

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**SIFIR GEÇİŞ TABANLI ELEKTRONİK ŞALTER VE KAÇAK AKIM
RÖLELİ HİBRİT BİR SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ahmet YURTÇU

İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı

HAZİRAN 2021

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**SIFIR GEÇİŞ TABANLI ELEKTRONİK ŞALTER VE KAÇAK AKIM
RÖLELİ HİBRİT BİR SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Ahmet YURTÇU
161215005**

İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞIMLI

HAZİRAN 2021



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Doktora Tezi Onay Belgesi

Enstitümüz, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı (161215005) numaralı öğrencisi Ahmet YURTÇU'nun "Sıfır Geçiş Tabanlı Elektronik Şalter ve Kaçak Akım Röleli Hibrit Bir Sistemin Geliştirilmesi" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun kararıyla 08/06/2021 tarihinde oluşturulan jüri tarafından *Oy Birliği* ile Yüksek Lisans tezi olarak *Kabul* edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

Tez Savunma Tarihi: 08/06/2021

- 1) Tez Danışmanı:** Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞIMLI
- 2) Jüri Üyesi:** Prof. Dr. A. Fevzi BABA
- 3) Jüri Üyesi:** Prof. Dr. Hakan TOZAN
- 4) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi H. Uğur ÖNCEL
- 5) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Hilal ARSLAN

YEMİN METNİ

Doktora tezi olarak sunduğum ‘‘Sıfır Geçiş Tabanlı Elektronik Şalter ve Kaçak Akım Röleli Hibrit Bir Sistemin Geliştirilmesi’’ adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden olduğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (08/06/2021)

Ahmet YURTÇU

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim süresince, değerli birikimlerini aktarmak için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, tezimin başlangıcından bitimine kadar sorunlarımı sabırla dinleyen ve çok değerli zamanlarını benim için ayıran, tezimin bu seviyeye ulaşması için her türlü özveriyi gösteren tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞIMLI'ya, ilerleme sürecinde değerli tavsiyeleri ile tezime yön vermede katkıda bulunan Tez izleme Komitesi Üyeleri; Prof. Dr. Hakan TOZAN ve Dr. Öğr. Üyesi Hasan Uğur ÖNCEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım süresince; benim, oğullarım Adil Mehmet ve Yusuf Efe'nin sıkıntılarını gideren ve bana huzurlu bir çalışma ortamı hazırlayarak hiçbir zaman desteğini esirgemeyen değerli eşim Sema ATEŞ YURTÇU'ya ayrıca sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

HAZİRAN 2021

Ahmet YURTÇU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Konusu	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Literatür Araştırması	3
1.4 Hipotez	5
2. KULLANILAN DEVRE ELEMANLARI.....	7
2.1 Kaçak Akım Rölesi İç Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	7
2.1.1 Toroid bobin.....	12
2.1.2 Ark flaşı.....	14
2.1.2.1 Ark flaşı ile ilgili standartlar	15
2.1.2.2 Ark flaşı analizi	16
Sistem verilerinin toplanması:.....	16
Sistem çalıştırma uygulamalarının tespiti:	17
Arıza akımlarının tespiti:.....	17
Ark akımının hesaplanması:.....	17
Koruma cihazı karakteristiği ve ark süresinin tespiti:	18
Sistemdeki cihazlar için arıza enerjisinin belirlenmesi:	18
Sistemdeki cihazlar için ark koruma limit uzaklıklarının belirlenmesi:	19
Ark flaş seviyelerinde iyileştirmeler:	20
2.2 Elektronik Şalterler ve Çalışma Prensipleri	20
2.2.1 Sıfır geçiş yöntemi	23
2.2.1.1 Sıfır nokta geçiş tespiti.....	25
Transistörlü sıfır geçiş algılama devresi:	25
Optokuplörülü sıfır geçiş algılama devresi:	26
Karşılaştırma devresi kullanılan sıfır geçiş algılama devresi:.....	28
Mikrodenetleyicili sıfır geçiş algılama devresi:	30
2.3 Triyak ve Çalışma Prensipleri	32
2.3.1 Triyak uygulamaları	34
2.3.1.1 Doğru akım triyak tetikleme yöntemi	35
2.3.1.2 Alternatif akım triyak tetikleme yöntemi	36
2.3.1.3 Triyak ile faz kontrolü.....	36
2.3.1.4 Triyak ile sıfır geçiş kontrol yöntemi.....	38
2.4 Optokuplörler ve Çalışma Prensipleri	39

2.4.1 MOC serisi optokuplör entegresi	42
2.4.2 MOC serisi optokuplör entegresi ve triyak ile sıfır geçiş kontrol yöntemi	43
2.5 Mikrodenetleyiciler ve Çalışma Prensipleri	46
2.5.1 Komut işlem süresi	47
2.5.2 Bellek organizasyonu	48
2.5.3 Mikrodenetleyici yazılımı	50
2.5.4 Mikrodenetleyici seçimi	50
3. MATERYAL VE YÖNTEM	53
3.1 Elektronik Şalter ve Kaçak Akım Röleli Hibrit Sistemin Geliştirilmesi	53
3.1.1 Güç devresinin tasarımı	55
3.1.2 Lojik devrenin tasarımı	57
3.1.3 Mikrodenetleyici program algoritmasının geliştirilmesi	58
3.1.4 Sistemin genel çalışma prensibi	61
3.2 Önerilen Sisteme Ait Simülasyonun Yapılması	62
3.2.1 Önerilen sisteme ait simülasyon devresinin yapımı	62
3.2.2 Önerilen sisteme ait giriş çıkış sinyallerinin simülasyonu	62
3.3 Önerilen Sisteme Ait Devre Kartının ve Ölçümlerin Yapımı	64
3.3.1 Önerilen sisteme ait devre kartının tasarımı ve yapımı	64
3.3.2 Önerilen sisteme ait ölçümlerin yapılması	66
4. ÖNERİLEN SİSTEMİN PİYASADAKİ DİĞER ÜRÜNLERLE KARŞILAŞTIRILMASI	70
5. ÖNERİLEN SİSTEME AİT ZAMAN TEPKİ ANALİZLERİ	73
5.1 İnsan Vücut Modelinin Geliştirilmesi	73
5.2 Kaçak Akım İnsan Vücut Modeli Ölçümleri	75
5.3 Zaman Tepki Analizlerinin Yapılması	81
6. ÖNERİLEN SİSTEMİN ZAMAN TEPKİ ANALİZİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	87
6.1 Matematiksel Modelleme İçin Parametrelerin Belirlenmesi	88
6.2 Matematiksel Modellemenin Yapımı	89
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	92
7.1 Tartışma	93
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	103

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
SSR	: Solid State Relay – Katı Hal Röle
SCR	: Silicon Controlled Rectifier – Yarı iletken Kontrollü Doğrultucu
ZC	: Zero Crossing – Sıfır Geçiş
V	: Volt
KV	: Kilo Volt
Ω	: Ohm
KΩ	: Kilo Ohm
ms	: Mili Saniye
μs	: Mikro Saniye
A	: Amper
mA	: Mili Amper
KA	: Kilo Amper
W	: Watt
KW	: Kilo Watt
NFPA	: National Fire Protection Association
NESC	: National Electrical Safety Code
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
RISC	: Reduced Instruction Set Computer - Azaltılmış komut seti
CISC	: Complex Instruction Set Computer - Karmaşık komut seti
\$: Dolar
μF	: Mikro Farad
Hz	: Hertz
PDF	: Probability Density Function – Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
CDF	: Cumulative Distribution Function - Kümülatif Dağılım Fonksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Kaçak Akım Rölelerine Ait Standartlara Göre Hat Açma Süreleri	9
Çizelge 2.2: Toroid Bobin Renk Kodları ve Frekans Değerleri	13
Çizelge 2.3: IEEE 1584 Standardı Uygulama Değerleri	16
Çizelge 4.1: Önerilen Sistemin Maliyeti	70
Çizelge 4.2: Önerilen Sistemin Karşılaştırılması.....	70
Çizelge 4.3: Önerilen Sistemin Türe Göre Maliyet ve Gecikme Karşılaştırılması ...	71
Çizelge 5.1: Zaman Tepki Değerleri	84
Çizelge 5.2: Zaman Tepki Değerleri	85

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kaçak Akım Rölesi Prensip Şema.....	8
Şekil 2.2: Kaçak Akım Rölesi Bağlantı ve Etiket Değerleri	9
Şekil 2.3: Kaçak Akım Rölesi Elektrik Devresi Bağlantı Şeması.....	11
Şekil 2.4: Toroid Bobin Nüve Yapısı	12
Şekil 2.5: Toroid Bobin Sarım Sayısı Hesaplamasında Kullanılan Değerler	13
Şekil 2.6: Ark Flaş Anı	15
Şekil 2.7: Solid-State Röle İç Yapısı	21
Şekil 2.8: Sıfır Geçiş Yöntemi İle Faz Kontrol Yönteminin Karşılaştırılması.....	24
Şekil 2.9: Transistörlü Sıfır Geçiş Algılama Devresi Şeması	25
Şekil 2.10: Transistörlü Sıfır Geçiş Algılama Devresi Giriş ve Çıkış Sinyal Şekilleri	26
Şekil 2.11: Optokuplör Sıfır Geçiş Algılama Devresi Şeması	27
Şekil 2.12: Optokuplör Sıfır Geçiş Algılama Devresi Giriş ve Çıkış Sinyal Şekilleri	27
Şekil 2.13: Karşılaştırma Devresi İle Sıfır Geçiş Algılama Devre Şeması	28
Şekil 2.14: Karşılaştırıcı İle Sıfır Geçiş Algılama Devresi Giriş ve Çıkış Sinyalleri	29
Şekil 2.15: Mikrodenetleyicili Sıfır Geçiş Algılama Devre Şeması.....	30
Şekil 2.16: Mikrodenetleyicili Sıfır Geçiş Algılama Devresi Giriş ve Çıkış Sinyalleri	31
Şekil 2.17: (a) Triyak İç Yapısı, (b) Tristör Eşleniği, (c) Triyak Sembolü	32
Şekil 2.18: Triyak Çalışma Karakteristik Eğrisi.....	34
Şekil 2.19: Triyak Doğru Akım Tetikleme Devre Şeması	35
Şekil 2.20: Triyak Alternatif Akım Tetikleme Devre Şeması	36
Şekil 2.21: Triyak Faz Kontrol Devre Şeması.....	37
Şekil 2.22: Triyak Faz Kontrol Tetikleme Sinyal Şekli	38
Şekil 2.23: Triyak İle Sıfır Geçiş Kontrol Devre Şeması	39
Şekil 2.24: Optokuplör İç Yapısı	40
Şekil 2.25: Optokuplör Çeşitleri	41
Şekil 2.26: Optokuplör Uygulaması Devre Şeması.....	41
Şekil 2.27: MOC 3041 Entegresi İç Yapısı	43
Şekil 2.28: MOC Entegresi ve Triyak İle Sıfır Geçiş Kontrol Devre Şeması	44
Şekil 2.29: MOC Entegresi ve Triyak İle Sıfır Geçiş Kontrol Devresi Sinyal Şekilleri	45
Şekil 2.30: Mikrodenetleyici Blok Şeması	47
Şekil 2.31: Mikrodenetleyici Komut İşlem Döngüsü	48
Şekil 2.32: Mikrodenetleyici Komut Çevirim Süresini Gösteren Kare Dalga Sinyali	48
Şekil 2.33: PIC 12C508 Mikrodenetleyicisine Ait Bellek Organizasyon Şeması.....	49
Şekil 2.34: PIC 12C508 Mikrodenetleyicisine Ait Bacak Bağlantıları	51
Şekil 2.35: PIC 12C508 Mikrodenetleyicisine Ait Blok Şema	52

Şekil 3.1: Önerilen Sisteme Ait Blok Şema	54
Şekil 3.2: Güç Devresi Devre Şeması.....	56
Şekil 3.3: Lojik Devre Şeması	57
Şekil 3.4: Program Algoritma Şeması	59
Şekil 3.5: Simülasyon Devre Şeması.....	62
Şekil 3.6: Sisteme Güç Uygulandığı Andaki Osilaskop Sinyal Görüntüsü.....	63
Şekil 3.7: Sistemden Güç Kesildiği Andaki Osilaskop Sinyal Görüntüsü	64
Şekil 3.8: Önerilen Sisteme Ait Baskı Devre Şeması.....	65
Şekil 3.9: Önerilen Sisteme Ait Devre Kartı	65
Şekil 3.10: Sinyal Ölçümü İçin Hazırlanan Devre Düzenegi	66
Şekil 3.11: Tetikleme Sinyali Uygulanmadan Giriş ve Çıkış Sinyali	67
Şekil 3.12: Tetikleme Sinyali Uygulandıktan Sonra Giriş ve Çıkış Sinyali.....	67
Şekil 3.13: Tetikleme Sinyali Verildiğinde Çıkış Sinyalinin Sıfır Seviyesinde Aktif Olduğu An	68
Şekil 3.14: Tetikleme Sinyali Kesilme Anındaki Çıkış Sinyalinin Sıfır Seviyesinde Pasif Olduğu An	69
Şekil 3.15: Tetikleme Sinyalindeki Distorsiyon Seviyesi	69
Şekil 5.1: İnsan Vücut Modeli	74
Şekil 5.2: Geliştirilen İnsan Vücut Modeli	74
Şekil 5.3: 10 K-Sağ Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri.....	75
Şekil 5.4: 10 K-Sol Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri.	76
Şekil 5.5: 10 K - Kafa İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri	77
Şekil 5.6: 1 K – Sağ Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri	77
Şekil 5.7: 1 K – Sol Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri.....	78
Şekil 5.8: 1 K – Kafa İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri	79
Şekil 5.9: 560 Ω – Sağ Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri. .	79
Şekil 5.10: 560 Ω – Sol Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri. 80	
Şekil 5.11: 560 Ω – Kafa İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri	81
Şekil 5.12: Sol Kol ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal	82
Şekil 5.13: Sağ Kol ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal	82
Şekil 5.14: Kafa ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal.....	83
Şekil 5.15: Sol Ayak ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal	83
Şekil 5.16: Sağ Ayak ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal.....	84
Şekil 5.17: 560 Ω Yük Direnci ile Beş Vücut Bölgesi İçin Zaman Tepki Grafiği	86
Şekil 6.1: Monte Carlo Simülasyonu Sonucu Oluşturulan PDF Grafiği	90
Şekil 6.2: Monte Carlo Simülasyonu Sonucu Oluşturulan CDF Grafiği	91

SIFIR GEÇİŞ TABANLI ELEKTRONİK ŞALTER VE KAÇAK AKIM RÖLELİ HİBRİT BİR SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Kaçak akım röleleri günümüzde hem bireyleri elektrik çarpmalarından hem de makine ve teçhizatları aşırı akım kaynaklı arızalardan korumak amacı ile kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, Kaçak akım cihazları, insanları elektrik çarpmasından ve yangın tehlikesinden korumak için kullanılan son derece önemli cihazlardır. Bu cihazlar, elektrik hattındaki kaçak akımı tespit ederek kontaklarını açar ve hattı gerilimsiz bırakır. Piyasada kullanılan cihazların kaçak akım algılama değerleri; insan hayatı için 30 mA, yangın tehlikesinden korunmak için olanlarda ise 300 mAdır. Kaçak akım cihazları röle kontaklı (RCD) ve elektronik kaçak akım röleleri (SSR) olarak iki farklı tipte üretilmektedirler.

Manyetik alan prensibine göre çalışan geleneksel röleli kaçak akım cihazlarında; rölenin enerjilenmesi, kontağı çekmesi için geçen süre, yüksek güçlü uygulamalarda kontağın aşırı ısınma sonucu yapışması, elektrik yangınlarına sebebiyet vermesi, yüksek enerji sarfıyatı gibi sorunlar mevcuttur. Elektrik çarpması ve yangın tehlikesine vakalarında elektrik akımının mümkün olan en kısa sürede sistemden kesilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu durumları önlemek amacı ile kullanılan kaçak akım rölelerinde rölenin enerjilenip kontağı itmesi ve sistemi enerjisiz bırakmasında geçen sürenin insan hayatının kurtarılmasında mikro saniyeler düzeyinde olması gerekmektedir.

Özellikle üç faz elektrik akımı kullanılan endüstriyel tesislerde sisteme elektrik enerjisinin verilmesi veya kesilmesi görevini şalterler görmektedir. Ancak piyasada genel olarak kullanılan kontaklı şalter tiplerinde elektrik enerjisinin sisteme verilmesi ya da kesilmesi esnasında ark alevi oluşmaktadır. Oluşan bu ark alevi çoğu zaman elektrik yangınları, makine ve ekipman hasarı, çalışma ortamı hasarı ve çalışanların can kaybı veya yaralanması gibi sonuçlara neden olmaktadır. Bu durumun önüne geçmek amacı ile piyasada farklı çalışma yöntemlerine sahip elektronik şalterler bulunmaktadır. Ancak özellikle yüksek güç tüketen sistemler için üretilen bu tür ürünlerin fiyatları oldukça yüksektir.

Literatüre bakıldığında hem kaçak akım röleleri hem de elektronik şalterlerin içyapılarında yukarıda bahsedilen problemlerin önüne geçmek amacı ile SCR tip cihazlardan oluşan elektronik devreler kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerden biri olan sıfır geçiş yönteminin hem literatürde hem de günümüzde piyasada kullanılan ürünlerde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntem sisteme elektrik akımının alternatif akımın sıfır noktasında uygulanması ve kesilmesi temeline dayanan bir yöntemdir. Bu temel prensibe dayalı olarak çalışan kaçak akım röleleri ve elektronik şalterler piyasada ayrı ayrı iki farklı ürün olarak üretilerek kullanılmaktadır.

Bu araştırmada, yüksek güç gerektiren devrelerde de kullanılacak sıfır geçiş tabanlı çalışan elektronik şalter ile kaçak akım rölesi hibrit bir sistem düşük maliyetli olarak geliştirilmiştir. Sistemin tasarımı, simülasyonu ve üretimi için Proteus ve

Eagle programları kullanılmıştır. Sistemin yapısında kullanılan temel bileşenler sıfır geçiş tabanlı optokuplörler, triyaklar ve kontrolü sağlamak üzere bir mikrodenetleyici kullanılmıştır. Mikrodenetleyicinin programlanmasında programlama dili olarak Proton yazılımı kullanılmıştır.

Geliştirilen sisteme ait ölçümler ve testler yapılarak analiz edilmiştir. Geliştirilen sistem piyasada kullanılan muadil ürünler ile çalışma yöntemi, çalışma hızı, tepki süresi ve maliyet açısından karşılaştırılıp performansları incelenmiştir.

Ayrıca geliştirilen sisteme ait kaçak akım tepki süresinin gerçek senaryolar için etkinliği analiz edilmiştir. Yapılan deneylerde insanı simüle etmek amacıyla kapasitör ve dirençlerden oluşan insan vücut modeli elektrik devresi kullanılmıştır. Geliştirilen sistemin ortalama tepki süresi tespit edilmiş olup, geleneksel kaçak akım cihazlarına göre ortalama 4,1 kat daha hızlı çalıştığı gözlemlenmiştir.

Geliştirilen sisteme ait insan vücudu kaçak akım değeri ve akım kesme tepki süresi değerlerinin Microsoft Excell programı kullanılarak Monte Carlo Simülasyonu sıklık/şiddet dağılımları yöntemi ile matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Uygulama insan vücudu direnç değeri fiziksel ve ortam kaynaklı veriler kullanılarak 5000 farklı veri seti meydana getirilmiştir. Monte Carlo simülasyon yöntemi kullanılarak elektrik akım miktarı, insan vücudunun sıcaklığı, cilt ve nem özellikleri, giyilen ayakkabı, zemin kaplaması, malzeme cinsi özelliklerine göre geliştirilen sistemin tepki süresi incelenerek matematiksel olarak hesaplanmıştır.

Araştırma kapsamında, kaçak akım rölesi ve elektronik şalterden oluşan hibrit sistem tamamen özgün olarak tasarlanmıştır. Sistemin içyapısını oluşturan elektronik devre tasarımı ve yazılımlar özgün olarak geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem hibrit olması, düşük maliyetli olması ve çalışma hızının yüksek hızlı olması açısından da özgün bir sistemdir.

Anahtar Kelimeler: *Sıfır geçiş yöntemi, Kaçak akım rölesi, Elektronik şalterler.*

DEVELOPMENT OF A HYBRID SYSTEM WITH ZERO CROSSING BASED ELECTRONIC SWITCH AND LEAKAGE RELAY

ABSTRACT

Leakage current relays are mainly used to protect both human life against electrical shocks and machinery and equipment from malfunctions caused by excessive current. Residual current devices are extremely important devices used to protect people from electric shock and fire hazard. These devices detect the leakage current in the power line, open their contacts and leave the line without voltage. Leakage current detection values of devices used in the market are as follows: 30 mA for human life, 300 mA for protection from fire hazard. Residual current devices are produced as two different types as relay contacts (RCD) and electronic residual current relays (SSR).

In conventional leakage current devices working according to the magnetic field principle, there are such problems as energizing the relay, the time it takes to pull the contact, sticking of the contact as a result of overheating in high power applications, causing electrical fires, and high energy consumption. In cases of electric shock and fire hazard, it is vital that the electric current is cut off from the system as soon as possible. In leakage current relays used in order to prevent these situations, the time taken for the relay to be energized and pushed the contact and de-energized the system should be at micro second time intervals to save human life.

Especially in industrial plants where three-phase electrical current is used, switches serve to supply or cut off electrical energy to the system. However, in contact switch types commonly used in the market, arc flame is formed during the supply of electrical energy to the system or when it is cut off. This arc flame often causes consequences such as electrical fires, machinery and equipment damage, work environment damage, and death or injury to employees. In order to prevent this situation, there are electronic switches with different operating methods in the market. However, the prices of such products, which are produced especially for systems with high power consumption, are quite high.

Literature review has revealed that electronic circuits consisting of SCR type devices are used in the internal structures of both residual current relays and electronic switches in order to prevent the problems above-mentioned. It is seen that the zero crossing method, which is one of these methods, is frequently used both in the literature and in the products used in the market today. This method is based on the application of the electric current to the system at the zero point of the alternating current and its cutting. Residual current relays and electronic switches operating based on this basic principle are produced and used as two different products in the market.

In this present study, a low-cost hybrid system with zero-cross based electronic switch and residual current relay, which can be used in circuits requiring high power, has been developed. Proteus and Eagle programs were used for the design, simulation and production of the system. The basic components used in the structure

of the system are zero-cross based optocouplers, triacs and a microcontroller to provide control. Proton software was used as the programming language for the programming of the microcontroller.

Measurements and tests of the developed system were performed and analyzed. The developed system was compared with the equivalent products used in the market in terms of working method, working speed, reaction time and cost, and their performances were examined.

In addition, the efficiency of the leakage current response time of the developed system for real scenarios was analyzed. In the experiments, electric circuit of a human body model consisting of capacitors and resistors was used to simulate the human being. The average response time of the developed system has been determined, and it has been observed that it operates an average of 4.1 times faster than conventional leakage current devices.

Mathematical modeling of the human body leakage current value and current cut-off response time values of the developed system was carried out by using the Microsoft Excell program with Monte Carlo Simulation frequency / intensity distribution method. Five thousand different data sets were created by using the human body resistance value of the application, physical and environmental data. Using the Monte Carlo simulation method, the response time of the system developed according to the amount of electric current, temperature of the human body, skin and moisture properties, wearing shoes, floor covering, material type was calculated mathematically.

Within the scope of the research, the hybrid system consisting of residual current relay and electronic switch was designed completely uniquely. The electronic circuit design and software that make up the internal structure of the system have been uniquely developed. The developed system is a unique system in terms of being hybrid, low cost and high speed of operation.

Keywords: *Zero crossing method, Residual current relay, Electronic switches.*

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Konusu

Hem günlük yaşam hem de üretim tesisleri için elektrik vazgeçilmez bir enerji türüdür. Hemen hemen her türlü cihazın kullanımı için mutlaka elektrik enerjisi gereklidir. Dünyadaki kalkınmışlık düzeyi ve teknolojik gelişim, elektrik üretimi, elektrikle çalışan aygıtlar ve tüketilen elektrik enerjisi ile doğru orantılı olarak kabul edilir. Elektrik enerjisi insanlık için ne kadar vazgeçilemez ise de gerekli önlemler alınmadığı sürece sonu ölümlere varan kazalara ve ağır makine ve ekipman hasarına sebep olmaktadır. Bu kadar tehlikeli olmasına rağmen günümüzde elektrik enerjisinin kullanılmadığı bir yaşam da düşünülemez. Teknolojilerin baş döndürücü bir şekilde devam ettiği günümüzde özellikle sanayide elektrik enerjisinin önemi de kullanım alanları da her geçen gün giderek artmaktadır. Dolayısıyla elektrik kazalarının sayısında da buna paralel olarak artmıştır (Ceylan, 2012).

Güner yaptığı çalışmada şu anda yürürlükte olan mevzuatlarımıza göre iş kazası 5510 sayılı Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu'nun 13. Maddesi'nde ve 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun 3. Maddesi'nde kavramsal olarak yer almaktadır (Resmi Gazete 2006; Resmi Gazete, 2012).

İş kazasının ulusal ve uluslararası yapılan tanımlarda özellikle, çalışanların o an veya sonradan ruh ve beden sağlığına özre uğratan veya ölüme sebebiyet veren bir olay olduğu belirtilmektedir. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) istatistikleri incelendiğinde ülkemizdeki iş kazalarının öncelikli sebeplerinin arasında elektrikle çalışmaların geldiği görülmekte olduğu bilinmektedir. Sadece 2019 yılı içerisinde SGK istatistiklerine göre 16 “Bir kaynak arkı, kıvılcım veya çakması” iş kazası olmuştur SGK, (2019). SGK tarafından oluşturulan bu istatistiklere sadece iş göremezlik ve ölümlerle sonuçlanan kazalar alınmaktadır. Can kaybına veya yaralanmaya sebep olmayan sadece maddi hasara neden olan veya herhangi bir zararla sonuçlanmayan kazalarda bu sayıya eklendiğinde bu rakamın çok daha yüksek olduğu görülmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Son yıllarda, elektrikle çalışmalardan dolayı meydana gelen iş kazalarının nedenlerini ve bunların çalışanlar üzerindeki potansiyel etkilerine karşı alınabilecek önlemler yetersiz kalmaktadır. Özellikle kimyasal tesisler ve petrol rafinerileri gibi endüstriyel ortamlarda çalışanların yanı sıra kamu hizmetlerinde elektrikle daha yakın bir şekilde çalışanlar dahil olmak üzere binlerce işçi, potansiyel olarak risk altındadır. İstemsiz olarak meydana gelen elektrik arklarından dolayı meydana gelen kazalarda korunma sağlamada yeterli kişisel koruyucu ekipmanın rolü göz ardı edilemeyeceği gibi proaktif önlemlerin alınması gerekliliği kaçınılmazdır (Yağimli ve Tozan, 2020).

Elektrik arklarının yol açtığı parlama yangın oluşumunun yanı sıra, yakındaki çalışmada ciddi yaralanmalara ve makine hasarına neden olabilmektedir (Yurtçu, 2019). Bununla birlikte, elektrik ark patlamaları da çevredeki yapılara zarar verecektir. Ayrıca ark akımı ile çalışanlarda çok ciddi elektrik çarpmaları meydana gelebilmektedir (Laverty, 2001; Ralph, 1987).

Elektrik kaynaklı kazaların birçoğuna elektrik sistemlerinde meydana gelen kaçak akımların neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle kaçak akım rölesi elektrikte işçi sağlığı ve güvenliğinin temel unsuru olarak düşünülebilir. Kaçak akım röleleri insan hayatını korumaya yönelik bir unsur olduğundan oldukça önemli ve bir elektrik sisteminde kesinlikle bulunması gereklidir. Ayrıca bir binanın ya da endüstriyel bir tesiste kullanılan tüm elektrik sistemlerinin topraklama sisteminin doğru şekilde yapılmış olması kaçak akım rölelerinin doğru çalışmasında oldukça etkilidir (Akarçay, 2017).

Elektrik uygulamalarında kazalara karşı emniyet, genel olarak cihaz ve tesislerin temel izolasyon yoluyla elde edilmektedir. Fakat temel izolasyondaki arızalar tehlikeli durumlara yol açabilmekte olup, bu gibi durumlar çok yüksek olan gövde akımlarına karşı ilave koruyucu önlemlerin alınması gerektirmektedir (Yılmaz ve Özbey, 2003).

Bu bağlamda tezin amacı;

- 1- Sıfır geçiş tabanlı elektronik şalter ve kaçak akım röleli hibrit bir sistem tasarlamak,

- 2- Tasarlanan sistemle, yüksek akımlarla çalışmalar gerektiren elektrik tesislerinde kullanılan panolarda oluşan elektrik arklarından dolayı meydana gelen kazaları engelleyerek hem çalışma ortamını hem de çalışanın sağlığını korumak,
- 3- Sıfır geçiş tabanlı hem elektronik şalter hem de röle kontakları yerine optokuplör entegrasyonu içeren, piyasada kullanılan emsallerine göre çok daha hızlı çalışan ve daha uygun maliyetli bir kaçak akım rölesi üretmektir.

1.3 Literatür Araştırması

Kaçak akım rölesinin görevi, bir elektrik tesisatının üzerinden geçen akımın bulunduğu iletken kısımlara farklı nedenlerle kısa devre olması suretiyle oluşan kaçak akımın, kaçak akım rölesi tarafından devamlı olarak fazdaki akımı nötrdeki akımla kıyaslanarak ikisi arasındaki farkın belirlemek ve toprağa akan kaçak akımın (sağlıklı bir devrede izolasyondan ve kayıplardan dolayı her zaman azda olsa bir miktar kaçak akım mevcuttur) daha önceden belirlenen seviyeye geldiğinde devreyi kesmektir (Whitfield, t.y.).

Günümüzde kaçak akım röleleri elektrik tesisatlarında hem insan hayatını korumak hem de elektrik tesisatını korumak amacıyla kullanılmaktadır (Güner, 2013). Ayrıca elektrik tesisatlarında Elektrik İç Tesisat Yönetmeliği'nin 18. maddesine göre kaçak akım rölesi kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Elektrik tesisatlarında yangından korumaya yönelik kaçak akım rölesinin 300 mA anma kaçak akım değerine sahip kaçak akım rölesi kullanılması, tali dağıtım noktalarına ise hayat korumaya yönelik kaçak akım rölesinin 30 mA anma kaçak akım değerine sahip kaçak akım rölesi düzeneği ile birlikte termik manyetik şalter veya otomatik sigorta (ayrı ayrı veya birlikte) konulması ve tüm koruma düzenleri arasında seçicilik sağlanması zorunlu tutulmuştur (Resmi Gazete, 1984).

Piyasada kullanılan kaçak akım röleleri elektromanyetik alan prensibine dayalı olarak röle kontaklarının manyetik alan oluşturulması ve kesilmesi yöntemi ile açılıp kapanması esasına göre çalışmaktadır. Bu durum röle kontaklarının zamanla çalışma esnasında oluşan ısınma ve arklardan dolayı aşınma meydana getirmektedir (Yavuz, 1998; Tüzün ve diğ., 2020).

Oluşan bu durum özellikle yüksek akımla çalışılan endüstriyel tesislerde önüne geçilmedikçe yangına sebebiyet vermektedir (Paker, 2017). Röle kontaklarında açma kapama anında oluşan ark akımları kontaklarda bozulma sonucu boşluk meydana getirerek kontak ömrünü kısaltmakta ve akım geçişinde kayıplara neden olmaktadır (Dietrich ve Feige, 2010).

Kaçak akım rölelerinin kontaklarının uygun zamanda açılma ve kapanması ve süresi çalışma performansı açısından çok önemlidir. Normal röle kontaklarında açma ve kapa işlemi alternatif akımın herhangi bir noktasında gerçekleştiğinden dolayı bu süre uzamakta ve performans kaybı oluşmaktadır. Elektronik rölelerde kullanılan SCR elemanları kontak içermediğinden kontak içeren rölelere göre çok daha hızlı çalışmaktadır. Sıfır geçiş yöntemi alternatif akım sinyalinin her iki alternansında da sıfır noktasından geçme anının tespit edilmesidir (Controlled Power Company, 2011).

Günümüzde elektronik röle kullanımı oldukça artmıştır. Özellikle sektörün önde gelen firmaları ürettikleri bu ürünleri yüksek fiyatlara satmaktadırlar (Fotek, 2021). Ancak bu ürünlerin çoğu elektromanyetizma prensibine göre çalışmaktadır. Yapılarında yine röle kontakları elektromanyetik alan oluşturularak kontrol edilmektedir. Yine bu tür rölelerin bazılarında sıfır geçiş yöntemi kullanıldığı görülmektedir. Bu sistemin birçok avantajı vardır. Bunların başında elektrik sarfiyatının önüne geçilmesi, rölenin kontaklarının daha uzun ömürlü kullanılması, aşırı akımlardan ve oluşacak arklardan hem sistemin hem de çalışanın korunması gelmektedir. Ancak yine de röle içerisinde kontakların kullanılması hem çalışmada milisaniyeler kadar olsa da bir gecikme meydana gelmesini sağlarken aynı zamanda da kontakların aşırı akımlarda yapışması ve oluşacak arklardan dolayı bozulmasını sağlamaktadır. Bu durum elektronik rölenin kullanım ömrünü de kısaltmaktadır (Dietrich ve Feige, 2010).

Piyasada kullanılan elektronik şalterlerde SCR elemanlarının tetiklenmesinde sıfır geçiş yöntemi kullanılmaktadır (Makel, (2021). Sıfır geçiş yöntem çoğu elektrik ve elektronik devre uygulamalarında sıklıkla uygulanmaktadır.

Vorobyov ve Vitols (2014) yaptıkları çalışmada sıfır geçiş yöntemi ile alternatif akım şebekelerinde sıfır geçiş yöntemi ile düşük maliyetli bir sistem tasarımı uygulaması gerçekleştirmişlerdir.

Kuppambatti ve Kinget (2013) ise çalışmalarında sıfır geçiş yöntemi ile çalışan analog dijital dönüştürücü devre tasarımı yapmışlardır.

Espinoza ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada piyasada kullanılan sıfır geçiş yöntemi ile üretilmiş kaçak akım cihazları ile bu yöntemin kullanılmadığı kaçak akım cihazlarının tepki sürelerinin analizini yaparak bir değerlendirme sunmuşlardır.

Gülbahçe ve diğ. (2017) çalışmalarında endüksiyon motorlarının ilk kalkışında kullanılan mikrodenetleyici tabanlı, sıfır geçiş prensibine dayalı bir başlangıç ve koruma rölesi tasarlamışlardır.

Shin (2014) ise çalışmasında sıfır geçiş tabanlı, düşük güçlü, yüksek hızlı ve çözünürlüklü bir analog dijital dönüştürücü tasarımı gerçekleştirmiştir.

Akyasan ve Hasırcı (2016) alternatif akımda sıfır geçiş algılama işleminde kullanılan farklı devrelerin analizini yaparak bir karşılaştırma sunmuştur.

Bachu ve diğ. (2010) sıfır geçiş yöntemini konuşma sinyallerini işleyerek sinyalin sesini açıp kapama işlemi gerçekleştirmişlerdir.

Zheng ve Zhang (2012) yaptıkları çalışmada alternatif akımın sıfır noktasında ilettime geçen bir yük kontrol anahtarı tasarımı sunmuşlardır.

Soliman (1990) ise otomatik modülasyon sınıflandırmasında sıfır geçiş yöntemini kullanmıştır.

Çengelci (2012) yaptığı çalışmada frekans belirleme işleminde taylor ve sıfır geçiş yöntemlerini kullanmıştır.

Bal ve Öztürk (2009) ise alternatif akımda sinüsoidal darbe genişlik modülasyonunda sıfır geçiş tabanlı evirici ile rezonans hatlı eviricinin analizini yaparak karşılaştırmasında sıfır geçiş yönteminin üstünlüklerini belirtmişlerdir.

1.4 Hipotez

Tezde sıfır geçiş tabanlı elektronik şalter ve kaçak akım rölesi olarak kullanılabilen hibrit bir sistemin geliştirilmesi önerilmiştir. Önerilen sistem piyasada kullanılan emsallerinden farklı olarak hem elektronik şalter hem de kaçak akım rölesi görevini yerine getirebilmektedir. Önerilen sistemde manyetik alan prensibine dayalı olarak çalışan röle kontakları yerine sıfır geçiş tabanlı elektronik SCR devre elemanları kullanılmıştır. Böylece röle kontaklarından dolayı oluşan ark alevi, ısınma, gecikme

ve kullanım ömrünün kısa olması gibi olumsuz durumlar ortadan kaldırılmıştır. Sıfır geçiş noktasının tespit işlemi MOC serisi bir optokuplör entegre ile sağlanmıştır. Böylece önerilen sistemde kontrol işlemini gerçekleştirmek için kullanılan mikrodenetleyici ile yüksek akım geçen güç devresi kısmı arasında ki fiziksel bağlantı ortadan kaldırılmıştır. Bu sayede piyasada kullanılan röle kontaklı şalterlerde sisteme akım uygulama anında görülen ark alevini ortadan kaldırmaktadır. Bu durum özellikle endüstriyel tesislerde ark alevi nedeni ile meydana gelecek yangın ve kazaların önüne geçmektedir (Şimşek ve Aydoğdu, 2020).

Tezde önerilen sistemin ölçüm ve analizleri yapılarak piyasada kullanılan emsalleri ile karşılaştırılması yapılarak insan vücut modellemesi üzerinde tepki süresi analizi gerçekleştirilmiştir. Monte carlo simülasyonu yöntemi kullanılarak 5000 farklı durum simüle edilmiştir.

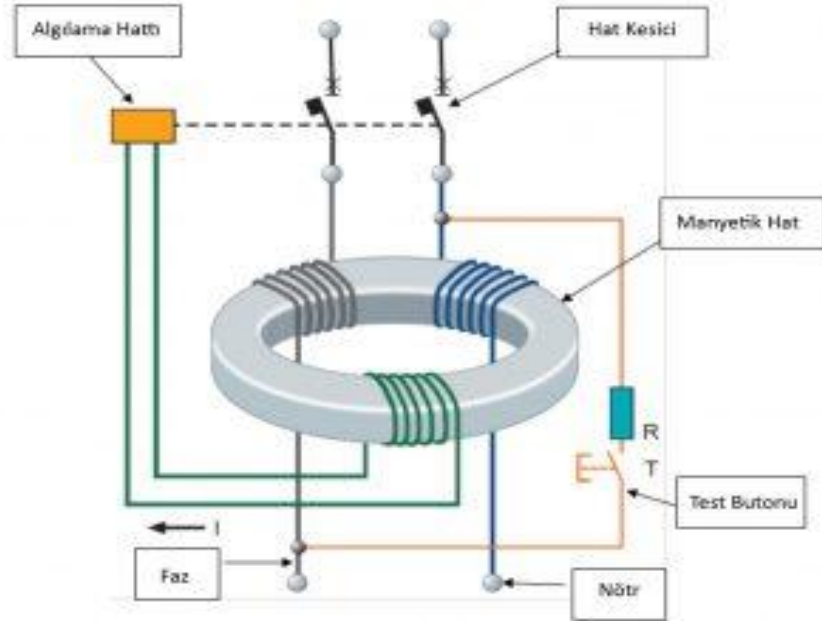
Önerilen sistem piyasada kullanılan emsallerine göre daha iyi bir tepki süresine sahip, daha uygun maliyetli ve daha uzun kullanım ömrüne sahiptir.

2. KULLANILAN DEVRE ELEMANLARI

2.1 Kaçak Akım Rölesi İç Yapısı ve Çalışma Prensipleri

Kaçak akım koruma rölesi elektrik tesisatlarında faz ve nötr hatlarında akım farkı meydana geldiğinde devreden geçen akımı kesen anahtarlardır. Bir elektrik devresinde faz hattından devreye uygulanan akım, nötr hattından devreyi tamamlar. Herhangi bir arıza ya da kaçak yoksa elektrik devresine uygulanan akım miktarı ile dönen akım miktarının eşit olması gerekmektedir. Elektrik hattında veya devre elemanlarının herhangi birinde kaçak oluşması durumunda fazdan hattından uygulanan akımın tamamı nötr hattı üzerinden değil, bir miktarı da kaçak oluşan kısımdan devresini tamamlayacaktır. Kaçak akım olması durumunda faz hattından uygulanan akım miktarı ile nötr hattından dönen akım miktarı birbirine eşit olmayacaktır. Kaçak akım koruma röleleri bu eşitsizliği algılayarak devredeki akımı keser ve kaçak akım sonucunda olması muhtemel elektrik çarpması veya herhangi bir devre elemanı arızasını engelleyecektir (Güner, 2013).

Elektrik devrelerinde oluşan kaçak akımlar elektrik akımının üzerinden geçtiği iletken kablolar ve günlük hayatta kullandığımız her türlü elektrikli aletin izoleli kısımlarının hasar görmesi neticesinde ve yanlış izolasyon nedeni ile iletken kısımların açıkta kalması ile bu bölgelere kişinin istemsiz olarak vücudun herhangi bir uzvuyla doğrudan veya iletken bir cisimle temasından oluşur. Meydana gelen kaçak akım insan vücudu üzerinden toprağa akar (Erk Mühendislik, 2011). Aşağıda Şekil 2.1’de kaçak akım rölesine ait prensip şema verilmiştir.



Şekil 2.1: Kaçak Akım Rölesi Prensi Şema

Kaynak: Kale,(2017)

Şekil 2.1’de bir elektrik devre sisteminde bağlı olan kaçak akım rölesi prensip şeması görülmektedir. Şemada akımın toprağa aktarılması için iki adet topraklama hattı bulunmaktadır. Hatta her zaman artık akım meydana gelebilmektedir. Bu durumun sebebi yalıtım direnci ve topraktır. Bu artık akım normalde oldukça küçüktür ve nadiren 2 mA’in geçmektedir. Normalde ana hat bağlantısı kapalıdır ve kaçak akım oluştuğu anda kaçak akım rölesi ana bağlantıyı açarak elektrik akımını sistemden kesecek enerjiyi oluşturur. Faz ve nötr hatları aynı manyetik halkadan zıt yönde sarım yapılarak yerleştirilmiştir. Böylece kaçak akım oluşmadığı durumlarda her sarım manyetik alan etkisiyle eşit kuvvetli ancak zıt yönlü akım oluştururlar. Ters yönlü akım şiddetleri birbirini dengeleyerek manyetik akım oluşturmazlar (Üstünel ve diğ., 2001).

Artık akım oluştuğunda devre hattından geçerek faz hattına girer ancak devre sonunda toprak hattına gider, bu durum nötr hattının faz hattından daha az akım taşımaya sebep olur. Böylece faz hattından iletilen akım miktarı nötr hattından iletilen akım miktarını geçer ve manyetik hatta manyetik alan etkisiyle akım meydana gelir. Bu manyetik akım elektromanyetik kuvvet oluşmasına neden olur. Elektromanyetik kuvvetin şiddeti kaçak akımın miktarına bağlı bir şekilde artar. Elektromanyetik kuvvetin şiddeti belirlenen seviye çıktığında kaçak akım rölesi sistemden elektrik akımını kesmek için açma düzeneğini çalıştırır. Üç fazlı elektrik devre sistemlerinde faz nötr ve toprak hatlarındaki toplam akım miktarı sürekli

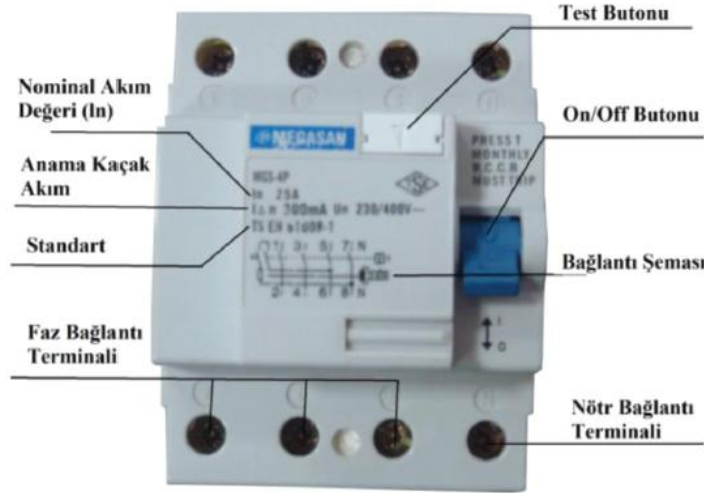
olarak dengelidir. Kaçak akım röleleri böyle sistemlerde kolaylıkla kullanılabilir. Ancak yüksek akımlı elektrik hatlarda manyetik alan sisteminden direkt geçen faz ve nötr kondüktörü kullanmak daha uygun olmaktadır. Kaçak akım rölelerinde bulunan test butonuna basıldığında nötr ve faz hatları kesilerek suni bir artık akım oluşturularak rölenin hattı kesmesi sağlanır (Kale, 2017). Çizelge 2.1’de kaçak akım rölelerine ait standartlara göre hat açma süreleri verilmiştir.

Çizelge 2.1: Kaçak Akım Rölelerine Ait Standartlara Göre Hat Açma Süreleri

Standart	Akım Büyüklüğü		
	30 mA	60 mA	150 mA
AS/NZS 3190	300 ms	150 ms	40 ms
AS/NZS 61008.1	300 ms	150 ms	40 ms
AS/NZS 61009.1	300 ms	150 ms	40 ms

Kaynak: (Megep, 2012).

Çizelge 2.1’de akım büyüklüğü arttıkça kaçak akım rölelerinin hata akım kesme sürelerinin de azaldığı görülmektedir. Şekil 2.2’de bir kaçak akım rölesinin görünümü verilmiştir.



Şekil 2.2: Kaçak Akım Rölesi Bağlantı ve Etiket Değerleri

Kaynak: Güner, (2013).

Şekil 2.2’de verilen kaçak akım rölesi etiket değerleri;

Nominal akım Değeri (In): Kaçak akım rölesinin çalışabileceği devre akımını belirtir. Kaçak akım röleleri herhangi bir ısınma veya manyetik alandan koruma sağlama işlevi yoktur. Devrede herhangi bir kaçak akım oluştuğunda devreden geçen akımı durdurur. Sistemde çalışacak kaçak akım rölesi belirlenirken sisteme gelen hattın taşıdığı işletme akımına dikkat edilmelidir.

On/off Butonu: Kaçak akım rölesinin çalışır halde olması ve kapanması işlevini yerine getirmektedir.

Bağlantı Şeması: Kaçak akım rölesinin devre bağlantısının nasıl yapılacağını belirtir. Anma Kaçak Akımı: Kaçak akım rölelerinin temelde iki asıl amacı vardır. Bunlardan birisi insan hayatını korumak, diğeri ise kaçak akım nedeni ile oluşabilecek yangınların önüne geçmek şeklinde belirtilebilir. Kaçak akım röleleri için IEC 60479-1 standardında 30mA kaçak akım değeri, insan sağlığı yönünden eşik değer olarak belirlenmiştir. Kaçak akım röleleri 30mA eşik değeri ve üzerindeki değerlerde devrenin akımını direkt olarak açarak güvenli bir koruma sağlar. Kaçak akım 300mA eşik değerin üzerine çıktığında hatlarda ve devrede ısınma başladığından yangın tehlikesi ile karşı karşıya kalınabilir. Kaçak akım röleleri tercihi insan hayatı koruması için 30 mA, yangın tehlikesinden koruma için ise 300mA'lık anma kaçak akım eşik değerine sahip kaçak akım röleleri seçilmelidir.

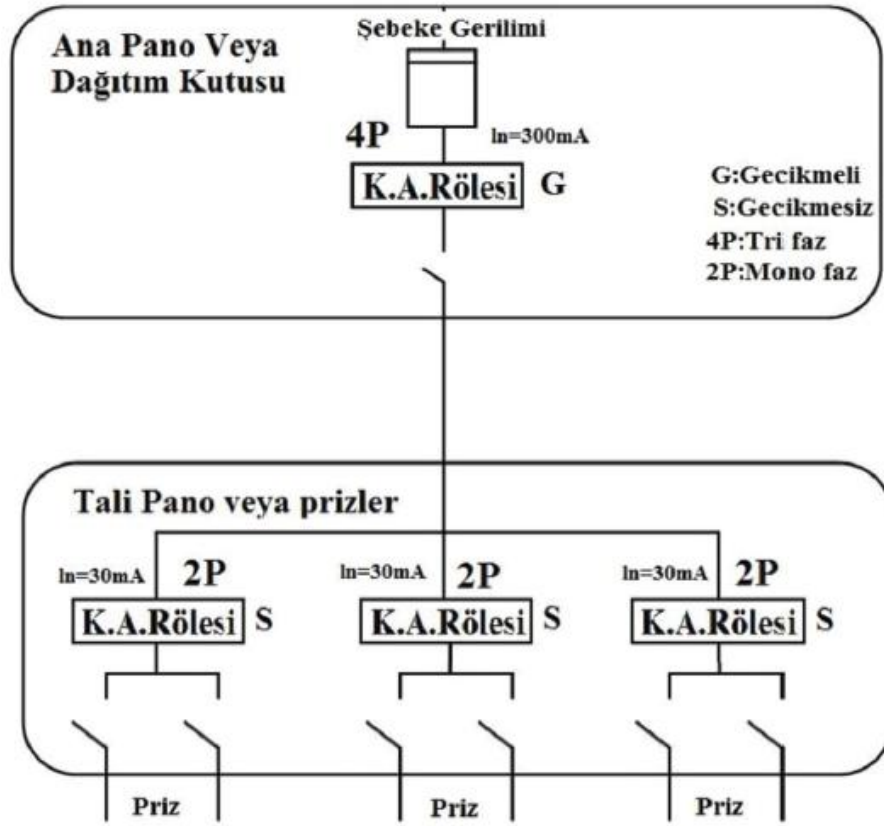
Standart: Kaçak akım rölesinin üretildiği standardı belirtir. Ulusal ve uluslararası birçok standart mevcuttur. Ülkemizde kullanılan belli başlı standartlar, TS EN 61008-1, TS EN 61008-2-1, EN 61008-1, EN 61008-2-1 IEC 61008-1, IEC 61008-2-1 standartlarıdır. Kaçak akım rölesi seçiminde belirtilen standartlara uygun olmaması ve özellikle uygun standardın işaretinin üzerinde belirtilmiş olmasına özen gösterilmelidir.

Test Butonu: Kaçak akım rölesi devreye bağlanmasının ardından çalışıp çalışmadığını test etmek amacıyla bu buton kullanılır. Ayrıca test amaçlı olarak çıkış uçlarının kısa devre edilmesi gibi yöntemler kaçak akım rölesine, devreye ve devre elemanlarına zarar verebileceğinden muhakkak kullanılmamalıdır.

Nötr Bağlantı Terminali: N nötr hattını belirtir. Kaçak akım rölesi çalışma prensibi olarak faz hattı ile nötr hattı arasında bulunan akım farkını tespit etmesi amacı ile kullanılması nedeni ile faz hattı ve nötr hattı arasına bağlanılmaktadır.

Faz Bağlantı Terminali: Bağlantı yapılacak elektrik devresinin monofaz veya trifaz olması durumuna göre terminal sayısı farklıdır. Monofaz sistemlerde tek terminal varken, trifaz sistemlerde üç terminal mevcuttur. Farklı bir söylemle elektrik devresinin monofaz veya trifaz olması durumu kaçak akım rölesinin kutup sayısını etkiler. Monofaz sistemlerde 2 kutuplu (2P) kullanılırken, trifaz sistemlerde 4

kutuplu (4P) kaçak akım röleleri kullanılır. Şekil 2.2’de verilen kaçak akım rölesi 4 kutuplu bir trifaz kaçak akım rölesidir.



Şekil 2.3: Kaçak Akım Rölesi Elektrik Devresi Bağlantı Şeması

Kaynak: Behaviour Modification, (2010).

Şekil 2.3’de monofaz ve trifaz kaçak akım rölelerinin elektrik devresine bağlantı yöntemi görülmektedir. Genelde kaçak akım rölesi uygulamalarında görülen hatalar topraklama işleminin doğru yapılmaması nedeni ile oluşmaktadır. Elektrik devrelerinde sıklıkla görülen sıfırlama adı verilen, nötr ve toprak hatlarının birleştirilmesi işlemi oluşacak kaçak akımın yükün üzerinde kalmasına neden olmaktadır. Bu durum yükün toprak ile temas eden kısmı nedeni ile kaçak akım rölesi sürekli olarak devreyi kesecektir. Elektrik devresinin kaçak akım rölesinden sonraki kısmında ki tesisatta nötr hattı ile koruma hattı ayrı ayrı çekilmelidir. Topraklama korumalı cihazların topraklama hattı, nötr hattı ile değil, sadece koruma hattı ile gerçekleştirilmelidir. Kaçak akım rölelerinin anma kaçak akımının önceden ayarlanmış değere geldiğinde anında devreyi kesen ve gecikmeli devreyi kesen olarak iki tipte üretilmektedir. Gecikmesiz tip kaçak akım koruma röleleri herhangi bir kaçak akım tespiti anında gecikmesiz olarak anma kaçak akım değerinde 300 ms’den daha kısa bir zamanda ani olarak devreyi açarlar. Bazı elektrik devrelerinde

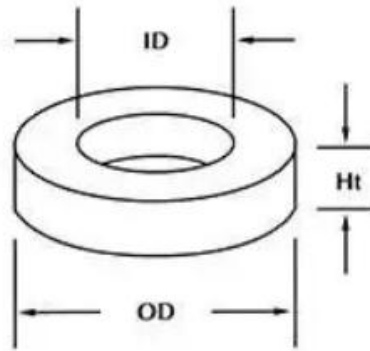
ise sistemde 300 mA’ın üzerinde görülen hata akımlarında tali dağıtım devresindeki 30 mA’lık kaçak akımdan daha önce ana dağıtım devresindeki çıkışında 300 mA’lık kaçak akım rölesi devreyi keserek tüm elektrik devresine uygulanan akımı kesebilmektedir. Bu nedenle ana dağıtım devresi çıkışına bağlanılacak kaçak akım rölesinin gecikmeli tip olması gerekmektedir (Calvas, 1999).

2.1.1 Toroid bobin

Kaçak akım rölelerinin içerisinde kullanılan toroid bobin sayesinde nötr hattı ve faz hattı arasındaki akım farkı tespit edilmektedir. Bu işlem halka şeklinde olan toroid bobininin içerisinde geçen iki hat arasındaki akım farkının manyetik alan oluşturması ile gerçekleştirilmektedir.

Toroid bobinler genellikle düşük frekanslı elektrik sinyalleri ile çalışırken kullanılır. Toroid bobinleri elektrik sinyali frekansını uygun seviyelere çıkaran bir tür indüktör gibi görev yaparlar. İndüktörler elektrik enerjisini manyetik alanlar şeklinde depolayabilen pasif elektronik devre elemanlarıdır. Toroid bobinleri döner ve bu dönme hareketi frekansın daha da artmasına sebep olur. Toroid bobinleri daha ekonomiktir ve solenoidlerden daha verimlidir. Toroid bobinleri sarma işlemi solenoid bobinlere göre daha kapsamlıdır. Toroid bobinlerin yapıları küçüktür ve elektrik elektronik devrelerinde diğer devre elemanlarına daha yakın konumlandırılabilir.

Toroid bobinler ilk olarak 1830’lu yılların başlarında Michael Faraday tarafından üretilmiştir. Toroid bobinleri telekomünikasyon, tıp, müzik aletleri, balastlar ve EMI filtresi gibi farklı alanlarda da kullanılmaktadır (Özder 2020).



Şekil 2.4: Toroid Bobin Nüve Yapısı

Kaynak: (Bilgen, 2019)

Şekil 2.4’de bir toroid bobin nüvesi verilmiştir. Toroid bobin nüveleri farklı renklerde üretilmektedirler. Toroid bobin nüveleri her renk için farklı boyutlar ve manyetik geçirgenlik değerleri taşımaktadır. Toroid bobinleri numaralandırılırken, OD dış çapı, ID iç çapı ve HD ise yüksekliği (inç olarak uzunlukların 100 katını) ifade etmektedir.

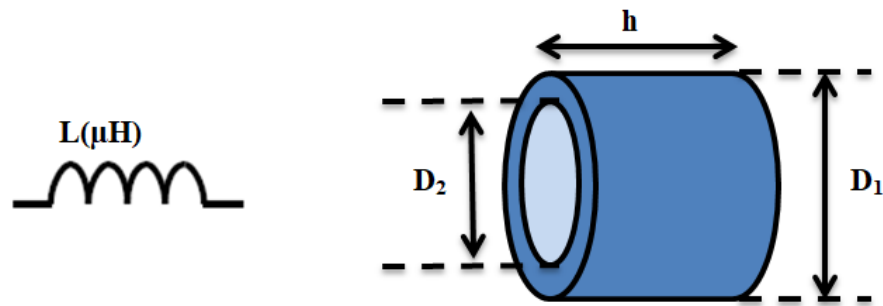
Aşağıda Çizelge 2.2’de toroid bobinler için renklere göre renk kodları ve frekans değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.2: Toroid Bobin Renk Kodları ve Frekans Değerleri

Renk Kodu	Renk	Görelî Manyetik Geçirgenlik	Optimum Frekans
7	Beyaz	9	1 MHz - 25 MHz
3	Gri	32,7	20 KHz – 1 MHz
1	Mavi	20	150 KHz – 3 MHz
2	Kırmızı	10	250 KHz -10 MHz
6	Sarı	8	3 MHz – 40 MHz
10	Siyah	5,4	15 MHz-100 MHz
12	Yeşil	4	50 MHz-200 MHz
15	Kırmızı/Beyaz	25	0.1 MHz-2 MHz
17	Mavi/Sarı	4	20 MHz-200 MHz

Kaynak: (Bilgen, 2019)

İstenilen indüktans değerinde toroid bobini elde etmek için Çizelge 2.2’de verilen değerlerle olması gereken bobin sarım sayısı hesaplanabilmektedir. Bu hesaplama için kullanılan yöntem Şekil 2.5’de verilen değerler kullanılarak yapılmaktadır (Özder 2020).



Şekil 2.5: Toroid Bobin Sarım Sayısı Hesaplamasında Kullanılan Değerler

Kaynak: Bilgen, (2019)

Şekil 2.5’de verilen totroid bobin sarım sayısı hesaplamasında kullanılan değerler;

L(µH): indüktans,

h: yükseklik,

D1: dış çap,

D2: iç çap'ı göstermektedir.

Elde edilen bu değerlerle sarım sayısı ile indüktans değerleri;

$$L = 2 \cdot N_2 \cdot \mu_r \cdot h \cdot \ln(D_1/D_2) \quad (2.1a)$$

$$A_e = \left(\frac{h}{2}\right) \cdot (D_1 - D_2) \quad (2.1b)$$

$$L_e = (\pi \cdot (D_1 - D_2)) / \ln(D_1/D_2) \quad (2.1c)$$

$$V_e = A_e \cdot L_e \cdot B/I = (0.4\pi \cdot \mu_r \cdot N) / L_e \quad (2.1d)$$

Bağıntıları ile hesaplanabilmektedir. Formüllerde verilen parametreler;

L: indüktans,

N: sarım sayısı,

μ_r : göreceli manyetik geçirgenlik,

h: yükseklik,

D1: dış çap,

D2: iç çap,

Ae: Etkin nüve alanı,

Le: etkin nüve uzunluğu,

Ve: etkin nüve hacmi,

B/I: amper başına akı yoğunluğudur (Özder, 2020; Hacıismailoğlu, 2011).

2.1.2 Ark flaşı

Bir elektrik tesisatının iki faz hattı arasında veya faz hattı ile toprak hattı arasında gerilim farkı meydana geldiğinde, bu durum boşluktaki gazların direncinin bozulmasına sebep olur ve ark flaşı adı verilen büyük bir enerji akışının ortaya çıkmasına neden olur. Ark flaşı meydana geldiğinde, açığa çıkan ısı sebebiyle çevrede bulunan gazlar hızlıca genişler. Isınmış olan gazların bu ani genişlemesi patlama sınırı içerisinde yangına ve çalışanın yaralanmasına sebep olabilir. Ark flaşı esnasında çok parlak bir ışık ve 20.000 °C'ye kadar yükselebilecek ısı açığa çıkabilir. Ark flaşının ısı ve ışık etkisi ile beraber metallerin eriyip buharlaşması etkisi ile yüksek basınçlı bir patlama oluşmaktadır (Türkuçar, 2019).

Patlama sonucunda ortaya çıkan yüksek ısıya bağlı yanıklar, patlamanın basınç etkisi ve etrafa dağılan materyaller nedeniyle ark flaş patlamaları çok ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Ark flaş, can güvenliği açısından oluşturduğu büyük riskin ölümcül kazaların yanı sıra ortaya çıkabilecek yangın nedeniyle ciddi kazalara sebep olabilmektedir (Kaya ve Kaya, 2019).



Şekil 2.6: Ark Flaş Anı

Kaynak: SIEMENS, (2019)

Şekil 2.6’da bir ark flaşı patlama anı görülmektedir. Ark flaşı insan hayatını riske atmaktadır. İnsan hayatı üzerinde ısı ve ışık etkisi sebebiyle metal erimesi, ileri derece yanıklar, görme bozuklukları ve kayıpları oluşabilmektedir. Yüksek basınçlı patlama etkisi ile beyin fonksiyonlarında anlık veya uzun süreli bozulma, duyma kayıpları, parça saçılımı sebebiyle yaralanmalar meydana getirebilmektedir.

2.1.2.1 Ark flaşı ile ilgili standartlar

Ark flaşı, alçak, orta, yüksek ve çok yüksek gerilim düzeylerinde oluşabilir. Koruma ekipmanlarının seçiminde uluslararası standartlara göre belirlenen yazılımlar ile simülasyonlar uygulamak, seçilen ekipmanların koruma sınıfının tespitinde önemlidir (Karacasu ve Hocaoğlu, 2010).

Ark flaş analizi uygulamaları literatürdeki standartlar;

- 1- NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace, 2015 (National Fire Protection Association): iş yerlerinde elektrikle çalışmalarda güvenliğin sağlanması amacıyla oluşturulan standarttır. Bu standart ile ark flaş risk sınıfına göre kullanılması gereken kişisel koruma donanımlarının ve kıyafetlerinin tanımı ve sınıflandırılması sağlanmıştır (NFPA 70E, 2015).
- 2- IEEE C2-2017 - 2017 National Electrical Safety Code(R) (NESC(R)) : Sisteme enerji uygulama, bakım ve çalışma sırasında oluşabilecek ark flaşı etkilerinin önlenmesi amaçlı temel önlem kuralları belirlenmiştir (NESC C2-2017, 2017).

- 3- IEEE 1584: IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations, 2002 (Institute of Electrical and Electronics Engineers): Ark flaşı analizlerinde kullanılan hesaplama yöntemleri, sistemdeki cihazlara ait oluşabilecek ark flaşı enerji seviyelerinin hesaplanma yöntemleri ve bu hesaplamalar sonucu ark flaş tehlike seviyelerini açıklayan standarttır. Bu standart ile üç fazlı güç devrelerinde ark flaşı enerjisi ve sınır uzaklık değerleri dikkate alınarak ark flaş sınıflandırılmasının yapılmasına ışık tutacak yöntem ve hesaplama yöntemleri ifade edilmektedir.
- 4- IEEE 1584 standardı belirli deneysel durumlar ve denklemler gerilim düzeyi 208 V - 15 KV arası güç sistemleri için kullanılabilir. Gerilim seviyesi 15kV üzeri olduğu durumlar ve mesafe belirtilen ölçüler dışında değere sahip olduğunda ise Ralph Lee metodu kullanılır. Bu metoda ait değerler Çizelge 2.3’de verilmiştir (IEEE 1584, 2002).

Çizelge 2.3: IEEE 1584 Standardı Uygulama Değerleri

Parametre	Değerler
Sistem gerilimi (KV)	280 V-15 KV
Frekans (Hz)	50 Hz/60 Hz
Arıza akımı (KA)	0,7 KA-106 KA
Baralar arası mesafe (mm)	13 mm-52 mm
Pano/Ekipman tipi	Open air, Box, MCC, Panel, Switchgear, Kablo
Topraklama yöntemi	İzole, Direk topraklı, Direnç üzerinden topraklı
Faz	Üç Faz arıza

Kaynak: (IEEE 1584, 2002)

2.1.2.2 Ark flaşı analizi

Sistem verilerinin toplanması:

Ark flaşı analiz işlemlerinin ilk adımı sistem bilgilerinin elde edilmesidir. Yapılacak uygulama ile sistemde yer alan transformatör, jeneratör, motor, elektrik sistem panoları vb. sistem elemanlarının etiket parametre değerleri ile tek hatta, koruma elemanları olan röle ve şalter gibi elemanların değerleri de bulunarak, bu elemanlara ait koruma parametre değerleri toplanmalıdır.

Sistem çalıştırma uygulamalarının tespiti:

Sistemin çok farklı çalıştırma uygulaması olabilir ve bunlara göre ark enerji düzeyi farklılık gösterebilir. Bu nedenle tüm çalışma uygulamaları tespit edilmelidir. Bunun yanı sıra tüm gerilim seviyeleri için faz arası bara açıklıkları belirlenmelidir. Ark flaşından koruma her durumda çalışma uzaklığındaki çalışanın yüz ve vücudundaki enerji seviyesine göre değişmektedir.

Arıza akımlarının tespiti:

Kısa devre analiz yazılımları sayesinde sistemden elde edilen verilerin tamamı işlenir ve her bir bara ve her bir sistem uygulaması için arıza akımlarının düzeyleri tespit edilir. Ark flaş analizleri sadece en yüksek kısa devre olacak uygulamalarda değerlendirilmemeli, en düşük faz hattı kısa devre akımını verecek sistem uygulamalarına da dikkat edilmelidir. Ark oluşturan akım kısa devre akımından daha küçüktür ve en düşük ark akımı meydana geldiğinde, en düşük kısa devre akımına bağlı olarak tespit edilmiş koruma değerlerine dahi duyarsız olunması riski vardır. Koruma sınır değerinin altında meydana gelecek en düşük ark akımı, yüksek açma zamanına bağlı olarak, en yüksek duruma oranla daha yüksek enerji açığa çıkartabilmektedir.

Ark akımının hesaplanması:

İlgili bara ve sistem girişinde er alan koruma cihazına uygulanan ark akımının hesaplanmalıdır. Ark arıza akımı, yazılımlar yardımı ile üç faz hatlı simetrik kısa devre arıza akımı kullanılarak hesaplanır. Sistemde çalışan ekipman için ark akımı IEEE-1584 ve NFPA-70E standartlarında belirtilen formüllerden hesaplanabilmektedir.

1000 V ve altı için;

$$\log I_a = K + 0,662 \cdot \log I_{bf} \cdot 0,996V + 0,000526 \cdot G + 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304 \cdot G(\log I_{bf}) \quad (2.2a)$$

1000 V ve üzeri için;

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \cdot \log I_{bf} \quad (2.2b)$$

Formüllerde log: 10'luk tabandaki logaritma,

Ia: ark akımı (kA),

K: 0,153 open box sınıflandırma değeri veya 0,097 box sınıflandırma değeri,

I_{bf} : Etkin arıza akımı simetrik üç faz r.m.s değeri (kA),

V: Sistem gerilimi (kV),

G: İki iletken arası mesafe (mm) değerlerini belirtmektedir.

Koruma cihazı karakteristiği ve ark süresinin tespiti:

Koruma cihazlarının sahip olduğu verilerin girişi için programlarda özellikler belirlenmiş olan koruma cihazlarından yararlanır. Her bir röle veya şalter için en düşük ve en yüksek ark oluşumuna göre ark temizleme zamanı belirlenir. Birden fazla girişin olduğu baralarda koruma cihazları için toplam temizleme zamanına ve kısa devre oluşumuna bağlı olarak toplam enerji göz önünde bulundurulmalıdır.

Sistemdeki cihazlar için arıza enerjisinin belirlenmesi:

Arkı oluşturan akımlar ve temizleme süreleri tespit edilmesinin ardından ark flaş enerjisi ampirik yöntem kullanılarak şu şekilde hesaplanır (IEEE-1584, NFPA 70-E).

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \cdot \log I_a + 0,0011 \cdot G \quad (2.3a)$$

Formül 2.3a'da:

E_n : Zaman ve mesafeye göre düzeltilmiş enerjiyi,

K_1 : 0.792, açık işletmeler (muhafaza yok), 0.555, kapalı işletmeler (muhafazalı),

K_2 : 0, topraksız ya da yüksek dirençli topraklama sistemleri, 0.113, topraklı sistemleri,

I_a : Ark akımı (kA),

G: Pano içerisinde iki iletken arası mesafe (bara açıklığı) (mm),

E_n : $10 \log E_n$ göstermektedir.

Son olarak,

$$E = 4,184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0,2}\right) \cdot (10^x / D^x) \quad (2.3b)$$

Formül 2.3b'de;

E: Hesaplanan ark flaş enerjisi (J/cm^2),

C_f : 1KV üzeri sistemlerde 1, 1kV ve altı sistemlerde 1,5 olarak alınır,

t: ark süresi (sn),

D: Muhtemel ark noktasından personele olan uzaklık (çalışma mesafesi) (mm)

X: Mesafe katsayısı olarak ifade edilir.

Gerilimin 15kV'dan fazla olduğu veya mesafe standartlarda belirtilen açıklıklar dışında değere sahipse Lee metodu kullanılır. Bu metoda göre ark flaş enerjisi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E = 2,142.106. V. I_{bf}. (t/D_2) \quad (2.4)$$

Formül 2.4'de;

E: Hesaplanan ark flaş enerjisi (J/cm²),

V: Sistem gerilimi (kV),

I_{bf}: Etkin arıza akım (simetrik üç faz r.m.s) (kA),

t: Ark süresi (sn),

D: Muhtemel ark noktasından personele olan uzaklık (mm),

15 KV üzeri gerilim düzeyleri için ark flaş akımının, etkin arıza akıma eşit olduğu kabul edilmektedir.

Ark flaş enerjisi ark akımının 100% ve 85% olarak varsayıldığı durumlar için hesaplanır. Bu iki değer birbiri ile karşılaştırılır ve büyük olan değer nihai ark enerjisi olarak belirlenir. Ark akımının düşük olsa da daha yüksek enerji açığa çıkma durumu, koruma rölesi ya da elektronik şalterin aniden ayarlanan üst değere ulaşmayacak bir ark akımının oluşması ve bu nedenle temizleme süresinin artması gibi durumlarda oluşur (Das, 2012).

Sistemdeki cihazlar için ark koruma limit uzaklıklarının belirlenmesi:

Ark flaş koruma sınırını tespit ederken açığa çıkacak enerjiyi bulmak için yapılan hesaplamalarda ark kaynağı ile ikinci derece yanık oluşabilecek bir mesafe ön görülür. Enerji, ikinci seviyede bir yanık oluşturabilecek minimum seviyenin altında olmalıdır. Ark flaş koruma sınırında bu enerji 5,0 J/cm²'dir (1,2 cal/cm²).

IEEE Standardı 1584'e göre limit uzaklık hesaplamasında, ampirik hesaplama modeli;

$$D_B = [4,184. C_f. E_n. \left(\frac{t}{0,2}\right). \left(6. \frac{10^x}{E_B}\right)]^{1/x} \quad (2.5)$$

Lee metodu hesaplama modeli;

$$D_B = \sqrt{(2,142. 10^6. V. I_{bf}. \left(\frac{t}{E_B}\right))} \quad (2.6)$$

Formülleri kullanılmaktadır. Formül 2.5 ve 2.6'da;

D_B : Ark noktasından limit uzaklık (mm),

C_f : Gerilime bağılı düzeltme katsayısı, 1KV'dan büyük gerilim seviyeleri için 1 ve 1 KV ve altı gerilim seviyeleri için 1,5 olarak alınır,

E_n : Zaman ve mesafeye göre düzeltilmiş enerji,

E_B : Limit uzaklıktaki ark enerjisi (J/cm^2), korumasız vucut için $5.0 J/cm^2$ olarak alınır,

t : Ark süresi (sn),

x : Mesafe katsayısı,

I_{bf} : Etkin arıza akım (simetrik üç faz r.m.s) (kA) olarak ifade edilmektedir.

Gerek en düşük ve en yüksek kısa devre akımlarının tespit edilmesi, gerekse pratikte hesaplaması karmaşık olan verilen formüllerin kullanılmasında simülasyon yazılımları kolaylık sağlamaktadır (Chelvaraja ve diğ., 2020).

Ark flaş seviyelerinde iyileştirmeler:

Ark flaş analizlerinin amacı sonuçta açığa çıkacak enerjiyi ve bu durumda kullanılması gereken koruyucu donanımların belirli çalışma uzaklığına bağlı olarak tespit edilmesini sağlamaktır. Bu hesaplamalar sonucunda mühendislik çalışmaları yapılarak ark flaş sınıfı gerilere çekilmelidir. Bu nedenle ters zamanlı aşırı akım korumaya kalmış yani ani değeri başlatma almamış olan koruma cihazlarının ayar özellikleri belirlenmeli ve yeni değerlerden sonra ark flaş hesaplamaları yenilenmelidir. Yenilenmiş değerler hem trafo enerji yüklemelerine ve motor kalkışlarına izin vermeli hem de sistemin uygun şartlarda açma yapmasına neden olmamalıdır. Buda, ark flaş analizi çalışmalarının eş zamanlı röle koordinasyonu ile mümkün olabileceğini göstermektedir (Das, 2012).

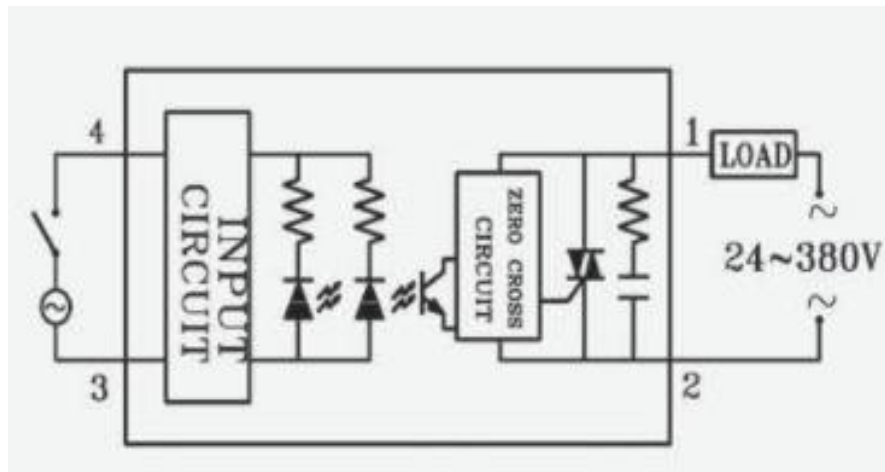
2.2 Elektronik Şalterler ve Çalışma Prensipleri

Elektronik şalterler elektrik devrelerinde devrenin aşırı akım ve kısa devre arızalarından korunmasını sağlarlar. Bir elektrik devresinde ki sistem ve cihazların devreye sokulmasını ya da devreden çıkarılması işlevi görürler. Şalterler elektrik devrelerinde sisteme akımın ilk uygulandığı noktada yer alarak giriş akımının istenildiğinde direk olarak kesilmesi görevini görürler. Bu işlemi şalterin türüne göre manuel, otomatik veya uzaktan kontrollü olarak yapabilmektedirler. Elektronik şalterler düşük akımlardan yüksek akımlara kadar anahtarlama yapabilen, monofaze (tek faz) veya trifaze (üç faz) türleri mevcuttur.

Elektronik şalterler piyasada solid state röle olarak isimlendirilmektedir. SSR'ler mekanik parçalar içermezler. Bu nedenle uzun kullanım ömrüne sahiptirler ve gürültüsüz çalışırlar. Bu ise elektrik tesisat panolarında birden fazla rölenin bir arada kullanılabilmesi avantajını sağlamaktadır. Alternatif akım ve doğru akım ile kontrol edilebilirlerken diğer mekanik rölelere göre enerji tasarrufu sağlarlar. Elektronik devre elemanlarından oluşmaları nedeni ile mikrodenetleyici veya PLC tabanlı sistemler ile kumanda edilebilirler. Solid-state rölelerin diğer bir avantajı da tepki sürelerinin çok daha kısa olmasıdır (Zhang ve Zhang, 2011).

Solid-state rölelerde kumanda devresi triyak veya transistör gibi elektronik devre elemanlarının tetiklenerek iletme geçirilmesi ile güç devresi kısmının açık durumdan kapalı duruma gelerek sisteme enerjiyi uygular.

Solid-state rölenin kullanılırken güç devresinin solid-state rölenin özelliğine göre sadece belirli gerilim sınırlarında çalışabilmektedir. Bu sınır, güç devrelerinde kullanılan tetikleme işlemini gerçekleştirecek elektronik devre elemanının çalışma karakteristiğine göre değişen çalışma aralığına sahiptir. Solid-state rölenin üst gerilim değerinden daha yüksek voltaj değerinde anahtarlama yapılmak istenirse elektronik anahtarlama devre elemanının çalışabileceği üst gerilim sınırı aşılır ve röle arızalanır. Bu şekilde bir arızanın gerçekleşmesi için 1 saniyeden daha kısa süre verilecek bir gerilim aşımı yeterli olur (3eelectrotech, 2018). Aşağıda Şekil 2.7'de bir solid-state röle iç yapısı görülmektedir.



Şekil 2.7: Solid-State Röle İç Yapısı

Kaynak: Eksen,(2017)

Şekil 2.7'de verilen devrede sıfır geçiş tabanlı bir solid-state rölesinin iç yapısı görülmektedir. Röleye 3 ve 4 nolu uçlarından uygulanan AC sinyal giriş devresine

(input circuit) gelmektedir. Optokuplör devre elemanları ile tetikleme işlemi sağlanarak, sıfır geçiş noktasında triyağın ilettime geçmesi sağlanmaktadır. Böylece 1 ve 2 uçlarında bağlı olan yük (load) devresine istenilen gerilim değeri uygulanmış olacaktır.

Elektrik devrelerinde uygulanan gerilimin uygun değeri, optokuplörün veya solid-state rölenin anahtarlama gerilim değerine göre ayarlanır. Böylece sistem geriliminin uygun değerlerde kalması sağlanır. Bu işlem sürekli akım için de yapılır. Akım değeri eşik değerinin üzerine çıktığında röle üzerinde ve optokuplörde arızalara sebep olur. Diyot veya varistörler ile solid-state rölelerin aşırı gerilimlerden korunması gerekir. Ani akım artışlarından arızalanmayı engellemek amacıyla güç yükselticiler kullanılmaktadır.

Solid-state röleler, kontrol gerilimi, yük gerilimi, yükün çeşidi ve şiddetine göre çeşitlendirilir. Solid-state röleler kullanılırken şu özellikler dikkate alınmalıdır.

1. Kontrol gerilimi: Doğru akım devrelerde gerilim genellikle 4 V-32 V kullanılırken, Alternatif akım devrelerinde gerilim değeri genellikle 90 V-280 V veya 180 V-280 V olarak seçilir.
2. Yük gerilimi: Endüstriyel ortamlarda genellikle alternatif akım kullanan devreler vardır. Ancak bazen de doğru akım devreleri de kullanılmaktadır.
3. Yükün yapısı: Yük devresinin türü ve şiddeti SSR tespitinde önemli rol oynar. Omik-rezistif yüklerde (ısıtıcılar, lambalar...) sıfır geçiş anahtarlama (zero crossing) röleler kullanılır. Sıfır geçiş anahtarlama rölede yük anahtarlama şebeke geriliminin sinüsoidal sinyalin sıfır noktasından geçişlerinde gerçekleştirilir. Gerilim yük devresine kademeli olarak uygulanır. Böylece tepe noktalarında akım uygulanmayacağından yük devresi korunmuş olur. Kapasitif yük devrelerinde de sıfır geçiş anahtarlama röleler seçilir. Endüktif yük devrelerinde ise ani gerilim anahtarlama yöntemi kullanılır. Bu yöntemde yük devresi anahtarlama şebeke gerilim değerlerine bakılmadan anlık gerçekleştirilir.

Solid-state rölelerin çalışma akım değerleri 1 A-150 A arasında değişmektedir. Uygun alternatif akım gerilim değerleri ise 120 Vrms, 240 Vrms, 380 Vrms, 480 Vrms ve 600 Vrms'dir. Böylece solid-state röleler farklı gerilim değerlerinde rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca Solid-state röleler hem alternatif akım hem de

doğru akım gerilimi ile çalışabilmektedirler. Doğru akım kontrol gerilim aralığı 3 V-32 V arasında değişmekte iken alternatif akım kontrol gerilim aralığı ise 18-36Vrms, 90-140 Vrms ve 90-280 Vrms değerleri arasında farklılık gösterebilmektedir (Özdemir, 2020).

2.2.1 Sıfır geçiş yöntemi

Sıfır geçiş yöntemi, alternatif akım sinüzoidal sinyalin matematiksel bir fonksiyonun işaretinin değiştiği pozitiften alternansdan negatif alternansa veya negatif alternansdan pozitif alternansa geçişi esnasında fonksiyonun grafiğindeki eksenin sıfır değeri ile kesişmesiyle temsil edilen bir noktadan geçişidir. Elektronik, matematik, ses ve görüntü işlemede yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Alternatif akımda, sıfır geçiş noktası gerilimin olmadığı anlık bir noktadır. Bir sinüs dalgasında veya diğer basit dalga formlarında, bu normalde her döngüde iki kez meydana gelir (Zheng ve Zhang, 2012).

Sıfır geçiş yöntemi, elektriksel gürültüyü azaltmak veya ortadan kaldırmak için kullanışlı bir yöntemdir. Anahtarlama sırasında üretilen gürültü, anahtarlama noktasındaki alternatif akım voltajının genliği ile orantılıdır. Bu nedenle, bu gürültüyü en aza indirmek için anahtarlama voltajın sıfır geçişinde gerçekleştirilmelidir. Etkili bir sıfır geçiş yöntemi ile yapılacak devre ile bu noktanın tespiti anahtarlama işleminde oluşabilecek arızaların engellenmesini kolaylaştırabilmektedir (Farnell, 2021).

Sıfır geçiş noktasının tespiti bir sıfır geçiş detektör devresi ile yapılabilmektedir. Farklı yöntemler kullanılarak sıfır geçiş detektör devresi yapılabilir. Bunlardan biri olan, işlemsel amplifikatör (Op-Amp) entegresi olan LM741 entegresi kullanılarak yapılacak bir sıfır geçiş detektör devresi ile bu işlem gerçekleştirilebilmektedir. Op-Amp entegresinin bir girişi referans voltajı için sıfıra ayarlanmalıdır. Diğer girişe bir sinüs dalgası voltajı uygulanır. Giriş sinüs dalgası sıfır noktasından negatif alternans yönünde geçtiğinde, çıkış voltajı pozitif alternansa yönlendirilir. Benzer şekilde, giriş pozitif alternans yönünde sıfırı geçerken, çıkış gerilimi negatif alternansa yönlendirilir. Bu yöntem aynı zamanda sinüs-kare dalga dönüştürücü olarak da bilinmektedir.

Solid-state röleler anahtarlama yöntemine göre sıfır nokta geçiş yöntemi kullanan veya faz kontrol yöntemi kullanan röleler olarak iki türde üretilmektedir. Sıfırda

nokta geçiş yöntemi kullanan solid-state röleler kontrol girişinde uygulanan komutu sinyal giriş hattı üzerindeki ana sinyalin sıfır noktasından geçtiği anda uygular. Faz kontrol yöntemi kullanan solid-state rölelerde ise sinyal giriş hattına uygulanan sinyalin bir periyotluk süresi içerisinde belirli bir sürede açma ve belirli bir sürede kapama işlemi gerçekleştirilir. Bu süreye göre çıkış sinyalinin voltajına ait etkin değer farklılık gösterir. Böylece kısma ve açma uygulanabilmektedir. Lineer solid-state röleler bu amaçla üretilmektedir (Kuppambatti ve Kinget 2013). Şekil 2.8’de sıfır geçiş yöntemi kullanılan bir sinyal ile faz kontrol yöntemi kullanılan bir sinyalin karşılaştırılması görülmektedir.

Control method / Kontrol metod		Phase angle control / Faz kontrol	Zero cross control / Sıfır geçiş kontrol
Output volume / Çıkış gücü eğrisi	10%		
	25%		
	50%		
	75%		
Feature		<ol style="list-style-type: none"> 1. Suited to control the inductive load or The variable resistance load (IR, Pure metal heater, Silicone carbonate heater or Transformer) 2. The power factor $\cos \theta < 1$ 3. Higher harmonic noise 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Suited to control the constant resistance load or The capacity load. (Alloy heater or Capacitor) 2. The power factor $\cos \theta = 1$ 3. Lower harmonic noise
Özellikler		<ol style="list-style-type: none"> 1. Rezistans yükleri veya endüktif yük uygulamaları için kullanımı uygundur. (IR lamba, Saf metal ısıtıcılar, Silikon karbonat ısıtıcılar, Trafolar,) 2. Güç Faktörü $\cos \theta < 1$ 3. Yüksek Harmonik Parazit 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kapasitif yük veya sabit direnç uygulamaları için kullanıma uygundur. (Metal alaşımlı ısıtıcılar veya kompanzasyon uygulamaları) 2. Güç Faktörü $\cos \theta = 1$ 3. Düşük Harmonik Parazit

Şekil 2.8: Sıfır Geçiş Yöntemi İle Faz Kontrol Yönteminin Karşılaştırılması

Kaynak: Eksen, (2017)

Şekil 2.8’de sıfır geçiş yöntemi ve faz kontrol yöntemi çıkış sinyalleri güç eğrileri verilmiştir. Verilen sinyallere bakıldığında sıfır geçiş yöntemi kullanılan sinyalinin her güç değeri aşamasında çıkış sinyalinin tam olarak çıkışa yansıdığı görülmektedir. Böylece çıkış sinyali herhangi bir gürültüye ve kayba maruz kalamadan elde edilmiştir. Faz kontrol yöntemi kullanılan çıkış sinyali sinyaline ait güç faktörü olan $\cos\theta$ değeri 1’den küçüktür. Bu değer güç panolarında uygulanan kompanzasyon işlemlerinde 1’e eşit olması istenmektedir. Bu nedenle faz kontrol yöntemi genellikle rezistans yükleri veya endüktif yükler olan IR lambalar, saf metal ısıtıcılar, silikon karbonat ısıtıcılar ve trafolar gibi sistemlerde kullanılır. Sıfır geçiş yöntemi kompanzasyon işlemlerinde güç faktörü olan $\cos\theta$ değerinin 1’e eşit olması nedeniyle rahatlıkla kullanılabilir. Aynı zamanda sıfır geçiş yöntemi kapasitif yük veya sabit dirençli metal alaşımlı ısıtıcı sistemlerinde kullanılması uygundur. Faz kontrol yöntemi kullanılan çıkış sinyalinde yüksek harmonikli parazitler görülürken

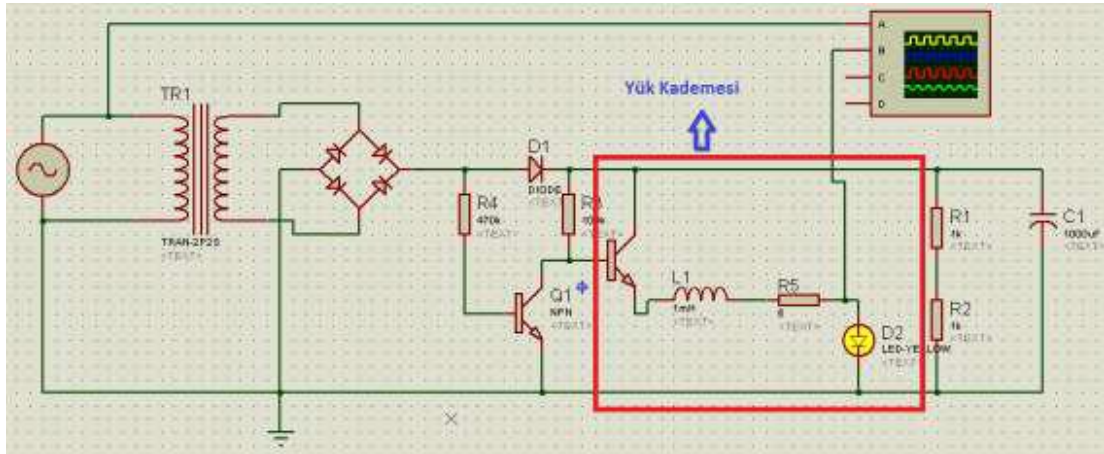
sıfır geçiş yöntemi kullanılan çıkış sinyalinde ise düşük harmonikli parazitler görülmektedir (Liu ve diğ., 2018).

2.2.1.1 Sıfır nokta geçiş tespiti

Literatüre bakıldığında çok farklı yöntem ve teknikle oluşturulmuş sıfır geçiş algılama devresi bulunduğu görülmektedir. Bu devreler incelendiğinde kullanılan elektronik devre elemanlarının özelliklerine göre üstün ve zayıf yönleri sahiptir. Kullanıldıkları alanlara göre bakıldığında bazı devreler yüksek frekanslı uygulamalar için uygunken, bazıları kuvvetli akım kullanılan devrelerde kullanımları uygundur. Bu uygulamalarda aktif komponentler olan transistör ve optokuplör elektronik devre elemanları kullanılmaktadır (Akyasan ve Hasırcı, 2016).

Sıfır geçiş detektörleri iki farklı tür çıkış sinyaline sahiptir. Giriş sinyal değeri sıfır noktasında olduğunda sıfır geçiş detektör devresi bir darbe sinyali üretir. Detektör giriş sinyalinin pozitif alternansın yükselen kenarı ve negatif alternansın düşen kenarında darbe üretir. Böylece sıfır geçiş detektörleri giriş sinyalinin pozitif ve negatif alternansları arasındaki geçişi tespit eder (Shin, 2014).

Transistörlü sıfır geçiş algılama devresi:

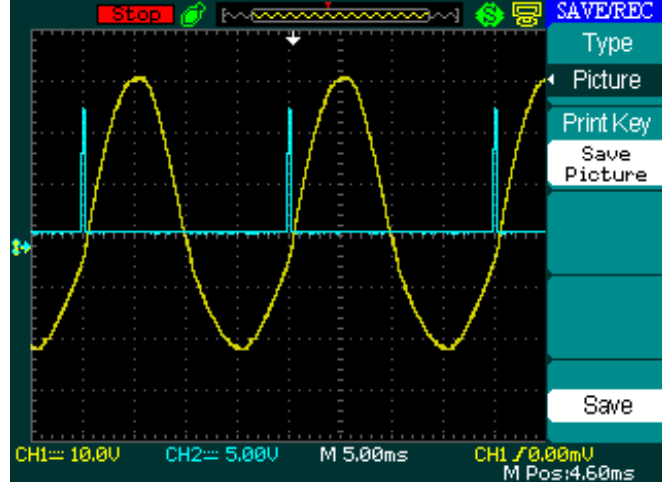


Şekil 2.9: Transistörlü Sıfır Geçiş Algılama Devresi Şeması

Kaynak: Akyasan ve Hasırcı (2016)

Şekil 2.9’da transistörlü sıfır geçiş detektör devresine ait devre şeması görülmektedir. Devrede R3 ve R4 dirençleri sıfır geçiş noktasının daha net olarak tespit edilmesi amacıyla ayarlama görevi görmektedir. Devre şemasında kare içerisinde gösterilen kısım yük görevi görmektedir. Transformatörün primer uçlarına uygulanan alternatif akım köprü tip diyotlar tarafından doğru akıma çevrilerek Q1 transistörünün beyz

ucuna uygulanmıştır. Böylece Q1 transistörünün sadece alternatif akım sinyalinin sıfır noktasında tetiklenmesi sağlanarak devrenin yük kısmı enerjilendirilmiştir. Şekil 2.9'da transistörlü sıfır geçiş detektör devresine ait çıkış sinyal şekli görülmektedir.



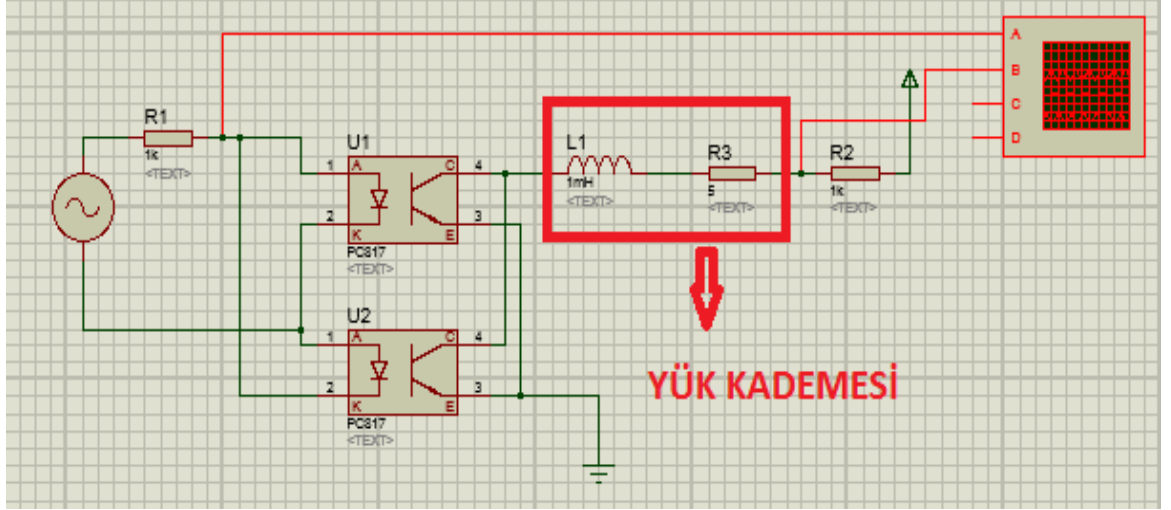
Şekil 2.10: Transistörlü Sıfır Geçiş Algılama Devresi Giriş ve Çıkış Sinyal Şekilleri

Kaynak: Akyasan ve Hasırcı (2016)

Şekil 2.10'da görülen sarı renkli alternatif akım sinyali giriş sinyalini göstermektedir. Mavi renkli sinyal ise alternatif akım sinyalinin sıfır noktasından geçişinde transistörün tetiklendiği anda oluşan çıkış sinyalini göstermektedir. Devrede bulunan R4 direnci sıfır geçiş noktasının algılanması sonrasında tetiklemede gecikme oluşturmak için kullanılmaktadır. R4 direncinin değeri değiştirilerek alternatif akım sinyalinin 30, 60, 90 derecelik değerlerinde tetikleme sağlanarak gecikme oluşturulabilir. Devreye direnç ve bobinden oluşan bir yük bağlanmıştır. Endüktif yük sıfır geçiş noktasının algılanması esnasında gecikmeye sebep olmaması için devrede bulunan R3 ve R4 dirençleri vasıtası ile ayarlama yapılabilmektedir.

Optokuplörülü sıfır geçiş algılama devresi:

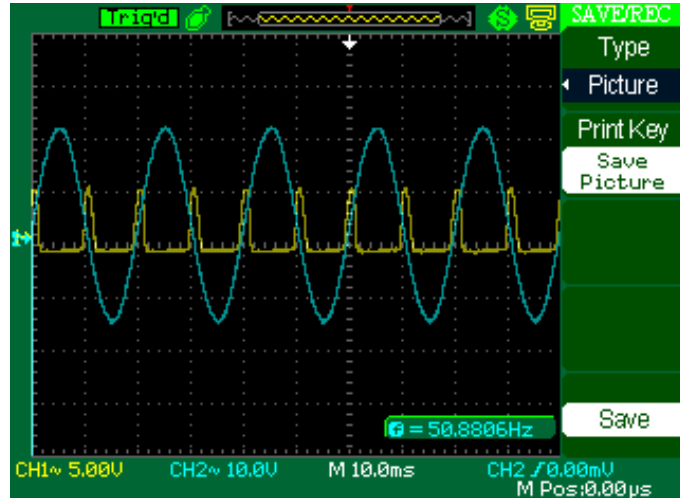
Şekil 2.11'de Optokuplörülü sıfır geçiş algılama devresine ait devre şeması görülmektedir. Devre çıkışına direnç ve bobinden oluşan yük kısmı bağlanarak alternatif akımın sıfır geçiş noktasında enerjilendirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 2.11: Optokuplör Sıfır Geçiş Algılama Devresi Şeması

Kaynak: Akyasan ve Hasırcı (2016)

Şekil 2.11’de optokuplör sıfır geçiş algılama devresinde giriş sinyali olarak uygulanan alternatif akım sinyali PC817 optokuplör entegrelerine uygulanarak sinyalin sıfır geçiş noktalarında tetikleme yapılması sağlanmıştır. Devrede R2 direnci ile tetikleme sinyalinde istenilen gecikme değerinin ayarlanması sağlanabilmektedir. Şekil 2.12’de devreye ait giriş çıkış sinyalleri verilmiştir.



Şekil 2.12: Optokuplör Sıfır Geçiş Algılama Devresi Giriş ve Çıkış Sinyal Şekilleri

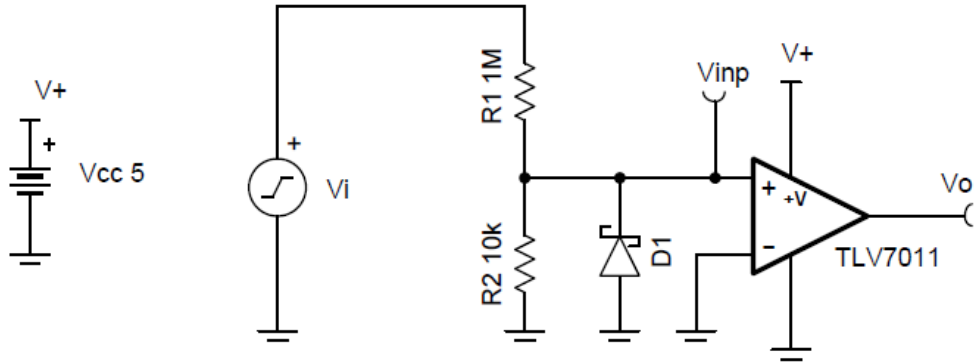
Kaynak: Akyasan ve Hasırcı (2016)

Şekil 2.12’de mavi renkli sinyal optokuplör girişlerine uygulanan alternatif akım sinyalini göstermektedir. Diğer sarı renkli sinyal ise alternatif akım giriş sinyalinin sıfır geçiş noktalarında optokuplörlerin tetiklenerek ürettiği çıkış sinyalini göstermektedir. Optokuplör sıfır geçiş detektör devresinin transistörlü devreye göre avantajı yüksek gerilim ve frekansa sahip giriş sinyali ile devre çıkışındaki yük

devresine uygulanan düşük gerilim değerine sahip çıkış sinyalinin arasında fiziksel bir bağlantı olmamasıdır. Böylece iki sinyalin kısa devre olması ihtimali ortadan kaldırılarak oluşabilecek tehlikelerin önüne geçilmiştir.

Karşılaştırma devresi kullanılan sıfır geçiş algılama devresi:

Şekil 2.13’de işlemsel yükselteç (Op-Amp) kullanılarak yapılan karşılaştırma devresi ile sıfır geçiş algılama devre şeması görülmektedir.



Şekil 2.13: Karşılaştırma Devresi İle Sıfır Geçiş Algılama Devre Şeması

Kaynak: Texas Instruments, (2018)

Şekil 2.13’de TLV7011 işlemsel yükselteç entegresi kullanılarak karşılaştırma devresi elde edilmiştir. Karşılaştırma devresi sayesinde sıfır geçiş algılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Devrede alternatif akım giriş sinyalinin sıfır noktası geçişinde karşılaştırıcı çıkış durumunu değiştirir. Bu işlem karşılaştırıcının ters çevirme girişini sıfır referans voltajına ayarlayarak gerçekleştirilir. Gerilim bölücü R1 ve R2 dirençleri ile alternatif akım sinyali zayıflatılarak işlemsel yükselteç entegresinin evirmeyen girişine uygulanır. D1 diyodu ile evirmeyen giriş seviyesinin asla negatif girişin altına düşmemesi sağlanmaktadır. Karşılaştırıcı ile sıfır noktası geçiş tespiti genellikle güç kontrol devrelerinde kullanılır (Texas Instruments, 2018).

Karşılaştırma devresinde giriş sinyalinin tepe değerinin hesaplanması;

$$V_p = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 340v \quad (2.7)$$

Şeklindedir. Formülde;

V_p : Giriş sinyalinin tepe değerini,

V_{rms} : Giriş sinyalinin etkin değerini göstermektedir.

Karşılaştırıcının pozitif değer içerisinde kalmasını sağlamak amacıyla giriş sinyali olarak hesaplanan 340 V değerinin 3.4 V değerine düşürülmesi için gerekli gerilim bölme oranı;

$$340v \cdot G = 3,4v \Rightarrow G = 0,001 \quad (2.8)$$

Olarak hesaplanır. Formülde;

G: Gerilim bölme oranını göstermektedir.

Gerilim bölme oranına göre devrede gerilim bölücü olarak görev yapan R1 ve R2 dirençlerinin değerleri;

$$G = \frac{R_2}{(R_1+R_2)} = 0,001 \quad (2.9)$$

Formülü ile hesaplandığında yaklaşık olarak R1=1MΩ, R2=1KΩ olarak bulunur.

Devrede D1 diyodu evirmeyen girişin negatif voltajını sınırlamak amacıyla diyot voltaj değeri 0,3V olarak kullanılabilir.

Karşılaştırıcı devresinde işlemsel yükselteç için sızıntı akımının değeri;

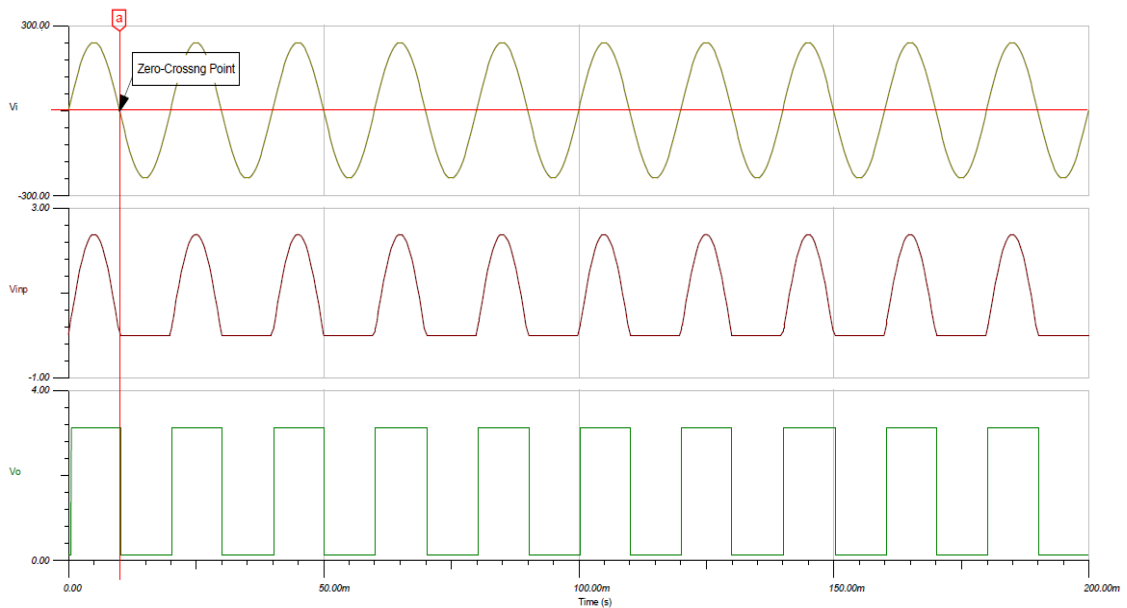
$$I_{ac} = \frac{V_p}{R_1} = 340\mu A \quad (2.10)$$

Olarak bulunur. Bu değer 500μA den az olması gerekir. Formülde;

I_{ac}: Sızıntı akım değerini,

V_p: Giriş sinyalinini tepe değerini,

R₁: Devrede R1 direnci değerini göstermektedir.



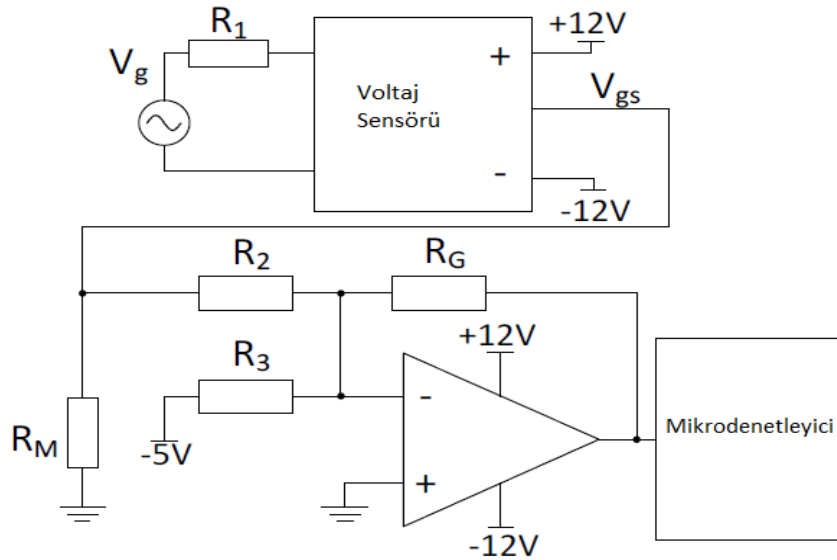
Şekil 2.14: Karşılaştırıcı İle Sıfır Geçiş Algılama Devresi Giriş ve Çıkış Sinyalleri

Kaynak: Texas Instruments, (2018)

Şekil 2.14’de Karşılaştırıcı ile sıfır geçiş devresine ait ana giriş sinyali (V_i), karşılaştırıcı entegresi zayıflatılmış giriş sinyali (V_{inp}) ve çıkış sinyali (V_o) görülmektedir. V_i giriş sinyalinin sıfır geçiş noktasında karşılaştırıcının durum değiştirerek V_o çıkış sinyalinin üretildiği görülmektedir.

Mikrodenetleyicili sıfır geçiş algılama devresi:

Gerilim polarite detektörlerim iki ana başlıkta sınıflandırılabilir. Bunlar donanım ve yazılım kısımlarıdır. Donanımsal detektörler yalnızca tipik olarak elektronik bir devre yapısına sahiptir. Bu devreler optokuplör, karşılaştırıcı ve işlemsel yükselteçlerden oluşur. Yazılım detektörleri sinyali izolasyonu ve ölçme yaparlar. Ölçülen sinyal, sinyal polaritesinin belirlemek amacıyla filtre devresine uygulanır (Vorobyov ve Vitols, 2014).



Şekil 2.15: Mikrodenetleyicili Sıfır Geçiş Algılama Devre Şeması

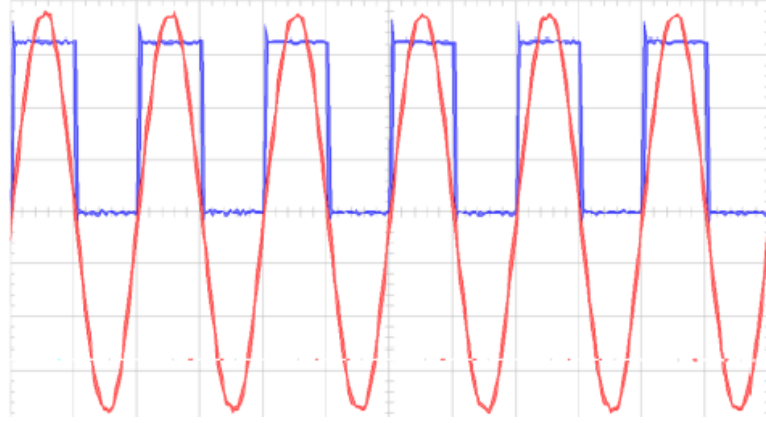
Kaynak: Vorobyov ve Vitols, (2014)

Şekil 2.15’de voltaj sensörü giriş voltajını düşürür ve izolasyon sağlamaktadır. Aynı zamanda giriş akımını azaltan bir akım sensörü yani hall detektörü olarak da çalışmaktadır. Devrede giriş direnci olan R_1 , giriş akımını ayarlamak için kullanılmaktadır. Çıkış direnci olan R_M ise çıkış voltajı üretmek için kullanılmaktadır.

Gerilim sensörünün çıkış sinyalinde bulunan negatif alternans mikrodenetleyiciye uygulanamayacağı nedeniyle bir voltaj değiştirici kullanılarak dönüştürülür. Gerilim

değiştirici işlemsel yükselteç entegrasi ile yapılmaktadır. Bu durumun iki farklı kazanımı vardır. Bunlar gerilim yükseltme ve gerilim kayması sağlanmasıdır.

Bu isteminin en önemli kısmı yazılan bir yazılım ile mikrodenetleyicinin kullanılmasıdır. Mikrodenetleyiciye uygulanan sinyal ile ölçülen sinyal yazılım sayesinde işlenir. Mikrodenetleyici giriş voltaj polaritesine göre yüksek hassasiyetli çıkış sinyalleri üretir.



Şekil 2.16: Mikrodenetleyicili Sıfır Geçiş Algılama Devresi Giriş ve Çıkış Sinyalleri

Kaynak: Vorobyov ve Vitols, (2014)

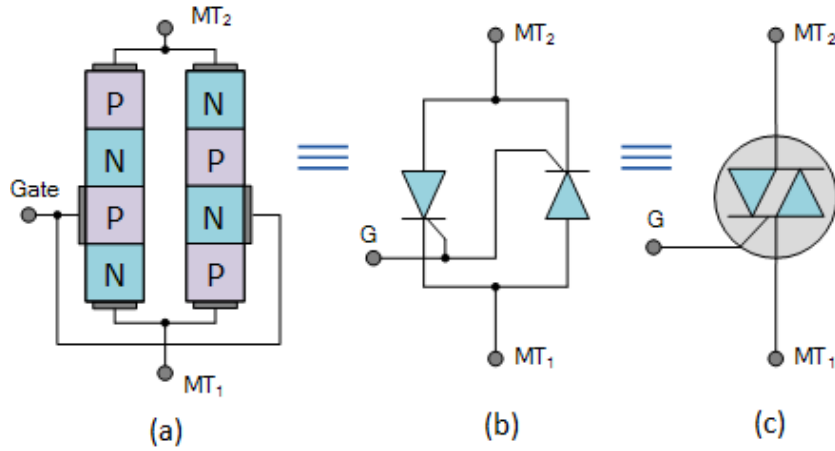
Şekil 2.16'da kırmızı sinyal mikrodenetleyicili sıfır geçiş algılama devresinin giriş sinyalini, mavi sinyal ise çıkış sinyalini göstermektedir. Mikrodenetleyici kullanılan sıfır geçiş algılama devreleri diğer yöntemlere göre daha hızlı ve yüksek hassasiyetle çalıştığı görülmektedir.

Sıfır geçiş devreleri hassasiyet ve hatasızlık gerektiren ölçüm sistemlerinde reaktif güç için vazgeçilmez bir gereklilik olan güç faktörünün doğru bir şekilde algılanmasını sağlamaktadır. Benzer şekilde, enerji gözlem sistemleri de sıfır geçiş algılama devreleri kullanılmaktadır (Irmak ve diğ., 2011).

Sıfır geçiş detektör devrelerinin uygulamaları koruma röleleri, AC analog giriş modüller, akıllı enerji sayaçları, güç kalitesi analizörler, frekans ölçümü, faz güç elektroniği devrelerinin ölçümü ve kontrolü işlemlerinde alternatif akımın dönüştürüleceği dalga biçimine göre değişiklik göstermektedir (Texas Instruments, 2019).

2.3 Triyak ve Çalışma Prensipleri

Triyak, gate ucundan düşük bir enerjiyle tetiklendiğinde ilettime geçen üç uçlu bir alternatif akım yarı iletken anahtardır. Silikon kontrollü doğrultucuların aksine triyak her iki yönde de akım iletmektedir. Ayrıca triyakların diğer bir farkı hem pozitif hem de negatif sinyalde tetiklenebilmektedir. Triyak paralel olarak bağlı iki tamamlayıcı tristör olarak düşünülebilir. Triyaklar alternatif akım gücünün doğru bir şekilde kontrol etmenin çok yönlü yollarını sunmaktadır. Mekanik anahtarlara göre çok farklı avantajlar sunmaktadır. Triyaklar sıfır noktasında ilettime ve kesime gidebildiği için zarar görmezler. Anahtarlama işlemi rölelere göre çok daha hızlı olduğu için daha hassas ve doğru kontrol sağlamaktadır. Triyaklar doğru akım, alternatif akım, düzeltilmiş alternatif akım veya darbe sinyal ile tetiklenebilir. Tetiklenmek için düşük bir enerjinin yeterli olması nedeni ile kontrol devrelerinde düşük maliyetli transistörler, ikili anahtarlar, tristörler, optik olarak bağlı sürücüler ve entegre devreler gibi elektronik devre elemanlarından herhangi biri kullanılabilir (ON Semiconductor, 2006).



Şekil 2.17: (a) Triyak İç Yapısı, (b) Tristör Eşleniği, (c) Triyak Sembolü

Kaynak: Electronics Tutorials, (2020)

Şekil 2.17.a'da bir triyağın yarı iletken iç yapısı görülmektedir. Triyak dört eklemlili yarı iletken dizilimine sahip bir devre elemanıdır. Bu haliyle Şekil 2.17.b'de görüldüğü gibi paralel bağlı iki ayrı tristör eşleniğinden oluşmaktadır. Şekil 2.17.c'de verilen triyağa ait elektronik devre sembolünde G ucu gate (kapı) ve MT₁, MT₂ uçları ise giriş ve çıkış uçlarını temsil etmektedir. Triyak gate ucundan düşük bir gerilim ile tetiklendiğinde MT₁ ucundan MT₂ ucuna doğru bir akım geçişi gerçekleşmektedir.

Triyak, alternatif akımda sinüsoidal bir dalga formunun her iki yönünde de iletme geçebilen ve kontrol edilebilen yüksek hızlı bir solid-state cihazdır. Doğru akım anahtarlama devreleri için tek yönlü anahtarlama özelliği, bir kez tetiklendiğinde tüm gücü doğrudan yüke verilir. Ancak alternatif akım anahtarlama devrelerinde, bu durum tek yönlü anahtarlama işlemi anot ucu pozitif olduğunda, gate sinyali her durumda sinyalin yalnızca yarım alternansında iletme geçtiği için sorun olacaktır. Alternatif akımda çalışmada gücün sadece yarısı bir tristör tarafından yüke iletilecektir.

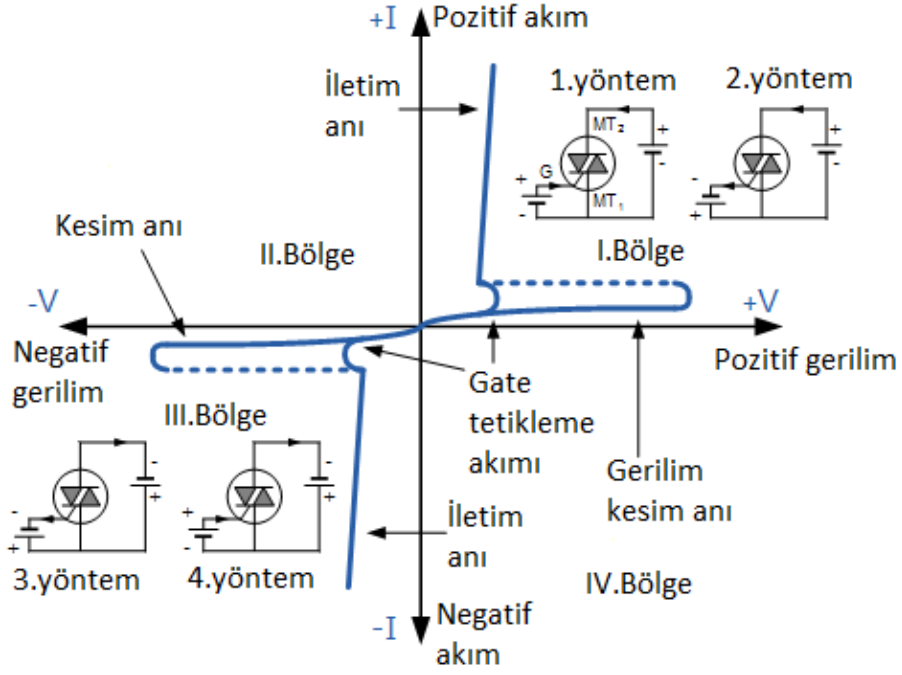
Alternatif akımın her iki alternansında da güç kontrolü elde etmek için, her pozitif yarım dalgayı tetikleyen tam dalgalı bir köprü doğrultucu içine tek bir tristör bağlanabilir. İki ayrı tristör Şekil 2.17.b’de gösterildiği gibi ters paralel olarak (arka arkaya) bağlanabilir.

Bir triyağın temel yapısı Şekil 2.17.a’da gösterilmektedir. Triyak, beş katmanlı bölgeye sahip bir cihazdır. MT_1 ve MT_2 uçları arasında P – N – P – N yarı iletken katmanları ile buna paralel tamamlayıcı N – P – N – P yarı iletken katmanları bulunmaktadır. Ayrıca bu yapı, triyağın gate sinyali ile pozitif veya negatif gerilimde tetiklenebilme özelliğini sağlamaktadır. MT_1 ile gate arasındaki bölge, birbirini tamamlayan iki tamamlayıcı diyot özelliği göstermektedir. Pozitif veya negatif bir gate sinyal ile bu diyotlardan biri tetiklenecektir. Bu tetikleme sinyali ile MT_1 ucunun polaritesi değişecektir. MT_2 ve MT_1 arasındaki akım akışı daha sonra cihazın dahili olarak gate tetikleme akımı sağlamasına neden olur. Böylece triyak akım akışı kesilene kadar iletimde kalacaktır.

Triyak için aşağıda gösterilen dört farklı iletme geçme yöntemi mevcuttur.

- 1- Pozitif gerilim yöntemi= MT_2 akımı pozitif (+) ve Gate akımı pozitif (+)
- 2- Negatif gerilim yöntemi= MT_2 akımı pozitif (+) ve Gate akımı negatif (-)
- 3- Ters pozitif gerilim yöntemi = MT_2 akımı negatif (-) ve Gate akımı pozitif (+)
- 4- Ters negatif gerilim yöntemi= MT_2 akımı negatif (-) ve Gate akımı negatif (-)

Bir triyağın iletme geçirilebildiği bu dört yöntem, Şekil 2.18’de triyağa ait çalışma karakteristik eğrisi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.18: Triyak Çalışma Karakteristik Eğrisi

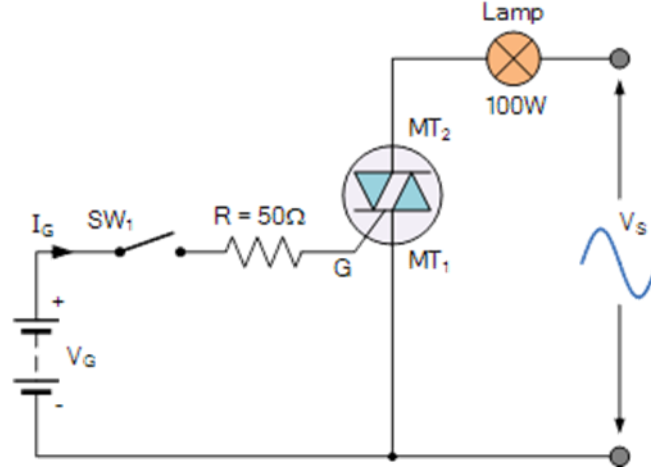
Kaynak: Electronics Tutorials, (2020)

I. Bölgede triyak genellikle yukarıda bahsedilen 1. yöntemde verilen pozitif bir gate akımı ile tetiklenerek ilettime geçirilir. Ancak aynı zamanda bir negatif gate akımı uygulanarak 2. yöntemle de tetiklenebilir. III. Bölgede ise negatif bir gate akımı ile tetikleme işlemi yapılmaktadır. 1. ve 4. tetikleme yöntemleri daha yaygın olarak kullanılır. 2. ve 3. yöntemle göre daha büyük bir gate akımı gerektiren daha hassasiyetin düşük olduğu yöntemlerdir.

2.3.1 Triyak uygulamaları

Triyak, alternatif akım besleme sinyalinin polaritesinden bağımsız olarak, pozitif veya negatif bir gate tetikleme sinyali ile ilettime geçebildiğinden, alternatif akımla çalışabilen sistemlerinin kontrolü ve güç kontrolü için en yaygın olarak kullanılan yarı iletken elektronik devre elemanıdır. Bu durum triyağın özellikle alternatif akımla çalışan endüstriyel sistemler için farklı uygulama yöntemleri ile kullanımında ideal hale getirir. Bu uygulamalar için kullanılan triyak anahtarlama devreleri aşağıda açıklanmıştır.

2.3.1.1 Doğru akım triyak tetikleme yöntemi



Şekil 2.19: Triyak Doğru Akım Tetikleme Devre Şeması

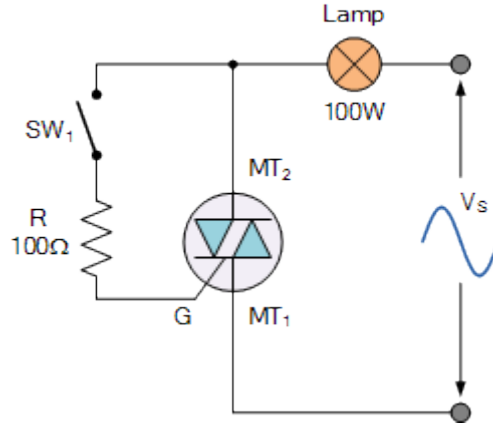
Kaynak: Electronics Tutorials, (2020)

Şekil 2.19’da basit bir doğru akım tetiklemeli triyak güç anahtarlama devre şeması görülmektedir. SW_1 anahtarı açıkken, triyağın gate ucuna akım akmayacaktır. Bu durumda lamba (lamp) kapalı durumda olacaktır. SW_1 anahtarı kapatıldığında, doğru akım gerilim kaynağından (V_G) R direnci üzerinden triyağa tetikleme akımı uygulanır ve triyak iletme geçer. Lamba üzerinden alternatif akım beslemesinden akım çekilerek ışık verir.

SW_1 anahtarı kapatıldığında triyağa pozitif bir gate akımı sağladığından, triyak, MT2 terminalinin polaritesinden bağımsız olarak sürekli olarak iletimde kalır. Bu triyak anahtarlama devresinde triyağı iletme geçirmek için ek bir pozitif veya negatif gate beslemesine ihtiyaç duyulur.

Alternatif akım tetikleme yöntemi tam dalga tetikleme olarak da isimlendirilir. Bunun nedeni triyağın alternatif akım sinyalinin her iki alternansında da iletimde olmasıdır.

2.3.1.2 Alternatif akım triyak tetikleme yöntemi



Şekil 2.20: Triyak Alternatif Akım Tetikleme Devre Şeması

Kaynak: Electronics Tutorials, (2020)

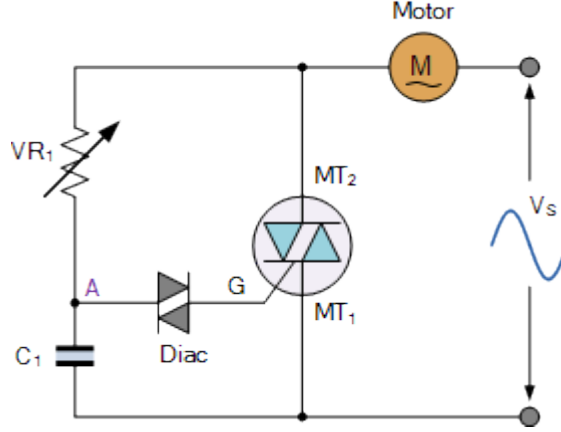
Şekil 2.20’de verilen devrede, Şekil 2.19’da verilen doğru akım tetikleme devresine benzer bir tetikleme işlevi sağlayan basit bir statik alternatif akım güç anahtarı olarak kullanılan bir triyak tetikleme yöntemi kullanılmıştır. SW_1 anahtarı açıkken, triyak açık bir anahtar gibi davranır ve lamba akımı çekmez. SW_1 kapatıldığında, triyak akım sınırlama direnci (R) yoluyla tetiklenir ve her alternans başlangıcından kısa bir süre sonra kendiliğinden tetiklenir. Böylece devrede yük olarak kullanılan lamba akım çeker.

Besleme sinüsoidal bir alternatif akım olduğu için, triyak, anlık besleme voltajı olarak her bir alternans sonunda otomatik olarak ilettime geçer ve böylece yük akımı kısa bir süre sıfıra düşer, ancak sonraki yarım döngüde karşılıklı kullanılan tristör yapısını kullanarak yeniden tetiklenir. Bu işlem SW_1 anahtarı kapalı kaldığı sürece devam eder. Bu tip anahtarlama kontrolü, sinüs dalgasının her iki yarısının da kontrol edilmesinden dolayı genellikle tam dalga kontrolü olarak adlandırılır.

2.3.1.3 Triyak ile faz kontrolü

Faz kontrolü, triyak için etkili ve yaygın olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir. Triyağın bir yükü faza göre kontrol etmesi sağlanır. Triyağın alternatif akımın her alternansının yüke kontrollü olarak uygulanması için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde triyak bir kontrol devresi tarafından belirlenen alternatif akımın her alternansının bir kısmında kesimde olur ve tekrar ilettime geçirilir. Bu durumda devreden geçen akım yük için sınırlandırılır. Devreden geçen akımın tamamı triyağın

daha kısa süre tetiklenmesiyle yüke uygulanır. Bu durumda gerilim miktarını değiştirmek için faz kontrolü kullanılmış olur. Bir yüke giriş sinyalinin hem pozitif hem de negatif yarıları için uygulanan güç kullanılır. AC motor hız kontrolü, tamamen değişken ve doğrusal bir kontrol sağlar çünkü gerilim sıfır ile uygulanan besleme gerilimi arasında ayarlanabilir.



Şekil 2.21: Triyak Faz Kontrol Devre Şeması

Kaynak: Electronics Tutorials, (2020)

Şekil 2.21’de verilen faz tetikleme devresinde triyak alternatif akım besleme sinyali motorla seri bağlı olarak kullanır. Değişken direnç olarak kullanılan VR_1 , triyağın gate ucundaki faz kayması miktarını kontrol etmek için kullanılır. Bu durum da alternatif akım alternans geçişi sırasında farklı zamanlarda iletme geçirerek motora uygulanan gerilim miktarını kontrol eder.

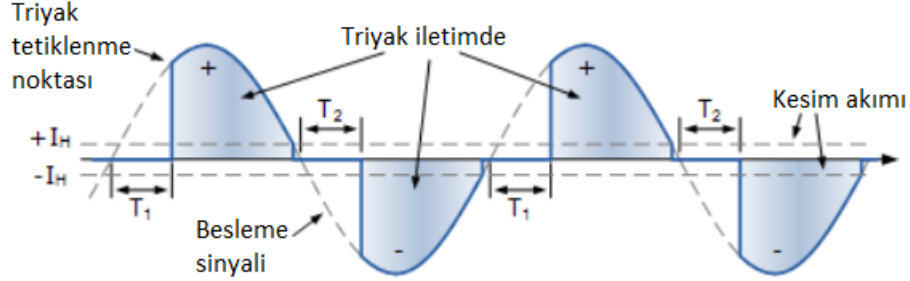
Triyağın tetikleme gerilimi VR_1 direnci ve C_1 kondansatörü ile ayarlanarak devrede triyağın gate ucuna bağlı bulunan diyak aracılığıyla sağlanmaktadır. Diyak triyağın tetiklenmesi için keskin bir tetikleme darbe akımı sağlamaya yardımcı olan çift yönlü bir yarı iletken elektronik devre elemanıdır.

Besleme gerilimi olan alternatif akımın her alternansının başlangıcında C_1 kondansatörü değişken direnç VR_1 üzerinden şarj olur. C_1 kondansatörünün üzerindeki gerilim değeri doyum noktasına gelerek triyağın gate ucuna sinyal gönderecek şekilde diyağı iletme geçirmek için yeterli olana kadar sürer.

Triyak tetiklendiğinde ona paralel olarak bağlanan gate tetikleme faz kontrol devresini devre dışı bırakır ve yarım alternansın geri kalanı için iletimde kalır.

Triyak yarım alternansın sonunda otomatik olarak kesime gider ve sonraki yarım alternansda VR_1 değişken direnci ile C_1 kondansatörü üzerinden tetikleme işlemi

tekrar başlar. Triyak her anahtarlama yönteminde örneğin 1. ve 2. yöntem için farklı miktarlarda gate tetiklenme akımı gerektirdiğinden asimetriktir, yani her pozitif ve negatif yarım alternans için tam olarak aynı noktada tetiklenemeyebilir.



Şekil 2.22: Triyak Faz Kontrol Tetikleme Sinyal Şekli

Kaynak: Bodur, (2017)

Şekil 2.22’de triyağın, giriş besleme gerilimi olan alternatif akım sinyal şekli üzerinde faz kontrollüne göre iletim ve kesimde olduğu bölgeler görülmektedir. T_1 ve T_2 anları triyağın tetiklendiği anlardır.

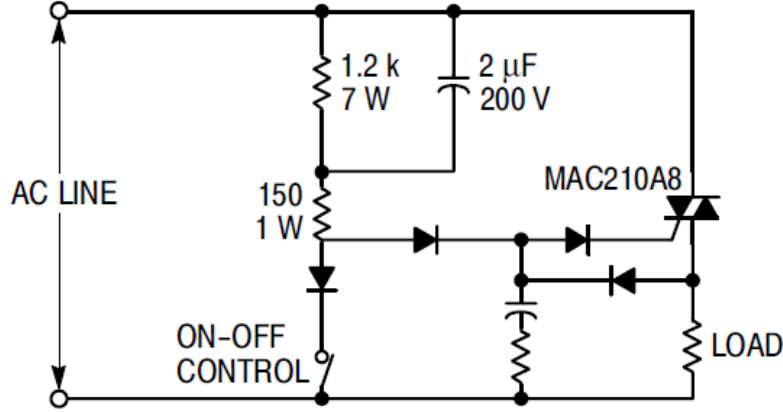
Bu triyak faz kontrolü ile yapılan hız kontrol devresi alternatif akım motor hız kontrolü, lamba dimmerleri ve elektrikli ısıtıcı kontrolü için uygun bir devredir. Aslında birçok evde kullanılan triyak ışık kontrolü devresi bu prensip ile çalışır. Bununla birlikte, genel olarak triyak ışık kısıcılarının yalnızca akkor lambalar gibi dirençli yüklerle ve motor hız kontrolörü olarak kullanılması amaçlanmıştır (Bodur, 2017).

2.3.1.4 Triyak ile sıfır geçiş kontrol yöntemi

Sıfır noktası anahtarlama çoğu sistemde elektro manyetik parazit (EMI) üretmedikleri için kullanılmaktadır. Sıfır geçiş noktası kontrolü alternatif akım sinyalinin her iki alternansının sıfır olduğu noktada yüke uygulanmasıdır. Bu uygulamalarda öncelikli olarak ısıtıcılar gibi rezistif yükler kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntem eğer gecikme yüke uygulanan güç sinyali ile modüle edilirse ve yük karakteristiği doğrusal ise motor hız kontrolünde de kullanılır. Modülasyon işlemi rastgele açma-kapama veya oranlamalı tip olabilir.

Sıfır geçiş anahtarlama yönteminin verimli olabilmesi için doğru noktada anahtarlama yapılması gerekmektedir. Eğer 10 V gibi bir gate gerilimi ve yük için 100-200 watt arası güç gerekiyorsa bu yöntem avantajlı olmayacaktır. Triyaklarda negatif alternanslarda gate akımını sağlamak için ikincil bir elemana ihtiyaç duyulur.

Gate akımı için kullanılacak ikincil eleman daha az güç gerektirmesi nedeni ile triyaklar bu yöntemde daha çok tercih edilir. Yükün aniden tam olarak yüklenmesi triyağın her zaman iletimde kalmasına neden olacaktır. Bu durum gerilimin düşmesine ve hatta çalışan diğer devre elemanlarının düzensiz çalışmasına neden olacaktır. Bu nedenle yük yüksek güçte aynı hattan beslenmemelidir.



Şekil 2.23: Triyak İle Sıfır Geçiş Kontrol Devre Şeması

Kaynak: ON Semiconductor, (2006).

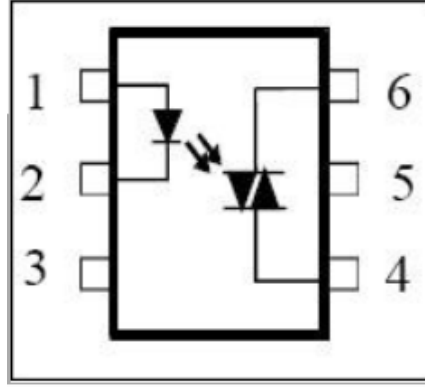
Şekil 2.23’de triyaklı sıfır geçiş noktası tetiklemeli devre görülmektedir. Devrede triyağın gate tetikleme gerilimi on-off (açma-kapama) kontrol anahtarı ile kontrol edilmektedir. Devredeki direnç ve kondansatör yardımı ile de besleme sinyalinin sıfır noktası tespit edilerek, diyotlar üzerinden doğrultma yapılmıştır. Böylece triyak negatif alternanslarda da tetiklenmiştir (ON Semiconductor, 2006).

2.4 Optokuplörler ve Çalışma Prensipleri

Optoizolatör, fotokuplör veya optikal izolatör olarak da bilenen optokuplörler, birbiri ile optik bağlantılı ışık verici ve foto alıcıdan oluşan, elektriksel bir bağlantı olmadan düşük gerilimlerle, yüksek gerilim ve akımları kontrol edebilen ve iki devrenin elektriksel olarak izolasyonunu (yalıtılmasını) sağlayan, bir elektronik devre elemanıdır.

Optokuplörlerin temel özelliği iki ayrı devreyi birbirinden elektriksel olarak ayırmak ve yalıtımdır. Böylece optokuplörler sayesinde, farklı akımlar aynı devrede birbirinden izole edilerek güvenli bir şekilde kullanılır ve devre sorunsuz bir şekilde çalışırken oluşabilecek arızaların önüne geçilir.

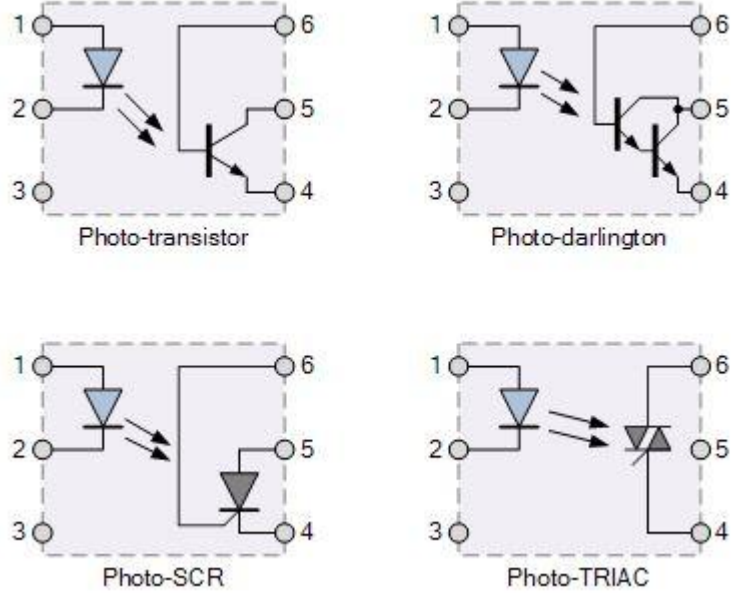
Giriş uçlarında bir LED diyot ve çıkış uçlarında led diyotun yaydığı ışığı alarak iletme geçen bir adet foto eleman bulunur. Optokuplörlerin giriş uçlarına elektrik sinyali uygulandığında led diyot ışık yayar ve yayılan bu ışık fototransistör tarafından algılanarak iletme geçer. Bu sayede elektrik akımı fiziksel bir bağlantı olmadan optik olarak iletilir. Böylece farklı gerilimler birbirinden ayırt edilerek devrenin sorunsuz çalışması sağlanır (Musayev, 2000).



Şekil 2.24: Optokuplör İç Yapısı

Kaynak: Musayev, (2000)

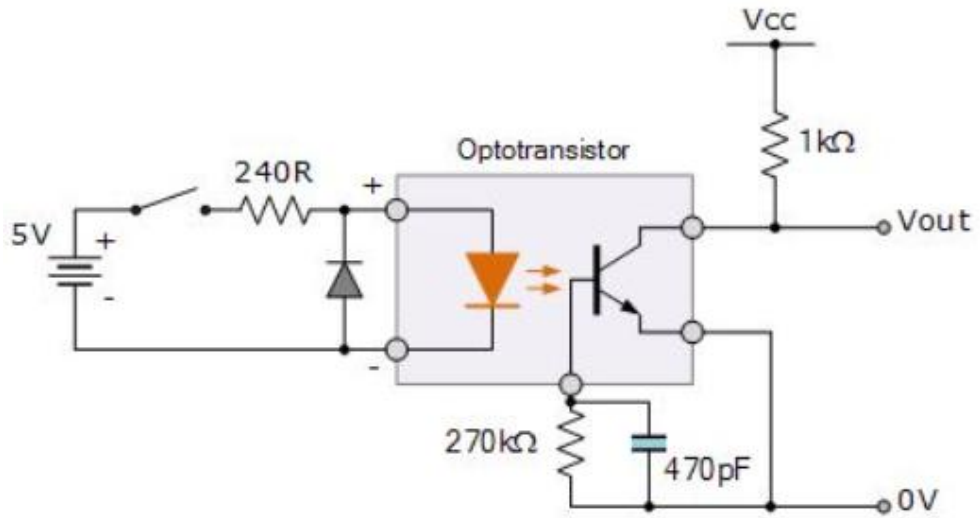
Şekil 2.24'de bir optokuplörün temel iç yapısı görülmektedir. Giriş sinyalinin uygulandığı 1 ve 2 nolu bacaklar bir foto diyota bağlıdır. Bu bacaklara sinyal uygulandığında foto diyot iletme geçerek bir optik sinyal yayar. Aynı zamanda 6 ve 4 nolu bacaklara bağlı olan foto transistör veya başka bir optik devre elemanları tarafından optik sinyal algılanarak iletme geçer. Böylece uçlarına bağlı olan yük akımının üzerinden akımına izin verir. Optokuplörlerin iç yapısında kullanılan alıcı ve verici foto devre elemana göre farklı türleri kullanılmaktadır. Optokuplörlerde temel özellik kızıl ötesi ışık üreten led diyotdan saçılan kızıl ötesi ışını algılamak için kullanılan yarı iletken foto transistörden oluşur. Hem led hem de foto transistör hafif metal gövdeli veya metal ayaklı bir pakette üretilirler. Şekil 2.25'de örnek olarak optokuplör çeşitleri görülmektedir.



Şekil 2.25: Optokuplör Çeşitleri

Kaynak: Şahinoğlu, (2018)

Şekil 2.25’de görüldüğü üzere infrared led (IR Diode) adı verilen diyotdan akım geçirildiğinde infrared ışık foto transistör tarafından algılanarak tetiklenir ve transistörden akım geçmeye başlar. Bir optokuplörün yalıtkan kısmı spektral tepkisi, cam, plastik veya hava gibi saydam bir ortamla birbirinden ayrılır. Girişi ve çıkışı arasında direk bir elektrik bağlantısı olmadığından, 10 KV’a kadar elektriksel yalıtım sağlar. Optokuplörler türleri infrared optik olarak foto-transistör, foto darlington, foto SCR, foto triac olmak üzere dört genel tipte üretilirler (Şahinoğlu, 2018). Şekil 2.26’da bir optokuplör uygulama devresi verilmiştir.



Şekil 2.26: Optokuplör Uygulaması Devre Şeması

Kaynak: Şahinoğlu, (2018)

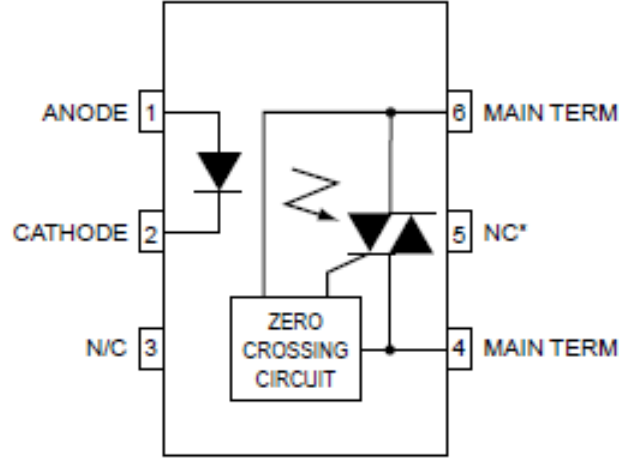
Şekil 2.26'da verilen uygulama devresinde 5 V'luk bir doğru akım kaynağından gelen düşük güçlü sinyal ile optokuplör içindeki infrared led optik sinyal yayarak foto transistörü tetiklenmektedir. Böylece transistör direnci sıfıra düşerek çıkış gerilimi 0 V olur. Normalde anahtar açık iken çıkış gerilimi giriş gerilimine eşit olurken, anahtar kapatıldığında çıkış gerilimi 0 V olur. Bu devre doğru akım anahtarlama işlemi için kullanılmaktadır.

Optokuplörler mikrodenetleyicilerden gelen düşük gerilim seviyesine sahip kontrol sinyali arasında gerekli elektriksel izolasyonu oluşturan, transistörler ve triyaklar gibi daha yüksek gerilimlerle çalışabilen elektronik devre elemanlarının tetiklenmesi sağlayabildiklerinden çok geniş bir alanda kullanılabilirler.

Optokuplörlerin sahip olduğu yaygın uygulama alanları arasında, mikrodenetleyici giriş ve çıkışlarında anahtarlama yapma, doğru akım ve alternatif akım güç kontrolü, bilgisayar ağları, sinyal yalıtımı ve akım toprak döngülerinden kaynaklanan parazitlenmeyi engelleme gibi alanlar vardır (Musayev, 2000).

2.4.1 MOC serisi optokuplör entegresi

MOC optokuplör entegresi triyak çıkışlı DIP-6 kılıflı bir entegredir. MOC entegresi kendi içerisinde optokuplör prensibi ile triyak tetiklemesi yapabilen bir entegredir. MOC triyak çıkışlı optokuplör entegresi tek kanala sahiptir. Bu entegrenin triyak tetikleme yöntemi sıfır nokta geçiş yöntemi temellidir. MOC serisi optokuplör entegresi 60 mA'e kadar çıkış akımı verebilmektedir. Bu optokuplör entegresi 5,3 KV'a kadar çıkan gerilimlere karşı izolasyona sahiptir. MOC serisi optokuplör entegreleri kılıf şekilleri, iç yapısı ve kullanım şekillerine göre farklı üretim çeşitlerine sahiptir. Bunlar 3010, 3011, 3020, 3021, 3022, 3041 vb. şeklinde sınıflandırılmıştır (Fairchild Semiconductor, 2001).



Şekil 2.27: MOC 3041 Entegresi İç Yapısı

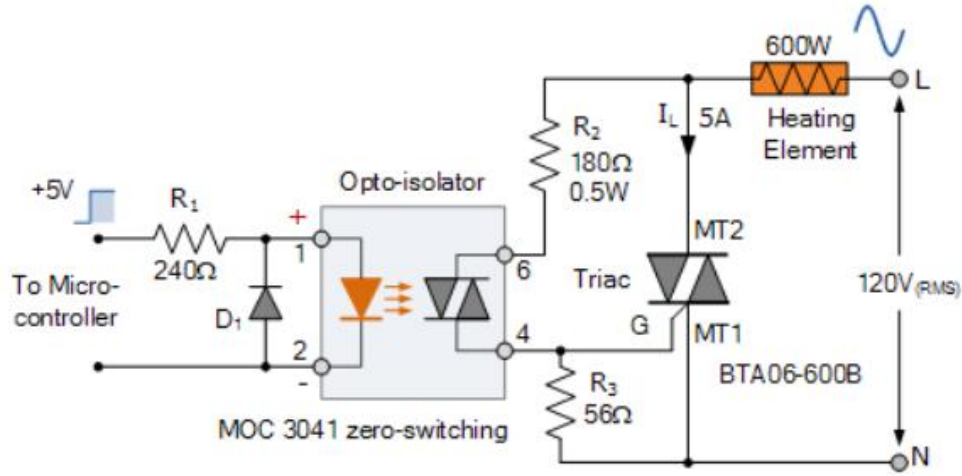
Kaynak: Fairchild Semiconductor, (2001)

Şekil 2.27’de MOC 3041 entegresinin iç yapısı verilmiştir. Entegrenin 1 ve 2 nolu bacaklarında bir infrared diyodun anot ve katot uçları bağlıdır. Çıkış uçları olan 4 ve 6 nolu bacaklara ise bir foto triyak bağlanmıştır. MOC 3041 entegresinin diğer optokuplörlerden farkı iç yapısında bir sıfır geçiş devresi (zero crossing circuit) yapısı bulunmasıdır. Sıfır geçiş devresi ile foto triyağın gate ucundan tetikleme sinyali verilmektedir. Böylece infrared diyot tarafından yayılan optik sinyal foto triyak tarafından algılandığında triyak direk olarak ilettime geçmez. Entegrenin 4 ve 6 nolu bacaklarına bağlı olan sıfır geçiş devresi aynı zamanda triyak uçlarına uygulanan alternatif akım sinyalinin sıfır geçiş noktasını tespit ederek sıfır geçiş noktasında triyağın gate ucuna tetikleme sinyali göndererek triyağı ilettime geçirir. Triyağın ilettime geçmesi ile entegre çıkış uçlarına bağlı olan sinyal yüke uygulanmış olur.

2.4.2 MOC serisi optokuplör entegresi ve triyak ile sıfır geçiş kontrol yöntemi

Elektronikte herhangi bir kaynaktan alınan elektrik enerjisinin yine elektronik yöntemlerle kontrol edilmesi, dönüştürülmesi ve işlenmesinin ardından kontrollü olarak yüke aktarılması amacıyla farklı devre elemanları kullanılmaktadır. Bu elektronik devre elemanlarının başında IGBT, MOSFET, SCR ve Triyak gibi güç elektroniğinde anahtarlama devre elemanı olarak kullanılan cihazlar gelmektedir. Bu devre elemanlarını yüksek güçlerde kullanımını daha güvenli ve verimli hale getirmek amacıyla farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi de bir mikro denetleyici tarafından düşük gerilim seviyeleri ile kolaylıkla kontrol edilebilen

optokuplör entegreleri yapıları gereği aynı zamanda elektriksel yalıtım da sağlamaktadırlar. Şekil 2.28’de bu yöntemin kullanıldığı elektronik devre şeması verilmiştir.

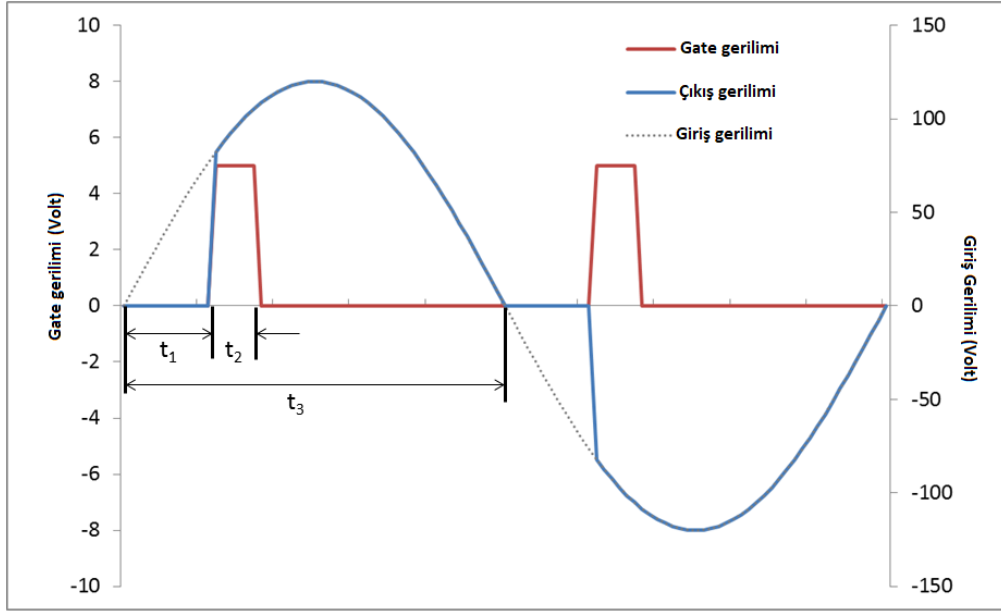


Şekil 2.28: MOC Entegresi ve Triyak İle Sıfır Geçiş Kontrol Devre Şeması

Kaynak: Electronics Tutorials, (2020)

Şekil 2.28’de verilen uygulama devresinde yük kısmında bulunan 120V alternatif gerilim ile doğru akımın bulunduğu taraf birbirinden optik yolla izole edilmiştir. MOC serisi optokuplör devresi ile yük kontrol edilmektedir. Bu devreye mikrodenetleyici kullanılarak MOC optokuplör entegresi kontrol edilebilir. Tetiklenen triyak ise alternatif akım ile çalışan yük devrelerini kontrol eder.

Ayrıca yük olarak kontrol edilecek devrenin endüktif veya rezistif olmasına dikkat edilmelidir. Eğer alternatif akım motorları gibi endüktif (bobinli) sistemler kullanılacaksa devrenin çıkışına bir direnç ve kondansatörün seri bağlanması ile oluşturulan bir devrenin eklenmesi gerekmektedir. Bunun sebebi anahtarlama elemanları kesime girme esnasında anahtar uçlarında hızlı bir gerilim yükselmesine ve iletme girme esnasında hızlı bir akım yükselmesine maruz kalmalarıdır. Bu durumda bu yöntem kullanılarak akımın yükselme hızı sınırlandırılabilir. Şekil 2.29’da devreye ait giriş ve triyak tetikleme sinyalleri verilmiştir.



Şekil 2.29: MOC Entegresi ve Triyak İle Sıfır Geçiş Kontrol Devresi Sinyal Şekilleri

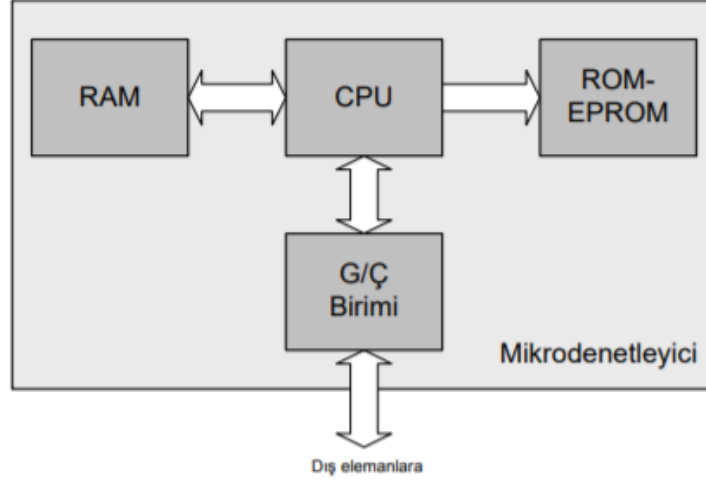
Kaynak: Arduino Playground, (2018)

Şekil 2.29’da triyak gate tetikleme gerilim sinyali, çıkış gerilim sinyali ve giriş gerilim sinyali şekilleri verilmiştir. Sıfır geçiş noktası tespit edildiğinde, Triyak kontrollü t_1 süresince kesimde kalır. Bu süre ne kadar uzun olursa alternatif akım yük devresi o kadar az güç çekmektedir. Kesim süresi t_1 sona erdiğinde mikrodenetleyici triyağın gate ucuna bir sinyal uygulayarak (kırmızı renk ile gösterilen sinyal) triyağı ilettime geçirir. Triyak ilettime geçtikten sonra gate gerilimi kesildikten sonra bile iletimde kalacaktır. Alternatif akım sinyali bir sonraki sıfır noktası geçişinde gate gerilimi sıfırsa triyak kesime gidecektir. Bu nedenle alternatif akım sinyali tekrar sıfır noktasından geçtiğinde triyağı kesime götürmek için farklı bir işleme gerek yoktur. Triyak alternatif akım sinyalinin yarım alternansı t_3 süresi içinde kesime gitmesini sağlamaktadır. Gate darbe sinyalinin t_2 süresi triyağın tetiklenme işlemi ile belirlenir. Bu darbe süresi çok kısa olursa triyak ilettime geçmez. İkinci sıfır noktası geçişi gerçekleştiğinde gate gerilimi olmadığından triyak bir sonraki yarım alternansda tekrar tetiklenene kadar kesimde kalır. Burada alternatif akımın bazı kısımlarının kesilmesi sonucunda daha düşük ortalama güç elde edilmektedir. Bu yöntem aynı zamanda bir alternatif akım sinyalinin PWM (puls darbe modülasyonu) kontrolünün gerçekleştirilmesidir. Triyak anahtarlama işleminin zamanlamasını tam olarak kontrol etmek için mikrodenetleyicide yazılımsal zamanlayıcıyı kullanılabilmektedir.

2.5 Mikrodenetleyiciler ve Çalışma Prensipleri

Bilgisayarların içerisinde bulunan temel bileşenlerden olan RAM, ROM ve giriş çıkış üniteleri gibi bileşenlerin tek bir entegre kılıfı içerisinde üretilme haline mikrodenetleyici (Microcontroller) denir. Bazı yazılımsal kontrol gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere üretilmiş olan mikrodenetleyiciler, mikroişlemcilerle göre çok daha temel yapıda ve uygun maliyetlidir. Günümüzde mikrodenetleyiciler otomobillerde, kameralarda, cep telefonlarında, fax-modem cihazlarında, fotokopi, radyo, TV, bazı oyuncaklar gibi çok fazla alanda kullanılmaktadır. Piyasada birçok üretici tarafından üretilen mikrodenetleyiciler bulunmaktadır. Her firma üretmiş olduğu mikrodenetleyici yapısına uygun yazılım dili de üreterek farklı isimler altında piyasaya sürmektedir. Örnek olarak Microchip firması ürettiği mikrodenetleyici entegresine PIC adını verirken, Intel firmasına ait 8051 entegresi, Atmega, Arduino gibi günümüzde çok fazla kullanılan mikrodenetleyici yapıları vardır (Megep, 2017).

Mikrodenetleyici, içerisindeki hafıza birimlerine yüklene yazılımsal veriyi derleyip bu yazılım sayesinde dışarıdan uygulanan analog veya dijital verileri işleyerek sonucunda da çıktı sinyalleri üreten bilgisayardır. Hafızasındaki programlanan yazılımı anlayabileceği gibi derler ve her bir komut yapısı için bir çıkış sinyali üretir. Bu işleme mikrodenetleyicinin komut çevirimi denir. Örneğin mikrodenetleyicinin çıkış uçlarına bağlanan bir piston uygulanan sinyale göre harekete geçecektir. Mikrodenetleyiciler elektronik devrelerde işleyişi belirleyen beyin görevini yerine getirir ve elektronik sistemleri kontrol eder. Maliyet düşüklüğü ve kullanım kolaylığı nedeniyle Microchip firmasının tarafından üretilen PIC ailesi (Peripheral Interface Controller/çevresel ünite denetleme arabirimi) en çok tercih edilen mikrodenetleyiciler arasındadır (Ozsoy ve diğ, 2019).



Şekil 2.30: Mikrodenetleyici Blok Şeması

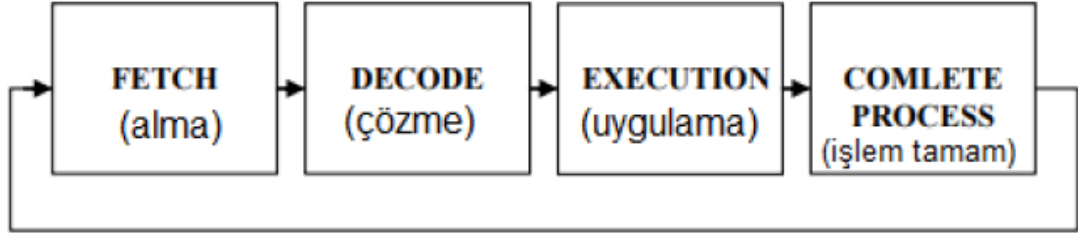
Kaynak: Megep, (2017)

Şekil 2.30’da bir mikrodenetleyiciyi oluşturan birimler blok şema halinde gösterilmiştir. Mikroişlemci mimarisi olarak iki temel mimari vardır. Bunlar RISC (Azaltılmış komut seti/Reduced Instruction Set Computer) ve CISC (Karmaşık komut seti/ Complex Instruction Set Computer) tabanlı işlemcilere göre planlanmıştır. Microchip firmasına ait PIC serisi mikrodenetleyicilerde genellikle bu iki işlemci sınıfından birisi kullanılmaktadır. PIC mikrodenetleyiciler daha hızlı çalışması nedeniyle RISC tabanlı işlemci olarak üretilmiştir (Ozsoy ve diğ, 2019).

Mikro işlemcili sistemlerde kullanılan iki tip temel mimari vardır. Bunlar, Von Neuman mimarisi ve Harvard mimarisidir. Von Neuman mimarisinde, program kodları (komutlar) ve veriler aynı bellek biriminden tek bir yoldan alınıp işlemciye getirilir. Önce komut getirilir daha sonraki adımda veri alınıp getirilerek işlenir. Bu durum bazı gecikmelere sebep olur. Harvard mimarisinde, program kodları ve verilere ayrı veri yollarından ulaşıldığından çalışma daha hızlı olmaktadır. Mikrodenetleyicilerde daha çok Harvard mimarisi kullanılmaktadır (Bates, 2011).

2.5.1 Komut işlem süresi

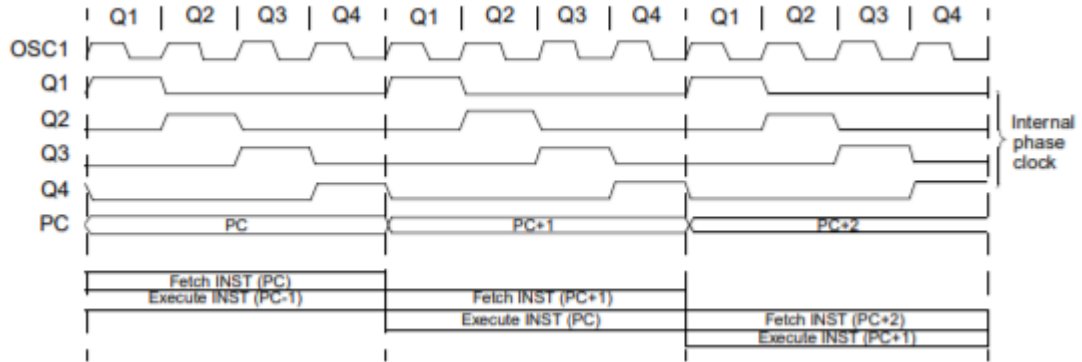
Mikrodenetleyicilerde bir komut için gereken işlem döngüsü dört aşamada gerçekleşmektedir. Bunlar bulma (fetching), kod çözme (decoding), uygulama (executing), komut işlem döngüleridir. Şekil 2.30’da bu döngü aşamaları verilmiştir.



Şekil 2.31: Mikrodenetleyici Komut İşlem Döngüsü

Kaynak: Ozsoy ve diğ., (2019)

Şekil 2.31’de mikrodenetleyicide gerçekleşen bir komut işlem döngüsü verilmiştir. Mikrodenetleyiciler her komut için kendi yapılarında bulundukları osilatör devresi tarafından üretilen kare dalga sinyal ile işlem gerçekleştirirler. Bu kare dalga sinyali her bir palsinde bir işlem gerçekleştirilir. Bu da mikrodenetleyicinin çalışma hızı belirleyen temel unsurdur. Kare dalgayı üreten osilatör devresinin frekansına göre işlem süresi belirlenmektedir. Şekil 2.32’de komut çevirim süresini gösteren kare dalga sinyalleri verilmiştir.



Şekil 2.32: Mikrodenetleyici Komut Çevirim Süresini Gösteren Kare Dalga Sinyali

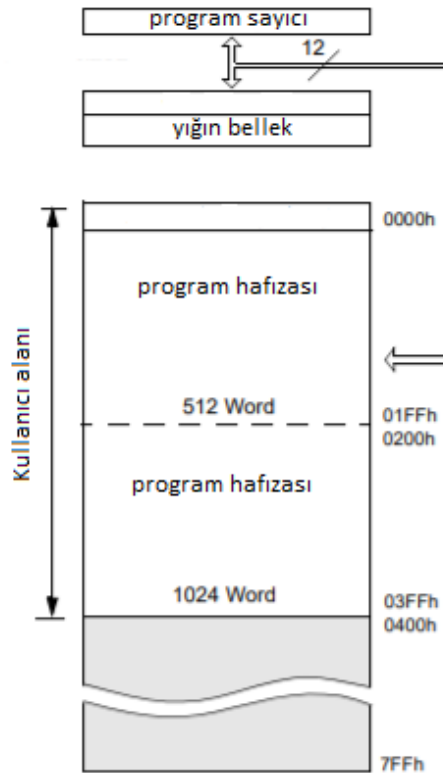
Kaynak: Microchip, (1999).

Şekil 2.32’de dahili olarak üretilen kare dalga sinyali Q1, Q2, Q3 ve Q4 olarak dört temel süreç dilimine bölünmüştür. Mikrodenetleyicinin içerisinde dahili olarak bulunan program sayacı program belleğinden alınan komuta göre her Q1 sürecinde bir işlem gerçekleştirir. Q1 ve Q4 arasındaki döngü sürecinde kod çözülür ve uygulanır (Microchip, 1999).

2.5.2 Bellek organizasyonu

Mikrodenetleyiciler yapısında farklı amaçlar için kullanılan program bellekleri barındırırlar. Temelde mikrodenetleyiciler içerisinde iki adet bellek kullanır. Bunlar program belleği olan flash bellek (okunur yazılabilir bellek) ve RAM (rastgele erişim

bellek) bellektir. Program belleklerinin türleri EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory), EEPROM (Electrically Alterable Read-only Memory), ROM (Read Only Memory) olarak bilinmektedir. EPROM programlanabilen sadece okunur bellek yaygın olarak kullanılan bellek türüdür. Bu tip bellekleri silmek için ultraviyole ışık kaynağı gerekmektedir. EPROM bellek hücrelerine mikrodenetleyici programlayıcı kullanarak elektriksel sinyal uygulanıp yazma işlemi gerçekleştirilir. Elektrik kesilse bile bu tür belleklerin içerisindeki veriler kaybolmaz. EEPROM bellek içerisindeki program silinip yeni bir veri yazılacağı zaman mikrodenetleyici programlayıcı devresi ile elektriksel sinyaller uygulanarak içerisindeki verilerin silme ve programlama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. ROM bellekler salt okunur bellek içerisinde verilerin okunmasını sağlayan ancak içerisindeki verilerin değiştirilmesi mümkün olmayan bellek türüdür. Üretildikleri fabrikada bir defaya mahsus programlanmaktadır. Bu nedenle üzerinde program oluşturmaya müsait değildir. Bu bellek türleri araçlarda, fırınlarda, bulaşık makinesinde vb. içerisindeki programın sürekli olarak değiştirilmesine ihtiyaç duyulmayan mikrodenetleyici kontrol devrelerinde tercih edilmektedirler.



Şekil 2.33: PIC 12C508 Mikrodenetleyicisine Ait Bellek Organizasyon Şeması

Kaynak: Microchip, (1999)

Şekil 2.33'de PIC12C508 mikrodnetleyicisi bellek organizasyonu görölmektedir. Bellek program belleği ve veri belleği olarak iki ayrı bölümde düzenlenmiştir. Program hafızası 512MB'dan büyük olan mikrodnetleyiciler için bu organizasyon yapısı kullanılmaktadır. Program bellek alanlarına durum kaydedicisi ile erişilir. Veri bellek alanına dosya seçim kaydedicisi kullanılarak erişilir (Microchip, 1999).

2.5.3 Mikrodnetleyici yazılımı

Her mikrodnetleyici türü için üretici firma tarafından bir yazılım dili geliştirilir. Programcı bu komut dizinini kullanarak kullanılacak sistem için bir program geliştirerek mikrodnetleyicinin hafızasına programlayıcı devreler vasıtası ile yükleme işlemini gerçekleştirir. Ancak mikrodnetleyicilerin bu komutları yorumlaya bilmesi için ikili sayı sisteminden komutlara çevirmesi gerekir. Bu tür ikili sayı sisteminden oluşan komut dizinine Assembly (makine dili) adı verilir. Programcı komutlarının makine dilindeki komutlara çevrilmesi işlemine ise compailer (derleme) adı verilmektedir. Bu komutlar uygulanırken mikrodnetleyicinin işlemci bloğu tarafından sırayla çözölürler. Mikrodnetleyiciyi komutları yürütmek üzere kontrol sinyalleri üretir. Komutların uygulanması sırasında yapılan işlemler şunlardır;

- Verilen kod numarası kaydediciye yüklenir,
- Veriler bir kaydediciden diğerine kopyalanır,
- Komutların gerektirdiği aritmetik veya mantıksal işlemler gerçekleştirilir,
- Programda sıradaki diğer bir noktaya geçilir,
- İşlemin sonucuna bağlı olarak bir bit veya komut işlenir,
- Bir alt programa geçilir ve daha sonra programın başına geri dönölür,
- Özel bir kontrol işlemi gerçekleştirilir (Bates, 2011).

2.5.4 Mikrodnetleyici seçimi

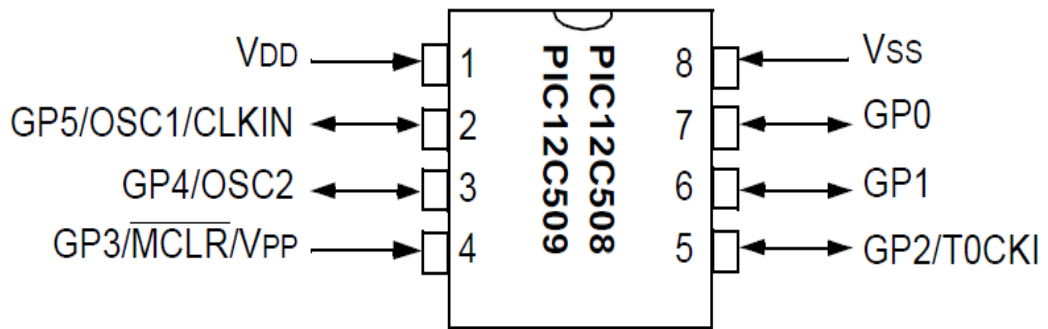
Bir mikrodnetleyici kullanımında bakılması gereken özellikler modüller, hafıza büyüklüğu, dahili zamanlayıcı ve harici kesme gibi özelliklerdir. Kullanacağımız sisteme göre mikrodnetleyici seçerken dikkat edilmesi gereken özellikler ve bölümler aşağıda verilmiştir;

- Çalışma palsi,
- Osilatör tipleri (XT, RC vb.)

- I/O sink-source akımları,
- Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) birimi
- Anolog ve dijital ayarlanan I/O pin sayısı,
- Seri haberleşme (UART) birimi,
- Haberleşme protokolü (SPI, I2C USART vb.)
- Darbe genişlik modülasyonu (PWM) birimi,
- Harici ve dahili kesme (interrupt) sayısı
- Zamanlayıcı (timer) birimi,
- Flash bellek kapasitesi,
- Bellek tipi (RAM, ROM, EPROM, ve EEPROM)
- Dâhili rastgele erişebilir bellek (RAM) büyüklüğü
- USB arabirim,
- CAN bus, ethernet bağlantısı (Megep, 2017).

Tezde tasarlanan sistemde PIC serisi 12C508 mikrodenetleyicisi tercih edilmiştir. Bu mikrodenetleyicinin tercih edilmesinin sebepleri;

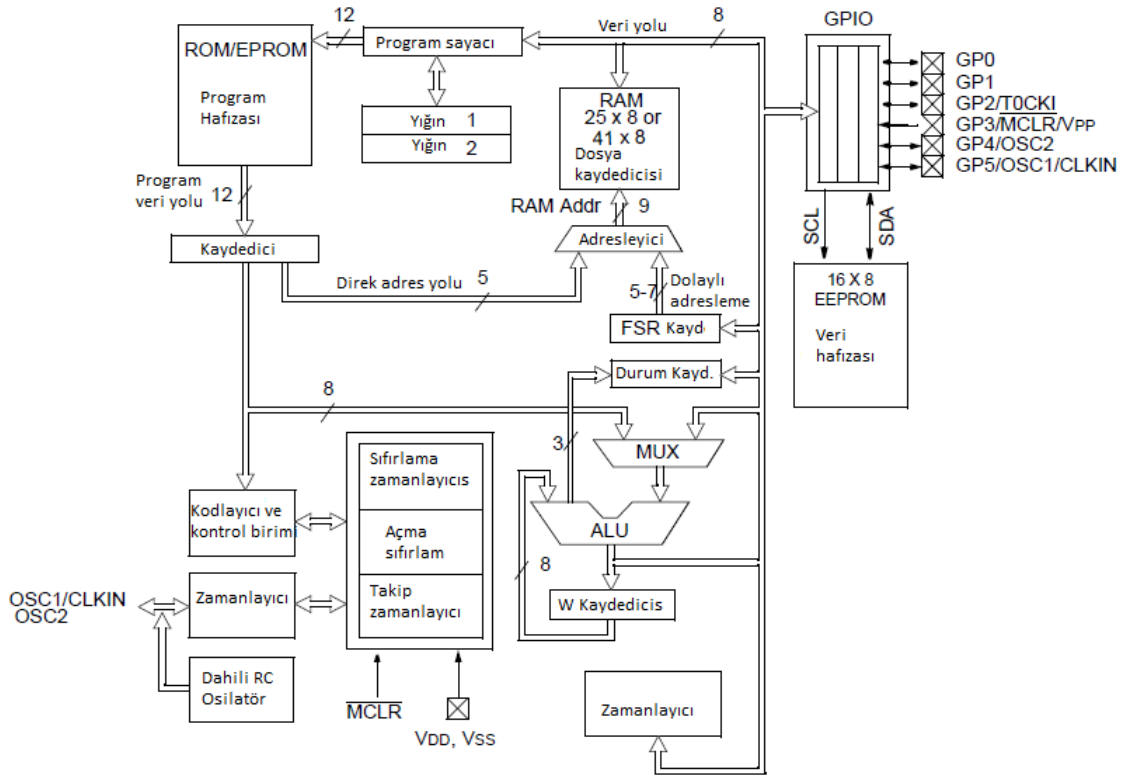
1. Fiyatının ucuz olması;
2. Mantıksal işlemlerde performansının yüksek olması;
3. Verilere ve belleğe hızlı bir şekilde erişimin sağlanması;
4. 8 bitlik bir mikrodenetleyici olması ;
5. Veri ve bellek için ayrı yolların (bus'ların) ayrılmış olması;
6. Yüksek frekanslarda çalışabilme özelliği;
7. Uyku modunda (Sleep mode) 1 μ A gibi küçük bir akım çekmesi;
8. 14 bitlik komut işleme hafızası;
9. Yalnızca 2 kondansatör ve bir direnç ile çalışabilme özelliği;
10. RISC mimarisine sahip olmasıdır (Microchip, 1999).



Şekil 2.34: PIC 12C508 Mikrodenetleyicisine Ait Bacak Bağlantıları

Kaynak: Microchip, (1999)

Şekil 2.34’de PIC12C508 mikrodenetleyicisine ait bacak bağlantı isimleri verilmiştir. DIP-8 entegre kılıfı kullanılmıştır. GP0, GP1, GP2, GP4 ve GP5 pinleri mikrodenetleyiciye veri giriş ve çıkışı için kullanılmaktadır. GP3 pini reset (sıfırlama) olarak da kullanılır. 1 ve 8 nolu pinler V_{DD} ve V_{SS} olarak belirtilmiş ve mikrodenetleyicinin besleme pinleri olarak kullanılmaktadır. Osilatör pini olarak 3 nolu bacak kullanılmıştır. Şekil 2.35’de PIC12C508 mikrodenetleyicisinin iç yapısını gösterir açık blok şema görülmektedir.



Şekil 2.35: PIC 12C508 Mikrodenetleyicisine Ait Blok Şema

Kaynak: Microchip, (1999)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Elektronik Şalter ve Kaçak Akım Röleli Hibrit Sistemin Geliştirilmesi

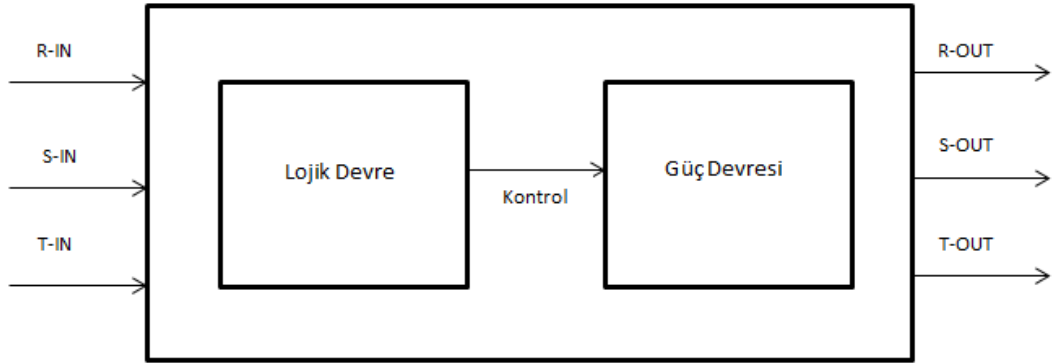
Günümüzde piyasada kullanılan manyetik alan prensibine göre çalışan geleneksel röle kontaklı koruma ve anahtarlama şalterlerinde röle kontaklarına akımın uygulanması ile kontakların çekmesi için geçen süre gecikmelere sebep olmaktadır. Özellikle yüksek güç kullanılan sistemlerde kontaklar aşırı ısınma sonucu birbirlerine yapışmaktadır. Yine kontaklarda oluşan arklar sonucunda meydana gelen patlamalar büyük yangınlara neden olmaktadır. Ayrıca bu tip röleler daha fazla enerji harcamaktadır. Elektrik sistemlerinde kullanılan kaçak akım rölelerinin kaçak akımı algılayıp sistemdeki elektriği kesene kadar geçen süre insan hayatının kurtulmasında çok büyük rol oynamaktadır. Literatür araştırmaları kısmında da belirtildiği gibi elektronik şalter genellikle düşük güçlü devrelerde kullanılmıştır. Önerilen sistem daha yüksek güç kullanılan devrelerde kullanılmak üzere elektronik şalter ve kaçak akım rölesi aynı sistem içerisinde beraber çalışacak şekilde geliştirilmiştir.

Günümüzde piyasada elektronik rölelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle büyük firmaların üretmiş olduğu ürünler yüksek fiyatlı bir şekilde ücretlendirilmektedir. Ancak bu ürünler genellikle elektromanyetizma prensibi ile çalışan röle kontakları bulundurmaktadır. Elektronik şalter ve rölelerin bazılarında farklı sıfır noktası geçiş yönteminin kullanılmaktadır. Bu yöntem rölelerde elektrik sarfiyatının önüne geçilmesi, rölenin kontaklarının daha uzun ömürlü kullanılması, aşırı akımlardan ve oluşacak arklardan hem sistemin hem de çalışanın korunması gibi avantajlar sağlamaktadır. Ancak bu yöntem kullanılsa da röle yapısında kontakların olması hem gecikmelerin oluşmasına hem de röle kontaklarının aşırı akımlarda yapışması ve oluşacak arklardan dolayı bozularak kullanım ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır.

Sıfır geçiş yöntemi kullanan detektör devreler birçok alanda kullanılmaktadır. Sıfır geçiş tabanlı detektörler; anahtarlama sistemleri (Zheng ve Zhang, 2012), görüntü analizi (Florea ve diğ 2012), şaft titreşimlerinin açısız ölçümleri (Addabbo ve diğ.,

2014), hassas ultrason ölçümleri (Jobst ve Bierl, 2014), rotor konumunun tespit edilmesi (Sun, 2019), gibi yaygın kullanıma sahiptir. Günümüzde; distorsiyonun, gecikmenin ve maliyetin en düşük olduğu sıfır geçiş tabanlı elektronik şalter çalışmaları bulunmaktadır. Optik yalıtıcı devreler (Wall, 2003), karşılaştırmalı devreler (Elliott Sound Products, 2019; Rowlan, 2000), işlemsel yükselteçler (Irmak ve diğ., 2011), adaptif filtre yöntemleri (Vainio ve Ovaska, 2002; Vainio ve Ovaska, 1996), yapay sinir ağları (Valiviita, 1998), sıfır geçişli detektör tiplerini distorsiyon seviyesi gibi birçok uygulamada kullanılan sıfır geçiş yöntemi gecikme ve fiyat olarak da karşılaştırmıştır (Vorobyov ve Vitols, 2014).

Tasarlanan sistemde elektronik röle için elektromanyetik alan prensibine göre çalışan kontaklar yerine MOC serisi bir optokuplör entegresi ile bir triyak kontrol edilerek yüke akım uygulanmıştır. MOC entegresi aynı zamanda sıfır nokta akım geçiş yöntemine göre çalıştığı için aşırı akım sonucu meydana gelecek ark oluşumu ve patlama veya yangınların önüne geçilmiş, hem sistemin hem de çalışanın korunması sağlanmıştır (Fairchild Semiconductor, 2001). Ayrıca önerilen sistemde elektronik şalter ve elektronik kaçak akım rölesi birlikte tasarlanarak şu an ülkemizde üretimi olmayan bir sistemin yapımı sağlanmıştır.



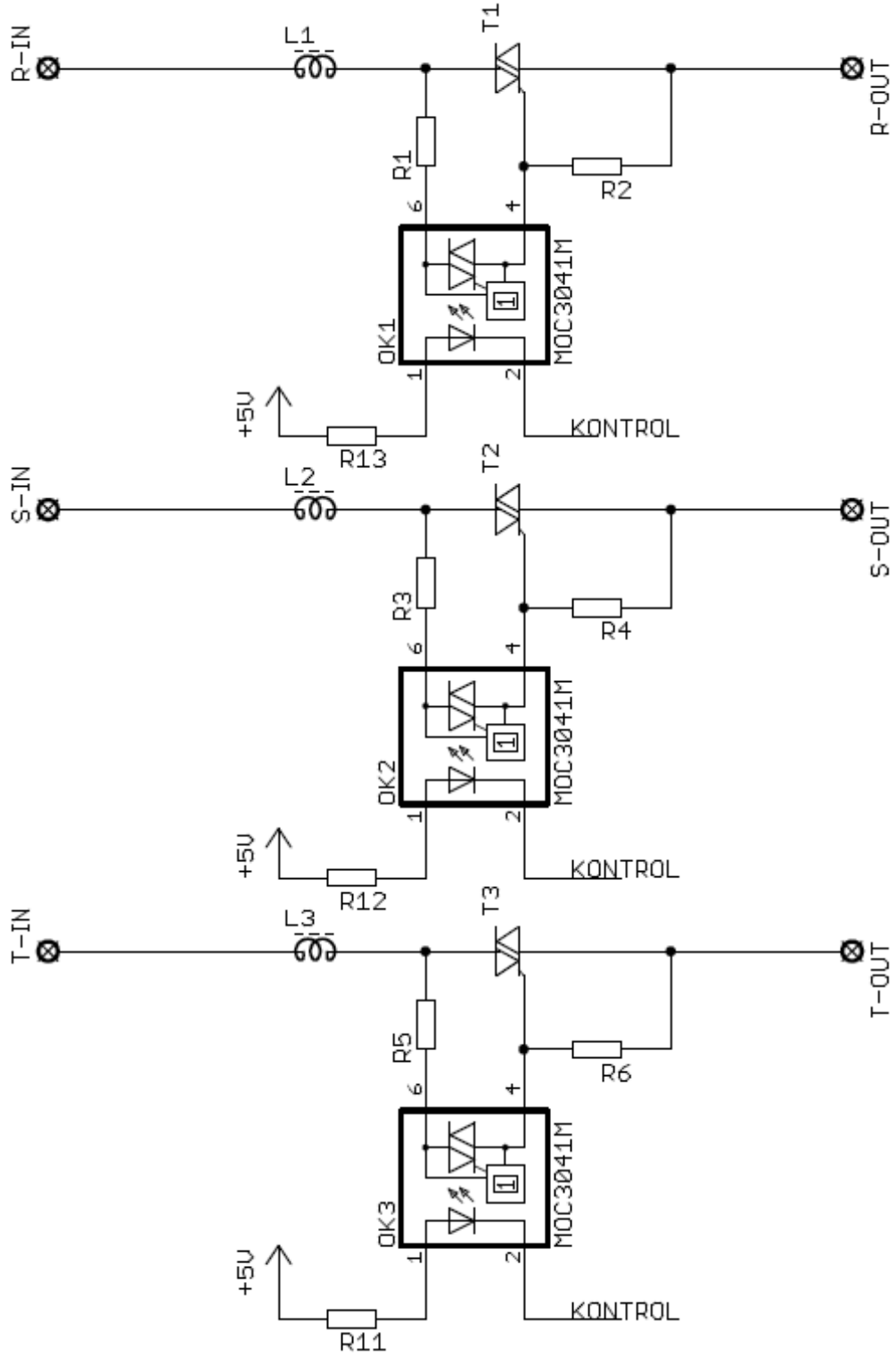
Şekil 3.1: Önerilen Sisteme Ait Blok Şema

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi önerilen sistem iki ayrı devreden oluşmaktadır. Birinci devre güç devresi olup sisteme gücün aktarılmasını kontrol eder. İkinci devre olan lojik devre güç devresinin kontrolünü sağlar. Lojik devrede kontrolü sağlamak için PIC12C508 bir mikrodenetleyici kullanılmıştır. Güç devresinde ise ayrıca toroid bir transformatör kullanılarak kaçak akım rölesi çalışması sağlanmıştır. Ayrıca MOC3041 optokuplör entegresi ile alternatif akım sinyalinin sıfır geçiş noktasında

devrede kullanılan BTB24800 triyaklarının tetiklenmesi gerçekleştirilmiştir (Alldatasheet, 2006).

3.1.1 Güç devresinin tasarımı

Devrenin tasarımı ve simülasyonunda Proteus 8.11 programı kullanılmıştır. Şekil 3.2’de g devresine ait devre Şeması verilmiştir.

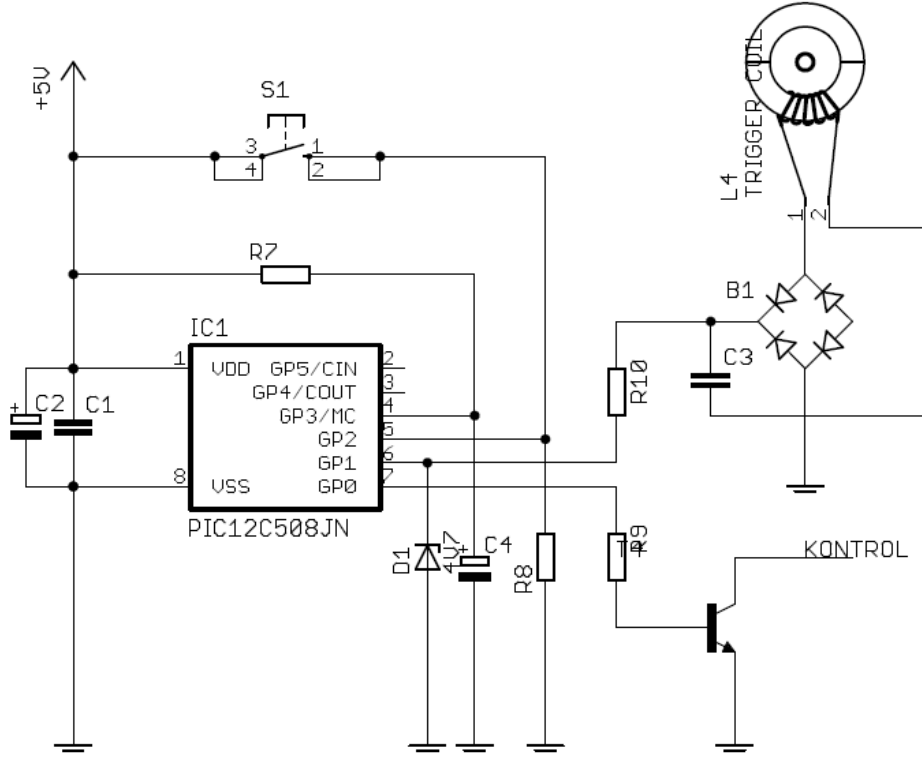


Şekil 3.2: Güç Devresi Devre Şeması

Şekil 3.2’de verilen güç deresi üç faz girişleri (R-IN/S-IN/T-IN) lojik kart üzerinde gösterilen trigger coil adlı toroidal transformator içerisinde geçerek T1/T2-T3 triyakları ile çıkışa (R-OUT/S-OUT/T-OUT) aktarılır. Her faza ait triyaklar sıfır geçiş detektörü içeren optokuplör entegresi olan MOC3041M (OK-1/OK-2/OK3) entegreleri ile sürülür. Devre üzerinde görülen kontrol uçlarına lojik devre üzerindeki

mikrodenetleyici çıkışlarından gelen sinyal uygulanmaktadır. Böylece MOC3041 optokuplörleri mikrodenetleyici tarafından kontrol edilmiştir. Aynı zamanda böylece lojik devreden optik olarak izole edilmiştir.

3.1.2 Lojik devrenin tasarımı



Şekil 3.3: Lojik Devre Şeması

Şekil 3.3'de lojik devre şeması görülmektedir. Devrede PIC 12C508 mikrodenetleyicisinin üç adet pini veri giriş ve çıkışı için kullanılmıştır (Microchip, 1999). Bunlardan GP2 pinine bağlı bir push button ile sistemin devreye alınması ve devreden çıkarılması sağlanmaktadır. Güç devresindeki L1-L2-L3 bobinlerinin de sarılı olduğu toroidal bobin üzerinde 0,2 mm kesitli 1200 tur olarak sarılıp bir trigger bobini elde edilmiştir. Böylece L1-L2-L3 bobinlerinden akan yük akımı dışında toprağa bir akım akması halinde oluşacak manyetik alan bobin uçlarında gerilim indüklenmesine neden olacaktır. Hata anında indüklenen bu gerilim alternatif akım olduğu için B1 köprü diyotu ile doğrultularak GP1 pinine uygulanmıştır. Mikrodenetleyicinin giriş pini olan GP1 pini aşırı ters gerilimden korumak için 4,7V'luk bir zener diyot (D1) kullanılmıştır.

GP0 pini mikrodenetleyicinin kontrol çıkışıdır. Aynı anda üç adet MOC3041 entegresi kontrol edileceği için NPN bir transistör ile tamponlanmıştır. Bu transistöre

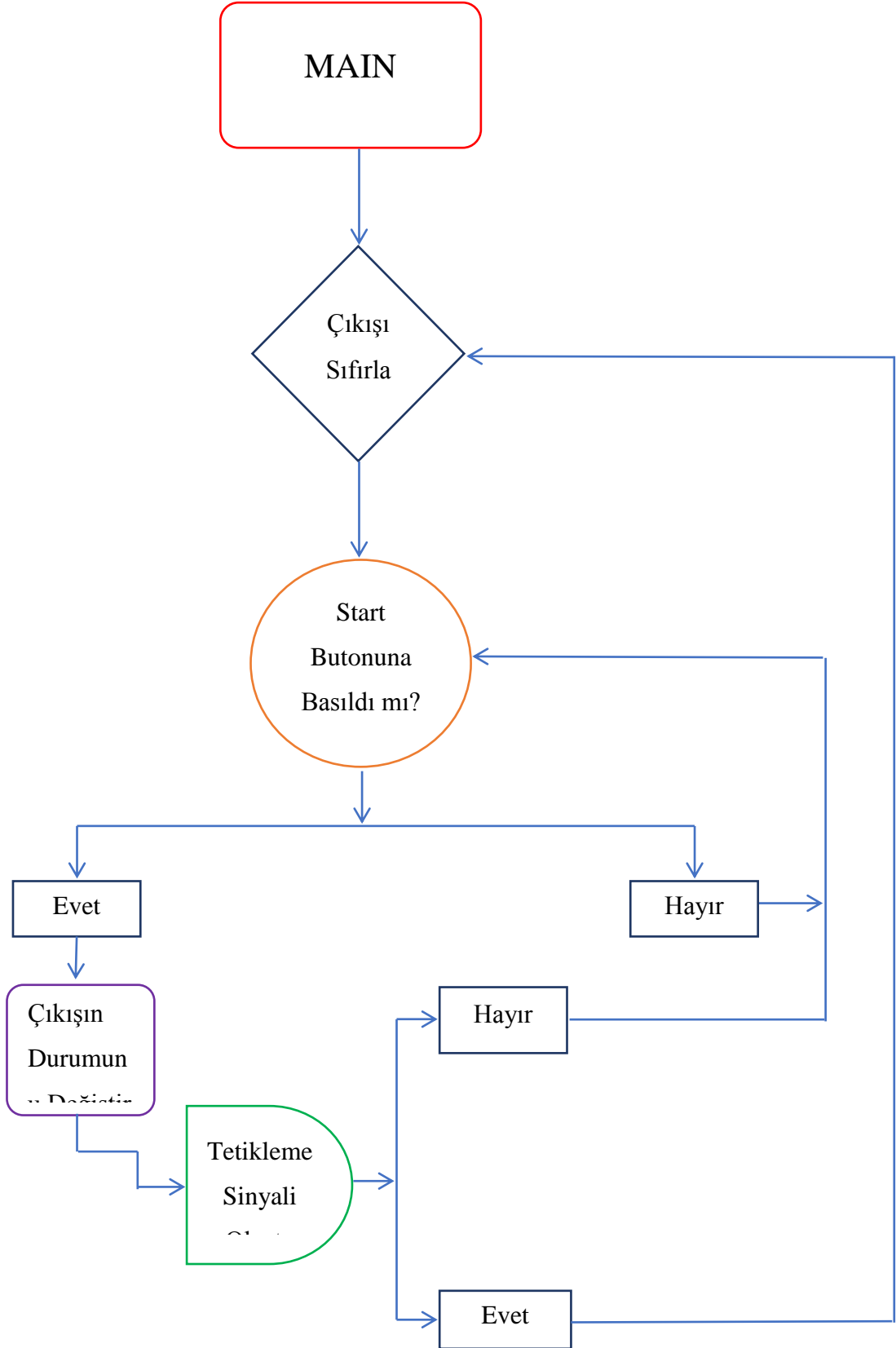
uygulanan pozitif tetikleme sinyali güç devresindeki her faza ait optodiyakların toprak (GND) pinlerinin devreyi tamamlamasını sağlar. Fakat, MOC3041 entegresi bu anda iletme geçmeyip her fazın sıfır noktasını bekler. Bu süre en fazla 1/100 saniye sürer. Bunun nedeni frekansı 50 Hz olan alternatif akım sinyalinde toplam 100 adet alternans olmasıdır.

3.1.3 Mikrodenetleyici program algoritmasının geliştirilmesi

Mikrodenetleyicinin sistemi kontrol edebilmesi için programlanması gerçekleştirilmiştir. Bu program Proton programlama dili üzerinde yazılmıştır. Gerçekleştirilen programa ait algoritma şeması Şekil 3.4’de verilmiştir.

Şekil 3.4’de görülen algoritma şeması oldukça basit bir mantığa sahiptir. Oluşturulan algoritmanın sade ve basit olması yazılımı oluşturan kodlarında kısa olmasını sağlamıştır. Böylece mikrodenetleyici içerisinde çalışacak olan program oldukça kısa bir süre içerisinde çıkış sinyali üretmesini sağlamıştır.

Temel olarak algoritmada iki ayrı karar döngüsü kullanılmıştır. Bu karar döngülerinden birincisi sisteme enerjiyi uygulayacak olan butona basılıp basılmadığını kontrol etmekte ve sisteme enerjiyi butonun durumuna göre kesecek veya uygulayacaktır. İkinci karar döngüsü ise güç devresinde toroid bobin uçlarından gelen hata akım sinyalini kontrol etmektedir. Hata akımı oluştuğunda mikrodenetleyici triyakları kesime götürecektir.



Şekil 3.4: Program Algoritma Şeması

Mikrodenetleyici içerisine yazılan programa ait akış diyagramı Şekil 3.3'de görülmektedir. Programın çalışma mantığına göre main komutu ile başlayan

program, öncelikli olarak start butonuna basılıp basılmadığını kontrol etmektedir. Eğer butona basıldı ise toroid bobinin çıkışından mikrodenetleyicinin GP1 pinine gelen sinyali kontrol edilerek kaçak akım olup olmadığına karar verilir. Eğer yoksa Tetikleme sinyali oluşturulur. Programda bir döngü içerisinde sürekli olarak kaçak akım sinyalinin geldiği GP1 pini kontrol edilir. Bu pinden kaçak akım sinyali geldiği anda veya start butonuna ikinci kez basıldığında tetikleme sinyali kesilir. Bu işlemler program döngüsü içerisinde sürekli olarak tekrarlanmaktadır. Aşağıda programı oluşturan kod yapısı ve kodların görevine ait açıklamalar bulunmaktadır.

```
Device = 12F508 //Mikrodenetleyicinin tanıtılması
Xtal = 4 // Mikrodenetleyici osilatör frekansı tanımlaması
Reminders = false // Hatırlatıcı kapalı
Config INTRC_OSC,WDT_OFF,MCLRE_ON,CP_OFF // Konfigrasyon ayarları
Reminders = true // Hatırlatıcı açık
TRISIO = %00000110 // Pinlerin giriş ve çıkış olarak belirlenmesi
GPIO = %000000000 // GPIO pininin çıkış olarak ayarlanması
Dim X As Byte // X değişkeni tanımlama
MAIN: // Program başlangıcı
If GPIO.1=1 Then
    GoSub ROTAR // 1. Karar döngüsü açma
    Toggle GPIO.0 // Buton kontrolü
EndIf //1. Karar döngüsü bitimi
If GPIO.2=1 Then // 1. Karar döngüsü kapama
    GPIO.0=0 // Buton kontrolü
EndIf //1. Karar döngüsü bitimi
GoTo MAIN // Program başlangıcına yönlendirme
ROTAR: // Alt program tanımlama
For X=0 To 10 // Döngü tanımlama
    DelayMS 6 // 6ms gecikme
Next X // Döngü sonu
If GPIO.1=1 Then // 2. Karar döngüsü
    X=0 // Değişken kontrolü
    GoTo ROTAR // Alt programa yönlendirme
Else // Karar yapısı
```

```
Return // Tekrarlama
EndIf // 2. Karar döngüsü bitimi
GoTo MAIN // Program başlangıcına yönlendirme
End // Program sonu
```

3.1.4 Sistemin genel çalışma prensibi

Üç faz girişleri (R-IN/S-IN/T-IN) TRIGGER COIL adlı toroidal bobin içerisinden geçmektedir. Bobin ile fazlar arasında fiziksel bir bağlantı bulunmamaktadır. Bu sistemin amacı, transformatörün yapısı gereği üç faz girişlerin transformatörde oluşturacağı manyetik alanı takip etmektir. Böylece, düşük seviyelerde olsa bile oluşacak herhangi bir manyetik alan değişimi algılanıp toroid bobin tarafından mikrodenetleyiciye iletilecek ve mikrodenetleyicinin GP0 pinine bağlı kontrol çıkışı tarafından güç devresindeki MOC entegreleri kesime götürülecektir. Bu şekilde çok hızlı çalışan elektronik bir kaçak akım rölesi sistemi kurulmuştur.

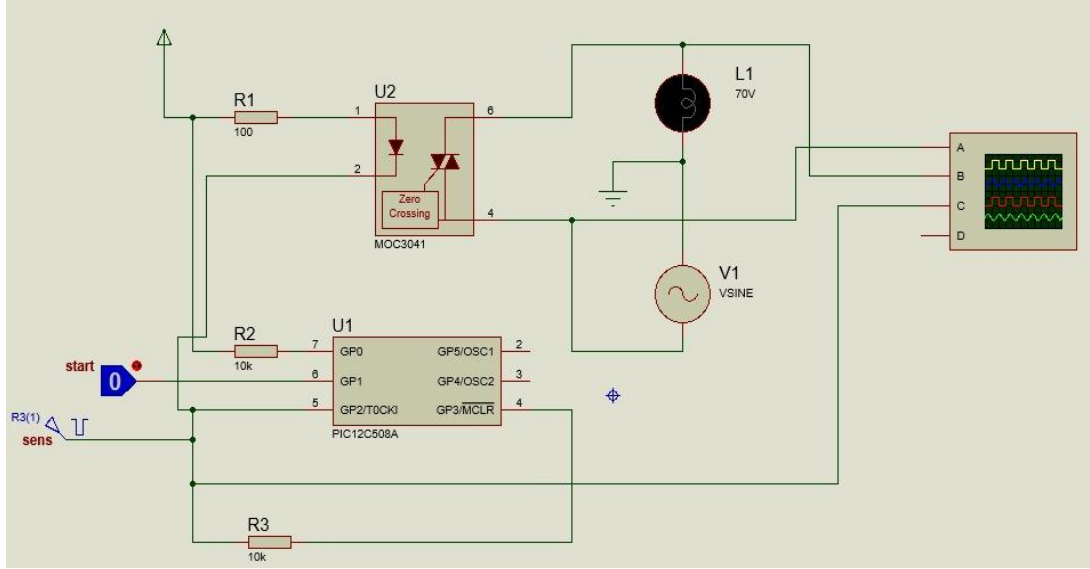
Şekil 3.2’de verilen trigger bobini (L4) adlı toroidal bobini çıkışı köprü diyot ile doğrultularak mikrodenetleyicinin GP1 pinine bağlanmaktadır. Böylece, transformatör üzerindeki manyetik alan değişimi mikrodenetleyiciye aktarılmıştır. Devredeki mikrodenetleyici kontrolü sayesinde piyasada kullanılan rölelerinin aksine kontak kullanımına gerek kalmamıştır. Böylece, hem kontaklarda oluşacak arklar önlenerek olası yangın ve elektrik çarpmalarının önüne geçilirken hem de tepki sinyalindeki gecikme önlenmiştir.

Lojik devrede mikrodenetleyicinin GP0 pininden çıkan sinyal yine lojik devrede gösterilen NPN tipi transistör ile tamponlanarak güç devresindeki üç ayrı MOC entegresi optokuplör uçlarına bağlanmaktadır. Böylece, MOC entegresi içerisindeki triyakların tetiklenmesi sağlanmaktadır. Herhangi bir yük akımındaki değişiklik anında kontrol çıkışı kesilecek ve MOC entegreleri kesime gidecektir. İletime geçirme esnasında ise MOC3041 entegreleri sıfır geçiş noktasını bekleyerek sisteme enerji yükleyecektir. Böylece piyasada kullanılan şalterlerin tersine hem sistem hem de can güvenliği sağlanmış olacaktır.

3.2 Önerilen Sisteme Ait Simülasyonun Yapılması

3.2.1 Önerilen sisteme ait simülasyon devresinin yapımı

Tezde tasarımı gerçekleştirilen sistemin Proteus 8.11 programı içerisinde bulunan ISIS programı kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon yapımı için oluşturulan devre şeması Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5: Simülasyon Devre Şeması

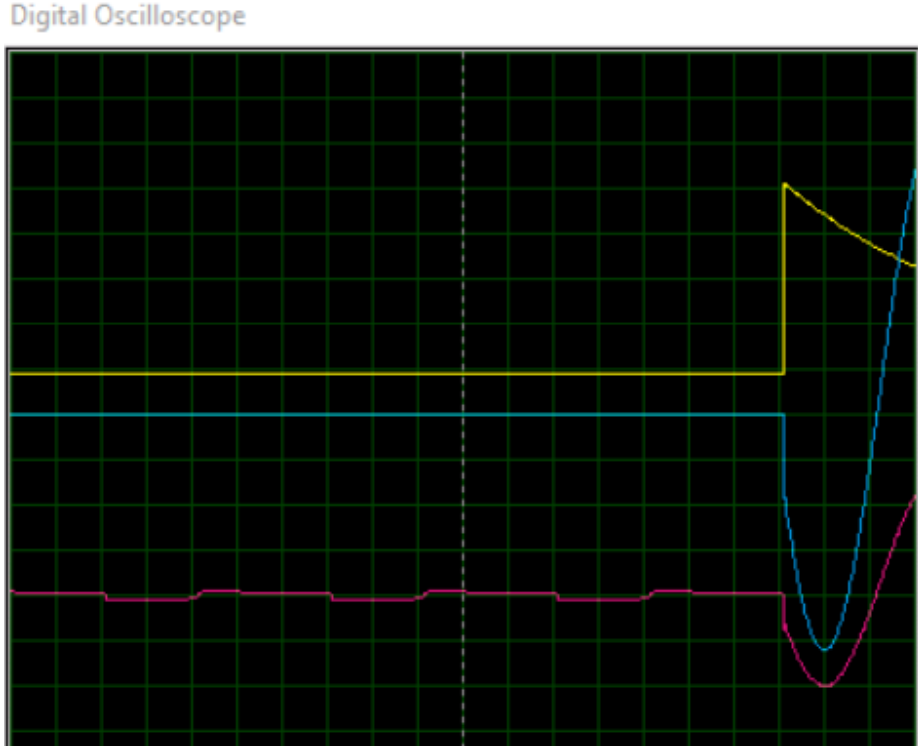
Şekil 3.5’de önerilen sisteme ait oluşturulan simülasyon devre şeması görülmektedir. Devrede yük olarak 70 W’lık bir lamba kullanılmıştır. Start butonu ile devreye enerjinin uygulanıp kesilmesi sağlanmaktadır. R3 direnci üzerinden kaçak akım simülasyonu yapmak üzere bir kare dalga sinyali verilmektedir. MOC3041 optokuplör entegresi çıkışına bağlanan alternatif akım üreticiden alınan sinyal lambaya uygulanmaktadır. Optokuplör giriş uçlarına ise PIC 12C508A mikroişlemcisi üzerinden alınan kontrol sinyali ve besleme gerilimi uygulanmıştır. Böylece devrenin gerçekte çalışma koşulları oluşturulmuştur.

3.2.2 Önerilen sisteme ait giriş çıkış sinyallerinin simülasyonu

Devre giriş çıkış sinyallerinin ölçümü simülasyon programının osiloskop ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Osiloskobun A kanalına sistemin giriş sinyali, B kanalına çıkış sinyali ve C kanalına ise hata akım sinyali bağlanmıştır.

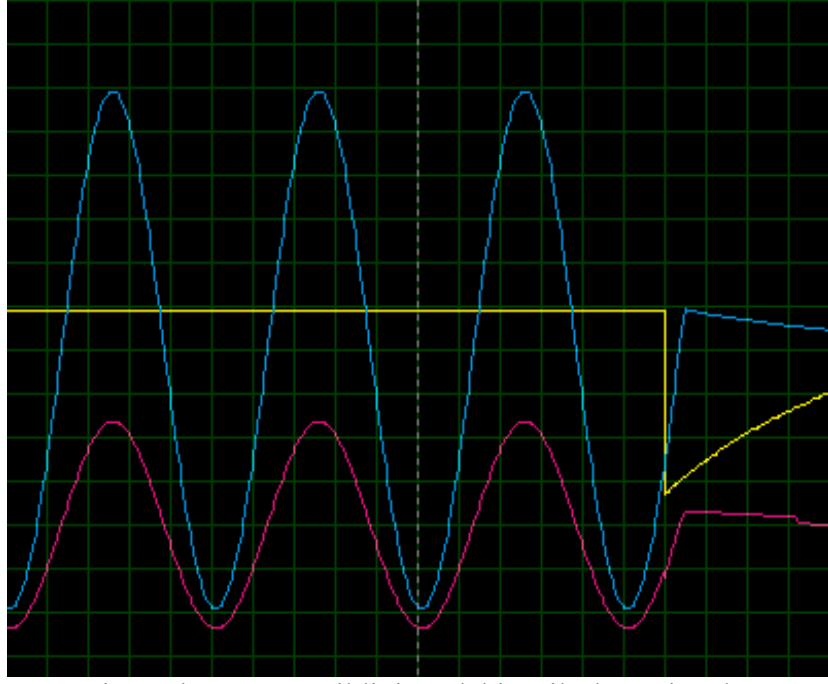
Önerilen sisteme ait sinyal incelemeleri 50KHz’lik şebeke sinyali frekansının gerçek osiloskop üzerinde mikro saniyelik değişim sağladığından moc entegrelerinin tam

tetikleme anının daha rahat yakalanması için frekans 10KHz'e düşürülerek ölçüm yapılmıştır. Şekil 3.6'da sisteme sinyal uygulandığı andaki sinyal şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.6: Sisteme Güç Uygulandığı Andaki Osilaskop Sinyal Görüntüsü

Şekil 3.6'da sisteme ilk enerji uygulandığı andaki sinyal şekilleri görülmektedir. Şekilde görülen sarı renkli sinyal MOC3041 optokuplör entegrelerinin tetikleme sinyali, mavi renkli sinyal alternatif akım giriş sinyalini, kırmızı renkli sinyal ise triyakların tetiklenme sonrası çıkış sinyalini göstermektedir. Sistem ilk sinyal uygulandığında giriş sinyali olan alternatif akım sinyalinin sıfır noktasında herhangi bir gecikme olmadan devreye girmektedir. Bu durum aynı zamanda simülasyon olmasından da kaynaklanmaktadır. Gerçek ortamdaki parazit ve devre elemanlarından kaynaklanan gecikmeler burada görülmemektedir.



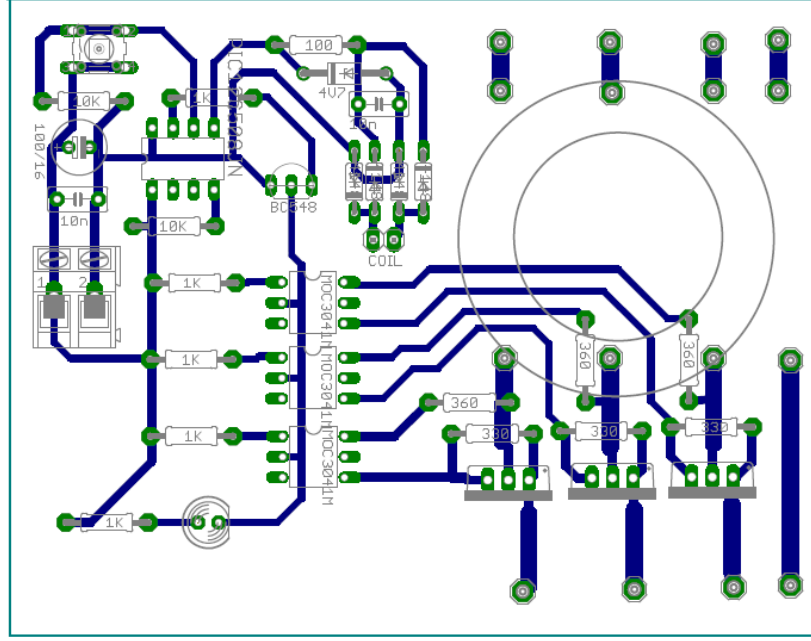
Şekil 3.7: Sistemden Güç Kesildiği Andaki Osilaskop Sinyal Görüntüsü

Şekil 3.7’de MOC3041 optokuplör entegrelerinin tetikleme sinyalinin kesildiği andaki sinyal şekilleri görülmektedir. Çıkış sinyali olan kırmızı renkli sinyal tetikleme sinyalinin kesilmesine rağmen sıfır geçiş anını bekleyerek daha geç bir fazda kesildiği açıkça görülmektedir.

3.3 Önerilen Sisteme Ait Devre Kartının ve Ölçümlerin Yapımı

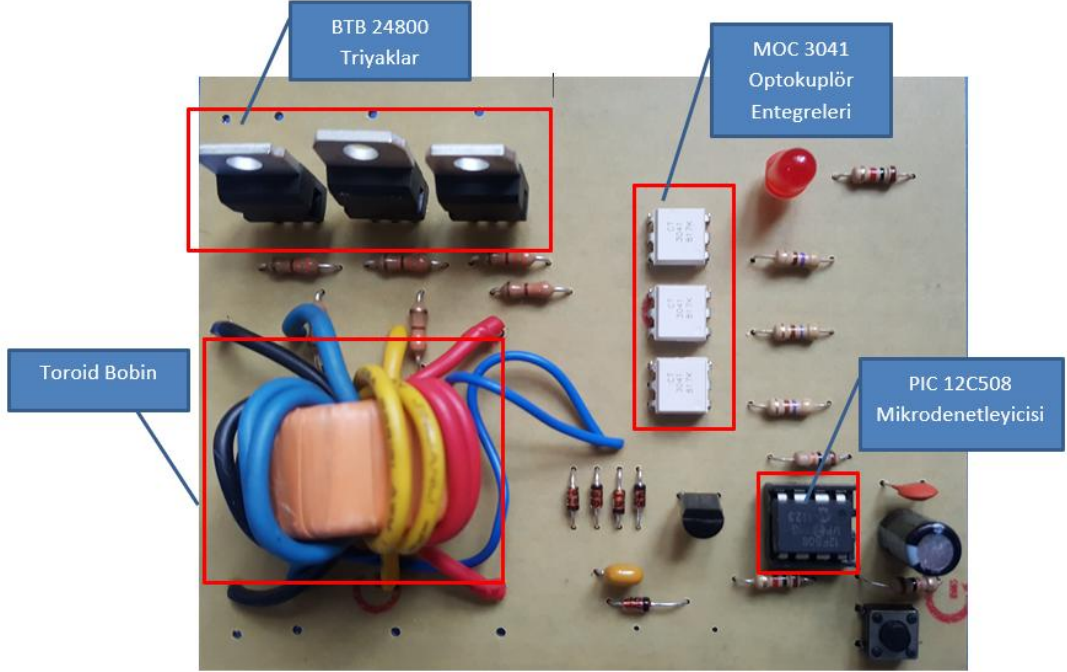
3.3.1 Önerilen sisteme ait devre kartının tasarımı ve yapımı

Önerilen sisteme ait devre kartının yapımında baskı devre tasarımı Eagle programı kullanılarak yapılmıştır. Baskı devre şeması üretilerek basımı gerçekleştirilmiştir. Baskı devre şeması Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8: Önerilen Sisteme Ait Baskı Devre Şeması

Devrenin yapımı gerçekleştirilerek Şekil 3.9’da verilmiştir.

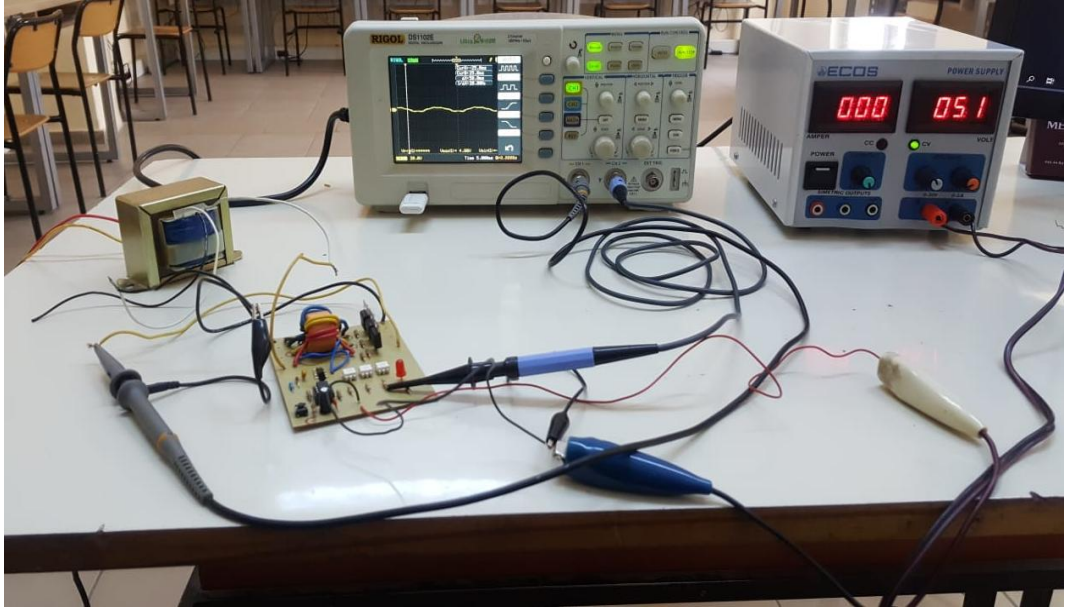


Şekil 3.9: Önerilen Sisteme Ait Devre Kartı

Şekil 3.9’de önerilen sisteme ait devre kartında sistemi oluşturan lojik devre ve güç devresi aynı kart üzerinde oluşturulmuştur. Sistem prototip olarak tasarlandığından devre boyutu dikkate alınmamıştır. İstenildiğinde daha küçük bir kart tasarımı yapılabilmektedir. Devre kartı üzerinde sistemin ana unsur elemanları olan mikrogenetleyici, üç faz kontrolü için triyaklar, MOC 3041 optokuplör entegreleri ve toroid bobin yerleri gösterilmiştir.

3.3.2 Önerilen sisteme ait ölçümlerin yapılması

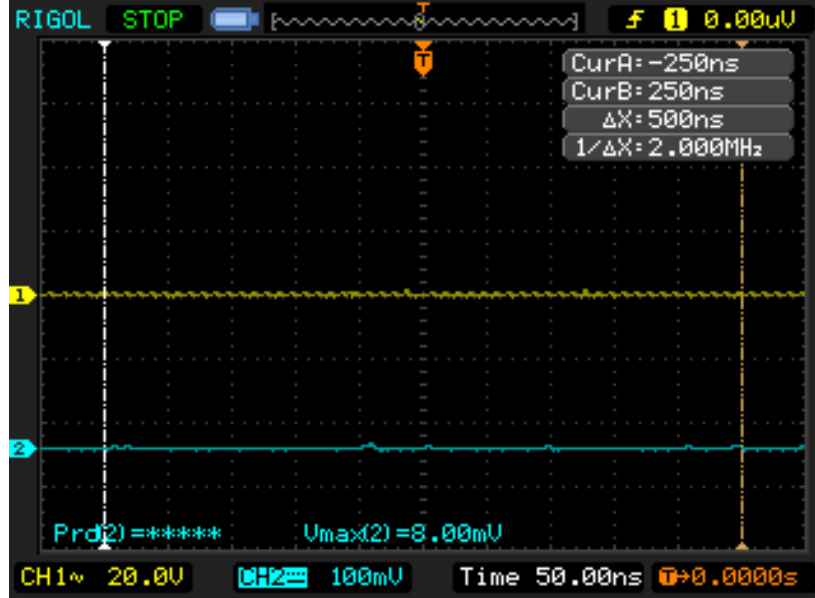
Önerilen sistemin üretimi gerçekleştirilerek laboratuvar ortamında giriş çıkış sinyal şekilleri osiloskop üzerinde incelenmiştir. Ölçümlerde sistem beslemesi için doğru akım güç kaynağı ve mikrogenetleyici besleme sinyali için +5 V’luk bir doğru akım besleme sinyali kullanılmıştır. Sinyal ölçümleri için hazırlana düzenek Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10: Sinyal Ölçümü İçin Hazırlanan Devre Düzenegi

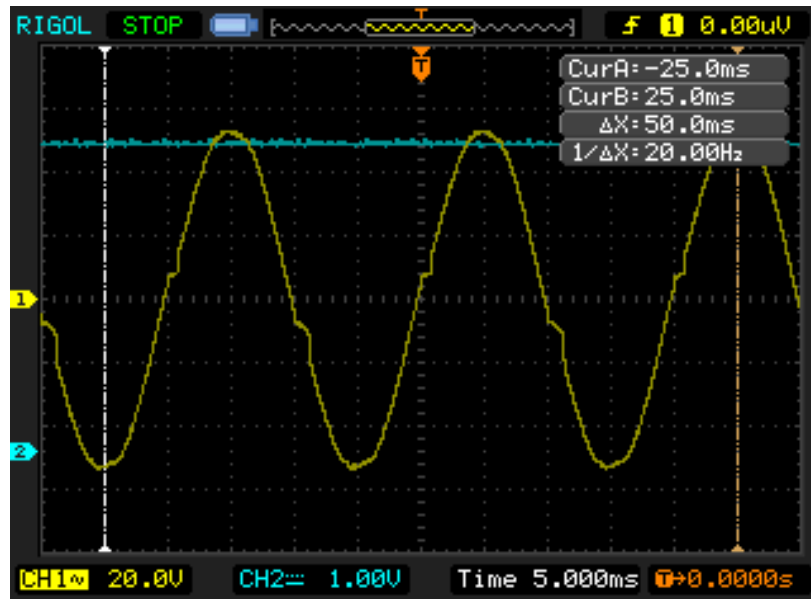
Şekil 3.10’da önerilen sisteme ilişkin ölçümlerinin yapıldığı devre bağlantıları görülmektedir. Önerilen sistem üç faz olup 380 volt ve 25 W güce kadar çalışabilmektedir. Ancak osiloskop ölçümlerini daha güvenli bir şekilde yapmak amacı ile tek faz üzerinden çalıştırılmıştır. Yine sistem girişine bir alternatif akım transformatörü yardımı ile 20 V alternatif akım sinyali uygulanarak ölçümler yapılmıştır. Yük olarak devre çıkışında 100 Ω – 5 W’lık bir taş direnç kullanılmıştır. Mikrogenetleyici besleme sinyali olarak doğru akım 5 V’luk bir sinyal üreteç

yardımı ile devreye uygulanmıştır. Yapılan ölçümlerde RIGOL DS1102E marka Dijital osiloskop kullanılmıştır. Osiloskobun 1. kanalında (CH1 - sarı renkli sinyal) önerilen sistemin çıkış sinyali, 2. kanalında (CH2 – mavi renkli sinyal) ise mikrodenetleyici çıkışındaki triyakların tetikleme sinyali görülmektedir.



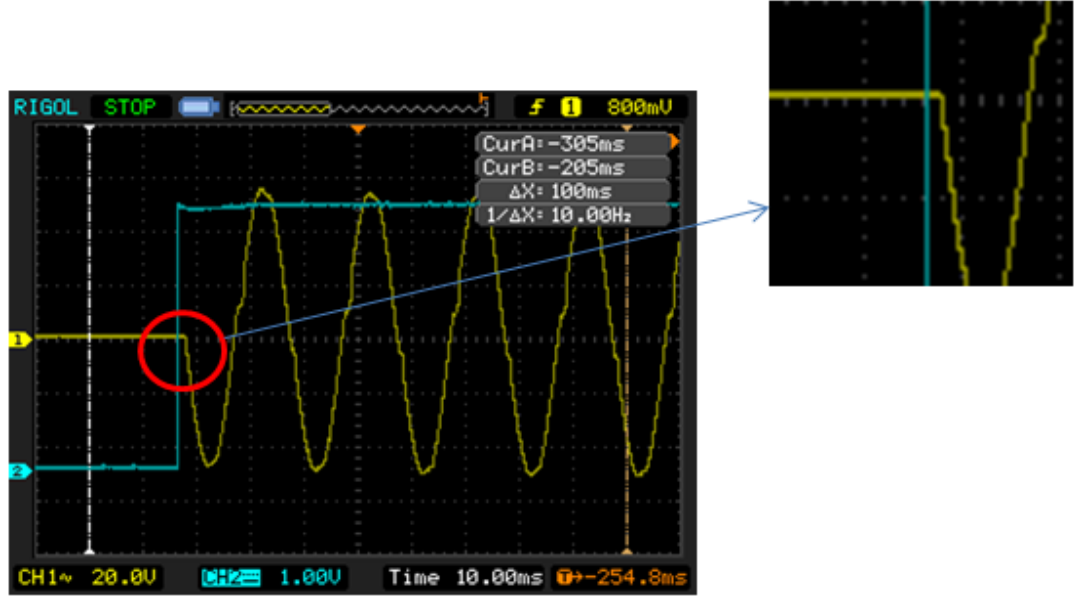
Şekil 3.11: Tetikleme Sinyali Uygulanmadan Giriş ve Çıkış Sinyali

Şekil 3.11’da devre çıkışına yük bağlı değilken ve pic mikrodenetleyiciye tetikleme sinyali verilmeden alınan sinyaller görülmektedir. Her iki sinyalde de devreye yükün bağlı olmamasından dolayı oluşan düşük seviyeli bir distorsiyon bulunmaktadır.



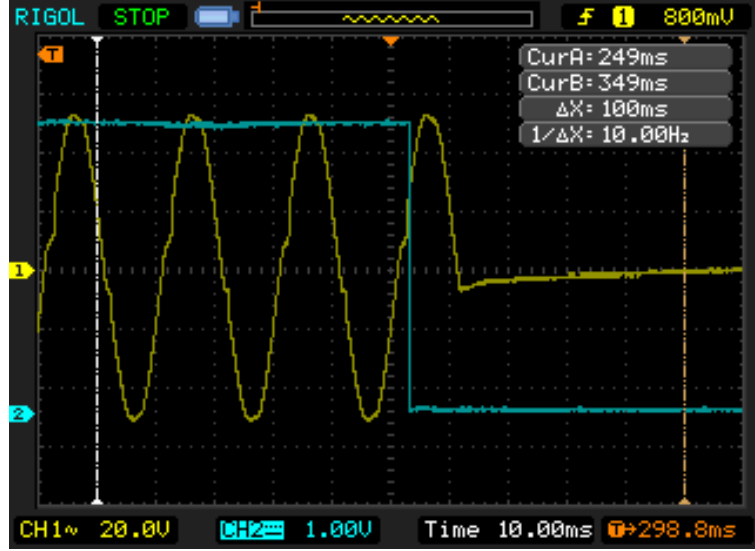
Şekil 3.12: Tetikleme Sinyali Uygulandıktan Sonra Giriş ve Çıkış Sinyali

Şekil 3.12’de devre çıkışına yük bağlandığında mikrodnetleyici tarafından triyaklara tetikleme sinyali verildikten sonra alınan çıkış sinyali görülmektedir. Şekil 3.12’de ki çıkış sinyali devre çıkışında yük bağlı olduğu andaki çıkış sinyalidir. Sinyalde görülen kırılmalar triyakların tetikleme sinyalinin uygulanarak iletime geçtiği anları göstermektedir. Bu durum alternatif akım sinyalinin hem pozitif hem de negatif alternanslarına geçiş anları olan sıfır noktasında tekrarlanmaktadır.



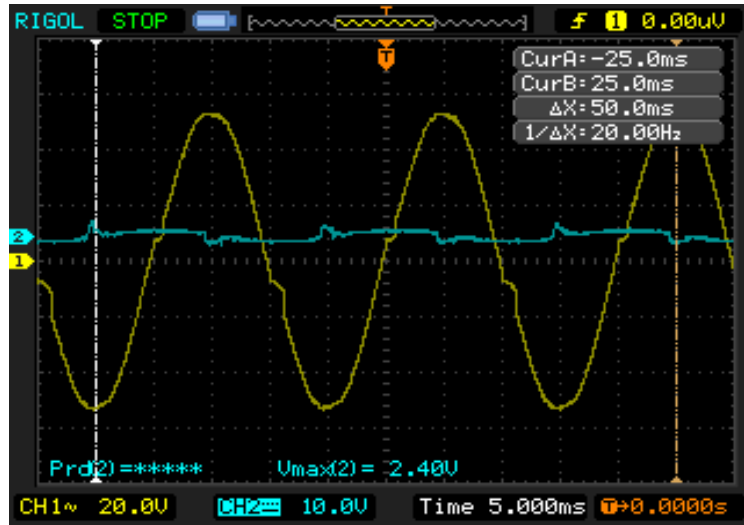
Şekil 3.13: Tetikleme Sinyali Verildiğinde Çıkış Sinyalinin Sıfır Seviyesinde Aktif Olduğu An

Şekil 3.13’de mikrodnetleyici tarafından tetikleme sinyalinin verildiği anda MOC3041 optokuplör entegrelerinin sıfır geçiş noktası anında triyakları tetikleyerek giriş sinyalinin sıfır noktasında devrenin çıkışına aktarıldığı açıkça görülmektedir. Tetikleme sinyalinin verilmesi ile çıkış sinyalinin aktif olması arasındaki geçen süre tetikleme sinyalinin alternatif akım sinyalinin hangi noktasında verildiğine göre değişmektedir. Bu süre en fazla 50 KHz’lik bir alternatif akım sinyalinde yarım alternanslık süre olan 0,02 ms olacaktır.



Şekil 3.14: Tetikleme Sinyali Kesilme Anındaki Çıkış Sinyalinin Sıfır Seviyesinde Pasif Olduğu An

Şekil 3.14’de mikrodenetleyici tarafından tetikleme sinyalinin kesildiği an ve triyakların kesime giderek çıkış sinyalinin kesildiği an görülmektedir. Tetikleme sinyali kesildiğinde çıkış sinyali alternatif akım sinyalinin sıfır noktasında kesildiği görülmektedir.



Şekil 3.15: Tetikleme Sinyalindeki Distorsiyon Seviyesi

Şekil 3.15’de distorsiyon seviyeleri incelenmiştir. Çıkış sinyalinde distorsiyon seviyesinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Tetikleme sinyali olan mavi sinyalde ise oluşan orta seviyeli distorsiyonun önerilen sistemle ilgisi yoktur. Bu tamamen mikrodenetleyicinin tetikleme sinyali üretmesi amacıyla harici bir kaynaktan uygulanan 5 V’luk doğru akım üreticiden gelen sinyalden kaynaklanmaktadır.

4. ÖNERİLEN SİSTEMİN PİYASADAKİ DİĞER ÜRÜNLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Önerilen sistem çalışma yöntemi, maliyet, gecikme ve distorsiyon seviyesi açısından piyasada sıklıkla kullanılan diğer ürünlerle karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.1’de önerilen sisteme ait maliyet tutarı ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1: Önerilen Sistemin Maliyeti

Devre Elemanı	Miktar	Adet Fiyat (\$)	Toplam Fiyat (\$)
Triyak	3	2,05	6,15
PIC 12C508 Mikrodenetleyici	1	1,3	1,3
MOC 3041 Optokuplör	3	0,43	1,29
Toroidal Bobin	1	1,74	1,74
Dirençler, Kondansatörler, Diyotlar, Transistör, Push Buton	1	1	1
			11,48

Çizelge 4.1’de önerilen sistemin maliyeti görülmektedir. Sistemin toplam maliyeti 11,48 \$ dir.

Çizelge 4.2: Önerilen Sistemin Karşılaştırılması

Cihaz	Çalışma Türü	Gecikme	Fiyat(\$)
Mekanik Kaçak Akım Rölesi (25 A)	Mekanik Kontaklı Röle	300 ms	20-22
Solid state röle (SSR) tip şalter (25 A)	Zero crossing	10 ms	25-30
Önerilen Sistem (Sıfır Geçiş hibrid system)	Elektronik şalter ve kaçak akım rölesi Sıfır geçiş	1,5 μ s	11,48

Çizelge 4.2’de önerilen sistemin çalışma türü, gecikme ve fiyat açısından diğer ürünlerle karşılaştırılması görülmektedir. Bir mekanik röle kontaklı kaçak akım rölesinin gecikmesi 300 ms iken fiyatı 20-22 \$’dir (Makel, 2020). Bir sıfır geçiş tabanlı SSR tip elektronik şalterin gecikmesi 10 ms iken fiyatı 25-30 \$’dir (Eksen, (2017). Burada, elektronik şalter ile kaçak akım rölesin ayrı ayrıdır. Bu çalışmada ise gecikme 1,5 μ s ve fiyatı ise 10 \$’dır (Fairchild Semiconductor, 2001; Microchip, 1999; Snuberrless and Standard, 2006).

Çizelge 4.3: Önerilen Sistemin Türe Göre Maliyet ve Gecikme Karşılaştırılması

Sıfır geçiş dedektör türü	Distortion hassasiyet seviyesi	Gecikme (μ S)	Fiyat (\$)
Optoizolatör devreli	Düşük	100-150	5’den az
Karşılaştırmacı devreli	Orta	60-100	5-10
Diferansiyel hat alıcı devresi	Orta	50-100 (Yüksek distorsiyon)	5-10 (sensörsüz)
İşlemsel yükselteç (Op-Amp) devresi	Orta	50-100 (Yüksek distorsiyon)	5-10 (sensörsüz)
Adaptiv filitreleme yöntemi	Yüksek	40-50	Yüksek
Neural ağ	Yüksek	40-50	Yüksek
Düşük maliyetli sıfır geçiş dedektörü	Yüksek	20-40	10 civarı (sensörsüz ve 35 civarı LEM LV-25 P sensörü ile)
Önerilen sistem	Yüksek	1,5	11,48

Çizelge 4.3’de sıfır geçiş detektör devre tipine göre fiyat, gecikme ve distorsiyon hassasiyeti değerleri açısından karşılaştırma yapılmıştır. Optoizolatör devreli sıfır geçiş yönteminin distorsiyon hassasiyeti düşük, gecikme değeri 100-150 μ s arası iken fiyatı 5 \$’dan az olduğu görülmektedir (Wall, 2003). Karşılaştırmacı devreli sıfır geçiş yönteminin distorsiyon hassasiyeti orta, gecikme değeri 60-100 μ s arası iken fiyatı 5-10 \$ arası olduğu görülmektedir (Elliott, 2019). Diferansiyel hat alıcı devreli sıfır geçiş yönteminin distorsiyon hassasiyeti orta, gecikme değeri yüksek

distorsiyonla 50-100 μ s arası iken fiyatı sensörsüz 5-10 \$ arası olduğu görülmektedir (Rowlan, 2000). İşlemsel yükselteç (Op-Amp) devreli sıfır geçiş yönteminin distorsiyon hassasiyeti orta, gecikme değeri yüksek distorsiyonla 50-100 μ s arası iken fiyatı sensörsüz 5-10 \$ arası olduğu görülmektedir (Irmak ve diğ., 2011). Adaptiv filitreleme sıfır geçiş yönteminin distorsiyon hassasiyeti yüksek, gecikme değeri 40-50 μ s arası iken maliyeti yüksek olduğu görülmektedir (Vainio ve Ovaska, 1996; Vainio ve Ovaska, 2002). Neural ağ sıfır geçiş yönteminin distorsiyon hassasiyeti yüksek, gecikme değeri 40-50 μ s arası iken maliyeti yüksek olduğu görülmektedir (Valiviita, 1998). Düşük maliyetli sıfır geçiş detektörü devresinin distorsiyon hassasiyeti yüksek, gecikme değeri 20-40 μ s arası iken fiyatı sensörsüz 10 \$ civarı ancak LEM LV-25 P sensörü ile 35 \$ civarı olduğu görülmektedir (Vorobyov, 2014).

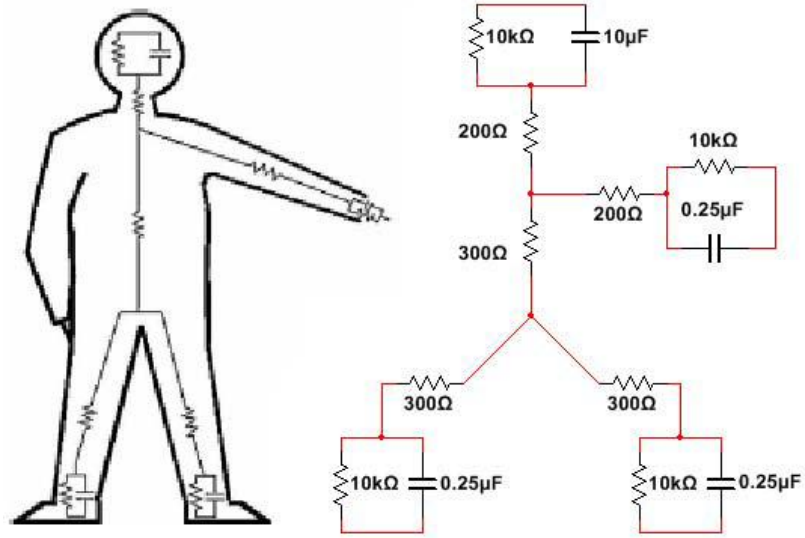
Önerilen sisteme bakıldığında ise distorsiyon hassasiyeti yüksek, gecikme değeri 1,5 μ s iken fiyatının 11,48 \$ olduğu görülmektedir.

5. ÖNERİLEN SİSTEME AİT ZAMAN TEPKİ ANALİZLERİ

Role kontaklı kaçak akım cihazları ile ilgili yapılan çok fazla çalışma vardır. Massimo (2010), yaptığı çalışmada kaçak akım cihazlarının kullanımındaki başarıyı değerlendirmiştir. Fabio (2012), anma frekansından daha yüksek frekanslarda kaçak akım rölesinin davranışlarını analiz edip matematiksel bir model geliştirmiştir. Pawel (2017), kaçak akım rölesi anahtarındaki salım sistemi tasarımının, artık akımın frekansındaki değişimler için korumalı devreyi kapatma verimliliği üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Utegulov ve diğ. (2016), 1000 Volt altındaki kaçak akım rölelerinin verimliliğini artırmak için doğrudan kuruluma dayanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Porta ve diğ. (2014), elektronik yükleri besleyen devrelerde kaçak akı rölesinin yanlış açma nedenlerine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Düşük voltajlı güçte toprak döngüsü empedansının veya direncinin test edilmesinde kaçak akım röleleri bunlara yüklendiğinde sistemler elverişsiz hale gelir. Bu nedenle istenmeyen açmaların, geleneksel yöntemlerle test edilmesi pratik olarak pek mümkün değildir. Stanislaw ve Kornel (2019), istenmeyen açtırma olmadan otomatik besleme kesintisinin etkinliğini test etmek için yeni bir yöntem önermiştir. Salvatierra ve diğ. (2015), elektrik kazalarının çok sık rastlandığı Ecuador'da, konut ve endüstride orta gerilim olarak 127 Volt'ta çalışma yapmışlardır. Espinoza ve diğ. (2017), ise geleneksel kaçak akım rölesinin zaman tepki analizini ölçmüşler ve laboratuvar sonuçları, geleneksel bir koruma rölesinin ortalama 8,81 milisaniyede açılabilirdiğini göstermiştir. Geleneksel kaçak akım rölelerin aksine elektronik şalter ve kaçak akım röleleri ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır.

5.1 İnsan Vücut Modelinin Geliştirilmesi

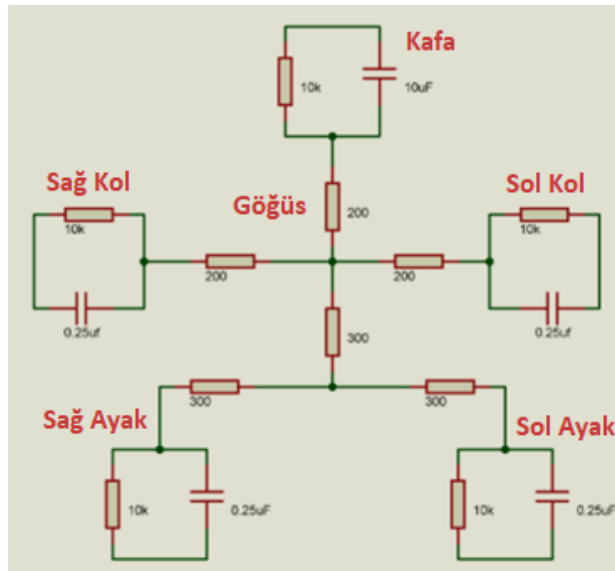
Önerilen sisteme insan temasını simüle etmek için kapasitör ve dirençlerden oluşturulan insan vücudu modeli (Human Body Model) kullanılarak kaçak akım oluşturulmuştur. Sistemin gerçeğe yakın kaçak akım esnasında devreyi kesme süreleri incelenmiştir. Şekil 5.1'de oluşturulan model verilmiştir (Andrews, 2003).



Şekil 5.1: İnsan Vücut Modeli

Kaynak: Andrews (2003)

Bu model, yıldırım düşmesindeki yaralanmalarda akan akımların teorik bir modelini sağlamaya yönelik bir çalışmadır. İç bileşen olarak kollar, gövde ve bacaklar arasında sadece bir iç direnç içerir. Yüzeysel direnç bileşenleri, iç dirençten önemli ölçüde daha büyüktür. 10 KΩ paralel direnç ve 0.25 µF kapasitansından oluşur. Bu vücut modeli, yıldırım akımı kaynağı ile devreye sokulduğunda, dış ve deri bozulmalarını modellemek için gereklidir. Bu model yüksek akım etkileri için geliştirilmesine rağmen düşük akım seviyeleri içinde kullanılabilir (Andrews, 2003).



Şekil 5.2: Geliştirilen İnsan Vücut Modeli

Önerilen sistemin zaman tepki analizlerinde kullanılmak üzere geliştirilen insan vücut modeli devresi Şekil 5.2’de verilmiştir.

5.2 Kaçak Akım İnsan Vücut Modeli Ölçümleri

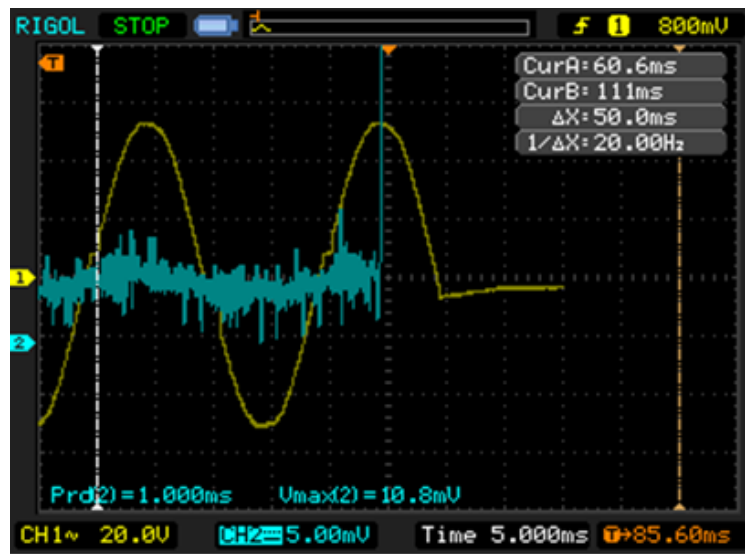
Önerilen sistemin oluşturulan insan vücudu modelinde rezistif yükler kullanıp kaçak akım oluşturularak sisteme uygulanmıştır. Sistemin gerçeğe yakın kaçak akım esnasında devreyi kesme süreleri incelenmiştir.

Önerilen sistem 3 faz çalışabilmekte ve 380 Volt 25 W'a kadar desteklemektedir. Ancak bu ölçümler yapılırken güvenlik nedeni ile sisteme bir transformatör üzerinden alternatif akım 20 V sinyal uygulanmıştır. Ayrıca sistem üzerindeki mikrodenetleyici harici bir güç kaynağı yardımı ile +5 V ile beslenmiştir. Sisteme yük olarak 100 Ω -5 W'lık bir taş direnç bağlanmıştır.

Ölçümlerde RIGOL DS1102E dijital osilaskop kullanılmıştır. Osilaskobun birinci kanalı (CH1- sarı sinyal) sistemin çıkış sinyalini gösterirken, ikinci kanal (CH2- mavi sinyal) sisteme uygulana uygulanan kaçak akım sinyalini göstermektedir.

Bu çalışmada insan vücudunun akıma maruz kalabileceği uzuvları olan sağ kol, sol kol, sağ ayak, sol ayak ve kafa olarak modellenerek, bu uzuvlarda oluşabilecek kaçak akım 10 K, 1 K ve 560 Ω direnç değerlerine göre ölçümler yapılmıştır. Yapılan 200 adet deneyden anlamlı olan, 10 K, 1 K ve 560 Ω yük direnç değerleri için insan vücut modelinin sağ kol, sol kol, kafa bölgeleri için örnek sinyal şekilleri verilmiştir.

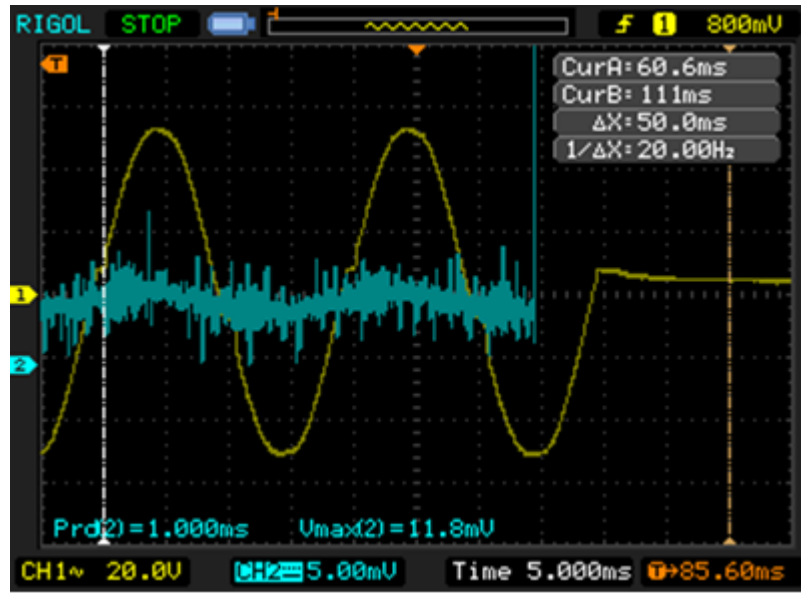
Şekil 5.3'de 10 K direnç ile sağ kol kaçak akım sinyali tetikleme ve çıkış sinyali kesim anı sinyal şekilleri görülmektedir.



Şekil 5.3: 10 K-Sağ Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri

Şekil 5.3'de verilen osilaskop sinyalinde 10K direnç ile sağ kol kaçak akım modellenmesine göre kaçak akım sinyalinin uygulandığı an ve sistem çıkış akımı sinyalinin kesime gittiği an görülmektedir. Kaçak akım sinyali voltaj değeri 10,8 mV olmuştur. Kaçak akım sinyalinin oluşma anı $T=85,60$ ms iken çıkış sinyali time değeri $CurA=60,6$ ms'dir. Bu verilere göre sistemin tepki süresi 85,60 ms ile 60,6 ms'nin farkı olan 25 ms'dir. Osilaskop ölçüm frekans değeri 20 Hz olduğundan sistem tepki süresi değeri 20'ye bölüldüğünde 1,25 ms olarak hesaplanmaktadır.

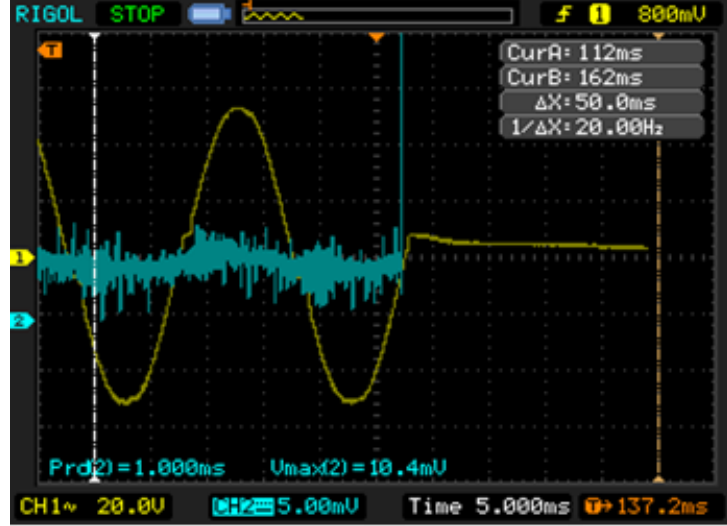
Şekil 5.4'de 10 K direnç ile sol kol kaçak akım sinyali tetikleme ve çıkış sinyali kesim anı sinyal şekilleri görülmektedir.



Şekil 5.4: 10 K-Sol Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri.

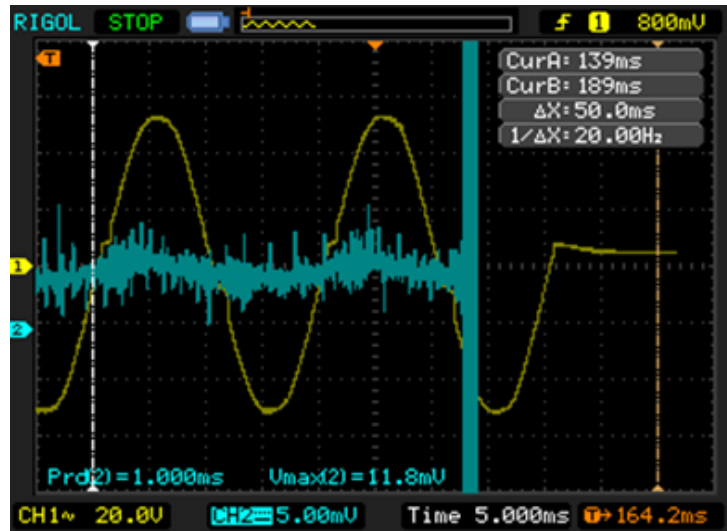
Şekil 5.4'deki osilaskop sinyalinde 10 K direnç ile sol kol kaçak akım modellenmesine göre kaçak akım sinyalinin uygulandığı an ve sistem çıkış akımı sinyalinin kesime gittiği an görülmektedir. Değerler sağ kol kaçak akım sinyali ile aynı şekilde oluşmuştur. Farklı ölçümlerde çok küçük farkalar olduğu görülse de sağ ve sol kol için tüm değerler birbirine çok yakın ölçülmüştür. Aynı yöntemle sol kol için tepki süresi 1,25 ms olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.5'de 10 K direnç ile kafa kaçak akım sinyali tetikleme ve çıkış sinyali kesim anı sinyal şekilleri görülmektedir.



Şekil 5.5: 10 K - Kafa İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri

Şekil 5.5'deki osilaskop sinyalinde 10K direnç ile kafa kaçak akım modellenmesine göre kaçak akım sinyalinin uygulandığı an ve sistem çıkış akımı sinyalinin kesime gittiği an görülmektedir. Kaçak akım sinyali voltaj değeri 10,4 mV olmuştur. Kaçak akım sinyalinin tetikleme anı $T=137,2$ ms iken çıkış sinyali time değeri $CurA=112$ ms dir. Bu verilere göre sistemin tepki süresi 25,2 ms dir. Osilaskop ölçüm frekans değeri 20 Hz olduğundan sistem tepki süresi değeri 1,26 ms olarak hesaplanmaktadır. Şekil 5.6'da 1 K direnç ile sağ kol kaçak akım sinyali tetikleme ve çıkış sinyali kesim anı sinyal şekilleri görülmektedir.

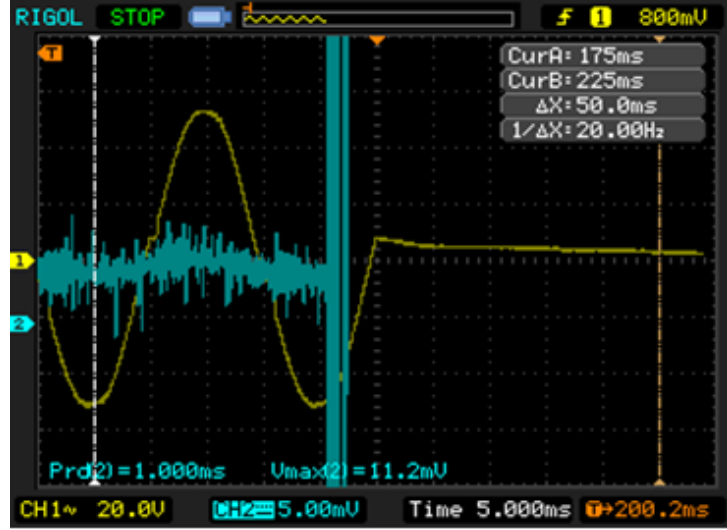


Şekil 5.6: 1 K – Sağ Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri

Şekil 5.6'daki osilaskop sinyalinde 1 K direnç ile sağ kol kaçak akım modellenmesine göre kaçak akım sinyalinin uygulandığı an ve sistem çıkış akımı

sinyalinin kesime gittiği an görülmektedir. Kaçak akım sinyali voltaj değeri 11,8 mV olmuştur. Kaçak akım sinyalinin tetikleme anı $T=164,2$ ms iken çıkış sinyali time değeri $CurA=139$ ms dir. Bu verilere göre sistemin tepki süresi 25,2 ms dir. Önerilen sistemin tepki süresi değeri 1,26 ms olarak hesaplanmaktadır.

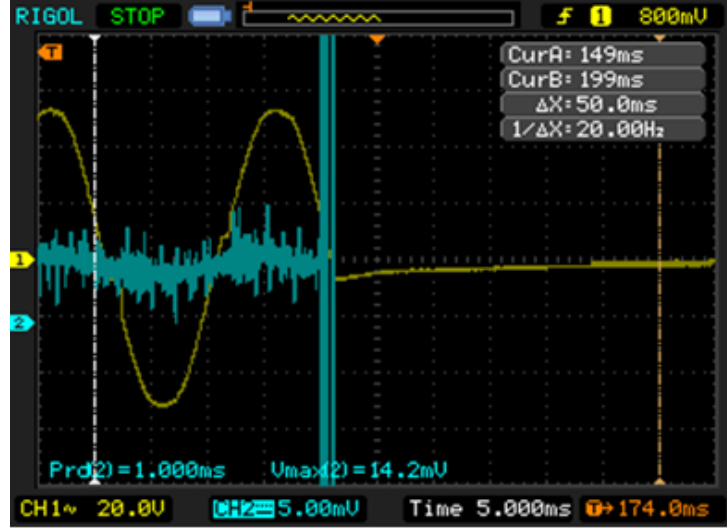
Şekil 5.7’de 1 K direnç ile sol kol kaçak akım sinyali tetikleme ve çıkış sinyali kesim anı sinyal şekilleri görülmektedir.



Şekil 5.7: 1 K – Sol Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri

Şekil 5.7’deki osilaskop sinyalinde 1 K direnç ile sol kol kaçak akım modellenmesine göre kaçak akım sinyalinin uygulandığı an ve sistem çıkış akımı sinyalinin kesime gittiği an görülmektedir. Kaçak akım sinyali voltaj değeri 11,2 mV olmuştur. Kaçak akım sinyalinin tetikleme anı $T=200,2$ ms iken çıkış sinyali time değeri $CurA=175$ ms’dir. Bu verilere göre sistemin tepki süresi 25,2 ms olmuştur. Önerilen Sistem tepki süresi değeri 1,26 ms olarak hesaplanmaktadır.

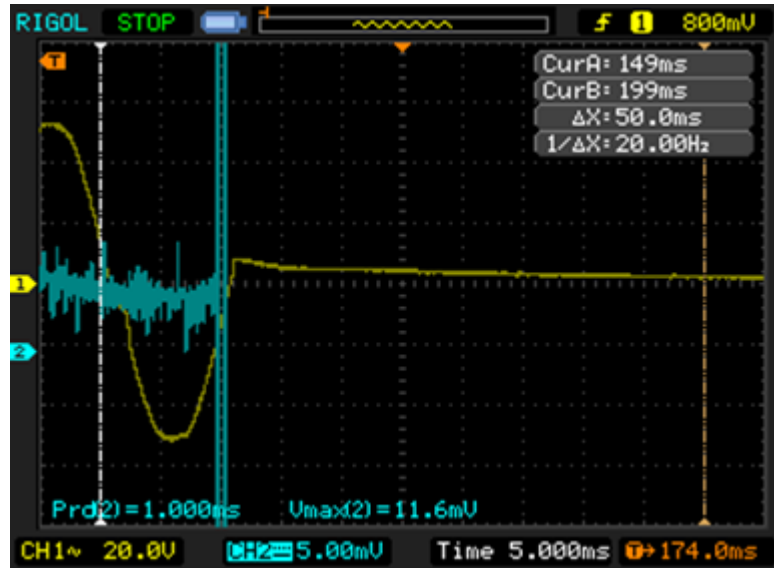
Şekil 5.8’de 1 K direnç ile kafa kaçak akım sinyali tetikleme ve çıkış sinyali kesim anı sinyal şekilleri görülmektedir.



Şekil 5.8: 1 K – Kafa İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri

Şekil 5.8'deki osilaskop sinyalinde 1 K direnç ile kafa kaçak akım modellenmesine göre kaçak akım sinyalinin uygulandığı an ve sistem çıkış akımı sinyalinin kesime gittiği an görülmektedir. Kaçak akım sinyali voltaj değeri 14,2 mV olmuştur. Kaçak akım sinyalinin tetikleme anı $T=174$ ms iken çıkış sinyali time değeri $CurA=149$ ms'dir. Bu verilere göre sistemin tepki süresi 25 ms'dir. Önerilen sistemin tepki süresi değeri 1,25 ms olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 5.9'da 560 Ω direnç ile sağ kol kaçak akım sinyali tetikleme ve çıkış sinyali kesim anı sinyal şekilleri görülmektedir.

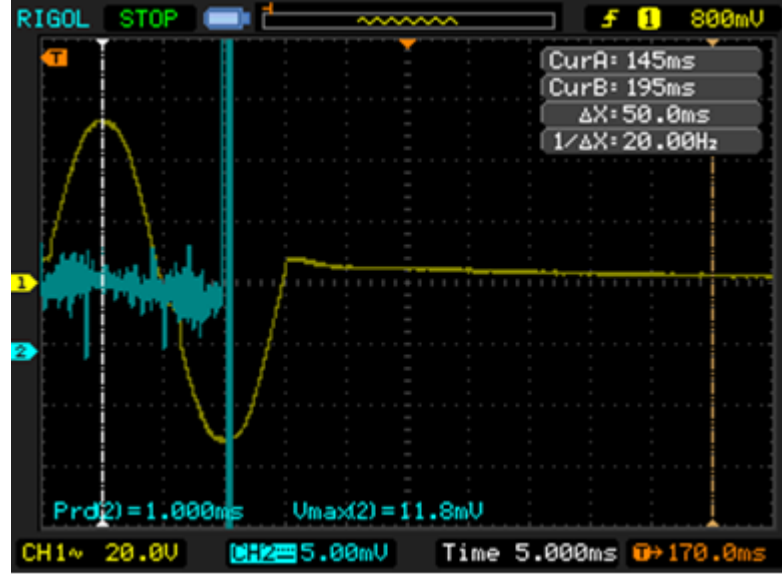


Şekil 5.9: 560 Ω – Sağ Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri.

Şekil 5.9'daki osilaskop sinyalinde 560 Ω direnç ile sağ kol kaçak akım modellenmesine göre kaçak akım sinyalinin uygulandığı an ve sistem çıkış akımı

sinyalinin kesime gittiği an görülmektedir. Kaçak akım sinyali voltaj değeri 11,6 mV olmuştur. Kaçak akım sinyalinin tetikleme anı $T=174$ ms iken çıkış sinyali time değeri $CurA=149$ ms dir. Bu verilere göre sistemin tepki süresi 25 ms'dir. Sistemin tepki süresi değeri 1,25 ms olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 5.10'da 560 Ω direnç ile sol kol kaçak akım sinyali tetikleme ve çıkış sinyali kesim anı sinyal şekilleri görülmektedir.



Şekil 5.10: 560 Ω – Sol Kol İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri

Şekil 5.10'daki osilaskop sinyalinde 560 Ω direnç ile sol kol kaçak akım modellenmesine göre kaçak akım sinyalinin uygulandığı an ve sistem çıkış akımı sinyalinin kesime gittiği an görülmektedir. Kaçak akım sinyali voltaj değeri 11,8mV olmuştur. Kaçak akım sinyalinin tetikleme anı $T=170$ ms iken çıkış sinyali time değeri $CurA=145$ ms'dir. Bu verilere göre sistemin tepki süresi 25 ms'dir. Sistemin tepki süresi 1,25 ms olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 5.11'de 560 Ω direnç ile kafa kaçak akım sinyali tetikleme ve çıkış sinyali kesim anı sinyal şekilleri görülmektedir.



Şekil 5.11: 560 Ω – Kafa İçin Tetikleme ve Çıkış Sinyali Kesim Anı Sinyalleri

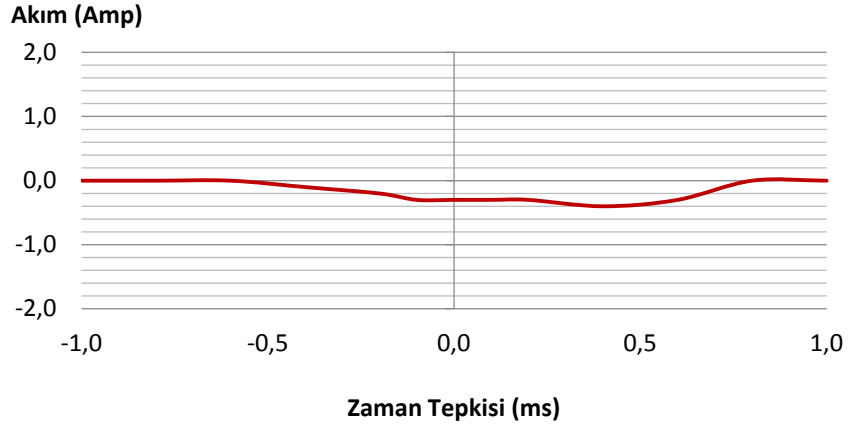
Şekil 11’deki osilaskop sinyalinde 560 Ω direnç ile kafa kaçak akım modellenmesine göre kaçak akım sinyalinin uygulandığı an ve sistem çıkış akımı sinyalinin kesime gittiği an görülmektedir. Kaçak akım sinyali voltaj değeri 11,4 mV olmuştur. Kaçak akım sinyalinin tetikleme anı $T=292,2$ ms iken çıkış sinyali time değeri $CurA=267$ ms’dir. Bu verilere göre sistemin tepki süresi 25,2 ms’dir. Sistemin tepki süresi 1,26 ms olarak hesaplanmaktadır.

5.3 Zaman Tepki Analizlerinin Yapılması

Analizlerin yapımında RIGOL DS1102E digital osilaskop kullanılmıştır. İnsan vücudunun akıma maruz kalabileceği uzuvları olan sağ kol, sol kol, sağ ayak, sol ayak ve kafa olarak modellenerek, bu uzuvlarda oluşabilecek kaçak akım 560 Ω , 1 K Ω ve 10 K Ω direnç değerlerine göre analizler yapılmıştır. Bu direnç değerleri farklı ev aletleri gibi yükleri simüle etmektedir. Konut ve endüstriyel düzeylerde elektrik çarpmasına karşı düşük gerilim ile insan vücut modeli üzerinde analiz edilmiştir.

Analizi verilen dört farklı durumda 560 Ω ’luk yük kullanılmıştır. Yaklaşık 200 farklı durum analiz edilmiştir.

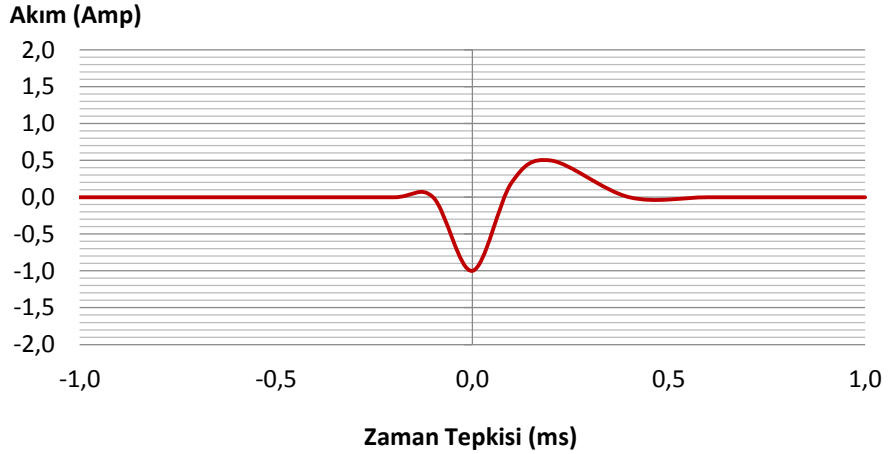
Birinci durumda, sol kolda 127 V kaynak girişi bağlı olup sağ ve sol bacak yere temas ettirilmiştir. Yere temas edilen noktalar toprak seviyesinde tutulmuştur. Şekil 5.12’de, sol kolun akıma maruz kalması durumunda zaman tepkisini göstermektedir.



Şekil 5.12: Sol Kol ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal

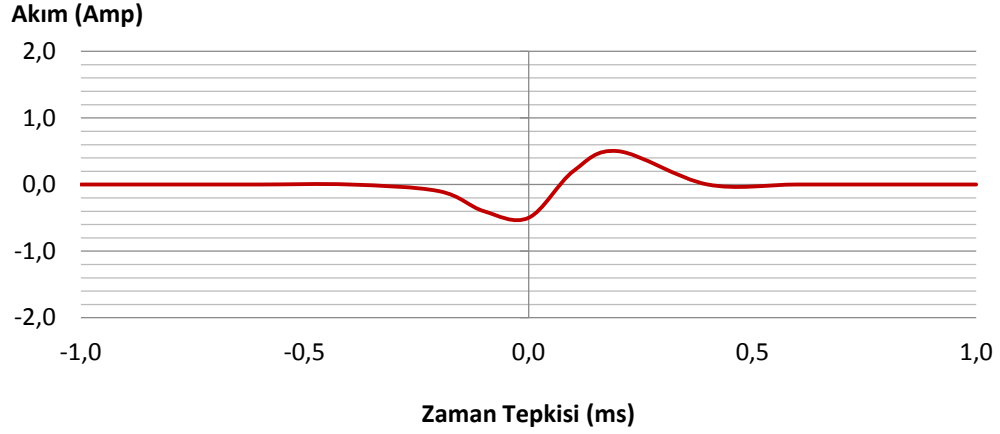
Şekil 5.12'de -0,4 ile 0,6 ms arasında sinyal akışı olup diğer zaman aralıklarında akım sıfır olarak ölçülmüştür.

İkinci durumda, sağ kolda 127 V kaynak girişi olup sol ve sağ bacak yere temas ettirilmiştir. Şekil 5.13'de 560 Ω 'luk yükte sağ kolun akıma maruz kalması durumunda gerçekleşen analizi görülmektedir.



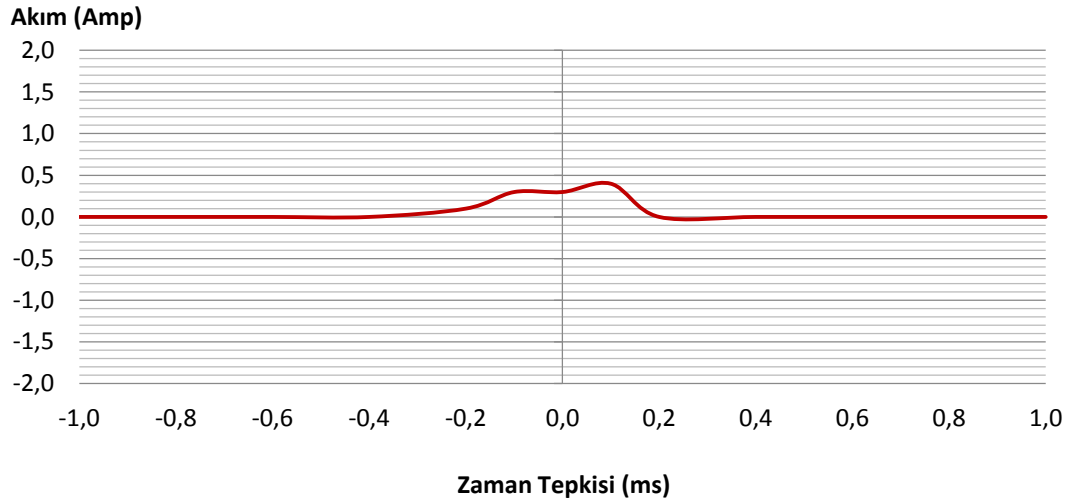
Şekil 5.13: Sağ Kol ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal

Üçüncü durumda, doğrudan kafada 127 V kaynak girişi olup sol ve sağ bacak yere temas ettirilmiştir. Şekil 5.14'de kafanın akıma maruz kalması durumunda gerçekleşen analizin sonuçları gösterilmiştir.



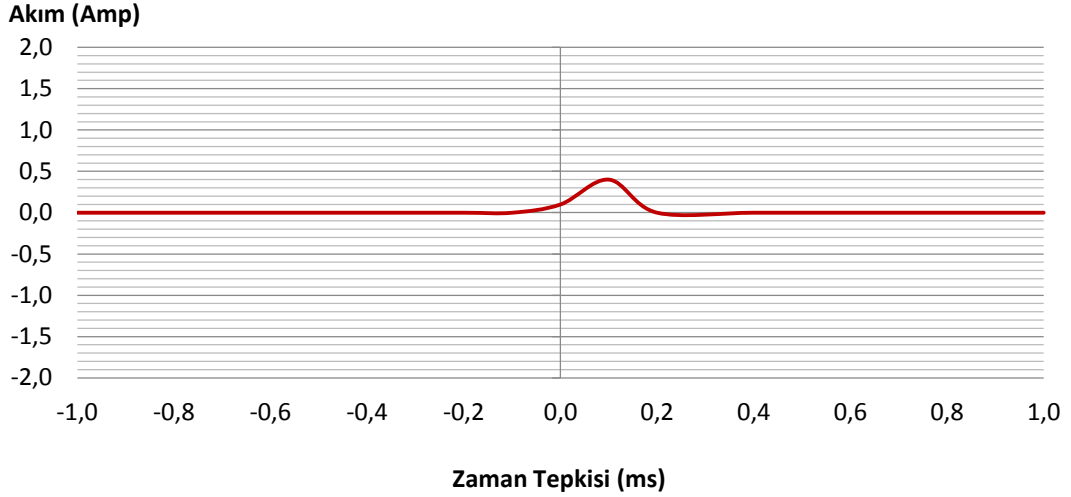
Şekil 5.14: Kafa ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal

Dördüncü durumda, 127 V kaynak sol ayağa bağlanmış olup sağ kol toprak seviyesinde tutulmuştur. Şekil 5.15’de sol ayağın akıma maruz kalması durumunda zaman cevabını göstermektedir.



Şekil 5.15: Sol Ayak ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal

Son olarak, 127 V kaynak sağ ayağa bağlanmış olup sol kol toprak seviyesinde tutulmuştur. Şekil 5.16’da sağ ayağın akıma maruz kalması durumunda gerçekleşen analiz simüle edilmiştir.



Şekil 5.16: Sağ Ayak ile Temas Edildiğinde Sistemde Oluşan Sinyal

Kaçak akım direnci 1 K Ω ve 10 K Ω olduğu durumlar içinde benzer analizler yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarının özeti Çizelge 5.1’de sunulmuştur. Bunun yanı sıra, Çizelge 5.1’de yapılan tüm ölçümler vücudun her bölümü için farklı yük dirençlerine sahiptir. Çizelge 5.1’de altı ölçüm sunulmuştur. Ancak, toplam 200 adet farklı ölçüm yapıldığı için bu altı zaman tepkisi minimum ve maksimum değerli ölçümlerin en anlamlı olanlarını temsil etmektedir.

Çizelge 5.1: Zaman Tepki Değerleri

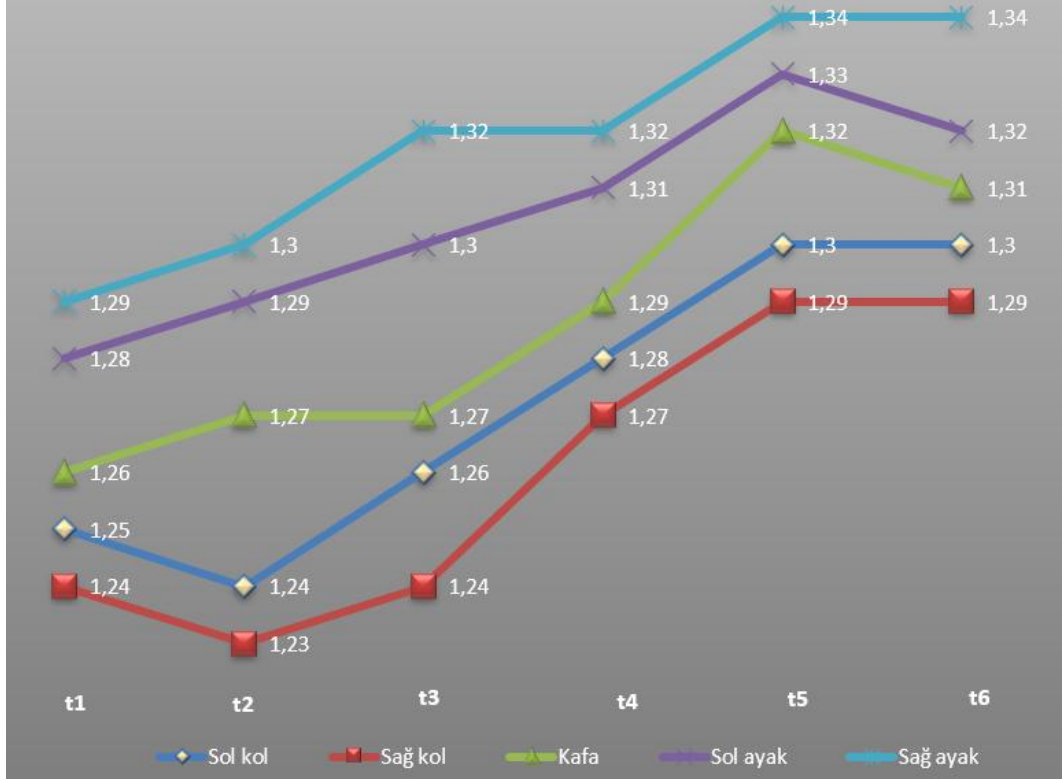
Yük Direnci	Vücut Bölgesi	t1(ms)	t2(ms)	t3(ms)	t4(ms)	t5(ms)	t6(ms)
560 Ω	Sol kol	1,25	1,24	1,26	1,28	1,30	1,30
	Sağ kol	1,24	1,23	1,24	1,27	1,29	1,29
	Kafa	1,26	1,27	1,27	1,29	1,32	1,31
	Sol ayak	1,28	1,29	1,30	1,31	1,33	1,32
	Sağ ayak	1,29	1,30	1,32	1,32	1,34	1,34
1K Ω	Sol kol	1,26	1,30	1,32	1,32	1,33	1,33
	Sağ kol	1,26	1,32	1,34	1,34	1,35	1,36
	Kafa	1,25	1,26	1,28	1,30	1,34	1,36
	Sol ayak	1,27	1,31	1,33	1,35	1,36	1,38
	Sağ ayak	1,28	1,29	1,32	1,34	1,35	1,38
10K Ω	Sol kol	1,24	1,28	1,31	1,35	1,38	1,40
	Sağ kol	1,25	1,26	1,32	1,36	1,37	1,39
	Kafa	1,26	1,28	1,32	1,38	1,41	1,45
	Sol ayak	1,27	1,29	1,35	1,40	1,42	1,44
	Sağ ayak	1,27	1,29	1,33	1,42	1,47	1,50

Çizelge 5.1’de yapılan 200 adet farklı deney tekrarının t1, t2, t3, t4, t5 ve t6 olmak üzere her yük direnci ve insan vücudunun beş bölgesi için toplam altı zaman tepkisi minimum ve maksimum değerli ölçümlerin en anlamlı olanlarını temsil etmektedir. Çizelge 5.2’de her vücut kısmında minimum ve maksimum zaman cevabı da dikkate alınarak 200 ölçümün zaman cevap sonuçlarının özeti verilmiştir. Aynı zamanda ortalama süre de hesaplanmıştır.

Çizelge 5.2: Zaman Tepki Değerleri

Yük Direnci	Vücut Bölgesi	Minimum süre(ms)	Ortalama süre(ms)	Maximum süre(ms)
560Ω	Sol kol	1,25	1,28	1,30
	Sağ kol	1,23	1,26	1,29
	Kafa	1,26	1,29	1,32
	Sol ayak	1,28	1,31	1,33
	Sağ ayak	1,29	1,32	1,34
1kΩ	Sol kol	1,26	1,30	1,33
	Sağ kol	1,26	1,31	1,36
	Kafa	1,25	1,31	1,36
	Sol ayak	1,27	1,33	1,38
	Sağ ayak	1,28	1,33	1,38
10kΩ	Sol kol	1,24	1,32	1,40
	Sağ kol	1,25	1,32	1,39
	Kafa	1,26	1,36	1,45
	Sol ayak	1,27	1,36	1,44
	Sağ ayak	1,27	1,39	1,50
Toplam ortalama		1,26	1,32	1,37

Çizelge 5.2’de insan vücut modellemesi üzerinde farklı yük dirençleri ve beş vücut bölgesine göre yapılan deneylerden alınan değerlerin ortalamaları gösterilmiştir.



Şekil 5.17: 560 Ω Yük Direnci ile Beş Vücut Bölgesi İçin Zaman Tepki Grafiği

Şekil 5.17’de, Çizelge 5.2’de verilen ortalama değerlere göre 560 Ω yük direnci için beş ayrı vücut bölgesinde alınan altı ortalama değer grafiksel olarak gösterilmiştir.

6. ÖNERİLEN SİSTEMİN ZAMAN TEPKİ ANALİZİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Önerilen sisteme ait insan vücudu kaçak akım değeri ve akım kesme tepki süresi Monte Carlo Simülasyonu kullanılarak sıklık/şiddet dağılımları hesaplanmıştır. İnsan vücudu direnç değeri fiziksel ve ortam kaynaklı veriler kullanılarak veri setleri meydana getirilmiştir. Monte Carlo simülasyonu kullanılarak elektrik akım miktarı, insan vücudunun sıcaklığı, cilt ve nem özellikleri, giyilen ayakkabı, zemin kaplaması, malzeme cinsi özelliklerine göre önerilen sistemin tepki süresi incelenerek matematiksel olarak modellenmiştir.

Mooney, (1997) Monte Carlo simülasyonu yöntemini, bir veri setini simüle etmek için bir algoritma geliştirerek, bu tahmini veri setinde çok sayıda örneklem oluşturarak ve bu örneklerden elde edilen tahminleri değerlendirerek önemli hipotezleri ve istatistiksel tahminleri değerlendirme yöntemi şeklinde tanımlamıştır. Papadopoulos ve Yeung (2001) yaptıkları çalışmada; Monte Carlo Simülasyonunu ile matematiksel teori ile istatistiksel hesaplamalar kullanılarak çıkarım yürütme, sosyal ve davranışsal araştırmalarda, hipotezleri çeşitli makul koşullar altında test ederek, parametrik çıkarımın güvenilirliğini değerlendirildiğini belirtmişlerdir.

İnsan vücudunun elektrik iletimi farklı ortam koşulları ile değişken vücut değerlerine bağlıdır. Bu değerler ortam koşulları, vücut özellikleri ve maruz kalınan elektrik akım değerlerine göre farklı koşullar altında farklı sonuçlar doğurabilmektedir. Dalziel (2011) yaptığı çalışmada; insan deri kalınlığı, nem oranının vücut elektriksel direncine etkisini belirlemiştir. Nuran (2016) çalışmasında, kullanılan ayakkabı ve zemin kaplamasında kullanılan malzeme cinsinin elektrik akımına karşı gösterdiği direnci incelemiştir. İnsan derisinin normal koşullarda 100-300 K Ω dirence sahipken, nemli derinin bu değerlerin %1'ine inerek 1-3 K Ω olmaktadır. Aynı zamanda nasırlı ve kalın bir ciltte direnç değeri 1-3 M Ω seviyelerine kadar çıkmaktadır. Kişinin giymiş olduğu ayakkabı zemin kaplamasına göre elektriksel direncin 1-1.000 K Ω arasında değişebileceğini belirtmektedir.

Monte Carlo simülasyonu çok farklı alanda kullanım alanına sahiptir. Çalamak (2017) bir barajın üstten aşılma güvenilirliğini olasılık yöntemlerle değerlendirilmiştir. Zhou ve diğ., (2020) bir madenden atılan 260 kaya örneğini inceleyerek bu simülasyonu risk gerektiren yerler için kullanmıştır. Periyasamy and Pramanik (2017) dokudaki ışığın yayılmasını inceleyerek modelleme yapmıştır. Baležentis and Streimikiene (2017), Monte Carlo simülasyonu ile enerji üretim senaryolarının sıralamasını yapmıştır. Silva (2019) yaptığı çalışmada, çapraz entropi yöntemiyle önem örnekleme tekniklerini kullanarak Monte Carlo simülasyonuna dayalı iletim ekipmanında aşırı yük olasılığı ve risk endekslerini hesaplamak için yeni bir yöntem önermiştir. Marmidis ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada yenilenebilir enerji alanında rüzgar tribünlerinin yerleştirilmesinde en uygun yer tahmini yapmak amacıyla monte carlo simülasyonu yöntemini kullanmışlardır.

İnsan vücudunun elektrik akımı ile doğrudan temasında vücut üzerinden geçen akımın izlediği yol, geçen akımın şiddeti ve insan vücudunun geçen akıma maruz kaldığı süre vücutta oluşacak hasarı belirlemektedir. Geçen akımın şiddeti kişiden kişiye değişken olan vücut direnci ve ortam koşullarının oluşturduğu direnç değerine göre de değişmektedir. İnsanları bu akımdan koruyacak olan kaçak akım rölelerinin akımı algılayarak elektrik akımını tamamen kesmesi için gereken süre ise tepki süresidir. Bu süre ne kadar kısa olursa vücutta oluşacak hasar o kadar az olacaktır (Yağımlı ve Tozan, 2020).

6.1 Matematiksel Modelleme İçin Parametrelerin Belirlenmesi

Vücut sıcaklığı, cilt ve nem özellikleri, giyilen ayakkabı, zemin kaplaması, malzeme cinsi, özelliği parametreleriyle Monte Carlo Simülasyonu kullanılarak sistemin tepki süresine etkisi incelenmiştir. Bu süreye bağlı olarak oluşturulan Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF) ve Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu (CDF) grafikleri oluşturularak sistemin matematiksel formülasyonu elde edilmiştir.

Elektrik akımının vücut geçiş yolu, akım şiddeti ve elektriksel direnç arasındaki bağıntı olduğu bilinmektedir. Vücut geçiş yoluna göre;

1. Akım Yolu: Sağ kol-gövde-sol kol akım geçiş yoluna göre insan vücut direnci $Z_B = \%10$ artmakta, Kalp akımı kat sayısı $k=0,4$ olmaktadır.

2.Akım Yolu: Sağ kol-gövde-ayaklar akım geçiş yoluna göre insan vücut direnci $Z_B = \%75$ artmakta, Kalp akımı kat sayısı $k=0,8$ olmaktadır.

3.Akım Yolu: Eller-gövde-ayaklar akım geçiş yoluna göre insan vücut direnci $Z_B = \%50$ artmakta, Kalp akımı kat sayısı $k=1$ olmaktadır.

4.Akım Yolu: Sağ ve sol el-göğüs akım geçiş yoluna göre insan vücut direnci $Z_B = \%50$ artmakta, Kalp akımı kat sayısı $k_{sağ}=1,3$, $k_{sol}=1,5$ olmaktadır.

5.Akım Yolu: Eller-göğüs akım geçiş yoluna göre insan vücut direnci $Z_B = \%25$ artmakta, Kalp akımı kat sayısı $k=1,1$ olmaktadır.

Verilen akım geçiş yollarına göre vücut üzerinden geçen kaçak akım şiddeti;

$$I_b = \frac{U}{R_g + Z_b} \cdot k \quad (6.1)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir. Bu bağıntıda;

I_b = İnsan vücudu üzerinden geçen akım,

U = Maruz kalınan elektrik voltajı,

R_g = İnsan vücudu direnç değeri,

Z_b = İnsan vücudu bağlı direnç değeri

k = Kalp akımı kat sayısını temsil etmektedir (Bayram ve Ilısu, 2004).

Önerilen sistem 380V ile çalışılan endüstriyel ortamlar için üretildiğinden simülasyonlarda gerilim değeri 380V olarak alınmıştır. Ayrıca tepki süresi verilen şartlara göre değişen direnç değerleri dikkate alınarak vücut kaçak akım şiddeti hesaplanmıştır. Hesaplanan vücut kaçak akım şiddetine göre önerilen sistemin tepki süresi de doğru orantılı olarak değişmektedir. Önerilen sistem kaçak akım rölesi olarak çalıştırıldığında sistem kaçak akım kesme değeri mikrodenetleyicide yazılımsal olarak 5 mA değeri belirlenmiştir. Önerilen sistem ile yapılan 200 adet deney sonucunda 5 mA akım değerine göre sistemin tepki süresi ortalaması 1,32 ms olarak tespit edilmiştir. Oluşturulacak simülasyonlarda bu ortalama değer baz alınarak hesaplanan I_b akımı değerine göre tepki süresi hesaplanarak simüle edilmiştir.

6.2 Matematiksel Modellemenin Yapımı

Önerilen sistemin tepki süresinin farklı şartlara göre test edilmesi amacı ile yukarıda belirtilen şartlara göre verilen aralıklarda değişken olan direnç değerleri dikkate

alınarak 5000 farklı direnç değeri üretilmiştir. Bu değerlerle Monte Carlo simülasyonu yöntemi kullanılarak 5000 farklı senaryo üretilmiş ve bu durumlara göre sistemin verimliliğini tespit etmek amacı ile PDF ve CDF grafikleri oluşturulmuştur.

Oluşturulan grafikler belirlenen simülasyon teorisine göre vücuttan geçen akım şiddetine bağlı olarak geliştirilen sistemin kaçak akımın algılandığı andan itibaren sistemdeki elektrik enerjisini tamamen kesmesi için gerekli olan tepki süresinin ortam ve vücut koşullarına göre dağılımını göstermektedir.

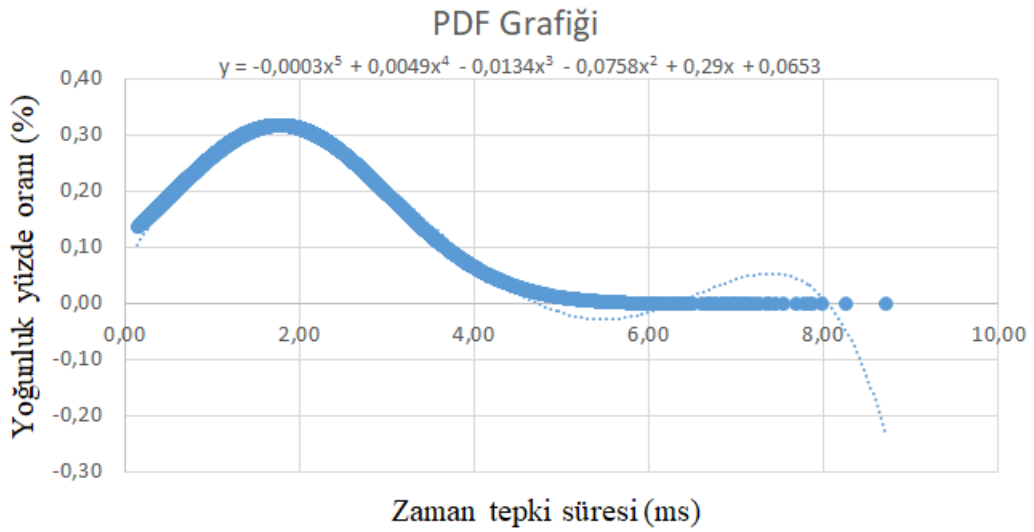
PDF grafiği oluşturulması için kullanılan formül (Eren ve Çıkrıkçı, 2014).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6.2)$$

Formülde;

μ = Tepki süresi için ortalama değeri,

σ = Tepki süresi için standart sapma değerini göstermektedir.



Şekil 6.1: Monte Carlo Simülasyonu Sonucu Oluşturulan PDF Grafiği

Üretilen PDF grafiği polinomsal denklemi;

$$y = -0,0003x^5 + 0,0049x^4 - 0,0134x^3 - 0,0758x^2 + 0,29x + 0,0653 \quad (6.3)$$

Şeklinde olmuştur.

Şekil 6.1’de verilen PDF grafiğinde, değişken şartlara göre farklılık gösteren direnç değerleri X eksenini ve vücut üzerinden geçen akıma göre geliştirilen sistemin tepki

süresi Y eksenini dağılımını görülmektedir. X ekseninde verilen rastgele bir değişken direnç değeri, Y ekseninde tek bir simülasyonda meydana gelen tepki süresi değerinin olasılığını yoğunluk olarak göstermektedir. Grafiğe göre tepki süresi dağılımı olasılığı özellikle 2 ms altında yoğunlaşmaktadır. PDF grafiğinin integrali CDF grafiğini vermektedir.

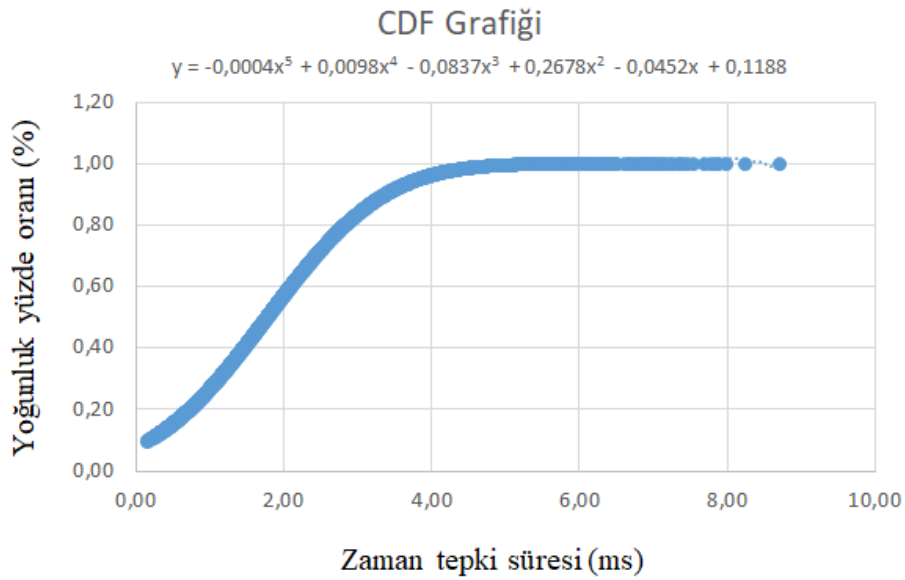
CDF grafiği oluşturulması için kullanılan formül;

$$F(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \quad (6.4)$$

Formülde;

μ = Tepki süresi için ortalama değeri,

σ = Tepki süresi için standart sapma değerini göstermektedir.



Şekil 6.2: Monte Carlo Simülasyonu Sonucu Oluşturulan CDF Grafiği

Üretilen CDF grafiği polinomsal denklemi;

$$y = -0,0004x^5 + 0,0098x^4 - 0,0837x^3 + 0,2678x^2 - 0,0452x + 0,1188 \quad (6.5)$$

şeklinde olmuştur.

Şekil 6.2’de verilen CDF grafiği vücuttan geçen akım değerine göre tepki süresi yoğunluğu dağılımını göstermektedir. Grafikte Y eksenini vücuttan geçen akım değerlerinin yüzdesini gösterirken, X eksenini ise bu değerlere göre tepki süresi yoğunluklarını göstermektedir. Değişken tepki sürelerine karşılık gelen değerden daha düşük veya ona eşit bir değer alma olasılığı kümülatif yoğunluk olarak görülmektedir. Bu dağılıma göre geliştirilen sistemin tepki süresi %60 oranla 2 ms ve altı olarak gerçekleşmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektronik şalter ve kaçak akım röleli hibrit bir sistem tasarlanarak, üretilmiş ve fiziksel olarak test edilmiştir. Önerilen sistem, güç ve lojik devre olarak iki ayrı alt sistemden oluşmaktadır. Bu iki kısım arasında fiziksel bir bağ yoktur. Bu durumda sistemin yüksek güç gerektiren endüstriyel ortamlarda elektrik panolarında güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.

Önerilen sistem, klasik röleli ve literatürdeki diğer sıfır geçiş yöntemi kullanılan diğer detektörlerle maliyet, sıfır geçiş tespit yöntemi ve gecikme süresi açısından karşılaştırılmış ve performansları incelenmiştir. Önerilen sistem gecikme değeri 1,5 μ s ve maliyetinin ise 11,48 \$ olan sıfır geçiş tabanlı bir sistem olarak geliştirilmiştir.

Önerilen sisteme ait zaman tepki süresi analizlerinin yapılabilmesi amacıyla insan vücut modeli elektrik devresi oluşturulmuştur. Oluşturulan modelleme ile 200 farklı durum analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde önerilen sisteme ait zaman tepki süresi ortalama 1,32 ms olarak tespit edilmiştir.

Önerilen sistemin insan vücudunun elektrik akımı ile doğrudan temas etmesi sonucu elektrik akımını kesmesi için gereken tepki süresi incelemesi yapılmış ve matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu matematiksel modellemede monte carlo simülasyonu yöntemi kullanılmıştır. İnsan vücudunun elektrik ile temasında vücut üzerinden geçen akımın izlediği yol, bu akımın şiddeti ve insan vücudunun bu akıma maruz kaldığı süre kişide meydana gelecek sağlık problemleri açısından önemli rol oynamaktadır. Bu akımın şiddeti kişiden kişiye değişken olan vücut direnci ve ortam koşullarının oluşturduğu direnç değerine göre de değişmektedir. Normal şartlar altında insan vücut direnç değeri 100 – 300 K Ω iken deri hassasiyeti, vücudun nem oranı, terleme, zemin kaplaması ve giyilen ayakkabı gibi değişken durumlara göre değişkenlik göstermektedir. Bu değişken direnç değeri ise vücuttan geçen akım şiddetini etkilemektedir. Bu akım şiddetine göre de geliştirilen sistemin elektrik akımını kesmek için devreye girmesi gereken tepki süresi değişmektedir.

Monte carlo simülasyonu yöntemi kullanılarak değişken direnç değerlerine göre farklılık gösteren vücuttan geçen akım şiddeti ve sistem tepki süresi için 5000 farklı senaryo üretilmiştir. Bu senaryolar kullanılarak geliştirilen sistemin tepki süresine göre PDF ve CDF grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde en kötü senaryoda dahi geliştirilen sistemin tepki süresi olasılık dağılımı 2 ms ve altı olarak görülmektedir.

Önerilen sistemin geliştirilmesi için devreye likid kristal ekran (LCD) ekran yerleştirilerek istenilen andaki akım ve gerilim değerleri, farklı parametreler ve bunlara göre istenilen mesajların görüntülenmesi sağlanabilir.

Önerilen sistemin uzaktan kontrol edilebilmesi amacı ile bluetooth veya kablosu ağ (WiFi) modülü devreye eklenerek geliştirilebilir. Önerilen sistem içerisinde yer alan mikrodenetleyicinin içerisindeki yazılım değiştirilerek bu sayılan veya eklenecek farklı eklentilerin kontrolü sağlanabileceği gibi farklı sistemlerle de iletişim kurabilecek hale getirilebilir.

Önerilen sistem piyasadaki mudillerine göre daha düşük maliyet, daha iyi tepki süresi ve hibrid bir sistem olması özellikleri ile alternatif bir ürün olma niteliği taşımaktadır.

7.1 Tartışma

Önerilen sistem, hem elektronik bir şalter hem de elektronik kaçak akım rölesi olarak iki ayrı kısım barındırmaktadır. Bu özelliği ile özgün bir yapıya sahiptir. Ayrıca önerilen sistemin özgün yapısıyla piyasada üretimi olmayan bir alternatif sunulmuştur.

Yapılan analizlerde önerilen sisteme ait gecikme değeri 1,5 μ s olarak tespit edilmiştir. Önerilen sistemin piyasada kullanılan muadil ürünlere göre daha hızlı çalışmakta olduğu gözlemlenmiştir (Liu ve diğ., 2018). Önerilen sisteme ait maliyet 11.48 \$ olarak hesaplanmış ve bu yönüyle piyasadaki muadil ürünlere oranla daha düşük bir maliyete sahip olduğu görülmüştür Fotek (2021); Makel (2021); Microchip (1999); Makel (2020); Sigma Elektrik (2021).

Geleneksel kaçak akım cihazlarında açma aktivasyon değeri 30 ms olarak bilinmektedir. Geleneksel kaçak akım cihazlarında, rölenin enerjilenip kontakları açıp sistemi gerilimsiz bırakacağı zaman dilimi tepki süresidir. Önerilen sistemde

tepki süresi ortalaması 1,32 ms olarak ölçülmüştür. Espinoza ve diğ. (2017) geleneksel kaçak akım rölesi ile yaptıkları çalışmada bu değer 8,81ms'dir. Ölçüm sonuçları; Önerilen sistemin, geleneksel kaçak akım cihazından 6,43 kat daha hızlı çalıştığını göstermiştir. Sistemi çok daha çabuk gerilimsiz bırakmakta ve insan vücudunu elektrik akımından daha çabuk bir sürede ayırmaktadır. Bu da özellikle elektrik çarpası olaylarında kişinin elektrik akımına maruz kaldığı sürenin kısılması açısından hayati önem taşımaktadır. Önerilen sistemin insan hayatını korumak için geleneksel kaçak akım cihazlarından daha fazla etkili olduğu söylenebilmektedir.

Zaman tepki süresi ölçümlerinin sonuçlarının birbirine yakın çıkmasının sebebi akıma maruz kalınan organ ile elektrik akımına maruz kalma süresinin değişmediği olabilmektedir. Hangi organ ile elektriğe temas edilirse edilsin önerilen sistemin enerjii kestiği zaman hemen hemen değişmemektedir. Yapılan çalışmada minimum ortalama değer 1,26 ms olarak bulunmuştur. Rezistif yük arttıkça tepki sürelerinin de arttığı görülmüştür.

Önerilen sisteme ait zaman tepki süresi analizi sonuçlarına göre göre monte carlo simülasyonu yöntemi kullanılarak farklı durum ve koşullar simüle edilmiş, olasılık dağılımı 2 ms olarak tespit edilmiştir. Bu durum önerilen sistemin en kötü koşullar altında bile tepki süresinin 2 ms üzerine çıkmadığını göstermektedir. Bu zaman tepki süre değeri piyasada bulunan muadil sistemlere göre daha hızlıdır.

KAYNAKLAR

- Addabbo, T., Biondi, R., Cioncolini, S., Fort, A., Rossetti F. ve Vignoli, V.** (2014). A Zero-crossing detection system based on FPGA to measure the angular vibrations of rotating shafts, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(12), 3002-3010.
- Akarçay, O.** (2017). Elektrik İşlerinde İş Sağlığı Ve Güvenliği İller Bankası A.Ş.'Ye Ait Bir Örnek Üzerinde İncelenmesi, Uzmanlık Tezi
- Akyasan, M.A. ve Hasırcı, U.** (2016). Farklı Sıfır Geçiş Algılama Devrelerinin Deneysel Performansının İncelenmesi, *Journal of Advanced Technology Sciences*, ISSN:2147-3455, sayı.5.
- Andrews, C.** (2003) Electrical aspects of lightning strike to humans, Fifth edition, *The Lightning Flash, IEEE Press, London*, Sf. 548-564.
- Bachu, R.G., Kopparthi, S., Adapa, B., Barkana, B.D.** (2010). Voiced/Unvoiced Decision for Speech Signals Based on Zero-Crossing Rate and Energy, *Springer Science+Business Media*, DOI 10.1007/978-90-481-3660-5_47
- Bal, G. ve Öztürk, N.** (2009). Sinüsoidal DGM Sıfır Akım Geçişli Evirici İle Rezonans Hatlı Eviricinin Karşılaştırılması, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.
- Baležentis, T. ve Streimikiene, D.** (2017). Multi-criteria ranking of energy generation scenarios with Monte Carlo simulation, *Applied Energy*, 185862-871.
- Bates, M.** (2011). PIC Microcontrollers, *Published by Elsevier Ltd.*, ISBN: 978-0-08-096911-4, Oxford. Sf. 27-90.
- Bayram M. ve İhsu İ.** (2004). Elektrik Tesislerinde Güvenlik ve Topraklama, *UCTEA The Chamber of Electrical Engineers Publishing*, 9753956967, İstanbul.
- Bodur, H.** (2017). *Güç Elektroniği*, Birsen Yayınevi, 5. Baskı. (Sf. 68-112).
- Calvas, R.** (1999). Residual current devices in LV, *Technical Collection Cahier technique Schneider Electric*, sayı.ECT 114.
- Ceylan, H.** (2012). Türkiye'deki Elektrik İletim Tesislerinde Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi, *Electronic Journal of Vocational Colleges*, Mayıs. Sf.98-109.
- Chelvarajah, J., Lakshmanan, R. ve Selvaperumal, S. K.** (2020). Protection System for Industrial Motors using Vibration sensor and Arduino Microcontroller, *International conference on computer vision and machine learning*, doi:10.1088/1742-6596/1228/1/012065.

- Çalamak, M.** (2017). Estimation of flood induced overtopping reliability of dams on Tanyeri Dam case study, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32(3), 965-975.
- Çengelci, B.** (2012). Güç Sistemlerinde Sıfır Geçiş Ve Taylor Yöntemleri Kullanılarak Frekans Kestirimi, *Selçuk-Teknik Dergisi*, ISSN 1302-6178 Cilt 11, Sayı:3.
- Dalziel C. ve Berkeley F.** (2011) Types and Effects of Electric Current, *Electrical Engineering*, 190, 72-80.
- Das, J. C.** (2012). *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*, John Wiley & Sons, New Jersey, ISBN 978-1-118-16381-8. sf.496-531.
- Dietrich, H. P. ve Feige, L.** (2010). Smart Adaptive Relay Triggering (SART®) and Electromechanics: A Life-Extending Synergy, *elektronikinformatiönen, EL-info EXTRA*, Nisan.
- Elliott Sound Products.** (2019). Zero crossing detectors and comparators, <<https://sound-au.com/appnotes/an005.htm>>, Aralık. alındığı tarih: 28.03.2021.
- Eren, Ö. ve Çıkrıkçı, M.** (2014). Estimation of Unexpected Operational Losses with Monte Carlo Simulation, *Çankırı Karatekin University, Journal of the Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 4(2), 349-361.
- Espinoza, C., Villavicencio, F., Cuzco, O., Aguilar J., Ayala E. ve Morales J.** (2017). Time Response Laboratory Analysis for Residual Current Devices, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference*. 978-1-5386-3312-0/17.
- Fabio, F.** (2012). High-Frequency Behavior of Residual Current Devices”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 3.
- Florea, L., Flore C., Vranceanu, R. ve Vertan, C.** (2012). Zero-crossing based image projections encoding for eye localization. *20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Bucharest, Romania, 27-31 Ağustos.
- Gülbahçe, M. O., Yılmaz, A. E., Kocabaş, D. A.,** (2017). Microcontroller Based Wye-Delta Starter and Protection Relay for Cage Rotor Induction Motor, *IU-JEEE*, Vol. 17(1), 3227-3232
- Güner, R.** (2013). Elektrikte İşçi Sağlığı ve Güvenliğinin Temel Unsuru: Kaçak Akım Röleleri, *Elektrik Mühendisliği*, sayı.447.
- Hacıismailoğlu, M. C.** (2011). *Nano-Kristal Toroid Manyetik Çekirdeklerde Hysteresis Eğrisinin Modellenmesi*, (doktora tezi), Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- IEEE 1584.** (2002). IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations.
- Irmak, E., Colak, I., Kaplan, O. ve Guler, N.** (2011). Design and application of a novel zero-crossing detector circuit, *Proceedings of the 3rd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG2011)*, sf.1-4, 11-13 May.

- Jobst, S. ve Bierl, R.** (2014). A Comparison of correlation and zero-crossing based techniques in ultrasonic measurements, *Applied Research Conference*, 362-267.
- Kale, H.** (2017). Kaçak Akım Rölesi, <<http://calismabarisi.com/is-guvenligi/is-guvenligi-is-guvenligi/konular/elektrik/kacak-akim-rolesi-1-calisma-prensibi-dezavantajlari/>>, alındığı tarih: 02.04.2021.
- Karacasu, Ö. ve Hocaoğlu, M. H.** (2010). Tek Faz Geri Kapamada Ark Arızasının ADALINE tabanlı Algılanması, *SIU2010 - IEEE 18.Sinyal işleme ve iletişim uygulamaları kurultayı*, doi:10.1109/SIU.2010.5653236.
- Kaya, B. ve Kaya Y.** (2019). Elektrik Kaynaklı Yanma ve Yangın, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, BUFBFD 2-1.
- Kuppambatti, J. ve . Kinget P.** (2013). A low power zero-crossing pipeline-SAR ADC with on-chip dynamically loaded pre-charged reference, in Proc. *IEEE Eur. Solid-State Circuits Conf. (ESSCIRC)*, pp.113-116.
- Laverty, G.** (2001). Measuring The Performance Of Fabric Systems To Protect Against The Thermal Effects Of Electric Arcs, *IET Digital Library*.
- Liu, J., Liu, Y., Zhuang, Y. ve Wang, C.** (2018). Analysis to Input Current Zero Crossing Distortion of Bridgeless Rectifier Operating under Different Power Factors, *Energies*, 11, 2447, doi:10.3390/en11092447.
- Marmidis G., Lazarou S. ve Pyrgioti E.** (2008). Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation, *Renewable Energy*, 33(7), 1455-1460.
- Massimo, M.** (2010). Shock Hazard in the Presence of Protective Residual-Current Devices, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 46, No. 4.
- Megep,** (2017). Mikro İşlemci Ve Mikrodenetleyiciler, *Milli Eğitim Bakanlığı Megep Modülleri*, Ankara.
- Megep,** (2012). Koruma Röleleri, *Milli Eğitim Bakanlığı Megep Modülleri*, Ankara.
- Mooney, C. Z.** (1997) Monte Carlo Simulation, *SAGE Publications*, Sf. 60-85.
- Musayev, E.** (2000). *Optokuplörler Ve Uygulamaları*, Birsen Yayınevi, İstanbul. (Sf. 32-127).
- NESC C2-2017.** (2017). National Electrical Safety Code.
- NFPA 70E.** (2015). Standard for Electrical Safety in the Workplace.
- Nuran C.** (2016). Comparison of Anti-Static Footwears' Electrical Resistance Test Between Under Laboratory Conditions and Under Work Conditions while They are Used, *Occupational Health and Safety Directorate Thesis for Occupational Health and Safety Expertise*, Ministry of the Labor and Social Security, Ankara.
- ON Semiconductor,** (2006). *Thyristor Theory and Design Considerations Handbook*, HBD855/D, Revision 1, November. Sayfa. 22-89.
- Ozsoy, K., Aksoy, B., Aksoy, B., İnan, S. A.** (2019). Mikrodenetleyiciler Ve Programlama, *IKSAD Publishing House*, ISBN: 978-625-7029-34-6

- Özdemir, A.**, (2020). *Endüstriyel Elektronik (Güç Elektroniği)*, Gece Kitaplığı. Ankara. Sf.14-31.
- Özder, Ö.** (2020). *Kablosuz Güç Transferinde Kullanılan Bobin Yapılarının İncelenmesi*, Balıkesir, (yüksek lisans tezi), Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Paker, S.** (2017). Elektrik İç Tesislerindeki Yangından Korunma Yöntemleri, *Elektrik Mühendisliği*, sayı.462, (Sf. 28-32).
- Papadopoulos, C. E. ve Yeung H.** (2001). Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method, *Flow Measurement and Instrumentation*, 12 (4), 291-298.
- Pawel, C.** (2017). Examination of the impact of design of a Residual Current Protective Device on the release frequency range, *2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, 78-1-5386-1528-7/17.
- Periyasamy, V. ve Pramanik, M.** (2017). Advances in Monte Carlo Simulation for Light Propagation in Tissue, *IEEE Reviews In Biomedical Engineering*, 10.
- Porta C. R., Escriva, G., Carrasco, F. J. C., Roldán, B. C.** (2014). Nuisance tripping of residual current circuit breakers: a practical case, *Electr. Power Syst. Res.*, 106. 180–187, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.07.020>.
- Ralph, H. L.** (1987). Pressures Developed by Arcs, *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Rowlan, J.** (2000). Differential line receivers function as analog zero-crossing detectors. *Electronic Design*. Sf.142.
- Salvatierra, B., Diego, G., Dominguez, H. ve Morales, J. A.** (2015). Analysis of electric shock human safety to residential, industrial and medium voltage levels, *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Kasım 10.1109/ROPEC.2015.7395085, Sf. 4-6. Ixtapa, Mexico.
- Shin, S.** (2014). *A Low-Power High-Speed High-Resolution Zero-Crossing Based Pipelined Analog to Digital Converter*, University of Washington, (doktora tezi), Washington.
- Silva, A. M. L.** (2019). Risk Assessment in Probabilistic Load Flow via Monte Carlo Simulation and Cross-Entropy Method, *IEEE Transactions On Power Systems*, 34(2), 1193-1202.
- Soliman, S. S.** (1990). Automatic modulation classification using zero crossing, *IEE Proceedings*, Vol. 137, sayı. 6.
- Stanislaw, C., ve Kornel, B.** (2019). Verification of safety in low-voltage power systems without nuisance tripping of residual current devices, *Elsevier, Electric Power Systems Research*, 172, Sf. 260-268.
- Sun, L.** (2019). A new method for sensorless control of brushless DC motor. *Cluster Computing*. 22(02), 2793-2800.
- Şimşek, H ve Aydoğdu, M .** (2020). Endüstriyel İşlerde Yangın Sistemlerinin İş Sağlığı ve Güvenliğinde Etkileri . *İSG Akademik* , 2 (1) , sf. 35-45.

- Texas Instruments.** (2019). Zero-Crossing Detection with False Trigger Avoidance, *Shubham Sahasrabudhe, Data Converter Products*, SBAA356. June.
- Texas Instruments.** (2018). Zero Crossing Detection Using Comparator Circuit, *Analog Engineer's Circuit: Amplifiers*, SNOA999–July.
- Türkuçar, D.** (2019). Elektrik Ark Tehlikeleri Ve Elektrik Ark Patlamalarına Karşı Korunma, *Yangın ve Güvenlik*, Ekim, sf. 42-48, <www.yanginguvenlik.com.tr>, alındığı tarih: 04.04.2021.
- Tüzün, D., Üçkol, H. İ. ve İlhan, S.** (2020). Investigation of Correlation Between Temperature and Leakage Current in HTV Silicone Rubber by Inclined Plane Tests, *2020 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, pp. 10-14, doi: 10.1109/ELECO51834.2020.00010.
- Utegulov B. B., Utegulov, A. B., ve Uakhitova, A. B.** (2016). Development of Method to Improve Efficiency of Residual Current Device under 1000V on Excavators of Mining Enterprises, *Journal of Mining Science*, Vol. 52, No. 2, pp. 325–331, 1062-7391.
- Üstünel, M., Altın, M. ve Kızılgedik, M.** (2001) Endüstriyel Elektrik, MEB Yayınları, Ankara.
- Vainio, O. ve Ovaska, S. J.** (2002). Adaptive lowpass filters for zero-crossing detectors, *Proceedings of the 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2002)*, 2, 1483–1486, 5–8 Kasım.
- Vainio, O. ve Ovaska, S. J.** (1996). Digital filtering for robust 50/60 Hz zero-crossing detectors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 45(2), 426–430.
- Valiviita, S.** (1998). Neural network for zero-crossing detection of distorted line voltages in weak AC-systems, *Proceedings of the Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC1998)*, 1, 280–285, 18–21 Mayıs.
- Vorobyov, M. ve Vitols, K.** (2014). Low-Cost Voltage Zero-Crossing Detector for AC-Grid Applications, *Electrical, Control and Communication Engineering*, sayı.6. doi: 10.2478/ecce-2014-0015.
- Wall, R. W.** (2003). Simple methods for detecting zero crossing, *Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2003)*, 3, 2477–2481.
- Yağmırlı, M. ve Tozan, H.** (2020). *Elektrikle Çalışmalarda İş Sağlığı ve Güvenliği*, Beta Basım Yayım. 6. (Sf. 28-132).
- Yavuz, A. H.** (1998). Kaçak Akım Koruma Şalterleri, *EMO Elektrik Mühendisliği*, sayı.24.
- Yılmaz, Y. ve Özbey Ş.** (2003). Kaçak Akım Koruma Cihazları, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*
- Yurtçu, A.** (2019) Investigation of Work Accidents in Vocational and Technical High Schools, , *Universal Journal of Educational Research*, UJER4-19513048, 7(5): 1189-1197.

- Zhang, X. ve Zhang, H.** (2011). The accelerated life experiment study of Solid State Relay, *2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, Xi'an, China, pp. 349-351, doi: 10.1109/ICQR2MSE.2011.5976628.
- Zheng G., Zhang, Z.** (2012). A Novel Intelligent Load Control Switch Based on Dynamic Compensation Method for Current Zero-crossing Point, *Advanced Materials Research*, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.4717
- Zhou, J., Aghili, N., Ghaleini, E. N., Bui, D. T., Koopialipoor, T. M. M. ve Koopialipoor, M.** (2020) A Monte Carlo simulation approach for effective assessment of fyrock based on intelligent system of neural network, *Engineering with Computers* 36, 713–723.

İnternet

- Alldatasheet.** (2006). *Triyak BTB 24800 Kataloğu*. inceleme: 14.04.2021, adres: https://www.alldatasheet.com/view_datasheet.jsp?Searchword=BTB24800
- Arduino Playground.** (2018). *AC Phase Control*. inceleme: 14.04.2021, adres: <https://playground.arduino.cc/Main/ACPhaseControl/>
- Behaviour modification.** (2010). *Kaçak Akım Rölesi*. inceleme: 02.04.2021, adres: www.sigmaelektrik.com/tr/images/resim/kaks.pdf
- Bilgen, Y.** (2019). *Toroid Bobin Çeşitleri Ve Toroid İndüksiyon Hesabi*. inceleme: 03.04.2021, adres: <https://yusufbilgen.wordpress.com/2017/04/14/toroid-bobin-cesitleri-ve-toroid-induksiyon-hesabi/>
- Controlled Power Company.** (2011). *SCR Timing and The Zero Crossing*. inceleme: 30.03.2021, adres: <https://www.controlledpwr.com/wp-content/uploads/2018/07/Zero-Crossing.pdf>
- Eksen.** (2017). *Fotek Ürün Kataloğu*. inceleme: 18.04.2021, adres: <http://www.fotek.com.tr/dokumanlar/eksen-fotek-katalog.pdf>
- Eksen.** (2017). *SSR Nedir? Nasıl Çalışır?*. inceleme: 04.04.2021, adres: <https://www.fotek.com.tr/ssr-nedir-nasil-calisir/>
- Electronics Tutorials.** (2020). *Triac Tutorial*. inceleme: 12.04.2021, adres: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/triac.html>
- Electronics Tutorials.** (2020). *Triyak'lı AC Kontrol Devreleri*. inceleme: 13.04.2021, adres: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/solid-state-relay.html>
- Erk Mühendislik.** (2011). *Kaçak Akım Rölesi*, inceleme: 02.04.2021, adres: http://www.trerk.com/teknik/4/kacak_akim_rolisi/index.html
- Fairchild Semiconductor.** (2001). *MOC 3041 Entegre Katoloğu*. inceleme: 13.04.2021, adres: <http://www.vandelogt.nl/datasheets/moc3043.pdf>

- Farnell.** (2021). *Zero Crossing Detector*. inceleme: 07.04.2021, adres: <https://uk.farnell.com/zero-crossing-detector-definition>
- Fotek.** (2021). *Solid State Relay Ürün Kataloğu*. inceleme: 30.03.2021, adres: <https://www.fotek.com.tw/en-gb/product-category/143>
- Güner, R.** (2013). *Elektrikte İSG: Kaçak Akım Röleleri*. inceleme: 02.04.2021, adres: <https://www.isguvenligi.net/elektrikte-isg-kacak-akim-roleleri/>
- Makel.** (2020). *Ürün Kataloğu*. inceleme: 18.04.2021, adres: <http://www.makel.com.tr/tr/cozum-merkezi/katalog-ve-brosurler>
- Microchip.** (1999). *PIC 12C508 Mikrodenetleyici Kataloğu*. inceleme: 14.04.2021, adres: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40139e.pdf>
- Resmi Gazete.** (1984). *Elektrik İç Tesisat Yönetmeliği*. inceleme: 28.03.2021, adres: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/yonetmelik/7.5.9721.doc>
- Resmi Gazete.** (2012). *İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu*. inceleme: 28.03.2021, adres: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.6331.pdf>
- Resmi Gazete.** (2006). *Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu*. inceleme tarihi: 28.03.2021, adres: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5510.pdf>
- Şahinoğlu, R.** (2018). *Optokuplör (Optocoupler) Nedir, Nasıl Kullanılır*. inceleme: 13.04.2021, adres: <https://www.kaizen40.com/optokuplor-optocoupler-nedir-nasil-kullanilir/>
- SIEMENS.** (2019). *İş Güvenliğinde Ark Flaş Simülasyonlarının Önemi ve Gerekliliği*. inceleme: 04.04.2021, adres: <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/is-guvenliginde-ark-flas-simulasyonlarinin-onemi-ve-gerekliligi--siemens/22054#ad-image-0>
- Sigma Elektrik.** (2021). *2021-1 Fiyat Listesi*. inceleme: 01.05.2021, adres: <https://sigmaelektrik.com/fiyat-listesi/>
- Snubberless and Standard.** (2006). *25A Triacs Data Sheet*. inceleme: 18.04.2021, adres: https://www.alldatasheet.com/view_datasheet.jsp?Searchword=BTB24800
- Sosyal Güvenlik Kurumu.** (2019). *2019 Yılı İstatistikleri*. inceleme: 28.03.2021, adres: http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari
- Url-14 3eelectrotech.** (2018). *Solid-State Röleler, Kullanım Alanları Ve Mekanik Röleler İle Karşılaştırılması*. inceleme: 04.04.2021, adres: <http://www.3eelectrotech.com.tr/uncategorized/137-solid-state-roleler-kullanim-alanlari-ve-mekanik-roleler-ile-karsilastirilmesi/>
- Whitfield, John.** (n.d.). *Electricians Guide Book to the 17th edition Wiring Regulations, First edition*. inceleme: 29.03.2021, adres: <http://www.tlcdirect.co.uk/Book/5.1.1.htm>

World Place Safety Awareness Council. (2018). *Understanding “Arc Flash”*.
inceleme: 04.04.2021, adres:
https://www.osha.gov/sites/default/files/2018-12/fy07_sh-16615-07_arc_flash_handout.pdf

8 Makel. (2021). *Şalt ve Endüstriyel Ürünler Kataloğu*, inceleme: 30.03.2021, adres:
<http://makel.com.tr/tr/salt-ve-endustriyel-urunler>

ÖZGEÇMİŞ

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans** : 2000, Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Öğretmenliği
- **Yüksek lisans** : 2015, Gedik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER

- 2018 : Amasya Şehit Gültekin Tırpan Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Müdür Yardımcısı
- 2015 : A Sınıfı İş Güvenliği Uzmanı
- 2008 – 2010 : Amasya Endüstri Meslek Lisesi, Müdür Yardımcısı
- 2006 – 2008 : Amasya İl Milli Eğitim Müdürlüğü Orta Öğretim Projesi İl Koordinatörü
- 2003 – 2008 : Amasya Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Elektronik Öğretmeni
- 2003 – 2010 : Amasya Üniversitesi Amasya Meslek Yüksek Okulu Öğretim Görevlisi (Dışarıdan)
- 2000 – 2003 : Yakacık Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Öğretmeni Kartal/İST
- 1999 – 2002 : Akademi Bireysel Gelişim Şirketi Bilgisayar Sorumluluğu (Part Time) Bağlarbaşı / İstanbul

HAZIRLADIĞI VE YÖNETTİĞİ PROJE VE ÖDÜLLER

Yıl	Program	Proje No ve Adı	Bütçe
2015	TÜBİTAK Enerji Verimliliği Programı	Su Tasarrufu İle Enerji Verimliliği	Türkiye 3.lüğü
2019	Orta Karadeniz Kalkınma Ajansı Mesleki ve Teknik Eğitimin Geliştirilmesi Mali Destek	TR83/19/MES/0003 Oka İle El Ele Nitelikli Mesleki Eğitime	516.408,05 TL

	Programı		
2019	Ulusal Ajans KA102	2019-1-TR01-KA102-064153 Avrupa da Enerji Verimliliğinde Yeni Yöntemler Stajı	35.825 Avro
2018	Ulusal Ajans KA102	2018-1-TR01-KA102-052528 Binalarda Yalıtım Teknikleri Ve Enerji Verimliliği	36.760 Avro
2016	Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İKG Birimi	EuropeAid/135743/ID/ACT/TR/0735 Engelli Bireylerin Mozaik Mermer İşleme Sektöründe İstihdamı Projesi	153.400,55 Avro
2012	Ulusal Ajans LDV	Tarımsal Üretimde Yeni Ufuklar Gösterilmesi	62.000 Avro
2011	Merkezi Finans ve İhale Birimi	TR07H2.01-02/318 Doğalgazın Kaynağında İstihdam Var	300.000 Avro
2010	Ulusal Ajans LDV	Avrupa'da Staj Eğitimi	65.000 Avro
2009	Ulusal Ajans LDV	2008-1-TR-LEO03-01372 Özürümlülerin Mesleki Eğitimi Projesi (Almanya)	17.400 Avro
2008	Ulusal Ajans LDV	Yeni Nesil Araçlarda Elektronik kontrol Ünitesinin İncelenmesi (Almanya)	13.320 Avro
2007	Yerel Kalkınma Hibe Programları	Nitelikli Yapı Üretici Elemanı Yetiştirme (Amasya)	189.000 Avro
2007	Yerel Kalkınma Hibe Programları	Deprem Lojistik Merkezi (Amasya)	190.000 Avro

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

- Yağımlı, M. ve Yurtçu, A., 2020. Development of a Hybrid System with Electronic Switch and Residual Current Relay, *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(4): 467-472, DOI: 10.7240/jeps.703025.
- Yurtçu, A., Yağımlı, M. ve Tozan, H., 2020. A Low Cost Hybrid System Of A Zero Crossing Switch And Leakage Current Relay, *International Conference on Advanced Technologies, 9th International Conference, ICAT'20*, E-ISBN: 978-625-44427-1-1, August 10-12, Istanbul, Turkey.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

- Yurtçu, A., 2019. Investigation of Work Accidents in Vocational and Technical High Schools, *Universal Journal of Educational Research* 7(5): 1189-1197, <http://www.hrpub.org> DOI: 10.13189/ujer.2019.070504.