

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

168334

**HARMONİKLERİN AŞIRI AKIM RÖLELERİ ÜZERİNE  
ETKİSİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI DESTEKLİ OLARAK  
İNCELENMESİ**

Elektrik Müh. Altuğ BOZKURT

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Prof. Dr. Celal KOÇATEPE  
Yrd. Doç. Dr. Yılmaz BİRBİR

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI**

İSTANBUL, 2005

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                 | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ                                                                   | v     |
| KISALTMA LİSTESİ                                                                | vi    |
| ŞEKİL LİSTESİ                                                                   | vii   |
| ÇİZELGE LİSTESİ                                                                 | ix    |
| ÖNSÖZ                                                                           | x     |
| ÖZET                                                                            | xi    |
| ABSTRACT                                                                        | xii   |
| 1. GİRİŞ .....                                                                  | 1     |
| 2. HARMONİKLERLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAR.....                        | 3     |
| 2.1 Harmoniklerin Matematiksel İfadesi .....                                    | 3     |
| 2.1.1 Fourier Analizi .....                                                     | 3     |
| 2.2 Harmonikler İle İlgili Temel Kavramlar.....                                 | 6     |
| 2.2.1 Harmonikli Sistemler İçin Güç İfadeleri .....                             | 6     |
| 2.2.2 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) .....                                  | 7     |
| 2.3 Harmonik Kaynakları .....                                                   | 8     |
| 2.3.1 Generatörler .....                                                        | 8     |
| 2.3.2 Transformatörler .....                                                    | 8     |
| 2.3.3 Konverterler .....                                                        | 9     |
| 2.3.4 Ark Fırınları .....                                                       | 10    |
| 2.3.5 Gaz Deşarjlı Aydınlatma Elemanları .....                                  | 10    |
| 2.4 Harmoniklerin Etkileri .....                                                | 11    |
| 2.4.1 Ölçü ve Koruma Düzenlerine Etkisi .....                                   | 12    |
| 2.4.2 Kondansatörler ve Kompanzasyon Sistemine Etkileri .....                   | 13    |
| 2.4.3 Hassas Elektronik Cihazlar ve Elektronik Donanım Üzerine Etkileri.....    | 13    |
| 2.4.4 İletkenler Üzerine Etkileri .....                                         | 14    |
| 2.4.5 Direnç Üzerindeki Etkisi .....                                            | 14    |
| 2.4.6 Reaktanslar Üzerine Etkisi .....                                          | 14    |
| 2.4.7 Devre Kesiciler ve Sigortalar Üzerine Etkisi.....                         | 15    |
| 2.4.8 Aydınlatma Donanımı Üzerine Etkisi .....                                  | 15    |
| 3. KORUMA İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR .....                                      | 16    |
| 3.1 Koruma Sistemini Oluşturan Elemanlar .....                                  | 16    |
| 3.2 Koruma Sisteminden Beklenen Özellikler .....                                | 17    |
| 3.2.1 Seçicilik (Selektivite).....                                              | 17    |
| 3.2.2 Hızlı Çalışma .....                                                       | 19    |
| 3.2.3 Güvenilir Çalışma .....                                                   | 19    |
| 3.2.4 Basitlik .....                                                            | 20    |
| 3.2.5 Yedek Koruma.....                                                         | 21    |
| 3.2.6 Ekonomik Koruma.....                                                      | 21    |
| 3.3 Koruma Röleleri .....                                                       | 21    |
| 3.3.1 Aşırı Akım Röleleri .....                                                 | 22    |
| 3.3.1.1 Aşırı Akım Röleleri ile İlgili Tanım ve Kavramlar .....                 | 22    |
| 3.3.1.2 Aşırı Akım Rölelerinde Ani Eleman, Yardımcı Kontaktör ve Bayraklar..... | 24    |
| 3.3.1.3 Elektromekanik (İndüksiyon Diskli) Röle .....                           | 24    |
| 3.3.1.4 Statik (Yarı İletken) Röleler .....                                     | 26    |

|           |                                                                                                                                 |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.1.4.1 | Statik Rölelerin Temel Yapısı.....                                                                                              | 27 |
| 4.        | YAPAY SİNİR AĞLARI.....                                                                                                         | 29 |
| 4.1       | Giriş.....                                                                                                                      | 29 |
| 4.2       | Yapay Sinir Ağlarının Tanımı ve Modeli.....                                                                                     | 29 |
| 4.3       | Yapay Sinir Ağlarının Yapısı.....                                                                                               | 31 |
| 4.3.1     | Ağ Tipleri.....                                                                                                                 | 33 |
| 4.3.2     | Eşik fonksiyonları.....                                                                                                         | 33 |
| 4.4       | Yapay Sinir Ağlarında Eğitim.....                                                                                               | 35 |
| 4.4.1     | Eğitim Algoritmaları.....                                                                                                       | 35 |
| 4.4.2     | Bellek.....                                                                                                                     | 35 |
| 4.4.3     | Hata Toleransı.....                                                                                                             | 36 |
| 4.4.4     | Yapay Sinir Ağlarının Kullanımının Sebepleri.....                                                                               | 36 |
| 4.4.5     | YSA'nın Klasik Yazılımlar ile Karşılaştırılması.....                                                                            | 37 |
| 4.5       | Çok Katmanlı Ağ.....                                                                                                            | 37 |
| 4.6       | Klasik Hatanın Geriye Yayılması Algoritması (GYA).....                                                                          | 39 |
| 4.7       | Genelleştirilmiş Delta Kuralı.....                                                                                              | 41 |
| 5.        | HARMONİKLERİN KORUMA RÖLELERİ ÜZERİNE ETKİSİ.....                                                                               | 43 |
| 5.1       | Elektromekanik Röleler.....                                                                                                     | 43 |
| 5.1.1     | Silindir Tipi Ani Aşırı Akım Röleleri.....                                                                                      | 43 |
| 5.1.2     | Elektromekanik Gerilim Röleleri.....                                                                                            | 44 |
| 5.1.3     | Çift Girişli Elektromekanik Röleler.....                                                                                        | 44 |
| 5.2       | Mesafe Röleleri.....                                                                                                            | 45 |
| 5.3       | Harmonik Sınırlamalı Ani Akım Röleleri.....                                                                                     | 46 |
| 5.4       | Simetrik Bileşenli Röleler.....                                                                                                 | 46 |
| 5.5       | Transformatör Diferansiyel Röleleri.....                                                                                        | 47 |
| 5.6       | Bara Diferansiyel Röleleri.....                                                                                                 | 47 |
| 5.7       | Statik Röleler.....                                                                                                             | 47 |
| 5.7.1     | Tek Girişli Statik Röleler.....                                                                                                 | 48 |
| 5.7.2     | Çift Girişli Statik Röleler.....                                                                                                | 48 |
| 5.7.3     | Statik Aşırı Akım Röleleri.....                                                                                                 | 48 |
| 6.        | DENEYSEL ÇALIŞMA.....                                                                                                           | 50 |
| 6.1       | Giriş.....                                                                                                                      | 50 |
| 6.2       | Deneylerde Kullanılan Nonlineer (Doğrusal Olmayan) Yük.....                                                                     | 50 |
| 6.3       | Nonlineer Yük Akımının Etkatif Değerinin Hesaplanması.....                                                                      | 52 |
| 6.4       | Harmoniklerin İndüksiyon Diskli Elektromekanik Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesine Etkisinin Deneysel Çalışma ile İncelenmesi..... | 53 |
| 6.4.1     | Deneyde Kullanılan İndüksiyon Diskli Elektromekanik Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi.....                                         | 53 |
| 6.4.2     | İndüksiyon Diskli Elektromekanik Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi Deneyinin Yapılması.....                                        | 55 |
| 6.4.3     | Deney Sonuçlarının Yapay Sinir Ağı Algoritmalarına Uygulanması.....                                                             | 60 |
| 6.4.4     | Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                                                                                       | 64 |
| 6.5       | Harmoniklerin Sabit Zamanlı (Bağımsız) Elektromekanik Aşırı Akım Rölesine Etkisinin Deneysel Çalışma ile İncelenmesi.....       | 64 |
| 6.5.1     | Deneyde Kullanılan Sabit Zamanlı (Bağımsız) Elektromekanik Aşırı Akım Rölesi.....                                               | 64 |

|                 |                                                                                                        |    |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.5.2           | Sabit Zamanlı (Bağımsız) Elektromekanik Aşırı Akım Rölesi Deneyinin Yapılması.....                     | 66 |
| 6.5.3           | Deney Sonuçlarının Yapay Sinir Ağı Algoritmalarına Uygulanması .....                                   | 69 |
| 6.5.4           | Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....                                                             | 71 |
| 6.6             | Harmoniklerin Ters Zamanlı Statik Aşırı Akım Rölesine Etkisinin Deneysel Çalışma İle İncelenmesi ..... | 71 |
| 6.6.1           | Deneyde Kullanılan Statik Koruma Rölesi .....                                                          | 71 |
| 6.6.2           | Ters Zamanlı Statik Aşırı Akım Rölesi Deneyinin Yapılması.....                                         | 75 |
| 6.6.3           | Deney Sonuçlarının Yapay Sinir Ağı Algoritmalarına Uygulanması .....                                   | 84 |
| 6.6.4           | Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....                                                             | 86 |
| 7.              | SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....                                                                              | 89 |
| KAYNAKLAR ..... |                                                                                                        | 91 |
| ÖZGEÇMİŞ .....  |                                                                                                        | 94 |



## SİMGE LİSTESİ

|             |                                                                   |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|
| $A$         | Sabit                                                             |
| $D$         | Distorsiyon gücü                                                  |
| $f$         | Frekans                                                           |
| $GF$        | Güç faktörü                                                       |
| $HD_I$      | 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                                                |
| $p$         | Darbe sayısı                                                      |
| $P$         | Aktif güç                                                         |
| $Q$         | Reaktif güç                                                       |
| $Q_C$       | Kondansatörün toplam gücü                                         |
| $Q_S$       | Sistemin kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücü |
| $R$         | Direnç                                                            |
| $S$         | Görünen güç                                                       |
| $t$         | Reset zamanı                                                      |
| $THD$       | Toplam harmonik distorsiyonu (bozulması)                          |
| $THD_I$     | Akım için toplam harmonik distorsiyonu                            |
| $THD_V$     | Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu                         |
| $X$         | Reaktans                                                          |
| $X_C$       | Kapasitif reaktans                                                |
| $X_L$       | Endüktif reaktans                                                 |
| $V_0$       | Gerilimin dc bileşeni                                             |
| $V_n$       | n. harmonik geriliminin efektif değeri                            |
| $\delta_n$  | n. harmonik geriliminin faz açısı                                 |
| $\alpha$    | Triyak tetikleme açısı                                            |
| $\phi$      | Akı                                                               |
| $\phi_n$    | n. harmonik akımının faz açısı                                    |

## KISALTMA LİSTESİ

|      |                                                         |
|------|---------------------------------------------------------|
| AT   | Akım Transformatörü                                     |
| DC   | Doğru Akım(Direct Current)                              |
| GT   | Gerilim Transformatörü                                  |
| HD   | Harmonik Distorsiyonu(Harmonic Distortion)              |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers       |
| THD  | Toplam Harmonik Distorsiyonu(Total Harmonic Distortion) |
| VA   | Volt × Amper                                            |
| YSA  | Yapay Sinir Ağları                                      |



## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1 Koruma sistemi .....                                                                                                          | 16 |
| Şekil 3.2 Radyal şebekede seçici koruma .....                                                                                           | 18 |
| Şekil 3.3 Ring şebekede seçici koruma .....                                                                                             | 18 |
| Şekil 3.4 Örnek devre .....                                                                                                             | 20 |
| Şekil 3.5 Röleler .....                                                                                                                 | 22 |
| Şekil 3.6 Rölelerde geri dönüş oranı .....                                                                                              | 23 |
| Şekil 3.7 İndüksiyon disk ünitesi .....                                                                                                 | 25 |
| Şekil 3.8 Ters zamanlı aşırı akım rölesinin fazör diyagramı .....                                                                       | 25 |
| Şekil 3.9 Ters zamanlı aşırı akım rölesinin standart akım-zaman karakteristiği (IEEE Standart, 1996) .....                              | 26 |
| Şekil 3.10 Koruma rölelerinin temel blok diyagramı .....                                                                                | 28 |
| Şekil 4.1 Biyolojik sinir sisteminin blok gösterimi (Öztemel, 2003) .....                                                               | 30 |
| Şekil 4.2 Bir biyolojik sinir hücresinin yapısı .....                                                                                   | 30 |
| Şekil 4.3 Nöron modeli .....                                                                                                            | 31 |
| Şekil 4.4 YSA'nın genel blok şeması .....                                                                                               | 31 |
| Şekil 4.5 Yapay sinir ağı katmanlarının birbirleri ile olan ilişkileri (Öztemel, 2003) .....                                            | 32 |
| Şekil 4.6 Bir yapay sinir ağı örneği .....                                                                                              | 32 |
| Şekil 4.7 Sık kullanılan dört eşik fonksiyonu .....                                                                                     | 33 |
| Şekil 4.8 Çok katmanlı ağ yapısı .....                                                                                                  | 38 |
| Şekil 4.9 Geri yayımlı yapay sinir ağının genel yapısı .....                                                                            | 39 |
| Şekil 4.10 Hatanın geriye yayılması algoritmasının blok diyagramı .....                                                                 | 41 |
| Şekil 5.1 İdeal akım transformatörü sekonder akımı doyma 90 'de ve direnç yüklü iken .....                                              | 45 |
| Şekil 5.2 Tipik transformatör deşarj akımları (WDCIWG, 1984) .....                                                                      | 46 |
| Şekil 6.1 Deneylerde kullanılan nonlineer (lineer olmayan) yük .....                                                                    | 50 |
| Şekil 6.2 Nonlineer (lineer olmayan) yük akımı .....                                                                                    | 51 |
| Şekil 6.3 İndüksiyon diskli elektromekanik ters zamanlı aşırı akım rölesi .....                                                         | 53 |
| Şekil 6.4 İndüksiyon diskli elektromekanik ters zamanlı aşırı akım rölesinin kısa devre açma karakteristiği (DEMA kataloğu, 2000) ..... | 54 |
| Şekil 6.5 İndüksiyon diskli elektromekanik ters zamanlı aşırı akım rölesi deney devresi .....                                           | 55 |
| Şekil 6.6 Rölenin çalışma akımının THD <sub>i</sub> değerine göre değişimi .....                                                        | 59 |
| Şekil 6.7 Rölenin cevap süresinin akımın temel bileşenine göre değişimi .....                                                           | 59 |
| Şekil 6.8 Rölenin cevap süresinin akımın efektif değerine göre değişimi .....                                                           | 60 |
| Şekil 6.9 Yapay sinir ağı genel blok diyagramı .....                                                                                    | 61 |
| Şekil 6.10 Yapay sinir ağı modeli .....                                                                                                 | 61 |
| Şekil 6.11 Yapay sinir ağı performans diyagramı .....                                                                                   | 63 |
| Şekil 6.12 Sabit zamanlı (bağımsız) elektromekanik aşırı akım rölesi .....                                                              | 65 |
| Şekil 6.13 Bağımsız aşırı akım- kısa devre rölesinin çalışma karakteristiği .....                                                       | 66 |
| Şekil 6.14 Sabit zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesi .....                                                                         | 67 |
| Şekil 6.15 Rölenin çalışma akımının $\% \frac{I_3}{I_1}$ göre değişimi .....                                                            | 69 |
| Şekil 6.16 Rölenin çalışma akımının THD <sub>i</sub> göre değişimi .....                                                                | 69 |
| Şekil 6.17 Yapay sinir ağı genel blok diyagramı .....                                                                                   | 70 |
| Şekil 6.18 Yapay sinir ağı modeli .....                                                                                                 | 70 |
| Şekil 6.19 Ters zamanlı statik aşırı akım rölesi .....                                                                                  | 72 |
| Şekil 6.20 Statik koruma rölesi bir faz gösterimi (Ürgüplü, 1997) .....                                                                 | 72 |
| Şekil 6.21 Statik koruma rölesi bağlantı şeması (Ürgüplü, 1997) .....                                                                   | 73 |
| Şekil 6.22 Normal ters zamanlı (Normal inverse) röle çalışma eğrileri (Ürgüplü, 1997) .....                                             | 74 |
| Şekil 6.23 Çok ters zamanlı (Very inverse) röle çalışma eğrileri (Ürgüplü, 1997) .....                                                  | 74 |
| Şekil 6.24 Aşırı ters zamanlı (Extremely inverse) röle çalışma eğrileri (Ürgüplü, 1997) .....                                           | 75 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.25 Ters zamanlı statik aşırı akım rölesi deney devresi.....            | 76 |
| Şekil 6.26 Rölenin cevap süresinin akımın efektif değerine göre değişimi ..... | 84 |
| Şekil 6.27 Yapay sinir ağı genel blok diyagramı.....                           | 84 |
| Şekil 6.28 Yapay sinir ağı modeli(Haykin, 1994).....                           | 85 |



## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 6.1 Nonlineer yüke ait çalışma modları.....                                      | 52 |
| Çizelge 6.2 Mod 0 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları.....               | 56 |
| Çizelge 6.3 Mod 1 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları.....               | 57 |
| Çizelge 6.4 Mod 2 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları.....               | 57 |
| Çizelge 6.5 Mod 3 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları.....               | 58 |
| Çizelge 6.6 Mod 4 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları.....               | 58 |
| Çizelge 6.7 Mod 5 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları.....               | 58 |
| Çizelge 6.8 Aynı akım değeri (2 Amper) için modlara göre rölenin cevap süreleri .....    | 60 |
| Çizelge 6.9 Bütün modlar için eğitme sonuçları .....                                     | 61 |
| Çizelge 6.10 Test sonuçları .....                                                        | 64 |
| Çizelge 6.11 Sabit zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları.....         | 68 |
| Çizelge 6.12 Test sonuçları .....                                                        | 71 |
| Çizelge 6.13 Mod 0 için statik röle ölçüm sonuçları .....                                | 78 |
| Çizelge 6.14 Mod 1 için statik röle ölçüm sonuçları .....                                | 79 |
| Çizelge 6.15 Mod 2 için statik röle ölçüm sonuçları .....                                | 80 |
| Çizelge 6.16 Mod 3 için statik röle ölçüm sonuçları .....                                | 81 |
| Çizelge 6.17 Mod 4 için statik röle ölçüm sonuçları .....                                | 82 |
| Çizelge 6.18 Mod 5 için statik röle ölçüm sonuçları .....                                | 83 |
| Çizelge 6.19 Bütün modlar için eğitme sonuçları .....                                    | 85 |
| Çizelge 6.20 $I_{rms}=1,5$ A için tüm modların ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması..... | 87 |

## ÖNSÖZ

Teknolojinin ve kaliteli yaşamın her geçen gün gelişmesiyle beraberinde getirdiği enerji kalitesi problemleri büyük önem kazanmıştır. Enerji kalitesinin temel problemlerinden biri olan akım-gerilim karakteristiği doğrusal (lineer) olmayan yükler sebebiyle ortaya çıkan harmonik bileşenlerin güç sistemlerine olumsuz etkileri giderek artmaktadır.

Aşırı akım röleleri genellikle sinüsoidal akım için tasarlanırlar ve bu nedenle bu röleler sinüsoidal akımda karakteristiklerine uygun olarak hatasız ve güvenilir bir şekilde koruma yaparlar. Ancak günümüzde güç elektroniği devrelerinin kullanımının artması, ark fırınlarının yoğun olarak kullanıldığı demir-çelik tesislerinin artması vb. sebeplerle elektrik güç sistemlerinde akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan yüklerin yaygınlaşması ile akımın dalga şekli sinüsoidal formdan uzaklaşmakta, şebeke akım ve gerilim harmonik bileşenleri içermektedir. Koruma rölesi 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. 0.4 kV alçak gerilim şebekesinde gerilim distorsiyonunun %3'ün, akım distorsiyonunun %10'un üzerine çıktığı günümüzde harmoniklerin aşırı akım röleleri üzerine etkisini incelemenin güncel ve gerekli bir çalışma olduğu göz önüne alınarak bu tez çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmada, ters zamanlı statik ve elektromekanik aşırı akım röleleri ile sabit zamanlı elektromekanik aşırı akım rölelerinin çalışma karakteristiklerine harmoniklerin etkileri incelenmiştir. Harmonik içeriği ve toplam harmonik distorsiyon değerleri farklı nonlineer yük akımları için aşırı akım rölelerinin çalışma akımı veya zaman gecikmesi değerleri, karakteristik eğrileri Yapay Sinir Ağları algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir.

Çalışmalarım sırasında büyük ilgi ve desteklerini gördüğüm danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI'ya, çalışma arkadaşlarıma ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

## ÖZET

Bu tez çalışmasında harmoniklerin statik ve elektromekanik aşırı akım rölelerinin çalışma karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada aşırı akım rölesi olarak indüksiyon diskli ters zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesi, ters zamanlı statik aşırı akım rölesi ve sabit zamanlı (bağımsız) elektromekanik aşırı akım rölesi incelenmiştir. Nonlineer yük olarak omik yüklü bir dimmer devresi kullanılmıştır.

Deneysel çalışmada, farklı harmonik spektrumlarına sahip nonlineer yük akımları aşırı akım rölelerine uygulanmış ve ters zamanlı aşırı akım rölelerinin çalışma akım değerleri ve zaman gecikmeleri, sabit zamanlı aşırı akım rölesinin çalışma akım değerleri ölçülmüştür. Nonlineer yük akımlarının harmonik analizörü ile harmonik spektrumları elde edilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen veriler yapay sinir ağları (YSA) geriye yayılım algoritması kullanılarak eğitilmiştir ve incelenen rölelerin akım-zaman karakteristiklerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen YSA simülasyonları ile ölçüm yapılmayan harmonikli akım değerleri için rölelerin yaklaşık cevabını belirlemek mümkündür.

Deneysel çalışma sonucunda, akımın Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) değeri yükseldikçe indüksiyon diskli ters zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesinin çalışma akımının ve zaman gecikmesinin yükseldiği, ters zamanlı statik aşırı akım rölesinde ise THD<sub>i</sub> değeri yükseldikçe çalışma akım ve zaman gecikmesinin azaldığı görülmüştür. Sabit zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesinde THD<sub>i</sub> değeri yükseldikçe çalışma akımı artmaktadır.

Sonuç olarak sistemde güç kalitesinin önemli kriterlerinden biri olan harmonik bileşenleri mevcutsa, harmonik etkinliği arttıkça koruma rölelerinin çalışma hatası artmakta, güvenilirlik azalmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Harmonikler, aşırı akım röleleri, yapay sinir ağları.

## ABSTRACT

In this thesis, harmonic effects on operational characteristics of static and electromechanical overcurrent relays are studied. As an experimental study, an inverse time induction disc type overcurrent relay, an inverse time static overcurrent relay and an instantaneous electromechanical overcurrent relay are considered. A dimmer circuit is used to represent nonlinear load.

In the experimental study, the nonlinear load currents which have different harmonic spectrums are applied to overcurrent relay inputs. Afterward, pickup current and operating time values for inverse time over current relays as well as pickup current values for instantaneous overcurrent relays are measured. Harmonic spectrums of nonlinear load currents are obtained by using a harmonic analyzer. The data set which are obtained from experimental results are trained using Artificial Neural Networks and back propagation algorithm in order to simulate the current-time characteristics of the considered overcurrent relays. Therefore, the responses of relays for any nonsinusoidal current can approximately be defined by using the trained neural network.

It is evident from experimental results that the increase of the total harmonic current distortion value of the current ( $THD_i$ ) causes operating current and time delay of the induction disc type inverse time electromechanical overcurrent relay to increase. However, the increase of the  $THD_i$  value on the inverse time static overcurrent relay causes the operating current and time delay to decrease. As the total harmonic distortion increases, inverse-time static overcurrent relay nominal current and time-delaying increases.

In conclusions, the presence of harmonics as an important factor in power quality, results in the increase of operating errors and unavailability of protection relays.

**Keywords:** Harmonics, overcurrent relays, artificial neural networks.

## 1. GİRİŞ

Elektrik güç sistemlerinde, transformatör, hat, motor vb. elemanların aşırı akım koruması aşırı akım röleleri ile gerçekleştirilmektedir.. Aşırı akım röleleri yapılarına göre elektromekanik aşırı akım röleleri ve statik (elektronik) aşırı akım röleleri olmak üzere başlıca iki gruba ayrılırlar. Statik rölelerin daha gelişmiş tipi dijital rölelerdir.

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

Bu tez çalışmasının amacı harmoniklerin aşırı akım rölesine etkisinin incelenmesi, gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda farklı harmonik spektrumlarına sahip nonlinear yük akımları için aşırı akım rölesinin çalışma akım değerlerinin ve zaman gecikmelerinin belirlenmesidir. Böylece harmonikli akımlar için aşırı akım rölelerinin karakteristik eğrileri elde edilebilmektedir. Uygun Yapay Sinir Ağları (YSA) algoritmaları kullanılarak deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar YSA algoritmalarının eğitime aşamasında veri olarak kullanılmış ve YSA algoritması çıkışında ölçüm yapılmayan harmonikli akımlar için aşırı akım rölelerinin çalışma akımı veya zaman gecikmeleri büyük bir doğrulukla elde edilmiştir. Deney sonuçlarını ve YSA analiz sonuçlarını kullanarak farklı harmonik içeriğine sahip nonlinear yük akımları için deneylerde kullanılan aşırı akım rölelerinin dinamik davranışını simüle etmek, rölelerin karakteristik eğrilerini elde etmek mümkün olmaktadır.

Tez çalışmasının giriş bölümünde konu ortaya konulup tezin içeriği kısaca açıklandıktan sonra;

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.) açıklanmış, aşırı akım rölelerinin yapısı ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde yapay sinir ağlarının tanımı, modeli, yapısı ve yapay sinir ağlarında eğitime ile ilgili genel bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde harmoniklerin koruma röleleri üzerine etkisi incelenmiş, çeşitli koruma rölelerine harmoniklerin etkisi konusunda literatürde yapılmış çalışmalar ele alınmıştır.

Altıncı bölümde harmoniklerin elektromekanik ve statik aşırı akım rölelerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmaya yer verilmiştir. Bu bölümde ters zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesi ve ters zamanlı statik aşırı akım rölesi ile ilgili yapılan deneyler açıklanmış, nonlineer yüke ait harmonik analiz sonuçları, rölelerle ilgili ölçülen değerler, kullanılan YSA modelleri ve analiz sonuçları ayrıntılı olarak verilmiştir.

Yedinci bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

## 2. HARMONİKLERLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAR

### 2.1 Harmoniklerin Matematiksel İfadesi

İdeal bir güç sistemi, sabit genlik ve frekansa sahip ve sinüs dalga şeklinde olan gerilim kaynaklarından beslenen 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.

#### 2.1.1 Fourier Analizi

Fourier serisi birinci terimi sabit ve diğer terimleri ise bir değişkenin katsayılarının sinüs ve kosinüslerden 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 integralinin (2.3) eşitliğinin terimlerinin integralinin toplamına eşit olduğunu kabul edelim.  $a_0$  katsayısını hesaplamak için (2.3) eşitliğinin her iki tarafını  $-\pi$ ' den  $+\pi$ ' ye kadar terim terim integralini hesaplayalım (Gökalp, 1988).

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,

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

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

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

elde edilir. Bu ifadeleri tekrar düzenlersek,

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

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

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

$n = k$  ise

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

'dir.

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;

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

bulunur.

(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 (Gökalp, 1988; Yumurtacı, 2000).

## 2.2 Harmonikler İle İlgili Temel Kavramlar

Harmonik bileşenleri içeren nonsinüsoidal akım ve gerilimlerin ani değerleri, Fourier serileri ile aşağıdaki eşitliklerdeki gibi ifade edilebilir;

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= I_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \\ v(t) &= V_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \delta_n) \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

Gerilimin ve akımın efektif değeri ise,

$$\left. \begin{aligned} I &= \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)^{1/2} \\ V &= \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

olarak tanımlanır. Bu eşitliklerde  $I_0$  ve  $V_0$  sırasıyla akım ve gerilimin dc bileşeni n ise harmonik mertebesi,  $I_n$  ve  $\phi_n$  sırasıyla n. harmonik akımının efektif değeri ve faz açısı,  $V_n$  ve  $\delta_n$  n. harmonik geriliminin efektif değeri ve faz açısıdır (Yumurtacı, 2000).

### 2.2.1 Harmonikli Sistemler İçin Güç İfadeleri

Akım ve gerilimdeki bozulma, görünen gücü (S), reaktif gücü (Q) ve aktif gücü (P) etkilemektedir (Gürsoy vd., 1999). Harmonikli bir sistemde gerilim ve akım ifadelerinin eşitlik (2.19)'daki gibi tanımlanması durumunda güç ifadeleri bir fazlı sistem için aşağıdaki gibi bulunur.

Aktif güç,

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\delta_n - \phi_n) \quad (2.21)$$

Reaktif güç,

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\delta_n - \phi_n) \quad (2.22)$$

Görünen güç ise,

$$S = VI = \left( \sum_{n=0}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2} \cdot \left( \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (2.23)$$

olarak ifade edilir. Burada  $V_0$  ve  $I_0$  gerilim ve akımın dc bileşeni  $V_n$ , n. harmonik geriliminin efektif değeri,  $\Phi_n$ , n. harmonik geriliminin faz açısı,  $I_n$  n. harmonik akımın efektif değeri ve  $\delta_n$  akımın açısını göstermektedir. Bu güç ifadelerinden  $S^2 = P^2 + Q^2$  olmadığı görülmektedir. Bu nedenle bu güçlerden farklı olarak bir de distorsiyon gücü (D) tanımlanmaktadır. Distorsiyon gücünün fiziksel anlamının tam olarak açıklanamaması sebebiyle literatürde distorsiyon gücünün tanımı, fiziksel anlamı ve reaktif güç ile ilişkisi tartışılmakta, aynı frekanstaki akım ve gerilimlerin meydana getirdiği aktif ve reaktif güç dışında kalan farklı frekanslardaki akım ve gerilim bileşenlerinin çarpımından oluşan ve distorsiyon gücünü oluşturan terimler için akımın distorsiyon gücü, gerilimin distorsiyon gücü, nonaktif güç, aktif olmayan güç vb. tanımlar yapılmış olsa da henüz tam bir görüş birliği sağlanamamıştır (Yumurtacı, 2000).

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.24)$$

bu eşitlikte D distorsiyon gücünü göstermektedir ve bu güç aktif olmayan bir güç olup sinüsoidal işaretli devrelerde sıfırdır (Kocatepe vd., 2003).

Güç faktörü,

$$GF = \frac{P}{S} \quad (2.25)$$

olarak tanımlanır. Bu tanım genel bir tanım olup her durumda (akım ve gerilimin sinüsoidal olması, sistemde harmonik bileşenlerinin bulunması) geçerlidir.

### 2.2.2 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

Harmonikleri sınırlandırmak için kullanılan Toplam Harmonik Distorsiyonun (THD) gerilim ve akım için ifadeleri, temel bileşen hariç tüm harmonik bileşenlerinin toplam efektif değerinin sırasıyla gerilim ve akım için,

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.26)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.27)$$

olarak ifade edilir. Sinüsoidal bir dalga şekli için THD sıfırdır. Benzer şekilde, n. harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları,

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (2.28)$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (2.29)$$

olarak tanımlanır.

### 2.3 Harmonik Kaynakları

Normal bir işletmede harmonik oluşmasına, işletmede bağlı olan nonlineer özelliğe sahip yükler sebep olmaktadır. Günümüzde yarı-iletken elemanların kullanımının yaygınlaşmasıyla, güç sistemlerinde harmoniklerin artmasına neden olmuştur. Harmoniklerin oluşmasına neden olan başlıca kaynaklar aşağıda incelenmiştir.

#### 2.3.1 Generatörler

Generatörler en doğal harmonik üreten elemanlardır. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, magnetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır (Kocatepe vd., 2003).

Dönen makineler, makine ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak harmonikler üretirler (Arrillaga vd., 1985). Generatörler, stator bağlantı şekillerine göre farklı harmonikler üretirler. Stator sargıları yıldız bağlanmışsa, faz gerilimlerinde 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler bulunur. Fazlar arası gerilimlerde bu harmonikler bulunmaz. Generatör stator sargıları üçgen bağlıysa, sargılarda 3'ün katı frekanslı, yüke bağlı olmayan ve büyük kayıplara neden olan bir sirkülasyon akım geçer.

#### 2.3.2 Transformatörler

Enerji sistemlerinde, demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden oluşan elemanlar harmoniklere neden olur (Dommel vd., 1986). Güç sistemlerinin önemli elemanlarından biri

olan transformatörler bunların başında gelir. Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslama karakteristiğinin lineer olmamasından, yani transformatörün doymasından kaynaklanmaktadır. Transformatör çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer özelliğe sahip olmadığından uygulanan sinüsoidal uyarma akımı sonucu sinüsoidal akım ve gerilim oluşamamaktadır (Kocatepe ve Demir, 1998).

Normal işletme şartlarında ve sinüsoidal gerilimle çalışan transformatörler, 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 olabilir (Szabados ve Lee, 1981).

Sistemden çekilen yükün az olduğu günün erken saatlerinde, mıknatıslanma akımı harmonikleri en yüksek seviyelere ulaşır. Harmoniklerin yüksek seviyeye ulaşmasının sebebi transformatörde aşırı uyarmanın meydana gelmesidir. Aşırı uyarmayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5., 7. harmonikler etkili olurlar (Arrillaga vd., 1985). Akım şiddeti bakımından 3. harmonik en önemlisidir. Aralarında 360 derecelik faz farkı olan 3 ve 3'ün katları harmonikler aynı fazdadır.

Mıknatıslanma akımının şebekeye geçip geçmemesi transformatörün bağlantı grubuna, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmamasına ve transformatördeki magnetik devrenin geometrik yapısına bağlıdır. (Arıkan, 2003).

### 2.3.3 Konverterler

Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklarından biride hat komütasyonlu konverterlerdir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenir (Kocatepe, 1995). Konverterlerin çalışma prensibi akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanır. Akımdaki bu kesilme nonlineer olma durumudur. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterlerin bir fazlı konverterlere göre avantajı, üç fazlı konverterlerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir. Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen a.c. akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile tanınır (Kocatepe vd., 2003).

Darbe sayısının  $p$  olduğu bir konverterin oluşturacağı akım harmoniklerinin mertebesi,

$$h = p \cdot k \pm 1 \quad (2.30)$$

burada  $k = 1, 2, 3, \dots$  gibi sabitler olmaktadır.

Örneğin, 6 darbeli bir konverterin akımı,

$$i_a(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left( \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \right) \quad (2.31)$$

olarak yazılır. Burada  $i_a(t)$  hat akımının ani değeri,  $I_d$  doğrultucu tarafındaki akımdır. Bu ifadeden de anlaşılabacağı gibi harmonik akımlarının genliği harmonik frekansı ile ters orantılıdır. Harmonik akımının efektif değerini azaltmak için darbe sayısı ( $p$ ) ve harmonik akımın mertebesi artırılır (Karakas, 2000).

### 2.3.4 Ark Fırınları

Ark fırınları, geniş harmonik spektrumları ile büyük güçlü nonlinear yükler arasında önemli bir yer tutar. Ark fırını bulunan işletmeler için harmonik oluşum nedeni olarak, ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması ileri sürülmektedir (Arrillaga vd., 1985). Ark fırınlarının empedansı dengesizdir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının rastgele değişim göstermesine sebep olduğundan ark fırının modellenmesini güçleştirir. Ark olayında akım ve gerilim, ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına, ocaktaki malzemeye ve elektrot mesafesine bağlı olarak değişir.

Bu konuda yapılan deneysel çalışmalardan çeşitli değerler elde edilmiştir. Örneğin, tipik bir ark fırınında 2,3,..., 9 mertebesinde akım harmonikleri bulunmuş ve maksimum harmonik bileşenin temel bileşenin %30'u kadar olduğu tespit edilmiştir (Sundberg, 1976). Ayrıca 2,3,4 ve 5 mertebesindeki akım harmoniklerinin temel bileşen akımının yaklaşık %2'si ile %4'ü arasında ve 6,7,...,10 mertebesindeki akım harmoniklerinin ise temel bileşen akımının yaklaşık %0.4'ü ile %1.3'ü arasında dağılım gösterdiği de tespit edilmiştir (Yumurtacı, 2000).

### 2.3.5 Gaz Deşarjlı Aydınlatma Elemanları

Fluoresant, civa buharlı, neon, yüksek basınçlı gibi gaz deşarj prensibine göre çalışan lambalar nonlinear akım ve gerilim karakteristiğine sahip oldukları için harmonik üretirler. Konutlarda, işyerlerinde, yol aydınlatmasında çok sık kullanılan floresant lambalar, manyetik balastlarından ve gaz deşarjından dolayı harmonik bileşenlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Son yıllarda magnetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlama güç kaynağı prensibi ile çalışan elektronik balastlar da harmonik üretmekle beraber balast içerisine monte edilen filtre ile elektronik balastın ürettiği harmonik

bileşenlerini elimine etmek mümkündür (Dugan vd., 1996).

Burada detaylı olarak incelediğimiz yukarıdaki harmonik kaynaklarından başka aşağıda maddeler halinde verilen nonlinear yüklerde harmoniklerin oluşmasına sebep olmaktadır:

- Statik VAR kompanzatörler,
- Yarı iletken elemanlar,
- Motorlar,
- Senkron makinelerin uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayarlar,
- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlama güç kaynakları,
- Kaynak makineleri,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüleri,
- YGDA sistemleri.

#### 2.4 Harmoniklerin Etkileri

Harmonikler güç sisteminde ve güç sistemine bağlanan elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirirler. Harmonikler, motorlar, generatörler, kondansatörler, transformatörler ve enerji iletim hatlarında ilave kayıplara neden olurlar (Kocatepe vd., 2003). 50 Hz şebeke frekansının katları olan harmonik akımı frekanslarından dolayı rezonansın meydana gelmesi olasılığı artacaktır. Olası bir rezonans sonucu oluşabilecek büyük akım ve gerilim değerleri sistemdeki elemanlara zarar verebilir. Harmoniklerin enerji sistemlerinde yol açtığı problemler genel olarak şöyle özetlenebilir (Kocatepe, 1995; IEEE Working Group on Power System Harmonics, 1983):

- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin sinüs formundan sapması sebebiyle tüketicilerin çalışma koşullarının bozulması.
- Enerji sistemi elemanlarında ve yüklerde harmonikler nedeniyle ek kayıpların oluşması.
- Akımın harmonik bileşenleri nedeniyle gerilim düşümünün artması.
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik

frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve dielektrik zorlanma nedeniyle hasar görmeleri.

- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların meydana gelmesi ve bu nedenle aşırı ısınmaları.
- Koruma sistemlerinin harmonikler nedeniyle hatalı çalışmaları.
- Kontrol sistemlerinde hatalı çalışmalar.
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması.
- İzolasyon malzemesinin delinmesi.
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması.(Yumurtacı, 2000)

#### 2.4.1 Ölçü ve Koruma Düzenlerine Etkisi

Akımdaki harmonik bozulması anahtarın akım kesme yeteneğini etkilemektedir. Bozulma, akımın sıfır geçişinde temel frekanstaki, normal sinüs değerine göre daha yüksek bir değişim hızına yol açabilmekte, bu ise kesmeyi zorlaştırmaktadır.

Bir ölçme cihazını seçerken veya kullanırken dikkat edilmesi gereken en önemli etkenlerden biri bu cihazların çalışma prensipleridir. Hemen hemen bütün ölçü cihazları ölçülen işaretin etkin değerini verecek şekilde kalibre edilmişlerdir. Etkin değer ölçmek için kullanılan en yaygın olanları,

- Tepe değer yöntemi: Bu yöntemde, işaretin sinüsoidal olduğu kabul edilerek, ölçme cihazı, işaretin tepe değerini alıp etkin değerini elde etmek için 1,414 ile bölmektedir.
- Ortalama yöntemi: cihaz, işaretin ortalama değerini almaktadır. Saf sinüsoidal işaretin ortalama değerini almaktadır. Saf sinüsoidal işaret için bu ortalama değer bir katsayı ile etkin değere eşitlenmektedir.
- Gerçek etkin değer: Bir işaretin efektif değeri, bir dirence uygulanan gerilim sonunda oluşan ısıнын ölçüsü olarak verilmektedir. Gerçek etkin değeri ölçmek için bir başka yöntemde ısı değerini ölçen termal dedektör kullanılmasıdır.

Bütün bu değişik yöntemler saf sinüs için aynı değeri verse de bozulmuş bir işaret için farklı sonuçlar vermektedir. Uygulamada faz ve nötr akımlarının dalga şekillerinde harmonik akımlar nedeniyle bozulma olduğunda bu akımların doğru olarak ölçülmesi önemli olmaktadır.

#### 2.4.2 Kondansatörler ve Kompanzasyon Sistemine Etkileri

Güç faktörünün düzeltilmesi için kullanılan kondansatörlerin, sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri vardır. Kondansatörlerin kendileri harmonik üretmezler, fakat sistemde rezonans koşulları için uygun çevrimleri oluştururlar. Kondansatörler, sistemi her zaman belli bir frekansta rezonansa getirir. Bu frekans, yük akımının veya sistem geriliminin harmoniklerinden birine eşit olursa, büyük akımlar ve gerilimler meydana gelebilir. Bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansı,

$$n = \sqrt{\frac{Q_s}{Q_c}} \quad (2.32)$$

bağıntısıyla bulunur. Burada n, rezonansın meydana gelebileceği harmoniğin derecesi.  $Q_s$ , sistemin kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü,  $Q_c$  ise kondansatörün toplam gücünü gösterir.

Kapasitif empedans frekans arttıkça azalır. Bu da herhangi bir harmoniğin akımdaki oranının, gerilimdeki oranından büyük olmasına böylece kondansatör akımının artmasına ve ilave ısınmalara yol açar (Atmaca, 1995).

Harmonikli sistemlerde kompanzasyon için kullanılan kondansatörler, harmonikler göz önüne alınarak aynı zamanda filtre olarak tasarlanmalıdır. Sistem harmonik frekanslarına uygun olarak tasarlanmış bir harmonik akım filtresi, harmonik bozulmayı azaltıp, gerilim ve güç faktörünün düzeltilmesini sağlar (Gürsoy vd., 1999).

#### 2.4.3 Hassas Elektronik Cihazlar ve Elektronik Donanım Üzerine Etkileri

Harmonikler, elektronik devrelerin hatalı çalışmasına, hatta bozulmalarına neden olabilirler. Sıfır geçişlerini algılayan cihazlar, harmonikli durumda sıfır geçişleri değişeceğinden hatalı çalışacaktır. Evlerde kullanılan dijital saatlerin ileri gitmesi bu etkiden kaynaklanır.

Elektronik güç kaynakları, filtre kondansatörlerini tam yükte tutmak için gerilimin tepe değerini kullanır. Harmoniğin frekansına ve fazına bağlı olarak, gerilim bozulması tepe değerini arttırabilir veya dalga tepesini düzleştirebilir. Böylece, giriş gerilimi normal rms değerinde olsa bile, güç kaynağı giriş geriliminin altında veya üstünde bir gerilimde çalışacaktır. Gerilim bozulması şiddetli olursa güç kaynağı olağandışı bir çalışma gösterebilir.

Temel frekansın tam katları olmayan harmonikler ve temel frekanstan daha düşük frekanslı harmonikler ise video cihazlarını ve televizyonları etkilemekte, görüntüyü bozmaktadır.

#### 2.4.4 İletkenler Üzerine Etkileri

Harmonik akımlar iletkenlerde kayıpların artmasına dolayısıyla da ısınmanın artmasına sebep olurlar. Harmonik akımlar iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma meydana getirirler. Birincisi, literatürde deri etkisi olarak bilinen “skin-effect” sonucudur. Harmonik frekansının artmasına bağlı olarak akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşması sonucu etkin direncin artmasıyla meydana gelen ek artıştır. İkinci etki ise, tek fazlı yükleri besleyen 3-fazlı 4 telli sistemlerin nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesi ile karşımıza çıkar. Bazı nonlineer elemanlar büyük değerde 3 ve 3’ün katları harmonik bileşenleri üretirler.

#### 2.4.5 Direnç Üzerindeki Etkisi

Harmoniklerin bulunmadığı bir sistemde, direnç üzerinden sinüsoidal bir dalga şekline sahip akımın temel bileşeni geçer. İletkenin akım geçişine esas olarak kullanılan kesiti, harmonik bileşenlerin frekansının artması ile (deri etkisi sonucu) azalmaktadır. Kesit azalmasının bir sonucu olarak iletkenin temel bileşen omik direncine harmonikler nedeniyle ilave direnç ( $R_h$ ) gelmektedir. Harmonikli akıma gösterilen toplam omik direnç  $R = R_o + R_h$  olur. Frekans artışı ile direnç değerinin değişimine ait çok kullanılan ifade şöyle verilir (Çakır, 1989):

$$x = 1,585 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{f/R_o} \quad (2.33)$$

olmak üzere

$$\begin{array}{ll} 0 \leq x \leq 3 & \text{için} \\ x > 3 & \text{için} \end{array} \quad \begin{array}{l} R = R_o \cdot K_1 \\ R = R_o \cdot K_2 \end{array}$$

dir. Burada,

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[ \left( 1 + \frac{x^4}{48} \right)^{1/2} + 1 \right] \quad (2.34)$$

$$K_2 = \left[ \frac{x}{2.828} + 0,26 \right] \quad (2.35)$$

Burada,  $R_o$ , doğru akım direnci ve  $R$ , deri etkisi dahil toplam direnci göstermektedir (Arıkan, 2003).

#### 2.4.6 Reaktanslar Üzerine Etkisi

Güç sistemlerinin modellenmesinde reaktanslar oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Temel

bileşendeki değeri  $X_L$  olan endüktif bir reaktans, n. harmonikte,

$$X_{Ln} = n \cdot X_L \quad (2.36)$$

olarak gösterilir.

Temel harmonikteki değeri  $X_c$  olan kapasitif bir reaktans, n. harmonikte,

$$X_{cn} = \frac{X_c}{n} \quad (2.37)$$

değerini alır.

#### 2.4.7 Devre Kesiciler ve Sigortalar Üzerine Etkisi

Akımdaki harmonik bozulma, devre kesicilerin akımı kesme yeteneğini etkilemektedir. Bozulma akımının sıfır geçişinde, temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızına (daha yüksek bir  $di/dt$  oranına) yol açabilmekte, bu da sonuç olarak kesmeyi zorlaştırmaktadır.

Devre kesicilerin çalışmasındaki aksaklık, elektromanyetik endüksiyon bobininin harmoniklerin varlığında doğru çalışmamasından kaynaklanmaktadır. Bobin, arkı, söndürüldüğü yer olan ark hücrelerine süren manyetik alanı yaratmak için kullanıldığından bunun çalışmasındaki anormallikler arkın yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına yol açmaktadır. Literatürde bu olaya "Reigniton" denmektedir.

Harmonik akımlar ilave ısınmalara neden olduklarından, sigortaların çalışma karakteristiklerinin değişmesine ve akımı zamansız kesmelerine yol açar (Kocatepe vd., 2003).

#### 2.4.8 Aydınlatma Donanımı Üzerine Etkisi

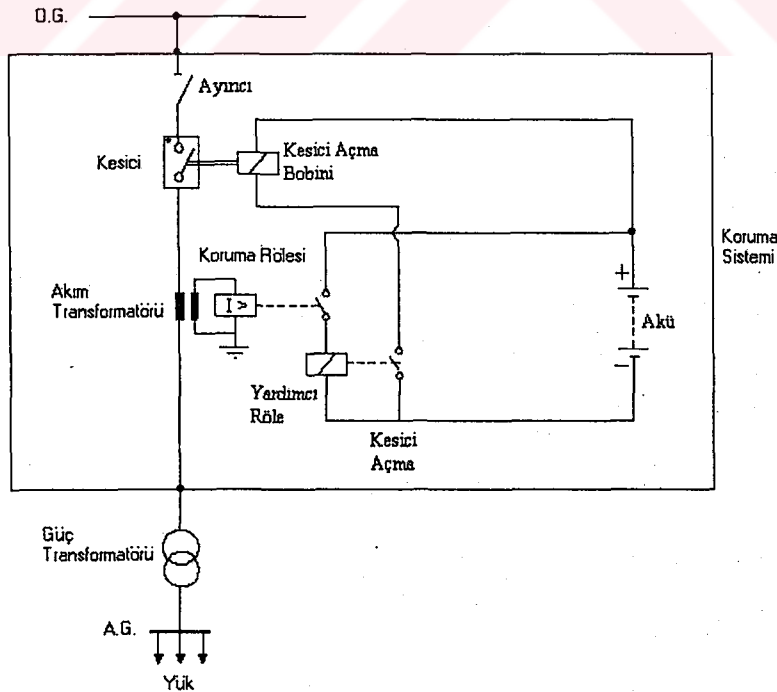
Akkor lambaların ömrü, bozulmuş gerilimde çalıştırıldıklarında kısalmaktadır. Bu durum, lambanın içindeki flamanın aşırı ısınmasından kaynaklanmaktadır. Normal gerilimin %5 üstünde bir gerilimde kullanıldıklarında, akkor lambanın ömrünün %47 oranında azaldığı görülmüştür. Harmonik kaynaklı gerilim bozulmasının flüoresan lambalar üzerinde ise işitilir bir gürültüye yol açmak dışında bir etkisi yoktur.

### 3. KORUMA İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

Elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtımında ana problemlerden biri “koruma”dır. Genel anlamda koruma enerji üretim cihazlarını, iletim hatlarını ve bu enerjiyi kullanan cihazların, emniyetli işletme şartları içinde çalışmasını sağlamak ve herhangi bir nedenle önceden belirlenmiş bu şartların dışına çıkan bölümü (arızalı bölümü) şebekenin bütününden ayırmak izole etmektir. Bu sağlandığında koruma şebeke için iki yönde anlam kazanır. Birincisi, arızalı bölümü şebekeden ayırarak daha fazla tahrip olmamasını sağlamak; ikincisi ise, arızanın şebekede daha geniş bir alana yayılmasını önlemektir.

#### 3.1 Koruma Sistemini Oluşturan Elemanlar

- Kesiciler (Arızalı kısmı ayırmak, arıza akımını kesmek için)
- Koruma Röleleri (Arızanın varlığını saptamak ve kesiciye açma kumandası vermek için)
- Akım ve Gerilim Transformatörleri (Koruma rölelerini yüksek gerilimden izole etmek, rölelerin düşük akım ve gerilimle çalışmasını sağlamak, böylece personelin can güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılır.)
- 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 3.1 Koruma sistemi

Pratikte, koruma rölesi kontağı doğrudan kesici açma bobinine bağlanmaz. Bu bobinin endüktans değerinin ya da akımın yüksek olması sebebiyle koruma rölesi kontağı oluşacak arklara dayanamaz. Bunun yerine koruma rölesi bir yardımcı röleye kumanda eder. Yardımcı röle, kontağı daha büyük akıma dayanabilecek şekilde seçilmiştir. Koruma rölesi devreye girdiği zaman yardımcı röle bobini enerjilenir. Yardımcı rölenin kontakları konum değiştirerek kesiciye kumanda edilmesini sağlar. Böylece koruma rölesinin kontak sayısı dolaylı olarak arttırılmış olur (Yumurtacı, 1995).

### 3.2 Koruma Sisteminden Beklenen Özellikler

Koruma düzenlerinin 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.

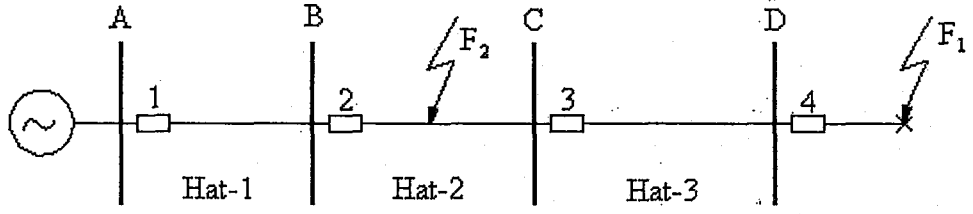
Bu görevi yerine getirmesi beklenen koruma sisteminin;

- Seçicilik,
- Hızlı çalışma,
- Güvenilir çalışma,
- Basit olma,
- Yedek koruma,
- Ekonomik olması,

özelliklerine sahip olması gerekir.

#### 3.2.1 Seçicilik (Selektivite)

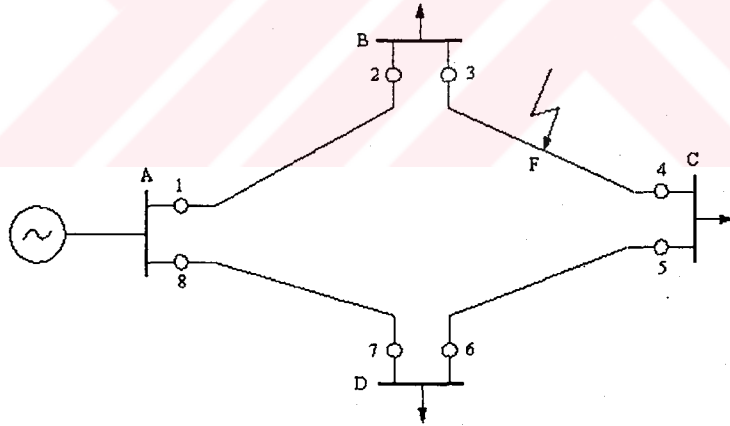
Selektif korumanın amacı; şebekenin herhangi bir bölümünde meydana gelen arızanın yayılma alanının minimumda sınırlamak için, yalnız arızalı bölümü en kısa zamanda devre dışı bırakmaktır. Selektif koruma planlaması yapılırken şebekenin tümü gözönünde bulundurulmalı, ayrıca gelecekte yapılabilecek ilaveler de hesaba katılmalıdır. Şebekenin teknik değerlerine göre seçilen koruma sisteminin fonksiyonlarını tam olarak yerine getirip getirmeyeceği önemle incelenmeli ve buna göre seçim yapılmalıdır (Mansuri, 1984).



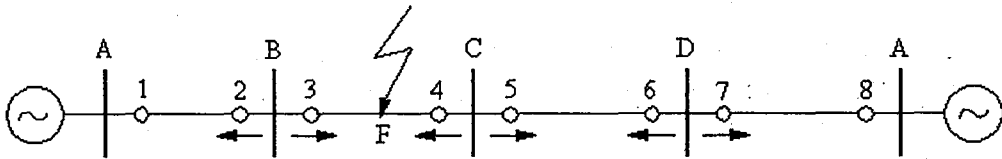
(□: Kesici + koruma düzenini göstermektedir)

Şekil 3.2 Radyal şebekede seçici koruma

Yukarıdaki radyal şebekede  $F_1$  noktasındaki arızada 4 nolu kesici açarak arızayı temizlemelidir. Böylece sadece arıza bölgesinin enerjisi kesilecek A, B, C baralarına bağlı yükler devrede kalacaktır.  $F_1$ 'deki arıza 1 nolu kesicinin açılması ile de temizlenebilirdi. Ancak bu durumda tüm sistemin enerjisi kesilecekti. Bu sistemde  $F_1$ 'deki arızada 4 nolu kesici mekanik arıza veya koruma sisteminin çalışmaması sebebiyle açma yapmazsa, 4 nolu kesicinin açmasına müsaade edecek kadar beklendikten sonra belirli bir zaman gecikmesi ile D barasının yedek koruması durumundaki 3 nolu kesici açacaktır. Şekil 3.2'deki radyal şebekede  $F_2$  noktasındaki arızada 2 nolu kesici açacaktır. 2 nolu kesici hemen açmazsa, belirli bir zaman gecikmesinden sonra 1 nolu kesici açacaktır.



(a)



(O: Kesici + koruma düzenini gösteriyor)

(b)

Şekil 3.3 Ring şebekede seçici koruma

Şekil 3.3(a)'deki ring şebekeyi A barasındaki 1 ve 8 uçlarından açarsak, Şekil 3.3(b)'deki şebekeyi elde ederiz. Ring şebekelerde kullanılan koruma röleleri yönlü koruma yapar ve şemada gösterilen ok yönündeki arıza akımlarında röle çalışır, ters yöndeki akımlarda çalışmaz. Yukarıdaki ring şebekede seçici koruma yapıldıysa F noktasındaki arızada arıza noktasına en yakın kesiciler olan 3 ve 4 kesicileri öncelikle açacaktır. Böylece sadece arızalı kısım şebekeden ayrılır. Bu sistemde seçicilik iyi sağlandıysa F noktasındaki arızada 3,4 açmalı, 3 açmaz ise onun yedeği durumundaki 1 zaman gecikmeli olarak, 4 açmaz ise onun yedeği olan 6 zaman gecikmeli olarak açacaktır (Gönen, 1988).

### 3.2.2 Hızlı Çalışma

Koruma sistemi, bir arıza meydana geldiğinde olabildiği kadar kısa sürede çalışmalıdır. Herhangi bir işletme elemanında arıza ne kadar çabuk tespit edilir ve bu eleman devre dışı bırakılırsa, büyük kısa devre güçlerine rağmen ortaya çıkacak arızalar ve bunların onarımı için geçecek zamanla yapılacak masraflar da o kadar azalır. Ayrıca arızanın kısa sürede ortadan kaldırılması şebekenin dinamik kararlılığının devamını sağlar ve arıza tüketiciler tarafından fark edilmez (Yumurtacı, 1995).

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 (Gönen, 1988).

### 3.2.3 Güvenilir Çalışma

Bir koruma rölesinin veya koruma sisteminin güvenilirliği, hatasız olarak doğru çalışması, yanlış kesici açmalarına neden olmaması, arıza meydana geldiğinde çalışacağından emin olunabilmesi olarak açıklanabilir.

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.

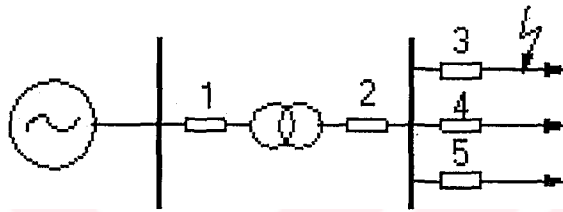
Koruma Sisteminin Yanlış Açma Sayısı / Arıza Sayısı oranı azaldıkça koruma sisteminin güvenilirliği artar.

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 3.4 Örnek devre

Örnek; Şekil 3.4'deki 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).

### 3.2.4 Basitlik

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 (Taylan, 1965).

### 3.2.5 Yedek Koruma

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 (Üçleröglü, 1984).

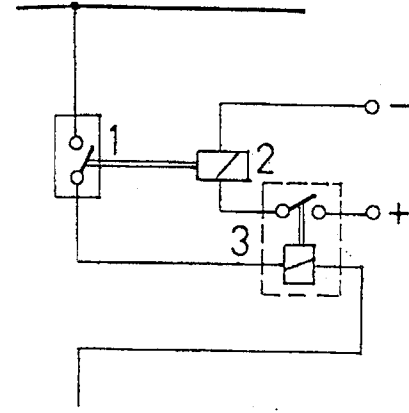
### 3.2.6 Ekonomik Koruma

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.

### 3.3 Koruma Röleleri

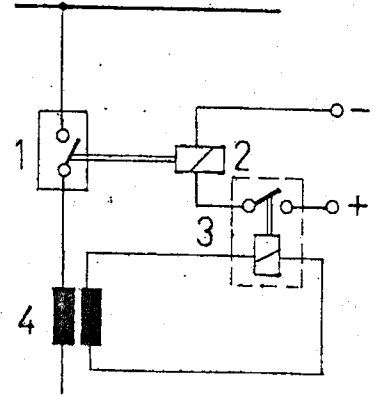
Elektrik güç sistemlerindeki elemanları (hat, transformatör, generatör vb.) korumak amacıyla kullanılan, girişine uygulanan çalışma büyüklüğü (akım, gerilim, empedans, sıcaklık, basınç vb.) rölenin ayarlandığı sınır değerlerin dışına çıktığında kontağını açarak veya kapatarak bir açma-kapama elemanına 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.



a)Primer röle

1. Kesici
2. Kesici açama bobini
3. Koruma rölesi
4. Akım transformatörü



b)Sekonder röle

Şekil 3.5 Röleler

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 tez çalışmasının konusu harmoniklerin aşırı akım rölelerine etkisidir. Bu nedenle aşağıda, koruma röleleri olarak sadece aşırı akım röleleri incelenmiştir.

### 3.3.1 Aşırı Akım Röleleri

#### 3.3.1.1 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.

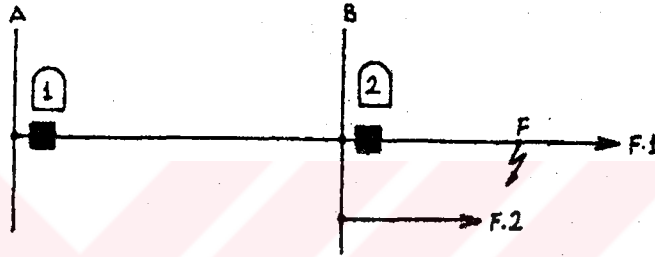
**Çalışma zamanı:** Bir aşırı akım rölesinin, çalışma akımının üzerinde bir akımla beslendiği andan kontağını kapattığı ana kadar geçen süre olarak tanımlanır ve  $t_c$  ile belirtilir.

**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 dekuplaj akımı da denir.

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

$$K_{gd} = \frac{I_{gd}}{I_c} \quad (3.1)$$

Geri dönüş oranı orta gerilim şebekelerindeki röleler için önemli özelliktir. Bunu alttaki Şekil 3.6 yardımıyla açıklayabiliriz (Koruma - Kontrol Teknisyeni El Kitabı III).



Şekil 3.6 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 periyot

süreyle) hasar görmeden taşıyabileceği maksimum akım değeridir.

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

### 3.3.1.2 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).

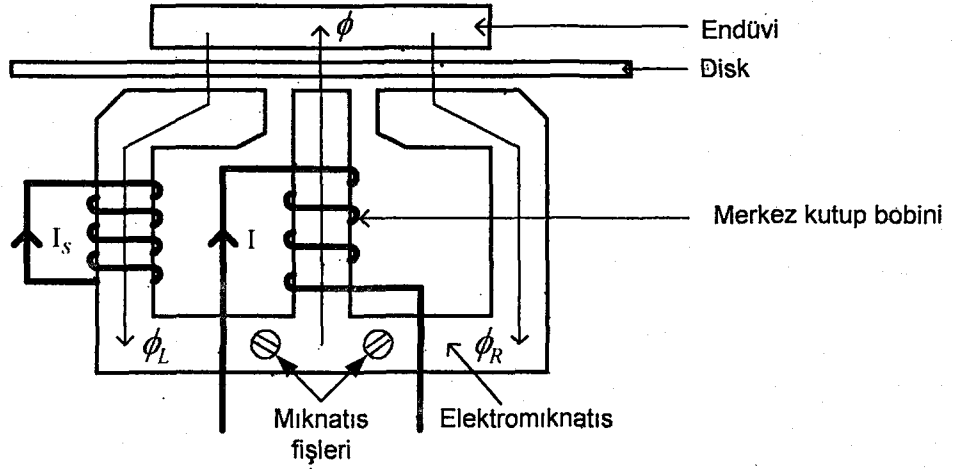
### 3.3.1.3 Elektromekanik (İndüksiyon Diskli) Röle

Bu röleler, elektromıknatıs ve döner alüminyum disk düzleminde indüklenen akımların etkileşiminden oluşan tork sayesinde çalışırlar. Şekil 3.7'deki ünite diskin bir tarafında 3 adet kutba sahiptir ve aynı zamanda ortak manyetik üye ya da karşı tarafında koruyucusuna da sahiptir. Ana sargı merkez ayağın üzerinde bulunmaktadır. Ana sargıdaki I akımı, diskten ve hava boşluğundan tutucuya geçen  $\Phi$  akısını oluşturur.  $\Phi$  akısı sol el ayağında  $\Phi_L$ 'ye, sağ el ayağında da  $\Phi_R$ 'ye dönüşür.

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

(3.2)

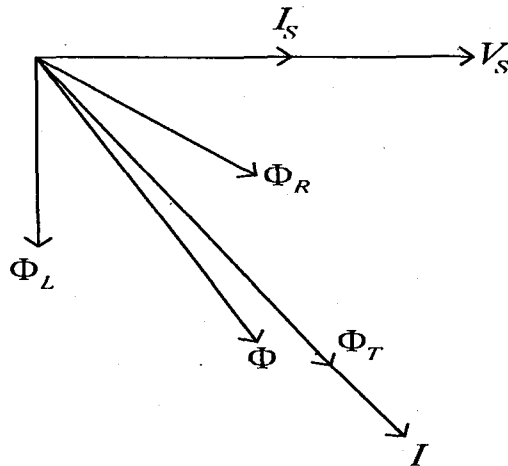
dir.



Şekil 3.7 İndüksiyon disk ünitesi

Sol ayaktaki geciktirici bobindeki kısa devre  $\Phi_L$ 'nin  $\Phi_R$  ve  $\Phi$  'den geri kalmasına sebep olur ve böylece bölünmüş faz motor hareketi oluşturur. Şekil 3.8'de gösterilmiştir.  $\Phi_L$  akısı özellikle aynı fazda ve kısa devre geciktirici bobininde  $V_S$  gerilimini oluşturur ve  $I_S$  akımı devreden geçer (Applied Protective Relaying, 1976).

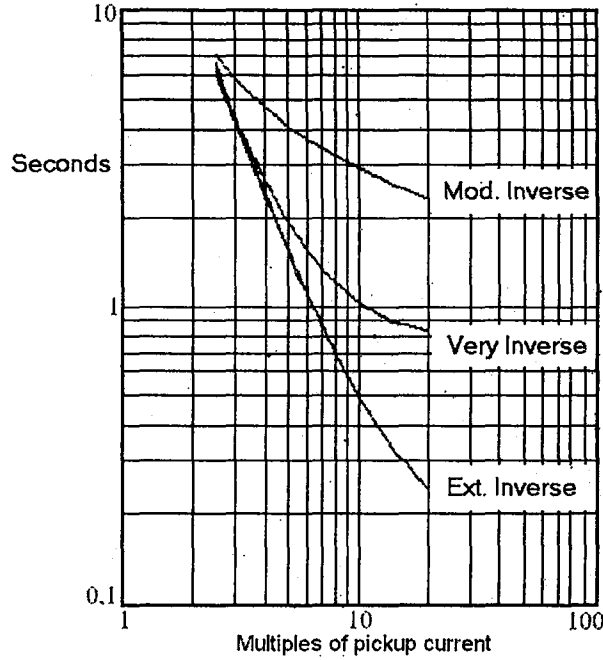
$\Phi_T$ , ana bobin akımı  $I$  tarafından oluşan toplam akıdır. 3 akı disk hava boşluğundan geçerek diskte girdap akımlarını oluşturur. Bu girdap akımları karşı akıları oluşturur ve 2 takım akının etkileşimi diski döndüren momenti oluşturur. Şekilde gösterilen aynı referans yönlü 3 akı için, akı soldan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



Şekil 3.8 Ters zamanlı aşırı akım rölesinin fazör diyagramı

Şekil 3.9'da 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 eğrisi daha az ters zamanlı aşırı akım rölelerinin çalışma eğrileridir.



Şekil 3.9 Ters zamanlı aşırı akım rölesinin standart akım-zaman karakteristiği (IEEE Standart, 1996)

Burada;

t: reset zamanı

M:  $I_{giriş}/I_{çıkış}$

A: sabit

Giriş yönü ne olursa olsun, disk her zaman aynı yönde hareket eder. Eğer geciktirici bobini açık olursa, moment oluşmaz. Diğer üniteler, böylece indüksiyon disk ünitesindeki momenti kontrol eder. Genellikle geciktirici bobin devresine yönlendirici ünite ilave edilir. Yönlendirici üniteye kontak kapandığında, indüksiyon disk ünitesinde tork olur, kontak açıldığında üniteye tork olmaz.

### 3.3.1.4 Statik (Yarı İletken) Röleler

Mevcut bulunan koruma sistemi ve bu sistemdeki elemanların ihtiyacı karşılamada yeterli olması, teknolojik araştırma ve gelişmeleri etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu gün mevcut koruma sistemlerindeki koruma rölesi ihtiyacının çoğu kullanımda sorun yaratmayan elektromagnetik röleler tarafından karşılanmaktadır. Koruma devrelerinin güvenilirliği ve çalışma hızı kullanılan indüksiyon diski, hareketli bobin veya hareketli armatür (menteşe

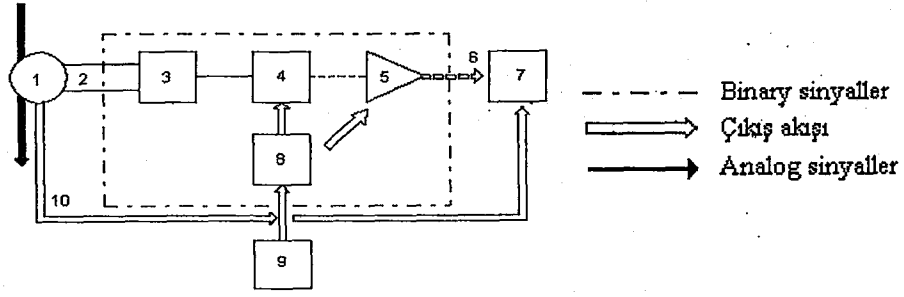
armatür) elemanlarının karakteristiklerine bağlıdır. Ancak aşağıda belirtilen özellikler statik rölelerin gelişimini ve bu rölelere duyulan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu özellikler:

- Statik rölelerin performans ve karakteristikleri elektromagnetik rölelerden daha iyidir. Statik rölelerin önemli uygulama alanlarından birisi olan statik mesafe rölelerinde daha yüksek doğruluk ve duyarlılıkla birlikte çalışma hızı da yüksektir.
- İmalatta standartlaşmayı sağlamak kolaydır.
- İmalatı daha kolaydır ve bakım süresi daha kısadır.

#### 3.3.1.4.1 Statik Rölelerin Temel Yapısı

Koruma röleleri koruma fonksiyonlu analog-ikili sistem (binary) dönüştürücüleridir. 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 bir binary sinyaldir. Röle kesiciyi açtırmayacak ise çıkış sinyali açık (OFF) sinyaldir. Eğer röle kesiciyi açtıracaksa çıkış sinyali kapalı (ON) sinyal olur. Bu çıkış sinyalleri bir sonraki kontrol elemanı tarafından değerlendirilir.

Bir koruma rölesi Şekil 3.10'de gösterilen temel blok diyagrama göre buradaki elemanların sırayla birleştirilmesinden meydana gelir. Bir akım veya gerilim ölçü transformatörü olan ölçme elemanından alınan ve sürekli değişken 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 çıkışında kapalı bir sinyal elde edilir. Çıkış elemanı (5) ölçme elemanından alınan zayıf binary sinyali kuvvetlendirerek bir ya da 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 3.10 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.

## 4. YAPAY SİNİR AĞLARI

### 4.1 Giriş

Yapay sinir ağları kısaca YSA, olayların örneklerine bakmakta onlardan ilgili olay hakkında genellemeler yapmakta, bilgiler toplamakta ve daha sonra hiç görmediği örnekler ile karşılaşınca öğrendiği bilgileri kullanarak o örnekler hakkında karar verebilmektedir (Öztemel, 2003). Yapay sinir ağları, temelde tamamen insan beyni örneklenerek geliştirilmiş bir teknolojidir. Bilindiği gibi; öğrenme, hatırlama, düşünme gibi tüm insan davranışlarının temelinde sinir hücreleri bulunmaktadır. İnsan beyninde tahminen  $10^{11}$  adet sinir hücresi olduğu düşünülmektedir ve bu sinir hücreleri arasında sonsuz diyebileceğimiz sayıda sinaptik birleşme denilen sinirler arası bağ vardır. Bu sayıdaki bir birleşimi gerçekleştirebilecek bir bilgisayar sisteminin dünya büyüklüğünde olması gerektiği söylenmektedir; ancak 50 yıl sonra bunun büyük bir yanılgı olmayacağını bu günden kimse söyleyemez. İnsan beyninin bu karmaşıklığı göz önüne alındığında, günümüz teknolojisinin 1.5 kg.lık insan beynine oranla henüz çok geride olduğunu söylemek yanlış olmaz (Ergezer vd., 2003).

### 4.2 Yapay Sinir Ağlarının Tanımı ve Modeli

Yapay sinir ağları, insan beyninin özelliklerinden olan öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri herhangi bir yardım almadan otomatik olarak gerçekleştirmek amacı ile geliştiren bilgisayar sistemleridir (Öztemel, 2003). Genel anlamda YSA, beynin bir işlevini yerine getirme yöntemini modellemek için tasarlanan bir sistem olarak tanımlanabilir.

YSA, girdi ve çıktı değişkenleri arasında herhangi bir ön bilgiye ihtiyaç duymadan, herhangi bir varsayımda bulunmadan, doğrusal olmayan modellemeyi sağlayabilmektedir. Ağa, girdi bilgileri ve bu bilgilere karşılık gelen çıktı bilgileri verilmekte ve ağın girdi-çıktı bilgileri arasındaki ilişkiyi öğrenmesi sağlanmakta, böylece ağın eğitimi gerçekleştirilmektedir (Hamzaçebi ve Kutay, 2004).

İnsan beyninin fonksiyonel özelliklerine benzer şekilde, öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, özellikle belirleme ve optimizasyon gibi konularda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Öztemel, 2003).

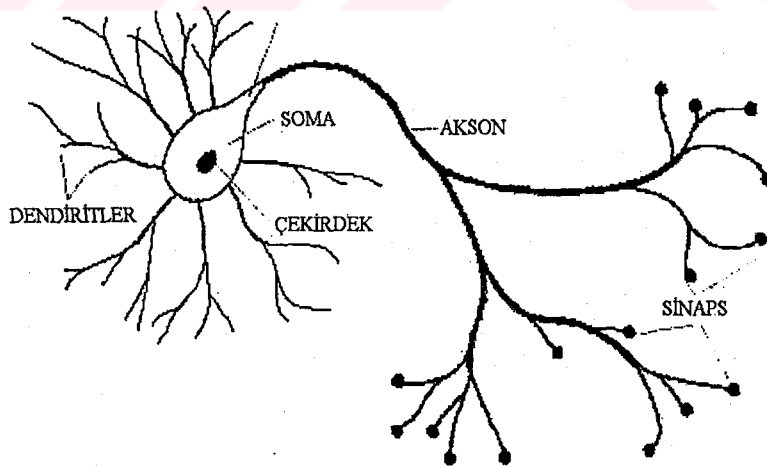
Biyolojik sinir sistemi, merkezinde sürekli olarak bilgiyi alan, yorumlayan ve uygun bir karar üreten beynin (merkezi sinir ağı) bulunduğu 3 katmanlı bir sistem olarak açıklanır. Alıcı

sinirler (receptor) organizma içerisinde ya da dış ortamlardan algıladıkları uyarıları, beyne bilgi ileten elektriksel sinyallere dönüştürür. Tepki sinirleri (effector) ise, beyinin ürettiği elektriksel darbeleri organizma çıktısı olarak uygun tepkilere dönüştürür. Şekil 4.1’de bir sinir sisteminin blok gösterimi verilmiştir (Fırat ve Güngör, 2004).



Şekil 4.1 Biyolojik sinir sisteminin blok gösterimi (Öztemel, 2003)

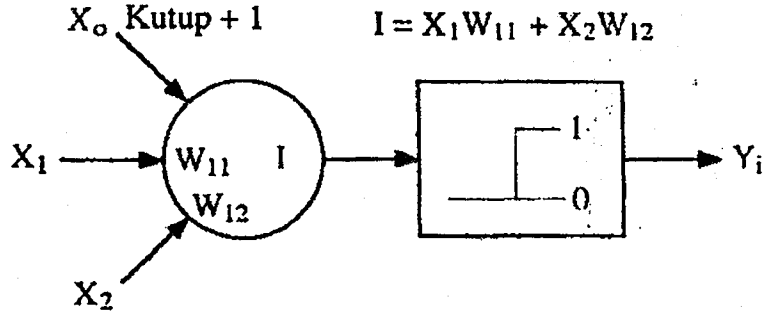
Merkezi sinir ağında bilgiler, alıcı ve tepki sinirleri arasında ileri ve geri besleme yönünde değerlendirilerek uygun tepkiler üretilir. Bu yönüyle biyolojik sinir sistemi, kapalı çevrim denetim sisteminin karakteristiklerini taşır. Merkezi sinir sisteminin temel işlem elemanı, sinir hücresi (nöron)’dır. Sinir hücresi Şekil 4.2’de gösterildiği gibi; çekirdek, soma, sinapsler, dendritler ve aksonlardan meydana gelir. Sinapsler sinir hücreleri arasındaki bağlantılar olarak görülebilir. Bunlar fiziksel bağlantılar olmayıp bir hücreden diğerine elektrik sinyallerinin geçmesini sağlayan boşluklardır. Bu sinyaller somaya giderler. Soma bunları işleme tabi tutar, sinir hücresi kendi elektrik sinyalini oluşturur ve akson aracılığı ile dendritlere gönderir (Öztemel, 2003). Dendritler, diğer hücrelerden aldığı bilgileri hücre gövdesine bir ağaç yapısı şeklinde ince yollarla iletir. Aksonlar ise elektriksel darbeler şeklindeki bilgiyi hücreden dışarı taşıyan daha uzun bir yoldur (Fırat ve Güngör, 2004).



Şekil 4.2 Bir biyolojik sinir hücresinin yapısı

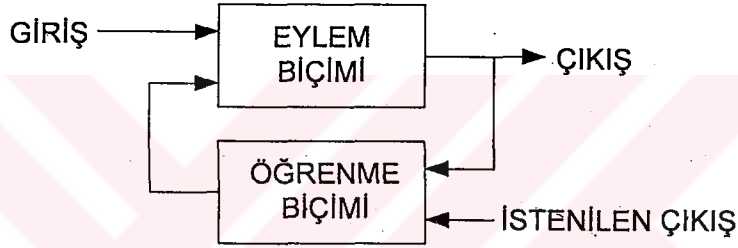
Sinir sistemi milyarlarca nöron ile tek bir nörondan çıkan aksonun 10000 kadar diğer nöronu bağlayan bir ağıdır. Sinapslarla düzeltilen işaretleri taşıyan aksonlar ve dendritlerle iç içe

geçmiş nöronlar bir sinir ağı oluştururlar. Şekil 4.3'de en basit formda gösterilen nöron modeli, bir eşik birimi olarak algılanabilir.



Şekil 4.3 Nöron modeli

Şekil 4.4'de ise YSA'nın genel blok şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.4 YSA'nın genel blok şeması

Eşik birimi, çıkışları toplayan ve sadece girişin toplamı eşik değerini aştığında bir çıkış üreten işlem elemanıdır. Bir eşik birimi olarak nöron sinapslarındaki işaretleri alır ve hepsini toplar. Eğer toplanan işaret gücü, eşiği geçecek kadar güçlü ise diğer nöronları ve dendritleri uyaran akson boyunca bir işaret gönderilir. Kesişen dendritlerden gelen sinapslarla kapılanan bütün işaretleri soma toplar. Toplam işaret daha sonra nöronun iç eşik değeri ile karşılaştırılır ve eşik değerini aşmışsa aksona bir işaret yayar. YSA, bu basit nöronların (düğümlerin ya da ünitelerin) bağlanarak bir ağa dönüştürülmesiyle meydana gelir.

### 4.3 Yapay Sinir Ağlarının Yapısı

Yapay sinir hücreleri (proses) bir araya gelerek yapay sinir ağını oluştururlar. Sinir hücrelerinin bir araya gelmesi rastgele olmaz. Genel olarak hücreler 3 katman halinde ve her katman içinde paralel olarak bir araya gelerek ağı oluştururlar.

Bu katmanlardan birincisi **giriş katmanı**'dir. Bu katmandaki proses elemanları dış dünyadan

bilgileri alarak ara katmanlar transfer etmekle sorumludurlar. Bazı ağlarda giriş katmanında herhangi bir bilgi işleme olamaz.

İkinci katman olan **ara katmanlar**, giriş katmanından gelen bilgileri işleyerek çıkış katmanına gönderirler. Bir ağ için birden fazla ara katman olabilir.

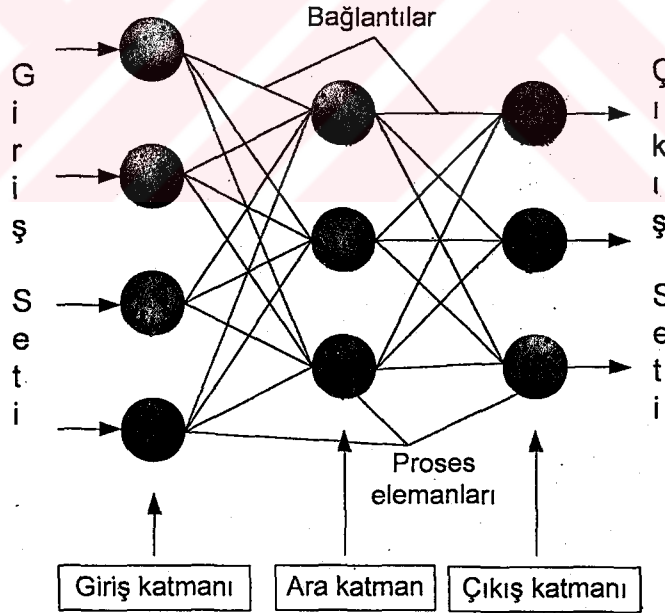
Son katman olan **çıkış katmanı**, bu katmandaki proses elemanları ara katmanlardan gelen bilgileri işleyerek ağın giriş katmanından sunulan örnek için üretmesi gereken çıktıyı üretirler. Üretilen çıktıyı dış dünyaya gönderirler (Öztemel, 2003).

Bu üç katmanın bir biri ile ilişkisini Şekil 4.5 göstermektedir.



Şekil 4.5 Yapay sinir ağı katmanlarının birbirleri ile olan ilişkileri (Öztemel, 2003)

Bu üç katmanın her birinde bulunan proses elemanları ve katmanlar arası ilişkileri şematik olarak Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Bir yapay sinir ağı örneği

Burada yuvarlak şekiller proses elemanları göstermektedir. Her katmanda birbirine paralel elemanlar söz konusudur. Proses elemanları birbirine bağlayan çizgiler ise ağın bağlantılarını göstermektedir. Proses elemanları ve bağlantıları bir yapay sinir ağını oluştururlar. Bu

bağlantıların ağırlık değerleri öğrenme sırasında belirlenmektedir (Öztemel, 2003).

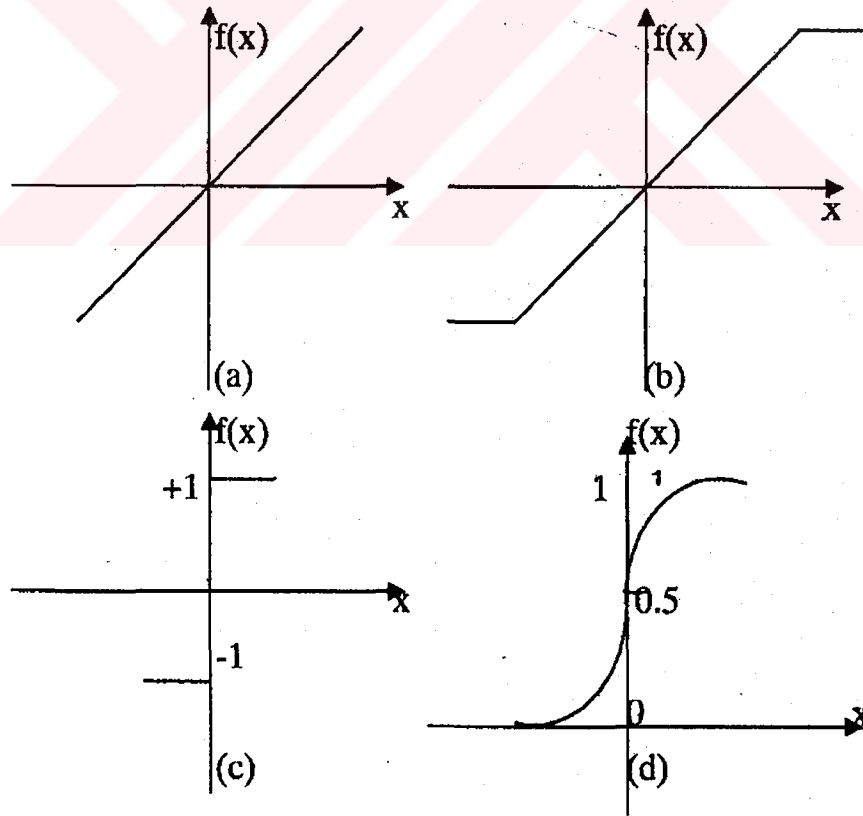
#### 4.3.1 Ağ Tipleri

Üç çeşit ağ tipi vardır.

- İleri beslemeli ağ: Her bir katmandaki hücreler sadece bir önceki katmanın hücrelerince beslenir.
- Kaskat bağlantılı ağ: Hücreler sadece önceki katmanlardaki hücrelerce beslenir.
- Geri beslemeli ağ: En az bir hücre sonraki katmanlardaki hücrelerce de beslenir.

#### 4.3.2 Eşik fonksiyonları

Eşik fonksiyonları, transfer veya işaret fonksiyonları olarak da adlandırılır. Muhtemel sonsuz domen girişli işlem elemanlarını önceden belirlenmiş sınırdaki çıkış olarak düzenler. Yaygın olarak kullanılan dört tane eşik fonksiyonu vardır. Bunlar lineer, rampa, basamak ve sigmoid fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Sık kullanılan dört eşik fonksiyonu

Şekil 4.7 (a)'de gösterilen doğrusal bir problemi çözmek amacıyla kullanılan doğrusal hücre ve YSA' da ya da genellikle katmanlı YSA' nın çıkış katmanında kullanılan doğrusal fonksiyon, hücrenin net girdisini doğrudan hücre çıkışı olarak verir. Doğrusal aktivasyon fonksiyonu matematiksel olarak  $f(x)=\alpha \cdot x$  şeklinde tanımlanabilir.

Burada  $\alpha$ , işlem elemanının  $x$  aktivitesini ayarlayan reel değerli bir sabittir. Lineer fonksiyon  $[-\tau, +\tau]$  sınırları arasında sınırlandırıldığında Şekil 4.7 (b)'deki rampa eşik fonksiyonu oluşur ve denklemi;

$+\tau$ : eğer  $x \geq \tau$  ise

$$f(x)= \quad x: \text{ eğer } |x| < \tau \text{ ise} \quad (4.1)$$

$-\tau$ : eğer  $x \leq -\tau$  ise şeklini alır.

$+\tau$  işlem elemanının maksimumu ve  $-\tau$  işlem elemanının minimumu çoğu zaman doyma seviyesi olarak adlandırılan çıkış değeridir. Eğer eşik fonksiyonu bir giriş işaretine bağlı ise yaydığı  $+\tau$  giriş toplamı pozitif, bağlı değil ise eşik basamak fonksiyonu  $-\delta$  olarak adlandırılır. Eşik basamak fonksiyonu Şekil 4.7 (c)'de gösterilmiştir ve denklemi;

$+\tau$ : eğer  $x > 0$  ise

$$f(x)= \quad (4.2)$$

$-\delta$ : diğer durumlar

şeklindedir.

Son ve en önemli eşik fonksiyonu sigmoid fonksiyonudur. Şekil 4.7 (d)'de gösterilen S biçimindeki sigmoid fonksiyonu türevi alınabilir, sürekli ve doğrusal olmayan bir fonksiyon olması nedeniyle doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan YSA'larında tercih edilir. Sigmoid fonksiyonunun matematiksel ifadesi ise denklem (4.3)'de verilmiştir (Uzunoğlu, 1996).

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.3)$$

Her işlem elemanı kendisine verilen yerel veriye göre kendisini ayarlayacak bütün YSA'nın olasılık-yoğunluk fonksiyonu olarak da tanımlanan enformasyon bölgesinin öğrenmesini sağlar. Enformasyon bölgesi birçok uygulamada, gerçek değerler "0" ile "1" arasında normalize edilmesi gerekir. Normalize etmek, gerçek değeri 85 olan bir giriş 0.85 olarak ağı uygulamaktır. Normalizasyon aynı zamanda bütün girişlere uygulanabilir.

## 4.4 Yapay Sinir Ağlarında Eğitim

### 4.4.1 Eğitim Algoritmaları

Eğitim algoritması eldeki problemin özelliğine göre öğrenme kuralını YSA'na nasıl adapte edeceğimizi belirtir. Yaygın olarak üç çeşit eğitim algoritması kullanılmaktadır.

- Öğreticili eğitim
- Skor ile eğitim
- Öğreticisiz eğitim

Öğreticili eğitimde, yapay sinir ağının eğitimi için eğitici veriler (eğitim seti) kullanılmaktadır. Eğitim seti giriş bilgileri ve istenen (hedef) bilgiler olmak üzere iki ayrı vektör gibi düşünülebilir. Vektörlerin her bir karşılıklı elemanları bir eğitim çiftini oluşturmaktadır. Eğitim seti ağın eğitimine başlamadan önce belirlenmektedir. Ağın eğitimi için, öncelikle bağlantı ağırlıklarına rastgele değerler atanmaktadır. Daha sonra eğitim çiftlerine bağlı olarak bir algoritma dahilinde ağırlıklar yenilenmektedir. İstenilen bilgiler ve ağın çıkışı arasındaki fark (hata) azalmaya kadar eğitim sürdürülmektedir. Ağ çıkışındaki, hatanın azalması ağırlıkların kararlılık kazanması demektir. Ağırlıklar istenilen kararlılığa ulaştığında eğitim bitirilmektedir.

Skor ile eğitimde giriş işaretlerine karşılık gelen çıkış işaretleri tam olarak bilinmemektedir. Çıkış işareti yerine skor verilir ve ağın değerlendirilmesi yapılır. Özellikle kontrol uygulamaları için idealdir. Çeşitli maliyet fonksiyonları kullanılır (Uzunoğlu, 1996).

Öğreticisiz eğitmeye "Kendi kendine öğrenilebilen durum" da denilmektedir. Bu öğrenme durumunda eğitim seti kullanılmamaktadır. Ağ, birbirine benzer giriş bilgilerini gruplamakta, veya giriş bilgisinin hangi gruba ait olduğunu göstermektedir. Ağ eğitimi için sadece giriş bilgileri yeterli olmakta, referans alınacak (eğitici) bilgiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Ağın performansını kendiliğinden izlemesi söz konusudur. Ağ, giriş sinyallerinin yönüne veya düzenine bakmakta ve ağın fonksiyonuna göre ayarlama yapmaktadır. Ağ kendini nasıl organize edeceği hakkında bir miktar bilgiye sahip olmalıdır.

### 4.4.2 Bellek

Bilgiyi saklama şekli YSA'nın önemli özelliklerinden biridir. Bağlantı ağırlıkları YSA bellek biçimleridir. Ağırlıkların değerleri ağın o anki bilgi durumunu temsil eder. Örnek olarak; bir giriş ve istenen çıkış çiftinin belirtilen bilgi parçası ağın içinde birçok bellek biçimine

dağıtılmıştır. Bellek üniteleri ile diğer saklı bilgiler, bu bilgiyi paylaşırlar. Bazı YSA bellekleri ilişkilidir. Öyle ki eğitilen ağa bir kısmı uygulanırsa, ağ bu girişe belleğindeki en yakın çıkışı bu giriş için seçer ve tam girişe bağlı çıkış ortaya çıkar. Eğer YSA oto-ilişkili ise kısmi giriş vektörlerinin ağa verilmesi bu girişlerin tamamlanması ile sonuçlanır. YSA belleğinin yapısı; eksik, gürültülü ve tam seçilemeyen bir giriş uygulandığı zaman bile mantıklı çıkış üretmeye uygundur. Bu kurala “genelleme” adı verilir. Bir genellemenin kalitesi ve anlamı, uygulama çeşidine, ağın tipine ve karmaşıklığına dayanır. Lineer olmayan çok katmanlı ağlar (özellikle geriye yayılım ağlar) gizli katmandaki özelliklerden öğrenirler ve bunları çıkışlar üretmek için birleştirirler. Gizli katmandaki bilgi, yeni giriş örüntülerine akılcı çözümler oluşturmak için kullanılabilir.

#### 4.4.3 Hata Toleransı

Sayısal bir bilgisayarda, herhangi bir işlem elemanını yerinden almak, onu etkisiz bir makinaya dönüştürmektedir. Ancak yapay sinir ağlarında bir elemanda meydana gelebilecek hasar çok büyük önem teşkil etmez. Yapay sinir ağlarının paralel çalışması hız avantajı ile birlikte yüksek hata sağlamaktadır. Seri bilgi işlem yapan bir sistemde herhangi bir birimin hatalı çalışması, hatta bozulmuş olması tüm sistemin hatalı çalışmasına veya bozulmasına sebep olacaktır. Paralel bilgi işleme yapan bir sistemde ise, sistemin ayrı ayrı işlem elemanlarında meydana gelecek olan hatalı çalışma veya hasar, sistemin performansında keskin bir düşüşe yol açmadan, performansın sadece hata birimlerinin bir oranınca düşmesine sebep olur. Sistem hiçbir zaman durma noktasına gelmez.

#### 4.4.4 Yapay Sinir Ağlarının Kullanımının Sebepleri

- a) Sinir ağı ile hesaplamalarda istenilen dönüşüm için, adım adım yürütülen bir yöntem gerekmez. Sinir ağı ilişkilendirmeyi yapan iç kuralları kendi üretir ve bu kuralları, bunların sonuçlarını örneklerle karşılaştırarak düzenler. Deneme ve yanılma ile ağ kendi kendine işi nasıl yapması gerektiğini öğretir.
- b) YSA'nda bilgi saklama, verilen eğitim özelliğini kullanarak eğitim örnekleri ile yapılır. Sinirsel hesaplama, algoritmik programlamaya bir seçenek oluşturan, temel olarak yeni ve farklı bir bilgi işleme olayıdır. Uygulama imkanının olduğu her yerde, tamamen yeni bilgi işleme yetenekleri geliştirebilir. Bu sayede de geliştirme harcamaları ile geliştirme süresi büyük ölçüde azalır.
- c) YSA lineer olmayan yapıdadır. Bu özelliği nedeni ile daha karmaşık problemleri lineer

tekniklerden daha doğru çözerler. Nonlineer davranışlar hissedilir, algılanır, bilinebilir ancak bu davranışları ya da problemleri matematiksel olarak çözmek zordur.

- d) Yapay sinir ağlarının; paralel çalışma yeteneği, öğrenerek kendini geliştiren bir eğitim yöntemi, donanım olarak kolay gerçekleştirilebilir olması, genelleme yeteneği ve sistem cevabının hücre ölümüne az bağlı olması en önemli kullanım sebeplerinden biridir.

#### 4.4.5 YSA'nın Klasik Yazılımlar ile Karşılaştırılması

YSA önceden tahmin, örnek değerlendirme ve gruplama işlemlerinde etkilidir. Aynı işlemleri klasik bilgisayar programı ile yapmak da mümkündür. YSA açıkça kuralları bulunmayan veya anında optimizasyon kısıtlamaları koyan uygulamalar için idealdir. YSA için endüstriyel kontrol işlemleri oldukça yaygın uygulama alanlarıdır. Burada kurallar çok sık değişmez ve üstelik iyi bir tarafı da diğer çalışma koşullarına ait verilerin bol oluşudur.

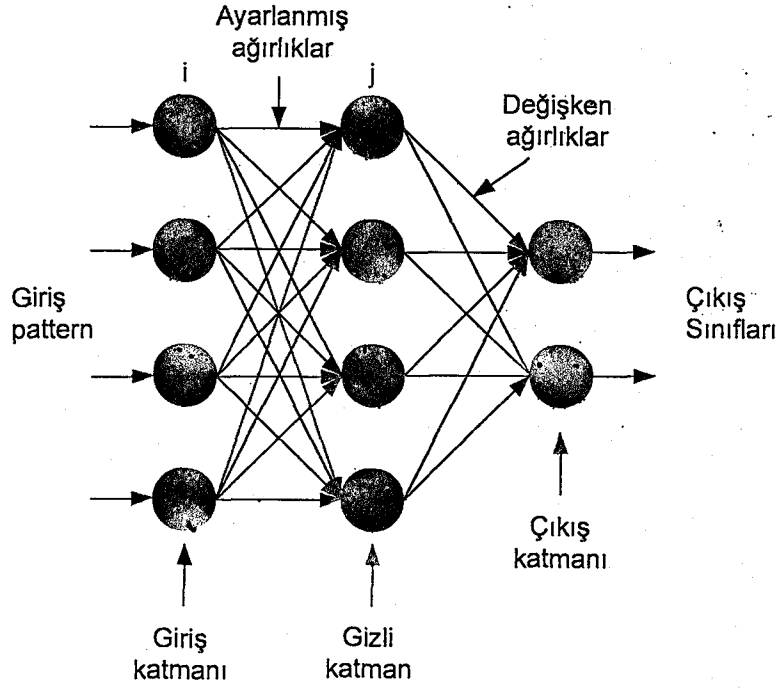
Klasik programlarda belirli bir görev için yazılmış bir yazılım yıllarca aynı tip işi yapar. Örneğin bir mühendislik programı olan Autocad ve benzeri programlar ile sürekli aynı hizmetler yapılabilir.

YSA'nın uygulamadaki dezavantajlarından bazıları şöyle sıralanabilir.

- a) Yapay sinir ağlarının oluşturulmasında, model seçilmesinde kurallar seti yoktur. Kullanıcının tecrübesine dayalı olarak belirlenmektedir.
- b) YSA'nda aynı problem değişik şekillerde gösterilebilmekte ve her gösterimin kendisine göre performansı da değişmektedir. Doğru gösterimi bulmanın yolu yine tecrübeler ile sınırlıdır.
- c) Ağın davranışlarını açıklaması mümkün değildir. Bu durum ağa olan güveni azaltmakta ve özellikle insan hayatı ile ilgili olan problemlerde sonuçların neden verilmediğinin açıklanamaması kullanım alanlarının sınırlandırmaktadır.
- d) Eğitimin gerçekleştirilmesi uzun zamanlar alabilmektedir.
- e) Probleme optimum sonuçlar garanti etmez (Öztemel, 2003).

#### 4.5 Çok Katmanlı Ağ

Çok katmanlı ağ giriş ve çıkış katmanları arasında birden fazla katmanın kullanıldığı YSA sistemleridir. Bu katmanlara gizli katman adı da verilmektedir. Şekil 4.8'de çok katmanlı ağın genel yapısı gösterilmiştir.

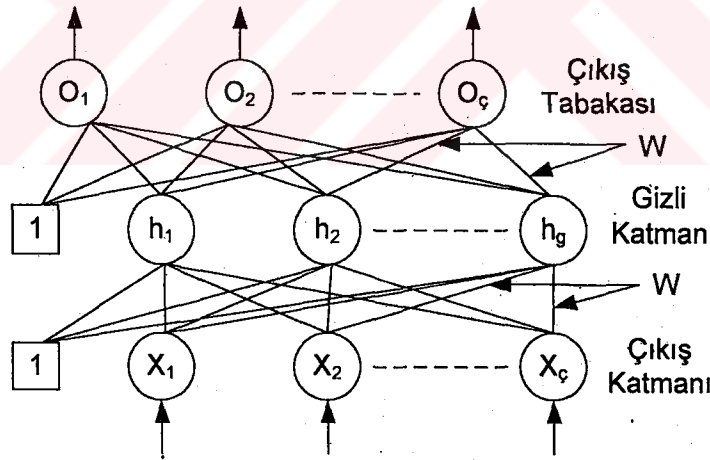


Şekil 4.8 Çok katmanlı ağ yapısı

Çok katmanlı ağlara eğitim sırasında hem girişler hem de o girişlere karşılık üretilmesi gereken çıkışlar gösterilir. Ağ içinde yapılan işlemler sonucunda çıkış katmanında oluşan sonuç değer, işlenen çıkış ile karşılaştırılır. Bulunan cevap ile istenen cevap arasındaki herhangi bir ayrılık varsa ağırlıklar bu farkı azaltacak şekilde yeniden düzenlenir. Girişteki değer, ağırlıklar uygun noktaya ulaşana kadar değişmez. Hesaplanan çıkışlar istenilen cevaplarla karşılaştırılarak sonuçta gerekirse hata işareti belirtilir. Hata işareti gizli katmandan çıkış katmanına olan ağırlıkları değiştirmekte kullanılır. Gizli katmandan ne tür bir çıkış istendiği bilinmeyeceği için gizli katmanların çıkışında hata işareti verilmesi kolay bir şey değildir. Bunun yerine her bir katmanın çıkış katmanının hatalarına olan etkisi bilinmelidir. Bu hatalı birim için gizli katmana bağlı olan çıkış katmanlarının hata işaretlerinin ağırlıkları toplamı alınarak yapılır. Birden çok gizli katmana sahip sistemlerde her sistemin hata işaretleri, bir önceki katmanın düzeltilmiş işaretlerinden çıkartılarak işlem tekrarlanır. Sonuç olarak ağırlık düzeltme işlemi çıkış seviyesine bağlı ağırlıklardan başlar ve işlem ters yönde giriş seviyesine varana kadar devam eder. Sonuçta sistem hatalar yapar, ama bu hatalardan bir şeyler öğrenip isteneni bulana kadar işleme devam eder. Bu yöntem “hatanın geriye yayılması algoritması” denir.

#### 4.6 Klasik Hatanın Geriye Yayılması Algoritması (GYA)

Karmaşık verilerin sınıflandırılmasında kullanılan etkin YSA modellerinden birisi; ilk olarak Werbos tarafından düzenlenen daha sonra Parker, Rummelhart ve McClelland tarafından geliştirilen geri yayılım ağıdır (Back Propagation Network). İlk uygulamaları yazılı metinden söz sentezi, robot kollarının kontrolüdür. Sınırları ise denetimli eğitim giriş ve çıkış örneklerinin çok sayıda olmasıdır. Backpropagation günümüzde en yaygın kullanılan öğrenimi kolay sonuçları etkin bir YSA'dır. Yayınma ve uyum gösterme (Propagate - Adapt) olmak üzere iki aşamada işlemleri gerçekleştiren GYA, katmanlar arasında tam bir bağlantının bulunduğu çok katmanlı (Multilayer), İleri Beslemeli (Feed Forward) ve Denetimli (Supervised) olarak eğitilen bir YSA modelidir. Geri yayılım algoritması (Backpropagation) birçok uygulamalarda kullanılmış en yaygın öğrenme algoritmasıdır. Anlaşılması kolay ve tercih edilen öğretme algoritmasıdır. Bu algoritma; hataları geriye doğru çıkıştan girişe azaltmaya çalışmasından dolayı geri yayılım ismini almıştır. Geri yayımlı öğrenme kuralı ağ çıkışındaki mevcut hata düzeyine göre her bir tabakadaki ağırlıkları yeniden hesaplamak için kullanılmaktadır. Bir geri yayımlı ağ modelinde giriş, gizli ve çıkış olmak üzere 3 katman bulunmakla birlikte, problemin özelliklerine göre gizli katman sayısını artırabilmek mümkündür.



Şekil 4.9 Geri yayımlı yapay sinir ağının genel yapısı

Giriş katmanı; giriş veri gruplarının ağına sunulduğu terminallerdir. Bu katmanda nöron sayısı, A giriş veri sayısı kadardır ve her bir giriş nöronu bir veri alır. Burada veri işlenmeden bir sonraki katman olan gizli katmana geçer.

Gizli katman; ağın temel işlevini gören katmandır. Bazı uygulamalarda ağda birden fazla gizli katman bulunabilir. Gizli katman sayısı ve katmandaki nöron sayısı B, probleme göre değişir,

tamamen ağ tasarımcısının kontrolündedir ve onun tecrübesine bağlıdır. Bu katman; giriş katmanından aldığı ağırlıklandırılmış veriyi probleme uygun bir fonksiyonla işleyerek bir sonraki katmana iletir. Bu katmanda gereğinden az nöron kullanılması giriş verilerine göre daha az hassas çıkış elde edilmesine sebep olur. Aynı şekilde gerektiğinden daha çok sayıda nöron kullanılması durumunda da aynı ağda yeni tip veri gruplarının işlenmesinde zorluklar ortaya çıkar.

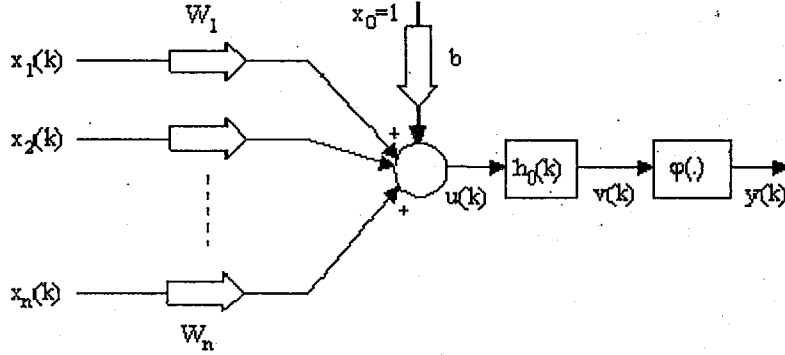
Çıkış katmanı; ağın en uç katmanıdır. Gizli katmandan aldığı veriyi ağın kullandığı fonksiyonla işleyerek çıktısını verir. Çıkış katmanındaki nöron sayısı, ağa sunulan her verinin çıkış sayısı kadardır. Bu katmandan elde edilen değerler yapay sinir ağının söz konusu problem için çıkış değerleridir. Geri yayılım ağında; bir katmandan bir başka katmana, aradaki katmanı atlayarak geçebilmek mümkün değildir.

Bir giriş verisinin ağın ilk katmanında yer alan düğümlere uygulandığında en üst katman olan çıkış katmanına erişinceye kadar, bu veri üzerinde çeşitli işlemler gerçekleştirilir. Bu işlemlerin sonucunda elde edilen fiili çıktı, olması gereken çıktı ile karşılaştırılır. Fiili ve olması gereken değerler arasındaki fark, her çıktı düğümü için bir hata sinyali olarak hesaplanır. Hesaplanan hata sinyalleri, her çıktı düğümüne karşı gelen ara katmandaki düğümlere aktarılır. Böylece ara katmandaki düğümlerin her biri toplam hatanın sadece hesaplanan bir kısmını içerir. Bu süreç her katmandaki düğümler toplam hatanın belirli bir kısmını içerecek şekilde giriş katmanına kadar tekrarlanır. Elde edilen hata sinyalleri temel alınarak, bağlantı ağırlıkları her düğümde yeniden düzenlenir. Bu düzenleme tüm verilerin kodlanabileceği bir duruma ağın yakınsamasını sağlar.

Yukarıda anlatıldığı gibi; ileri besleme safhasında, giriş tabakasındaki nöronlar veri değerlerini doğrudan gizli katmana iletirler. Gizli katmandaki her bir nöron kendi giriş değerlerini ağırlandırarak toplam değer hesap ederler ve bunları bir taşıma fonksiyonu ile işleyerek bir ileriki tabakaya veya doğrudan çıkış katmanına iletirler. Katmanlar arasındaki ağırlıklar başlangıçta rasgele küçük rakamlardan seçilir. Çıkış katmanındaki, her bir nöron ağırlıklandırılmış değeri hesaplandıktan sonra, bu değer yine taşıma fonksiyonu ile karşılaştırılarak mevcut hata minimize edilmeye çalışılır. Hata değeri belli bir mertebeye ininceye kadar iterasyon işlemine devam edilir ve böylece ağın eğitim aşaması tamamlanmış olur. Katmanlar arasındaki bağlantılardaki ağırlık değerleri eğitimi tamamlamış ağdan alınarak deneme safhasında kullanılmak üzere saklanır.

#### 4.7 Genelleştirilmiş Delta Kuralı

Geri yayılım ağılarının eğitiminde; Delta kuralı (Generalized Delta Rule) öğrenim algoritma kullanılır.



Şekil 4.10 Hatanın geriye yayılması algoritmasının blok diyagramı

$x$ = giriş değerleri,  $y$ =çıkış değerleri  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_p, y_p)$ . Net giriş değerleri aşağıdaki gibidir.

$$N_j = \sum_{i=0}^n o_i w_{ij} + w_{bj} \quad N_k = \sum_{i=0}^n o_i w_{ik} + w_{bk} \quad (4.4)$$

$k$ 'inci çıkış tabakasındaki herhangi bir nörondaki hata,  $e=y_k-o_k$  (Hata değeri)'dir. Burada  $y_k$ =olması gereken çıktı,  $o_k$ =fiili çıktıdır. Tek bir çıktı düğümünün hatası;  $ep_k=(y_k-o_k)$  dir.

Delta Kuralı tarafından minimize edilmiş olan toplam hata;

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_k (t_k - o_k)^2 \quad (4.5)$$

dir. Delta kuralı tarafından minimize edilecek olan hata, tüm çıktı düğümleri için elde edilen hataların kareleri toplamı olacaktır. Eğitim işlemi ve eğitimden sonraki test işlemi bu akışa göre yapılır. Bu algoritma ile  $i$  ve  $j$  kat işlem elemanları arasındaki ağırlıklardaki  $w_{ji}(t)$  değişikliği hesaplanır. Bu ifade,

$$\Delta w_{ji}(t) = \eta \delta_j x_i + \alpha \Delta w_{ji}(t-1) \quad (4.6)$$

şeklindedir. Öğrenme katsayısı( $\alpha$ ), momentum katsayısı( $\eta$ ) ve  $j$  ara veya çıkış katındaki herhangi bir  $j$  nöronuna ait bir faktördür. Buradaki  $\Delta w_{ji}$  ağırlık farkıdır. Çıkış düğümleri net ağırlığı;

$$o_j = \text{Out}_j = F(N_j) = \frac{1}{1 + e^{-(N_j)}} \quad o_k = \text{Out}_k = F(N_k) = \frac{1}{1 + e^{-(N_k)}} \quad (4.7)$$

dir. Çıkış tabakasında bütün düğümler için eğitime esnasında denklemden hesaplanan bir hata değeri;

$$\delta_k = (t_k - o_k)F'(N_k) = (t_k - o_k) \cdot o_k (1 - o_k) \quad (4.8)$$

dir. Değerler hesaplandıktan sonra, hatadan sonra geriye yayılım başlama adımıdır.

$$w_{ij}^{\text{yeni}} = w_{ij}^{\text{eski}} + \Delta w_{ij}^{\text{yeni}} \quad w_{jk}^{\text{yeni}} = w_{jk}^{\text{eski}} + \Delta w_{jk}^{\text{yeni}} \quad (4.9)$$

$$w_{bj}^{\text{yeni}} = w_{bj}^{\text{eski}} + \Delta w_{bj}^{\text{yeni}} \quad w_{bk}^{\text{yeni}} = w_{bk}^{\text{eski}} + \Delta w_{bk}^{\text{yeni}} \quad (4.10)$$

$$\Delta w_{ij} = \eta \delta_j o_j \quad \Delta w_{jk} = \eta \delta_k o_k \quad (4.11)$$

$$\Delta w_{bj} = \eta \delta_j \quad \Delta w_{bk} = \eta \delta_k \quad (4.12)$$

$$\delta_j = F'(N_j) \sum_k \delta_k w_{jk} = o_j (1 - o_j) \sum_k \delta_k w_{jk} \quad (4.13)$$

## 5. HARMONİKLERİN KORUMA RÖLELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

### 5.1 Elektromekanik Röleler

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 yerleşimlerindeki fiziksel farklılıkla ilgilidir. Bu yüzden, farklı üreticilerdeki elektromekanik röleleri benzer zaman-akım karakteristiklerine sahip olsalar da, bozuk sinyallere farklı cevap verirler. Bir elektromekanik röle tipi moment üretimi, yıllar boyunca tekrar edilen ve iyileştirilen bir dizayn sonunda elde edilir. Bu nedenle belirli bir rölenin bozulmuş dalga şekline cevabını incelemek amacıyla elde edilen 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 parametreleri içerdiğinden frekansın bir fonksiyonu olacaktır. Bu yüzden bir rölenin zaman-akım karakteristiği uygulanan akımdaki bozulmayla değişebilir (WDCIWG, 1984).

#### 5.1.1 Silindir Tipi Ani Aşırı Akım Röleleri

Silindir tip ani aşırı akım röleleri endüksiyon disk röleleri gibi, dizayn parametrelerine bağlı bir frekans cevabına sahip olacaktır. Ani piston ve menteşeli armatür akım röleleri çoğunlukla frekans etkilerinden bağımsızlardır. Davranışları, rölenin çalışma zamanı ile karşılaştırılabilir bir zaman periyodu üzerinde, alınan akımın rms değeri ile ilgilidir.

Şiddetli akım transformatörü (AT) doyması ani röleleri iki açıdan etkileyebilir:

- Her bir çevrim doyması sonucu sekonder akım darbesi, rölenin Şekil 5.1'deki gibi bir dalga şeklinin yüksek-frekans bileşenlerine hassaslığına rağmen rölenin hızlanma kapasitesi için yeterli enerjiyi içermeyebilir. AT doyması süresince bir ani röle akım dalga şeklinin verilen alanın her çevrimine karşılık olacaktır. Bu yüzden 90° AT doyması için primer akım yaklaşık iki katı değere ihtiyaç duyacaktır. 45° doymada yaklaşık 6-10 kat

primer hızlı çekme akımı çalışma için gerekli olacaktır. Çok şiddetli AT doyması asimetrik veya remenans akımıyla gerçekleştirilirse, ani röle, primer akımın herhangi bir değerinde hızlanmayabilir.

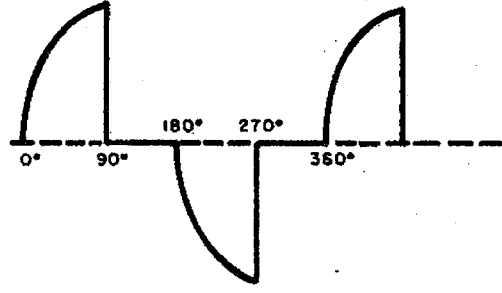
- Ani röleler kesici arıza sistemleri gibi hızlı çalışma için tasarlanırsa, şiddetli AT doyması, rölenin her bir zamanının başlangıç değerine getirilmesi için akımın bir küçük değere düşürülmesine sebep olabilir (Selamoğulları, 1998).

### 5.1.2 Elektromekanik Gerilim Röleleri

Elektromekanik gerilim röleleri, efektif değere cevap vermeye değil yüksek frekanslarda sargı empedansındaki yapısal akım sınırlandırılmalarından dolayı bozulmuş bir dalga şeklinin yalnızca temel bileşenine cevap vermeye de yönelebilir. İç doymanın değişken etkisi gerilim rölelerinde daha azdır. Çünkü gerilim röleleri genellikle, maksimum giriş koşullarında yalnızca düşük doymalar için tasarlanırlar (WDCIWG, 1984).

### 5.1.3 Çift Girişli Elektromekanik Röleler

Çift girişli elektromekanik röleler, tek girişli röleler ve kendi giriş harmoniklerinin faz ilişkilerini içeren diğer etkilere de maruz kalabilirler. Bu röleler yönlü, çarpım, empedans, admitans, diğer mesafe rölesi türleri veya sequence ayırma devreli röleler içerirler. Farklı frekanstaki iki giriş sinyali, ortalama değeri sıfır olan bir sinüsoidal çalışma momenti üretir. Bununla birlikte bir röle içerisindeki nonlineerlikten dolayı farklı frekansların etkileşimi net çalışma momenti (pozitif veya negatif) ile sonuçlanabilir. Özellikle doymuş akım transformatöründen dolayı oluşan bozulmuş dalga şekilleri temel bileşende bir faz kayması içerebilirler. Böylelikle, yalnızca giriş büyüklüğündeki bozulma çift girişli elektromekanik rölelerin çalışmasını etkileyebilir.  $E_0$  gerilimi ile polarize olmuş yönlü toprak röleleri, belirli limit arıza koşulları esnasında temel bileşen geriliminden çok 3. harmoniğe maruz kalabilir. Bu tip durumlar saf sinüs dalga akımlıda olsa yanlış röle çalışması ile sonuçlanabilir. Bu olaylar daha çok aşırı hassasiyette, yüksek hızlı ve yönlü birimlerde daha iyi görülebilir. Bu bir problem olarak düşünüldüğünde, harmoniklerin polarize gerilimlerinin harmonik bileşenlerini filtreleme problemini ortadan kaldıracaktır. Fakat bu, rölenin daha yavaş çalışmasına sebep olabilir. Ayrıca, filtredeki herhangi bir temel frekans faz kayması doğru bir yön referans sinyalini sağlamak için dikkate alınmalıdır. Bir faz veya toprak yönlü rölenin çalışma akımındaki bozulmalar benzer problemlere sebep olabilirler. Akım transformatörünün doyması sonucu bozulma olduğunda temel bileşenin fazı ileri kaydırılır (WDCIWG, 1984).



Şekil 5.1 İdeal akım transformatörü sekonder akımı doyma  $90^\circ$ 'de ve direnç yüklü iken

Ürün-tipi röleye gelen sinyallerden biri sinüs dalgı olduğunda; röle, diğer giriş sinyalindeki bozulmaları ihmal eder ve yalnızca temel bileşene cevap verir. Eğer akım transformatörü AT enerjilenmesi, %90 doğruluk noktasında ise sekonder akım doğru değerin %90'ı olacaktır. Bu dalğanın analizi bize, bozulmuş dalğanın harmoniklerinin %39 ve temel bileşenin %92 olduğunu gösterir. Böylelikle temel frekans akımının ek olarak %8'lik bir kaybı olur. Bu yüzden ürün momenti olan efektif akım yalnızca %82'dir. Ayrıca, yukarıda da belirtildiği gibi önemli bir faz kayması muhtemeldir. Eğer bu faktörler dikkate alınmazsa, rms cihazla uyumlu veya harmoniklere daha çok duyarlılık kaybedilebilir. Diğer taraftan, bu kalitede bir röle 60 Hz'lik bir sinyal filtresi gibi kullanılabilir ve yalnızca temel frekans için röle cevap üretir.

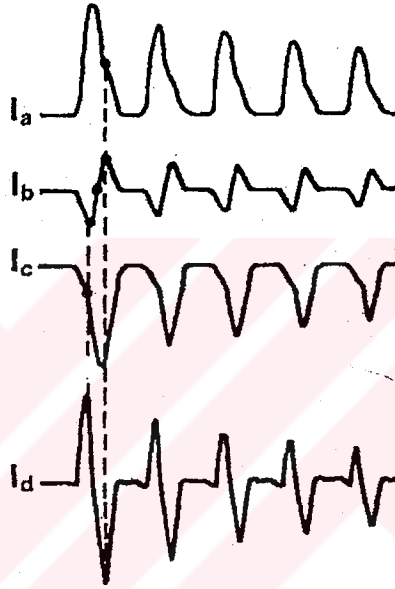
## 5.2 Mesafe Röleleri

Mesafe röleleri çeşitli dizaynlarda imal edilirler. Bu yüzden bozulmuş akım ve gerilimlere cevabı üzerinde pratikte bir genelleme yapmak doğru olmaz fakat özel bir röleye temel prensipleri uygulayarak dalga şeklinin bozulmasının bu röle üzerindeki genel etkileri tahmin edilebilir. Örneğin kopya veya denge tipi mesafe röleleri, röle içinde koruma altındaki hat kısmının bir kopyasını içerirler. Bunun doğru bir kopya olduğunu anlamak için röle, bozulmuş gerilim ve akımda çalıştırılmalıdır. Fakat akım transformatörü, gerilim transformatörü ve özellikle primer sistemde karşılığa sahip olmayan ölçü transformatörlerinden gelen bozulmalar rölenin doğru çalışmasını etkileyebilir. Kopya empedansı, hat reaktansını sağlayabilmek için hava aralıklı akım transformatörü ve direnç bileşeni için uç dirençten oluşur. Tekil sabit-frekans temelli bir kararlı durum, hat empedansı için yeterli kompanzasyonu sağlayabilir. Bununla birlikte bu kopya eşdeğer devre seri endüktans ve dirençten oluşurken, gerçekte hattın admitansı ve kondüktansı da vardır. Böyle bir kopya yalnızca bir frekansta ve kararlı durum koşullarında doğru olabilir. Geçici sistem koşullarında veya fark edilebilir harmonikli koşullarda veya düşük frekans esnasında bir

kopya röle, sistem şartlarına uygun cevap vermeyebilir (Selamoğulları, 1998).

### 5.3 Harmonik Sınırlamalı Ani Akım Röleleri

Harmonik sınırlamalı ani akım röleleri, basit bir ani röle ayarının transformatörün ani deşarj akımlarıyla sınırlandığı bazı uygulamalarda kullanılırlar (Şekil 5.2). Genellikle, dizayn yapılan sınır, yüksek hızlı transformatör diferansiyel rölelerinde olduğu gibi ikinci harmoniktir. Çalışma parametreleri genellikle tasarıma uygun olarak 2.harmonik cevabına uygulanır. Sınırlama akımına geliştirildiği çalışma devresi ve özel röle filtre devresinin analizi ile diğer harmoniklerin etkisi tahmin edilebilir (WDCIWG, 1984).



Şekil 5.2 Tipik transformatör deşarj akımları (WDCIWG, 1984)

### 5.4 Simetrik Bileşenli Röleler

Simetrik bileşenli röleler, sistemin 3 faz değerlerinden istenen gerilim ve akım sequence bileşenlerini elde etmek için R-L-C faz kaydırma devreleri kullanılırlar. Bu rölelerin tümü harmonik bozulmalarından ve birçoğu da sistem frekansındaki sapmalardan etkilenirler. Ek filtreler, rölelerde harmoniklerden kaynaklanan yanlış çalışmayı minimize etmek için kullanılabilirler. Filtreler, off-frekans sistem bozulmaları esnasındaki hatalı çalışmayı önlemek için kullanıldıklarında sonuç, bozulma esnasındaki gerçek faz dengesizliği için istenilen röle çalışmasını bloke edebilir (Selamoğulları, 1998).

### 5.5 Transformatör Diferansiyel Röleleri

Transformatör diferansiyel röleleri, harmonik sınırlaması olmayan genellikle bir veya daha fazla moment üretim prensiplerine göre çalışırlar. Harmonik sınırlamalı diferansiyel röleler genellikle belirli 2. harmonik sınırlamasında daha farklı cevaplara sahiptir. Harmonik sınırlama rölesinin uygulama prensibi, transformatör enerjilendiğinde ani deşarj akımındaki harmonikler tarafından rölenin çalışmasının sınırlandırılmasıdır. Sonuç olarak, bir iç arıza esnasında akım transformatörünün doymasından gelen bozulma bileşenleri röleyi sınırlandırabilir. Her bir üretici, böyle bir yanlış çalışmadan sakınmak için genellikle deneysel kılavuzlar sunarlar. Bazı üreticiler 2. harmonik dışındaki harmonikler için ek sınır karakteristikleri sağlarlar. Ayrıca, bazıları doğrultucu veya dc inverter istasyonları yakınlarındaki 5. harmonik bakımından zengin olduğu bilinen servisler için değiştirilmiş röle karakteristikleri verirler.

Düşük akım transformatör arızaları; bu arızaların bazılarının yapısının neden olduğu bozulmuş arıza akımları içerirler. Bir rölenin harmonik sınırlaması, röle performans kriterindeki listeden daha az arızalara rölenin duyarlılığını sınırlayabilir. Bu sebepten, aşırı harmonik sınırlaması ve şiddetli iç arızalar için doymuş akım transformatörlerinin oluşturduğu harmoniklerin sınırlama işlemi istenmeyen bir şeydir (WDCIWG, 1984). Ayrıca aşırı harmonik zorlama, enerjilenme periyotları esnasında röle duyarlılığını aşırı derecede sınırlar. Her üreticinin farklı tasarım çözümleri vardır, önerilen uygulama parametreleri röleler arasında farklılık gösterebilir.

### 5.6 Bara Diferansiyel Röleleri

Yüksek empedans, yüksek hızlı tip bara diferansiyel röleleri, bozuk akımlarda düzgün biçimde çalışmak üzere tasarlanırlar. Üreticilerin uygulama verileri genellikle yeterlidir ve harici olarak meydana gelen dalga şekli bozulmaları için özel bir önlem gerekli değildir. Doğrusal kuplör tipi diferansiyel şemaları, arka arkaya bağlanmış kapasitörlerdeki geçici akımlar için ek koşullara ihtiyaç duyabilirler. Bu kuplörler, primer ve sekonder arasında 60 Hz'de  $5m\Omega$ 'luk ortak bir reaktansa sahiplerdir. Enerji transfer verimi frekansla doğru orantılı olarak artacaktır ve böylece harmonikler primer sistemdeki değeriyle orantılı olarak yükseltilecektir (WDCIWG, 1984).

### 5.7 Statik Röleler

Elektromekanik röleler gibi üreticileri arasında tasarım değişikliğine sahiplerdir. Genel

çalışma karakteristikleri, herhangi bir belirgin röle uygulaması gibi algılanmamalıdır.

### 5.7.1 Tek Girişli Statik Röleler

Tek girişli statik röleler, zaman-aşırı akım rölesi gibi aşağıdakilere cevap vermek üzere dizayn edilmiştir.

- Giriş dalga şeklinin tepe değeri
- Giriş dalga şeklinin ortalama değeri
- Giriş dalga şeklinin rms değeri

Her biri kendi karakteristiklerine ve özel uygulama ve dizayn performans değerlerine sahiptir. Her ne kadar tekil frekans kararlı hal sinüs dalga şekliyle aynı çalışmaya ayarlanmış olsalar bile sinüzoidal olmayan dalga şekillerine cevapları temel tasarımlar arasında oldukça farklı olabilir. Belirli bir dizayn için bozulmuş akım veya gerilime göre performansı, giriş sinyallerinin dalga şekli ve beklenen frekans değerleri için röle tasarım teorisi ile kıyaslanarak tahmin edilebilir. Genelde, bir rölenin tekil frekanslı giriş sinyalleri için frekans cevabı, bu frekansları içeren bozulmuş bir dalga şekline cevabının ölçüsü değildir. Gerçek efektif değerli tip röleler dışında, dalga şekli hem çalışma değerini hem de zaman gecikme karakteristiklerini etkileyebilir. Buna ek olarak, zaman-akım karakteristiğini belirlemek için kullanılan metot, rölenin temel cevabını etkileyecektir. Eğri biçimlendirmesi için diyot köprüleri gibi elemanlar kullanıldığında röle daha çok tepe değerlere cevap vermeye yönelir. Ölçüm tekniğinde sıfır geçiş zamanından faydalandığında bazı frekans rölelerinde olduğu gibi bozulma, röle cevabını önemli ölçüde etkileyebilir (Selamoğulları, 1998).

### 5.7.2 Çift Girişli Statik Röleler

Çift girişli röleler bozulmuş dalga şekillerine aşağıdaki dizaynlara bağlı olarak cevap verirler.

- Sinyallerin belirlenmesi için kullanılan giriş transformatörü ve analog devreler
- Genlik veya faz açısına cevap veren eşik dedektör dizaynı

Bu dizayn özellikleri ister istemez bağımsız değildir. Bir çok çift girişli statik röleler yüksek hızlı rölelerdir. Dinamik karakteristikleri, kararlı hal parametrelerinden ayrı değerlendirilmelidir.

### 5.7.3 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).



## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

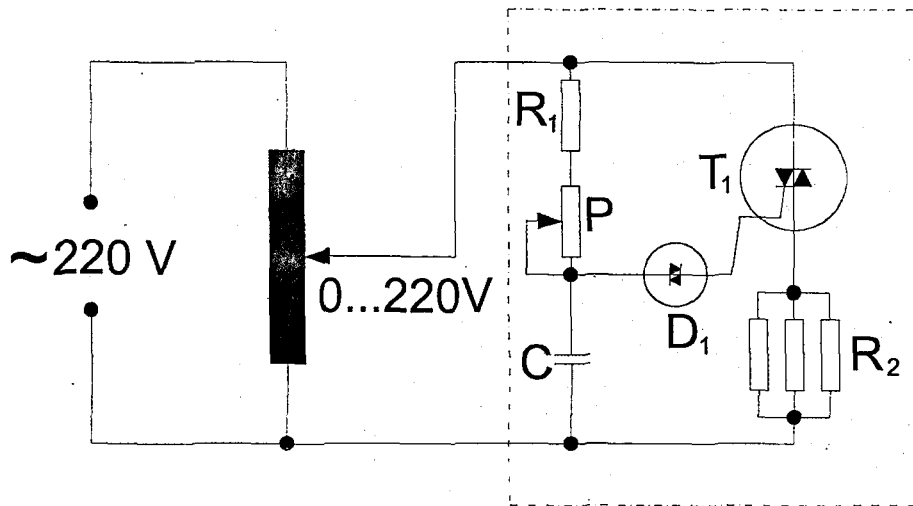
### 6.1 Giriş

Harmoniklerin aşırı akım röleleri üzerine etkisini belirlemek amacıyla bu bölümde laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Sonuçları karşılaştırabilmek amacıyla, deneylerde yapıları ve çalışma ilkeleri birbirinden farklı ancak sinüsoidal yük akımı için akım-zaman karakteristikleri birbirine benzer olan üç ayrı aşırı akım rölesi kullanılmıştır. Bu röleler, bir elektromekanik röle olan “İndüksiyon Diskli Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi” ile “Statik Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi” dir. Statik röle analog elektronik devrelerden oluşmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan üçüncü röle, zaman gecikmesi akımdan bağımsız olan “Sabit Zamanlı Elektromekanik Aşırı Akım Rölesi” dir.

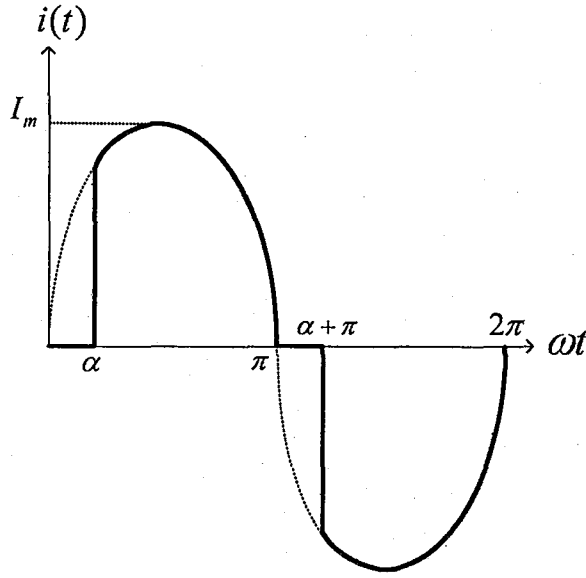
Her üç aşırı akım rölesinin girişine harmonik bileşenleri içeren nonsinüsoidal akım olarak triyak kontrollü rezistif yüklü bir devreden oluşan ve aşağıda açıklanan nonlinear yükün akımı uygulanmıştır. Her üç röleye de aynı nonlinear yükün akımı uygulanmasına rağmen, rölelerin farklı yapıda olması sebebiyle aşağıda detayları verilen deney sonuçlarından da görüleceği gibi harmoniklerin bu rölelerin akım-zaman karakteristiklerine etkileri de farklı olmuştur.

### 6.2 Deneylerde Kullanılan Nonlinear Yük

Deneylerde şebekeden harmonik bileşenleri içeren distorsiyonlu akım çeken nonlinear yük olarak Şekil 6.1’de gösterilen rezistif yüklü triyak kontrollü a.c. kıyıcı devresi kullanılmıştır. Nonlinear yük akımının zamana göre değişimi Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Deneylerde kullanılan nonlinear yük



Şekil 6.2 Nonlinear yük akımı

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

Aşağıda Bölüm 6.3'de (5.4) eşitliğinde gösterildiği gibi, nonlinear yük devresinde triyak tetikleme açısı  $\alpha$  sabit tutulup ototransformatör çıkış gerilimi değiştirilirse, akımın  $THD_i$  değeri çok az değişir yaklaşık sabit kalır. Böylece nonlinear yük akımının karakterini, harmonik spektrumunu fazlaca değiştirmeden sadece nonsinüsoidal akımın efektif değerini değiştirmek yani  $\alpha$  açısını sabit tutup devreye uygulanan gerilimi değiştirmekle mümkün olabilir.

Harmoniklerin aşırı akım rölelerine etkisini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalarda triyak tetikleme açısı  $\alpha$ ,  $0^\circ$  den itibaren  $30^\circ$  aralıklarla  $150^\circ$  ye kadar arttırılarak altı farklı harmonik spektrumuna sahip dolayısıyla altı farklı nonlinear yük için ölçüm yapılmıştır.  $\alpha$  değerine göre belirlenen altı ayrı çalışma modu Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Nonlineer yüke ait çalışma modları

| Mod No | Triyak Tetikleme Açısı<br>$\alpha$ |
|--------|------------------------------------|
| 0      | $0^\circ$                          |
| 1      | $30^\circ$                         |
| 2      | $60^\circ$                         |
| 3      | $90^\circ$                         |
| 4      | $120^\circ$                        |
| 5      | $150^\circ$                        |

### 6.3 Nonlineer Yük Akımının Efektif Değerinin Hesaplanması

Nonlineer yüke uygulanan şebeke geriliminin ani değer ifadesi

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t \quad (6.1)$$

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

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m^2 \cdot \sin^2 \omega t d\omega t} \quad (6.2)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_\alpha^\pi V_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t \right]} \quad (6.3)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \int_\alpha^\pi V_m^2 \left( \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right)^2 d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} V_m^2 \left( \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right)^2 d\omega t \right)} \quad (6.4)$$

bu integralin sonucunda,

$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi}} \quad (6.5)$$

olarak elde edilir.

Örneğin,  $\alpha=30^\circ$  ve  $V_m = \sqrt{2} \cdot 220$  V olması durumunda yük uçlarındaki gerilimin efektif değeri,

$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{2} \sqrt{\frac{2\left(\pi - \frac{\pi}{6}\right) + \sin 2\frac{\pi}{6}}{\pi}} = 201,1817 \text{ V olarak bulunur.}$$

Nonsinüsoidal gerilim uygulanan yük direncinden geçen akımın efektif değeri, direnç değeri R olmak üzere,

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} \quad (6.6)$$

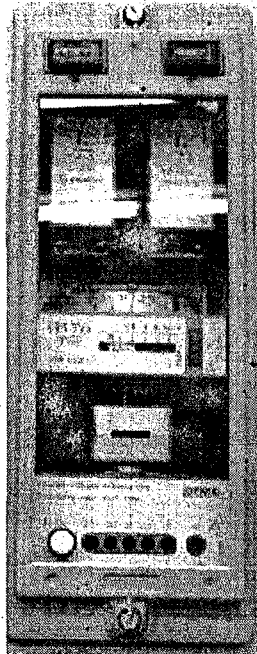
$$I_{rms} = \frac{V_m}{2R} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi}} \quad (6.7)$$

olarak elde edilir.

#### 6.4 Harmoniklerin İndüksiyon Diskli Elektromekanik Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesine Etkisinin DeneySEL Çalışma ile İncelenmesi

##### 6.4.1 Deneyde Kullanılan İndüksiyon Diskli Elektromekanik Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi

Deneyde kullanılan indüksiyon diskli elektromekanik ters zamanlı aşırı akım rölesi, dağıtım transformatörlerinin korunması ve dağıtım hatlarının selektif koruması amacıyla kullanılır. Açma zamanı akımla ters orantılıdır. Akım arttıkça rölenin zaman gecikmesi kısalmakta, akım azaldıkça rölenin açma süresi uzamaktadır.



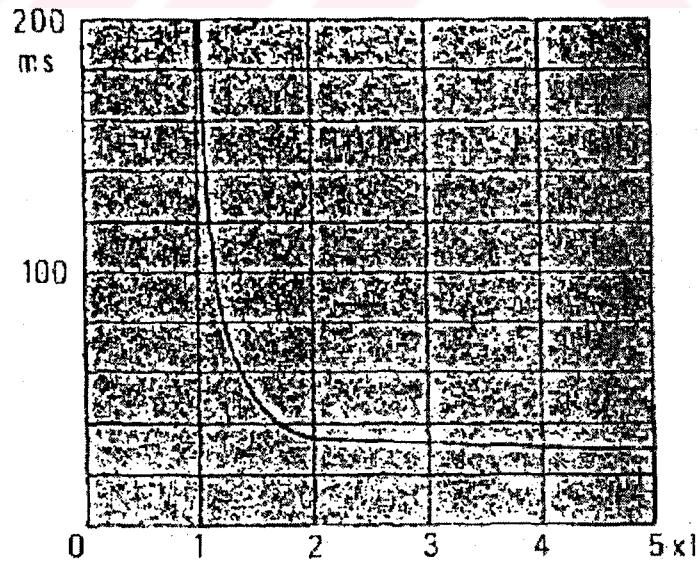
Şekil 6.3 İndüksiyon diskli elektromekanik ters zamanlı aşırı akım rölesi

Şekil 6.3’de indüksiyon diskli elektromekanik ters zamanlı aşırı akım rölesinin önden görünüşü gösterilmiştir. Bu röle aşırı akım ve kısa devre ünitesi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

Aşırı akım ünitesindeki özel saçtan yapılmış indüksiyon mıknatısı, kutupları ve buna bağlı özel histerizis eğrisi nedeni ile dizayn edilmiş diski çevirmeye ve yeterli moment kazancına neden olmaktadır. İndüksiyon bobini yüksek termik dayanıklılık özelliği taşımakta ve rölenin aşırı akım değeri 7 kademe olarak akım ayar pimi vasıtası ile ayarlanmaktadır. Pim dışarı çekildiğinde röle yüksek kademenin bir önceki kademe sargısına kenetlenir. Akımın oluşturduğu moment diske hareket sağlar ve fren magneti disk hızını ayarlar. Disk üzerinde bulunan hareketli kontak hareket sonunda kontağını kapatır ve aşırı akım yardımcı rölesini çektirir. Böylece aşırı akım indikatörü, aşırı akımın olduğunu gösterir. Aşırı akım açma zamanı ayar düğmesi ile seçilir. Akımın kesilmesi ile disk özel ölçü yayı vasıtası ile başlangıç noktasına alınır.

Kısa devre ünitesi gecikmesiz çalışan indüksiyon magnetiği ile çalışır. Rölede aşırı akım katsayısı, kısa devre akımı ayar düğmesi ile seçilmektedir. Kısa devre akımı ayarlanan değerin üzerine çıktığında kısa devre ünitesi kontağını kapatır ve yardımcı röleye kumanda eder. Gösterge renginin beyazdan turuncuya dönmesi kısa devre olduğunu gösterir.

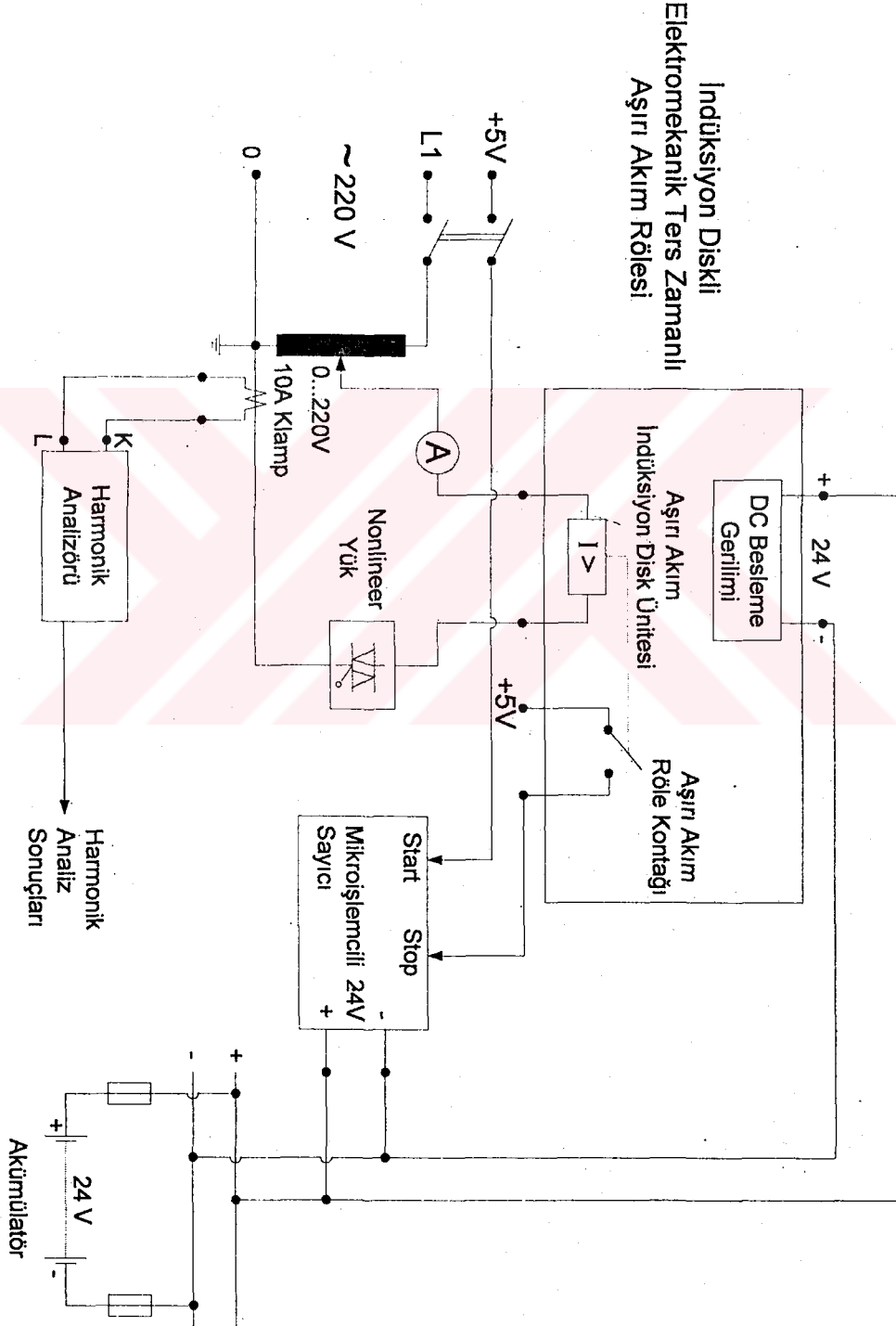
Aşağıda kısa devre açma karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 6.4 İndüksiyon diskli elektromekanik ters zamanlı aşırı akım rölesinin kısa devre açma karakteristiği (DEMA kataloğu, 2000)

#### 6.4.2 İndüksiyon Diskli Elektromekanik Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi Deneyinin Yapılması

Ölçümler için Şekil 6.5’de gösterilen deney devresi kullanılmıştır. Nonlineer yük olarak triyak kontrollü rezistif yüklü bir devre kullanılmıştır. Nonlineer yük akımının zamana göre değişimi Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.5 İndüksiyon diskli elektromekanik ters zamanlı aşırı akım rölesi deney devresi

Deneyde triyak ateşleme açısı ( $\alpha$ ) ve devreye uygulanan gerilim değiştirilerek nonlinear yük akımının genliği ve toplam harmonik distorsiyonu (THD<sub>i</sub>) değiştirilebilmektedir.

Deneyde farklı harmonik spektrumlarına sahip nonlinear yük akımlarının rölenin dinamik davranışına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, triyak ateşleme açısı  $\alpha$  Çizelge 6.1'de gösterilen altı farklı değere ayarlanmıştır ve bu altı mod için ölçümler yapılmıştır. Her mod için  $\alpha$  sabit tutularak ototransformatör yardımıyla nonlinear yük akımının efektif değeri değiştirilmiş nonlinear yük akımının temel bileşen ve harmonik bileşen akımları, THD<sub>i</sub> değerleri, nonsinüsoidal akımın efektif değeri, rölenin çalışma akımı ve cevap süresi ölçülerek veri tabloları oluşturulmuştur. Aynı ölçümler tüm modlar için yapılmıştır. Tüm ölçümlerde rölenin çalışma akımı saf sinüsoidal akım için 1 Amper rms değerine ayarlanmış ve deney süresince değiştirilmemiştir. İdeal olarak sinüsoidal dalga şekline sahip olması gereken şebeke gerilimi distorsiyonludur, şebeke geriliminin THD<sub>v</sub> değeri %3 - %7 civarındadır.

Deneyde elde edilen ölçüm sonuçları her mod için ayrı ayrı Çizelge 6.2, Çizelge 6.3, Çizelge 6.4, Çizelge 6.5, Çizelge 6.6, Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Mod 0 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları

| $I_{rms}$ (A) | $I_1$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   |
|---------------|-----------|----------------------|--------|
| 1.1           | 1.0975    | 6.0010               | 16.318 |
| 1.2           | 1.2094    | 6.7337               | 10.777 |
| 1.3           | 1.3023    | 5.8734               | 8.755  |
| 1.4           | 1.4022    | 5.8422               | 7.267  |
| 1.5           | 1.5015    | 6.0742               | 6.522  |
| 1.6           | 1.6014    | 6.3769               | 5.958  |
| 1.7           | 1.7075    | 5.8945               | 5.345  |
| 1.8           | 1.8044    | 6.0316               | 5.199  |
| 1.9           | 1.8976    | 6.3123               | 4.876  |
| 2.1           | 2.1015    | 6.2068               | 4.335  |
| 2.2           | 2.2017    | 6.1646               | 4.238  |
| 2.3           | 2.3049    | 6.8553               | 4.141  |
| 2.4           | 2.3989    | 7.0745               | 4.130  |

Çizelge 6.3 Mod 1 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları

| $I_{rms}$ (A) | $I_l$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   |
|---------------|-----------|----------------------|--------|
| 1.2           | 1.1422    | 35.3101              | 17.347 |
| 1.3           | 1.2423    | 33.6806              | 12.276 |
| 1.4           | 1.3437    | 32.3516              | 9.609  |
| 1.5           | 1.4410    | 31.3289              | 8.302  |
| 1.6           | 1.5408    | 30.8599              | 7.190  |
| 1.7           | 1.6409    | 29.2126              | 6.565  |
| 1.9           | 1.8414    | 28.1155              | 5.352  |
| 2.1           | 2.0375    | 26.7684              | 5.088  |
| 2.2           | 2.1350    | 26.1434              | 4.891  |
| 2.3           | 2.2279    | 25.8756              | 4.707  |
| 2.4           | 2.3325    | 25.4594              | 4.594  |
| 2.5           | 2.4307    | 25.0310              | 4.483  |

Çizelge 6.4 Mod 2 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları

| $I_{rms}$ (A) | $I_l$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   |
|---------------|-----------|----------------------|--------|
| 1.4           | 1.2997    | 43.9829              | 12.541 |
| 1.5           | 1.4006    | 41.6213              | 10.078 |
| 1.6           | 1.4923    | 40.3583              | 8.257  |
| 1.7           | 1.5896    | 38.8949              | 7.682  |
| 1.8           | 1.6933    | 37.5775              | 6.967  |
| 1.9           | 1.8044    | 36.2994              | 6.371  |
| 2.0           | 1.8952    | 35.1163              | 5.984  |
| 2.2           | 2.0948    | 33.8428              | 5.271  |
| 2.3           | 2.1908    | 33.1266              | 5.126  |
| 2.4           | 2.2950    | 32.0956              | 4.904  |
| 2.5           | 2.3893    | 31.4527              | 4.844  |

Çizelge 6.5 Mod 3 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları

| $I_{rms}$ (A) | $I_1$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   |
|---------------|-----------|----------------------|--------|
| 1.6           | 1.3352    | 68.9976              | 20.444 |
| 1.7           | 1.4298    | 66.2637              | 11.769 |
| 1.8           | 1.5428    | 63.9780              | 9.041  |
| 1.9           | 1.6330    | 62.3266              | 8.852  |
| 2.1           | 1.8348    | 57.7019              | 7.925  |
| 2.3           | 2.0415    | 54.3674              | 6.832  |
| 2.5           | 2.2356    | 51.5610              | 6.127  |

Çizelge 6.6 Mod 4 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları

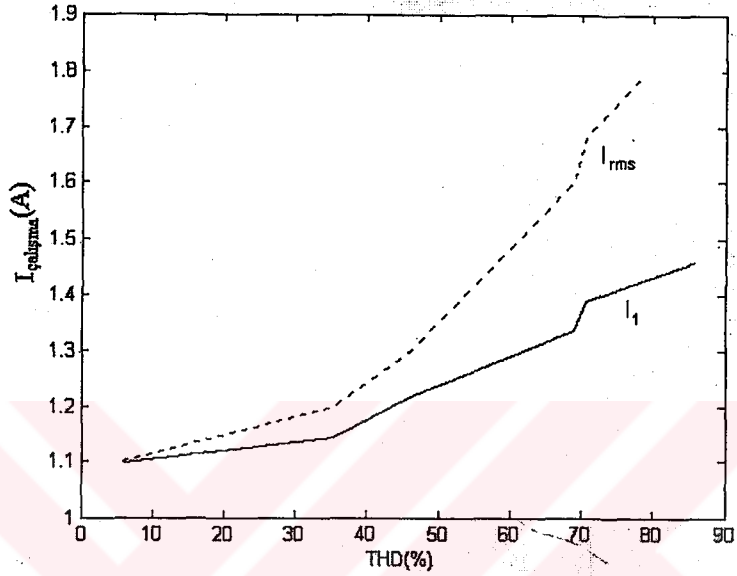
| $I_{rms}$ (A) | $I_1$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   |
|---------------|-----------|----------------------|--------|
| 1.7           | 1.3930    | 72.5661              | 15.435 |
| 1.8           | 1.4966    | 70.3076              | 13.333 |
| 2.0           | 1.7008    | 65.2308              | 9.582  |
| 2.1           | 1.8111    | 63.1822              | 8.508  |
| 2.3           | 1.9855    | 60.1068              | 7.428  |
| 2.4           | 2.1087    | 57.8187              | 6.796  |
| 2.5           | 2.1921    | 56.3810              | 6.622  |

Çizelge 6.7 Mod 5 için ters zamanlı aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları

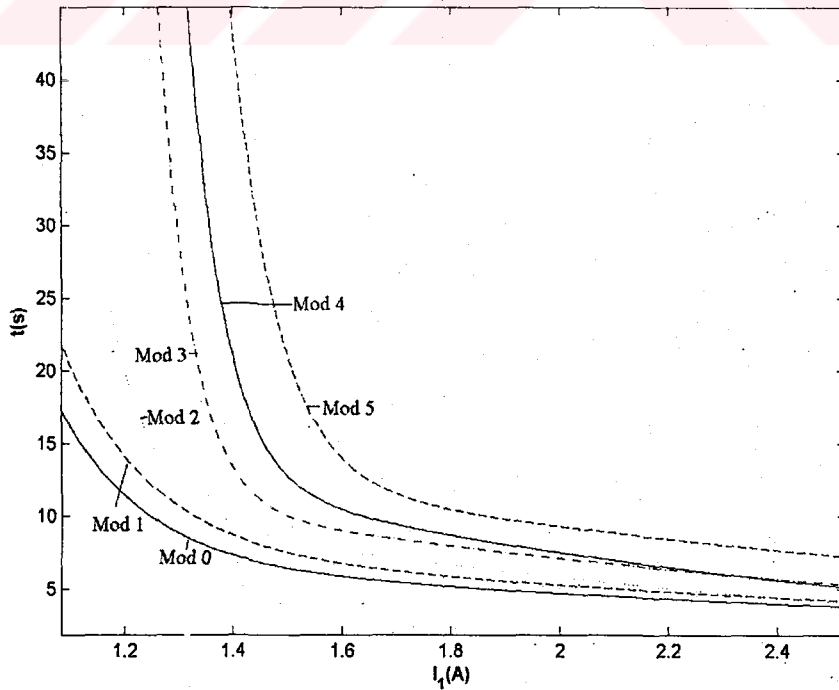
| $I_{rms}$ (A) | $I_1$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   |
|---------------|-----------|----------------------|--------|
| 1.90          | 1.4583    | 85.8677              | 27.292 |
| 2.02          | 1.5681    | 83.5548              | 14.964 |
| 2.10          | 1.6306    | 82.5535              | 12.941 |
| 2.21          | 1.7477    | 80.2299              | 10.621 |
| 2.26          | 1.7894    | 79.3045              | 10.519 |

Deneyde elde edilen sonuçlara göre Şekil 6.6'da rölenin çalışma akımının röleden geçen nonsinüsoidal akımın THD değerine göre değişimi gösterilmiştir. Akımın THD değeri yükseldikçe rölenin çalışma akımı da artmaktadır. Sinüsoidal akım için 1 Amper'e ayarlanan

bu röle THD<sub>i</sub> değeri yaklaşık %86 olduğu zaman ancak 1.9 Amperde çalışmaktadır. Hat, transformatör ve motor gibi güç sistem elemanlarının iletkenlerinin ısınması, hasar görmesi akımın efektif değerine ve akımın geçtiği süreye bağlıdır. 1 Amper değerinde çalışması gereken röle 1.9 Amper değerinde çalıştığı için güç sistem elemanları hasar görecektir, röle koruma fonksiyonunu gerçekleştiremeyecektir.

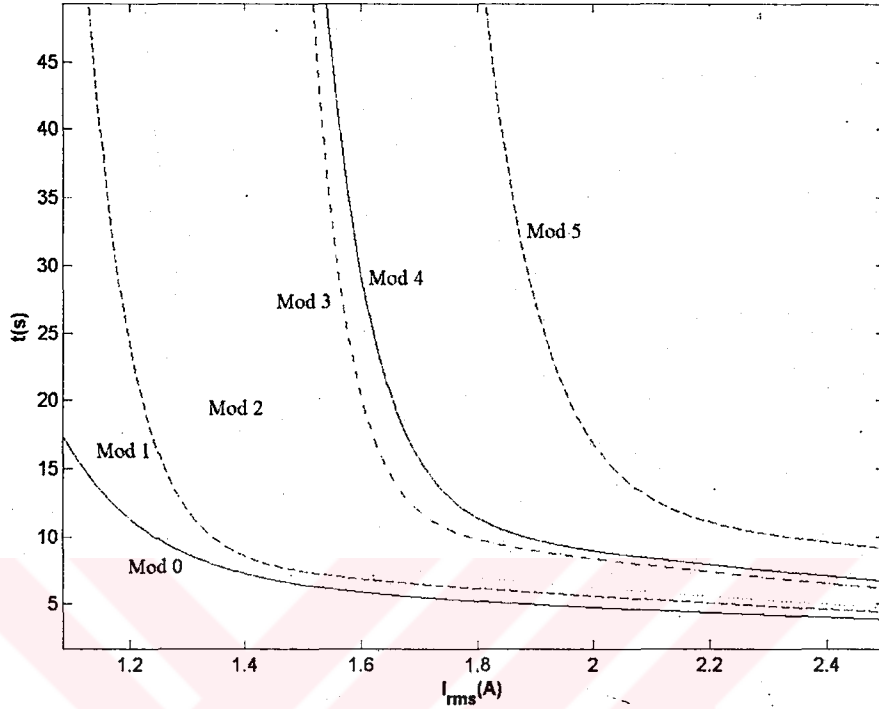


Şekil 6.6 Rölenin çalışma akımının THD<sub>i</sub> değerine göre değişimi



Şekil 6.7 Rölenin cevap süresinin akımın temel bileşenine göre değişimi

Deneyden elde edilen sonuçlara göre, Şekil 6.7’de röleden geçen akımın temel bileşen değerine göre rölenin cevap süresinin değişimi, Şekil 6.8’de ise röleden geçen akımın rms değerine göre rölenin cevap süresinin değişimi gösterilmiştir (Dalcı vd., 2005).



Şekil 6.8 Rölenin cevap süresinin akımın efektif değerine göre değişimi

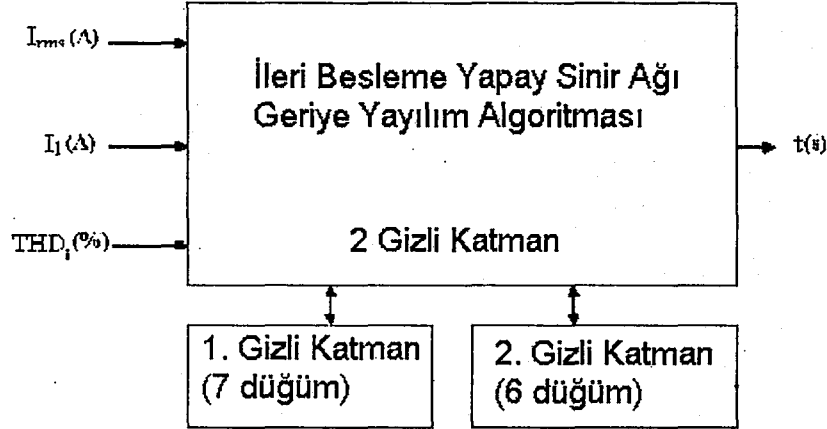
Çizelge 6.8 Aynı akım değeri (2 Amper) için modlara göre rölenin cevap süreleri

| Mod | $I_{rms}$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   |
|-----|---------------|----------------------|--------|
| 0   | 2.00          | 6.43                 | 4.634  |
| 1   | 2.00          | 27.45                | 5.268  |
| 2   | 2.00          | 35.12                | 5.984  |
| 3   | 2.00          | 59.50                | 8.682  |
| 4   | 2.00          | 65.23                | 9.582  |
| 5   | 2.00          | 85.20                | 14.964 |

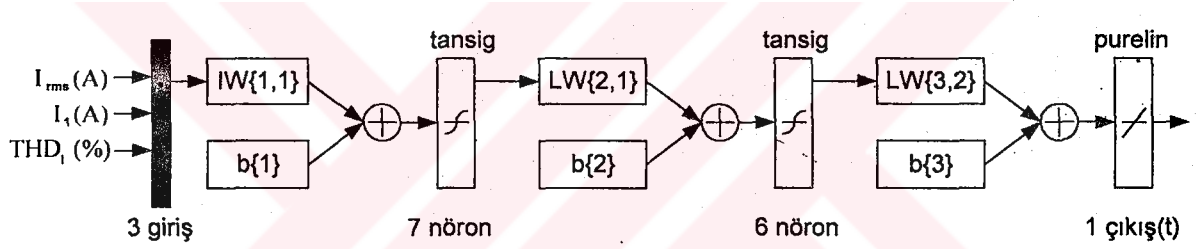
#### 6.4.3 Deney Sonuçlarının Yapay Sinir Ağı Algoritmalarına Uygulanması

Nonlineer yük akımları için rölenin dinamik karakteristiği yapay sinir ağlarıyla bilgisayarda simüle edilmiştir. İleri besleme sinir ağı geriye yayılım algoritmasının uygulamasında giriş değerleri olarak, akımın efektif değeri, akımın temel bileşeni ve akımın toplam harmonik distorsiyonu (THD<sub>i</sub>) hesaba alınmıştır. Çıkış değeri rölenin açma süresidir. Bu çalışmada

kullanılan yapay sinir ağlarının blok diyagramı ve modeli Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.9 Yapay sinir ağı genel blok diyagramı



Şekil 6.10 Yapay sinir ağı modeli

İlk katmanda 7 düğüm, ikinci katmanda 6 düğümlü iki gizli katman vardır. Momentum ve öğrenme hızları sırasıyla  $\epsilon=0,9$  ve  $\alpha=0,7$  olarak ayarlanmıştır. Çizelge 6.9'da verilen ölçülen nonsinüsoidal akımların röle çalışma zaman değerleri ve harmonik analiz sonuçları ile ölçülmeyen nonsinüsoidal akım değerleri için, rölenin dinamik karakteristiği ve çalışma zamanını belirlemek için MATLAB'de (yapay sinir ağları araç kutusu) ileri beslemeli yapay sinir ağı algoritması uygulanmıştır.

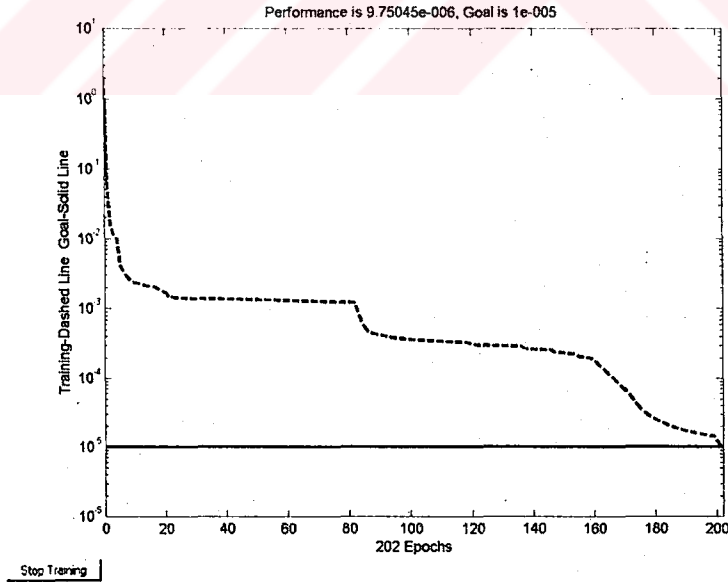
Çizelge 6.9 Bütün modlar için eğitim sonuçları

| Mod-0         |           |                      |        | Mod-1         |                |                      |      |
|---------------|-----------|----------------------|--------|---------------|----------------|----------------------|------|
| $I_{rms}$ (A) | $I_1$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   | $I_{rms}$ (A) | $I_1$ (A)      | THD <sub>i</sub> (%) | t(s) |
| 1.1           | 1.0975    | 6.0010               | 16.318 | 1.1           | Röle çalışmadı |                      |      |

|               |                |                      |        |               |                |                      |        |
|---------------|----------------|----------------------|--------|---------------|----------------|----------------------|--------|
| 1.2           | 1.2094         | 6.7337               | 10.777 | 1.2           | 1.1422         | 35.3101              | 17.347 |
| 1.3           | 1.3023         | 5.8734               | 8.755  | 1.3           | 1.2423         | 33.6806              | 12.276 |
| 1.4           | 1.4022         | 5.8422               | 7.267  | 1.4           | 1.3437         | 32.3516              | 9.609  |
| 1.5           | 1.5015         | 6.0742               | 6.522  | 1.5           | 1.4410         | 31.3289              | 8.302  |
| 1.6           | 1.6014         | 6.3769               | 5.958  | 1.6           | 1.5408         | 30.8599              | 7.190  |
| 1.7           | 1.7075         | 5.8945               | 5.345  | 1.7           | 1.6409         | 29.2126              | 6.565  |
| 1.8           | 1.8044         | 6.0316               | 5.199  | 1.9           | 1.8414         | 28.1155              | 5.352  |
| 1.9           | 1.8976         | 6.3123               | 4.876  | 2.1           | 2.0375         | 26.7684              | 5.088  |
| 2.1           | 2.1015         | 6.2068               | 4.335  | 2.2           | 2.1350         | 26.1434              | 4.891  |
| 2.2           | 2.2017         | 6.1646               | 4.238  | 2.3           | 2.2279         | 25.8756              | 4.707  |
| 2.3           | 2.3049         | 6.8553               | 4.141  | 2.4           | 2.3325         | 25.4594              | 4.594  |
| 2.4           | 2.3989         | 7.0745               | 4.130  | 2.5           | 2.4307         | 25.0310              | 4.483  |
| <b>Mod-2</b>  |                |                      |        | <b>Mod -3</b> |                |                      |        |
| $I_{rms}$ (A) | $I_1$ (A)      | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   | $I_{rms}$ (A) | $I_1$ (A)      | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   |
| 1.4           | Röle çalışmadı |                      |        | 1.4           | Röle çalışmadı |                      |        |
| 1.5           | 1.4006         | 41.6213              | 10.078 | 1.5           | Röle çalışmadı |                      |        |
| 1.6           | 1.4923         | 40.3583              | 8.257  | 1.6           | 1.5408         | 30.8599              | 7.190  |
| 1.7           | 1.5896         | 38.8949              | 7.682  | 1.7           | 1.6409         | 29.2126              | 6.565  |
| 1.8           | 1.6933         | 37.5775              | 6.967  | 1.6           | 1.3352         | 68.9976              | 20.444 |
| 1.9           | 1.8044         | 36.2994              | 6.371  | 1.7           | 1.4298         | 66.2637              | 11.769 |
| 2.0           | 1.8952         | 35.1163              | 5.984  | 1.8           | 1.5428         | 63.9780              | 9.041  |
| 2.2           | 2.0948         | 33.8428              | 5.271  | 1.9           | 1.6330         | 62.3266              | 8.852  |
| 2.3           | 2.1908         | 33.1266              | 5.126  | 2.1           | 1.8348         | 57.7019              | 7.925  |
| 2.4           | 2.2950         | 32.0956              | 4.904  | 2.3           | 2.0415         | 54.3674              | 6.832  |

| 2.5           | 2.3893         | 31.4527              | 4.844  | 2.5           | 2.2356         | 51.5610              | 6.127  |
|---------------|----------------|----------------------|--------|---------------|----------------|----------------------|--------|
| Mod-4         |                |                      |        | Mod-5         |                |                      |        |
| $I_{rms}$ (A) | $I_l$ (A)      | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   | $I_{rms}$ (A) | $I_l$ (A)      | THD <sub>i</sub> (%) | t(s)   |
| 1.6           | Röle çalışmadı |                      |        | 1.6           | Röle çalışmadı |                      |        |
| 1.7           | 1.3930         | 72.5600              | 15.435 | 1.7           | Röle çalışmadı |                      |        |
| 1.8           | 1.4966         | 70.3076              | 13.333 | 1.8           | Röle çalışmadı |                      |        |
| 2.0           | 1.7008         | 65.2308              | 9.582  | 1.90          | 1.4583         | 85.8677              | 27.292 |
| 2.1           | 1.8111         | 63.1822              | 8.508  | 2.02          | 1.5681         | 83.5548              | 14.964 |
| 2.3           | 1.9855         | 60.1068              | 7.428  | 2.10          | 1.6306         | 82.5535              | 12.941 |
| 2.4           | 2.1087         | 57.8187              | 6.796  | 2.21          | 1.7477         | 80.2299              | 10.621 |
| 2.5           | 2.1921         | 56.3810              | 6.622  | 2.26          | 1.7894         | 79.3045              | 10.519 |

Yapay sinir ağı performans diyagramı Şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 Yapay sinir ağı performans diyagramı.

Test faz sonuçları ve yapay sinir ağlarının bağıl hataları Çizelge 6.10’da verilmiştir.

Çizelge 6.10 Test sonuçları

| Durumlar | $I_{rms}$ (A) | $I_1$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | t(s) - Gerçek | t(s) - NNs | Bağıl hata |
|----------|---------------|-----------|----------------------|---------------|------------|------------|
| 0        | 2.0           | 2.0010    | 6.4338               | 4.6340        | 4.6774     | 0.0094     |
| 1        | 2.0           | 1.9337    | 27.4502              | 5.2680        | 5.2629     | 0.000968   |
| 2        | 2.1           | 1.9914    | 34.2464              | 5.6330        | 5.6534     | 0.0036     |
| 3        | 2.4           | 2.1399    | 53.4397              | 6.4350        | 6.4322     | 0.000435   |
| 4        | 1.9           | 1.5935    | 67.8967              | 11.1840       | 11.2314    | 0.0042     |
| 5        | 2.15          | 1.6923    | 81.0465              | 11.8190       | 11.6102    | 0.0177     |

Bu çalışma, yapay sinir ağı algoritmasının koruma rölelerinde analiz ve simülasyon çalışmaları için başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Genelleştirilmiş sistem hatası  $9,75045 \times 10^{-6}$  'dır ve aynı zamanda test durumunda ortalama hata 0,0061'dir. Bunlar yapay sinir ağları için oldukça başarılı sonuçlardır. Farklı harmonik spektrumlarına sahip olan nonsinüsoidal akımlarla, ters zamanlı aşırı akım rölesinin çalışması yapay sinir ağı algoritması kullanılarak simüle edilmiştir. Bu çalışmada yapay sinir ağı simülasyon sonuçlarını kullanarak nonsinüsoidal akımlar için rölenin çalışma zamanını veya çekme akımın belirlemek mümkündür.

#### 6.4.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 6.8'de gösterildiği gibi, tüm modlarda röleden geçen akımın efektif değeri aynı olmasına rağmen rölenin cevap süreleri her mod için farklıdır, akımın THD<sub>i</sub> değeri arttıkça (harmonik akım bileşenlerinin değeri temel bileşene göre yükseldikçe) rölenin cevap süresi de artmaktadır. Bunun nedeni nonlineer yük akımının harmonik bileşenleri nedeniyle rölenin indüksiyon diskinin daha yavaş dönmesidir. Akımın harmonik bileşenleri içermesi sebebiyle rölenin kumanda zamanının artması röle tarafından korunan güç sistemi elemanlarının hasar görmesine neden olacaktır.

### 6.5 Harmoniklerin Sabit Zamanlı (Bağımsız) Elektromekanik Aşırı Akım Rölesine Etkisinin Deneysel Çalışma İle İncelenmesi

#### 6.5.1 Deneyde Kullanılan Sabit Zamanlı (Bağımsız) Elektromekanik Aşırı Akım Rölesi

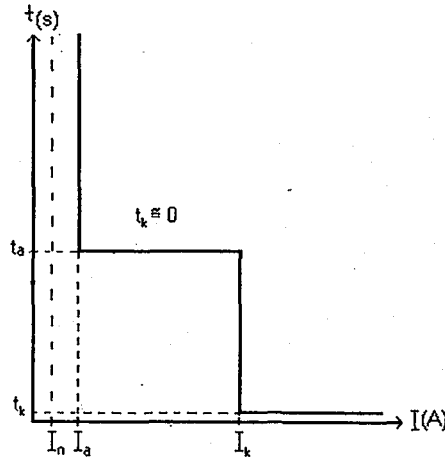
Sabit zamanlı (bağımsız) elektromekanik aşırı akım rölesi, tek yönlü beslenen şebekelerde primer gerilim ve nominal primer akımdan tamamen bağımsız olarak kullanılır. Her 3 fazdaki

aşırı akım ve kısa devreler için koruma görevi yapar. Ana dağıtım baralarını besleyen giriş hatlarında, ana baradaki trafo, Y.G. motoru, tali bara beslemelerinde ve uzun kablo çıkışlarında aşırı akım ve kısa devre korumalarında kullanılır.



Şekil 6.12 Sabit zamanlı (bağımsız) elektromekanik aşırı akım rölesi

Bu tip rölelerde, rölenin aşırı akım geçmeye başladıktan sonra kontağını kapatarak kesiciye açma kumandası verinceye kadar geçen süre akımdan bağımsız ve sabittir. Açma süresi röle üzerinden ayarlanır. Ayrıca rölenin açma kumandası vereceği aşırı akım ( $I_a$ ) ve kısa devre akımı ( $I_k$ ) değerleri de röle üzerinden önceden ayarlanır.



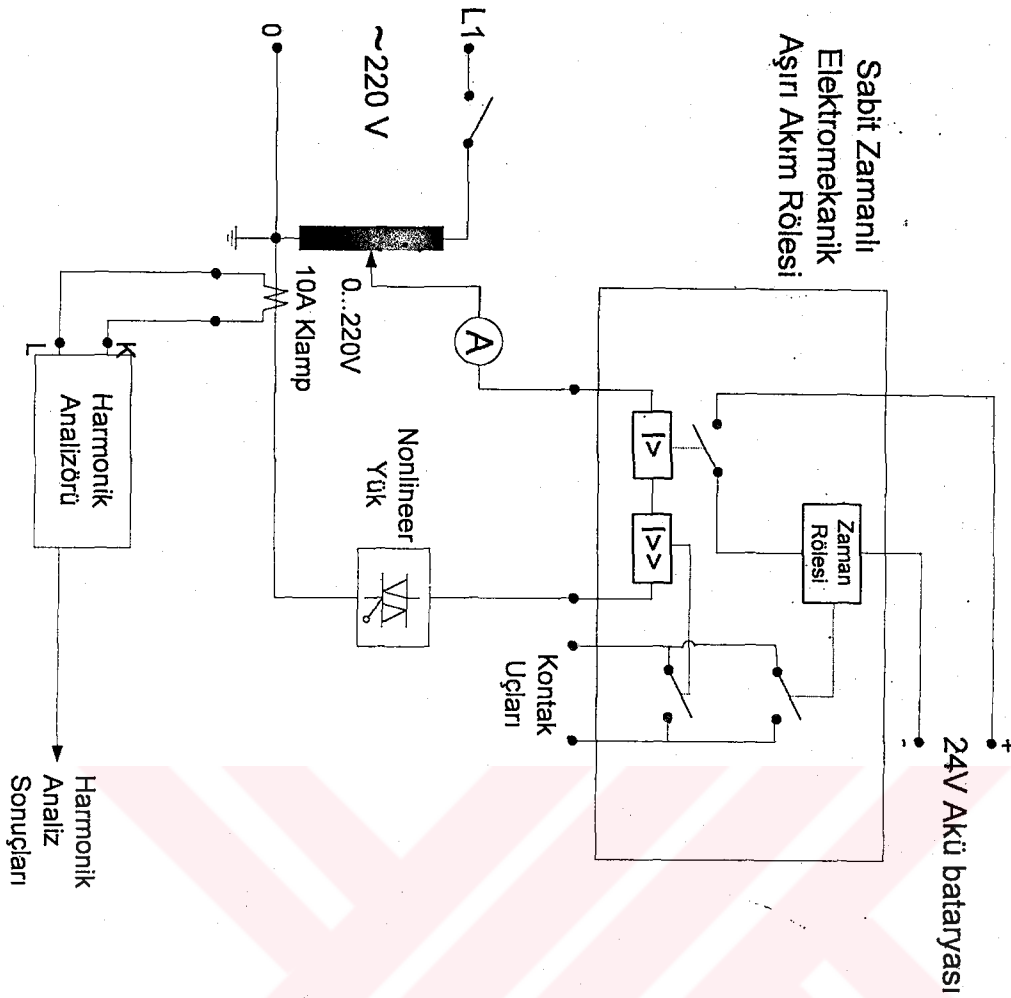
Şekil 6.13 Bağımsız aşırı akım- kısa devre rölesinin çalışma karakteristiği

Burada  $I_n$  rölenin koruduğu yükün nominal akımı,  $I_a$  rölenin ayarlandığı aşırı akım,  $I_k$  rölenin ayarlandığı kısa devre akımıdır. Karakteristikten de görüleceği gibi geçen akım  $I_a$  dan az ise röle açma kumandası vermez. Akım nominal-kısa devre aralığında ise röle aşırı akım açma zamanı sonunda açar. Eğer akım kısa devre akımından büyükse bu takdirde röle neredeyse zaman farkı olmaksızın ani olarak devreyi açar. Burada  $t_k$  rölenin açma zamanıdır ( $t_k \approx 0$ ).

Akım trafolarının sekonder akımları, rölenin ayarlanmış akım değerlerinin aştığı takdirde aşırı akım veya kısa devre üniteleri kontaklarını kapatır. Röle üzerinde, aşırı akım bulunan faza ait sinyal lambası yanar. Aşırı akım, ayarlanmış zaman sürecinde devam ederse zaman rölesi kontağını kapatır ve elektriksel anlamda kendini kilitler. Bu arada aşırı akım olan fazı belirten sinyal lambası da kilitlenir ve sürekli yanık kalır. Kilitlenmiş olan zaman rölesi ve sinyal lambası, cihaz üzerindeki reset butonu vasıtasıyla sıfırlanır. Aşırı akım, ayarlanmış zaman süresinden önce ortadan kalkar ve normal işletme akımına dönülürse sinyal lambası reset yapılmadan söner. Cihazda bulunan her faza ait kısa devre röleleri, ayarlanmış değer üzerindeki bir akımda zaman gecikmesiz olarak kontaklarının kapatır.

### 6.5.2 Sabit Zamanlı (Bağımsız) Elektromekanik Aşırı Akım Rölesi Deneyinin Yapılması

Deneylerde Şekil 6.14'de gösterilen devre kullanılmıştır. Nonlinear yük olarak Şekil 6.1'de gösterilen triyak kontrollü devre kullanılmıştır.



Şekil 6.14 Sabit zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesi

Sabit zaman aşırı akım rölesinin zaman gecikmesi çalışma akımından bağımsızdır. Bu nedenle bu röleler “Bağımsız aşırı akım rölesi” olarak da adlandırılır. Bu rölede zaman gecikmesi röle içerisinde yer alan bir “Elektronik zaman geciktirme devresi” tarafından sağlanmaktadır. Zaman gecikmesi röle üzerindeki saniye birimiyle ölçeklendirilmiş bir potansiyometre ile ayarlanabilmektedir. Aşırı akım rölesi girişine uygulanan akımın sinüsoidal olması ya da harmonik bileşenleri içermesi sadece aşırı akım rölesinin çalışma akımını değiştirmektedir, zaman gecikmesi sabittir. Bu nedenle deneysel çalışmada ters zamanlı aşırı akım rölesi deneyinden farklı olarak rölenin zaman gecikmesi ölçülmemiş sadece rölenin çalışma akımı ( $I_{\text{çalışma}}$ ) ölçülmüştür.

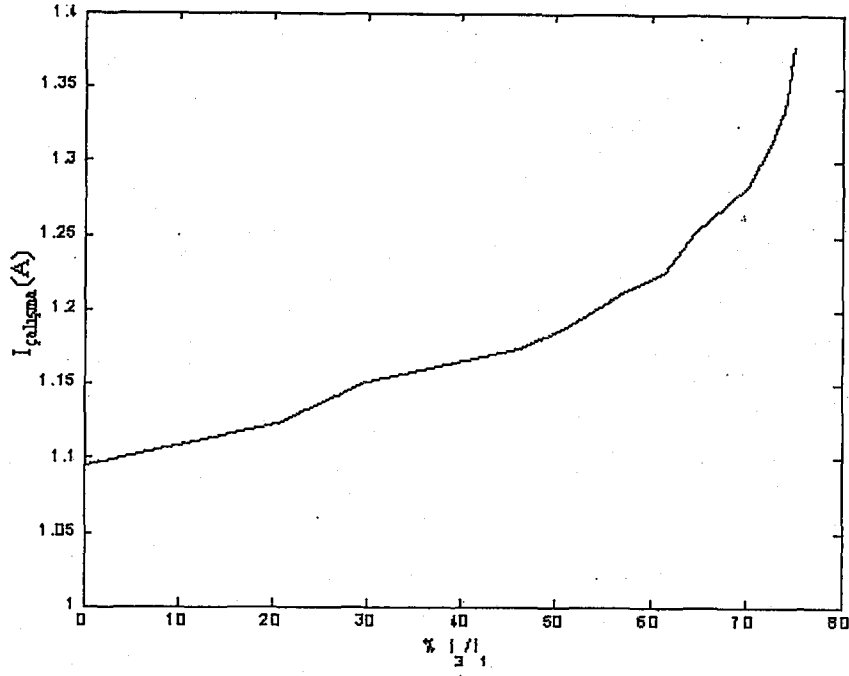
Triyak tetikleme açısı  $\alpha$  değişik değerlere ayarlanarak nonlineer yük için onaltı ayrı ölçüm yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçları Çizelge 6.11’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.11 Sabit zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesi ölçüm sonuçları

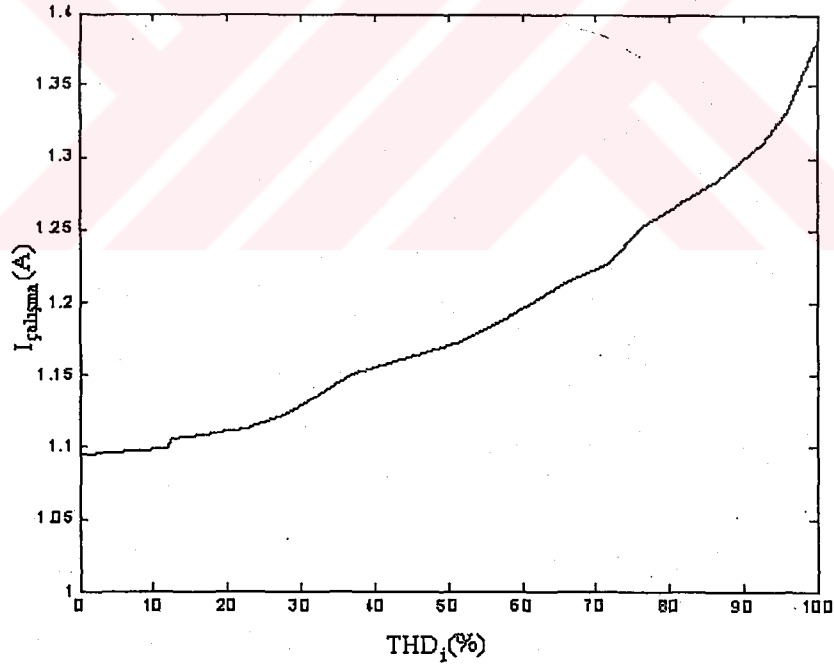
| Ölçüm No | %THD <sub>i</sub> | I <sub>1</sub> (A) | % $\frac{I_3}{I_1}$ | % $\frac{I_5}{I_1}$ | % $\frac{I_7}{I_1}$ | % $\frac{I_9}{I_1}$ | % $\frac{I_{11}}{I_1}$ | % $\frac{I_{13}}{I_1}$ | I <sub>çalışma</sub> (A) |
|----------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| 1        | 0,0               | 1,095              | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                      | 0                      | 1,095                    |
| 2        | 11,9              | 1,091              | 3,2                 | 9,4                 | 3,4                 | 3,1                 | 2,7                    | 2,1                    | 1,099                    |
| 3        | 12,6              | 1,088              | 3,1                 | 10,1                | 3,6                 | 3,2                 | 2,6                    | 1,8                    | 1,106                    |
| 4        | 22,8              | 1,085              | 13,6                | 13,2                | 6,6                 | 5,8                 | 4                      | 3,3                    | 1,114                    |
| 5        | 28,35             | 1,081              | 20,5                | 13,4                | 8,5                 | 5,7                 | 4,4                    | 4,1                    | 1,124                    |
| 6        | 37,3              | 1,078              | 30                  | 12,8                | 10,8                | 6,6                 | 6,4                    | 4,8                    | 1,152                    |
| 7        | 52,0              | 1,042              | 46,1                | 12,2                | 10,9                | 10,2                | 6,6                    | 6,2                    | 1,174                    |
| 8        | 58,3              | 1,030              | 51,6                | 15                  | 11,5                | 10,4                | 7,7                    | 6,9                    | 1,190                    |
| 9        | 65,8              | 1,017              | 57,3                | 19,8                | 13,3                | 10,2                | 9,3                    | 7                      | 1,213                    |
| 10       | 71,5              | 0,997              | 61,4                | 23,7                | 15,2                | 10,3                | 10,5                   | 7,5                    | 1,226                    |
| 11       | 76,4              | 0,994              | 64,6                | 27,4                | 17,2                | 11,3                | 10,8                   | 8,8                    | 1,253                    |
| 12       | 79,6              | 0,984              | 66,2                | 30,6                | 18,6                | 12,5                | 10,9                   | 9,4                    | 1,262                    |
| 13       | 86,7              | 0,965              | 70,1                | 35,7                | 22,1                | 16,3                | 11,8                   | 11,5                   | 1,285                    |
| 14       | 92,8              | 0,963              | 72,6                | 39,4                | 24,6                | 18,9                | 12,9                   | 11,7                   | 1,311                    |
| 15       | 96,4              | 0,96               | 74                  | 41,1                | 25,7                | 19,8                | 13,8                   | 13                     | 1,335                    |
| 16       | 99,8              | 0,959              | 75,1                | 43,7                | 27,6                | 22,6                | 15,8                   | 13,2                   | 1,38                     |

Aşırı akım rölesine uygulanan, nonlinear yük akımının harmonik analizini gerçekleştirmek için Fluke 43B Harmonik Analizöründen yararlanılmıştır. Harmonik analizörü 10 amper anma akımlı bir klemp ile nonlinear yük akımı örneğini alarak, çıkış değeri olarak harmonik spektrumunu, THD<sub>i</sub> değerini, temel bileşen değerini, reaktif ve görünen değerlerini vb. ölçümlerini vermektedir.

Deneyde kullanılan sabit zamanlı aşırı akım rölesi 1.095 A değerinde çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyde elde edilen sonuçlara göre rölenin çekme akımının  $\% \frac{I_3}{I_1}$  ve THD<sub>i</sub> göre değişimi sırasıyla Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



Şekil 6.15 Rölenin çalışma akımının  $\% \frac{I_3}{I_1}$  göre değişimi

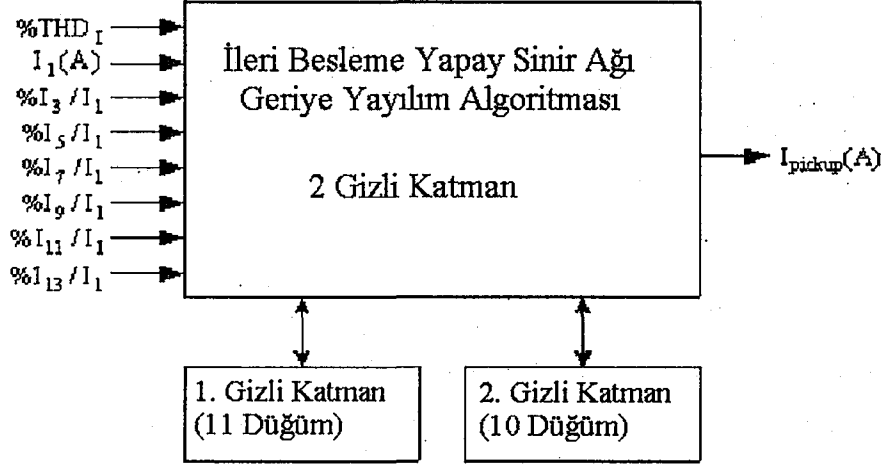


Şekil 6.16 Rölenin çalışma akımının THD<sub>1</sub> göre değişimi

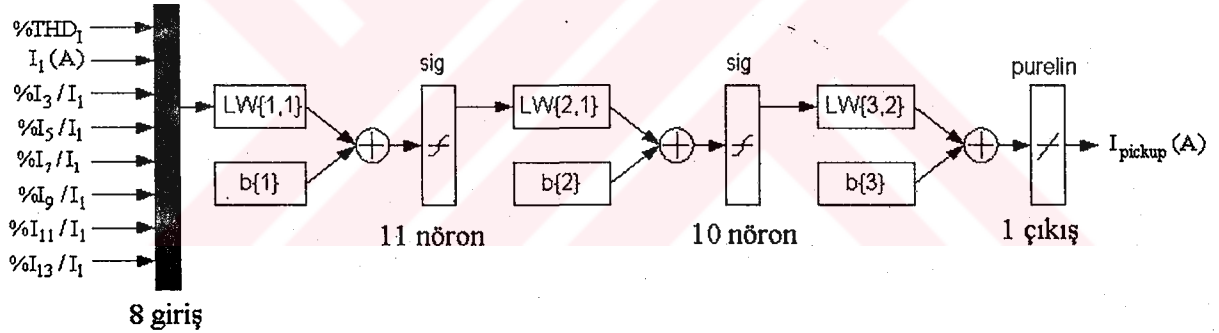
### 6.5.3 Deney Sonuçlarının Yapay Sinir Ağı Algoritmalarına Uygulanması

İleri besleme sinir ağı geriye yayılım algoritmasının uygulamasında giriş değerleri olarak, akımın temel bileşeninin efektif değeri, 3., 5., 7., 9., 11., 13. akım harmoniklerinin akımın

temel bileşene oranları ve akımın toplam harmonik distorsiyonu (THD<sub>i</sub>) hesaba alınmıştır. Bu nedenle 8 girişli yapay sinir ağı modeli kullanılmıştır. Çıkış değeri rölenin çekme akımıdır. Yapay sinir ağı modeli ve genel blok diyagramı sırasıyla Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de gösterilmiştir (Yumurtacı vd., 2005a; Yumurtacı vd., 2005b).



Şekil 6.17 Yapay sinir ağı genel blok diyagramı



Şekil 6.18 Yapay sinir ağı modeli

Birinci gizli katmanda 11 düğüm ve ikinci gizli katmanda 10 düğüm vardır. Momentum ve öğrenme hızları sırasıyla  $\epsilon=0,9$  ve  $\alpha=0,7$  olarak ayarlanmıştır. Sabit zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesi statik röle deney devresi kullanılarak alınan ölçümler klasik geri yayılım algoritması kullanılarak başarıyla eğitildi. Eğitim sonuçları Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 6.12 Test sonuçları

| $I_1(A)$ | THD <sub>i</sub> (%) | Ölçülen                  | Yapay sinir ağı sonuçları | Hata  |
|----------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------|
|          |                      | $I_{\text{çalışma}} (A)$ | $I_{\text{çalışma}} (A)$  | (%)   |
| 1.085    | 22.8                 | 1.114                    | 1.105                     | 0.808 |
| 1.017    | 65.8                 | 1.213                    | 1.206                     | 0.577 |
| 0.96     | 96.4                 | 1.335                    | 1.344                     | 0.674 |

Yapay sinir ağı modellerinin blokları, %0,0000001 genelleştirilmiş sistem hatasıyla 8-11-10-1'dir. Yapay sinir ağı iterasyon sayısı 511171'dir. Yapay sinir ağı algoritmasının çıkış değerleri olan rölenin çalışma akımı ( $I_{\text{çalışma}}$ ) başarıyla hesaplanmıştır.

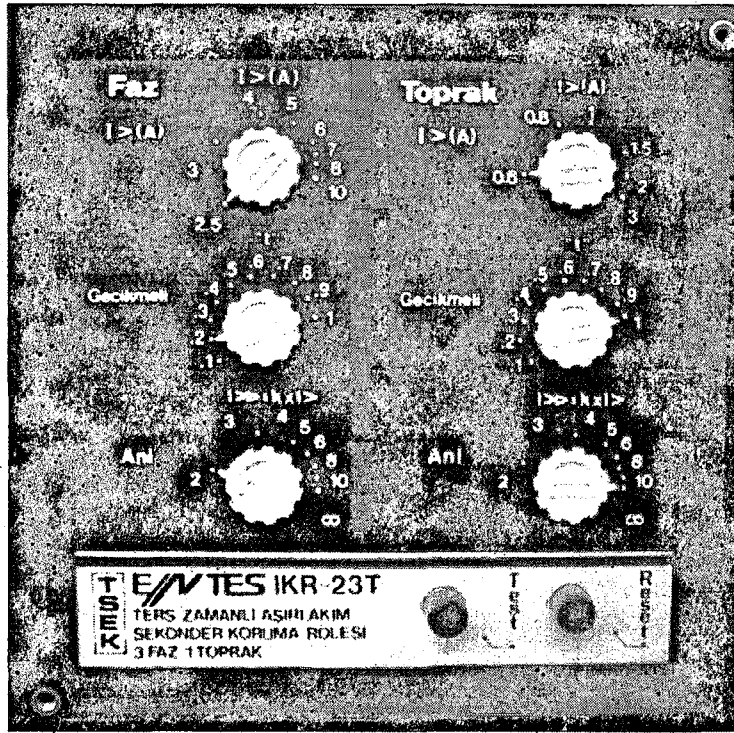
#### 6.5.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 6.11'den de görüldüğü gibi akımın THD değeri arttıkça rölenin çalışma akımı değeri artmaktadır. Akımın 1.095 A değerine ayarlanmasına rağmen röleden geçen akımın harmonikli olması durumunda rölenin kesiciye açma kumandası verdiği çalışma akımı değeri 1.38 A'e kadar çıkmaktadır. Transformator sargılarının ve hat iletkenlerinin aşırı akıma dayanma süresi akımın efektif değerine bağlıdır. Rölenin daha yüksek akımda faaliyete geçmesi, daha uzun sürede kesiciye açma kumandası vermesi korunan sistem elemanlarının hasar görmesine neden olacaktır.

### 6.6 Harmoniklerin Ters Zamanlı Statik Aşırı Akım Rölesine Etkisinin Deneysel Çalışma İle İncelenmesi

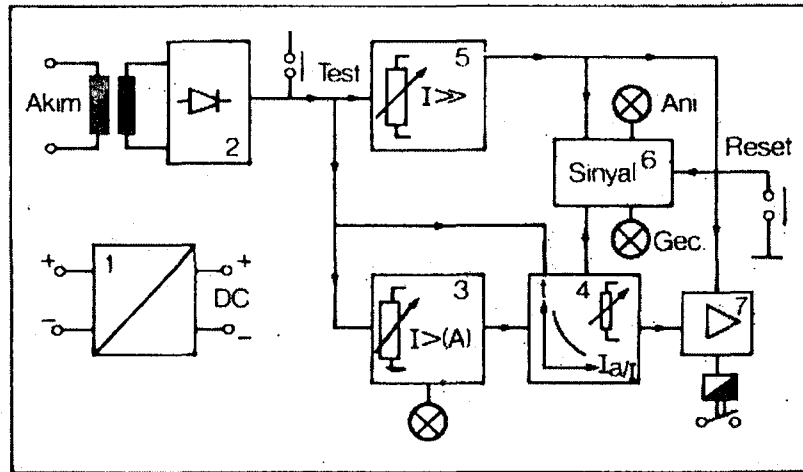
#### 6.6.1 Deneyde Kullanılan Statik Koruma Rölesi

Deneyde incelediğimiz bu röle IKR-23 T tipi toprak korumalı sekonder aşırı akım koruma rölesidir. Şekil 6.19'da ters zamanlı statik aşırı akım rölesi gösterilmektedir.

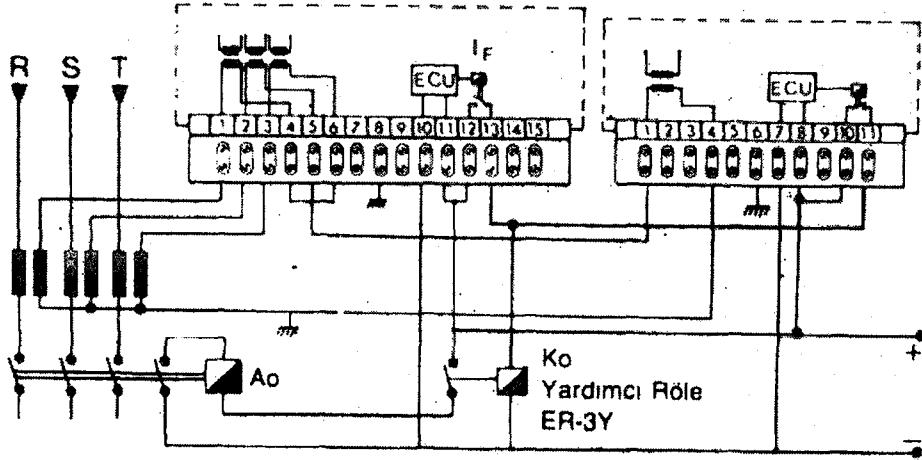


Şekil 6.19 Ters zamanlı statik aşırı akım rölesi

Şekil 6.20’de sekonder koruma rölesinin bir faz birimi gösterilmiştir. Bu röle 7 bölümden oluşmaktadır. Röle girişindeki akım trafosundan gelen akım bilgisi, “giriş devresi” (2) tarafından filtre edilerek ve düzenlenerek “akım ayar ve start devresine”(3) ve ani açma devresine (5) iletilir. (3) nolu devre, giriş devresinden gelen akım bilgisini, ayarlanan akım bilgisi ile karşılaştırır. Eğer gelen akım değeri, ayarlanan akım değerinden büyük ise, röle üzerindeki yeşil veya sarı ışık söner. Akım ayar devresinin ayarı “ $I > (A)$ ” düğmesi ile yapılır.



Şekil 6.20 Statik koruma rölesi bir faz gösterimi (Ürgüplü, 1997)



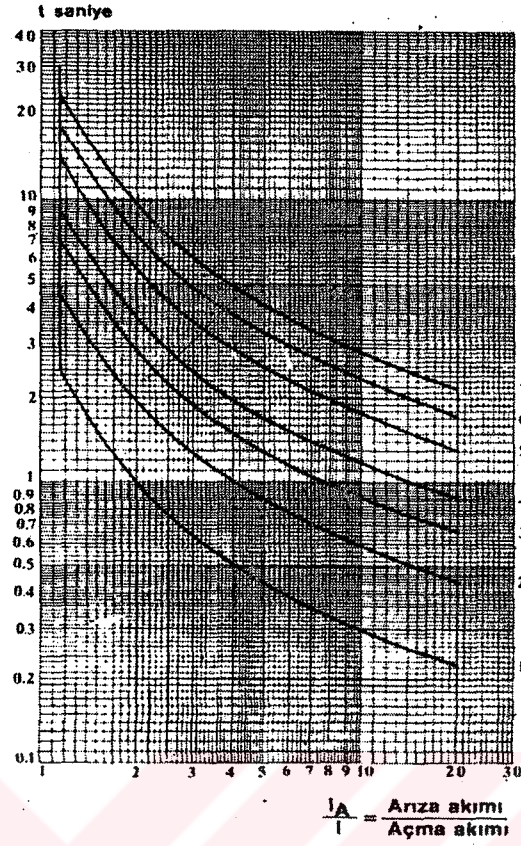
Şekil 6.21 Statik koruma rölesi bağlantı şeması (Ürgüplü, 1997)

Yeşil ışık söndüğü anda (5) nolu “gecikme zaman devresi” çalışarak zaman sayma işlemini başlatır. Ayarlanan süre sonunda, arıza durumu devam ederse çıkış rölesini çektirir (7) ve koruma fonksiyonu gerçekleşir. Gecikme zaman devresi “t” düğmesi ile ayarlanır. Gecikme zamanı röle ile birlikte verilen zaman karakteristik eğrilerinden hesaplanır. Röle üzerinde yer alan her “t” değeri için grafikte akım katlarının fonksiyonu olarak bir ters zaman eğrisi verilmiştir. Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24 üzerinden görüldüğü gibi arıza akımı büyüdükçe gecikme zamanı kısalmaktadır.

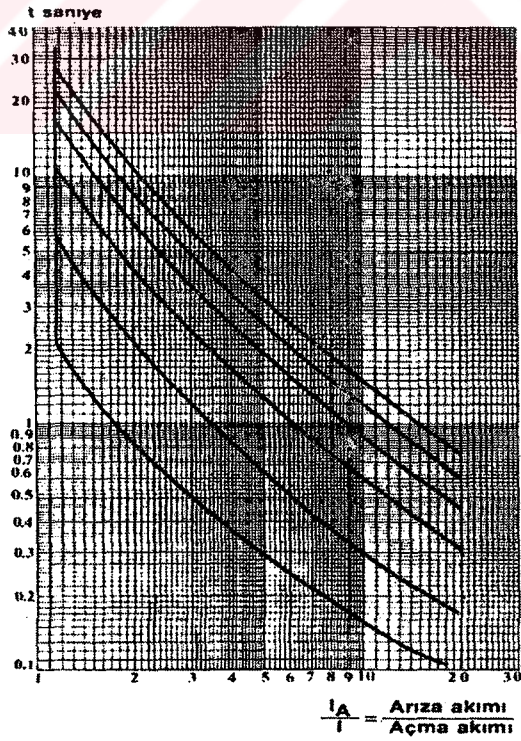
Bu tip röleler 3 değişik tipte imal edilmektedir;

- Normal ters zamanlı (normal inverse time)
- Çok ters zamanlı (very inverse time)
- Aşırı ters zamanlı (extremely inverse time)

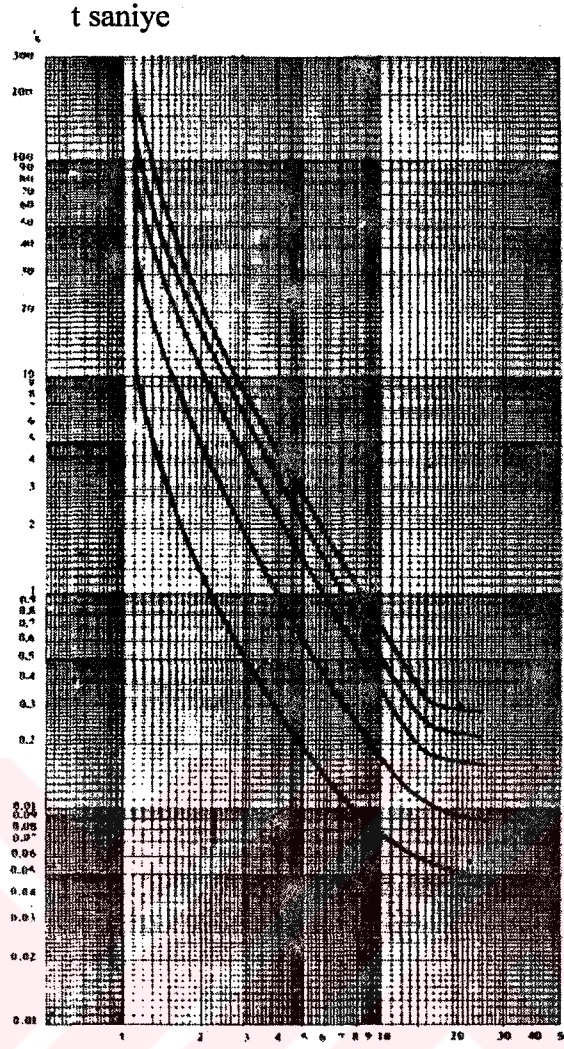
Aşağıda bu 3 tip röleye ait çalışma eğrileri verilmiştir. Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24’de verilen akım-zaman eğrileri harmonik bileşenleri içermeyen saf sinüsoidal akım için verilmiştir



Şekil 6.22 Normal ters zamanlı (Normal inverse) röle çalışma eğrileri (Ürgüplü, 1997)



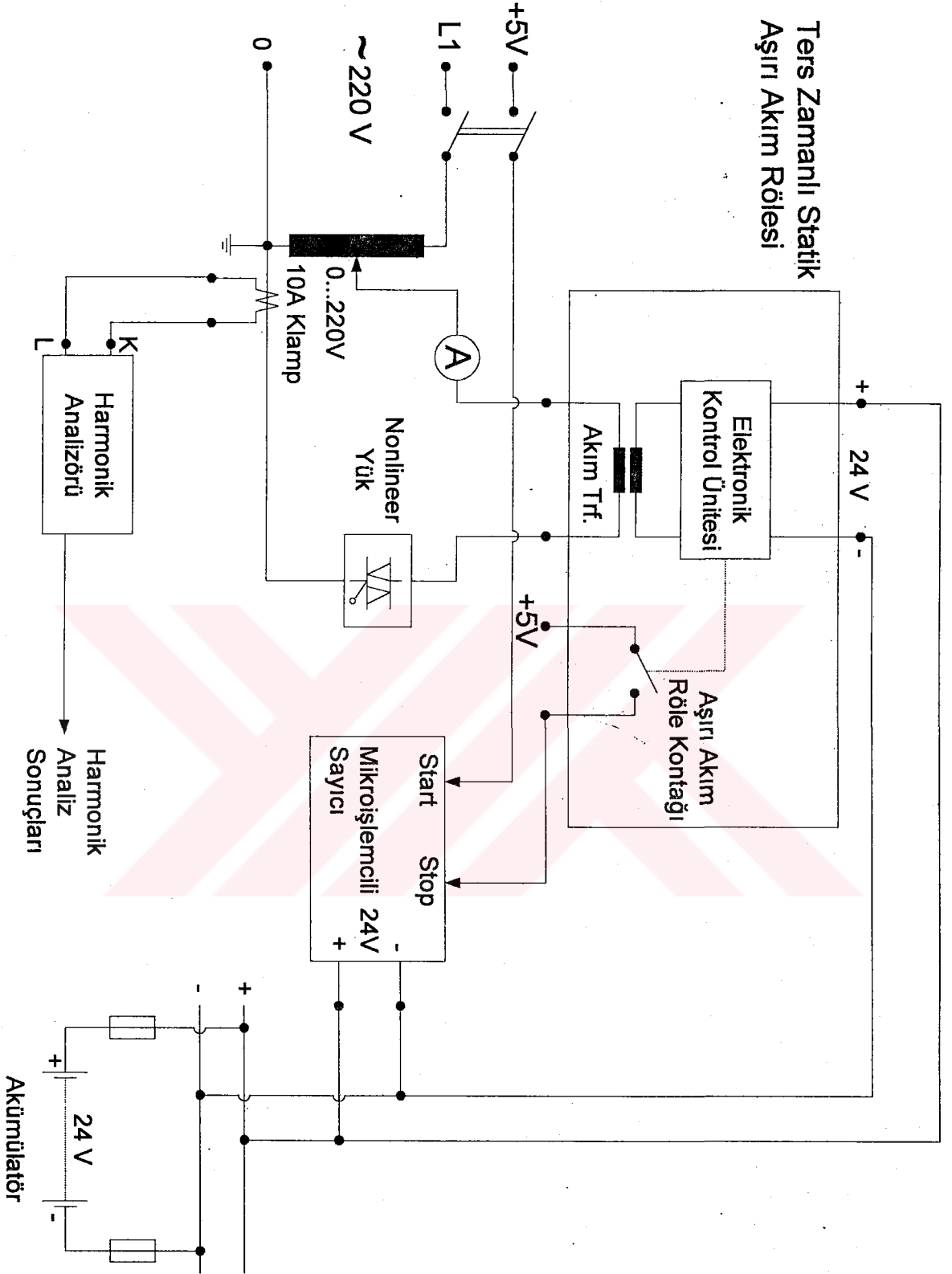
Şekil 6.23 Çok ters zamanlı (Very inverse) röle çalışma eğrileri (Ürgüplü, 1997)



Şekil 6.24 Aşırı ters zamanlı (Extremely inverse) röle çalışma eğrileri (Ürgüplü, 1997)

#### 6.6.2 Ters Zamanlı Statik Aşırı Akım Rölesi Deneyinin Yapılması

Deneylerde Şekil 6.25’de gösterilen devre kullanılmıştır. Nonlineer yük olarak Şekil 6.1’de gösterilen triyak kontrollü devre kullanılmıştır. Triyak tetikleme açısı  $\alpha$  Çizelge 6.1’deki değerlere ayarlanarak nonlineer yük için altı ayrı çalışma modu oluşturulmuştur. Bu modlar içinde mod 5 nonlineer yük akımının toplam harmonik distorsiyonu (THD<sub>i</sub>) değerinin en yüksek olduğu, başka bir ifade ile harmoniklerin en etkin olduğu durumdur.



Şekil 6.25 Ters zamanlı statik aşırı akım rölesi deney devresi

Devreden aşırı akım geçmesi halinde, ters zamanlı statik aşırı akım rölesinin normalde açık olan ve orta gerilim tesislerinde kesiciye açma kumandası veren kontağının kapanma süresini

(rölenin kumanda zamanını) ölçmek üzere mikro işlemcili bir sayacı kullanılmıştır. Sayıcı start ve stop girişlerine uygulanan lojik-1 (+5V) seviyesindeki işaretler arasındaki zaman gecikmesini 1/1000 saniye(1ms) hassasiyetle ölçmektedir.

Aşırı akım rölesine uygulanan, nonlinear yük akımının harmonik analizini gerçekleştirmek için Fluke 43B Harmonik Analizöründen yararlanılmıştır. Harmonik analizörü 10 amper anma akımlı bir klempten ile nonlinear yük akımı örneğini alarak, çıkış değeri olarak harmonik spektrumunu, THD<sub>i</sub> değerini, temel bileşen değerini, reaktif ve görünen değerlerini vb. ölçümlerini vermektedir.

Deneyde kullanılan ters zamanlı statik aşırı akım rölesi 0.6A değerinde çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Her ölçüm modu için triyak tetikleme açısı  $\alpha$ , bundan önceki indüksiyon diskli aşırı akım rölesi deneyinde açıklandığı gibi Çizelge 6.1'deki değerlere ayarlanmıştır.  $\alpha$  açısı ayarlanan değerde sabit tutularak ototransformatör yardımıyla nonlinear yüke uygulanan gerilim değiştirilerek harmonik bileşenleri içeren nonlinear yük akımı, efektif değeri 0.05A aralıklarla 0,65 A – 1,50 A aralığında değiştirilmiş, her akım değeri için rölenin kumanda zamanı t(s), nonlinear yük akımının THD<sub>i</sub> değeri, yüzde olarak nonlinear yük akımının harmonik bileşenlerinin temel bileşene oranları, şebeke geriliminin efektif değeri ve THD<sub>v</sub> değerleri ölçülmüştür. Ölçüm değerleri her bir mod için Çizelge 6.13, Çizelge 6.14, Çizelge 6.15, Çizelge 6.16, Çizelge 6.17 ve Çizelge 6.18'de verilmiştir.

Çizelge 6.13 Mod 0 için statik röle ölçüm sonuçları

| $I_{rms}(A)$ | $t(s)$ | $THD_i (%)$ | $I_1(A)$ | $\%I_n/I_1$ |     |     |     |      |      | Şebeke Gerilimi |            |
|--------------|--------|-------------|----------|-------------|-----|-----|-----|------|------|-----------------|------------|
|              |        |             |          | n=3         | n=5 | n=7 | n=9 | n=11 | n=13 | $V_{rms}(V)$    | $THD_v(%)$ |
| 0,65         | 22.956 | 4.44        | -        | -           | 3.2 | 2.6 | 0.8 | 0.9  | -    | 229.40          | 4.50       |
| 0,70         | 19.152 | 4.32        | -        | -0.3        | 3.2 | 2.7 | 0.7 | 0.9  | -    | 230.00          | 4.24       |
| 0,75         | 17.213 | 4.65        | -        | 0.3         | 3.3 | 2.7 | 0.7 | 1.0  | 0.3  | 230.20          | 4.50       |
| 0,80         | 15.783 | 4.78        | -        | -           | 3.5 | 2.6 | 0.6 | 0.6  | -    | 231.50          | 4.78       |
| 0,85         | 14.855 | 4.24        | -        | -           | 3.1 | 2.6 | 0.7 | 1.0  | -    | 230.90          | 4.24       |
| 0,90         | 14.071 | 4.10        | -        | -           | 3.1 | 2.6 | 0.6 | 0.9  | -    | 231.40          | 4.24       |
| 0,95         | 13.235 | 4.40        | -        | -           | 3.4 | 2.9 | 0.4 | 0.6  | -    | 232.32          | 4.37       |
| 1,00         | 12.628 | 4.31        | -        | -           | 3.1 | 2.6 | 0.6 | 0.9  | -    | 227.20          | 4.21       |
| 1,05         | 11.961 | 4.20        | -        | -           | 3.0 | 2.6 | 0.6 | 0.9  | -    | 226.97          | 4.12       |
| 1,10         | 11.469 | 4.10        | -        | -           | 3.0 | 2.6 | 0.6 | 0.6  | -    | 226.27          | 4.08       |
| 1,15         | 10.966 | 4.66        | -        | 0.2         | 3.1 | 3.0 | 0.5 | 0.8  | -    | 221.50          | 4.62       |
| 1,20         | 10.387 | 4.29        | -        | -           | 3.2 | 2.6 | 0.7 | 0.9  | -    | 226.02          | 4.30       |
| 1,25         | 10.134 | 4.25        | -        | -           | 3.2 | 2.7 | 0.6 | 0.5  | -    | 225.86          | 4.27       |
| 1,30         | 9.726  | 4.34        | -        | -           | 3.1 | 2.7 | 0.7 | 0.9  | -    | 225.97          | 4.37       |
| 1,35         | 9.456  | 4.29        | -        | -           | 3.1 | 2.6 | 0.8 | 0.9  | -    | 226.02          | 4.21       |
| 1,40         | 9.125  | 4.18        | -        | -           | 3.4 | 3.0 | 0.5 | 0.7  | -    | 225.96          | 4.24       |
| 1,45         | 8.792  | 4.20        | -        | -           | 3.1 | 2.6 | 0.7 | 0.9  | -    | 226.43          | 4.23       |
| 1,50         | 8.493  | 4.45        | -        | -           | 3.0 | 2.6 | 0.5 | 0.7  | -    | 226.00          | 4.50       |

Çizelge 6.14 Mod 1 için statik röle ölçüm sonuçları

| $I_{rms}(A)$ | $t(s)$ | $THD_i(\%)$ | $I_1(A)$ | $\%I_n/I_1$ |      |      |      |      |      | Şebeke Gerilimi |             |
|--------------|--------|-------------|----------|-------------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|
|              |        |             |          | n=3         | n=5  | n=7  | n=9  | n=11 | n=13 | $V_{rms}(V)$    | $THD_v(\%)$ |
| 0,65         | 15.940 | 48.75       | 0.580    | 40.8        | 14.8 | 8.8  | 11.2 | 6.2  | 6.7  | 221.41          | 3.96        |
| 0,70         | 15.114 | 45.58       | 0.632    | 38.2        | 14.5 | 8.6  | 10.7 | 5.7  | 6.4  | 220.95          | 3.80        |
| 0,75         | 14.190 | 42.60       | 0.694    | 3.47        | 14.1 | 8.9  | 10.1 | 6.1  | 5.8  | 220.75          | 3.74        |
| 0,80         | 13.536 | 40.71       | 0.743    | 32.0        | 13.9 | 9.3  | 9.4  | 6.5  | 5.4  | 221.23          | 3.78        |
| 0,85         | 12.841 | 38.98       | 0.796    | 30.5        | 13.8 | 9.7  | 8.4  | 6.9  | 5.4  | 222.13          | 3.75        |
| 0,90         | 12.390 | 37.48       | 0.839    | 29.3        | 13.6 | 10.3 | 7.6  | 7.1  | 5.1  | 221.13          | 3.80        |
| 0,95         | 11.794 | 35.85       | 0.895    | 27.4        | 13.6 | 10.7 | 6.9  | 7.2  | 4.9  | 222.90          | 3.80        |
| 1,00         | 11.298 | 34.32       | 0.948    | 25.9        | 13.4 | 10.9 | 6.2  | 7.2  | 4.7  | 222.35          | 3.72        |
| 1,05         | 10.926 | 33.30       | 0.993    | 24.9        | 13.5 | 10.9 | 5.7  | 6.9  | 4.6  | 222.31          | 3.84        |
| 1,10         | 10.465 | 32.15       | 1.049    | 23.3        | 13.2 | 10.9 | 5.2  | 6.7  | 4.3  | 221.80          | 3.75        |
| 1,15         | 10.088 | 30.97       | 1.094    | 22.4        | 13.2 | 11.0 | 4.9  | 6.1  | 4.6  | 222.70          | 3.76        |
| 1,20         | 9.819  | 30.00       | 1.137    | 21.6        | 13.1 | 11.0 | 4.9  | 6.0  | 4.4  | 222.00          | 3.79        |
| 1,25         | 9.357  | 28.70       | 1.208    | 20.6        | 12.8 | 10.7 | 4.6  | 5.6  | 4.1  | 221.80          | 3.86        |
| 1,30         | 9.119  | 28.30       | 1.246    | 19.3        | 12.9 | 10.3 | 4.6  | 5.6  | 3.8  | 220.98          | 3.63        |
| 1,35         | 8.772  | 27.30       | 1.301    | 18.3        | 12.5 | 10.3 | 4.4  | 5.4  | 3.9  | 221.00          | 3.53        |
| 1,40         | 8.505  | 26.60       | 1.354    | 18.0        | 12.3 | 10.2 | 4.4  | 5.2  | 3.7  | 221.50          | 3.56        |
| 1,45         | 8.255  | 25.66       | 1.406    | 17.6        | 12.3 | 9.9  | 4.4  | 4.8  | 3.7  | 222.50          | 3.56        |
| 1,50         | 7.998  | 24.99       | 1.463    | 16.9        | 12.0 | 9.9  | 4.5  | 4.4  | 3.4  | 222.80          | 3.55        |

Çizelge 6.15 Mod 2 için statik röle ölçüm sonuçları

| $I_{rms}(A)$ | $t(s)$ | $THD_i(\%)$ | $I_1(A)$ | $\%I_n/I_1$ |      |      |      |      |      | Şebeke Gerilimi |             |
|--------------|--------|-------------|----------|-------------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|
|              |        |             |          | n=3         | n=5  | n=7  | n=9  | n=11 | n=13 | $V_{rms}(V)$    | $THD_v(\%)$ |
| 0,65         | 13.411 | 97.80       | 0.461    | 74.4        | 39.5 | 22.0 | 22.6 | 18.7 | 13.8 | 222.60          | 3.59        |
| 0,70         | 12.587 | 94.00       | 0.506    | 72.3        | 36.4 | 22.3 | 22.6 | 17.2 | 13.2 | 222.62          | 3.56        |
| 0,75         | 11.867 | 91.10       | 0.555    | 70.6        | 33.9 | 22.5 | 21.9 | 15.0 | 11.4 | 222.20          | 3.52        |
| 0,80         | 11.259 | 86.80       | 0.604    | 69.0        | 32.0 | 22.4 | 20.8 | 13.8 | 10.8 | 223.40          | 3.40        |
| 0,85         | 10.700 | 83.90       | 0.653    | 66.7        | 29.5 | 22.4 | 19.2 | 11.4 | 10.2 | 222.60          | 3.50        |
| 0,90         | 10.278 | 80.60       | 0.706    | 65.3        | 27.6 | 22.4 | 17.2 | 10.5 | 10.2 | 223.11          | 3.54        |
| 0,95         | 9.889  | 78.16       | 0.748    | 63.6        | 26.5 | 22.0 | 15.9 | 10.2 | 10.0 | 223.20          | 3.57        |
| 1,00         | 9.467  | 75.54       | 0.800    | 62.1        | 24.9 | 21.5 | 14.2 | 9.8  | 9.4  | 223.29          | 3.38        |
| 1,05         | 9.152  | 72.59       | 0.849    | 60.5        | 24.0 | 20.6 | 12.3 | 9.7  | 8.9  | 223.00          | 3.50        |
| 1,10         | 8.828  | 70.42       | 0.901    | 58.6        | 22.5 | 20.1 | 11.1 | 9.5  | 8.6  | 222.63          | 3.51        |
| 1,15         | 8.556  | 68.52       | 0.951    | 57.4        | 21.7 | 19.0 | 10.2 | 9.8  | 8.5  | 222.86          | 3.44        |
| 1,20         | 8.288  | 66.27       | 1.000    | 55.6        | 20.8 | 18.1 | 9.0  | 10.2 | 8.5  | 223.50          | 3.46        |
| 1,25         | 8.076  | 64.94       | 1.044    | 54.5        | 20.1 | 17.7 | 8.8  | 10.0 | 7.9  | 224.00          | 3.51        |
| 1,30         | 7.832  | 63.40       | 1.097    | 53.2        | 19.3 | 16.7 | 8.4  | 9.9  | 7.6  | 224.00          | 3.57        |
| 1,35         | 7.573  | 61.70       | 1.144    | 52.4        | 18.7 | 15.9 | 8.6  | 9.9  | 7.4  | 224.00          | 3.53        |
| 1,40         | 7.385  | 59.70       | 1.205    | 50.3        | 18.4 | 14.6 | 8.8  | 10.0 | 7.1  | 223.30          | 3.60        |
| 1,45         | 7.200  | 58.15       | 1.265    | 49.5        | 17.9 | 13.8 | 8.9  | 9.5  | 7.1  | 223.40          | 3.50        |
| 1,50         | 6.986  | 56.68       | 1.319    | 48.0        | 17.2 | 12.8 | 9.5  | 9.1  | 6.7  | 225.00          | 3.55        |

Çizelge 6.16 Mod 3 için statik röle ölçüm sonuçları

| $I_{rms}(A)$ | $t(s)$ | $THD_i(\%)$ | $I_1(A)$ | $\%I_n/I_1$ |      |      |      |      |      | Şebeke Gerilimi |             |
|--------------|--------|-------------|----------|-------------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|
|              |        |             |          | n=3         | n=5  | n=7  | n=9  | n=11 | n=13 | $V_{rms}(V)$    | $THD_v(\%)$ |
| 0,65         | 12.605 | 118.30      | 0.438    | 84.0        | 57.2 | 31.6 | 19.8 | 21.0 | 19.8 | 221.6           | 3.80        |
| 0,70         | 12.066 | 116.70      | 0.460    | 83.6        | 57.5 | 32.0 | 20.1 | 20.0 | 17.2 | 221.5           | 3.80        |
| 0,75         | 11.379 | 114.00      | 0.496    | 82.2        | 53.6 | 29.0 | 19.9 | 19.7 | 16.6 | 222.0           | 3.70        |
| 0,80         | 10.817 | 110.90      | 0.533    | 80.9        | 51.2 | 27.3 | 20.4 | 22.0 | 18.3 | 222.0           | 3.70        |
| 0,85         | 10.234 | 108.15      | 0.578    | 80.0        | 49.1 | 25.2 | 20.7 | 20.3 | 16.3 | 222.1           | 3.64        |
| 0,90         | 9.714  | 105.42      | 0.630    | 78.0        | 45.7 | 23.3 | 21.5 | 20.1 | 15.4 | 222.9           | 3.69        |
| 0,95         | 9.494  | 103.33      | 0.656    | 77.6        | 45.1 | 23.3 | 21.9 | 19.8 | 15.9 | 223.7           | 3.62        |
| 1,00         | 9.082  | 101.30      | 0.701    | 76.5        | 42.6 | 22.7 | 22.2 | 19.2 | 15.0 | 223.0           | 3.71        |
| 1,05         | 8.730  | 99.46       | 0.741    | 75.3        | 41.4 | 22.4 | 22.8 | 19.1 | 14.1 | 223.8           | 3.66        |
| 1,10         | 8.322  | 97.03       | 0.796    | 74.3        | 39.2 | 22.1 | 22.9 | 18.0 | 13.7 | 224.0           | 3.63        |
| 1,15         | 8.020  | 95.16       | 0.839    | 73.4        | 37.7 | 22.2 | 22.9 | 17.6 | 13.6 | 224.9           | 3.64        |
| 1,20         | 7.799  | 92.54       | 0.883    | 72.6        | 36.2 | 22.3 | 22.4 | 16.9 | 12.3 | 224.4           | 3.12        |
| 1,25         | 7.554  | 90.98       | 0.935    | 71.1        | 35.1 | 22.2 | 20.8 | 15.4 | 13.0 | 224.5           | 3.16        |
| 1,30         | 7.303  | 89.34       | 0.983    | 70.0        | 34.0 | 22.2 | 20.7 | 14.3 | 12.4 | 225.0           | 3.11        |
| 1,35         | 7.110  | 87.50       | 1.020    | 69.7        | 32.6 | 21.9 | 19.8 | 13.9 | 12.3 | 224.7           | 3.08        |
| 1,40         | 6.884  | 86.00       | 1.062    | 68.1        | 31.9 | 22.2 | 19.5 | 13.5 | 11.4 | 225.6           | 3.06        |
| 1,45         | 6.678  | 84.12       | 1.111    | 67.1        | 30.2 | 22.0 | 19.0 | 13.1 | 11.2 | 225.3           | 3.05        |
| 1,50         | 6.416  | 82.04       | 1.161    | 66.7        | 29.6 | 22.5 | 17.2 | 10.2 | 11.0 | 227.0           | 3.80        |

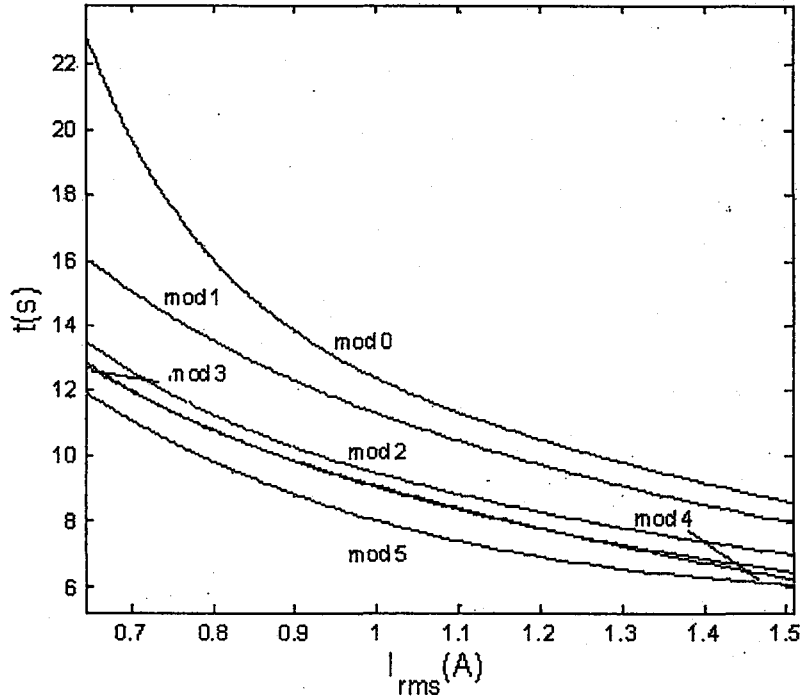
Çizelge 6.17 Mod 4 için statik röle ölçüm sonuçları

| $I_{rms}(A)$ | $t(s)$ | $THD_i(\%)$ | $I_1(A)$ | $\%I_n/I_1$ |      |      |      |      |      | Şebeke Gerilimi |             |
|--------------|--------|-------------|----------|-------------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|
|              |        |             |          | n=3         | n=5  | n=7  | n=9  | n=11 | n=13 | $V_{rms}(V)$    | $THD_v(\%)$ |
| 0,65         | 12.680 | 130.74      | 0.383    | 88.3        | 68.2 | 45.2 | 25.4 | 18.7 | 19.1 | 222.20          | 4.19        |
| 0,70         | 12.088 | 128.31      | 0.423    | 86.7        | 64.6 | 39.9 | 21.1 | 19.1 | 20.1 | 222.02          | 4.23        |
| 0,75         | 11.395 | 122.85      | 0.466    | 85.4        | 60.5 | 34.4 | 19.9 | 20.2 | 20.0 | 222.15          | 4.04        |
| 0,80         | 10.835 | 119.06      | 0.514    | 84.3        | 57.6 | 32.5 | 19.9 | 21.2 | 20.1 | 221.80          | 4.06        |
| 0,85         | 10.325 | 116.07      | 0.560    | 82.7        | 55.0 | 28.7 | 20.0 | 22.4 | 20.0 | 221.40          | 4.18        |
| 0,90         | 9.822  | 114.20      | 0.604    | 81.7        | 52.7 | 27.2 | 21.5 | 23.1 | 19.1 | 221.40          | 4.15        |
| 0,95         | 9.451  | 112.27      | 0.630    | 80.9        | 51.1 | 26.5 | 22.1 | 22.9 | 18.9 | 221.80          | 4.07        |
| 1,00         | 8.988  | 110.00      | 0.673    | 80.0        | 48.8 | 25.1 | 23.3 | 22.9 | 17.5 | 222.00          | 4.07        |
| 1,05         | 8.685  | 108.12      | 0.708    | 79.0        | 48.1 | 24.5 | 23.7 | 22.6 | 17.7 | 222.00          | 4.01        |
| 1,10         | 8.438  | 106.87      | 0.738    | 78.2        | 46.0 | 24.6 | 23.7 | 23.0 | 16.8 | 221.16          | 4.01        |
| 1,15         | 8.049  | 104.92      | 0.790    | 77.6        | 44.6 | 23.3 | 23.8 | 21.3 | 16.1 | 222.44          | 3.77        |
| 1,20         | 7.817  | 102.97      | 0.830    | 76.5        | 43.7 | 23.2 | 23.9 | 21.6 | 14.4 | 222.53          | 3.83        |
| 1,25         | 7.482  | 101.37      | 0.877    | 75.9        | 41.8 | 23.0 | 24.2 | 19.9 | 14.5 | 223.20          | 3.81        |
| 1,30         | 7.204  | 99.08       | 0.923    | 75.2        | 40.6 | 23.3 | 23.9 | 18.7 | 13.8 | 223.50          | 3.68        |
| 1,35         | 6.990  | 97.48       | 0.964    | 73.6        | 38.5 | 23.2 | 23.7 | 18.3 | 13.5 | 223.80          | 3.65        |
| 1,40         | 6.728  | 96.55       | 1.011    | 72.9        | 38.3 | 24.6 | 24.0 | 17.7 | 12.7 | 224.50          | 3.72        |
| 1,45         | 6.618  | 94.32       | 1.053    | 72.5        | 36.4 | 23.7 | 23.7 | 16.4 | 12.1 | 223.00          | 3.99        |
| 1,50         | 6.302  | 92.60       | 1.117    | 71.3        | 35.5 | 24.1 | 22.7 | 14.6 | 11.5 | 224.00          | 3.71        |

Çizelge 6.18 Mod 5 için statik röle ölçüm sonuçları

| $I_{rms}(A)$ | $t(s)$ | $THD_i(\%)$ | $I_1(A)$ | $\%I_n/I_1$ |      |      |      |      |      | Şebeke Gerilimi |             |
|--------------|--------|-------------|----------|-------------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|
|              |        |             |          | n=3         | n=5  | n=7  | n=9  | n=11 | n=13 | $V_{rms}(V)$    | $THD_v(\%)$ |
| 0,65         | 12.157 | 195.75      | 0.286    | 96.7        | 88.7 | 78.0 | 65.6 | 47.0 | 39.1 | 225.18          | 3.59        |
| 0,70         | 10.841 | 178.43      | 0.348    | 95.5        | 84.6 | 72.8 | 57.3 | 44.0 | 32.4 | 225.19          | 3.65        |
| 0,75         | 10.171 | 172.30      | 0.403    | 94.8        | 82.9 | 68.6 | 51.5 | 37.2 | 26.0 | 224.36          | 3.56        |
| 0,80         | 9.742  | 160.93      | 0.432    | 93.6        | 80.1 | 62.1 | 42.4 | 28.4 | 21.1 | 222.67          | 3.48        |
| 0,85         | 9.434  | 156.16      | 0.466    | 93.6        | 79.6 | 62.6 | 44.9 | 32.3 | 21.5 | 225.00          | 3.88        |
| 0,90         | 9.023  | 153.18      | 0.494    | 92.8        | 78.0 | 58.6 | 42.3 | 25.6 | 19.3 | 223.00          | 3.66        |
| 0,95         | 8.315  | 148.54      | 0.541    | 91.5        | 76.2 | 56.0 | 37.4 | 25.0 | 19.4 | 222.75          | 3.52        |
| 1,00         | 7.904  | 143.84      | 0.601    | 90.8        | 72.4 | 52.4 | 32.4 | 20.6 | 19.7 | 222.51          | 3.59        |
| 1,05         | 7.709  | 141.30      | 0.629    | 90.5        | 73.2 | 51.9 | 32.8 | 22.1 | 20.5 | 222.80          | 3.37        |
| 1,10         | 7.493  | 139.62      | 0.661    | 90.4        | 72.3 | 49.9 | 30.4 | 22.6 | 20.3 | 222.95          | 3.47        |
| 1,15         | 7.182  | 134.79      | 0.721    | 89.0        | 69.9 | 45.1 | 27.0 | 20.1 | 19.4 | 222.81          | 3.46        |
| 1,20         | 6.959  | 132.06      | 0.761    | 87.9        | 67.7 | 44.2 | 27.2 | 20.2 | 19.7 | 223.74          | 3.53        |
| 1,25         | 6.728  | 128.45      | 0.806    | 87.6        | 65.9 | 40.9 | 24.2 | 19.5 | 19.5 | 224.00          | 3.56        |
| 1,30         | 6.567  | 126.94      | 0.841    | 87.0        | 65.4 | 40.8 | 22.5 | 19.3 | 19.9 | 224.00          | 3.33        |
| 1,35         | 6.406  | 124.35      | 0.866    | 87.0        | 63.3 | 37.2 | 21.7 | 20.1 | 19.5 | 224.35          | 3.29        |
| 1,40         | 6.334  | 123.25      | 0.881    | 85.5        | 61.3 | 36.0 | 22.4 | 20.1 | 19.5 | 224.66          | 3.82        |
| 1,45         | 6.103  | 121.06      | 0.915    | 84.9        | 59.8 | 36.1 | 23.0 | 20.1 | 19.0 | 224.07          | 3.67        |
| 1,50         | 6.078  | 120.73      | 0.941    | 84.9        | 58.8 | 35.2 | 22.3 | 20.6 | 19.2 | 225.89          | 3.30        |

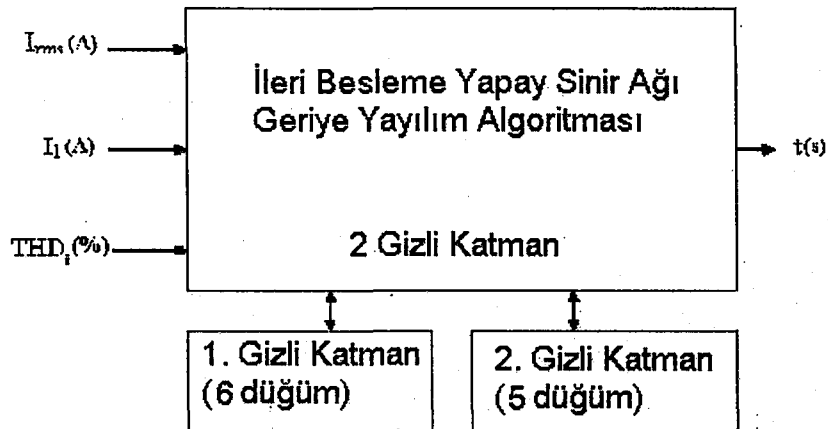
Deneyde elde edilen sonuçlara göre, röleden geçen akımın rms değerine göre rölenin cevap süresinin değişimi Şekil 6.26'de gösterilmiştir.



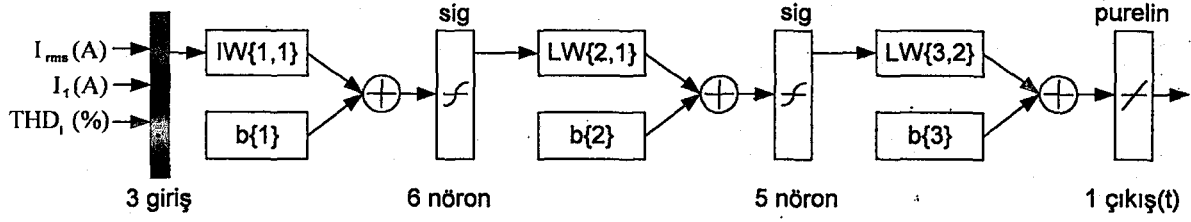
Şekil 6.26 Rölenin cevap süresinin akımın efektif değerine göre değişimi

### 6.6.3 Deney Sonuçlarının Yapay Sinir Ağı Algoritmalarına Uygulanması

İleri besleme sinir ağı geriye yayılım algoritmasının uygulamasında giriş değerleri olarak, akımın efektif değeri, akımın temel bileşeni ve akımın toplam harmonik distorsiyonu (THD<sub>i</sub>) hesaba alınmıştır. Çıkış değeri rölenin açma süresidir. Bu çalışmada kullanılan yapay sinir ağlarının blok diyagramı ve modeli Şekil 6.27 ve Şekil 6.28'de verilmiştir (Yumurtacı vd.,2005c).



Şekil 6.27 Yapay sinir ağı genel blok diyagramı



Şekil 6.28 Yapay sinir ağı modeli(Haykin, 1994)

İlk katmanda 7 düğüm, ikinci katmanda 6 düğümlü iki gizli katman vardır. Momentum ve öğrenme hızları sırasıyla  $\epsilon=0,9$  ve  $\alpha=0,7$  olarak ayarlanmıştır. Statik röle uygulamasının 6 farklı durumu, klasik geri yayılım algoritması kullanılarak başarıyla eğitildi. Eğitim sonuçları Çizelge 6.19’da verilmiştir.

Çizelge 6.19 Bütün modlar için eğitim sonuçları

| Mod-0         |                      |         |                           |       |
|---------------|----------------------|---------|---------------------------|-------|
| $I_{rms}$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | Ölçülen | Yapay sinir ağı sonuçları | Hata  |
|               |                      | t(s)    | t(s)                      | (%)   |
| 0,8           | 4,78                 | 15,783  | 15,901                    | 0,747 |
| 1,0           | 4,31                 | 12,628  | 12,537                    | 0,720 |
| 1,3           | 4,34                 | 9,726   | 9,758                     | 0,329 |
| Mod-1         |                      |         |                           |       |
| $I_{rms}$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | Ölçülen | Yapay sinir ağı sonuçları | Hata  |
|               |                      | t(s)    | t(s)                      | (%)   |
| 0,8           | 40,71                | 13,536  | 13,510                    | 0,192 |
| 1,0           | 34,32                | 11,298  | 11,321                    | 0,203 |
| 1,3           | 28,30                | 9,119   | 9,091                     | 0,307 |
| Mod-2         |                      |         |                           |       |
| $I_{rms}$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | Ölçülen | Yapay sinir ağı sonuçları | Hata  |
|               |                      | t(s)    | t(s)                      | (%)   |
| 0,8           | 86,80                | 11,259  | 11,194                    | 0,577 |
| 1,0           | 75,54                | 9,467   | 9,518                     | 0,538 |
| 1,3           | 63,40                | 7,832   | 7,829                     | 0,038 |

| Mod-3         |                      |         |                           |       |
|---------------|----------------------|---------|---------------------------|-------|
| $I_{rms}$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | Ölçülen | Yapay sinir ağı sonuçları | Hata  |
|               |                      | t(s)    | t(s)                      | (%)   |
| 0,8           | 110,90               | 10,817  | 10,878                    | 0,563 |
| 1,0           | 103,33               | 9,494   | 9,396                     | 1,032 |
| 1,3           | 92,54                | 7,799   | 7,690                     | 1,397 |
| Mod-4         |                      |         |                           |       |
| $I_{rms}$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | Ölçülen | Yapay sinir ağı sonuçları | Hata  |
|               |                      | t(s)    | t(s)                      | (%)   |
| 0,8           | 119,06               | 10,835  | 10,861                    | 0,239 |
| 1,0           | 110,00               | 8,988   | 9,005                     | 0,189 |
| 1,3           | 99,08                | 7,204   | 7,205                     | 0,013 |
| Mod-5         |                      |         |                           |       |
| $I_{rms}$ (A) | THD <sub>i</sub> (%) | Ölçülen | Yapay sinir ağı sonuçları | Hata  |
|               |                      | t(s)    | t(s)                      | (%)   |
| 0,8           | 160,93               | 9,742   | 9,762                     | 0,205 |
| 1,0           | 143,84               | 7,904   | 7,889                     | 0,189 |
| 1,3           | 126,94               | 6,567   | 6,590                     | 0,350 |

Yapay sinir ağı modellerinin blokları, %0,0001 geliştirilmiş sistem hatasıyla mod-0 için 2-5-4-1, %0,000001 geliştirilmiş sistem hatasıyla diğer modlar için 3-6-5-1'dir. Rölenin çalışma zamanı(t), yapay sinir ağı algoritmasının çıkış değerleri başarıyla hesaplanmıştır.

#### 6.6.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Harmoniklerin ters zamanlı statik aşırı akım rölesine etkisini belirleyebilmek amacıyla yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen ve Çizelge 6.13, Çizelge 6.14, Çizelge 6.15, Çizelge 6.16, Çizelge 6.17 ve Çizelge 6.18'de verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

- Tüm ölçüm modlarında rölenin kumanda zamanının akım değeriyle ters orantılı olarak değiştiği, akım arttıkça kumanda zamanının azaldığı dolayısıyla rölenin akım-zaman eğrisinin biçiminin genel olarak değiştiği görülmektedir.

- Genel olarak 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. Bu durum aşağıda verilen Çizelge 6.20’de ve tüm modların deney sonuçlarının karşılaştırılmasına imkan veren Şekil 6.26’da açıkça görülmektedir.

Çizelge 6.20  $I_{rms}=1,5$  A için tüm modların ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

| Mod | $I_{rms}(A)$ | $THD_i(\%)$ | $t(s)$ |
|-----|--------------|-------------|--------|
| 0   | 1,5          | 4,45        | 8,493  |
| 1   | 1,5          | 24,99       | 7,998  |
| 2   | 1,5          | 56,68       | 6,986  |
| 3   | 1,5          | 82,04       | 6,416  |
| 4   | 1,5          | 92,60       | 6,302  |
| 5   | 1,5          | 120,73      | 6,078  |

- Yük akımının harmonik bileşenleri içermesi halinde, deneyde kullanılan statik rölenin aynı efektif akım değeri için sinüsoidal akımdaki kumanda zamanından daha kısa sürede kesiciye açma kumandası vermesi, uygulamada bazı sorunlara yol açacaktır. Geçici olaylarda, kısa süreli aşırı yüklenmelerde frekans konverteri üzerinden beslenen büyük güçlü asenkron motorlara yol verilmesi vb. durumlarda akımın  $THD_i$  değeri yüksek ise harmonikler sebebiyle bu röle gereksiz kesici açmalarına, enerji kesintilerine neden olabilir.
- Deneyde kullanılan statik rölenin, hatların aşırı akım korumasında kullanılması halinde, akım sinüsoidal iken sorun olmadığı halde akımın nonsinüsoidal olması yani harmonik bileşenleri içermesi halinde akımın  $THD_i$  değeri yükseldikçe rölenin kumanda zamanının azalması nedeniyle röle koordinasyonlarının yapılması ve seçiciliğin sağlanmasında güçlükler ortaya çıkabilir, sistemin güvenilirliği azalabilir.
- Mod-0 için  $THD_i$  değeri çok düşük olduğu için, akımın temel bileşen değeri yaklaşık olarak efektif değerine eşittir. Mod-0’da  $THD_i$  %4,44 iken  $I_{rms}=0,65$  A için rölenin kumanda zamanı 22,956 saniyedir. Mod-5 için  $THD_i$ =%195,75 iken  $I_{rms}=0,65$  A için rölenin kumanda zamanı 12,157 saniyedir. O halde röle sadece akımın efektif değerine

bağlı olarak çalışmamaktadır. Mod-0 için akımın temel bileşen değerinin yaklaşık olarak efektif değerine eşit olması sebebiyle, mod-0 için temel bileşen akımı  $I_1=0,65$  a, Mod-5' de  $I_{rms}=0,65$  A,  $THD_1=195,75$  için temel bileşen akımı  $I_1=0,286$  A'dir. Röle 0,6 A' e ayarlanmıştır. Röle sadece temel bileşen değerine bağlı olarak çalışsaydı mod-5'de temel bileşen akımının düşük olması sebebiyle çalışmazdı oysa mod-5 için rölenin kumanda zamanı mod-0'dan daha kısa 12,157 saniyedir. Bu sonuçlara göre deneyde kullanılan statik rölenin sadece akımın efektif değerine veya sadece akımın temel bileşen değerine bağlı olarak çalıştığını söylemek mümkün değildir.



## 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında harmoniklerin aşırı akım rölelerinin çalışma karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma ve sonuçlarından yararlanılarak gerçekleştirilen yapay sinir ağları destekli analiz ile ters zamanlı indüksiyon diskli elektromekanik aşırı akım rölesi, ters zamanlı statik aşırı akım rölesi ve sabit zamanlı elektromekanik aşırı akım rölelerinin harmonikli akım için davranışı (çalışma akımının değişimi, zaman gecikmesinin değişimi) simüle edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda;

- Akımın dalga şeklindeki bozulma arttıkça, başka bir deyişle akımın THD<sub>i</sub> 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<sub>i</sub> değerinin %10'un altında olması durumunda uygulamada ciddi bir sorun oluşturmaz. THD<sub>i</sub> değerinin çok yüksek olduğu yük akımlarında ayarlandığı akım değerinden daha yüksek akımda devreye gireceği için güvenilir bir koruma gerçekleştiremeyecektir. Deneysel çalışmada 1 A değerine ayarlanan bu röle, akımın THD<sub>i</sub> değerinin %86 olması durumunda ancak 1,9 A değerinde çalıştığı görülmüştür. Transformatör sargılarının ve hat iletkenlerinin aşırı akıma dayanma süresi akımın efektif değerine bağlıdır. Rölenin daha yüksek akımda faaliyete geçmesi, daha uzun sürede kesiciye açma kumandası vermesi ve korunan sistem elemanlarının hasar görmesine neden olacaktır.
- Ters zamanlı statik aşırı akım rölesi ise indüksiyon diskli elektromekanik röleye uygulanan aynı harmonik spektruma sahip nonlineer yük akımları için tamamen farklı tepkiler vermiştir. Uygulanan THD<sub>i</sub> değeri yükseldikçe ters zamanlı statik aşırı akım rölesinin zaman gecikmesinin azaldığı tespit edilmiştir. Karakteristik eğrilerden akımın THD<sub>i</sub> değeri yükseldikçe statik rölenin çalışma akımının azaldığı görülmektedir. Akımın THD<sub>i</sub> değeri yükseldikçe statik rölenin daha düşük akımda devreye girmesi, zaman gecikmesinin azalması, uygulamada gereksiz kesici açmalarına neden olacak ve koruma sistemlerinde seçiciliğin sağlanmasını zorlaştıracaktır.
- Sabit zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesinde Çizelge 6.11'den de görüldüğü gibi akımın THD<sub>i</sub> değeri arttıkça rölenin çektiği akım değeri artmaktadır. Akımın 1.095 A değerine ayarlanmasına rağmen röleden geçen akımın harmonikli olması durumunda rölenin kesiciye açma kumandası verdiği çalışma akımı değeri 1.38 A değerine kadar çıkmaktadır.

- Her üç aşırı akım rölesinin çalışma karakteristikleri harmonik spektrumları farklı nonlineer yük akımları için YSA algoritmaları kullanılarak çok düşük hatalar ile elde edilmiştir. Bu çalışma YSA kullanılarak, her üç aşırı akım rölesi için ölçüm yapılmamış harmonikli akımlara ait rölenin dinamik davranışını, cevap süresini büyük bir yaklaşıkla tahmin etmek mümkündür.

Sonuç olarak yük akımının harmonik bileşenleri içermesi durumunda aşırı akım rölelerinin çalışması harmoniklerden etkilenmekte, rölenin çalışma akımları ve karakteristik eğrileri akımın dalga şeklindeki bozulmaya bağlı olarak değişmektedir. Harmoniklerin aşırı akım röleleri üzerine etkisi konusunda bir genelleme yapmak uygun değildir. Koruma rölesinin yapısına, imalatçısına ve çalışma prensibine bağlı olarak harmoniklerin aşırı akım rölelerine etkisi farklı olmaktadır.

Bir tesiste aşırı akım rölesi seçilirken, yük akımı için önceden harmonik analizi yapılmalı, tesis kuruluş aşamasında ise yüklerin karakteristikleri gözönünde bulundurulmalıdır. Tesis girişinde çekilecek yük akımının harmonik içeriği dikkate alınmalı, koruma sisteminde kullanılacak rölelerin yapısı, çalışma karakteristikleri göz önünde bulundurularak harmonikler sebebiyle koruma rölelerinin hatalı çalışma riskinin oluşabileceği, güvenilirliğin azalabileceği öngörülmelidir.

**KAYNAKLAR**

Appilied Protective Relaying, (1976), Westinghouse Electric Conporation Relay Instrument Division, Newark.

Arıkan, O., (2003), "Nonlinear Yüklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

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, 19:59-62.

Çakır, H., (1989), Enerji İletimi, 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., (2000), DEMA Kataloğu, İstanbul.

Dommel, H.W., Yan, A. ve Wei, S., (1986), "Harmonics from Transformer Saturation", IEEE Trans. on Power Systems, 1(2):209-215.

Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. ve Beaty, H.W., (1996), Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill.

Ergezer, H., Dikmen, M. ve Özdemir, E., (2003), "Yapay Sinir Ağları ve Tanıma Sistemleri", Pivolka, 2:14-17.

Fırat, M. ve Güngör, M., (2004), "Askı Madde Konsantrasyonu ve Miktarının Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi", İMO Teknik Dergi, 219:3267-3282.

Gökalp, E., (1988), "Güç Sistemlerine Harmoniklerin Etkileri", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Gönen, T., (1988), Modern Power System Analysis, Wiley Interscience Publication, California.

Gülezer, K., (1995), "Motor Tespit ve Analizi İçin Yapay Sinir Ağlarının Tasarımı", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Gürsoy, E., Gül, Ö. ve Kaypmaz, A., "Konutlar ve Ticari Binalardaki Harmonik Kaynakları ve Etkileri", EMO İzmir Şubesi Bülteni, 114:22-26.

Hamzaçebi, C. ve Kutay, F., (2004), "Yapay Sinir Ağları ile Türkiye Elektrik Enerjisi Tüketiminin 2010 Yılına Kadar Tahmini", Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 19:227-233.

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), "Power Systems Harmonics: An Overview", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, 102(8): 2455-2460.

IEEE Standarts Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, (1996), ISBN 1-55937-887-5.

Jahn, H.H. ve Kauferle, J., (1974), "Measuring and Evaluating Current Fluctuations of Arc-Furnaces", IEE Conf. Publ., 110:105-109.

- Karakaş, A., (2000), "Harmonikli Devrelerde Güç Kompanzasyonu", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Kocatepe, C., (1995), "Sinüsoidal Olmayan Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Kocatepe, C., Yumurtacı, R., Uzunoglu, M., Karakaş, A. ve Arıkan, O., (2003), "Elektrik Tesislerinde Harmonikler" Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Kocatepe, C. ve Demir, A., (1998), "Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Elemanlar Genel Bakış", Kaynak Elektrik Dergisi, 113:99-106.
- "Koruma - Kontrol Teknisyeni El Kitabı III", Türkiye Elektrik Kurumu Röle ve Ölçü Aletleri Grup Müdürlüğü Yayını, Yayın No: 84/3.
- Madhavarao, T.S., (1992), Power System Protection Static Relays, Tata Mc Graw-Hill, New Delhi.
- Mansuri, A., (1984), "Koruma Yöntemleri ve Röleler", Elektroteknik Araç Gereç Sanayii Dergisi, 325:14-19.
- Öztemel, E., (2003), Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Selamoğulları, U.S., (1998), "Enerji Sistemlerindeki Harmoniklerin Koruma Sistemleri Üzerine Etkisi", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Szabados, B. and Lee, J., (1981), "Harmonic Impedance Measurements on Transformers", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, 5020-5026.
- Sundberg, Y., (1976), "The Arc Furnace as a Load On The Network", ASEA, Journal, Vol.49.
- Taylan, N., (1965), "Elektrik Tesislerinde Koruma Sistemleri", DSI Genel Müdürlüğü Matbaası.
- Türk, B., (1990), Enerji İletim Hatlarının Korunması ve Röle Koordinasyonu", Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Uzunoglu, M., (1996) "Güç Sisteminde Durum Kestiriminin Kötü Veri Tespiti, Tanımlanması ve Yok Edilmesi İçin Ön Tahmin Filtresinin Yapay Sinir Ağları ile Tasarımı", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Üçleroglu, K., (1984), "Koruma Röleleri", Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Ürgüplü, Z., (1997), "Kısa Devre Hesapları", Elektrobank, 116-128, Ankara.
- Wave Distortion on Consumer's Interconnection Working Group(WDCIWG), (1984), "The Impact of Sine-Wave Distortion on Protective Relays", V:011.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., (2000), "Lineer Olmayan Dengesiz Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.

Yumurtacı, R., Gülez, K., Bozkurt, A., Kocatepe, C. ve Uzunoğlu, M., (2005a), "Analysis of Harmonic Effects on Electromechanical Instantaneous Overcurrent Relays with Different Neural Networks Models", 2005 International Conference on Intelligent Computing (ICIC2005), 23-26 Aug. 2005, Çin.

Yumurtacı, R., Bozkurt, A. ve Gülez, K., (2005b), "Neural Networks Based Analysis of Harmonic Effects on Electromechanical Instantaneous Overcurrent Relays", The Society of Instrument and Control Engineers (SICE), 8-10 Aug. 2005, Okayama.

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.

#### **INTERNET KAYNAKLARI**

[1] [www.backpropagation.netfirms.com](http://www.backpropagation.netfirms.com)



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 03.12.1979

Doğum yeri İstanbul

Lise 1993-1996 Rıfat Canayakın Lisesi

Lisans 1997-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi  
Elektrik–Elektronik Fakültesi  
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2002-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Elektrik Mühendisliği Bölümü

**Çalıştığı kurum(lar)**

2002-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi  
Elektrik–Elektronik Fakültesi  
Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı’nda Arş. Gör.