44	Gerilime ait 1., 3., 5., 7. harmonik spektrumu.....	109
Şekil 5.45	Basit bir kondansatörün bir fazlı gösterişe şematik akım ve gerilim diyagramı.....	110
Şekil 5.46	Yüksek frekansta iletken kesitindeki akım dağılımı.....	112
Şekil 5.47	Deri etkisi ile direnç yükselmesi.....	113
Şekil 5.48	İki tabakalı elektrodlu bir kondansatörde tabaka kalınlıklarına göre kapasite ve dielektrik katsayısı dağılımı.....	115
Şekil 5.49	İki tabakalı düzlemsel elektrodlu bir kondansatörde tabaka kalınlıklarına göre deplasman ve gerilim dağılımı.....	116
Şekil 5.50	Ortak bağlantı barasında paralel rezonans oluşumu.....	119
Şekil 5.51	Paralel titreşim devresi.....	119
Şekil 5.52	Seri rezonans devresi.....	122
Şekil 5.53	Seri titreşim devresi.....	122
Şekil 5.54	Asenkron makinenin harmoniklere ilişkin tek fazlı eşdeğer devresi.....	126
Şekil 5.55	Rotor harmonik momentleri ve akımları.....	127
Şekil 7.1	Transformatör aşırı akım ayırıcıları.....	139
Şekil 7.2	Pano ve çıkış TVSS'i.....	139
Şekil 7.3	Tek-fazlı yalıtım transformatörü.....	140
Şekil 7.4	Üçgen-yıldız bağlı yalıtım transformatörü.....	141
Şekil 7.5	Yaygın olarak kullanılan pasif filtrelerin bağlantı şekilleri.....	142
Şekil 7.6	Harmonik için tasarlanmış bir çentik filtre ve sistem cevap karakteristikleri.....	143
Şekil 7.7	Aktif filtrenin doğrusal olmayan bir yüke uygulanması.....	144
Şekil 7.8	Beklemesiz bir KGK bağlantısı.....	145

Şekil 7.9	Beklemeli bir KGK bağlantı şekli.....	145
Şekil 7.10	Doğrudan bağlamalı bir KGK bağlantı şekli.....	146
Şekil 7.11	Tipik bir motor-generatör grubu.....	146



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Güç kalitesi problemleri ve koruma ekipmanları.....	11
Çizelge 3.2	Güç kalitesini bozan etkenler.....	12
Çizelge 5.1	K-faktör Hesaplaması.....	61
Çizelge 5.2	Transformatör yeniden sınıflama hesaplamalarında kullanılacak tipik P_{Ec-R} değerleri.....	61
Çizelge 5.3	K-faktör örneği.....	62
Çizelge 5.4	Stator ve rotor harmonikleri.....	65
Çizelge 5.5	16 değerli kural tablosu.....	83
Çizelge 5.6	34 = 81 hata fonksiyonuna ait kural tablosu.....	83
Çizelge 5.7	VOLTA ve BALDOR motorları eşdeğer devre parametrelerinin karşılaştırılması.....	85
Çizelge 5.8	Güç yarıiletkenlerinin anahtarlama parametreleri.....	93
Çizelge 5.9	Kullanılan kablo tiplerinin μF olarak işletme kapasiteleri.....	111
Çizelge 6.1	Güç kalitesini ilgilendiren standartlar.....	136

ÖZET

Elektrik güç kalitesi problemi hem elektrik üreticileri, hem de tüketiciler için giderek önem kazanan bir ilgi haline gelmiştir. Son yıllarda, bu sorun, harmonik üreten cihazların ve dalga şekli distorsiyonlarına hassas yüklerin sayısında artış ile daha da önem kazanan bir konudur.

Güç kalitesi elektrik gücünün hem dağıtımı hem de kullanımının elektrikli aletleri etkilediği derecedir. Başka bir ifade ile “sinüsoidal dalga şeklinin frekansından herhangi bir sapma” güç kalitesi problemi olarak adlandırılabilir. Bu problemler kısaca, gerilim düşmesi, gerilim yükselmesi, gerilim kesilmesi, aşırı gerilim, düşük gerilim, gerilim dengesizliği, harmonikler, gürültü, çentik etkisi olarak belirtilebilir.

Besleme sisteminde meydana gelen herhangi bir gerilim değişikliği; hassas veri işlemci, kontrol ekipmanlarına zarar verebilir, beslemeyi kesebilir, değişken hız kontrol birimlerinin yanlış çalışmasına sebep olabilir, kapasitör, transformatör ve asenkron motorlarda aşırı ısınmaya yol açabilir, ışık flikeri olayına neden olabilir. Bunun dışında, diğer etkiler; omik ve demir kayıplar, sistemde harmoniklerden dolayı rezonansın meydana gelmesi, asenkron makinelerde mekanik salınımlar, kablolarda dielektrik kayıplar, deri etkisi ve yakınlık etkisi olarak sayılabilir.

Güç kalitesi problemlerini çözmek veya en aza indirmekte kullanılan yöntemler sürekli gelişir ve yenilenmesi gerekir. Elektrik ekipmanının performans kriterleri ve çalışma tavsiyeleri standartlarla tanımlanabilir.

Çalışmada güç kalitesi bozucu etkileri ve bu problemlerin transformatör, asenkron motor ve kablolar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güç kalitesi, harmonikler, transformatör, asenkron motor, iletim hatları

ABSTRACT

Power quality is becoming an increasingly important topic, judging from the frequency problems experienced by electrical-end users. In recent years, this problem becomes important because of the harmonic producing devices and the loads that are susceptible to waveform distortion.

Power quality is the degree to which both the utilization and delivery of electrical power effects the performance of electrical equipment. Another way of describing power quality is in terms of voltage “any deviation to the magnitude of frequency of the ideal sinusoidal waveform can be regarded as power quality disturbance”. These disturbances can be shortly specified as overvoltage, interruption, sags, swells, harmonics, notching, noise, voltage fluctuations.

Major contributing factors to the problems associated with power quality are as follows: sensitive loads, complexity, disturbance producing equipment.

Actual voltage varies from the normal range because of disturbances on the supply system, within customer’s plant and/or within nearby plants. These disturbances can; damage sensitive data processing, control and instrumentation equipment, interrupt supply, trip out variable speed drives, cause data processing, control and instrumentation equipment to malfunction, cause capacitors, transformers and induction motors to overheat, cause annoying light flicker. Moreover, the other effects can be as follows: copper and iron losses, resonance caused by harmonics, mechanical vibrations in induction machines, skin effect and proximity effect and dielectrical faults in cables.

The totality or knowledge required to resolve power quality problems is continually being upgraded and altered to meets new problems. Solution to old problems can become today’s problems.

The study describes the range of power quality problems, what causes them, how they effect electrical machines and what could be done to manage them.

Keywords: Power quality, harmonics, transformers, induction machines, power lines

1. GİRİŞ

Elektrik güç kalitesi problemi hem elektrik üreticileri, hem de tüketiciler için gittikçe artan bir ilgi haline gelmiştir. Son yıllarda, bu sorun güç kalitesine hassas yüklerin sayısında yükselme nedeniyle önem kazanmış ve yüklerin güç kalitesi problemlerine sebep olmasıyla daha sıkıntılı bir hale gelmiştir. Tüketicilere göre yeni ekipmanların sistem kalitesine hassasiyetlerinden ileri gelen problemler sorunlardır. Güç kalitesi problemlerinin ekonomik etkileri, ev aletlerini onarmak veya değiştirmekte yüzlerce dolara veya ürün ve üretim kayıplarına da milyonlarca dolar olarak yansiyabilir. Elektrik üreticileri için, kullanıcı ekipmanları ve gereksinimleri sebebiyle uygun güç kalitesi sağlamak gerekli olmuştur [1].

Alçak gerilim kullanıcıları için ideal güç kaynağı, 50 Hz frekansa sahip sinüsoidal dalga şekilli bir gerilimdir. Yerel şebeke operatörü bu beslemeyi kendi kontrolü dışındaki bazı problemler sebebiyle ideal düzeyde tutamaz ve belirli sınırlar içerisinde kalmasına çalışır. Güç kalitesi problemleri de, frekans, gerilim veya dalga şeklinin bu verilen sınırlar dışarısına çıkmasıyla başlar.

Yük akımındaki değişimler tüketici bağlantı noktalarında gerilimde dalgalanmalara neden olabilmektedir. Bilgi ve veri analiz sistemleri, dijital saatler, ayarlanabilir motor hız kontrol birimleri, haberleşme sistemleri gibi birçok cihazda mikroelektronik işlemcilerinin kullanımının artması, bu cihazların yararlarıyla birlikte birtakım güç kalitesi problemleri ortaya koymuştur. Bu doğrusal olmayan yükler, şebekede nominal frekansın dışında frekanslarda akım veya gerilim bileşenlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Harmonikler, standartlarda belirlenen değerlerin üstüne çıktıklarında nominal frekansta çalışacak şekilde tasarlanmış elektrikli ekipmanlara zarar vermekte, verimi düşürmekte ve ayrıca ek kayıplara yol açmaktadır (Dugan vd., 1996).

Besleme gerilimindeki kısa veya uzun süreli değişimler sonucunda oluşan kesintiler, üretimlerini sürekli olarak arttırmak isteyen sanayicilerin büyük maddi kayıplara uğramasına neden olmaktadır. Bu tür olayların sık sık tekrarlanması sonucunda elektrik enerjisi kullanıcıları elektrik idaresinden şebekedeki güç kalitesinin iyileştirilmesini talep etmeye başlamışlardır.

Enerji sistemleri ve tüketicilerde çok geniş kapsamlı olabilen güç kalitesi problemleri farklı devreler tarafından üretilmektedir. Güç kalitesi problemlerinin sebebi çok fazla sayıda harmonik üreten cihaz olması ve dalga şekli distorsiyonlarına duyarlı yüklerin sayısının

giderek artmasıdır. Çok fazla sayıda elektronik cihazların kullanılmasından dolayı hem enerji sistemi hem de tüketiciler dalga şekli bozulmalarına karşı hassas hale gelmektedir. Güç sistemindeki dalga şekli distorsiyonları büyük önem taşımaktadır. Özellikle, teknolojinin gelişmesine paralel olarak sayıları gittikçe artan elektronik cihazlar üzerinde distorsiyonun olumsuz etkileri daha da artacaktır. Bugün güç kalitesi konusunda artan ilgi için dört ana sebep vardır. Bunlar;

- Yük ekipmanlarının, geçmiştekilere nazaran güç kalitesi değişmelerine daha hassas olmaları ve birçok yeni yük cihazlarının, güç kalitesi problemlerine karşı hassas olan mikro işlemci temelli kontroller ve güç elektroniği cihazları içermeleri,
- Güç sistem verimliliği üzerindeki yükselen önemin, yüksek verimli ayarlanabilir hız motor sürücüler ve kayıpların azaltılması için güç faktörü düzeltilmesinde şönt kapasitörlerin kullanımına yol açması ve böylece güç sisteminde harmonik seviyelerinin azaltılması,
- Tüketicilerin kesintiler, gerilim düşümleri ve geçici açıp-kapamalar gibi olaylar hakkında daha bilgili olmaları ve yetkilileri dağıtılan güç kalitesini geliştirmeleri konusunda zorlamaları,
- Birçok yükün şebeke içerisinde birbirine bağlı olması ve böylece herhangi bir noktada oluşacak arızadan dolayı farklı bir tüketicinin etkilenebilecek olmasıdır (Dugan vd., 1996).

Bu sonuçların arkasındaki başlıca hızlandırıcı güç kamu müşterileri için artan üretkenliktir. İmalatçılar daha hızlı, daha üretken ve daha verimli makineler ister. Elektrik üreticileri müşterilerinin daha karlı duruma gelmesi, ve ayrıca daha verimli yük ekipmanları kullanılarak trafo merkezi ve üretimde yapılacak yatırımların ertelenmesine yardımcı olması nedeniyle bu çabayı destekler. İlginçtir ki, üretkenliği arttırmak için tesis edilen ekipmanlar genellikle güç bozulmalarından en çok etkilenenlerdir ve bazen bu gereçler ek güç kalitesi problemlerinin kaynağıdır.

2. GÜÇ KALİTESİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Harmonik üreten cihazların ve dalga şekli distorsiyonlarına karşı hassas yüklerin artışıyla güç kalitesi konusu son yıllarda giderek önem kazanan bir konudur.

Güç sisteminde, tüketici ve üretici ekipmanlarını etkileyebilen, harmonik üreten lineer olmayan cihazların kullanılmaya başlanmasıyla, müşteriler geçici olaylar ve diğer güç problemleri hakkında daha duyarlı ve bilinçli olmuştur. Bundan dolayı, müşteriler cihazlarının güvenli ve verimli bir şekilde çalışması için kaliteli güce ihtiyaç duyarlar (Domijan ve Embriz-Santander, 1992).

2.1 Güç Kalitesi Nedir?

Yapılan incelemenin türüne ve kim tarafından yapıldığına göre tamamen farklı güç kalitesi tanımları olabilir. Örneğin, elektrik üreticisi güç kalitesini enerjinin güvenilir biçimde iletilmesi olarak tanımlayabilir. Elektrikli aletler imalatçısı için güç kalitesi ise, üretilen aletin düzgün bir şekilde çalışması için gereken güç şeklidir. Bu tanımlar çeşitli aletler ve çeşitli üreticiler için farklı olabilir. Ancak elektrik üretimi kullanıcı ihtiyacından doğduğu için kullanıcının bakış açısı referans alınmalıdır. Bundan dolayı, güç kalitesi probleminin tanımı “kullanıcı aletlerinde hataya veya bu aletlerin yanlış çalışmasına neden olacak gerilim, akım ve frekanstaki sapmalar” olarak yapılabilir (Dugan vd., 1996).

Güç kalitesi, elektrik gücünün hem kullanım hem de dağıtımının elektrik ekipmanının performansını etkilediği derecedir. Güç kalitesini gerilime bağlı açıklamak yararlı bir diğer yoldur. İdeal sinüsoidal gerilim dalga şeklinin genlik ve frekansındaki herhangi bir değişim güç kalitesi problemi olarak adlandırılır. Bu tanımlamaları kullanırken aşağıdaki faktörlerin gözden kaçırılmaması gerekir;

- Elektrik şebekesiyle uyumlulukta, elektrik ekipmanının kabul edilebilir tasarım hassasiyetleri oranı,
- Elektrik ürünlerinin düzgün seçimi, tesisi ve topraklanması.

Güç kalitesinin en iyi ölçümü, elektrik aletinin tatmin edici bir şekilde, verilen düzgün dikkat ve bakımla çalışması kabiliyetidir. Yük elektrik sistemi ile uyumluluk içerisinde tasarlanmalıdır. Elektrik ekipmanı için performans ölçümleri ve çalışma tavsiyeleri standartlar ve prosedürler olarak tanımlanabilir [1].

Enerji üretim sistemleri ancak üretilen enerjinin gerilimine etkiye bulunabileceği düşünüldüğünde güç kalitesi kavramı üzerinde yapılan belirlemelerin büyük çoğunlukla sistem gerilim hakkında olduğu görülür. Her ne kadar kısa devre olayında olduğu gibi büyük akım değişiklikleri gerilimde de önemli farklılaşmalara neden olsa da temel ölçüt gerilim olmalıdır.

Ülkemizde ve Avrupa’da $f=50\text{Hz}$ ve $\omega=314 \text{ 1/s}$ ’dir. Frekansın 50 Hz seçilmesinin nedenleri, üretim merkezinde generatörden tüketiciye kadar değişmeden kalabilmesi, iletim ve dağıtım sistemlerinde, ve tüketici ekipmanlarındaki kayıpları en aza indirmesi ve yakındaki haberleşme araçlarında parazit gerilim oluşması riskini en aza indirmesidir. Sinüsoidal ve 50 Hz frekansta üretilen bu güç, dağıtım şebekeleri üzerinden tüketicilere kadar taşınmakta, burada nominal güç ve 50 Hz’lik nominal frekansa göre tasarlanmış ve boyutlandırılmış olan tüketicilerce bir diğer enerji türüne dönüştürülmektedir. Bu dönüşümde verilen verim ve cihaz ömürleri ancak nominal değerler altında sağlanabilmektedir. Tüketicie sunulan enerjinin kaliteli olması kesintileri minimuma indireceği ve dolayısı ile işletmede verimi arttıracakı kesindir.

IEEE 1159 (1998) standardına göre güç kalitesi, kaynak geriliminin sinüsoidal dalga şeklindeki bozulma miktarı ile tanımlanmaktadır. Enerji kalitesi; enerjinin sabit gerilimde, sabit frekansta ve sinüsoidal formda, ve sürekli olması olarak tanımlanabilir.

Güç kalitesi elektrik tüketicilerinden doğan problemlerin neden olduğu frekanstaki değişimler sebebiyle önemli ve yükselen bir sorundur. Son yıllarda, bilgisayarlar gibi yüksek derecede hassas cihazlar geniş bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu cihazların bir kısmı güç hattı hasarlarına karşı çok hassastır. Entegreli devreler kullanımında teknolojik ilerlemeler elektronik cihazların boyutunu küçültmüş, ancak daha çok devrenin daha kısa mesafede yerleştirilmesine yol açmıştır. Ayrıca ark fırınları, kaynak makineleri ve ayarlanabilir hız-kontrol birimleri gibi harmonik üreten ekipmanların kullanımındaki yükselme güç kalitesi problemlerinde artışa sebep olmuştur.

Kısaca, güç kalitesi, tüketicilerin hassas elektronik ekipmanlarının güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayacak, gerilim düşümleri olmayan 50 Hz frekansa sahip saf bir sinüsoidal dalga şeklinde akım ve gerilim kalitesi sağlamaktır. Güç kalitesi hem sürekli hem de normal besleme genliği veya frekansından olan kesintili gerilim sapmalarını kapsamak üzere kullanılan bir terimdir [1].

2.2 Gerilim Kalitesi

Teknik olarak güç dağıtılan enerji miktarıdır ve akım ve gerilimin çarpımıdır. Bu niceliğin kalitesini anlamlı bir şekilde açıklamak mümkün değildir. Şebekede sadece gerilim kalitesi kontrol edilebilir. Yükün değerine bağlı olarak çekilen akım değişeceğinden akım kontrol edilemez. Bu sebeple güç kalitesi alanında standartlar, şebeke gerilimini belirli sınırlar içerisinde tutmak için mevcuttur.

Alternatif akım güç sistemleri, belirli bir frekans (50 Hz veya 60 Hz) ve genliğe sahip sinüsoidal gerilimde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Sonuç olarak, dalga şeklinin genlik veya frekansındaki herhangi bir değişiklik veya sapma muhtemel bir güç kalitesi problemidir.

Herhangi bir güç sisteminde gerilim ve akım çok yakından ilgilidir. Generatörler mükemmel yakın bir sinüs şeklinde gerilim üretmesine rağmen, şebeke empedanslarından geçen akım, gerilimde çeşitli bozulmalara sebep olmaktadır. Örneğin;

- Şebekede meydana gelen bir kısa devre sonucunda oluşan akımın gerilimde ani olarak düşmeye veya gerilimin tamamen kesilmesine sebep olması,
- Enerji iletim hattına yıldırım düşmesi sonucu oluşacak aşırı akımların şebekede yalıtımın zorlanması ve delinmesine sebep olacak ani darbe gerilimleri meydana getirmesi,
- Harmonik üreten kaynaklardan oluşan bozulmuş akımların sistem empedansından geçmesi ile gerilimi de bozması, bunun sonucunda diğer tüketicilerin bozulmuş gerilim ile beslenmeleridir (Dugan vd., 1996).

2.3 Güç Kalitesinin Tarihsel Gelişimi

Tarihsel olarak, güç kalitesi bu alandaki gelişme ve önem seviyelerine bağlı olarak üç aşamaya ayrılabilir.

İlk aşama, makineler ve transformatörlerdeki demirin doymasından kaynaklanan 3. harmonik akımlara çözüm bulan Steinmetz'in açıklamasıyla başlamıştır. 1900'lerin başlarında Steinmetz güç sistemine yayılan 3. harmonikleri durdurmak için, transformatörlerde yıldız noktasının topraklanması ve üçgen bağlantıların kullanılmasını önerdi. 1930'lu yıllarda Schilling yapmış olduğu çalışmada sinüsten ayrılan akım ve gerilim dalgalarının iletim hatları üzerindeki etkinlikleri üzerinde durmuştur. Örneğin; 400 km uzunluğunda 220 kV'luk bir enerji iletim hattıyla ilgili olarak şu saptamaları yapmıştır (Schilling, 1933);

- Hat başındaki gerilim % 7 oranında 3. harmonik içerdiğinde bunun hat sonu gerilimi üzerindeki etkisi % 53 oranında 3. harmoniktir.
- Tam yük altında, harmonik yüzdesi 29'a düşmektedir.
- Generatör tarafında belirlenen güç katsayısı (harmonikli halde) 0,848 iken, sinüsoidal halde bu değer 0,96'dır.
- Yük tarafında bulunan asenkron motorlar, harmoniklerin etkisiyle mekanik salınımlara uğramakta ve gürültü oluşmaktadır.

1930'larda yapılan bu saptamalar, günümüzde de ayrıntılı olarak, geçerliliğini korumaktadır.

1940'larda enerji ve telefon devrelerinde çoğunlukla aynı yol kullanılmaktaydı. Telefon devrelerinin yakınında endüktif olarak birleştirilmiş harmonik akımlardan dolayı, ses frekanslarının karışması günümüzde olduğu gibi yaygın bir problem idi. Bu harmonikler, ark fırınları, büyük güçlü doğrultucular gibi cihazlar tarafından üretilmekteydi. Sonuç olarak, harmonikler tekrar inceleme konusu oldu. Dağıtım transformatörlerinin ürettiği mıknatıslama akımı harmonikleri, gerekli yerlere filtreler yapılarak ve daha önceden edinilen tecrübelerle önlenmeye çalışıldı.

Üçüncü aşama, yarıiletken güç devrelerinin ortaya çıkmasıyla 1950'lerin sonlarında başladı. Yarıiletken devrelerin gittikçe artan kullanımı güç kalitesi problemlerini de önemli ölçüde arttırmıştı. Dalga şekline aşırı duyarlı elektronik cihazların yaygınlaşması ile birlikte, harmonikler yeniden bir ilgi alanı olmuştur. Günümüzde güç kalitesine ilgi duyulmasının başlıca iki nedeni vardır. Birincisi, alternatif enerji çeviricileri, motor kontrol devreleri, esnek alternatif akım iletim sistemleri ve doğrudan enerji dönüştüren devreler gibi çok sayıda harmonik üreten cihaz vardır. İkinci olarak, kelime işlemciler, bilgisayarlar, röleler, ölçüm cihazları ve endüstriyel süreç kontrolörleri gibi dalga şekli bozulmalarına duyarlı olan yükler ve devreler vardır (Domijan ve Santander, 1992).

2.4 Güç Kalitesi Problemlerinin Ekonomik Açıdan Önemi

Güç kalitesi ile ilgilenmemizin esas nedeni ekonomik değerdir. Elektrik üreticileri, müşterileri ve yük ekipmanları üzerinde ekonomik etkiler çok farklı olabilir. Son yıllarda endüstriyi, otomasyon ve daha modern ekipmanlarla güçlendirmek önem kazanmıştır. Bu, kaynak gerilimindeki saptamalara, önceki elektromekanik olanlardan daha hassas, elektronik olarak kontrol edilen enerji-verim ekipmanlarının kullanımı anlamına gelir.

Güç sisteminin dayanabileceği ve aynı zamanda ticari ve endüstriyel kuruluşların çekebileceği harmonik sinyalleri sınırlayan standartların yeterli olmamasından dolayı, güç elektroniği esaslı cihazlar gibi lineer olmayan yüklerin neden olduğu bozucu etkiler çok yaygındır. Bu durum, hem enerji sisteminde hem de tüketicilerde güç kalitesi problemlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Domijan vd., 1993).

Cihaz üreticileri, cihazlarının kesintisiz, geçici olayların meydana gelmediği ve sürekli bir enerji ile beslenmesini isterler. Genellikle, müşterilerinin en düşük maliyette olanı tercih etmeleriyle kendilerini rekabetçi bir pazarın içinde bulurlar. Budan dolayı, müşteriler özellikle istemedikçe ekipman üzerinde ana hasarlara direnecek özellikleri eklemekte isteksizdirler. Aynı zamanda, cihazlarının elektriksel ortamda daha uygun bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla ilave bir harcama yapmak, müşterilerinden güç sistemi toleranslarını sınırlandırmak ya da güç kalitesi sorunlarından dolayı garanti belgesindeki yükümlülükleri yerine getirmek istemezler ve birçok üretici de güç sistemleri üzerinde meydana gelebilecek hasarlar konusunda bilgisizdir (Ludbrook, 1993).

Güç kalitesi problemlerini çözmek veya azaltmakta ortaya çıkan maliyetler, elektrik tesisatı kontrolü veya kesintisiz güç kaynağı satın alıp tesis ederek veya şebekeyle uyumluluğunu garantileme durumlarına göre düşük ve yüksek maliyetli olabilir. Satın alma fiyatına ek olarak, herhangi bir elektriksel ürünü satın alırken ek hazırlıklar (boşluk gereksinimi, havalandırma), tesis, bakım, işletme maliyetleri, danışman tavsiyeleri, servis hizmeti gibi bazı spesifik maliyetler göz önünde bulundurulmalıdır [1].

Eskiden genellikle ışık kaynakları, sabit hızlı motorlar gibi klasik cihazların çalışması sırasında güçteki fark edilmeyen küçük değişimler, günümüzde fabrikaların tamamen durmasına yol açabilmektedir. Örneğin montaj hattı üzerindeki motorlu cihazlara ait hız-kontrol birimlerinin bizzat kendileri gerilim harmonikleri ve geçici olaylara karşı duyarlı olduğu için, saniyenin yalnızca % 1'i kadar süren ve ama geriliminin % 30'u kadar olan bir gerilim çöküntüsü ya da enerji kesintisi montaj hattındaki programlanabilir lojik kontrolörleri reset edebilmektedir. Bu tür parazitlerin işletmeye maliyeti yüksek olabilmektedir. Örneğin, bir cam fabrikasında saniyenin onda biri kadar süren bir güç kesintisinin yaklaşık olarak 200.000 \$'lık bir zarara yol açabileceği tahmin edilmiştir. Aynı şekilde, 2 saniyelik bir kesintinin yaşandığı bir bilgisayar merkezinde yaklaşık 600.000 \$'lık bir zarara yol açabileceği tahmin edilmektedir (Kennedy, 2000).

Bütün bu zarar verici etkilere karşı güç düzeltici cihazların optimal yerleştirilmesi doğrudan doğruya maliyetle ilgili bir konudur. Örneğin, bir kişisel bilgisayarın 20 \$'lık bir dalga bastırıcısı ile geçici aşırı gerilimlere karşı korunması mümkündür. Diğer yandan endüstriyel bir kuruluştaki, kesintisiz güç temin etmek için maliyeti çok yüksek olan iki ayrı hattan beslenmesi gerekebilir (Douglas, 1994).



3. GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ

Güç kalitesi problemleri, kısa süreli hatalardan veya güç sistemindeki ani değişikliklerden dolayı kalıcı düzen dalga şeklinden geçici bir sapma olarak tanımlanabilir.

Hassas elektronik yüklere etki eden güç bozucu etkilerinin çok çeşitli nedenleri olabilir. Bu etkenler arasında yıldırım, fırtına gibi atmosferik olaylar, şebeke bağlama işlemleri, yanlış topraklamalar ve elektrik kesintileri sayılabilir. Bununla birlikte güç bozucu etkilerine çoğunlukla yüklerin anahtarlama, topraklama hataları veya cihazların normal çalışması sırasında bizzat tüketicilerin kendileri neden olmaktadır (Martzloff ve Thomas, 1988).

Elektrik enerjisi ile ilgili standart ve yönetmelikler, binaların gövdesinin enerji servis giriş yerinde topraklama bağlantısının yapılmasını şart koşmaktadır. Bununla birlikte, eğer bir bina içinde nötr iletkeni ve topraklama şasesi arasındaki bağlantıların yanlış yapılması ve özellikle yükler arasında yapılan yanlışlıklar sonucunda arızalara neden olan parazit akımları meydana gelebilir (Kennedy, 2000).

Günümüzde, aygıtların duyarlılığı ile ilgili sorunlar, cihaz tasarımcılarının eksik bilgilerinden, güç kalitesi sorunlarından ve bir ölçüde de kullanıcıların karşılaştığı problemlerle elektrik kurumunun yeterince ilgilenmemesinden kaynaklanmaktadır. Bu bölümde bozucu etkiler ve nedenleri konusunda bilgi verilecektir (Ludbrook, 1993).

3.1 Güç Kalitesi Problemlerinin Sınıflandırılması

Güç kalitesi problemleri genel olarak üç bölümde incelenebilir.

3.1.1 Frekans Olayları

Güç sistem frekansı, güç istasyon generatörlerinin açılma hızları ile tespit edilir. Bu frekansın önemli bir şekilde değişim göstermesi çok nadir görülür.

3.1.2 Gerilim Olayları

Eğer besleme gerilim 415 V'u aşarsa (aşırı gerilim), motor izolasyonu zorlanır ve motorun ömründe bir kısalma meydana gelir. Bir asenkron motor için 20 yıllık bir ömür kabul edilir. Eğer gerilim 415 V'un altına (düşük gerilim) düşerse, 415 V normal gerilimindeki gücü elde etmek için motor kaynaktan daha fazla akım çeker. Bu, motor ısısında yükselmeye ve

ömründe azalmaya sebep olur. Müşteri bağlantı noktasında elde edilmesi gereken gerilim $\pm \% 6$ oranındadır. Gerilim değişimleri birkaç gruba ayrılabilir;

- a) 1 dakikadan uzun süreli değişimler. Bunlar, eğer nominal gerilimin $\% 90$ 'ından az ise düşük gerilim, nominal gerilimin $\% 110$ 'undan büyük olursa aşırı gerilim olarak adlandırılır,
- b) 1 dakikadan kısa süreli gerilim değişimleri. Gerilim nominal değerin $\% 10$ 'u ile $\% 90$ 'ı arasında ise gerilim düşmesi, gerilimin $\% 110$ 'undan daha büyük ise gerilim yükselmesi olarak adlandırılır,
- c) Her bir faz iletkeninde, gerilimin farklı değerler aldığı gerilim dengesizlikleri,
- d) Işık flikeri olarak görülen sürekli ve değişken dalgalanmalar,
- e) Beslemenin tamamen kaybolduğu kesintiler,
- f) Yetersiz topraklamayla ortaya çıkan nötr-toprak geriliminde yükselme.

3.1.3 Dalga Şekli Olayları

Bu olaylar, temel gerilimin normal sinüsoidal dalga şeklinde distorsiyona sebep olurlar. Dalga şekli olayları aşağıdaki şekillerde görülür.

- a) Temel gerilim veya akımda var olan, ana frekansın tam katı ek frekanslar harmonik olarak adlandırılır,
- b) Araharmyonikler, temel frekansın tam katı olmayan ek frekanslardır,
- c) AC-DC konverter gibi 3 fazlı elektronik anahtarlama cihazlarının normal çalışmasından kaynaklanan çentik etkisi,
- d) Yıldırım düşmesi veya şebekede anahtarlama sonucunda meydana gelen büyük kısa süreli gerilim değişimleri olan geçici olaylar,
- e) 200 kHz'e kadar büyük frekanslı enerji dağıtımından kaynaklanan hasarlar [2].

3.2 Güç Kalitesi Problemlerinin Kaynakları

Güç kalitesi problemleri genel olarak iki gruba ayrılır. Birinci grup, güç sisteminden kaynaklanan hasarları içerir. Bunlar enerji kesintileri ve gerilim çöküntülerini kapsar. İkinci grup müşteri ekipmanlarının çalışmasından kaynaklanan problemlerdir. Örnek olarak, büyük yüklerin devreye alınması söylenebilir. Çizelge 3.1'de güç kalitesi problemleri, nedenleri, etkileri ve bu etkileri engellemek için kullanılan çözümler gösterilmiştir (Douglas, 1994).

Çizelge 3.1 Güç kalitesi problemleri ve koruma ekipmanları

Güç kalitesi Problemi	Muhtemel Neden	Koruma Ekipmanı	Problemin Etkisi
Gerilim düşmesi	Yıldırım düşmesi Büyük yüklerin devreye alınması Sistem hataları	Gerilim regülatörü Motor-generatör grubu KGK Statik düzenleyici	Bilgisayar ve kontrollerde kullanılan hassas devrelerin yanlış çalışması Ekipmanların çökmesi
Aşırı veya düşük gerilim	Zayıf gerilim regülasyonu Aşırı devre yükleri	Gerilim regülatörü KGK Hat düzenleyici	Aşırı motor akımı Anormal gerilimden dolayı ekipmanlarda hata veya çökmeye
Geçici olaylar	Yıldırım düşmesi Şebeke anahtarlama	Dalga bastırıcı Parafudr	Ekipmanların çökmesi
Kesinti	Güç sistem hataları Güç hatlarını kapsayan hatalar	KGK Motor-generatör grubu	Elektronik cihazların yanlış veya hiç çalışmaması
Gerilim yükselmesi	Büyük yüklerin azaltılması veya tamamen devreden çıkarılması	Gerilim regülatörü KGK Motor-generatör grubu	Cihaz yalıtımının delinmesi
Harmonik distorsiyon	Ark fırınları Gaz deşarjlı aydınlatma cihazları Güç konverterleri	Hat düzenleyici Filtre	Rölelerin yanlış çalışması Yalıtımın delinmesi Motor-trafo nötr iletkeninde aşırı ısınma
Elektriksel gürültü	Zayıf bağlantılar Yetersiz topraklama Radyo ekipmanları	Yalıtım transformatörü KGK	Mikroişlemci temelli ekipmanların yanlış çalışması

Besleme sisteminde aşağıdaki olaylar meydana gelebilir;

- Yıldırım düşmesi geçici olaylara sebep olabilir. Gerilim çökmesi ve gerilim düşmesi veya olası müşteri kesintilerine yol açabilecek bir hataya yol açarlar,
- Hat ve kapasitör anahtarlama geçici olaylara neden olur,
- İletim hatları ve transformatörlerin asimetrik yapısı dengesizliğe yol açar,
- Fider üzerindeki hatalar gerilimin düşmesine, yükselmesine veya beslemenin tamamen kaybolmasına sebep olabilir,

Müşteri üretim sahası veya yakın bir tesisten kaynaklanan problemler;

- Büyük yüklerin, özellikle motorların aniden devreye alınması, gerilim düşmesine neden olur,
- Tek fazlı yüklerin üç faza doğru eşit olmayan dağıtımı dengesizliğe neden olur,
- Periyodik yükler fliker olayına sebep olur,

- d) Zayıf bir bağlantı veya yetersiz topraklama yüksek nötr-toprak gerilimine neden olur,
- e) Bilgisayarlar gibi güç elektroniği yükleri, ofis araçları, floresan lambalar, yüksek verimli ışıklar, ayarlanabilir hız sürücüleri harmonik distorsiyona ve tek fazlı yük durumunda yüksek nötr akımlarına yol açar,
- f) Eski televizyon gruplarında bulunabilen SMPS'ler, yüksek frekanslı gürültüye neden olur,
- g) Kontaktörlerin veya rölelerin anahtarlama geçici olaylara sebep olur,

Çizelge 3.2 Güç kalitesini bozan etkenler

PROBLEM SINIFI	FREKANS SPEKTRUMU	SÜRESİ	GERİLİM TEPEDEĞERİ
Geçici Olay			
Darbese			
Nano saniye	5 ns yükselme	< 50 ns	
Mikro saniye	1 µs yükselme	50 ns - 1ms	
Mili saniye	0.1 ms yükselme	> 1ms	
Salımsal			
Düşük frekans	< 5 Hz	0.3 - 50 ms	0 - 4 p.u.
Orta frekans	5 - 500 kHz	20 µs	0 - 8 p.u.
Yüksek frekans	0.5 - 5 MHz	5 µs	0 - 4 p.u.
Kısa Süreli Değişimler			
Ani			
Düşme		0.5 - 30 periyod	0.1-0.9 p.u.
Yükselme		0.5 - 30 periyod	1.1-1.8 p.u.
Kısa Süreli			
Kesilme		0.5 - 3 s	< 0.1 p.u.
Düşme		30 periyod - 3 s	0.1 - 0.9 p.u.
Yükselme		30 periyod - 3 s	1.1 - 1.4 p.u.
Geçici			
Kesilme		3 s - 1 dakika	< 0.1 p.u.
Düşme		3 s - 1 dakika	0.1 - 0.9 p.u.
Yükselme		3 s - 1 dakika	1.1 - 1.2 p.u.
Uzun süreli Değişimler			
Kalıcı kesilme		> 1 dakika	< 0.0 p.u.
Düşüklük		> 1 dakika	0.8 - 0.9 p.u.
Yükseklik		> 1 dakika	1.1 - 1.2 p.u.
Dengesizlik		Kalıcı durum	0 - %0.1
Dalga şekli bozukluğu			
Doğru akım bileşeni		Kalıcı durum	0 - %0.1
Harmonikler	0 - 100 Hz	Kalıcı durum	0 - %20
Ara harmonikler	0 - 6 kHz	Kalıcı durum	0 - %2
Çentik etkisi		Kalıcı durum	
Gürültü	Geniş band	Kalıcı durum	0 - %1
Gerilim dalgalanması	< 25 Hz	Kesikli	0.1 - %7
Güç frekans değişimleri			

h) Kesintisiz güç kaynaklarının yanlış veya uygun olmayan çalışmaları, geçici olaylar, gerilim düşmeleri veya kesintilere yol açar [2].

3.3 Güç Kalitesi Problemleri

Çizelge 3.2 farklı kategorilerdeki elektromanyetik olaylar için uygun tipik spektral içerik, devamlılık süresi ve genlikleri içeren bilgileri gösterir. Bu kategoriler ve açıklamalar, ölçüm sonuçlarını sınıflayabilmek ve güç kalitesi problemlerine sebep olabilen elektromanyetik olayı tanımlamakta önemlidir.

3.3.1 Geçici Olaylar

Geçici olaylar terimi, güç sistem değişikliklerinin analizinde, istenmeyen ancak kısa süreli olan olayları ifade etmekte kullanılır. Çoğu güç mühendisi, geçici olay kelimesini duyduğunda muhtemelen ilk düşündükleri RLC türündeki devrelerden kaynaklanan sönümlü salınımsal geçici olaylardır.

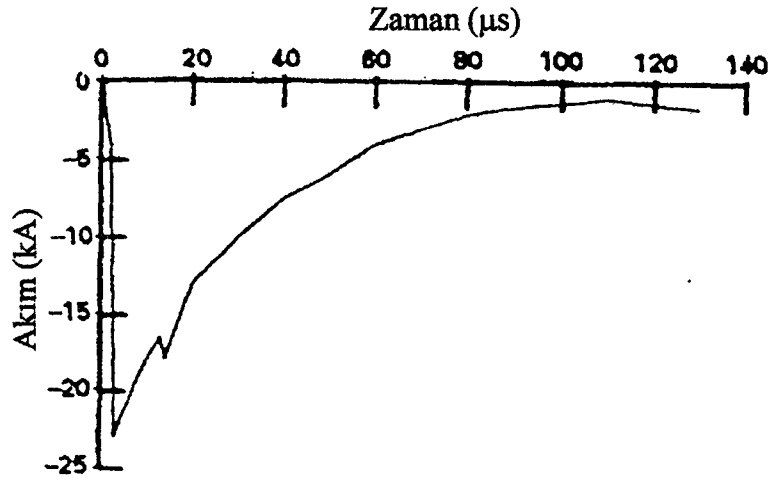
Geçici olaylar için yaygın olarak kullanılan diğer bir tanım ise bir sistemin bir kalıcı durum işletme koşulundan diğerine geçişi sırasında meydana gelen değişikliklerdir. Ancak bu tanım güç sisteminde oluşabilecek sıradan olmayan herhangi bir olayı tanımlamak için kullanılabilir.

Genel olarak geçici olaylar darbesel geçici olaylar ve salınımsal geçici olaylar olarak iki gruba ayrılabilir. Bu terimler akım ve gerilim geçici olayının dalga şeklini yansıtır (Dugan vd., 1996).

3.3.1.1 Darbesel Geçici Olaylar

Darbesel geçici olaylar, akım, gerilim veya her ikisinin kalıcı düzen durumlarında meydana gelen tek kutuplu (pozitif yada negatif) ani değişikliklerdir.

Darbesel geçici olaylar genelde yükselme veya alçalma zamanları ile karakterize edilirler. Örneğin, $1,2 \times 50 \mu s$ 2000 V'luk bir darbesel geçici olay, nominal olarak sıfırdan tepe değeri 2000 V'a $1,2 \mu s$ 'de çıkar ve tepe değerinin yarısına $50 \mu s$ 'de düşer. Darbesel geçici olayların en önemli neden yıldırım olaylarıdır. Şekil 3.1'de yıldırım olayından kaynaklanan tipik bir darbesel geçici olay gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Yıldırım düşmesi sonucu meydana gelen darbesel akım geçici hali

Darbesel geçici olayların şekli, oluşan yüksek frekanslardan dolayı hızlı bir şekilde değişebilir ve güç sisteminin farklı bölümlerinden izlendiğinde çok ayrı karakteristikler gösterebilir. Genellikle güç sistemine girdikleri kaynaktan çok uzak bir mesafeye kadar iletilmezler. Aynı zamanda darbesel geçici olaylar güç sisteminin frekansını aşabildiklerinden salınımsal geçici olaylara da neden olurlar.

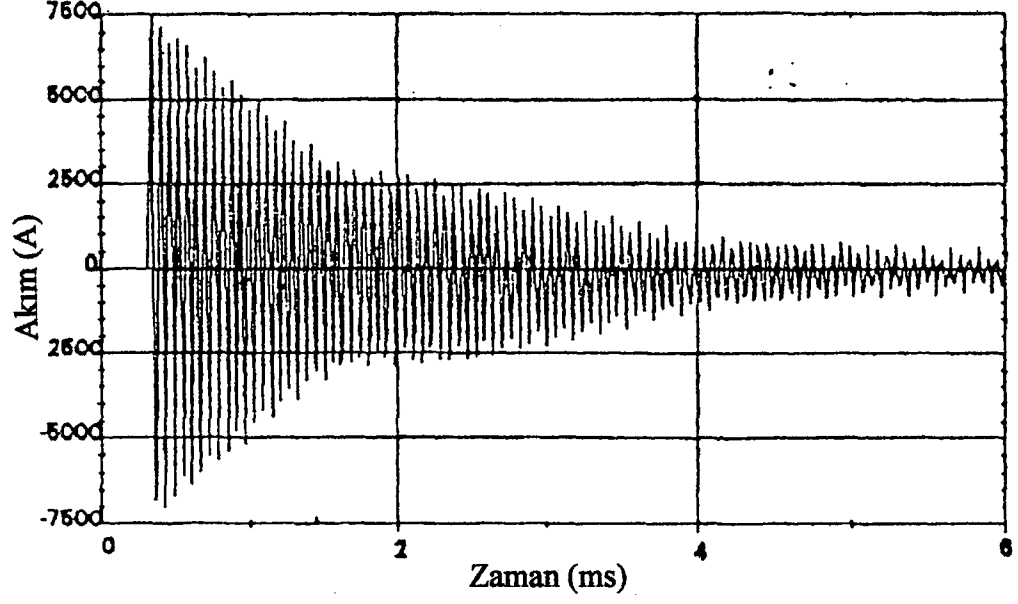
3.3.1.2 Salınımsal Geçici Olaylar

Salınımsal geçici olay, akım, gerilim veya her ikisinin kalıcı düzen durumlarında meydana gelen hem pozitif hem de negatif kutuplu değerleri içeren ani değişikliklerdir. Herhangi bir salınımsal geçici olay ani değerleri hızlı bir şekilde kutuplarını değiştiren akım ve gerilimden oluşur. Salınımsal geçici olaylar spektral içerik, devamlılık süresi ve genlik ile ifade edilirler.

Salınımsal geçici olaylar frekans spektrumuna göre düşük frekanslı, orta frekanslı ve yüksek frekanslı olarak üçe ayrılır.

500 kHz üzerinde bir temel frekans bileşenine ve mikrosaniye cinsinden bir tipik devamlılık süresine sahip salınımsal geçici olaylar yüksek frekanslı salınımsal geçici olaylardır ve genelde darbesel geçici olaylara yerel sistemin cevabı sonucudur.

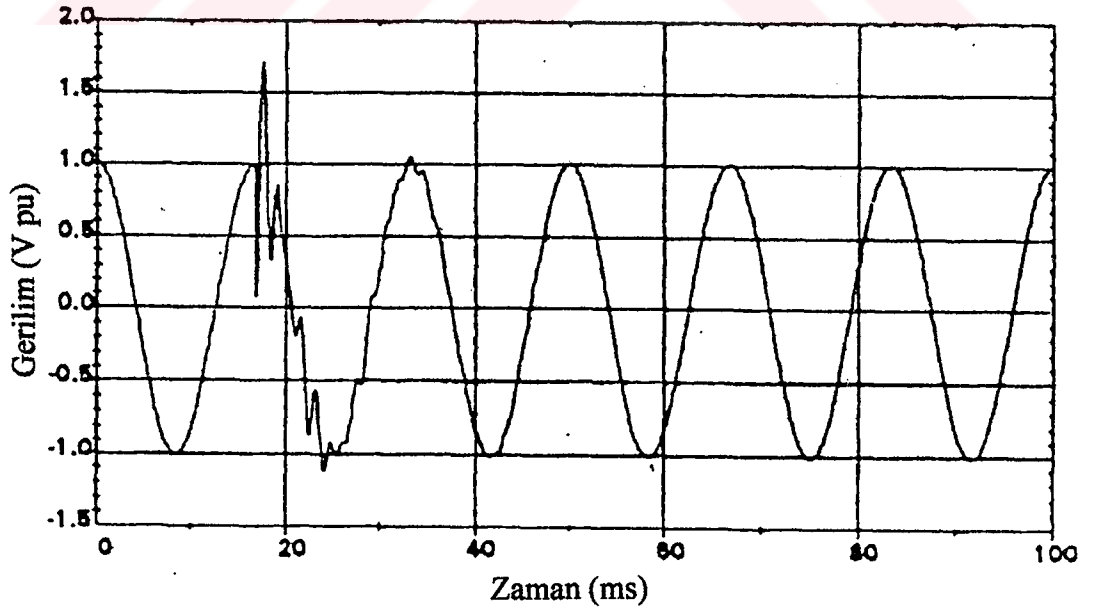
5 ve 500 kHz arasında bir temel frekans ve $10 \times \mu s$ 'ler cinsinden ölçülen bir devamlılık süresine sahip salınımsal geçici olaylar orta frekanslı salınımsal geçici olaylardır. Kablo anahtarlama da aynı frekans seviyesinde salınımsal geçici olaya sebep olur.



Şekil 3.2 Kapasitörlerin arka arkaya anahtarlanması sonucu oluşan salınımsal geçici akım hali

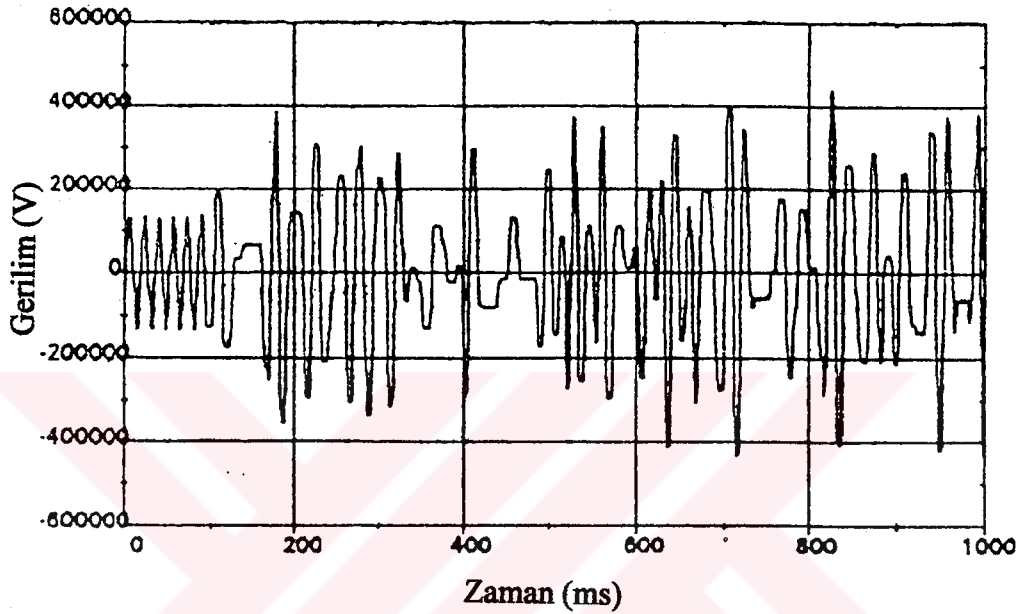
5 kHz'den az bir temel frekans ve 0,3 ms ile 50 ms arasında bir devamlılık süresine sahip salınımsal olayda düşük frekanslı salınımsal olaydır.

Şekil 3.2'de arka arkaya kapasitör anahtarlamaı sonucunda meydana gelen $10 \times \text{kHz}$ frekansında salınımsal akımlar gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Kapasitör gruplarının enerjilenmesinden dolayı oluşan düşük frekanslı salınımsal geçici olay

Dağıtım sistemlerinde sık sık karşılaşılan bu kategorideki olaylar birçok farklı olay sebebiyle meydana gelebilir. En sık olan ise 300 – 900 Hz arasında frekansta bir temel frekansa sahip salınımsal bir geçici olaya sebep olabilecek kapasitörlerin devreye alınması olayıdır. Tepe genlik değeri 2.0 p.u.'ya ulaşabilir, ancak genelde sistemin yapısına bağlı olarak 0,5 ve 3 arasında periyotlu 1,3 ile 1,5 p.u. arasında süreye sahiptir. Şekil 3.3'te kapasitör gruplarının devreye alınmasıyla oluşan salınımsal geçici olay gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Yüksüz bir transformatörün ferrezonansı ile meydana gelen düşük frekanslı salınımsal geçici olay

Dağıtım sistemleri üzerinde 300 Hz'den daha az tam frekansa sahip olaylar da olabilir. Bunlar genellikle ferrezonans veya transformatörlerin devreye alınması sırasında meydana gelir. Şekil 3.4'te bu tip bir salınımsal geçici olay gösterilmektedir.

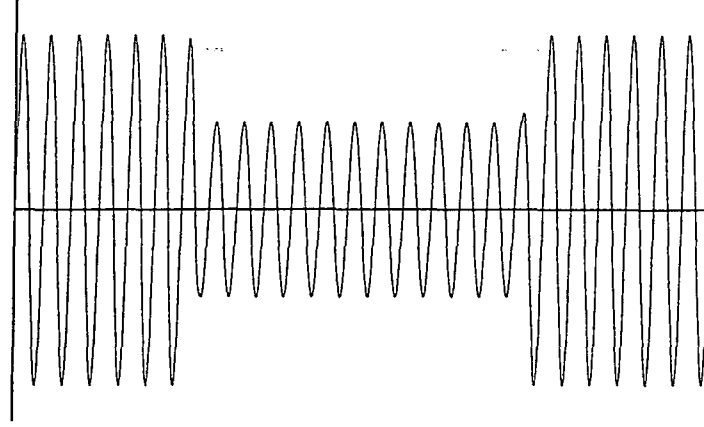
Seri kapasitörler sebebiyle oluşan geçici olaylar da bu kategoridedir. Transformatör kalkış akımlarındaki düşük-frekans bileşenleriyle (2. veya 3. harmonikler) rezonansına sistem cevap verdiğinde veya sıradan olmayan durumlar ferrezonansa sebep olduğunda meydana gelirler.

3.3.2 Kısa Süreli Gerilim Değişimleri

Bu tür değişimler ani, geçici ve kısa süreli olarak tanımlanabilir. Kısa süreli gerilim değişimleri, yüksek değerde yol alma akımı çeken büyük yüklerin devreye alınması veya güç iletkenlerinde oluşan temassızlıklar sebebiyle meydana gelir. Hatanın yerine ve sistem

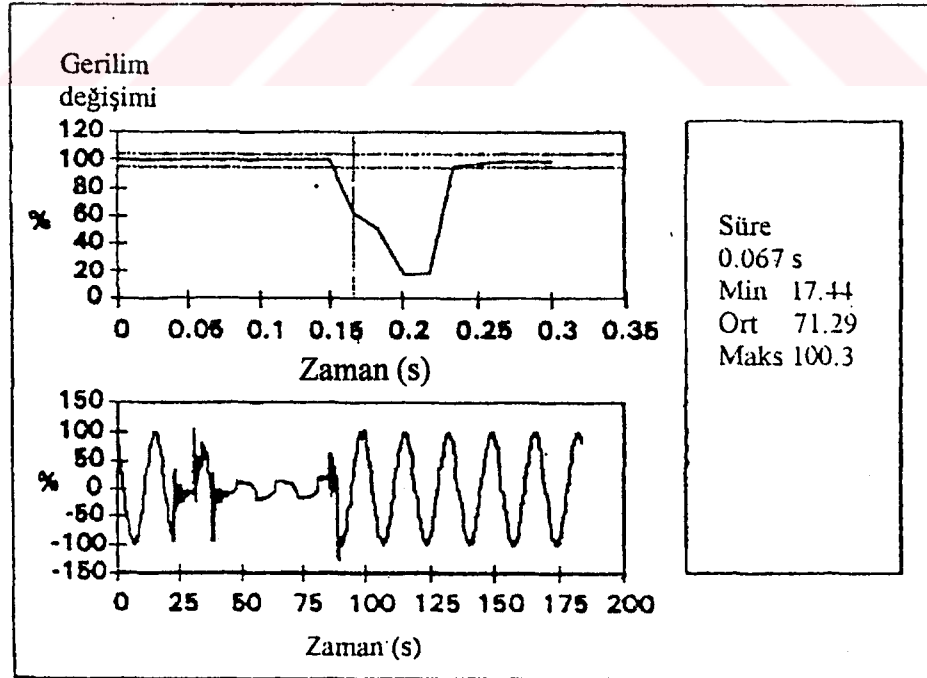
koşullarına bağlı olarak hata geçici gerilim düşmelerine veya gerilimin tamamen kesilmesine sebep olabilir (Dugan vd., 1996).

3.3.2.1 Gerilim Düşmesi



Şekil 3.5 Gerilim düşmesi

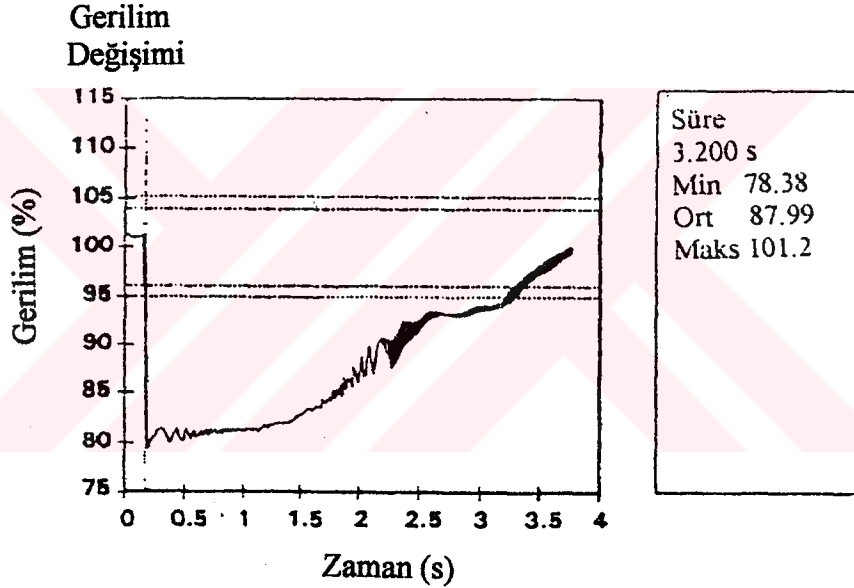
Gerilim düşmesi, 0,5 periyot ile bir dakika arasındaki bir süre boyunca güç sistemi frekansındaki gerilim veya akım efektif değerinin düşmesidir.



Şekil 3.6 Tek-faz-toprak arızasından kaynaklanan gerilim düşmesi

Gerilim düşmesi genellikle sistem hataları ile ortaya çıksa da ağır yüklerin devreye alınması veya büyük güçlü motorlara yol verilmesiyle de meydana gelebilir. Ancak anlık gerilim düşmelerinin ana sebebi muhtemelen yıldırım düşmesidir. Şekil 3.6'da tek-faz-toprak kısa devresi (SLG hatası) sonucu aynı trafo merkezine bağlı diğer bir fider üzerinde meydana gelen tipik bir gerilim düşmesini gösterir.

Şekil 3.7 büyük güçlü bir motora yol verilmesi etkisini gösterir. Bir asenkron motor kalkış sırasında tam yük akımının 6 ile 10 katı arasında akım çeker. Eğer asenkron motor akımının genlik değeri sisteme bağlı olduğu noktadaki olası hata akımına göre yüksek ise, meydana gelen gerilim düşmesi büyük olur. Bu durumda gerilim hızlı bir şekilde % 80'ine düşer ve yavaş yavaş normal değerine 3 s'lik bir sürede geri döner.



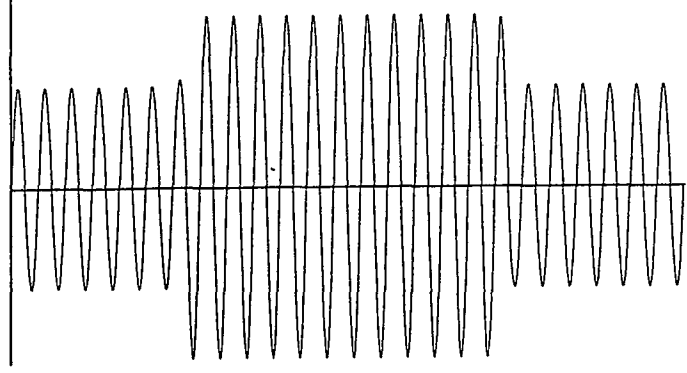
Şekil 3.7 Motor kalkışı ile meydana gelen geçici gerilim düşmesi

Muhtemel etkileri deşarj lambalarının sönmesi, kontrol cihazlarının yanlış çalışması, motorların durması veya hızlarında değişim, bilgisayar sistemlerinin çökmesi, veya inverterlerde komütasyon hatalarıdır.

Son yıllarda, gerilim düşme olaylarının süresi açıkça tanımlanmıştır. Tipik gerilim düşme süresi bazı kaynaklarda 2 ms'den birkaç dakikaya kadar uzanmıştır. Yarım periyottan daha az süren düşük gerilimler temel frekans değerinin efektif değerinde değişim ile etkili olarak ifade edilemez. Bundan dolayı, bu olaylar geçici olaylar olarak düşünülebilir.

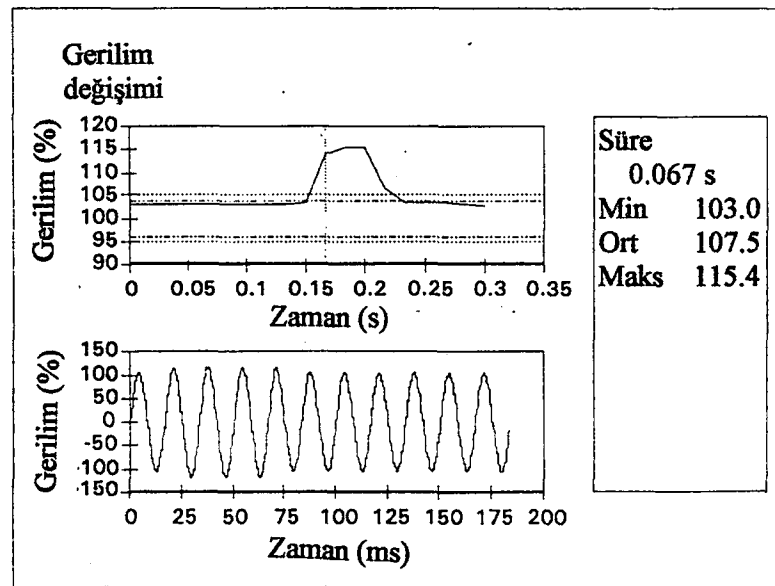
3.3.2.2 Gerilim Yükselmesi

Gerilim yükselmesi, 0,5 periyot ile 1 dakika arasındaki bir süre boyunca frekansındaki gerilimin veya akımın efektif değerinin 1,1 pu ile 1,8 pu arası bir değere yükselmesidir.



Şekil 3.8 Gerilim yükselmesi

Gerilim düşmeleri gibi gerilim yükselmeleri de sistem hatası ile ilişkilidir, ancak gerilim düşmeleri kadar yaygın değildir. Gerilim yükselmesinin meydana gelmesinde bir neden tek-faz-toprak kısa devresi (SLG hatası) sırasında, hata olmayan fazda geçici gerilim artışıdır. Şekil 3.9 SLG hatası sonucu oluşan gerilim yükselmesini gösterir. Gerilim yükselmesi ayrıca büyük yüklerin anahtarlama sırasında veya büyük kapasitörlerin devreye alınmasında oluşabilir.



Şekil 3.9 Tek-faz-toprak kısa devresi sonucu oluşan ani gerilim yükselmesi

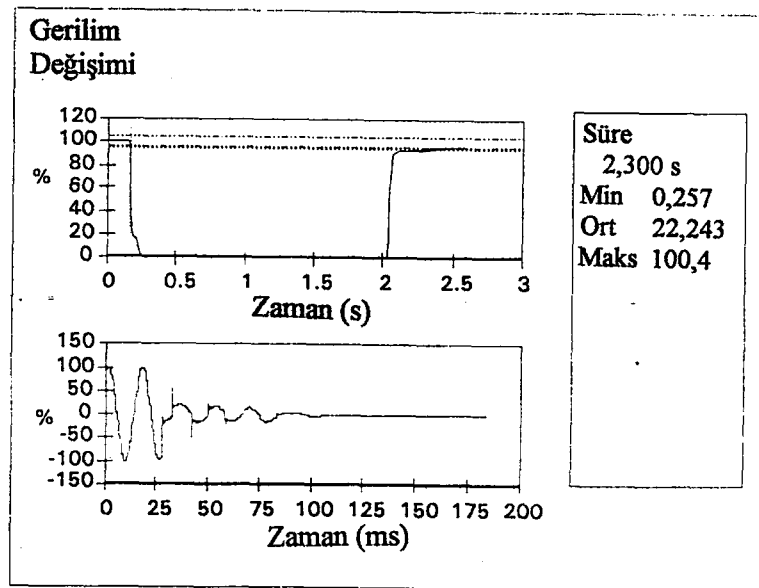
Gerilim yükselmeleri efektif tepe değerleri ve süreleri ile karakterize edilir. Hata sırasındaki gerilim yükselmesinin şiddeti hata yerine, sistem empedansına ve topraklamaya bağlıdır. Topraklanmamış bir sistemde, sıfır bileşen empedansı ile, topraklanmamış fazlarda faz toprak gerilimleri SLG hata durumunda 1,73 p.u. olacaktır. Topraklanmamış bir trafo merkezinde ise hata olmayan fazlarda çok küçük veya hiçbir yükselme olmayacaktır.

3.3.2.3 Gerilim Kesilmesi

Gerilim kesilmesi kaynak geriliminin veya yük akımının 1 dakikayı geçmeyen bir periyot boyunca 0,1 p.u.'in altına düşmesi sonucu meydana gelir.

Gerilim kesilmesi güç sistemi hataları, alet hataları veya kontrol sistemlerinin yanlış çalışması sonucu olabilir. Gerilim kesilmeleri, gerilimin nominal değerin % 10'undan daha az değerlere düşmesi sebebiyle genellikle süreleri ile ölçülürler. Şebekedeki bir hatadan kaynaklanan gerilim kesilmesinin süresi, kullanıcı koruma cihazlarının çalışma zamanları ile belirlenir. Koruyucu cihazın gecikmeli tekrar kapaması anlık ve geçici gerilim kesilmelerine neden olabilir. Ekipman yanlış çalışması veya bağlantılarda temassızlıklarından kaynaklanan kesintilerin süresi düzensiz olabilir.

Bazı gerilim kesilmeleri, besleme sistemindeki bir hatadan kaynaklanıyorsa gerilim düşmesi olarak görülebilir. Gerilim düşmesi, hatanın oluşması ile koruma cihazının çalışması arasındaki zamanda meydana gelir. Şekil 3.10'da kısa süreli gerilim kesilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Kısa süreli gerilim kesilmesi

Şekil 3.10'a göre gerilim 3 periyot boyunca % 20'ye düşmüş ve daha sonra 1,8 s boyunca sıfıra ani bir kesilme ile düşmüştür. Kesintiye sebep bir sigortanın atması veya kesicinin açması olabilir.

3.3.3 Uzun Süreli Gerilim Değişimleri

Uzun süreli gerilim değişimleri, güç frekansındaki 1 dakikadan daha uzun efektif değişimleri ifade eder. ANSI C84.1 güç sistemi üzerinde kabul edilen kalıcı düzen gerilim toleranslarını belirlemiştir. Bir gerilim değişimi, ANSI limitleri 1 dakikadan daha fazla aşıldığında uzun süreli olarak düşünülebilir.

Uzun süreli gerilim değişimleri aşırı gerilim veya düşük gerilim olabilir. Aşırı ve düşük gerilimler genellikle sistem hataları sonucunda değil de sistemdeki yük değişiklikleri ve sistem anahtarlamaları nedeni ile olur. Bu tür değişiklikler genellikle efektif değer-zaman grafikleriyle gösterilir.

3.3.3.1 Aşırı Gerilim

Aşırı gerilim, güç frekansında 1 dakikadan uzun bir süre boyunca AC gerilim efektif değerinin % 110'unu aşacak kadar yükselmesidir.

Aşırı gerilimler, genelde yük anahtarlamaları (büyük bir yükün devreden çıkarılması, kapasitör gruplarının devreye alınması) sonucunda oluşurlar. İstenilen gerilim regülasyonuna göre sistemin güçsüz olması veya gerilim kontrollerinin yeterli olmaması gibi sebeplerle aşırı gerilimler oluşur. Transformatör gerilim kademelerinin yanlış ayarlamaları sonucunda da oluşabilir.

3.3.3.2 Düşük Gerilim

Düşük gerilim, güç frekansında 1 dakikadan uzun bir süre boyunca AC gerilim efektif değerinin % 90'ın altına düşmesidir.

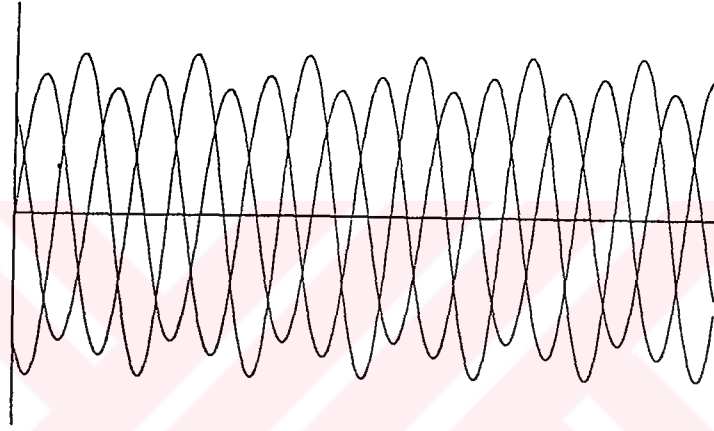
Yüksek gerilime neden olan olayların karşıtları sonucunda düşük gerilimler oluşur. Yük anahtarlaması, kapasitör gruplarının devreden çıkarılması, sistem üzerindeki gerilim düzenleyici ekipmanların gerilimi standartlar içerisindeki seviyeye geri getirene kadar ki sürede düşük gerilime neden olurlar. Aşırı yüklenmiş devrelerde ayrıca düşük gerilime neden olabilirler.

3.3.3.3 Kalıcı Gerilim Kesintileri

Kalıcı gerilim kesintisi, 1 dakikadan daha uzun bir süre boyunca kaynak geriliminin sıfır olarak kalmasıdır. Uzun süreli gerilim değişimleri kalıcı kesintilerdir. Bir dakikadan uzun süren gerilim kesintileri genelde kalıcıdır ve sistemi onarıp eski durumuna getirmek için insan müdahalesi gerekir.

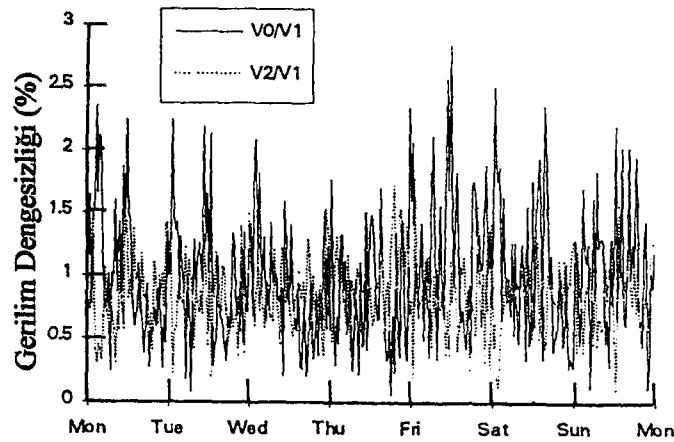
3.3.4 Gerilim Dengesizliği

Gerilim dengesizliği üç-faz gerilim ve akım değerlerinin ortalamasından maksimum sapma olarak tanımlanabilir. Ayrıca simetrik bileşenleri kullanarak da ifade edilebilir.



Şekil 3.11 Gerilim dengesizliği

Negatif veya sıfır bileşenin pozitif bileşene oranı ile dengesizlik yüzdesi belirlenebilir. Şekil 3.12 her iki oranın evlere ait bir fider üzerindeki dengesizliklerin bir haftalık incelemesi örneklerin gösterir.



Şekil 3.12 Evlere ait bir fider için dengesizlik değerleri

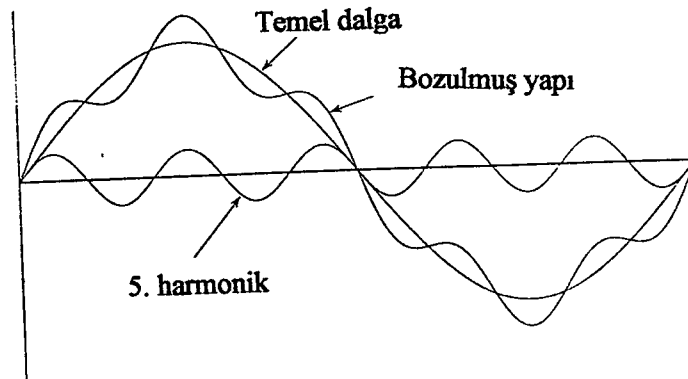
Dengesiz bir besleme üzerinde çalışan bir makine kaynak gerilimin birkaç katı derecesinde bir akım çeker, sonuç olarak üç faz akımları farklılık gösterir, ve makinede sıcaklık artışı başlar. Motor ve generatör, bu tür büyük dengesizlikleri anlayabilmek için koruma cihazıyla donatılırlar. Besleme dengesizliği yetersizse, tek fazlı koruma cihazı dengesiz akımlara cevap verir ve makineyi devre dışı bırakır.

Üç fazlı sistemler üzerindeki tek fazlı yükler, % 2'den az gerilim dengesizliğini ana sebebidir. Üç fazlı kapasitör gruplarının bir fazında olabilecek sigorta atması sonucu da gerilim dengesizliği meydana gelebilir. % 5'ten büyük şiddetli gerilim dengesizlikleri tek fazı kullanabilmeden kaynaklanabilir.

3.3.5 Dalga Şekli Distorsiyonu

Dalga şekli distorsiyonu, çoğunlukla sapmanın spektral içeriğine göre karakterize edilen, ideal bir sinüs dalganın güç frekansından kararlı düzen sapması olarak tanımlanır. Dalga şekli bozulmasının beş temel türü vardır. Bunlar;

- DC Bileşen
- Harmonikler
- Ara Harmonikler
- Çentikler
- Gürültü



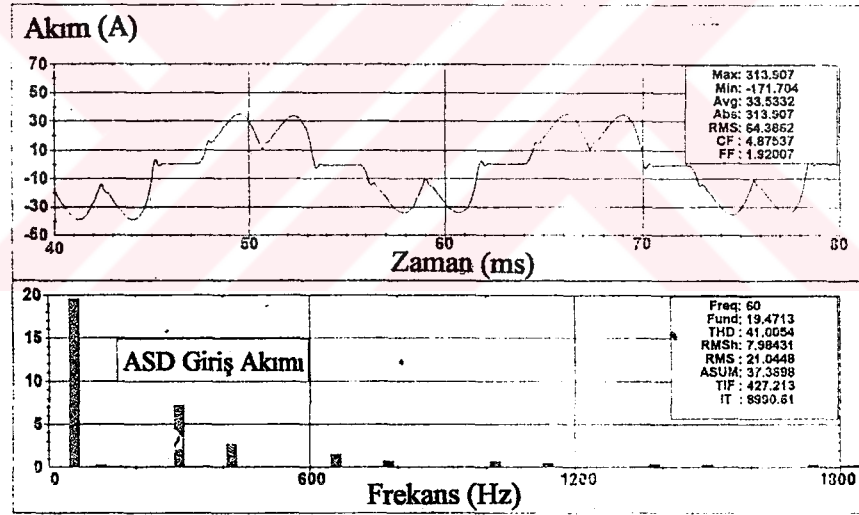
Şekil 3.13 Bozulmuş bir dalga örneği

3.3.5.1 DC Bileşen

Bir AC güç sisteminde DC gerilim veya akımın varlığı, DC bileşen olarak ifade edilir. Geomagnetik hasar sonucu veya yarı-dalga doğrultucu etkisinden dolayı meydana gelebilir. Alternatif akım şebekelerindeki doğru akım, sistemde bulunan bir transformatörün normal çalışma koşullarında doymaya ulaşmasına sebep olabilir. Bu, aşırı ısınmaya ve transformatör ömründe azalmaya yol açar. Doğru akım, ayrıca topraklama elektrotlarında ve diğer bağlantılarda elektrolitik erozyona sebep olabilir.

3.3.5.2 Harmonikler

Harmonikler, besleme sistemi çalışma frekansının (50 Hz ve 60 Hz) tam katı frekanslara sahip sinüsoidal gerilim veya akımlardır. Distorsiyona uğramış dalga şekilleri, temel bileşen ve tüm harmoniklerin toplamı olarak ifade edilebilir. Harmonik distorsiyon güç sistemindeki lineer olmayan özellikte cihaz ve yükler nedeniyle oluşabilir.



Şekil 3.14 Ayarlanabilir hız kontrol sürücüsüne ait giriş akımı dalga şekli ve harmonik spektrumu

Harmonik distorsiyon seviyeleri, her bir harmonik bileşenin genliği ve faz açılarını belirten harmonik spektrumu ile açıklanabilir. Ayrıca harmonik distorsiyon efektif değerini bir ölçü olarak belirtmekte Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) ifadesi kullanılabilir. Bu ifade temel bileşen hariç olmak üzere her bir harmonik bileşenin karelerinin toplamının karekökünün temel bileşene oranıdır. Şekil 3.14, ayarlanabilir hız kontrol sürücüsüne ait giriş akımı dalga şekli ve harmonik spektrumunu göstermektedir.

Akım bozulma seviyeleri THD değeri ile karakterize edilebilir ama bazen bu yanıltıcı olabilir. Örneğin, birçok ayarlanabilir hız kontrol sürücüsü düşük yüklerde çalıştıklarında giriş akımı için yüksek THD değerleri ortaya çıkar. Böyle bir durumda genlik düşük olduğundan THD değerinin yüksek olması çok önemli değildir. Harmonikleri daha iyi karakterize edebilmek için IEEE Standart 519 (1992), TDD (Toplam Talep Distorsiyonu) adında yeni bir terim ifade etmiştir. TDD terimi toplam harmonik distorsiyonu ile hemen hemen aynıdır, ancak TDD'nda yük akımlarına göre yüzde bulunur. IEEE standart 519-1992 dağıtım ve iletim devrelerindeki harmonik akım ve gerilim distorsiyonlarına karşı bazı standartlar sağlar.

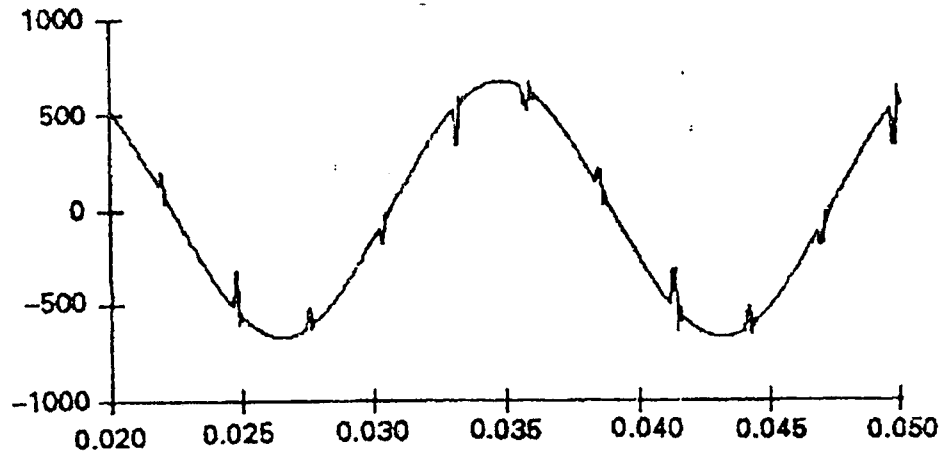
3.3.5.3 Ara Harmonikler

Ara harmonikler, besleme sistem çalışma frekansının (50 Hz veya 60 Hz) tam katlarında olmayan frekansa sahip sinüsoidal gerilim veya akımlardır. Ara harmonikler farklı frekanslar veya geniş bant spektrumları olarak görülebilir.

Ara harmonikler, tüm gerilim sınıflarındaki şebekelerde bulunabilir. Ara harmonik dalga şekli distorsiyonunun ana kaynakları; frekans konverterleri, asenkron motorlar ve ark cihazlarıdır. Güç hattı taşıyıcı işaretleri de ara harmonikler olarak düşünülebilir.

3.3.5.4 Çentik Etkisi

Çentik etkisi, güç elektroniği cihazlarının normal çalışma şartlarında akımın bir fazdan diğerine geçmesiyle oluşan periyodik gerilim distorsiyonlarıdır.



Şekil 3.15 Üç fazlı konverter nedeni ile meydana gelen çentik etkisi

Çentik etkisi, devamlı meydana geldiğinden, etkili gerilimin harmonik spektrumu ile karakterize edilebilir. Bununla birlikte, bu genelde özel bir durum olarak kabul edilebilir. Çentik etkisi ile ortaya çıkan frekans bileşenler, yüksek olabilir ve harmonik analizi için kullanılan ölçme aletleri tarafından karakterize edilmeyebilir. Şekil 3.15'te sürekli DC akım üreten bir konverter tarafından oluşturulan gerilim çentik etkisine bir örnektir.

Çentik etkisi akımlar bir fazdan diğerine geçtiğinde meydana gelir. Bu periyot sırasında iki faz arasında anlık bir kısa devre oluşur ve gerilim sistem empedanslarının izin verdiği derecede hemen hemen sifıra kadar azalır.

3.3.5.5 Gürültü

Gürültü faz iletkenlerindeki güç sistem akım veya gerilim, veya nötr iletkenler veya sinyal hatları üzerinde bulunan, 200 kHz'den daha küçük geniş bant spektral içeriğe sahip istenilmeyen elektrik sinyalleri olarak tanımlanabilir.

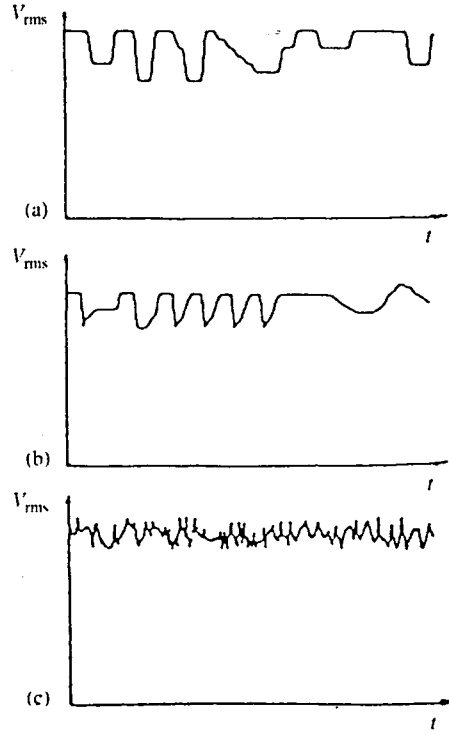
Güç sistemlerinde gürültüler, güç elektroniği cihazları, kontrol devreleri, ark cihazları, anahtarlamalı güç kaynakları gibi elemanlardan kaynaklanabilir. Gürültü problemini önemli yapan bu problemi güç sisteminden uzağa iletemeyen yetersiz topraklama sistemleridir.

Temel olarak, gürültü harmonik distorsiyon veya geçici olaylar olarak sınıflandırılmayan herhangi bir güç sinyali distorsiyonundan oluşur. Mikrobilgisayar veya programlanabilir kontrolcüler gibi elektronik cihazlarının çalışmasını etkiler. Bu problem filtreler, yalıtım transformatörleri gibi cihazlar kullanarak azaltılabilir.

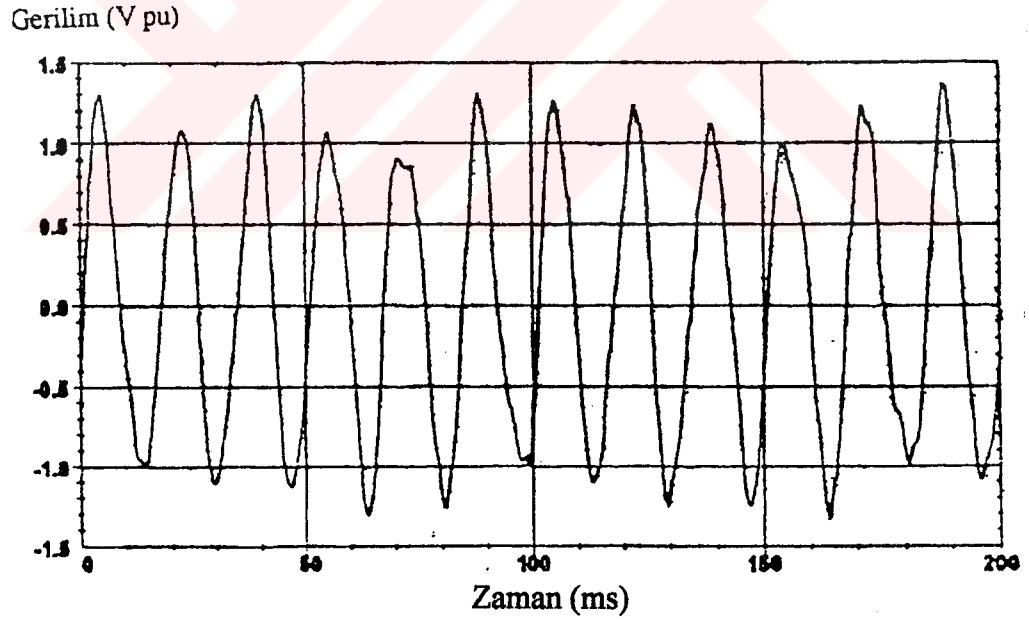
3.3.6 Gerilim Dalgalanması

Gerilim dalgalanmaları, normalde ANSI C84.1-1982 tarafından belirlenen 0,9 p.u. -1,1 p.u. gerilim oranlarını aşmayan sistematik değişimlerdir. Yük akımında sürekli ve hızlı değişimler ortaya koyan yükler fliker olarak adlandırılan gerilim değişmelerine neden olabilir (Dugan vd., 1996).

Teknik olarak fliker bazı yüklerdeki gerilim dalgalanmasının istenmeyen bir sonucu iken gerilim dalgalanması elektromagnetik bir olaydır. Bununla birlikte her iki terimde standartlarda birlikte anılır.



Şekil 3.16 Gerilim dalgalanması



Şekil 3.17 Bir ark fırınının çalışmasıyla meydana gelen gerilim flikeri örneği

Şekil 3.17’de fliker üreten bir gerilim dalga şekli örneği gösterilmiştir. Bunun sebebi, iletim ve dağıtım sistemlerinde gerilim dalgalanmalarının ana sebeplerinden biri olan ark fırınıdır. Fliker sinyali, temel bileşenin yüzdesi olarak efektif tepe değeri ile ifade edilir. Tipik olarak,

% 0,5 oranı kadar düşük genlikler, eğer frekanslar 6-8 Hz civarında ise lambada flikere sebep olur.

3.3.7 Frekans Değişimleri

Güç frekans değişimleri, güç sistem temel frekansının nominal değerden (50 Hz veya 60 Hz) sapması olarak tanımlanabilir.

Güç sistem frekansı, sistemi besleyen generatörlerin açısal hızları ile doğrudan ilişkili bir parametredir. Yük ile kaynak arasındaki dinamik denge sebebiyle frekansta küçük değişimler vardır. Frekanstaki değişim ve sürenin boyutu yük karakteristiğine, ve yük değişikliklerine generatör sisteminin cevabına bağlıdır.

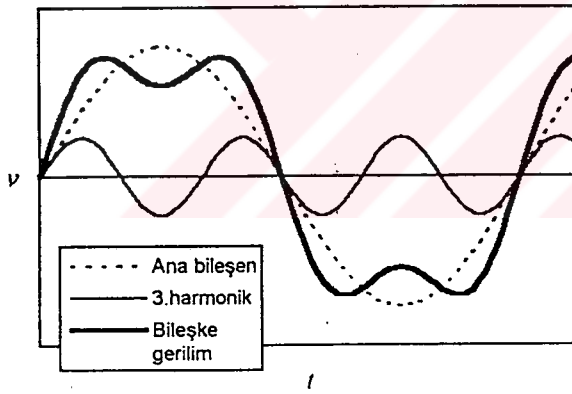
Güç sisteminin normal kalıcı-düzen çalışması için kabul edilen sınırlar dışına çıkan frekans değişimleri, büyük bir yükün devre dışı kalması, iletim sisteminde bir arıza sonucu meydana gelebilir. Modern enterkonnekte güç sistemlerinde ciddi frekans değişimleri çok nadirdir.

Gerilimin çentik etkisi kimi zaman frekans değişimlerine sebep olabilir. Gerilim çentikleri, sıfıra yakın bir değere inerek çeşitli aletler ve kontrol cihazlarını etkileyebilir [2].

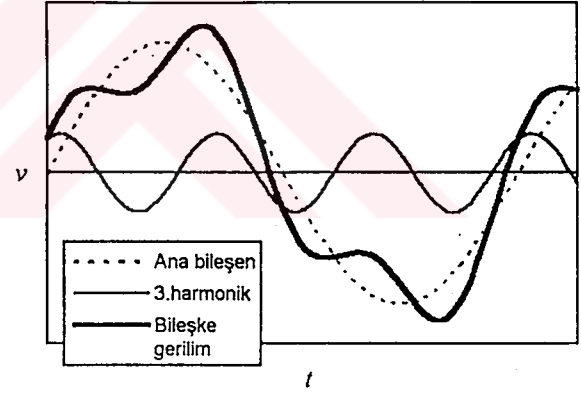
4. HARMONİKLER

Güç sistemlerinin başlangıcından beri lineer olmayan elemanlar ve yükler olmuştur. Örneğin; transformatörler nominal çalışma koşullarının dışına çıktığında lineer olmayan şebeke elemanı olarak davranırlar. Nonlineerlik etkisi ve nonlineer eleman sayısı, harmonik üreten elemanların güç sistemine bağlanmasıyla hızlı bir şekilde artmıştır. Bu artmanın temel sebebi yüksek güçlü yarı iletken anahtarların gelişimi ve onların doğrultucu, evirici ve çeşitli elektronik devrelerde uygulanmasıdır. (Örneğin; DC iletim konverter istasyonları, motor kontrol devreleri, statik VAR generatörleri, v.b.).

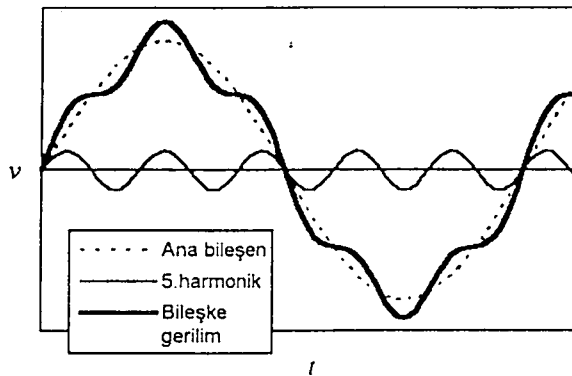
Yarı iletken elemanların yapısı gereği ve sanayide kullanılan bazı lineer olmayan yüklerin (transformatör, ark fırınları, v.b.) etkisiyle; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüsoidal dalgalara harmonik adı verilir. Temel dalga ile 3., 5., 7. harmonikler ve bunların bileşkesi olan bileşke dalga şekli Şekil 4.1'de verilmiştir.



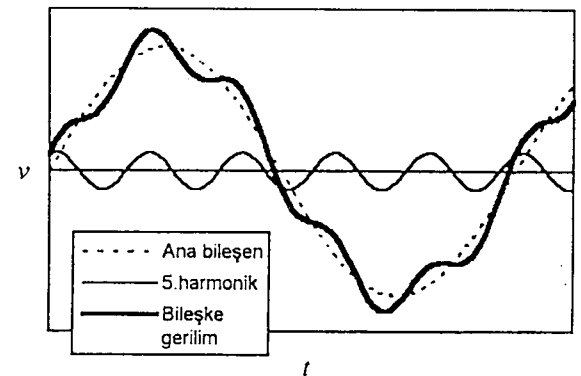
a) 3. harmonik, faz açısı $\phi=0^\circ$



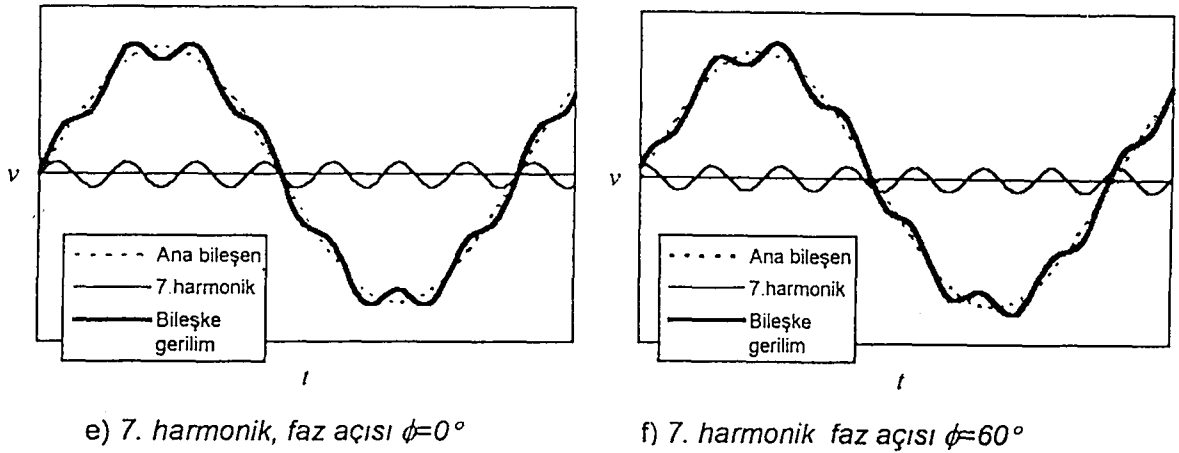
b) 3. harmonik, faz açısı $\phi=60^\circ$



c) 5. harmonik, faz açısı $\phi=0^\circ$



d) 5. harmonik, faz açısı $\phi=60^\circ$



Şekil 4.1 Temel dalga, 3., 5., 7. harmonikler ile bunların bileşkesi olan bileşke dalga

Güç sistemlerindeki harmonikler, sistemi gün geçtikçe artan bir oranda etkilemekte, tesislerde güç kesintilerine ve zaman kaybına yol açmaktadırlar. Her ne kadar filtre devreleri yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmışsa da; filtreleme tesislerin, toplam maliyeti artırması nedeniyle maliyet optimizasyonuna gidilme ihtiyacı duyulmuştur.

Uygulamada en çok 3., 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerle karşılaşılır. Ancak 11. ve 13. harmoniklerin genlikleri ana bileşene göre çok küçük olduğundan özel haller dışında önemsenmezler. Daha çok 3., 5., 7. harmoniklere ilişkin önlemler alınmaya çalışılır. Elektrikli aygıtlara en büyük zararı 5 kHz'den küçük olan harmoniklerin verdiği kabul edilmektedir.

Enerji sistemlerinde akım ve gerilim dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunların en önemlileri;

- Dielektrik arızası veya reaktif gücün aşırı yüklenmesinden dolayı kondansatörlerde meydana gelen arızalar,
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü ve ölçme yapan sistemlerin enerji taşıma hattı sistemlerine ait dalga kontrolü ile karışması,
- Asenkron ve senkron makinelerin ısınmasına neden olan aşırı kayıplar,
- Şebeke üzerindeki rezonans sonucunda meydana gelen harmonik gerilim ve akımlardan dolayı sistem üzerindeki aşırı gerilim ve akımlar,
- Harmonik aşırı gerilimlerin sonucunda yalıtkan kablolarda meydana gelen dielektrik arızaları,

- Haberleşme sistemleriyle endüktif karışma,
- Ölçüm okumadaki hatalar,
- Özellikle katı hal ve mikroişlemci kontrollü sistemlerde sinyal karışması ve hatalı röle çalışması,
- Büyük motor kontrolörleri ve santral uyarma sistemlerinin karışması,
- Asenkron ve senkron makinelerde meydana gelen mekanik salınımlar,
- Ateşleme anları gerilimin sıfırına göre ayarlanmış devrelerde kararsız çalışma,
- Transformatör çekirdeğine bağlı olan frekanslardan dolayı transformatörlerin aşırı ısınması,
- Harmoniklerin tepe gerilimini etkilemesi sonucu TV resim boyutu ve parlaklığındaki değişimler,
- Bilgisayar ve bilgisayar otomasyonlu üretimdeki etkilerdir (Douglas, 1994).

Bu etkiler içinde teknik ve ekonomik yönden en olumsuz sonuçlara yol açanları, kayıplardaki artış ve sistem ölçü cihazlarındaki hata paylarının artması şeklinde özetlemek mümkündür. Bunlardan birincisi omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır. İkincisi ise, ölçü ve kayıt cihazlarındaki istenmeyen hata miktarlarının oluşması, bir başka deyişle ölçüm hatalarının artmasıdır.

Arızasız bir işletmede harmonikler çeşitli nedenlerle ortaya çıkarlar. Magnetik ve elektrik derelerdeki doğrusal olmayan olaylar ana nedenlerdir. Magnetik devrelerde doyma olayı, elektrik devrelerinde ark olayı ve güç elektroniğinde sinüs eğrisinin kesilmesi olayı doğrusal olmayan olaylardır. Örneğin, generatör, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek içeren elemanlar, doymanın baş göstermesi ile harmonikli akımlar üretirler. Ark fırınları ve kaynak makineleri gibi normal işletmeler gereği bir arkın oluşması sonucunda da harmonikler oluşur.

Kısaca, karakteristiği doğrusal olmayan elemanlar 50 Hz temel frekanslı aktif ve reaktif güç tüketirken, harmonikli frekanslı gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Güç sistemlerinde başlıca harmonik üreten kaynaklar;

- Generatörler
- Transformatörler

- Ark fırınları
- Konverterler
- Elektronik balastlar
- Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları
- Kesintisiz güç kaynakları
- Ayarlanabilir hız kontrol devreleridir.

4.1 Harmonikli Elektriksel Büyüklükler

Alternatif akım tesislerinde elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve tüketilmesi sırasında gerilimin ve akımın tam sinüs şeklinde olması arzu edilir ve ülkemizde nominal şebeke frekansı 50 Hz'dir. Fakat bazı yan etkiler ve bozucu olaylar yüzünden gerilimin ve akımın dalga şekli bozulur ve sinüs şeklinden ayrılır. Gerilim ve akım sinüs şeklinde olmaması aşağıda açıklanacağı gibi tesislerde birçok zararlı etkilere yol açar (Arrilaga vd., 1985; Dugan vd., 1996; Bayram, 1997).

Genel olarak bilindiği gibi, sinüs şeklinde olmayan herhangi periyodik bir fonksiyon Fourier serisine göre, sonsuz sayıda harmoniklerin toplamına eşittir. Buna göre sinüs şeklinde olmayan periyodik bir fonksiyon,

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin nt + B_n \cos nt) \quad (4.1)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt + \phi_n) \quad (4.2)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(nt + \phi_n) \quad (4.3)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada; n, pozitif tam sayı olarak harmonik derecesidir, t, bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde $t = \omega t$ olarak tanımlanır), A_0 , sabit terim (doğru bileşen veya ortalama değer olup literatürde A_0 yerine $A_0/2$ kullanılmaktadır), ω , temel dalga açısal frekansı ve f şebeke frekansı ve T periyot olmak üzere $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ olur.

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (4.4)$$

ve

$$\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (4.5)$$

ifadeleri ile bulunur.

Harmoniğin mertebesi yükseldikçe genellikle harmoniğin tepe değeri de küçülür. Denklem (4.1)'deki katsayılar,

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4.6a)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin nt dt \quad (4.6b)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos nt dt \quad (4.6c)$$

ile hesaplanır.

Fonksiyon $f(t) = f(-t)$ koşulunu sağlıyorsa burada çift fonksiyon simetrisi vardır. Bu durumda $A_n = 0$ olur ve fonksiyon sadece cosinüslü terimleri içerir. Fonksiyon $f(t) = f(t+\pi)$ koşulunu sağlıyorsa sadece çift harmonikleri içerir.

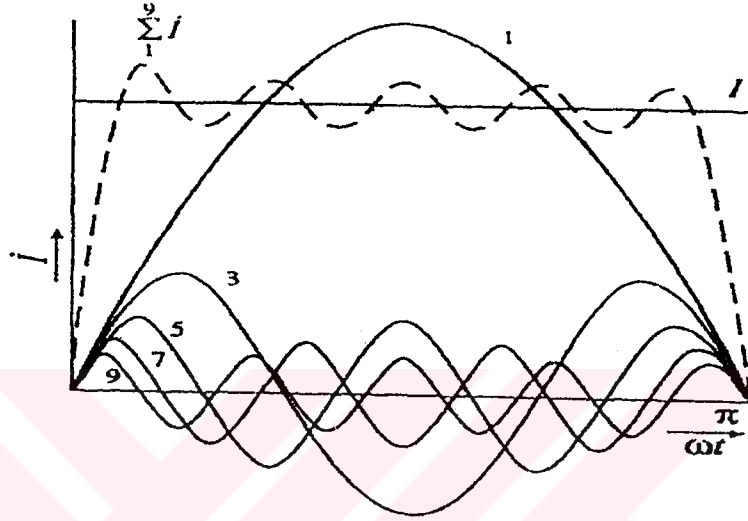
Eğer fonksiyon $f(t) = -f(-t)$ koşulunu sağlıyorsa bu durumda tek fonksiyon simetrisi vardır ve $B_n = 0$ 'dır. Bu fonksiyonlar sadece sinüslü terimleri içerir.

Fonksiyon $f(t+\pi) = -f(t)$ koşulunu sağladığında yarım dalga simetrisi söz konusudur. Fourier açılımında sabit terim yoktur ve fonksiyon sadece tek harmonikli bileşenleri içerir.

Periyodik dalga hem yarım dalga simetrisi hemde çift dalga simetrisi gösteriyorsa bu dalgalara çeyrek dalga simetrikli dalgalar denir. Bu fonksiyonlar cosinüslü ve tek harmoniklerden oluşur.

Sinüsoidal olmayan akım, gerilim v.b. elektriksel büyüklükler için en çok rastlanan dalga şekilleri, dikdörtgen eşkenar üçgen ve trapez veya bunların benzerleridir. Bu eğrilere ait Fourier serisi, tek mertebeli sinüslü terimlerin toplamına eşittir. Bunlardan üç ve üçün katları

olan 3., 9., 15. gibi harmoniklerin R, S, T fazlarındaki değerleri arasındaki faz farkları, 120'nin ve 240'ın üç katına veya üçün katlarına eşit olduklarından, bu faz farkları daima 360 derecenin tam sayılı katlarına eşittir. Bu yüzden üç ve üçün katlarına eşit olan harmonikler, daima R, S, T fazlarında eşit fazlıdır ve cebirsel toplanırlar; onun için bunlara sıfır bileşeni de denilebilir. Bunun dışında kalan 1., 7., 13., ... gibi harmonikler sağa dönen (doğru sistem) ve 5., 11., 17., .. gibi harmonikler ise sola dönen (ters sistemler) sistemler verirler.



Şekil 4.2 Dikdörtgen bir akım eğrisinin harmoniklere ayrılması

Harmonik analizine güzel bir örnek olarak Şekil 4.2'de dikdörtgen şeklinde periyodik değişen bir akım eğrisi verilmiştir. Örneğin çıkık kutuplu senkron makinelerde alan eğrisi şekildeki gibidir. Sabit akım değeri I olan böyle bir eğri, şu denklem ile ifade edilebilir;

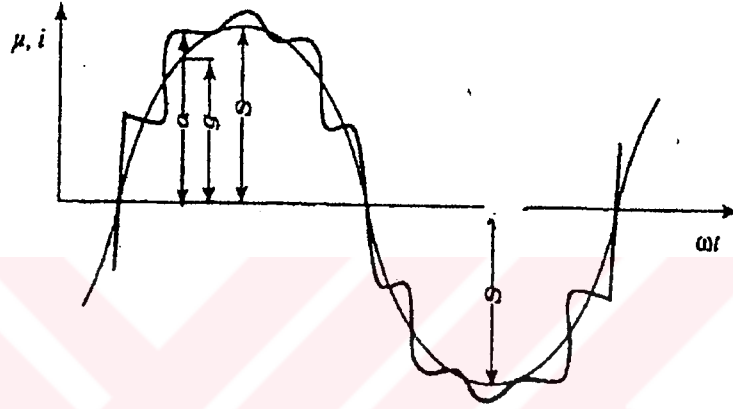
$$i = \frac{4I}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots) \quad (4.7)$$

Teorik olarak burada harmoniklerin sayısı sonsuza kadar gider; fakat her bir harmoniğin genliği, harmonik mertebesi ile ters orantılı olarak azalır böyle bir eğride yalnız tek mertebeli harmonikler vardır. Şekil 4.2'de 1., 3., 5., 7. ve 9. harmonikler çizilmiştir. 1. den 9.'ya kadar harmoniklerin toplamı kesik çizgi ile gösterilmiştir. Görülüyor ki, bunun dikdörtgenden farkı çok büyük değildir. Ancak burada en büyük harmoniğin 3. harmonik olduğu görülür. Bu da, aşağıda açıklanacağı gibi arzu edilmeyen bir durumdur (Bayram, 1997). Şekil 4.2'de I sabit

akım değeri, $\sum_{i=1}^9 i$ 1'den 9'a kadar harmonik akımlarının toplamıdır.

Elektrik enerji sistemlerinde akımların ve gerilimlerin mümkün olduğu kadar sinüs şeklinde olması arzu edilir VDE 0104'e göre sinüs şeklinin bozulması bakımından kabul edilen tolerans; sinüs şekline herhangi bir andaki $U(t)$ değeri ile aynı anda temel harmoniğin $U_1 \cos(\omega t + \phi_1)$ değeri arasındaki farkın, temel dalganın U_1 tepe değeri ile oranı % 5'ten küçük olması şeklindedir.

$$\frac{u(t) - U_1 \cos(\omega t + \phi_1)}{U_1} 100 \leq \%5 \quad (4.8)$$



Şekil 4.3 Sinüs şeklinde olmayan ve periyodik olarak değişen gerilim (veya akım) eğrisi ile temel harmoniği

Şekil 4.3'te periyodik bir gerilim (veya akım) eğrisi ile bunun temel harmoniği gösterilmiştir. Burada herhangi bir andaki gerilimin değeri $u(t) = a$ ile, aynı anda temel harmoniğin tepe değeri $U_1 = S$ ile gösterilmiştir. Buna göre denklem (4.8) yerine,

$$\frac{a - g}{S} 100 \leq \%5 \quad (4.9)$$

yazılabilir.

Şekil 4.3'te a eğri üzerindeki herhangi bir andaki değer, g aynı anda harmoniğin değeri, S temel harmoniğin tepe değeridir. Burada gerilimin efektif değeri,

$$U = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2} \quad (4.10)$$

ve akımın efektif değeri,

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad (4.11)$$

dir.

4.2 Akım ve Gerilim Harmonikleri

Harmonik akımları, harmonik kaynağından en düşük empedansa doğru akma eğilimindedirler. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedanslarının paralel eşdeğerlerinin toplamıdır. Genelde sistem kaynak empedansı, paralel bağlı yüklerin toplam empedansından çok daha düşüktür. Harmonik akımları, çok büyük miktarı sistem kaynağına akmak üzere, empedans oranlarına göre bölünecektir. Daha yüksek mertebeli harmonik akımları ise, yüksek frekanslara düşük bir empedans gösteren kondansatörlere doğru akacaktır.

Akım harmonikleri lineer olmayan yüklerden kaynaklandıkları halde, gerilim harmonikleri,

- Bazı elemanların çıkış gerilimlerinin sinüsten sapması,
- Harmonikli akımların hat parçaları boyunca oluşturduğu harmonik frekanslı gerilim düşümleri,
- Seyrek de olsa orta gerilim şebekesinden kaynaklanan ve giriş trafosuna yansıyan gerilim distorsiyonu,

biçimlerinde ortaya çıkabilir.

Akım harmoniklerinin faz açılarının da bilinmesi, harmonik analizi için gereklidir. Çünkü akım harmonikleri analiz için veri durumundadır. Gerilim harmoniklerinin faz açılarının bilinmesi çoğu kez gerekli değildir. Çünkü bu harmonikler simülasyon sonunda çıktı olarak belirlenmektedir. Zaten gerilim harmoniklerinin genlikleri oldukça küçük olduğu için, çok duyarlı ölçümleri hayli güçtür. Fakat besleme noktasının önemli ölçüde gerilim harmonikleri içermesi halinde, gerilim harmoniklerinin faz açıları da gerekli olabilmektedir.

Güç sisteminde gerilim, harmonik bileşenler içerdiğinde bundan tüm yükler etkilenir. Harmonik içeren bir akım ise sadece harmonik akımı üreten bir yüke etki edebilir. Gerilimdeki harmoniklerin nedeni, sistem empedansında akan harmonikli bir akımdır. Bu nedenle, gerilim harmoniklerini önlemenin yolu, harmonik akımlarının akışını kontrol ederek gerilim harmoniklerine neden olabilecekleri yerlerden uzak tutmaktır.

Harmonik içeren bir akım, yüksek bir empedans yolunda veya rezonans devresinde akarsa, gerilimde harmonik bileşenler içermeye başlar. Bu, dolaylı bir etkidir. Akım harmoniklerinin doğrudan etkisi, akım yolundaki elemanlarda ek ısınma ve kayıplara yol açmasıdır.

4.3 Toplam Harmonik Bozulması ve Efektif Değer

Bir dalga şeklinin harmonik içeriğini tek bir rakamla göstermek için kullanılan çeşitli ölçüm yöntemleri vardır. En yaygın kullanılanlardan biri hem gerilim hem de akım için hesaplanabilen Toplam Harmonik Distorsiyonudur (Arrilaga vd., 1985; Ferrero ve Superti-Forga, 1990; Bayram, 1997)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} M_n^2}}{M_1} \quad (4.12)$$

Burada M_n , n'inci harmonik bileşenin efektif değeridir. THD bozulmuş bir dalga şeklinin harmonik bileşenlerinin efektif değeri olarak bir ölçüsüdür ve bu aynı zamanda harmoniklerin temel bileşene göre potansiyel ısınmalarıdır. Toplam dalga şeklinin efektif değeri her bir bileşenin toplamı olarak değil de, kareleri toplamının karekökü olarak bulunur (Dugan vd., 1996).

$$Efektif\ Değer = \sqrt{\sum_{n=1}^{n_{max}} M_n^2} = M_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2} \quad (4.13)$$

THD birçok uygulama için yararlı bir niceliktir. Omik bir yüke bozulmuş bir gerilim uygulandığında, ne kadar ısı oluşabileceği hakkında fikir verebilir. Benzer bir şekilde bir iletkenin akım sebebiyle oluşan ek kayıpların bir göstergesini verebilir.

Harmonik gerilimler çoğunlukla temel bileşene göre referans alınarak hesaplanır. Gerilimin sadece küçük yüzde oranlarında değişimiyle, gerilim THD'u hemen hemen aynı kalır. Ancak akım için bu durum söz konusu değildir. Küçük bir akım çok yüksek THD doğurabilir, ancak bunun sistemde etkisi tehlike yaratmaz.

4.4 Güç ve Güç Faktörü

Güç ile ilgili 3 standart büyüklük vardır;

- Görünür güç, S; gerilim ve akımın efektif değerleri çarpımıdır.

- Aktif güç, P; görünür gücün işe dönüştürülebilir kısmıdır.
- Reaktif güç, Q; görünür gücün işe dönüştürülemeyen kısmıdır.

Akımın ve gerilimin;

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^N I_{mn} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (4.14)$$

$$V(t) = V_0 + \sum_{n=1}^N V_{mn} \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (4.15)$$

değerlerine bağlı olarak P, Q ve S;

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^N V_n I_n \cos(\delta_n - \phi_n) \quad (4.16)$$

$$Q = \sum_{n=1}^N V_n I_n \sin(\delta_n - \phi_n) \quad (4.17)$$

$$S = V.I = \left[\sum_{n=0}^N V_n^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{n=0}^N I_n^2 \right]^{1/2} \quad (4.18)$$

olarak ifade edilebilir.

Cos ϕ faktörü genellikle güç faktörü olarak adlandırılır. Bununla birlikte, güç faktörünü tanımlamakta kullanılan ifade,

$$PF = \frac{P}{S} \quad (4.19)$$

şeklinde olabilir (Dugan vd., 1996).

$S > P$ olduğu için $PF < 1$ 'dir. Bu katsayı bir oran değeri olup cos ϕ gibi bir açı fonksiyonu değildir. Bu yüzden PF güç katsayısının cos ϕ -metre ile ölçülmesi mümkün değildir. Onun için PF, ya hesap yoluyla belirlenir, ya da özel bir PF-metrenin geliştirilmesi gerekmektedir. Akımın ve gerilimin sinüsoidal olması halinde $PF = \cos \phi$ 'dir.

Gerilim sinüs şeklinde ve buna karşılık akımın herhangi bir eğri şeklinde olması halinde, çekilen aktif güç için sadece akımın temel dalga bileşeni geçerlidir;

$$P = U.I_1.Cos\phi_1 \quad (4.20)$$

dir.

Burada I_1 , akımın temel harmoniğinin efektif değeri ve ϕ_1 , bunun gerilime göre faz açısıdır. Görünür güç ve reaktif güçte aynı şekilde akımın temel dalga bileşenine göre hesaplanabilirler.

Temel harmoniğin görünür gücü,

$$S_1 = U.I_1 \quad (4.21)$$

ifadesi ile, temel harmoniğin reaktif gücü

$$Q_1 = U.I_1.Sin\phi_1 \quad (4.22)$$

ifadesi ile hesaplanabilir.

Sinüs şeklindeki akım ve gerilim için hesaplandığı gibi, sinüs şeklinde olmayan akıma göre bir görünür güç ve

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4.23)$$

ifadesine göre bir reaktif güç tarifi yapılırsa, aktif güce karşılık bu reaktif gücün akımın harmonikleri belirlenebileceği sonucuna varılır (Emanuel, 1990).

$$Q = \sqrt{(U.I_1.Sin\phi_1)^2 + U^2.(I_2^2 + I_3^2 +)} \quad (4.24)$$

Bu ifade, (4.23) ifadesine göre Q_1 terimi ile distorsiyon gücü adı verilen,

$$D = U.\sqrt{I_2^2 + I_3^2 +} \quad (4.25)$$

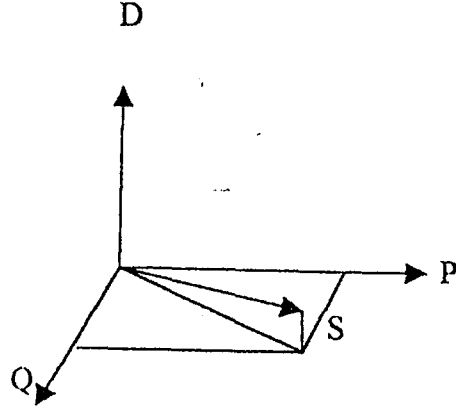
teriminin toplamına eşittir.

Yukarıdaki hesaplara göre görünür güç için,

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (4.26)$$

denklemini elde edilir (Arrilaga vd., 1985; Emanuel, 1990; Bayram, 1997).

Şekil 4.4'te D , S , P ve Q 'nin üç boyutlu vektör diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.4 Görünür güç bileşenleri arasındaki ilişki

5. GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN ELEKTRİK MAKİNELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Enerji sistemi ve tüketici cihazlarında güç kalitesi ile ilgili problemler geniş kapsamlıdır. Bu problemler birçok devre tarafından üretilir ve hem tüketiciyi hem de enerji sistemlerini etkiler.

Güç kalitesi problemleri topraklama, radyo parazitleri, geçici olaylar, kesintiler, harmonikler gibi konulardan oluşur. En sık görülen güç bozucu etkileri arasında bilgisayarlarda donanım hasarları, sistem çöküntüleri ve yöntem hataları gibi problemler sayılabilir.

Güç sistemlerinde gerilim ve akım dalga şekilleri harmoniklerle sık sık bozulmaktadır. Bu bozulma çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde verilecek olursa;

- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması,
- Gerilim düşümünün artması,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi,
- Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması, verimin azalması,
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın oluşması,
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü vb. yerlerde çalışma bozuklukları
- Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar,
- Koruma ve kontrol düzeneklerinde sinyal hataları,
- Toprak temasında bir takım problemler,
- İzolasyon malzemesinin delinmesi,
- Elektrik aygıtlarının ömürlerinin azalması,
- Güç faktörünün azalması,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazitler ve anormal çalışma,
- Mikro bilgi işlemcilerde hatalı çalışmalar,
- Gerilim harmonikleri, TV cihazlarının görüntü kalitesini bozabilir,

- Flüoresan ve cıva buharlı lambalarla yapılan aydınlatmada, balastın yanı sıra kondansatörler de kullanılır. Devrenin endüktansı ile kondansatörler bir rezonans devresi oluşturabilir. Eğer harmonik frekansı bu devrenin rezonans frekansına eşit olursa ısınma ve arızalar oluşur. Flüoresan lambaların kullanıldığı aydınlatma tertibatında yaşlanma etkileri görülür,
- Tristör kontrollü hız kontrol cihazlarında, tristörlerin tetiklenmesinde kapı devrelerinde gecikmeler, ateşleme anlarının değişmesi gibi etkiler,
- Başta motor olmak üzere diğer cihazlarda ek gürültü.

Bu bölümde, güç kalitesi sorunlarının elektrik makinaları üzerindeki etkileri incelenecektir.

5.1 Harmoniklerin Elektrik Makinaları Üzerindeki Etkileri

5.1.1 Transformatör Üzerindeki Etkiler

Transformatörler, temel frekansta gerekli gücü bağlı yüklere minimum kayıplarla iletmek için tasarlanmışlardır. Bir akımın veya gerilimin harmonik distorsiyonu transformatörlere aşırı bir ısınmaya yol açacaktır. Bu yüzden harmonikli bir devrede soğutması normalden daha güçlü bir transformatör kullanmak gerekebilir (Dugan vd., 1996; Bayram, 1997).

Yük akımının harmonik bileşenler içermesi durumunda transformatörün yükselen ısınmasına sebep olabilecek üç etki vardır:

- Efektif akım: Harmonik akımlar, transformatör efektif akımının kapasitesinden yüksek olmasına sebep olur. Artan toplam efektif akım yükselen iletken kayıplarına ve dolayısıyla verimin düşmesine yol açacaktır.
- Girdap akım kayıpları: Bu akımlar transformatörde magnetik akı sebebiyle endüklenen akımlardır. Bu endüklenen akımlar, transformatörün sargılarında, çekirdeğinde ve transformatörün magnetik alanıyla ilgili diğer iletken bölgelerinde dolaşırlar ve fazladan ısınmaya sebep olurlar. Bu kayıplar, girdap akımları sebebiyle frekansın karesi ile orantılıdır. Bu nedenle, bir transformatörde girdap akımlarının aşırı ısınma nedeniyle kayıpların artması ve verimin düşmesinde payı büyüktür.
- Çekirdek kayıpları: Harmoniklerin varlığında çekirdek kayıplarındaki artış, uygulanan gerilimdeki harmoniklerin etkisine ve trafo çekirdeğinin tasarımına bağlıdır. Gerilim distorsiyonunun artışı çekirdek plakalarındaki girdap akımlarını yükseltebilir. Çekirdekte

kullanılan metalin kalitesi ve çekirdek plakalarının kalınlığı çekirdek kayıplarını büyük ölçüde etkiler. Harmoniklerden dolayı çekirdek kayıplarındaki artış genellikle iki kayıp kadar büyük değildir.

Harmonik gerilim ve akımlarının oluşturduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Manyetik çekirdekdeki alternatif manyetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan, çekirdekdeki histerezis kayıpları artar. Ayrıca, zamanla değişen magnetik akı, iletkenleri kestikçe değişken magnetik alan çelik dilimlerinde girdap (eddy ve fuko) akımlarını oluşturur. Bu da ek kayıplara neden olur. Kısaca, frekans arttıkça transformatör kayıpları artar. Bu yüzden, transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonik bileşenler, düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir.

Diğer bir önemli sorun da, transformatörlerin dengesiz bir yükü beslemesidir. Yük akımı, doğru akım bileşeni içeriyorsa, transformatör manyetik devresinin doyması sonucu alternatif akım uyarma akımına ait tüm harmonik bileşenlerin seviyesi önemli ölçüde artacaktır (Arrilaga, 1985).

IEEE, transformatörün yük akımındaki harmonikler için bir limit saptamıştır. Buna göre, akım için THD sınırı % 5'tir. Gerilim için ise yük duruma göre bazı limitler saptamıştır. Bu sınır, yüksüz durumda % 10, anma yükünde % 5'tir.

Kısaca, harmonikler transformatörlere akım ve gerilim harmonikleri olmak üzere iki şekilde etki ederler.

Akım harmoniklerinin etkileri;

- Sargı bakır kayıplarında ($R.I^2$, ilave joule kayıpları) artışa,
- Çekirdek kaybının artmasına,
- Haberleşme sistemlerinde magnetik, bozucu etkiler yapması,

Gerilim harmoniklerinin etkileri de şunlardır;

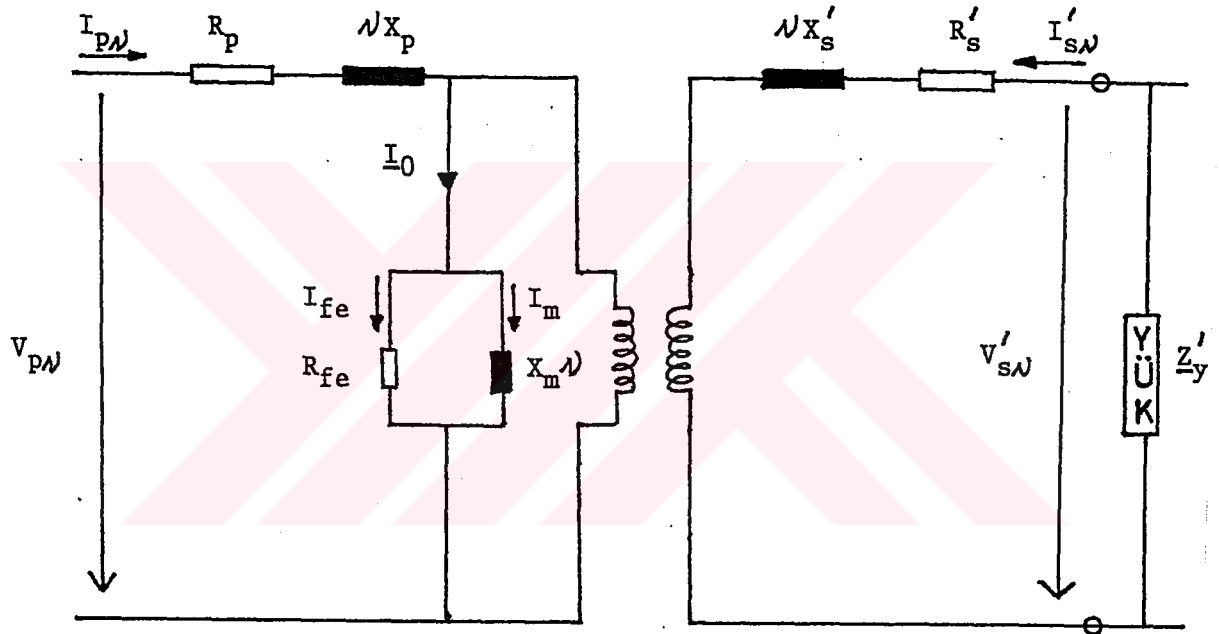
- Fuko ve histerezis akımlarından dolayı demir kayıplarında artışa,
- Dielektrik zorlanmanın artmasına,
- Yalıtımın zorlanması,

- Transformatör endüktansı ve transformatörlere bağlı bir tüketicinin kapasitansı arasında rezonans meydana getirebilir.

5.1.1.1 Transformatörlerin Harmonik Bağımlı Modeli

Sekonder tarafından sinusoidal olmayan akımların çekildiği transformatörlerde, hem primer hem de sekonder sargılarından harmonikler akar. Ayrıca uç gerilimleri, harmonik gerilim düşümlerinden ötürü harmonik bileşenler içerebilir.

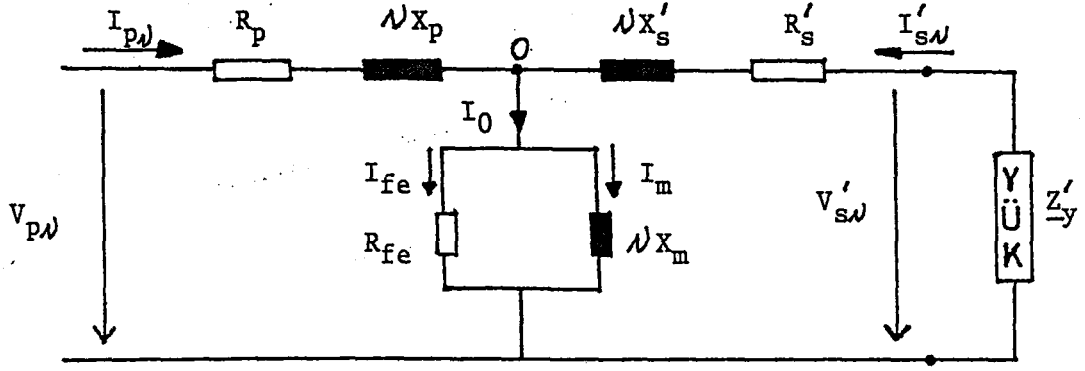
İdeal transformatörün primer ve sekonder sargılarında sarım sayıları ve endüklenen kaynak gerilimleri eşit olduğundan, eşdeğer devrenin her iki tarafı birbirine bağlanabilir.



Şekil 5.1 n. harmonik için ayrı kaçak akımlı eşdeğer devre

Şekil 5.1'de " p " indisi primeri ve " s " indisi sekonderi göstermektedir. R sargı direnci ve X kaçak reaktanstır. R_{fe} demir kayıplarına karşılık düşen direnç ve X_m mıknatıslanma reaktansıdır. " ' " ile primere indirgenmiş büyüklükler gösterilmiştir. (I_0 , boşa çalışma akımıdır).

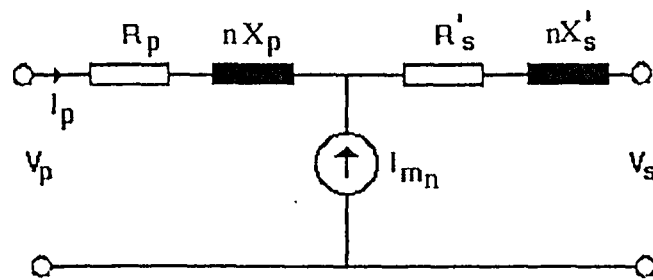
İdeal transformatörün kalkmasıyla transformatörün "T eşdeğer devresi" kullanılabilir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Transformatörün T eşdeğer devresi

Burada; R_p ve X_p primer sargı direncini ve reaktansını, R'_s ve X'_s primere indirgenmiş sekonder direnç ve reaktansını, R_{fe} demir direncini ve I_m mıknatıslanma akımını göstermektedir. Transformatörde mıknatıslama eğrisinin nonlineerliği nedeniyle doyma meydana gelir. Bu durumda mıknatıslama endüktansı (L_m) nonlineer bir eleman olarak davranır ve harmoniklere sebep olur.

Güç akış incelemeleri için eşdeğer devredeki R_{fe} , demir nüve kayıp direnci, nüve kayıp akımı I_d 'nin, mıknatıslama akımı I_m yanında çok küçük olması nedeniyle ihmal edilebilir. Mıknatıslama akımı, verilen bir endüklenmiş gerilim için sabit akım kaynağı ile modellenerek eşdeğer devre Şekil 5.3'teki gibi verilebilir. Burada harmonikli yük akışı analizine transformatör modelindeki mıknatıslama akımı da dahil edilmiştir.



Şekil 5.3 Transformatörün harmonik akım veren eşdeğeri

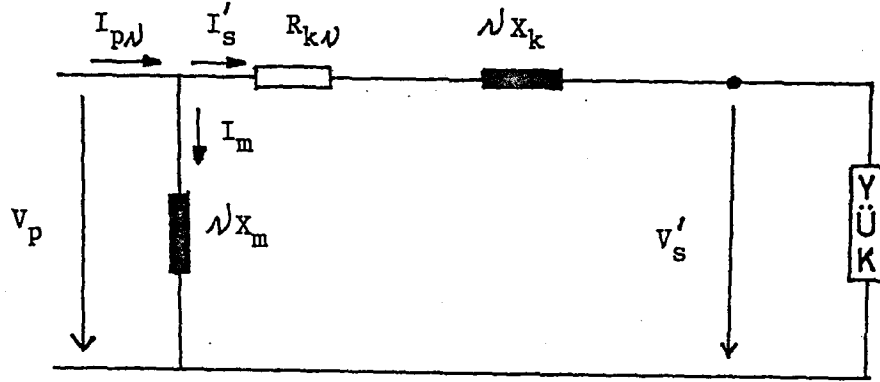
Akım bağıntısı,

$$(I_p)_n = (I_o)_n + (I_s)_n \quad (5.1)$$

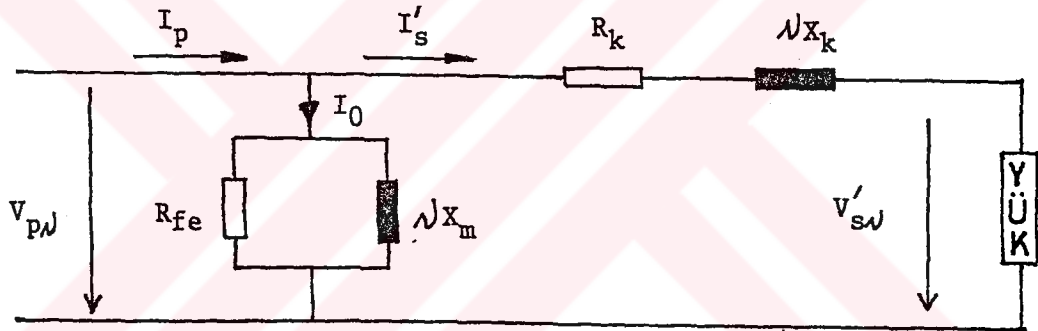
ve gerilim denklemi,

$$(V'_s)_n = (E)_n + (I_s)(R'_s) + J(n.X'_s)(I'_s)_n \quad (5.2)$$

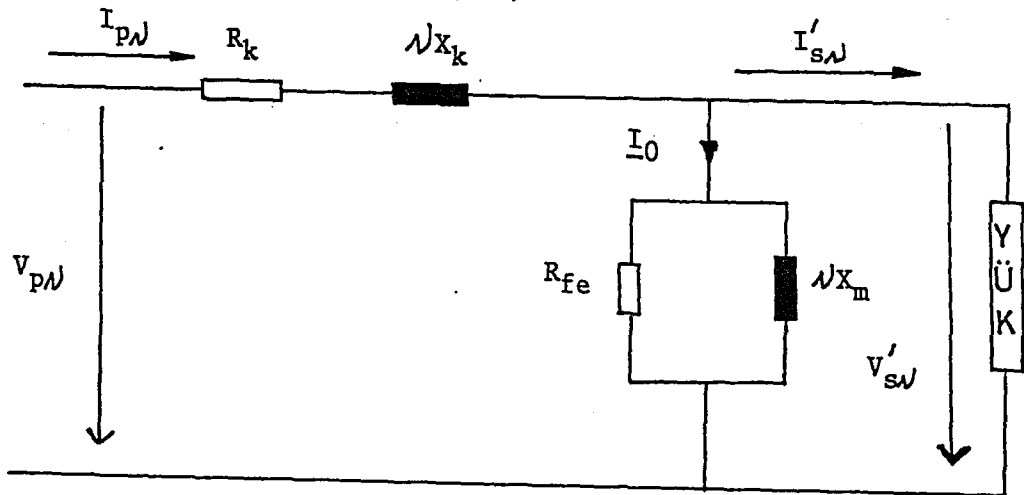
şeklinde yazılabilir.



Şekil 5.4 Demir kayıpsız transformator eşdeğer devresi



(a)



(b)

Şekil 5.5 (a) Boşta akım kolu girişte toplanmış L eşdeğer devre

(b) Boşta akım kolu çıkışta toplanmış L eşdeğer devre

T eşdeğer devrede demir kayıpları ihmal edilirse, boşta akım kolundaki demir kayıp direnci ortadan kalkar. T eşdeğer devrede boşta akım kolu giriş veya çıkış uçlarından birine kaydırılırsa, seri dirençler ve kaçak reaktanslar toplanabilir. (L eşdeğer devre elde edilir). T ve L eşdeğer devrede boşta akım kolu tamamen ihmal edilirse, paralel bağlı demir kayıp direnci ve esas reaktans ortadan kalkar. Böylece en basit devre elde edilir.

R_k ve X_k kısa devre büyüklükleri olup,

$$R_k = R_p + a^2 R'_s \quad (5.3)$$

$$X_k = X_p + a^2 X'_s \quad (5.4)$$

Düşey kolun tamamen ihmal edilmesi veya bu durumda sargı dirençlerinin ihmal edilmesi söz konusu olabilir. Transformatörün temel deneyleri (boşta çalışma ve kısa devre çalışma deneyleri) temel frekansa göre yapılarak sargı dirençleri ve reaktansları temel devre parametreleri hesap edilebilir. Bu işlemlerden sonra harmonik için eşdeğer devreler verilir.

5.1.1.2 Sinüsoidal Olmayan Yük Akımlarını Beslerken Transformatör Kapasitesini Belirlemekte Önerilen IEEE Uygulamaları

Bu uygulama, ANSI / IEEE C57.12.01-1979'da tanımlanan tüm güç transformatörlerine ve ANSI / IEEE C57.12.00-1987'de tanımlanan 50 MVA maksimum sınıflamalı güç transformatörlerine, 0,05 per uniti aşan harmonik faktöre sahip yük akımlarına uğradıklarında uygulanabilir. (Harmonik faktör, ANSI / IEEE C57.12.80-1978'de, tüm harmoniklerin efektif değerinin temel bileşen efektif değerine oranı olarak tanımlanır). ANSI / IEEE C57.12.00-1987 veya ANSI / IEEE C57.12.01-1979'da tanımlanmayan doğrultucu transformatörleri veya diğer özel amaçlı transformatörlere uygulanamaz.

Bilinen karakteristiklerdeki sinüsoidal olmayan yük akımlarını beslerken, normal ömür kabulü ve kayıpların olmadığı şartlar altında transformatör kapasitesini belirlemekte uygun yöntemlerin tanımlanması için genelde kullanılan iki yöntem vardır. İlk yöntem, transformatör sargılarındaki kayıp yoğunluğu dağılımı kullanımıyla tasarlanmıştır. İkinci yöntem daha az hatasızdır ve sadece transformatörün verilen test rapor verileri kullanımı üzerine kurulmuştur. İlk yöntemin öncelikle transformatör tasarım mühendisleri ve ikinci yönteminde öncelikle kullanıcılar tarafından kullanılması önerilir. Bu tavsiye edilen uygulama mevcut transformatörlere sinüsoidal olmayan yük akımlarının uygulanması ve sinüsoidal

olmayan yükleri besleyecek yeni transformatörleri belirlemenin fizibilitesini değerlendirirken uygulanabilir.

5.1.1.2.1 Kullanılan Kısaltmalar

F_h	h. harmonik için harmonik akım dağıtım faktörü (verilen herhangi yük seviyesinde akımın h. harmonik bileşeninin, akımın temel 60 Hz bileşenine bölümüne eşittir.)
h	Harmonik derecesi
I	Efektif yük akımı (amper)
$I(pu)$	Efektif yük akımı (nominal efektif yük akımının per unit değeri)
I_h	h harmoniğinde efektif akım (amper)
$I_h(pu)$	h harmoniğinde efektif akım (nominal efektif yük akımının per unit değeri)
I_{max}	Maksimum izin verilebilir efektif sinüsoidal olmayan yük akımı (amper)
$I_{max}(pu)$	Maksimum izin verilebilir efektif sinüsoidal olmayan yük akımı (nominal efektif yük akımının per unit değeri)
I_R	Nominal frekans ve yük koşulları altında efektif sine dalga akımı (amper)
I_{1-R}	Nominal frekans ve yük koşulları altında YG efektif sine dalga hat akımı (amper)
I_{2-R}	Nominal frekans ve yük koşulları altında AG efektif sine dalga hat akımı (amper)
P_{EC}	Sargı fuko akım kaybı (watt)
$P_{EC}(pu)$	Sargı fuko akım kaybı (nominal yük $I^2 R$ kaybın per unit değeri)
P_{EC-R}	Nominal koşullarda sargı fuko akım kaybı
$P_{EC-R}(pu)$	Nominal koşullarda sargı fuko akım kaybı (nominal $I^2 R$ kaybın per unit değeri)
P_{LL}	Yük kaybı (watt)
$P_{LL}(pu)$	Yük kayıp yoğunluğu (nominal yük $I^2 R$ kayıp yoğunluğunun per unit değeri)
P_{LL-R}	Nominal koşullarda yük kaybı

$P_{LL-R}(pu)$ Nominal koşullarda yük kaybı yoğunluğu (nominal yük I^2R kayıp yoğunluğunun per unit değeri)

P_{OSL} Diğer akı kaybı

$P_{OSL}(pu)$ Diğer akı kaybı (nominal yük I^2R kaybın per unit değeri)

P_{OSL-R} Nominal koşullarda diğer akı kaybı (watt)

$P_{OSL-R}(pu)$ Nominal koşullarda diğer akı kaybı (nominal yük I^2R kaybın per unit değeri)

R DC direnç (ohm)

R_1 İki YG terminali arasında ölçülen dc direnç

R_2 İki AG terminali arasında ölçülen dc direnç

5.1.1.2.2 Transformatör Kapasite Eşdeğeri

Bu önerilen uygulamadaki prosedürleri takip ederek transformatör kapasite eşdeğeri aşağıdaki varsayımlara dayanır;

- Yük akım harmonik faktör haricinde transformatör, ANSI / IEEE C57.12.00-1987 veya ANSI / IEEE C57.12.01-1979'da "Usual Service Conditions" (Genel Hizmet Koşulları) ile uygunluk içinde çalışacak şekilde kabul edilmiştir.
- Toplam yük kaybının, her bir sargıdaki yük kaybının ve en yüksek fuko akım kayıp bölgesindeki kayıp yoğunluğunun tam yükteki 60 Hz sine dalga tasarım koşullarını aşmaması şartıyla, transformatörün, herhangi bir harmonik içerikteki yük akımını besleme kapasitesinde olduğu varsayılır. Bunun dışında, en yüksek sargı fuko akım kayıp bölgesinde kayıp yoğunluğunun sınırlama koşulu olduğu varsayılır; bundan dolayı bu, kapasite eşdeğerini belirlemek için, kullanılan temeldir.

5.1.1.2.3 Önerilen Prosedürler

1. Temel Veri: Bu bölümde hesaplamaları yerine getirmek için, sinüsoidal olmayan yük akımının karakteristikleri, temel frekans bileşeni ve güç sistem ölçümlerinin her bir harmonik frekans bileşeninin tepe değeri cinsinden ifade edilmelidir. Ek olarak, sargı fuko akım kayıp yoğunluğunun tepe değeri üreticilerden veya toplam yük kaybı ve I^2R kaybı test kayıtlarından alınabilmelidir.

2. Per Unit Kayıplar: Yük kayıpları; I^2R , sargı fuko akımı ve kaçak akı kayıplarını içerir. Harmonik yük koşulları altında en önemli konu sargıların aşırı ısınması olduğundan, sargılardaki kayıp yoğunluğunu per unit temelinde göz önünde bulundurmak uygundur. Yük kayıpları üzerinde harmonik etkileri ve yükselen yük kayıplarının ne şekilde hesaplanacağı ANSİ / IEEE C57.110 (1986) standardında, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents başlığıyla belirtilmiştir. Bu standartta toplam yük kaybı,

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} \quad (5.5)$$

ile gösterilmiştir. Nominal yük koşullarına uygulanan denklem (5.5), per unit temelinde aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (5.6)$$

Harmonikler fuko akım kayıplarını artırır. Fuko akım kayıpları yük akımının harmonik frekansının karesiyle orantılıdır. Bu kayıplar, büyük derecede yük akımları var olduğunda, aşırı sargı kayıpları ve ısınmasına sebep olabilir. Fuko akım kayıpları transformatör nüvesi dışındaki kaçak magnetik akı tarafından üretilen fuko akımlarıyla meydana gelirler. Fuko akımları yük akımlarına dik akarlar. Harmoniklerin oluşturduğu yükselen akı yoğunluğu daha fazla kaçak magnetik akıya ve fuko akım kayıplarına sebep olur. Transformatör sargısı veya bir bölümü için nominal koşullarda, fuko akım kaybı (P_{EC-R}) verildiğinde, herhangi belirli sinüsoidal olmayan yük akımından dolayı fuko akım kaybı şu şekilde ifade edilebilir;

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \text{ watt} \quad (5.7)$$

(5.7) ayrıca per unit formunda yazılabilir;

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(pu)^2 h^2 \quad (5.8)$$

Diğer akı kaybı veya fuko akım kaybı ile diğer akı kaybı toplamı aynı usulle verilen nonsinüsoidal yük akım için hesaplanabilir.

Harmonikler toplam akımı (I) yükselterek I^2R kayıplarını artırır. Bu, harmonik akımların 60 Hz'lik temel akıma eklenmesi sebebiyledir. Nominal yükte (I^2R) kaybı tanıma göre

“1 per unit “ değerindedir, ancak nonsinüsoidal akım 1 per unitten farklı bir değer alırsa nonsinüsoidal yük akımları için bu (I^2R) kaybı değişebilir. Yük akımının efektif değeri,

$$I = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h)^2 \right]^{1/2} \text{ amper} \quad (5.9)$$

ile verilebilir. Per unit formunda bu denklem,

$$I(pu) = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h(pu))^2 \right]^{1/2} \quad (5.10)$$

olur.

ANSI / IEEE C57.110 (1986) standardında belirtilen yük kayıpları üzerinde harmoniklerin etkilerine ek olarak, deri etkisinden dolayı kayıplarda yükselme meydana gelir. Normalde, transformatör iletkeni 60 Hz akım taşıdığından, akım iletkenin içine sınırlanır. Bu harmoniklerin yükselen frekanslı durumu değildir. Bunun yerine, harmoniklerin yükselen frekansı iletken yüzeyinde akım akmasına sebep olur. Bu, iletkenin yüzeyindeki direncin iletken içerisindeki dirençten daha büyük olmasıdır. Bundan dolayı, deri etkisi sebebiyle iletken yüzeyinden daha fazla akım akmasıyla, iletken direnç kayıpları ve ısınma artar. Deri etkisinden kaynaklanan kayıplar genellikle nötr iletkeninden akan üçüncü harmonik (180 Hz) sebebiyle meydana gelir.

3. Tasarım Fuko-Akım Kayıp Eğrisini Kullanarak Transformatör Kapasite Eşdeğerinin Hesaplanması. En yüksek kayıp yoğunluğu bölgesinde per unit fuko-akım kaybı, nominal akımda 60 Hz işletme için transformatör üreticisi tarafından (5.6) ifadesinde, sıfıra eşit $P_{OSL-R}(pu)$ ile tanımlanabilir.

En yüksek fuko akım kaybı bölgesinde per unit kayıp yoğunluğu denklem (5.6), (5.8) ve (5.10)'u birleştirerek nonsinüsoidal yük akımı için yeniden hesaplanabilir. Kaçak akı kayıpları ihmal edilirse, harmonik akım durumunda, per unit toplam kayıp yoğunluğu aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$P_{LL}(pu) = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(pu)^2 + P_{EC-R}(pu) \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(pu)^2 h^2 \quad (5.11)$$

(5.11) hesaplamasının sonucunu, 60 Hz için en yüksek kayıp bölgesinde kayıp yoğunluğunun tasarım değerine eşit yapan nonsinüsoidal yük akımının per unit değeri (5.12) ile verilmiştir.

$$I_{\max}(pu) = \left[\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + \left[\left(\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_h^2 \cdot h^2 \right) / \left(\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_h^2 \right) \cdot P_{EC-R}(pu) \right]} \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

3.1. Örnek: Verilen 1 pu efektif tepe değerinde nonsinüsoidal yük akımı ve aşağıdaki harmonik dağılım için, 1200 A nominal tam yük akımına sahip ve nominal koşullar altında (P_{EC-R}) maksimum kayıp yoğunluğu noktasında sargı fuko akım kaybı yerel I^2R kaybının % 15'i olan ANSI / IEEE C57.12.01-1979 transformatöründen sürekli çekilebilecek maksimum yük akımını belirleyin.

h	$I_h(pu)$
1	0,978
5	0,171
7	0,108
11	0,044
13	0,028
17	0,015
19	0,0098

Nominal koşullar altında maksimum per unit kayıp yoğunluğu, 1,15 pu olur. Denklem (5.11) $I_h(pu)^2, h^2$ ve $I_h(pu)^2 h^2$ değerlerini gerektirir. (5.12) ayrıca f_h, f_h^2 ve $f_h \cdot f_h^2$ değerlerini gerektirir. Bu değerler aşağıdaki şekilde hesaplanır ve tablo şekline getirilir;

h	$I_h(pu)$	$I_h(pu)^2$	h^2	$I_h(pu)^2 h^2$	f_h	f_h^2	$f_h^2 h^2$
1	0,978	0,957	1	0,957	1,000	1,0000	1,0000
5	0,171	0,029	25	0,731	0,175	0,0306	0,7643
7	0,108	0,012	49	0,571	0,110	0,0122	0,5975
11	0,044	0,002	121	0,234	0,045	0,0020	0,2449
13	0,028	0,00078	169	0,133	0,029	0,0008	0,1385
17	0,015	0,00023	289	0,065	0,015	0,0002	0,0680
19	0,0098	0,00010	361	0,035	0,010	0,0001	0,0362
Σ		1,00		2,726		1,0459	2,8494

Denklem (5.11)'den nonsinüsoidal yük akımı için yerel kayıp yoğunluğu,

$$P_{LL}(pu) = 1,00 + 0,15 \cdot 2,726 = 1,4089 \text{ pu}$$

ve verilen harmonik bileşimi ile maksimum izin verilebilir nonsinüsoidal yük akımı, denklem (5.12)'den,

$$I_{\max} = \left[\frac{1,15}{1 + \frac{2,8494}{1,0459} \cdot 0,15} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,9035$$

veya

$$I_{\max} = 0,9035 \cdot 1200 = 1084 \text{ amper}$$

olur. Böylece, verilen nonsinüsoidal yük akımı harmonik bileşimi için, transformatör kapasitesi sinüsoidal yük akım kapasitesinin % 90'ı civarındadır.

4. Onaylanmış Testlerden Alınan Verileri Kullanarak Transformatör Kapasite Eşdeğerinin Hesaplanması. Bu sınırlı verilere göre hesaplama yapmak için, tutarlı olduğu düşünülen bazı varsayımlar yapılır. Bu varsayımlar özel bir transformatör için üreticilerin rehberliğinde düzenlenebilir.

1. Onaylanmış test raporu ANSI / IEEE C57.12.90-1987 veya ANSI / IEEE C57.12.91-1979'da eklerde tam bir listelenmiş veriyi içerir.
2. Tüm akı kaybı sargı fuko akım kaybı olarak düşünülebilir.
3. I^2R kaybının her bir sargıda düzgün bir şekilde dağıldığı düşünülebilir.
4. Sargılar arasında fuko akım kayıp bölümünün aşağıdaki gibi olduğu varsayılır;
 - a) 1000A'den daha az maksimum bir akım sınıflamasına sahip tüm transformatörler için iç sargılarda % 60 ve dış sargılarda % 40 (dönüştürme oranı ne olursa olsun) olur.
 - b) 4:1 veya daha küçük dönüştürme oranına sahip tüm transformatörler için iç sargılarda % 60, dış sargılarda % 40 olur.
 - c) 4:1'den daha büyük dönüştürme oranı ve ayrıca 1000 A'den büyük maksimum akım sınıflamalı bir veya daha fazla sargıya sahip tüm transformatörler için iç sargıda % 70 ve dış sargıda % 30 olur.
5. Herbir sargının içinde fuko akım kayıp dağıtımının düzgün olmadığı varsayılır. Maksimum fuko akım kayıp yoğunluğunun % 400'e ulaşabildiği varsayılır.

4.1. Hesaplamalar. ANSI / IEEE C57.12.90-1987 ve ANSI / IEEE C57.12.91-1979, test kodlarında belirtildiği gibi, yük kaybının akı kaybı bileşeni transformatörün I^2R kaybını, ölçülen yük kaybı değerinden çıkararak hesaplanır. Bu varsayımla (2), tüm akı kaybı sargı fuko kaybı olarak alınır. Bundan dolayı,

$$P_{EC-R} = P_{LL} - K[(I_{1-R})^2 R_1 + (I_{2-R})^2 R_2] \text{ watt} \quad (5.13)$$

olur. Burada, K , tek fazlı transformatörler için 1, üç fazlı transformatörler için 1,5'tir (ANSI / IEEE C57.12.91-1979, 9.2.5.1).

Birçok üç fazlı transformatör test raporunda seri halindeki üç fazın direnci gösterilmiştir. Bu durumda R_1 ve R_2 aşağıdaki şekilde hesaplanır;

Üçgen sargı: R_1 veya $R_2 = \text{Üç faz direncinin } 2/9\text{'u}$

Yıldız sargı: R_1 veya $R_2 = \text{Üç faz direncinin } 2/3\text{'ü}$

Alçak gerilim (içteki) sargı fuko akım kaybı, denklem (5.13)'ten elde edilen P_{EC-R} değerinden transformatörün dönüştürme oranı ve akım sınıflamasına bağlı olarak 0,6 P_{EC-R} veya 0,7 P_{EC-R} olarak hesaplanır. Alçak gerilim sargısının I^2R kaybının per unit değerinde bu sargının fuko akım kaybı,

$$P_{EC-R}(pu) = \frac{0,6 \cdot P_{EC-R} \text{ watt}}{K \cdot (I_{2-R})^2 \cdot R_2 \text{ watt}} pu \quad (5.14)$$

veya

$$P_{EC-R}(pu) = \frac{0,7 \cdot P_{EC-R} \text{ watt}}{K \cdot (I_{2-R})^2 \cdot R_2 \text{ watt}} pu \quad (5.15)$$

olacaktır.

(3) varsayımıyla birlikte yukarıdaki I^2R kaybın sargı içerisinde düzgün dağıldığı düşünülebilir, ve (5) varsayımıyla maksimum fuko akım kayıp yoğunluğunun ortalama değerin % 400 olduğu varsayılır;

$$\text{Maks. } P_{EC-R}(pu) = \frac{2,4 \cdot P_{EC-R} \text{ watt}}{K \cdot (I_{2-R})^2 \cdot R_2 \text{ watt}} pu \quad (5.16)$$

veya

$$Maks. P_{EC-R}(pu) = \frac{2,8 \cdot P_{EC-R} watt}{K \cdot (I_{2-R})^2 \cdot R_2 watt} pu \quad (5.17)$$

4.2. Örnek. Aşağıdaki harmonik dağıtımına sahip, verilen bir nonsinusoidal yük akımı için:

Onaylanmış test raporlarından alınmış aşağıdaki karakteristiklere sahip bir ANSI / IEEE C57.12.01-1979 transformatöründen (standart koşullar altında) sürekli çekilen maksimum yük akımını belirleyin.

h	$I_h (pu)$
1	1,0
5	0,175
7	0,110
11	0,045
13	0,029
17	0,015
19	0,010

- Yüksek gerilim sargısı;

12 000 Volt, üçgen,

Direnç, 3,8150 ohm @ 170 °C.

- Alçak Gerilim Sargısı,

480 Volt, üçgen,

Direnç, 0,00411 ohm @ 170 °C.

- Nominal Kapasite,

2500 kVA, 3 fazlı, 150 °C yükselme,

Tip AA.

- 170 °C'de Yük Kayıpları, 31 232 watt.

(Dirençler, üç fazın seri olarak toplamıdır).

R_1 ve R_2 için değerler 4.1'deki açıklama kullanılarak belirlenebilir;

$$R_1 = 0,84778 \text{ ohm}$$

$$R_2 = 0,0009133 \text{ ohm}$$

kVA ve gerilim sınıfından hesaplanan I_{1-R} ve I_{2-R} aşağıdaki şekildedir;

$$I_{1-R}=120,28 \text{ amper} \quad I_{2-R}=3007 \text{ amper}$$

P_{EC-R} denklem (5.13) yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} P_{EC-R} &= 31232 - 1,5[(120,28)^2 \cdot (0,84778) + (3007)^2 \cdot (0,0009133)] \\ &= 31232 - 1,5[12264,7 + 8258,6] \\ &= 31232 - 30785 = 447 \text{ watt} \end{aligned}$$

Transformatör dönüştürme oranının 4:1'i aşmasıyla, sekonder akım 1000 amperi aşar, alçak-gerilim sargı fuko akım kaybı P_{EC-R} ve $Maks P_{EC-R}$ 'nin 0,7 katıdır ve denklem (5.17)'den şu şekilde hesaplanır;

$$Maks. P_{EC-R} = \frac{2,8 \cdot 447}{1,5 \cdot 8258,6} = 0,101 \text{ pu}$$

Bir önceki örnekte olduğu gibi, denklem (5.11)'deki $P_{LL}(pu)$ 'nin hesaplanması için $I_h(pu)^2, h^2$ ve $I_h(pu)^2 h^2$ değerleri gereklidir. Bunlar aşağıdaki gibi hesaplanır ve tablo haline getirilir. (Bu durumda $f_h = I_h(pu)$, denklem (5.12) için faktörlerin hesaplanması basitleştirilir).

h	f_h $I_h(pu)$	f_h^2 $I_h(pu)^2$	h^2	$f_h^2 h^2$ $I_h(pu)^2 h^2$
1	1,000	1,000	1	1,0000
5	0,175	0,0306	25	0,765
7	0,110	0,0121	49	0,593
11	0,045	0,002025	121	0,245
13	0,029	0,000841	169	0,142
17	0,015	0,000225	289	0,065
19	0,010	0,000010	361	0,036
		1,045826		2,846

Üçüncü sütun toplamını denklem (5.10)'a uygulamak 1,023 pu efektif değerinde bir nonsinüsoidal yük akımı verir. Denklem (5.11)'den en yüksek fuko akım kaybı bölgesinde nonsinüsoidal yük akımı tarafından üretilen yerel kayıp yoğunluğu;

$$P_{LL}(pu) = 1,0458 + 0,101 \cdot 1,333 \text{ pu}$$

olur. Böylece, verilen harmonik bileşim ile yük akımının efektif değeri, denklem (5.12)'den;

$$I_{\max}(pu) = \left[\frac{1,101}{1 + \frac{2,846}{1,0458} \cdot 0,101} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,9293$$

veya

$$I_{\max} = 0,9293 \cdot 3007 = 2794 \text{ amper}$$

olur. Bu durumda nonsinüsoidal yük akımı harmonik bileşeni ile transformatör kapasitesi sinüsoidal yük akımı kapasitesinin % 93'ü civarındadır.

5.1.1.3 K-Faktör Transformatörleri

Harmoniklerin transformatörler üzerindeki problemlerine çözüm olarak ortaya çıkmışlardır. K-faktör olmayan transformatörlerden daha verimli değillerdir. Transformatörlerdeki harmonikler yükselen kayıplara ve ısınmaya neden olur. Isınma yalıtımı bozar ve sonuç olarak transformatörde hataya sebep olur. Mikroişlemcilerin ve ayarlanabilir-hız sürücülerini gibi lineer olmayan cihazların kullanımının artmasıyla birlikte, harmonikler yükselen bir problem olmuştur. Bu harmonikler filtre kullanımıyla yok edilebilir veya özel tasarlanmış K-faktör transformatörleri ile taşınabilirler (Kennedy, 1997).

K-faktör değeri, özel olarak tasarlanmış K faktör transformatörünün seçilmesinde veya K-faktör olmayan transformatörün tekrar değerlendirilmesinde kullanılabilir. K-faktör değerini hesaplamadaki basamaklar bu bölümde örneklerle incelenecektir. Böylece, transformatör kullanıcısı standart bir transformatörü yeniden değerlendirmek veya özel bir şekilde tasarlanmış K-faktör transformatörünü satın almak arasında karar verebilir. Eğer bir K-faktör transformatörü satın alınırsa, K-faktörü, transformatörün K-faktör sınıfını belirler. K-faktör transformatörü, harmoniklerin neden olduğu ek kayıp ve ısıyı taşımak için tasarlanmışlardır. United Laboratories (UL) Standarts 1561, Kuru Tip Genel Amaç ve Güç Transformatörleri (Dry Type General Purpose and Power Transformers), ve 1562, Transformatörler, Dağıtım, Kuru Tip 600 Volt Üzeri (Transformers, Distribution, Dry-Type-Over 600 Volts), K-faktör olmayan transformatörlerin kullanımını % 5'ten daha az harmonik içeriğe sahip yüklerle sınırlamıştır. UL, K-faktör sınıflaması için 1, 4, 9, 13, 20, 30, 40 ve 50'lik bir standart sağlar.

5.1.1.3.1 K Faktörü

K faktörü, harmoniklerin transformatör yük ve kayıpları üzerindeki etkisini hesaba katmak için geliştirilmiş bir katsayıdır. K faktör, ANSI / IEEE C57.110 (1986) standardında tanımlanmıştır. Bununla birlikte, ANSI / IEEE C57.110 (1986), K faktör değerini tanımlamak için temel olan belirli bir harmonik yükteki kayıplar ve akımları hesaplamakta yöntemler sağlar.

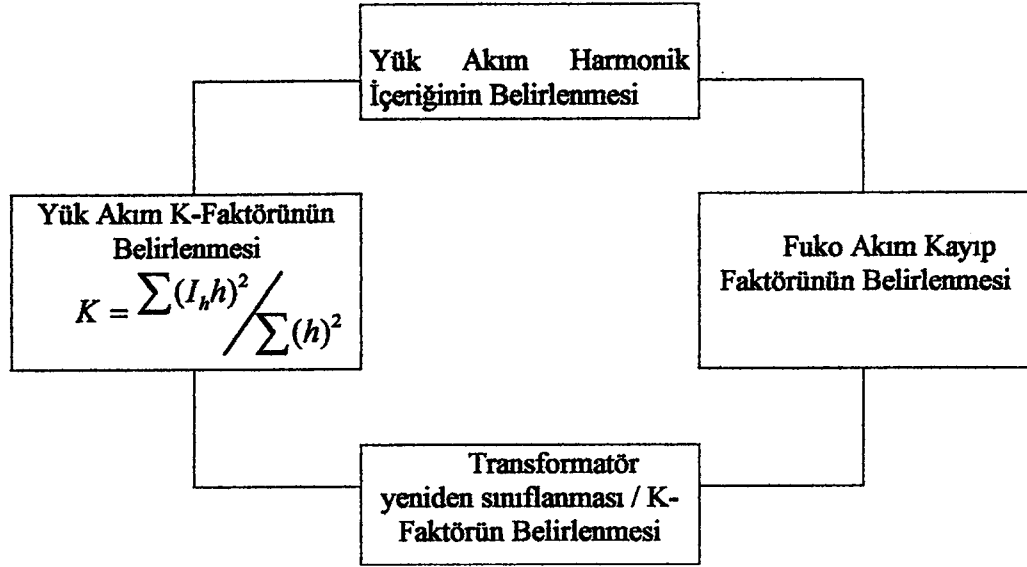
K faktör sınıflamasının amacı transformatörleri harmoniklere göre değerlendirmek, deri etkisi kayıplarını azaltmak, ve nüvenin doyma olasılığını yok etmektir. K faktör sınıflandırılmalı transformatörler, plakalarının üzerinde belirli bir K faktörlü nonsinüsoidal akım yüküne göre tasarlandıklarını gösteren kayıtları vardır. K faktör, fuko akım kayıplarının harmonik akım karesine bölünmesi olarak ifade edilebilir ve şu şekilde gösterilebilir.

$$K = \frac{\sum (I_h \cdot h)^2}{\sum (h)^2} \quad (5.18)$$

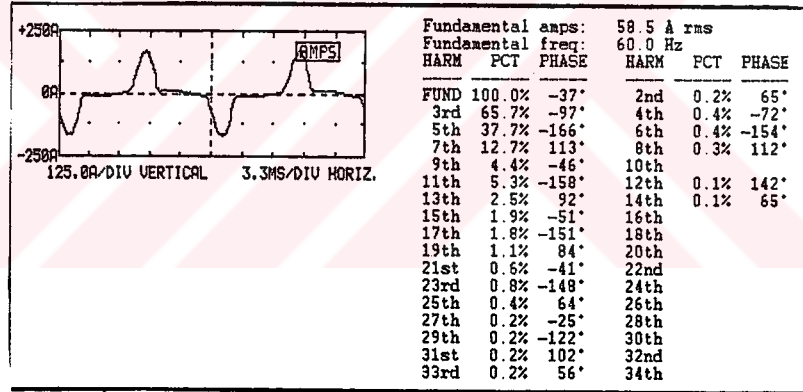
Bu formülden görüldüğü gibi, K faktörü, her bir harmonik akımın ve harmonik derecesinin kareleri çarpımlarının toplamını, harmonik derecelerinin kareleri toplamına bölerek bulunabileceği görülür. Bu toplam, harmoniklerden kaynaklanan yükselmiş fuko akım kayıplarını elde etmek için nominal fuko akım kayıpları ile çarpılır.

Bir transformatörün K faktörünü hesaplamadaki basamaklar Şekil 5.6'daki akış diyagramında gösterilmiştir. Bu akış diyagramı, standart bir transformatörü yeniden değerlendirmek veya K faktör transformatörünün K sınıflamasını belirlemekte kullanılacak K faktörü tanımlamakta adım adım bir yaklaşım sunar. Temel olarak bir transformatörü yeniden sınıflamak için dört basamak vardır (Kennedy, 1997).

Basamak 1: Harmoniklerin derecesini ve toplam yük akımının benzer yüzde harmonik içeriğini belirleyebilmek gereklidir. Bu gerçek harmonik ölçümlerden veya çeşitli harmonik yüklerin dalga şekillerinden tanımlanabilir. Dalga şekilleri ve bu dalga şekillerinin harmonik içerikleri Şekil 5.7'den Şekil 5.10'a kadar çeşitli harmonik yükler için gösterilmiştir. Bu harmonik yükler anahtarlamalı güç kaynak yükü, flüoresan lamba yükü, AA ayarlanabilir-hız sürücüler, ve DA sürücüyü içerir. Transformatör empedansı yük akımının dalga şekli ve harmonik bileşenini etkileyebilir. Bunun sebebi transformatör empedansının harmonik bileşeni düşürmek için endüktans olarak davranmasıdır.

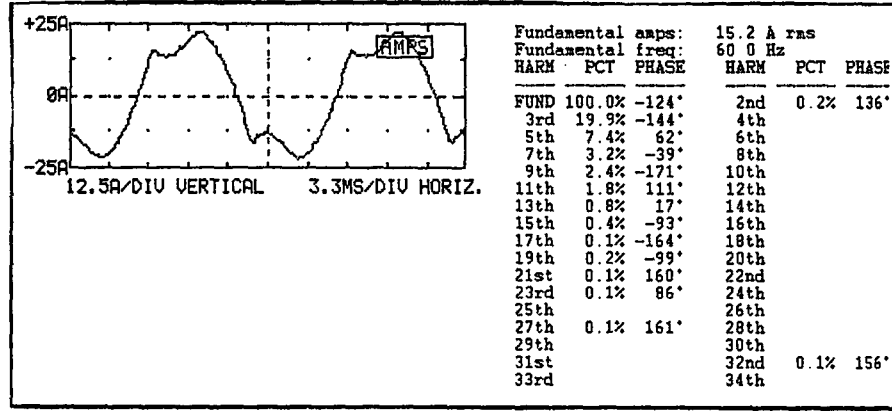


Şekil 5.6 K faktör hesaplanması ve transformatörün yeniden sınıflandırılması akış diyagramı

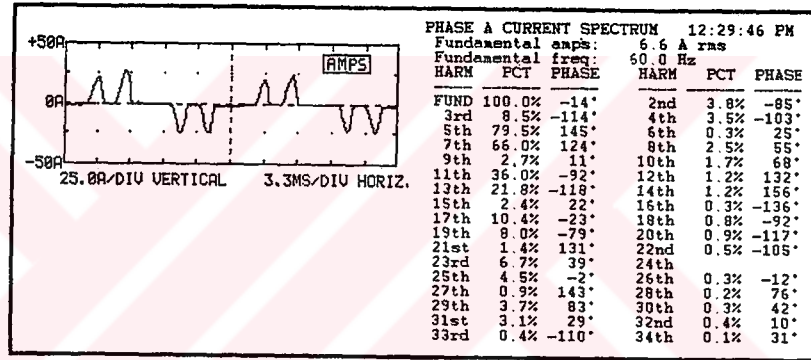


Şekil 5.7 Anahtarlama güç kaynağı yükü için akım dalga şekli ve spektrumu

Basamak 2: K faktörü denklem (5.18)'i kullanarak herbir harmonik için harmonik akımının karesi ve harmonik derecesinin karesi çarpımlarını toplayarak ve bu toplamı harmonik akım karelerinin toplamına bölerek hesaplanır. Çizelge 5.1'de verilen değer tablosu çeşitli harmonik koşullar için K faktör hesaplamasını kolaylaştırır. (Herbir durum için boş değerler doldurulmalıdır). Bu tablo bilgisayar tabloları programı kullanılarak kolayca kurulabilir. Akım, I_h , h harmonik derecesinde yük akımının per-unit derecesindedir.



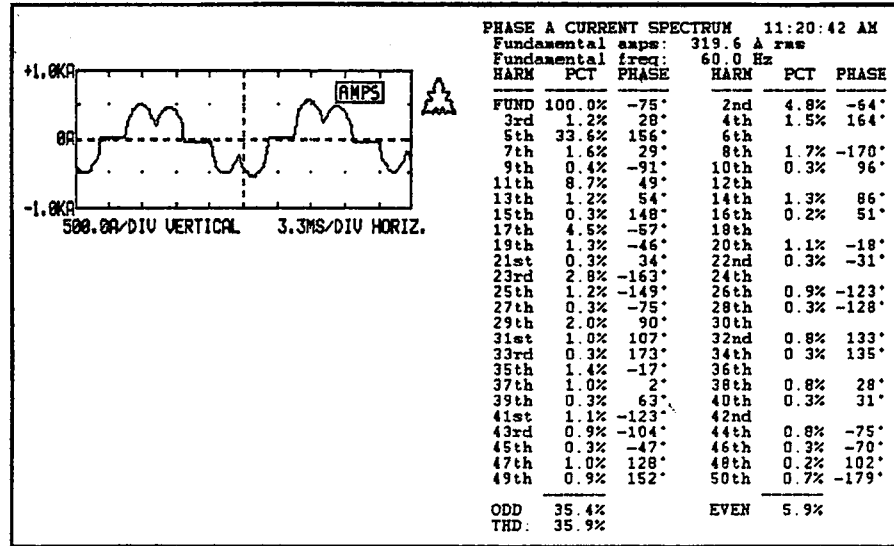
Şekil 5.8 Flüoresan aydınlatma yükü için akım dalga şekli ve spektrumu



Şekil 5.9 AC ayarlanabilir-hız sürücüsüne ait akım dalga şekli ve spektrumu

Basamak 3: Transformatörün fuko akım kayıp faktörü hesaplanır. Transformatör tasarımcısı, transformatör test verileri, ve C57.110'da belirtilen yöntemle, veya transformatör tip ve boyutuna bağlı tipik değerlerden elde edilebilir. Çizelge 5.2, D. E. Rice'in 1984'te yayınladığı "Adjustable-Speed Drive and Power Rectifier Harmonics: Their Effects on Power System Components" başlıklı IEEE makalesinden elde edilebilir.

Basamak 4: Transformatör tekrar sınıflaması, basamak 3'te hesaplanan fuko akım kayıp faktörü ve basamak 2'de hesaplanan yük akımı K faktörü kullanılarak maksimum akımın hesaplanmasıyla belirlenir. Maksimum akım aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir.



Şekil 5.10 DC sürücü yüküne ait akım dalga şekli ve spektrumu

Çizelge 5.1 K-faktör Hesaplaması

Harmonik derecesi h	Frekans f (Hz)	Akım I (pu)	$I^2(\text{pu})$	$I^2 \cdot h^2$
1	60			
3	180			
5	300			
7	420			
9	540			
11	660			
13	780			
15	900			
17	1020			
19	1140			
21	1260			
23	1380			
25	1500			

Çizelge 5.2 Transformatör yeniden sınıflama hesaplamalarında kullanılacak tipik P_{Ec-R} değerleri

Tip	kVA	Gerilim	Yüzde P_{Ec-R}
Kuru	≤1000	480 -V YG	3-8
	≥1500	5-kV YG	12-20
	≥1500	15-kV YG	9-15
Yağlı	≤1000	480 -V AG	1
	2500-5000		1-5
	>5000		9-15

$$I_{\max} = \sqrt{\sum I_h^2} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \cdot P_{EC-R}}} \quad (5.19)$$

Örnek: Ticari bir müşteri 200 PC'ye sahip bir bina katına sahiptir. Toplam yük 100 kW civarındadır. Bu yük 150 kVA'lık tek bir transformatörden beslenmektedir. K faktör ve transformatör yeni sınıfı nedir?

Bu örneğe bir çözüm bulmanın ilk basamağı PC yükleri için harmonik içeriği Şekil 5.7'ye göre belirlemektir. Bir sonraki aşama bu rakamları Çizelge 5.3'te gösterildiği gibi Çizelge 5.1'e doldurularak K-faktör değerinin hesaplanmasıdır. Sonuç olarak, maksimum akım Çizelge 5.2'den fuko akım kayıp faktörünün (P_{EC-R}) % 8 olduğu belirlenmesinden sonra hesaplanır.

$$I_{\max} = \sqrt{\sum I_h^2} = \sqrt{\frac{1 + 0,08}{1 + (6,3 \cdot 0,08)}} = 0,85$$

Bundan dolayı, transformatör % 85 veya 127,5 kVA'ya tekrar sınıflanır veya 7 K sınıflamalı bir K-faktör transformatörü kullanılmalıdır.

Çizelge 5.3 K-faktör örneği

Harmonik h	Akım %	Frekans f (Hz)	Akım (pu)	I^2	$I^2 \cdot h^2$
1	100,00	60	1	1	1
3	65,70	180	0,657	0,431649	3,884841
5	37,70	300	0,377	0,142129	3,553225
7	12,70	420	0,127	0,016129	0,790321
9	4,40	540	0,044	0,001936	0,156816
11	5,30	660	0,053	0,002809	0,339889
13	2,50	780	0,025	0,000625	0,105625
15	1,90	900	0,019	0,000361	0,081225
17	1,80	1020	0,018	0,000324	0,093636
19	1,10	1140	0,011	0,000121	0,043681
21	0,60	1260	0,006	0,000036	0,015876
23	0,80	1380	0,008	0,000064	0,033856
25	0,40	1500	0,004	0,000016	0,01
Toplam				1,5961999	10,108991
K-faktör				6,333165	

Bir K faktör transformatörü harmonik akımların ekstra ısınmasını yönetmesine izin veren bazı özelliklere sahip özel olarak tasarlanmış bir transformatördür. Harmoniklerin meydana getirdiği elektrostatik gürültüyü azaltmak için yüksek ve alçak gerilim sargıları arasında statik bir kalkan görevi yapabilir. Deri etkisi ve fuko akım kayıpların azaltmak için herbiri ayrı ayrı

yalıtılmış olan iletkenlerin daha küçük boyuttakileri kullanılabilir. Nüve tabakaları nüvedeki fuko akımlarını azaltmak için ayrı ayrı yalıtılmış olabilir. Özel çelikli daha geniş bir nüve, histerezis kayıplarını azaltmak için ve bozulmuş gerilim dalga şekli üzerindeki yüksek piklerden dolayı transformatörün doyması olasılığını azaltmak için gerekli olabilir. Özel çelik, değişken magnetik alanlara daha az direnç gösterir.

Daha büyük bir nüve çeliğin alanını arttırır ve böylece değişken magnetik alanlara akı yoğunluğu ve direnci düşürür. Akı yoğunluğunu azaltmanın diğer bir yolu sargıdaki dönüştürme oranını arttırmaktır. Yükselen I^2R kayıplarının sebep olduğu ısınma, daha büyük kesitler kullanımıyla iletken direncini azaltarak düşürebilir. Genellikle, soğutma kanalları harmoniklerin artan ısınma etkilerini azaltmak için sargılara eklenir. Fuko akım kayıpları iletkenin büyüklüğünü düşürerek ve akı yoğunluğunu azaltarak düşürülebilir.

Bir K faktör transformatörü normal standart transformatörün hemen hemen iki katı maliyetindedir ve ağırlığı standart transformatörün % 115'i kadardır. Standart bir transformatörü tekrar sınıflama yerine kullanılması önerilir bir durumdur. Bunun sebebi yeniden sınıflanmış bir transformatörün aşırı ısınma ve transformatör ömründe azalmaya sebep olabilecek faktörler içermesidir.

Belirli bir yükün K faktörünü belirlemekte bazı önerilen düşünceler vardır. Bunlar,

- K-faktör sistem ölçümlerine dayanır. Ölçümler mümkün olmadığında, gerçekçi bir K faktörü belirlemek zorlaşır.
- Tek fazlı harmonik kaynaklar aynı frekansta diğer akımlarla aynı fazda olmayan harmonik akımları sisteme enjekte edebilir. Bu, o frekansta toplam harmonik akımda bazı hatalara sebep olur.
- Harmonik hatalardan dolayı, ayrı bir yükün K faktörü 30'a ulaşabilmesine rağmen, bu tipte yüklerin birkaçına bağlı devre için K-faktörü nadiren 9'u aşar.
- Transformatör kayıpları akımın frekansı ile yükselir; bundan dolayı, yüksek-frekans harmonik bileşenleri transformatör ısınmasına sebep olmakta alçak frekans elemanlarına göre daha önemlidir.

Sonuç olarak, K-faktör transformatörlerini belirlerken, düşüncenin aşağıdaki gereklere verilmesi önerilir;

- Transformatör K-faktör sınıflamaları beslenen yük ve devrenin K-faktörüyle eşleşmelidir.

- Transformatör üreticileri her olası K-faktör sınıfına göre transformatör üretmezler. İmalatçılar normal olarak, K-faktör sınıflı transformatörleri standartlaştırırlar.
- Transformatör K-faktör sınıfı, transformatörün beslediği yük veya devrenin K-faktörüne eşit veya daha büyük olmalıdır.
- K-faktör sınıflı transformatörler K-faktör-sınıflı olmayan transformatörlerden daha düşük empedansa sahiptirler.
- K-faktör transformatörün çoğu uygulaması için, 13 gibi bir K-faktör sınıfı veya daha düşüğü uygundur.
- Transformatör K-faktör sınıfları UL Standarts 1561 ve 1562'ye dayanır (Kennedy, 1997).

5.1.2 Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler

Motorlar harmonik gerilim bozulmasından önemli bir şekilde etkilenirler. Motor terminallerinde, bağlantı noktalarındaki harmonik gerilim bozulması motor içerisine harmonik akılar olarak iletilir. Harmonik akılar motor momentini etkilemezler ancak, rotorda yüksek-frekanslı akımları meydana getiren, rotor senkron frekansından farklı bir frekansta döner. Motorlar üzerindeki etki negatif bileşen akımlarının temel frekanstakine benzerdir. Düşen verim, yükselen ısınma, titreşim, yüksek gürültü harmonik distorsiyonun belirtileridir (Dugan vd., 1996).

Harmonik gerilimler veya akımlar, stator sargıları, rotor devreleri, stator saçları ve rotor saçlarında ilave kayıplara yol açar. Girdap akımları ve deri etkisi nedeniyle, stator ve rotor iletkenlerindeki kayıplar, doğru akım dirençlerinden kaynaklanan kayıplardan daha fazladır. Stator ve rotor uç sargılarındaki harmonik akımların oluşturduğu kaçak akımlar ilave kayıplar üretir. Örneğin 16 kW'lık bir endüksiyon motoru 60 Hz temel frekanslı sinüsoidal gerilimle beslenirken oluşan toplam kayıp 1303 W iken, kare dalga bir gerilimle besleme yapıldığında toplam kayıpların 1600 W'a çıktığı gözlenir (Klingsiran ve Jordan, 1968). Benzer şekilde, evirici çıkışından beslenen endüksiyon motorlarında harmonik gerilimlerin yol açtığı kayıpların dağılımı da şu şekilde belirlenmiştir (Chalmers ve Sarkar, 1968); stator sargılarında % 14.2; rotor çubuklarında % 41.2; uç bölgeler de % 18.8.

Eğik rotorlu asenkron motorlarda, hem stator ve rotor hem de yüksek frekanstaki akı değişiklikleri büyük demir kayıpları üretebilmektedir. Bu kayıpların genliği eğiklik derecesine ve saçların demir kayıp eğrisine bağlıdır. Senkron makinelerin rotorundaki harmonik ısı

kayıpları dikkate alındığı zaman, çift stator harmoniklerine ait frekansların rotor frekansı ile aynı olduğu görülür. Örneğin 5. ve 7. harmonikler $6f_1$ frekansında endüklenen akımları verir. Bu akımların görünümü, rotor çevresinde ters yönde $6\omega_1$ hızında dönen söndürüm çubuk akımlarının sinüsoidal uzay dağılım eğrisiyle aynıdır. Böylece lineer bir sistem için, rotor çevresindeki ortalama rotor yüzey akımı yoğunluğu ($I_5^2 + I_7^2$) ile orantılı olacaktır. Bununla birlikte, bu akımlar ters yönde döndükleri için, rotor çevresindeki bazı noktalarda kısmi yüzey kaybı yoğunluğu ($I_5^2 + I_7^2$) ile orantılı olacaktır.

Harmoniklerin alternatif akım makineleri üzerindeki en ciddi etkileri genellikle ilave güç kayıpları (demir, bakır kayıpları) sebebiyle ısınmadaki yükselmedir. Bir makine, ilave harmonik akımlara göre boyutlandırılırken esas olarak toplam ek kayıplar, tüm makinenin sıcaklığındaki artışın etkisi ve rotordaki kısmi aşırı ısınma dikkate alınır. Harmonik akımları ve ısınmalar statorda aşırı ısınmaya yol açmadığı sürece, sincap kafesli asenkron motorlar yüksek harmonik akımlara ve sıcaklıklara daha fazla dayanabilmektedir. Oysa, rotoru sargılı makineler bu bakımdan daha fazla sınırlandırılmıştır. Generatörler için sürekli negatif yarım dalga akımının maksimum seviyesi yaklaşık % 10, asenkron motorlar için sürekli negatif periyot geriliminin maksimum seviyesi yaklaşık % 2'dir. Bu nedenle, harmonik bileşenleri negatif periyot limitlerini aştığı zaman problemler ortaya çıkabilmektedir (Arrilaga vd., 1985).

Çizelge 5.4 Stator ve rotor harmonikleri

Harmonik derecesi	Simetrikli Bileşen	Stator Harmoniği	Harmonik Dönüş Yolu	Rotor Harmoniği
1 (Temel)	+	1 (Temel)	İleri	----
5	-	5	Geri	6
7	+	7	İleri	6
11	-	11	Geri	12
13	+	13	İleri	12
17	-	17	Geri	18
19	+	19	İleri	18
23	-	23	Geri	24
25	+	25	İleri	24

Statordaki her bir harmonik akım akışı, hava aralığında harmonik magnetomotor kuvvetlerinin (MMK) bir serisini oluşturur. MMK, rotorda harmonik akımlarının akışını sağlar. Her bir harmonik akım doğru veya ters sıralı bileşen olarak ifade edildiğinde, hava aralığı harmoniği MMK'nin dönüşü, rotor dönüşüne göre ya ileri yada geri olacaktır (Hanna, 1989). Çizelge 5.4, altı darbeli bir dönüştürücüyle bağlantı durumunda harmonik sıra karakteristiklerini ve stator ve rotor harmoniklerini verir.

Rotor harmoniklerinin iki tür etkisi olabilir; bileşke rotor ısınması ve salınım momentleri.

Harmonikerin yol açtığı diğer bir olayda, harmonik momentlerdir. Nonsinüsoidal gerilim uygulandığında motor veriminde ve momentinde bir düşüş olur harmoniklerin ortalama moment üzerindeki etkisi çoğu zaman ihmal edilebilir, ancak önemli sayılabilecek moment salınımlarına yol açabilir. Sinüs biçiminde bir beslemeye sahip üç fazlı bir endüksiyon motorunda, harmonik akımlarının oluşturduğu akı yoğunluğu dalgaları arasındaki etkileşim gürültüye neden olabilir. Ayrıca, harmoniklerin hava aralığında bileşke akı üretmesi nedeni ile indüksiyon motoru kalkış yapmayabilir veya senkronaltı hızlarda çalışabilir (IEEE Ind. Ap. Soc., 1992).

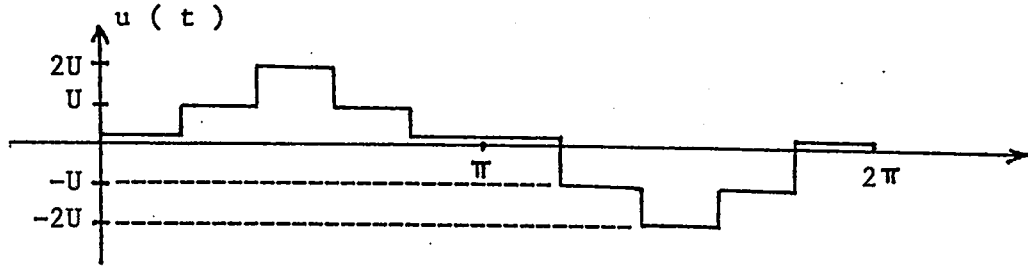
Çeşitli harmonik çiftleri (5. ve 7. gibi), motor-yük sisteminde veya türbin-generatör gruplarında mekanik salınımlara neden olurlar. Harmonik akımlarının ve temel bileşenin magnetik alanları arasındaki etkileşimin neden olduğu salınım momentleri bir mekanik rezonans frekansına uyduğu zaman mekanik salınımlar oluşur. Eğer mekanik titreşimin frekansı elektriksel frekansa yakın olursa, yüksek zorlamalı mekanik cevaplar oluşabilir. Örneğin; 5. ve 7. harmonikler generatör rotorunda 6. harmonik frekansında sürekli bir bükülmeye neden olurlar.

Gerilim bozulması, IEEE 519 (1992) Standardına göre THD % 5'in altında, herhangi bir harmoniğin temel bileşene oranı % 3 değerlerinin altında ise kritik sınırların altında kalmaktadır. Gerilim bozulması % 8 - % 10 değerlerinde ve daha yüksek değerlere ulaştığında motorda aşırı ısınma problemleri meydana gelmeye başlar. Motorun ömrünün azalmaması için bu harmonik bileşenlerinin düşürülmesi gerekmektedir.

Bir dönüştürücü tarafından üretilen sinüs biçimli olmayan bir gerilim stator sargısında endüklendiğinde bir sirkülasyon harmonik akımı meydana gelir. Harmonik akımının genliği stator sargı şekline (örneğin 3-faz veya 6-faz), harmonik reaktanslara ve rotor bastırma etkisine göre değişir. 5., 7. ve 11. gibi harmonik gerilimlerinin her biri, stator sargısında karşılık gelen bir harmonik akım üretecektir. Bu harmonik mertebelerinin her biri, simetrik bileşenler teorisine göre doğru veya ters sıralı olarak belirtilebilir. Bu akımlar, stator sargısında ek ısınmaya neden olurlar.

5.1.2.1 Asenkron Motorun Harmonik Bağımlı Modellenmesi

Asenkron motorlarda sargı ve nüve yapısı nedeniyle, sinüsoidal olmayan akımların makine tarafından şebekeden çekilmesi pek mümkün değildir. Bununla birlikte, özellikle tristör kontrollü hız kontrol düzenleri üzerinden beslenen motorlarda uç gerilimleri harmonik içerebilir. Şekil 5.11’de asenkron motorların beslendiği evirici çıkış gerilimi gösterilmiştir.



Şekil 5.11 Bir eviricide çıkış geriliminin değişimi

Bunun dışında, sincap kafesli asenkron motorlarda sargı bobinlerinin yapısından bazı stator ve rotor oluk sargılarında, magnetik doymadan, hava aralığının imalat nedeniyle düzgün yapılamamasından makine içinde magnetik alanda yüksek harmonikler oluşabilir. Bu harmonikler, motorun yol alması esnasında moment karakteristiği üzerinde beklenmeyen kötü etkiler meydana getirir. Moment karakteristiğine etkileri bakımından, yüksek harmonikleri ikiye ayırmak mümkündür;

- Asenkron moment üreten yüksek harmonikler
- Senkron moment üreten yüksek harmonikler

Genel olarak üç fazlı sargıların oluşturdukları magnetomotor kuvvetler hava aralığı çevresine göre Fourier serisine açıldığında, temel bileşen yanında 5, 7, 11, 13,... harmoniklerin olduğu görülür. k pozitif bir sayı olmak üzere, harmoniklerin mertebesi $(6k+1)$ bağıntısı ile verilebilir. Harmoniklerin oluşturduğu döner alanların hızları, harmonik mertebesinin tersi ile orantılıdır. Üstelik bu harmoniklerden $6k+1$ mertebesinde olan harmoniklerin ($n = 1, 7, 13, 19, \dots$) ürettikleri döner alanlar, bileşke döner alan ile aynı yönde; $6k-1$ mertebesinde olanların ($n = 5, 11, 17, \dots$) ürettiği döner alanlar ise bileşke döner alana göre ters yönde dönerler.

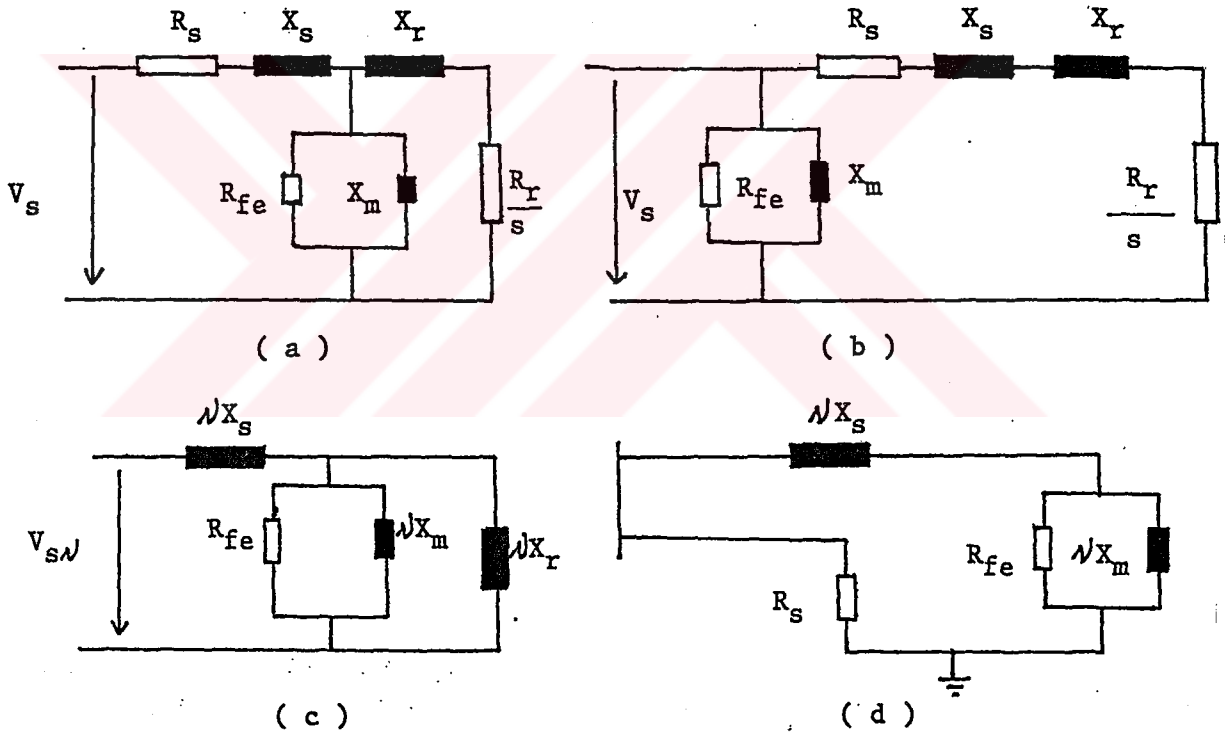
Tristörlü çeviricilerin yaygınlaşması ile, değişik kontrol düzenleri geliştirilmiş ve bu düzenlere karşılık düşen eşdeğer devreler verilmiştir (Jacovides, 1973).

“ s ” indisi statoru, “ r ” indisi rotoru ve (') statora indirgenmiş rotor büyüklüklerini göstermek üzere, akım denklemi,

$$(I_0)_n = (I_s)_n - (I_r')_n \quad (5.20)$$

yazılabilir. I_0 , makinanın boşa çalışma akımıdır. Burada n. harmonik gerilimi bileşeni altında denklem yazılırken, makinadaki doyma ihmal edilmiştir.

Berg ve Abdel Hakim (1976), şebekeye paralel bağlı asenkron motorların belirli bir frekans için (örneğin 60 Hz) eşdeğer bir model ile gösterilebileceğini öne sürmüştür. Bu modellemeye göre, ele alınan baraya paralel bağlı bir şönt empedansla gösterim mümkün olabilmektedir. Şekil 5.12’de bir asenkron motor için öngörülen eşdeğer devreler verilmiştir.



Şekil 5.12 Eşdeğer asenkron makine modeli (a), yaklaşık model (b), yüksek frekanslar için model (c) ve basit yük modeli (d)

Frekans arttıkça (harmoniklerin etkinliği arttıkça) makinanın kayması (s) artar. Diğer yandan, yüksek frekanslarda stator ve rotor kaçak reaktanslarını yaklaşık olarak eşit almak büyük bir hataya yol açmaz. Bu anda X_m reaktansı için $X_m \cong 35X_s$ bağıntısı yazılabilir (Mahmoud ve Shultz, 1982).

Asenkron motorun (örneğin; 60 Hz frekansta) şebekeden çekeceği reaktif güç (Q) ifadesi,

$$\begin{aligned}\frac{Q}{3} &= I^2 X_s + (0,3I)^2 X_m + (0,7I)^2 X_r \\ &= I^2 X_s + (0,3I)^2 35 X_s + (0,7I)^2 X_s \\ &= 4,64 I^2 X_s\end{aligned}\quad (5.21)$$

bulunur (Mahmoud ve Shultz, 1982). Burada I ve Q sırasıyla, motorun şebekeden çektiği akım ve reaktif güçtür.

n. harmoniğe ilişkin stator gerilimi V_{sn} ise, stator akımının ifadesi,

$$I_{sn} = V_{sn} \left[\frac{R_{sn} + j(X_{sn} + X_{mn}) - \frac{(jX_{mn})^2}{\frac{R_m}{s_n} + j(X_m + X_{mn})}}{R_{sn} + j(X_{sn} + X_{mn}) - \frac{(jX_{mn})^2}{\frac{R_m}{s_n} + j(X_m + X_{mn})}} \right] \quad (5.22)$$

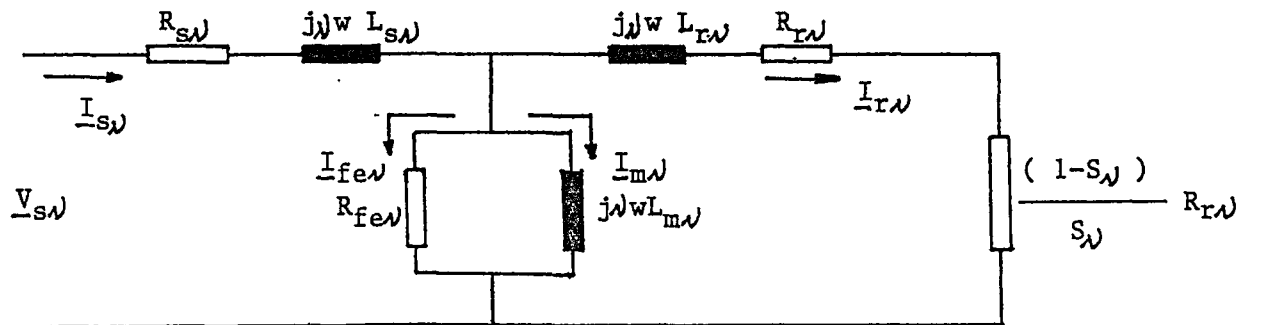
ve rotor akımının ifadesi,

$$I_m = jX_{mn} I_{sn} / \left(\frac{R_m}{s_n} + j(X_m + X_{mn}) \right) \quad (5.23)$$

yazılabilir. s_n , n. harmoniğe ilişkin kayma olup,

$$s_n = (nw_s - w_r) / nw_s = (n \pm (1 - s_1)) / n \quad (5.24)$$

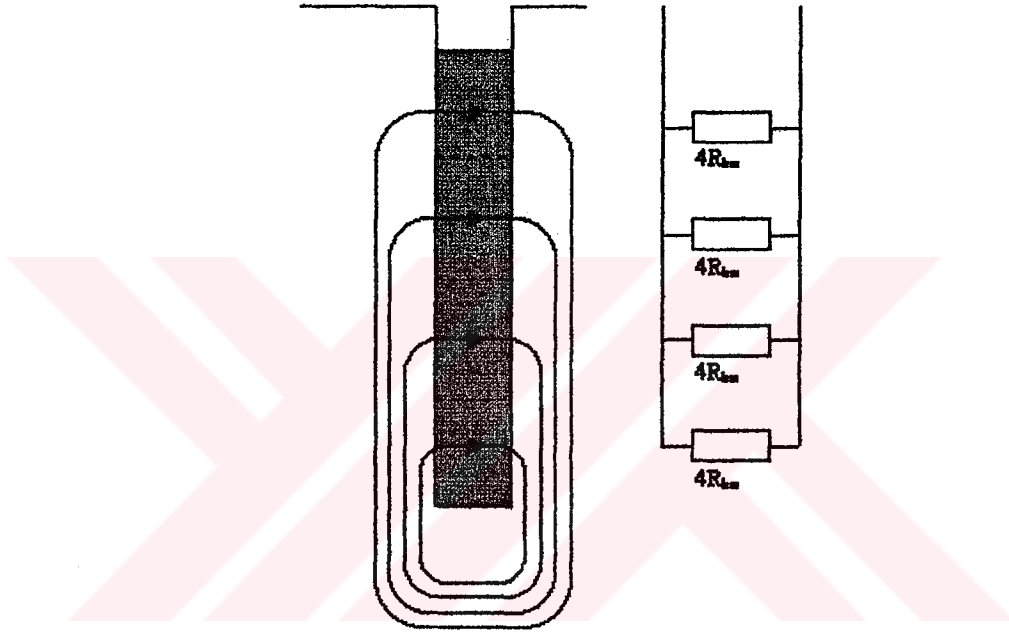
şeklinde ifade edilebilir. Senkron hızda $s_1 = 0$ olup, $s_n = (n \pm 1) / n$ dir. Burada (+) işaret esas alana göre geriden dönen harmonikler; (-) işaret ise ileri yönde dönen harmonikler için kullanılacaktır. n. harmonik için en genel eşdeğer devre Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13 n. harmonik için asenkron motorun genel eşdeğer devresi

5.1.2.2 Deri Etkisini (Skin Effect) Modellemenin Gerekliliği

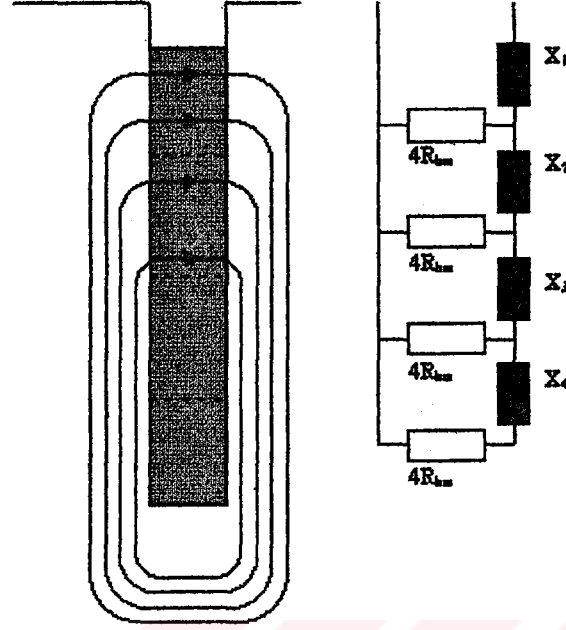
Bilezik rotorlu (sargılı rotor) asenkron motor kullanarak moment karakteristiklerini makine dışındaki reosta yardımıyla değiştirmek mümkündür. Bu sincap kafesli bir asenkron motorla mümkün değildir. Bu tür makinelerde ilk devre bağlama anında yüksek bir etkin direnç ve motor yüksek devire geldikten sonra küçük bir etkin direnç gösterir. Bu tür kendinden yol verme dirençli olan bu rotorlarda ilk devre bağlama anında akım çekişi küçük ve yol alma momenti büyük olmaktadır. Bunun sonucu motor daha yumuşak yol alır [3].



Şekil 5.14 Deri etkisi olmadan akı dağılımı ve eşdeğer devre

Bu durumda rotor rezistansını etkileyebilmenin tek olasılığı çubukları uygun bir düzende seçmek ve böylece daha yüksek bir kalkışta düşük kalkışa göre etkili bir direnç elde etmektir.

Bu, özellikle sincap kafesli bir asenkron motorun şebekeden beslenmesiyle mümkündür. Bu durumda frekans 50/60 Hz civarında olacaktır. Yüksek frekans sebebiyle rotorda daha yüksek akımlar dolaşır. Deri etkisi sebebiyle de nötr rezistansı nominal durumdan daha yüksek olur. Bu durumda, istenilmeyen gerilim problemleri sebebiyle şebekedeki diğer kullanıcılar da etkilenecektir. Bu amaçla üretilen çift kafesli veya daha kompleks çubuklu bazı özel makineler vardır.



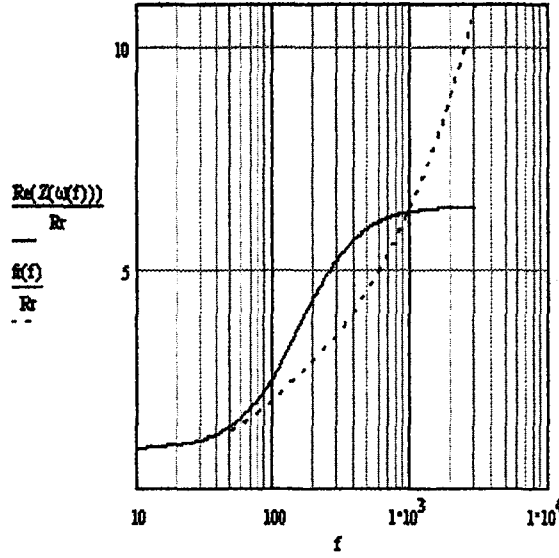
Şekil 5.15 Deri etkili akı dağılımı ve eşdeğer devre

Motor yüksek devire ulaştığında rotor direnci kendiliğinden küçülür ve yüklenmeler karşısında devir sayısı değişikliklerini büyük ölçüde önler. Bu tür otomatik direnç ayarlı bir rotor, skin efekti prensibine göre çalışır ve bunlara bu nedenle skin-efektli-rotor da denir. Skin efektli rotorların saç paketi üzerinde alt alta iki sincap kafesi bulunur. Alttaki kafes işletme kafesi; üstteki kafes yol verme kafesi olarak anılmaktadır. İlk devre bağlama anında hem işletme kafesinin, hem de yol verme kafesinin çubukları üzerinden alternatif akımlar geçer. Her bir çubuğun manyetik alanı hem kendisine hem de komşu çubuğa etkiyerek çubuk dirençlerinin yükselmesine neden olur. (Deri etkisi ve yakınlık etkisi). İşletme kafesinin çubukları altta bulunduğu için, bunların alan çizgileri daha çok demir üzerinden geçmekte ve manyetik akının büyük olmasından dolayı dirençleri arttıkça, rotor frekansı düşer ve deri etkisi akım frekansı ile doğru orantılı olduğundan çubukların direnci küçülür (Erna, 1979).

Skin-efektli rotorların yol alma momentleri (M_A) büyük ve yol alma akımları küçüktür. Bunların en büyük sakıncalı tarafı, oluk kesitlerinin, yeni bir deyimle hava aralıklarının oldukça büyük olmasıdır. Bu nedenle bunlarda akı kaçakları büyük, güç faktörü ve verimi küçük olmaktadır.

Bu durumda deri etkisi istenilir bir durumdur ve iyi bir amaçta kullanılabilir. Son zamanlarda, AC-AC konverterlerin sincap kafesli asenkron makinelerde kullanılmasıyla, kompleks kontrol

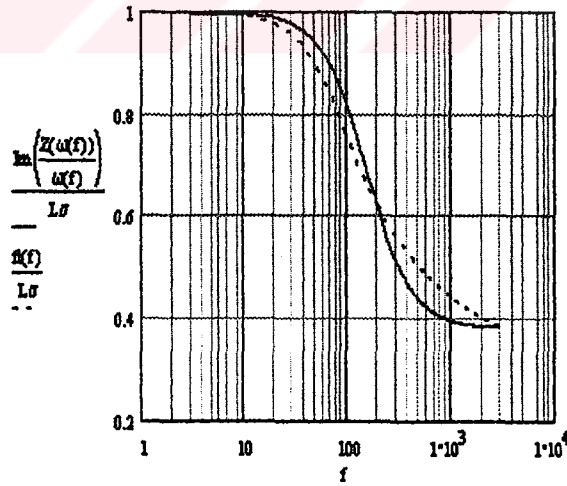
düzenlerini anlamak mümkündür, makinenin yapısı sebebiyle akımın temel bileşenini sınırlamakta artık gereksizdir [3].



— 2 R-L modeli

----- makine

Şekil 5.16 Rotor frekansına bağlı olarak bağlı efektif rotor direnci



— 2 R-L modeli

----- makine

Şekil 5.17 Rotor frekansına bağlı olarak bağlı etkili rotor kaçak endüktansı

5.1.2.3. Asenkron Motor Modellerinin Parametre Tanımlaması ve Karşılaştırılması

Son yıllarda, sincap kafesli asenkron motorların hız ve pozisyon kontrollü sürücülerdeki önemi açık bir şekilde büyümüştür. Bunun sebebi AC asenkron motorların, genel olarak DC motorları kullanan teknolojiye büyük ölçüde kullanılmasıdır. Bunun dışında, teknolojiye büyük ölçüde verim elde etmek için, birçok kontrol edilmeyen AC sürücü frekans konverterleri eklenerek yeniden tesis edilmiştir, ve hız kontrollü sürücüler olarak kullanılmaktadırlar. Bu sürücülere daha iyi statik ve değişken özellikler ekleyebilmek için, kontrol mühendisleri kontrol aracı hakkında daha fazla bilgi sahibi olmalıdırlar. Bundan dolayı, sincap kafesli asenkron motorun karakteristik ve parametrelerinin tanımlanması göze çarpıcı bir şekilde önem kazanmıştır. Sürücü tasarım ve kontrolünün en önemli ifadesi motorun düzgün bir şekilde modellenmesidir. Zaten asenkron motor sürücülerinin model temelli kontrol yöntemleri en etkili ve kullanışlı olanlardır (Lehtla, 1996).

5.1.2.3.1 Modeller

Sincap kafesli asenkron motorlar için uygun olan birçok farklı model sürücü tasarımı ve kontrolü için başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle bu modeller, statik veya dinamik, lineer veya nonlineer, bölümsel veya entegral olarak sınıflandırılabilirler. Bunun dışında, parçalı veya dağıtılmış parametrelili modeller mevcuttur. Parçalı parametrelili tek fazlı bir eşdeğer devre AC asenkron motorun en geleneksel modelidir. Kloss formülündeki çeşitli değişiklikler hız-moment karakteristiklerinin hesaplanması için bu devreden elde edilir.

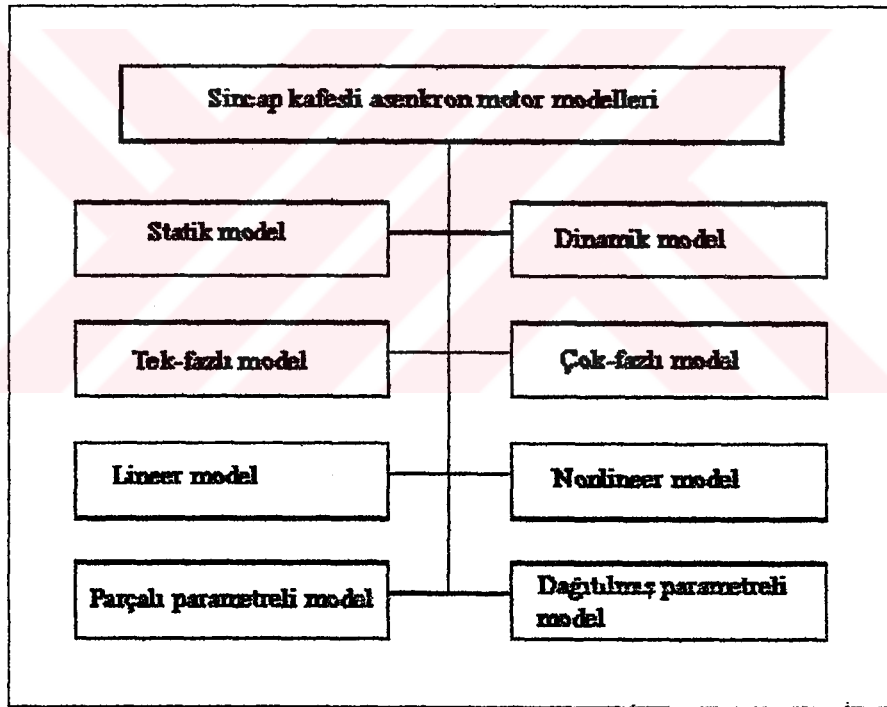
Bununla birlikte, sincap kafesli bir asenkron motor için, bu model kesin hesaplama koşullarını tatmin etmez. Deri etkisinden dolayı, sincap kafesli asenkron motorlarda, Kloss formülüyle hesaplanmış hız moment karakteristikleri gerçek değerlerden çok büyük farklılık gösterir.

Sincap kafesli bir asenkron motor eşdeğer devresinin parametre tanımlamaları kompleks bir problemdir, çünkü hiçbir güvenilir teori mevcut değildir ve rotor devresinde hiçbir doğrudan ölçüm yöntemi mevcut değildir. Rotor sargılarındaki deri etkisi ve demir nüvenin doyma etkisi sincap kafesli motorun modellenmesi işleminde karışıklıklara yol açar. Bundan dolayı, doğrudan olmayan ölçüm yöntemleri ve hesaplamalar, referanslar veya deneysel ölçülmüş hız-moment karakteristikleri ile verilen verilerdeki parametre tanımlaması için kullanılmalıdır [4].

Eşdeğer devre verisinden hız-moment karakteristiklerini hesaplamak nispeten basittir, ancak referans karakteristiklerden parametreleri hesaplamak, problemi daha karmaşıktır, çünkü eşdeğer devre değişiklik gösterebilir ve farklı parametreler seçilebilir.

Hız-moment karakteristiklerini hesaplamakta kullanılan birçok eşdeğer devre vardır (Şekil 5.19). a ve b eşdeğer devreleri kısıadevre rotorlu asenkron makine için başarılı bir şekilde kullanılır, ancak sincap kafesli asenkron motor durumunda deri etkisinden dolayı, hesaplanan hız-moment karakteristikleri gerçek karakteristiklerden açıkça farklılık gösterir.

c devresi bazı lineer motor çeşitleri gibi büyük asenkron motorlar için yararlı olabilir. Bazı özel durumlarda, ayrıca d ve e devreleri kullanılabilir. e devresi AC motorun DC motor olarak kabul edildiği vektör kontrollü AC asenkron motor sürücüsü analizinde yararlıdır. Sincap kafesli asenkron motorun hız-moment karakteristiğini hesaplamanın birçok yolu vardır [4].



Şekil 5.18 Modellerin sınıflandırılması

1. Verilen deneysel veya katalog verilerine göre bir karakteristiğin yaklaşık fonksiyon olarak hesaplanması, örnek olarak, çok bilinmeyenlerle veya Kloss formülünün çeşitli düzenlemeleriyle yaklaşım.
2. Verilen parçalı parametrelili bir AC asenkron motorun elektromekanik model veya eşdeğer devresi için karakteristik hesaplaması.

3. Verilen bir alan modeli veya bir motor tesisi için bir karakteristiğın hesaplanması. Örnek olarak, FEM hesaplama yöntemi ve dağıtılmış parametreler kullanarak (Lehtla, 1996).

İlk yöntem (1,2)'de anlatılmıştır. Çok bilinmeyenlerin katsayıları elektrik motorunun herhangi bir elektromekanik fenomeni ile ilgili değildir. Sonuç olarak, biz çok bilinmeyi asenkron motorun özel çeşit bir saf matematiksel modeli olarak düşünebiliriz.

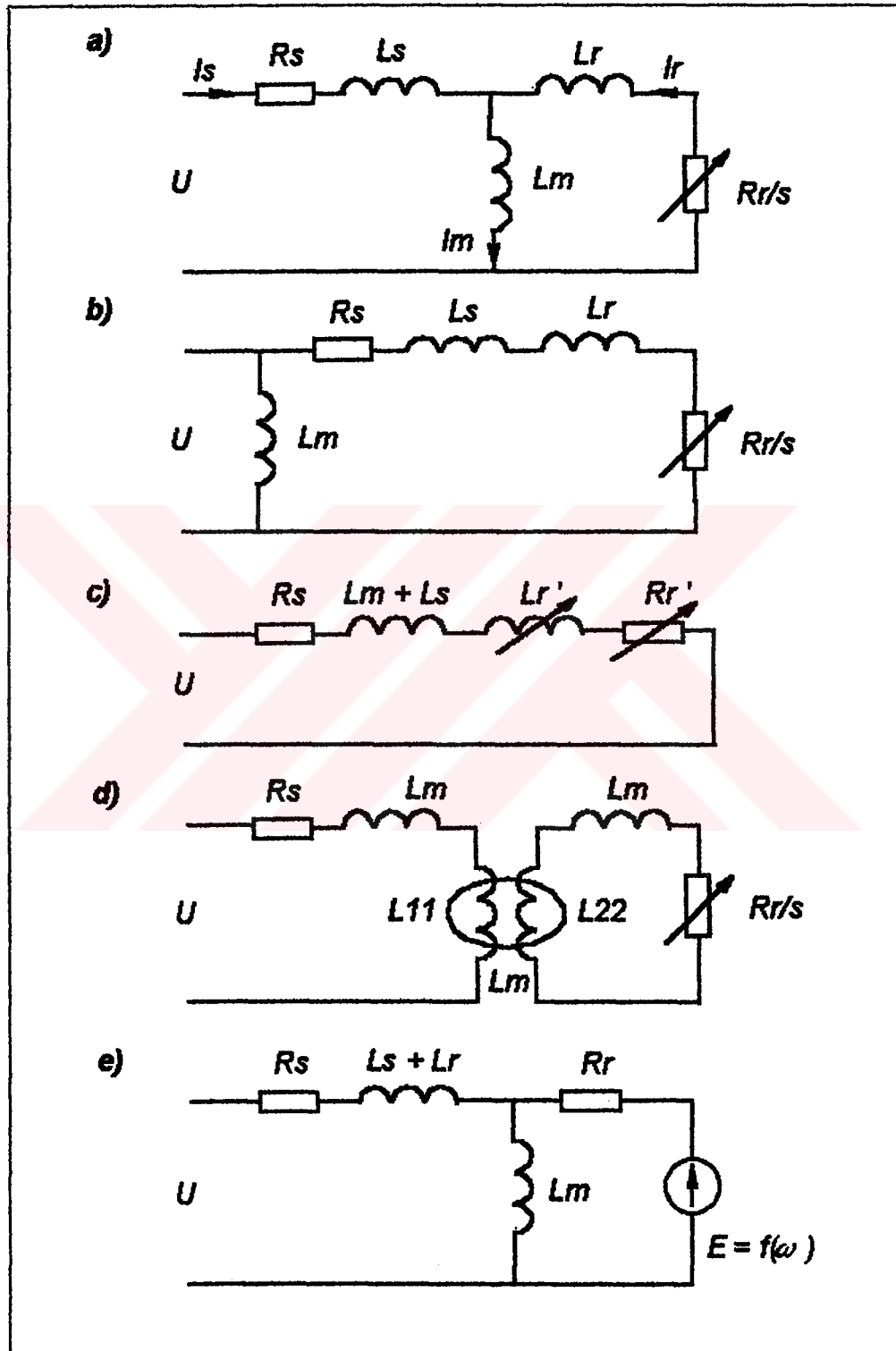
E. Risthein tarafından önerilen yöntem (1), dönme momentini geniş bir kayma farklılığında ($s = 0...2$) hesaplama imkanı verir. Tork, her biri Kloss formülüyle benzerlik gösteren iki veya üç bileşenin toplamı olarak hesaplanabilir. Verilen yöntemin en temel avantajı hız-moment karakteristiğini geniş bir aralıkta rotor kayma değişiminde hesaplayabilme olasılığı ve bu hesaplamaların gerçek fiziksel etkileri göz önünde bulundurduğu gerçeğidir. Deri etkisinden ve kalkış işlemi sırasında rotor direncindeki değişmeden dolayı iki tork maksimumu vardır. Dezavantaj ise, eşdeğer devre parametrelerinin fonksiyonu olarak hız-moment karakteristiğinin hesaplanmasına imkan vermemesidir.

Şekil 5.19'da verilen eşdeğer devreler için hız-moment karakteristiğini hesaplamanın ikinci yolu, en gelenekseldir, ancak sadece küçük kayma $s < s_{max}$ durumu için mümkündür. Deri etkisinden dolayı, $2 > s > s_{max}$ kayma değişiminde hesaplanmış moment gerçek momentten önemli bir derecede farklılık gösterir.

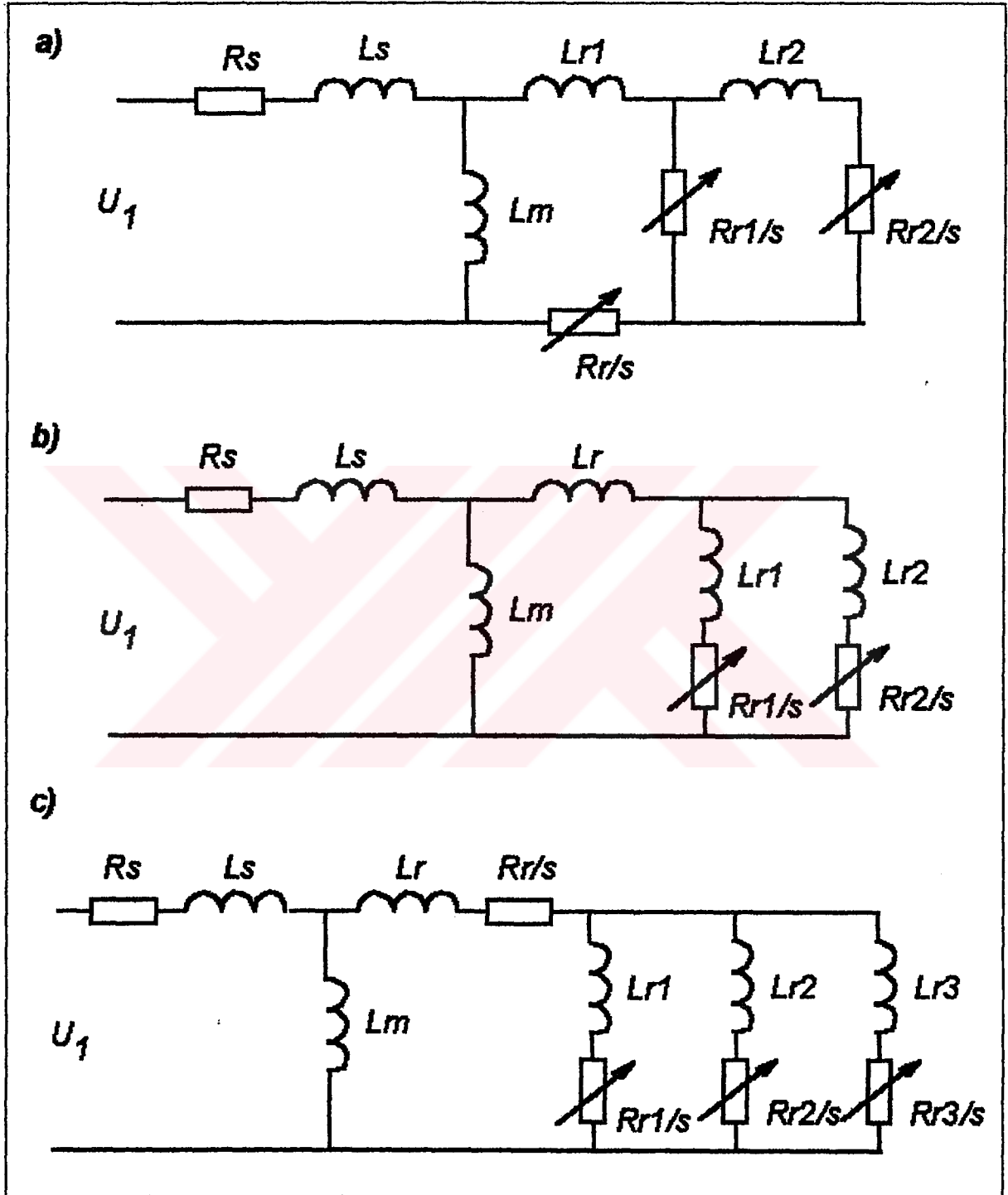
Üçüncü yöntem doğru ancak karmaşık bir yöntem olarak tanımlanabilir. Bundan dolayı asenkron motorun fiziksel modeline dayanan ve tatmin edici sonuçlar veren, hız-moment karakteristiğinin herhangi bir hesaplama yöntemi yararlıdır.

İkinci ve üçüncü yöntemleri birleştirebiliriz ve özel bir sınıfta eşdeğer devreleri kullanırsak rotor sargılarındaki deri etkisi göz önünde bulundurulabilir. Şekil 5.20, büyük bir kayma aralığında hız-moment karakteristiklerinin hesaplanmasına izin veren üç versiyondaki eşdeğer devreleri gösterir.

Eşdeğer devrenin rotor sargıları parçalı parametrelili RL bağlantı dizilerinden oluşur. En uygun eşdeğer devreler Şekil 5.20(a) ve 5.20(b)'de gösterilmiştir. Rotor devresi direnç ve endüktans bileşenlerinin sayısı değişebilir. Bunun dışında, rotor endüktansı frekans bağımlı ve doyma bağımlı bileşenlere ayrılabilir. Üç bağlantı (dört empedans) eşdeğer devre (merdiven şebeke) Şekil 5.20(c)'de gösterilmiş ve Healey, Williamson ve Smith tarafından tanımlanmıştır .

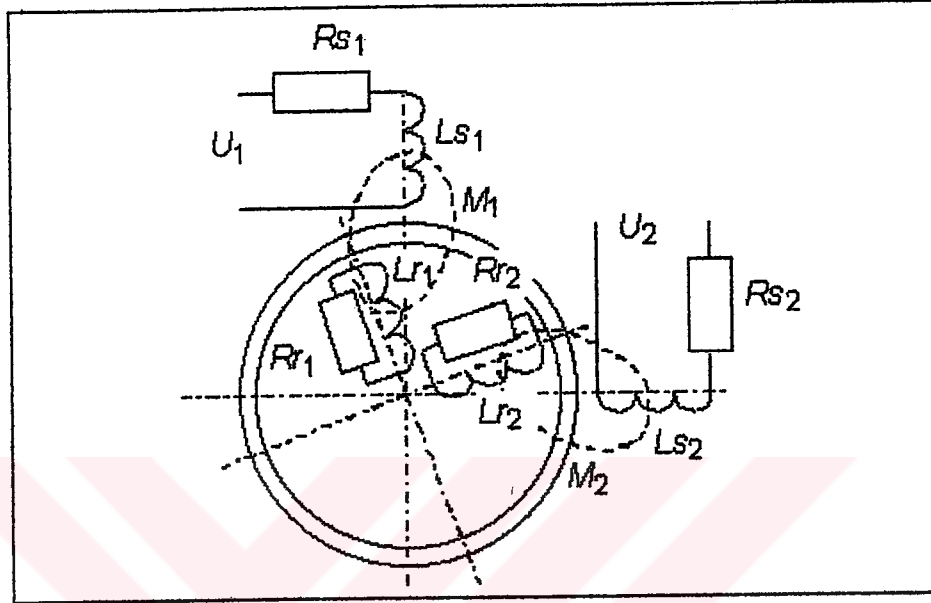


Şekil 5.19 AC asenkron motor eşdeğer devreleri

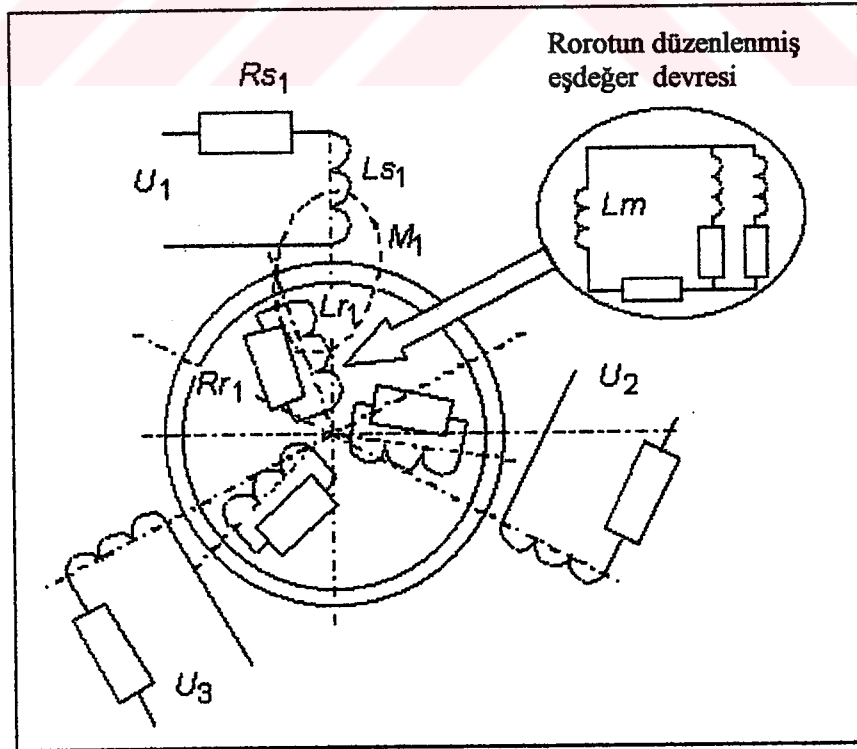


Şekil 5.20 AC asenkron motorun deri etkisi düşünülerek çizilen eşdeğer devreleri

Aslında, 3-faz asenkron motorun 2 ve 3 faz vektör modelleri kullanılmaktadır. Ayrıca AC asenkron motorun dinamik veya vektör modelleri tek fazlı eşdeğer devre üzerine dayanır, ancak gerçek makinenin tanımlanması için, 2 veya 3 faz vektör modelleri gereklidir .



Şekil 5.21 AC asenkron motorun iki-faz vektör modeli



Şekil 5.22 AC asenkron motorun üç-faz vektör modeli

İki-faz vektör modeli nispeten daha basit konfigürasyondadır. Temel olarak, bu model vektör kontrollü frekans konverterlerin bilgisayar yazılım programında kullanılır. Bu durumda deri etkisini göz önünde bulundurmanın gereği yoktur, çünkü rotorun mevcut kayması nominal değere yakındır. 3 fazlı AC asenkron motorun modellenmesi veya kontrolü için iki-faz model uygulaması basit ilave düzenleme dönüşümü kullanımıyla mümkündür.

Üç faz vektör modeli daha kompleks konfigürasyondadır. Bu model güç elektroniği ve motor devrelerinin birleşik modellenmesi için gereklidir. Son yıllarda vektör modelleri Pspice, Simplorer gibi elektronik tasarım bilgisayar yazılım programları yardımıyla tesis edilebilirler. AC asenkron motorun kalkış işleminin modellenmesi için rotor sargılarındaki deri etkisi göz önünde bulundurulmalıdır, çünkü rotor kayması geniş bir aralıkta değişebilir. Bundan dolayı, bu durumda Şekil 5.22'deki düzenlenmiş eşdeğer devreli vektör modeli kullanılabilir.

5.1.2.3.2 Eşdeğer Devre Parametrelerinin Belirlenmesi

Sincap kafesli bir asenkron motorun eşdeğer devresinin parametre tanımlaması kompleks bir problemdir, çünkü hiçbir güvenilir teori mevcut değildir ve rotor devresinde doğrudan ölçümün hiçbir yöntemi mümkün değildir. Rotor sargısındaki deri etkisi ve demir nüve doyma etkisi sincap kafesli asenkron motorun modelleme prosesinde karmaşıklıklara yol açar. Bundan dolayı, doğrudan olmayan ölçüm yöntemleri ve hesaplamalar referanslarda verilen veriler veya deneyle ölçülmüş hız-moment karakteristiklerinden parametre tespiti için kullanılmalıdır.

Eşdeğer devrenin verisinden hız-moment karakteristiklerini hesaplamak nispeten daha kolaydır, ancak karşısında parametreleri referans karakteristiklerden hesaplamak zordur, çünkü eşdeğer devre farklılık gösterebilir ve farklı parametreler seçilebilir.

Genel başvuru rotor sargılarının kompleks çubuklarını seçeneklere bölmek ve iki veya daha fazla fikrîsel “kafes” oluşturmaktır. Kısmi kafeslerin parametreleri bu seçimlerin önerilen boyutlarından hesaplanabilir. Çok bağlantılı (merdiven şebeke) eşdeğer devre parametreleri, istenilen frekans seviyesinde, çubuğun empedansı ve merdiven şebekenin giriş empedansı arasında en iyi kabulü veren sınırlı eleman yöntemi ve parametre değerlerinin yaklaşık seçimi ile hesaplanabilir.

1. İlk Referans Parametrelerinin Hesaplanması. Genellikle, AC asenkron motor, kataloglarda verilen çıkış parametreleri ile tanımlanır;

P_{nom}	Nominal çıkış gücü,
f_{nom}	Nominal frekans,
U_{nom}	Nominal gerilim,
s_{nom}	Nominal hız veya kayma,
η_{nom}	Verim,
$\cos \varphi_{nom}$	Nominal güç faktörü,
T_{max}/T_{nom}	Bağıl maksimum tork
T_{st}/T_{nom}	Bağıl kalkış torku,
T_{min}/T_{nom}	Bağıl minimum tork,
I_{st}/I_{nom}	Bağıl çalışma akımı,

Bu çıkış değerleri, herhangi bir önerilen eşdeğer devrenin parametrelerini belirlemekte hesaplamalar için kullanılabilir. Öncelikle, ilk referans için nominal parametreler hesaplanmalıdır.

Nominal hız,

$$\omega_{nom} = \frac{2\pi f_{nom}}{p} (1 - s_{nom}) \quad (5.25)$$

Nominal dönme momenti,

$$T_{nom} = P_{nom} / \omega_{nom} \quad (5.26)$$

Nominal stator akımı,

$$I_{nom} = \frac{P_{nom}}{3U_{nom} \cdot \eta_{nom} \cdot \cos \varphi_{nom}} \quad (5.27)$$

Eşdeğer devrenin özet empedans, direnç ve reaktansı,

$$Z_{eqv} = U_{nom} / I_{nom}$$

$$R_{eqv} = Z_{eqv} \cdot \cos \varphi_{nom} \quad (5.28)$$

$$X_{eqv} = Z_{eqv} \cdot \sqrt{1 + (\cos \varphi_{nom})^2}$$

Rotor devresinin özet direnç ve reaktansı, yaklaşık olarak;

$$R_{eqv.r} = \frac{P_{nom} \cdot s_{nom}}{3(1-s_{nom})I_{nom}^2} \quad (5.29)$$

$$X_{eqv.r} = R_{eqv.r} \frac{\sqrt{1 + (\cos \varphi_{nom})^2}}{\cos \varphi_{nom}} \quad (5.29)$$

Kaçak akı katsayısı,

$$\sigma = \frac{(1 - \cos \varphi_{nom})}{(1 + \cos \varphi_{nom})} \quad (5.30)$$

AC asenkron motorun temel endüktansı,

$$L_\mu = \frac{U_{nom}}{2\pi f_{nom} \cdot I_{nom} \cdot \sqrt{\sigma}} \quad (5.31)$$

Eşdeğer devrenin ilk yaklaşık tahmini için stator ve rotor kaçak endüktansları,

$$L_s = 0,3\sigma \cdot L_\mu ; L_{r1} = 0,5L_s ; L_{r2} = 2 \cdot L_{r1} \quad (5.32)$$

Rotor dirençleri,

$$R_{r2} \cong (0,5...1,0)R_{eqv.r} ; R_{r1} \cong (2...7)R_{r2} ; R_r = (0,2...0,5)R_{r2} \quad (5.33)$$

Stator direnci,

$$R_s \cong R_{eqv.r} \left(\frac{1 - \eta_{nom}}{\eta_{nom}} \right) \quad (5.34)$$

Yukarıdaki parametreler, eşdeğer devre parametre tahmininin fuzzy işlemine başlamak için başlangıç noktası olarak kabul edilmelidir. Diğer bir başlangıç noktası sincap kafesli asenkron motorun hız-moment karakteristikleridir.

2. Hız-moment karakteristiklerinin belirlenmesi. Hız-moment karakteristiklerinin belirlenmesi yöntemleri üç gruba ayrılabilir;

- Elektromekanik AC motor - DC generatör sistemi kullanarak ve momentin ölçülen DC generatör akımın fonksiyonu olarak hesaplanması,
- Özel moment sensörleri yardımıyla momentin doğrudan ölçülmesi,

- Yüksüz bir motorun geçici hız ölçümü ve ivmenin fonksiyonu olarak momentin hesaplanması.

Hız-moment karakteristiğinin belirlenmesinin en basit yolu DC generatörün bütünleşmiş yük cihazı ve yük sensörü olarak kullanımıdır. Bununla birlikte, uygulamada kesin momentin hesaplanması nonlineerliklerden ve sürtünme etkilerinden dolayı nispeten daha karmaşıktır.

İkinci yöntem, momentin doğrudan ölçülmesini sağlamaktır ve en doğru olanıdır. Bununla birlikte, moment sensörleri genellikle nispeten daha pahalıdır. Bundan dolayı bu yöntem esas olarak büyük sabit laboratuarlarda kullanılabilir.

Üçüncü yöntem en basit ve en ucuz olanıdır. Bunun yanında, bize değişken durumlar altında karakteristikleri belirleme imkanı verir.

Sincap kafesli asenkron motor dinamik olarak kalkış işlemini yavaşlatmak için sabit bir kütle ile yüklenir. Hız sensörünün sinyali (bu durumda DC takogeneratör) dijital bir osiloskopa kaydedilir. Daha sonra, PC veri işleme gerçekleştirilir. Veri işleme;

- Ölçülen sinyalin nümerik filtrelemesini,
- Çok bilinmeyenli fonksiyonlarla geçici olayların tahminini,
- Hızlanma geçici prosesinin hesaplanması ve farklılaşma fonksiyonunu,
- Hız-moment karakteristiğini,

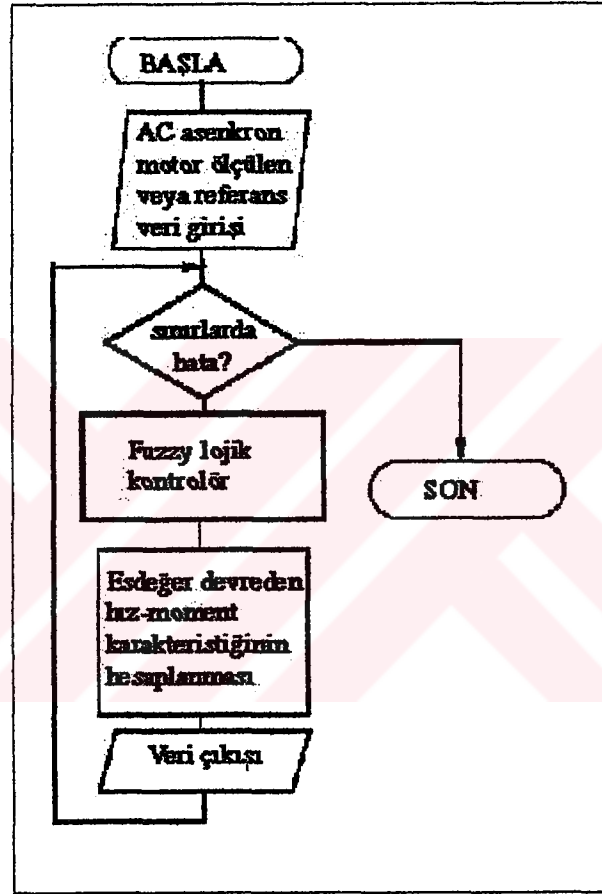
içerir.

3. Fuzzy Parametre Belirleme Sistemi. Eşdeğer devre parametre belirlenmesinin blok diyagramı Şekil 5.23'te gösterilmiştir. Hız-moment karakteristiği belirlenmesi gibi bu algoritmanın ilk aşaması, bir önceki bölümde incelenmiştir. Bir sonraki aşama, eşdeğer devre parametrelerini tahmin etmek için hız-moment eğrisinin adım adım tahminidir.

Fuzzy lojik kontrolör için giriş değerleri eşdeğer devreden hesaplanan hız-moment karakteristikleri ile referans karşılaştırılarak elde edilir. İki karakteristik arasında yer değişikliği dört noktada değerlendirilir. Bunlar; nominal kayma noktası, maksimum moment noktası, minimum moment noktası ve kalkış moment noktası (Şekil 5.24). Bu veriler hesaplamalar için referans girişler olarak kullanılabilir. Bu veriler hesaplamaların sonuçlarına kıyasla, $24 = 16$ hata fonksiyonuna uğrarlar. Hata fonksiyonlarının değerlendirilmesinden sonra, fuzzy kontrolör lojiğini oluşturan hüküm, karakteristikleri ele almakta kullanılır.

Bu verileri değerlendirmek için, terimler az veya daha çok kullanılır. 16 kurallı en az kural tablosu Çizelge 5.5'te gösterilmiştir. Her kullanılan değişken için üç temel terim olduğunda (az, normal ve daha fazla) daha kesin bir çözüm elde edilir (Çizelge 5.6).

Kullanılan terimlerden dolayı kural tablosunun boyutu, $34 = 81$ fonksiyonuna bağlı olarak büyür. Tahmin işlemi, hata fonksiyonunun değeri izin verilen referans değerden daha küçük olduğunda bitirilecektir ve eşdeğer devrenin parametreleri belirlenmiş olacaktır.

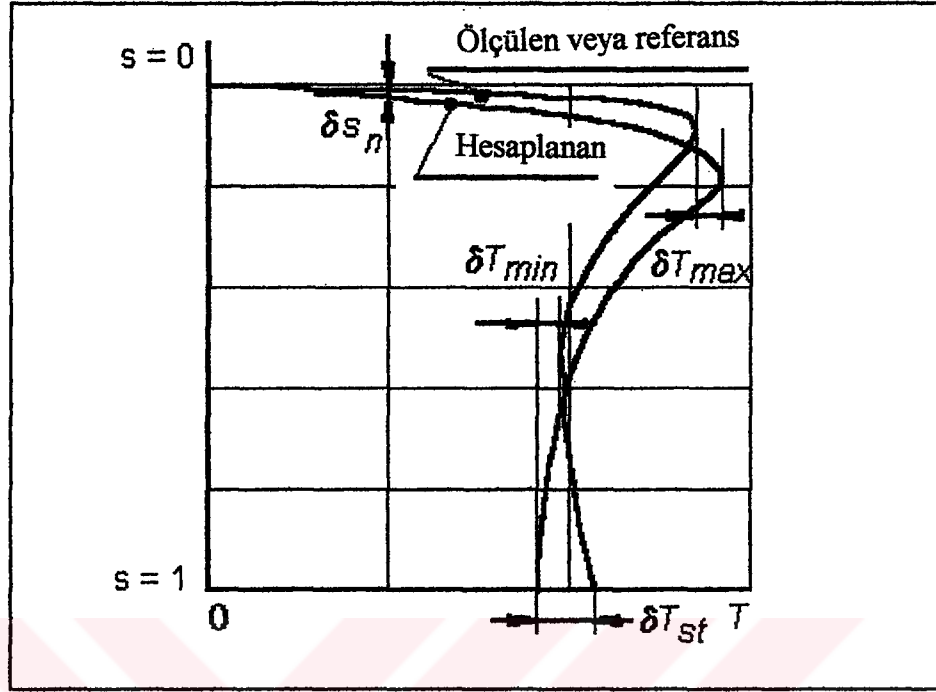


Şekil 5.23 Asenkron motor karakteristikleri ve parametrelerinin bilgisayar kontrollü belirlenmesi algoritması

Kural tablosu IF x AND y THEN z türündeki cümlelerden oluşur. Örneğin, MLML hali (Çizelge 5.5) ve Şekil 5.20(a)'daki eşdeğer devre durumunda, kural R11 Şu şekilde anlaşılır.

IF $T_{min} > T'_{min}$ AND $T_{st} < T'_{st}$ AND $T_n < T'_n$ AND $T_{max} < T'_{max}$ THEN değerleri $(R_s, L_s, L_{r1}, L_{r2}, R_{r1}, R_{r2}, R_r) = \text{yeni değerler}$ $(kiR_s, kiL_s, kiL_{r1}, kiL_{r2}, kiR_{r1}, kiR_{r2}, kiR_r)$. Burada, ki değişken bir katsayıdır ve hata değerini (iki karakteristik arasında farklılıklar) ve hız-moment karakteristiğine farklı parametrelerin etkisini göz önünde bulundurur. ki 'nin ilk referans

değeri nispeten daha büyüktür, ancak hesaplama işlemi sırasında, eğer tahmini eğri referans eğriye yaklaşırsa, ki değeri küçülür (Lehtla, 1996).

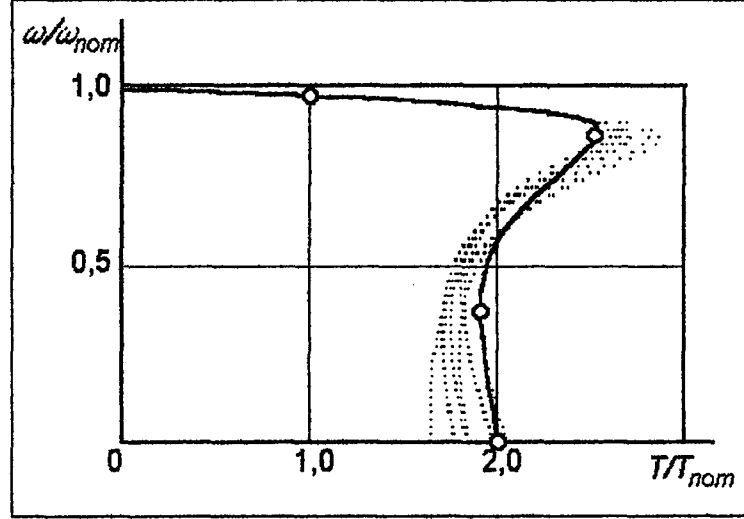


Şekil 5.24 Karakteristiğin dört-nokta hata fonksiyonu

Çizelge 5.7 VOLTA ve BALDOR motorları eşdeğer devre parametrelerinin karşılaştırılması

Parametre	Tip 0735M BALDOR	Tip 0940M BALDOR	Tip 4A132 VOLTA
Güç, W	5 516	11 030	11 000
Nom. hız	1 800	1 800	1 500
R_s, Ω	0.793	0.350	0.332
R_r, Ω	0.155	0.086	0.089
R_{r1}, Ω	2.24	0.931	1.249
R_{r2}, Ω	0.533	0.261	0.178
L_m	0.164	0.117	0.121
L_s	0.00639	0.00393	0.0033
L_{r1}	0.00393	0.00190	0.0009
L_{r2}	0.00655	0.00455	0.0041

Hız-moment karakteristiklerinin bilgisayar kontrollü basamak basamak tahmini ve VOLTA motorun eşdeğer devre parametreleri BALDOR motorlarına kıyasla Çizelge 5.7 ve Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



Şekil 5.25 Parametre tanımlamasının adım adım tahmininde bilgisayar kontrollü proses

5.1.3 Kablolar ve İletim Sistemi Üzerindeki Etkiler

İletim sistemi (hava hattı veya yer altı kablosu) üzerindeki etkileri, iki bölüm altında incelemek mümkündür. Bunlardan birincisi, harmonik akım bileşenlerinin oluşturduğu ek I^2R ayıplarıdır. Bu kayıplar;

$$P_K = \sum (I^2 \cdot R)_n = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n \quad (5.35)$$

şeklinde verilebilir. Deri etkisi ihmal edilirse, $R_n \rightarrow R$ (hattın omik direnci) yazılabilir.

Diğer taraftan, harmonik akımların hat boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde oluşturduğu gerilim düşümleri de ayrı bir etkidir. n . akım harmoniğinin oluşturduğu gerilim düşümü;

$$(\Delta V)_n = I_n \cdot Z_n \quad (5.36)$$

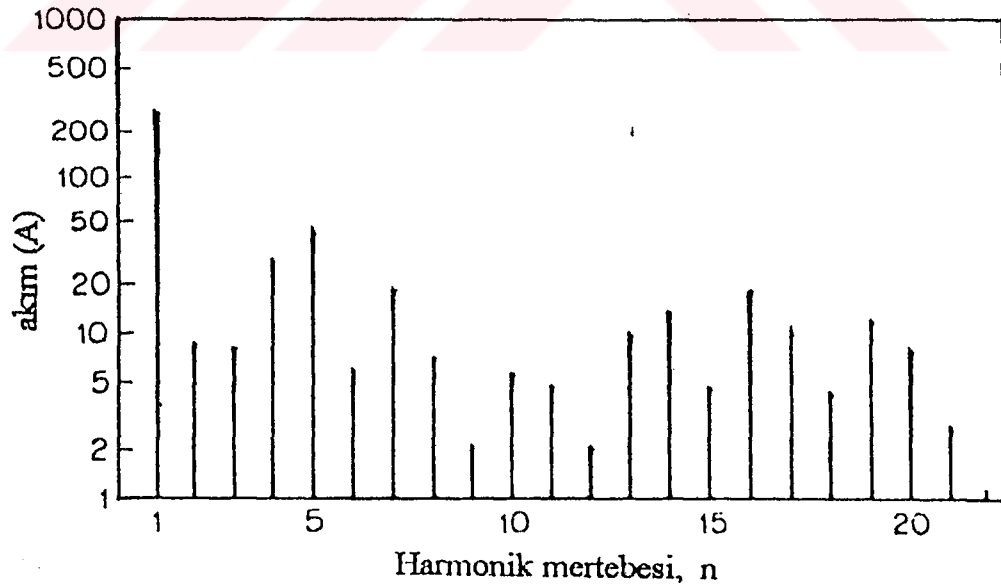
olarak yazılabilir. Burada, I_n , n . harmonik akımını, R_n , harmonik frekansındaki sistem direncini göstermektedir.

Bir iletkende sinüs biçimli olmayan bir akım akışı, deri olayı (skin effect) ve yakınlık etkisi (proximity effect) olaylarından dolayı, dalga şeklinin etkin değeri için tahmin edilenin üstünde bir ek ısınmaya neden olacaktır. Söz konusu her iki olay, iletken boyutu ve aralığı ile değiştiği gibi, frekansın da bir fonksiyonu olarak değişir.

Bu iki etkinin sonucu olarak, özellikle büyük boyutlu iletkenler için etkin alternatif akım direnci R_{AC} , doğru akım direnci R_{DC} 'den daha büyük bir değere sahip olur. Bir kabloda yüksek frekanslı harmonikler içeren akım aktığında, kablo için eşdeğer R_{AC} , I^2R kaybının artmasıyla da yükselir.

Harmonik akımın ikinci etkisi değişik devre empedansları üzerinde harmonik gerilim düşümleri oluşturmaktır. Bir başka ifadeyle, büyük empedanslı sistemler düşük empedanslı sistemlere göre daha büyük gerilim bozucu etkilerine neden olacaktır.

Kablolu enerji iletiminde harmonik gerilimler, tepe gerilim değeri ile orantılı olarak dielektrik zorlanmayı artırır. Bu etki kablonun kullanım ömrünü kısaltır. Aynı zamanda hata sayısını ve bu nedenle onarım masrafını artırır. Aşırı gerilimler nedeni ile yalıtkan kablolarda delinme meydana gelebilir. Harmoniklerin korona başlangıcı ve sönme seviyeleri üzerindeki etkileri, gerilimin tepeden tepeye değerinin bir fonksiyonudur. Tepe gerilimi, temel ve harmonik gerilim arasındaki faz ilişkisine bağlıdır (Arrilaga vd., 1985).



Şekil 5.26 Bir blokaj devresiyle ölçülen harmonik akımları

Burada I_{n+} ve I_{n-} , birim değerleri; $n+$, $1+3k$ harmonik mertebelerini; ve $n-$, $1-3k$ harmonik mertebelerini göstermektedir. Bu ifade ile olası mil burulma titreşim problemlerinin ön hesaplanması mümkündür.

Örnek olarak 5. ve 7. harmonikler için sırasıyla 0.03 ve 0.02 p.u. makine akımlarına yol açan ve yaklaşık toplam harmonik distorsiyonu % 4 olan bir besleme gerilimin dikkate alalım. Eğer her iki harmoniğin faz açısı aynıysa, 50 Hz frekans ve anma geriliminde çalışan bir makinede, momentin 300 Hz frekansında ve 0.01 p.u. genliğinde değişken bir bileşeni olacaktır. Eğer harmonikler zıt fazda ise momentin genliği 0.05 p.u. olacaktır.

5.1.3.1 Kablo ve İletim Hatlarının Modellenmesi

İletim hatları için, dengeli ve dengesiz yüklenmeyi göz önüne alan modellere gerek vardır. Bu modellemede, hat parametrelerinin (R, L, C) lineer oldukları ve zamanla değişmedikleri kabul edilmiştir.

Bir iletim hattı için genel hat parametreleri, omik direnç (R), endüktans (L) ve kapasite (C)'dir.

Bunlardan R direnci üzerinde, akımın karesiyle değişen harmoniği, R direnci üzerinde bir Joule kaybı oluşturur. Örneğin; n . akım harmoniğinin R direncinde oluşturacağı kayıp $I_n^2 \times R$ 'dir. Bütün bu harmoniklerin Joule kayıpları toplamı sinüs biçimli olmayan ve içinde süperpoze olmuş bir doğru akım bileşeni bulunmayan bu akımın efektif değerinin vereceği Joule kaybına eşit olacaktır.

Alternatif akım bir iletkenin geçtiğinde, iletken içinde doğurduğu alanın değişmesi nedeniyle bizzat iletken için Foucault akımları oluşturur. Diğer taraftan iletken için de bu gibi Foucault akımları, iletkenin içinden alternatif akım geçmeden de, dış alanların değişmeleri ile de oluşabilir. O halde alternatif akımda bu akımın iletkenin içinde doğurduğu magnetik alanın değişmesi ile iletken içinde endüklendiği Foucault akımları, iletkenin bir doğru akımın vereceği Joule kayıplarına göre daha fazla enerji kayıplarına neden olurlar. Bu fazla kayıp, akımın, Foucault akımları tarafından iletkenin yüzeylerine doğru sıkıştırılması, yani "deri etkisi" olayının sonucudur.

Doğru akımda iletken kesitinde her tarafta aynı olan omik direnç alternatif akımda, akımın sıkıştırılması sonucu iletken kesitindeki bu homojenliğini kaybeder ve iletkenin omik direnci iletken içinde çok büyümüş ve yüzeylere doğru sabit kalmış gibi gözükür. Sonuç olarak bu

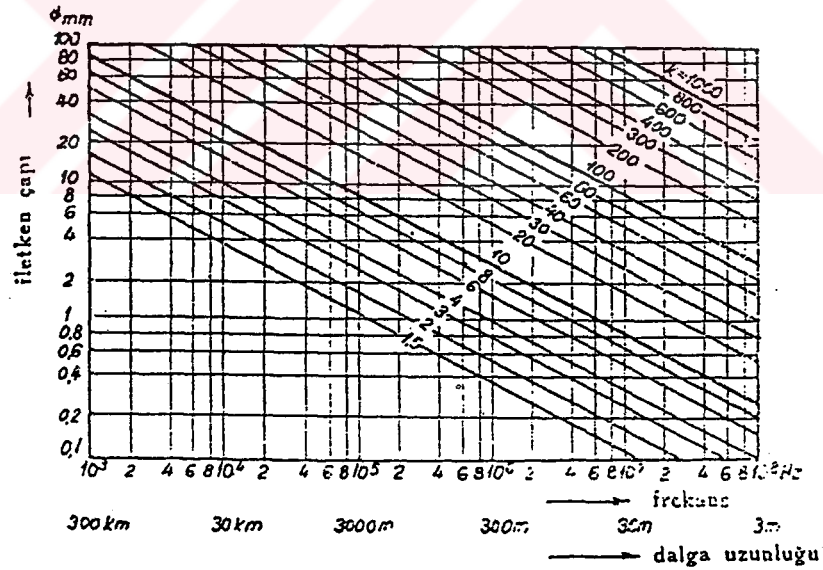
durum, iletkenin omik direncine bir parça büyümüş olarak etkir. Yani alternatif akımda iletken direnci büyür.

Doğru akım direnci R_{DC} ve alternatif akım direnci R_{AC} olmak üzere, bu iki değer arasında,

$$R_{AC} = k \times R_{DC} \quad (5.37)$$

ilişkisi vardır. Buradaki k , daima 1'den küçük bir sayıdır. Bir iletken içinde endüklenen Foucault akımlarının verecekleri akım yoğunluğunu bulmak için o iletken içinde alternatif akımla endüklenen ayrık akım hatlarının iletken merkez ekseninden olan mesafelerine göre akım yoğunluklarını saptamak gerekir. Sonuçta, yükselen frekansla ayrık akım çizgileri gittikçe iletken yüzeyine doğru sıkışır.

Yapılan incelemelerden, direnç büyümesinin (k katsayısı) iletken çapı ve frekansla ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Yuvarlak kesitli iletkenler (hat iletkenleri gibi) için, k direnç oranının frekans ve iletken çapıyla değişimi Şekil 5.27'de gösterilmiştir.



Şekil 5.27 Doğru akım direncine göre bakır elektrik direncinin çeşitli frekanslardaki artışı

Bakırın dışındaki iletken malzemeleri için (örneğin, iletim hatlarında alüminyum kullanılması) k oranını bulmak için, bakır için kullanılacak değeri "malzeme direnç faktörü $\mathfrak{F}$ " ile çarpmak gerekir. Örneğin alüminyum için $\mathfrak{F} = 0,74$ 'tür (Duman, 1989).

Harmonik için hattın omik direnci R_n ,

$$R_n = R_{DC} \times k_n \quad (5.38)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Diğer taraftan, iletken çapı ve iletkenler arası uzaklığın bir fonksiyonu olan hat endüktansı, hattın çaprazlanmış olduğu varsayımı ile,

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ (H/km)} \quad (5.39)$$

yazılabilir. Burada D_m iletkenlerin “geometrik ortalama açıklığı” ve D_s de iletkenin “geometrik ortalama yarıçapı”dır. Hat için “hat reaktansı” önemlidir. Buna göre n. harmoniğe ilişkin hat reaktansı,

$$X_{Ln} = 2\pi f_1 n L = n X_{L1} \text{ (}\Omega/\text{km)} \quad (5.40)$$

olacaktır. f_1 temel dalga frekansı ve X_{L1} de temel frekansa karşılık düşen hat reaktansıdır.

Son olarak hat kapasitesi,

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 10^3}{\ln \frac{D_m}{D_s}} \text{ (F/km)} \quad (5.41)$$

şeklinde ifade edilebilir. ϵ_0 boşluğun geçirgenliği olup $8,85 \cdot 10^{-9}$ F/m dir. Hesaplarda hattın kapasitif reaktansı kullanıldığına göre, n. harmoniğe ilişkin hattın kapasitif reaktansı,

$$X_{Cn} = \frac{1}{2\pi f_1 n C} = \frac{1}{n X_{C1}} \text{ (}\Omega/\text{km)} \quad (5.42)$$

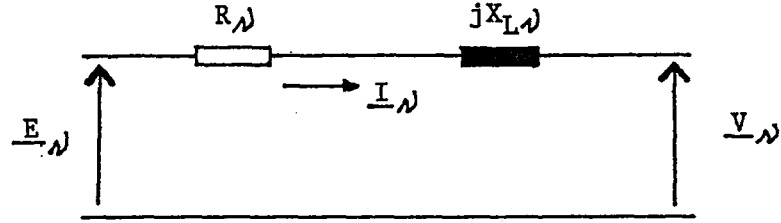
olacaktır. X_{C1} temel frekansa karşılık gelen hattın kapasitif reaktansıdır. Kompleks düzlemde ise, n. harmonik için,

$$Z_n = R_n + jX_{Ln} \text{ (}\Omega/\text{km)} \quad (5.43)$$

$$X_{Cn} = -jX_{Cn} \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

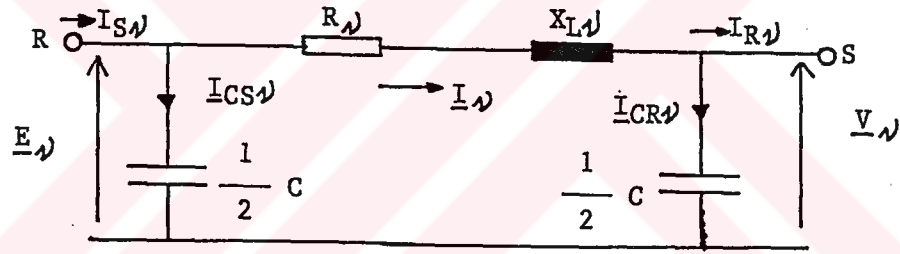
bağıntıları yazılabilir.

İletim hatları, uzunluklarına göre, kısa uzunlukta, orta uzunlukta ve uzun iletim hattı olarak sınıflandırılabilir. Ortalama 100 km'ye kadar olan hatlar kısa iletim hattı olarak göz önüne alınır. Bu tip hatlarda kapasite etkisi ihmal edilir ve hat, basit R, L devresi gibi çözülebilir.

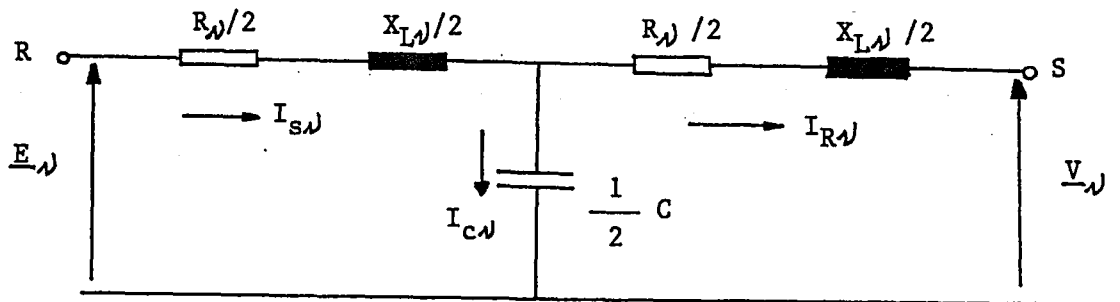


Şekil 5.28 Kısa uzunlukta bir iletim hattının n. harmonikte tek-hat diyagramı. (E hat başı gerilimini ve V hat sonu gerilimini göstermektedir.)

Orta uzunluklardaki hatlarda hat kapasiteleri tamamen ihmal edilmez; hattın belirli noktalarına toplanmış gibi düşünülebilir.

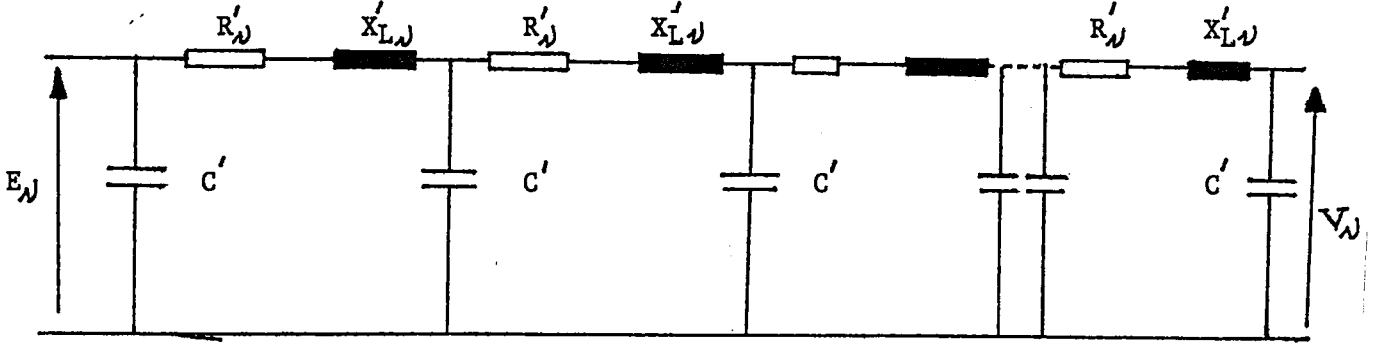


Şekil 5.29 Orta uzunlukta bir iletim hattının n. harmonikte tek-hat diyagramı (π modelindeki bu devrede, “S”, indisi hat başını, “R” indisi ise hat sonunu göstermektedir.



Şekil 5.30 Orta uzunlukta bir iletim hattının n. harmonikteki tek-hat diyagramı. (T devre modeli)

Yaklaşık 300 km'nin üzerindeki iletim hatlarının hesapları ve eşdeğer devreleri, gerçeğe uygun olarak öngörülür. Başka bir ifadeyle, hat boyunca empedans ve admitansların (hat kapasitelerinin) hat boyunca düzgün dağıldıkları kabul edilir (Şekil 5.31).



Şekil 5.31 Uzun bir iletim hattının n. harmonikte tek-hat diyagramı

5.1.4 Yüksek Frekanslı Geçici Gerilimlerin Elektrik Makinaları Üzerinde Etkileri

Endüstri ve güç sahaları AC asenkron motorları büyük miktarda kullanmaktadır. Birçok durumda değişken hız sürücülerinde motorlar PWM gerilim inverterleri ile kullanılır. Yakın gelecekte ayrıca sabit hız AC asenkron motor sürücülerin çoğu değişken hız sürücüler ile değiştirilecektir. Frekans veya gerilim konverterleri ile beslenen ayarlanabilir hız sürücülerin sayısı artacaktır, çünkü enerjinin idareli bir şekilde kullanılması acil olmuştur [5].

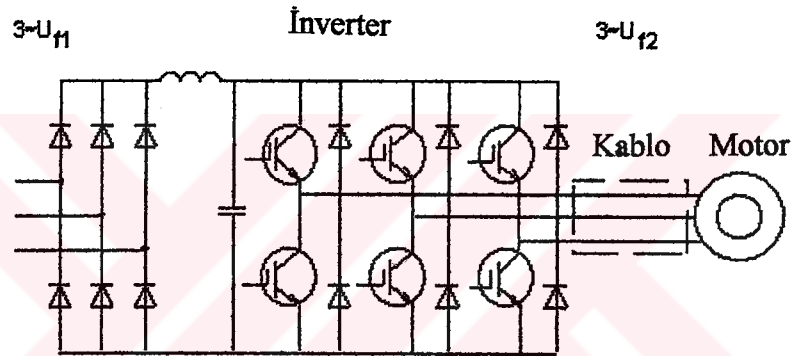
AC motor ve inverterlerin birlikte kullanılması motor terminallerindeki aşırı gerilim problemini yükseltecektir. Bunun sebebi, güç konverterlerinin komütasyon prosesinin gerilim dalgalanmalarına ve kablolu hat ve motor sargılarında çoğalmalarına sebep olmasıdır. Genellikle geçici gerilim olayları inverter-kablo-motor sistem dağıtılmış parametre ve kablo uzunluğunun fonksiyonudur.

Güç konverteri ve elektrik motorları arasındaki kablonun uzunluğu teknolojik araca bağlıdır. Çoğu durumda kablo uzunluğu 10 metreden fazla olabilir. Transformatör boyutunu küçültmek için çoğu durumda frekans konverterli yüksek frekans enerji iletim sistemleri kullanılır. Yüksek frekanslı komütasyon işleminin ve kısa yükselme-zamanlı pulsların görüldüğü bütün bu uygulamalar için gerilim dalgalanmaları ve yalıtım problemleri olağandır.

Ayrıca, Doğu Avrupa ve Rusya'da binlerce AC asenkron motor, IEC Standartları ve Avrupa normlarıyla uyumsuzluk içerisinde. Yalıtım maddesinin kalitesi, üretim teknolojisi ve bu motorların güvenilirliği çoğunlukla daha düşüktür.

5.1.4.1 Teorik düşünceler

Şekil 5.32 inverter beslemeli AC sürücüsünün güç devresini gösterir. Modern PWM inverter kısa ve yüksek frekansta (2...20 kHz) pulsalar üretir. İdealde, bu pulsalar dikdörtgendir, ancak gerçek pulsalar, anahtarların açık ve kapalı zamanlarının sınırlı bir süreye sahip olması sebebiyle trapez şeklindedir. MOSFET, IGBT ve tristör inverterleri için, puls yükselme ve alçalma zamanları süre olarak farklılık gösterir (Çizelge 5.8). İnverterin içinde iletkenlerin endüktansı ve kapasitansı puls formunu etkiler (Lehtla, 1995).



Şekil 5.32 İnverter beslemeli AC sürücü güç devresi

Çizelge 5.8 Güç yarıiletkenlerin anahtarlama parametreleri

Eleman	Açık olma zamanı, μs	Kapalı olma zamanı, μs
Güç MOSFETleri	0.1 - 0.5	0.3 - 1.0
IGBT	0.2 - 1.0	0.7 - 4.0
Tristörler (SCR)	4 - 10	100 - 300
GTO	2 - 5	10 - 25

Güç inverteri ve motor arasındaki kablo tüm elektrik sürücülerinin en gerekli elemanıdır. Bundan dolayı kablolar kısa ve uzun kablolar olarak ayrılabilir. Kısa kablolar parçalı RLC parametrelili bir devre elemanı olarak ifade edilebilir. Uzun kablolar dağıtılmış parametreler

per metre direnç R_0 , endüktans L , kapasitans C_0 , yalıtım iletkenliği G_0 ile veya karakteristik empedans Z_C ile tanımlanabilir.

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L_0}{G + j\omega C_0}} \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (5.44)$$

Yayılma faktörü k_p ,

$$k_p = \sqrt{(R + j\omega L_0)(G + j\omega C_0)} \quad (5.45)$$

Z_C için tipik değer 30 ile 80 Ω arasındadır. Puls veya sinedalga kablo üzerinden bağlı dielektrik geçirgenliğin ϵ_r fonksiyonu olan sınırlı bir hızla yayılır. ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$, $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$).

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (5.46)$$

Kablo için, bağlı geçirgenlik ϵ_r , 3 ile 8 arasında ve hız v , 120...180 $\text{m}/\mu\text{s}$ arasında değişir. Bundan dolayı kablo hatlarında puls yayılmasının modellenmesi kablo uzunluğuna bağlıdır. Kısa kablolar için, model parçalı parametrelili kablo eşdeğer devresinden oluşur. Uzun kablolar için, iletim hattının eşdeğer devresi ve dağıtılmış parametreler kullanılmasıdır. Eğer kablo uzunluğu, kritik uzunluk l_{cr} 'i aşarsa ($l > l_{cr}$), ikinci tip model kullanılmalıdır.

$$l_{cr} = \frac{v \cdot t_r}{2} \quad (5.47)$$

Burada t_r pulsun yükselme zamanıdır. Bu durumda, iletim hattı üzerinden geçen puls, kablonun sonuna $t_r/2$ 'lik bir süre sonunda döner. Daha sonra, ikinci yansıma meydana gelir ve yansıyan puls gerilim başlangıç puls gerilime eklenir. İdeal yansıma ile, toplam gerilim maksimumu, başlangıç pulsun pik geriliminden iki kat daha yüksektir. Motordaki gerçek yansıma faktörü k_{refm} ,

$$k_{refm} = \frac{Z_m - Z_C}{Z_m + Z_C} \quad (5.48)$$

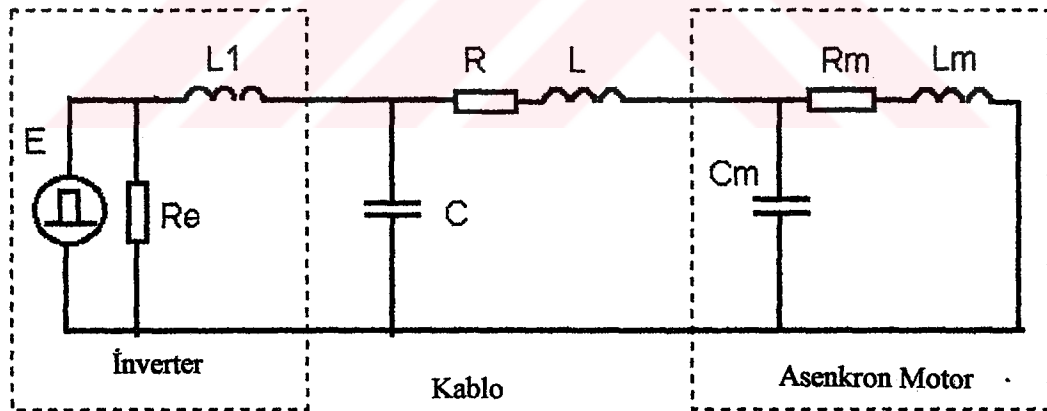
dir. Burada Z_m motor empedansıdır, ve motorun tam endüktansı L_m ve stator sargısı kapasitansı C_m 'nin fonksiyonu olarak,

$$Z_m = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}} \quad (5.49)$$

şeklinde ifade edilebilir. Z_m 'nin tipik değeri 100 ile 1000 Ω arasındadır. Z_m yükseldikçe motor küçülür [5].

5.1.4.2 Modeller

Şekil 5.33 kısa uzunlukta bir kablo için $l < l_{cr}$ ve kablonun parçalı RLC parametreleri kullanıldığında, inverter beslemeli AC motorda aşırı gerilimlerin simülasyonu için eşdeğer devreyi gösterir. Eşdeğer devre matematiksel modelleme ve Pspice simülasyonu ile incelenebilir. Motor uçlarındaki aşırı gerilimler motor devresindeki salınımlardan meydana gelir. AC asenkron motor sargılarının kapasitansı C_m 2 nF- 0,2 μ F civarındadır. Şekil 5.34 motor uçlarındaki gerilim geçici olayını gösterir. Gösterilen model, inverter beslemeli AC sürücüsünün yüksek frekans eşdeğer devresi olarak görülebilir (Lehtla, 1995).

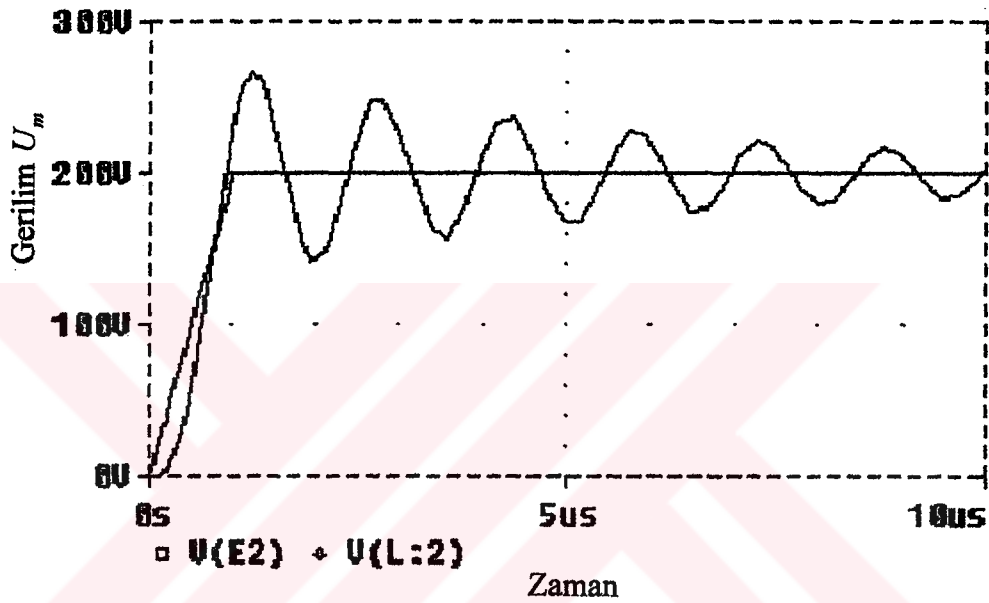


Şekil 5.33 Kısa uzunlukta bir kabloda aşırı gerilimler simülasyonu için eşdeğer devre

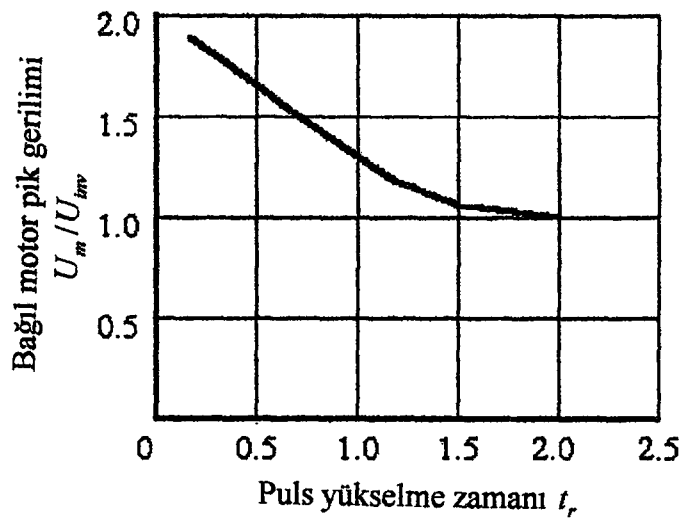
Salınımların genlik ve frekansı motor kapasitansı C_m ve kablo parametrelerinin fonksiyonudur. Gerçek motor sargısının kapasitansı sargının çeşitli bölümlerine dağıtılır. Bundan dolayı pik gerilimi sargının herhangi bir bölümünde farklılık gösterir.

Modelin kaynak gerilimi E değişken bir puls formlu trapez şeklinde puls kaynağıdır. Motor gerilim geçici olayları, puls yükselme zamanı değiştğinde incelenir. Şekil 5.35 bağıl pik gerilimi U_m/U_{inv} ’ne karşı puls yükselme-zamanı t_r fonksiyonunu gösterir.

İnverter ve kablo arasında veya kablo ve motor arasında uygun bir RLC filtre kullanılırsa, motor terminal gerilimindeki pik değer ve salınımlar azaltılabilir. Ancak her filtre ek kayıplara neden olur. Ayrıca, aşırı gerilimler her bir motor türü için uygun bir besleme kablo hattı seçerek azaltılabilir.

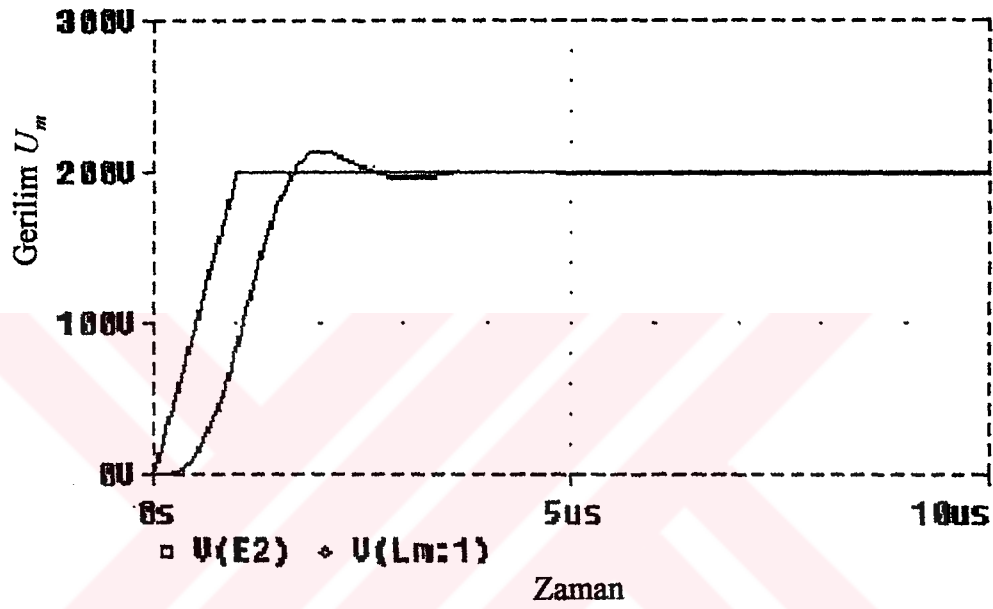


Şekil 5.34 Motor uçlarındaki gerilim geçici olayı



Şekil 5.35 10 m'lik bir kablo için puls yükselme zamanının fonksiyonu olarak bağıl pik gerilimi

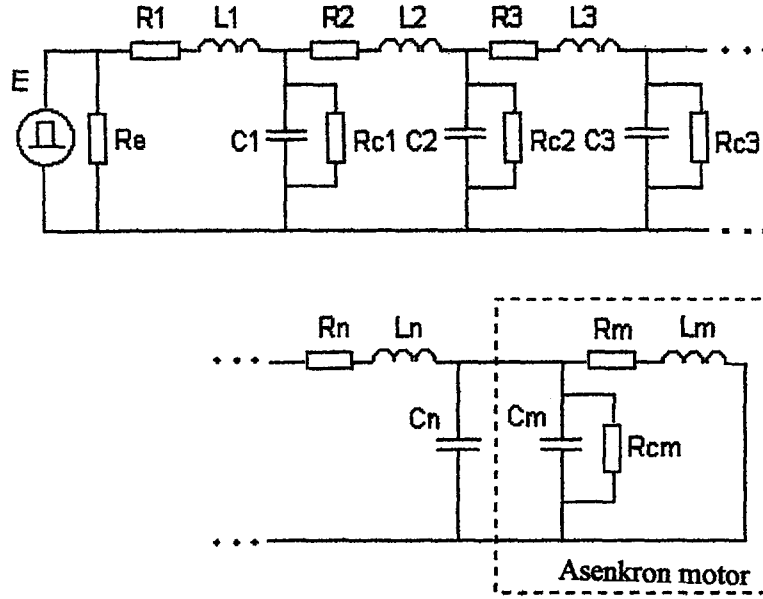
$l > l_{cr}$ kablo uzunluğu için, iletim hattının modeli kullanılmalıdır. Pspice simülasyonu ile kablo hatlarında puls yayılmasını incelemek için uygun bir model tesis etmekte iki olasılık vardır. İlk olarak kablo birkaç RLC hattı dizisi olarak modellenebilir. İkinci olarakta, iletim hattının Pspice'ta hazırlanmış modeli kullanılabilir. Herhangi bir durumda, inverter, motor ve kablo bağlantıları ayrı R, L ve C elemanları ile modellenmelidir.



Şekil 5.36 Filtrelenmiş puls örneği

Şekil 5.37 RLC hat dizili kablo modelinden oluşan, inverter beslemeli AC sürücüsünün yüksek frekans eşdeğer devresini gösterir. Kablo hattının parametreleri dizideki hatların sayısı ile uyumludur. Eğer $n > 10$ ise iyi sonuçlar elde edilir, ancak kablodaki puls yayılmasının tüm etkileri $n = 5...6$ olduğunda gözlenebilir.

İnverter ve kablo arasında veya kablo ve motor arasında uygun bir RLC filtre kullanılırsa, motor terminal gerilimindeki pik değer ve salınımlar azaltılabilir. Ancak her filtre ek kayıplara neden olur. Ayrıca, aşırı gerilimler her bir motor türü için uygun bir besleme kablo hattı seçerek azaltılabilir.



Şekil 5.37 İverter beslemeli AC sürücüsünün yüksek frekans eşdeğer devresi

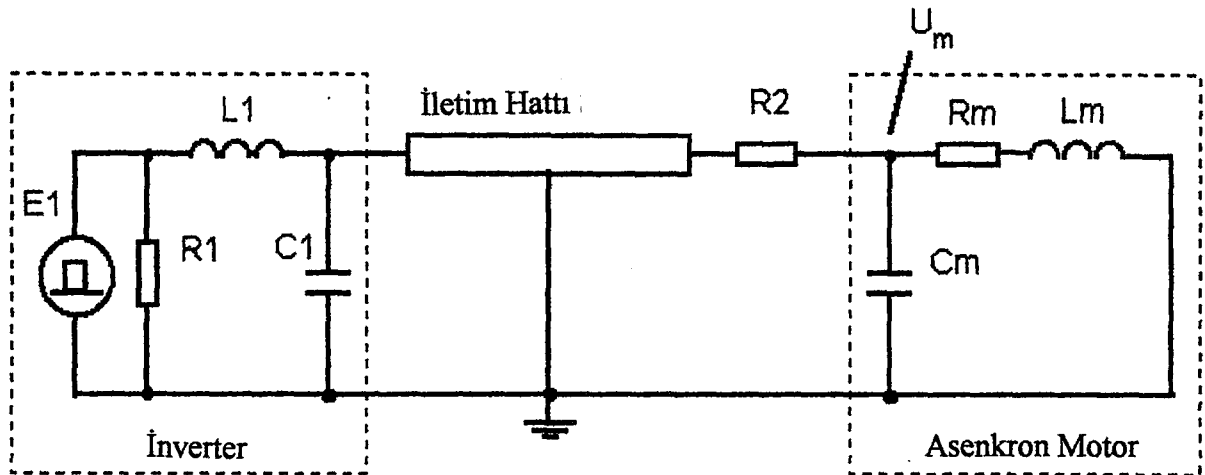
Şekil 5.38 İletim hattının Pspice modelinden oluşan inverter beslemeli AC sürücü yüksek frekans eşdeğer devresini gösterir.

Pspice simülasyonu sonucu olarak, üç farklı kablo uzunluğu için gerilim geçici olayları hesaplanmıştır.

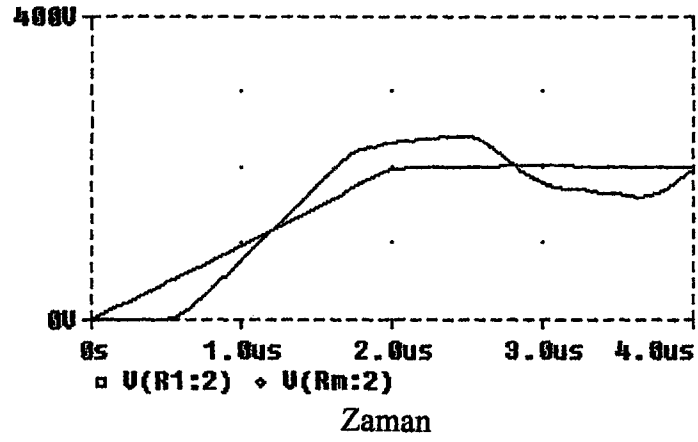
Şekil 5.39 $l = 0,5l_{cr} = 0,25t_r$ durumundaki geçici gerilim olayını gösterir.

Şekil 5.40 $l = l_{cr} = 0,5t_r$ durumundaki motor geçici gerilim olayını gösterir.

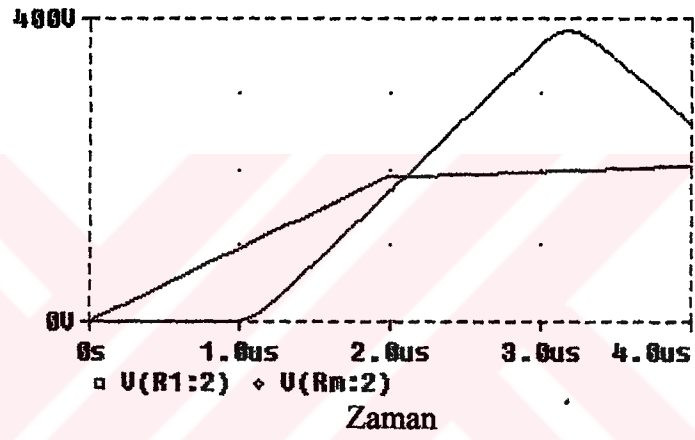
Şekil 5.41 $l = 1,5l_{cr} = 0,75t_r$ durumundaki geçici gerilim olayını gösterir.



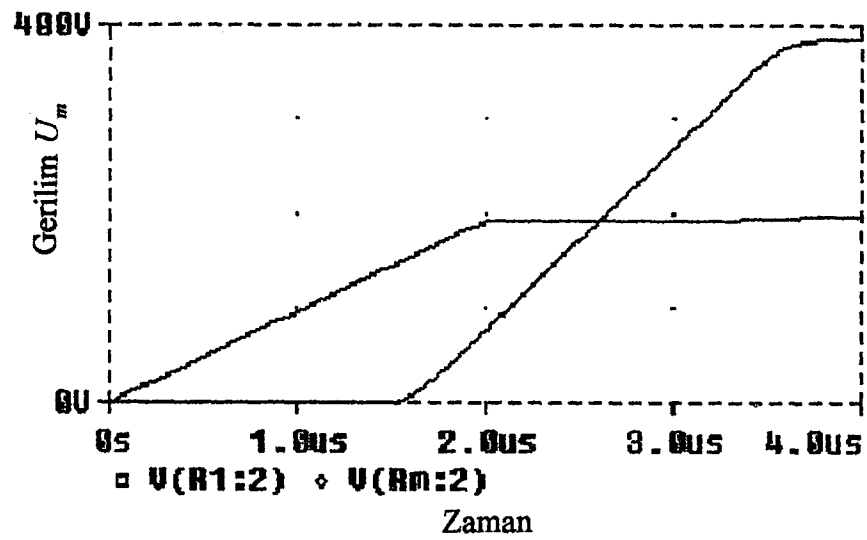
Şekil 5.38 Puls yayılma ve yansıma çalışması için inverter beslemeli motor sürücüsünün yüksek frekans eşdeğer devresi



Şekil 5.39 AC asenkron motor geçici gerilimi

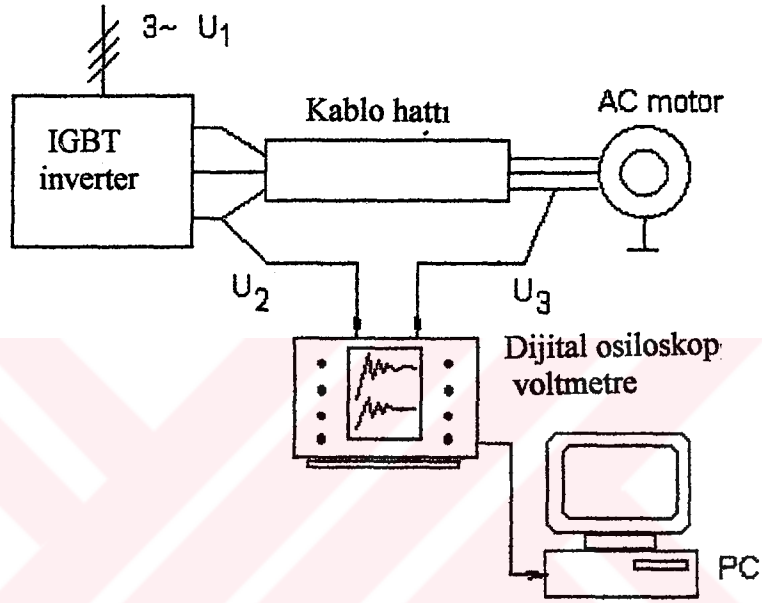


Şekil 5.40 Kritik kablo uzunluklu AC asenkron motor geçici gerilimi

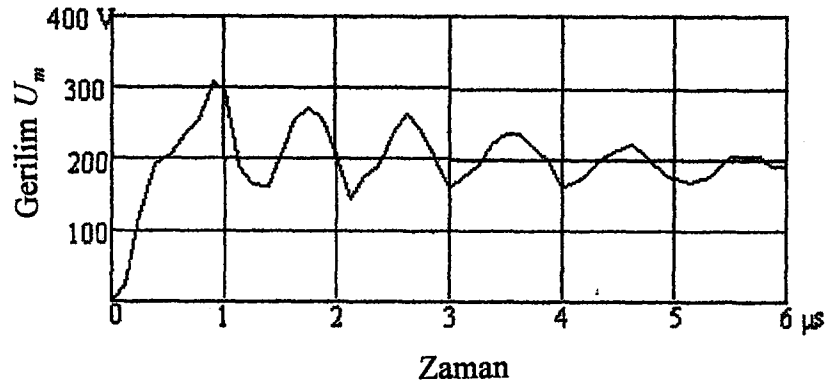


Şekil 5.41 Kablo uzunluğu kritikten uzun olduğunda AC motor geçici gerilimi

Komutasyon geçici olaylar deneysel olarak IGBT inverter beslemeli 0,25'ten 2,2 kW güç değişimine ve 1 ile 25 m arasındaki uzunlukta besleme kablosuna sahip AC asenkron motor için incelenmiştir. Şekil 5.42 inverter ve motor terminalleri üzerindeki geçici gerilimlerinin deneysel olarak nasıl belirlendiğini gösteren blok şema verilmiştir. Dijital bir osiloskop ve 100 nanosaniye kayıt zamanı burada kullanılmıştır. Bu sebeple deney sonuçları teorik olarak modellenen ve simülasyonu yapılan geçici olaylarla karşılaştırılmıştır. Şekil 5.43 hesaplanan geçici olayla (Şekil 5.34) koşulların aynı olduğu kayıtlı gerilim geçici olayını gösterir.



Şekil 5.42 Gerilim geçici olayın inverter ve AC motor üzerinde deneyle belirlenmesi



Şekil 5.43 Kablo uzunluğu 10 m olduğunda deneyle kaydedilmiş motor geçici gerilimi

İnverter beslemeli AC sürücüler kullanımı maksimum pik gerilimleri ve motor sargılarının yalıtım direnci ile belirlenir. Pik gerilimi, komütasyon prosesi ile belirlenir. Maksimum U_m 'e karşı puls yükselme zamanı IEC normlarında ve motor sargılarının standartlarında belirtilmiştir.

Teorik olarak izolasyon çökme gerilimi U_{bd} , frekans f , dielektrik iletkenlik ε , dielektrik kayıplar $\tan \delta$ ve izolasyon katsayısı K 'nın fonksiyonudur.

$$U_{bd} = K \sqrt{\frac{1}{f \cdot \varepsilon \cdot \tan \delta}} \quad (5.50)$$

Bundan dolayı, kısa yükselme zamanlı puls (daha yüksek frekans) yalıtım çökme gerilimini düşürür. İnverter beslemeli AC sürücüsünün yüksek frekans modelleri AC asenkron motor terminallerinde gerilim geçici olayların simülasyonu için uygundur [5].

5.2 Harmonik Kayıpların Analizi

Akım, gerilim gibi sistem büyüklüklerinin sinüsoidal oldukları varsayılarak gerçekleştirilen kayıp analizi, bu büyüklüklerinin non-sinüsoidal olması durumunda bazı değişikliğe uğrar. Bu yüzden akım ve gerilimin fonksiyonlarına bağlı olan işletme kayıpları, bu büyüklüklerin harmonikli değerlerine göre yeniden düzenlenmelidir. Bu düzenleme için sistemde harmonik akım dağılımları belirlenmeli, harmonik gerilim spektrumları elde edilmelidir. Bu değerler kullanılarak non-sinüsoidal duruma göre kayıplar hesaplanır.

5.2.1 Harmoniklerin Sebep Oldukları Ek Omik Kayıplar

Genel olarak, iletim hatlarında, motor, generatör, transformatör gibi elemanların sargılarında ve omik direnç içeren tüm akım yolu elemanlarında oluşur. İletim hatlarındaki omik kayıplar, güç akışı sonrasında hesaplanan salınım barasının gücü yardımıyla, diğer elemanlarda ise analitik bağıntılar veya ölçme-test yöntemleriyle belirlenir.

Elektrik makineleri bilezik, fırça kollektör, endüvi, rotor, stator, kutuplar, yardımcı kutuplar, kompanzasyon sargıları ile denkleştirme irtibatları gibi içlerinden akım geçen bir çok kısımlardan oluşmuştur. Bütün bu kısımlardan akan elektrik akımları bunların omik dirençlerinde enerji kayıplarına sebep olurlar.

Elektrik akımının madde omik direncindeki enerji kayıpları I^2R ile verilebilir ve bu basit ifadedeki enerji kaybı maddede elektronların hızlanmaları esnasında atom iyonları ile çarpışmalarından bir enerjinin kaybolması dolayısıyla bir sürtünme ısısının oluşması şeklinde meydana gelir (Duman, 1989).

Genel olarak elektrik makinelerinin bütün sargıları, kollektörleri ve hatta bilezikleri bakırdan yapılır. Bu sebepten akım geçiren bu kısımların omik dirençlerindeki Joule kayıplarına elektrik makinelerinin bakır kayıpları denir ve makinenin bu akım ısı kayıpları bir çok literatürde bu isim altında toplanır. Halbuki bazı hallerde akım geçiren kısımlar bakırdan yapılmamaktadır. Mesela asenkron makinelerin sincap kafesli rotor sargıları alüminyumdan ve makine bilezikleri genel olarak bronz, pirinç ve çelikten yapılır. Hatta bazı hallerde, özellikle mikro elektrik makinelerinin bizzat sargıları için, sigortalarda kullanılan gümüşte kullanılabilir. Biliyoruz ki bütün bu maddelerin özgül dirençleri bakıra nazaran farklıdır.

Diğer taraftan elektrik makineleri yüklendikleri zaman makinelerin bütün bu kısımlarından genellikle yük akımı geçer. O halde bakır kayıpları makinelerin yükteki kayıplarının esasını teşkil ederler.

Makine kısımları Joule kayıplarının hesabına gelince: bunun için genel olarak şunlar söylenebilir: Elektrik makinelerinin cinsine göre, belirtilen kısımlardan doğru akım veya alternatif akım akar. Bu kısımların Joule kayıplarının I^2R basit formülündeki omik direnç, akım cinsine göre birbirinden farklı değerler arz eder. Alternatif akımdaki omik direnç doğru akımdaki omik dirence nazaran büyüktür. Non-sinüsoidal yükler için bu kayıplar aşağıda ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Harmonikli akım akan şebekeden;

$$S = \left[\sum_{n=1}^N S_n^2 \right]^{1/2} \quad (5.51)$$

Şeklinde ifade edilen görünür gücü çekerler. Burada S_n , n. harmoniğe ait görünen güçtür. n=1 için temel bileşen (yük) gücü olduğuna göre şebekeden çekilen harmonik güç,

$$S_h = \left[S^2 - \sum_{n=2}^N S_n^2 \right]^{1/2} \quad (5.52)$$

olacaktır. Omik değeri R olan bir iletken den geçen ve N tane harmoniği içeren bir akımın ani değeri,

$$i(t) = \sum_{n=1}^N i_n(t) \quad (5.53)$$

olmak üzere efektif değerinin,

$$I = \left[\sum_{n=2}^N I_n^2 \right]^{1/2} \quad (5.54)$$

olduğu bilinmektedir. Bu durumda n. harmonik için “akım harmoniği oranı” tanımlanırsa,

$$\alpha_n = I_n / I_1 \quad (n=2, 3, \dots, N) \quad (5.55)$$

ve üç fazlı sistemde oluşacak toplam joule kayıpları,

$$P_K = 3 \sum_{n=1}^N R_n I_n^2 \quad (5.56)$$

yazılabilecektir. Buradan I_n , n. harmonik akımın efektif değeri olup R_n , hattın n. harmonik frekansındaki direncini gösterir. Direnç değerinin frekansla artması ihmal edilirse,

$$P_K = 3.R.I^2 = 3.R.I_1^2 \left(1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) \quad (5.57)$$

şeklini alır. Formülden de görüldüğü gibi, akım harmoniği arttıkça temel bileşen omik kayıplarına ilave olan kayıplarda etkin olmaktadır.

5.2.2 Harmoniklerin Sebep olduğu Ek Demir Kayıpları

Ferromagnetik malzemeden nüvesi olan elemanlarda (transformatörler ve asenkron motorlar gibi), demir kayıpları oluşmaktadır. Bu kayıplar elemana uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Uygulanan bu gerilimin non-sinüsoidal olması bu kayıplar da farklılık gösterir.

Boşta çalışan bir transformatörün şebekeden çektiği akım, bilindiği gibi iki bileşenden teşekkül eder. Bunlardan biri daha büyük olan reaktif akım ve diğeri nispeten daha küçük olan aktif akım bileşenleridir. Transformatör boşta çalışma akımının reaktif bileşeni magnetik alan meydana getirmeye yarar ve mıknatıslama akımı olarak adlandırılır. Buna mukabil aktif bileşenin küçük bir kısmı demir kayıplarını karşılar, çünkü demirde değişken bir magnetik akı meydana getirmek, ancak bir kayıp enerji sarfetmekle mümkün olur. Demir kayıpları histerezis ve fuko kayıplarından teşekkül eder (Çakır, 1985).

5.2.2.1 Histerezis Kayıpları

Demir çekirdeğin mıknatıslanmasının değiştirilmesi için lüzumlu olan kayıp enerjisidir. Fiziksel bakımdan ısı olarak meydana çıkar.

Transformatörün magnetik akısı değişken bir akı olduğundan, demir çekirdekte her bir periyotta iki defa magnetik akının yönünü değiştirir ve böylece bir histerezis çevrimi tamamlanmış olur. Böylece histerezis kayıpları P_H , f frekansı ile orantılıdır. Bundan dolayı harmonikli gerilimler; frekansları yüksek olduğu için histerezis kayıplarını artırırlar (Çakır, 1985).

Histerezis kayıpları endüksiyona da tabidir. Endüksiyon büyüdükçe bu kayıplar büyür. Buna mukabil demir ne kadar yumuşak ise kayıplar da o kadar azdır. Histerezis kayıpları mesela şebeke tarafından elektrik enerjisi şeklinde kapatılmış olacaktır.

Bunun dışında indüksiyonun B (gauss) karesiyle orantılı olarak artar ve nihayet kullanılan demir cinsine bağlıdır (σ_h , malzeme sabiti).

Bu kayıplar genel olarak f ve $B^{1.6}$ ile orantılıdır. Steinmetz'e göre spesifik histerezis kaybı,

$$P_h = \eta \cdot f \cdot B_{\max}^{1.6} \frac{1}{7.7 \times 10^4} \text{ Watt/kg} \quad (5.58)$$

ile verilmiştir. B (Gauss) endüksiyon, η ise demir cinsine bağlı sabit bir değerdir. Bu formül 10000 Gauss'un altındaki endüksiyon değerleri için geçerlidir. Bu değer üstündeki endüksiyonlarda gerçektekinden küçük histerezis kayıpları verir. Richter'e göre basit ve pratik olarak histerezis kayıpları,

$$P_h = \sigma_h \left(\frac{f}{100} \right) \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \text{ Watt/kg} \quad (5.59)$$

ile hesap edilir. Bu formül $B \geq 10000$ Γ için de geçerlidir. Yine Richter'e göre daha hassas olarak,

$$P_h = \alpha \left(\frac{f}{100} \right) \cdot \left(\frac{B}{10000} \right) + \beta \left(\frac{f}{100} \right) \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \text{ Watt/kg} \quad (5.60)$$

ile hesaplanır.

Demir çekirdeğin kg ağırlığı G_{fe} ile gösterilirse, transformatörün histerezis kayıplarını karşılamak için gerekli güç P_h , yeni bir saatteki kayıp enerjisi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_h = G_{fe} \cdot \sigma_h \left(\frac{f}{100} \right) \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 10^{-3} \text{ kWatt} \quad (5.61)$$

Buradaki σ_h malzeme sabitidir. Bu değer kullanılan demir levhanın (saç) cinsine ve kalınlığına göre değişir. Örneğin 0.5 mm kalınlığındaki yüksek alaşımlı saçın σ sabiti 2.85 iken, aynı kalınlıktaki normal saçın σ sabiti 4.4'tür. Aynı şekilde 0.35 mm kalınlığında

yüksek alaşımlı saçın σ sabiti 2.4 iken, normal saçınki 4.7'dir. Bu değerler bize kullanılan malzemenin cinsinin ve kalınlığının, histerezis kayıpları üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir [26].

5.2.2.2 Fuko Akımı Kayıpları

Periyodik akı değişiklikleri neticesinde demir çekirdekte fuko akımları meydana gelir bu akımlar kendilerini meydana getiren magnetik akıya zıt yönde bir akı meydana getirirler ve bunu karşılamak için münzam mıknatıslanma akımına ihtiyaç gösterirler. Bundan başka fuko akımları demir çekirdekte omik kayıplar meydana getirirler, buna fuko akımı kayıpları denir. Bunları mümkün mertebe alçak tutabilmek için, bilindiği gibi transformatörün çekirdeği saçlardan (kalınlığı 0.35 ila 0.5 mm olan) yapılır. Bu saçlar araya konan kağıt tabakalarla veya laklamak suretiyle birbirlerinden izole edilirler. Bundan başka demirin elektriksel iletkenliğini azaltmak için silisyumlu saçlar kullanılır. Fuko akımı kayıpları akımın karesi ile orantılı olarak artarlar; böylece endüksiyonun yani frekansın karesi ile orantılıdır. Malzemenin tertibinin ve saç kalınlığının etkisi bir malzeme sabiti σ_f ile ifade edilir (Çakır, 1985).

Genel olarak Foucault akımları, alternatif, rotatif veya pulzasyon yapan alanlar tarafından demirde, ve içinden alternatif akım akan iletkenlerde husule gelir. Tesirleri iki türlü olur;

- Foucault akımları da elektrik akımları olduklarından aktıkları ortamda Joule ısısı meydana getirirler ve bu şekilde elektrik enerjisinden bir kayba sebep olurlar.
- Foucault akımları mıknatıslayan esas alanı zayıflatırlar. Cismin yüzeylerine yakın bölgelerde meydana gelen bu akılar cismin orta nüvesini magnetik alana karşı siperler ve bu

şekilde güç hatlarının yoğunluğu cismin kesidi boyunca homojen olmaz. Bu histerezis kayıpları üzerine de tesir eder.

Bu tesislere Foucault akımlarının reaksiyonu denir.

J. J. Thompson'un hesaplarına göre Foucault akımları kalın levhalarda o kadar kuvvetlidir ki mesela kalın bir levha $f=100$ frekanslı bir alternatif alanı hatta 1/6 mm kalınlıktaki iki tane ince levha kadar bile geçirememektedir. Buna mukabil bu akımlar demiri aşırı derecede ısıtırlar.

Foucault kayıpları homojen dağılmış ve sinüs biçimli endüksiyonda genel olarak endüksiyon B 'nin, mıknatıslama frekansı f 'nin ve levha kalınlığı Δ 'nın karesi ile orantılıdır. Levha kalınlıkları normalize olduklarından formüllerde Δ 'yı ayrı olarak göstermeye gerek yoktur. Ve değeri cm cinsinden σ_f sabiti içinde dikkate alınmıştır (Duman, 1989)

Bu takdirde sinüs biçimli bir endüksiyonda ve normal bir levha kalınlığı için özgül Foucault kaybı,

$$P_f = \frac{4}{3\rho} \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10000} \right)^2 \text{ Watt / kg} \quad (5.62)$$

Demir çekirdeğin kg ağırlığı G_{fe} ile gösterilirse ,

$$P_f = G_{fe} \cdot \sigma_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10000} \right)^2 \cdot 10^{-3} \text{ kWatt} \quad (5.63)$$

olur. Burada σ_f malzeme sabitidir. Malzeme sabiti, normal sac'ta, 0.35 mm kalınlıkta 3.2; 0.5 mm kalınlıkta ise 5.6 olur. Yüksek alaşımlı sac'ta ise 0.35 mm kalınlıkta 0.6; 0.5 mm kalınlıkta ise 1.1 olur. Kullanılan sac kalın olursa veya alaşım miktarı az olursa, fuko kayıplarının artacağını söyleyebiliriz.

Eğer endüksiyon sinüs biçimli değilse ve levha kalınlığının da formülde gösterilmesi istenirse, o vakit levha kalınlığı Δ (cm) cinsinden olmak üzere özgül Foucault kaybı,

$$P_f = \frac{4}{3\rho} \left(\Delta \frac{f}{100} \cdot \xi_f \frac{B}{10000} \right)^2 \text{ Watt / cm}^3 \quad (5.64)$$

ile hesaplanabilir. B (Gauss), f (Per/san) ve özgül direnç ρ ($\Omega mm^2 / m$) cinsinden alınacaktır.

Veya yine bu durumda normal bir levha kalınlığı ve yüksek harmonikli bir endüksiyon eğrisi için aynı formül,

$$P_f = \sigma_f \cdot k_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10000} \right)^2 \text{ Watt / kg} \quad (5.65)$$

şeklini alır. Bu anlamda şekil faktörü karelerinin oranı,

$$k_f = \left(\frac{\xi_f}{\xi_{\sin}} \right)^2 = \frac{B_1^2 + 4B_2^2 + 9B_3^2 + \dots}{B^2} \quad (5.66)$$

ile verilebilir.

5.2.2.3 Toplam Demir Kayıpları Formülleri

Bir transformatörün toplam demir kayıpları P_{fe} , histerezis ve fuko akım kayıplarının toplamı olarak bulunur.

$$P_{fe} = P_h + P_f = G_{fe} \left[\sigma_h \frac{f}{100} + \sigma_f \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \cdot 10^{-3} \text{ kWatt} \quad (5.67)$$

$f=50$ konularak,

$$P_{fe} = G_{fe} (0,5\sigma_h + 0,25\sigma_f) \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \cdot 10^{-3} \text{ kWatt} \quad (5.68)$$

bulunur. $0,5\sigma_h + 0,25\sigma_f = \sigma_{fe}$ konularak nihayet transformatörün demir kayıpları için,

$$P_{fe} = G_{fe} \cdot \sigma_{fe} \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \cdot 10^{-3} \text{ kWatt} \quad (5.69)$$

ifadesi elde edilir.

Burada demirin kayıp sayısı σ_{fe} W/kg olarak konulur; bu transformatör sacı için büyüklük itibarıyla 1.1 ila 1.3 W/kg arasında bulunur. Nispeten az demir kayıpları elde edebilmek için magnetik bakımdan anizotrop saçların kullanılması tavsiye olunur.

Denklem (5.69)'da yegane değişken bir büyüklük B'dir. Sıfır mıknatıslanma akımının büyüklüğüne ve böylece primer geriliminin büyüklüğüne bağlıdır. İşletme geriliminin yaklaşık olarak sabit kalması halinde, bir transformatörün demir kayıplarının da sabit kaldığı kabul edilebilir, ve bu transformatör gerilim altında bulunduğu müddetçe geçerlidir.

Böylece bir transformatörün demir kayıpları P_{fe} dolayısıyla T saatlik bir işletme süresinde meydana gelen kayıp enerjisi,

$$W_{kfe} = P_{fe} \cdot T \text{ kWh} \quad (5.70)$$

Fakat incelenen şebekenin her bir transformatörü için demir kayıplarını yukarıdaki şekilde hesapla bulmak daima mümkün değildir. Çünkü ekseriyetle böyle bir hesap için gerekli olan konstrüktif verileri (demir kesiti, sarım sayısı) belli değildir. Ölçü ile bulmak da her zaman mümkün değildir.

Bu bakımdan pratik kayıp analizlerinde kaide olarak, demir kayıplarını muayene protokollerinden almakla iktifa edilir, ki bu bir şebekenin büyük transformatörleri için ekseriyetle mevcuttur. Küçük şebeke transformatörleri için de imalatçı firmaların kataloglarındaki verilerden yararlanılmalıdır.

Pratikte toplam demir kayıpları herhangi bir endüksiyon ve frekans (100 Per/san kadar) değerinde şu formülle hesaplanır.

$$P_{fe} = P_{10} \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \frac{f}{50} \text{ Watt / kg} \quad (5.71)$$

Eğer $f > 100$ Per/san ise,

$$P_{fe} = P_{10} \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} \text{ Watt / kg} \quad (5.72)$$

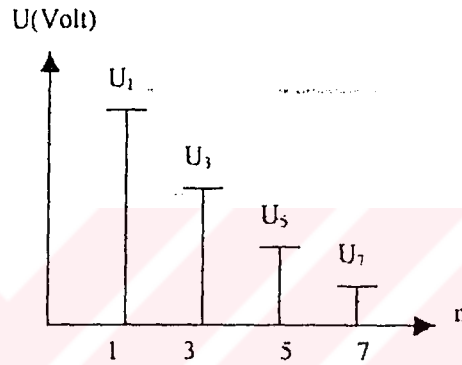
ile hesaplanacaktır. P_{10} kayıp faktörü, 0.35 mm kalınlığındaki normal sac'ta 3.15; yüksek alaşımlı sac'ta ise 1.35 olmaktadır.

Her iki formülde de $P_{10}(P_{15})$ demir kayıp sayısıdır. Bu kayıp sayıları fabrikalarca normalize dinamo sac'ları için Epstein veya başka bir demir muayene cihazı ile toplam demir kaybını vermek üzere kg başına Watt olarak tespit edilir ve bu şekilde levhalar piyasaya çıkarılır.

Her bir harmonik bileşen için demir kayıplarının tespitinde süperpozisyon yöntemi kullanılabilir. Enerji sistemindeki baranın geriliminin noninüoidal olması durumunda bu gerilime ait harmonik spektrumu aşağıdaki şekilde verilebilir.

n . harmonik bileşenine ait gerilim U_n ile gösterilirse bu gerilimin meydana getireceği demir kaybı için,

$$P_{Fe_n} = P_{10} \left[\frac{B_n}{10000} \right]^2 \cdot \left[\frac{f_n}{100} \right]^{1.3} \text{ Watt / kg} \quad (5.73)$$



Şekil 5.44 Gerilime ait 1., 3., 5., 7. harmonik spektrumu

yazılabilir. Burada n . harmonik frekansı şu şekildedir:

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (5.74)$$

Burada n harmonik derecesi, f_1 ise temel bileşen frekans değeridir. n . harmonik frekansına ait magnetik endüksiyonun değeri ise B_n 'dir.

Transformatörlerde magnetik endüksiyonun hesabı için şu yol izlenmiştir; transformatöre uygulanan gerilim U , sarım sayısı N ve demir nüve kesiti q_{Fe} olmak üzere,

$$U = \sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B \cdot q_{Fe} \cdot N \cdot 10^{-8} \quad (5.75)$$

eşitliği geçerlidir. n . harmonik gerilimi için,

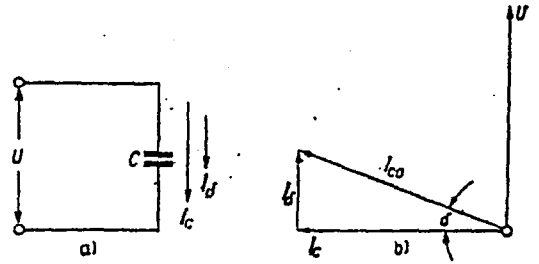
$$U_n = \sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f_n \cdot B_n \cdot q_{Fe} \cdot N \cdot 10^{-8} \quad (5.76)$$

yazılabilir.

5.2.3 Kabloların ve Yüksek Gerilim Kondansatörlerinin Dielektrik Kayıpları

Kapasitesi C olan bir kondansatöre (Şekil 5.45(a)) bir U gerilimi uygulanırsa, bu gerilim kondansatörden gerilime nazaran 90° ileri fazda olan bir I_C reaktif akımı geçirir, buna yük akımı denir, bunun büyüklüğünü genel olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$I_C = U \cdot \omega \cdot C \quad (5.77)$$



Şekil 5.45 Basit bir kondansatörün bir fazlı gösterişte şematik akım ve gerilim diyagramı

Gerilim altında bulunan fakat boşta çalışan bir kablo da bir kondansatör teşkil eder, onun kapasitesi bütün uzunluk boyunca taksim dılmıştır. Üç fazlı bir kablo için, işletme gerilimi U (faz arası) volt olarak ve kablunun işletme kapasitesi C_1 de μF olarak konulmak şartıyla, yük akımı amper olarak aşağıdaki şekilde bulunur.

$$I_C = \frac{U}{\sqrt{3}} \omega \cdot C_1 \cdot 10^{-6} \quad (5.78)$$

Burada $f=50$ Hz'de.

Dielektrik olarak kullanılan izole maddeler ideal izolatörler yani izole cisimler değildirler, çok az da olsa bir iletkenlikleri vardır. Böylece kondansatörlerin ve kabloların dielektriğinden munzam bir I_δ aktif akımı geçer, buna kayıp akım denir, çünkü bu dielektrikte bir ısınma, dolayısıyla bir ısı kaybı meydana getirir.

Şekil 5.45(b)'de görüldüğü gibi, kondansatör veya kablunun yük akımı I_C , I_δ kayıp akımı ile fazörel olarak I_{C0} boşta çalışma akımını teşkil ederler. Bu boşta çalışma akımını yük akımı ile bir δ açısı yapar ki buna da kayıp açısı adı verilir. Şekil 5.45(b)'den görüldüğü gibi,

$$I_\delta = I_C \cdot \tan \delta \quad (5.79)$$

dır.

İşletme gerilimi ve wattsız yük akımından kablonun yük gücü elde edilir.

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_C \cdot 10^{-3} \text{ kVar} \quad (5.80)$$

bu tamamen reaktif bir güçtür.

Dielektrik içerisinde ısı kaybını meydana getiren I_δ kayıp akımı, gerilim ile kablonun dielektrik kayıp gücünü verir. Bu da;

$$P_\delta = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_\delta \cdot 10^{-3} \text{ kW} \quad (5.81)$$

tır. Bu aktif bir güçtür. I_δ , U ile aynı fazdadır. Denklem (5.79)'daki I_δ 'nın değeri denklem (5.81)'de yerine konarak,

$$P_\delta = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_C \cdot \tan \delta \cdot 10^{-3} \text{ kW} \quad (5.82)$$

(5.80) denklemi de nazarı itibara alınarak,

$$P_\delta = Q_C \cdot \tan \delta = \text{Yük gücü} \times \text{Kayıp açısının tangenti} \quad (5.83)$$

yazılabilir.

Bir kablo sabit gerilim altında kaldığı müddetçe, örneğin T-saatlik bir zaman esnasında, dielektrik kayıplar da sabittir.

Çizelge 5.9 Kullanılan kablo tiplerinin μF olarak işletme kapasiteleri

Kesit (mm ²)	Ortak metal kılıflı kablo 1 kV'dan 10 kV'a kadar				Yuvarlak iletkenli
	1 kV	3 kV	6 kV	10 kV	
16	0,365	0,280	0,220	0,190	
25	0,405	0,320	0,250	0,215	
35	0,450	0,351	0,250	0,250	
50	0,695	0,550	0,372	0,330	
70	0,755	0,600	0,421	0,372	Sektör iletkenli
95	0,850	0,673	0,478	0,418	
120	0,910	0,742	0,540	0,455	
150	0,950	0,875	0,595	0,506	
185	1,010	0,890	0,650	0,565	
240	1,055	0,923	0,740	0,620	

Böylece bir kablonun dielektrik kayıplarının meydana getirdiği enerji kaybı,

$$W_{k8} = P_{\delta} \cdot T \text{ kWh} \quad (5.84)$$

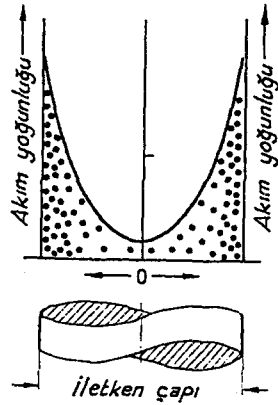
olur.

Bir kablonun dielektrik dolayısıyla meydana gelen enerji kayıplarını pratik olarak bulmak için önce denklem (5.78)'e göre I_C yük akımı tayin olur. Kullanılan kablo tiplerinin μF olarak işletme kapasitesi çizelge (5.2)'de gösterilmiştir ve pratik kablo uzunluğu içindir. km olarak kablo uzunluğu ile çarpımları gerekir.

5.3 Deri Etkisi (Skin Effect) ve Yakınlık Etkisi (Proximity Effect)

Bir iletkenin geçen bir doğru akım, geçtiği iletkenin kesitine düzgün bir şekilde dağılır. Tüm iletken boyunca tüm kesit üzerinde akım yoğunluğu aynıdır. Akım geçiren bu iletken çevresinde, merkezi iletken olan manyetik alan daireleri oluşur. İletkenin merkezinde de bu manyetik alan mevcuttur. Bu nedenle iletkenin tam ortasından geçen elektronlar, dışakilere nazaran daha çok manyetik alan dairesi tarafından çevrilmiştir.

Bir iletkenin alternatif akım geçiyorsa, akım iletken kesiti üzerine düzenli dağılmaz. Değişken manyetik alan nedeni ile, iletkenin içinde bir karşı gerilim oluşur. Bu gerilim iletkenin ortasında en büyük değerini alır. Bundan dolayı akım yoğunluğu iletkenin ortasına doğru azalır. Bu oluşum deri etkisi olarak tanımlanır (Erna, 1979).

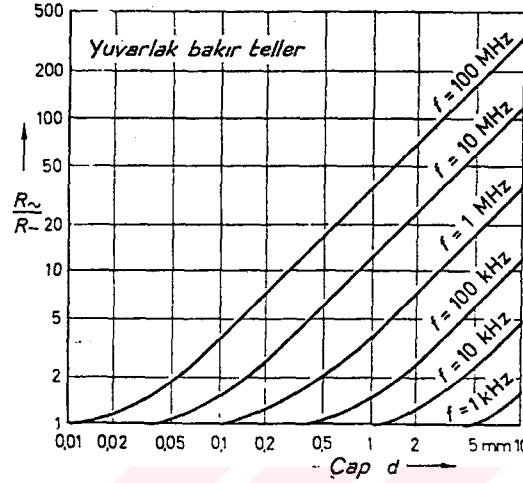


Şekil 5.46 Yüksek frekansta iletken kesitindeki akım dağılımı

Bilindiği gibi elektrik devrelerinde kullanılan her bir iletkenin bir direnci vardır. Bu direnç kendisini enerji sistemlerinde gerilim düşümü ve ısı şeklinde aktif kayıplar ile göstermektedir. İletkenlerin doğru akımdaki direnci, iletkenin boyu ve öz direnci ile doğru akıma gösterdiği

zorluk ile alternatif akıma gösterdiği zorluk farklı olup, alternatif akımda daha büyük olmaktadır.

Deri etkisi nedeni ile alternatif akımda iletken kesitinin ancak bir kısmı yararlı olmaktadır. Etkin iletken kesitinin bu kadar küçülmesi iletkenin omik direncini yükseltmektedir.



Şekil 5.47 Deri etkisi ile direnç yükselmesi

Deri etkisi frekansın yükselmesi ile birlikte artar. Bundan dolayı yüksek frekanslarda kullanılacak tellerin birbirinden izole edilmiş örgülü iletkenler olması istenir. Çünkü iletken sayısının çoğaltılması yüzeyi büyütüp, deri etkisini azaltır. Çok yüksek frekanslarda (örneğin: radar frekansı) üst yüzeyi gümüş kaplanmış bakır borular kullanılır. Akım bu boru iletkenlerin yalnızca üst yüzeyinden akar. Uygulamada bu tür iletkenler dalga kılavuzu olarak anılmaktadır.

Enerji sistemi analizlerinde iletkenlerin deri etkisi genellikle ihmal edilmektedir. Deri etkisi iletkenin kesiti ve akan akımın frekansı ile orantılı olarak arttığından iletkenin özellikle harmonikli akımlar akması ve büyük kesitlerin söz konusu olması halinde etkisini daha da belirginleştirmektedir. Bu durumda iletkenin doğru akım direncine harmonik direnci de ilave olmaktadır.

Harmoniklerin frekansının artması ile deri etkisi sonucu iletkenin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin temel bileşen omik direnç değerine harmoniklerden dolayı R_h direnci ilave olmaktadır. Harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri,

$$R = R_0 + R_h \quad (5.85)$$

olmaktadır. Burada,

R_0 = Doğru akım direnci (Ω/cm)

R_h = Deri etkisi dahil direnç (Ω/cm)

olarak tanımlanabilir.

Deri etkisi ile oluşan direnç değeri pratik bakımdan iyi netice veren Arnold formülünde direnç değeri;

$$X = \sqrt{\frac{4\omega}{R_0 \cdot 10^9}} \quad (5.86)$$

katsayı olmak üzere,

$$0 \leq x \leq 3 \text{ için } R = R_0 \cdot K_1 \quad (5.87)$$

$$x > 3 \text{ için } R = R_0 \cdot K_2 \quad (5.88)$$

olarak bulunabilir. Burada,

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{x^4}{48}} + 1 \right] \quad (5.89)$$

$$K_2 = \left[\frac{x}{2.828} + 0.26 \right] \quad (5.90)$$

olarak tanımlanabilir.

Deri etkisi açıklanırken iletkenin kendisinden geçen akımın oluşturduğu alan içinde kalması sonucu iletkenin geçen akımın kesite düzgün olarak dağılmadığı ve bunun sonucu iletken direncin yükseldiği belirtilmiş idi.

Çok fazla yan yana giden iletkenlerde, her bir iletken kendisinin oluşturduğu alan içinde kalacağı gibi komşu iletkenlerin ortaya çıkardığı alanlardan da etkilenecektir. Bunun sonucu her bir iletkenin kendi deri etkisiyle artan direnci, komşu deri etkisiyle ikinci bir defa artacaktır.

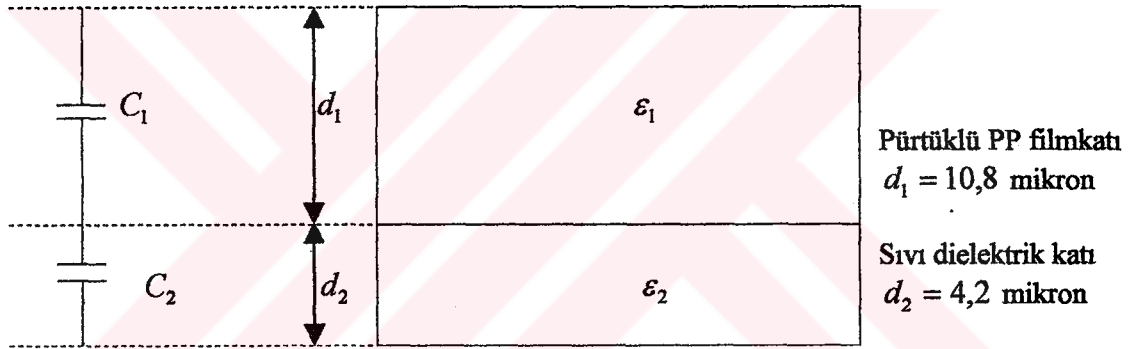
Bu oluşum proximity efekt olarak anılır. Yakınlık etkisi, deri etkisi gibi frekansla birlikte artar. Alçak frekanslarda proximity efekti göz önüne alınmayacak kadar küçüktür. Ancak yüksek frekanslarda (örneğin TV frekansı) kesinlikle hesaba katılır.

Çevredeki iletkenlerin magnetik akı halkaları sebebi ile ortaya çıkan proximity efekt, akımın iletken kesiti üzerinde muntazam dağılamamasından dolayı meydana gelen deri etkisinden daha az etkilidir. Özellikle hava hatlarında bu etki daha da azalmakta ve deri etkisi yanında ihmal edilebilmektedir (Çakır, 1985).

5.4 Dielektrik Zorlanmalar

Kondansatör gruplarında tahribat ve aşırı gerilimler nedeni ile yalıtkan kablolarda delinme.

Örneğin iki tabakalı düzlemsel elektrodlu bir kondansatör ele alalım (Şekil 5.48).



Şekil 5.48 İki tabakalı elektrodlu bir kondansatörde tabaka kalınlıklarına göre kapasite ve dielektrik katsayısı dağılımı

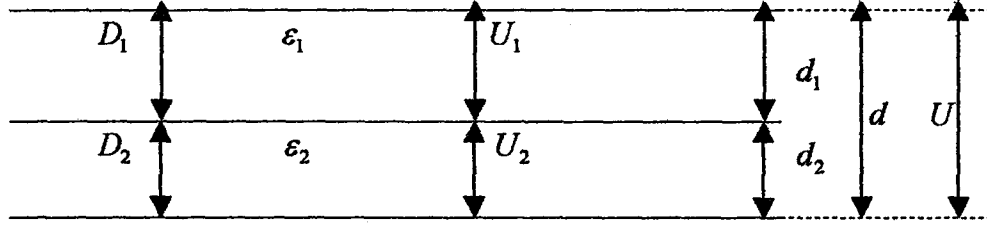
Burada D deplasman vektörü, S plaka yüzeyi, U gerilimi ve C kapasite olmak üzere

$$D_1 = D_2 \frac{C_1 \cdot U_1}{S} = \frac{C_2 \cdot U_2}{s} \quad (5.91)$$

olduğundan,

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (5.92)$$

ayrıca $U = U_1 + U_2$ yazılabilir. O halde Şekil 5.48'deki sistem Şekil 5.49'daki gibi çizilebilir.



Şekil 5.49 İki tabakalı düzlemsel elektrodlu bir kondansatörde tabaka kalınlıklarına göre deplasman ve gerilim dağılımı

Burada ε_1 ve ε_2 , her tabakanın dielektrik sabitleridir. Her bir dielektriğin ayrı ayrı maruz kaldığı gerilimler ise,

$$U_1 = U_x \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (5.93)$$

$$U_2 = U_x \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (5.94)$$

Ayrıca E_1 ve E_2 alan şiddetleri,

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} \quad (5.95)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} \quad (5.96)$$

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot d_2} \quad (5.97)$$

$$E_2 = \frac{U}{d_2 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot d_1} \quad (5.98)$$

olacaktır. Bu bağıntılar uygulanan gerilimin sinüsoidal olduğu, yani harmonik içerdiği hal için gereklidir. Eğer gerilim;

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_v^2} \quad (5.99)$$

şeklinde sinüsoidal olmayan bir gerilim ise bu gerilim yeni alan şiddetlerinde yerine konulursa,

$$E_1 = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_v^2}}{d_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot d_2} \quad (5.100)$$

$$E_2 = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_v^2}}{d_2 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot d_1} \quad (5.101)$$

olacaktır. $\sqrt{U_2^2 + \dots + U_v^2} > 0$ olduğu için kondansatörün maruz kalacağı E_1 ve E_2 alan şiddetleri artacak ve delinme ihtimali artacaktır.

5.4.1 Dielektrik Kayıplar

Harmonikli gerilim uygulanan bir kapasite elemanındaki kayıplar,

$$\sum_{n=1}^N C \cdot (\tan \delta) \cdot \omega_n \cdot V_n^2 \quad (5.102)$$

şeklinde hesaplanabilir (Arrillaga vd., 1985).

Burada,

$$\tan \delta = 1 / R \omega C \quad (5.103)$$

ile ifade edilen kayıp faktörüdür. Kayıp faktörü yüksek gerilim kondansatörlerinde yaklaşık olarak 0.004 ile 0.006 arasında değişir. $\omega_n = 2\pi \cdot f_n$, n. harmonik için açısal frekans olup V_n , n. harmoniğin efektif değeridir.

5.5 Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları

Harmoniklerin şebeke ve sistem üzerinde yaptığı en büyük etkilerden birisi rezonans olaylarına sebebiyet vermesidir. Rezonans; şebekeden çekilen akımın endüktif ve kapasitif etkiden kurtulup tamamen omik yük etkisi altında kalmasıdır. Bir başka deyişle sistemdeki kapasitif ve endüktif yüklerin uyum sağlayarak (reaktans değerlerinin eşitlenmesi) devrede

tamamen omik yükün etkili olmasıdır. Bu da hat empedansının yani omik direncinin küçük olmasından dolayı yüksek akım değerinin geçmesi demektir.

Enerji tesislerinde hatlar, transformatörler ve motorlar gibi işletme cihazlarının çektikleri gücü kompanze etmek için veya başka amaçlarla kondansatörler kullanılır. Şebekelerdeki cihazlar tek başına ele alınabildiği halde kondansatörler hiçbir zaman yalnız olarak incelenemez. Bu cihazlar incelenirken şebekeye bağlı diğer endüktif cihazların da dikkate alınması gereklidir. Çünkü, kondansatörler endüktif cihazlarla birlikte rezonans olaylarına neden olabilirler [29].

Tesise uygulanan gerilimin sinüsoidal olması durumunda yani gerilimin 50 Hz temel frekansa sahip olması durumunda, bir rezonans söz konusu olmaktadır. Çünkü kompanzasyon için gerekli kapasitif yük hesabı bu temel frekans durumuna göre yapılır ve rezonansın meydana gelmemesine dikkat edilir.

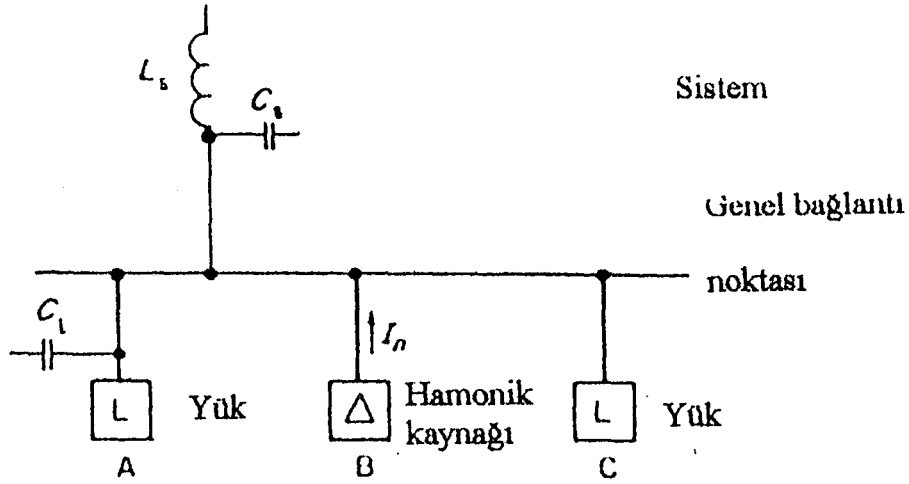
Harmonikli bir gerilimin tesise uygulanması halinde ise rezonans oluşturacak harmonik frekansları oluşabilir. Yüksek harmonik frekans değerlerinde rezonansın meydana gelmesi tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Frekansla kapasitif direnç değerinin ters orantılı olarak değişmesi sebebiyle, yüksek harmonik değerlerinde şebekeden yüksek kapasitif akımlar çekilir, bu da şebekenin zorlanmasına ve arızalara yol açar.

Söz konusu rezonans olayları, seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki grup altında incelenebilir.

5.5.1 Paralel Rezonans

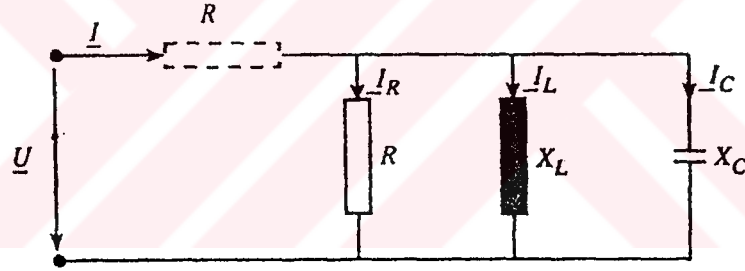
Bu tür devrelerle şebekenin çeşitli yerlerinde karşılaşılabilir. Örneğin ayırık kompanzasyonun uygulandığı transformatör veya motorun endüktif reaktansı ile kondansatörün kapasitif reaktansı arasında rezonans oluşabilir. Bunlara paralel bağlı R değerini de bobinin demir kayıpları ile kondansatörün dielektrik kayıpları teşkil eder. Bobin ve kondansatöre seri bağlı dirençler ise bobinin sargı direnci ile kondansatörün iç direncidir ve bu değerler ihmal edilebilir.

Paralel rezonans sonucunda, rezonans frekansında harmonik kaynağı olarak davranan yüksek bir empedans meydana gelir. Harmonik kaynakları çoğunlukla akım kaynağı olarak dikkate alındığı için, bu durumda her bir empedans kolunda yüksek harmonik akımları ve harmonik gerilimleri ortaya çıkar.



Şekil 5.50 Ortak bağlantı barasında paralel rezonans oluşumu

Paralel rezonanslar değişik şekillerde ortaya çıkabilmektedir. Aynı baraya harmonik kaynağı olarak bir kondansatörün bağlanması en basit durumdur. Sonuç olarak, kondansatörler ile şebekedeki diğer endüktif tesisler birlikte paralel rezonans devresi oluştururlar (Bayram, 1997).



Şekil 5.51 Paralel titreşim devresi

Rezonans durumunda $I_C = I_L$ olacağından;

$$\frac{1}{X_C} = \frac{1}{X_L} \Rightarrow 2\pi f_r C = \frac{1}{2\pi f_r L} \quad (5.104)$$

olur. Buradan rezonans frekansı;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.105)$$

olur. Bu rezonans frekansı, kapasitif ve endüktif kol akımlarının saf kapasitif ve saf endüktif akımlar olduğu kabulüyle bulunduğu için, seri devrenin rezonans formülüyle uyum sağlamıştır.

Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekansının birinin yakınında, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında paralel rezonans oluşabilir. Paralel rezonans olayı sırasında kondansatör uçları arasındaki gerilim aşırı yükseldiği için kondansatör zarar görebilir. Bu, endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır.

Kaynağın tamamen endüktif olduğu kabul edilirse, rezonans frekansı,

$$f_r = f \cdot \sqrt{\frac{S_s}{S_c}} \quad (5.106)$$

olur. Burada, f , temel frekans, f_r , paralel rezonans frekansı, S_s , şebekenin kısıdevre gücünü (VAr), S_c , kapasitenin nominal gücünü göstermektedir.

Rezonans koşulu, sistem endüktansı L_s , sistem kapasitesi C_s ile yükün kapasitesi değerlere bağlıdır. Hangi harmonik rezonansların mevcut olduğunu belirlemek için, baradaki harmonik gerilimle birlikte, baraya bağlı her tüketici yük ve kaynakların şebekedeki ve her bir tüketici harmonik akımlarının ölçülmesi gerekir. Genel olarak, harmonik gerilimi yüksek ve baradan güç sistemine akan akım küçük ise, bu durumda güç sisteminde rezonans olduğu söylenebilir.

Şekil 5.50'den görüleceği gibi, A yüküne büyük bir harmonik akım akıyorsa ve bu harmonik akım barada harmonik gerilime yol açıyorsa, sistem endüktansı ile yük kapasitesi arasında rezonans olduğu söylenebilir (Arrilaga vd., 1996).

Hesap kolaylığı açısından gerçel güç kayıplarının olmadığı varsayıldığında, paralel devre reaktansı şebeke frekansında,

$$X_s = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C} \quad (5.107)$$

olur. Başka bir fekansta,

$$n = f / f_1 \quad (5.108)$$

$$X_s = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L \cdot n + \frac{X_C}{n}} \quad (5.109)$$

olur. Burada, n , bağıl frekans, f , frekans, f_1 , temel frekanstır.

Rezonans durumunda $\omega \cdot L = 1/(\omega \cdot C)$ ve $X_s \rightarrow \infty$ olacağından akım,

$$I = \frac{U}{X_s \rightarrow \infty} = 0 \quad (5.110)$$

olur. Kısmi akımlar I_L ve I_C burada yüksek değerler alabilir ve besleme devresindeki toplam akımının birkaç kat üstüne çıkabilir.

5.5.2 Seri Rezonans

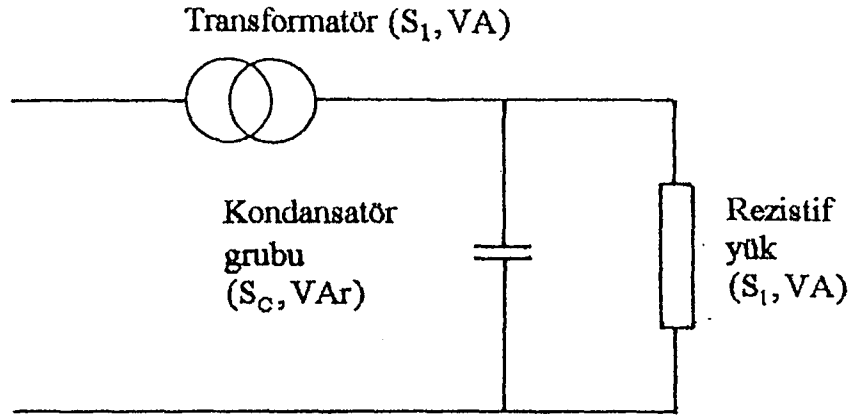
Seri rezonans R, L, C elemanlarının birbirine seri bağlı olduğu sistemlerde görülmektedir. Böyle bir rezonans durumu; aynı şebekeyi besleyen iki transformatörün bulunduğu bir sistemde, kompanzasyon amacı ile kullanılan kondansatörün kapasitif reaktansı ile hattın ve transformatörlerin endüktif reaktansları söz konusu olabilir.

Şekil 5.52'deki tesisi göz önüne alalım. Yüksek frekanslarda kapasitif empedans düştüğü için yük empedansı ihmal edilebilir. O halde,

$$f_s = f_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{S_T}{S_C \cdot Z_T} - \frac{S_1^2}{S_C^2} \right)} \quad (5.111)$$

durumunda seri rezonans meydana gelecektir. Burada; f_s , seri rezonans frekansı (Hz), S_T , transformatör nominal gücü, S_C sistemdeki kapasitenin gücü, Z_T , transformatör per unit empedansı, S_1 , omik yük gücünü göstermektedir.

$R < R + j(X_L - X_C)$ olduğundan rezonans durumunda devreden geçen akım değerinde artış olacaktır. Kuvvetli akım tesislerinde, omik direnç değerinin endüktif reaktans değerine göre hayli küçük olması nedeni ile; rezonans durumundaki bu akım artışı daha da büyük olacaktır. Harmonik akımındaki bu artış kompleks dalga akımının biçimini belirli bir oranda bozacaktır.



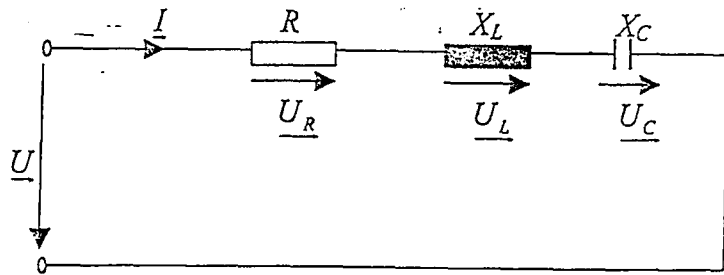
Şekil 5.52 Seri rezonans devresi

Bu durumda da kondansatör ve endüktör uçlarında oluşan gerilimler, bu elemanlara zarar verecek şekilde artacaktır.

Kuvvetli akım tesislerinde seri rezonans olayı genelde 150 - 700 Hz arasında meydana gelir. Bu da 3 ila 15. harmonikler arasında rezonansın oluşması demektir.

Seri rezonans, rezonans frekansı ile uyuşan harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağlar, böylece harmonik akımlarda bir büyüme söz konusu değildir. Ancak harmonik akımlar şebekenin istenmeyen kısımlarına akabilirler. Bunun sonucunda iki tür sorun ortaya çıkabilir:

- Rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler var ise, önemli ölçüde parazitler oluşabilir.
- Rezonans kolundaki harmonik akımların yoğunluğu nedeniyle kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir.



Şekil 5.53 Seri titreşim devresi

Rezonansların oluşması sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir. Harmonik rezonansının etkisi sistem yükünün az olduğu zamanlarda, örneğin gecenin geç saatlerinde ve tatil günlerinde daha fazladır. Yük seviyesi arttıkça, akımın akabileceği daha küçük empedans yollarından dolayı rezonans nedeniyle oluşan harmonik artışı zayıflar. Birçok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiklerinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, rezonans nedeniyle oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar.

Kolaylık açısından bobin ve kondansatör kayıpları ihmal edildiğinde eşdeğer devre Şekil 5.53'teki gibi olur. Bu devrede seri bağlı kondansatör ile bobin bir salınım devresi oluşturur. Bu devrenin davranışı paralel rezonans devresinden farklıdır. X_L ve X_C cebirsel olarak toplanırlar. Toplam empedans,

$$X_s = X_L + X_C \quad (5.112)$$

dir. Başka bir frekansta $n = f / f_1$ ile,

$$X_s = X_L \cdot n + \frac{X_C}{n} \quad (5.113)$$

olur. Rezonans durumunda ($X_L = X_C$), kayıplar ihmal edildiği düşünülürse, $X_s = 0 \Omega$ olacağından akım teorik olarak sonsuz büyük olur. Buradan,

$$I = \frac{U}{X_s} \rightarrow \infty \quad (5.114)$$

elde edilir. Pratik kayıpsız salınım devresi olmayacağı için akım sonsuz büyük değerler alamaz. Seri rezonans devrelerinde akım R, L ve C hesaba katılarak aşağıdaki biçimde hesaplanır.

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}} \quad (5.115)$$

Rezonans durumunda akımı yalnızca R direnci sınırlar. Rezonans durumunda geçen akım

$$I = \frac{U}{R} \quad (5.116)$$

olur. Bağıl rezonans frekansı n_r , rezonansta,

$$n_r = \frac{f_r}{f_1} = \sqrt{\frac{X_L}{X_C}} \quad (5.117)$$

değerini alır. Seri devre, düşük frekansta ($f_1 < f_r$) kapasitif, yüksek frekansta ($f_1 > f_r$) endüktif olur.

Ayrıca seri rezonansta kondansatörler üzerinde çok yüksek gerilimler oluşabilir.

$$U_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (5.118)$$

Burada,

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}} \quad (5.119)$$

$$U_C = \frac{U}{\omega \cdot C \cdot \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}} \quad (5.120)$$

dır. Seri rezonansta $\omega \cdot L = 1/\omega \cdot C$ olduğu için kondansatördeki gerilim,

$$U'_C = \frac{U}{R \cdot \omega \cdot C} \quad (5.121)$$

olur. Burada,

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (5.122)$$

alınırsa,

$$U'_C = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.123)$$

elde edilir. Bu durumda kondansatör uçlarındaki şebeke geriliminin X_C/R katına eşittir.

Omik direnç genellikle çok küçük olduğundan kondansatör ve bobin uçlarındaki gerilim,

şebeke geriliminden çok daha büyük olur. Bu durumda devreden çok yüksek akımlar geçtiğinden bobin sargılarının izolasyonu ve özellikle kondansatörler aşırı derecede zorlanabilir (Wyk, 1993).

5.5.3 Paralel ve Seri Rezonansı Önleyici Tedbirler

Kompanzasyon tesislerinde doğal olarak bulunan titreşim devrelerinde, harmonikler sebebi ile meydana gelen rezonans olayları, büyük zararlara yol açabilirler. Rezonansın meydana gelmesine engel olmak ve tesislerin sürekli olarak güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için harmoniklerin ortadan kaldırılmaları gerekir. Harmoniklerin meydana geldiği kompanzasyon tesislerinde, örneğin ark fırınlarını ve büyük doğrultucuları besleyen şebekelerde, harmonikleri ortadan kaldırmak için filtre devrelerinden yararlanılır. Tesiste oluşan her bir harmonik bileşeni için ayrı bir filtre devresine ihtiyaç vardır. Bunlar harmonik kaynağının yanında, şebeke gerilimine paralel bağlıdır. Her bir filtre, hangi harmonik frekansına göre düzenlenmişse, bu harmonik için bir kısa devre oluşturur; böylelikle şebeke, harmoniklerden kurtulmuş olur. Filtre devrelerinde kapasite büyük, endüktans küçük olduğundan, bunlar aynı zamanda güç katsayısını düzeltmek için kompanzasyon görevini de üstlenirler (Bayram, 1985).

Seri rezonansın olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla alınacak bazı tedbirler, sistem güvenliği ve sistem kayıplarının azaltılması açısından etkili olacaktır.

Seri rezonansı önleyecek birkaç yöntem sıralanacak olursa;

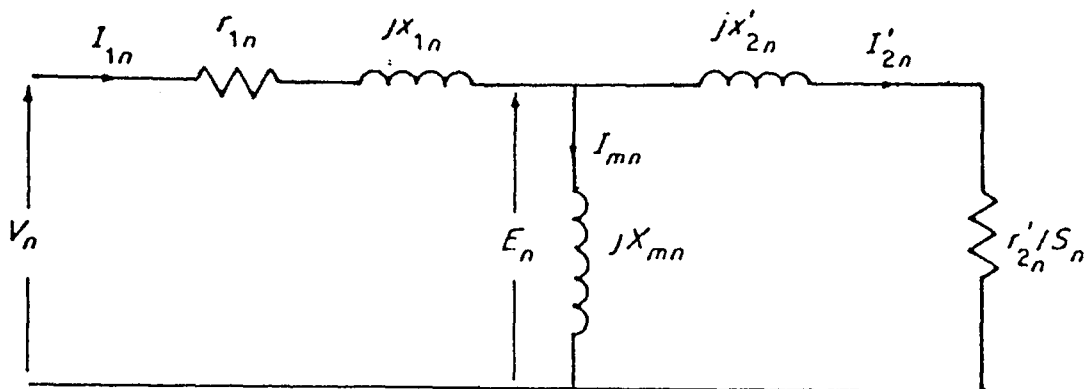
- Rezonansı meydana getirebilecek harmonik frekanslarından genlik değeri yüksek olanlarının etkisini yok etmek için, bu harmonik mertebelerini süzecek süzgeç devreleri yerleştirmek
- Kompanzasyon için gerekli kondansatör değerinin haricindeki kapasitif yükleri devreden çıkarmak. Bu durum şebeke yükünün azalmasıyla ortaya çıkar. Kondansatörlerin devreye giriş çıkış işlemi, sisteme bağlanacak otomatik Cos ϕ regülatörü ile sağlanabilir.
- Devreye yerleştirilecek omik direnç vasıtasıyla rezonans akımları teorik olarak sınırlanabilir. Fakat eklenen her direnç fazladan enerji sarfiyatına neden olduğundan dolayı kullanışsızdır.

- Kompanzasyon yapmak amacıyla hesaplar yapılırken; bağlanacak kondansatör değeriyle tesisdeki mevcut motor, transformatör ve hatların endüktif direnç değerleri göz önünde bulundurulmalıdır. Rezonansa sebebiyet verecek harmonik frekanslardan kaçınılmalıdır. Örneğin kurduğumuz kompanzasyon tesisinin rezonans frekansını mevcut harmonik frekans değerlerinde seçmemeliyiz. Mesela sistemimiz 175 Hz de rezonans oluşturuyorsa, bu frekans değerinde harmonik mevcut olmadığı için rezonans oluşmayacaktır. Bu yöntemin eksik yanı kompanzasyonun istenilen değerde yapılamıyor olmasıdır.

- Rezonans frekansını düşürmek amacıyla kondansatöre seri bir self bobini yerleştirmek. Bu durumda harmonik akımlarının etkisi azalacaktır. Yani harmonik mertebesiyle doğru orantılı olarak artan kondansatör akımı, yine doğru orantılı olarak artan self bobininin endüktif reaktansı tarafından sınırlanacaktır. Bu sebeple harmonik akımı kondansatöre zarar verici bir noktaya gelmeyecektir. Bobinin ısı kaybı da az olduğu için ekonomiklik de sağlayacaktır. Kondansatöre seri bağlanacak self bobininin reaktif direnci hesaplanırken; kompanzasyon yapılacak noktadan itibaren santrale kadarki sistemin direncini göz önünde bulundurmak gereklidir.

5.6 Asenkron ve Senkron Makinelerde Mekanik Salınımlar

Her bir harmonik akım için asenkron makinenin eşdeğer devresi Şekil 5.54' teki gibi çizilir. Bu devrede asenkron makinenin tüm parametreleri sargı akımlarının frekanslarına bağlıdır. Bir alternatif akım makinesinin statorundaki harmonik akımlar, örneğin, pozitif harmonik kaymaları s_n asenkron motor çalışmaya yol açar. Negatif yarım dalga harmonikleri zıt etkiye yol açmadığı sürece, bu motor çalışmada, bütün pozitif yarım dalga harmonikleri mil dönmesine yardımcı olacak şekilde mil momentini arttıracaktır.



Şekil 5.54 Asenkron makinenin harmoniklere ilişkin tek fazlı eşdeğer devresi

T_n Harmonik akımının faz başına momenti, harmonik hızına bağlı olarak $I_n^2(r'_{2n}/s_n)$ bağıntısıyla verilir. Temel hızda bu moment,

$$T_n = (I_n^2/n) \cdot (r'_{2n}/s_n) \text{ senkron watt} \quad (5.124)$$

dir. Burada n moment doğrultusunu göstermektedir.

Eğer I_n ve r'_{2n} birim olarak ifade edilmişse, s_n yaklaşık 1.0 olduğu için yukarıdaki bağıntı,

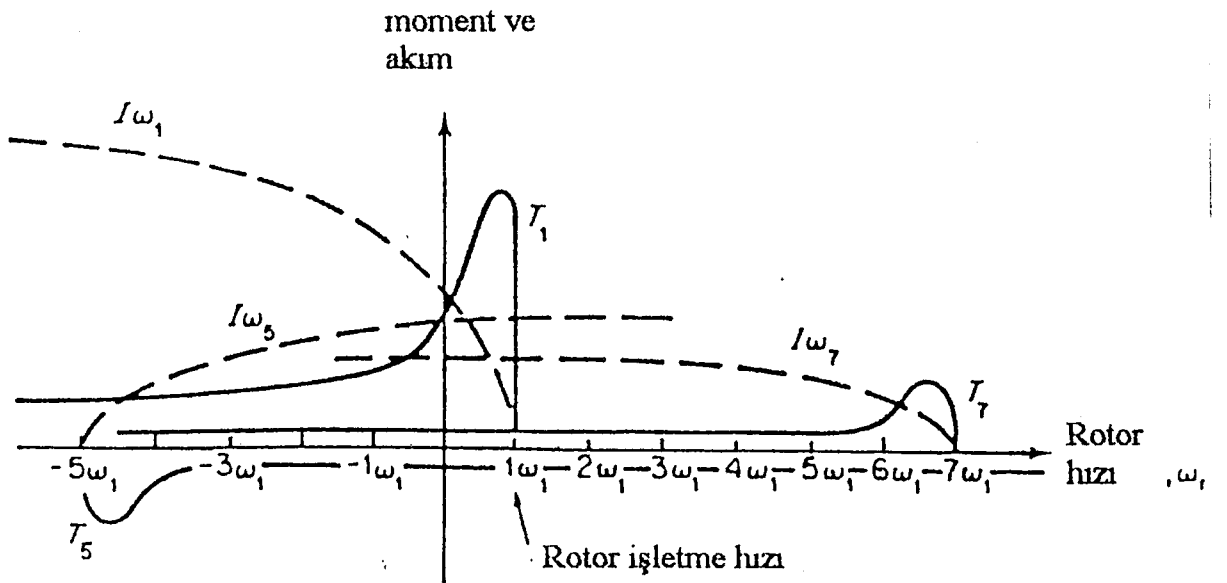
$$T_n = (I_n^2/n) \cdot r'_{2n} \text{ p.u.} \quad (5.125)$$

olarak yazılabilir.

$V_n = I_n \cdot Z_n$ ve $Z_n \approx n \cdot X_1$ bağıntısını kullanarak, harmonik gerilimlere bağlı olarak moment aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_n = (V_n^2/n^3) \cdot (r'_{2n}/X_1^2) \quad (5.126)$$

Harmonik frekanslarının kayması hemen hemen momentlerle aynı olduğu için, pratikte birim sistemde harmonik akımlarının ürettiği momentler ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu etki Şekil 5.55'te gösterilmiştir. Bu nedenle, çoğu zaman harmoniklerin ortalama momentler üzerindeki etkisi ihmal edilir.



Şekil 5.55 Rotor harmonik momentleri ve akımları

Harmoniklerin ortalama moment üzerindeki etkisi küçük olduğu halde, önemli moment darbeleri meydana gelebilir. Anma gerilimindeki moment darbelerinin genliği yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_{3K} = \left[I_{n+}^2 + I_{n-}^2 - 2I_{n+} \cdot I_{n-} - \cos(\phi_{n+} - \phi_{n-}) \right]^{1/2} p.u. \quad (5.127)$$

Burada I_{n+} ve I_{n-} , birim değerleri; $n+$, 1+3k harmonik mertebelerini; ve $n-$, 1-3k harmonik mertebelerini göstermektedir. Bu ifade ile olası mil burulma titreşim problemlerinin ön hesaplanması mümkündür.

Örnek olarak 5. ve 7. harmonikler için sırayla 0,03 ve 0,02 pu makine akımlarına yol açan ve yaklaşık toplam harmonik distorsiyonu % 4 olan bir besleme gerilimini dikkate alalım. Eğer her iki harmoniğin faz açısı aynıysa, 50 Hz frekans ve anma geriliminde çalışan bir makinede, momentin 300 Hz frekansında ve 0,01 pu genliğinde değişken bir bileşeni olacaktır. Eğer harmonikler zıt fazda ise momentin genliği 0,05 pu olacaktır (Arrilaga vd., 1985).

6. GÜÇ KALİTESİ STANDARTLARI

Güç kalitesi problemlerinin sebeplerini tanımlamak, yapılabilecek olası düzeltme yöntemleri için en önemli gereksinimdir. Yükselen güç kalitesi problemlerini çözmek, örneğin, ekipmanların birbiriyle uyumsuzlukları ve güç kalitesi anormallikleri, problemlerin meydana geldikleri şebeke ve güç kalitesi sorunları üzerinde büyük bir bilgi gerektirir. Spesifik güç kalitesi sorunlarını tanımlayan sayısız güç kalitesi standardı son beş yıl içerisinde hızlı bir şekilde gelişmiştir [1].

Güç kalitesi problemleri dinamik ve sürekli değişirler. Eski problemlere çözümler, yeni sistemler ve teknolojiler için yeni problemler haline gelir. Güç kalitesi problemlerini çözmek, yeni güç arttırımı ve iyileştirme teknolojileri, analitik çözümler, değişen standartlar ve değişen elektrik ve elektronik yükler ve ekipmanlar üzerinde yenilenen güç kalitesi bilgileri gerektirdiğinden zor bir görevdir.

Standartlar ve tavsiyeler aşağıdaki başlıklar etrafında toplanmıştır;

- Olayın tanımlanması ve karakterize edilmesi,
- Güç kalitesi problemlerinin ana sebepleri,
- Ekipman ve güç sistemi üzerinde etkiler,
- Problemin öneminin nicel bir değerlendirmesini sağlamak için indisler ve istatistiki analizler kullanarak matematiksel tanımlanması,
- Ölçme teknikleri ve tavsiyeler,
- Farklı tip ve sınıftaki ekipmanlar için emisyon sınırları,
- Çeşitli ekipmanların tolerans sınırları,
- Sınırlara uyumlulukta test yöntemleri ve işlemleri,
- Güç kalitesini iyileştirme tavsiyeleri.

Güç kalitesi sorunlarının çözümü, değişen güç kalitesi bilgileri temeline dayanan bir sistematik problem çözme başvurusu gerektirir. Güç kalitesi problemini tatmin edici bir şekilde çözmekte, problemin ne olduğunu tanımlamak önemlidir ve bu problemin bir takım olaylardan bağımsız olmadığına dikkat edilmelidir. Problem, örnek olarak ürünün veya güç sisteminin eksik tasarımı, hatalı imalat ve bina içinde elektronik ve elektrik cihazların veya

güç sisteminin hatalı tesisi, kullanım ve elektrik ürün veya güç sistemlerinin düzgün olmayan bakımlarından kaynaklanabilir.

Güç kalitesi alanında, standart terimleri ve tanımlamaları gelişme aşamasındadır. Bununla birlikte, daha önceden varolan uygulanabilir bir dizi standart mevcuttur [1].

Güç kalitesi ile ilgili standartların çoğunluğu aşağıdaki topluluklar tarafından ortaya konulur;

- Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE),
- American National Standards Institute (ANSI),
- National Fire Protection Agency (NFPA),
- National Institute of Standards and Technology (NIST); formerly National Bureau of Standards, Department of Commerce,
- National Equipment Manufacturers Association (NEMA),
- Underwriters Laboratories (UL).

6.1 Standartlar ve Toleranslar

1959 yılına kadar doğrultucular için kullanılan NEMA Standartları, yarıiletken devrelerde yetersiz kaldığı için yeni standartların geliştirilmesine başlandı. Güç yarıiletkenlerinin kullanılmaya başlanmasıyla, cihazların sivri uçlu darbelere karşı toleransları azaltılmıştır.

Bilgisayarlara, üretici firma $\pm$ % 4'lük toleransın zorunlu olduğunu bildirmediği, $\pm$ % 6 ve $\pm$ % 13 anma sürekli gerilim sınırları yeterli olmaktadır. 2 saniyeden daha küçük süreli geçici olaylarda güç kalitesi ile ilgili değişik toleranslar kullanılmaktadır. Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü'nün (ANSI) C84.1 Standardı'na göre 0,05 - 0,5 saniye süren geçici olaylar için gerilim toleransları $\pm$ % 15 ve $\pm$ % 20; 0,08 - 0,05 saniye süren geçici olaylar için ise $\pm$ % 20 ve $\pm$ % -30'dur. Bilgisayar imalatçıları, kendilerinin geliştirdikleri ve ANSI Standartlarından farklı toleransları kullanmaktadırlar. Genel olarak bu standartlarda, gerilim büyük dalgaları ve impulslara ilişkin toleranslar, C84.1 Standardına göre çok daha küçüktür. Örneğin bu standartlarda 2 saniye süren bir bozucu etki için + % 6 olan gerilim toleransı, 8,33 ms süren bir bozucu etkide + % 30'a çıkmaktadır. 1 ms süren bozucu etkiler için, bu tolerans + % 100 ve, 100 μ s süren bozucu etki için + % 200'dür. Bu toleransların alt gerilim sınırı, 2 saniyelik bozucu etki için - % 13, 0,5 saniye için - % 30, 0,1 saniye süren

bozucu etkiler için - % 42, 16,7 ms için - % 70 ve 8,33 ms için - % 100'dür. 60 Hz'lik bir freknsın tolerans değeri genel olarak + 0,5 Hz değeri kabul edilmektedir.

Güç kalitesi problemleri ölçülmesinde aşağıdaki standartlardan bazıları ya da tamamı kullanılır.

- Gerilim, akım, frekans ve N fazlı dengesizlik: Tüketici yüklerindeki değişimler, yanlış topraklama, kademeli transformatörlerde gerilimi ayarı ve kompanzasyon elemanlarının yerleştirilmesi gibi elektrik şebekesi içindeki birçok faktör, normal şebeke gerilimi, akımı, frekansı ve faz işleme noktalarının sürekli hal durumuna göre sapmasına neden olabilir. Uygulanabilen standartlar ANSI C84.1, ANSI C37.106 ve IEE 141'dir.
- Harmonikler: Nonlineer devreler ya da yükler, gerilim ve akımda dalga şekli distorsiyonlara neden olur. Periyodik yapıda olabilen bu distorsiyonların sonucunda, ölçüm hatası, iletişim sistemlerinde karışmalar, makine, ve transformatör ısınması ve hatalı röle çalışması gibi problemler meydana gelir. Güç elektroniği devrelerindeki anahtarlama elemanlarının çalışması sırasında gerilim çentikleri ve kırpışması gibi problemler oluşabilir. Uygulanabilen test standartları IEEE 519-D5, ANSI C57.105 ve IEEE 141'dir.
- Enerji kullanımı: Güç kalitesi, cihazların aktif ve reaktif güç ihtiyacını etkiler. Bu ise işletme maliyetinin yüksek olmasına, kayıplara, gerilim ve akım regülasyonu problemlerine neden olur. Bu test ile, donatım tasarımı, gerçekleştirilmesi, ve çevre faktörleri incelenir. Uygulanabilen standartlar IEEE 59, IEEE 141, IEEE 389 ve IEC 555'tir.
- Büyük Dalga Testleri: Yıldırım ve geçici anahtarlama olaylarından kaynaklanan büyük dalgalara karşı korunma önlemi olmayan devrelerde hatalı çalışma veya arızalar meydana gelebilir. Uygulanabilen standartlar ANSI / IEEE C62.41 ve ANSI / IEEE C37.90.1'dir.
- Yüksek ve Düşük Gerilim: Birkaç periyottan fazla süren gerilim çöküntüleri ve kabarmalar, güç sistemindeki faz gecikmelerinden dolayı ortaya çıkabilen bir olaydır. Bu koşullar donanımda ve esas olarak enerji hattına bağlı elektronik donanımda düzensiz davranışlara neden olabilir. Uygulanabilen standartlar IEEE 141 ve ANSI C37'dir.

6.2 Statik Elektrik Standartları

Statik deşarj, zıt kutuplu yükler arasındaki mesafe yeterince kısa olduğunda meydana gelir. İletken yüzeydeki bir deşarj, ani yükselme zamanlı impuls ses akımı oluşturur. Yüksek

genlikteki bu tür bir akım yarıiletken devre ve cihazların yanlış çalışması veya çökmesine sebep olur. ANSI / IEEE Std. 142-1982, Endüstriyel ve Ticari Güç Sistemlerinin Topraklaması için Önerilen Uygulama (Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power System) ve Federal Bilgi İşlem Standartları (Federal Information Processing Standards, FIPS) Yayın 94; ADP Tesisleri için Elektriksel Güç Üzerinde Tavsiyeler (Guideline on Electrical Power for ADP Installations 9/83), statik problemleri kontrol etme tekniklerinin bir kısmını taslak olarak ortaya koyar. Bu teknikler nem kontrolü, statik elektriği en aza indiren halı ile kaplama, iyon generatörleri ve elektronik devrelerin hassasiyetlerini düzenlemeyi içerir.

6.3 Hassas Ekipmanların Yıldırım Düşmesinden Korunması Standardı

Yıldırım düşmesi hassas araçları olumsuz yönde etkiler. Yıldırımdan kaynaklanan elektrik gürültü sinyalleri, yalıtıma, kontaktörlere ve diğer devre elemanlarına zarar verebilecek kadar büyüktür. FIPS yayın 94: ADP Tesisleri için Elektriksel Gücü Üzerinde Tavsiyeler otomatik veri işlemci (ADP) sistemleri hakkında bir bölüm içerir.

Tavsiye edilen bir teknik, transformatör sekonder sargı ve binaların hizmet ekipmanı arasına alçak gerilim ayırıcıları tesis ederek güç ve haberleşme araçlarının kalıcı aşırı gerilim korunmasıdır. Standart ayrıca, bilgisayar odasına aşırı akımın istenmeyen iletken yolunun tanımlanması ve yok edilmesini tartışır.

6.4 Topraklama Standartları

Topraklama iki ana nedenden dolayı gereklidir: güvenlik ve güvenilir çalışma. Güvenlik kodlarına uygunluk ve düzgün yorum, topraklamayla ilgili temel konuların anlaşılmasını gerektirir.

ANSI/ IEEE Std. 142-1982, Endüstriyel ve Ticari Güç Sistemlerinin Topraklanması için Önerilen Uygulama (Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems) aşağıdakileri tartışır;

- Topraklanmış sistemlerin topraklanmamışlara karşı avantaj ve dezavantajları,
- Topraklama için ekipmanların seçimi ve sistemlerin ne şekilde topraklanacağı,
- Transformatörler ve motorlar gibi elektrik cihazlarının kapalı yer tesisatının topraklama sistemine bağlantı problemleri,

- Toprağa bağlantıda düşük direnç elde etme teknikleri.

FIPS yayın 94; ADP Tesisleri İçin Elektriksel Gücü Üzerinde Tavsiyeler 9/83, hassas ekipmanların spesifik topraklama gereçlerinin temellerini açıklar. Bu yayın, topraklamanın çeşitli fonksiyonlarını aşağıdaki şekilde özetler;

- Topraklamayla, dokunma gerilimi farklılıkları elektriksel tehlikeden kaçınmak için sınırlandırılmalıdır,
- Bir güç kaynağına toprak hata akım dönüş yolu empedansı aşırı akım koruması ve kaynaktan kopmaya mümkün kılmak için düşük olmalıdır,
- Hassas ekipman etrafındaki toprak gerilim farklılıkları sabit bir gerilim referansına azaltılmalıdır,
- İmalatçı tavsiyeleri, güvenlik kodları ile tutarlılık içerisinde olduğundan izlenmelidirler.

6.5 Kalıcı-Düzen Gerilim Standartları

Kalıcı-Düzen 60 Hz koşulları ANSI Std. C84.1'de belirtilmiştir. Bu standart servis noktasında (elektrik üretici ve kullanıcı iletkenlerin bulunduğu nokta) ve kullanım noktasında (müşteri ekipmanlarına bağlantı yapılan nokta) en yaygın kullanılan nominal gerilimler ve değişme oranlarını ifade eder.

6.6 Aşırı Gerilim Standartları

277 V'a kadar sınıflanan faz-toprak gerilimli AC güç devrelerinde aşırı gerilimler, IEEE Std. 587-1980, Alçak Gerilim Şebekelerinde Aşırı Gerilimler Üzerinde Tavsiyeler (Guide for Surge Voltages in Low-Voltage AC Circuits) bölümünde belirtilmiştir.

Tavsiye, gerilim dalgasının iki ana sebebi ile açıklanır, yıldırım düşmesi ve güç sistem anahtarlama. Aşırı gerilimin göstergesi olarak ortaya çıkan dalga şekillerini üreten test devreleri gibi, ekipmanın kapasitesine bakışla dalgayı değerlendirmekte uygulanan testlerin seçimi için pratik bir temel ifade eder.

Gerilim dalgalanmalarını kullanmakta kullanılan diğer standartlar şu şekildedir;

- ANSI C 62.2-1969, Guide for Application of Value Type Lightning Arresters for Alternating Current Systems,

- ANSI / IEEE c 37.90a-1974, Guide for Surge Withstand Capability (SWC) Tests,
- ANSI/IEEE Std. 28-1974, Standart for Surge Arresters for AC Power Circuits,
- IEC No.664 (1980), Insulation Coordination within Low-Voltage Systems Including Clearances and Creepage Distance for Equipment,
- ANSI / IEEE Std. 100-1977, Dictionary of Electrical and Electronics Terms.

6.7 Düzeltme Ekipmanı Standartları

Bir kesintisiz güç kaynağı çeşitli güç problemlerini düzeltmekte kullanılır. Bu cihaz ANSI / IEEE Std. 944-1986, Üretim Merkezlerinde Kesintisiz Güç Kaynaklarının Uygulanması ve Test Edilmesinde Önerilen Uygulama (Recommended Practice for the Application and Testing of Uninterruptible Power Supplies for Generating Stations) standardının konusudur. Bu standart düşünce ve uygulamaları tasarlamak için genel bir tavsiyedir. NEMA-URS-1983 imalatçı ve kullanıcılara tanımlamalar, güvenlik önlemleri ve kesintisiz güç kaynaklarının ayrıntılarını sağlar.

FIPS Yayın 94 (FIPS 94), Guideline on Electrical Power for ADP Installations 9/83, şu araçları tanımlar; filtreler, gerilim regülatörleri, yalıtım transformatörleri, motor-generatör setleri, aşırı akım ayırıcıları ve kesintisiz güç kaynakları.

6.8 Harmonik Standartları

Harmonikler güç konverterleri, ark fırınları gibi lineer olmayan cihazlar tarafından meydana gelir. Bu lineer olmayan cihazların hızla çoğalması harmonik seviyeleri ve ilgili problemlerin artışına sebep olmuştur.

Harmoniklerin zarar verici etkileri haberleşme ekipmanlarını da etkiler. IEEE Std. 368-977, Yüksek Gerilim Doğru Akım Sistemlerinin Elektriksel Gürültü ve Harmonik Filtre Performanslarının Ölçümünün Tavsiye Edilen Uygulaması (Recommended Practice for Measurement of Electrical Noise and Harmonic Filter Performance of High-Voltage Direct-Current Systems) standardı, temel olarak, HVDC konverterler tarafından üretilen harmoniklerle ortaya çıkan telefon etki faktörünü (TIF) tanımlar.

Harmoniklerin diğer bir etkisi gerilim distorsiyonudur. Harmonik distorsiyonun değerlendirilmesi IEEE Std. 519-1984, Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Kontrol İçin Tavsiye Edilen Uygulama ve Gereksinimler (Recommended Practices and Requirements for

Harmonic Control in Electric Power Systems) standardında tanımlanmıştır. Standart, bir kullanıcının şebekeye verebileceği maksimum harmonik akımını sınırlama tavsiyelerini içerir. Sinüsodal AC gerilim distorsiyonuna bakışla, elektrik üreticisi tarafından müşteriye sağlanan güç kalitesini düzenler.

IEEE Std. 519-1981 ayrıca fliker olarak adlandırılan gerilim dalgalanmalarının sınırını tanımlar. Fliker nedenlerinin ark fırınları gibi periyodik yükler olduğunu belirtir.

6.9 IEEE Renkli Kitap Serisi

ANSI / IEEE Std. 464-1987 [IEEE ORANGE BOOK];

- Kesintisiz gücü garantilemek için en son tavsiyeleri,
- Veri işlemci ekipmanları için güç gereksinimleri,
- Bekleme ve acil durum güç sistemleri,
- Elektronik araç imalatçı endüstrisinin, genellikle CBEMA eğrisi olarak adlandırılan gerilim tolerans örneklerini,

ANSI / IEEE Std. 443-1987 [IEEE GOLD BOOK];

- Endüstriyel ve ticari güç dağıtım sistemlerine uygulanmasıyla güvenilirlik analizlerini,
- Kritik hizmet kaybı zamanı,
- Güç kesinti zamanına karşı yük kayıp çeşitleri,
- Endüstri ve ticari güç sistem kesintilerinin maliyeti,

ANSI / IEEE Std. 1100-1992 [IEEE EMERALD BOOK]

- Güç ve topraklama hassas elektronik ekipman için tavsiye edilen uygulamaları,
- Tavsiye temelleri ve tanımlamaları,
- Güç kalitesi incelemeleri için genel araç gereksinimleri,
- Güç artırma ekipmanı tanımı,
- Tavsiye edilen tasarım/tesis uygulamaları,

ANSI / IEEE Std. 399-1990 [IEEE BROWN BOOK];

- Endüstri ve ticari güç sistem analizleri için tavsiye edilen uygulamaları,
- Motor-kalkış çalışmaları,
- Harmonik çalışmalar,
- Topraklama çalışmaları,
- Anahtarlama geçici olay çalışmalarını,

sunar [1].

Standartlarda kalıcı-düzen 60 Hz durumu ANSI Std. C 841-1989'da tanımlanmıştır. İzin verilebilir harmonik seviyeleri ANSI / IEEE 519'da, KGK sistemlerinin tanımlamaları ve kullanımı NEMA-UPS-1983'te belirtilmiştir. FIPS-94 ve ANSI / IEEE Std. 142-1982 topraklamayı ilgilendiren temel kurallar açıklanmıştır. Veri işlemci ekipmanların güç gereksinimleri FIPS 94'te tanımlanır.

Çizelge 6.1 Güç kalitesini ilgilendiren standartlar

Standart	İlgili güç kalitesi başlığı
ANSI/IEEE Std. - 414	Aşırı gerilim koruması
ANSI/IEEE Std. - 142	Ticari ve endüstriyel güç sistemleri için topraklama
ANSI/IEEE Std. - 446	Yedek ve acil durum güç kaynaklarının seçimi ve uygulanması
ANSI/IEEE Std. - 493	Endüstriyel ve ticari güç dağıtım sistemlerinin güvenilirlik analizleri
ANSI/IEEE Std. - 518	Topraklama ve gürültü kontrolü
ANSI/IEEE Std. - 519	Harmonikler
NFPA - 70	Topraklama
NFPA - 75	Veri işlemci gereçlerin yanmadan korunması
NFPA - 78	Aşırı akım koruması
FIPS - 94	Otomatik veri işlemci araçların güç gereksinimleri
NIST - SP768	Güç problemlerinin özeti; sebepleri, etkileri, ve düzeltilmeleri
UL 1449	Gerilim dalga bastırıcıları

7. GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN AZALTILMASI

Güç kalitesini düzeltmek için kullanılan yöntemler, istenilen amaca ve maliyete bağlı olarak çok büyük farklılıklar gösterir. Başka bir ifadeyle, güç sistemi problemlerinin çözümü için en az etkili ve en ucuz cihazlardan biri olan dalga bastırıcıdan en etkili ve de en pahalı kesintisiz güç kaynağına kadar çeşitli cihazlar kullanılır (Aspnes vd., 1985).

Endüstriyel ve ticari kuruluşlar, güç kalitesini düzeltmek için kesintisiz güç kaynağı sistemleri, büyük dalga bastırıcıları ve yalıtım transformatörleri gibi cihazlar kullanılır. Bununla birlikte, güç kalitesinin çok iyi olması için atılacak ilk adım genellikle özel koşullara bağlıdır. Bir bina içinde aynı hatta bağlı değişik elektriksel yükler arasında meydana gelen harmonik karışma gibi bazı problemler çok defa müşteri binasında son derece kolay bir şekilde çözülür. Yıldırım düşmesi sonucu oluşan enerji kesilmeleri veya dağıtım merkezlerindeki bağlama işlemleri gibi problemlerin elektrik kurumu tarafından düzeltilmesi ekonomik açıdan da uygun bir çözümdür. Bu nedenle güç kalitesi problemlerinin çözümlenmesinde ekonomik koşullar da dikkate alınarak optimum çözüm sağlanmalıdır.

Güç kalitesi sorunları çözümlenirken aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır;

- Güç kalitesi konusunda daha fazla bilgi elde etmek
- Müşterilerini uyarmak üzere elektrik kurumlarının yeni analitik aletleri geliştirmesi

Elektrik donanımının güvenilirliğine, yeterliliğine ve arızaların şiddetine bağlı olarak değişik hat düzeltme yöntemlerinden yararlanılabilir. Bu amaçla filtreli veya filtresiz aşırı akım kesicisi, yalıtım transformatörü, gerilim transformatörü, motor-generatör grubu veya kesintisiz güç kaynağı gibi cihazlar kullanılabilir.

7.1 Önlemler

Güç kalitesi problemleri genel olarak meydana geldiği saha açısından iki gruba ayrılabilir. Birinci grup genellikle müşterilerin binalarında meydana gelen ve en uygun bir şekilde yine buralarda çözümlenebilen dalga şekli distorsiyonlarını içermektedir. İkinci grup, dağıtım sisteminde kaynaklanan gerilim çöküntülerini ve enerji kesintilerini içermektedir.

Güç kalitesi problemlerini çözmek veya önlemek için dört genel yöntem vardır;

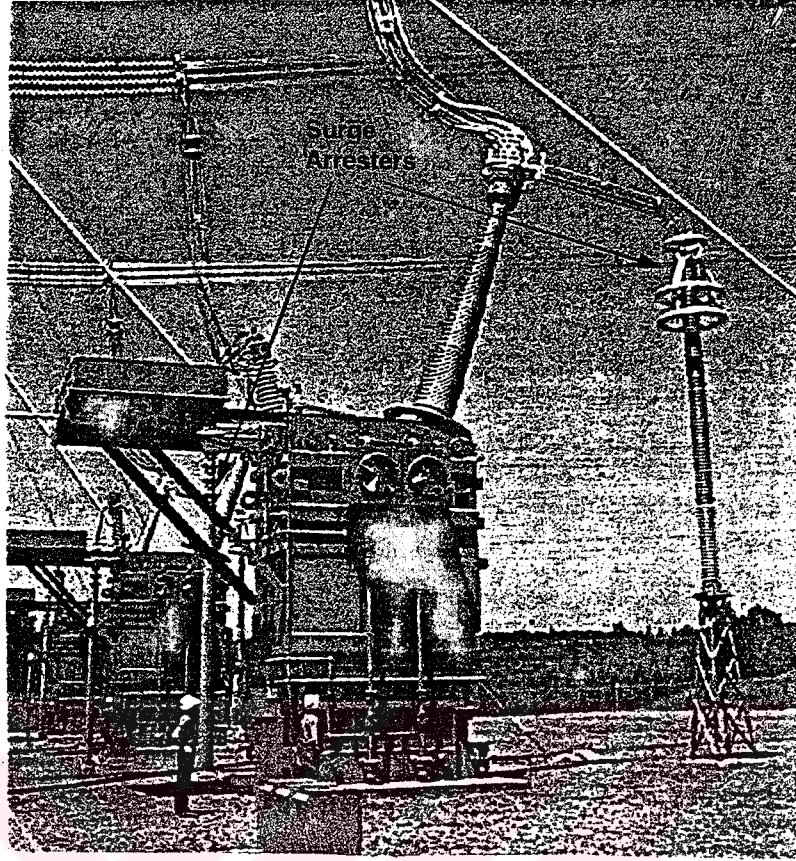
- Ekipmanları veya elektrik sistemlerini yanlış çalışmalarına sebep olabilecek elektriksel hatalardan önleyecek şekilde tasarlamak,
- Bir güç kalitesinin sebep ve çözümünü tanımlamak için problemin belirtilerini analiz etmek,
- Elektrik problemini ileten aracı tanımlamak ve etkisini azaltmak veya ortadan kaldırmak,
- Güç düzeltici kullanarak güç kalitesi problemi belirtilerini iyileştirmek. Güç yönlendirici ekipman, bir güç kalitesi sorunu ortaya çıktığında, bu sorunu hafifletir

Çoğu güç düzeltici genellikle gerilimi iyileştirmekte görev alır, çünkü çoğu güç kalitesi problemi gerilim problemidir. Çoğu cihaz gerilim genlik veya frekansını iyileştirir veya düzenler. Bu cihazlar geçici olayların ve kalıcı-düzen gerilim değişikliklerinin etkilerini azaltmak veya hassas cihazı probleminden ayırabilmek için geliştirilirler. Örnek olarak, büyük dalga bastırıcılar, geçici gerilim büyüklüğünü sınırlar ve regülatörler de kalıcı düzen geriliminin belirlenen nominal değerinden sapmasını engeller. Filtreler 60 Hz dışında frekansa sahip gerilim ve akımları azaltır veya yok eder. Gerilim düzelticilerin en önemlileri, gerilim regülatörleri ve ferromanyetik cihazlar, harmonik filtreler, kalıcı düzen bastırıcıları ve statik VAR kompanzatörleridir.

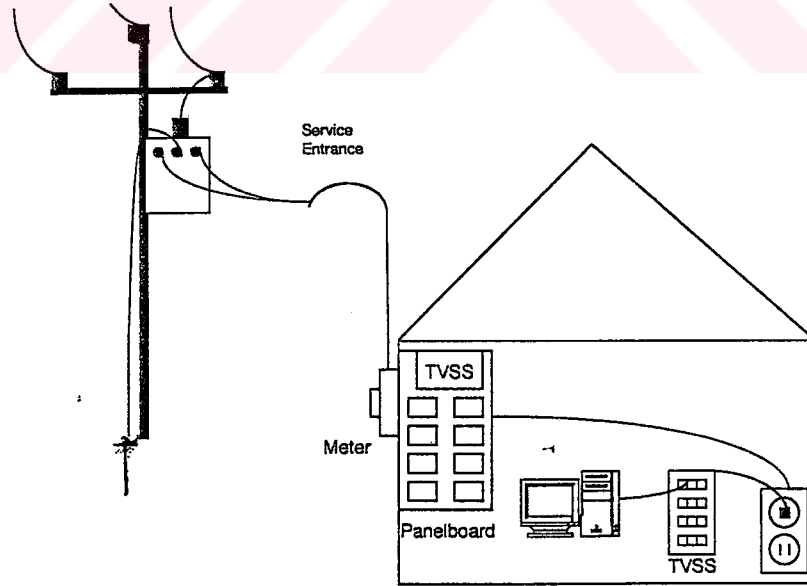
Diğer türdeki güç düzelticiler enerjinin alternatif kaynaklarını sağlar. Bu tür cihazlar enerji depolama veya alternatif kaynaklar anahtarlama cihazlarını içerir. Enerji depolama sistemleri pil, kapasitör, motor-generatör gruplarını içerir. Bu cihazların her biri geçici kesintiler ve gerilim düşümleri gibi elektriksel hatalar sırasında alternatif enerji sunarlar. Bu cihazların en önemlileri, dalga bastırıcılar, yalıtım transformatörleri, alçak gerilim hat reaktörleri, çeşitli hat-gerilim regülatörleri, motor-generatör grupları, KGK, harmonik filtrelerdir.

7.2 Dalga Bastırıcıları

Ekipmanları güç kalitesi problemlerinden korumak için en yaygın olarak kullanılanlar dalga bastırıcılardır. Dalga bastırıcılar hassas ekipmanların güç sistemindeki gerilim dalgalanmaları veya yıldırım düşmesi olaylarından etkilenmesini engeller. Eğer elektrik üreticisi tarafına yerleştirilirlerse dalga veya yıldırım ayırıcıları olarak adlandırılırlar. Tüketici tarafına yerleştirildiklerinde ise geçici gerilim dalga bastırıcıları (TVSS) olarak adlandırılırlar. Oluşan geçici gerilimleri toprağa yönlendirirler veya korudukları ekipmana zarar vermeyecek seviyeye sınırlayarak koruma sağlarlar.



Şekil 7.1 Transformatör aşırı akım ayırıcıları



Şekil 7.2 Pano ve çıkış TVSS'i

Elektrik üreticileri korumak istedikleri transformatör, dağıtım hatları veya trafo merkezi ekipmanları gibi araçların yakınına ayırıcılar tesis ederler. Şekil 7.1'de gösterildiği gibi,

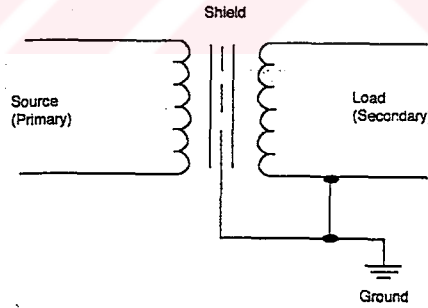
üreticiler trafo merkezinin yüksek-gerilim ve alçak-gerilim tarafına dalga bastırıcılar kullanmışlardır.

Tüketiciler, dalga bastırıcıları veya TVSS'leri, güç çıkışı ile bilgisayarlar, ayarlanabilir hız sürücüler, ve haberleşme cihazları gibi hassas elektronik cihazlar arasına veya ana güç kaynağı panosuna yerleştirebilirler. Şekil 7.2 güç çıkışı ve panoda yerleştirilmiş TVSS'i gösterir.

7.3 Yalıtım Transformatörleri

Yalıtım transformatörleri en popüler güç-düzeltilme cihazlarıdır. Bu cihazlar, hassas yükleri elektrik üreticisi tarafından oluşan geçici olaylar ve gürültüden izole ederler. Ayrıca müşterilerinin lineer olmayan ekipmanlarından kaynaklanan harmoniklerin elektrik şebekesine ulaşmasını engeller.

Yalıtım transformatör bileşenleri magnetik çekirdekli bir primer ve sekonder sargı ve bu sargılar arasında magnetik olmayan topraklanmış bir ekran içerirler. Elektrik üreticisinden gelen herhangi bir gürültü veya geçici olay, primere doğru kapasitans üzerinden toprağa iletilir ve herhangi bir hassas elemana ulaşamaz. Şekil 7.3 tek fazlı bir yalıtım transformatörün yapısını göstermektedir.

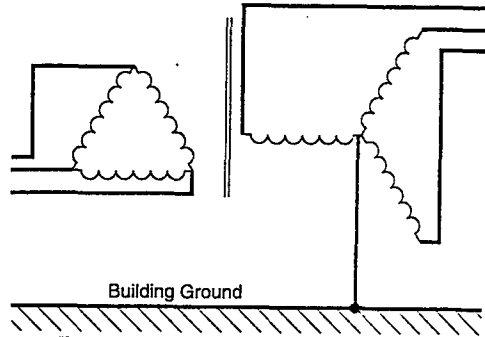


Şekil 7.3 Tek-fazlı yalıtım transformatörü

Yalıtım transformatörleri gürültünün hassas elektronik ekipmana ulaşıp hasar vermesini engeller. Eğer sekonder yıldız bağlı ve topraklanmış ise, hiçbir gürültü korunan hassas ekipmana ulaşamaz.

Tüketiciiyi elektrik üreticisinden kaynaklanan geçici olaylardan korumaya ek olarak, üçgen-yıldız bağlı yalıtım transformatörleri elektrik üreticisini üçün katları olan harmoniklerden korur.

Yalıtım transformatörleri, için katı harmonikleri yıldız bağlı sekonderden, üçgen bağlı primere taşır. Bu harmonikler primerde dolanırlar ve ısı üretirler, ancak şebekeye geçemezler. Şekil 7.4 ekranlanmış üçgen-yıldız bağlı yalıtım transformatörünü gösterir.



Şekil 7.4 Üçgen-yıldız bağlı yalıtım transformatörü

Yalıtım transformatörleri genellikle dalga bastırıcıları ile birlikte kullanılırlar. Gerilimi düzenlemez veya ekipmanı gerilim düşümlerinden korumazlar. Çeşitli türdeki hat-gerilim regülatörleri bu korumayı sağlar (Kennedy, 2000).

7.4 Harmoniklerin Filtrelenmesi

Harmonik sorununu çözümlenebilmek için genel üç çözüm vardır;

- Yük nedeni ile meydana gelen harmonik akımlarını azaltmak,
- Sistemden harmonik akımları temizlemek için tıkaç devresi eklemek ve akımların sisteme girişlerini bloke etmek,
- Filtreler, kondansatörler ve bobinler ile sistemin frekans cevabını değiştirmek (Arrilaga vd., 1985; Gonzalez ve McCall, 1987; Dugan vd., 1996).

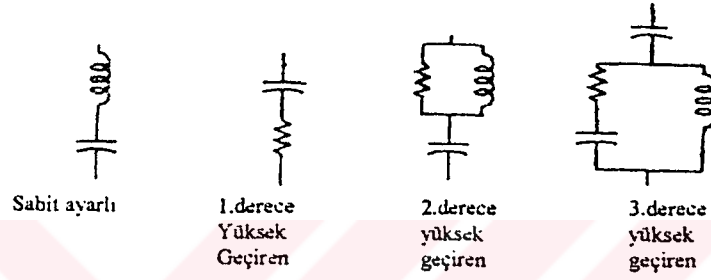
Pratik olarak filtreler harmonik akımlarını harmonik kaynağı olan yüke en yakın noktada kısa devre ederek süzerler. Bu şekilde harmonik akımları güç sisteminde dolaşamazlar. Yük gerilimini de yumuşattığı ve ekonomik olduğu için en çok kullanılan seriler filtrelemedir. Bu filtre paralel ayarlı devresi sayesinde harmonik akımına yüksek bir empedans sunar, bu şekilde harmonik akımlarının devrede dolaşmasını engeller. Filtreler;

- Pasif filtreler
- Aktif filtreler

olarak iki genel sınıfta incelenirler.

7.4.1 Pasif Filtreler

Pasif filtreler endüktans, kondansatör ve direnç elemanlarından oluşur. Harmonik distorsiyonları azaltmakta kullanılan diğer yöntemlere göre daha ekonomik olduğu düşünülebilir. Harmonik akımları şebekeden silebilirler veya şebekede dolaşmasını önleyebilirler. Seçilen harmonik frekansında rezonans meydana getirerek çalışırlar. Şekil 7.5'te yaygın olarak kullanılan filtreler görülebilir (Dugan vd., 1996).



Şekil 7.5 Yaygın olarak kullanılan pasif filtrelerin bağlantı şekilleri

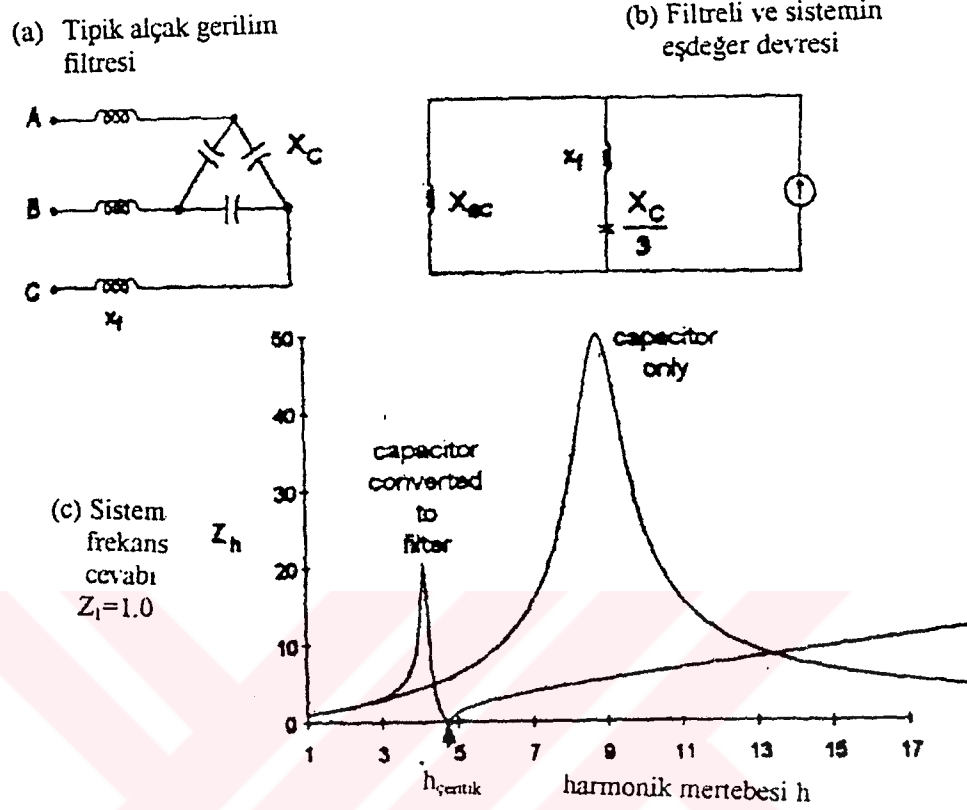
Şekil 7.6'da 480 V'ta bir filtreleme örneği ve sistem frekans cevabı gösterilmiştir. Çentik filtre ayarlandığı harmonik derecesine düşük empedans gösterecek şekilde seri olarak ayarlanır. Güç sistemine şönt bağlanır. Bu şekilde harmonik akımları normal akış yönünden saparak filtre üzerinde dolaşırlar. Şekil 7.6 üçgen bağlı bir kondansatör grubunun endüktans eklenerek filtreye dönüşmesini göstermektedir. Bu örnekte $h_{\text{çentik}}$ temel frekans ile aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$h_{\text{çentik}} = \sqrt{\frac{X_C}{3 \cdot X_F}} \quad (7.1)$$

Burada X_C , eşdeğer faz nötr kapasitif reaktör yerine üçgen bağlı transformatör grubunun bir kolundaki reaktanstır. Fazlar arası gerilim ve üç faza ait reaktif güç ile yapılan bir hesaplamada X_C 'yi üçe bölmeden işlem yapmamız gerekir.

Sistem frekansındaki değişimlerden etkilenmemek için filtreler belirlenen harmonik frekansının belli bir miktar altında ayarlanmaktadır. Aksi taktirde bobin ve kondansatör elemanlarının ısınması ya da yaşlanması gibi durumlarda meydana gelebilecek ayarsızlık nedeni ile harmonik frekansında paralel rezonans meydana gelebilir ve bununla birlikte

harmonik akımlar etkisinden daha yüksek değerlere çıkabilir. Bu nedenle filtreler sisteme en düşük harmonikten başlamak üzere bağlantı yapılmalıdır.



Şekil 7.6 Harmonik için tasarlanmış bir çentik filtre ve sistem cevap karakteristikleri

Şekil 7.6(a)'daki filtre, kondansatörler üçgen bağlı olduğu için üç ve üçün katları harmonikleri engellemektedir.

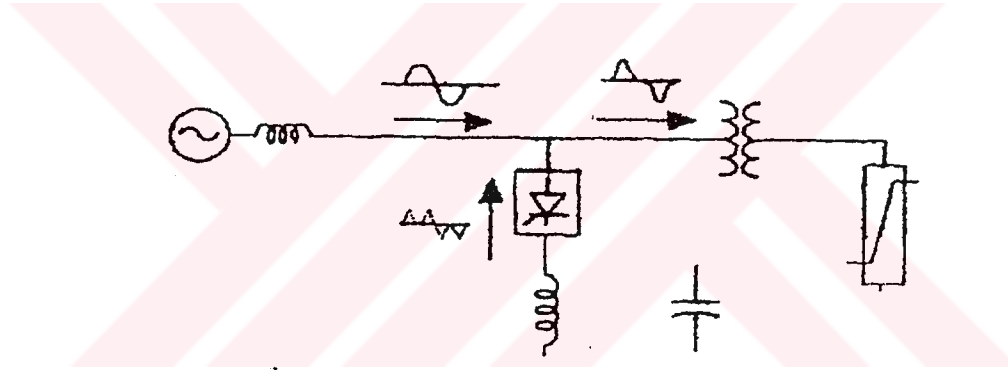
Gereken durumlarda üç ve üçün katları harmonikleri filtrelemek gerekmektedir. Düşük gerilimlerde genelde kondansatör grupları üçgen bağlantı şeklindedir. Yüksek gerilimde ise yalıtım probleminden dolayı yıldız bağlantı daha çok kullanılır. Kondansatörün nötr bağlantısına bobin bağlanarak sıfır bileşen harmoniklerini süzmek mümkündür.

- Filtrenin büyüklüğü, filtrenin temel frekansta sağladığı reaktif güç ile tanımlanır. İyi bir filtreden, dalga şekli bozulmalarının tüm yan etkilerini ortadan kaldırılması beklenir. Pratikte pasif filtrelerde bu pek mümkün değildir (Arrilaga vd., 1985). Bir pasif filtrede, harmonik bileşenlerin % 70 ile % 90 oranlarında düşürüldüğü düşünülebilir.

7.4.2 Aktif Filtreler

Aktif filtreler daha yeni tipte filtrelerdir. Pasif filtrelere göre daha pahalı olup karmaşık elektronik devrelere sahiplerdir. En büyük üstünlükleri sistemle rezonansa girmemeleridir. Bu nedenle rezonans sorunu çözülmemiş noktalarda yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca aktif filtreler bir diğer güç kalitesi problemi olan flikeri de önlerler.

- Temel çalışma prensipleri, doğrusal olmayan yükün yarattığı bozukluğu sinüsoidal forma tamamlayarak filtrelemesidir. Şekil 7.7’de aktif filtre örneği gösterilmiştir. Şebekeye bağlanmış gerilim ve akım algılayıcılarından gelen anahtarlama işareti sayesinde aksi işaret üreterek bozuk dalgayı sinüsoidal forma tamamlamaktadır. Aktif filtreler, harmonikleri süzer ve bununla birlikte nominal şebeke frekansında güç faktörünü de iyileştirirler (Arrilaga vd., 1985; Dugan vd., 1996).



Şekil 7.7 Aktif filtrenin doğrusal olmayan bir yüke uygulanması

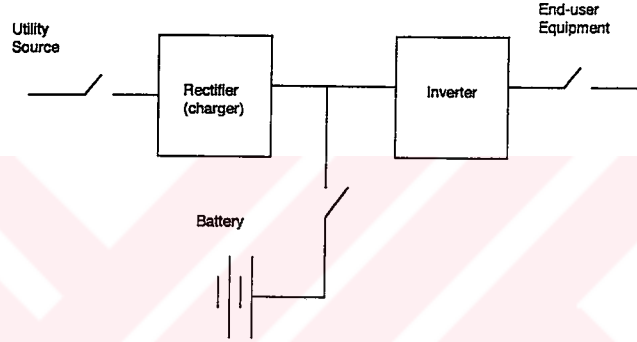
7.5 Kesintisiz Güç Kaynakları

Sürekli devrede olup şebeke gerilimi kesinti ve bozukluklarını yüke hiç hissettirmeden veya şebeke gerilimi kesildiğinde çok kısa bir sürede devreye girerek yükü beslemeye devam eden sistem veya güç kaynaklarıdır.

Kesintisiz güç kaynakları gerilim ve gücü düzenler. Bir gerilim düşmesi sırasında gerilimin sabit kalmasını sağlayarak gerilimi düzeltir. Gücü ise bir kesinti sırasında güç kaynağı sağlayarak düzeltir. Statik veya dönen bir kaynaktan sabit bir gerilim veya güç sağlar.

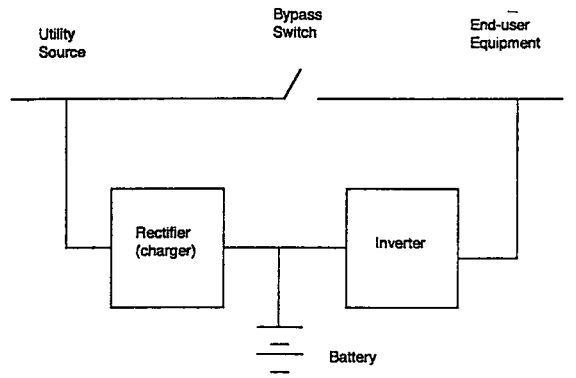
Bir KGK çeşitli şekillerde bağlanabilen temel bileşenler veya inşa blokları içerir. Bu temel inşa blokları akümülatör, inverter ve doğrultucu içerir. Bu akümülatör boyutuna bağlı olarak 1-5 yıl kullanılabilir ömür ve 5-60 dakika destek kapasitesine sahiptir. Inverter, doğru akımı alternatif akıma genellikle ayarlanmış bir kare dalga ile çeviren tristörleri içeren bir cihazdır. Doğrultucu ise AC gerilimi, DC gerilime çevirir. Doğal komutasyonlu tam dalga ve kontrollüdür. Diyot ve tristörlerden oluşmuştur.

Kesintisiz güç kaynakları dinamik ve statik olarak 2 gruba ayrılır. Sürekli çalışır durumda olup olmamasına göre beklemesiz (on-line) ve beklemeli (off-line) olarak iki gruba ayrılır. Şebekeye doğrudan bağlamalı olanları da vardır.



Şekil 7.8 Beklemesiz bir KGK bağlantısı

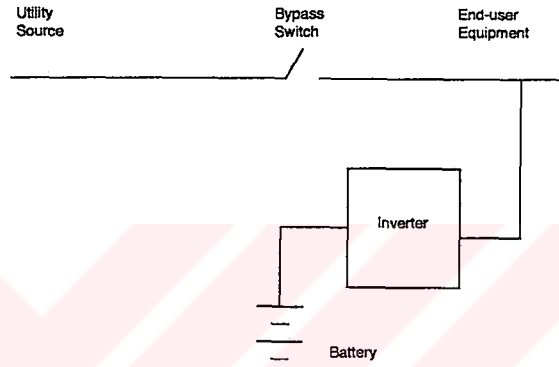
Şekil 7.8'de gösterildiği gibi beklemesiz bir KGK her zaman mümkün bir tam şarjlı akümülatör desteği sağlar. Gücü, gerilim düşmeleri, dalgalanmalar veya sürekli kesintilerden koruma avantajına sahiptir. Ancak daha kısa bir akü ömrü dezavantajına sahiptir, çünkü pilin sürekli şarjı ve deşarjı pilin ömrünü kısaltır.



Şekil 7.9 Beklemeli bir KGK bağlantı şekli

Şekil 7.9’da gösterildiği gibi beklemeli bir KGK normal çalışma sırasında akümülatöre bağlı inverteri kapatır. KGK sadece bir kesici sırasında DC gücü AC’ye çevirmek için kullanılan inverteri açar. Sonuç olarak, akü ömrünü sürekli şarj ve deşarj yapmaması sebebiyle uzatır. Bununla birlikte, kesinti sırasında KGK’yı hizmete almak için 4-10 ms kadar bir zaman gecikmesi vardır.

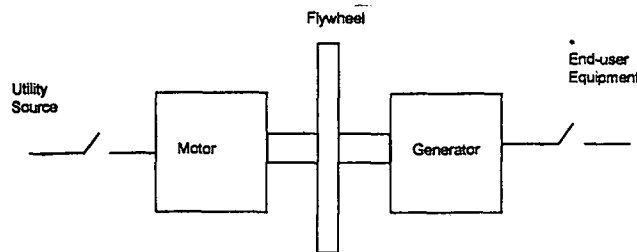
Şekil 7.10’da gösterilen KGK ise, on-line ve off-line çalışmaların bir karışımıdır. Normal çalışma sırasında aküyü şarj eder. Kesinti olduğunda ise, çalışmayı tersine döndürerek hassas elektronik ekipman için kullanılmak üzere pilden DC gücü AC güce çevirir.



Şekil 7.10 Doğrudan bağlamalı bir KGK bağlantı şekli

Yüksek derecede kritik bölgelerde (hastane, çeşitli üretim sahaları gibi), müşteriler statik KGK modüllerine bir tanede dinamik KGK modülü ekleyebilir veya ayrı bir motor-generatör grubu kullanılabilir.

KGK’ların düzgün boyutlandırılması ve seçimi başarılı bir şekilde çalışması için önemlidir. Bir KGK satın alırken veya tesisinde yükün tek fazlı veya 3 fazlı olması, tesis yeri, yükün soğutma ve aydınlatma ekipmanları göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 7.11 Tipik bir motor-generatör grubu

Tipik olarak, KGK sistemleri akünün boyutuna bağı olarak 15 dakikadan 30 dakikaya kadar güç kesintisi koruması sağlayabilir. Elektrik üreticisi hasarlarının %99'undan kritik yükleri koruyabilir, ve güç hatalarının varlığı sırasında kontrollü bir kapama zamanı sağlar. KGK sistemleri, klimalar gibi mekanik yükleri besleyemezler. KGK sistemlerine ek olarak, dizel generatörler uzun dönemli kesinti koruması sağlamak için gereklidir.

Tesis edilen çoğu KGK 500 kVA'nın altına sınırlandırılmıştır ve statik tiptedirler. 500 kVA'nın altındaki dinamik KGK sistemleri statiklere nazaran daha pahalıdır. 500 kVA'nın üstünde, çoğu KGK tesisleri statiktir. 50 kVA'nın üstünde, çoğu KGK sistemleri on-line konfigürasyondadır.

Bilgisayarlar için KGK üniteleri 250-400 VA sınıfında ve off-line yapıdadırlar. KGK sisteminin tesisiyle ortaya çıkan maliyet 800 \$'dan 1500 \$/kVA'ya kadar değişebilir. KGK boyutu büyüdükçe kVA'ya göre birim maliyet düşer. 500 kVA'nın üstündekilerde maliyet 800 \$/kVA'dan, 30 kVA'da 1500 \$/kVA'ya kadar yükselir [1].

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Özellikle son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte hassas elektronik cihazların kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Bunun sonucunda söz konusu cihazları kullanan müşterilerin yüksek kaliteli elektrik enerjisine olan talepleri teknolojinin gelişmesine paralel olarak artmıştır.

Dalga şekli distorsiyonlarının ve bozucu etkilerin hassas tüketici yükleri üzerindeki olumsuz etkilerini belirlemek amacıyla elektrik kurumları ve konuyla ilgilenen diğer kuruluşlar tarafından öncelikle cihazların nasıl etkilendiği tespit edilmeli ve ilgili standartlar hazırlanmalıdır. Daha önceden çıkarılan standartlar ise değişen koşullara uygun olarak yeniden gözden geçirilmelidir.

Özellikle, hassas yükler için güç gereksinimlerini üreticilerden almak önemlidir. Ulusal Bilgi İşlem Standardı Yayın 94 (Federal Information Processing Standart (FIPS) Publication 94), otomatik veri işleme sistemlerinin güç kaynak karakteristiklerine ve topraklama araçlarına uyması için bazı maddeler içerir. Buna göre;

- Veri işleme sisteminde birbirine bağlı tüm elemanların aynı topraklama sistemine sahip olduğu ve bu noktanın sürekli olarak kalite seviyesinin belirli bir maksimum empedansı aşmamasına yönelik testler yapılmalıdır.
- Topraklama sisteminin fiziksel olarak ayrı iki noktasında aynı potansiyelin mevcut olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır. Fiziksel olarak ayrı ekipmanlar için yalıtım teknikleri veya akım taşıyıcılar kullanılmalıdır.
- Elektrik sisteminde önemli değişiklikler yapıldığında, ve bir alçak gerilim koşulu mevcut olduğunda, elektrik üretici firma uyarılmalı ve elektrik transformatörü üzerindeki kademe ayarları kontrol edilmelidir.
- Elektrik ekipmanının düzgün tesis edilmesi önemlidir. Örnek olarak, birçok ferreazonant transformatör ve güç düzeltici, yanlış boyutlandırılmış primer iletken ve kesiciler sebebiyle düzgün olmayan bir şekilde tesis edilirler.
- Transformatörler, hasara karşı korunmaları için, işletme altındayken yüksüz bırakılmamalıdır. Örneğin, bilgisayar yüküne sahip aynı sistem, transformatör devre dışı bırakılmadan kapatılmamalıdır.

- Tüketiciler ürettikleri harmoniklerin seviyesinin farkında olmalıdır. Bu harmonikler dağıtım sisteminin izin verilebilir sınırlarının dışına çıktığında müşteriler kullanımlarını devre dışı bırakmalıdır.

Enerji iletim sisteminin tipi de güç kalitesini etkileyen önemli etkenlerden biridir. Çöküntüler hava hatlarında yer altı şebekesine göre dört kat daha fazla meydana gelmektedir. Aynı şekilde kesintiler de havai hatlarda iki kat daha sık olarak görünmektedir.

Elektronik cihazlar dalga şekli distorsiyonlarından etkilenmeleri yanında aynı zamanda birer distorsiyon kaynağıdır. Büyük güçlü elektronik aygıtlar, elektrik motorları, ark fırınları gibi yükler şebekenin genel bağlantı noktasında büyük gerilim dalgalanmalarına neden olur. Bu ise aynı noktadan beslenen hassas cihazlara sahip diğer tüketicilerde önemli güç kalitesi problemlerine yol açar. Elektrik kurumları güç kalitesi problemlerinin azaltılması için genel bağlantı noktasındaki gerilimleri azaltmak için gerekli önlemleri alması gereklidir. Büyük güçlü endüstriyel tesislerden kaynaklanan problemler standart değerlerin üzerinde ise elektrik kurumu bu kuruluşlardan güç kalitesini düzeltmesini istemelidir. Elektrik tüketicilerine önerilen bazı güç kalitesi problemlerini azaltma yöntemleri ise şu şekilde verilebilir;

- Topraklama sisteminin düzgün bir şekilde uygulanıp uygulanmadığı kontrol edilmelidir.
- Elektriksel olarak diğer yüklerden daha hassas yükler önemlidir. Bu ayrı bir dağıtım transformatörü gerektirebilir. Elektrik Güvenlik Kodları (Electrical Safety Code) genellikle şebekede ayrı AC sistemlerin kullanılmasına izin vermez.
- Binada, güç hattı girişi noktasında ve diğer hassas noktalarda aşırı gerilim korumasının mevcut olmasını sağlanmalıdır.
- Tüm ekipmanların güvenlik sebebiyle CSA tasdikli olduğuna dikkat edilmelidir.
- Elektriksel ürünleri satın alırken, istenilen tüm fonksiyonları etkili bir şekilde yerine getirmesi düşünülmelidir. Üretim sahası içerisinde, özellikle de düzeltme ekipmanları için, mümkün ise örnekleme istenmelidir.
- Düzeltme ekipmanının tesisini takip etmek, problemin çözüldüğünün doğruluğunu kanıtlar.

- Düzeltme ekipmanı ve yükün karşılıklı etkilenmeleri göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, düzeltme ekipmanı büyük bir empedansa sahipse, yük büyük bir kalkış akımı (büyük motorların kalkışı gibi) çekebilir, ve bir gerilim çökmesi meydana gelir.

Tüm elektrik ekipmanları düzgün boyutlandırılmalıdır. Ürünler güç ifadesi ile, Volt Amper (VA) olarak veya maksimum akım (amper olarak) sınıfına göre boyutlandırılabilirler. Uygun boyutu seçilirken; yük çalışma gerilim, akım veya VA'nın plaka sınıfından belirlenmesi, yüklerin tüm ayrı VA sınıflarının toplanması, yük tarafından çekilen Watt olarak gerçek güç tahmininin elde edilmesi gerekir. Ayrıca, bazı üniteler primer güç sınıfına göre belirlenir. Bu durumda tüm sekonder yüklerin toplamı primer güç sınıfını elde etmek için ünitenin verimine bölünmelidir.

Ayrıca projelendirme aşamasındaki endüstriyel ve ticari kuruluşlarda bulunan ve güç kalitesini olumsuz yönde etkileyebilecek yüklerin neden olabileceği güç kalitesi problemlerini minimum olması için gerekli tedbirler alınmalıdır. Bu tesisler işletmeye alındıktan sonra elektrik kurumu tarafından şebekeye bağlantı noktasındaki gerilim dalga şekilleri tespit edilmelidir. Eğer kaybedilen bozucu etkiler standart değerlerin üzerinde ise elektrik idaresi söz konusu kuruluşun bu olumsuz etkiyi gidermek için filtreleme gibi ilave tedbirleri almasını da şart koşabilmelidir.

Ayrıca, büyük sistemlerin incelenmesinde güç kalitesi laboratuvarlarından ve bilgisayar simülasyonlarından yararlanılabilir. Böylece uzun süreli güç kalitesi çalışmalarının süresi kısaldığı gibi maliyetler de düşer. Fakat burada laboratuvarlarda kullanılacak verilerin gerçek değerlere uygun olması gerekir. Aksi halde, elde edilen sonuçlar yanlış olduğu gibi uygulamada daha yüksek masraflar da meydana gelebilir.

Güç kalitesi problemlerinin tüm şebeke üzerindeki olumsuz etkileri, elektrik enerjisini üreten, ileten, dağıtan kuruluşlarca sınırlandırılabilir. Örneğin güç katsayısıyla ilgili kompanzasyon tesisi kurma zorunluluğuna benzer şekilde, harmonik yüzdeleri doğrultusunda filtre tesisi kurma zorunluluğu getirilebilir. Bunun için, ilgili tesislere harmonikleri ölçecek ve kaydedecek cihazların bağlanması, belirli noktalara kayıt ve kontrol ünitelerinin yerleştirilmesi düşünülebilecek önlemlerdir.

Hassas elektronik cihaz üreticileri de dalga şekli distorsiyonlarının cihazları üzerindeki etkileri konusunda müşterilerini bilgilendirmelidir. Üretimi yapılan cihazların tolerans değerleri belirlenen standart değerlerinin altında olmalıdır.

Tüketiciler elektrik kurumlarından kesintisiz ve sürekli bir elektrik enerjisi talep ederler. Bu amaçla elektrik kurumları da tüketiciye sürekli ve kesintisiz güç temin etmek üzere kendi üzerine düşen görevleri yerine getirmelidir. Özellikle elektrik kurumlarının fırtına, yıldırım gibi atmosferik olaylar ve hatalı röle çalışması gibi nedenlerle meydana gelen gerilim çöküntüsü ve kesintilerin sayısını minimum yapması gereklidir. Tüketicilerin elektrik cihazlarını verimli ve ekonomik bir şekilde kullanması için seminerler düzenlenerek eğitilmesi sağlanmalıdır.



KAYNAKLAR

ANSI / IEEE C57.110, (1986), IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents, IEEE Standards Department, New Jersey.

Arrilaga, J., Bradley D. A., Bodger P.S., (1985), Power System Harmonics, Wiley & Sons, New York.

Aspnes J.D., Evans B.W., Merritt R.P., (1985), "Rural Alaska Elektrik Power Quality", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-104(3):2487-2493.

Bayram M., (1985), "Kompanzasyon Tesislerinde Rezonans ve Bunların Önlenmesi", Elektroteknik Mecmuası.

Bayram M., (1997), "Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu", Elektrik Mühendisleri Odası, İstanbul.

Berg, G.J., M.M. Abdel Hakim, (1976), "Dynamic Single Unit Representation of Induction Motor Groups", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, volume PAS-95:562-567.

Çakır, H. (1985), Elektrik Şebeke Kayıpları, Y.T.Ü., İstanbul.

Domijan A., Embriz-Santander E., (1992), "A Novel Electric Power Laboratory for Power Quality and Energy Studies; Training Aspects", IEEE Transactions on Power Systems, 7(4):1571-1578.

Domijan A., Heydt J.T., Meliopoulos A.P.S., Venkata M.S.S., West S., (1993), "Directions of Research on Electrical Power Quality", IEEE Trans. On Power Delivery, 8(1):429-436

Douglas J., (1994), Power Quality Solutions, IEEE Power Engineering Review.

Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Beaty H.W., (1996), Electrical Power System Quality, McGraw-Hill, New York.

Duman, H., (1989), Elektrik Makinalarının Kayıpları ve Teorisi, Acar Matbaacılık, İstanbul.

Emanuel, A.E., (1990), "Powers In Nonsinusoidal Situations A Review of Definitions and Physical Meaning", IEEE Transactions on Power Delivery, 5(3):1377-1389.

Erna, H., (1979), Pratik Elektrik, İnkılap ve Aka Basımevi, İstanbul

Ferrero, A., Superti-Furga, G., (1990) "A new Approach to the Definition of Power Components in Three Phase Systems Under Nonsinusoidal Conditions", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 40(3):568-577.

Gonzalez, D.A. and McCall, J.C., (1987), "Design of Filters to reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, 1A-23(3):504-511.

IEEE 519, (1992), Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standards Department, New Jersey.

IEEE 1159, (1998), Guide for Recorder and Data Acquisition Requirements for Characterization of Power Quality Events, IEEE Standards Department, New Jersey.

Jacovides, L.L., (1973), "Analysis of Induction Motor Drives with a Non-sinusoidal Supply Voltage Using Fourier Analysis", IEEE Trans. On Industry Applications, 1A(9):741-747.

Kennedy, B.W., (1997), Energy Efficient Transformers, Mc Graw-Hill, New York.

Kennedy, W.B., (2000), Power Quality Primer, McGraw-Hill, New York.

Lehtla, T., (1995), "Modelling of Voltage Transients on Inverter Fed AC Induction Motor", Int. Symp. On Electrical Power Engineers, Stockholm Power Tech., Stockholm, 438-439.

Lehtla, T., (1996), "Parameter Identification of an Induction Motor Using Fuzzy Controller", PEMC'96, Budapest, Part 3:292-296.

Ludbrook A., (1993), 'Manager's Guide to Electrical Power Quality', Iron and Steel Engineer, Volume 70.

Mahmoud, A.A., R.D. Shultz, (1982), "A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. Power Systems", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, PAS-101:1815-1824.

Martzloff F., Thomas G., (1988), "Power Quality Site Surveys", IEEE Transactions on Industry Applications, 24(6):1005-1018.

Schilling, E.W., (1933), "The Distortion of Current and Voltage Waves on Transmission Lines", PhD. Dissertation, Iowa State University, Ames.

Wyk, J. Van, (1993), 'Power Quality, Power Electronics and Control'. The European Poer Electronics Association.

İnternet Kaynakları

[1] <http://www.lincopower.com/Documents.htm>

Power Quality Paper – Problems and Solutions, Power Quality One-day Seminar, Linco Power Ltd, Toronto.

[2] <http://www.elec.uow.edu.au/pqc/pq-pub.html>

"Understanding Power Quality", June 98; "Power Factor Correction and its Pitfalls", May 99; "Harmonic Distortion in the Electrical Supply Systems", March 2000; Integral Energy Power Quality Centre, School of Electrical, Computer, Telecommunications Engineering of Wollongong, NSW, AUSTRALIA.

[3] [http://www.d-tech.de/Veroeffentlichungen/EPE97/Transient Model.html](http://www.d-tech.de/Veroeffentlichungen/EPE97/Transient%20Model.html)

Nemeth-Csoka, M., "Transient Model of a Squirrel Cage Induction Machine Including the Skin Effect Using Rotor-fixed Reference Frame", Tallinn Technical University, Estonia.

[4] [http://www.ene.ttu.ee/Elektrijamid/teadus/artiklid/ Comp_OF_models/](http://www.ene.ttu.ee/Elektrijamid/teadus/artiklid/Comp_OF_models/)

Lehtla, T., Joller, J., Lehtla M., Laugis J., "Parameter Identification and Comparision of an Induction Motor Models", Tallinn Technical University, Estonia.

[5] <http://www.ene.ttu.ee/Elektriamid/teadus/artiklid/Kreeka2/>
Lehtla, T., Laugis J., "Modelling of High Frequency Voltage Transients on Electrical Motors", Tallinn Technical University, Estonia.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	06. 08. 1978	
Doğum Yeri	Rize	
Lise	1989-1996	Hüseyin Avni Sözen Anadolu Lisesi
Lisans	1996-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2000- 2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

