

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HARMONİKLERİN DİJİTAL AŞIRI AKIM RÖLELERİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Elektrik Müh. Sema AKBABA

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1 GİRİŞ.....	1
2 HARMONİKLER, HARMONİK KAYNAKLARI, HARMONİKLERİN ETKİLERİ	3
2.1 Giriş	3
2.2 Harmoniklerin Matematiksel İfadesi	5
2.2.1 Fourier Analizi.....	5
2.3 Harmonik Üreten Başlıca Kaynaklar.....	8
2.3.1 Transformatörler	8
2.3.2 Döner Makineler.....	9
2.3.2.1 Senkron Generatörler.....	9
2.3.2.2 Asenkron motorlar.....	11
2.3.3 Güç Elektroniği Elemanları	12
2.3.4 Doğru Akım İle Enerji Nakli (HVDC).....	15
2.3.5 Statik VAR Sistemleri	15
2.3.6 Ark Fırınları.....	15
2.3.7 Kesintisiz Güç Kaynakları.....	17
2.3.8 Gaz Deşarjlı Aydınlatma	18
2.3.9 Elektronik Balastlar	18
2.3.10 Fotovoltaik Sistemler.....	19
2.4 Harmoniklerin Etkileri.....	19
3 KORUMA SİSTEMLERİNİN GENEL PRENSİPLERİ	21
3.1 Giriş	21

3.2	Koruma sisteminde olması gereken özellikler.....	21
3.3	Koruma Sistemini Oluşturan Elemanlar	25
4	KORUMA RÖLELERİNİN YAPILARI VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ	26
4.1	Giriş	26
4.2	Rölelerin Sınıflandırılması	27
4.3	Koruma Röleleri	27
4.4	Aşırı Akım Röleleri	28
4.4.1	Giriş	28
4.4.2	Aşırı Akım Röleleri ile İlgili Tanım ve Kavramlar	29
4.4.3	Aşırı Akım Rölelerinde Ani Eleman, Yardımcı Kontaktör ve Bayraklar	30
4.4.4	Aşırı Akım Rölelerinin Sınıflandırılması	31
1.1.1.1	Çalışma Karakteristiklerine Göre Aşırı Akım Röleleri	31
4.4.4.1	Yapılarına Göre Aşırı Akım Röleleri	32
4.4.4.1.1	Elektromekanik (İndüksiyon Diskli) Aşırı Akım Röleleri	32
4.4.4.1.1.1	Ani Aşırı Akım Röleleri	34
4.4.4.1.1.1.1	Dalgıç ve Menteşe Tipli Aşırı Akım Röleleri.....	35
4.4.4.1.1.1.2	İndüksiyon Diskli Aşırı Akım Röleleri.....	36
4.4.4.1.1.1.3	Negatif Sequence Aşırı Akım Röleleri	38
4.4.4.1.1.1.4	Harmonik Sınırlı Ani Akım Röleleri	39
4.4.4.1.1.2	Termik Aşırı Akım Röleleri	39
4.4.4.1.1.3	Eriyici Alaşımli Termik Röleler	40
4.4.4.1.1.3.1	Termik (Bimetalli) Aşırı Akım Röleleri	40
4.4.4.1.2	Statik (Elektronik) Aşırı Akım Röleleri	42
5	DİJİTAL AŞIRI AKIM RÖLELERİ.....	44
5.1	Giriş	44
5.2	Dijital Aşırı Akım Rölelerinin Yapısı ve Gelişimi	44
5.3	Dijital Aşırı Akım Rölelerinin Kullanım Alanları ve Avantajları	46
6	HARMONİKLERİN AŞIRI AKIM RÖLELERİ ÜZERİNE ETKİSİ	48
6.1	Giriş	48
6.2	Elektromekanik Aşırı Akım Röleleri.....	48
6.3	Statik Aşırı Akım Röleleri.....	49
6.4	Dijital Aşırı Akım Röleleri	49

7 DENEYSEL ÇALIŞMA	51
7.1 Giriş	51
7.2 Harmoniklerin Dijital Aşırı Akım Röleleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi	52
7.2.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Dijital Aşırı Akım Rölelerinin İncelenmesi	52
7.2.1.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'nın İncelenmesi	52
7.2.1.1.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'nın Teknik Özellikleri	56
7.2.1.1.2 Bir trafo merkezindeki röle ayarlarının yapılması	57
7.2.1.2 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'nin İncelenmesi	59
7.2.1.2.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'nin Teknik Özellikleri	63
7.2.1.3 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'nin İncelenmesi	65
7.2.1.3.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'nin Teknik Özellikleri	66
7.2.2 Deneysel Çalışma ve Sonuçları	68
7.2.2.1 Deneyde Kullanılan Cihazlar	68
7.2.2.2 Harmonik Üreten Triyak Kontrollü Rezistif Yüklü Devre	69
7.2.2.3 Deneyle İlgili Hesaplamalar	70
7.2.2.4 Deneyin Yapılması	71
7.2.2.4.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deney sonuçları	74
7.2.2.4.2 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deney sonuçlarının değerlendirilmesi	82
7.2.2.4.3 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deney sonuçları	84
7.2.2.4.4 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deney sonuçlarının değerlendirilmesi	94
7.2.2.4.5 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deney sonuçları	95
7.2.2.4.6 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deney sonuçlarının değerlendirilmesi	105
8 SONUÇLAR ve ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	109
İNTERNET KAYNAKLARI	110
ÖZGEÇMİŞ	111

SİMGE LİSTESİ

A	Sabit
D	Distorsiyon gücü
f	Frekans
HD_I	Akım için tekil harmonik distorsiyonu (bozulması)
HD_V	Gerilim için tekil harmonik distorsiyonu (bozulması)
I_0	Akımın dc bileşeni
I_c	Çalışma akımı
I_d	Doğrultucu tarafındaki akım
I_{gd}	Geri dönüş akımı
I_n	n. harmonik akımı
$I_{giriş}$	Giriş akımı
$I_{çıkış}$	Çıkış akımı
$i_a(t)$	Hat akımının ani değeri
K_{gd}	I_{gd} ile I_c arasındaki oran
M	$I_{giriş}$ ile $I_{çıkış}$ arasındaki oran
n	Harmonik mertebesi
t	Reset zamanı
THD	Toplam harmonik distorsiyonu (bozulması)
THD_I	Akım için toplam harmonik distorsiyonu
THD_V	Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu
X	Reaktans
V_n	n. harmonik geriliminin efektif değeri
δ_n	n. harmonik geriliminin faz açısı
α	Triyak tetikleme açısı
ϕ	Akı
ϕ_n	n. harmonik akımının faz açısı
I_s	Sekonder akım
I_n	Nominal akım

KISALTMA LİSTESİ

AT	Akım Transformatörü
DC	Doğru Akım
AC	Alternatif Akım
GT	Gerilim Transformatörü
HD	Harmonik Distorsiyonu (Harmonic Distortion)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu (Total Harmonic Distortion)
ADC	Analog Digital Dönüştürücü
EMI	Elektromanyetik Girişim
LCD	Liquid Crystal Display
TMS	Time Multiplier Settings
IEC	International Electrotechnical Commission
SI	Standart Inverse
VI	Very Inverse
EI	Extremely Inverse
LTI	Long Time Inverse

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1(a) Temel dalga ile 3., 5. ve 7. harmonikler ve bunların bileşkesi olan toplam dalga (Weltin, 2007).....	4
Şekil 2.1(b) Çeşitli harmonik bileşenlerini içeren harmonik spektrumu (Weltin, 2007).	4
Şekil 2.2 Bir harmonik kaynağı olan transformatör (Genma katalog)	8
Şekil 2.3 Bir harmonik kaynağı olan senkron generatör (Chinapower katalog).	10
Şekil 2.4 Bir harmonik kaynağı olan asenkron motor (Cokesen katalog).....	11
Şekil 2.5 Güç elektroniği elemanlarından oluşan bilgisayarlar (www.apaydingrupp.com).....	12
Şekil 2.6(a) 6 darbeli doğrultucu kullanıldığında akımda oluşan harmonikler (www.acdc.com.tr).	13
Şekil 2.6(b) 12 darbeli doğrultucu kullanıldığında akımda oluşan harmonikler (www.acdc.com.tr).	13
Şekil 2.7 Bir harmonik kaynağı olan ark fırını (Cemtaş Katalog).	16
Şekil 2.8 Bir harmonik kaynağı olan kesintisiz güç kaynakları (Stepro Katalog).	17
Şekil 2.9 Bir harmonik kaynağı olan gaz deşarjlı lambalar.....	18
Şekil 2.10 Bir harmonik kaynağı olan elektronik balastlar (Osram katalog).	18
Şekil 2.11 Bir harmonik kaynağı olan fotovoltaiik sistemler	19
Şekil 3.1 Genel güç üretim, iletim ve dağıtım sistemi	22
Şekil 3.2 Örnek sistem.....	23
Şekil 3.3 Bir koruma sistemi ve elemanları.....	25
Şekil 4.1 Bir röle ve iki kontağı.....	26
Şekil 4.2 Röle kontaklarının konumlarının değişimi.....	26
Şekil 4.3 Rölelerde geri dönüş oranı	29
Şekil 4.4 Sabit zamanlı ve ters zamanlı aşırı rölelerinin çalışma karakteristikleri.....	32
Şekil 4.5 İndüksiyon disk ünitesi.....	33
Şekil 4.6 Ters zamanlı aşırı akım rölesinin fazör diyagramı.....	33
Şekil 4.7 Ters zamanlı aşırı akım rölesinin standart akım-zaman karakteristiği (IEEE Standart, 1996).....	34
Şekil 4.8 Menteşe tipi bir rölenin basit şekli (Sayar, 1998).	35
Şekil 4.9 İndüksiyon diskli aşırı akım rölesi basit şekli	37
Şekil 4.10 Tipik transformatör inrush akımları (Bozkurt, 2005).....	39
Şekil 4.11 Termik Rölenin temel yapısı (Sayar, 1998).	41
a. Endirekt ısıtmalı termik röle	41
b. Direkt ısıtmalı termik röle	41
Şekil 4.12 Statik koruma rölelerinin temel blok diyagramı.....	43
Şekil 5.1 Dijital aşırı akım rölelerinin genel prensip şeması.....	45
Şekil 5.2 Dijital röleler ve bu rölelerin bağlı bulunduğu genel izleme merkezi.....	46
Şekil 7.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A (Röle-A Kataloğu)	52
Şekil 7.2 Röle-A'nın ani açma karakteristikleri (Röle-A Kataloğu).....	54
Şekil 7.3 Röle-A'nın ayarlarının gösterilmesi (Röle-A Kataloğu).....	54
Şekil 7.4 Röle-A'nın ters akım zaman karakteristikleri (Röle-A Kataloğu)	55
Şekil 7.5 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B (Röle-B Kataloğu).....	59
Şekil 7.6 Röle-B'nin çalışma karakteristiklerin gösteren eğriler (Röle-B Kataloğu).....	62
Şekil 7.7 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C (Röle-C Kataloğu).....	65
Şekil 7.8 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'nin standart ters eğriye göre akım-zaman karakteristiği (Röle-C Kataloğu)	66
Şekil 7.9 Harmonik Üreten Triyak Kontrollü Rezistif Yüklü Devre	69

Şekil 7.10 Deneylerde kullanılan nonlineer yükün akım zaman grafiği	69
Şekil 7.11 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deney şeması.....	72
Şekil 7.12 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deney şeması.....	72
Şekil 7.13 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deney şeması.....	73
Şekil 7.14 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait sonuçların karşılaştırılması.....	82
Şekil 7.15 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait sonuçların karşılaştırılması	93
Şekil 7.16 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait sonuçların karşılaştırılması	104

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Deneyisel Veriler	36
Çizelge 4.2 İndüksiyon diskli bir rölenin harmoniklerin bulunması durumundaki çalışma değerleri	38
Çizelge 7.1 Röledeki koruma tipleri (Röle-A Kataloğu).....	53
Çizelge 7.2 Deneyde kullanılan (α) değerlerine karşılık gelen gerilim değerleri.....	71
Çizelge 7.3 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=0° için yapılan ölçümler	74
Çizelge 7.4 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=0° için elde edilen sonuçlar	75
Çizelge 7.5 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=60° yapılan ölçümler	76
Çizelge 7.6 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=60° için elde edilen sonuçlar	77
Çizelge 7.7 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=90° için yapılan ölçümler	78
Çizelge 7.8 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=90° için elde edilen sonuçlar	79
Çizelge 7.9 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=120° için yapılan ölçümler	80
Çizelge 7.10 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=120° için elde edilen sonuçlar	81
Çizelge 7.11 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=0° için yapılan ölçümler	84
Çizelge 7.12 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=0° için elde edilen sonuçlar	85
Çizelge 7.13 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=60° için yapılan ölçümler	86
Çizelge 7.14 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=60° için elde edilen sonuçlar	87
Çizelge 7.15 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=90° için yapılan ölçümler	88
Çizelge 7.16 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=90° için elde edilen sonuçlar	89
Çizelge 7.17 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=120° için yapılan ölçümler	90
Çizelge 7.18 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=120° için elde edilen sonuçlar	91
Çizelge 7.19 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=0° için yapılan ölçümler	95
Çizelge 7.20 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=0° için elde edilen sonuçlar	96
Çizelge 7.21 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=60° için yapılan ölçümler	97
Çizelge 7.22 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=60° için elde edilen sonuçlar	98
Çizelge 7.23 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=90° için yapılan ölçümler	99
Çizelge 7.24 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=90° için elde edilen sonuçlar	100
Çizelge 7.25 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=120° için yapılan ölçümler	101
Çizelge 7.26 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=120° için elde edilen sonuçlar ...	102

ÖNSÖZ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerji kalitesi ve verimliliği konusundaki talepler artmış ve buna bağlı olarak da bu yöndeki çalışmalar hız ve önem kazanmıştır. Harmonikler, akım-gerilim karakteristiği doğrusal (lineer) olmayan elemanlar sebebiyle ortaya çıkmaktadır. Güç sistemlerinde bu tip elemanların oldukça fazla kullanılması nedeniyle harmonikler enerji kalitesinin en temel ve en sık karşılaşılan problemlerinden biridir.

Aşırı akım röleleri güç sistemlerinde yer alan koruma sistemlerinin temel elemanlarındanıdır. Bu röleler genellikle sinüsoidal akım için tasarlanırlar. Ancak günümüzde güç sistemlerinde akım-gerilim karakteristiği doğrusal (lineer) olmayan elemanların yaygınlaşmasıyla bu sistemlere uygulanan akım ve gerilim harmonik bileşenleri içermektedir. Röle imalatçıları röle kataloglarında aşırı akım rölelerinin akım-zaman karakteristiklerini sadece sinüsoidal akım için verdiklerinden harmonikli akım altında rölelerin karakteristiklerinin nasıl değişeceği, rölenin koruma işlevini yerine getirip getiremeyeceği bilinmemektedir. Bu tez çalışmasından önce, bu konudaki eksiklerin giderilmesi amacıyla harmoniklerin elektromekanik ve statik aşırı akım rölelerine etkisi çeşitli çalışmalarla incelenmiştir. Bu tez çalışmasıyla da daha önce yapılan çalışmalar bir adım daha ileri taşınarak teknolojinin gelişmesiyle birlikte ortaya çıkan dijital aşırı akım rölelerin harmoniklerden nasıl etkilendiği incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, harmoniklerin dijital aşırı akım rölelerine etkisi deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Harmonik içeriği ve toplam harmonik distorsiyon değerleri farklı nonlinear yük akımları için dijital aşırı akım rölelerinin işletme akımları ve süreleri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler kullanılarak sonuç çizelgeleri ve grafikleri oluşturularak değerlendirmeler yapılmıştır.

Çalışmalarım sırasında ilgi ve desteğini benden esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI'ya, Y.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Anabilim Dalındaki tüm hocalarıma, sevgili aileme, Sayın Elk. Müh. Onur ÖZDEMİR'e, Sayın Elk. Müh. Nurcan KARA'ya, teknik katkılarından dolayı Sayın Elk. Müh. Necati ÖZBEY'e ve EAE Elektroteknik A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Bu Yüksek Lisans Tezi, TÜBİTAK 105G129 nolu "Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi" konulu proje tarafından desteklenmektedir. Deneysel çalışmadaki katkılarından dolayı Proje Yürütücülüğü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Bu tez çalışmasında harmoniklerin dijital aşırı akım röleleri üzerine olan etkileri deneysel çalışmalar yapılarak incelenmiştir. Bu deneysel çalışmalarda benzer akım-zaman karakteristiklerine sahip üç farklı dijital aşırı akım rölesi kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, farklı harmonik spektrumlarına sahip nonlineer yük akımları dijital aşırı akım rölelerine uygulanmış ve rölelerinin çalışma akım değerleri ile cevap süreleri ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar sonunda ölçüm sonuçları ile röle katalog değerleri karşılaştırılarak rölelerin hata yüzdeleri hesaplanmış, yapılan tüm ölçümler ve hesaplanan değerler kullanılarak sonuç çizelgeleri ve grafikleri oluşturulmuştur.

Deneysel çalışmalar sonucunda, akımın Toplam Harmonik Distorsiyonu (%THDi) değeri yükseldikçe, röle kataloglarında sadece saf sinüsoidal akım için verilen akım-zaman karakteristik eğrilerinin sinüsoidal olmayan (nonsinüsoidal) akımlar için değiştiği, incelenen dijital aşırı akım harmonik distorsiyonlarından olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür.

Sonuç olarak bir güç sisteminde standartlarca izin verilen harmonik distorsiyonları dışında harmonik distorsiyonu mevcutsa ve röle kataloglarında belirtilen değerler dışındaki çalışma akımları uygulanıyorsa dijital röleler hatalı çalışabilmekte ve koruma sisteminin güvenilirliğini azalmaktadır.

Anahtar kelimeler: Harmonikler, dijital aşırı akım röleleri.

ABSTRACT

In this thesis, the effects of harmonics on digital overcurrent relays are studied with experimental studies. For these studies three different digital overcurrent relay which have similar current-time characteristics are used.

In experimental studies, the nonlinear load currents which have different harmonic spectrums are applied to overcurrent relays. Afterward, pick up currents and operating times of relays are measured. End of the studies, mistake percent of relays are calculated, results tables and graphics are drawn by using all measurements and calculated values.

It is seen from the experimental results that, as total harmonic distortion value of the current (THD_i) increases, the current-time characteristic curves only given for pure sinusoidal current on relay's catalogue are changed as for nonsinusoidal currents and the digital relays are effected in negative way because of the harmonic distortions.

In conclusions, if there are harmonics bigger than values that harmonic standards permit in a power system and the currents applied to digital overcurrent relays are different from the catalogue values, digital overcurrent relays may work faulty and due to this situation the reliability of the protection systems is declined.

Keywords: Harmonics, digital overcurrent relays.

1 GİRİŞ

Aşırı akım rölesi, elektrik güç sistemlerinde transformatör, hat, motor vb. elemanları sistemde oluşabilecek aşırı akımlara karşı koruyan temel koruma elemanlarından biridir. Bu nedenle bir güç sisteminin sağlıklı bir şekilde korunması için aşırı akım rölelerin seçimi ve ayarlarının yapılması oldukça önemli ve dikkat isteyen bir konudur.

Aşırı akım röleleri genel olarak yapılarına göre elektromekanik aşırı akım röleleri ve statik (elektronik) aşırı akım röleleri olmak üzere başlıca iki gruba ayrılırlar. Bu tez çalışmasına konu olan dijital aşırı akım röleleri de statik aşırı akım rölelerin daha gelişmiş bir tipidir.

Aşırı akım röleleri akım-zaman karakteristiklerine göre incelendiğinde genel olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar sabit zamanlı aşırı akım röleleri ve ters zamanlı aşırı akım röleleridir. Sabit zamanlı aşırı akım rölelerinde arıza halinde rölenin kesiciye kumanda etmesi için beklenen zaman gecikmesi akımdan bağımsız olarak sabittir. Ters zamanlı aşırı akım rölesinde ise zaman gecikmesi akımla ters orantılıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan dijital aşırı akım röleleri ters akım zaman karakteristiğine sahip röleler olarak seçilmiştir.

Aşırı akım rölelerinin akım-zaman karakteristikleri röle imalatçısı firmalar tarafından röle kataloglarında sadece saf sinüsoidal akım için verilir. Bu durumda akımın nonsinüsoidal olması halinde aşırı akım rölesinin akım-zaman karakteristiklerinin nasıl değişeceği bilinmemektedir. Günümüzde elektrik güç sistemlerinde kullanılan elemanların bir çoğunun harmonik üreten kaynaklar olduğu düşünüldüğünde sistemde çekilen akımların saf sinüsoidal olması beklenemez. Bu nedenle harmoniklerin güç sistemlerindeki temel koruma elemanlarından biri olan aşırı akım rölelerine etkisinin belirlenmesi oldukça önemli bir yer tutmaktadır.

Literatürde ve daha önce yapılan tez çalışmalarında ters zamanlı elektromekanik ve statik aşırı akım rölelerine harmoniklerin etkisi ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasının amacı ters akım-zaman karakteristikli dijital aşırı akım rölelerine harmoniklerin etkisini bilimsel olarak inceleyerek literatürde verilen çalışmalara katkı sağlamaktır. Bu amaçla gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda farklı harmonik spektrumlarına sahip nonlineer yük akımları için dijital aşırı akım rölelerinin çalışma akım değerlerinin ve zaman gecikmeleri belirlenerek sonuçları gösteren çizelge ve eğri grafikleri oluşturulmuştur.

Giriş kısmında tezin genel içeriğinden bahsettikten sonra sırasıyla tezin diğer kısımlarında aşağıdaki sıra ve içerik izlenmiştir:

İkinci bölümde, harmonikler ile ilgili temel kavramlar ve tanımlar verilmiştir. Başlıca harmonik kaynakları ve harmoniklerin güç sistem elemanları üzerinde etkileri açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, koruma ile ilgili temel kavramlara yer verilmiş, koruma sistemini oluşturan elemanlar, koruma sisteminden beklenen özellikler (seçicilik, ekonomi, güvenilirlik, vb.) açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde aşırı akım rölelerin yapıları ve temel çalışma prensipleri anlatılmıştır.

Beşinci bölümde bu tez çalışmasına konu olan dijital aşırı akım rölelerini genel yapısı ve çalışma prensibi anlatılmıştır.

Altıncı bölümde harmoniklerin aşırı akım rölelerine etkisi literatürde daha önce yapılmış çalışmalar ışığında incelenmiştir.

Yedinci bölümde harmoniklerin dijital aşırı akım rölelerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmaya yer verilmiştir. Yapılan çalışmalar, kullanılan dijital röleler, oluşturulan deney devreleri, rölelerle ilgili ölçülen değerler, oluşturulan sonuç çizelge ve grafikleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Son bölüm olan sekizinci bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2 HARMONİKLER, HARMONİK KAYNAKLARI, HARMONİKLERİN ETKİLERİ

2.1 Giriş

Vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların görevi; kesintisiz, ekonomik ve kaliteli bir hizmeti tüketicilerine sunmaktır. Elektrik enerji sistemlerinde kalite söz konusu olunca, sabit şebeke frekansında; sabit ve sinüsoidal biçimli uç geriliminin sağlanması anlaşılmaktadır.

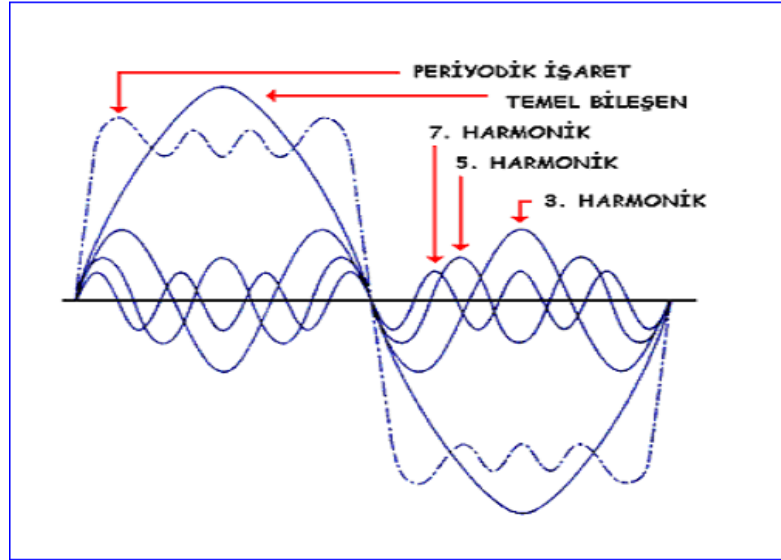
Ancak bu tür enerji pratikte bir takım zorluklarla sağlanabilir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle tam sinüsoidal değişimden sapmalar olabilmektedir. Tam sinüsoidalden sapma, genellikle harmonik adı verilen bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir ve buna sebep olan etkenlerin başında ise manyetik ve elektrik devrelerindeki lineersizlikler (nonlineerlik) gelir.

Güç sistemlerinin başlangıcından beri nonlinear elemanlar ve nonlinear yükler var olmuştur. Örneğin; transformatörler nominal çalışma koşullarının dışına çıktığında nonlinear şebeke elemanı olarak davranırlar. Nonlineerlik etkisi ve nonlinear 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; D.A. iletim konverter istasyonları, motor kontrol devreleri, statik VAR generatörleri, v.b.).

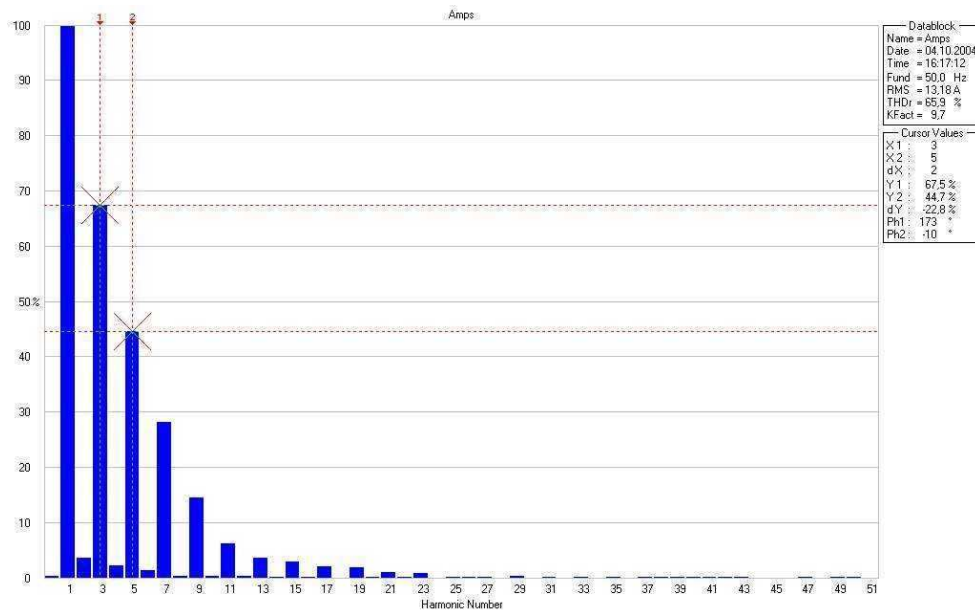
Yarı iletken elemanların tabiatı gereği ve sanayide kullanılan bazı nonlinear yüklerin (transformatör, ark fırınları, v.b.) etkisiyle; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte temel sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüsoidal dalgalara “harmonik bileşenler” adı verilir.

Harmonikler, daha önce de belirtildiği gibi genel olarak nonlinear elemanlar ile nonsinüsoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin de sistemde bulunmasından meydana gelirler. Sistemde bulunan bu elemanların etkisiyle akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte temel sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüsoidal dalgalara “harmonik bileşenler” adı verilir. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüsoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinüsoidal dalgalar olarak adlandırılır.

Bu dalgalar, Fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile nonsinüsoidal dalgalar, frekansları farklı sinüsoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Şekil 2.1(a)'da temel dalga, harmonikli dalgalar ve bunların bileşkesi olan toplam dalga ile Şekil 2.1(b)'de çeşitli harmonik bileşenlerini içeren harmonik spektrumu gösterilmiştir.



Şekil 2.1(a) Temel dalga ile 3., 5. ve 7. harmonikler ve bunların bileşkesi olan toplam dalga (Weltin, 2007).



Şekil 2.1(b) Çeşitli harmonik bileşenlerini içeren harmonik spektrumu (Weltin, 2007).

2.2 Harmoniklerin Matematiksel İfadesi

İdeal bir güç sistemi, sabit genlik ve frekansa sahip ve dalga şekli saf sinüsoidal biçimde olan gerilim kaynaklarından beslenen ve pasif elemanlardan oluşan bir sistem olarak modellenebilir. Fakat sistemde nonlinear (doğrusal olmayan) elemanlar ve nonsinüsoidal (sinüs şeklinde olmayan) kaynakların bulunması durumunda harmonikler oluşmaktadır. Bu durumda sistemde tanımlanan elektriksel büyüklükler, harmoniklerin neden olduğu sinüs dalgası bozulmasından dolayı yeniden tanımlanır. Nonsinüsoidal akım ve/veya gerilim fonksiyonlarının içerdiği harmonik bileşenlerini belirlemek için Fourier Analizinden yararlanılır.

2.2.1 Fourier Analizi

Fourier serisi birinci terimi sabit ve diğer terimleri ise bir değişkenin katsayılarının sinüs ve kosinüslerinden oluşan bir seri halinde yazılabilir. ($0-2\pi$) veya ($-\pi, +\pi$) aralığında belirli ve kesiklilik sayısı ile maksimum sayıları da sınırlı olan periyodik bir $f(x)$ fonksiyonu

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (2.1)$$

şeklinde bir seri halinde açılabilirler. Burada a_n ve b_n , x değişkenine bağlı olmayan katsayılardır. Bu durumda seri;

$$\frac{a_0}{2} + a_1 \cos x + b_1 \sin x + a_2 \cos 2x + b_2 \sin 2x + \dots + a_n \cos nx + b_n \sin nx \quad (2.2)$$

şeklini alır ve bu seriye trigonometrik seri adı verilir. a_0 , a_n ve b_n ($n=1,2,3,\dots$) Fourier serisi katsayıları olmak üzere, periyodik bir $f(x)$ fonksiyonunun ($-\pi, +\pi$) aralığında yakınsak bir trigonometrik seri ile temsil edilmiş olduğunu varsayalım. Bu durumda;

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (2.3)$$

olarak tanımlanabilir. $f(x)$ fonksiyonunun integrali (2.3) eşitliğindeki terimlerin integrallerinin toplamına eşittir. a_0 katsayısını hesaplamak için (2.3) eşitliğinin her iki tarafını $-\pi$ ' den $+\pi$ ' ye kadar terim terim integralini hesaplayalım.

Bu durumda;

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x)dx = \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} dx + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \int_{-\pi}^{+\pi} \cos nx dx + b_n \int_{-\pi}^{+\pi} \sin nx dx \right] \quad (2.4)$$

elde edilir. İkinci taraftaki her bir integral hesaplanırsa,

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} dx = \pi \cdot a_0 \quad (2.5)$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos nx dx = \frac{\sin nx}{n} \Big|_{-\pi}^{+\pi} = 0 \quad (2.6)$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin nx dx = -\frac{\cos nx}{n} \Big|_{-\pi}^{+\pi} = 0 \quad (2.7)$$

elde edilir. Bu ifadeleri tekrar düzenlersek,

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x)dx = \pi \cdot a_0 \quad (2.8)$$

bulunur. Buradan da ,

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x)dx \quad (2.9)$$

elde edilir. a_n ve b_n katsayılarını bulmak için ilk önce yardımcı integralleri anımsayalım. n ve k tamsayılar olmak üzere;

$n \neq k$ ise

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos nx \cdot \cos kx dx = 0; \int_{-\pi}^{+\pi} \cos nx \cdot \sin kx dx = 0; \int_{-\pi}^{+\pi} \sin nx \cdot \sin kx dx = 0 \quad (2.10)$$

$n = k$ ise

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 nx dx = \pi; \int_{-\pi}^{+\pi} \cos nx \cdot \sin nx dx = 0; \int_{-\pi}^{+\pi} \sin^2 nx dx = \pi \quad (2.11)$$

Bu yardımcı integraller yardımıyla (2.3) eşitliğindeki a_n ve b_n katsayılarını bulabiliriz. $k \neq 0$ olarak a_n ' i hesaplamak için (2.3) eşitliğinde her iki tarafı $\cos kx$ ile çarparsak,

$$f(x)\cos kx = \frac{a_0}{2}\cos kx + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx \cos kx + b_n \sin nx \cos kx) \quad (2.12)$$

ifadesi elde edilir. Eşitliğin her iki tarafının $-\pi$ 'den $+\pi$ 'ye kadar integralini alalım;

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos kx dx = \frac{a_0}{2} \int_{-\pi}^{+\pi} \cos kx dx + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \int_{-\pi}^{+\pi} \cos nx \cdot \cos kx dx + b_n \int_{-\pi}^{+\pi} \sin nx \cdot \cos kx dx \right] \quad (2.13)$$

yardımcı integrallerden yararlanarak eşitliği $n=k$ olması durumu için tekrar düzenlersek,

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos nx dx = a_n \int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 nx dx = \pi \cdot a_n \quad (2.14)$$

ve buradan da;

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos nx dx \quad (2.15)$$

bulunur.

b_n katsayısını bulmak için, (2.3) eşitliğinde her iki tarafı $\sin kx$ ile çarpıp terimlerin tek tek $-\pi$ 'den $+\pi$ 'ye kadar integrali hesaplanırsa,

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin kx dx = \frac{a_0}{2} \int_{-\pi}^{+\pi} \sin kx dx + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \int_{-\pi}^{+\pi} \cos nx \sin kx dx + b_n \int_{-\pi}^{+\pi} \sin nx \sin kx dx \right] \quad (2.16)$$

elde edilir. $n=k$ olması durumu için, yardımcı integraller yardımıyla eşitlik tekrar düzenlenirse,

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin nx dx = b_n \int_{-\pi}^{+\pi} \sin^2 nx dx = \pi \cdot b_n \quad (2.17)$$

elde edilir ve buradan da;

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin nx dx \quad (2.18)$$

(2.9), (2.15), (2.18) eşitlikleriyle tanımlanan katsayılara $f(x)$ fonksiyonunun Fourier katsayıları ve bu katsayılarla oluşturulmuş (2.2) serisine de $f(x)$ fonksiyonunun Fourier serisi denir.

2.3 Harmonik Üreten Başlıca Kaynaklar

2.3.1 Transformatörler

Enerji sisteminde nüvesi (demir çekirdeği) bulunan bobinler, nüvesi doyuma ulaştığında harmoniklere yol açarlar. Bu tür elemanların başında güç sistemindeki en önemli elemanlardan transformatörler gelir. Bunların harmonik üretme özelliği, nüvenin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmamasından, yani transformatörün nüvesinin doymasından kaynaklanmaktadır. Nüvenin $B=f(H)$ eğrisine mıknatıslanma eğrisi denir. Transformatör çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiği belli bir bölgeden sonra lineer özelliğe sahip olmadığından, uygulanan sinüsoidal gerilim sonucu sinüsoidal akım ve akı oluşmamaktadır.



Şekil 2.2 Bir harmonik kaynağı olan transformatör (Genma katalog)

$v(t)=V_m \sin \omega t$ biçiminde sinüsoidal şebeke geriliminin transformatörün primer sargısına uygulanması halinde demir çekirdekte $\Phi(t)=\Phi_m \cos \omega t$ şeklinde yine sinüsoidal bir akı üretilecektir. Transformatörler, normal işletme şartlarında sinüsoidal gerilimle çalışma altında lineer mıknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüsoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvenin daha çok doymasına ve harmonik akımları seviyesinin hızla artmasına sebep olabilmektedir.

Mıknatıslanma akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır, çünkü o saatlerde sistemdeki yük az olduğundan gerilim yükselmekte ve aşırı uyarma meydana gelmektedir. Aşırı uyarımayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olurlar.

Güç sisteminde generatör, hat ve transformatörden meydana gelen sistemde harmonik akımları, generatörün reaktansı, transformatörün primer reaktansı ve hattın reaktansı üzerinden geçerek harmonikli gerilim düşümü meydana getirir. Generatörde sinüs şeklinde emk üretildiği halde çıkış uçlarında gerilimin dalga şekli bozulabilir.

Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi şu koşullara bağlıdır;

- Transformatörün bağlantı grubu,
- Primerin yıldız bağlı olması halinde, yıldız noktasını şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması,
- Transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısı.

2.3.2 Döner Makineler

Bir döner makinenin oluşturduğu harmonikler, ilke olarak makinenin stator ve rotorundaki olukların neden olduğu manyetik relüktanstaki değişimlerle ilgilidir. Döner makinelerin harmonik üretmelerinin başlıca iki nedeni; Alan şekli ve ana devreler ile kaçak yollardaki doymalardır. Günümüzdeki ileri tasarım teknikleri (oluk ve kutup geometrisi, sargı yapısı) ile döner makinelerdeki harmonik etkinliği en aza indirilmiştir. Döner makineler içerisinde en önemli harmonik üreticisi senkron generatörlerdir.

2.3.2.1 Senkron Generatörler

En doğal harmonik üreticileri senkron generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması, kaçak akımlar, sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır.

MWL290-330



Şekil 2.3 Bir harmonik kaynağı olan senkron generatör (Chinapower katalog).

Döner makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir.

Generatörlerde hava aralığındaki manyetik akının durumu, indüklenen emk'ya aynen etki ettiğinden, emk'nın sinüsoidal olması için akı dağılımını yapılabildiği kadar sinüsoidal yapmak gerekir. Bunun için sargıların dağıtılması, sargı adımının kesirli olması, bir kutup altında bir faza ait oluk sayısının kesirli olması ve bunlara benzer faktörler yanında, endüvi-çıkıntılı kutup yüzeyi arasındaki akı dağılımının sinüsoidal yapılması, indüklenen gerilimin sinüsoidal olmasını sağlar.

Hava aralığındaki manyetik akının sinüsoidal yapılabilmesi, çıkık kutuplu generatörlerde kutup yüzeyinin kavisli yapılması ile sağlanır. Buradaki kutup ile stator arasındaki hava aralığı kutbun her yerinde aynı değildir. Kutup ekseninde hava aralığı, kutup kenarlarına göre daha azdır. Buna göre manyetik akı kutup ekseninde en fazla olup kutup kenarlarına doğru gidildikçe eğrisel şekilde azalır. Bu durumda akı dağılışı sinüsoidale yaklaştığından indüklenen emk'da daha düzgün bir sinüs dalgası verir.

Generatörlerin bağlantı şekilleri de harmonikler için belirleyici özellikler taşır:

Generatör sargısı yıldız bağlı ise; 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerinde bulunmazlar.

Yıldız bağlı bir generatöre üç fazlı simetrik bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası generatör yıldız noktasına bağlanmaz ise; 3 ve 3'ün katı harmonikli akımlar geçmezler. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.

Generatör sargısı üçgen bağlı ise; bu sargılarda 3'ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur.

Bu sebeplerden dolayı, generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Fakat generatörün 4 iletkenli bir şebekeyi beslemesi gerekiyorsa, nötr iletkeni zigzag bağlı bir bobinde oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Generatörlerin sebep olduğu 3 ve 3'ün katları harmonik akımları, generatör veya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanılmak suretiyle bloke edilir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun dizayn edilerek 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür.

2.3.2.2 Asenkron motorlar

Asenkron makinenin çalışması bir döner alan varlığına dayandığından bu döner alanın oluşturulması için asenkron motorun statorunun açılmış olan oluklarına sargılar yerleştirilmiştir. Oluklara sarılan bu sargının iletken dağılımı sinüs formunda yapılamadığından, Amper-sarım dağılımı da sinüs formunda olmamaktadır. Sargılara sinüsoidal gerilim uygulandığında her bir faz sargısından geçen akım, akı ve Amper-sarım ifadesi sinüsoidal olmadığı için harmonikler içerir. Bu harmoniklere, “hava aralığı” veya “uzay” harmonikleri adı verilir. Meydana gelen hava aralığı harmonikleri, temel dalga ile birlikte asenkron motoru etkiler. Çünkü frekansları farklı olan bu harmonikler devre parametrelerini değiştirmekte ve bunlara bağlı kayıpların farklı olmasına neden olmaktadır. Ayrıca hava aralığında stator sargısına bağlı olarak meydana gelen yüksek harmonikler zararlı döndürme momenti ve kuvvetlerin meydana gelmesine yol açarlar. Bu durum özellikle sincap kafesli asenkron motora yol vermede oldukça önemlidir.



Şekil 2.4 Bir harmonik kaynağı olan asenkron motor (Cokesen katalog).

2.3.3 Güç Elektroniği Elemanları

Çeşitli güç elektroniği elemanları küçük uygulamalardan büyük endüstriyel uygulamalara kadar bir çok alanda kullanılmaktadır. Bu elemanlar yüksek çalışma verimine ve istenilen çalışma karakteristiklerine sahip olmaları nedeni ile uygulamada geniş kullanım alanı bulmuşlardır.

Televizyon alıcıları, bilgisayarlar ve diğer elektronik uygulamaları kapsayan küçük güçlü tek fazlı elektronik güç dönüştürücülerin sayısı gün geçtikçe artmaktadır.



Şekil 2.5 Güç elektroniği elemanlarından oluşan bilgisayarlar (www.apaydingrupp.com)

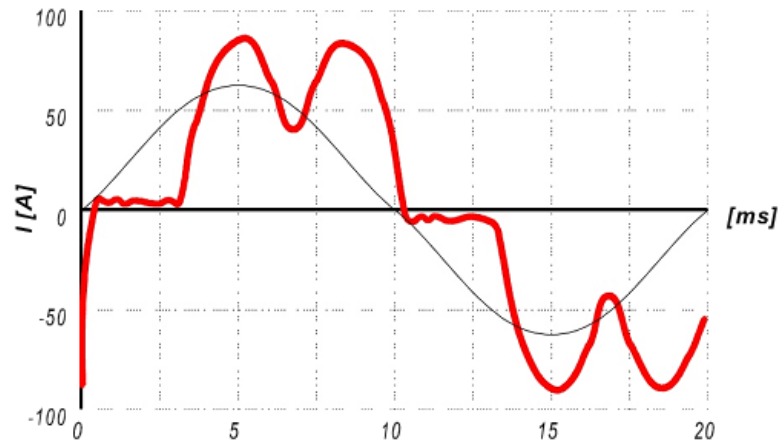
Üç fazlı güç elektroniği elemanları ise geniş bir kullanım ve tasarım alanına sahiptirler. Başlıca güç dönüşüm grupları şunlardır:

- Doğrultma,
- Frekans kontrolü,
- Gerilim kontrolü,
- Evirme,
- Diğer uygulamalar.

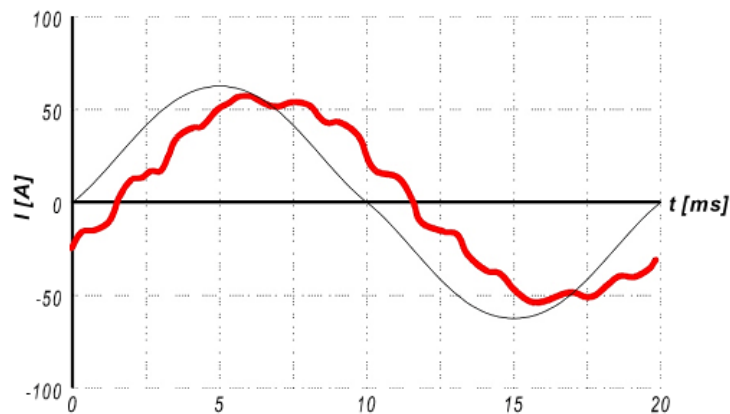
Sanayiden enerji iletimine kadar her alanda yaygın olarak kullanılan çeviriciler, alternatif akımı doğru akıma dönüştüren (doğrultucular=redresör) veya doğru akımı alternatif akıma dönüştüren (eviriciler = inverterler) elemanlar olarak tanımlanır.

Bunların içinde güç sisteminde en çok kullanılan grup, doğrultucu grubudur. Doğrultucuların güç sisteminde başlıca kullanım alanları; yüksek doğru gerilimle enerji iletimi (HVDC), doğru akım motorlarının beslenmesi ve kimyasal süreçlerdir.

Çeşitli darbe sayılarına sahip doğrultucular bulunmaktadır. 6 ve 12 darbeleri doğrultucular en yaygın olanlarıdır. Küçük güçlü uygulamalarda 3 darbeleri, daha güçlü uygulamalarda ise 18 ve daha büyük darbeleri doğrultucular kullanım alanı bulmaktadır. Darbe sayısının seçimi ekonomik koşullara da bağlıdır. Şekil 2.6(a) da 6 darbeleri doğrultucu kullanıldığında, Şekil 2.6(b) de ise 12 darbeleri doğrultucu kullanıldığında akımda oluşan harmonikler gösterilmiştir.



Şekil 2.6(a) 6 darbeleri doğrultucu kullanıldığında akımda oluşan harmonikler
(www.acdc.com.tr).



Şekil 2.6(b) 12 darbeleri doğrultucu kullanıldığında akımda oluşan harmonikler
(www.acdc.com.tr).

Frekans ve gerilim kontrolü grubu, senkron ile indüksiyon motorların ve benzeri yüklerin farklı frekans ve gerilimlerde beslenmesi amacıyla kullanılır. Böylece motorların tüm yük seviyelerinde daha verimli çalışması sağlanır.

Yarı iletken elemanlar, çalışma karakteristiğinin nonlineerliğinden kaynaklanan harmonikler üretirler.

Transformatörlerden sonra ana harmonik kaynağı günümüzde hat komütasyonlu konverterlerdir. Belirli şartlarda, alternatif akım ile enerji iletimine göre daha ekonomik iletim sağlayan doğru akım enerji iletim sistemleri (HVDC) ile akü, fotovoltaik sistemler ve bazı endüstriyel donanımlar hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenirler.

Örneğin yarım dalga kontrollü bir doğrultucu devresinde sinüsoidal dalga tristörlerin tetikleme açısına (α) bağlı olarak belirli bir (ϕ) açılarından kesildiğinde devrede nonsinüsoidal dalga meydana gelmektedir.

Bir konverterin meydana getirdiği harmonikler, konvertörlerin tristör sayısına (darbe sayısına) bağlı olarak ifade edilebilir. Örneğin; 6 darbeleri bir konverterin akımı aşağıdaki gibidir;

$$I_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \quad (2.20)$$

Burada görüldüğü gibi harmonik akımların genliği harmonik frekansı ile ters orantılıdır. Harmonik derecesi ne kadar yüksekse harmonik akımların genliği o kadar düşmektedir. Konverterlerde darbe sayısı $p = 6, 12, 18$ ve 36 ' dır. Buna bağlı olarak meydana gelen harmonik bileşenlerin frekansları şu şekilde ifade edilebilir;

$$n = kp \pm 1 \quad (2.21)$$

n : harmonik mertebesi

p : çeviricinin darbe sayısı

k : pozitif bir tamsayı (1, 2, 3,.....)' dır.

2.3.4 Doğru Akım İle Enerji Nakli (HVDC)

1960'lı yıllardan başlayarak, yarı iletken teknolojisinin de gelişmesiyle, doğru akım ile enerji nakli (HVDC - High Voltage Direct Current) gündemdedir. Kararlılık probleminin olmaması ve farklı frekanslı iki noktanın birleştirme olanağının olması, doğru akımla enerji iletimini tercih edilir yapmaktadır. Bu teknikte alternatif-doğru ve doğru-alternatif çeviricileri kullanılmaktadır. Alternatif olarak üretilen gerilim doğrultulmakta ve enerji nakil hattını beslemekte, hattın sonunda tekrar alternatifte çevrilerek tüketiciye iletilmektedir.

Doğru akım enerji iletim hatlarında hat başında ve sonunda yer alan büyük güçlü çevriciler (doğrultucu ve evirici bloklar) yarı iletken elemanlardan oluştuklarından, birer harmonik kaynağı olmaktadır.

2.3.5 Statik VAR Sistemleri

Statik VAR sistemleri; alternatif akım kısıcısı ile akımı değiştiren bir reaktör, paralel bağlı kondansatörler, kumanda ve kontrol elemanlarından oluşur. Bu sistemlerin çalışma özelliği gerekli reaktif gücü en hızlı bir şekilde ve her faz için ayrı ayrı verebilmesidir. Çünkü, geleneksel kompanzasyon düzenleri ile çok hızlı değişen reaktif güç ihtiyacı karşılanamaz. Örneğin; ark fırınlarında fırının çektiği reaktif gücün değişimi çok hızlı olduğundan normal mekanik cihazlarla (klasik kontaktör kumandalı kademeli kompanzasyon ile) kompanzasyon gücünü karşılamak mümkün olmaz. Fakat yarı iletken elemanların sağladığı imkanlar sayesinde reaktör elemanlarını ark fırınının çalışması gerektiği hızda devreye sokup çıkarmak mümkündür. Bunun için tristörlerden yararlanılır. Bu iş için kullanılan tristörler, yarı iletken anahtarlama elemanları olduklarından doğal harmonik kaynaklarıdır.

2.3.6 Ark Fırınları

Ark fırınları, geniş spektrumlu harmonikler içeren yüklerin önemli bir örneğidir. Ark fırını bulunan işletmeler için harmonik oluşum nedeni olarak ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleri verilir.



Şekil 2.7 Bir harmonik kaynağı olan ark fırını (Cemtaş Katalog).

Ark fırınının aktif direnci sabit değildir. Bir yarı periyodun başlangıcında direnç büyüktür, bundan sonra bir minimum değere düşer ve yarı periyodun sonuna doğru tekrar yükselir. Bu yüzden akım tam bir sinüs şeklinde değildir ve birçok harmonikler içerir. Ergitme aşamasının başında akım harmonikleri çok fazladır ve hurda eridikten sonra yani ark sakinleşince harmonik azalır.

Ark fırınlarının çalışma şartlarındaki bu değişimlerden dolayı güç sisteminden çektikleri akımlarda gelişigüzel olur. Bunun sonucu olarak, şebeke gerilimi de akıma bağlı olarak sinüs formundan uzaklaşır. Akım ve gerilimdeki bu bozulmalar, şebekeye harmonikli bileşenlerin verilmesi anlamına gelir.

Bu açıklamalardan da anlaşıldığı gibi, ark fırını sisteme bir harmonik kaynağı gibi etki eder. Ark fırınına paralel bağlı devrelerde, şartların gerçekleşmesi halinde rezonans olayları baş gösterebilir. Bugün ark fırınlarının düşük güç katsayısı ile çalıştırılması tercih edilir. Bu yüzden fırın daha büyük bir reaktif güç çeker. Bunu kompanze etmek için büyük güçlü kondansatör bataryası kullanılır. Böylece şebekenin rezonans frekansı düşer.

2.3.7 Kesintisiz Güç Kaynakları

Gerilim dalgalanmasının ve kesintisinin yol açtığı zararlardan kurtulmak için bilgisayarlar, hastaneler, hava alanları v.b. diğer önemli yerlerde kullanılan kesintisiz güç kaynakları; alternatif gerilimin doğru gerilime çevrilerek depolanması ve sonra evirici yardımı ile alternatif akıma çevrilerek tüketiciye iletilmesi esasına göre çalışır.



Şekil 2.8 Bir harmonik kaynağı olan kesintisiz güç kaynakları (Stepro Katalog).

Kesintisiz güç kaynaklarında evirici, ara devre gerilimi olan doğrultucu çıkış gerilimini, evirmek suretiyle istenen genlik ve frekansta dalgalı gerilime dönüştürür. Dönüşüm sırasında tam sinüs dalgası elde edilemediği için çıkış işaretinin Fourier Serisinin açılımının belirttiği frekanslarda, belirli genliklerde harmonikler oluşturacaklardır.

Kesintisiz güç kaynaklarında harmonikler; evirici tipine, evirici çıkışını elde etmek için kullanılan modülasyon tipine, mikroişlemci kontrollü olup olmadığına v.b. etkenler bağlı olarak değişmektedir.

Bir güç elektroniği düzeni olan kesintisiz güç kaynakları, esas olarak şebeke geriliminin uygulandığı bir doğrultucu, doğrultucu çıkışında paralel olarak uygulanmış olan akü düzeni ile, doğrultulmuş gerilimi dalgalı gerilime dönüştürerek, yüke veren evirici düzenini içerir. Bu temel elemanlar yanında, elde edilip yüke verilecek sinüsoidal gerilimin istenilen özelliklerde olmasını sağlamak, güvenilir bir çalışma elde etmek üzere yardımcı düzenlerde vardır. Kesintisiz güç kaynaklarında doğrultucu ve evirici devreleri, uygun geri beslemelerle kapalı çevrim kontrollü çalıştırılırlar. Bundan dolayı çıkış gerilimleri çok kararlıdır, yükten etkilenmez.

2.3.8 Gaz Deşarjlı Aydınlatma

Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, örneğin flüoresan, cıva, ark, neon v.b. ve yüksek basınçlı sodyum lambalar şebekeden harmonikler içeren akımların çekilmesine neden olurlar. Bu tür aydınlatma elemanları özellikle büyük şehir alanlarında daha çok hissedilen harmonikler meydana getirirler. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği nonlineer olup akım geçişi esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler (Dugan vd., 1996).



Şekil 2.9 Bir harmonik kaynağı olan gaz deşarjlı lambalar

Ev ve işyerlerinde yaygın olarak kullanılan flüoresan lambalar balastlarından ve gaz deşarjlarından kaynaklanan harmonik bileşenlerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

2.3.9 Elektronik Balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her safhasına daha belirgin bir biçimde giren elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan elektronik balastlarda harmonik üreticisidirler. Filtreli ve filtresiz olarak imal edilen bu balastlar eğer filtreli ise harmonik etkinliği yok denecek kadar azdır.



Şekil 2.10 Bir harmonik kaynağı olan elektronik balastlar (Osram katalog).

2.3.10 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler harmonik üretme bakımından genel olarak konverterlerden kaynaklanan harmonik etkinliğine sahiptirler.



Şekil 2.11 Bir harmonik kaynağı olan fotovoltaik sistemler

Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konverterleri kullanırlar. Dolayısıyla dönüşüm esnasında yarı iletken elemanların sebep olduğu harmonikler söz konusu olmaktadır.

2.4 Harmoniklerin Etkileri

Enerji sistemlerinde, harmoniklerle gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde;

- Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar,
- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması,
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi ve bu nedenle motorların gürültülü çalışması ve aşırı ısınması,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi,
- Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması,
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları,

- Gerilim düşümünün artması,
- Elektrik aygıtlarının ömrünün azalması,
- İzolasyon malzemesinin delinmesi,
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü v.b. yerlerde çalışma bozuklukları,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma olarak verilebilir.
- Statik rölelerin çalışma karakteristiklerinde önemli değişiklikler gözlenir.
- Aşırı akım ve gerilim rölelerinin çalışma karakteristikleri değişir.
- Harmonik bileşene bağlı olarak elektromekanik rölelerin çalışma momentlerinin yönü değişebilir.
- Çalışma zamanları, ölçülen büyüklükteki frekansın bir fonksiyonu olarak oldukça büyük bir farklılık gösterebilir.
- Dengeli empedans röleleri hem ayar ötesi hem ayar gerisi çalışma gösterebilirler.
- Fark röleleri yüksek hızla çalışmayabilirler.

Genelde rölelerin çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik seviyelerinden daha büyüktür. Bununla birlikte, koruyucu elemanlar (röleler) üzerindeki yapılan testlerden %20'lik bir harmonik seviyesine kadar rölelerde fazla bir işletme probleminin oluşmadığı gözlenmiştir.

3 KORUMA SİSTEMLERİNİN GENEL PRENSİPLERİ

3.1 Giriş

Generatör, transformatör, kablo, hat gibi şebeke elemanlarının birinde kısa devre veya izolasyon hatası sonucunda ark veya arıza akımlarının ve aşırı gerilimlerin yol açabileceği zararları sınırlandırmak veya en aza indirmek ve sürekli bir kısa devrenin şebekenin genel işletmesi ve özellikle stabilitesi üzerindeki etkileri ortadan kaldırmak için hatalı elemanın olabildiğince çabuk devre dışı edilmesi gerekmektedir.

Hatalı elemanı otomatik olarak devre dışı etme işlemi koruma sistemleri vasıtasıyla gerçekleştirilir. Söz konusu koruma sistemleri hat, kablo, generator veya transformatör gibi şebeke elemanlarının akım ve gerilimlerini sürekli olarak kontrol eden ve gözetken röleler topluluğunu kapsamaktadır. Gözetilen kısımda hata oluştuğunda ayarlanan değerlerin üstünde röleler işletmeye girer ve bu durumda düzenlenmesi göz önüne alınan sisteme bağlı kontaklar dizisi açılıp veya kapanarak elemanı devreye bağlayan güç anahtarını (alçak gerilimde kontaktör veya kompakt şalter, orta gerilimde ve yüksek gerilimde kesici) açarak hatalı bölümün devre dışı olması sağlanır.

İletim dağıtım şebekesinde olduğu gibi endüstriyel şebekelerin güvenilir bir şekilde işletilip korunmasında da koruma sistemlerinin çok önemli bir yeri vardır.

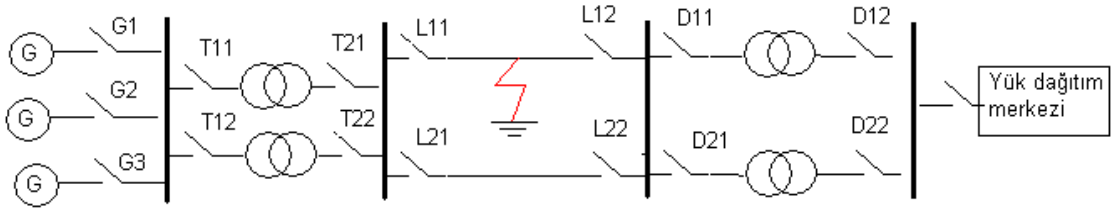
3.2 Koruma sisteminde olması gereken özellikler

Koruma sistemlerinin görevi, işletme elemanları ile elektrik tesis ve şebekelerinde ortaya çıkan hataları ve bunların çeşitlerini gözlenen elektriksel büyüklükler yardımıyla çabuk ve güvenilir olarak tespit etmek ve gerektiğinde hatalı işletme elemanını (hat, transformatör, generatör vb.) devre dışı bırakarak, enerjinin mümkün olabildiğince sürekli olmasını sağlamaktır.

Bu görevi yerine getirmesi beklenen koruma sisteminin aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir;

1. Güvenilir bir şekilde yapılmış bir koruma sistemi hatanın meydana geldiği şebeke bölümünü kesinlikle devreden çıkarmalı hatalı bölümden başka şebekenin diğer kısımları devrede kalarak işletmeye devam etmelidir. Kısaca diğer bölümlere ait anahtarların kapalı

olarak devrede kalması şartıyla sadece hatalı cihazı veya bölümü çevreleyen anahtarların açılması gerekir.



Şekil 3.1 Genel güç üretim, iletim ve dağıtım sistemi

Şekilde sadece L11 ve L12 anahtarları (kesicileri) arasındaki hatta kısa devre olursa sadece L11 ve L12 anahtarlarının açılması gerekir. Böylece sadece arızlı olan hat sistemden izole edilir, sistemin arızasız kısmı L21-L22 hattı üzerinden beslenmeye devam eder. Koruma sistemindeki diğer anahtarlardaki açılma gereksiz açma olacaktır.

Koruma sisteminde, sadece arızanın meydana geldiği yerdeki koruma elemanlarının arızayı algılayıp, buradaki devre kesme elemanlarını yönlendirmeleri istenir. Böylece arıza olmayan yerlerde gereksiz enerji kesintilerinin önüne geçilmiş olur. Bu şekilde çalışan koruma sistemine '**seçici koruma sistemi**' denir.

Koruma sisteminin olabildiğince kısa süre içinde yeterince hızlı çalışması gerekmektedir. Oluşabilecek zararların en aza indirilmesi için arızalı kısa devrelerin açılma sürelerini olabildiğince azaltmak gerekir. Bundan başka çoğu kez bir faz-toprak arasında başlayan arızın gelişerek başka fazlara da geçmeye zaman bulmasını önlemek gerekir. Özellikle kısa devrelerin çabuk giderilmesi iletim şebekelerinde stabiliteyi sağlamada en etkin yol olmaktadır.

Seçiciliği sağlamak üzere, sistemdeki bazı kesicilerin açma süreleri bilinçli olarak geciktirilir. Bu durumda seçicilik ve hızlı çalışma özellikleri birbiriyle çelişir. Bunlardan birine öncelik vermek gerekir. Pratikte seçiciliğe öncelik verilir. Röle tipleri ve karakteristiklerini uygun seçmek suretiyle korumanın seçici ve olabildiğince hızlı çalışmasına özen gösterilir.

2. Bir koruma sisteminin hatasız olarak doğru çalışması, yanlış kesici açmalarına neden olmaması, arıza meydana geldiğinde çalışacağından emin olunabilmesi; yani koruma rölesinin veya koruma sisteminin güvenilir olması gerekir.

Bir koruma sisteminin güvenilirliği, aynı koruma işlemini yapan ama farklı metotlarla çalışan iki veya üç ayrı koruma düzeni paralel çalıştırılarak artırılabilir. Ekonomik bakımdan bu çareye ancak korunan elemanın önemi göz önünde tutularak başvurulabilir.

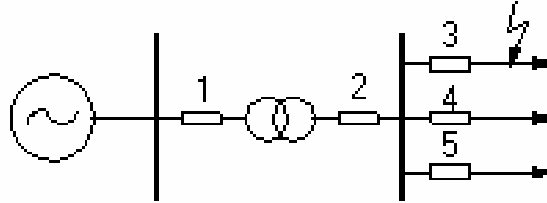
Koruma Sisteminin “Yanlış Açma Sayısı / Arıza Sayısı” oranı azaldıkça koruma sisteminin güvenilirliği artar.

Güvenilir olmayan bir koruma düzeni bazı durumlarda, koruma yapılmamasından ortaya çıkacak sonuçlardan daha büyük zararlara yol açabilir. Örneğin, çok yüklü bir şebekede gereksiz yere açma yapan bir hat veya bara koruma sistemi bütün sistemin çökmesine neden olup kısa devre durumunda açma yapmayan röleye oranla daha fazla zarar doğurabilir.

Bir koruma düzeninin yanlış çalışma durumları üç grupta toplanabilir:

Gereksiz Açma: Ortada herhangi bir arıza olmadığı halde rölenin açma kumandası vermesidir. Örneğin iyi ayarlanmamış veya karakteristiği iyi seçilmemiş bir rölenin, bir asenkron motorun ilk hareketi (yol alma) sırasında açma kumandası vermesi.

Arıza Durumunda Yanlış Açma: Rölenin yanlış ölçme işlemi yapması veya yanlış ayarlanması durumunda gerçekleşen seçici olmayan açma işlemidir.



Şekil 3.2 Örnek sistem

Şekil 2'deki örnek sistemde gösterilen arızada, 2 kesicisine bağlı koruma rölesinin yanlış ayarlanması sebebiyle 3 kesicisinden önce 2 kesicisinin açmasıdır. Bu durumda gereksiz yere 4 ve 5'in enerjisi kesilir.

Açma Yapmama: Arıza olduğu halde rölenin açma kumandası vermemesidir. Bunun sebebi rölenin ya da kesicinin arızalı olması veya röle ayarının yanlış yapılmasıdır.

Güvenliği arttırmak için aynı eleman farklı prensiplere göre çalışan iki veya üç ayrı koruma düzeniyle korunabilir. Örneğin güç transformatörleri, hem aşırı akım hem de

buchholz ve tank koruma rölesiyle korunur. Bu durumda ekonomik kriterler de dikkate alınır (Yumurtacı, 1995).

3. Bir koruma sisteminin davranışı, şebekenin yapısından olabildiğince bağımsız kalmalı, manevra serbestliği sağlamalı ve ayar değişiklikleri gerektirmeden kuplajlara, paralel bağlamalara besleme değişikliklerine elverişli olmalıdır. Koruma sistemlerini şebeke yapısının değişimlerine olabildiğince duyarsız yapmaya çaba göstermelidir.
4. Koruma sistemi kısa devre akımlarının şiddetleri, cinsi ve hata yeri nerede olursa olsun işlemek zorundadır. Bazı durumlarda kısa devre akımının değeri normal akım değerinden daha düşük olabilmektedir. Hata yeri nerede olursa olsun şebekenin her türlü işletme şartları altında hatanın giderilmesini sağlamak için sistemin duyarlılığının yeterli seviyede olması gerekmektedir. Bununla beraber röleleri minimum kısa devre altında duyarlı yapmak verimsiz ve üstelik çok az yarar sağlamaktadır.
5. Bir koruma sisteminde minimum sayıda aygıt bulunmalıdır. Böylece sistemin bakımı, işletimi kolay olmakta ve sistem işletme masraflarına fazla yük olmamaktadır. Yapılan araştırmalara göre korumanın maliyetinin, güç sistemi maliyetinin %1-2 kadarı olduğu görülmüştür.
6. En ekonomik şekilde korumanın güvenilirliği, ana koruma görevi dışında yedek koruma özelliğine de sahip olan koruma düzenleri ile artırılabilir. Örneğin; hat korumasında bu husus aşırı akım ve mesafe rölelerinin zaman kademeleriyle gerçekleştirilir. Buna göre arıza yerine en yakın istasyondaki rölelerin açma yapmamaları halinde, bu istasyonların bir gerisinde bulunan istasyonlardaki röleler kademe planına uygun olarak kısa bir gecikme ile açma işlemini yaparlar. Yani arıza yerine daha uzak olan yakındaki röleler için yedek koruma vazifesi yaparlar.
7. Elektrik tesislerinde, kurulacak koruma düzeninin seçilmesi ve planlanması sırasında göz önünde tutulması gerekli en önemli hususlardan biri koruma düzeninin ekonomik olmasıdır. Çünkü koruma sistemi için yapılacak yatırım, işletmeye ek bir masraf getirmektedir. Fakat, korumasız bir tesiste de, meydana gelecek hatanın ortaya çıkardığı zarar ve onarım masrafları, tüketici zararları göz önünde tutulmalıdır. Sonuçta koruma düzeni için harcanan para nispetinde enerjinin sürekliliği sağlanır ve iş gücü kaybı azaltılır.

8. İşletmenin devreye almasını uzatan ve güç kılan ve hiç bir fayda sağlamayan bir şebeke parçalanmasına yol açmamak için senkronizma dışındaki bir işletme sırasında gerilimler, akımlar ve güçlerde kendini gösteren salınımlara duyarsız kalınması gerekir.

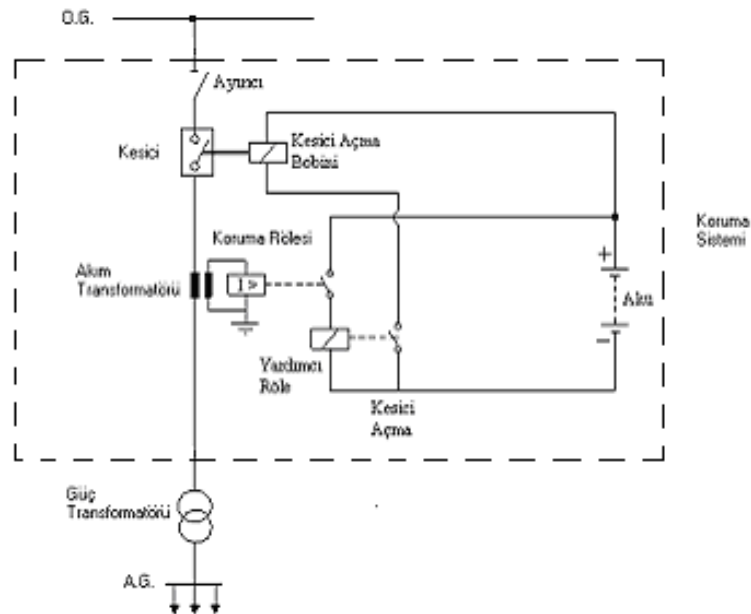
3.3 Koruma Sistemini Oluşturan Elemanlar

Kesiciler: Arızalı kısmı ayırır, arıza akımını keser.

Koruma Röleleri: Arızanın varlığını saptar ve kesiciye açma kumandası verir

Akım ve Gerilim Transformatörleri: Koruma rölelerini yüksek gerilimden izole eder, rölelerin düşük akım ve gerilimle çalışmasını sağlar, böylece personelin can güvenliğini sağlar.

Yukarıdaki temel elemanlardan başka; kesici kumanda devresini, sinyal ve alarm devresini besleyen akü bataryaları, yardımcı röleler, sinyal lambaları, sesli alarm cihazları(korna) vb. “yardımcı elemanlar” da koruma sistemlerinde yer alır.

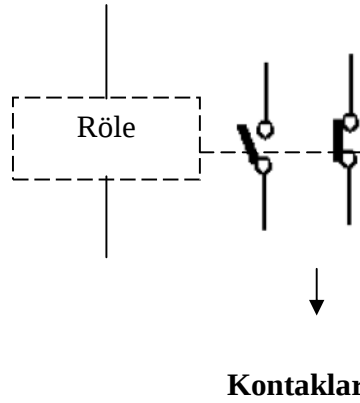


Şekil 3.3 Bir koruma sistemi ve elemanları

4 KORUMA RÖLELERİNİN YAPILARI VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

4.1 Giriş

En genel anlamda röle, girişine uygulanan büyüklük (akım, gerilim, basınç, sıcaklık vb.) çalışma eşik değerine ulaştığı anda faaliyete geçerek kontaklarının konumunu değiştiren (açık kontaklarını kapatan, kapalı kontaklarını açan), elektrik devrelerinde kumanda ve koruma amaçlı olarak kullanılan bir elemandır.



Şekil 4.1 Bir röle ve iki kontağı

Röle kontakları, bir güç anahtarına (Alçak gerilimde kontaktör, Orta ve Yüksek gerilimde kesici) kumanda ederek anahtarın açılıp kapanmasını sağlar. Böylece röle yardımıyla istenen şartlarda devreye gerilim uygulanabilir, istenmeyen şartlarda ise devrenin gerilimi kesilebilir.

Röle faaliyete geçmeden(enerjisiz iken) kontakların konumu			
			
Normalde	Açık	Normalde	Kapalı
kontakt (NO: Normally Open)		kontakt (NC: Normally Closed)	
Röle enerjili iken kontakların konumu			
			

Şekil 4.2 Röle kontaklarının konumlarının değişimi

4.2 Rölelerin Sınıflandırılması

Röleler yapılarına, çalışma zamanına, devreye bağlanışlarına, elektriksel çalışma büyüklüklerine ve kullanım amaçlarına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar:

Yapılarına göre:

1. Elektromekanik Röleler
2. Statik(elektronik) ve Nümerik (Dijital) Röleler
3. Elektriksel Olmayan B y kl klerle (basınç, sıcaklık vs.)  alışan Röleler

Çalışma zamanına göre:

1. Ani çalışmalı (gecikmesiz) Röleler
2. Zaman Gecikmeli Röleler

Sabit Zamanlı Röleler

Ters Zamanlı Röleler

Devreye bağlanışlarına göre:

1. Primer Röleler
2. Sekonder Röleler

Elektriksel  alıřma büyüklüklerine göre:

1. Akım Röleleri
2. Gerilim Röleleri
3. G   Röleleri

Kullanış amaçlarına göre:

1. Koruma Röleleri (aşırı akım rölesi, düşük gerilim rölesi, diferansiyel röle vs.)
2. Kumanda Röleleri (normal röle)

4.3 Koruma Röleleri

Elektrik güç sistemlerindeki elemanları (hat, transformatör, generatör vb.) korumak amacıyla kullanılan, girişine uygulanan çalışma büyüklüğü (akım, gerilim, empedans, sıcaklık, basınç vb.)

rölenin ayarlandığı sınır değerlerin dışına çıktığında kontağını açarak veya kapatarak bir açma-kapama elemanına kumanda eden rölelere “koruma röleleri” denir.

Eğer bir rölenin, giriş uçlarına doğrudan doğruya devrenin elektriksel büyüklükleri uygulanıyorsa; bu rölelere primer röleler adı verilir. Eğer rölenin giriş uçlarına, ölçü transformatörleri üzerinden akım veya gerilim büyüklükleri uygulanıyorsa; bu tip rölelere de sekonder röleler adı verilir.

Pratikte genellikle sekonder röleler kullanılmaktadır. Sekonder rölelerin kullanılmasının nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz;

Sekonder röleler ölçü transformatörleri tarafından yüksek gerilim koruma düzenlerinden ayrılmıştır. Böylece sekonder röleler, ana akım devresinin manyetik tesiriyle termik ve dinamik zorlamalardan korunmuş olur.

Ana akım devresini kesmeden, sekonder rölenin ayarlanması, değiştirilmesi veya bağlantılarının yapılması ve muayene edilmesi mümkündür.

Ölçü büyüklükleri, küçük değerli olduğundan bu röleler ucuz yapılabilir.

Daha hassas elemanlarla ölçü doğruluğu artırılabilir.

Bu seminer çalışmasının konusu harmoniklerin dijital aşırı akım röleleri üzerine etkisidir. Bu nedenle bu bölümde koruma röleleri olarak sadece aşırı akım röleleri ve özellikle de dijital aşırı akım röleleri incelenmiştir.

4.4 Aşırı Akım Röleleri

4.4.1 Giriş

Güç sisteminde bir arıza meydana geldiğinde, arıza akımı güç sistemindeki herhangi bir elemanın yük akımından daima daha büyüktür. Bu nedenle sistemde oluşabilecek bir arıza sonucunda meydana gelecek aşırı akımlara karşı bir koruma sistemi gerekir. Elektrik güç sistemlerinde, transformatör, hat, motor vb. elemanların aşırı akım koruması aşırı akım röleleri ile gerçekleştirilmektedir. Aşırı akım röleleri çok basit bir yöntemle sadece arıza sonucunda oluşan aşırı akımın genliğine göre çalışmaktadır.

Aşırı akım röleleri yapılarına göre elektromekanik aşırı akım röleleri ve statik (elektronik) aşırı akım röleleri olmak üzere başlıca iki gruba ayrılırlar. Bu tez çalışmasına konu olan dijital aşırı

akım röleleri ise statik rölelerin daha gelişmiş halidir.

Aşırı akım röleleri akım-zaman karakteristik eğrilerine göre sabit zamanlı aşırı akım röleleri ve ters zamanlı aşırı akım röleleri olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

4.4.2 Aşırı Akım Röleleri ile İlgili Tanım ve Kavramlar

Aşırı akım röleleriyle ilgili bilinmesi gerekli bazı temel tanımları şu şekilde sıralayabiliriz;

Çalışma akımı: Aşırı akım rölesinin ayarlandığı akımdır. Röle bu akımda çalışmaya başlar. İlk hareket akımı olarak da tanımlayabileceğimiz bu akım I_c ile belirtilir. Çalışma akımına aynı zamanda kuplaj akımı da denir.

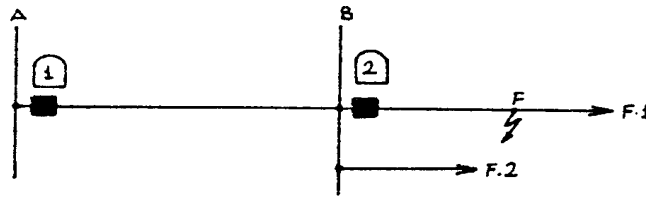
Çalışma zamanı: Bir aşırı akım rölesinin, çalışma akımının üzerinde bir akımla beslendiği andan kontağını kapattığı ana kadar geçen süre olarak tanımlanır ve t_c ile belirtilir.

Geri dönüş akımı: Önceden kontağını kapatmış bir aşırı akım rölesinin, kontağının açılmasına yol açan en büyük akıma denir. I_{gd} ile belirtilir. Geri dönüş akımına aynı zamanda deкупlaj akımı da denir.

Geri dönüş oranı: Geri dönüş akımının çalışma akımına oranına denir ve K_{gd} ile gösterilir.

$$K_{gd} = \frac{I_{gd}}{I_c} \quad (4.1)$$

Geri dönüş oranı orta gerilim şebekelerindeki röleler için önemli özelliktir. Bunu alttaki Şekil 4.3 yardımıyla açıklayabiliriz (Koruma - Kontrol Teknisyeni El Kitabı III).



Şekil 4.3 Rölelerde geri dönüş oranı

F noktasındaki arızayı ilk önce 2 nolu röle temizler, eğer temizleyemezse (rölenin çalışmaması, kesicinin tutukluk yapması v.b. nedenlerle) 1 nolu röle arızayı temizler. Dolayısıyla bu arızada 2 nolu röle ile birlikte 1 nolu rölede çalışır. Ancak 2 nolu röle arızayı daha önce temizleyeceğinden

1 nolu rölenin sükûnete dönmesi gerekir. Bunu ise arızadan sonra devreden geçen yük akımına bağlı olarak rölenin geri dönüş akımı belirler. Eğer arızadan sonra geçen akım, geri dönüş akımından büyükse 1 nolu röle çalışmaya devam eder ve gereksiz açmaya neden olur. Ayrıca geri dönüş akımı, yol alma akımı (Demeraj akımı) açısından da önemlidir.

Yük: Bir aşırı akım rölesinin yükü, beslendiği akım transformatörünün sekonder sargısından çektiği güçtür. VA (Volt x Amper) olarak belirtilir.

Kısa süreli dayanma akımı: Aşırı akım rölelerinin hasar görmeden bir saniye süreyle taşıyabilecekleri maksimum akım değeridir.

Dinamik dayanma akımı: Manyetik alan nedeniyle oluşan mekanik kuvvetler açısından rölenin dayanabileceği maksimum akım değeridir. Yani rölenin bir anlık (örneğin bir peryot süreyle) hasar görmeden taşıyabileceği maksimum akım değeridir.

Sürekli dayanma akımı: Aşırı akım rölesinin hasarlanmadan sürekli olarak taşıyabileceği maksimum akım değeridir.

4.4.3 Aşırı Akım Rölelerinde Ani Eleman, Yardımcı Kontaktör ve Bayraklar

Rölenin kısa devre korumasını gerçekleştiren ani elemanın akım bobini, aşırı akım korumasını gerçekleştiren zaman gecikmeli elemanın akım bobinine seri bağlı olur. Bu eleman her rölede bulunmaz.

Yardımcı kontaktör, her rölede bulunmaz. Yardımcı kontaktör bobininin dc gerilimle veya ac gerilimle çalışan tipleri vardır. Yardımcı kontaktör kullanmanın başlıca avantajları; kontak sayısını çoğaltmak, kontak akım kesme kapasitesini arttırmak, kesici açınca kadar kontağı kapalı tutup açmayı garantilemektir. Yardımcı kontaktör elektriksel olarak kilitlenecekse bu, kesici hareket sonu kontağı üzerinde yapılmalıdır. Akım beslemeli olanlarda, kontaktör bobini ile kesici açma bobini seri bağlanmalıdır.

Bayraklar, rölenin kısa devre ve aşırı akım ünitelerinin çalıştığını gösteren elemanlardır. Her rölede bulunmaz. Mekanik veya elektriksel olarak harekete geçen tipleri vardır. Elektriksel olanları ayrı bir bayrak kontaktörüyle çalışabilir. Bayrakların reseti (sükûnet haline dönüşü), genellikle röle kutusunun dışından elle kumanda edilen mekanik bir düzenle veya (elektriksel olanlarda) butonla sağlanır.

Gerek yardımcı kontaktör, gerek bayraklar, zamanlı ve ani eleman için ortak olarak (biri adet) bulunabileceği gibi, ayrı ayrı (ikişer adet) bulunabilir. Bu tip rölelerde ani eleman, yardımcı kontaktör ve bayrak gibi elemanların bulunup bulunmadığını, bulunuyorsa özellikleri, imalatçılarca, genellikle röle tipini belirten harflerin yanına ilave harf ve rakamlar konarak ifade edilir (Türk 1990).

4.4.4 Aşırı Akım Rölelerinin Sınıflandırılması

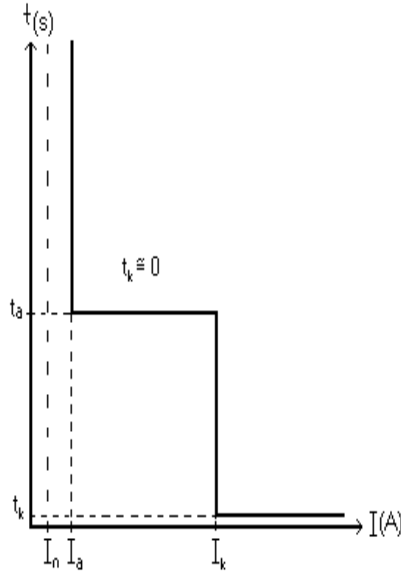
Aşırı akım röleleri genel olarak yapılarına ve çalışma karakteristiklerine göre sınıflandırılmaktadır.

4.1.1.1 Çalışma Karakteristiklerine Göre Aşırı Akım Röleleri

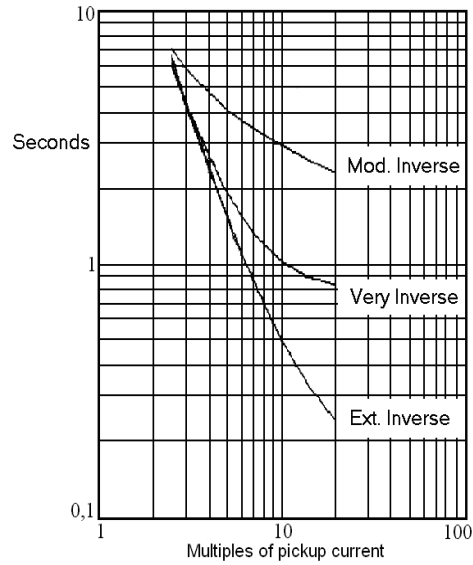
1. Ani Çalışmalı (gecikmesiz) Röleler
2. Zaman Gecikmeli Röleler
 - Sabit Zamanlı Röleler
 - Ters Zamanlı Röleler

Sabit zamanlı aşırı akım rölelerinde arıza halinde rölenin kesiciye kumanda etmesi için geçen zaman gecikmesi sabittir, akımdan bağımsızdır. Bu nedenle bu rölelere bağımsız aşırı akım röleleri de denir. Ters zamanlı aşırı akım rölesinde zaman gecikmesi akımla ters orantılıdır. Aşağıda şekil 4.4(a) da sabit zamanlı aşırı akım rölesinin çalışma karakteristiği, şekil 4.4(b) de ise ters zamanlı aşırı akım rölesinin standart akım-zaman karakteristiği gösterilmiştir.

Aşırı akım rölelerinin akım-zaman karakteristikleri röle imalatçısı firmalar tarafından röle kataloglarında sadece saf sinüsoidal akım için verilir. Akımın nonsinüsoidal olması yani harmonik bileşenleri içermesi halinde aşırı akım rölesinin akım-zaman karakteristiklerinin nasıl değişeceği bilinmemektedir. Günümüzde elektrik güç sistemlerinde çekilen akımların dalga şekli distorsiyonlu, bozulmuş sinüs formunda olup yoğun olarak harmonik bileşenleri içermektedir. Bu nedenle harmoniklerin aşırı akım rölelerine etkisinin belirlenmesi, farklı harmonik spektrumlarına sahip harmonikli akımlar için rölelerin akım-zaman karakteristiklerinin elde edilmesi, harmonikli akım altında koruma rölesinin güç sistem elemanlarının koruma işlevini yerine getirip getiremeyeceğinin tespit edilmesi zorunluluk haline gelmektedir.



(a) Sabit zamanlı aşırı akım rölesinin çalışma karakteristiği



(b) Ters zamanlı aşırı akım rölesinin çalışma karakteristiği

Şekil 4.4 Sabit zamanlı ve ters zamanlı aşırı rölelerinin çalışma karakteristikleri

4.4.4.1 Yapılarına Göre Aşırı Akım Röleleri

1. Elektromekanik Röleler
2. Statik(elektronik) Röleler

Bu tez çalışmasına konu olan dijital aşırı akım röleleri ise statik rölelerin daha gelişmiş halidir.

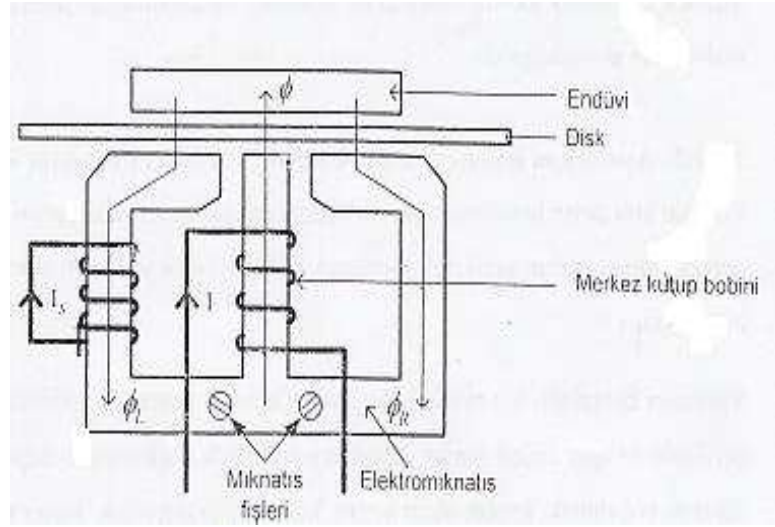
4.4.4.1.1 Elektromekanik (İndüksiyon Diskli) Aşırı Akım Röleleri

Elektromekanik röleler çoğunlukla tek girişli ve tek fazlı cihazlardır. Bu rölelerde doğru olarak belirlenmiş zaman gecikmesi için dizayn edilen indüksiyon diskli veya ani çalışmalar için tasarlanmış olup indüksiyon kupası, silindir veya basit bir piston içerirler.

Bu röleler, elektromıknatıs ve döner alüminyum disk düzleminde indüklenen akımların etkileşiminden oluşan tork sayesinde çalışırlar. Şekil 4.5'deki ünite diskin bir tarafında 3 adet kutba sahiptir ve aynı zamanda ortak manyetik üye yada karşı tarafında koruyucusuna da sahiptir. Ana sargı merkez ayağın üzerinde bulunmaktadır. Ana sargıdaki I akımı, diskten ve hava boşluğundan tutucuya geçen Φ akısını oluşturur. Φ akısı sol el ayağında Φ_L 'ye sağ el ayağında da Φ_R 'ye dönüşür.

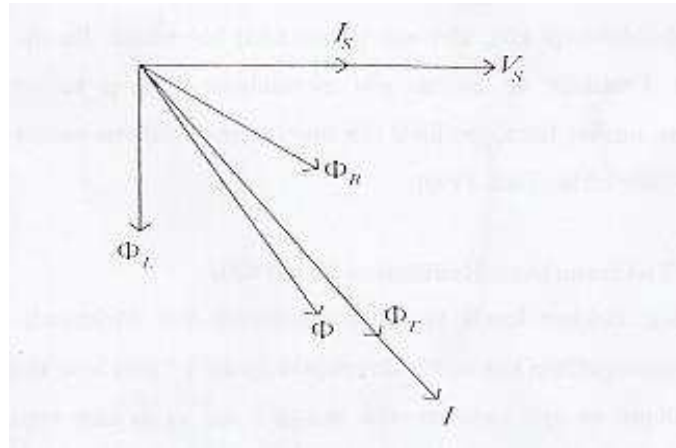
$$\Phi = \Phi_L + \Phi_R$$

(4.1)



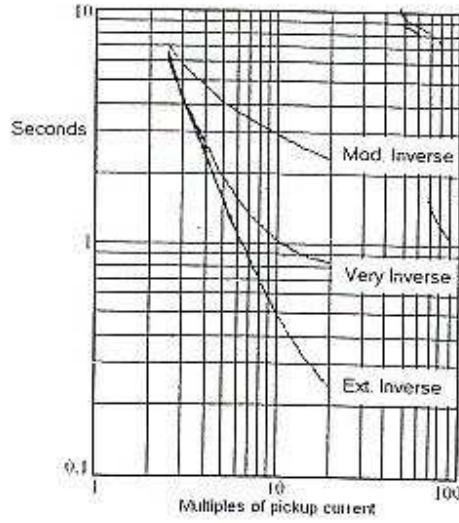
Şekil 4.5 İndüksiyon disk ünitesi

Φ_T , ana bobin akımı I tarafından oluşan toplam akıdır. 3 akı disk hava boşluğundan geçerek diskte girdap akımlarını oluşturur. Bu girdap akımları karşı akıları oluşturur ve 2 takım akının etkileşimi diski döndüren momenti oluşturur. Şekilde gösterilen aynı referans yönlü 3 akı için, akı soldan sağa kayarak diski saat yönünde döndürür (Applied Protective Relaying, 1976).



Şekil 4.6 Ters zamanlı aşırı akım rölesinin fazör diyagramı

Şekil 4.7'de ters zamanlı aşırı akım rölesinin standart akım-zaman karakteristik eğrileri gösterilmiştir. Bu şekilde mod. inverse eğrisi aşırı ters zamanlı ,very inverse eğrisi çok ters zamanlı, ext. inverse aşırı ters zamanlı aşırı akım rölelerinin çalışma eğrileridir.



Şekil 4.7 Ters zamanlı aşırı akım rölesinin standart akım-zaman karakteristiği (IEEE Standart, 1996)

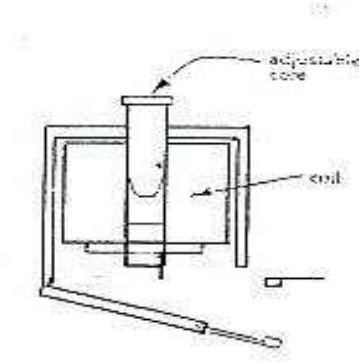
Tipik bir ters zamanlı rölede çalışma momenti oluşturmak için röle içindeki faz kaydıma bileşenleri ve akımın yardımıyla akı meydana getirilir. Bir frekans için (örneğin 50 veya Hz) optimize edilen bir dizayn diğer frekanslarda daha az verimli olacaktır. Bu yüzden giriş akımı harmonik frekansları içerdiğinde elektromekanik röleler daha az duyarlı olmaya ve daha yavaş çalışmaya yönelecektir. Her üreticinin farklı moment üretim dizaynı vardır. Bu yüzden benzer eğri yapılarına sahip olsalar bile farklı üreticilerin elektromekanik röleleri bozulmuş sinyallere farklı şekilde cevap verebilir. Bir elektromekanik röle tipi moment üretimi yıllar boyunca tekrar edilen ve iyileştirilen bir dizayn sonunda elde edilir. Bundan dolayı, belirli bir rölenin bozulmuş dalgaya cevabının nasıl olduğunun test verilerinin o tip rölelerin hepsine uygulanabileceği sonucu çıkartılamaz. Aşırı akım zaman rölelerinin değişik uyumsuzlukları genellikle doymanın başladığı noktanın değiştirilmesi ile oluşur. Bu kaçak reaktans parametresi içerdiğinden frekansın bir fonksiyonu olacaktır. Bu nedenle rölenin aşırı-akım zaman karakteristiği kullanıldığı devrede oluşan bozunumla değişebilir. Elektromekanik aşırı akım rölelerindeki dizayn farklılıklarının çok olması, bozunumun genel bir etkisini ortaya çıkartmamızı engeller.

4.4.4.1.1 Ani Aşırı Akım Röleleri

Elektromekanik rölelerin çalışma prensibine göre bir çeşidi olan ani aşırı akım röleleri yapılarına göre aşağıda alt başlıklar halinde incelenmiştir.

4.4.4.1.1.1 Dalgıç ve Menteşe Tipli Aşırı Akım Röleleri

Dalgıç ve menteşe tipli aşırı akım röleleri elektromanyetik akı cevaplı elemanlardır. Hareket eden elemana uygulanan ani güç, ani akıya dolayısıyla ani akıma bağlıdır. Hareket eden armatürdeki güç (kuvvet) periyot içinde çekme kuvvetinden büyük olarak yeterli uzunlukta kalırsa menteşe veya dalgıç birimi çalışacaktır. Birime uygulanan yüksek frekanslı akım veya harmonik bileşenli akım eğer yeterli büyüklükte ise röleyi çalıştıracaktır. Şekil 4.8’de menteşe tipi rölenin basit şekli gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Menteşe tipi bir rölenin basit şekli (Sayar, 1998).

Teorik olarak hareket eden eleman üzerindeki ortalama kuvvet akımın karesinin integrali ile orantılıdır.

$$\int_0^{2\pi} i^2 dt = \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{3m}^2}{2} + \dots + \frac{I_{nm}^2}{2} \quad (4.2)$$

Burada;

I_{1m} = sinüs dalgasının temel bileşinin maksimum akım değerini

I_{nm} = n. Harmoniğin maksimum akım değerini

göstermektedir.

Ortalama kuvvetin temel bileşinin yanında sadece farklı harmonik bileşenlerinin maksimum değerlerinin karelerinin toplamına bağlı olduğu görülmektedir. Burada akımdaki dc bileşenin etkisi ihmal edilir.

Buna dayanarak, her bir frekans bileşeni bağımsız ve bir de kümülatif etki üretecektir: Bu kümülatif etki çalışma değerinin (harmonikteki bir artış için) azalmasına neden olur. Bu tip bir rölenin bir kutbu kutup akısının kaydırılmış bir bileşenini üretmek için gölgeleme (shading) yüzüğü ile donatılmıştır. Daha yüksek frekansın etkisi, kutuptaki iki akının faz bakımından daha yakın olmalarına neden olacak şekildedir. Bu ise çalışma değerinin frekansla beraber artmasına neden olur. Bu artış çok yüksek frekanslarda sesli çalışmaya neden olur.

Örneğin, menteşe tipli bir rölede yapılan testte 60 Hz'deki çalışma akımı 5 A'e ayarlanmıştır. Daha yüksek frekanstaki çalışma değerleri. Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Frekansta meydana gelen bir artış çalışma değerini arttırmakta ve daha yüksek frekanslarda sesli çalışma daha belirgin hale gelmektedir. Karma frekans girişleri için yapılan deneyde ise çalışma değerinin efektif değeri (temel bileşen + 9. harmonik içeren) 5.1 A'den (temel bileşen ve 2. harmonik içeren) 5.7 A'e çıkmaktadır (Sayar, 1998).

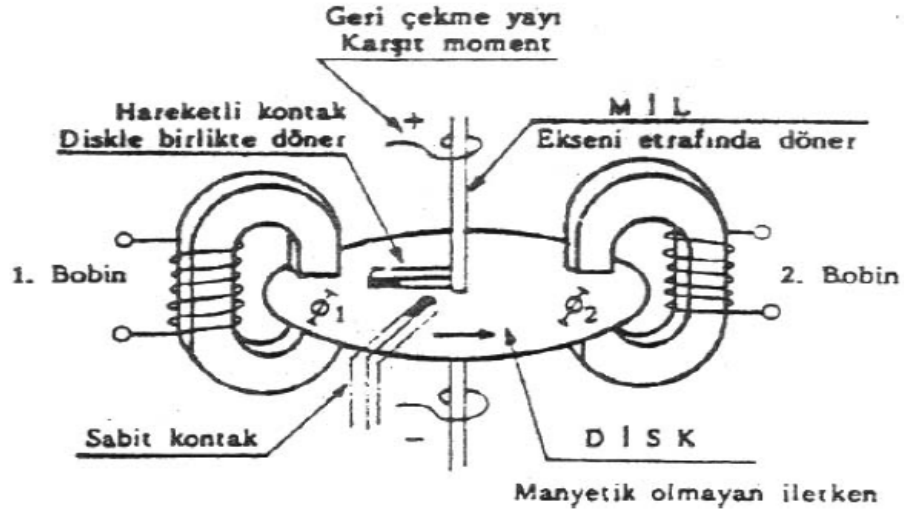
Çizelge 4.1 Deneysel Veriler

Frekans (Hz)	Efektif akım değeri (A)
60	5.0
120	7.3
180	9.3
300	12.6
420	14.2
540	14.8

4.4.4.1.1.2 İndüksiyon Diskli Aşırı Akım Röleleri

Bu rölelerde üç kutuplu elektromıknatısın bir araya getirilmesinden meydana gelir. Röle için tüm çalışma enerjisi merkez kutup sargısına uygulanır. Bir dış kutup geri faz bobini ile donatılmıştır. Üçüncü kutupta bobin yoktur, fakat diğer iki kutuptan etkilendiği için akı alır. Basit bir yapısı şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Bu sistemde, uygulanan temel bileşen çalışma akımı ile moment yay sınırlamasını yok etmek ve diskin harekete başlamasını sağlamak önerilir. Bu moment her bir kutup akısı tarafından üretilen disk akımları ile diğer iki kutup akısı tarafındaki karşılıklı etkileşimden ortaya çıkar ve bu momentlerin hepsi aynı yöndedir.



Şekil 4.9 İndüksiyon diskli aşırı akım rölesi basit şekli

Giriş akımlarının frekansını arttırmak geri faz bobin devresinde üretilen akımda küçük bir değişikliğe yol açar. Bu kutuptaki akı, elektromıknatısın davranışı, bir akım transformatörü eşdeğer olarak alınarak frekans artışı ile ters orantılı olarak azalacaktır. Benzer şekilde diğer dış kutuptaki akı, üzerindeki daha düşük magnetomotor kuvvetinden dolayı azalır. Merkez kutuptaki akı diğer iki dış kutuptakilerin toplamı olduğundan o da artan frekans için azalan mıknatıslama akımı ve sabit geri faz bobini akımı devresi ile toplam etki (merkez kutup) için ve geri faz bobini bulunmayan kutup akılarının faz bakımından yakına çekilir. Bu durum çalışma değerlerinin artmasına sebep olur disk dönüşü azalır ve sonunda elektromıknatısın verimliliğinin kötüleşmesine neden olur. Temel bileşenle birlikte harmonikler bu birimin çalışması üzerinde az da olsa bir etkiye sahip olacaktır.

İndüksiyon kupalı ve silindir tipli röleler dizayn parametrelerine bağlı olarak indüksiyon diskli rölelerdekine benzer olarak frekans cevabına sahip olacaktır.

İndüksiyon disk birimi çoğu koruma fonksiyonlarında (genellikle aşırı akım) kullanılır. Faz denge rölesi dışında harmoniklerin etkisi hepsinde benzerdir. Frekans temel bileşenden 9. harmoniğe kadar olan tek harmoniklere kadar arttırıldığında elektromıknatıslar tarafından üretilen disk üzerindeki moment verilen bir efektif akım için azalır, böylece daha yüksek minimum çalışma değerine yükselmesine neden olmaktadır. İndüksiyon aşırı akım rölesinin çekme değeri 1 A'e ayarlandığında elde edilen çalışma değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Burada f,

frekansı, n , harmonik derecesini, I_{60} 60 Hz'deki akımı I ise efektif çalışma değerini göstermektedir. Röleye giriş akımı,

$$I_{\text{giriş}} = I_{60} + I_{60n} \text{ olup} \quad (4.3)$$

n . harmonikteki akım değeri

$$I_{60n} = I_{60}/n \text{ ile ifade edilmektedir.} \quad (4.4)$$

Çizelge 4.2 İndüksiyon diskli bir rölenin harmoniklerin bulunması durumundaki çalışma değerleri

f(Hz)	n	$I_{60}(\text{Hz})$	I_{60}/n	Efektif Çalışma Değeri (A)
60	1	1.00	-	1.0
120	2	0.92	0.46	1.03
180	3	0.99	0.33	1.04
300	5	1.02	0.20	1.04
420	7	1.02	0.145	1.03
500	9	1.00	0.11	1.01

İndüksiyon diskli bir röle üzerinde yapılan deneyde, artan her bir frekans için röle daha az verimli hale geldiği çalışma zamanı daha uzun olmakta ve zaman eğrileri yukarı kaymaktadır. Karma frekans girişleri için ise zaman eğrilerinin oldukça az değiştiği gözlenmiştir.

Faz dengesi indüksiyon rölesi için tek frekans girişli aşırı akım indüksiyon disk rölelerinden farklı olarak harmonik seviyesindeki artarak verilen bir giriş akımı için momentler artmaktadır (120 ve 180 Hz'de moment artmıştır ve çalışma büyüklüğü temel bileşen değerinden yaklaşık olarak %15 daha azdır.).

Fakat karma olarak frekans 3. harmonikten 9. harmoniğe kadar arttırıldığında röle aşırı akım röleleri gibi çalışmış moment azalmış ve çalışma değeri artmıştır (Sayar, 1998).

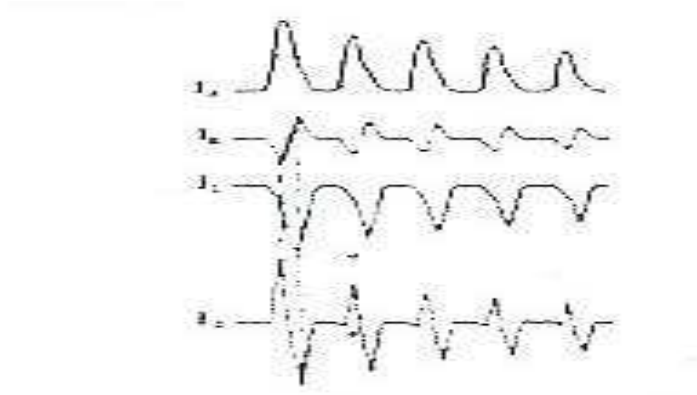
4.4.4.1.1.3 Negatif Sequence Aşırı Akım Röleleri

Bu tip röleler negatif sequence akımını tanımak ve pozitif sequence akımını ihmal etmek için yapılmıştır. Bunu temel bileşen frekansında yapar. Diğer frekanslarda rölenin bu özelliği kaybolur. Bu rölenin bir eşdeğeri endüktans ile direnç elemanlarını içerir. Frekansın bu reaktans rölelerinin reaktansları üzerindeki etkisi oldukça büyüktür ve tek frekans çalışma değerini oldukça değiştirir.

Negatif sequence aşırı akım rölesi, negatif sequence filtre devresindeki reaktansın değişiminden dolayı tek frekans girişiindeki değişimlerden etkilenir. Röle pozitif sequence aşırı akımlarına da cevap vermeye başlar. Artan tek frekans girişleri için, sequence filtre çıkışında azalma görülmüştür ve rölenin minimum çalışma değeri yaklaşık olarak $\sqrt{f}$ kadar artmıştır. Temel bileşen ve harmonik bileşiminin uygulanması röle çalışması üzerinde çok az etkisi vardır (Sayar, 1998).

4.4.4.1.1.4 Harmonik Sınırlı Ani Akım Röleleri

Bu tip röleler basit yapıdaki ani akım rölelerinin kullanımının transformatör inrush akımları tarafından sınırlandırıldığı bazı durumlarda kullanılırlar (Şekil 4.10). Genel olarak dizayn yapılan sınır (yüksek hızlı transformatörler rölelerinde olduğu gibi) ikinci harmoniktir. Sağlanan çalışma parametreleri genellikle dizayn edilen ikinci harmonik cevabına uyar. Sınırlama hareketinin geliştirildiği çalışma devresi ve özel filtre devresinin analizi ile diğer harmoniklerin etkisini tahmin edebiliriz.



Şekil 4.10 Tipik transformatör inrush akımları (Bozkurt, 2005)

4.4.4.1.1.2 Termik Aşırı Akım Röleleri

Termik aşırı akım röleleri makineleri transformatörleri, kabloları ve benzer cihazları aşırı akımın veya kısa devre akımının tesiri ile meydana gelen ısınmalara karşı korumak için kullanılır. Açma zamanları aşırı akımın değerine göre değişir. Akım arttıkça açma zamanı kısalır. Üç fazlı sistemlerde termik aşırı akım röleleri genellikle her fazın üzerine, nadiren de iki fazın üzerine konur.

Bu röleler ya bir kapalı kontağı müşterek olarak kumanda ederler veya herbiri kendisine ait kontağı açarak motoru korumuş olur. Termik aşırı akım röleleri çeşitli akım değerleri için yapılırlar. Her termik aşırı akım rölesi belirli iki akım değeri arasında çalışır. Rölenin üzerinde bulunan bir ayar vidası ile , rölenin istenen motor akımına ayarlanması sağlanır. Bu rölenin bimettali ve eriyici alaşımlı olarak iki çeşidi vardır.

4.4.4.1.1.3 Eriyici Alaşımlı Termik Röleler

Lehim kabı, mandallı çarkı belirli bir konumda tutar. Isıtıcı elemandan aşırı motor akımı geçtiğinde lehim yığınını eritir. Bu durumda mandallı çark eriyen lehim içerisinde serbestçe dönebilecektir. Yay kuvvetinde etkisiyle mandallı çark dönerek yol vericinin kontrol devresindeki normalde kapalı kontakları açar ve motoru durdurur. Motor tekrar çalıştırılmadan ve aşırı akım rölesi normal konumuna alınmadan önce lehim yığınının katılaşması için bir soğuma sürecine ihtiyaç duyulur.

Eriyici alaşımlı termik birimler değiştirilebilir. Bunlar, ısıtıcı eleman ve lehim kabı arasında ilişkiyi sağlayan parçalı bir yapıya sahiptir. Sonuç olarak bu birim, alanında çok kullanılabilir yapmak için üretim sırasında ayarlanmıştır. Bu önemli özellik diğer aşırı akım rölelerinde yoktur. Farklı büyüklükteki motorlara uygun açma akımları elde etmek için geniş bir değiştirilebilir ısıtıcı bbbirim seçeneği sunulmuştur. Bunlar, farklı tam yük akım değerleri olan motorlarda tam bir aşırı yük koruması sağlar. Termik birimler, akım değerine göre ve motorun tam yük akımına göre seçilir. Motor devresi ile seri bağlandığından, yol vericiye yerleştirilmiş bu ısıtıcı elemanlar olmadan motor çalışmaz.

4.4.4.1.1.3.1 Termik (Bimetalli) Aşırı Akım Röleleri

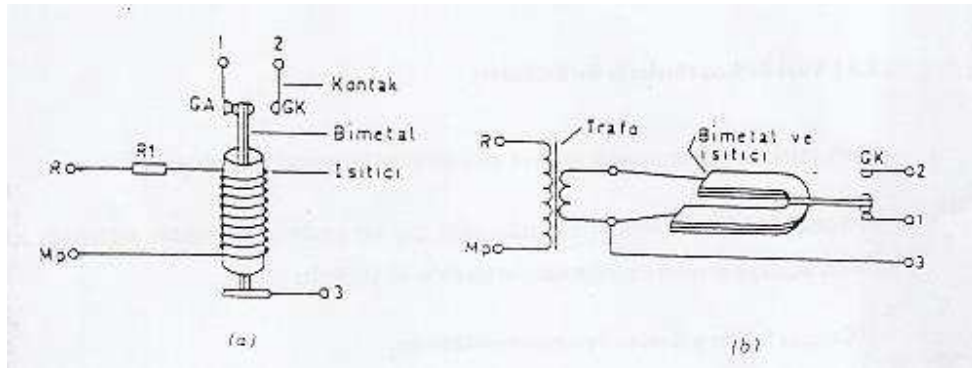
Bu elemanlar özellikle 2 tip uygulamada kullanılmak üzere tasarlanırlar: otomatik yeniden kurma ve bimettali röle uygulamaları. Otomatik yeniden kurma özelliği ,bu elemanın elle kurma işleminin kolayca gerçekleştirilemediği yerlere monte edildiği ve otomatik konumda iken ayarlanabileceğini ifade eder.

Otomatik yeniden kurma konumunda, bir açma işleminin ardından röle soğuduktan sonra röle kontakları otomatik olarak yeniden kapanacaktır. Yeniden kurma butonuna erişmek güç olduğunda bu özellik önemli bir üstünlüktür. Otomatik pilot kontrol elemanlarıyla kullanıldığında, otomatik kurmalı aşırı akım röleleri tercih edilmez. Çünkü bir aşırı akım

nedeniyle kontaklar açıldıktan sonra röle kontakları otomatik olarak bir süre sonra geri kapanacağından, aşırı akıma neden olan arıza bulunup giderilmeden motor otomatik olarak yeniden çalışacaktır. Aşırı akıma neden olan arıza giderilmediği sürece motorun çalışması tekrarlanacak ve kısa süreli de olsa tekrarlı darbe akımı ve aşırı yük akımının toplam etkisi nedeniyle motor yanacaktır.

Çoğu bimetalli röleler, ısıtıcı birimlerinin normal değerinin %85'inden %115'ine kadarlık değerlerinde devreyi açacak şekilde ayarlanabilir. Bu özellik, bir büyük röle yeterli koruma yapamadığında ve kullanılan ısıtıcı birim, gereksiz açma kapama yaptığında yararlıdır.

Termik rölenin en önemli tipi bimetal röledir. Bu röle farklı uzama katsayıları farklı iki metalin ısınması esnasında az uzayan metalden yana kıvrılması olayından faydalanılarak yapılmıştır. Hat akımı, ya direkt olarak ya da bir akım transformatörü üzerinden alınarak metal çiftin etrafına sarılmış direnç telinden geçirilir ve bu tel içinden geçen akıma bağlı olarak metal çifti ısıtır. Isınmanın fazla olması metal çiftin bir kontağını kapatmasına (veya açmasına) sebep olur. Akımın kesilmesi ile kontağın eski konumunu alması gerekir. Ancak soğuma çabuk olmayacağı için röle kontağı akım kesildikten sonra bir süre daha kapalı (veya açık) kalır. Ayrıca bir tertip ile kontağın normal ısıya gelinceye kadar açılmaması temin edilir. Şekil 4.11 'de termik rölenin temel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Termik Rölenin temel yapısı (Sayar, 1998).

a. Endirekt ısıtmalı termik röle

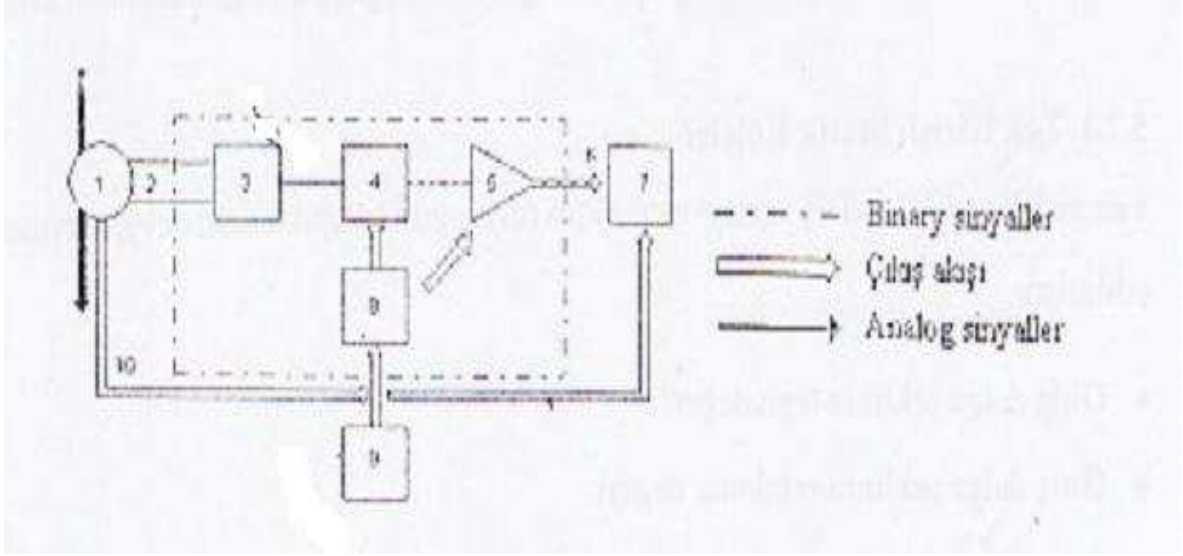
b. Direkt ısıtmalı termik röle

4.4.4.1.2 Statik (Elektronik) Aşırı Akım Röleleri

Elektromekanik röleler, herhangi bir sinyal prosesi olmadan, yalnızca röleye uygulanan akımın yada gerilimin büyüklüğüne göre çalışan rölelerdir. Bu eksikliğin öneminin anlaşılması ve gelişen teknolojiyle birlikte statik röleler üretilmiştir.

Statik röleler koruma fonksiyonlu analog-ikili sistem (binary) dönüştürücülerdir. Akım gerilim, frekans ve faz açısı gibi değişkenler ile diferansiyel, integral veya diğer matematiksel işlemlerle türetilen değerler ölçüm ünitesinin girişine analog sinyaller olarak gelir. Daima çıkış binary sinyaldir. Röle kesiciye açtırmayacak ise çıkış sinyali açık (OFF) sinyaldir. Eğer röle kesiciyi açtıracaksa çıkış sinyali kapanan (ON) sinyal olur. Bu çıkış sinyalleri bir sonraki kontrol elemanı tarafından değerlendirilir.

Bir statik röle, şekil 4.12’de gösterilen temel blok diyagrama göre buradaki elemanların sırayla birleştirilmesinden meydana gelir. Bir akım veya gerilim ölçü transformatörü olan ölçme elemanından alınan ve sürekli değişen formda koruma rölesindeki dönüştürücü (konverter) üniteyi besler, ölçme devresinden (1) alınan sinyaller dönüştürücüde (3) işlenecek hale getirilir ve şekildeki gibi ölçme elemanı tarafından değerlendirilir. Ölçme elemanı girişindeki sinyaller rölenin çalışması için gerekli olan eşik değeri aştığı zaman ölçme elemanı çıkışındaki kapalı bir sinyal elde edilir. Çıkış elemanı (5) ölçme elemanından alınan zayıf binary sinyali kuvvetlendirerek bir yada daha çok kontrol elemanına (7) iletir. Kontrol elemanı (7) bir besleme elemanı (8) tarafından ölçme veya çıkış elemanına verilen güç yardımıyla bir kesiciyi açtıracak şekilde bir anahtarlama fonksiyonu oluşturur. Kesiciyi açtıracak olan anahtarlama fonksiyonu için gerekli olan güç ya bir yardımcı gerilim kaynağından (8) ya da direkt olarak ölçme devresinin (1) kendisinden temin eder (Yumurtacı, 1995; Madhava, 1992).



Şekil 4.12 Statik koruma rölelerinin temel blok diyagramı

Burada;

1. Ölçme devresi ,
2. Ölçme sinyalleri,
3. Dönüştürme elemanı,
4. Ölçme elemanı,
5. Çıkış elemanı,
6. Çıkış sinyali,
7. Kontrol elemanı,
8. Besleme elemanı,
9. Yardımcı gerilim kaynağı,
10. Ölçme devresi kaynağını göstermektedir.

5 DİJİTAL AŞIRI AKIM RÖLELERİ

5.1 Giriş

Dijital teknolojinin gelişmesiyle birlikte, dijital sistemlerin güç sistemlerinde kullanımı artmıştır ve var olan mekanik sistemler zamanla yetersiz kalmaya başlamıştır. Bu durum özellikle koruma sistemlerinde yer alan elektromekanik rölelere alternatif olarak yeni arayışlara girilmesine neden olmuştur. İlk olarak yarı iletken elemanlar kullanılarak statik röleler geliştirilmiştir. Dijital teknolojinin gelişmesi ve koruma sistemlerindeki ihtiyaçların atmasıyla, statik röleler geliştirilmiştir. Böylece bu tez çalışmasına konu olan ve dijital aşırı akım röleleri geliştirilmiştir.

Bu kısımda dijital aşırı akım rölelerinin yapısı, gelişimi, genel çalışma prensipleri, kullanım alanları ve avantajları anlatılmıştır.

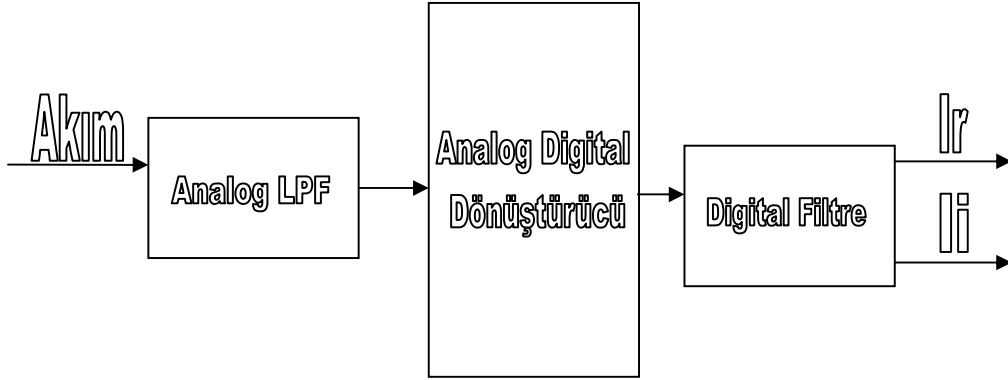
5.2 Dijital Aşırı Akım Rölelerinin Yapısı ve Gelişimi

Elektromekanik röleler, herhangi bir sinyal prosesi olmadan, yalnızca röleye uygulanan akımın ya da gerilimin büyüklüğüne göre çalışan rölelerdir. Bunun sonucu olarak da bu rölelerin bulunduğu güç sisteminde harmonikler mevcutsa elektromekanik röleler yanlış kesici açmalarına neden olabilmektedir. Bu eksikliğin öneminin anlaşılmasıyla birlikte statik röleler üretilmiştir. Statik aşırı akım röleleri elektromekanik rölelerden farklı olarak, içerisindeki analog filtreler sayesinde röleye uygulanan akımın harmoniği azaltmakta ya da süzmektedir.

Dijital teknolojiyle gelişen filtreleme karakteristikleri sayesinde statik rölelerde, analog filtrelerle birlikte dijital filtreler de kullanılmaya başlanmıştır. Böylece statik aşırı akım rölelerin daha gelişmiş bir versiyonu olan ve bu tez çalışmasına konu olan dijital aşırı röleleri üretilmeye başlanmıştır.

Dijital aşırı akım rölelerinde harmonikler açısından en önemli kısım ön filtredir. Bu ön filtre sayesinde temel bileşen dışındaki frekanslar elimine edilmektedir. Bu ön filtre analog bir filtre olup, filtreden gelen sinyaller bir analog dijital dönüştürücü (ADC) ile dijitalle dönüştürülür ve dijital filtre algortiması kullanılarak filtre edilir. Bu nedenle dijital aşırı akım rölelerinde doğru ADC ve dijital filtre seçimi çok önemlidir (Grigsby, 2001).

Aşağıda Şekil 5.1 de dijital aşırı akım rölelerine ait genel bir prensip şeması gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Dijital aşırı akım rölelerinin genel prensip şeması

Genel olarak dijital aşırı akım rölelerinde kullanılan filtre çeşitleri şunlardır:

- CAL Filtre
- Cosine Filtre
- Fourier (FIR) Filtre
- IIR Filtre
- Correlators
- Least-squares
- Kalman Filtre

Bu filtrelerden FIR filtreler harmoniklerin matematiksel olarak ifade edilmesini sağlayan Fourier eşitliklerini baz alan filtrelerdir. Böylece bu filtrelerle aşırı akım rölesine uygulanan akımda harmonik olması durumunda, harmonikleri azaltmakta veya harmonikli akımları bileşenlerine ayırmaktadır.

CAL filtreler genel olarak etkili bir filtre olarak bilinmektedir. Ancak tek harmonikleri geçirdiklerinden, bu duruma karşı düşük bantlı analog filtrelerle birlikte kullanılmaktadır. Cosine filtreler, genel çalışma prensibi olarak Cal fitrelere benzemektedir. Ancak harmonikli akımlarda Cal fitrelere göre daha etkili çalışmakta ve neredeyse bütün harmonikleri süzebilmektedir.

IIR filtreler, FIR filtreler gibi çalışmaktadır ama genel olarak ikinci harmoniğe ve akımın dc bileşenlerine karşı etkili olarak çalışmaktadır.

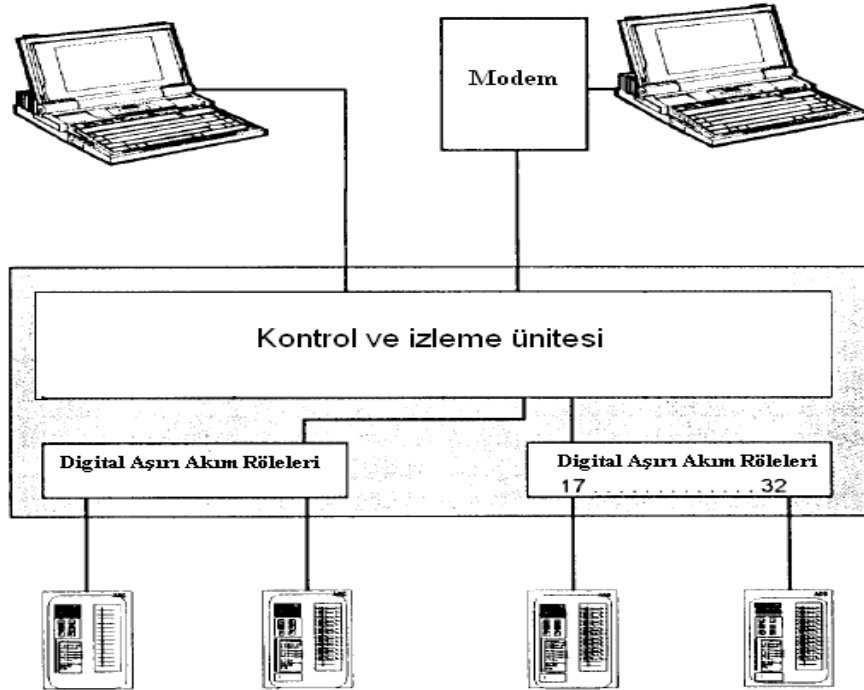
Correlator filtreler de FIR filtreler gibi harmonikler karşısında etkili bir biçimde çalışmaktadır. Ancak akımda ikinci harmoniğin bulunması durumunda daha az verimli çalışmaktadır.

Least-squares filtreler genel olarak harmoniklere karşı etkili olup, özellikle en çok üçüncü harmoniğe karşı etkili çalışmaktadır.

Kalman filtreler harmonikleri algılayabilmektedir ama ikinci ve üçüncü harmoniklerin olması durumunda etkinliği azalmaktadır.

5.3 Dijital Aşırı Akım Rölelerinin Kullanım Alanları ve Avantajları

Dijital aşırı akım röleleri, elektromekanik rölelerin yer aldığı hat koruması, trafo koruması, busbar koruması gibi tüm koruma sistemlerine adapte edilerek kullanılabildiği gibi, dijital teknolojinin gelişmesiyle birlikte oluşturulan dijital ağırlıklı koruma sistemlerinde etkili ve güvenilir bir biçimde çalışabilmektedir. Şekil 5.2 de dijital aşırı akım röleleri ve bu rölelerin bağlı bulunduğu genel izleme merkezi gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Dijital röleler ve bu rölelerin bağlı bulunduğu genel izleme merkezi

Genel olarak dijital aşırı akım röleleriyle elektromekanik röleler karşılaştırıldığında, dijital rölelerin avantajları aşağıdaki gibidir:

- Daha uzun ömür ve daha yüksek güvenilirlik
- Mantık-düzey devrelerine daha kolay uydurulabilme
- Yüksek anahtarlama hızı
- Şok ve vibrasyon için daha yüksek direnç
- Bakım ve işletme kolaylığı
- Mekanik kontak olmaması

Dijital rölelerde mekanik kontakların olmaması aşağıda sıralanan sorunların ortadan kalkmasını sağlar:

- Kontak sıçraması
- Kontak açılması sonucu kıvılcım atlaması
- Elektromanyetik girişim (EMI) ve patlayıcı ve yanıcı gaz, sıvı ve katıların bulunması durumunda bir kontak kıvılcımı sonucu ortaya çıkabilecek yangın tehlikesinin ortadan kalkması.

Buna karşın elektromekanik röleler, yüksek hız anahtarlama veya tehlikeli bir ortamda operasyon gerektirmeyen durumlarda fiyat olarak daha ucuzdur (Grigsby, 2001).

6 HARMONİKLERİN AŞIRI AKIM RÖLELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

6.1 Giriş

Elektrik güç sistemlerindeki harmonikler aşırı akım rölelerin çalışmasını birçok yönden etkilemektedir. Bu etkiler aşırı akım rölelerinin çalışma akımlarının ve cevap sürelerinin artması veya azalması (rölelerin akım-zaman karakteristiklerinde değişmeler) şeklinde görülmektedir. Bu bölümde literatürde yer alan ve daha önce yapılmış çalışmalardan yararlanılarak harmoniklerin aşırı akım rölelerine olan etkileri incelenmiştir.

6.2 Elektromekanik Aşırı Akım Röleleri

Elektromekanik röleler, çoğunlukla tek veya çift girişli, bir-fazlı cihazlardır. Bu röleler doğru olarak belirlenmiş zaman gecikmesi için dizayn edilen indüksiyon diskli veya ani çalışmalar için tasarlanmış olan indüksiyon kupası, silindir veya basit bir piston içerirler. Bir ters zamanlı rölede çalışma momenti oluşturmak için içindeki faz kaydırma bileşenleri ve akımın yardımıyla bir akı meydana getirilir. Belirli bir frekans için (örneğin, 50 veya 60 hertz) dizayn edilen röleler, bu frekans girişleriyle enerjilendiğinde karakteristik eğrilerine uygun zaman gecikmeleriyle çalışır. Giriş akımı veya geriliminin harmonik frekansları içermesi elektromekanik rölelerin daha az hassas ve daha yavaş çalışmasına neden olur. Distorsiyonlu girişlerin etkilerindeki bu farklılık; bileşenlerin elektrik ve magnetik özellikleri ve röleleri oluşturan elemanların fiziksel yerleşimlerdeki fiziksel farklılıkla ilgilidir (WDCIWG, 1984).

Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda literatürde harmoniklerin elektromekanik aşırı akım rölelerine etkisini inceleyen deneysel çalışmalara bakıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Elektromekanik röleler harmonikli akımlar uygulandığında saf sinüsoidal akımlarda gösterdiği çalışma karakteristiğinden farklı bir karakteristik göstermektedir. Buna göre mekanik rölenin tipine bağlı olarak değişen yüzdelerde bu rölelerin işletme akımlarında azalma görülmektedir. Bu nedenle harmoniklerin elektromekanik aşırı akım rölelerine etkisi oldukça önemlidir (AI-Zyoud, Khraiwish, Shakarchi, 2006)
- Akımın dalga şeklindeki bozulma arttıkça, başka bir deyişle akımın THD_i değeri yükseldikçe indüksiyon diskli aşırı akım rölesinin çalışma akım değerinin ve zaman gecikmesinin arttığı tespit edilmiştir. Sinüsoidal akım için tasarlanmış ve imal edilmiş olan bu röle akımın THD_i değerinin %10'un altında olması durumunda uygulamada ciddi

bir sorun oluşturmaz. THD_i değerinin çok yüksek olduğu yük akımlarında ayarlandığı akım değerinden daha yüksek akımda devreye gireceği için güvenilir bir koruma gerçekleştirilemeyecektir (Bozkurt, 2005).

6.3 Statik Aşırı Akım Röleleri

Bu rölelerde elektronik elemanlara transfer edilen enerjiyi sınırlamak ve zaman-aşırı akım karakteristiğini kolaylaştırmak için rölenin akım girişinde akım transformatörleri kullanılır. Bu röle içerisinde meydana getirilen dalga şekli bozulmasına neden olacaktır ve rölenin bu tip sinyallere nasıl cevap verdiğini etkileyecektir. Çoğu statik röleler de giriş sinyalini elektronik işlem için uygun seviyeye dönüştürmek için küçük giriş transformatörleri kullanılır. Bu transformatörler, kayda değer bir eşdeğer hava boşluğuna sahip olabilirler. Böylece röle, uygulanan sinyaldeki yüksek frekans bileşenlerine karşı ölçüm tekniği ne olursa olsun daha hassas olacaktır. Hava boşluğu bir asimetrik akımdaki dc bileşeni bastırmak için, bilerek geniş yapıldığında yüksek frekans hassasiyeti artırılır (WDCIWG, 1984).

Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda literatürde harmoniklerin statik aşırı akım rölelerine etkisini inceleyen deneysel çalışmalara bakıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Genel olarak harmonikli akımlar uygulandığında, statik aşırı akım rölelerinin akım-zaman eğrisinin biçiminin değişmesiyle birlikte, harmonik bileşenleri içeren nonsinüsoidal akımın efektif değeri aynı kalmak şartıyla, akımın toplam harmonik distorsiyonu (THD_i) arttıkça (akımın dalga şekli bozulup sinüsoidal formdan saptıkça) rölenin kumanda zamanının azaldığı görülmektedir (Bozkurt, 2005).
- Statik rölelere harmonikli akımlar uygulandığında rölelerin işletme akımlarında azalma görülmektedir. Bu azalmanın oranı rölenin tipine bağlı olarak değişmektedir (AI-Zyoud, Khraiwish, Shakarchi, 2006).

6.4 Digital Aşırı Akım Röleleri

Bu tez çalışmasına konu olan dijital aşırı akım röleleri statik rölelerin daha gelişmiş bir tipidir. Literatürde daha önce yapılmış çalışmalar ve pratikte karşılaşılan sorunlar göz önüne alınarak harmoniklerin statik rölelerin çalışma karakteristiklerini olumsuz yönde etkilediği ortaya konmuştur. Bu nedenle dijital rölelerde statik rölelerden farklı olarak harmoniklerin etkisini

azaltmak veya yok etmek amacıyla bir takım elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların en başında filtreler gelmektedir.

Dijital aşırı akım rölelerinde harmonikler açısından en önemli kısım ön filtredir. Bu ön filtre sayesinde temel bileşen dışındaki frekanslar elimine edilmektedir. Bu ön filtre analog bir filtre olup, filtreden gelen sinyaller bir analog dijital dönüştürücü (ADC) ile dijitale dönüştürülür ve dijital filtre algortiması kullanılarak filtre edilir. Bu nedenle dijital aşırı akım rölelerinde doğru ADC ve dijital filtre seçimi çok önemlidir (Grigsby, 2001).

Yukarıda anlatılan bilgiler doğrultusunda literatürde harmoniklerin dijital aşırı akım rölelerine etkisini inceleyen deneysel çalışmaların sayısı fazla olmamakla beraber, bu çalışmalara bakıldığında dijital rölelerin sahip oldukları filtreler sayesinde harmoniklerden çok az etkilendiği ya da etkilenmediği görülmüştür (Medina, Martínez-Cárdenas, 2005).

7 DENEYSEL ÇALIŞMA

7.1 Giriş

Bu bölümde, harmoniklerin dijital aşırı akım röleleri üzerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar açıklanmış, deney sonuçlarına yer verilmiştir. Deneysel çalışmalar Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Laboratuvarında yapılmıştır.

Deneysel çalışmada sinüsoidal yük akımı için akım-zaman karakteristikleri benzer olan (ters akım zaman karakteristiği) üç adet dijital aşırı akım rölesi kullanılmıştır. Literatürde ve daha önce yapılan tez çalışmalarında ters zamanlı elektromekanik ve statik aşırı akım rölelerine harmoniklerin etkisi ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasının amacı ters akım-zaman karakteristikli dijital aşırı akım rölelerine harmoniklerin etkisini bilimsel olarak inceleyerek literatürde verilen çalışmalara katkı sağlamaktır. Yapılan deneysel çalışma tamamen bilimsel amaçlı olup deney sonuçlarından hareket ederek röle üretici firmalarının birbiriyle karşılaştırılmamasına ve ürünlerin ticari etkinliğini etkileyebilecek yorum ve değerlendirme yapılmamasına özen gösterilmiş olup bu nedenle deneysel çalışmada kullanılan dijital aşırı akım rölelerine üretici firmalarca verilen ürün adları ve bu rölelerin üretici firmalarının adları özellikle verilmemiştir. Röleler “Dijital Aşırı Akım Rölesi-A”, “Dijital Aşırı Akım Rölesi-B” ve “Dijital Aşırı Akım Rölesi-C” olarak adlandırılmıştır. Deneyde kullanılan her üç röle de sinüsoidal akım için aşırı akım ve kısa devre korumasında oldukça başarılı ve son derece güvenilir rölelerdir. Bu röleler içerisinde Röle-A ve Röle B mikroişlemcili birer röle olup gerekli ayarlar röle üzerindeki mikro anahtarlar (switch) yardımıyla yapılmaktadır. Röle-C daha gelişmiş mikroişlemcili bir dijital röle olup rölenin üzerinde akım değerlerini, rölenin ayarlarını gösteren LCD ekranı ve rölenin bilgisayarla iletişimini sağlayan yazılımı mevcuttur. Deneyde kullanılan rölelerle ilgili diğer detaylı bilgiler aşağıdaki alt başlıklar altında verilmiştir. Çalışmalarda röle akım-zaman karakteristiklerinden standart çalışma eğrisi (SI) seçilmiş olup, zaman öteleme çarpanı 0,4 olarak belirlenmiştir.

Deneylerde rölelere uygulanacak harmonikli akım bir harmonik kaynağı olan ve dimmer olarak adlandırılan triyak kontrollü rezistif yüklü bir devre ile üretilmiştir. Bu harmonik kaynağı şebeke gerilimi ile beslendiği için şebeke gerilimindeki düşük genlikli harmonik bileşenlerden de etkilenmektedir. Deneysel çalışmada bu harmonik kaynağının akımı dijital aşırı akım rölelerine

uygulanmış ve rölelerin kesiciye açma kumandası verdiği zaman gecikmeleri (rölelerin cevap süreleri) ölçülmüştür. Böylece triyak tetikleme açısı ayarlanarak farklı harmonik spektrumlarına sahip, farklı karakterlerdeki nonlinear yük akımları için dijital aşırı akım rölelerinin akım-zaman karakteristikleri belirlenerek harmoniklerin rölelerin akım-zaman karakteristiklerine etkisi incelenmiştir.

7.2 Harmoniklerin Dijital Aşırı Akım Röleleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde sırasıyla deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, deneylere ait devre şemaları ve yapılan hesaplamalar verilerek deneyler açıklanmış ve deney sonuçları yorumlanmıştır.

7.2.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Dijital Aşırı Akım Rölelerinin İncelenmesi

Bu bölümde deneysel çalışmalarda ortak olarak kullanılan Dijital Aşırı Akım Rölesi-A, Dijital Aşırı Akım Rölesi-B ve Dijital Aşırı Akım Rölesi-C detaylıca incelenmiştir.

7.2.1.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'nın İncelenmesi

Deneysel çalışmalarda kullanılan mikroişlemcili Dijital Aşırı Akım Rölesi-A, korumada selektivite (seçicilik) gerektiren havai hat ve kablo dağıtım şebekelerinde kullanılır. Transformatör, generatör ve yüksek gerilim şebekelerinde aşırı akım ve kısa devrelere karşı koruma yapar. Ayrıca yıldız noktası direkt veya düşük direnç üzerinden topraklanmış şebekelerde toprak hatası rölesi olarak kullanılabilir. Aşağıda şekil 7.1 de bu rölenin önden görünüşü gösterilmiştir.



Şekil 7.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A (Röle-A Kataloğu)

Bu röle, “akımın rms değerine göre” çalışmaktadır ve rölede her bir akım ölçme ünitesinde mode, aşırı akım, zaman çarpanı ve ani açma switchleri bulunur. Mode switch ile işletmenin veya korunacak elektrik tesisinin yapısına uygun olarak koruma tipi seçilir. Bu koruma tiplerinin seçimine ilişkin çizelge aşağıda verilmiştir. Örnek olarak genelde trafolar için standart ters (standart inverse) eğri, zor yol alabilen orta gerilim motorları için uzun zamanlı ters (long-time inverse) eğri, iletim ve dağıtım sistemlerinde aşırı ters (extremely inverse) eğrisi veya çok ters (very inverse) eğrisi, toprak hatası korumalarında ise sabit zamanlı (definite time) eğrisi D1 yani 1s. seçilebilir.

Çizelge 7.1 Röledeki koruma tipleri (Röle-A Kataloğu)

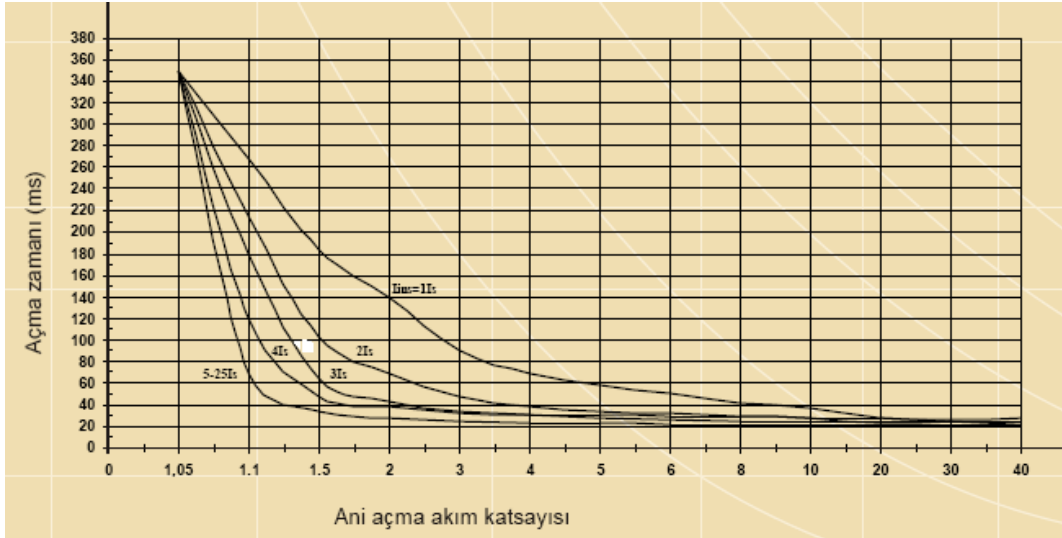
ÇALIŞMA FONKSİYONLARI	NORMAL TERS (STANDARD INVERSE - SI)	ÇOK TERS (VERY INVERSE - VI)	AŞIRI TERS (EXTREMELY INVERSE - EI)	UZUN ZAMANLI TERS (LONG-TIME INVERSE - LTI)	SABİT ZAMANLI ÇALIŞMA (saniye)		
					1s.	10s.	50s.
IEC 255-4 VEYA BS142	$t = \frac{0.14}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{0.02} - 1}$	$t = \frac{13.5}{\left(\frac{I}{I_s}\right) - 1}$	$t = \frac{80}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 - 1}$	$t = \frac{120}{\left(\frac{I}{I_s}\right) - 1}$	D1	D10	D50

Aşırı akım (0-1) konumlu mikro anahtarlar (dip switchler) ile yapılmaktadır. Aşırı akım ayarı (I_s) amper olarak bu dip switchler toplanarak belirlenir. Örneğin; bir faz için bu switchlerden 0,5 ile 4,0 kademeleri sağ tarafta (1 konumunda), diğerleri sol tarafta (0 konumunda) ise aşırı akım değeri $0,5+4,0=4,5A$ olarak ayarlanmış olur. Bu rölede aşırı akım ayarı fazlarda 0,25...10,00 A arasında 0,25A aralıklarla ve toprakta ise 0,05A aralıklarla 0,05...2,00A arasında yapılabilir. Akım ayarı yapılırken bu mikroişlemcili rölenin akımın efektif (rms) değerine göre çalıştığına dikkat edilmelidir.

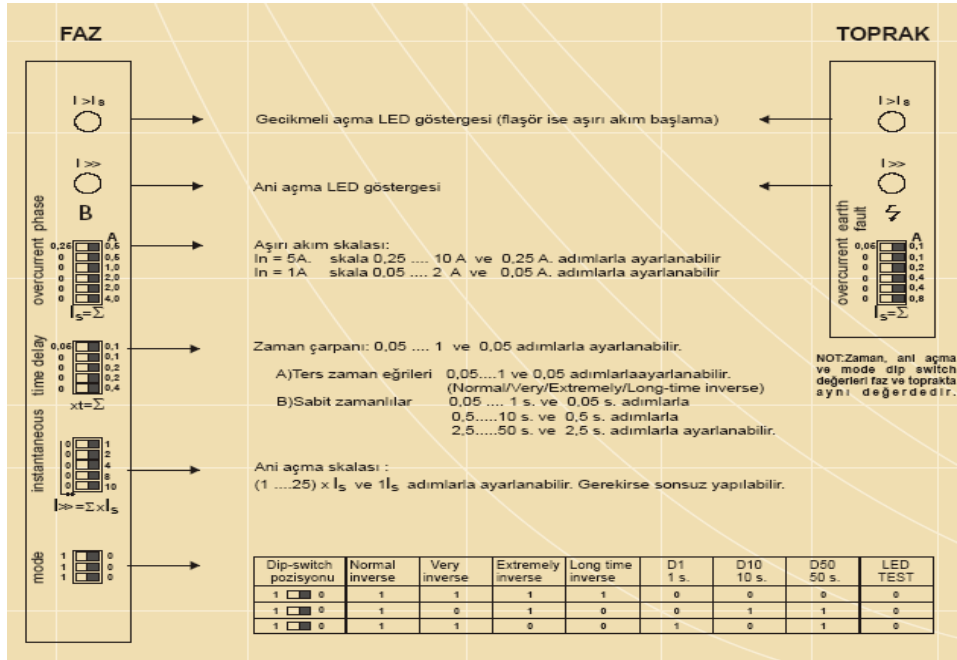
Zaman çarpanı (xt) dip switchleri kullanılarak rölenin zaman gecikmesi ayarlanır. Eğer rölenin çalışma eğrisi ters zamanlı olarak seçilmişse xt switchleri ile eğri yüzdesi, sabit zamanlı olarak seçilmişse, saniye olarak zaman gecikmesi değeri belirlenir. Örnek olarak skala 0,1+0,1=0,2 olarak ayarlanmış olsun. Rölenin çalışma karakteristiğini gösteren “mode” switch ters zamanlı olarak ayarlanmış ise xt değeri rölenin 0,2 eğrisinde çalışılacağını, sabit zamanlı olarak D1 konumuna (1s) ayarlanmış ise o zaman 0,2s de açma olacağı anlaşılmalıdır.

Ani açma ($I >>$) switchleriyle kısa devre koruması ayarları yapılır. Ani açma ayarı aşırı akımın (I_s) katları olarak ayarlanır. Bu ayar I_s nin 1...25 katına kadar ve $1 \times I_s$ ’ lik adımlarla yapılabilir.

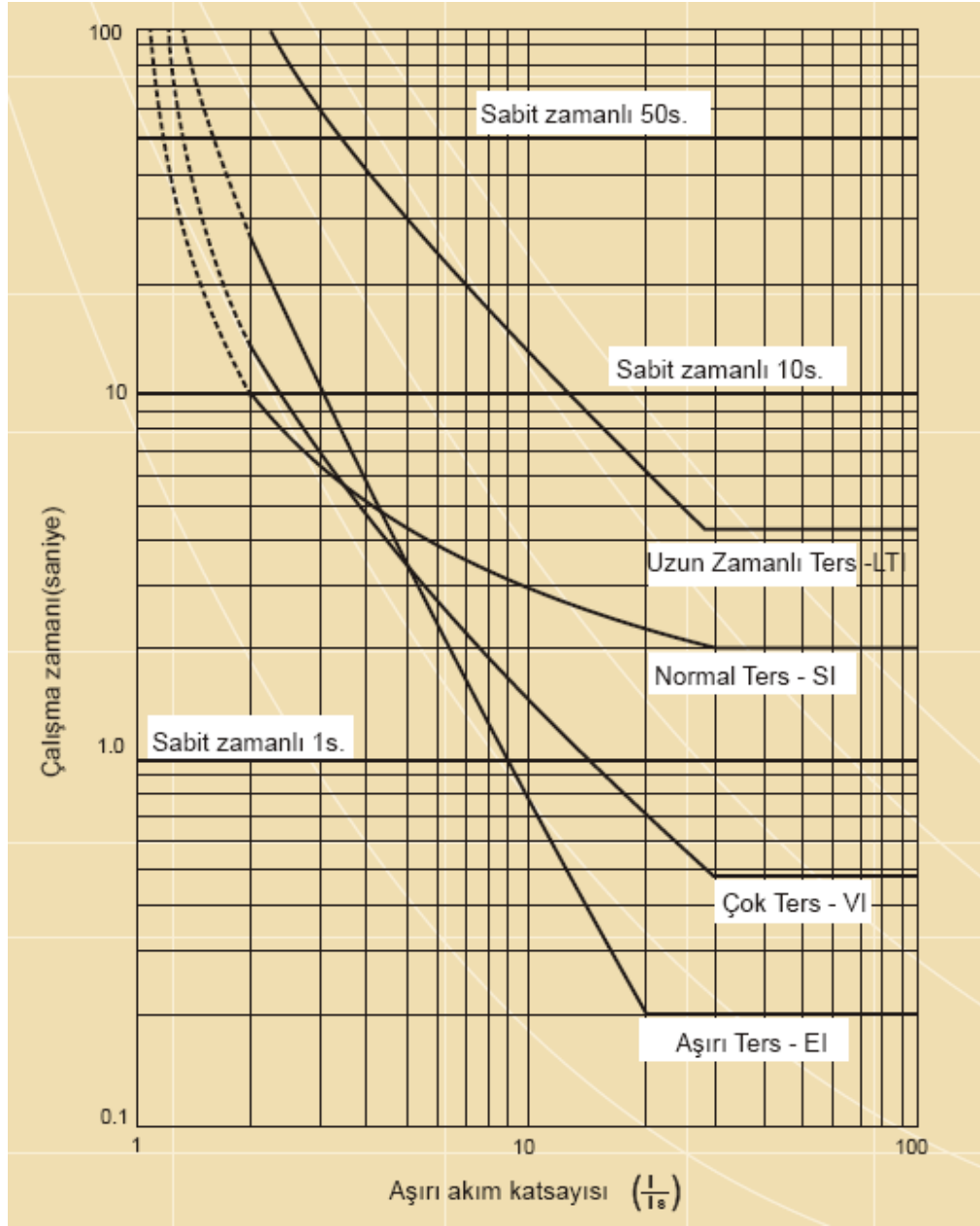
Bu ayarda da toplama kuralı kullanılmaktadır. Örneğin; dip switchlerden 2 ve 4 kademeleri sağda (1) diğerleri solda (0) ise ani açma değeri $2+4=6 \times I_s$ olarak ayarlanmış olur. Tüm kademeler solda, yani sıfır ise ani açma sonsuz yani devre dışı edilmiş olur. Aşağıda Şekil 7.2 de rölenin ani açma karakteristikleri, Şekil 7.3 de bu kısımda anlatılan röle ayarları, Şekil 7.4 de ise röleye ait ters zaman çalışma karakteristikleri gösterilmiştir.



Şekil 7.2 Röle-A'nın ani açma karakteristikleri (Röle-A Kataloğu)



Şekil 7.3 Röle-A'nın ayarlarının gösterilmesi (Röle-A Kataloğu)



Şekil 7.4 Röle-A'nın ters akım zaman karakteristikleri (Röle-A Kataloğu)

7.2.1.1.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'nın Teknik Özellikleri

1. Nominal değerler

- AC akım (I_n) : 1A veya 5A
- Frekans : 50/60 Hz.
- DC Yardımcı gerilimi : 24/54 - 48/125 veya 110/250 V

2. Ayar aralıkları

- Aşırı akım skalası (I_s) : Fazlarda (0,25...10)A ve 0,25A adımlarla ve toprakta ise (0,05...2)A ve 0,05A adımlarla ayarlanabilir.
- Ani açma skalası ($I_{>>}$) : (1-25)x I_s ve 1 I_s 'lik adımlarla ayarlanabilir, istenirse sonsuz olabilir.

3. Zaman karakteristikleri

Seçilebilir özellikte dört çeşit ters zamanlı ve üç çeşit sabit zamanlı çalışma karakteristiği mevcuttur:

- Standard inverse (Normal ters)
- Very inverse (çok ters)
- Extremely inverse (aşırı ters)
- Long time inverse (uzun zamanlı ters)
- Definite time 1 s / 10 s / 50 s. (Sabit zamanlı 1s /10s / 50s)

Zaman çarpanı skalası 0.05...1.0 arasında 0.05 adımlarla ayarlanabilir. (Bu durum bütün karakteristikler için geçerlidir).

Ani açma elemanı : (1 ... 25) x I_s ve 1 I_s adımlarla ayarlanabilir. 5 x I_s ve üzeri ayarlarda ayar değerinin 2 katındaki açma süresi <35 ms.

4. Genel hatalar

- Aşırı akım elemanı (I_s) : +/- 5 %
- Ani açma elemanı ($I_{>>}$) : +/- 7.5 %

- Çalışma karakteristikleri hataları:
 - Standard inverse: +/- 5 % veya (20-40 ms)
 - Very inverse: +/- 5 % veya (20-40 ms)
 - Long time inverse: +/- 5 % veya (20-40 ms)
 - Extremely inverse: +/- 7.5 % veya (20-40 ms)
 - Definite time: +/- 3 % veya (20-40 ms)

7.2.1.1.2 Bir trafo merkezindeki röle ayarlarının yapılması

Bu kısımda Röle-A'nın ayarlarına ilişkin bir örnek çalışma gösterilmiştir. Röle ayarları her işletmenin yapısına göre farklılıklar gösterebilir. Röle işletmecisi gerekli incelemeleri yaparak röleyi ayarlar. Aşağıda 3faz + 1toprak korumalı bir dağıtım trafosundaki ayarlar anlatılmaktadır.

Trafonun nominal gücü : 1600 kVA

İşletme gerilimi : 34,5 kV

Akım trafosu : 40/5

Ip : Primer akım.

Is : Sekonder akım..

$$I_p = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 34,5 \cdot 10^3} = 26,8 \text{ A} \quad (5.1)$$

$$I_s = (5/40) \times 26,8 = 3,35 \text{ A. (Nominal sekonder akım)}$$

Bu örnekte yapılan hesaplara göre röle üzerinde yapılacak ayarların sözlü anlatımı ve röle ön paneli üzerindeki şekli aşağıda detaylı olarak gösterilmiştir.

	FAZ	TOPRAK
overcurrent	A 0,25 0,6 0 0,6 0 1,0 0 2,0 0 2,0 0 4,0 $I_s = \Sigma$	A 0,06 0,1 0 0,1 0 0,2 0 0,4 0 0,4 0 0,8 $I_s = \Sigma$
time delay	0,06 0,1 0 0,1 0 0,2 0 0,2 0 0,4 $x_t = \Sigma$	0,06 0,1 0 0,1 0 0,2 0 0,2 0 0,4 $x_t = \Sigma$
instantaneous	1 0 2 0 4 0 8 0 10 $I_{\infty} = \Sigma x I_s$	1 0 2 0 4 0 8 0 10 $I_{\infty} = \Sigma x I_s$
mode	1 0 1 0 1 0	1 0 1 0 1 0

Aşırı Akım(I_s) ayarları: Nominal sekonder akım 3,35A' e en yakın üst değer 3,50A dir. Bu nedenle fazların I_s değeri 3,5A'e ayarlanır. (1/3/4 kademeleri sağa diğerleri sol tarafa alınır. $0,5+1+2=3,5A$.) Toprakta ayar değeri geçici rejimlerin geçildiği akım değeridir. Bu değer toprağın geçirgenliğine de bağlı olmakla birlikte $0,1+0,1+0,2=0,4A$ ayarlanabilir.

Zaman çarpanı (x_t) ayarı: Fazlarda işletmedeki büyük yüklerin olması durumunda zaman uzatılabilir. Normal durumda $0,1+0,1=0,2$ seçilir. Toprakta yol alma geçici rejim süresinin asılması gerekir. Bu süre 0,5s civarındadır. $0,1+0,4=0,5s$ ayarlanır.

Ani açma (I_{∞}) ayarı: Fazlarda ani açma değeri fiderden beslenen trafoların güçlerine göre değişmesine karşılık, $(6...7) \times I_s$ arasında ayarlanabilir. Burada $1+2+4=7$ kat ayarı yapılabilir. Toprakta ani açma değeri yaklaşık olarak 2 kat olarak ayarlanabilir.

Mode ayarı: Fazlarda ters zamanlı, toprakta ise sabit zamanlı fonksiyonlar seçilmelidir. Buradaki uygulamada fazlar 1/1/1 yani normal ters (SI) seçilirken, toprak için 0/0/1 modu yani sabit zamanlı 1s. seçilmiştir. Fazlardaki SI fonksiyonunun alt eğrisi 0,2 ile topraktaki 1s. çalışmasının alt değeri olan 0,5s. Zaman çarpanı skalasında önceden ayarlanmıştı.

7.2.1.2 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'nin İncelenmesi

Bu röle havai hatlarda, kablo dağıtım şebekelerinde, transformatörlerde, jeneratörlerde ve büyük güçteki motorlarda aşırı akım, aşırı yük ve kısa devrelere karşı koruma yaparken, dağıtım hatlarında değişik metotlarla selektivite yapabilmektedir. Aşağıda şekil 7.5 de bu rölenin önden görünüşü gösterilmiştir.



Şekil 7.5 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B (Röle-B Kataloğu)

Dijital Aşırı Akım Rölesi-B, aşırı akım ters zamanlı ve aşırı akım ani açma işlevlerinde içerisinde bulunan dijital filtre sayesinde uygulanan akımı bileşenlerine ayırıp, “akımın temel bileşenine göre” çalışmaktadır. Buna ek olarak trafoların, havai hatların ve kablo hatlarının $(1-1.5) \times I_n$ arasındaki aşırı yüklerini akımın rms değeriyle çalışan termik koruma işleviyle korur. Deneysel çalışmalarda bu özellikler dikkate alınarak ölçümler yapılmıştır.

Bu rölenin gerçekleştirdiği işlevler sırasıyla,

- Faz aşırı akım-ani açma
- Faz aşırı akım-zamanlı açma
- Toprak aşırı akım-ani açma
- Toprak aşırı akım-zamanlı açma
- Sınırlandırılmış toprak hatası
- Termik aşırı yük

- Düşük akım
- Negatif bileşen
- Çıkış rölesi kilitleme fonksiyonudur.

Rölenin akım ayar eşikleri:

Bu rölede fazlarda ve toprakta zamansız üç akım eşiği mevcuttur. Bu eşiklerin ayarları nominal akımın katları şeklinde tanımlanır.

Fazlarda,

- 1.akım eşik değeri:

$$I_{>} = (0.1-25) \times I_n, \text{ adım: } 0.001 \times I_n$$
- 2.akım eşik değeri:

$$I_{>>} = (0.5-40) \times I_n, \text{ adım: } 0.01 \times I_n$$
- 3.akım eşik değeri:

$$I_{>>>} = (0.5-40) \times I_n, \text{ adım: } 0.01 \times I_n$$

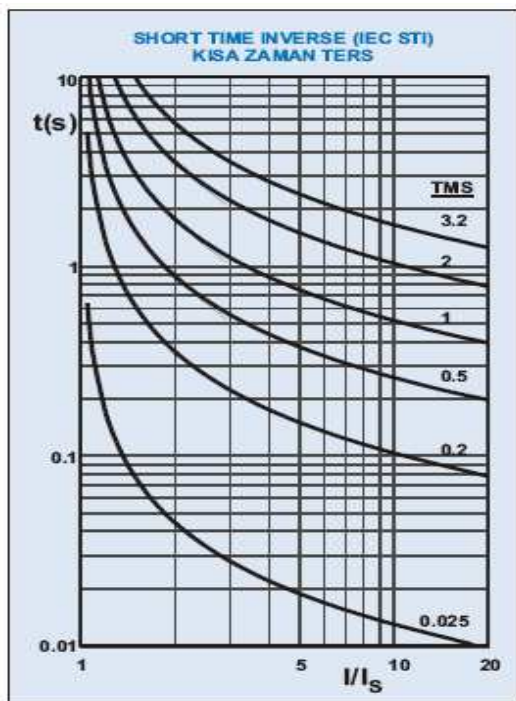
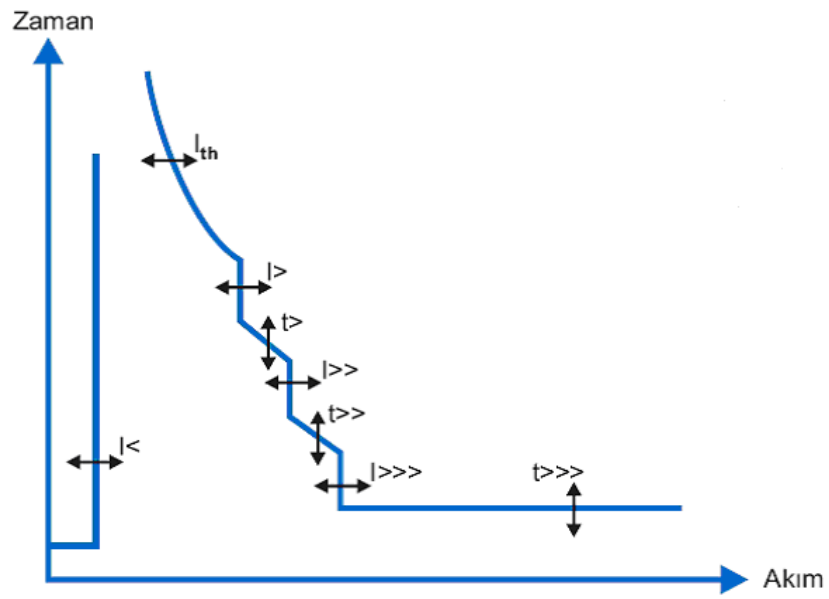
Toprak aşırı akım ayarı için üç ayrı tip seçenek mevcuttur. Bunlardan $(0.1-40) \times I_n$ ve $(0.02-8) \times I_n$ tipleri aynı cihaz üzerinden köprüler (jumper) ve menü ayarları ile seçilebilir. Üçüncü tip ise sınırlandırılmış özel tip toprak rölesi olup $(0.004-1.6) \times I_n$ ayarındadır.

Rölede zamansız akım eşikleri dışında bir de zamana bağlı olarak standart gecikmeli açma eğrileri de bulunmaktadır. Bu eğriler sırasıyla,

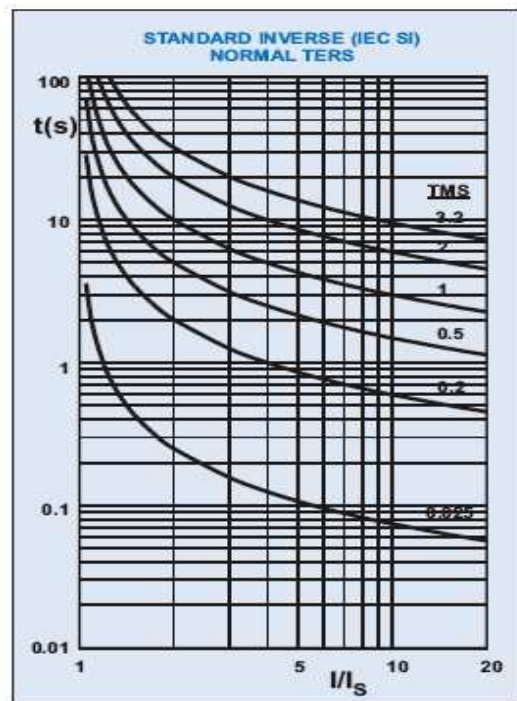
- IEC STI (Short Time Inverse)
- IEC SI (Standart Inverse)
- IEC VI (Very Inverse)
- IEC EI (Extremely Inverse)
- IEC LTI (Long Time Inverse).

Zamana bağlı açmalarda açma şekli sabit zaman olarak seçilmiş ise, zaman aralığı $= (0.04-100)s$, olup 0,01s'lik adımlarla ayar yapılabilirken, ters zamanlı açma seçilmiş ise zaman öteleme çarpanı $TMS = (0.025-3,2)$ aralığında 0,001 adımlarla ayarlanabilmektedir.

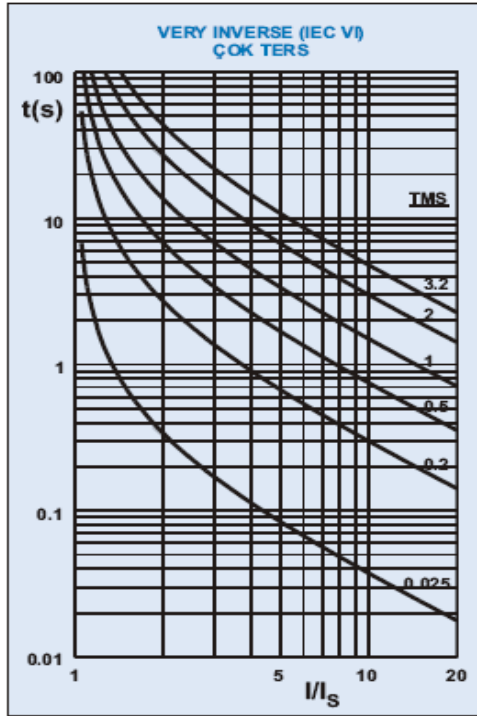
Aşağıda Şekil 7.6 da bu ayarlara ait eğriler gösterilmiştir.



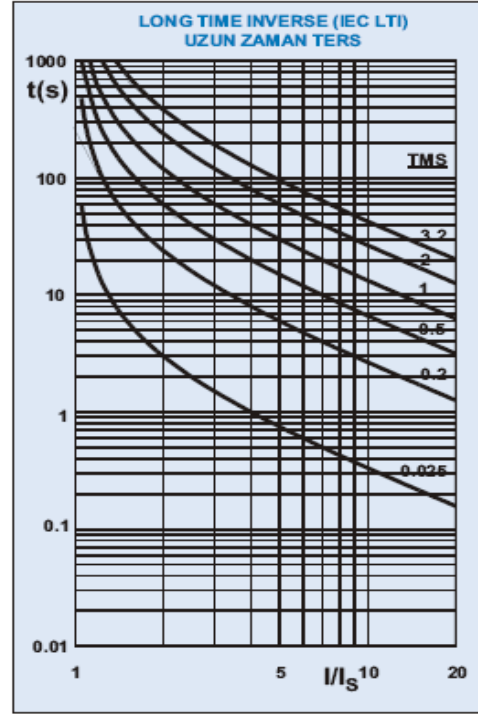
$$t = \left(\frac{0.05}{(I/I_s)^{0.04} - 1} \right) \cdot TMS$$



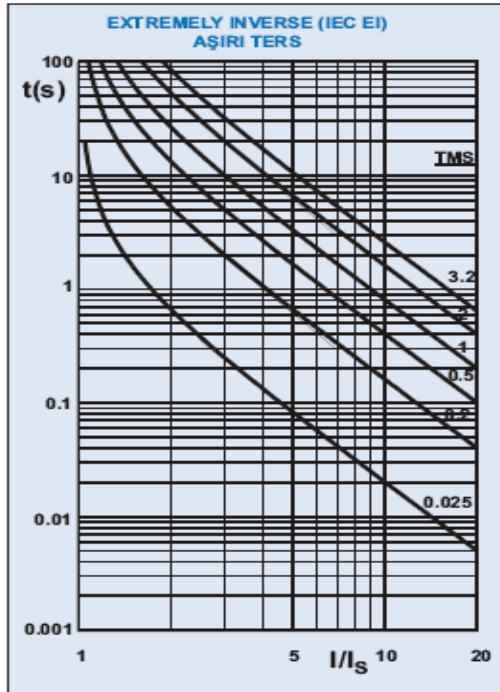
$$t = \left(\frac{0.14}{(I/I_s)^{0.02} - 1} \right) \cdot TMS$$



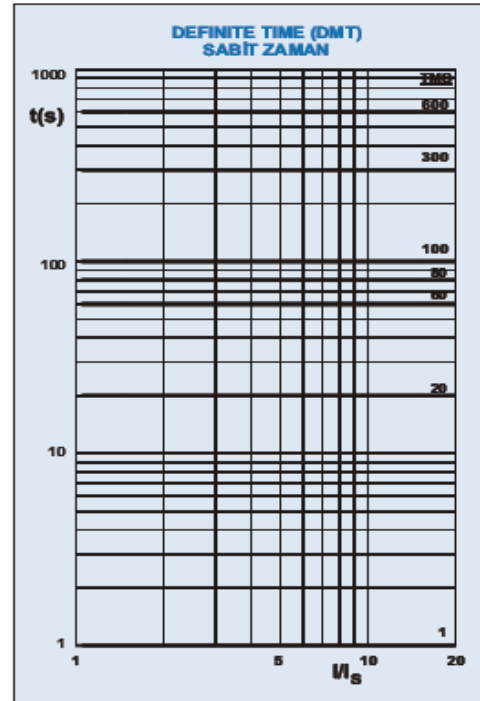
$$t = \left(\frac{13,5}{(I/I_s) - 1} \right) \cdot TMS$$



$$t = \left(\frac{120}{(I/I_s) - 1} \right) \cdot TMS$$



$$t = \left(\frac{80}{(I/I_s)^2 - 1} \right) \cdot TMS$$



$$t = TMS, I/I_s > 1$$

Şekil 7.6 Röle-B'nin çalışma karakteristiklerinin gösteren eğriler (Röle-B Kataloğu)

Rölenin diğer işlevlerini ise kısaca özetlersek,

- Sınırlandırılmış toprak hatası özelliğiyle ile yıldız noktası yüksek direnç üzerinden topraklanmış trafo ve jeneratör sistemlerinde oluşacak küçük toprak kaçak akımlarını tespit etmek mümkündür .
- Düşük akım koruma özelliğiyle normal yükte çalışan bir pompa motorunun su çekmemesi durumunda çalışma akımında azalma olması, üç fazlı sistemlerde faz iletkenlerinden bir tanesinin kopması yada kesici kutuplarının açık devre veya kısa devre kalması gibi durumlarda koruma yapılabilir.
- Negatif bileşen özelliğiyle toprak kaçağına bağlı olmayan faz dengesizlikleri veya alçak gerilimde oluşacak faz dengesizlikleri yüksek gerilim tarafından (primer tarafından) tespit edilebilir.

7.2.1.2.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'nin Teknik Özellikleri

1 - Giriş ve Çıkış Devreleri			
1.1 - Ölçme Üniteleri :			
Anma akımı In :	1A/5A jumper ile seçilebilir.		
Anma frekansı fn :	50/60 Hz. menüden seçilebilir		
Akım girişi yükleri :			
Fazlarda :	1A için		0,01 VA
	5A için		0,2 VA
Toprakta :	1A için		0,01 VA
	5A için		0,2 VA
Akım devresi termik dayanımı :	100 In		1s. süreyle
	2 In		Sürekli
Akım devresi dinamik dayanımı :	250 In		Yarım periyot süreyle (10ms)
Akım trafosu seçimi :	In=1A için		1 VA 5P20 veya 10P20
	In=5A için		5 VA 5P20 veya 10P20
1.2 - Yardımcı Besleme Gerilimi (Uaux)			
Çalışma nominal değerleri :	(24-250)V dc	(100-250)V ac	
Çalışma aralığı :	(21-275)V dc	(80-275)V ac	
Güç tüketimi en az :	DC beslemede		4,5 W
	AC beslemede		9,0 VA
Güç tüketimi en fazla :	DC beslemede		8,0 W
	AC beslemede		15,0 VA

2.2 Toprak Aşırı Akım Koruması (50N/51N)			
Ölçme tekniği	Ana harmonik akımı		
Akım ölçme aralığı	T1 tipi toprak korumasında:	(0,1-40) len ,	adım: 0,01 len
	T2 tipi toprak korumasında:	(0,02-8) len ,	adım: 0,001 len
	TS sensitiv tip toprak korumasında:	(0,004-1,6) len ,	adım: 0,001 len
NOT: T1 ve T2 tipi toprak rölesi standart CPM310 üzerinde mevcut olup trafo ayarlarından seçilebilir. Fakat TS tipi toprak rölesi içeren CPM310 sipariş üzerine özel tip olarak imal edilmektedir. Yani CPM310 üzerinde ya T1,T2 veya TS tipi toprak rölesi mevcuttur.			
Akım ayar eşikleri	Her tip toprak koruma rölesi için len toprak nominal akımın katları şeklinde birbirlerinden bağımsız ayarlanabilen 3 eşik mevcuttur.		
	T1 tipi toprak koruması için:	(0,1-40)len	
	1.eşik ve ayar aralığı	len> = (0,1-25)len,	adım: 0,01 len
	2.eşik ve ayar aralığı	len>> = (0,5-40)len,	adım: 0,01 len
	3.eşik ve ayar aralığı	len>>> = (0,5-40)len,	adım: 0,01 len
	T2 tipi toprak koruması için:	(0,02-8)len	
	1.eşik ve ayar aralığı	len> =(0,02-5)len,	adım: 0,001 len
	2.eşik ve ayar aralığı	len>> =(0,1-8)len,	adım: 0,001 len
	3.eşik ve ayar aralığı	len>>> =(0,1-8)len,	adım: 0,001 len
	TS tipi toprak koruması için:	(0,004-1,6)len	
	1.eşik ve ayar aralığı	len> =(0,004-1)len,	adım: 0,001 len
	2.eşik ve ayar aralığı	len>> =(0,02-1,6)len,	adım: 0,001 len
	3.eşik ve ayar aralığı	len>>> =(0,02-1,6)len,	adım: 0,001 len
Arıza başlatma akım değeri	Üç eşikte ayar değerinin yaklaşık 1,05 katından itibaren başlar.		
Akım reset oranı	(histeresis)	yaklaşık %95	
En hızlı açma süresi	(instantaneous time)	yaklaşık 35ms	
Eşiği aşan akımın min. reset zamanı	(drop out time)	yaklaşık 40ms	
Toprak eşikleri açma zaman gecikmeleri	tle>, tle>>, tle>>> eşikleri için geçerlidir.		
	Açma zamanları, Sabit zaman (DMT) ve ters zaman (IDMT) eğrilerine göre dir.		
	Faz açma zamanları ve eğri tipleri burada da geçerlidir.		
Toprak eşikleri reset zaman gecikmeleri	tle>, tle>>, tle>>> eşikleri için geçerlidir.		
	Reset zaman değerleri ve eğri tipleri faz reset zamanları ile aynıdır.		
2.3 Termik Aşırı Yük Koruması (49)		IEC 60255-8 standardına uygun ısı hafızalı termik röle	
Ölçme tekniği	RMS akımı		
Akım eşik aralığı	$I_{\theta} \geq (0,1-3,2)I_n$	adım: 0,01 I_n	
Zaman sabiti aralığı	$T_e = (1-200)$ dakika	adım: 1 dk.	
Açma başlangıcı öteleme katsayısı	$k = (1-1,5)$	adım: 0,01	
Açma(trip) ısı yüzdesi	$Trip_{\theta} = \%(50-200)$	adım: %1	
Alarm ısı yüzdesi	$Alarm_{\theta} = \%(50-200)$	adım: %1	
2.11 Hata Oranları			
Korumadaki akım eşik hatası	$\pm \%2$		
Sabit ve ters zaman gecikme hatası	$\pm \%5$ veya 40 ms.(iki kategoriden bir tanesi sağlamalıdır)		
Termik gecikme hatası	$\pm \%5$ veya 200 ms. (iki kategoriden bir tanesi sağlamalıdır)		
Ölçme hatası	$\pm \%1$ (nominal akımda)		

7.2.1.3 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'nin İncelenmesi

Dijital Aşırı Akım Rölesi-C, diferansiyel koruma ve transformatör koruma sistemlerinde destek amaçlı aşırı akım koruma rölesi olarak kullanılır. Ayrıca güç sistemlerinde selektif kısa devre koruması amacıyla da kullanılır. Aşağıda Şekil 7.7 de rölenin önden görünüşü gösterilmiştir.

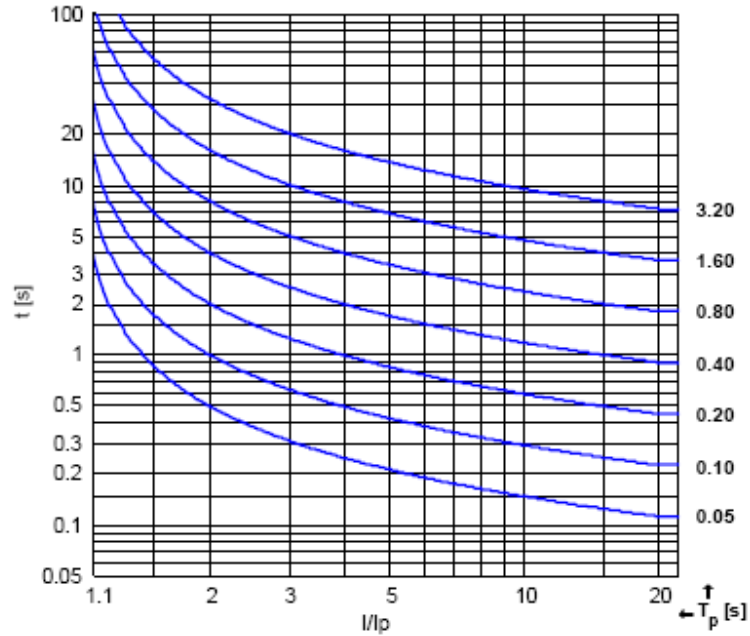


Şekil 7.7 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C (Röle-C Kataloğu)

Dijital Aşırı Akım Rölesi-C, Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'de olduğu gibi uygulanan akımın temel bileşenine göre çalışmaktadır. Bununla birlikte aşırı yükler nedeniyle oluşabilecek ısınmalara karşı termik koruma işlevi de bulunmaktadır.

Dijital Aşırı Akım Rölesi-C, diğer dijital rölelerde olduğu gibi aşırı akımlara karşı iki tip koruma gerçekleştirmektedir. İlk koruma tipi ters akım-zamanlı koruma olup, bu koruma seçeneğinde röle nominal çalışma akımının 4 katına kadar olan akımlarda koruma yapmaktadır. Ayrıca bu çalışma karakteristiğinde zaman öteleme çarpanı 3.2 değerine kadar seçilebilmektedir. Bu rölede ters akım-zaman karakteristiklerinden standart ters, çok ters ve aşırı çok ters akım- zaman karakteristikleri mevcuttur. İkinci koruma tipi ise sabit zamanlı koruma olup, röle nominal çalışma akımının 20 katına kadar olan akımlarda koruma yapmaktadır ve açma zamanı olarak da 6300ms ye kadar açma zamanı seçilebilmektedir.

Bu deneysel çalışmada Dijital Aşırı Akım Rölesi-C için diğer dijital rölelerde olduğu gibi ters akım-zaman karakteristiklerinden normal ters, zaman öteleme çarpanı ise 0.4 olarak seçilmiştir. Aşağıda Şekil 7.8 de seçilen çalışma eğrisi tipi gösterilmiştir.



Şekil 7.8 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'nin standart ters eğriye göre akım-zaman karakteristiği (Röle-C Kataloğu)

7.2.1.3.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'nin Teknik Özellikleri

1. Nominal değerler

- AC akım (I_n) : 1A veya 5A
- Frekans : 50/60 Hz.
- DC Yardımcı gerilimi : 24 - 250 V
- AC Yardımcı gerilimi : 60 - 230 V

2. Ayar aralıkları

- **Definite time karakteristiği**
 - Düşük aşırı akım skalası ($I>$): $0.5 I_n - 6.2 I_n$, $0.1 I_n$ ' lik adımlarla ayarlanabilir.
 - Yüksek aşırı akım skalası ($I>>$) : $2 I_n - 20 I_n$, $0.5 I_n$ ' lik adımlarla ayarlanabilir.

- Zaman gecikmesi ($I>$): 0 - 6300 ms, 100 ms' lik adımlarla ayarlanabilir.
- Zaman gecikmesi ($I>>$): 0 - 1575 ms, 25 ms' lik adımlarla ayarlanabilir.
- **Ters zaman karakteristiği**
 - Pick up akımı skalası (I_p): 0.5 In – 4 In, 0.1 In' lik adımlarla ayarlanabilir.
 - Yüksek aşırı akım skalası ($I>>$): 2 In – 20 In, 0.5 In' lik adımlarla ayarlanabilir.
 - Zaman gecikmesi ($I>$): 0.05 – 3.15 s, 0.05 s' lik adımlarla ayarlanabilir.

3. Zaman karakteristikleri

- Standard inverse (Normal ters)
- Very inverse (Çok ters)
- Extremely inverse (Aşırı ters)
- Definite time

7.2.2 Deneysel Çalışma ve Sonuçları

Bu deneysel çalışmada sinüsoidal yük akımı için, yukarıda özellikleri detaylıca anlatılan ters akım zaman karakteristiğine sahip üç ayrı dijital aşırı akım rölesi kullanılmıştır. Her bir röle için standart çalışma eğrisi (SI) seçilmiş olup, zaman öteleme çarpanı 0,4 olarak belirlenmiştir. Rölelere sırasıyla nonlinear yük akımları uygulanarak, rölelerin bu akımlara karşılık gelen cevap süreleri ölçülmüştür. Deney sonuçlarının doğruluğu deneyde kullanılan cihazlarının hassasiyetine bağlıdır.

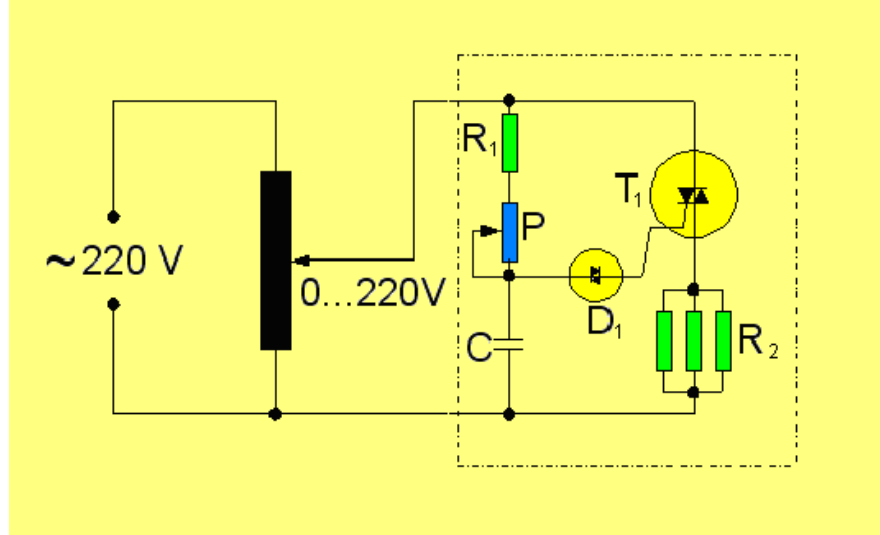
Bu çalışmada yapılırken dijital rölelerin kataloglarında belirtilen çalışma hata oranları ve harmonik standartı (IEC 519-1992) dikkate alınmıştır. Buna göre kataloglarda deneyde seçilen çalışma karakteristiği (standart inverse) için izin verilen hata aralığı % olarak (+/-) %5 veya saniye olarak ise maksimum 40ms'dir. Belirtilen bu değerler röle çalışma akımının 2 ile 20 katı arasında geçerlidir. Bu değerler dikkate alınarak olabilecek ekstra durumları da incelemek amacıyla deneysel çalışmada belirtilen değerlerin dışındaki akım ve %THDi değerleri de kullanılmıştır.

7.2.2.1 Deneyde Kullanılan Cihazlar

- Dijital Aşırı Akım Rölesi-A
- Dijital Aşırı Akım Rölesi-B
- Dijital Aşırı Akım Rölesi-C
- Harmonik Üreten Triyak Kontrollü Rezistif Yüklü Devre
- Akümülatör (24 V)
- Kontaktör
- Mikroişlemcili Sayıcı
- Harmonik Analizörü (Fluke 43B ve Fluke 434)
- Gerçek efektif (True rms) değer ölçen ampermetre
- Oto transformatör (0-220 V çıkışlı)

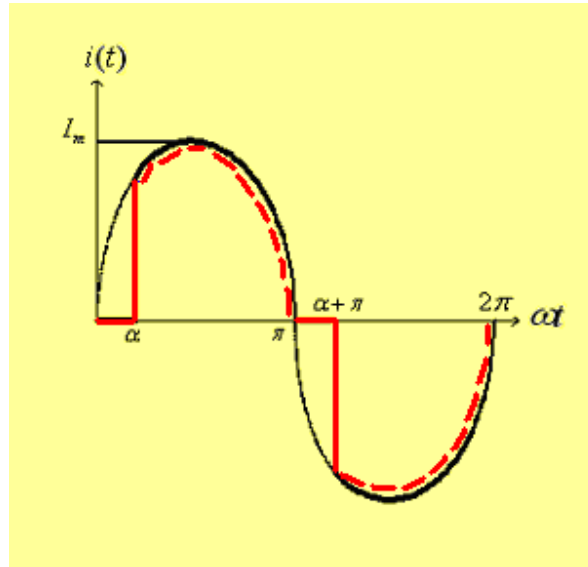
7.2.2.2 Harmonik Üreten Triyak Kontrollü Rezistif Yüklü Devre

Deneylerde şebekeden harmonik bileşenleri içeren distorsiyonlu akım çeken nonlinear yük olarak Şekil 7.9’de gösterilen rezistif yüklü triyak kontrollü a.c. kısıyıcı devresi kullanılmıştır.



Şekil 7.9 Harmonik Üreten Triyak Kontrollü Rezistif Yüklü Devre

Nonlinear yük akımının zamana göre değişimi aşağıda Şekil 7.10’de gösterilmiştir.



Şekil 7.10 Deneylerde kullanılan nonlinear yükün akım zaman grafiği

Nonlinear yük devresinde triyak tetikleme açısı ' α ' değiştirilerek triyakın iletimde kalma süresi, dolayısıyla yük akımının efektif değeri değiştirilebilir. α açısı $[0, \pi]$ aralığında ayarlanabilir. α değeri π değerine yaklaştıkça yük akımının efektif değeri azalır, yük akımındaki harmonik etkinliğinin bir ölçütü olan akımın toplam harmonik distorsiyonu (THDi) değeri ise artar.

Nonlinear yük devresinde triyak tetikleme açısı α sabit tutulup oto transformatör çıkış gerilimi değiştirilirse, akımın THDi değeri çok az değişir. Böylece deneyle ilgili hesaplamalar kısmında matematiksel olarak gösterildiği gibi, nonlinear yük akımının karakterini, harmonik spektrumunu fazlaca değiştirmeden sadece nonsinüsoidal akımın efektif değerini değiştirmek yani α açısını sabit tutup devreye uygulanan gerilimi değiştirmekle mümkün olabilir.

Harmoniklerin dijital aşırı akım rölelerine etkisini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalarda, daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırma yapmak amacıyla triyak tetikleme açısı α , 0° , 60° , 90° ve 120° 'ye ayarlanarak ölçümler yapılmıştır.

Deneyde harmonik kaynağı olarak kullanılan triyak kontrollü rezistif yüklü devrenin 1200 tetikleme açısı için röle girişine sürekli olarak uygulayabileceği en yüksek akım değeri 2.5 A (rms)'dir.

7.2.2.3 Deneyle İlgili Hesaplamalar

Deneylerde ölçüm yapılacak α değerine karşılık gelen yük uçlarındaki gerilim değerleri aşağıdaki gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

Nonlinear yüke uygulanan şebeke geriliminin ani değer ifadesi

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t \quad (7.2)$$

olduğuna göre, nonlinear yük devresinde triyak çıkışındaki yük direnci uçlarındaki gerilimin efektif değeri,

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m^2 \cdot \sin^2 \omega t d\omega t} \quad (7.3)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t \right]} \quad (7.4)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right)^2 d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} V_m^2 \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right)^2 d\omega t \right)} \quad (7.5)$$

bu integralin sonucunda,

$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi}} \quad (7.6)$$

olarak elde edilir.

Bu çalışmada yukarda gösterilen eşitliklere göre deneyde kullanılan (α) değerlerine karşılık gelen gerilim değerleri hesaplanarak elde edilen aşağıda çizelge 7.2 de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2 Deneyde kullanılan (α) değerlerine karşılık gelen gerilim değerleri

Triyak Tetikleme Açısı (α)	Gerilim (Vrms)
0°	202
60°	195
90°	146
120°	96

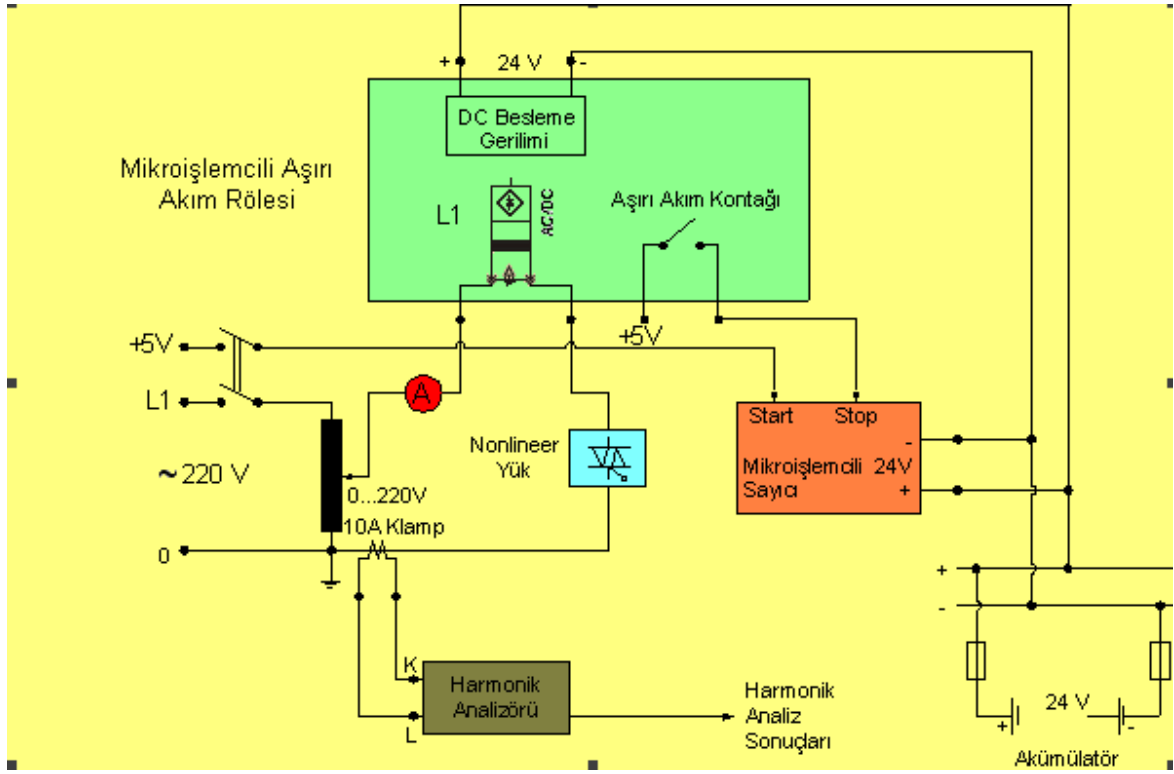
7.2.2.4 Deneyin Yapılması

Deneyde kullanılan deney şemaları sırasıyla, Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deney şeması Şekil 7.11'de ve Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deney şeması Şekil 7.12'de ve Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deney şeması Şekil 7.13'de gösterilmiştir.

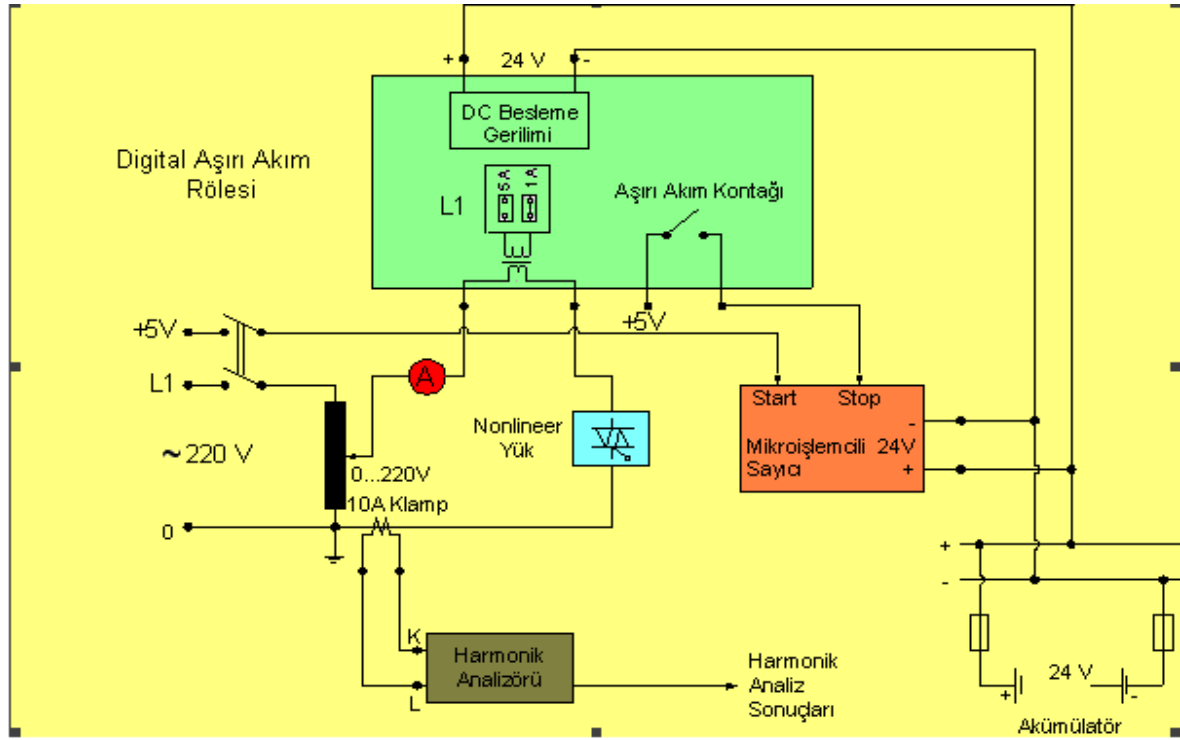
Deneyde her bir röle için de triyak tetikleme açısı (α) ve devreye uygulanan gerilim değiştirilerek nonlinear yük akımının genliği ve toplam harmonik distorsiyonu (THDi) değiştirilmiştir. Her (α) değerinde, bu triyak tetikleme açısı sabit tutularak oto transformatör yardımıyla devreye uygulanan gerilimin efektif değeri, dolayısıyla nonlinear yük akımının rms (efektif) değeri değiştirilmiştir.

Deneyde nonlinear yük akımlarının rms ve temel bileşen değerleriyle bu akımlara ait THDi değerleri, her THDi değerinin içindeki farklı harmoniklerin yüzdeleri ile cevap süreleri ölçülerek veri çizelgeleri oluşturulmuş, bu çizelgelerle ilişkili grafikler çizilmiş ve aşağıda sırasıyla bu çizelge ve grafikler gösterilmiştir.

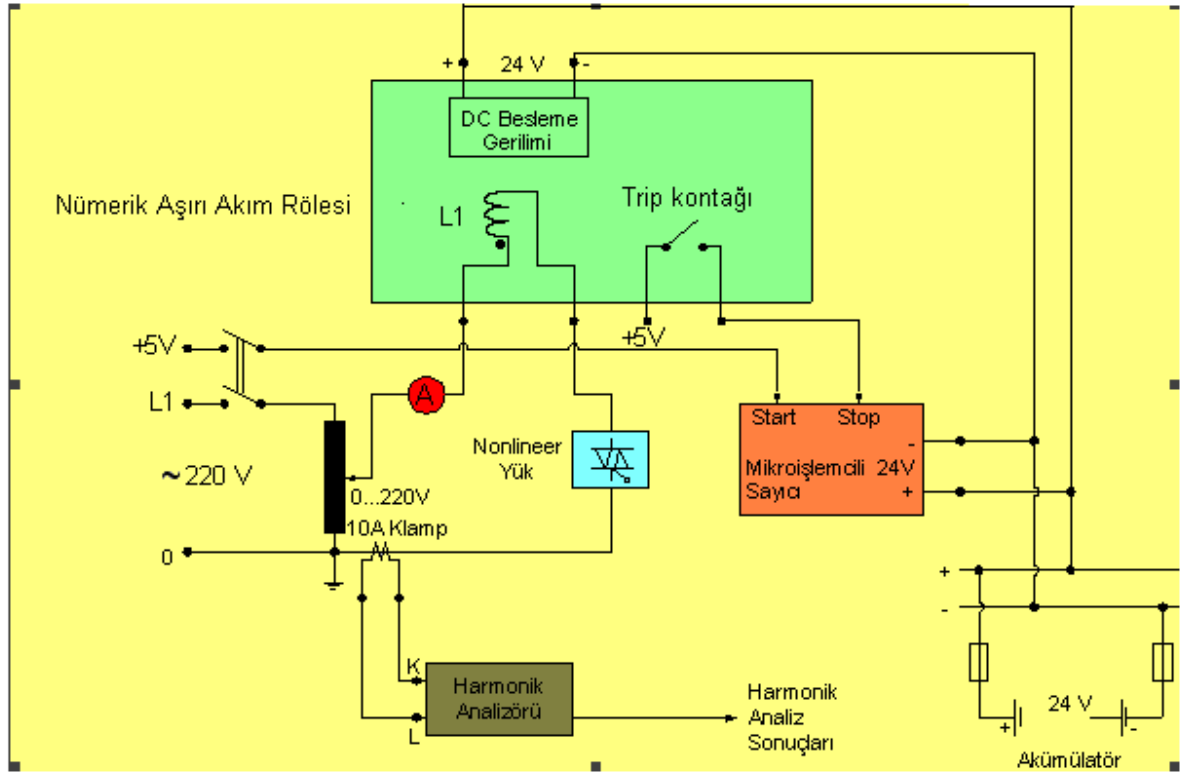
Tüm ölçümlerde rölelerin çalışma akımı saf sinüsoidal akım için 1 Amper rms değerine ayarlanmış ve deney süresince değiştirilmemiştir. Laboratuarda yapılan tüm ölçüm süresince şebeke gerilimi ideal sinüsoidal gerilim olmayıp şebeke gerilimine ait toplam harmonik distorsiyonu (THDv) değeri %2,8 ile %6,0 arasında değişmiştir.



Şekil 7.11 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deney şeması



Şekil 7.12 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deney şeması



Şekil 7.13 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deney şeması

7.2.2.4.1 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deney sonuçları

Deneylerde dijital aşırı akım rölesi-A ya ait elde edilen sonuçlar aşağıda çizelge ve grafikler halinde gösterilmiştir.

Çizelge 7.3 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=0° için yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	$t(s)$	$THD_i (\%)$	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2	1,18	10,900	2,90	0,0	1,9	1,5	0,0	0,0	0,0
1,3	1,29	8,592	2,60	0,3	1,7	1,4	0,0	0,3	0,0
1,4	1,39	7,024	2,90	0,3	2,1	1,6	0,0	0,0	0,0
1,5	1,50	5,948	3,90	0,0	2,4	2,1	0,4	0,4	0,0
1,6	1,59	5,284	3,50	0,3	2,5	1,9	0,3	0,4	0,3
1,7	1,68	4,761	3,50	0,0	2,9	1,7	0,0	0,0	0,0
1,8	1,79	4,378	3,60	0,0	2,7	1,9	0,4	0,0	0,2
1,9	1,89	4,021	3,50	0,0	2,5	2,1	0,2	0,2	0,0
2,0	1,99	3,754	3,40	0,2	2,8	1,7	0,0	0,2	0,0
2,1	2,10	3,510	3,70	0,2	3	1,8	0,2	0,2	0,0
2,2	2,19	3,342	3,70	0,0	2,8	2,1	0,0	0,3	0,0
2,3	2,27	3,187	3,90	0,5	3	1,9	0,4	0,2	0,2
2,4	2,38	3,038	3,80	0,3	3	2,1	0,2	0,2	0,0
2,5	2,49	2,917	2,90	0,2	3,2	2,1	0,2	0,2	0,0

Çizelge 7.4 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=0° için elde edilen sonuçlar

I_{rms}(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağlı hata	Mutlak hata (s)
1,2	10,900	15,329	28,90	4,429
1,3	8,592	10,644	19,28	2,052
1,4	7,024	8,294	15,31	1,270
1,5	5,948	6,878	13,52	0,930
1,6	5,284	5,929	10,89	0,645
1,7	4,761	5,249	9,29	0,488
1,8	4,378	4,736	7,55	0,358
1,9	4,021	4,334	7,23	0,313
2,0	3,754	4,012	6,42	0,258
2,1	3,510	3,746	6,30	0,236
2,2	3,342	3,523	5,15	0,181
2,3	3,187	3,334	4,40	0,147
2,4	3,038	3,170	4,18	0,132
2,5	2,917	3,028	3,66	0,111

Çizelge 7.5 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=60° yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	t(s)	THDi (%)	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2	∞								
1,3	1,16	35,535	42,40	36,4	12,5	8,3	9	5,2	5,9
1,4	1,24	17,235	41,90	35,4	12,8	8,9	9	6,3	5
1,5	1,36	10,957	39,50	33,4	12,4	8,6	8,8	5,4	4,8
1,6	1,46	8,693	38,40	32,3	12,2	9,0	7,9	6,2	4,8
1,7	1,56	7,211	37,00	30,7	12,3	8,9	7,7	6,1	4,1
1,8	1,66	6,049	36,00	29,4	12,1	9,5	7,2	6	4,5
1,9	1,75	5,413	34,60	28,4	11,8	9,4	6,6	5,9	4,0
2,0	1,86	4,899	34,20	27,7	12,1	9,5	6,3	6,3	4,4
2,1	1,97	4,445	33,30	26,5	12	9,9	5,9	6	4,5
2,2	2,06	4,156	32,30	25,4	11,8	10	5,7	5,7	4,4
2,3	2,18	3,861	31,80	24,9	12,2	9,6	5,6	5,4	4,5
2,4	2,26	3,637	31,10	24,3	12	9,7	5,3	5,1	4,4
2,5	2,36	3,432	29,90	23,2	11,8	9,9	5	5,1	4,4

Çizelge 7.6 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=60° için elde edilen sonuçlar

I_{rms}(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağlı hata	Mutlak hata (s)
1,2	∞	15,329	-	-
1,3	35,535	10,644	233,84	24,891
1,4	17,235	8,294	107,81	8,941
1,5	10,957	6,878	59,31	4,079
1,6	8,693	5,929	46,61	2,764
1,7	7,211	5,249	37,38	1,962
1,8	6,049	4,736	27,73	1,313
1,9	5,413	4,334	24,88	1,079
2,0	4,899	4,012	22,12	0,887
2,1	4,445	3,746	18,66	0,699
2,2	4,156	3,523	17,96	0,633
2,3	3,861	3,334	15,81	0,527
2,4	3,637	3,170	14,72	0,467
2,5	3,432	3,028	13,35	0,404

Çizelge 7.7 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=90° için yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	$t(s)$	$THD_i (\%)$	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2	∞								
1,3									
1,4									
1,5									
1,6									
1,7									
1,8									
1,9	1,27	32,124	73,90	54,1	35	19,9	15,8	14,8	10,9
2,0	1,33	19,839	73,50	54,4	34,7	19,2	16,0	14,6	10,4
2,1	1,41	13,859	72,90	54,3	33,5	18,9	16,3	14,4	10,1
2,2	1,48	11,279	72,70	54,1	33,2	19,3	16,6	14,4	9,8
2,3	1,56	9,394	72,10	54,0	32,7	18,9	16,6	14,9	9,3
2,4	1,67	7,705	71,70	54,0	31,8	19,0	16,8	14,4	9,1
2,5	1,75	6,842	71,00	53,8	31,4	18,6	16,8	14,3	8,6

Çizelge 7.8 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=90° için elde edilen sonuçlar

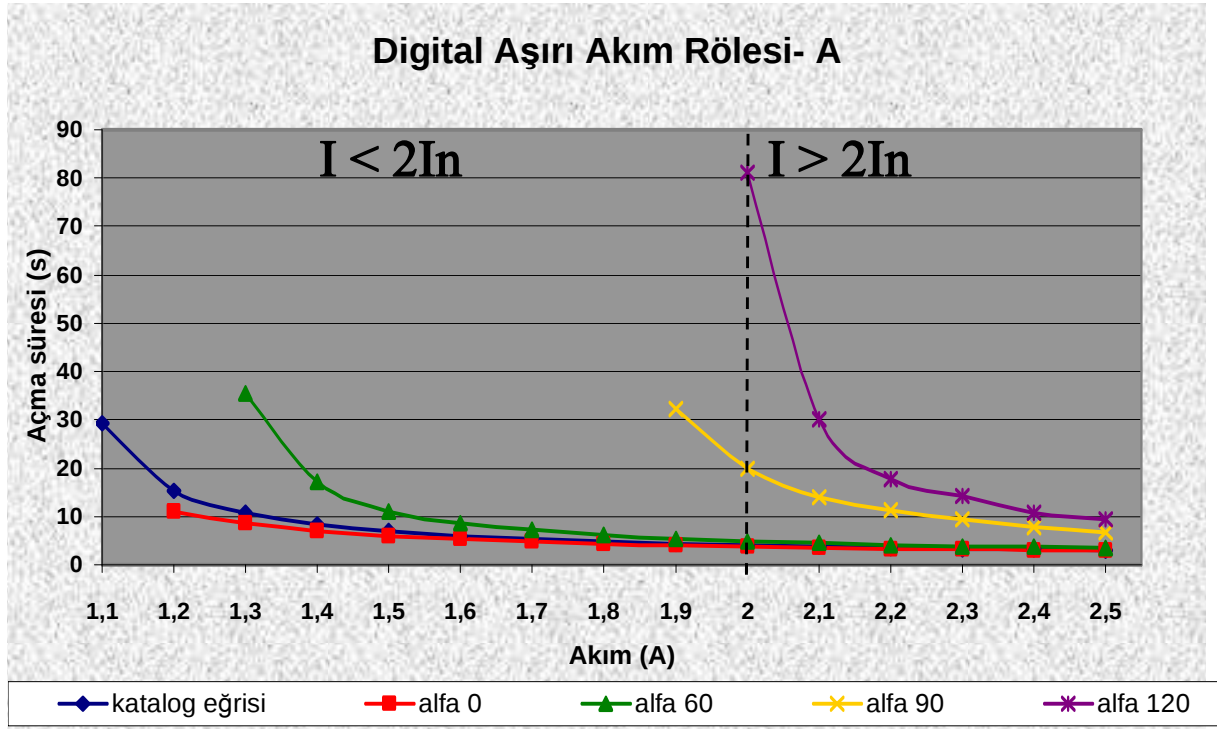
I_{rms}(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağlı hata	Mutlak hata (s)
1,2	∞	15,329	-	-
1,3	∞	10,644	-	-
1,4	∞	8,294	-	-
1,5	∞	6,878	-	-
1,6	∞	5,929	-	-
1,7	∞	5,249	-	-
1,8	∞	4,736	-	-
1,9	32,124	4,334	641,14	27,79
2,0	19,839	4,012	394,54	15,827
2,1	13,859	3,746	269,97	10,113
2,2	11,279	3,523	220,12	7,756
2,3	9,394	3,334	181,78	6,060
2,4	7,705	3,107	143,03	4,535
2,5	6,842	3,028	125,97	3,814

Çizelge 7.9 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=120° için yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	$t(s)$	$THD_i (\%)$	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2									
1,3									
1,4									
1,5									
1,6									
1,7									
1,8									
1,9									
2,0	1,21	81,042	79,00	52,8	39,1	25,3	16,4	14,7	14,4
2,1	1,29	30,096	78,50	53,4	38,8	24,1	15,7	14,4	14,1
2,2	1,37	17,721	77,80	53,9	38,1	22,9	15,0	14,6	13,8
2,3	1,44	14,327	77,20	53,6	37,9	22,5	14,9	14,6	13,7
2,4	1,51	10,781	77,00	53,8	37,4	21,9	15,2	15,2	13,5
2,5	1,58	9,363	76,80	53,6	37,0	21,8	16,0	15,9	13,2

Çizelge 7.10 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deneyde (α)=120° için elde edilen sonuçlar

I_{rms}(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağlı hata	Mutlak hata (s)
1,2	∞	15,329	-	-
1,3	∞	10,644	-	-
1,4	∞	8,294	-	-
1,5	∞	6,878	-	-
1,6	∞	5,929	-	-
1,7	∞	5,249	-	-
1,8	∞	4,736	-	-
1,9	∞	4,334	-	-
2,0	81,042	4,012	1920,19	77,030
2,1	30,096	3,746	650,22	36,884
2,2	17,721	3,523	373,07	13,975
2,3	14,327	3,334	306,63	10,804
2,4	10,781	3,170	223,39	7,447
2,5	9,363	3,028	195,33	6,193



Şekil 7.14 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait sonuçların karşılaştırılması

7.2.2.4.2 Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Deneyde sinüsoidal akım için çalışma akımı 1 A'ye ve standart ters (SI) eğriye ayarlanan Dijital Aşırı Akım Rölesi-A'ya ait çizelge ve şekil 7.14'de verilen deney sonuçları incelendiğinde,

- Harmoniklerin rölenin çalışma akımını etkilediği, triyak tetikleme açısı $\alpha=0^0$ için (şebeke gerilimindeki harmonikler sebebiyle) $THD_i=\%2,9$ iken rölenin çalışma akımının $I_{rms}=1,2$ A ($I_1=1,18A$) olduğu,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=60^0$ için $THD_i=\%42,4$ iken rölenin çalışma akımının $I_{rms}=1,3$ A ($I_1=1,16A$) olduğu,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=90^0$ için $THD_i=\%73,9$ iken rölenin çalışma akımının $I_{rms}=1,9$ A ($I_1=1,27A$) olduğu,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=120^0$ için $THD_i=\%79$ iken rölenin çalışma akımının $I_{rms}=2,0$ A ($I_1=1,21A$) olduğu,
- Akımın THD_i değeri yükseldikçe, (50 Hz frekanslı temel bileşen akımına göre harmonik

bileşenlerin genliği yükseldikçe) rölenin akım-zaman değişimini gösteren karakteristik eğrisinde değişim olduğu, rölenin standart ters eğrisine ve akımın temel bileşen değerine (I_1) göre hesaplanan teorik cevap süresi ile rölenin deneydeki cevap süresi arasında fark olduğu, THD_i değeri yaklaşık aynı kaldığında akım değeri yükseldikçe rölenin teorik cevap süresi ile rölenin deneydeki cevap süresi arasındaki bağıl farkın azaldığı, genel olarak akımın THD_i değeri yükseldikçe rölenin cevap süresinde artış olduğu görülmektedir.

- Şekil 7.14’de görüldüğü gibi, akımın efektif değeri arttıkça harmoniklerin röle üzerinde etkisi azalmaktadır. Deneyde kullanılan kaynağın maksimumu 2,5 A verebilmesi sebebiyle, en fazla çalışma akımının 2,5 katına kadar ($2,5 \times I_p$) deney yapılabilmiştir. Şekil 7.14’deki eğriden (kısa devre halinde) daha yüksek akım değerleri için sinüsoidal akımdaki cevap süresi ile harmonik bileşenleri içeren akımdaki cevap süresi arasındaki farkın akım yükseldikçe azaldığı görülmektedir. Bu nedenle bu röle için aşırı akım durumunda harmoniklerin röle üzerindeki etkisinin daha yüksek olduğu, kısa devre halinde (daha yüksek akımlar için) bu etkinin belirgin bir biçimde azaldığı yorumu yapılabilir.

7.2.2.4.3 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deney sonuçları

Çizelge 7.11 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=0° için yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	$t(s)$	THDi (%)	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2	1,20	16,380	3,20	0,4	2,2	1,7	0,0	0,0	0,0
1,3	1,29	11,856	3,00	0,0	2,1	1,6	0,0	0,0	0,0
1,4	1,37	9,080	2,60	0,5	1,9	1,1	0,0	0,3	0,0
1,5	1,48	7,514	3,00	0,3	2,3	1,5	0,0	0,0	0,0
1,6	1,59	6,303	2,80	0,0	2,2	1,4	0,0	0,3	0,0
1,7	1,70	5,567	3,10	0,0	2,5	1,6	0,3	0,0	0,0
1,8	1,79	5,017	2,90	0,4	2,2	1,6	0,2	0,0	0,0
1,9	1,87	4,636	2,90	0,0	2,1	1,7	0,0	0,2	0,0
2,0	1,99	4,290	2,80	0,2	2,3	1,3	0,0	0,3	0,0
2,1	2,06	4,028	3,10	0,3	2,3	1,8	0,0	0,2	0,0
2,2	2,19	3,765	3,20	0,2	2,6	1,5	0,2	0,3	0,2
2,3	2,28	3,537	3,10	0,5	2,5	1,5	0,2	0,4	0,0
2,4	2,38	3,389	3,10	0,2	2,5	1,7	0,2	0,2	0,0
2,5	2,50	3,208	3,20	0,0	2,7	1,6	0,2	0,4	0,0

Çizelge 7.12 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=0° için elde edilen sonuçlar

I_{rms}(A)	I₁(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağıl hata	Mutlak hata (s)
1,2	1,20	16,380	15,329	6,85	1,051
1,3	1,29	11,856	10,968	8,10	0,888
1,4	1,37	9,080	8,866	2,41	0,214
1,5	1,48	7,514	7,114	5,62	0,400
1,6	1,59	6,303	6,010	4,88	0,293
1,7	1,70	5,567	5,249	6,06	0,318
1,8	1,79	5,017	4,781	4,93	0,236
1,9	1,87	4,636	4,445	4,29	0,191
2,0	1,99	4,290	4,041	6,16	0,249
2,1	2,06	4,028	3,846	4,72	0,182
2,2	2,19	3,765	3,544	6,24	0,221
2,3	2,28	3,537	3,369	4,97	0,168
2,4	2,38	3,389	3,201	5,87	0,188
2,5	2,50	3,208	3,028	5,95	0,180

Çizelge 7.13 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=60° için yapılan ölçümler

I_{rms}(A)	I₁(A)	t(s)	THD_i (%)	% $\frac{I_3}{I_1}$	% $\frac{I_5}{I_1}$	% $\frac{I_7}{I_1}$	% $\frac{I_9}{I_1}$	% $\frac{I_{11}}{I_1}$	% $\frac{I_{13}}{I_1}$
1,25	1,10	33,977	44,30	39,5	10,7	9,4	8,1	5,6	5,0
1,3	1,15	23,234	43,00	38,1	10,4	9,1	8,2	5,6	4,7
1,4	1,24	14,107	41,30	36,5	10,7	9,3	7,8	5,5	4,9
1,5	1,35	10,042	39,70	34,3	10,5	9,5	7,4	5,4	4,4
1,6	1,46	7,989	38,10	32,6	11	9,3	6,9	5,8	4,2
1,7	1,56	6,780	37,10	31,4	11,1	9,5	6,9	5,7	4,4
1,8	1,66	5,937	35,90	29,9	11,5	9,6	6,5	5,8	4,4
1,9	1,75	5,277	34,90	28,7	11,7	9,4	6,4	5,8	4,3
2,0	1,85	4,818	33,80	27,5	12	9,6	6,1	5,5	3,9
2,1	1,97	4,402	32,70	26,2	12,1	9,5	6,2	5,2	4,5
2,2	2,09	4,093	32,40	25,5	12,7	9,5	5,9	5,5	4,3
2,3	2,16	3,845	31,20	24,7	12,3	9,3	5,9	5,0	4,2
2,4	2,27	3,655	30,60	23,5	12,8	9,1	5,9	5,0	4,2
2,5	2,38	3,456	29,70	22,6	12,7	9,1	5,4	4,8	4,4

Çizelge 7.14 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=60° için elde edilen sonuçlar

I_{rms}(A)	I₁(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağıl hata	Mutlak hata (s)
1,25	1,10	33,977	29,350	15,77	4,627
1,3	1,15	23,234	20,006	16,13	3,228
1,4	1,24	14,107	12,989	8,61	1,118
1,5	1,35	10,042	9,302	7,95	0,740
1,6	1,46	7,989	7,371	8,39	0,618
1,7	1,56	6,780	6,269	8,16	0,511
1,8	1,66	5,937	5,497	8,01	0,440
1,9	1,75	5,277	4,975	6,06	0,302
2,0	1,85	4,818	4,524	6,51	0,294
2,1	1,97	4,402	4,102	7,32	0,300
2,2	2,09	4,093	3,770	8,56	0,323
2,3	2,16	3,845	3,608	6,57	0,237
2,4	2,27	3,655	3,388	7,89	0,267
2,5	2,38	3,456	3,201	7,96	0,255

Çizelge7.15 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=90° için yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	$t(s)$	$THD_i (\%)$	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2	∞								
1,3									
1,4									
1,5									
1,6									
1,75	1,12	36,274	75,7	54,9	37,1	20,6	14,8	14,5	11,6
1,8	1,17	22,212	75,2	54,8	36,0	19,9	15,4	15,1	11,8
1,9	1,23	16,140	74,6	54,7	35,6	19,7	15,7	14,7	11,2
2,0	1,32	11,753	74,1	54,6	34,8	19,0	16,0	14,7	10,8
2,1	1,40	9,809	73,5	54,5	34,0	18,8	16,3	14,9	10,3
2,2	1,46	7,975	73,1	54,8	33,5	18,1	16,1	14,5	10,3
2,3	1,56	6,998	72,4	54,7	32,7	17,4	15,9	14,2	10,0
2,4	1,63	6,190	72,0	54,5	32,3	17,8	16,7	13,8	9,4
2,5	1,74	5,557	71,3	54,5	31,4	17,2	16,7	13,5	9,1

Çizelge 7.16 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=90° için elde edilen sonuçlar

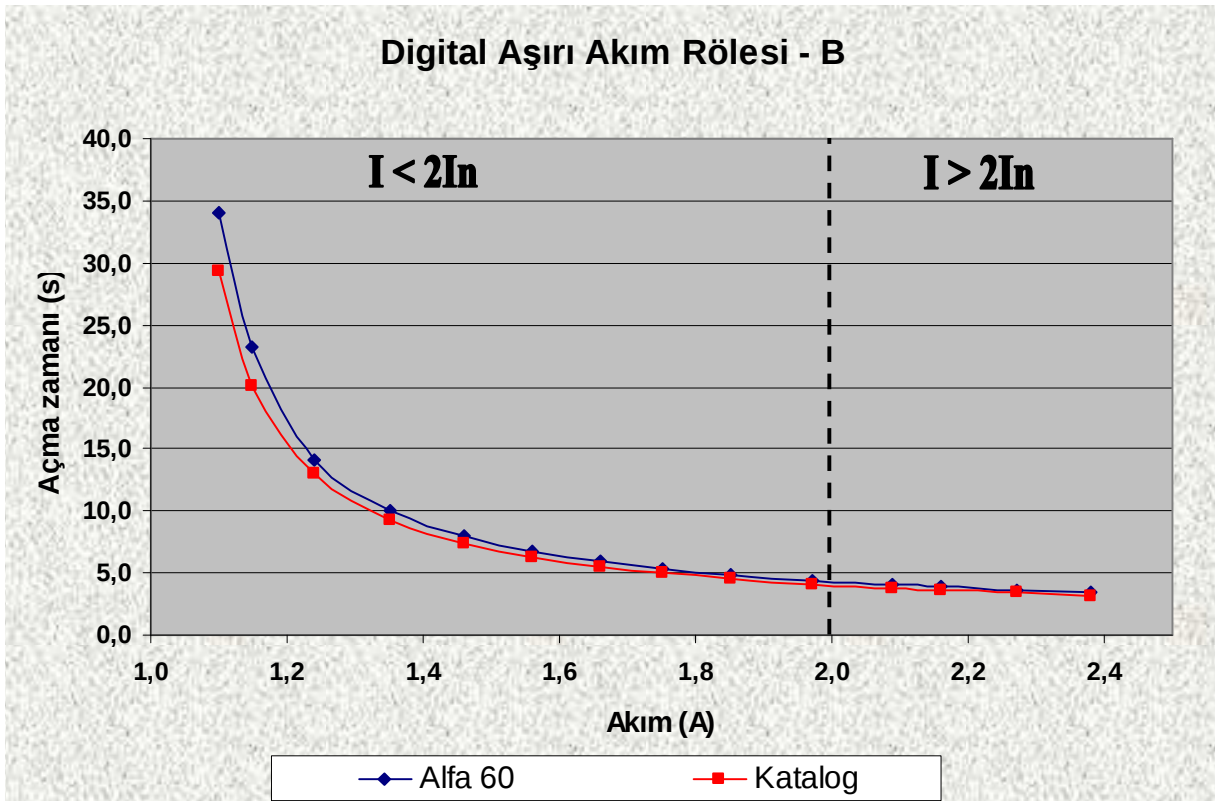
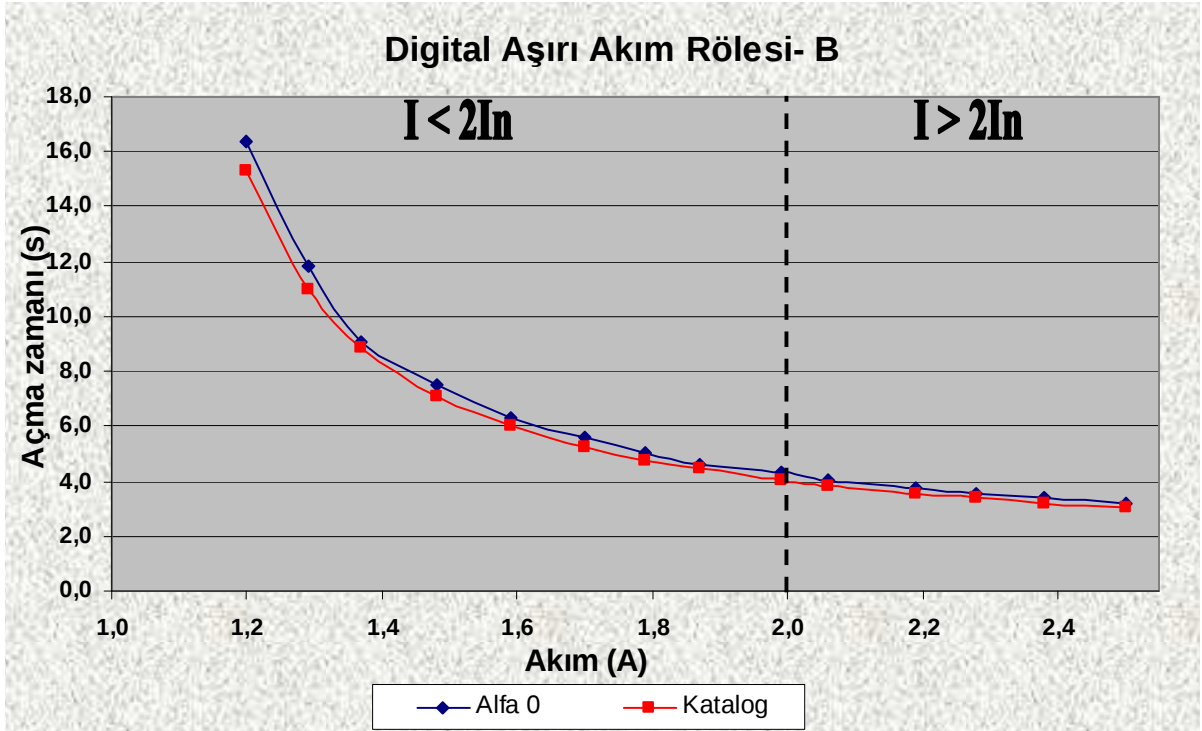
I_{rms}(A)	I₁(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağıl hata	Mutlak hata (s)
1,2	-	-	-	-	-
1,3	-	-	-	-	-
1,4	-	-	-	-	-
1,5	-	-	-	-	-
1,6	-	-	-	-	-
1,75	1,12	36,274	24,679	46,98	11,595
1,8	1,17	22,212	24,697	10,00	2,467
1,9	1,23	16,140	17,806	9,36	1,666
2,0	1,32	11,753	13,498	12,93	1,745
2,1	1,40	9,809	10,057	2,47	0,248
2,2	1,46	7,975	8,294	3,84	0,319
2,3	1,56	6,998	7,371	5,06	0,373
2,4	1,63	6,190	5,703	8,54	0,487
2,5	1,74	5,557	5,027	10,57	0,530

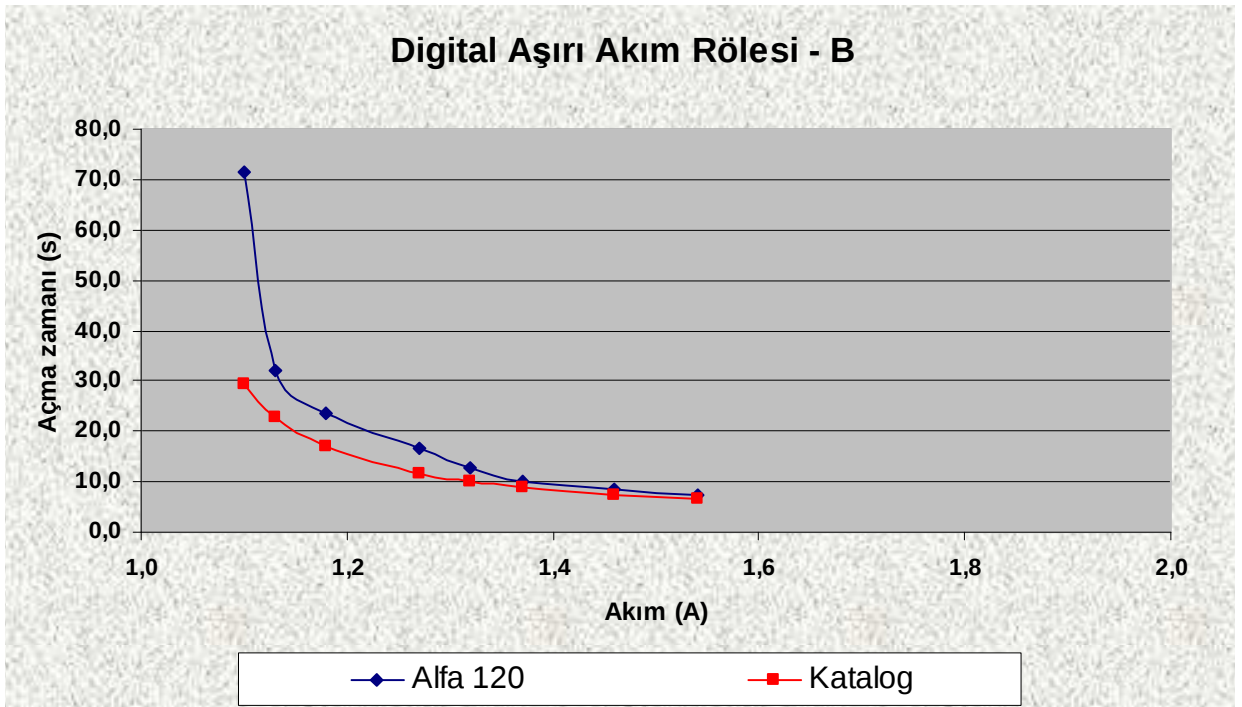
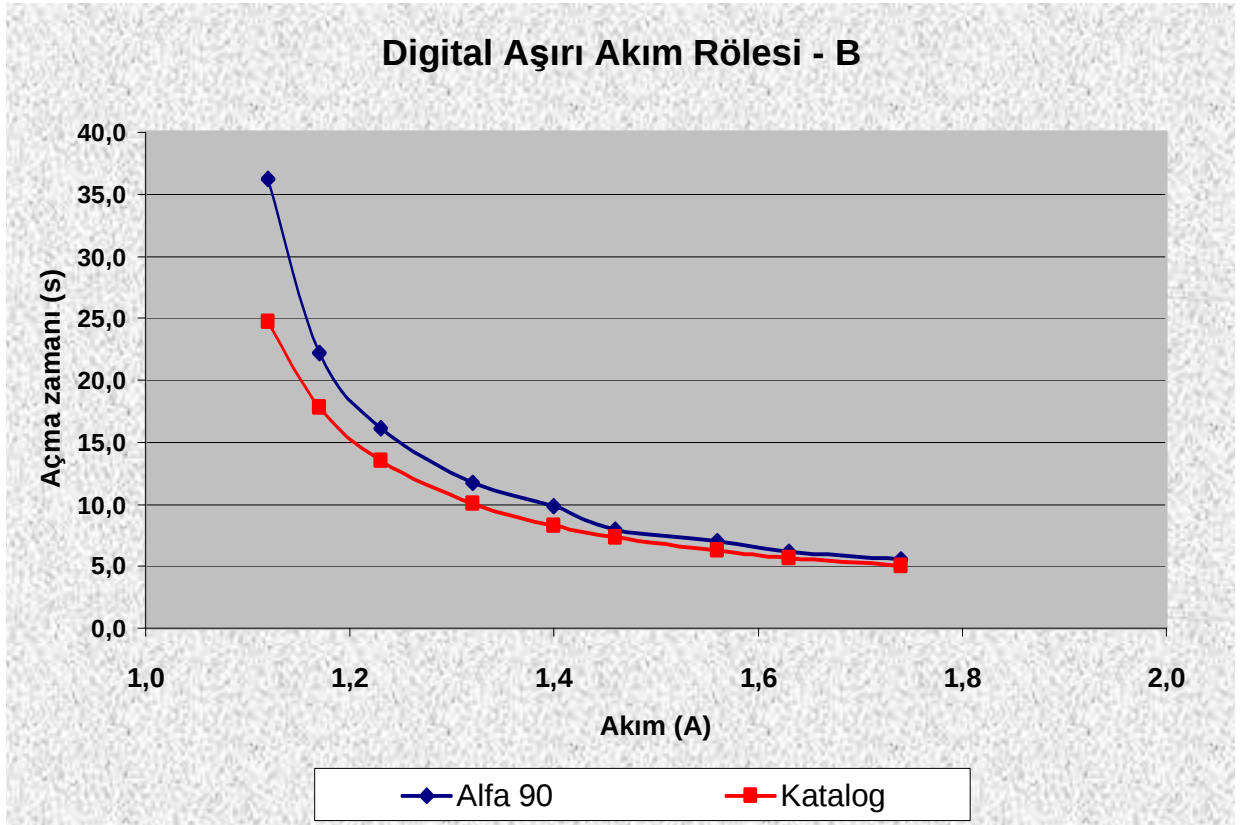
Çizelge 7.17 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=120° için yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	$t(s)$	THD _i (%)	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2	∞								
1,3									
1,4									
1,5									
1,6									
1,75									
1,8									
1,9	1,10	71,38	74,6	53,1	42,3	29,0	17,2	11,6	10,9
2,0	1,18	23,63	74,1	53,5	41,7	28,3	16,9	11,7	11,2
2,1	1,27	16,72	73,5	53,4	41,3	28,3	16,6	11,7	11,2
2,2	1,32	12,56	73,1	53,4	41,4	27,4	15,6	11,8	10,8
2,3	1,37	10,13	72,4	54,2	41,14	26,6	15,1	11,2	11,4
2,4	1,46	8,59	72,0	54,1	40,1	25,2	14,5	11,8	12,4
2,5	1,54	7,28	71,3	54,2	39,7	24,2	13,9	11,9	12,1

Çizelge 7.18 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deneyde (α)=120° için elde edilen sonuçlar

I_{rms}(A)	I₁(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağıl hata	Mutlak hata (s)
1,2	-	-	-	-	-
1,3	-	-	-	-	-
1,4	-	-	-	-	-
1,5	-	-	-	-	-
1,6	-	-	-	-	-
1,75	-	-	-	-	-
1,8	-	-	-	-	-
1,9	1,10	71,38	29,350	143,20	42,030
2,0	1,18	23,63	16,889	39,91	6,741
2,1	1,27	16,72	11,687	43,07	5,033
2,2	1,32	12,56	10,057	24,88	2,503
2,3	1,37	10,13	8,866	14,25	1,264
2,4	1,46	8,59	7,371	16,54	1,219
2,5	1,54	7,28	6,457	12,75	0,823





Şekil 7.15 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait sonuçların karşılaştırılması

7.2.2.4.4 Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Deneyde sinüsoidal akım için çalışma akımı 1 A'e ve standart ters (SI) eğriye ayarlanan Dijital Aşırı Akım Rölesi-B'ye ait çizelgelerde ve Şekil 5.15'de verilen deney sonuçları incelendiğinde,

- Harmoniklerin rölenin çalışma akımında çok az bir değişime sebep olduğu, rölenin genel olarak akımın temel bileşen değerine göre çalıştığı, çalışma akımının $I_1=1,10$ A ile $I_1=1,2$ A arasında değerler aldığı,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=0^0$ için (şebeke gerilimindeki harmonikler sebebiyle) $THD_i=\%3,2$ iken rölenin çalışma akımının $I_1=1,2$ A ($I_{rms}\approx 1,2A$) olduğu,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=60^0$ için $THD_i=\%44,3$ iken rölenin çalışma akımının $I_1=1,10$ A ($I_{rms}=1,25A$) olduğu,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=90^0$ için $THD_i=\%75,7$ iken rölenin çalışma akımının $I_1=1,12$ A ($I_{rms}=1,75A$) olduğu,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=120^0$ için $THD_i=\%74,6$ iken rölenin çalışma akımının $I_1=1,10$ A ($I_{rms}=1,9A$) olduğu,
- Akımın THD_i değeri yükseldikçe, (50 Hz frekanslı temel bileşen akımına göre harmonik bileşenlerin genliği yükseldikçe) rölenin akım-zaman değişimini gösteren karakteristik eğrisinde değişim olduğu, rölenin standart ters eğrisine ve akımın temel bileşen değerine (I_1) göre hesaplanan teorik cevap süresi ile rölenin deneydeki cevap süresi arasında fark oluştuğu, THD_i değeri yaklaşık aynı kaldığında akım değeri yükseldikçe rölenin teorik cevap süresi ile rölenin deneydeki cevap süresi arasındaki bağıl farkın azaldığı, genel olarak akımın THD_i değeri yükseldikçe rölenin cevap süresinde artış olduğu görülmektedir.
- Şekil 7.15'de görüldüğü gibi, akımın temel bileşen değeri arttıkça harmoniklerin röle üzerinde etkisi azalmaktadır. Deneyde kullanılan kaynağın maksimumu 2,5 A verebilmesi sebebiyle, en fazla çalışma akımının 2,5 katına kadar ($2,5 \times I_p$) deney yapılabilmiştir. Şekil 7.15'deki eğriden sinüsoidal akımdaki cevap süresi ile harmonik bileşenleri içeren akımdaki cevap süresi arasındaki farkın akım yükseldikçe azaldığı görülmektedir. Bu nedenle bu röle için aşırı akım durumunda harmoniklerin röle üzerindeki etkisinin daha yüksek olduğu, kısa devre halinde (daha yüksek akımlar için) bu etkinin azaldığı yorumu

yapılabilir.

7.2.2.4.5 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deney sonuçları

Çizelge 7.19 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=0° için yapılan ölçümler

I_{rms}(A)	I₁(A)	t(s)	THD_i (%)	% $\frac{I_3}{I_1}$	% $\frac{I_5}{I_1}$	% $\frac{I_7}{I_1}$	% $\frac{I_9}{I_1}$	% $\frac{I_{11}}{I_1}$	% $\frac{I_{13}}{I_1}$
1,2	1,18	16,092	2,300	0,6	1,5	0,6	0,0	0,6	0,0
1,3	1,29	10,970	2,30	0,5	1,5	1,0	0,0	0,3	0,0
1,4	1,39	8,600	2,70	0,3	2,1	1,1	0,3	0,0	0,3
1,5	1,50	7,217	2,60	0,3	1,9	1,3	0,0	0,0	0,0
1,6	1,59	6,196	2,70	0,0	2,1	1,1	0,0	0,7	0,3
1,7	1,68	5,493	2,60	0,5	2,0	1,0	0,3	0,4	0,3
1,8	1,79	4,952	2,90	0,6	2,3	1,2	0,2	0,4	0,0
1,9	1,89	4,578	2,90	0,2	2,4	1,2	0,0	0,4	0,0
2,0	1,99	4,182	2,80	0,4	2,1	1,6	0,2	0,3	0,0
2,1	2,10	3,912	2,80	0,2	2,2	1,5	0,0	0,4	0,0
2,2	2,19	3,656	2,90	0,0	2,3	1,5	0,2	0,3	0,0
2,3	2,27	3,497	3,00	0,2	2,3	1,7	0,2	0,3	0,0
2,4	2,38	3,324	2,90	0,3	2,5	1,5	0,0	0,5	0,0
2,5	2,49	3,164	3,10	0,3	2,6	1,5	0,2	0,2	0,0

Çizelge7.20 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=0° için elde edilen sonuçlar

I_{rms}(A)	I₁(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağlı hata	Mutlak hata (s)
1,2	1,18	16,092	16,889	4,72	0,797
1,3	1,29	10,970	10,968	0,02	0,002
1,4	1,39	8,600	8,475	1,48	0,125
1,5	1,50	7,217	7,114	1,45	0,103
1,6	1,59	6,196	6,010	3,10	0,186
1,7	1,68	5,493	5,249	4,65	0,244
1,8	1,79	4,952	4,736	4,57	0,216
1,9	1,89	4,578	4,408	3,87	0,170
2,0	1,99	4,182	4,041	3,49	0,141
2,1	2,10	3,912	3,770	3,76	0,142
2,2	2,19	3,656	3,544	3,16	0,112
2,3	2,27	3,497	3,369	3,79	0,128
2,4	2,38	3,324	3,201	3,83	0,123
2,5	2,49	3,164	3,041	4,03	0,123

Çizelge 7.21 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=60° için yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	$t(s)$	THD _i (%)	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2									
1,3	1,16	30,448	42,00	0,5	1,5	1,0	0,0	0,3	0,0
1,4	1,25	14,275	40,30	0,3	2,1	1,1	0,3	0,0	0,3
1,5	1,36	10,588	38,90	0,3	1,9	1,3	0,0	0,0	0,0
1,6	1,46	8,230	37,40	0,0	2,1	1,1	0,0	0,7	0,3
1,7	1,56	6,974	36,50	0,5	2,0	1,0	0,3	0,4	0,3
1,8	1,67	6,057	35,20	0,6	2,3	1,2	0,2	0,4	0,0
1,9	1,77	5,314	34,20	0,2	2,4	1,2	0,0	0,4	0,0
2,0	1,87	4,810	33,10	0,4	2,1	1,6	0,2	0,3	0,0
2,1	1,95	4,466	32,40	0,2	3	1,8	0,2	0,2	0,0
2,2	2,07	4,155	31,50	0,0	2,8	2,1	0,0	0,3	0,0
2,3	2,17	3,872	30,60	0,2	2,3	1,7	0,2	0,3	0,0
2,4	2,26	3,654	30,10	0,3	2,5	1,5	0,2	0,3	0,0
2,5	2,36	3,440	29,00	0,3	2,6	1,5	0,2	0,2	0,0

Çizelge 7.22 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=60° için elde edilen sonuçlar

I_{rms}(A)	I₁(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağlı hata	Mutlak hata (s)
1,2	-	-	-	-	-
1,3	1,16	30,448	18,837	61,64	11,611
1,4	1,25	14,275	12,520	14,02	1,755
1,5	1,36	10,588	9,078	16,63	1,510
1,6	1,46	8,230	7,371	11,66	0,859
1,7	1,56	6,974	6,269	11,25	0,705
1,8	1,67	6,057	5,432	11,51	0,625
1,9	1,77	5,314	4,876	8,98	0,438
2,0	1,87	4,810	4,445	8,20	0,365
2,1	1,95	4,466	4,165	7,23	0,301
2,2	2,07	4,155	3,821	8,75	0,334
2,3	2,17	3,872	3,586	7,97	0,286
2,4	2,26	3,654	3,406	7,28	0,248
2,5	2,36	3,440	3,233	6,40	0,207

Çizelge 7.23 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=90° için yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	$t(s)$	THD _i (%)	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2	∞								
1,3									
1,4									
1,5									
1,6									
1,7									
1,8	1,12	56,344	76,80	53,3	37,8	23,6	17,1	15,1	12
1,9	1,21	23,636	76,80	53,6	38,2	23,5	16,7	14,4	11,9
2,0	1,27	15,726	76,20	53,9	37,4	23,0	16,8	14,9	11,5
2,1	1,40	11,858	75,30	54,0	36,5	22,3	16,9	14,1	10,4
2,2	1,44	9,325	75,00	53,7	36,5	22,1	16,3	13,9	10,9
2,3	1,48	8,318	74,90	53,8	36,4	22,1	16,3	13,9	10,7
2,4	1,60	6,947	74,20	54,0	35,8	21,5	16,0	13,3	9,8
2,5	1,66	6,148	74,00	53,9	35,5	21,0	16,0	13,1	9,9

Çizelge 7.24 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=90° için elde edilen sonuçlar

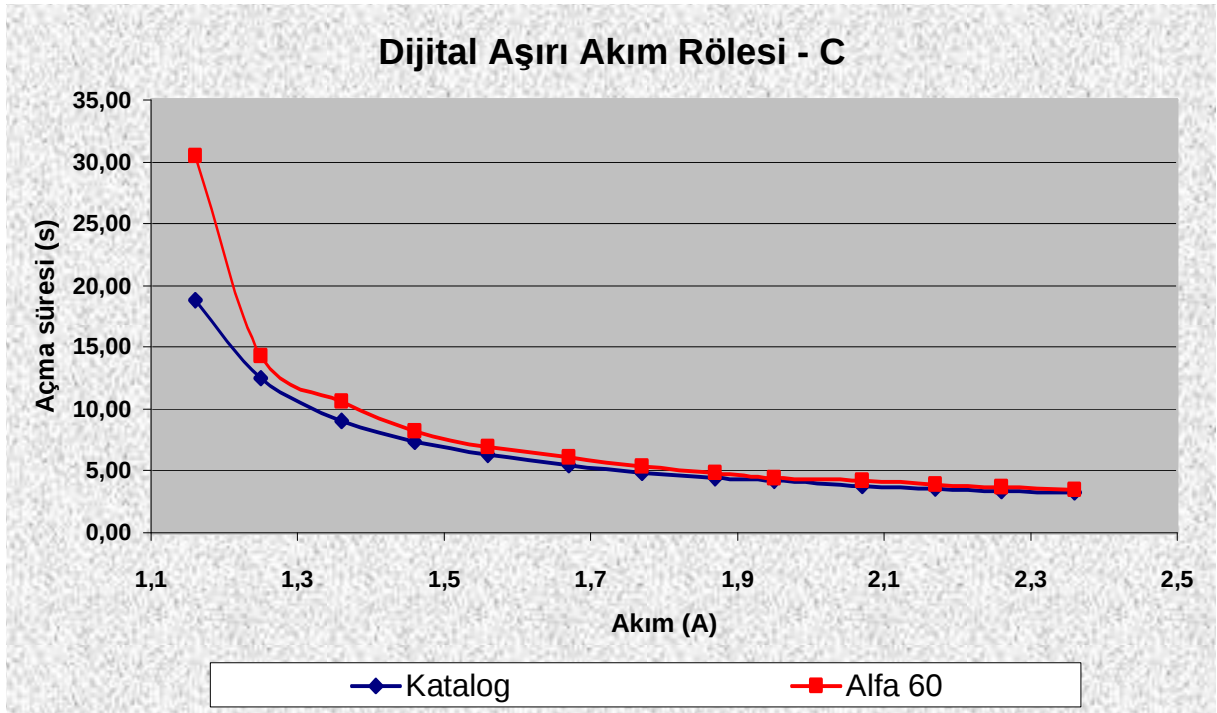
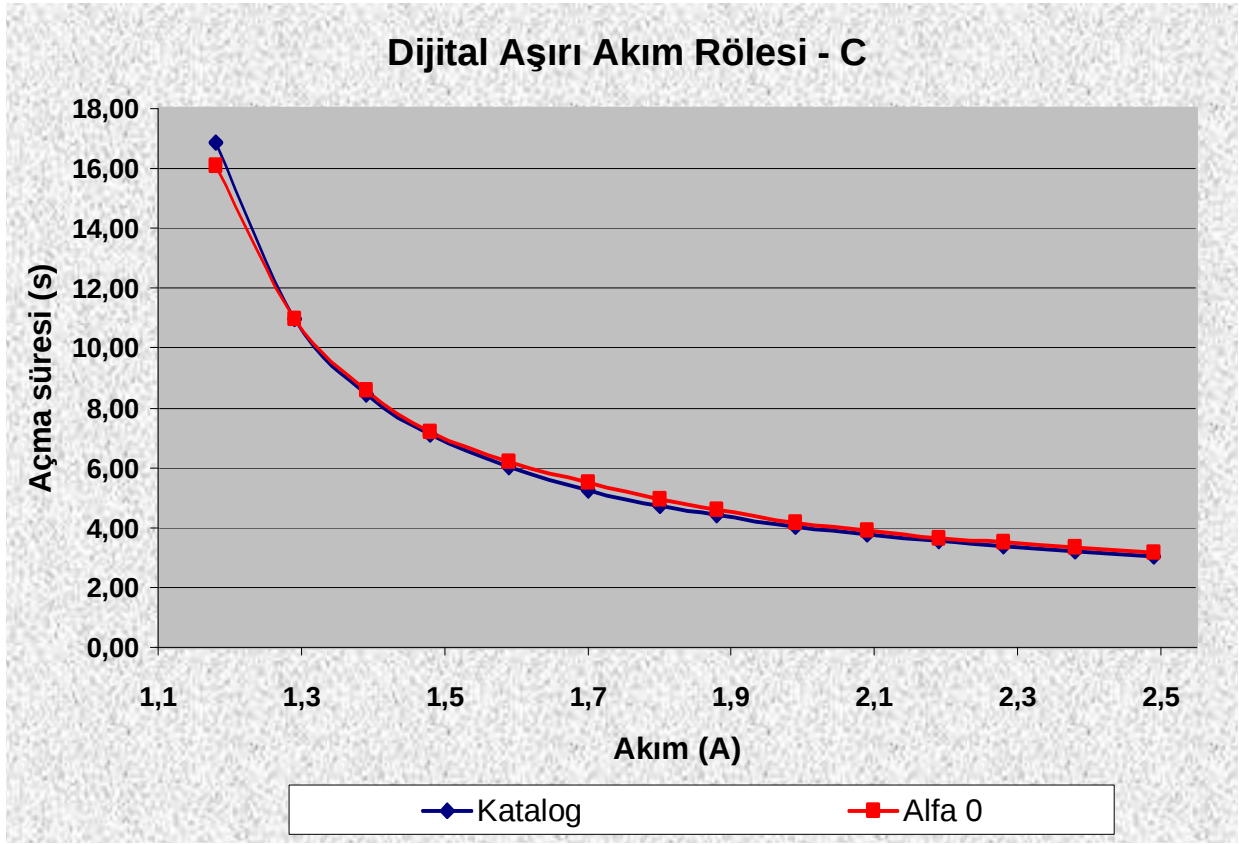
I_{rms}(A)	I₁(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağlı hata	Mutlak hata (s)
1,2	-	-	-	-	-
1,3	-	-	-	-	-
1,4	-	-	-	-	-
1,5	-	-	-	-	-
1,6	-	-	-	-	-
1,7	-	-	-	-	-
1,8	1,12	56,344	24,679	128,31	31,655
1,9	1,21	23,636	14,661	61,22	8,975
2,0	1,27	15,726	11,687	34,56	4,039
2,1	1,40	11,858	8,294	42,98	3,564
2,2	1,44	9,325	7,651	21,88	1,674
2,3	1,48	8,318	7,114	16,92	1,204
2,4	1,60	6,947	5,929	17,16	1,018
2,5	1,66	6,148	5,497	11,85	0,651

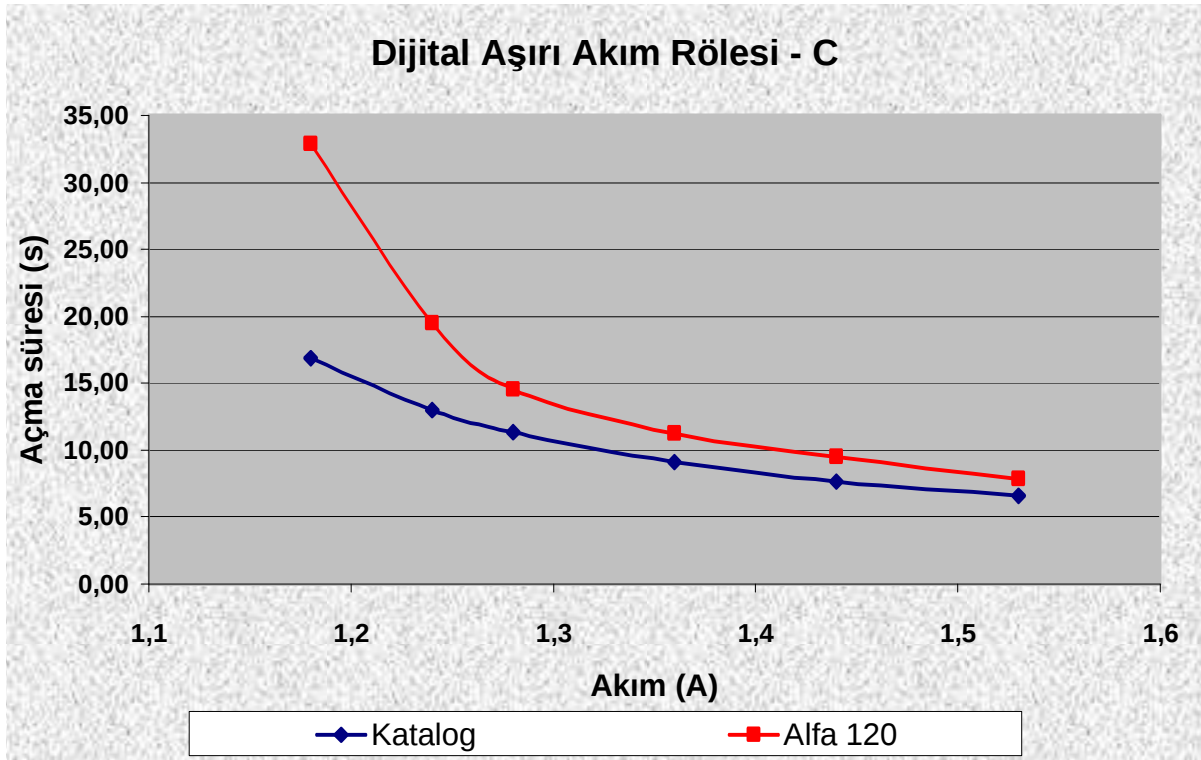
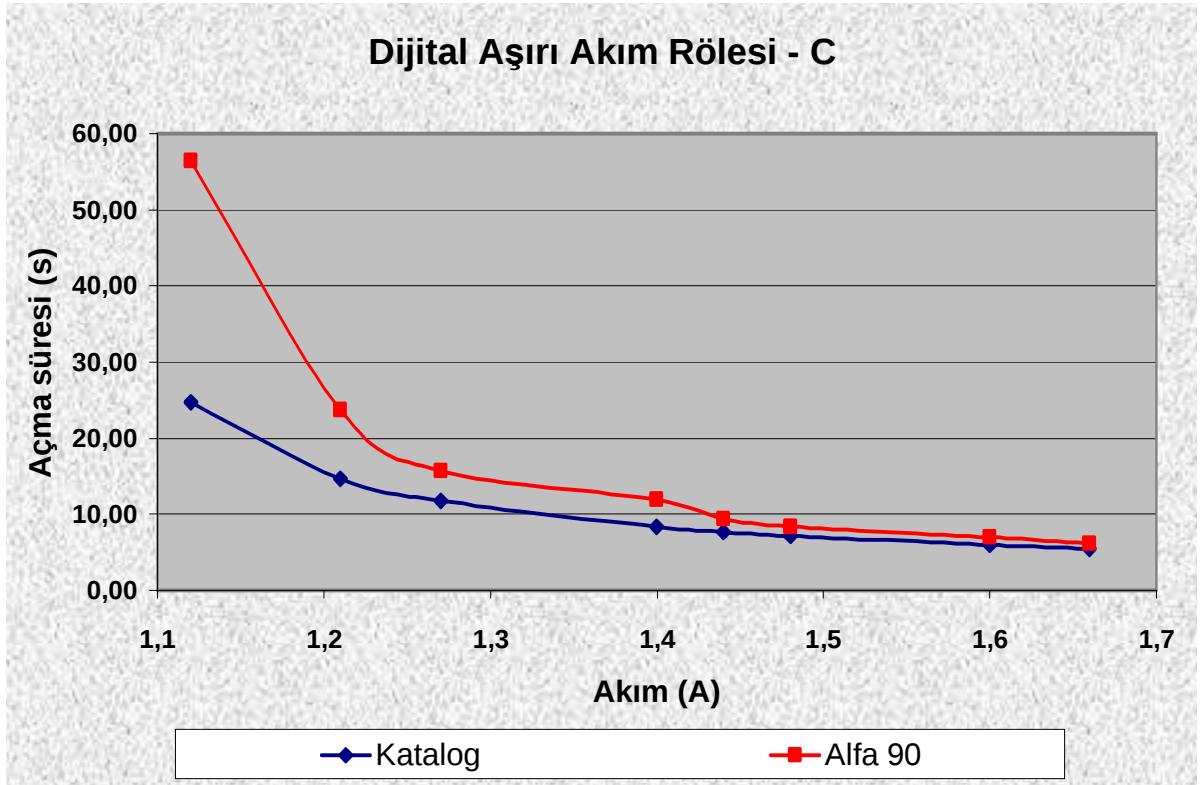
Çizelge 7.25 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=120° için yapılan ölçümler

$I_{rms}(A)$	$I_1(A)$	$t(s)$	$THD_i (\%)$	$\% \frac{I_3}{I_1}$	$\% \frac{I_5}{I_1}$	$\% \frac{I_7}{I_1}$	$\% \frac{I_9}{I_1}$	$\% \frac{I_{11}}{I_1}$	$\% \frac{I_{13}}{I_1}$
1,2	∞								
1,3									
1,4									
1,5									
1,6									
1,7									
1,8									
1,9									
2,0	1,18	32,842	81,00	51,8	40,1	28,1	18,8	15,6	14,1
2,1	1,24	19,497	80,00	52,2	39,6	27,0	8,5	15,1	13,9
2,2	1,28	14,530	79,90	51,5	39,5	27,3	18,1	15,5	14,1
2,3	1,36	11,220	79,50	52,4	39,1	26,0	17,9	15,5	13,9
2,4	1,44	9,514	79,10	52,5	38,8	25,4	18,0	15,8	13,5
2,5	1,53	7,828	78,60	52,6	38,5	25,1	17,6	15,5	13,4

Çizelge 7.26 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deneyde (α)=120° için elde edilen sonuçlar

I_{rms}(A)	I₁(A)	Ölçülen cevap süresi (s)	Teorik cevap süresi (s)	% Bağlı hata	Mutlak hata (s)
1,2	-	-	-	-	-
1,3	-	-	-	-	-
1,4	-	-	-	-	-
1,5	-	-	-	-	-
1,6	-	-	-	-	-
1,7	-	-	-	-	-
1,8	-	-	-	-	-
1,9	-	-	-	-	-
2,0	1,18	32,842	16,889	94,46	15,953
2,1	1,24	19,497	12,989	50,11	6,508
2,2	1,28	14,530	11,314	28,42	3,216
2,3	1,36	11,220	9,078	23,59	2,142
2,4	1,44	9,514	7,651	24,35	1,863
2,5	1,53	7,828	6,556	19,40	1,272





Şekil 7.16 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait sonuçların karşılaştırılması

7.2.2.4.6 Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Deneyde sinüsoidal akım için çalışma akımı 1 A'e ve standart ters (SI) eğriye ayarlanan Dijital Aşırı Akım Rölesi-C'ye ait çizelgelerde ve Şekil 7.16'de verilen deney sonuçları incelendiğinde,

- Harmoniklerin rölenin çalışma akımını etkilediği, triyak tetikleme açısı $\alpha=0^0$ için (şebeke gerilimindeki harmonikler sebebiyle) $THD_i=\%2,3$ iken rölenin çalışma akımının $I_1=1,18$ A ($I_{rms}\cong 1,2A$) olduğu,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=60^0$ için $THD_i=\%42$ iken rölenin çalışma akımının $I_1=1,16$ A ($I_{rms}=1,3A$) olduğu,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=90^0$ için $THD_i=\%76,8$ iken rölenin çalışma akımının $I_1=1,12$ A ($I_{rms}=1,8A$) olduğu,
- Triyak tetikleme açısı $\alpha=120^0$ için $THD_i=\%81$ iken rölenin çalışma akımının $I_1=1,18$ A ($I_{rms}=2,0A$) olduğu,
- Akımın THD_i değeri yükseldikçe, (50 Hz frekanslı temel bileşen akımına göre harmonik bileşenlerin genliği yükseldikçe) rölenin akım-zaman değişimini gösteren karakteristik eğrisinde değişim olduğu, rölenin standart ters eğrisine ve akımın temel bileşen değerine (I_1) göre hesaplanan teorik cevap süresi ile rölenin deneydeki cevap süresi arasında fark olduğu, THD_i değeri yaklaşık aynı kaldığında akım değeri yükseldikçe rölenin teorik cevap süresi ile rölenin deneydeki cevap süresi arasındaki bağıl farkın azaldığı, genel olarak akımın THD_i değeri yükseldikçe rölenin cevap süresinde artış olduğu görülmektedir.
- Şekil 7.16'de görüldüğü gibi, akımın temel bileşen değeri arttıkça harmoniklerin röle üzerinde etkisi azalmaktadır. Deneyde kullanılan kaynağın maksimumu 2,5 A verebilmesi sebebiyle, en fazla çalışma akımının 2,5 katına kadar ($2,5 \times I_p$) deney yapılabilmiştir. Şekil 7.16'daki eğriden sinüsoidal akımdaki cevap süresi ile harmonik bileşenleri içeren akımdaki cevap süresi arasındaki farkın akım yükseldikçe azaldığı görülmektedir. Bu nedenle bu röle için aşırı akım durumunda harmoniklerin röle üzerindeki etkisinin daha yüksek olduğu, kısa devre halinde (daha yüksek akımlar için) bu etkinin azaldığı yorumu yapılabilir.

8 SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Harmoniklerin dijital aşırı akım röleleri üzerinde etkilerinin araştırıldığı ve yapılan deneysel çalışmalarla incelendiği bu tez çalışmasında, elde edilen deney sonuçları da göz önüne alındığında ortaya çıkan değerlendirme, sonuç ve öneriler aşağıda verilmiştir:

- Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda harmoniklerin elektromekanik ve statik aşırı akım rölelerini etkilediği, akımda harmonik bileşenlerin bulunması halinde rölelerin çalışma akımlarının ve cevap sürelerinin (zaman gecikmelerinin) standart eğrideki sürelerden farklı olduğu tespiti yapılmıştır. Benzer şekilde, dijital aşırı akım röleleri üzerinde yapılan bu çalışmada da harmoniklerin dijital aşırı akım rölelerinin çalışma akımını ve ters akım-zaman karakteristik eğrilerini etkilediği görülmüştür.
- Deneysel çalışma sonuçlarına göre, genel olarak dijital aşırı akım rölesine uygulanan akımın toplam harmonik distorsiyonu (THD_i) değeri yükseldikçe (50 Hz frekanslı temel bileşen akımına göre harmonik bileşenlerin genliği yükseldikçe) rölenin akım-zaman değişimini gösteren karakteristik eğrisinde değişim olduğu, rölenin standart ters eğrisine ve röleden geçen sinüsoidal akıma göre hesaplanan teorik cevap süresine göre rölenin deneydeki cevap süresinin arttığı ancak Şekil 7.14, Şekil 7.15 ve Şekil 7.16’de gösterildiği gibi THD_i değeri yaklaşık aynı kaldığında akım değeri yükseldikçe rölenin teorik cevap süresi ile rölenin deneydeki cevap süresi arasındaki bağıl farkın azaldığı görülmüştür. Bu nedenle bu röle için aşırı akım durumunda harmoniklerin röle üzerindeki etkisinin daha yüksek olduğu, kısa devre halinde (daha yüksek akımlar için) bu etkinin azaldığı yorumu yapılabilir.
- Akımın THD_i değeri yükseldikçe –genel olarak dijital aşırı akım rölelerinin akımın temel bileşenine göre çalışması ve akımın THD_i değeri yükseldikçe temel bileşen akımının azalması sebebiyle- incelenen dijital aşırı akım rölelerinin cevap sürelerinin de yükseldiği buna karşılık akımın THD_i değeri yükseldikçe rölenin faaliyete geçtiği çalışma akımının da yükseldiği tespit edilmektedir. İncelenen dijital aşırı akım rölelerinin ayarlandığı çalışma akımlarından daha büyük akımlarda devreye girmesi ve karakteristik eğrisine göre öngörülen zaman gecikmesinden daha uzun sürede kesiciye açma kumandası vermesi gibi koruma görevi için risk oluşturacak bu sorunları bir ölçüde azaltmak amacıyla dijital aşırı akım röleleri akımın rms değerine göre çalışan harmoniklerden etkilenmeyen termik aşırı akım koruma üniteleriyle donatılmalı ve bu ünitelerin çalışma

akımları çok yüksek tutulmamalıdır. Böylece dijital aşırı akım rölesi akımın temel bileşenine bağlı olarak çalışsa bile THDi'nin yüksek olduğu durumlarda termik aşırı akım ünitesi akımın rms değerine göre çalışacağı için arıza akımı sebebiyle kesiciye mutlaka açma kumandası verilecektir.

- DeneySEL sonuçlar incelendiğinde, triyak tetikleme açısı $\alpha=0^0$ için şebeke geriliminin saf sinüsoidal biçimde olması (harmonik bileşen içermemesi) halinde $THD_i=0$ olması gerekirken şebeke gerilimindeki harmonikler sebebiyle $\alpha=0^0$ için THD_i değerinin %3- %4 arasında değiştiği, $\alpha=60^0$ için THD_i değerinin %30-%40 arasında değiştiği, triyak tetikleme açısı α büyüdükçe dalganın daha çok kıyılması sebebiyle THD_i değerinin büyüdüğü hatta $\alpha=120^0$ için THD_i değerinin %80'e yükseldiği görülmektedir. Bu çalışmanın amacının “harmoniklerin dijital aşırı akım röleleri üzerindeki etkisinin incelenmesi” olması nedeniyle deneySEL çalışmada rölelere uygulanan akımın THD_i değerinin çok yüksek değerler almasına izin verilmiştir. Deneyde incelenen dijital aşırı akım röleleri genel olarak gerilimin 34,5 kV civarında olduğu orta gerilim (O.G.) transformatör merkezlerinde kullanılmaktadır. Ülkemizde akım harmonikleri için uygulanan sınır değerler, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından çıkarılan “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”nde “kabul edilebilir akım harmonik limitleri” başlığı altında verilmiş olup bu yönetmeliğe göre orta gerilim ($1kV < U \leq 34,5 \text{ kV}$) için ölçümün yapıldığı noktanın kısa devre akımının (I_k) ölçüm süresince ölçülen en yüksek yük akımına (I_L) oranına (I_k / I_L) bağlı olarak ($I_k / I_L < 20$ için %5 ve $I_k / I_L > 1000$ %20) toplam akım distorsiyonu için izin verilen en yüksek sınır %20'dir. Ayrıca bu tez çalışmasının da desteklendiği, TÜBİTAK BİLTEN (UZAY), TEİAŞ, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Hacettepe Üniversitesi, Dokuz Eylül Üniversitesi ve Yıldız Teknik Üniversitesinin katılımıyla gerçekleştirilen TÜBİTAK 105G129 nolu “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi” konulu proje kapsamında ulusal enerji sistemimizde yapılan güç kalitesi ölçümlerinde 34,5 kV transformatör merkezlerinde genel olarak toplam akım harmonik distorsiyonunun yönetmelikte izin verilen sınırın altında olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına göre akımın THD_i değeri yükseldikçe harmoniklerin dijital aşırı akım röleleri üzerindeki etkisinin arttığı ancak önümüzdeki yıllarda Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve

Kalitesi Yönetmeliği'nin etkin biçimde uygulanmasıyla O.G. abonelerinin yönetmelikte izin verilen harmonik distorsiyonu sınır değerinin altında kalabilmek için harmonik filtresi tesis ederek THDi değerini %20 değerinin altında tutacağı ve THDi < %20 için sinüsoidal akıma oranla rölelerin karakteristik eğrilerindeki değişimlerin az olduğu göz önüne alındığında, yönetmelikteki akım harmonik sınırlarına uyulması halinde O.G. şebekesinde çalışma akımı I_p değerine ayarlanmış dijital aşırı akım rölesinin (deneysel çalışmada incelenen rölelerden herhangi birsinin) $I \geq 2 \times I_p$ için koruma işlevini riske atmadan güvenli çalışabileceği ancak daha düşük akım değerlerinde, $I < 2 \times I_p$ aşırı akım değerleri için harmonikler sebebiyle rölelerin cevap sürelerinin uzayabileceği anlaşılmaktadır.

- Literatürde verilen, harmoniklerin aşırı akım röleleri üzerindeki etkilerle ilgili çalışmalarda elde edilen sonuçlara benzer olarak bu çalışmada da harmoniklerin dijital aşırı akım rölelerinin çalışmasını olumsuz olarak etkilediği ortaya konulmuştur. Günümüzde akım gerilim karakteristiği doğrusal olmayan bu nedenle harmonik üreten ark fırını, güç elektroniği devreleri, foto voltaik sistemler vb. yüklerin sayısı ve güç sistemi içindeki payları gitgide artmakta, gelecekte de enerji sistemlerinde harmonik sorunlarının artması, akımın ve gerilimin toplam harmonik distorsiyonu değerlerinin yükselmesi beklenmektedir. Bu nedenle dijital aşırı akım rölesi ile korunacak tesislerde eğer tesisin çektiği akımın THDi değeri yüksek ise seçilecek rölenin harmoniklerden ne ölçüde etkilendiği incelenmeli, harmonik bileşenlerin olması halinde de etkin koruma yapabilen röle tercih edilmelidir.
- Gelecekte yapılacak çalışmalar ile bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarından yararlanılarak yapay sinir ağları yardımıyla incelenen dijital aşırı akım rölelerinin harmoniklere bağlı modelleri oluşturularak elde edilecek model üzerinde harmonik spektrumu farklı yükler için rölelerin davranışının incelenmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- Akimoto, Y., Matsuda, T., Matsuzawa, K., Yamaura, M., Kondow, R., Matsushima, T., (1981), "Microprocessor Based Digital Relays Application", IEEE, Tokyo.
- AI-Zyoud, A., Khraiwish, A., Shakarchi M., (2006), "Protective Relays Performance in Harmonic Environment", IEEE, Jordan.
- Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., (1985), Power System Harmonics, John Wiley & Sons, Norwich.
- Atmaca, E., (1985), "Harmoniklerin Elektrik Donanımı Üzerindeki Etkileri", 3e Dergisi.
- Bozkurt, A., (2005), "Harmoniklerin Aşırı Akım Röleleri Üzerine Etkisinin Yapay Sinir Ağları Destekli Olarak İncelenmesi", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Dalcı, B., Yumurtacı, R. ve Bozkurt, A., (2005), "Harmonic Effects on Electromechanical Overcurrent Relays", Doğu Üniversitesi Dergisi, İstanbul.
- Dema Röle Sanayii ve Ticaret A.Ş., CPM Serisi Digital Aşırı Akım Koruma Röleleri Kataloğu, İstanbul
- Dema Röle Sanayii ve Ticaret A.Ş., MCR Serisi Çok Fonksiyonlu Aşırı Akım Rölesi Kataloğu, İstanbul
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. ve Beaty, H.W., (1996), Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill.
- Exposito, A., Macias, J., (1999), "Fast Harmonic Computation for Digital Relaying", IEEE Transactions on Power Delivery, Sevilla
- Gec Alstom T & D, (1995), "Protective Relays Application Guide".
- Gençoğlu, M., Türkoğlu, İ., Aydoğmuş, Z., Cebeci, M., "Mikrobilgisayar Kontrollü Röle Tasarımı"
- Grigsby, L., (2001), "Electric Power Engineering Handbook" CRC Press and IEEE Press, Auburn.
- IEEE Standards Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, (1996), ISBN 1-55937-887-5.
- IEEE Standards Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines, (1999).
- Kocatepe, C., Yumurtacı, R., Uzunoğlu, M., Karakaş, A. ve Arıkan, O., (2003), "Elektrik Tesislerinde Harmonikler" Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Kocatepe, C. ve Demir, A., (1998), "Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Elemanlar Genel Bakış", Kaynak Elektrik Dergisi, 113:99-106.
- Mansuri, A., (1984), "Koruma Yöntemleri ve Röleler", Elektroteknik Araç Gereç Sanayii Dergisi, 325:14-19.
- Medina, A., Martínez-Cárdenas, F., (2005) "Analysis of the Harmonic Distortion Impact on the Operation of Digital Protection Systems", IEEE.
- Medina, A., Martínez-Cárdenas, F., (2005) "Experimental Studies on Digital Protection Systems Under Unbalanced and Non Sinusoidal Conditions", IEEE.
- Megep, (2007), "Koruma Röleleri", Ankara.

- Mladen, K., Popovic, T., Sevcik, D., DoCarmo, H., (2003) “Transient Testing of Protection Relays ”, IPST, Hong Kong.
- Sayar, İ., (1998) “Röleler”, Kocaeli Üniversitesi, Bitirme Tezi, İzmit.
- Selamoğulları, U.S., (1998), “Enerji Sistemlerindeki Harmoniklerin Koruma Sistemleri Üzerine Etkisi”, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Siemens, Siprotech easy Numerical Overcurrent Protection Manual.
- Sundberg, Y., (1976), “The Arc Furnace as a Load On The Network”, ASEA, Journal, Vol.49.
- Taylan, N., (1965), “Elektrik Tesislerinde Koruma Sistemleri”, DSİ Genel Müdürlüğü Matbaası.
- Usta, Ö., Kuzu, A., Özgür, M., Uzunkaya, A., (2003), “ Çok Fonksiyonlu Sayısal Röle Tasarımı”, İstanbul.
- Wave Distortion on Consumer’s Interconnection Working Group(WDCIWG), (1984), “The Impact of Sine-Wave Distortion on Protective Relays”, V:01I.A.-20, No:2.
- Yumurtacı, R., (1995) “Elektrik Güç Sistemlerinde Hatların Mesafe Röleleri ile Korunması”, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Yumurtacı, R., Bozkurt, A. ve Gülez, K., (2005c), “Neural Networks Based Analysis of Harmonic Effects on Inverse Time Static Overcurrent Relays”, Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 15-18 June. 2005, İstanbul.
- Zamora, I., Mazón, A., Valverde, V., San Martín, J., Buigues, G., Dyško, A., (2005), “Influence of Power Quality on the Performance of Digital Protection Relays”, IEEE.
- Zocholl, S., E., Benmouyal, G., (1998), “How Microprocessor Relays Respong to Harmonics, Saturation and Other Wave Distortion”, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA.

INTERNET KAYNAKLARI

- [1] www.ktp.yildiz.edu.tr
- [2] www.elektrotekno.com
- [3] <http://www.electricalengineeringnetbase.com/>
- [4] www.engineeringvillage2.com
- [5] ieeexplore.ieee.org/Xplore
- [6] www.etmd.org.tr

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	13.01.1982	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1995-1998	Şehremini Lisesi
Lisans	2000-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik–Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurum(lar)

2008-Devam ediyor EAE Elektroteknik A.Ş.