

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÇAK GERİLİM TOPRAKLAMA ŞEBEKELERİNİN
ANALİZİ VE SİMÜLASYONU**

Elektrik Mühendisi Sedat Sertan ERDEN

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Selim AY

Selim AY
Prof. Dr. Celal KOCATEPE
Doç. Dr. Özcan Kalenderli

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTAMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2 DOKUNMA GERİLİMİ.....	4
2.1 Dokunma Gerilimine Karşı Koruma.....	5
2.1.1 Direkt Dokunmaya Karşı Koruma.....	5
2.1.2 Endirekt Dokunmaya Karşı Koruma.....	5
3. ELEKTRİK TESİSLERİNDE TOPRAKLAMA.....	7
3.1 Genel Açıklama.....	7
3.2 Topraklamanın Sınıflandırılması.....	7
3.2.1 Topraklamanın Amaçlarına Göre Sınıflandırılması.....	7
3.2.1.1 Koruma Topraklaması.....	7
3.2.1.2 İşletme Topraklaması.....	9
3.2.1.3 Fonksiyon Topraklaması.....	10
3.2.2 Topraklamanın Şekline Göre Sınıflandırılması.....	11
3.3 Topraklayıcı Çeşitleri.....	11
3.3.1 Konuma Göre Topraklayıcılar.....	11
3.3.2 Biçim ve Profile Göre Topraklayıcılar.....	11
3.4 Topraklayıcı Türleri.....	12
3.4.1 Şerit Topraklayıcılar.....	12
3.4.2 Çubuk Topraklayıcı.....	13
3.4.3 Levha Topraklayıcı.....	14
3.5 Alçak Gerilim Şebeke Şekilleri ve Korumanın Koordinasyonu.....	15
3.5.1 TN - Tipi Şebeke.....	16
3.5.1.1 TN-S Sistemi.....	16
3.5.1.2 TN-C Sistemi.....	17
3.5.1.3 TN-C-S Sistemi.....	17
3.5.2 TT - Tipi Şebeke.....	19
3.5.3 IT - Tipi Şebeke.....	22
3.6 Hata Akım Koruma Düzenineğinin Kullanılması.....	23
3.7 Sistemde Hata Olması Hali.....	24
3.7.1 TN Sistemde Arıza Durumu ve Güvenlik.....	24
3.7.2. TT Sistemde Arıza Durumu ve Güvenlik.....	26
3.8 Nötr Üzerine Düşen Gerilim Değeri.....	27
3.8.1 TN Sistemde Nötr Üzerine Düşen Gerilim Değeri.....	27
3.8.2 TT Sistemde Nötr Üzerine Düşen Gerilim Değeri.....	28

4.	ELEKTRİK TESİSLERİNDE HARMONİKLER ve ETKİLERİ.....	30
4.1	Giriş.....	30
4.2	Harmoniklerin Oluşum Nedenleri.....	30
4.3	Harmonikli Devreler.....	32
4.3.1	Sinüsoidal Beslemeli Nonlineer Devreler.....	32
4.3.2	Nonsinüsoidal Beslemeli Lineer Devreler.....	32
4.3.3	Nonsinüsoidal Beslemeli Nonlineer Devreler.....	33
4.4	Başlıca Harmonik Kaynakları.....	33
4.4.1	Anahtarlama Güç Kaynakları.....	34
4.4.2	Bilgisayarlar.....	34
4.4.3	Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları.....	35
4.4.4	Elektronik Balastlar.....	35
4.5	Harmonik Bileşenlere Ait Temel Formüller.....	36
4.5.1	Toplam Harmonik Distorsiyon (THD).....	37
4.5.2	Toplam Talep Distorsiyonu (TTD).....	38
4.6	Uluslararası Sınırlamalar.....	38
4.7	Harmonik Standartları.....	39
4.8	Harmonik Ölçümleri.....	41
4.9	Direnç, Endüktif ve Kapasitif Reaktansın Harmonikle Değişimi.....	41
4.9.1	Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi.....	41
4.9.2	Harmoniklerin Reaktanslar Üzerine Etkisi.....	42
4.10	Harmonik Bileşenlerinin Faz Sırası.....	43
4.11	Harmoniklerin Modellenmesi.....	44
4.12	Süperpozisyon Teoremi.....	46
4.13	Harmonikli Durumda Sistemde Meydan Gelen Arızanın İncelenmesi.....	47
4.13.1	Faz Dağılımını Dengeli Olması Halinde.....	47
4.13.2	Faz Dağılımını Dengesiz Olması Halinde.....	48
4.14	Harmonikli Durumda Nötr Üzerine Düşen Gerilimin İncelenmesi.....	49
4.14.1	Harmonikli Nötr Akımlarının Sebep Olabildiği Problemler.....	51
4.14.2	Nötr İletkeninden Geçen Harmonikli Akımın Şebeke Üzerindeki Etkinliğinin Analizi.....	51
5.	SAYISAL UYGULAMA.....	53
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER.....	70
	KAYNAKLAR.....	71
	EKLER	
Ek 1	Sayısal Uygulama Matlab Uygulama Sonuçları.....	72
	ÖZGEÇMİŞ.....	92

SİMGE LİSTESİ

U-V-v	Gerilim
I-i	Akım
X	Reaktans
R	Omik Direnç
Z	Empedans
ρ	Özgöl toprak direnci
S	Görünen güç
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
D	Distorsiyon gücü
f	Frekans
$\cos\phi$	Güç faktörü
l	Uzunluk

İndisler

dc	doğru akım
1	Temel bileşen
n	harmonik derecesi
f	Arıza
F	fark
L	Endüktif
C	Kapasitif
h	harmonikli bileşen

KISALTMA LİSTESİ

dc	direct current
ac	alternative current
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon
TTD	Toplam Talep Distorsiyonu
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker
IEC	International Engineering Committee
EN	European Norms
PE	Protection Earth
PEN	Protection Earth Neutral



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Hata gerilimi ile dokunma geriliminin açıklanması.....	4
Şekil 3.1	Şerit topraklayıcıların çeşitli şekilleri.....	13
Şekil 3.2	Çubuk topraklayıcı.....	13
Şekil 3.3	Levha topraklayıcı.....	14
Şekil 3.4	Alçak gerilim şebekelerinin ana grupları.....	15
Şekil 3.5	TN-S- tipi şebeke.....	17
Şekil 3.6	TN-C- tipi şebeke.....	17
Şekil 3.7	TN-C-S- tipi şebeke.....	18
Şekil 3.8	TN-C- tipi şebekede tüketicilerin PEN hattı ile korunması.....	18
Şekil 3.9	TT- tipi şebeke.....	19
Şekil 3.10	TT- tipi şebekede cihazların topraklanması.....	21
Şekil 3.11	IT- tipi şebeke.....	23
Şekil 3.12	Hata akımı koruma anahtarlarının çeşitli şebeke tiplerine uygulanma şekilleri.....	24
Şekil 3.13	TN Sistemde arıza halinde hata akımının izlediği yol.....	25
Şekil 3.14	TN Sistemde arıza devresi.....	25
Şekil 3.15	TT Sistemde arıza haline hata akımının izlediği yol.....	26
Şekil 3.16	TT Sistemde arıza devresi.....	26
Şekil 3.17	TN-C-S Sistemde nötr üzerine düşen gerilim.....	28
Şekil 3.18	TN-C-S Sistemde akım yolu modeli.....	28
Şekil 3.19	TT Sistemde nötr üzerine düşen gerilim.....	29
Şekil 3.20	TT Sistemde akım yolu modeli.....	29
Şekil 4.1	Lineer elemanın uç karakteristiği.....	30
Şekil 4.2	Nonlineer elemanın uç karakteristiği.....	31
Şekil 4.3	Lineer elemanın akım-gerilim dalga şekilleri.....	31
Şekil 4.4	Nonlineer elemanın akım-gerilim dalga şekilleri.....	31
Şekil 4.5	Sinüsoidal şebekeye bağlı nonlineer yük.....	32
Şekil 4.6	Nonsinüsoidal beslemeli lineer yük.....	32
Şekil 4.7	Nonsinüsoidal beslemeli nonlineer devre.....	33
Şekil 4.8	Harmonik üreten elemanlar.....	33
Şekil 4.9	Lineer güç kaynağı.....	34
Şekil 4.10	Anahtarlamalı güç kaynağı.....	34
Şekil 4.11	Bilgisayarlar için tipik akım dalgası.....	35
Şekil 4.12	Fluoresant lambalar için tipik akım dalgası.....	35
Şekil 4.13	Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi.....	39
Şekil 4.14	Nonlineer yük içeren bir enerji dağıtım hattı.....	44
Şekil 4.15	Tek hat harmonik bileşen modelleri.....	45
Şekil 4.16	Nonsinüsoidal gerilim kaynağı eşdeğeri.....	46
Şekil 4.17	Nonsinüsoidal beslemeli devrenin eşdeğeri.....	46
Şekil 4.18	3. harmonik için TN Sistemde arıza devresi modeli.....	47
Şekil 4.19	5. harmonik için TT Sistemde arıza devresi modeli.....	47
Şekil 4.20	L1, L2, L3 faz gerilimlerinin gün içindeki değişimleri.....	48
Şekil 4.21	Faz gerilimlerinin dengesiz olması halinde gövdeye kaçak akım senaryoları.....	49
Şekil 4.22	Üç fazlı dengeli nonsinüsoidal akımlar halinde nötr akımının meydana gelmesine bir örnek.....	50
Şekil 5.1	Üç katlı bir binada nötr ile toprak arasındaki gerilimlerin hesaplanmasına ilişkin devre.....	54
Şekil 5.2	Üç katlı bir binada nötr ile toprak arasındaki gerilimlerin hesaplanmasında harmoniklerin etkisini gösteren devre.....	56

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1	Kaynak ve yüke göre meydana gelen harmonik bileşenler.....	32
Çizelge 4.2	Çeşitli ülkeler için THD değerleri.....	39
Çizelge 4.3	Konutlar ile ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri.....	40
Çizelge 4.4	Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3.sınıf elemanlar).....	40
Çizelge 4.5	Konutlarla ilgili alçak ve orta gerilim şebekeleri için harmonik distorsiyon limitleri.....	40
Çizelge 4.6	Çeşitli gerilimler için düzeltme faktörleri ile direnç değerlerinin belirlenmesi.....	42
Çizelge 5.1	Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	60
Çizelge 5.2	Temel akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	60
Çizelge 5.3	Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	61
Çizelge 5.4	Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	61
Çizelge 5.5	Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	61
Çizelge 5.6	Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	61
Çizelge 5.7	Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	62
Çizelge 5.8	Temel akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	62
Çizelge 5.9	Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	62
Çizelge 5.10	Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	62
Çizelge 5.11	Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	62
Çizelge 5.12	Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	63
Çizelge 5.13	Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	63
Çizelge 5.14	Temel akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	63
Çizelge 5.15	Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	63
Çizelge 5.16	Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	63
Çizelge 5.17	Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	64
Çizelge 5.18	Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	64
Çizelge 5.19	Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	64
Çizelge 5.20	Temel akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	64
Çizelge 5.21	Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri.....	64
Çizelge 5.22	Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri.....	65

ÖNSÖZ

Alçak gerilim topraklama şebekelerinin analizi ve simülasyonu konusunda yapılan bu tez, spesifik olarak nötr hattı üzerine düşen gerilim değerin değışimini uygulamalı olarak içermektedir.

Bu uygulamaya geçilmeden ön bilgi olarak ve konu bütünlüğünün sağlanması amacı ile alçak gerilim tesislerinde topraklama ve elektrik tesislerinde harmonikler adlı konular için genel bilgiler verilmiştir.

Alçak gerilim tesislerinde topraklama bölümlerinde, bu tesislerin kullanılma amaçlarını, yapısının ve değışik topraklama şebekeleri ile bunların hata halinde davranışları ve nötr hattı üzerine düşen gerilimin değışimi anlatılmıştır.

Harmoniklerin oluşum nedenleri, harmonik kaynakları, harmoniklerin modellenmesi ile harmoniklerin nötr hattı üzerindeki etkileri elektrik tesislerinde harmonikler bölümünde anlatılmıştır.

Bu iki ana konunun birleştirilmesi ile yapılan uygulama kısmında ise nötr hattı üzertinde düşen gerilim değerin çeşitli parametrelerin değışimi sonucunda ortaya çıkan durumlar incelenmiştir.

Bu tezin hazırlanmasında bana büyük katkıları olan ve her konuda yardımını esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. Selim AY'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu yaşa kadar ve bu çalışma sırasında benim her türlü derdimi çeken aileme de teşekkür eder her zaman yanımda olmalarını dilerim.

ÖZET

Alçak gerilim topraklama şebekeleri analiz edilmiş ve uygulama olarak bir alçak gerilim topraklama şebekesinde nötr hattı üzerine düşen gerilim değeri çeşitli parametreler kullanılarak incelenmiş ve simülasyonu yapılmıştır.

Bu analizin yapılmasından önce, ilk olarak alçak gerilim topraklama şebekelerinin yapısı, çalışması ve arıza hallerinde davranışları hakkında bilgi verilmiştir. Burada topraklama şebekelerinin kullanılma amaçları, kullanılan topraklayıcı çeşitleri ve alçak gerilim topraklama şebeke şekilleri (TT, TN, IT şebekeler) hakkında açıklamalar bulunmaktadır. Daha sonra topraklama şebekelerinde arıza halinde sitemin davranışı ve nötr üzerine düşen gerilim değerinin değişimi hakkında ön bilgi verilmiştir.

Sonraki kısımda harmoniklerin oluşum nedenleri, başlıca harmonik kaynakları, temel formüller, harmoniklerin modellenmesi (direnç ve reaktansların harmonikli durumlarda davranışları) ve standartları verilmiştir. Bu bilgiler topraklama şebekeleri ile sentez edilerek harmonikli şebekelerde arıza hali ve nötr üzerine düşen gerilim değeri için açıklamalar verilmiştir. Bu durumlarda nötr üzerinden geçen harmonikli akımın şebekeye etkileri incelenmiştir.

Son olarak verilen bu genel bilgiler ışığında Matlab® programında bir model oluşturulmuştur. Bu model, nötr üzerinden geçen akım durumu (temel bileşen veya temel bileşen ve harmonikli bileşen), kesit değeri (2.5 mm^2 veya 4 mm^2), yüklenme durumu (tam yükte veya yarı yükte), nötr hattının uzunluğu gibi parametreler kullanılarak değişik durumlar için analiz edilmiş ve Matlab® uygulama sonuçları alınmıştır. Bu uygulama sonuçları kullanılarak nötr üzerine düşen gerilim değerinin değişimi çizelgeler haline getirilmiş ve yüzde değişimleri de bu çizelgelerde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Topraklama, harmonikler, nötr-toprak gerilimi, MATLAB, AG Topraklama tipleri

ABSTRACT

Low voltage earthing systems have been analysed and voltage value in neutral line has been researched and simulated with different parameters for practice at a low voltage earthing system.

Before this analysis, first of all was informed about structure, working and fault behaviour of low voltage earthing systems. There were explanation about low voltage earthing systems' purpose and earthing materials and low voltage earthing systems (TT, TN and IT systems).

Then preliminary informations were given fault behaviour and change in the value of voltage on neutral line at low voltage earthing systems.

After this part, how to occur harmonics, primer harmonic sources, basic formulas, harmonic modelling (behaviour of resistance and reactance at harmonic condition) and standards was given. These informations were applied to the harmonic systems. These states were explanation for fault behaviour and voltage value on neutral line.

Finally a model has been proposed at Matlab[®] program with these general informations. This model was analysed for different states and parameters as current states (fundamental component or harmonic components), cross sectional area (2.5 mm^2 and 4 mm^2), loading states (full loading and half loading), neutral line lenght. Then Matlab[®] application results were obtained. Change in the value of neutral conductor's voltage has been represented in terms of the charts.

Keywords: Grounding, Harmonics, neutral-earth voltage, MATLAB, LV Grounding types

1.GİRİŞ

Topraklama elektrikli işletme araçlarının (generatör, transformatör, motor, kesici, ayırıcı, direk, aydınlatma armatürü, buz dolabı, çamaşır makinesi v.b.) aktif olmayan (normal işletme gerilimi altında olmayan) metal kısımlarının bir iletkenle toprakla birleştirilmesidir. Elektrik sistemlerinin devamlılığı ve insan hayatını güvenceye almak için elektrik sistemlerinde, gerilim altındaki kısımlar yalıtılırlar. Toprağa karşı yalıtımda, çeşitli sebepler ile, her zaman bozulma ve delinme şeklinde hata meydana gelmesi kaçınılmazdır.

Topraklama, meydana gelebilecek bu çeşit hata durumunda, insan hayatını güvenceye almak amacı ile uygulanacak sistemlerden biridir. Diğer taraftan şebekelerin düzgün çalışması amacı ile topraklama işlemine gerek duyulur.

Alçak gerilim tesislerinde ortaya çıkan hataların ve bunlara karşı koruma düzenlerinin açıklanmasından önce, elektrik tesisleri ile ilgili olan ve çok kullanılan temel kavramlar aşağıda gösterilmişlerdir.

Alçak gerilim, 1 kV'un altında olan gerilimler. Ülkemizde üç fazlı alternatif akımda en çok kullanılan gerilim 380/220 V olup 380 V, herhangi iki faz iletkeni arasındaki ve 220 V, nötr ile faz iletkenleri arasındaki gerilimdir(VDE, 1991; Bayram 2000; Bayram ve İlisu, 2004).

Aktif kısım, işletme bakımından gerilim altında bulunan ve işletme akım devresine ait olan sargı, direnç vb. gibi iletken kısımlar olup pasif kısımlara karşı işletme yalıtımı ile yalıtılmıştır.

Gövde veya pasif kısım, işletme araçlarının her an dokunulabilen, aktif kısmından işletme yalıtımı ile ayrılan ve fakat bir hata halinde gerilim altında kalabilen madeni ve iletken kısımlardır. Örneğin cihazların magnetik devrelerine ait demir çekirdek ile buna bağlı madeni kılıflar gövde olarak adlandırılır. Gövdeye daima temas edilebilir.

Yıldız noktası, herhangi bir işletme elemanının yıldız bağlı faz sargılarının ortak düğüm noktasıdır. Dengeli sistemlerde buna nötr veya sıfır noktası da denir ve bu takdirde bunun toprağa karşı potansiyeli sıfırdır.

Faz iletkeni, akım kaynağı ile tüketiciyi birbirine bağlayan iletkenler olup üç fazlı sistemde L1,L2,L3 ile işaretlenir ve kesintisiz çizgi ile gösterilir.

Nötr iletkeni, üç fazlı sistemde yıldız noktasından çıkan iletken olup N ile gösterilir.

Koruma iletkeni (PE), elektriksel olarak tehlikeli gövde akımlarına karşı alınacak güvenlik önlemleri için işletme elemanlarının açığındaki iletken bölümlerini bağlamaya yarayan iletkenlerdir ve noktalı çizgi ile gösterilir.

Topraklama barası, koruma iletkenlerinin, potansiyel dengeleme hatlarının ve topraklama hatlarının toplandığı bara.

Koruma iletkeni + nötr iletkeni (PEN), koruma iletkeni ile nötr iletkeninin işlevlerini bir iletkende birleştiren topraklanmış iletkenidir.

Gövde teması, bir yalıtım hatası sonucunda, elektrikli işletme araçlarının aktif kısımları ile gövdeleri arasında meydana gelen iletken bağlantıdır (VDE, 1991; Bayram 2000; Bayram ve İlisu, 2004).

Toprağı karşı gerilim

1) TN- ve TT- tipi şebekelerde bir faz hattının topraklanmış yıldız noktasına karşı gerilimidir. Bugerilim faz gerilimine eşittir.

2) IT- tipi şebekelerde bir faz hattının toprakla temas etmesi halinde diğer faz hatları ile toprak arasında meydana gelen gerilimdir. Direkt temas yok ise, bir fazın toprağı karşı gerilimi, fazlar arası gerilim değerine eşittir. Eğer faz hatlarından her hangi birinin toprakla teması yoksa, faz hatları ile toprak arasındaki gerilim sıfıra eşittir.

Hata akımı (I_F), bir yalıtım hatası sonucunda, işletme akım devresinin dışında, gövde, toprak ve/veya nötr iletkeni üzerinden geçen akımdır.

Hata gerilimi (U_F), bir yalıtım hatası sonucunda, işletme akım devresine ilişkin olmayan, iletken bölümler arasında ya da böyle bir bölüm ile referans toprak arasında oluşan gerilimdir.

Kaçak akım, eğer cihazların aktif olmayan kısımları, örneğin gövdeleri, sistemin yıldız noktasına veya toprağı iletken olarak bağlanmışsa, işletme sırasında işletme araçlarının aktif kısımlarından işletme yalıtımı üzerinden, yukarıda bahsedilen cihazların aktif olmayan kısımlarına örneğin cihazların gövdelerine geçen akımdır.

Topraklayıcı, toprakla iletken bir bağlantı kurmak amacı ile yer altında toprağı gömülen iletken elektrotlardır. Bunlar levha, çubuk ve şerit şeklinde olurlar. Topraklayıcı ile topraklanacak cihaz arasındaki bağlantı hattının toprak altında kalan ve yalıtılmamış olan kısmı da topraklayıcının bir parçası olarak kabul edilir.

Topraklama tesisi, birbiri ile iletken olarak bağlanmış bulunan topraklama hattının, eğer varsa topraklama barasının ve topraklayıcının tamamıdır.

Topraklama hattı, tesisin veya işletme araçlarının ve cihazların topraklanacak olan bölümlerini, topraklayıcı ile bağlayan iletken hattır.

Özgül toprak direnci ρ , dünyanın tabii yapısını teşkil eden maddenin, yani toprağın (zeminin) özgül elektrik direncidir.

Topraklama direnci, topraklayıcının yayılma direnci ile topraklama hattının direncinin toplamına eşittir.

İşletme topraklaması, işletme araçlarının aktif kısımlarının ve nötr hattının topraklanmasıdır.

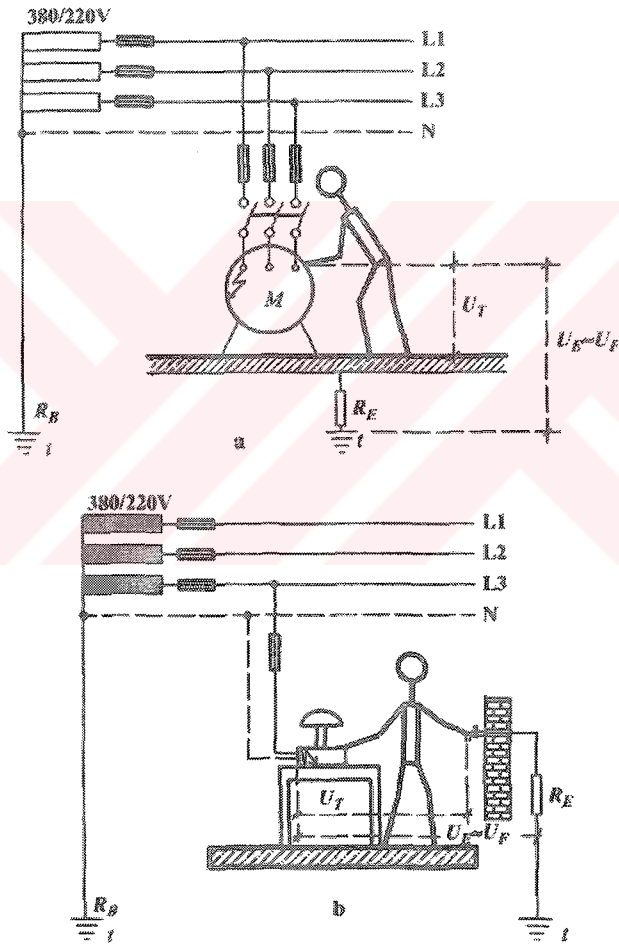
Koruma topraklaması, bir yalıtım hatası halinde insanları yüksek dokunma gerilimine karşı korumak için işletme araçlarının gövdelerinin topraklanmasıdır (VDE, 1991; Bayram 2000; Bayram ve İlisu, 2004).



2. DOKUNMA GERİLİMİ

Dokunma gerilimi, topraklayıcı geriliminin veya hata geriliminin insan gövdesi tarafından köprülenen kısmıdır (Şekil2.3).

Genel olarak gövde kısa devresi olan cihaza dokunan ve yalıtılmamış zemin üzerinde duran bir şahıs dokunma gerilimine maruz kalır. Elektrik tesislerinde bir arıza halinde, ölüm tehlikesi ortaya çıkmadan, bir insan vücuduna isabet etmesine ve uzun süreli olarak etkili olmasına izin verilen gerilim sınırı 50 V'dur. Bu değer insan vücudundan geçmesine izin verilen akım şiddetinin, etki süresine ve insan vücudunun en düşük direncine bağlı olarak bulunur. Şantiyeler, tarım alanları v.b. yerlerde bu değer 25 V olarak sınırlandırılmıştır.



Şekil 2.1 Hata gerilimi ile dokunma geriliminin açıklanması.

- U_F Hata gerilimi,
- U_T Dokunma gerilimi
- R_E Topraklama dirençlerinin toplamı,
- t Referans toprak,
- R_B Transformatöre ait işletme topraklaması.

2.1 Dokunma Gerilimine Karşı Koruma

Elektrik tesisleri ne kadar iyi yapılırsa yapılsın, yine yalıtım hataları ortaya çıkabilir. Bunun sebeplerinden ilki, yaşlanma, eskime, yıpranma ve aşırı yükleme sonucu aşırı ısınma gibi iç etkiler yüzünden yalıtım maddesinin dayanımının azalması ve bir aşırı gerilimin etkisi ile delinmesidir. İkincisi ise vurma, çarpma vb. gibi dışardan gelen etkiler altında yalıtımın zarar görmesidir.

Bu yüzden, bir yalıtım hatası sonucunda elektrik cihazlarını kullanan ve elektrik tesisleri ile temas eden kişilerin zarar görmemeleri ve yangın tehlikesinin meydana gelmemesi için, toprağa karşı gerilimi 50 V'dan büyük olan alçak gerilim tesislerinde ilave koruma tedbirleri öngörülür. Bu koruma tedbirleri, ya 50 V'luk tehlikeli dokunma gerilimlerinin meydana gelmesini veya da sürekli olarak etkili olmasını önlerler (Bayram ve İlisu, 2004).

2.1.1 Direkt Dokunmaya Karşı Koruma

Elektrikli işletme araçlarının aktif kısımlarına dokunulduğunda meydana gelen tehlikelere karşı insanları korumak için alınan bütün tedbirlere direkt dokunmaya karşı koruma denir.

Arızasız elektrik cihazlarının gerilim altında bulunan aktif kısımları, direkt dokunmalara karşı korunurlar. Cihazlardaki işletme yalıtımı, uygun yapı ve düzenleme tarzı veya ızgaralar, parmaklıklar vs. gibi uygun engeller, direkt dokunmaya veya rasgele dokunmalara karşı yeterli koruma sağlarlar. Bununla beraber emaye, oksit tabakası veya elyaf ile yapılan işletme yalıtımı, direkt dokunmaya karşı yeterli bir koruma olarak geçerli değildir; bu gibi hallerde ayrıca bir korumaya ihtiyaç vardır. Direkt dokunmaya karşı korunmuş olan arızasız işletme araçlarının ve elektrik cihazlarının pasif kısımlarına dış metal kılıflarına dokunmakta hiç bir sakınca yoktur (Bayram ve İlisu, 2004) .

İşletme gerilimi 42 V'a kadar olan tesislerde direkt dokunmaya karşı koruma yapmağa gerek yoktur. Fakat bu kolaylaştırıcı hüküm, yangın ve patlama tehlikesi olan işletmeler ve iş yerleri için geçerli değildir.

2.1.2 Endirekt Dokunmaya Karşı Koruma

50 V gibi belirli değerin üzerindeki dokunma gerilimleri yüzünden meydana gelen tehlikelere karşı insanları korumak için alınan bütün tedbirlere endirekt dokunmaya karşı koruma denir.

Eğer bir işletme aracında yalıtım hatası sonucunda dış metal kısımlar bir hata geriliminin etkisi altında kalırlarsa, endirekt dokunma söz konusu olur. Bu durumda hatalı cihaza temas eden insanlar dokunma gerilimi altında kalarak hayat tehlikesi ile karşı karşıya gelirler.

Buna engel olmak, birinci derecede imalatçının görevidir; çünkü uygun bir konstrüksiyon tarzı uygulamak, uygun bir yalıtım maddesi kullanmak ve itinalı bir işçilikle endirekt dokunmadan kaynaklanan tehlike geniş çapta önlenabilir. Bununla beraber, 50 V dan daha büyük dokunma geriliminin meydana gelebileceği yerlerde, ilave koruma tedbirlerinin alınması şarttır (Bayram ve İlisu, 2004).



3. ELEKTRİK TESİSLERİNDE TOPRAKLAMA

3.1 Genel Açıklama

Topraklama tesisleri, normal işletme esnasında varlığını hemen hemen hiç hissettirmedeği halde bir arıza halinde etkili olur ve o zaman görevini yapar. Bundan dolayı topraklama, her an işletmede olmayan ve görünmeyen bir çeşit gizli tesistir ve bu sebeple, elektrik tesisleri içinde topraklama ihmal edilmemelidir.

Elektrik makine, cihaz ve tesislerinde meydana gelen bir yalıtım hatası, makinelerin, cihazların ve tesislerin, işletme ile doğrudan doğruya ilgisi olmayan iletken malzemeden yapılmış gövdelerin, tespit kısımlarının gerilim altında kalmasına sebep olur. Bunun sonucunda dokunma gerilimi ve adım gerilimi adı verilen tehlikeli gerilimler oluşur. Bu gerilimler, gerek işletme personeli için ve gerekse söz konusu elektrik tesisleri ile herhangi bir şekilde temas halinde bulunabilecek olan şahıslar için hayat tehlikesine yol açtıkları gibi tesiste yangın çıkmasına da sebep olurlar. İşletme personeli ve elektrik tesislerinde dokunabilecek olan şahısları dokunma ve adım gerilimlerine karşı korumak için alınan önlemlerin başında topraklama gelir .

3.2 Topraklamanın Sınıflandırılması

3.2.1 Topraklamanın Amaçlarına Göre Sınıflandırılması

Topraklamalar başlıca üç amaca göre yapılır:

a.Koruma topraklaması: İnsanları tehlikeli dokunma gerilimlerine karşı korumak için, işletme akım devresinde bulunmayan iletken bir bölümün topraklanmasıdır.

b.İşletme topraklaması: İşletme akım devresinin bir noktasının, cihazların ve tesislerin normal işletilmesi için topraklanmasıdır.

c.Fonksiyon topraklaması: Bir iletişim tesisinin veya bir işletme elemanının istenen fonksiyonu yerine getirmesi amacı ile yapılan topraklamadır (İlisu, 2003).

3.2.1.1 Koruma Topraklaması

İnsanları veya hayvanları tehlikeli dokunma veya adım gerilimlerine karşı korumak amacı ile tesislerin işletme akım devresine ait olmayan ve fakat yalıtım hatası veya ark etkisi ile gerilim altına girebilen ve canlıların dokunabilecekleri iletken kısımlarını toprağa bağlamak için yapılan ilave topraklama tesislerine koruma topraklaması adı verilir.

Tehlikeli gerilim, normal olarak gerilim altında bulunan işletme akım devresinin yalıtımında bir hata meydana gelmesi sonucunda işletme akım devresine ait olmayan ve normal şartlar altında gerilim altında bulunmayan iletken tesis kısımları ile temas ederek bunların gerilim altında kalmaları ve bunlar üzerinden hata veya kaçak akımların geçmesi ile meydana gelir.

Yalıtım hatası, ya direkt veya endirekt sebeplerden ileri gelir. Yalıtım hatasına yol açan direkt sebepler, iletkenin kopması, aşırı akım yüzünden yalıtım maddesinin ısınarak elektrik dayanımının azalması, aşırı gerilimde yalıtım maddesinin zorlanarak delinmesi, malzemenin yaşlanmasıdır. Endirekt sebepler ise, dış etkilerle yalıtımın zarar görmesi, atmosferik deşarjlar, örneğin yıldırım düşmesi ile meydana gelen arklar, hava hatlarında izolatörlerin kirlenerek üzerlerinde kaçak akımlar meydana gelmesi veya gerilim atlaması, izolatörlerin dış etkilerle kırılmasıdır.

Koruma topraklaması bu tip koruma tedbirlerinin en eskisidir ve yalnız canlıların hayatını korumaya yarar. Buna karşılık tesislerin ve işletme araçlarının korunması için koruma topraklamasına ihtiyaç yoktur (Bayram ve İlisu, 2004).

Alçak Gerilim Tesislerinde Koruma Topraklaması

Yönetmeliklerde alçak gerilim tesislerinde toprağa karşı gerilimi 50 V'dan büyük olan her tesiste dokunma gerilimine karşı koruma tedbirinin alınması ve hiçbir faz hattının toprağa karşı 250 V'dan daha yüksek gerilim almaması şart koşulmuştur.

▪ Uygulama Alanı

TT tipi şebekede topraklanacak olan en önemli tesisler ve işletme araçları şunlardır:

- 1) Evlerde kullanılan ve insanların dokunabilecekleri dış kaplamaları iletken olan her çeşit tüketici makineler ve cihazlar, gerilim altına girmesi mümkün olan metal bina kısımları,
- 2) Atölyelerde ve iş yerlerinde her tür elektrik motorları, cihazlar ve tesisler,
- 3) Dağıtım tesislerinde sacdan yapılmış dağıtım tabloları, kabloların metal kılıfları ve ekranları, metal kablo başlıkları, kumanda cihazlarının metal kaplamaları, kumanda kolları, metal kapılar, kapaklar, bölmeler koruma ızgaraları, metal tesis hücreleri,
- 4) Transformatör istasyonlarında metal kaplamalar ve metal konstrüksiyon,
- 5) Hava hattı şebekelerinde metal ve beton direkler.

▪ Topraklama Şartları

Koruma topraklamasının topraklama direnci o şekilde belirlenir ki, ya hat akımının etkisi ile bunun üzerinde 50 V'dan daha büyük bir gerilim düşümü sürekli olarak meydana gelmez; yada hata yeri sigortalarla veya otomatik anahtarlarla, 50 V aşılmadan verilen süreler içinde otomatik olarak kesilip ayrılır.

Alçak gerilim tesislerinde koruma topraklamasının uygulanması bakımından en önemli olan noktalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1) TT tipi şebekede : Bir hata halinde toprak teması akımının topraklamadan geçmesi söz konusu olduğundan, korunacak olan işletme aracının R_A koruma topraklama direnci şu şartı gerçekleştirmelidir :

$$R_A < U_T / I_a \quad (3.1)$$

Burada 50 V, izin verilen en büyük dokunma gerilimi ve I_a ise şebeke tarafında işletme aracının önüne bağlanan aşırı akım kesicisinin açma akımıdır.

2) IT tipi şebekeler: Tüketici tesislerde bir yalıtım hatası sonucu bir gövde teması ortaya çıkarsa hiçbir hata akımı geçmez; çünkü yaygın olmayan alçak gerilim şebekelerinde kapasitif akımlar ihmal edilecek kadar küçük ve toprağa karşı yalıtım dirençlerinin belirli bir akım geçirmeyecek kadar yüksek oldukları kabul edilebilir. Böyle bir sistemde ancak, ikinci bir fazda da bir toprak teması daha olursa, yani bir çift toprak kısa devresi meydana gelirse, toprak üzerinden bir kısa devre akımı geçer.

3) Hava hattı şebekelerinde aşağıya indirilen işletme topraklaması hattı, elin ulaşacağı yerlerde mekanik zorlamalara ve rasgele dokunmalara karşı korunmalıdır.

Çelik veya betonarme direklerde işletme topraklaması hattının rasgele dokunmalara karşı korunması, bunun yalıtılmış olarak döşenmesini gerektirir.

4) Koruma topraklaması, tesis işletmeye sokulmadan önce kontrol edilmelidir.

3.2.1.2 İşletme Topraklaması

Elektrik tesislerinde işletme araçlarının aktif kısımlarının topraklanmasına işletme topraklaması denir. Bu sebeple işletme akım devresi ile toprak arasında direkt bir bağlantı yapılır ve hatta bu yüzden toprak, işletme akım devresinin bir kısmını teşkil eder ve gerektiğinde toprak üzerinden akım geçer, işletme topraklaması, topraklanan noktayı toprak potansiyelinde tutar (Bayram ve İlisu, 2004)..

Gerilim altında bulunan tesis bölümlerinin işletme topraklamasına bağlanması ile bunlar sürekli veya geçici olarak topraklanırlar ve böylece aşırı gerilimler önlenir veya sınırlandırılmış olur. Koruma topraklaması üzerinden yalnız hata halinde bir akım geçtiği halde işletme topraklaması üzerinden arızasız durumda dahi bir akım geçebilir.

▪ Yıldız Noktasının Durumunun Topraklama Üzerine Etkisi:

Yıldız noktasının durumuna göre bir toprak teması halinde topraktan, topraklayıcıdan ve topraklama tesislerinden geçen akımın değeri farklı olur. Onun için yıldız noktasının durumunun topraklama tekniğinde önemi büyüktür.

İşletme bakımından şebekelerin yıldız noktaları aşağıdaki durumlardan birinde bulunur:

- 1) Yıldız noktası serbesttir. Bu işletme durumunda yıldız noktası ya tamamen yalıtılmıştır yahut da bir bobin üzerinden topraklanmıştır. Yıldız noktası bobin üzerinden topraklanan şebekelere kompanzasyonlu şebeke veya söndürülmüş şebeke denir.
- 2) Yıldız noktası topraklanmıştır. Bu işletme durumunda yıldız noktası ya doğrudan doğruya topraklanmıştır yahut da akım sınırlayıcı (ohmik, endüktif veya kapasitif) direnç üzerinden topraklanmıştır.
- 3) Yıldız noktası geçici olarak akım sınırlayıcı direnç üzerinden topraklanan söndürülmüş şebekeler.

▪ Alçak Gerilim Tesislerinde İşletme Topraklaması

Alçak gerilim tesislerini doğrudan doğruya besleyen generatörün stator sargılarına ait yıldız noktasının ve bir üst gerilim kademesi üzerinden alçak gerilim tesislerini besleyen dağıtım transformatörünün alçak gerilim tarafındaki yıldız noktasının topraklanması ve alçak gerilim şebekesinde nötr hattının topraklanması işletme topraklamasıdır.

Yönetmelik hükümlerine göre alçak gerilim tesislerinde toprağa karşı gerilimin 250 V'un üstüne çıkmasına izin verilmez. Bu da ancak şebekenin yıldız noktasının topraklanması ile mümkündür. 220/ 380 V'luk bir alçak gerilim şebekesinde yıldız noktası topraklanmışsa, her bir faz hattının toprağa karşı olan gerilimi en fazla 220 V'dur (Bayram ve İlisu, 2004)..

3.2.1.3 Fonksiyon Topraklaması

Dönüş hattı olarak toprağı kullanan iletişim tesislerinin çalışabilmesi için yapılan işletme topraklamasına fonksiyon topraklaması denmektedir.

3.2.2 Topraklamanın Şekline Göre Sınıflandırılması

1.Münferit (tekil) topraklama: İşletme elemanı veya cihazın sadece kendine ilişkin topraklayıcıya bağlı olduğu topraklamadır.

2.Yıldız şeklindeki topraklama: Birçok işletme elemanının veya cihaza ilişkin topraklama iletkenlerinin topraklanmış bir noktada yıldız şeklinde topraklanmasıdır.

3.Çoklu topraklama: Bir işletme elemanı veya cihazın topraklanmış birçok iletken (örneğin potansiyel dengeleme iletkeni, koruma iletkeni veya fonksiyon koruma iletkeni) bağlandığı topraklamalardır.bu topraklana iletkenleri aynı topraklama birleştirme iletkenine veya farklı topraklayıcılara bağlı olabilir.

4.Yüzeysel topraklama: Topraklanacak işletme elemanları veya cihazların ve iletişim tesislerinin işletme akımı taşımayan iletken kısımlarının ağ şeklinde kendi aralarında koruma topraklamasına veya fonksiyon ve koruma topraklamasına bağlandığı topraklamadır (Yönetmelik 2002).

Topraklayıcının tesisinde en önemli olan konu, bunun her yerinde toprakla iyi temas etmesini sağlamaktır, imkan olduğu takdirde topraklayıcı, zemin suyu ile temas etmelidir. Kuru zeminde killi ve benzeri topraklar dikkatle dövülerek sıkıştırılır; kumlu ve benzeri topraklar su ile ıslatılır. Topraklayıcının yanında taş ve çakılın bulunması yayılma direncini artırır. Onun için, yayılma direncinin küçük olmasını sağlamak amacı ile, topraklayıcının civarında taş ve çakılın bulunmamasına dikkat edilir.

3.4 Topraklayıcı Çeşitleri

3.4.1 Konuma Göre Topraklayıcılar

1.Yüzeysel topraklayıcı: Genel olarak 0.5-1 m arasında bir derinliğe yerleştirilen topraklayıcıdır. Galvanizli şerit veya yuvarlak ya da örgülü iletken yapılabilir ve yıldız, halka, gözlü topraklayıcı ya da bunların karışımı olabilir.

2.Derin topraklayıcı: Genellikle düşey olarak 1 m'den daha derine yerleştirilen topraklayıcıdır. Galvanizli boru, yuvarlak çubuk veya benzer profil malzemelerden yapılabilir.

3.4.2 Biçim ve Profile Göre Topraklayıcılar

1.Şerit topraklayıcı: Şerit şeklindeki iletken malzeme ile yapılan topraklayıcıdır.

- 2.Boru ve profil topraklayıcı:** Boru ve profil şeklindeki malzeme ile yapılan topraklayıcıdır.
- 3.Örgülü iletken topraklayıcı:** Örgülü iletken malzeme ile yapılan topraklayıcıdır. Örgülü iletkeni oluşturan teller ince olmamalıdır.
- 4.Doğal topraklayıcı:** Temel amacı topraklama olmayan, fakat topraklayıcı olarak etkili olan, toprakla veya suyla doğrudan doğruya veya beton üzerinde temasta bulunan yapıların çelik bölümleri, boru tesisatları, temel kazıkları gibi metal parçalardır.
- 5.Topraklayıcı etkisi olan kablo:** Metal kılıfı, siperi (ekran) ve zırhlarının iletkenliği toprağa göre şerit topraklayıcı niteliğinde olan kablodur.
- 6.Çıplak topraklayıcı bağlantı iletkeni:** Bir topraklayıcıya bağlanan çıplak topraklama iletkeninin toprak içinde kalan bölümü, topraklayıcının bir paçası sayılır.
- 7.Temel topraklayıcı (temel içine yerleştirilmiş topraklayıcı):** Beton içine gömülü, toprakla (beton üzerinden) geniş yüzeyli olarak temasta bulunan iletkenidir (Yönetmelik 2002).

3.4 Topraklayıcı Türleri

Toprağın durumuna ve topraklayıcı olarak kullanılan malzemenin cinsine göre çeşitli topraklayıcılar kullanılırlar. Topraklayıcıların geometrik şekilleri, kullanılan malzemenin cinsi ve toprağa gömülme derinliği bakımından birçok türleri vardır. Topraklayıcı türünün seçilmesinde ve düzenlenmesinde yerel şartlar, zeminin yapılışı ve izin verilen yayılma direnci göz önüne alınır. Aşağıda en çok kullanılan topraklayıcı türleri bildirilmiştir (Koch, 1955; Bayram ve İlisu, 2004).

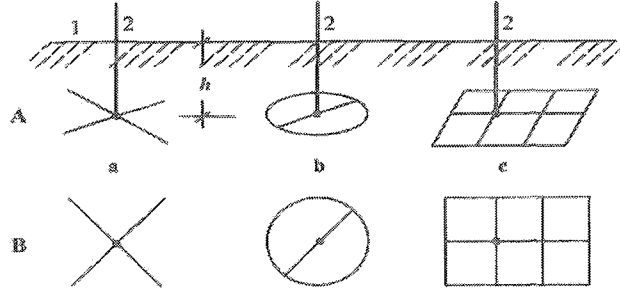
3.4.1 Şerit Topraklayıcılar

Genel olarak galvanizli demir şeritten yapılırlar, bunun dışında yuvarlak iletkenler veya örgülü teller de bu amaçla kullanılabilirler. Şerit topraklayıcılar çok derine gömülmezler. Onun için bunlara yüzey (az derin) topraklayıcı adı verilir.

Ülkenin iklim şartları göz önüne alınarak sürekli olarak rutubetli kalacak ve donma olmayacak şekilde bir gömme derinliği tayin edilir; bu derinlik ortalama 0,5 – 1 m kadardır.

En basit şerit topraklayıcı, boylu boyuna döşenen bir şeritten ibarettir. Bunun yayılma direnci, şeridin uzunluğuna bağlıdır.

Şekil 3.1'de en çok kullanılan şerit topraklayıcıların yapıları gösterilmiştir.



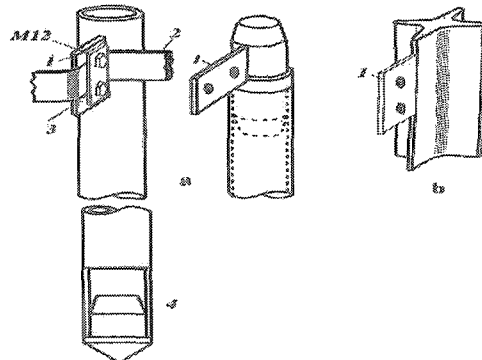
Şekil 3.1 Şerit topraklayıcıların çeşitli şekilleri.

- A Perspektif
- B Plan görünüş,
- a Dört kollu yıldız topraklayıcı,
- b Halka topraklayıcı,
- c Gözlü topraklayıcı,
- 1 Zemin, toprak.
- 2 Topraklama iletkeni,
- h Gömülme derinliği.

3.4.2 Çubuk Topraklayıcı

Genelde çelik borudan veya buna eşdeğer profil çelikten yapılırlar ve zemine dik olarak çakılırlar. Çubuk topraklayıcılar oldukça derine indiklerinden, yazın zemin kurusa bile topraklayıcı daima rutubetli zeminde bulunur ve çok iyi bir topraklama imkanı sağlar. Onun için buna derin topraklayıcı denir. Şekil 3.2'de çubuk topraklayıcı gösterilmiştir.

Bu topraklayıcının çapı, yayılma direnci üzerine çok az etki eder; onun için boru çapı veya profil kesiti mekanik dayanıma ve korozyon olaylarına göre tayin edilir. Yayılma direnci daha çok çubuk uzunluğuna bağlıdır. Çubuğun zemine kolay çakılabilmesi için ucunun sivri olması gerekir.



Şekil 3.2 Çubuk topraklayıcı.

- a Boru topraklayıcı,
- b Profil topraklayıcı,
- 1 Bağlama ucu,
- 2 Topraklama iletkeni,
- 3 Kurşun topraklayıcı,
- 4 Boru topraklayıcının ucu.

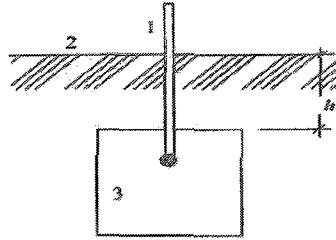
Çubuk topraklayıcılar yere gömülmeyip çakılarak zemine yerleştirildiklerinden bunlar toprak ile daha iyi temas ederler ve bu yüzden yayılma direnci küçük olur. Kalın topraklayıcıların zemine çakılmaları zor olursa, önceden ince bir kılavuz topraklayıcı çakılarak zemin hazırlanır ve bunun üzerine kalın topraklayıcı çakılır.

Çubuk topraklayıcılarla istenen yayılma direncinin sağlanamadığı kurak zeminlerde özel bir çubuk topraklayıcı kullanılır ki buna emdirmeli topraklayıcı denir, Bu da üzerinde delikler bulunan bir çeşit boru topraklayıcıdır. Zaman zaman borunun içine iletken bir sıvı dökülür; bu sıvı, topraklayıcı borunun deliklerinden çıkarak etrafa yayılır. Böylece toprağın özgül direnci, topraklayıcı etrafında çok düşürülmüş olur. Bu gibi topraklayıcılar her iki ayda bir defa emdirilir. Bu maksatla soda çözeltisi kullanılır, bunun korozyon etkisi çok düşüktür (Koch, 1955).

3.4.3 Levha Topraklayıcı

Levha topraklayıcı, geçmiş yıllarda çok kullanılan ve bugün önemini tamamen kaybeden bir topraklayıcı cinsidir (Şekil 3.3). Levha topraklayıcıda belirli bir yayılma direnci elde etmek için başka cins topraklayıcılara göre çok daha fazla bir malzemeye ihtiyaç vardır.

Levha, zemine dik olarak yerleştirilir. Eğer levha zemine paralel olarak yerleştirilecek olursa, bunun ancak üst yüzeyi etkili olur. Çünkü toprağın çökmesi ile levhanın altı boşlukta kalabilir.



Şekil 3.3 Levha topraklayıcı

- 1 Topraklama iletkeni,
- 2 Zemin, toprak,
- 3 Levha topraklayıcı.

Levha topraklayıcı, çubuk topraklayıcı gibi toprağa çakılmayıp önce bir çukurun kazılması ve levha zemine yerleştirildikten sonra boşluğun doldurulması ve toprağın cinsine göre zeminin ıslatılması veya dövülerek sıkıştırılması gerekir. Bu da levha topraklayıcının bugün az olarak kullanılmasının bir sebebidir. Levha topraklayıcının pahalı olması ve yayılma direncinin büyük olması göz önüne alınırsa, bugün bunun yerine şerit veya çubuk topraklayıcının kullanılması tercih olunur (Koch, 1955; Bayram ve İlisu, 2004).

3.7 Alçak Gerilim Şebeke Şekilleri ve Korumanın Koordinasyonu

Faz iletkenlerinden birinde bir yalıtım hatası ortaya çıktığında, toprak üzerinden bir hata akımının geçmesi, bu hata akımının şiddeti ve endirekt temaslara karşı alınacak koruma tedbirleri, birinci derecede alçak gerilim şebekesinin şekline bağlıdır.

IEC tarafından yapılan düzenlemeye göre, alçak gerilim şebekeleri üç ana gruba ayrılırlar:

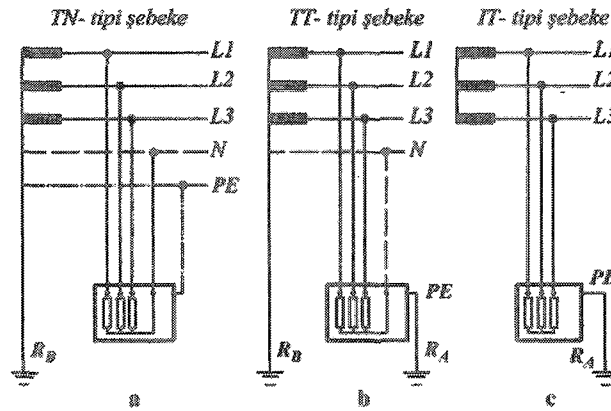
- a) TN- tipi şebeke,
- b) TT- tipi şebeke,
- c) IT- tipi şebeke.

Şekil 3.4'da bu şebeke tipleri üç fazlı olarak gösterilmişlerdir. TN- tipi şebekenin ayrıca üç değişik şekli vardır:

- a) TN-S- tipi şebeke,
- b) TN-C- tipi şebeke,
- c) TN-C-S- tipi şebeke.

Bunlar da Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7'de üç fazlı olarak gösterilmişlerdir.

Şekil 3.4, 3.5, 3.6 ve 3.7'de verilen şebeke şekillerinin tipleri, karakteristikleri ve fonksiyonları, uygun harflerle işaret edilmişlerdir. Bunlar, İngilizceden ve Fransızcadan alınan kelimelerin baş harfleri olup, anlamları aşağıda bildirilmişlerdir.



Şekil 3.4 Alçak gerilim şebekelerinin ana grupları,

- a) TN- tipi şebeke,
- b) TT- tipi şebeke,
- c) IT- tipi şebeke.

İlk harfler, daima akım kaynağının, yani transformatörün topraklama durumunu gösterir.

T: Şebekenin bir noktası, örneğin yıldız noktası topraklanmıştır.

I: Şebekenin bütün aktif kısımları, örneğin yıldız noktası toprağa karşı yalıtılmış veya şebekenin bir noktası bir empedans üzerinden topraklanmıştır.

Sembollerin ikinci harfi, tüketici cihazın metal kılıfının durumunu bildirir.

T: Akım kaynağının topraklanmış olmasına bağlı olmadan, cihaz direkt topraklanmıştır.

N: Cihazın kılıfı işletme topraklamasına doğrudan doğruya bağlanmıştır.

TN- tipi şebekenin üç değişik şekli için TN-'ye eklenen harflerin anlamları şunlardır.

S: TN-S'de koruma iletkeni PE ile nötr hattı N, fonksiyon bakımından ayrılmıştır, (Separated PE and N).

PE: Koruma iletkeni olmak üzere, (Protection Earth).

C: TN-C'de koruma iletkeni ile nötr hattının fonksiyonları PEN hatlarında birleştirilmiştir, (Combined PE and N = PEN).

Bu açıklamadan anlaşılacağına göre, PE hattı yalnız koruma için kullanılır, işletme fonksiyonu yoktur. N hattının yalnız işletme fonksiyonu olup koruma fonksiyonu yoktur. PEN hattı ise PE ile N'nin birleşmesinden oluştuğundan, bunda hem işletme ve hem de koruma fonksiyonları birleştirilmiştir (Bayram, 2000; Bayram ve İlisu ,2004).

3.5.1 TN - Tipi Şebeke

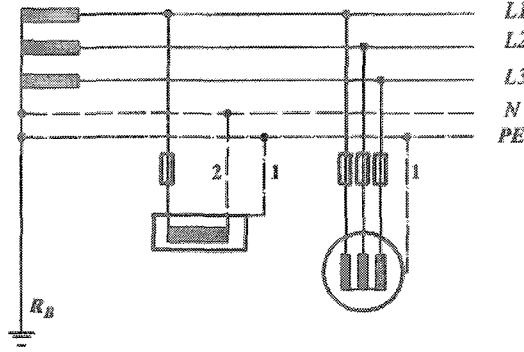
Burada şebekeye ait bir nokta, örneğin akım kaynağının yıldız noktası ve bundan başka daha bir kaç işletme topraklaması, düşük dirençli olarak topraklanırlar ve hepsi bir koruma iletkenine, diğer taraftan korunacak olan elektrikli işletme araçlarının metal gövdeler de topraklanmış olan bu koruma iletkenine bağlanırlar. Koruma iletkeninin düzenlenme şekline göre üç cins TN- sistemi söz konusudur; bunlar aşağıda açıklanmıştır.

3.5.1.1 TN-S Sistemi

N nötr ve PE koruma hatları bütün sistem boyunca ayrı çekilirler. Burada nötr hattı yalnız şebekenin başında koruma hattı ile birlikte, akım kaynağının yıldız noktasında işletme topraklamasına bağlanır. Nötr hattı, faz hatları gibi yalıtılmış olarak çekilir. PE koruma hattı genellikle birçok noktada topraklanır. Bu şebeke tipi, genel enerji tesislerinde nadir olarak kullanılır. Fakat özel transformatörü olan büyük tesislerde uygulanır.

3.5.1.2 TN-C Sistemi

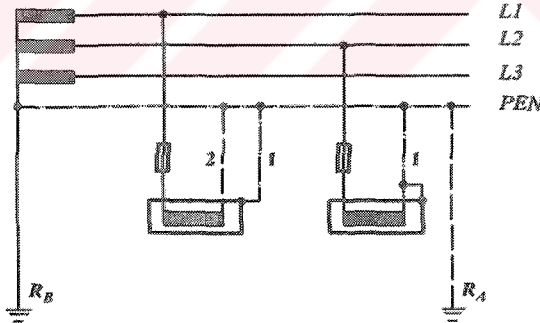
Burada PE koruma hattı ile N nötr hattının fonksiyonları, bütün şebeke boyunca birleştirilip PEN hattı olarak bir tek hat çekilir. Korunacak olan elektrikli işletme araçlarının gövdeleri, mesela bir fiş-priz sistemi üzerinden PEN hattına bağlanırlar.



Şekil 3.5 TN-S- tipi şebeke.

- 1 Cihaz gövdesinin koruma hattına bağlanması,
- 2 Tüketicinin nötr hattına bağlanması.

Bir hata halinde PEN koruma hattının toprak potansiyelinden farklı bir potansiyele yükselmemesi için PEN koruma hattı, her generatörün veya transformatörün yıldız noktasında topraklandığı gibi, hat boyunca mevcut iyi topraklanmış yerlere de bağlanırlar ve ayrıca binaların ve evlerin girişlerinde de topraklanırlar

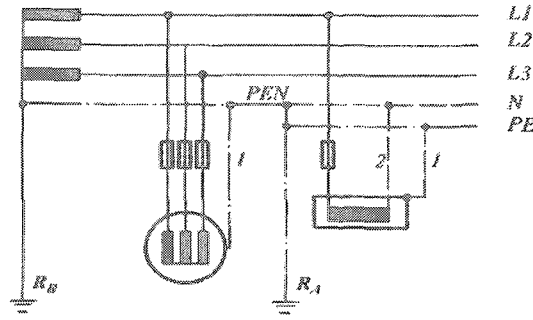


Şekil 3.6 TN-C- tipi şebeke.

- 1 Cihaz gövdesinin koruma hattına bağlanması,
- 2 Tüketicinin nötr hattına bağlanması.

3.5.1.3 TN-C-S Sistemi

Burada nötr hattı ile PE hattı, şebekenin bir bölümünde PEN hattı olarak ve şebekenin geri kalan bölümünde ayrı ayrı çekilirler. Bu ikinci bölümde PE hattı, TN-C- sisteminde olduğu gibi, dağıtım şebekesinde çok yerde topraklanır ve N hattı da faz hattı gibi yalıtılır. TN- tipi bir şebekede faz-toprak teması halinde, işletme topraklamasının R_B direnci üzerinden, PE veya PEN koruma hatlarının ve bunlara bağlı cisimlerin toprağa karşı gerilimleri yükselir. Bir faz iletkeni ile koruma iletkeni arasında bir kısa devre olursa, bir hata akımı devresi oluşur.



Şekil 3.7 TN-C-S- tipi şebeke.

- 1 Cihaz gövdesinin koruma hattına bağlanması,
- 2 Tüketicinin nötr hattına bağlanması.

Devrenin Z_s empedansı ile koruma cihazının I_a açma akımı o şekilde seçilmiş olmalı ki, bu hatalı devre belirli bir zaman içinde kesilsin. Bu şartın gerçekleşmesi için

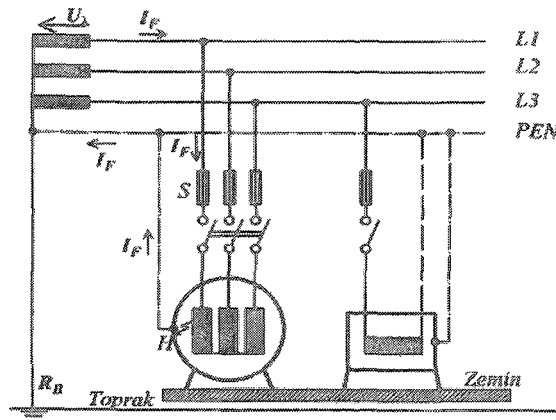
$$Z_s \cdot I_a \leq U_0 \quad (3.2)$$

olmalıdır; burada U_0 , şebekenin topraklanmış hatta karşı nominal gerilimidir. Z_s ise hata akım devresinin empedansı olup ya hesapla veya ölçme yolu ile tayin edilir. Yukarıdaki şartın gerçekleşmesi ile birlikte, koruma cihazının açma zamanının önemi çok büyüktür.

TN- tipi şebekelerde hata akımı anahtarları bir esas koruma düzeni olmayıp 30 mA'lık nominal açma akımlı bir anahtar, insan hayatını korumak için ve 300 mA açma akımlı bir anahtar ise yangına karşı korumak için bir ilave koruma sistemidir (Bayram ve İlisu ,2004).

Aşırı akıma ve kısa devreye karşı koruma için öngörülen aşırı akım cihazı, (3.2) eşitliğindeki şartı yerine getirmelidir.

Şekil 3.8'da TN-C- tipi şebeke ve tüketicilerin PEN hattı ile koruma bağlaması gösterilmiştir.



Şekil 3.8 TN-C- tipi şebekede tüketicilerin PEN hattı ile korunması.

- S Yalıtım hatasında eriyerek koruma görevi yapan sigorta,
H Hata yeri,
PEN Koruma hattı.

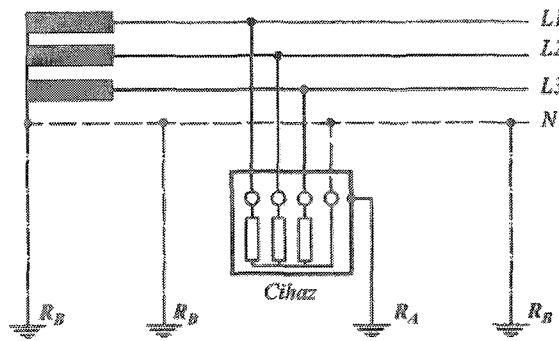
Şekil 3.8'de gösterilen şebeke şekli bir TN-C- tipi şebekedir. Bu sistem basit ve ucuzdur. Fakat bunun bir önemli sakıncası vardır. Eğer PEN hattında bir kopma olursa, örneğin bir fazlı tüketicilerde bir hata olmasa dahi, bunun metal kılıfı tam faz gerilimi altında kalır. Bu da çok tehlikeli bir durumun meydana gelmesine sebep olur.

TN-C-S- tipi şebekede durum değişiktir. Bu tip şebeke yapısında nötr hattı (N) ile koruma hattı (PE) ayrılmış ve nötr hattı yalıtılmış olarak tesis edilmiştir. Ayrıca nötr ve koruma hattı yalnızca bina ana tablosunda birleştirilmiş ve bu noktada bina temel topraklamasına bağlanmıştır.

Nötr hattının bina içinde kopması halinde koruma hattının gerilim altında kalma imkanı yoktur. Nötr hattı şebekede veya binaya gelen branşman hattında koparsa, bina ana tablosunda yapılmış olan topraklama sebebi ile koruma hattında oluşacak gerilim, emniyet sınırları içinde tutulabilir.

3.5.2 TT - Tipi Şebeke

Bu şebeke sisteminde bir nokta (örneğin yıldız noktası) direkt olarak topraklanır. Bu bir işletme topraklamasıdır. Tesise ait metal kısımlar ise, işletme topraklamasından ayrı olarak bir topraklayıcıya bağlanırlar; bunlar da koruma topraklamasıdır. Bu sistemde PEN gibi bir koruma hattı yoktur. Buradaki nötr hattı, bir fazlı tüketiciler için işletme akım devresine ait olup, koruma konusu ile ilgisi yoktur. Şekil 3.9'da TT- tipi şebekeye ait bağlama şeması verilmiştir.



Şekil 3.9 TT- tipi şebeke.
 R_A Cihazların koruma topraklaması,
 R_B Şebekenin işletme topraklaması.

TT- şebeke sisteminde koruma topraklamasının etkili olabilmesi için, bunun (3.1) eşitliğini gerçekleştirmesi gerekir.

Burada $U_T = 50$ V dokunma gerilimi; R_A , topraklayıcının yayılma direnci ve I_a , hata halinde devreyi otomatik olarak açan koruma cihazının açma akımıdır. Eğer koruyucu cihaz hata akımını anahtarı ise, bu durumda

$$I_a = I_{\Delta n} \quad (3.3)$$

dir.

TT- tipi şebekede korumanın etki şekli şu şekilde açıklanabilir. Koruma topraklaması ile donatılmış bir tüketici veya işletme aracında bir yalıtım hatası durumunda, R_A koruma topraklaması, R_B yıldız noktası topraklaması, transformatörün R_{TR} sargı direnci ve faz iletkenine ait R_h hat direnci üzerinden devresini kapatan bir hata devresi oluşur ki bu, bir fazlı bir kısa devredir. Bu devreden geçen hata veya kısa devre akımı,

$$I_F = U_\lambda / (R_A + R_B + R_{TR} + R_h) \quad (3.4)$$

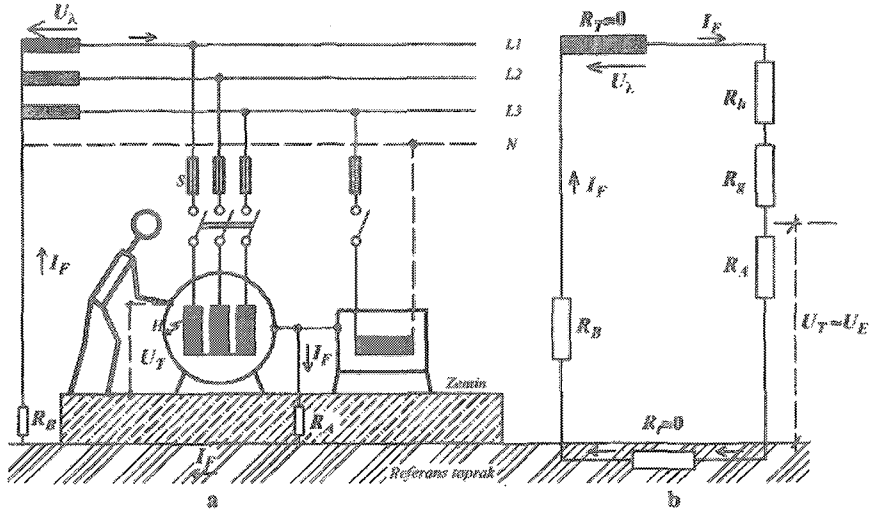
Burada U_λ faz-toprak arası gerilim değeridir. I_F akımının topraklama direnci üzerinde

$$U_T = I_F \cdot R_A \quad (3.5)$$

gibi bir gerilim düşümü yani dokunma gerilimi oluşturur. Bunun $U_T < 50V$ olabilmesi için birinci derecede R_A 'nın çok küçük olması şarttır. Eğer topraklama direnci veya hata akımı çok büyük ise, birinci derecede $U_T > 50V$ olur ki, bu da insan hayatı için tehlike yaratır. Bu sebeple devrenin kısa sürede kesilmesi gerekir.

Devreyi kesme elemanının güvenli çalışması için ise, açma akımının büyük olması istenir. Bunun değeri ise devrenin toplam direncinin değerine bağlıdır (Bayram ve İlisu ,2004).

Kısa devre akımının kesilmeden uzun zaman etkili olması, devredeki iletken kısımların aşırı ısınmasına sebep olur ve yangına yol açabilir. Onun için bu gibi hata hallerinde hem dokunma gerilimini ve hem de aşırı ısınmayı önlemek için hatalı devrenin örneğin sigorta aracılığı ile kısa zamanda açılması istenir.



Şekil 3.10 TT- tipi şebekede cihazların topraklanması,

- a Üç kutuplu bağlama şeması,
b Hatalı faza ait bir kutuplu bağlama şeması,
 R_A Koruma topraklamasının direnci,
 R_t Toprak direnci (ihmal edilir),
 R_B Yıldız noktasının topraklama direnci,
 R_h Şebekenin hat direnci,
 R_g Geçiş direnci (ihmal edilir),
 U_T Dokunma gerilimi,
 I_F Hata akımı.

Hata akımı anahtarının kullanıldığı bir koruma sisteminde gerekli topraklama direnci

$$R_A \leq U_T / I_{\Delta n} \quad (3.6)$$

ifadesine göre hesap edilir. Burada $I_{\Delta n}$, hata akımı koruma anahtarının nominal açma akımı ve $U_T < 50V$ izin verilen dokunma gerilimidir. Genellikle bu gibi şebekelerde nominal açma akımı $I_{\Delta n} = 0,3 \text{ A}$ olan koruma anahtarları kullanılır. Buna göre, olası en büyük dokunma geriliminde, sistem için gerekli topraklama direncinin

$$R_A = 220/0,3 = 733 \text{ ohm}$$

değerinde olması gerekir.

Böyle yüksek değerli bir direnç ekonomik olarak gerçekleştirilebilir. Ayrıca topraklama direnci atmosferik şartlara göre de çok değişken olduğundan, topraklama direncini sürekli olarak istenen küçük değerde tutmak mümkün değildir.

TT- tipi şebekelerde genel olarak, koruma topraklamasının güvenilir bir şekilde olması için aşağıdaki şartlar geçerlidir :

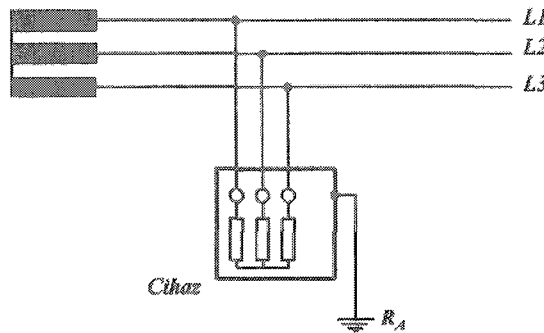
1. Koruma topraklamasının uygulandığı şebekelerde ve tesislerde tüketicilerin nötre bağlanmasına izin verilmez.

2. Tüketici tesislerde nötr hattı mekanik bakımdan korunmuş ve yalıtılmış olarak çekilir.
3. Koruma topraklamasının etkili olup olmadığı, tesis işletmeye alınmadan kontrol edilmelidir.
4. Bir transformatör tarafından beslenen şebekeye bağlı tüketim bölgesinde, her yerde, tüketicilerin, bu şebeke için uygun olan koruma sistemi uygulanmalı, karma koruma yapılmamalıdır. Örneğin TN- tipi şebekelerde cihazın gövdesini PE iletkenine bağlamadan TT- tipi şebekelerdeki gibi koruma topraklamasının yapılmasına izin verilmez. Çünkü topraklanmış tüketicide baş gösteren bir yatılım hatası sonucunda koruma topraklamasından geçen ve işletme topraklaması üzerinden şebekeye geri giden bir hata akımı, PE iletkeninde ve böylece aynı transformatör istasyonuna ait şebekeye bağlı bütün PE veya PEN'e bağlı tüketicilerde, başka bir izolasyon hatası olmasa dahi, potansiyel sürüklenmesi sebebi ile, bir hata geriliminin meydana gelmesine sebep olur. Şartların uygun olmaması halinde, hata akımı sigortanın kesme akımından küçük ise, hata akımı devresi kesilmez ve hata akımının işletme topraklamasında meydana getirdiği bu hata gerilimi de izin verilmeyen yüksek değerlerde olabilir. Devre kesilmezse tehlikeli gerilim uzun süre kalabilir.

3.5.3 IT - Tipi Şebeke

Bu tip şebekede, yıldız noktası toprağa karşı yalıtılmıştır veya yeteri kadar yüksek bir empedans üzerinden topraklanmıştır (Şekil 3.11). Şebekede baş gösteren ilk faz-toprak hatası, şebekeye bağlı cihazların çalışmalarını etkilemez. Ancak ikinci bir yalıtım hatası, toprak temaslı iki fazlı bir kısa devreye yol açar ve cihazların normal çalışmalarını olumsuz yönde etkiler.

Pratikte IT- tipi şebekede yalıtım durumu, bir kontrol cihazı ile sürekli olarak kontrol edilir. İlk yalıtım hatasını tespit edebilmek ve ikinci hatanın yol açacağı tehlikelerden sakınmak için, ilk hata baş gösterdiğinde ışıklı ve/veya sesli bir sinyal verilir.



Şekil 3.11 IT- tipi şebeke.

IT- tipi şebekelerde koruma hattı sisteminin kullanıldığı tesislerde şu şartların yerine getirilmesi beklenir:

1. Tesisin yıldız noktası topraklanmaz.
2. Bütün cihazların gövdeleri, binaların temas edilebilen metal kısımları, metal boru tesisleri, iyi topraklayıcılar, koruma hattı sistemine iyi iletken bir şekilde bağlanırlar.
3. Tesisin yalıtım durumunu kontrol için bir kontrol cihazı bulundurulur; yalıtım durumunun, kabul edilebilir en düşük bir değerin altına düştüğünü bildirmek için bu cihaz ışıklı veya sesli bir sinyal verir (Bayram, 2000; Bayram ve İlisu ,2004).

Koruma hattı sisteminin uygulandığı tesislerde ilk toprak hatası baş gösterdiğinde tesisin derhal devreden çıkarılması gerekli olmadığından aşağıda bildirilen sınırlı iş yerlerinde veya büyük tesislerin sınırlı bölümlerinde kullanılmaya elverişlidir:

Maden ocakları,

Santrallerin yardımcı tesisleri,

Kimya sanayii,

Ameliyathaneler,

Bir fabrikanın bir bölümü,

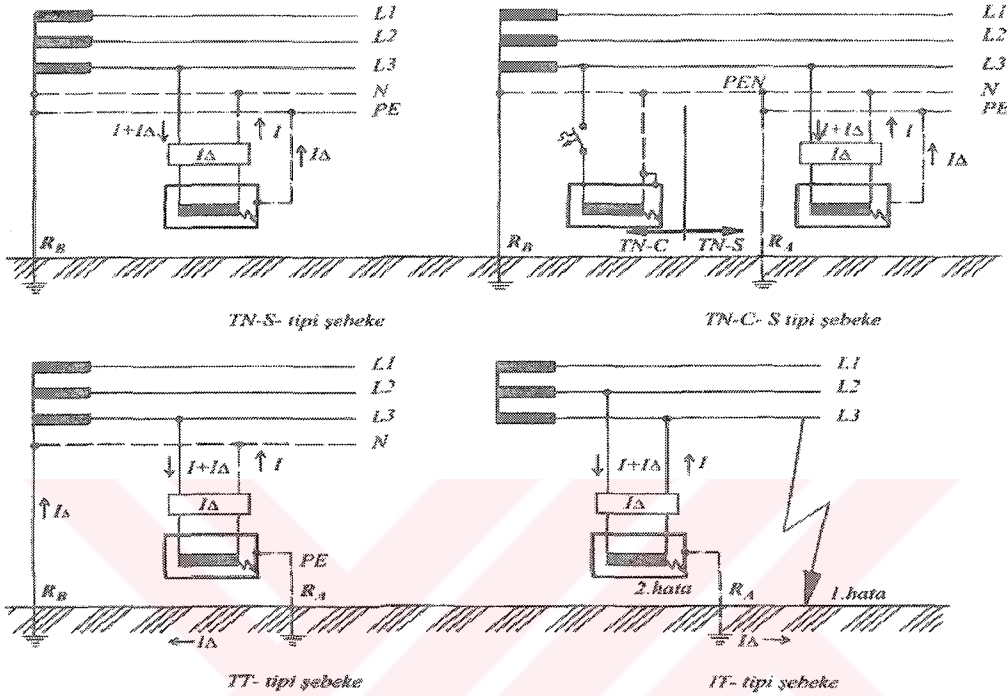
Bir hastahanenin bir bölümü.

3.6 Hata Akım Koruma Düzeneklerinin Kullanılması

Bütün bu alçak gerilim şebeke tipleri arasında TN-S- tipi, dokunma gerilimine karşı koruma sağlamak bakımından en uygun ve en güvenilir olanıdır. Bununla beraber, bu şebeke tipinde üç faz, bir nötr ve bir koruma iletkeni olmak üzere, beş adet iletken bulunduğu için, diğerlerinden %20-%30 kadar daha pahalıdır.

Hata akımı koruma anahtarının en kolay ve en rahat bir şekilde uygulandığı şebeke tipi TN-S- şebekedir. Burada üç faz ve bir nötr hattından başka ayrı bir de koruma hattına bağlanarak koruma sağlanır. Sadece dört iletkenli TN-C- tipi şebekede, nötr hattına, örneğin bir fazlı tüketicilerin işletme akım devreleri bağlandıklarından, bu gibi şebekeler hata akımı anahtarının kullanılmasına elverişli değildir. Ancak nötr hattı ile koruma hattının tüketici için ayrı çekildikleri şebeke bölümünde hata akımı ile koruma yapılabilir.

TT- tipi şebekede hata akımı ile korumanın sağlanması için korunacak cihazın gövdesinin topraklanması gerekir. Bunun için yapılacak topraklamanın (3.13) eşitliğini gerçekleştirmesi yeterlidir ve bunun ekonomik olarak yerine getirilmesi mümkündür(Bayram ve İlisu ,2004).



Şekil 3.12 Hata akımı koruma anahtarlarının çeşitli şebeke tiplerine uygulanma şekilleri.

3.7 Sistemde Hata Olması Hali

Dokunma gerilimine karşı güvenliğin sağlanması, hata halinde geçecek akımın koruma cihazlarının yeterli süre içinde çalıştıracak boyutta olması ile gerçekleşir. Bunun için topraklama sisteminin iyi tespiti, uygun direnç ve empedans değerlerini sağlayacak şekilde seçilmiş kesitli hatların çekilmesi veya topraklamaların yapılması gerekmektedir. Ayrıca koruma cihazlarının uygun değerde seçilmesi, yeterliliği ve dayanıklılığı da önem arz etmektedir.

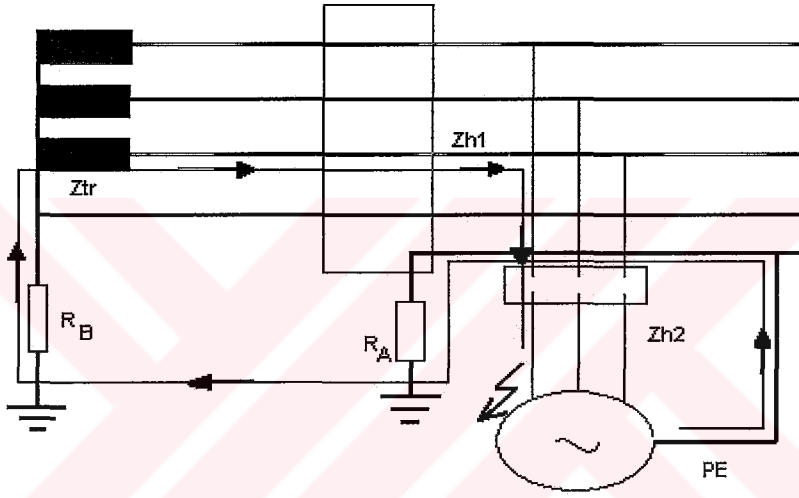
3.7.1 TN Sistemde Arıza Durumu ve Güvenlik

Bu bölümde TN Sitemde, örnek olarak TN-C-S Sistemde, bir hata halinde sistemin davranışı ve hata akımının izlediği yol anlatılacaktır (Şekil 3.13).

3.7.2. TT Sistemde Arıza Durumu ve Güvenlik

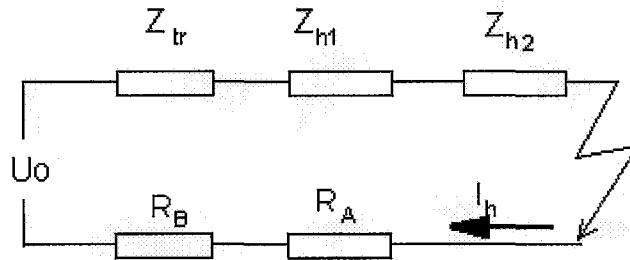
TT Sistem için de TN Sisteme benzer bir koruma şekli mevcuttur. TN sistemden farklı olarak burada hata akımının geçtiği yerler ve topraklama sistemlerinin doğal yapısından kaynaklanan farklılıklar bulunmaktadır. TT sistem için hata akım devresine dahil olan elemanlar ve hata akım devresinin izlediği yol Şekil 3.15’de gösterilmiştir.

Burada R_A , koruma topraklamasını ve R_B de işletme topraklamasını göstermektedir. Bu dirençlerin reaktans değerleri dikkate alınmayacak küçük olduğundan sisteme dahil edilmemiştir.



Şekil 3.15 TT Sistemde arıza haline hata akımının izlediği yol

Hata halinde oluşan hata akımı, koruma hattından geçerek yapılan koruma topraklamasına gider. Toprak üzerinde devresini tamamlayan hata akımı, işletme topraklaması ve trafo üzerinden geri dönüp hattın geçerek koruma devresinin bağlı olduğu hatta gelir ve sigortanın (veya koruma devresinin) açmasını sağlar. Hata akımının izlediği yol devresi Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16 TT Sistemde arıza devresi

Eşdeğer direnç değeri TN Sistemdekine bezer olarak ve çok küçük olan empedans değerleri ihmal edilerek eşitlik ,

$$R = R_{tr} + R_{h1} + R_{h2} + R_A + R_B \quad (3.8)$$

şeklini alır.

Buradaki R topraklama direnç değeri, hesap yolu ile bulunabileceği gibi ölçüm yolu ile de bulunabilir. Bu değer koruma cihazını açtıracak düzeyde olmalı (3.1) eşitliğini sağlamalıdır.

3.8 Nötr Üzerine Düşen Gerilim Değeri

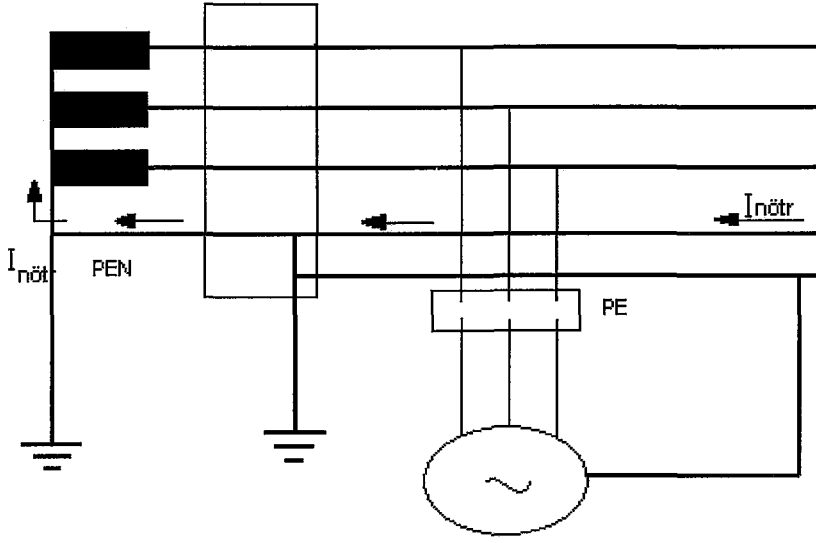
Günümüzde en yaygın olarak kullanılan alçak gerilim sistemi üç fazlı-dört telli, yani üç adet faz ve bir nötr hattından meydana gelen sistemdir. Enerjinin alçak gerilimli alıcı elemanlara ulaşmasının sağlayan bu sistem, endüstriyel tesislerde, ticari binalarda ve yerleşim bölgelerinde dağıtım şebekesi olarak yer almaktadır.

Alçak gerilim enerji dağıtım sisteminin tasarımı ve tesisi aşamasında ek fazlı yüklerin üç faz arasında dengeli olarak dağıtılmasına özen gösterilir. Üç fazlı yükler ise, yapıları gereği zaten dengeli olmak durumundadır. Böylece normal işletme koşullarında nötr iletkeninden küçük değerlerde örneğin faz akımının maksimum %20'si değerinde bir akım akması beklenebilir. Bu akımların topraklama sistemlerindeki akış yönleri aşağıdaki bölümlerde incelenmiştir.

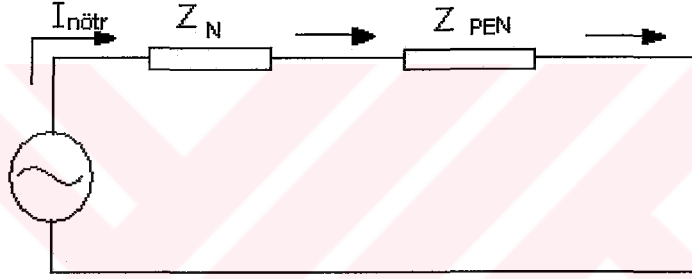
3.10.1 TN Sistemde Nötr Üzerine Düşen Gerilim Değeri

Sadece lineer yüklerin bulunduğu bir sistemde, bu yüklerin fazlara dengeli dağıtılmış olması halinde faz akımlarının toplamı sıfır olduğundan nötrde akım bulunmaz; ancak fazlarda yük dengesizliği var ise nötrden akım akabilir. Bu akım da nötr üzerinde bir gerilim düşümü meydana getirerek nötr-toprak potansiyelinin artmasına neden olur (Şekil 3.17).

Dengesiz yüklenme sonucunda hatlarda dolaşan akımların oluşturduğu artık akım nötr ve PEN hatları üzerinde dolaşmaktadır. Bu akım nötr hattı boyunca devam edip devresini de transformatörün yıldız noktası üzerinden tamamlamaktadır. Burada akan akım yolunun modellenmesi Şekil 3.18'de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 3.17 TN-C-S Sistemde nötr üzerine düşen gerilim



Şekil 3.18 TN-C-S Sistemde akım yolu modeli

Nötr üzerine düşen gerilim değeri,

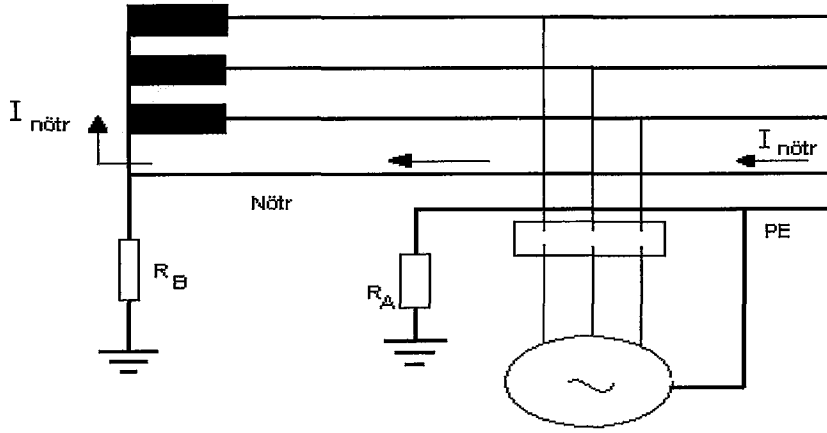
$$U_{n\ddot{o}tr} = I_{n\ddot{o}tr} \cdot R \quad (3.9)$$

olacaktır. R değeri, nötr ve PEN hatlarının kablo kesitine ve uzunluğuna bağlı olarak bulunmaktadır. $I_{n\ddot{o}tr}$, dengesiz yüklenmeden dolayı nötr hattı üzerinden geçen akımın değeridir.

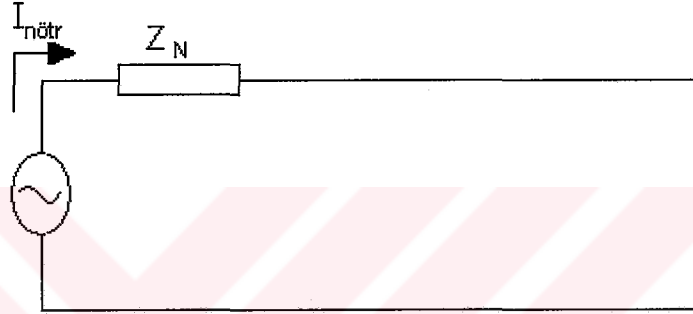
Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan biri, yapılacak olan topraklamanın nötr üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Şekil 3.20’de gösterildiği gibi nötr akımı sadece nötr hattı üzerinde dolaşmaktadır. Bu yüzden nötr üzerine düşen gerilim değerinin azaltılması, ancak nötr kesitinin büyütülmesi ile mümkün olmaktadır.

3.8.2 TT Sistemde Nötr Üzerine Düşen Gerilim Değeri

TT Sistemde de durum TN Sitem’deki ile benzerlik gösterir. Burada da artık akım yalnızca nötr hattı üzerinden geçerek trafonun yıldız noktasına ulaşır devresini tamamlar. Bu durumda oluşacak akım yolu devresi ve modellenmesi Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.19 TT Sistemde nötr üzerine düşen gerilim



Şekil 3.20 TT Sistemde akım yolu modeli

Dengeli durumda ve lineer yüklerin bulunduğu sistemde nötr üzerine düşen gerilim değeri çok büyük olmayacaktır. Ancak günümüzde yüklerin çoğunluğu nonlineer yüklerden oluştuğundan dolayı sistemde birçok harmonikler ve bozulmalar meydana gelmektedir. Bu da beraberinde faz akımlarının dengesiz akmasını ve artık akımların çoğalmasına sebep olur. Bu artık akımlar da nötr üzerine düşerek nötr-toprak potansiyelini arttırmaktadırlar. Bu değer artması beraberinde birçok sorunu da getirmektedir. Bu konu ile ilgili daha geniş açıklama 4.Bölüm’de yapılacaktır.

4. ELEKTRİK TESİSLERİNDE HARMONİKLER ve ETKİLERİ

4.1 Giriş

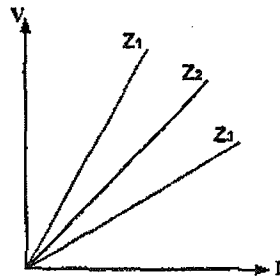
Ülkemizde ve dünyada enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Talebin artması daha güvenilir ve kaliteli enerjinin sağlanması durumunu ortaya çıkarmıştır. Faz gerilimlerinin dengeli olması, enerjinin sürekliliği, gerilim ve frekansın sabitliği gibi kriterler kaliteli enerji sağlamak için göz önünde bulundurulmalıdır.

Son yıllarda yarı-iletken elemanların ve büyük güçlü nonlinear elemanların kullanılması harmonik bileşenlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu harmonik kirlilik tüketiciye verilen enerjinin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

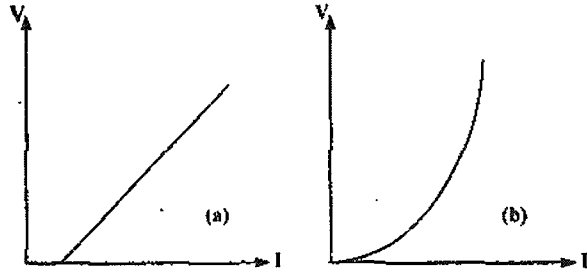
Harmonikler; motorlar, generatörler, kondansatörler, transformatörler ve enerji iletim hatlarında ilave kayıplara neden olurlar. Bazı durumlarda da harmonikler, güç sistem elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmalarına yol açabilirler. Ayrıca harmonikler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta akım ve gerilim bileşenleri bulunacağından, rezonans olayının meydana gelme olasılığı artacaktır. Rezonans sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler, işletmedeki elemanlara büyük zararlar verecektir (Kocatepe vd.,2003).

4.2 Harmoniklerin Oluşum Nedenleri

Akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanların kullanımına duyulan ihtiyaç nedeni ile harmoniklerin etkisi her geçen gün artış göstermektedir. Nonlinear eleman, uç karakteristiği yani akımı ile gerilimi arasındaki ilişkisi doğrusal olmayan elemandır. Nonlinear devre, nonlinear elemanlardan oluşabileceği gibi, bir elemanı nonlinear diğerleri lineer elemanlardan oluşan bir devre de olabilir. Lineer ve nonlinear elemanların uç karakteristikleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



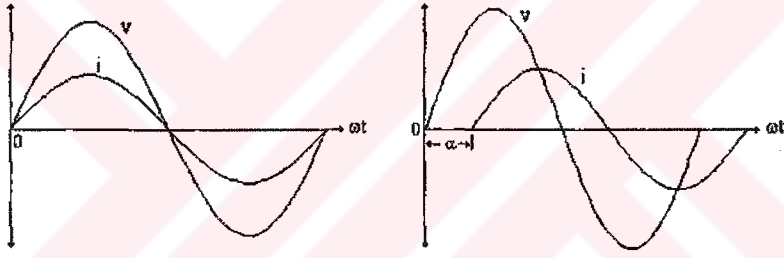
Şekil 4.1 Lineer elemanın uç karakteristiği



Şekil 4.2 Nonlinear elemanın uç karakteristiği

Nonlinear elemanlar ohm kanunu gerçeklemeyen elemanlar olarak da adlandırılabilirler. Çünkü; lineer elemanların sağladığı, sabit ve skaler bir değer olan V / I oranını nonlinear elemanlar sağlamazlar (Kocatepe vd.,2003).

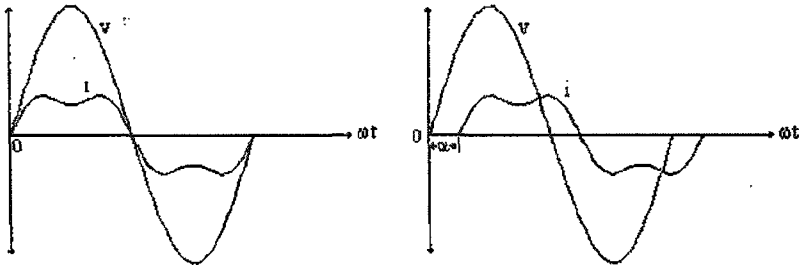
Nonlinear eleman gerilim dalga şekli ve akım dalga şekli aynı olmayan elemanlar olarak da tanımlanabilir. Nonlinear eleman kendisine uygulanan gerilim şeklinden farklı şekilde akım akıtır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de lineer ve nonlinear elemanların akım-gerilim dalga şekilleri verilmiştir.



(a) Faz farkı yok

(b) Faz farkı var

Şekil 4.3 Lineer elemanın akım-gerilim dalga şekilleri



(a) Faz farkı yok

(b)Faz farkı var

Şekil 4.4 Nonlinear elemanın akım-gerilim dalga şekilleri

4.3 Harmonikli Devreler

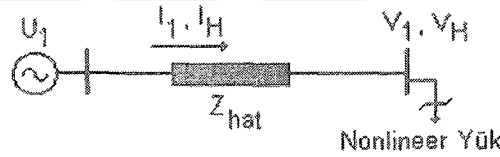
Nonsinüsoidal işaretlerin ortaya çıkması, besleme kaynağının ve devre parametrelerinin karakteristikleri ile bağlantılıdır. Besleme geriliminin nonsinüsoidal veya yükün nonlinear olması durumunda harmonikli akım ve gerilim meydana gelir. Kaynak ve yüke göre meydana gelen harmonik bileşenler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Kaynak ve yüke göre meydana gelen harmonik bileşenler

İşletme Türü		Harmonik Bileşenler		
Kaynak	Yük	Gerilimde	Akımda	Açıklama
Sinüsoidal	Lineer	-	-	Harmonik bileşenler yok.
Sinüsoidal	Nonlinear	-	Var	Yük nedeni ile akımda harmonikler oluşur.
Nonsinüsoidal	Lineer	Var	Var	Gerilim ile aynı harmonik bileşenler bulunur.
Nonsinüsoidal	Nonlinear	Var	Var	Aynı ve farklı harmonik bileşenler bulunabilir

4.3.1 Sinüsoidal Beslemeli Nonlinear Devreler

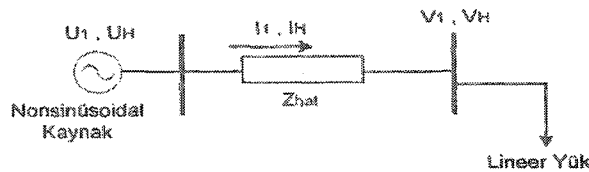
Besleme kaynağının sinüsoidal olduğu bir şebekeye nonlinear devre ya da devrelerin bağlı olması durumunda ortaya çıkan devrelerdir. Kaynakta sadece temel bileşen (U_1) bulunurken, nonlinear yükler nedeni ile harmonik akım bileşenleri (I_H) meydana gelir ve bu akımlar sonucunda Şekil 4.5’de görülen harmonik gerilim bileşenleri (V_H) sistemde görülür.



Şekil 4.5 Sinüsoidal şebekeye bağlı nonlinear yük

4.3.2 Nonsinüsoidal Beslemeli Lineer Devreler

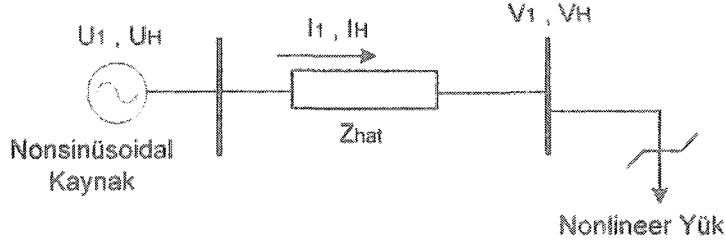
Devreye bağlı elemanlar lineer olduğu halde gerilim kaynağını nonsinüsoidal olması nedeni ile harmoniklerin olduğu devrelerdir (Şekil 4.6). Bu devrede, yük lineer olduğu için sadece besleme gerilimi harmoniklere bağlı olacaktır ve gerilimdeki harmonik bileşenler aynı harmonik dereceli olarak akımda da bulunacaklardır.



Şekil 4.6 Nonsinüsoidal beslemeli lineer yük

4.3.3 Nonsinüsoidal Beslemeli Nonlinear Devreler

Nonlinear elemanların nonsinüsoidal gerilim kaynağından beslenmesi halinde karşımıza çıkan devrelerdir (Şekil 4.7). Harmonik bileşenler, W.Shepherd ve P. Zand tarafından, hem gerilim hem akımda bulunan bileşenler,sadece gerilimde bulunan bileşenler ve sadece akımda bulunan bileşenler olarak üçe ayrılmıştır (Shepherd ve Zand, 1978; Kocatepe vd.,2003).

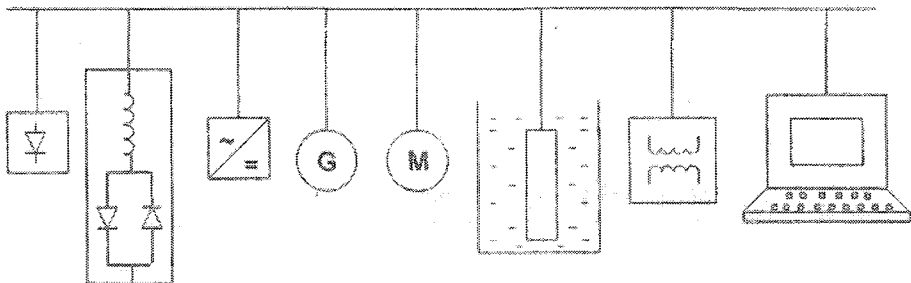


Şekil 4.7 Nonsinüsoidal beslemeli nonlinear devre

4.4 Başlıca Harmonik Kaynakları

Harmonik bileşenler, akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Harmonikleri meydana getiren başlıca elemanlar şunlardır:

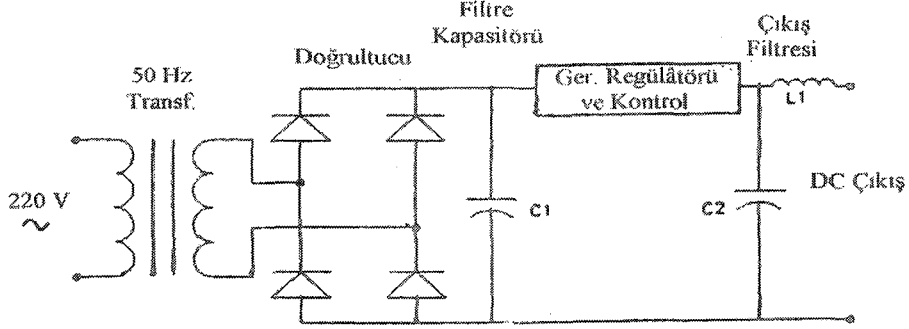
- Anahtarlama güç kaynakları,
- Gaz deşarj prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları,
- Bilgisayarlar, yazıcılar, kopyalama makineleri,
- Elektronik balastlar,
- Konverterler,
- Motorlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüleri,



Şekil 4.8 Harmonik üreten elemanlar

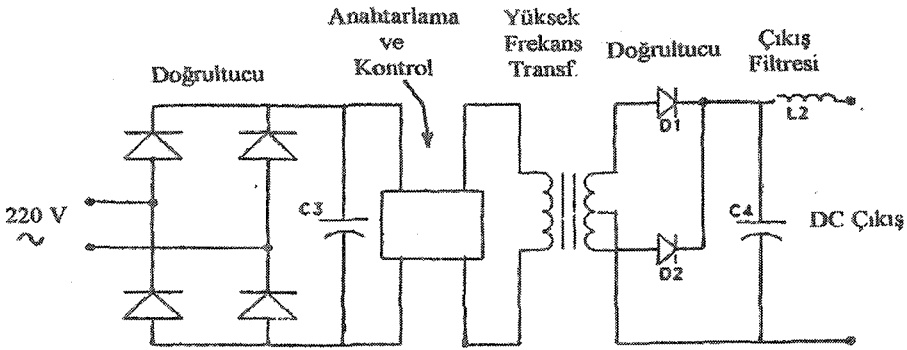
4.4.1 Anahtarlama Güç Kaynakları

Yarıiletken çipler kullanan modern elektronik cihazlar için genellikle 3-15 volt arasında bir dc güç kaynağı gerekli olur. Yakın geçmişteki yıllarda bu gerilimi elde etmek için bir indirici transformatör, doğrultucu köprüsü, filtre ve gerilim regülatöründen oluşan besleme üniteleri kullanılmaktaydı (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Lineer güç kaynağı

Şekil 4.10'da prensip şeması görülen modern teknoloji anahtarlama güç kaynaklarında ise, girişteki transformatör elimine edilmiş olup, doğrultucu diyot köprüsü doğrudan doğruya 220 voltluk giriştedir. Bu dc gerilim, anahtarlama devresi üzerinden 10-100 kHz mertebesinde yüksek frekanslı ac gerilime dönüştürülür. Bu gerilim yüksek frekanslı indirici transformatörden geçirilerek çıkışta yeniden doğrultulur. Yüksek frekans sayesinde buradaki transformatör ve demir çekirdekli filtre bobini, lineer güç kaynağına göre daha küçük boyutlu, daha hafif ve daha verimlidir.

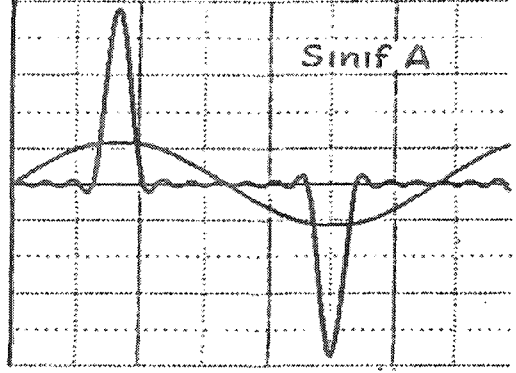


Şekil 4.10 Anahtarlama güç kaynağı

4.4.2 Bilgisayarlar

Bilgisayarlar nonlineer yük karakteristiğine sahiptirler ve yalnızca bozucu etkilere maruz kalmayıp, aynı zamanda birer etki kaynağıdır. İçlerinde bulunan anahtarlama güç kaynaklarından dolayı giriş akımının dalga biçimi, içindeki kondansatörünün yeniden deşarj olmasından dolayı çok kısa darbeler gösterirler (Şekil 4.11).

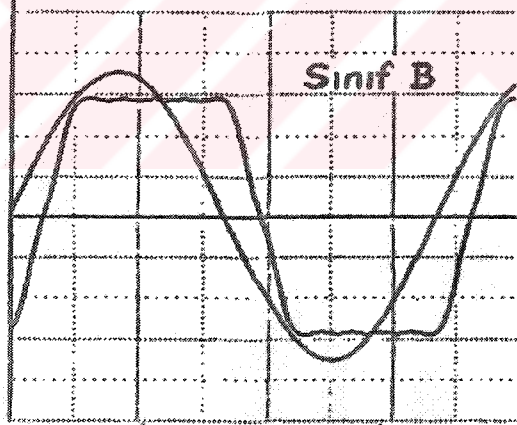
Hattaki gerilim distorsiyonları, güç sistemlerinde anormal gerilim düşümleri ve nötr iletkeninin aşırı yüklenmesine neden olabilirler.



Şekil 4.11 Bilgisayarlar için tipik akım dalgası

4.4.3 Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları

Civa buharlı lambalar, floresant lambalar, sodyum buharlı lambalar gibi bir tüp içerisindeki gazın deşarjı prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları nonlineer akım-gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler. Trapez ya da yaklaşık kare biçimine sahiptirler (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 floresant lambalar için tipik akım dalgası

4.4.4 Elektronik Balastlar

Yüksek frekanslı elektronik balastlarda en etkin harmonik bileşenler 3., 5., 7., 9. bileşenlerdir. Elektronik balastlar, filtreli ise harmonik etkinliği yok sayılır. Manyetik balastlı floresant aydınlatmada gerilim için $THD = 3,6\%$ değerinde iken, filtresiz sistemlerde $THD = 7,41\%$ değerine ulaşmakta, filtreli sistemlerde ise $THD = 0,74\%$ değerine inmektedir.

4.5 Harmonik Bilşenlere Ait Temel Formüller

Güç sisteminde akım ve gerilim harmoniklerinin ani değerleri aşağıdaki biçimde gösterilebilir:

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (4.1)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (4.2)$$

v_n : n. harmonik geriliminin ani değeri,

i_n : n. harmonik akımının ani değeri,

V_n : n. harmonik geriliminin efektif değeri,

I_n : n. harmonik akımının efektif değeri,

ω_1 : temel frekansa (f_1) ait açısal frekans,

θ_n : n. harmonik için gerilime ait faz açısı

δ_n : n. harmonik için akıma ait faz açısıdır.

Ani güç,

$$p(t) = v(t) i(t) \quad (4.3)$$

$p(t)$ 'nin T periyodunda aktif gücü,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (4.4)$$

bu eşitliklerden aktif güç,

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (4.5)$$

Farklı frekanslardaki akım ve gerilimlerin aktif güce katkısı yoktur (3.harmonik gerilimi ile 5. harmonik akımının çarpımı gibi).

Harmonikli toplam gerilim,

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (4.6)$$

Harmonikli toplam akım,

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (4.7)$$

olarak bulunur. Eğer gerilim ve akımın tepe değerleri (V_{mn} , I_{mn}) verilmiş ise,

$$V = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{mn}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

$$I = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{mn}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

ile gösterilir.

Görünen güç,

$$S = V \cdot I \quad (4.10)$$

veya

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (4.11)$$

Burada D, distorsiyon gücüdür ve,

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (4.12)$$

olarak ifade edilir. bu değer sinüsoidal işaretli lineer devrelerde sıfır değerindedir.

Reaktif güç,

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (4.13)$$

Sinüsoidal olsun veya olmasın toplam güç faktörü,

$$GF = P / S \quad (4.14)$$

'dir ve aktif güç eşitlik (4.4)'de gösterildiği gibi temel frekans bileşeni ve diğer harmonik bileşenlere ait güçlerin toplanması ile bulunur (Kocatepe vd.,2003).

4.5.1 Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)

THD, harmonik içeren periyodik dalga şeklinin tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel dalgadan oluşan bir sistem için THD sıfırdır.

THD, harmonik bileşenlerinin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değere oranıdır. Eşitlik (4.15)'de akım ve gerilim için THD gösterilmektedir,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad \text{ve} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (4.15)$$

THD'nin gerilim için diğer eşitlikleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$THD = \frac{[V^2 - V_1^2]^{1/2}}{V_1} \quad \text{veya} \quad THD = \left[\left(\frac{V}{V_1} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (4.16)$$

4.5.2 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Yüke ait bir değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (4.17)$$

I_L : yük tarafında, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. Hesap yapılacak tarihten bir yıl öncesine kadar süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır .

4.6 Uluslararası Sınırlamalar

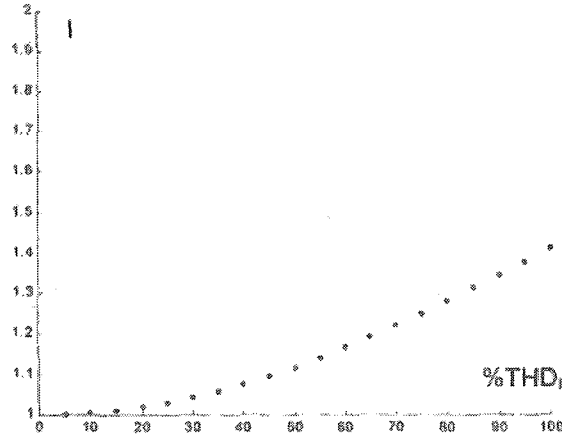
Son yıllarda harmoniklerin artmasına bağlı olarak çeşitli standartların ortaya konulması zorunlu hale gelmiştir. THD, TTD'nin akım ve gerilim değerlerinin maksimum sınırlarını belirlemeye ihtiyaç duyulmuştur.

Toplam harmonik distorsiyon (THD) ve toplam talep distorsiyonu (TTD) standartlarda bozulma ölçütleri olarak kullanılmaktadırlar. Akım ve gerilim büyüklüklerinin , harmonikleri içermesi durumundaki efektif değerleri THD'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad \text{ve} \quad I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (4.18)$$

V_1, I_1 : akım ve gerilimin efektif olarak temel bileşenidir.

Akım ve gerilim değerleri distorsiyon ile beraber artış göstermektedir. Akım için bu durum Şekil 4.13'de belirtilmiştir (Kocatepe vd.,2003).



Şekil 4.13 Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (I_r =sabit)

4.7 Harmonik Standartları

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerden zarar görmesini engellemek amacı ile harmonik bileşenleri sınırlandırılmışlardır ve buna bağlı olarak çeşitli standartlar oluşturulmuştur.

IEEE 519 ve VDE-0839'da elektrik dağıtım ve üretimi ile ilgili standartlar ortaya konmuştur. Bu standartlar Toplam Harmonik Distorsiyon değerine göre belirlenmiştir. Çizelge 4.2'de çeşitli ülkeler için THD değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 Çeşitli ülkeler için THD değerleri

Ülke	Gerilim (kV)	THD _v (%)
A.B.D.	Genel	5
	2.4-69	1,5
	≤ 115	8
	Özel	1,5
	2.4-69	8
	≤ 115	1,5
Almanya	Tüm Gerilimler (15.harmoniğe kadar)	10
Fransa	Tüm Gerilimler	1.6
İngiltere	0.415	5
	6.6-11	4
	33-66	3
	132	1.5

IEC 61000-2-2 konutlar ile ilgili, IEC 61000-2-4 ise endüstriyel tesisler için 2. sınıf olarak verilen standart değerlerini içerir (Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4).

Çizelge 4.3 Konutlar ile ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri

Tek harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥ 21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥ 12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥ 29	k				

$(k = 0,2+12,5/n)$

Çizelge 4.4 Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri

Tek harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1,5	9	2,5
11	5	≥ 6	1	15	2
13	4,5			21	1,75
17	4			≥ 27	1
19	4				
23	3,5				
25	3,5				
≥ 29	m				

$[m = 5\sqrt{(11/n)}]$

Avrupa standartları EN 50160’da alçak gerilim ve orta gerilime ait gerilim harmoniklerinin sınır değerleri Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Konutlarla ilgili alçak ve orta gerilim şebekeleri için harmonik distorsiyon limitleri

Tek harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6...24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

4.8 Harmonik Ölçümleri

Harmonik ölçümlerinde aşağıdaki kriterlere göre hareket edilir ve gerekli kontroller ve ölçümler yapılır:

a) Sürekli bir analizin (ölçümler arasında zaman boşluğu olmaksızın) gerekli olmadığı kabul edilen uygulamalar:

1) Sabit harmonik akımların ölçümü (TV alıcıları, aydınlatma dimmerleri vb. tarafından üretilen),

2) Bir besleme sisteminde, harmoniklerin ani etkilerinin önemli kabul edilmediği, uzun vadeli harmonik ölçümleri.

b) Sürekli bir gerçek-zaman analizinin gerekli olduğu durumlar. Elektronik faz kontrol ve regülasyon uygulamaları, motor dönüş yönünün ve hızının değişmesi gibi sebeplerden oluşan değişken harmonik akımlarının ölçümü, bu tip ölçümlerdir.

c) Sürekli bir gerçek-zaman ölçümünün kesinlikle gerekli olduğu durumlar. Zararlı olabilen, çok hızlı değişen harmonikler ya da çok kısa harmonik sıçramaların (1 s veya daha kısa süreli oluşabilen değişimler) analizi için bu tip ölçümler gerekli olabilecektir.

Veri değerlendirilmesi için, aşağıdaki zaman aralıklarının kullanılması tavsiye edilir:

çok kısa aralık	$(T_{vs}) : 3 \text{ s}$
kısa aralık	$(T_{sh}) : 10 \text{ dk.}$
uzun aralık	$(T_L) : 1 \text{ saat}$
bir gün aralığı	$(T_D) : 24 \text{ saat}$
bir hafta aralığı	$(T_{wk}) : 7 \text{ gün}$

4.9 Direnç, Endüktif ve Kapasitif Reaktansın Harmonikle Değişimi

Bir iletkenin içinden geçen akımın frekans sebebi ile iletken yüzeyinde homojen dağılması sonucu iletken direncinin değişmesi deri etkisi (skin effect) olarak tanımlanır. Deri etkisi olayının sonucu; doğru akımdaki direncine göre iletkenin alternatif akım direncinin artması ve endüktansının azalmasıdır.

4.9.1 Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi

İletkenin sinüsoidal akımdaki temel bileşen omik direnç değerine (R_1) nonsinüsoidal akım akışı halinde harmoniklerin her biri için R_n direnci ilave olmaktadır. Deri etkisi ile oluşan direnç değeri Arnold'un verdiği bir bağıntıyla hesap edilebilir (Arnold, 1938);

r_{dc} iletkenin km başına doğru akım direnci, n harmonik mertebesi $f_1(\text{Hz})$ temel frekans olmak üzere bir $x(n)$ değişkeni hesaplanmıştır.

$$x(n) = 0.050132 \sqrt{\frac{nf_1}{r_{dc}}} \quad (4.19)$$

olmak üzere h . harmonik frekansı için iletkenin direnci,

$$r_{ac} = \begin{cases} 0 \leq x(n) \leq 3 & \text{için} & r_{ac} = \frac{1}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{x(n)^4}{48} \right)^{1/2} \right] r_{dc} \quad (\Omega/\text{km}) \\ x(n) > 3 & \text{için} & r_{ac} = \left[0.26 + \frac{x(n)}{2.828} \right] r_{dc} \quad (\Omega/\text{km}) \end{cases} \quad (4.20)$$

olarak tanımlanmıştır. Bu bağıntılarda görüldüğü gibi harmonik mertebesi ve dolayısı ile frekans yükseldikçe hat iletkenlerinin direnç değeri artmaktadır.

Pratikte enerji şirketleri tarafından gerilim değerine bağlı olarak tanımlanan düzeltme faktörleri ile iletkenin temel frekanstaki direnci R_1 çarpılarak n .harmonik frekansındaki direnç değeri kolayca belirlenebilmektedir.

Çizelge 4.6 Çeşitli gerilimler için düzeltme faktörleri ile direnç değerlerinin belirlenmesi

Enerji Şirketi	Gerilim (kV)	Harmonik Mertebesi (n)	n. Harmonik Frekansındaki Direnç (Ω)
NGC (İngiltere)	400, 275	$n \geq 1,5$	$0,74R_1 \cdot (0,267 + 1,073 \cdot \sqrt{n})$
EDF (Fransa)	132	$n \geq 2,35$	$R_1 \cdot (0,187 + 0,532 \cdot \sqrt{n})$
	400, 225	$n \geq 2$	$0,74R_1 \cdot (0,267 + 1,073 \cdot \sqrt{n})$
	150, 90	$n \geq 2$	$R_1 \cdot (0,187 + 0,532 \cdot \sqrt{n})$

4.9.2 Harmoniklerin Reaktanslar Üzerine Etkisi

Elektrik güç sistem elemanlarının modellenmesinde endüktif ve/veya kapasitif reaktanslar geniş bir yer tutmaktadır. Temel frekanstaki (f_1), endüktif reaktansı $X_L^{(1)}$ olan bir bobin ile temel frekanstaki kapasitif reaktansı $X_C^{(1)}$ olan bir kondansatör elemanının n . harmonik frekansındaki $X_L^{(n)}$ ve $X_C^{(n)}$ reaktansları,

$$X_L^{(n)} = \omega L = 2\pi f L = 2\pi n f_1 L = \underbrace{2\pi n f_1 L}_{X_L^{(1)}} = n X_L^{(1)} \quad (4.21)$$

$$X_C^{(n)} = \frac{1}{2\pi n f_1 C} = \frac{1}{2\pi n f_1 C} = \frac{1}{\underbrace{2\pi n f_1 C}_{X_C^{(1)}}} = \frac{X_C^{(1)}}{n}$$

eşitlikleri ile bulunur. Harmonik mertebesi arttığı zaman endüktif reaktans artmakta kapasitif reaktans ise azalmaktadır (Kocatepe vd.,2003).

4.10 Harmonik Bileşenlerinin Faz Sırası

Nonlinear yükler içeren üç fazlı dengeli bir sistemde, faz-nötr geriliminin temel bileşeninin efektif değeri V_1 ve temel frekans için hesaplanan açısal hız ω_1 olmak üzere, L1, L2, L3 faz gerilimlerinin temel bileşenlerinin ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} &= \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ &= \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t - 2\pi/3 + \phi_1) \\ &= \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t + 2\pi/3 + \phi_1) \end{aligned} \quad (4.22)$$

olarak ifade edilebilir. Gerilimin n. harmonik bileşeninin efektif değeri V_n olmak üzere; L1, L2, L3 faz gerilimlerinin n. harmonik bileşenlerinin ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} &= \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \phi_n) \\ &= \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t - 2\pi n/3 + \phi_n) \\ &= \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + 2\pi n/3 + \phi_n) \end{aligned} \quad (4.23)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir. (4.23) eşitliğinde görüldüğü gibi, harmonik mertebesi n'e bağlı olarak harmonik bileşenlerinin faz gerilimlerinin faz açılan arasında pozitif sequence, negatif sequence veya sıfır sequence faz sırasına uygun olarak $\pm 120^\circ$ veya 0° faz farkı meydana gelmektedir. 4.23 eşitliği ile 2.harmonik ve 3.harmonik faz gerilimlerinin ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} &= \sqrt{2} V_2 \sin(2\omega_1 t + \phi_2) \\ &= \sqrt{2} V_2 \sin(2\omega_1 t + 2\pi/3 + \phi_2) \\ &= \sqrt{2} V_2 \sin(2\omega_1 t - 2\pi/3 + \phi_2) \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{2} V_3 \sin(3\omega_1 t + \phi_3) \\ &= \sqrt{2} V_3 \sin(3\omega_1 t + \phi_3) \\ &= \sqrt{2} V_3 \sin(3\omega_1 t + \phi_3) \end{aligned} \quad (4.25)$$

olarak verilebilir.

Dengeli olduğu kabul edilen bir nonlinear yük akımının temel bileşeninin efektif değeri I_1 ve temel frekans için hesaplanan açısal hızı ω_1 olmak üzere, L1, L2, L3 fazlarına ait yük akımların temel bileşen ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t) \\
&= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\
&= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + 2\pi/3)
\end{aligned} \tag{4.26}$$

olarak tanımlanır. Nonlinear yük akımının n. harmonik bileşeninin efektif değeri I_n olmak üzere; L1, L2, L3 faz akımlarının n, harmonik bileşenlerinin ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t) \\
&= \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t - 2\pi n/3) \\
&= \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t + 2\pi n/3)
\end{aligned} \tag{4.27}$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir.

Buradan üç ve üçün katı harmonik bileşenleri için önemli sonuçlar çıkarılabilir. Özel bir durum olarak $k=1,2,3,\dots$ olmak üzere $n=3k$ mertebesindeki harmonik bileşenlerinin (3.,6.,9.,...) ani değerleri (4.26) ve (4.27) eşitliklerine göre;

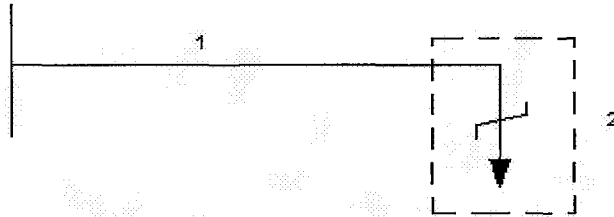
$$i_{a_{3k}}(\omega t) = i_{b_{3k}}(\omega t) = i_{c_{3k}}(\omega t) = \sqrt{2}I_{3k} \sin(3k\omega_1 t) \tag{4.28}$$

değerini alır. Yukarıdaki eşitlikte de görüldüğü gibi, dengeli şebeke ve yük koşulları altında üç ve üçün katı harmonik bileşenlerinin her üç faz akımları birbirine eşittir.

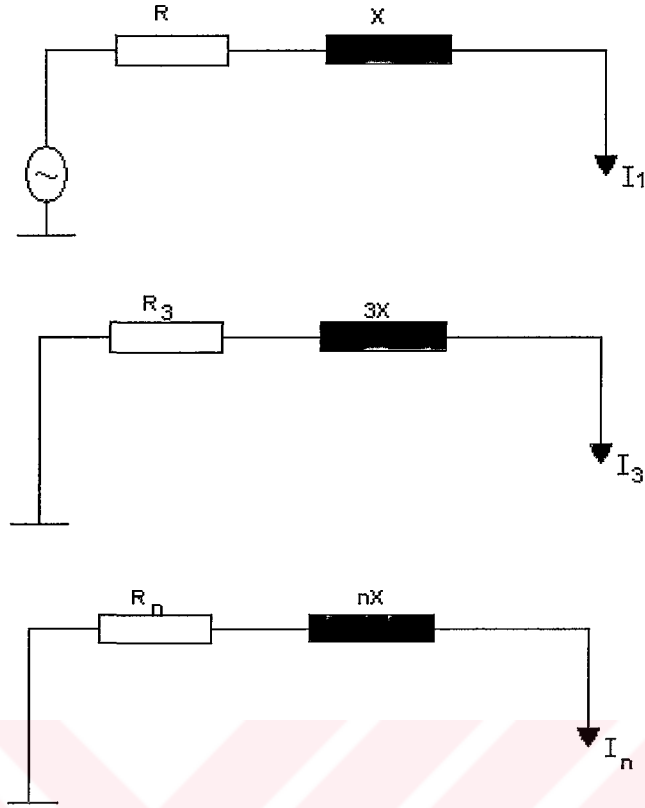
4.11 Harmoniklerin Modellenmesi

Şekil 4.14'de nonlinear yük içeren basit bir enerji dağıtım hattının modellenmesi göz önüne alınmıştır. Bu modelleme yapılırken aşağıdaki kabuller geçerlidir:

- Besleme gerilimleri dengeli ve sınısoidaldir.
- Yük akımları dengelidir.
- Hattın omik direnci ve reaktansı lineer özelliktedir.
- Faz iletkenleri arasındaki karşılıklı kuplaj etkisi ihmal edilebilir.
- Bütün şönt (kaçak) kapasiteler ve dirençler ihmal edilebilir.



Şekil 4.14 Nonlinear yük içeren bir enerji dağıtım hattı
1: Enerji dağıtım hattı
2: Nonlinear yük



Şekil 4.15 Tek hat harmonik bileşen modelleri

R: hattın omik direnci

X: hattın reaktansı

Bu durumda n'inci harmonikle ilgili devre denklemi

$$E_n = Z_n \cdot I_n + V_n \quad (n=1,3, 5,...) \quad (4.29)$$

şeklinde yazılabilir. E hat başı (besleme), V_n ise hat sonu gerilimidir. Hattın empedansı ise

$$Z_a = R_n + jnX \quad (4.30)$$

olacaktır. Burada, R_n değeri (4.20) eşitliğinden veya Tablo 4.6'dan, X_n değeri ise (4.21) eşitliğinden bulunacaktır.

Faz akımlarının dengesiz olması ve alçak gerilim tesisinde nötr iletkeninin bulunması halinde, denklem (4.29) ifadesine ek olarak nötr iletkeni için de denklem yazmak gerekir. Birden fazla yük içeren (d tane yük düğüm-uç noktası olan) bir tesiste, nötr akımı parça parça göz önüne alınabilir. Toplamsallık teoremi yardımıyla n'inci harmonik için nötr akımının değeri

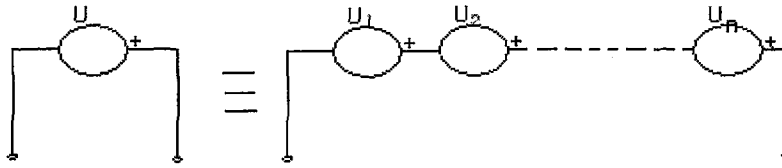
$$I_{n\text{ nötr}} = \sum_{k=1}^d I_{n\text{ nötr},k} \quad (4.31)$$

olacaktır.

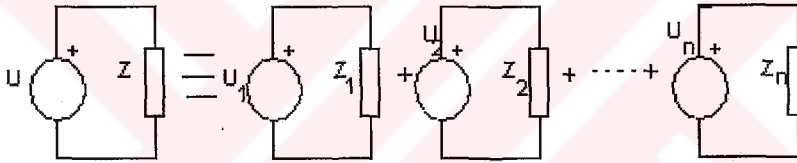
4.12 Süperpozisyon Teoremi

Devrede birden fazla sayıda kaynağın bulunması halinde, sisteme süperpozisyon teoremi uygulanarak devrenin eşdeğerinin bulunması sağlanır. Sistemde Bölüm 4.3’de anlattığımız durumlardan biri dolayısı ile çeşitli harmoniklerin oluşması halinde, sistemin çözümü için süperpozisyon teoremi kullanılır.

Örneğin; bir sistemde çok sayıda nonsinüsoidal gerilim kaynağı olduğunu ve bunların çeşitli harmonikler ürettiğini farz edelim. Bu durumda sistemi ayrı ayrı kaynaklardan beslenen bir devre gibi düşünüp, bu şekilde hareket edebiliriz.



Şekil 4.16 Nonsinüsoidal gerilim kaynağı eşdeğeri



Şekil 4.17 Nonsinüsoidal beslemeli devrenin eşdeğeri

Bu durumda oluşacak akım ve gerilim harmoniklerinin değerleri için şu eşitlikler ortaya konmaktadır,

$$V = \left[\sum_{n=1}^N V_n^2 \right]^{1/2} \quad (4.32)$$

$$I = \left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]^{1/2} \quad (4.33)$$

Sistem temel bileşenin yanı sıra, 3., 5. ve 7. harmoniklere sahip ise bu durumda gerilim ve akım değerleri,

$$V = [V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2]^{1/2}$$

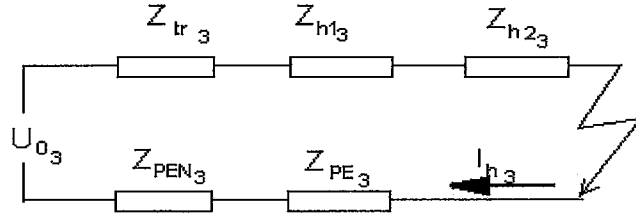
$$I = [I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2]^{1/2}$$

olarak bulunur.

4.13 Harmonikli Durumda Sistemde Meydan Gelen Arızanın İncelenmesi

4.13.1 Faz Dağılımını Dengeli Olması Halinde

Eğer besleme gerilimi U_0 primer taraftan kaynaklanan harmoniklere sahip ise, $U_2, U_3, U_4, U_5, \dots, U_n$ gibi harmonik bileşenlere sahip olur. Her harmonik (besleme) gerilim bileşeni için süperpozisyon teoremi uygulandığında ayrı ayrı eşdeğer devreler çizilebilir. Örnek olarak; 3. harmoniğe sahip TN sistemde bir arıza oluşması halinde (Şekil 3.13) oluşan devrenin modellemesi Şekil 4.18'deki gibi olacaktır.



Şekil 4.18 3. harmonik için TN Sistemde arıza devresi modeli

Örneğin, trafonun empedans değeri temel bileşenler ve dengeli durum için,

$$Z_{tr} = R_{tr} + jX_{tr}$$

değerinde iken 3. harmoniğin etkisi ile,

$$Z_{tr}^{(3)} = R_{tr}^{(3)} + j3X_{tr}$$

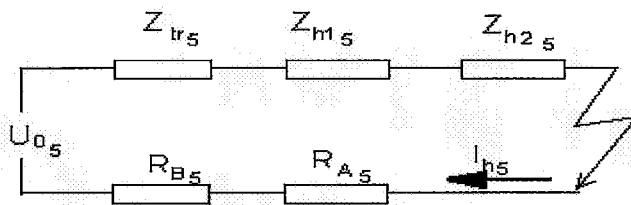
değerini alacaktır.

$R_{tr}^{(3)}$ = deri etkisi (skin effect) ile değişen direnç değeri (denklem(4.20)).

$j3X_{tr}$ = harmonik frekansına bağlı olarak (4.21) eşitliğinden bulunan reaktans değeridir.

Sistemde 3. harmoniği yanı sıra birçok harmonik gerilimleri daha oluşacaktır. Bu gerilimler yukarıda verilen örnekte olduğu gibi ayrı ayrı hesaplanarak süperpozisyon teoremi ile eşdeğer akım ve gerilim değerleri (4.32) ve (4.33) eşitliklerinden bulunabilir.

Aynı şekilde TT sistemi de modelleyebiliriz. 5.harmonikte TT Sitemde bir arıza olması halinde (Şekil 3.15) oluşacak devrenin eşdeğeri Şekil 4.19'deki gibi olacaktır.



Şekil 4.19 5. harmonik için TT Sistemde arıza devresi modeli

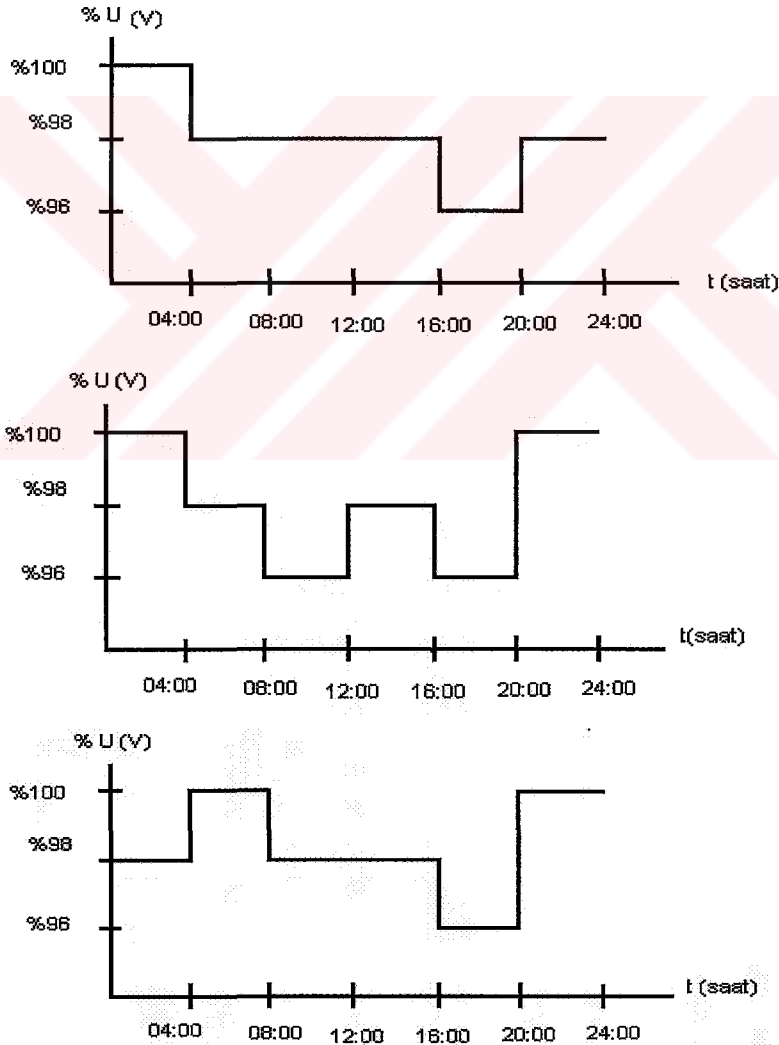
Hat 1'in empedans değeri 5. harmonik için,

$$Z_1^{(5)} = R_1^{(5)} + j5X_1$$

TN Sistem örneğinde olduğu gibi burada da birçok harmonik frekansı mevcuttur ve bunlara süperpozisyon teoremi uygulandığında eşdeğer akım ve gerilim değerleri (4.32) ve (4.33) eşitliklerinde bulunur.

4.13.2 Faz Dağılımının Dengesiz Olması Halinde

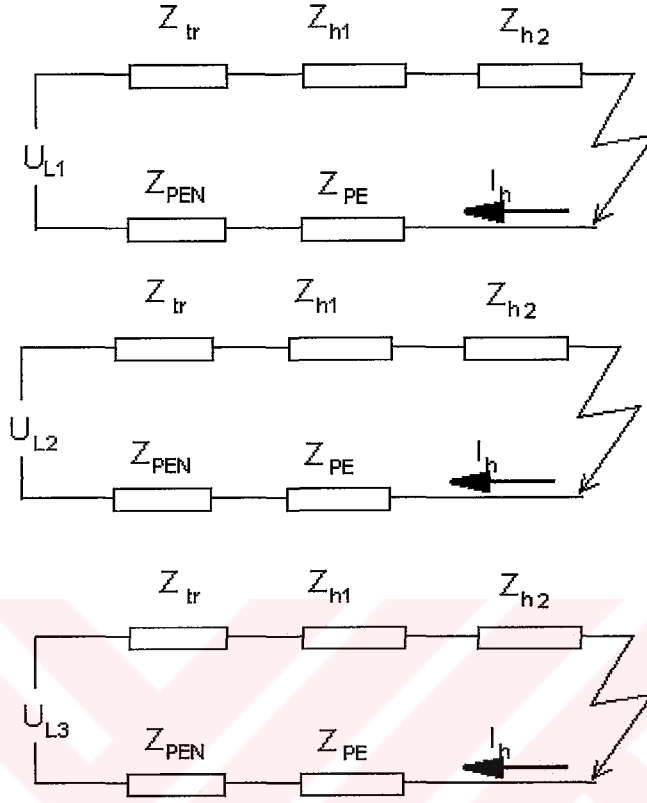
Son yıllarda kullanılan sistemlerde birçok nonlineer yük olduğundan dolayı, dengesiz yüklenme ortaya çıkmaktadır. Bu durumda besleme gerilimleri her faz için farklı olacaktır. Besleme gerilimleri yük durumuna göre her zaman dilimi için ayrı değerler alacaktır. Örnek şekil aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.20 L1, L2, L3 faz gerilimlerinin gün içindeki değişimleri

Görüldüğü üzere besleme gerilimleri, günün her saatinde her faz için farklı değerler almaktadır. Bir arıza halinde, hangi fazın hangi saatte gövde ile temas edeceğini

bilemediğimizden dolayı her 3 faz için de eşdeğer devre çizilmelidir. Şekil 4.21’de faz dengesizliğinin Şekil 3.13 üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.21 Faz gerilimlerinin dengesiz olması halinde gövdeye kaçak akım senaryoları

Dengesizliğin Z empedans değerlerine etkisi yoktur. Yalnızca kaynak yani besleme gerilimini etkilemektedir. Burada oluşacak harmonik frekansları Z değerlerinin dengeli durumda olduğu gibi değiştirmektedir (Bölüm 4.13.1).

4.14 Harmonikli Durumda Nötr Üzerine Düşen Gerilimin İncelenmesi

Sadece lineer yüklerin bulunduğu varsayılan bir sistemde, bu yüklerin fazlara dengeli olarak dağılmış olması halinde faz akımlarının toplamı sıfır olduğundan, nötrde akım bulunmaz; ancak fazlarda yük dengesizliği var ise nötrden akım akabileceği Bölüm 3.10’da ifade edilmiştir. Fakat sistemde nonlineer yükler var ise nötrde daima akım bulunur ve bunların fazlara dengeli dağıtılması ile nötr akımı yok olmaz. Durum genel haliyle aşağıdaki gibi açıklanabilir

(a) Üç fazlı nonlineer yüklerin 3. ve 3’ün katları mertebelerdeki akım harmonikleri, her bir yük için üç faz iletkenlerinde aynı faza düşerek toplamda çakıştıklarından, faz büyüklüklerinin 3’er misli akımlar olarak nötr iletkenine yığılırlar.

(b) Üç faza dağıtılmış farklı karakterlerde tek fazlı nonlinear yüklerin 3. ve 3'ün katı mertebeli akım harmonikleri, özellikle spektrum açılışları yüzünden çakışma durumundan oldukça ayrılabilmesine rağmen yine de hatırı sayılır bileşimler halinde nötr iletkenine yığılırlar.

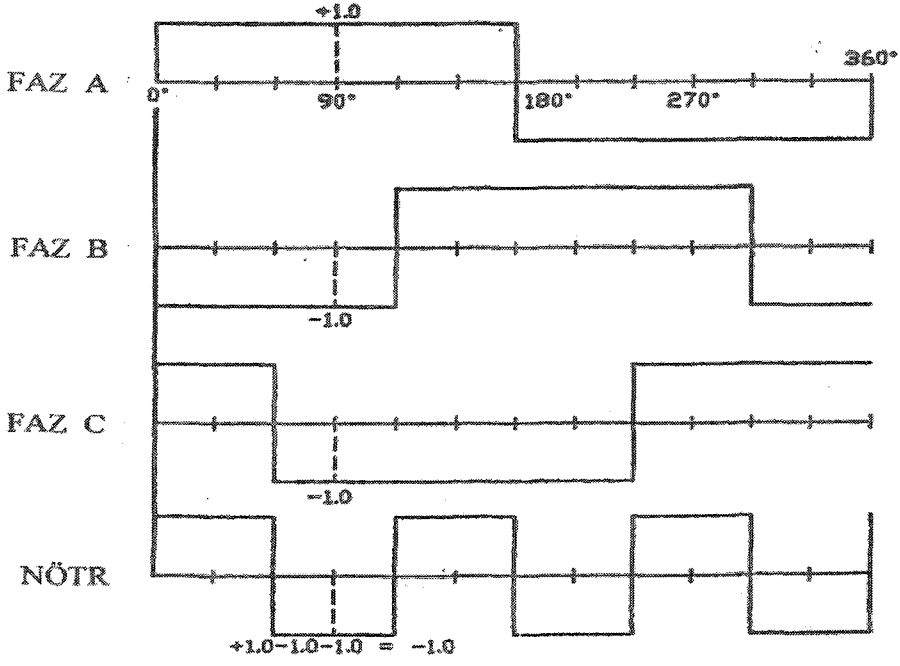
(c) (a)'da belirtilen nonlinear yüklerin temel bileşen ve 5., 7., 11., 13. vb. harmonik akımları, üç faza dengeli dağıldıklarından, toplamda sıfır olur ve dolayısıyla bunların nötr akımına katkıları olmaz.

(d) (b)'de sözü geçen ve zaten spektrum farkları yüzünden dengeli olamayan farklı karakterli tek fazlı nonlinear yüklere ve (a)'da parantez içinde belirtildiği gibi fazlar arasında dengeli çalışmayan eş karakterli tek fazlı nonlinear yüklere ait akımların temel bileşen ve 5., 7., 11., 13. vb. harmonikleri ise, üç fazın toplamında sıfır olmadıklarından, fazör toplamaları halinde nötr akımına katılırlar.

(e) Üç fazlı lineer yüklerden nötr akımı kaynaklanamaz. Ancak, tek fazlı lineer yükler, gerek kuruluştan gelen ve gerekse çalışma rejimlerine ve eşzamanlılık durumlarına göre değişen fazlar arası dengesizlikleri oranında nötr akımına katkısında bulunurlar.

Özetle, 3. ve 3'ün katları mertebelerdeki harmonikler, fazlara ister dengeli, ister dengesiz dağılmış olsunlar, nötr iletkeninde ağırlıklı olarak bulunurlar; bu bulunuş, faz değerlerinin aritmetik toplamına eşit veya ona yakın büyüklüklerde olur. Temel bileşen ve 5., 7., 11., 13. vb. harmonikler ise sadece dengesiz olmaları halinde nötr akımında mevcut olurlar.

Şekil 4.22'te 3 fazlı nonsinüsoidal akımların dengeli olmaları halinde bile toplamalarının sıfır olmayıp 3. ve 3'ün katı mertebeli harmoniklerden meydana gelen nötr akımlarına sebep oluşlarının örnekleri görülmektedir.



Şekil 4.23 Üç fazlı dengeli nonsinüsoidal akımlar halinde nötr akımının meydana gelmesine bir örnek (Gruzs, 1990).

4.14.1 Harmonikli Nötr Akımlarının Sebep Olabildiği Problemler

- Nötr iletkeninde aşırı ısınmalar ve bununla bağlantılı ek enerji kayıpları meydana gelecektir.
- Nonlineer yüklerin yol açtığı harmonik yönünden zengin nötr akımları çoğunlukla "tepe değeri/efektif değer" oranı yüksek olan akımlar olduğundan, harmonik frekanslardaki şebeke empedansları üzerinde bunların yapacağı gerilim düşümleri, şebekede gerilim dalgalarını "basık tepeli" olacak biçimde bozacaktır. Bu gerilim distorsiyonu da, motor vb. elektromanyetik elemanlarda ek ısınmalara yol açacaktır.
- Elektriksel gürültünün bir çeşidi, nötr-toprak arası gerilim farkı niteliğinde olanıdır. Yüksek harmonikli nötr akımlarında, nötr iletkeninin harmonik frekanslardaki empedansı üzerinde önemli gerilim düşümleri ortaya çıkabilir. Bunlar, yüklerin bağlantı noktalarına nötr-toprak arası elektriksel gürültü olarak yansır. Bu ise bilgisayarlar, programlanabilir kontrolörler gibi hassas elektronik cihazların çalışmasını bozabilir (Gruzs, 1990)
- Anahtarlama vb. güç kaynaklarında giriş tarafı kondansatörünün tam dolması gerilimin tepe değerine bağlı olduğundan, yukarıda sözü geçen "basık tepeli" gerilim dalgası bu güç kaynaklarına düşük gerilim gibi görünecektir (Gruzs, 1990).

4.14.2 Nötr İletkeninden Geçen Harmonikli Akımın Şebeke Üzerindeki Etkinliğinin Analizi

Nötr iletkeninden geçen harmonik akım bileşenleri şebekeyi nötr iletkeninin ısınması yönünden ve nötr iletkeninde ek I^2R kayıplarına yol açılması bakımından olumsuz yönde etkileyecektir.

"d" adet düğüm (yük bağlantı) noktası bulunan bir alçak gerilim şebekesinde, "harmonik akım dağılımı" analizi yapıldıktan sonra,

- (Tüm düğümler arasındaki) her bir faz iletkeni parçasından geçen akımların harmonik bileşenleri,
- Şebeke boyunca - tüm düğümlerin görüntüleri arasındaki - nötr iletkeni parçalarından geçen akımların harmonik bileşenleri elde edilecektir.

Nötr akımının yönü, beslenme noktasının sayısı, hattın topolojisi, hat yüklerinin (faz güçlerinin) değerleri gibi parametrelere bağlı olarak soldan sağa veya sağdan sola olabilir.

5. SAYISAL UYGULAMA

Sayısal uygulama bölümünde, önceki bölümlerde nötr hattı ile ilgili olarak anlatılan bilgiler ışığı altında Şekil 5.1’de verilen 3 katlı bir binada, nötr hattı gerilimlerinin değişimini etkileyebilecek değişik parametreler kullanılarak değişik durumlar oluşturulmuştur. Nötr hattı üzerine düşen gerilimin gösterdiği değişimin Matlab Simulink programı ile hesaplanması ve analizi gösterilmiştir. Uygulama esnasında oluşturulan değişik model ve durumların açıklamasına geçmeden önce bu örnek sistemde kullanılan büyüklükler ve değerleri aşağıda verilmiştir ($f=50\text{Hz}$):

Yükler:

3 katlı binanın her katında farklı yükler taşıyan 3 prizin bulunduğu düşünülmüştür. Bu yüklerin değerleri kat sırasına göre;

Kat 1: $P = 2500 \text{ W}$, $\cos\phi = 0.75$ değerinde endüktif yük.

Kat 2: $P = 1500 \text{ W}$, $\cos\phi = 0.85$ değerinde endüktif yük.

Kat 3: $P = 2000 \text{ W}$, $\cos\phi = 0.80$ değerinde endüktif yük.

olarak verilmiştir.

Kullanılan gerilim seviyesi 220 V olup iletkenlerdeki gerilim düşümleri ihmal edilmiştir. Faz açıları ile kaynak gerilimleri sırası ile aşağıdaki gibidir:

$$v_{L1} = 220 \text{ V} \quad 0.00^\circ$$

$$v_{L2} = 220 \text{ V} \quad 120.00^\circ$$

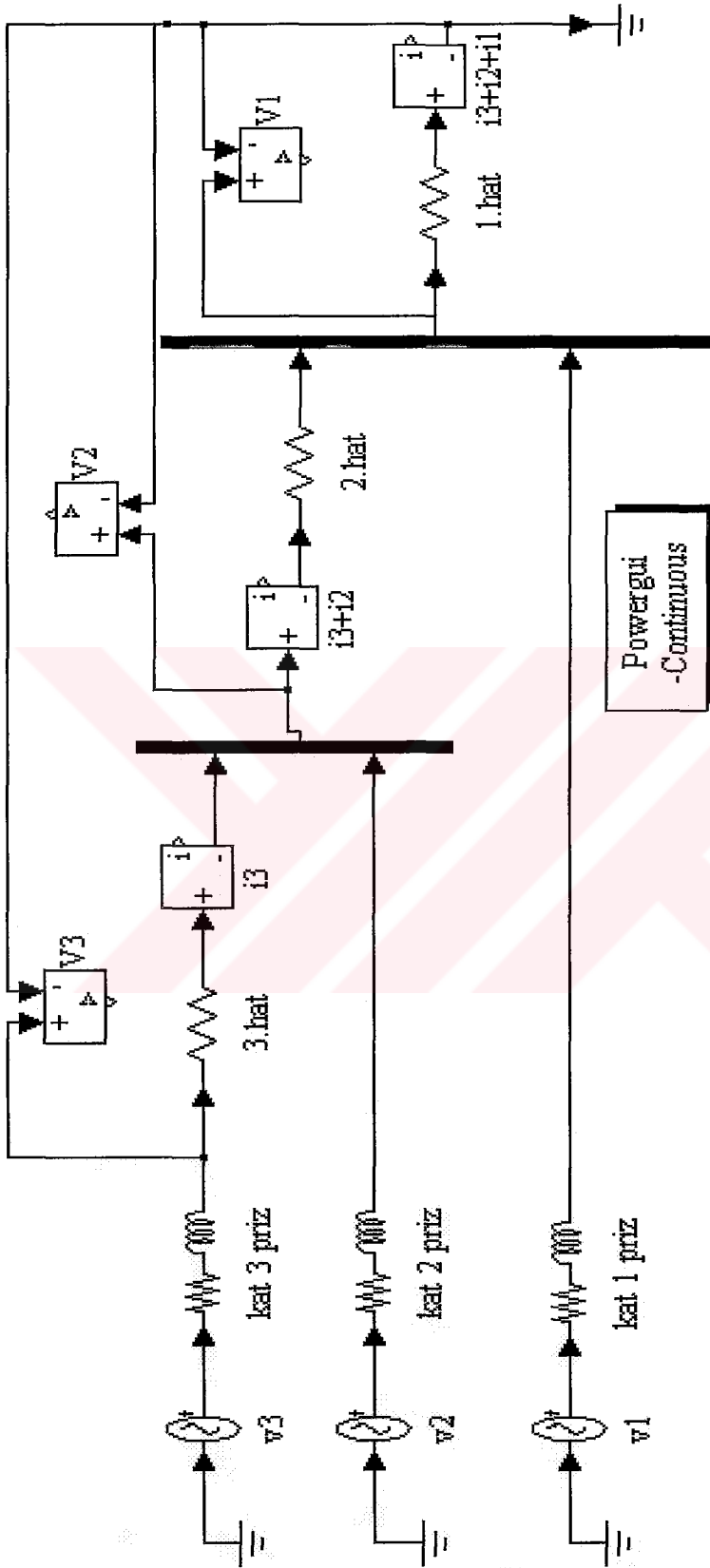
$$v_{L3} = 220 \text{ V} \quad -120.00^\circ$$

Çekilen nötr hattı için NYY (YVV) TS 212 tipi enerji kablosu kullanılmıştır. Bu sistemde kullanılan nötr hatları 2.5 mm^2 ve 4 mm^2 olarak düşünülmüştür ve bu kesitler için ohm /km direnç değerleri aşağıdaki gibidir:

$$1 \times 2.5 \text{ mm}^2 \text{ için} = 7.14 \Omega / \text{km}$$

$$1 \times 4 \text{ mm}^2 \text{ için} = 4.47 \Omega / \text{km}$$

Modelde çekilen hatların reaktansları ihmal edilmiş olup endüktans için sıfır, kapasite için sonsuz değerleri verilerek ve sadece yukarıdaki direnç değerleri kullanılarak hat modellenmesi yapılmıştır.



Sekil 5.1 Üç katlı bir binada nötr ile toprak iletkeni arasındaki gerilimlerin hesaplanmasına ilişkin devre

Yukarıda verilen ana değerler ile birlikte çeşitli durumların incelenmesi için ortaya konulacak parametreler şunlardır:

1. Sistemin yüklenme durumu: Bu parametre yukarıda belirtmiş olduğumuz prizlerdeki yüklerin tam yüklenmesi veya yarı yükte çalışması olarak iki değişik durumu içermektedir. (Yarı yükte prizlerden çekilen güç oranı yarıya düşürülmüştür).

- a. %100 yüklenme,
- b. %50 yüklenme.

2. Çekilen nötr hattının kesit değeri: Binaya çekilen nötr hattı kesitinin nötr üzerine düşen gerilim değerini nasıl etkileyeceğini göstermek için iki değişik kesit değeri ile modelleme yapılmıştır.

Binaya önce 2.5 mm^2 kesitinde bir hattın daha sonra ise 4 mm^2 kesitinde bir hattın çekilme durumlarını içeren modellemeler yapılmıştır.

- a. 2.5 mm^2 ,
- b. 4 mm^2 .

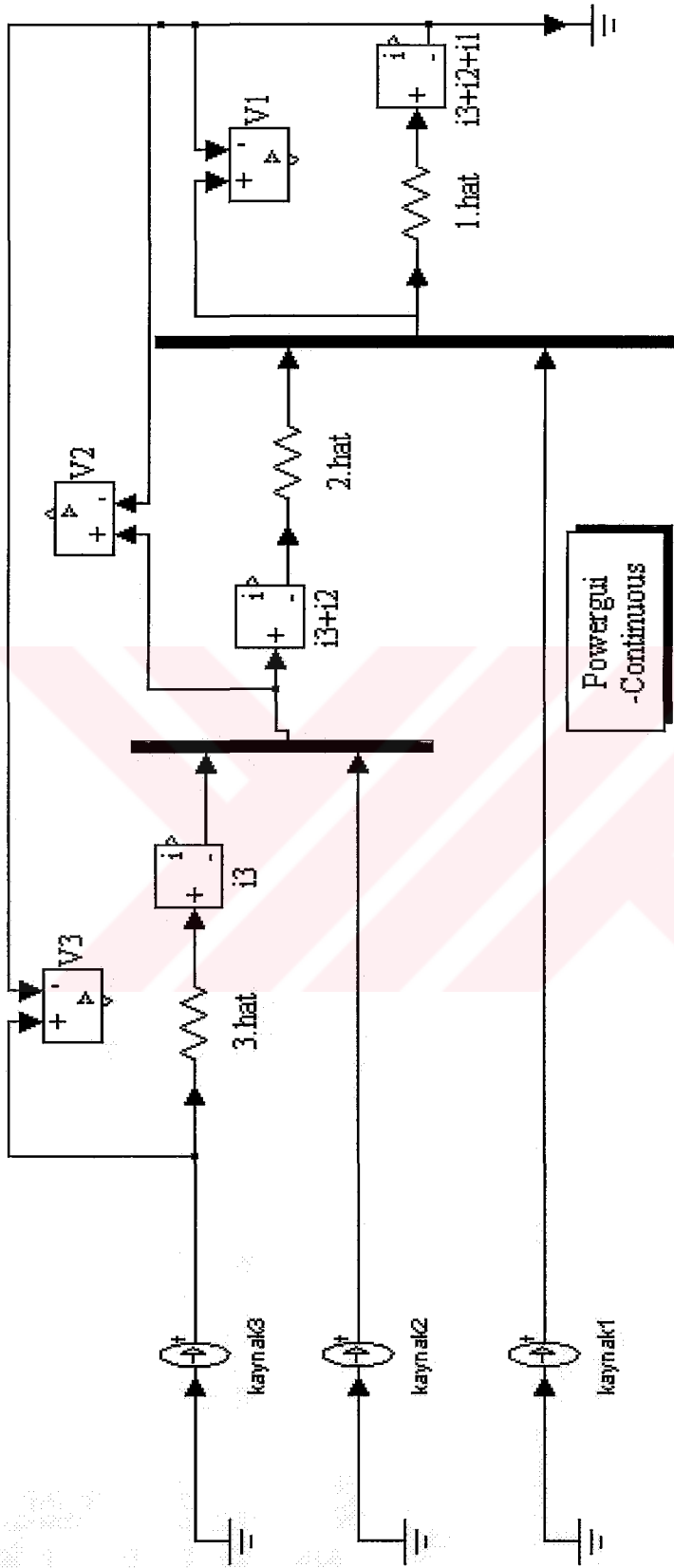
3. Akımların durumuna göre: Yüklerden geçebilecek olası akımlar için değişik modellemeler yapılmıştır.

Sistemde önce sadece temel akım bileşenin olması hali için modellemeler yapılmıştır. Daha sonra sisteme, temel akım bileşenin değişik oranlarında harmonik akım bileşenleri, örnek olarak 3.harmonik akım bileşeni (I_3), enjekte edilerek nötr hattı üzerine düşen gerilim değerinin değişimi için simülasyon yapılmış ve sonuçlar alınmıştır.

Harmonikli durumlar için tasarlanan ve kullanılan model devresi Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

Uygulanan akım bileşenleri sırası ile aşağıda verildiği gibidir:

- a. Sadece temel akım bileşeni var (I_1),
- b. Temel akım bileşeni ve temel akım bileşenin %10'u değerinde 3. harmonik akım bileşeni var ($I_3 = \%10 I_1$),
- c. Temel akım bileşeni ve temel akım bileşenin %5'i değerinde 3. harmonik akım bileşeni var ($I_3 = \%5 I_1$).



Sekil 5.2 Üç katlı bir binada nötr ile toprak arasındaki gerilimlerin hesaplanmasında harmoniklerin etkisini gösteren devre

Harmonikli durumlarda, her kattaki (1, 2, 3) harmonik akımların faz açıları, Fourier açılımı sonucunda sırasıyla aşağıdaki gibidir:

1. kat $\rightarrow \cos^{-1} 0.40$

2. kat $\rightarrow \cos^{-1} 0.50$

3. kat $\rightarrow \cos^{-1} 0.45$

4. Nötr hattının katlar arasındaki uzunluğuna (l) göre: Nötr üzerine düşen gerilimin değişimi doğrudan doğruya çekilen nötr hattının uzunluğu ile ilgili olduğunda dolayı değişik uzunluktaki nötr hatları için de hesaplamalar yapılmış ve değişimi gözlenmiştir.

Katlar arasında (Dağıtım Panosu-1.kat arası, 1.kat-2.kat arası, 2.kat-3.kat arası) kullanılan hat uzunlukları her kat arasında çekilen nötr hattının uzunluğunun eşit olması koşulu ile aşağıda gösterildiği gibidir:

a. $l = 10 \text{ m (} 0.01 \text{ km)}$,

b. $l = 15 \text{ m (} 0.015 \text{ km)}$,

c. $l = 20 \text{ m (} 0.02 \text{ km)}$.

Yukarıda belirttiğimiz 4 değişik parametre grubu kullanılarak, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 ile gösterilen sistemler, 4 değişik model başlığı altında ve her model başlığı altında 9 durum olmak üzere toplam 36 durum için düzenlenmiş ve her durum için nötr üzerine düşen gerilim değeri bulunarak bu değerler arasındaki değişim gözlenmiştir.

Burada önemli birkaç konuyu ileriki bölümlerde anlatılan durumların kolay anlaşılır olması için açıklamakta fayda var. Bu açıklamalar yapılan simülasyonda hangi gerilim değerlerin nasıl ve hangi akım değerlerinin toplamaları kullanılarak bulunduğunu gösterecektir.

İlk olarak bu durumlarda bulunacak olan gerilim değerlerinin hangi bölgeleri içerdiği belirtilmiştir:

- V1 gerilimi: Ana dağıtım panosu ile 1. kat prizi arasında çekilmiş olan nötr hattının üzerine düşen gerilim değeridir,
- V2 gerilimi: Ana dağıtım panosu ile 2. kat prizi arasında çekilmiş olan nötr hattının üzerine düşen gerilim değeridir,
- V3 gerilimi: Ana dağıtım panosu ile 3. kat prizi arasında çekilmiş olan nötr hattının üzerine düşen gerilim değeridir.

Sadece harmonik akımları sistemde bulunması halinde nötr üzerine düşen gerilim değerleri gösterimi:

- V_{h1} gerilimi: Ana dağıtım panosu ile 1. kat prizi arasında çekilmiş olan nötr hattının üzerine düşen gerilimin sadece harmonikli bileşenin olması halindeki değeridir,
- V_{h2} gerilimi: Ana dağıtım panosu ile 2. kat prizi arasında çekilmiş olan nötr hattının üzerine düşen gerilimin sadece harmonikli bileşenin olması halindeki değeridir,
- V_{h3} gerilimi: Ana dağıtım panosu ile 3. kat prizi arasında çekilmiş olan nötr hattının üzerine düşen gerilimin sadece harmonikli bileşenin olması halindeki değeridir.

Harmonik akımlarının sisteme katılması halinde bulunacak olan gerilim değerleri aşağıdaki gibi olacaktır:

- $V_1 + V_{h1}$: Ana dağıtım panosu ile 1. kat prizi arasında çekilmiş olan nötr hattının üzerine düşen gerilimin harmoniklerin de eklenmesiyle beraber alacağı gerilim değeridir,
- $V_2 + V_{h2}$: Ana dağıtım panosu ile 2. kat prizi arasında çekilmiş olan nötr hattının üzerine düşen gerilimin harmoniklerin de eklenmesiyle beraber alacağı gerilim değeridir,
- $V_3 + V_{h3}$: Ana dağıtım panosu ile 3. kat prizi arasında çekilmiş olan nötr hattının üzerine düşen gerilimin harmoniklerin de eklenmesiyle beraber alacağı gerilim değeridir.

Burada toplam gerilim değeri hesaplanırken:

$$V + V_h \rightarrow (V^2 + V_h^2)^{1/2}$$

ifadesi kullanılmaktadır.

Bu gerilim değerleri bulurken kullanılacak akım değerleri aşağıdaki gibidir:

- $i_3 + i_2 + i_1$: Her kat prizinin ayrı akım değerlerinin (i_1 , i_2 , i_3) fazör olarak toplanmasından oluşmaktadır.
- $i_3 + i_2$: 2. ve 3. kat prizlerinin ayrı akım değerlerinin (i_2 , i_3) fazör olarak toplanmasından oluşmaktadır.
- i_3 : 3. kat prizinin akım değeridir.

Sistemde sadece 3.harmonik akım bileşenlerinin olması halinde kullanılan akım değerleri:

- $i_{h3} + i_{h2} + i_{h1}$: Her kat prizinin ayrı 3. harmonik akım bileşeni değerlerinin (i_{h1} , i_{h2} , i_{h3}) fazör olarak toplanmasından oluşmaktadır.
- $i_{h3} + i_{h2}$: 2. ve 3. kat prizlerinin ayrı 3. harmonik akım bileşeni değerlerinin (i_{h2} , i_{h3}) fazör olarak toplanmasından oluşmaktadır.
- i_{h3} : 3. kat prizinin 3. harmonik akım bileşenin değeridir.

Binaya çekilen nötr hattının katlar arasındaki uzunluğu verilmiştir. Bu durumda kullanılan l uzunlukları ve bu uzunluklara göre nötr hattının alacağı direnç değerleri aşağıdaki gibidir:

- l_1 : En alt katta bulunan ana dağıtım panosundan 1. katta bulunan prize kadar çekilen nötr hattının uzunluğu,
- l_2 : 1. kattaki prizden 2.kattaki prize kadar çekilen nötr hattının uzunluğu,
- l_3 : 2. kattaki prizden 3. kattaki prize kadar çekilen nötr hattının uzunluğu,

Bu durumda her kat için kullanılan hatların direnç değerleri şöyledir:

- 2.5 mm^2 kablo kesiti için:

$$l = 10 \text{ m} = 0.01 \text{ km}$$

$$R = r_{dc} \times l$$

$$R = 7.14 \text{ } \Omega / \text{km} \times 0.01 \text{ km}$$

$$= 0.0714 \text{ } \Omega.$$

$$l = 15 \text{ m} = 0.015 \text{ km}$$

$$R = 7.14 \text{ } \Omega / \text{km} \times 0.015 \text{ km}$$

$$= 0.1071 \text{ } \Omega.$$

$$l = 20 \text{ m} = 0.02 \text{ km}$$

$$R = 7.14 \text{ } \Omega / \text{km} \times 0.02 \text{ km}$$

$$= 0.1428 \text{ } \Omega.$$

- 4 mm^2 kablo kesiti için:

$$l = 10 \text{ m} = 0.01 \text{ km}$$

$$R = r_{dc} \times l$$

$$R = 4.47 \text{ } \Omega / \text{km} \times 0.01 \text{ km}$$

$$= 0.0447 \Omega.$$

$$l = 15 \text{ m} = 0.015 \text{ km}$$

$$R = 4.47 \Omega / \text{km} \times 0.015 \text{ km}$$

$$= 0.06705 \Omega.$$

$$l = 20 \text{ m} = 0.02 \text{ km}$$

$$R = 4.47 \Omega / \text{km} \times 0.02 \text{ km}$$

$$= 0.0894 \Omega.$$

Bu değerlerin ve parametrelerin kullanılması ile oluşturulan model ve durumların simülasyon sonuçları Ek 1’de verilmiştir.

Aşağıda Model 1 için yani %100 yüklenme durumunda ve çekilen nötr hattının kesit değerinin 2.5 mm^2 olması halinde çekilen nötr hattının uzunluğuna bağlı olarak nötr üzerinde görülen gerilim değerleri arasındaki fark gerilimleri ve bunların yüzde değerleri için oluşturulan çizelgeler verilmiştir.

Buradan da görüldüğü üzere mesafe arttıkça nötr üzerine düşen gerilim değerinde bir artış olmaktadır ve bu artış hem sadece temel akım bileşeni olması halinde hem de temel akım bileşeni ve 3. harmonik akım bileşen değerlerinin olması hali için yüzde olarak hemen hemen aynı değerde olmaktadır.

Çizelge 5.1 Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1 (volt)	V2 (volt)	V3 (volt)
0.01	0.4691	0.6635	1.469
0.015	0.7046	0.9852	2.191
0.02	0.9407	1.3	2.904

Çizelge 5.2 Temel akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.2355	50.20	0.2361	33.5
V2	0.3217	48.49	0.3148	32
V3	0.7222	49.16	0.7130	32.5

Çizelge 5.3 Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1+Vh1 (volt)	V2+Vh2 (volt)	V3+Vh3 (volt)
0.01	0.4849	0.6906	1.487
0.015	0.728	1.026	2.218
0.02	0.9722	1.3553	2.94

Çizelge 5.4 Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1+Vh1	0.2431	50.13	0.2442	33.54
V2+Vh2	0.3354	48.57	0.3293	32.10
V3+Vh3	0.731	49.16	0.722	32.55

Çizelge 5.5 Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1+Vh1 (volt)	V2+Vh2 (volt)	V3+Vh3 (volt)
0.01	0.53	0.766	1.54
0.015	0.795	1.14	2.299
0.02	1.0614	1.509	3.0487

Çizelge 5.6 Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1+Vh1	0.265	50	0.2664	33.50
V2+Vh2	0.374	48.83	0.369	32.37
V3+Vh3	0.759	49.29	0.7497	32.60

Aşağıda Model 2 için yani %100 yüklenme durumunda ve çekilen nötr hattının kesit değerinin 4 mm² olması halinde çekilen nötr hattının uzunluğuna bağlı olarak nötr üzerinde görülen gerilim değerleri arasındaki fark gerilimleri ve bunların yüzde değerleri için oluşturulan çizelgeler verilmiştir.

Çizelge 5.7 Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1 (volt)	V2 (volt)	V3 (volt)
0.01	0.2933	0.4186	0.9239
0.015	0.4404	0.6239	1.381
0.02	0.5877	0.8265	1.834

Çizelge 5.8 Temel akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.1471	50.15	0.1473	33.45
V2	0.2053	49.04	0.2026	32.47
V3	0.4571	49.48	0.453	32.80

Çizelge 5.9 Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1+Vh1 (volt)	V2+Vh2 (volt)	V3+Vh3 (volt)
0.01	0.3312	0.4825	0.968
0.015	0.4972	0.7203	1.4481
0.02	0.6633	0.9558	1.9238

Çizelge 5.10 Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.152	50.13	0.1523	33.46
V2	0.2138	49.09	0.2113	32.54
V3	0.4628	49.49	0.4588	32.82

Çizelge 5.11 Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1+Vh1 (volt)	V2+Vh2 (volt)	V3+Vh3 (volt)
0.01	0.3032	0.4355	0.9352
0.015	0.4552	0.6493	1.398
0.02	0.6075	0.8606	1.8568

Çizelge 5.12 Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.166	50.12	0.1661	33.40
V2	0.2378	49.28	0.2355	32.70
V3	0.4801	49.60	0.4757	32.85

Aşağıda Model 3 için yani %50 yüklenme durumunda ve çekilen nötr hattının kesit değerinin 2.5 mm² olması halinde çekilen nötr hattının uzunluğuna bağlı olarak nötr üzerinde görülen gerilim değerleri arasındaki fark gerilimleri ve bunların yüzde değerleri için oluşturulan çizelgeler verilmiştir.

Çizelge 5.13 Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1 (volt)	V2 (volt)	V3 (volt)
0.01	0.2342	0.3352	0.739
0.015	0.3515	0.5002	1.105
0.02	0.4691	0.6635	1.469

Çizelge 5.14 Temel akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.1173	50.10	0.1176	33.46
V2	0.165	49.22	0.1633	32.65
V3	0.366	49.53	0.364	32.94

Çizelge 5.15 Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1+Vh1 (volt)	V2+Vh2 (volt)	V3+Vh3 (volt)
0.01	0.2421	0.3486	0.748
0.015	0.3633	0.5204	1.1186
0.02	0.4849	0.6906	1.4871

Çizelge 5.16 Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.1212	50.06	0.1216	33.47
V2	0.1718	49.28	0.1702	32.70
V3	0.3706	49.55	0.3685	32.95

Çizelge 5.17 Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1+Vh1 (volt)	V2+Vh2 (volt)	V3+Vh3 (volt)
0.01	0.2644	0.386	0.7745
0.015	0.3968	0.5769	1.1584
0.02	0.5295	0.7662	1.5404

Çizelge 5.18 Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.1324	50.07	0.1327	33.44
V2	0.1909	49.46	0.1893	32.81
V3	0.3839	49.56	0.382	32.98

Aşağıda Model 4 için yani %50 yüklenme durumunda ve çekilen nötr hattının kesit değerinin 4 mm² olması halinde çekilen nötr hattının uzunluğuna bağlı olarak nötr üzerinde görülen gerilim değerleri arasındaki fark gerilimleri ve bunların yüzde değerleri için oluşturulan çizelgeler verilmiştir.

Çizelge 5.19 Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1 (volt)	V2 (volt)	V3 (volt)
0.01	0.1465	0.2106	0.4637
0.015	0.2199	0.3149	0.6942
0.02	0.2933	0.4186	0.9239

Çizelge 5.20 Temel akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.0734	50.10	0.0734	33.38
V2	0.1043	49.53	0.1037	32.93
V3	0.2305	49.71	0.2297	33.09

Çizelge 5.21 Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1+Vh1 (volt)	V2+Vh2 (volt)	V3+Vh3 (volt)
0.01	0.1515	0.2189	0.4693
0.015	0.2273	0.3275	0.7027
0.02	0.3032	0.4328	1.0665

Çizelge 5.22 Temel akım bileşeni ve %5'i oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.0758	50.03	0.0759	33.40
V2	0.1086	49.61	0.1053	32.15
V3	0.2334	49.73	0.2324	33.07

Çizelge 5.23 Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri

Katlar arası Uzunluk (km)	V1+Vh1 (volt)	V2+Vh2 (volt)	V3+Vh3 (volt)
0.01	0.1654	0.2424	0.4859
0.015	0.2483	0.3626	0.7275
0.02	0.3312	0.4825	0.9684

Çizelge 5.24 Temel akım bileşeni ve %10'u oranında 3.harmonik akım bileşeni için artımsal nötr gerilimleri ve yüzde değişimleri

Gerilimler	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₀₋₁₅ (volt)	% değişimi	(Artımsal Nötr Gerilimi) ₁₅₋₂₀ (volt)	% değişimi
V1	0.0829	50.12	0.0829	33.38
V2	0.1202	49.59	0.1199	33.07
V3	0.2416	49.72	0.2409	33.11

Aşağıdaki çizelgeler Model 1 için sadece temel akım bileşeni ve temel akım bileşeni ile 3. harmonik bileşeni olması durumları için oluşturulmuştur. Buradan da görüldüğü üzere harmonik akım bileşenlerinin nötr üzerindeki gerilim değişimine katkısı vardır. Bu katkı harmonik yüzdesindeki artışa bağlı olarak yükselmektedir.

Çizelge 5.25 % 5 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr gerilimi üzerindeki değişim

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark "V _F " (volt)			% değişim		
	V _F	V _F	V _F	%V _F	% V _F	% V _F
0.01	0.0158	0.0271	0.018	3.37	4.08	1.23
0.015	0.0234	0.0408	0.027	3.32	4.14	1.23
0.02	0.0315	0.0553	0.036	3.35	4.25	1.24

Çizelge 5.26 % 10 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr gerilimi üzerindeki değişim

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “ V_F ” (volt)			% değişim		
	V_F	V_F	V_F	% V_F	% V_F	% V_F
0.01	0.0609	0.1025	0.0710	12.98	15.45	4.83
0.015	0.0904	0.1548	0.1080	12.83	15.71	4.93
0.02	0.1207	0.2090	0.1447	12.83	20.9	4.98

Aşağıdaki çizelgeler Model 2 için sadece temel akım bileşeni ve temel akım bileşeni ile 3. harmonik bileşeni olması durumları için oluşturulmuştur.

Çizelge 5.27 % 5 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr gerilimi üzerindeki değişim

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “ V_F ” (volt)			% değişim		
	V_F	V_F	V_F	% V_F	% V_F	% V_F
0.01	0.0099	0.0159	0.0113	3.38	3.80	1.22
0.015	0.0148	0.0254	0.017	3.36	4.07	1.23
0.02	0.0198	0.0341	0.0228	3.37	4.13	1.24

Çizelge 5.28 % 10 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr gerilimi üzerindeki değişim

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “ V_F ” (volt)			% değişim		
	V_F	V_F	V_F	% V_F	% V_F	% V_F
0.01	0.0379	0.0639	0.0441	12.92	15.26	4.77
0.015	0.0568	0.0964	0.0671	12.90	15.45	4.86
0.02	0.0766	0.1293	0.0898	13.03	15.64	4.90

Aşağıdaki çizelgeler Model 2 için sadece temel akım bileşeni ve temel akım bileşeni ile 3. harmonik bileşeni olması durumları için oluşturulmuştur.

Çizelge 5.29 % 5 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr gerilimi üzerindeki değişim

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “ V_F ” (volt)			% değişim		
	V_F	V_F	V_F	% V_F	% V_F	% V_F
0.01	0.0079	0.0134	0.009	3.37	4.00	1.22
0.015	0.0118	0.0202	0.0136	3.36	4.04	1.84
0.02	0.0158	0.0271	0.0181	3.37	4.08	1.23

Çizelge 5.30 % 10 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr gerilimi üzerindeki değişim

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “V _F ” (volt)			% değişim		
	V _F	V _F	V _F	% V _F	% V _F	% V _F
0.01	0.0302	0.0508	0.0355	12.89	15.15	4.80
0.015	0.0453	0.0767	0.0534	12.89	15.13	4.83
0.02	0.0604	0.1027	0.071	12.88	15.49	4.83

Aşağıdaki çizelgeler Model 2 için sadece temel akım bileşeni ve temel akım bileşeni ile 3. harmonik bileşeni olması durumları için oluşturulmuştur.

Çizelge 5.31 % 5 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr gerilimi üzerindeki değişim

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “V _F ” (volt)			% değişim		
	V _F	V _F	V _F	% V _F	% V _F	% V _F
0.01	0.005	0.0083	0.0056	3.41	3.94	1.20
0.015	0.0074	0.0126	0.0085	3.37	4.00	1.22
0.02	0.0099	0.0142	0.01426	3.38	3.39	15.4

Çizelge 5.32 % 10 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr gerilimi üzerindeki değişim

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “V _F ” (volt)			% değişim		
	V _F	V _F	V _F	% V _F	% V _F	% V _F
0.01	0.0189	0.0318	0.0222	12.90	15.10	4.79
0.015	0.0239	0.0477	0.0333	10.86	15.14	4.79
0.02	0.0379	0.0639	0.0445	12.92	15.26	4.81

Aşağıdaki çizelgelerde %100 yüklenme halinde çekilen nötr hattı kesitlerinin karşılaştırması verilmiştir. Burada yapılan karşılaştırmada 4 mm² kesit değerinde çekilen bir nötr hattının, 2.5 mm² kesite göre bütün durumlar için yaklaşık %60 gibi daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.33 Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri arasındaki farklar ve değişim yüzdeleri

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “V _F ” (volt)			% değişim		
	V _F	V _F	V _F	% V _F	% V _F	% V _F
0.01	0.1758	0.2449	0.5451	59.94	58.5	59
0.015	0.2642	0.3613	0.81	60	57.9	58.65
0.02	0.353	0.4735	1.07	60.06	57.29	58.34

Çizelge 5.34 % 5 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr üzerine düşen gerilim değerleri arasındaki farklar ve değişim yüzdeleri

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “V _f ” (volt)			% değişim		
	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	%V _{f1}	%V _{f2}	%V _{f3}
0.01	0.1988	0.2835	0.572	60.02	58.76	59.09
0.015	0.2978	0.4197	0.8509	59.89	58.27	58.76
0.02	0.3981	0.5532	1.1249	60.02	57.88	58.47

Çizelge 5.35 % 10 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr üzerine düşen gerilim değerleri arasındaki farklar ve değişim yüzdeleri

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “V _F ” (volt)			% değişim		
	V _F	V _F	V _F	% V _F	% V _F	% V _F
0.01	0.1817	0.2551	0.5518	59.93	58.57	59
0.015	0.2728	0.3767	0.82	59.93	58.02	58.65
0.02	0.3647	0.4947	1.0832	60.03	57.48	58.34

Aşağıdaki çizelgelerde %50 yüklenme halinde çekilen nötr hattı kesitlerinin karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 5.36 Temel akım bileşeni için nötr üzerine düşen gerilim değerleri arasındaki farklar ve değişim yüzdeleri

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “V _F ” (volt)			% değişim		
	V _F	V _F	V _F	% V _F	% V _F	% V _F
0.01	0.0877	0.1246	0.2753	59.86	59.16	59.37
0.015	0.1316	0.1853	0.4108	59.85	58.84	59.17
0.02	0.1758	0.2449	0.5451	59.94	58.50	59

Çizelge 5.37 % 5 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr üzerine düşen gerilim değerleri arasındaki farklar ve değişim yüzdeleri

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “V _F ” (volt)			% değişim		
	V _F	V _F	V _F	% V _F	% V _F	% V _F
0.01	0.0906	0.1297	0.2787	59.80	59.25	59.39
0.015	0.136	0.193	0.4159	59.83	58.93	59.16
0.02	0.1817	0.2578	0.4206	59.93	59.57	40.05

Çizelge 5.38 % 10 harmonikli akım enjekte olması halinde nötr üzerine düşen gerilim değerleri arasındaki farklar ve değişim yüzdeleri

Katlar arası Uzunluk (km)	Gerilimler arasındaki fark “V _F ” (volt)			% değişim		
	V _F	V _F	V _F	% V _F	% V _F	% V _F
0.01	0.099	0.1436	0.2886	59.85	59.24	59.40
0.015	0.1485	0.2143	0.4309	59.80	59.10	59.23
0.02	0.1985	0.2837	0.572	58.79	58.79	59.06

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan simülasyon uygulamaları sonucunda çıkan elde edilen değerlerin fark ve yüzde oranları tablolar halinde Sayısal Uygulama bölümünde verilmiştir. Bu bölümde tablolar ile gösterilen bilgilerin genel sonuç yargıları verilecektir.

1-) Yapılan simülasyon sonucunda, nötr geriliminin nötr hattının uzunluğunun artması ile beraber arttığı görülmüştür. Bu artış, nötr hattının uzunluğunun atışına bağlı olarak değişik oranlarda olabilir (Bunun nedeni şönt kapasitelerin ve deri etkisinin ihmal edilmiş olmasıdır).

2-) Her model için harmonik bileşenlerin nötr gerilimine artı yönde etkisinin olduğu görülmüştür. Sistemde oluşan harmonik bileşenlerine ve bunların güç faktörlerinin değişimi artımın değerine belirlemektedir.

3-) Nötr kesit değerinin kıyaslaması yapıldığında, kesit değerinin artması ile nötr geriliminin azaldığı görülmüştür. Nötr kesitinin dc direnç değerine bağlı olarak değişim göstermektedir ve kesit değeri arttıkça direnç değeri azalmakta dolayısı ile nötr üzerindeki gerilim değeri azalmaktadır.

4-) Kat sayısının ve harmonik bileşenler içeren PC, printer gibi elemanlara sahip ofislerin sayısının fazla olduğu binalarda (iş merkezleri, Borsa binası v.b.) priz noktalarında nötr ile toprak arasındaki gerilimin günün değişik saatleri için ortaya konulması tezde sunulan MATLAB modeli ile kolayca gerçekleştirilebilir.

Yapılan simülasyon çalışması pratik olarak da test edilebilme olanağına sahiptir. En basit durum olarak nötr kesit değerine göre karşılaştırma yapabileceğimiz birçok yer bulabiliriz. Ayrıca nötr hattının uzunluğunun farklı olduğu ve bu duruma bağlı ölçümlerin yapılabileceği birçok yer bulunabilmektedir. Harmonik belirleyici cihazımızın olması halinde harmonik bileşenlerin nötr gerilimine katkısını da inceleme imkanımız olacaktır.

Bu parametrelerin çeşitliliği arttırılabileceği gibi bu parametrelerin seçilen değerleri de fazlaştırlarak hem daha fazla simülasyon yapılabilir hem de ihtiyaç halinde ölçümler alınabilir.

KAYNAKLAR

- Arnold, A.H.M., (1938), AC Resistance of Hollow Square Conductors, Jour. Vol 82, pp.537
- Bayram, M., (2000), Elektrik Tesislerinde Topraklama, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Bayram, M., İlisu, İ., (2004), Elektrik Tesislerinde Güvenlik ve Topraklama, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Çakır, H., (1986), Elektrik Güç Sistemleri Analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği, (2001), TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, (2002), İstanbul.
- Gruzs, T.M., (1990), A Survey of Neutral Currents in Three-phase Computer Power System, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 26, no 4, 719-725.
- IEEE Standart 519-1992,(1993), Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- İlisu, İ., (2003), Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- İlisu, İ., (2003), Elektrik Tesislerinde Dolaylı Dokunmaya Karşı Koruma ve Topraklama, Elektrik Mühendisleri Odası Meslek İç Sürekli Eğitim Merkezi, İstanbul.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O., (2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Koch, W., (1955), Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV, Springer Verlag.
- Beck, R.T., Yu, L., (1988), Design Consideration for Grounding Systems, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol 24, No 6, Pgs 1096-1100.
- Short, T.A., Stewart, J.R., (2002), Five-Wire Distribution System Demonstration Project, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 17, No.2, Pages 649-654.
- The MathWorks Inc.,MATLAB®, 3 Apple Hill Drive Natick MA USA.
- VDE 0100 “Nominal Gerilimi 1000 V’a Kadar Olan Kuvvetli Akım Tesislerinin Kurulması İçin Esaslar”, Almanya.
- Zand, P., Shepherd, W., (1978), Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits, Cambridge University Press.
- Zipse, D.W., (2001), Earthing - Grounding Methods: A Primer, IEEE-IAS-PCIC-01-2 Conference Record.

SimPowerSystems Report generated by powergui,
14-Dec-2004 22:39:42

Model 1: Nötr hatının kesiti: 2.5mm²
Yük durumu: %100 yüklenme
Durum 1: I = Temel bileşen
l = 10 m (0.01 km)

States :

kat 1 priz i1 = 15.13 A -41.23°
kat 2 priz i2 = 8.017 A 88.03°
kat 3 priz i3 = 11.3 A -156.63°

Measurements :

V1 = 0.4691 V -78.78°
V2 = 0.6635 V -161.71°
V3 = 1.469 V -158.92°
i3 = 11.3 A -156.63°
i3+i2 = 10.7 A 160.75°
i3+i2+i1 = 6.569 A -78.78°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:40:44

Model 1: Nötr hatının kesiti: 2.5mm²
Yük durumu: %100 yüklenme
Durum 2: I = Temel bileşen
l = 15 m (0.015 km)

States :

kat 1 priz i1 = 15.13 A -41.17°
kat 2 priz i2 = 8.015 A 87.95°
kat 3 priz i3 = 11.28 A -156.51°

Measurements :

V1 = 0.7046 V -78.31°
V2 = 0.9852 V -161.45°
V3 = 2.191 V -158.73°
i3 = 11.28 A -156.51°
i3+i2 = 10.65 A 160.73°
i3+i2+i1 = 6.579 A -78.31°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:41:29

Model 1: Nötr hatının kesiti: 2.5mm²

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 3: I = Temel bileşen

l = 20 m (0.02 km)

States :

kat 1 priz i1 = 15.12 A -41.11°

kat 2 priz i2 = 8.013 A 87.87°

kat 3 priz i3 = 11.25 A -156.39°

Measurements :

V1 = 0.9407 V -77.84°

V2 = 1.3 V -161.19°

V3 = 2.904 V -158.54°

i3 = 11.25 A -156.39°

i3+i2 = 10.6 A 160.70°

i3+i2+i1 = 6.587 A -77.84°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°

v2 = 220 V 120.00°

v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:38:15

Model 1: Nötr hatının kesiti: 2.5mm²

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 4: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni

l = 10 m (0.01 km)

Measurements of harmonics :

Vh1 = 0.2457 V -63.54°

Vh2 = 0.3835 V -63.62°

Vh3 = 0.4641 V -64.10°

ih3 = 1.130 A -66.42°

ih3+ih2 = 1.929 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 3.442 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 1.513 A -63.26°

kaynak2 = 0.8017 A -60.00°

kaynak3 = 1.13 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.53 V

V2+Vh2 = 0.766 V

V3+Vh3 = 1.54 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:39:00

Model 1: Nötr hatının kesiti: 2.5mm²

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 5: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 15 m (0.015 km)

Measurements :

Vh1 = 0.3686 V -63.54°
Vh2 = 0.5752 V -63.62°
Vh3 = 0.6961 V -64.10°
ih3 = 1.13 A -66.42°
ih3+ih2 = 1.929 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 3.442 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 1.513 A -63.26°
kaynak2 = 0.8017 A -60.00°
kaynak3 = 1.13 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.795 V
V2+Vh2 = 1.14 V
V3+Vh3 = 2.299 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:39:35

Model 1: Nötr hatının kesiti: 2.5mm²

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 6: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 20 m (0.02 km)

Measurements :

Vh1 = 0.4915 V -63.54°
Vh2 = 0.7669 V -63.62°
Vh3 = 0.9281 V -64.10°
ih3 = 1.13 A -66.42°
ih3+ih2 = 1.929 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 3.442 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 1.513 A -63.26°
kaynak2 = 0.8017 A -60.00°
kaynak3 = 1.13 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 1.0614 V
V2+Vh2 = 1.509 V
V3+Vh3 = 3.0487 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:13:28

Model 1: Nötr hatının kesiti: 2.5mm²

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 7: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 10 m (0.01 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1228 V -63.54°

Vh2 = 0.1916 V -63.62°

Vh3 = 0.2319 V -64.11°

ih3 = 0.565 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°

kaynak2 = 0.4 A -60.00°

kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.4849 V

V2+Vh2 = 0.6906 V

V3+Vh3 = 1.487 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:15:27

Model 1: Nötr hatının kesiti: 2.5mm²

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 8: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 15 m (0.015 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1842 V -63.54°

Vh2 = 0.2874 V -63.62°

Vh3 = 0.3479 V -64.11°

ih3 = 0.565 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°

kaynak2 = 0.4 A -60.00°

kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.728 V

V2+Vh2 = 1.026 V

V3+Vh3 = 2.218 V

Model 1: Nötr hatının kesiti: 2.5mm2

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 9: I = Temel bileşen + Temel bileşenin 5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 20 m (0.02 km)

Measurements :

Vh1 = 0.2456 V -63.54°

Vh2 = 0.3832 V -63.62°

Vh3 = 0.4638 V -64.11°

ih3 = 0.565 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°

kaynak2 = 0.4 A -60.00°

kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.9722 V

V2+Vh2 = 1.3553 V

V3+Vh3 = 2.94 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:53:37

Model 2 : Nötr hatının kesiti: 4mm²
Yük durumu: %100 yüklenme
Durum 10: I = Temel bileşen
l = 10 m (0.01 km)

States :

kat 1 priz i1 = 15.13 A -41.27°
kat 2 priz i2 = 8.019 A 88.09°
kat 3 priz i3 = 11.33 A -156.72°

Measurements :

V1 = 0.2933 V -79.14°
V2 = 0.4186 V -161.91°
V3 = 0.9239 V -159.07°
i3 = 11.33 A -156.72°
i3+i2 = 10.74 A 160.76°
i3+i2+i1 = 6.562 A -79.14°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:55:22

Model 2 : Nötr hatının kesiti: 4mm²
Yük durumu: %100 yüklenme
Durum 11: I = Temel bileşen
l = 15 m (0.015 km)

States :

kat 1 priz i1= 15.13 A -41.24°
kat 2 priz i2= 8.018 A 88.04°
kat 3 priz i3= 11.31 A -156.64°

Measurements :

V1 = 0.4404 V -78.84°
V2 = 0.6239 V -161.75°
V3 = 1.381 V -158.95°
i3 = 11.31 A -156.64°
i3+i2 = 10.71 A 160.75°
i3+i2+i1 = 6.568 A -78.84°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:56:27

Model 2 : Nötr hatının kesiti: 4mm²
Yük durumu: %100 yüklenme
Durum 12: I = Temel bileşen
l = 20 m (0.02 km)

States :

kat 1 priz i1 = 15.13 A -41.20°
kat 2 priz i2 = 8.016 A 87.99°
kat 3 priz i3 = 11.29 A -156.57°

Measurements :

V1 = 0.5877 V -78.54°
V2 = 0.8265 V -161.58°
V3 = 1.834 V -158.83°
i3 = 11.29 A -156.57°
i3+i2 = 10.68 A 160.74°
i3+i2+i1 = 6.574 A -78.54°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:48:50

Model 2 : Nötr hatının kesiti: 4mm²
Yük durumu: %100 yüklenme
Durum 13: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 10 m (0.01 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1538 V -63.54°
Vh2 = 0.2401 V -63.62°
Vh3 = 0.2905 V -64.10°
ih3 = 1.13 A -66.42°
ih3+ih2 = 1.929 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 3.442 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 1.513 A -63.26°
kaynak2 = 0.8017 A -60.00°
kaynak3 = 1.13 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.3312 V
V2+Vh2 = 0.4825 V
V3+Vh3 = 0.968 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:48:07

Model 2 : Nötr hatının kesiti: 4mm2

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 14: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 15 m (0.015 km)

Measurements :

Vh1 = 0.2308 V -63.54°

Vh2 = 0.3601 V -63.62°

Vh3 = 0.4358 V -64.10°

ih3 = 1.13 A -66.42°

ih3+ih2 = 1.929 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 3.442 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 1.513 A -63.26°

kaynak2 = 0.8017 A -60.00°

kaynak3 = 1.13 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.4972 V

V2+Vh2 = 0.7203 V

V3+Vh3 = 1.4481 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:46:55

Model 2 : Nötr hatının kesiti: 4mm2

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 15: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 20 m (0.02 km)

Measurements :

Vh1 = 0.3077 V -63.54°

Vh2 = 0.4801 V -63.62°

Vh3 = 0.581 V -64.10°

ih3 = 1.13 A -66.42°

ih3+ih2 = 1.929 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 3.442 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 1.513 A -63.26°

kaynak2 = 0.8017 A -60.00°

kaynak3 = 1.13 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.6633 V

V2+Vh2 = 0.9558 V

V3+Vh3 = 1.9238 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:34:49

Model 2 : Nötr hatının kesiti: 4mm²

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 16: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 10 m (0.01 km)

Measurements :

Vh1 = 0.07688 V -63.54°
Vh2 = 0.12 V -63.62°
Vh3 = 0.1452 V -64.11°
ih3 = 0.565 A -66.42°
ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°
kaynak2 = 0.4 A -60.00°
kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.3032 V
V2+Vh2 = 0.4355 V
V3+Vh3 = 0.9352 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:34:02

Model 2 : Nötr hatının kesiti: 4mm²

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 17: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 15 m (0.015 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1153 V -63.54°
Vh2 = 0.1799 V -63.62°
Vh3 = 0.2178 V -64.11°
ih3 = 0.565 A -66.42°
ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°
kaynak2 = 0.4 A -60.00°
kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.4552 V
V2+Vh2 = 0.6493 V
V3+Vh3 = 1.398 V

Model 2 : Nötr hatının kesiti: 4mm²

Yük durumu: %100 yüklenme

Durum 18: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 20 m (0.02 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1538 V -63.54°

Vh2 = 0.2399 V -63.62°

Vh3 = 0.2904 V -64.11°

ih3 = 0.565 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°

kaynak2 = 0.4 A -60.00°

kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.6075 V

V2+Vh2 = 0.8606 V

V3+Vh3 = 1.8568 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:47:25

Model 3 : Nötr hatının kesiti: 2.5mm²
Yük durumu: %50 yüklenme
Durum 19: I = Temel bileşen
l = 10 m (0.01 km)

States :

kat 1 priz i1 = 7.567 A -41.29°
kat 2 priz i2 = 4.01 A 88.12°
kat 3 priz i3 = 5.667 A -156.75°

Measurements :

V1 = 0.2342 V -79.26°
V2 = 0.3352 V -161.98°
V3 = 0.739 V -159.12°
i3 = 5.667 A -156.75°
i3+i2 = 5.375 A 160.77°
i3+i2+i1 = 3.28 A -79.26°

Sources at 50 Hz :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:45:43

Model 3 : Nötr hatının kesiti: 2.5mm²
Yük durumu: %50 yüklenme
Durum 20: I = Temel bileşen
l = 15 m (0.015 km)

States :

kat 1 priz i1 = 7.566 A -41.26°
kat 2 priz i2 = 4.009 A 88.07°
kat 3 priz i3 = 5.66 A -156.69°

Measurements :

V1 = 0.3515 V -79.02°
V2 = 0.5002 V -161.85°
V3 = 1.105 V -159.02°
i3 = 5.66 A -156.69°
i3+i2 = 5.362 A 160.76°
i3+i2+i1 = 3.282 A -79.02°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:44:38

Model 3 : Nötr hatının kesiti: 2.5mm²
Yük durumu: %50 yüklenme
Durum 21: I = Temel bileşen
l = 20 m (0.02 km)

States :

kat 1 priz i1 = 7.565 A -41.23°
kat 2 priz i2 = 4.009 A 88.03°
kat 3 priz i3 = 5.652 A -156.63°

Measurements :

V1 = 0.4691 V -78.78°
V2 = 0.6635 V -161.71°
V3 = 1.469 V -158.92°
i3 = 5.652 A -156.63°
i3+i2 = 5.35 A 160.75°
i3+i2+i1 = 3.285 A -78.78°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:43:02

Model 3 : Nötr hatının kesiti: 2.5mm²
Yük durumu: %50 yüklenme
Durum 22: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 10 m (0.01 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1228 V -63.54°
Vh2 = 0.1916 V -63.62°
Vh3 = 0.2319 V -64.11°
ih3 = 0.565 A -66.42°
ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°
kaynak2 = 0.4 A -60.00°
kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.2644 V
V2+Vh2 = 0.386 V
V3+Vh3 = 0.7745 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:42:28

Model 3 : Nötr hatının kesiti: 2.5mm²

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 23: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 15 m (0.01 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1842 V -63.54°
Vh2 = 0.2874 V -63.62°
Vh3 = 0.3479 V -64.11°
ih3 = 0.565 A -66.42°
ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°
kaynak2 = 0.4 A -60.00°
kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.3968 V
V2+Vh2 = 0.5769 V
V3+Vh3 = 1.1584 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:41:13

Model 3 : Nötr hatının kesiti: 2.5mm²

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 24: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 20 m (0.02 km)

Measurements :

Vh1 = 0.2456 V -63.54°
Vh2 = 0.3832 V -63.62°
Vh3 = 0.4638 V -64.11°
ih3 = 0.565 A -66.42°
ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°
kaynak2 = 0.4 A -60.00°
kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.5295 V
V2+Vh2 = 0.7662 V
V3+Vh3 = 1.5404 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:21:47

Model 3 : Nötr hatının kesiti: 2.5mm2

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 25: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 10 m (0.01 km)

Measurements :

Vh1 = 0.0614 V -63.54°

Vh2 = 0.0958 V -63.62°

Vh3 = 0.116 V -64.11°

ih3 = 0.2825 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.4818 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 0.86 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.3782 A -63.26°

kaynak2 = 0.2 A -60.00°

kaynak3 = 0.2825 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.2421 V

V2+Vh2 = 0.3486 V

V3+Vh3 = 0.748 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:19:55

Model 3 : Nötr hatının kesiti: 2.5mm2

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 26: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 15 m (0.015 km)

Measurements :

Vh1 = 0.09211 V -63.54°

Vh2 = 0.1437 V -63.62°

Vh3 = 0.1739 V -64.11°

ih3 = 0.2825 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.4818 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 0.86 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.3782 A -63.26°

kaynak2 = 0.2 A -60.00°

kaynak3 = 0.2825 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.3633 V

V2+Vh2 = 0.5204 V

V3+Vh3 = 1.1186 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:19:05

Model 3 : Nötr hatının kesiti: 2.5mm²

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 27: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 20 m (0.02 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1228 V -63.54°

Vh2 = 0.1916 V -63.62°

Vh3 = 0.2319 V -64.11°

ih3 = 0.2825 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.4818 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 0.86 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.3782 A -63.26°

kaynak2 = 0.2 A -60.00°

kaynak3 = 0.2825 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.4849 V

V2+Vh2 = 0.6906 V

V3+Vh3 = 1.4871 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:58:33

Model 4 : Nötr hatının kesiti: 4mm2
Yük durumu: %50 yüklenme
Durum 28: I = Temel bileşen
l = 10 m (0.01 km)

States :

kat 1 priz i1 = 7.568 A -41.31°
kat 2 priz i2 = 4.01 A 88.15°
kat 3 priz i3 = 5.673 A -156.79°

Measurements :

V1 = 0.1465 V -79.45°
V2 = 0.2106 V -162.08°
V3 = 0.4637 V -159.19°
i3 = 5.673 A -156.79°
i3+i2 = 5.384 A 160.77°
i3+i2+i1 = 3.278 A -79.45°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:59:09

Model 4 : Nötr hatının kesiti: 4mm2
Yük durumu: %50 yüklenme
Durum 29: I = Temel bileşen
l = 15 m (0.015 km)

States :

kat 1 priz i1 = 7.567 A -41.29°
kat 2 priz i2 = 4.01 A 88.12°
kat 3 priz i3 = 5.668 A -156.76°

Measurements :

V1 = 0.2199 V -79.29°
V2 = 0.3149 V -162.00°
V3 = 0.6942 V -159.13°
i3 = 5.668 A -156.76°
i3+i2 = 5.376 A 160.77°
i3+i2+i1 = 3.28 A -79.29°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°
v2 = 220 V 120.00°
v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 22:59:44

Model 4 : Nötr hatının kesiti: 4mm²

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 30: I = Temel bileşen

l = 20 m (0.02 km)

States :

kat 1 priz i1 = 7.567 A -41.27°

kat 2 priz i2 = 4.01 A 88.09°

kat 3 priz i3 = 5.663 A -156.72°

Measurements :

V1 = 0.2933 V -79.14°

V2 = 0.4186 V -161.91°

V3 = 0.9239 V -159.07°

i3 = 5.663 A -156.72°

i3+i2 = 5.369 A 160.76°

i3+i2+i1 = 3.281 A -79.14°

Sources :

v1 = 220 V 0.00°

v2 = 220 V 120.00°

v3 = 220 V -120.00°

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:44:31

Model 4: Nötr hatının kesiti: 4mm²

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 31: I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni

l = 10 m (0.01 km)

Measurements :

Vh1 = 0.07688 V -63.54°

Vh2 = 0.12 V -63.62°

Vh3 = 0.1452 V -64.11°

ih3 = 0.565 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°

kaynak2 = 0.4 A -60.00°

kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results:

V1+Vh1 = 0.1654 V

V2+Vh2 = 0.2424 V

V3+Vh3 = 0.4859 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:45:05

Model 4: Nötr hatının kesiti: 4mm2

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 32:I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 15 m (0.015 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1153 V -63.54°
Vh2 = 0.1799 V -63.62°
Vh3 = 0.2178 V -64.11°
ih3 = 0.565 A -66.42°
ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°
kaynak2 = 0.4 A -60.00°
kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.2483 V
V2+Vh2 = 0.3626 V
V3+Vh3 = 0.7275 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:45:39

Model 4: Nötr hatının kesiti: 4mm2

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 33:I = Temel bileşen + Temel bileşenin %10'u değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 20 m (0.02 km)

Measurements :

Vh1 = 0.1538 V -63.54°
Vh2 = 0.2399 V -63.62°
Vh3 = 0.2904 V -64.11°
ih3 = 0.565 A -66.42°
ih3+ih2 = 0.9635 A -63.76°
ih3+ih2+ih1 = 1.72 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.7565 A -63.26°
kaynak2 = 0.4 A -60.00°
kaynak3 = 0.565 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.3312 V
V2+Vh2 = 0.4825 V
V3+Vh3 = 0.9684 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:27:02

Model 4: Nötr hatının kesiti: 4mm²

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 34:I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 10 m (0.01 km)

Measurements :

Vh1 = 0.03844 V -63.54°

Vh2 = 0.05998 V -63.62°

Vh3 = 0.07259 V -64.11°

ih3 = 0.2825 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.4818 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 0.86 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.3782 A -63.26°

kaynak2 = 0.2 A -60.00°

kaynak3 = 0.2825 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.1515 V

V2+Vh2 = 0.2189 V

V3+Vh3 = 0.4693 V

SimPowerSystems Report. generated by powergui,
14-Dec-2004 23:27:50

Model 4: Nötr hatının kesiti: 4mm²

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 35:I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 15 m (0.015 km)

Measurements :

Vh1 = 0.05766 V -63.54°

Vh2 = 0.08997 V -63.62°

Vh3 = 0.1089 V -64.11°

ih3 = 0.2825 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.4818 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 0.86 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.3782 A -63.26°

kaynak2 = 0.2 A -60.00°

kaynak3 = 0.2825 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.2273 V

V2+Vh2 = 0.3275 V

V3+Vh3 = 0.7027 V

Model 4: Nötr hatının kesiti: 4mm²

Yük durumu: %50 yüklenme

Durum 36:I = Temel bileşen + Temel bileşenin %5'i değerinde 3.harmonik bileşeni
l = 20 m (0.02 km)

Measurements :

Vh1 = 0.07688 V -63.54°

Vh2 = 0.5076 V -63.73°

Vh3 = 0.5328 V -63.85°

ih3 = 0.2825 A -66.42°

ih3+ih2 = 0.4818 A -63.76°

ih3+ih2+ih1 = 0.86 A -63.54°

Sources :

kaynak1 = 0.3782 A -63.26°

kaynak2 = 0.2 A -60.00°

kaynak3 = 0.2825 A -66.42°

Results :

V1+Vh1 = 0.3032 V

V2+Vh2 = 0.4328 V

V3+Vh3 = 1.0665 V

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 02.09.1980

Doğum Yeri İstanbul

Lise 1994-1997 İstanbul Davutpaşa Lisesi

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

Yüksek Lisans 2002-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği
Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı

Çalıştığı Kurumlar

2003-Devam ediyor Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi

