

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Çağ Sistemlerinde Nütr Noktası  
Topraklama Prensipleri**

**Bekir Mumyılmaz**

**Yüksek Lisans Tezi**

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON  
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot R 152  
133

Alındığı Yer FEN BİL. ENS.

Tarih : 20.04.1992

Fatura : - - - - -

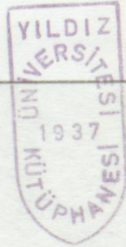
Fiyatı : 20.000, TL

Ayniyat No : 1/2

Kayıt No : 48344

UDC : 621.3 378.242

Ek :



ÜNSÖZ

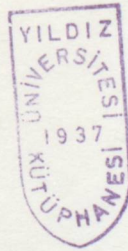
Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinde, generatör ve transformatörlerin yıldız noktalarının (nötr noktası) topraklama prensipleri incelenmiştir. Teorik hesaplamalar yanında pratik uygulamalara da yer verilmiş ve bu sistemlerle birlikte kullanılan koruma cihazlarının özellik ve bağlantı şekilleri belirtilmiştir.

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE NÖTR NOKTASI  
TOPRAKLAMA PRENSİPLERİ**

Lisansüstü çalışmamın danışmanları olan ve bu çalışmamın ilgi ve abirine takip eden değerli hocam, Prof. Dr. Hüseyin Çakır Bey'e bu çalışmamın süresince emeği ve tecrübe ve bilgilerinden faydalandığım araştırma görevlisi meslektaşlarıma ayrıca teşekkürlerimi en saygıyla bir borç biliriz.

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELK.MÜH.BEKİR MUMYAKMAZ



## ÖNSÖZ

Bekir Mumyakmaz 24.02.1962 Afyon doğumludur. İlköğretimini Bu tez çalışmasında; güç sistemlerinde, generatör ve transformatörlerin yıldız noktalarının (nötr noktası) topraklanma prensipleri incelenmiştir. Teorik hesaplamalar yanında pratik uygulamalara da yer verilmiş ve bu sistemlerle birlikte kullanılan koruma cihazlarının özellik ve bağlantı şekilleri belirtilmiştir.

Lisansüstü çalışmamı yöneten, çalışmalarımı ilgi ve sabırla takip edip yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocam, Prof.Dr.Hüseyin Çakır bey'e; yine tez çalışmam süresince engin tecrübe ve bilgilerinden faydalandığım araştırma görevlisi meslektaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç biliririm.

Elk.Müh.Bekir MUMYAKMAZ

## ÖZGEÇMİŞ

Bekir Mumyakmaz 16.08.1967 Afyon doğumludur. İlköğretimini Afyon Sahipata İlkokulu, orta öğretimini Afyon Merkez Ortaokulu ve lise öğretimini Afyon Endüstri Meslek ve Teknik Okulu elektrik bölümünde tamamladıktan sonra, 1984'de Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'ne girdi. 1988 yılında aynı okuldan mezun olduktan sonra, yine aynı yıl Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde lisansüstü öğretimine başladı. Mayıs 1989'da Yıldız Üniversitesi Elektrik Bölümünde Elektrik Tesisleri Kürsüsüne Araştırma Görevlisi olarak girdi. Halen görevine devam etmektedir.

## ÖZET

Güç sistemlerinin topraklanması çok önemlidir ve özellikle toprakla irtibat suretiyle meydana gelen arızaların genelinde etkisini gösterir. Bu sebeple topraklama, güç sistemlerinin bütün elemanlarının korunmasında önemli etkilere sahiptir. Topraklamanın ana amaçları; geçici aşırı gerilimleri minimize etmek, personel güvenliğinin sağlanması için uluslararası ve bölgesel standartlara uymak, arıza ve arıza bölgesinin hızlı bir şekilde bulunmasına yardımcı olmaktır.

Sistem topraklaması için 4 tip vardır: (1) topraklanmamış, (2) büyük empedans üzerinden, (3) küçük empedans üzerinden ve (4) direkt veya etkin olarak topraklı. Pratikte her tip avantaj ve dezavantajlarıyla tatbik edilir. Bu çalışmanın sonunda verilen tavsiyeler genel pratik tecrübeler ve kişisel tercihlere dayandırılmıştır.

Bu çalışmama ait 1., 2., 3. ve 4. bölümlerde gerekli ön bilgiler verilmiş, 5.bölümde ise sistem topraklama prensipleri incelenmiştir. Son bölümde genel bir sonuç ve tavsiyeler verilmiştir.

## SUMMARY

Power system grounding is very important, particularly since the large majority of faults involve ground. Thus it has a significant effect on the protection of all the components of the power system. The principal purposes of grounding are to minimize potential transient overvoltages, to comply with local, state, and national codes for personnel safety requirements, and to assist in the rapid detection and isolation of the trouble or fault areas.

There are four types for system grounding: (1) ungrounded, (2) high impedance, (3) low impedance, and (4) effective or solid grounding. Each has its application in practice, together with advantages and disadvantages. The recommendations, which are given in the last chapter of my study, are based on general practices and some personal preferences.

In the first, second, third and fourth chapters of the study necessary background is given. The system grounding principles are examined in the fourth chapter. A general result and recommendations are given in the last chapter.

## İ Ç İ N D E K İ L E R

Sayfa

	<u>Sayfa</u>
1. PER UNİT DEĞERLER	1
1.1. PER UNİT DEĞERLER İÇİN BAZ SEÇİLMESİ	1
1.2. PER UNİT DEĞERLERDE BAZIN DEĞİŞTİRİLMESİ	3
2. SİMETRİLİ BİLEŞENLER	5
2.1. DENGESİZ FAZÖRLERİN SİMETRİLİ BİLEŞENLER CİNSİNDEN SENTEZİ	5
2.2. DENGESİZ FAZÖRLERİN SİMETRİLİ BİLEŞENLERİ	7
2.3. SİMETRİLİ BİLEŞENLERDE GÜÇ İFADESİ	9
2.4. SİMETRİSİZ SERİ EMPEDANSLAR	12
2.5. SEQUENCE EMPEDANSLAR VE SEQUENCE DEVRELER	14
2.5.1. YÜKSÜZ GENERATÖRLERİN SEQUENCE DEVRELERİ	15
2.5.2. DEVRE ELEMANLARININ SEQUENCE EMPEDANSLARI	19
2.5.3. POZİTİF VE NEGATİF SEQUENCE DEVRELER	20
2.5.4. SIFIR SEQUENCE DEVRELER	21
3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE TOPRAKLA TEMAS ARIZALARI	23
3.1. İKİ FAZLI KISA DEVRE VE ÇİFT TOPRAK DEĞMESİ	23
3.2. BİR FAZLI KISA DEVRE	24
3.3. TOPRAK DEĞMESİ	27
3.3.1. TOPRAK DEĞMESİNDE GERİLİMLER	27
3.3.2. TOPRAK DEĞMESİNDE AKIMLAR	29
4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE NÖTR NOKTASI TOPRAKLAMASI	33
4.1. TOPRAKLAMANIN AMACI VE ÖNEMİ	33
4.1.1. TOPRAKLAMANIN TANIMI VE AMAÇLARI	34
4.1.2. TOPRAKLAMA ÇEŞİTLERİ	34
5. GÜÇ SİSTEMLERİNDE NÖTR NOKTASI TOPRAKLAMA PRENSİPLERİ	37
5.1. TOPRAKLANMAMIŞ SİSTEMLER	37
5.1.1. GEÇİCİ AŞIRI GERİLİMLER	42
5.1.2. TOPRAKLANMAMIŞ SİSTEMLER İÇİN TOPRAK DEĞMESİNİ TESPİT ETME METODLARI	44
5.2. BÜYÜK EMPEDANS ÜZERİNDEN TOPRAKLI SİSTEMLER	48
5.2.1. YANSITMALI TOPRAKLAMA SİSTEMİ	48
5.2.2. BÜYÜK DİRENÇLİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ	50
5.2.3. TİPİK BİR BÜYÜK DİRENÇLİ NÖTR TOPRAKLAMASI	52
5.2.4. ÜÇ DAĞITIM TRAFOSU KULLANIMIYLA BÜYÜK DİRENÇLİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ	57

	<u>Sayfa</u>
5.3. MADENLER YA DA DİĞER TEHLİKELİ TİP UYGULAMALAR İÇİN TOPRAKLAMA SİSTEMİ	60
5.4. KÜÇÜK EMPEDANS ÜZERİNDEN TOPRAKLAMA	62
5.4.1. TİPİK BİR REAKTÖRLÜ TOPRAKLAMA SİSTEMİ	64
5.4.2. TİPİK BİR DİRENÇLİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ	65
5.5. ETKİN (TAM) TOPRAKLAMA	66
5.5.1. TİPİK BİR ETKİN TOPRAKLAMA SİSTEMİ	67
6. SONUÇ KRİTİĞİ VE TAVSİYELER	68
KAYNAKLAR	71

## 1. PER UNİT DEĞERLER

Devre hesapları hakiki değerler ile yapılabildiği gibi, bunları temsil eden per unit değerlerle de yapılabilir. Hesaplamaların herhangi bir kademesinde arzu edilirse per unit değerden hakiki değerlere dönmek her zaman için mümkündür.

Devre hesaplamalarında herhangi bir büyüklüğün bir çok değerlerine rastlanabilir. Meselâ, hesaplamalarda gerilim büyüklüğünün 108, 120 ve 126 kV gibi değerleriyle karşılaşılmış olsun. Bu gerilim değerlerinden herhangi birisi birim veya baz değer olarak seçilebilir. Böyle bir gaye ile meselâ 120 kV baz olarak seçilmiş olsun. Bu takdirde 108, 120 ve 126 kV' luk gerilimler 0,90, 1,0 ve 1,05 per unit değerleri ile ya da % 90, % 100, % 105 yüzde değerleri ile de gösterilebilir. Şu halde per unit değer, verilen değer baz olarak seçilen değere göre alınan ve ondalık kesir şeklinde ifade edilen oranına eşittir. Yüzde cinsinden oran ise bu per unit değer baz değerine göre 100 katından ibarettir.

Bir devrede gerilim, akım ve kVA büyüklükleri arasında belli bağıntılar mevcuttur. Bu sebeple, bunlardan herhangi ikisi için baz değerler seçilmesi kâfidir. Umumiyetle kVA ve kV için baz değerler seçildiğinde, diğer büyüklüklerin baz değerleri kendiliğinden ortaya çıkar.

### 1.1. PER UNİT DEĞERLER İÇİN BAZ SEÇİLMESİ

Önce devrenin herhangi bir kısmı için baz seçilir, sonra devrenin bu kısmından transformatörler ile ayrılmış olan öteki kısımlarındaki bazlar biraz sonra izah edilecek prensibe göre tayin edilir.

Bir makina ya da cihazın p.u. değeri imalâtçısı tarafından bildirilmiş ise, baz olarak makina veya cihazın nominal

kV ve kVA değerlerinin alınmış olduğu düşünülür. Motorlar hakkında genellikle B.G ve gerilim bildirildiği vakit nominal kVA; sadece verim ve güç faktörü verildiği takdirde söylenebilir. Bu mevzuda herhangi bir bilgi verilmemişse aşağıdaki bağıntılardan faydalanabilinir:

Asenkron motorlarda	kVA = B.G
Senkron motorlarda	% 100 güç faktörü için
	kVA = 0,85 B.G
	% 80 güç faktörü için
	kVA = 1,10 B.G

Bir transformatörün gerçek direnci ve kaçak reaktansı yüksek veya alçak gerilim tarafından ölçme yapıldığına göre değişir. Fakat bu büyüklükler p.u değerler halinde ifade edildikleri zaman baz kVA transformatörün nominal kVA değeri ve baz kV, alçak gerilim tarafında; alçak gerilim değeri, yüksek gerilim tarafında da; yüksek gerilimin değeri demektir. Bu esasa uyulduğu takdirde transformatörün alçak gerilim veya yüksek gerilim taraflarından hangisine çevrilirse çevrilsin p.u empedansı hep aynı değerdedir.

Bir devrede gerilim, akım ve kVA arasında belli bağıntılar mevcuttur. Bu sebeple, bunlardan herhangi ikisi için baz değerler seçilmesi kâfidir. Umumiyetle kVA ve kV için baz değerler seçilir ve öteki büyüklüklerin baz değerleri kendiliğinden ortaya çıkar. Meselâ tek fazlı bir devre için şu bağıntılar yazılabilir:

$$\text{Baz akım} \quad I_B = \frac{\text{Baz güç}}{\text{Baz gerilim}} = \frac{kVA_{B1\phi}}{kVA_{LN}}$$

$$\text{Baz empedans} \quad Z_B = \frac{\text{Baz gerilim}}{\text{Baz akım}} = \frac{V_{BLN}}{I_B}$$

$$\begin{aligned} \text{Baz empedans} \quad Z_B &= \frac{(\text{Baz gerilim})^2}{\text{Baz güç}} \cdot 1000 \\ &= \frac{(kV_{BLN})^2}{kVA_{B1\phi}} \cdot 1000 \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\text{Baz güç,} \quad kW_{1\phi} = \text{BAZ } kVA_{1\phi} \quad (1.5)$$

$$\text{Baz güç,} \quad MW_{1\phi} = \text{Baz } MVA_{1\phi} \quad (1.6)$$

Bir devre elemanının

$$\text{p.u. değeri} = \frac{\text{gerçek değeri}}{\text{baz değeri}} \quad (1.2)$$

Üç fazlı devrelerde ise baz empedans ve baz akım değerleri direkt olarak üç faz baz kVA ve kV değerlerinde aşağıdaki formüllerden hesaplanabilir.

$$\text{Baz akım} \quad I_B = \frac{kVA_{B3\phi}}{\sqrt{3} \cdot kV_{BLL}} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Baz empedans} &= \frac{(kV_{BLL}/\sqrt{3})^2 \cdot 1000}{kVA_{B3\phi}/3} \\ &= \frac{(kV_{BLL})^2 \cdot 1000}{kVA_{B3\phi}} = \frac{(kV_{BLL})^2}{MVA_{B3\phi}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

bulunur. Şu halde baz akım ve baz empedansı hesaplanırken, formüllerde ya bir faza ait baz değerleri veya üç faza ait değerleri kullanılabilir.

## 1.2. PER UNIT DEĞERLERDE BAZIN DEĞİŞTİRİLMESİ

Sisteme dahil herhangi bir elemanın p.u. değeri bu elemanın bulunduğu devre kısmı için seçilenden başka bazaya göre verilmiş olabilir. Halbuki, sistemin herhangi bir kıs-

mındaki bütün empedansların hep aynı empedans bazına göre ifade edilmesi lâzım geldiğinden, p.u. değerlerin bir baz esasından, başka bir baz esasına göre çevrilebilmesi için aşağıdaki denklemlerden faydalanılır.

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \quad (1.5)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_\Omega}{Z_B} \quad (1.6)$$

$$Z_{pu} = Z_\Omega \cdot \frac{S_B}{V_B^2} \quad (1.7)$$

Ayrı ayrı baz boyutlarına işaret eden böyle iki p.u. empedans eskisi için (0), yenisi için de (n) notasyonu kullanılmak sureti ile (1.7)'de yerleştirilirlerse,

$$Z_{opu} = Z_\Omega \cdot \frac{S_{Bo}}{V_{Bo}^2}$$

$$Z_{npu} = Z_\Omega \cdot \frac{S_{Bn}}{V_{Bn}^2}$$

elde edilir. Bu iki ifade taraf tarafa bölünüp,  $Z_n$  için yazılırsa

$$Z_{npu} = Z_{opu} \left( \frac{V_{Bo}}{V_{Bn}} \right)^2 \left( \frac{S_{Bn}}{S_{Bo}} \right) \quad (1.8)$$

Bu ifade empedansın omik değeri bilinmeden direkt olarak yeni baza göre p.u. değeri vereceğinden çok önemlidir.

## 2. SİMETRİLİ BİLEŞENLER

Simetrili bileşenler teorisi 1918'de C.L. Fortescue tarafından ortaya atılmış ve daha sonra geliştirilerek hakkında pekçok makale neşredilmiştir. Kısaca, bu metod dengesiz bir elektrik şebekesinin kolaylıkla etüd edilmesine imkân vermektedir.

### 2.1. DENGESİZ FAZÖRLERİN SİMETRİLİ BİLEŞENLER CİNSİNDEN SENTEZİ

Fortescue'nin çalışmaları  $n$  tane fazörden meydana gelen bir dengesiz sistemin, dengeli fazörlerden meydana gelen  $n$  adet sistem olarak yeniden çözülebileceğini ortaya koymuştur. Bu  $n$  adet sistem orjinal sistemin simetrili bileşenleri olarak adlandırılır. Bu metod çok fazlı sistemlere tatbik edilebilirse de burada sadece 3 fazlı sistemler için kullanılacaktır. Buna göre 3 fazlı dengesiz bir sistemin, her biri üç fazörden meydana gelen 3 yeni bileşeni:

1- Orjinal (dengesiz) sistem ile aynı faz sırasında (a-b-c) büyüklükleri birbirine eşit ve aralarındaki faz farkı  $120^\circ$  olan üç fazörden teşekkül etmiş "pozitif sequence bileşen" olarak adlandırılmış bir sistem.

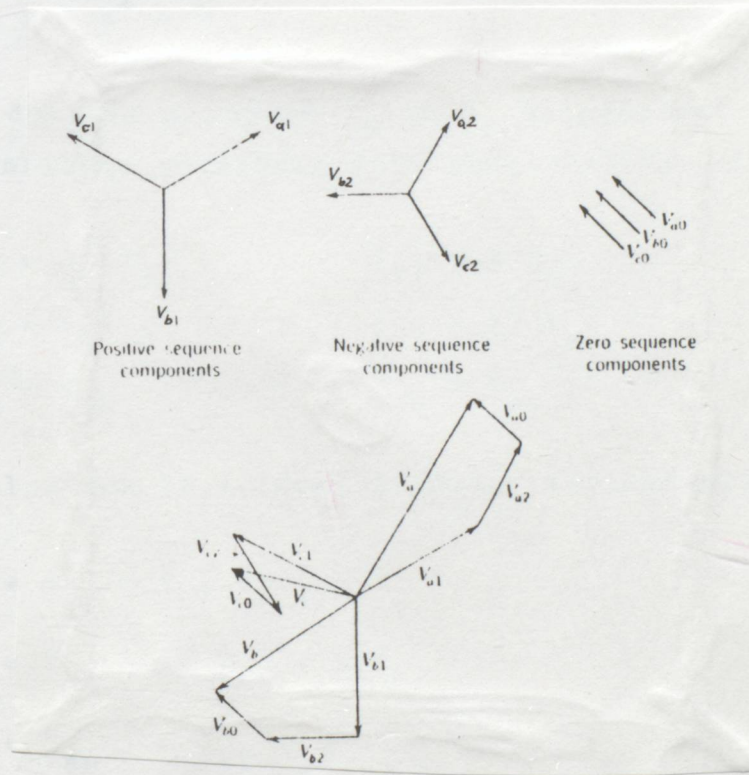
2- Orjinal sisteme ters faz sırasına sahip (a-c-b), büyüklükleri birbirine eşit ve aralarındaki faz farkı  $120^\circ$  olan, üç fazörden teşekkül etmiş ve "negatif sequence bileşen" olarak adlandırılmış ikinci bir sistem.

3- Büyüklükleri birbirine eşit ve aynı fazda üç fazörden teşekkül etmiş ve "sıfır sequence bileşen" olarak adlandırılmış üçüncü ve son sistem.

Şekil (2.1)'de dengesiz 3 fazlı bir sistemin gerilim fazörlerinin yukarıda tarifi yapılan dengeli 3 fazlı 3 sistem-

den müteşekkil hâli, yani simetrik bileşenleri ile teşkil gösterilmiştir. Bu gösteriliş akım fazörleri için de aynıdır. Sadece  $V$  yerine  $I$  yazmak kâfidir.

Şekilde orjinal fazör gerilimler  $V_a, V_b, V_c$  olarak, bunların pozitif sequence bileşenleri  $V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}$ , negatif sequence bileşenleri  $V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}$  ve sıfır sequence bileşenleri de  $V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}$  olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Orjinal fazörlerin sequence bileşenleri

Orjinal dengesiz fazörlerin her biri, dengeli bileşenlerin toplamından meydana geldiğine göre;

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \quad (2.3)$$

olarak yazılabilir.

## 2.2. DENGESİZ FAZÖRLERİN SİMETRİLİ BİLEŞENLERİ

Şekil (2.1)'den ve  $a$  operatörünün

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j 0,866 \quad (2.9)$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j 0,866$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

olduğu da dikkate alınarak  $V_b$  ve  $V_c$  bileşenleri  $V_a$ 'nın bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir: (2.10)

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & ; & & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & ; & & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{bo} &= V_{ao} & ; & & V_{co} &= V_{ao} \end{aligned} \quad (2.4)$$

(2.1) denkleminde (2.4)'deki ifadeler yerleştirilirse,

$$V_a = V_{ao} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.5)$$

$$V_b = V_{ao} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \quad (2.6)$$

$$V_c = V_{ao} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \quad (2.7)$$

Bu ifadeler matrisyel formda yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

elde edilir. Burada

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

olarak tarif edilirse,  $A^{-1}$  de

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

olarak kolayca bulunur. Öyleyse (2.8) denkleminin her iki yanını  $A^{-1}$  ile çarpılırsa,

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

elde edilir. (2.8) ifadesi a fazının simetrik bileşenleri bilindiğinde orjinal dengesiz fazörlerin, (2.11)'de orjinal sistemin fazörleri biliniyorken a fazının simetrik bileşenlerini verir. b ve c fazlarının  $V_{b0}, V_{b1}, V_{b2}; V_{c0}, V_{c1}, V_{c2}$  bileşenleri istenildiği takdirde (2.4)'den hesaplanabilir. Akımlar için de (2.8) ve (2.11) de V yerine I koymakla aynı ifadeler elde edilebilir.

(2.8) ve (2.11) matrisleri

$$\tilde{V}_{abc} = |A| \cdot \tilde{V}_{0,1,2}$$

$$\tilde{V}_{o,1,2} = |A|^{-1} \tilde{V}_{a,b,c}$$

ve akımlar için de

$$\tilde{I}_{abc} = |A| \tilde{I}_{o,1,2}$$

$$\tilde{I}_{o,1,2} = |A^{-1}| \tilde{I}_{a,b,c} \quad (2.14)$$

gibi kısaca da ifade edilebilirler.

Netice olarak (2.11)'den kolayca görüldüğü gibi  $V_{ao} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$  ifadesinden dengesiz fazörlerin toplamının sıfır olduğunda, sıfır sequence bileşenlerinin mevcut olmayacağı görülür. 3 fazlı bir sistemde faz-faz gerilimleri toplamı daima sıfır olduğundan hat geriliminde sıfır-sequence bileşenler olmaz.

Üç fazlı bir sistemde hat akımlarının toplamı, nötr iletkeninden dönen  $I_n$  akımına eşittir. Yani

$$I_a + I_b + I_c = I_n \quad (2.12)$$

Akımlar için (2.11) ifadesinden elde edilen  $I_{ao} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$  ile yukardaki denklem mukayese edilince

$$I_n = 3 I_{ao} \quad (2.13)$$

elde edilir. Bu ifade nötr hattı olmayan (meselâ  $\Delta$  bağlı bir yükte) üç fazlı bir sistemde  $I_n = 0$  olacağından hat akımlarının sıfır sequence bileşenlerinin de sıfır olacağını gösterir.

### 2.3. SİMETRİLİ BİLEŞENLERDE GÜÇ İFADESİ

Daha evvel izah edildiği şekilde gerilim ve akımın simetrik bileşenleri (komponentleri) elde edilmişse, devrede



harcanan güç direk olarak bu bilinenler vasıtası ile hesap edilebilir.

a, b, c fazlarından meydana gelmiş üç fazlı bir devrede kompleks güç

$$S_{3\phi} = P_{3\phi} + j Q_{3\phi} = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (2.14)$$

olup burada  $V_a, V_b, V_c$  faz nötr gerilimleri,  $I_a, I_b, I_c$  de üç fazlı devreden akan akımlardır. Matris gösterilişi olarak

$$S_{3\phi} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = [V_a \ V_b \ V_c] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* \quad (2.15)$$

yazılır. Daha kısa gösterilişi ile

$$S_{3\phi} = \tilde{V}_{abc}^T \cdot I_{abc}^* \quad (2.16)$$

olarak da kullanılır. Aynı  $S_{3\phi}$ , akım ve gerilimin simetrik bileşenleri kullanılarak da hesaplanabilir. Şöyle ki;

$$S_{3\phi} = [A \cdot \tilde{V}_{012}]^T \cdot [A \cdot \tilde{I}_{012}]^* \quad (2.17)$$

$$[A \tilde{V}_{012}]^T = \tilde{V}_{012}^T \cdot A^T \quad (2.18)$$

bu ifade (2.17)'de yerine konursa

$$S_{3\phi} = \tilde{V}_{012}^T A^T [A \tilde{I}_{a2}]^* = \tilde{V}_{012}^T \cdot A^T \cdot A^* I^* \quad (2.19)$$

$A^T = A$  olduğu bilindiğine göre (2.19) daha açık olarak

$$S_{3\phi} = [V_{a0} \ V_{a1} \ V_{a2}] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* \quad (2.20)$$

olup,

$$\begin{aligned} A^T \cdot A^* &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \\ &= 3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Yani

$$A^T \cdot A^* = A \cdot A^* = 3U \quad (2.21)$$

olur. Dolayısı ile

$$S = 3 [V_{a0} \ V_{a1} \ V_{a2}] \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^*$$

olarak elde edilir. Böylece

$$S_{3\phi} = \tilde{V}_{abc}^T \cdot I_{abc}^* = 3 \tilde{V}_{012}^T \cdot \tilde{I}_{012}^* = 3 [V_0 I_0^* + V_1 I_1^* + V_2 I_2^*] \quad (2.22)$$

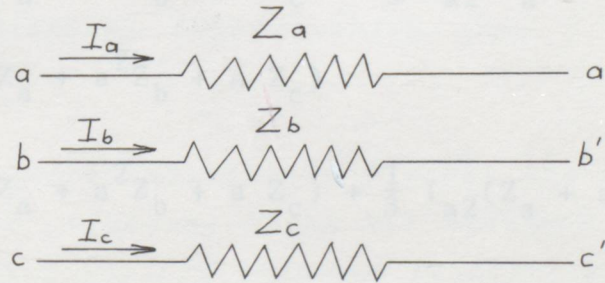
veya

$$S_{3\phi} = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = 3V_0 I_0^* + 3V_1 I_1^* + 3V_2 I_2^* \quad (2.23)$$

dir. Bu ifade dengesiz bir üç fazlı devrede, simetrik bileşenler ile kompleks gücün hesaplanabileceğini gösterir.

#### 2.4. SİMETRİSİZ SERİ EMPEDANSLAR

Şekil (2.2)'deki  $Z_a$ ,  $Z_b$  ve  $Z_c$  birbirine eşit olmayan seri üç empedans ile simetrik olmayan bir sistem parçasını gösterir.



ŞEKİL 2.2. Farklı empedanslara sahip 3 fazlı bir sistem

Bu üç empedans arasında kuplaj olmadığı kabul edilerek sistemin şekilde gösterilen empedansları boyunca gerilim düşümü:

$$\begin{bmatrix} V_{aa} \\ V_{bb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

akım ve gerilimin simetrik bileşenler ifadesi ise

$$A \cdot V_{aa1} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} A \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

olur. Burada  $A$ , (2.9) ile tarif edildiği gibidir. Eşitliğin iki tarafı  $A^{-1}$  ile çarpılırsa

$$\begin{aligned} V_{aa1} &= \frac{1}{3} I_{a1} (Z_a + Z_b + Z_c) + \frac{1}{3} I_{a2} (Z_a + a^2 Z_b + a Z_c) + \\ &\quad \frac{1}{3} I_{a0} (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c) \\ V_{aa2} &= \frac{1}{3} I_{a1} (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c) + \frac{1}{3} I_{a2} (Z_a + Z_b + Z_c) + \\ &\quad \frac{1}{3} I_{a0} (Z_a + a^2 Z_b + a Z_c) \\ V_{aa0} &= \frac{1}{3} I_{a1} (Z_a + a^2 Z_b + a Z_c) + \frac{1}{3} I_{a2} (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c) + \\ &\quad \frac{1}{3} I_{a0} (Z_a + Z_b + Z_c) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Empedanslar birbirine eşit olursa (yani  $Z_a = Z_b = Z_c$ ) (2.26) denklemleri aşağıdaki gibi kısalabilir ve

$$V_{aa1} = I_{a1} \cdot Z_a = V_{aa2} = I_{a2} Z_a ; V_{aa0} = I_{a0} Z_a \quad (2.27)$$

Netice olarak, fazlar arasında bir kuplaj olmadığı kabulü ile dengeli seri empedanslarda veya dengeli bağlı bir yükte akan dengesiz akımların simetrik bileşenleri, her sistemde yukarıdaki gibi gerilim düşümleri meydana getirebilir. Şayet empedanslar birbirine eşit değilse (2.26) denklemleri, herhangi bir sistemdeki gerilim düşümünün her üç sistemdeki akımlara bağlı olduğunu gösterir. Şekildeki üç empedans arasında bir

kuplaj mevcutsa, (2.24) ve (2.25)'deki kare matrislerin köşegenleri dışındaki elemanları, sıfırdan farklı elemanlar ihtiva edecek ve (2.26)'da da ilâve terimler olacaktı. Bir üç fazlı nakil hattının herhangi bir iletkenindeki akım diğer fazlarda bir gerilim indükleyse bile, hatların transpozitesi kabulü ile empedansların birbirine eşitliği neticesine varılır. Böylece herhangi bir sistemdeki bileşen akımları, sadece buldukları sistemde bir gerilim düşümü meydana getirir. Yani sıfır sequence akımları sadece sıfır, pozitif sequence akımları sadece pozitif, negatif sequence akımları da sadece negatif gerilim düşümlerini hasıl ederler.

## 2.5. SEQUENCE EMPEDANSLAR VE SEQUENCE DEVRELER

Bir devrenin herhangi bir bölümünde muayyen bir sequence akımı tarafından meydana getirilen gerilim düşümü, devrenin o bölümündeki empedansından akan o sequence akımına bağlıdır.

Bir sequence akımı için dengeli bir devrenin herhangi bir kısmındaki empedans, başka bir sequence akım için farklı olabilir. Sadece pozitif sequence akımları akan bir devrenin, bu akımlara gösterdiği empedansa pozitif sequence empedans, negatif sequence akımları akan devrenin gösterdiği empedansa negatif sequence empedans, sıfır sequence akımlara karşı gösterdiği empedansa da sıfır sequence empedans denir.

Bir dengeli sistemdeki dengesiz bir arızanın analizi, akan dengesiz akımların simetrik bileşenlerini bulmaktan ibarettir. Bir faz sequence'inin akım sequence'leri sadece o sequence ait gerilim düşümüne sebep olduğundan ve bunlar diğer sequence akımlarına bağlı olmadığından, dengeli bir sistemde her bir sequence'in akımının, o sequence için teşkil edilmiş bağımsız empedans devresinden aktığı düşünülmelidir. Her bir sequence akımı için sadece ona ait empedanslardan teşkil edilen tek bir faz eşdeğer devresine "sequence devre" denir. Bu

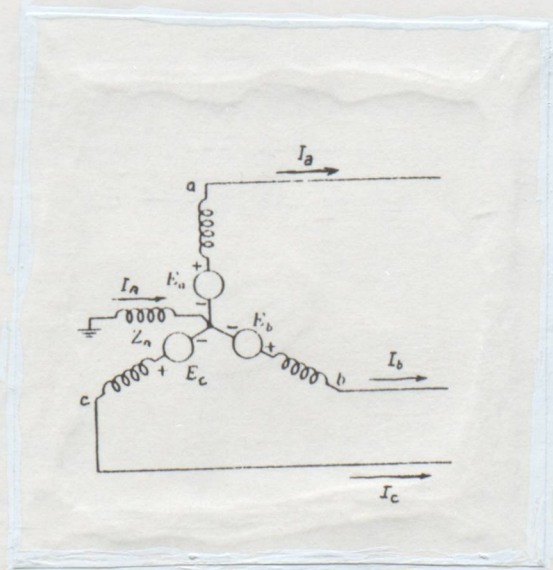
devreye aynı adlı sequence'in e.m.k.'i (varsa) dahildir. (pozitif sequence'inki gibi)

Çeşitli arıza hallerini göstermek ve incelemek için  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ ,  $I_{a0}$  akımlarını taşıyan sequence devreler, daha sonra kısa devre mevzuunda daha tafsilatlı anlatılacağı gibi birbirine bağlanır. Bu sebeple simetrik bileşenler metodu ile bir arızanın tesirini hesaplamak için; sequence empedansları ve onların meydana getirdikleri sequence devreleri tayin etmek lâzımdır. Kısa devre hesaplarının yapılabilmesi için lâzım gelen sequence devreleri ve empedanslarının teşkil edilmesi bundan dolayı çok ehemmiyetlidir.

### 2.5.1. YÜKSÜZ GENERATÖRLERİN SEQUENCE DEVRELERİ

Şekil (2.3) de nötr noktası bir bobinle topraklanmış yüksüz generatörde bir arıza meydana geldiği vakit (arıza şekilde gösterilmemiştir) hatlarda  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  akımları akar.

Şayet arıza toprak ile alâkalı ise (1 faz-toprak v.s.) generatörün nötründe akan akım  $I_n$  ile gösterilir. Bu arızaya göre bir veya iki hattın akımları sıfır olabilmekteyse de,



ŞEKİL 2.3. Nötr noktası bobin üzerinden topraklanmış yüksüz bir generatörün devre diyagramı

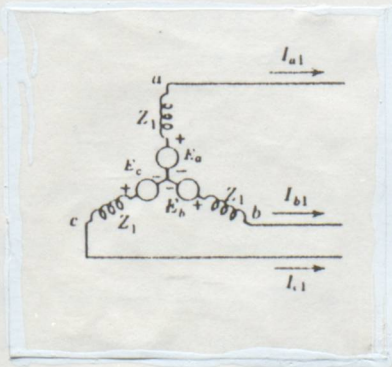
akımlar onların nasıl dengesiz olacağına bakmadan simetrik bileşenler metodu ile çözülebilirler.

Bileşen devrelerinin çizimi oldukça basittir. Generatör dengeli kabul edildiğinden, pozitif sistemle aynı yönde dönmektedir. Bundan dolayı sadece pozitif sistem için E gerilimi mevzu bahisdir. Pozitif bileşen şebekesi, (bu sebeple) E e.m.f ve ona seri bir pozitif bileşen empedansı ile gösterilir.

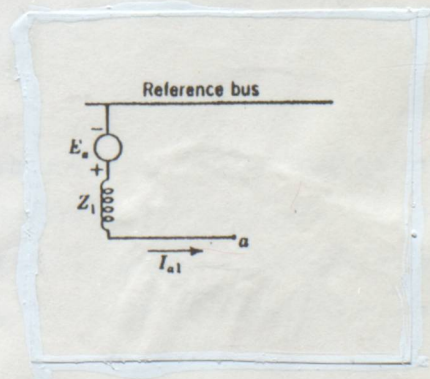
Negatif ve sıfır bileşen şebekeleri e.m.f ihtiva etmezler. Bunun için pasif sistem adını alırlar. Bununla birlikte negatif ve sıfır bileşen akımları için generatör empedanslarını ihtiva ederler. Akımın sequence bileşenleri Şekil (2.4)'de gösterilmiştir.

Akımlar şekilde gösterildiği gibi hangi empedanstan geçiyorlarsa o'na uygun olarak adlandırılırlar ve sadece kendi bileşen empedanslarından akarlar. Yukarıda gösterilen şekildeki bileşen şebekeleri, dengesiz akımların simetrik bileşenlerine göre tanzim edilmiş olan üç fazlı devrelerin eşdeğer tek hat devreleridir.

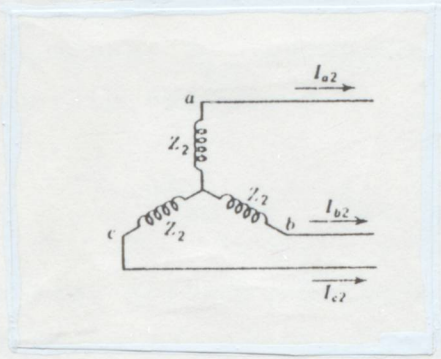
Pozitif bileşen şebekesindeki  $E_a$  gerilimi, generatörün 1 fazının yüksüzkenki faz-nötr gerilimidir. Çünkü generatörler yüksüzken uç gerilimine eşittir. Bunun için pozitif bileşen devresine aktif devre de denir.



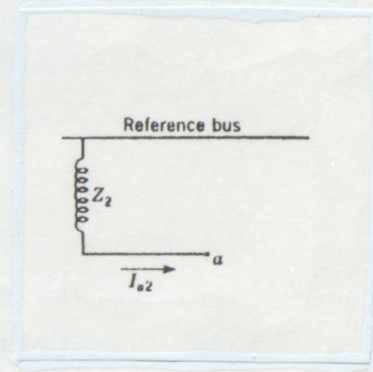
(a) Pozitif sequence devre diagramı



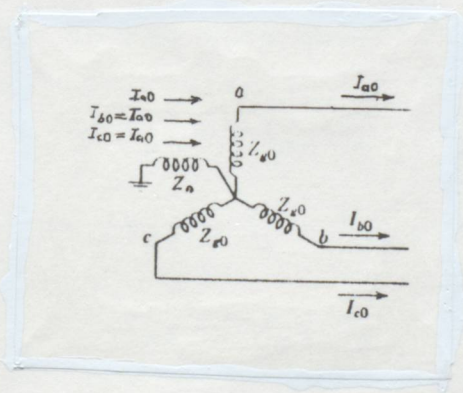
(b) Pozitif sequence devre



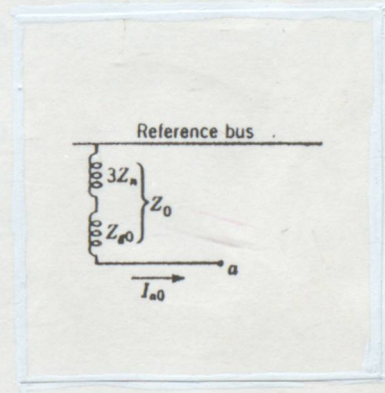
(c) Negatif sequence devre diagramı



(d) Negatif sequence devre diagramı



(e) Sıfır-sequence devre diagramı



(f) Sıfır sequence devre diagramı

ŞEKİL 2.4. Şekil (2.3)'deki yüksüz generatörün sequence devre diagramı ve sequence devreleri

Pozitif ve negatif bileşen şebekeleri için referans bara, generatörün nötrüdür. Nötr ve toprak arasındaki empedansta sadece sıfır bileşen akımı aktığı için, generatörün nötrü topraktır. Sıfır bileşen devresi için referans bara generatörde topraktır.

Özdeşlik (2.13) Nötr ve toprak arasındaki  $Z_n$  empedansından akan akım, (2.13) ifadesi ile daha evvel çıkartıldığı gibi  $3I_{ao}$  dır. Şekil (2.4)'e bakılırsa, generatörün her faz sıfır-bileşen empedansı  $Z_{go}$  olduğundan, a noktasından toprağa sıfır bileşen gerilim düşümünün

$$-3I_{ao} Z_n - I_{ao} Z_{go}$$

olduğu görülür. Dolayısı ile (2.4)'de gösterildiği gibi sıfır bileşen devresinin  $3Z_n + Z_{go}$ 'ın toplamı olan  $Z_o$  empedansı ile temsil edilmesi gerekli olmaktadır.

Umumiyetle a fazı için gerilim ve akım bileşenleri, bileşen devreleri ile tesbit edilen ifadelerden bulunmuştur. a fazının a noktasından referans baraya (veya toprağa) gerilim düşümü için denklemler Şekil (2.4)'den çıkarılmış olup

$$V_{ao} = -I_{ao} Z_o - I_{ao} (3Z_n + Z_{go}) \quad (2.28)$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \quad (2.29)$$

$$V_{a2} = -I_{a2} Z_2 \quad (2.30)$$

şeklinindedir. Burada

$E_a$  : Pozitif bileşenin yüksüz gerilimi (faz-nötr)

$Z_o$  : Sıfır bileşen empedansı ( $Z_o = 3Z_n + Z_{go}$ )

$Z_1$  : Pozitif " "

$Z_2$  : Negatif " "

olarak adlandırılmıştır. Dengesiz akımlar taşıyan her bir generatör için tatbik edilen yukardaki ifadeler, farklı arıza türlerinin akım bileşenlerinin esas denklemleri için başlama noktalarıdır. Eğer  $E_a$ , arızadan evvel mevcut olan yük için transient subtransient veya senkron reaktans altındaki geri-

lim olarak verilmişse bu denklemler yüklü bir generatöre tatbik edilir.

### 2.5.2. DEVRE ELEMANLARININ SEQUENCE EMPEDANSLARI

#### 1<sup>o</sup>- Pozitif Sequence Empedans ( $Z_1$ )

Bu empedans dengeli bir gerilim sisteminin, dengeli yüklenmesi hâlindeki işletme empedansıdır. Bu sebeple hatların faz empedansı, transformatörlerin kısa devre empedansı ve kısa devre anında generatörlerin empedansına eşit olan empedanstır.

#### 2<sup>o</sup>- Negatif Sequence Empedans ( $Z_2$ )

Bu empedans, dengeli gerilim sisteminin ters dönmesi hâlinde değişmeyeceğinden transformatörlerde, hatlarda ve bobinlerde pozitif sequence empedansa eşittir. Generatör ve motorlarda negatif sequence akımın stator sargılarında meydana getirdiği alan, daha çok amortisman sargılarında akımlar meydana getirir. Bu akımların meydana getireceği alan negatif sequence akımlarının meydana getireceği alanın bir kısmını kompanse edeceğinden, negatif sequence empedans pozitif sequence empedanstan küçük olur. Kısa devre hesaplarında generatörlerin direnci ihmal edilir.

#### 3<sup>o</sup>- Sıfır Sequence Empedans ( $Z_0$ )

Hatların sıfır sequence empedansları havai hat veya kablo oluşuna göre toprak iletkenliğine bağlıdır. Havai hatların sıfır sequence empedansı iletken kesitine ve tanzim şekline bağlı olarak pozitif sequence empedanstan 3 - 3,5 misli daha büyüktür. Yer altı kablolarında tek iletkenli ve 3-5 iletkenli kablolar için  $Z_0/Z_1 = 1 - 1,5$ 'dir. Alternatör-

lerde, başlangıç reaktans değerlerinden çok küçük olup onun  $1/3$  ile  $1/6$ 'sı kadardır. Transformatörlerde ise bu değer bağlantı şekline göre değişir. Ayrıca transformatörlerin bağlantı şekilleri, yıldız noktasının torpaklı olup olmamasına göre sıfır sequence devreleri değiştirmektedir.

### 2.5.3. POZİTİF VE NEGATİF SEQUENCE DEVRELER

Bir güç sisteminin sequence empedanslarının elde edilen değerleri, bütün sistem için sequence devrelerin meydana getirilmesine imkân verir. Bir sequence devre, aynı adlı sequence akımın akacağı bütün yolları gösterir.

Üç fazlı senkron generatörler ve motorlar dengeli gerilimler üretmek üzere dizayn edildiğinden sadece pozitif sequence devrelerinde iç gerilimlere sahiptirler. Statik ve simetrik sistemlerde pozitif ve negatif sequence empedanslar aynı olduğundan, pozitif sequence devrenin negatif sequence devreye dönüştürülmesi gerektiğinde sadece dönen makinayı gösteren empedansı değiştirip e.m.f.'i atmak kâfi gelir.

Bir üç fazlı dengeli sistemin bütün nötr noktaları aynı potansiyelde olduğundan, üç fazlı dengeli akımlar aktığında bütün nötr noktaları hem pozitif, hem de negatif sequence akımları için aynı potansiyelindedir. Bu sebeple simetrik bir üç fazlı sistemin nötrü, pozitif ve negatif sequence gerilim düşümlerinin tayini için referans potansiyelidir.

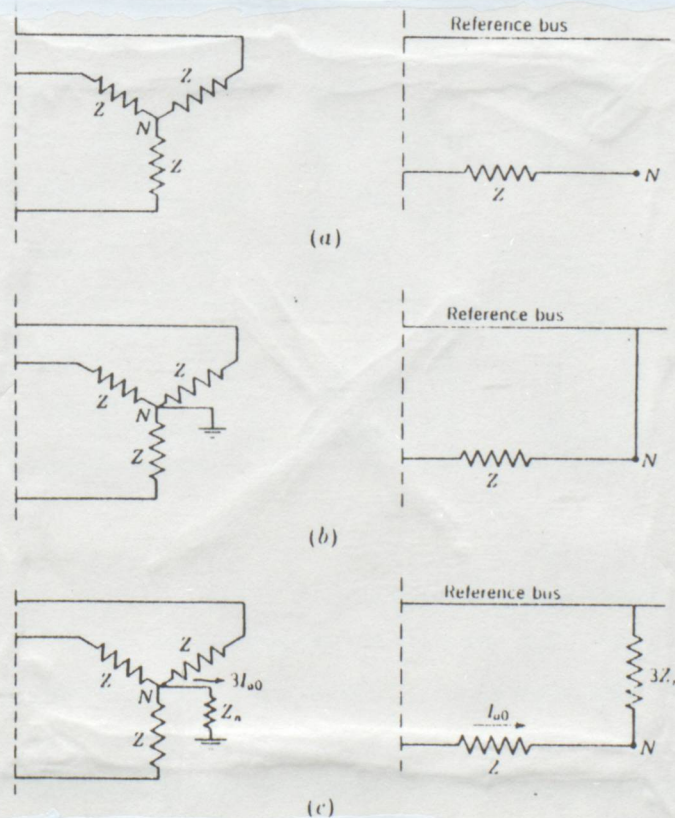
Bir makinanın nötr noktası ile toprak arasına bağlanan empedanstan ne pozitif ve ne de negatif sequence akım akmayacağından, bu empedans ne pozitif ve ne de negatif sequence devrenin bir parçası değildir.

## 2.5.4. SIFIR SEQUENCE DEVRELER

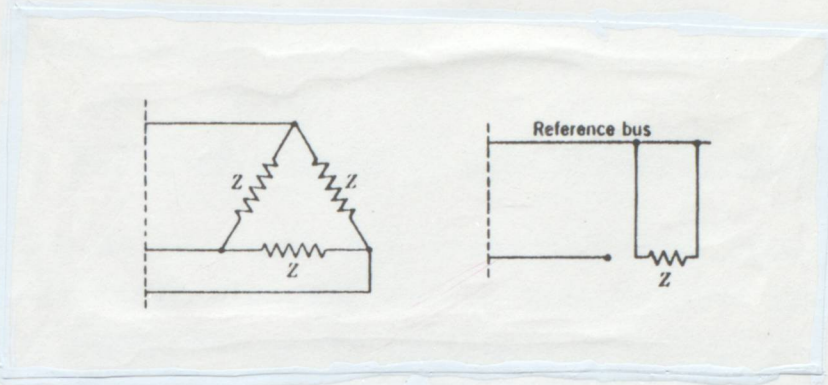
Sıfır sequence akımları söz konusu olduğu vakit, üç fazlı bir sistem tek fazlı çalışır. Çünkü, sistemin bütün fazlarında herhangi bir noktada sıfır sequence akımları büyüklük ve faz farkı bakımından aynıdır. Bu sebeple sıfır sequence akımlar ancak dönüş yolunun bulunması halinde akacaktır. Sıfır sequence akımlarının topraktan akma ihtimali olduğu için, toprak bütün noktalarda aynı potansiyelde olmayabileceğinden sıfır sequence devresinin referans barası uniform potansiyelde bir toprağı temsil etmeyebilir.

Toprak ve toprak hatlarının empedansları taşıma hatlarının sıfır sequence devrenin dönüş hattı, sıfır empedanslı bir iletken olan sistemin referans barasıdır.

Toprak empedansı sıfır sequence empedansına dahil edildiği için, sıfır sequence devrenin referans barasına göre ölçülen gerilimler toprağı göre gerçek gerilimleri verir.



ŞEKİL: 2.6-Y bağlı yüklerin sıfır sequence devreleri.



ŞEKİL: 2.7-  $\Delta$  bağlı bir yük için sıfır sequence devre.

SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS

ŞEKİL: 2.8- 3 fazlı transformatörlerin tek hat diyagramındaki sembolleri, bağlantı diyagramları ve sıfır sequence eşdeğer devreleri.

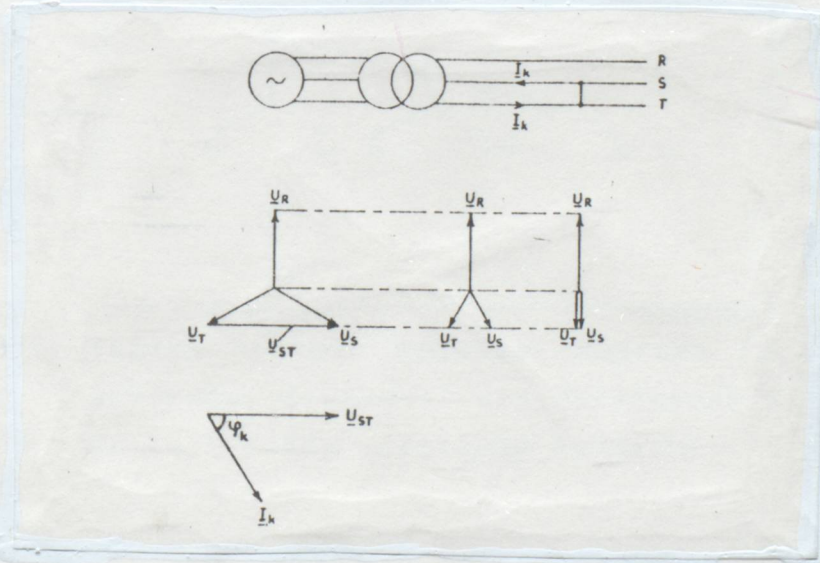
### 3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE TOPRAKLA TEMAS ARIZALARI

#### 3.1. İKİ FAZLI KISA DEVRE VE ÇİFT TOPRAK DEĞMESİ

Kısa devre akımı faz arası gerilimi tarafından geçirilir. Kısa devre olan iki fazdan aynı değerde fakat zıt yönde akımlar geçer. Faz arası gerilimin beslediği devreden geçen  $\underline{I}_k$  kısa devre akımı, faz arası gerilimine nazaran  $Q_k$  kısa devre faz açısı kadar geri fazdadır.

Kısa devre, geçiş dirençsiz, metalik bir kısa devre ise, kısa devre noktasında, kısa devre olan fazlar arasındaki gerilim sıfır olur.

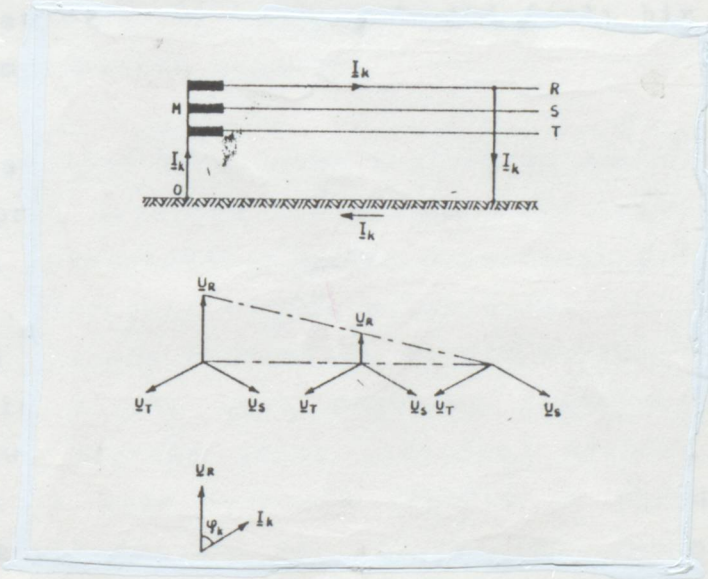
Bu kısa devrede, şebekenin yıldız noktasının toprağa bağlı olup olmaması veya bir direnç veya reaktans üzerinden bağlı olması bir rol oynamaz.



ŞEKİL: 3.1. İki fazlı devrede gerilimlerin değişimi

Yıldız noktası toprağa bağlanmamış şebekelerde iki ayrı fazda iki ayrı yerde meydana gelen çift toprak değmesi arızası da toprak üzerinden devresini tamamlayan iki fazlı bir kısa devredir ve benzer bir durum söz konusudur.

S ve T fazları arasındaki geçiş dirençsiz bir kısa devrede, gerilimlerin değişimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, arıza noktasında, arızalı S ve T fazlarının  $\underline{U}_S$  ve  $\underline{U}_T$  gerilimleri aynı fazda ve büyüklük itibarıyla sağlam bir faz geriliminin yarısı kadardır.  $\underline{U}_{RS}$  ve  $\underline{U}_{TR}$  gerilimleri ise büyüklük itibarıyla sağlam bir faz geriliminin 1,5 katı kadar olup, normal değerlerinin  $1,5/\sqrt{3}=0,866$ 'sı kadardır.



Şekil 3.2. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış bir şebekede, dirençsiz bir faz-toprak kısa devresinde arızalı fazda gerilimin değişimi.

### 3.2. BİR FAZLI KISA DEVRE

Şekil 3.2, yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış bir şebekede R fazında geçiş dirençsiz bir toprak kısa devresi meydana gelmesi halinde besleme noktasından kısa devre noktasına doğru, gerilimin değişimini göstermektedir. Arıza noktasında R fazı toprakla tam temas halinde olduğundan,

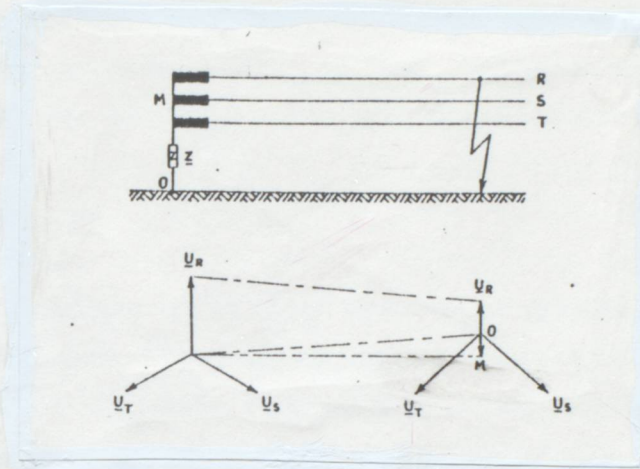
toprak potansiyelindedir, yani toprağa nazaran gerilimi sıfırdır. Bu fazda gerilim besleme noktasından arıza noktasına doğru lineer olarak azalır. Sistemin yıldız noktası da doğrudan doğruya toprağa bağlı olduğundan, toprak potansiyelinde kalır. Sağlam S ve T fazlarının toprağa nazaran gerilimleri de değişmeksizin aynen kalır.

Burada kısa devre akımını geçiren  $\underline{U}_R$  gerilimidir. Bu gerilim tarafından beslenen ve devresini toprak üzerinden tamamlayan  $\underline{I}_k$  akımı, bu gerilime nazaran geri fazdadır.

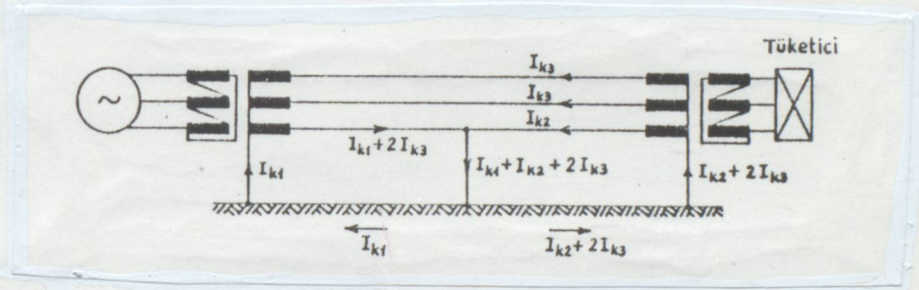
Bir faz iletkeni ve toprağın oluşturduğu devrenin empedansı pratik olarak aynı yerde iki fazlı bir kısa devredeki devrenin empedansına eşittir.

Yukarıdaki incelemede besleme sisteminin yıldız noktası ile toprak arasında bir direnç veya reaktans olmadığı ve keza arıza noktasında da geçiş direncinin sıfır olduğu kabul edilmiştir. Gerçekte bu dirençlerin her ikisi de sıfır olmaz. Çünkü besleme sisteminin yıldız noktası ile toprak arasına hiçbir direnç veya reaktans bağlanmasa dahi, toprak elektrodunun toprağa geçiş (yayıma) direnci vardır. Arıza noktasında da kısa devrenin cinsine ve toprağın özelliğine göre bir geçiş direnci söz konusu olur. Hatta bu önemli değerler alabilir. Bu durumda arıza noktasında R fazının toprağa nazaran gerilimi  $\underline{U}_R$  küçülmekle beraber, sıfır olmayıp, geçiş direncinin değerine göre belirli bir değer alır.

Şekil 3.3.'de yıldız noktası bir  $\underline{Z}$  empedansı üzerinden topraklanmış bir şebekede, geçiş dirençli bir toprak kısa devresi meydana gelmesi halinde gerilimlerin değişimi gösterilmiştir. Burada yıldız noktası ile toprak arasındaki empedansta kısa devre akımının meydana getirdiği gerilim düşümü dolayısıyla yıldız noktasının toprağa nazaran gerilimi bir  $\underline{U}_M$  değerine yükselmiş ve arıza noktasında R fazının toprağa nazaran gerilimi de küçülmekle beraber tam sıfıra düşmemiştir.



Şekil 3.3. Yıldız noktası bir  $Z$  empedansı üzerinden topraklanmış bir şebekede, dirençli bir toprak kısa devresinde gerilimlerin değişimi.



Şekil 3.4. Alıcı tarafında da yıldız noktası etkili olarak topraklanmış bir şebekede, bir faz-toprak kısa devresinde kısa devre akımları.

Şekil 3.4'e besleme tarafından başka, alıcı tarafında da yıldız noktası doğrudan doğruya veya etkili olarak topraklanmış bir hat gösterilmiştir. Burada, tüketicinin bulunduğu uçtan da kısa devre akımları geçer. Bu akımlar arzu edilmeyen açmalara neden olabilirler. Bundan dolayı yıldız noktası etkili olarak topraklı şebekelerde, bu topraklama yalnız besleyici tarafta yapılır. Alıcı veya tüketicinin bulunduğu tarafta yapılmaz. Tüketicinin bulunduğu tarafta transformatörün yıldız noktası izole yani toprağa bağlanmamış olarak bırakılır. Ancak alıcı taraftaki transformatörün başka bir şebekeyi besleyen sekonder tarafının yıldız noktası gene topraklanabilir.

Yıldız noktası izole şebekelerde, bir fazlı kısa devre ancak, bir faz iletkenindeki toprak değmesi esnasında yıldız noktası ile toprak arasında bir atlama olursa meydana gelir.

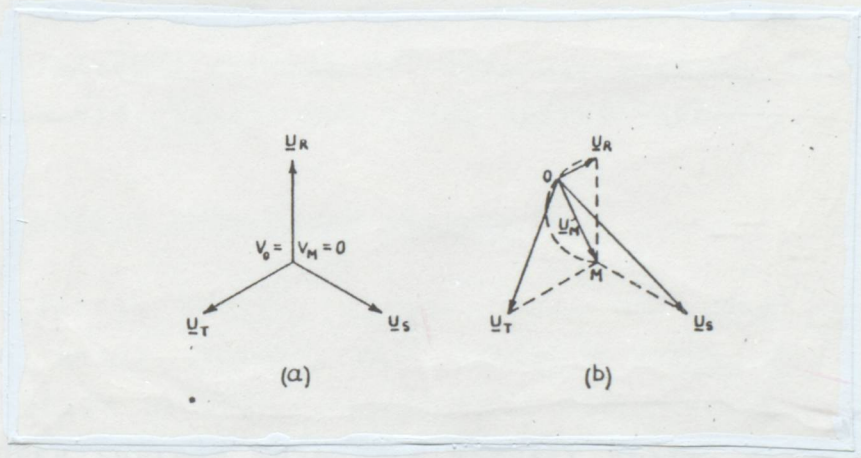
### 3.3. TOPRAK DEĞMESİ

Yıldız noktası etkili olarak topraklanmamış şebekelerde bir faz iletkeni ile toprak arasındaki bir değmeye toprak değmesi denir. Bu durumda sağlam fazların toprağa nazaran gerilimleri yükselir. Bunun etkisiyle şebekede başka arızalar oluşabilir. Toprak değmesi arkının ısısı, arıza noktasında arızalı iletkenin erimesine ve kopmasına neden olabilir. Birçok hallerde arklı toprak değmesi izolatörlerde meydana gelir. Eğer izolatörler özel olarak korunmamışlarsa parçalanabilirler veya yükselen veya yana doğru sürüklenen ark sağlam fazlara ulaşarak kısa devrelere neden olabilir. Aralıklı olarak meydana gelen toprak değmesi dik alınlı gezici dalgalar meydana getirir. Bunlar da yansıma noktalarında (makine ve cihazlarda) atlama veya delinmelere neden olabilirler. Bu zararlı etkiler pratikte başlıca toprak değmesi akımını söndürme düzenleri ve gereğinde hızlı açma ile önlenir.

#### 3.3.1. TOPRAK DEĞMESİNDE GERİLİMLER

Arızasız işlemede sistemin yıldız noktası toprak potansiyelindedir. Bir fazda toprak değmesi olduğunda, sistemin yıldız noktası ile toprak arasında bir potansiyel farkı veya gerilim meydana gelir ve sağlam fazların toprağa nazaran gerilimleri yükselir. Tam toprak değmesinde, yani iletken ve toprak arasındaki geçiş derincinin sıfır olması halinde, diğer iki sağlam fazın toprağa nazaran gerilimleri tam faz arası gerilimi değerine yükselir. Buna mukabil sistemin faz arası gerilimleri değişmeksizin aynen kalır.

Toprak değmesi uzun bir ark üzerinden olursa veya toprağa geçiş direnci (yayıma direnci) çok büyükse, bu taktirde toprak potansiyelindeki 0 noktası, arıza yerindeki gerilimler düşümüne, yani  $U_R = U_g = I_M \cdot R_g$ 'ye bağlı olarak M-R çaplı yarım daire üzerinde dolaşır (Şekil 3.5) burada  $R_g$  arıza yerindeki geçiş direnci,  $I_M$ 'de toprak değmesi akımıdır. Sonsuz büyük geçiş direnci halinde  $U_M$  sifıra eşittir, yani sistemin yıldız noktası M gene toprak potansiyelindedir. Arıza yerinde geçiş direnci büyüdükçe  $U_R$  büyür,  $U_M$  küçülür ve sağlam fazların toprağa nazaran gerilimleri de küçülür.



Şekil 3.5. Geçiş dirençli toprak değmesinde gerilimlerin değişimi

Generatör veya transformatör sargılarındaki toprak değmelerinde de arıza noktası sistemin yıldız noktasına ne kadar yakın olursa, yıldız noktasının toprağa nazaran kazandığı gerilim ve bunun sonucu olarak sağlam fazların toprağa nazaran gerilimleri o kadar az olur. Toprak değmesi geçiş dirençsiz olarak doğrudan doğruya yıldız noktasında meydana gelirse, gayet tabii yıldız noktası gene toprak potansiyelinde kalır ve toprağa nazaran bir gerilim kazanmaz.

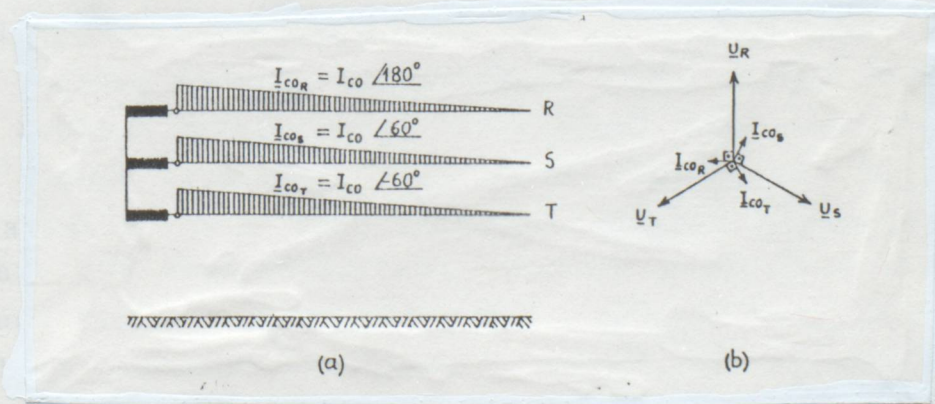
Arklı veya arksız olsun uzun zaman değişmeksizin kalan toprak değmelerine devamlı toprak değmeleri denir. Kendileri

tarafından meydana getirilen salınım olayları sonucunda tekrarlamalı olarak meydana gelen toprak değmelerine ise kesintili toprak değmeleri adı verilir. Bunlar şebekelerde tehlikeli aşırı gerilimler meydana getirirler. Buna doğru akım yüklerinin hatlar üzerinde kısa süre ile kalmaları ve bunu izleyen atlama dalgaları şeklindeki boşalmaları neden olur.

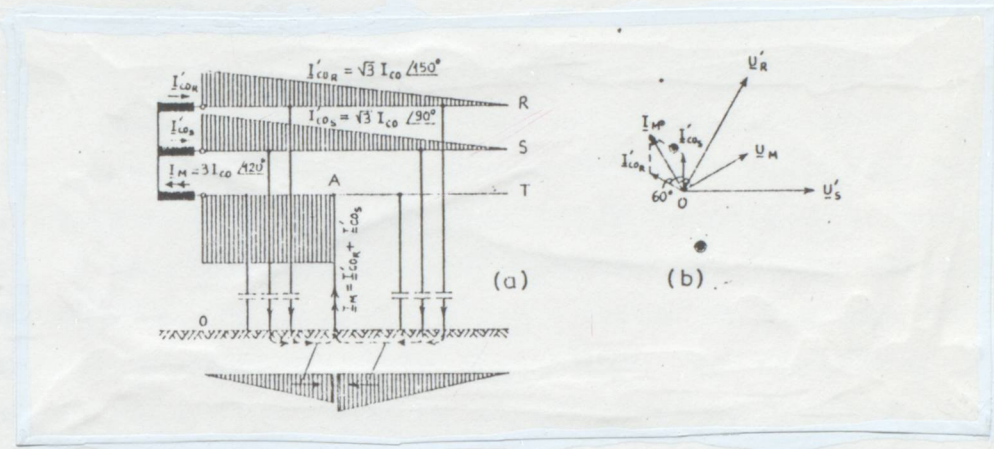
Burada söz konusu olan gerilim değişimleri söndürme düzeni olan ve olmayan şebekelerin her ikisi için de geçerlidir. Söndürme düzeni olan şebekelerde kesintili toprak değmelerinde zararlı etkiler artık meydana gelemez. Çünkü bu durumda hatlar üzerinde doğru akım yükleri kalmayacağı gibi, arıza yerindeki gerilim de, sıfırdan geçişde, akımın kesilmesinden sonra, tekrar çok yavaş olarak yükselir.

### 3.3.2. TOPRAK DEĞMESİNDE AKIMLAR

Toprak değmesi sonucu hatda bir akım simetrisizliği meydana gelir. Normal, yani arızasız halde, faz iletkenlerinin toprağa nazaran kapasiteleri dolayısıyla bu kapasiteler üzerinden toprağa kapasitif akımlar geçer. Her faz iletkeninin toprağa nazaran kapasitesi, o faz iletkeninin uzunluğu boyunca üniform olarak dağılmış olduğundan, her fazdaki kapasitif akımlar da besleme noktasına doğru lineer olarak artar (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Yıldız noktası toprağa bağlanmamış, arızasız bir hatda fazlardan geçen kapasitif akımların değişimi



Şekil 3.7. Yıldız noktası toprağa bağlanmamış bir hatda, bir fazda toprak değmesinde gerilimler ve akımların değişimi

Şimdi, örneğin T fazında herhangi bir A noktasında dirençsiz, tam bir toprak değmesi meydana geldiğini varsayalım (Şekil 3.7). Bu durumda sağlam R ve S fazlarının toprağa nazaran gerilimleri  $\sqrt{3}$  misli artarak, faz arası gerilimi değerine yükselir. Bu gerilimlerin, R ve S fazlarının toprağa nazaran kapasitelerinden geçirecekleri ve kendilerine nazaran  $90^\circ$  ile fazdaki akımlar da  $\sqrt{3}$  misli artar. T fazının toprağa nazaran kapasitesi kısa devre edilmiş bulunduğu ve aynı zamanda bu fazın toprağa nazaran gerilimi de sıfır olduğundan bu faza ait kapasitelerden bir akım geçmez. Şekil 3.7'de sağlam fazların arıza noktasının sağında ve solunda kalan kısımlarının toprağa nazaran kapasiteleri toplu olarak gösterilmiştir. Şekilde hattın sağda kalan kısmı daha uzun olduğundan, bu kısmın kapasitesi daha büyük, dolayısıyla bu yönden gelen kapasitif akım daha büyüktür. Sonuçta sağlam R ve S fazlarının tüm kapasitelerinden toprağa geçen akımlar arıza noktasında fazörel olarak toplanarak, arızalı iletken üzerinden besleme noktasına ve oradan da tekrar aynı şekilde sağlam fazların kapasiteleri üzerinden toprağa geçer. Yani arıza noktasından geçen akım,  $I'_{CO_R}$  ve  $I'_{CO_S}$  in fazörel toplamından

ibarettir. Ancak bu toplam akımın her iki yönden gelen kısımları, hattın her iki tarafta kalan uzunlukları ile orantılıdır. Şekil 3.7'de de böyle bir arıza halinde sağlam ve arızalı fazlarda ve toprakta akım dağılımları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sağlam fazlardaki kapasitif akımlar büyüklük bakımından arızasız haldekine nazaran  $\sqrt{3}$ ' misli artmışlardır. Çünkü bu kapasitelere etkiyen gerilimler bu oranda artmışlardır. Ayrıca bu akımlar arasında  $60^\circ$ 'lik bir faz farkı vardır. Arıza noktasından ve arızalı fazın, arıza ve besleme noktaları arasındaki kısmından geçen  $I_M$  akımı, bu akımların fazörel toplamına eşit olup, değeri arızasız halde besleme noktasından çıkan bir fazdaki kapasitif akımın büyüklüğünün üç katına, yani  $3.I_{CO}$  eşit ve sabittir. Buna toprak değmesi akımı adı verilir. Sağlam fazlardan gelen kapasitif akımların toprak içerisindeki değerleri, hattın her iki ucundan arıza noktasına doğru lineer olarak artar ve arıza noktasında maksimum değerine erişir.

Belirli bir şebekede toprak değmesi akımının büyüklüğü, yıldız noktasının toprağa nazaran kazandığı  $U_M$  geriliminin büyüklüğüne bağlıdır. Dirençsiz toprak değmesinde, yani yıldız noktasının toprağa nazaran geriliminin tam faz arası gerilimine eşit olması halinde en büyük toprak değmesi akımı meydana gelir.

Toprak değmesi akımının büyüklüğü, galvanik olarak bağlı bütün hatların uzunlukları, yani toprağa nazaran kapasiteleri ile orantılıdır. Arıza noktasındaki toprağa geçiş direncinin toprak değmesi akımının büyüklüğü üzerine etkisi ekseriya önemsizdir. Çünkü birçok hallerde bu geçiş direnci, sağlam fazların toprağa nazaran olan kapasitif reaktanslarına göre önemsizdir. Toprak değmesi akımı, arızanın meydana gelmesiyle tam büyüklükte ortaya çıkar. Hatta kapasitelerde depolanan elektriksel yüklerin serbest kalması dolayısıyla ilk anda bir tepe değeri (doğru akım bileşeni) de gösterir.

Toprak değmesi arızasında, arıza yerinden geçen  $I_M$  akımının büyüklüğü, arızasız halde, besleme noktasında, bir fazdan geçen kapasitif akımın büyüklüğünün üç katına eşit ve değeri arıza yerinden bağımsız olarak sabit olduğundan, aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$I_M = 3I_{c_0} = 3 \cdot \frac{U/\sqrt{3}}{1/(\omega \cdot \ell \cdot c_0)} = \sqrt{3} \cdot U \cdot \omega \cdot \ell \cdot c_0 \quad (A) \quad (3.1)$$

Burada;

$U$  Şebekenin faz arası gerilimi (kV)

$\ell$  Hat uzunluğu (km)

$c_0$  Bir fazın km başına toprağa nazaran kapasitesi (F/Km.faz)

$C_0$  Bir fazın toprağa nazaran kapasitesi (F/faz) dır.

Bir şebekenin toprak değmesi akımı, en basit ve en güvenli olarak, bir fazda kısa bir zaman için bir toprak değmesi meydana getirmek ve bu esnada toprak değmesi akımını bir ampermetre ile ölçmek suretiyle bulunur. Böylece makineler, transformatörler, baralar v.s.den ileri gelen kapasitif akımlar da dahil edilmiş olur.

#### 4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE NÖTR NOKTASI TOPRAKLAMASI

##### 4.1. TOPRAKLAMANIN AMACI VE ÖNEMİ

Elektrik tesisleri, yüksek gerilim hatları, elektrik makinaları ve cihazlarında izolasyondan dolayı meydana gelen hatalardan korunma gerekliliği Topraklama tekniğinin başlama-  
sına ve gelişmesine neden olmuştur.

Topraklama, aslında alçak gerilim tesislerinde insan-  
ları tehlikeli temas ve adım gerilimlerine karşı korumak için  
kullanılan yöntemlerden biri olarak bilinir. Ancak bugün al-  
çak gerilim tesislerinde topraklama yönteminden daha emin ve  
etkili koruma yöntemleri vardır. Yüksek gerilim tesislerinde  
ise hata gerilimlerine karşı biricik korunma yöntemi Toprak-  
lama'dır.

İster A.G. tesislerinde, isterse Y.G. tesislerinde ol-  
sun, topraklamanın etkili ve yararlı olması bunun iyi yapıl-  
masına ve çalışmasına bağlıdır. Enerji üretimi, iletimi, da-  
ğıtımı ve tüketimi tesislerinin projelendirilmesinde toprak-  
lamaya gerekli önem mutlaka verilmelidir.

Bir enerji sistemine ait topraklama tesisleri belki  
yıllarca işe yaramadan kalabilir, ancak bir izolasyon hatası  
olduğunda bunun koruyucu etkisi bu tesisler için yapılan har-  
camaların ve yatırımların boşa gitmediğini gösterecektir. Bu-  
nun için enerji tesisinin projesini hazırlayan ve kuran tek-  
nik elemanların projeleri dikkatle hazırlayıp bunları kuruluş  
esnasında yönetmelik esaslarına uygun olarak uygulaması ve  
zamanında bu tesislerin kontrolünü ve bakımını yapması zorun-  
ludur.

#### 4.1.1. TOPRAKLAMANIN TANIMI VE AMAÇLARI

Topraklamayı en basit olarak, "Elektrik tesisleriyle toprak arasındaki bağlantıyı sağlamak" diye tanımlayabiliriz. Çeşitli ülkelerdeki, topraklamanın nasıl yapılacağı ve işletileceği konusundaki yönetmelikler içerik bakımından birbirine çok benzerler.

Yurdumuzda da:

- 1- Elektrik iç tesisat ve talimatnamesi ve fenni şartname ile
- 2- Elektrik tesislerinde topraklama yönetmeliği

uygulanmaktadır.

Topraklamanın amaçlarını da şu başlıklar altında toplayabiliriz:

- 1- Yaşam güvencesini arttırmak
- 2- Kuruluşlarda oluşabilecek zararları önlemek
- 3- İşletmeyi islah etmek
- 4- Kuruluşun aralıksız çalışmasını sağlamak.

#### 4.1.2. TOPRAKLAMA ÇEŞİTLERİ

##### KORUMA TOPRAKLAMASI

Bu topraklamanın amacı, normal olarak gerilim altında bulunmayan kısımlara geçmesi olası olan kaçakların doğurabileceği tehlikeleri önlemektir. Koruma topraklamasına şu kısımlar bağlanır:

- a) Makina, transformatör ve aletlerin gövdeleri
- b) Aletlerin şasileri

- c) Binaların ulaşılabilir ve nakil olan kısımları
- d) Normal olarak Y.G. altında olup yalnız, iş yapmak için devresi kesilmiş bulunan tesisat kısımları
- e) Y.G ve A.G kablolarının kurşun kılıf ve çelik zırhları
- f) Ölçü transformatörlerinin sekonder sargıları
- g) Kuvvetli akım tesisatına ait işletme ve koruma topraklama sistemlerinin etki sahasında bulunan zayıf akım ve A.G. tesisat devrelerinin birer noktası
- h) Y.G. hava hatlarının koruma telleri.

Koruma topraklamasının irtibat nakilleri çıplak tel olacak ve izolatörler üzerine tesbit edilmeyecektir.

#### İŞLETME TOPRAKLAMASI

İşletme akım devresinin bir noktasının, aygıtların ve tesislerin normal işletilmesi için topraklanmasıdır. Bu topraklama iki şekilde yapılabilir.

- a) Dirençsiz (doğrudan doğruya) işletme topraklaması
- b) Dirençli işletme topraklaması. Bu durumda ek olarak omik, endüktif ya da kapasitif dirençler bulunmaktadır.

İşletme topraklamasına aşağıdaki tesisat kısımları bağlanır.

- a) Aşırı gerilim giderici sistemin nötr noktası veya kutuplarından biri (Bu topraklama gerekliyse)
- b) Havai hatların toprak seksiyonerleri (dağıtıcıları).

İşletme topraklamaları topraklanan tesisat kısımlarının normal çalışmasını sağlayacak şekilde düzenlenmelidir.

## ÖZEL TOPRAKLAMALAR

Koruma topraklamasıyla, işletme topraklamalarında bir potansiyel farkı söz konusu ise bu potansiyel farkının adı geçen tesisatın dışındaki kısımlara geçmesini önlemek için özel topraklama gereklidir.

Özel topraklamalara ait bağlantı hatlarının diğer tüm toprak hatlarından tamamen ayrılmış olması şarttır. Yüksek gerilimli tesisatta bunların ve kendilerine bağlanmış bulunan tesisat kısımlarının (koruma ve işletme) topraklamalarına bağlanmış bulunan) tüm tesisat kısımlarına göre en az 4 KV. deneyim gerilimine göre yalıtılmaları gereklidir.

## 5. GÜÇ SİSTEMLERİNDE NÖTR NOKTASI TOPRAKLAMA PRENSİPLERİ

Toprakla irtibat suretiyle meydana gelen güç sistemi arızalarının genelinde etkisini göstermesi sebebiyle; güç sistemlerinin topraklanması çok önem arzeder. Ayrıca güç sistemlerinin bütün elemanlarının korunmasında da tesiri büyüktür. Topraklamanın ana amaçları arasında; geçici aşırı gerilimleri minimize etmek, personel güvenliğinin sağlanması, arıza ve bölgesinin hızlı bir şekilde bulunmasında yardımcı olmak, vs... sayılabilir.

Sistem topraklamasının bir temel incelemesinin yapılabilmesi için temel teknolojinin verilmesi ve metodların genel bir değerlendirilmesinin yapılması gereklidir. Sistem topraklaması genel olarak dört şekilde yapılır.

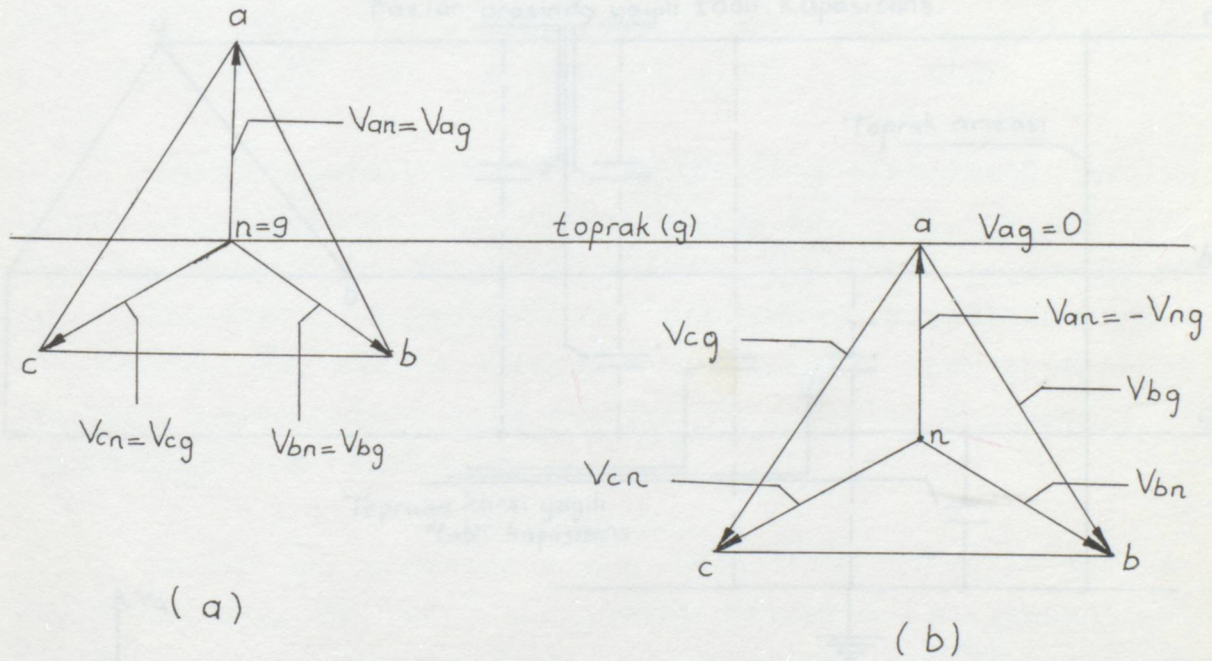
- 1- Topraklanmamış sistemler,
- 2- Büyük empedans üzerinden topraklanmış sistemler,
- 3- Küçük empedans üzerinden topraklanmış sistemler,
- 4- Etkin ya da doğrudan doğruya (direk) topraklanmış sistemler.

Bunların herbirinin tatbik edilmesi avantaj ve dezavantajlarının gözönüne alınmasıyla olur. Genel pratik tecrübe ve kişisel tercihlerden de faydalanılır. Değişik uygulamalar, ya da herbir özel sistemde pek çok etken faktör vardır, bunlar belirlenmiş olmalıdır ve seçim buna göre yapılmalıdır.

### 5.1. TOPRAKLANMAMIŞ SİSTEMLER

Uygulamada topraklanmamış güç sistemleri mevcut olmasına rağmen, bu sistemler tabii kapasitans üzerinden toprakla irtibatlıdırlar. Bu sistemlerde arıza akımı seviyesi çok düşük olduğundan, arıza bölgesinin çok hızlı bir şekilde yalıtılması muhakkak suretle gerekli değildir. Dolayısıyla teçhizat masrafları minimumdur. Bu avantajı sebebiyle, çoğu kez

servisin devamlı olması istenen endüstri sahalarında kullanılır. Bu sahalarda servisin devamlılığı, üretim metodunun kesintiye uğraması fiyatlarını minimize etmek açısından önemlidir. Bununla birlikte topraklanmamış sistemler zararlı geçici aşırı gerilimlere maruz kalabilirler. Bu yüzden tesisat, teçhizat ve personel daima muhtemel bir tehlike altındadır. Bu yüzden topraklanmamış sistemler her ne kadar kullanılıyorsa da pek tavsiye edilmezler.



Şekil 5.1.1. Topraklanmamış sistemde bir faz toprak arızası için gerilimlerin değişimi: a) Normal dengeli sistem, b) a fazının direkt toprağa değmesi durumunda

Topraklanmamış bir sistemde bir faz toprak arızası meydana geldiğinde; arıza öncesi gerilimlerin durumu, Şekil 5.1.1.a'daki gibi iken, arıza sonrası Şekil 5.1.1.b'ye dönüşür. Şekil 5.1.2'de arıza durumunda sistemin genel bir eşdeğeri Şekil 5.1.3'de ise sequence devrelerin bağlantısı verilmiştir. Hattın kapasitans değerleri  $X_{1C}$ ,  $X_{2C}$  ve  $X_{0C}$  çok büyük değerlere sahiptir. Bu değerlerle seri reaktanslar olan  $X_{1S}$



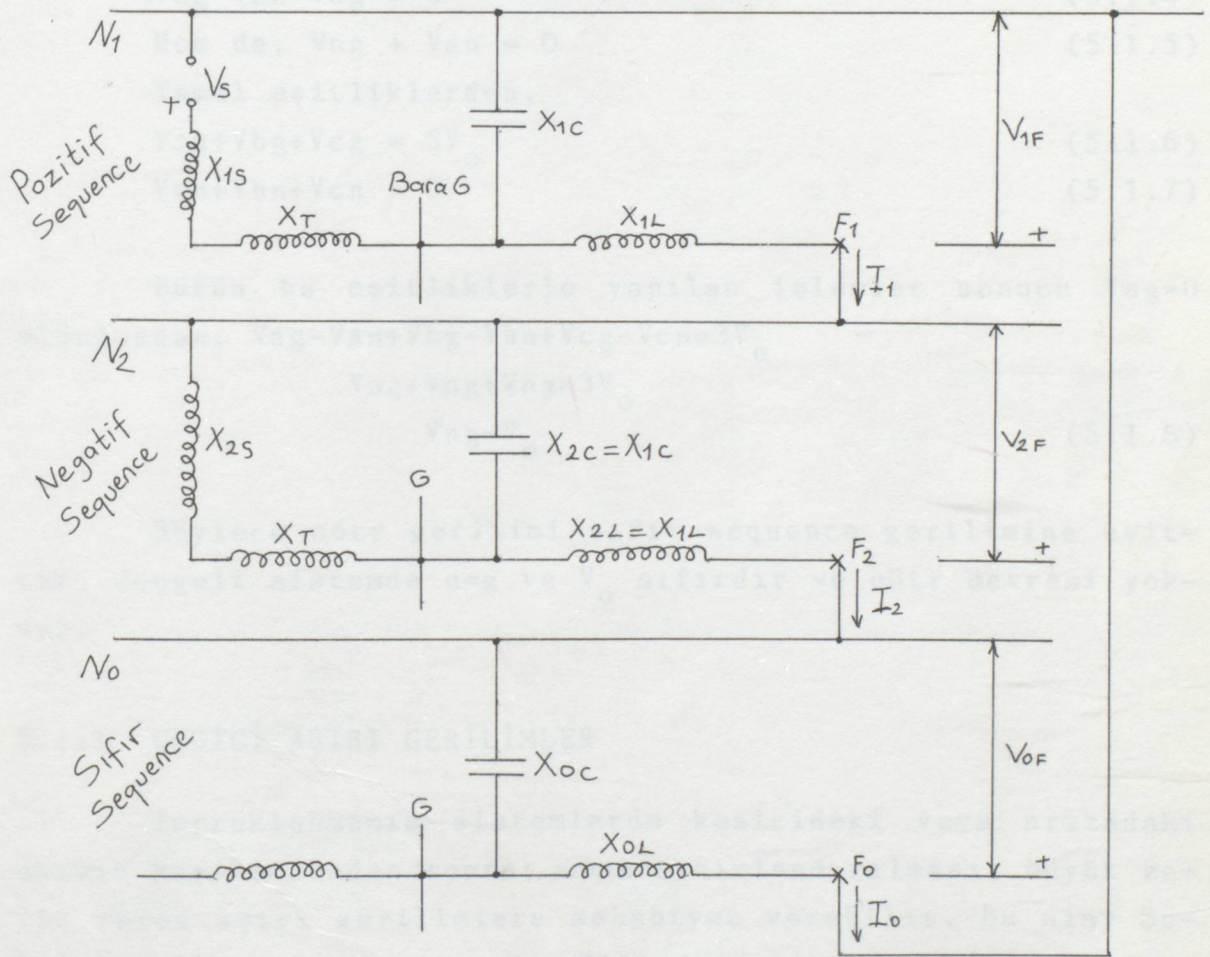
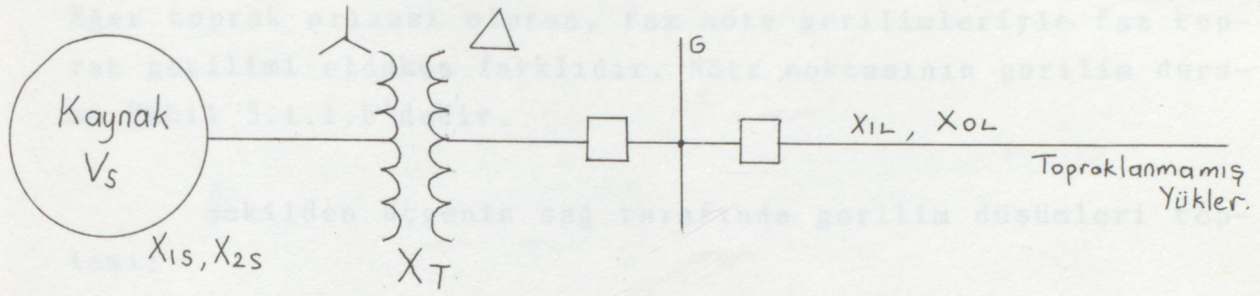
Hesaplamalar per unit veya hakiki değerlerle yapılabilir. Bilindiği gibi  $V_s$  faz nötr gerilimi değerindedir.

5.1.1. eşitliğinin sequence akımlarından bilindiği gibi arızasız fazlar b ve c nin akımları sıfır olacaktır. Bu arızanın kendisi için doğrudur. Buna rağmen yayılı kapasiteler  $X_{1C}$  ve  $X_{2C}$ , sistem aracılığıyla aslında seri reaktanslar  $X_{1S}$ ,  $X_T$  ile paralel bağlıdır. Devreden görüldüğü gibi  $I_1$  ve  $I_2$  tamamen  $I_o$ 'a eşit değildir. Böylece  $I_b$  ve  $I_c$  akımı vardır ve değeri küçüktür. Bu  $I_a$  arıza akımına dönüş yolu olması için gereklidir. Şekil 5.1.2'de görüldüğü gibi eğer  $I_a = -1$  pu ise  $I_b = 0,577 \angle +30^\circ$  ve  $I_c = 0,577 \angle -30^\circ$  p.u olur.

Topraklanmamış sistemin kullanılmış olabileceği endüstriyel uygulamalarda,  $X_{OC}$  pratik olarak  $X_{1C} = X_{2C}$ 'ye eşittir. Yine topraklanmamış devre bölgesinde,  $X_{OC}$  lokal generatörlerin, motorların, kabloların ve trafoların kapasitelerinden vs. oluşur. Güç sistem elemanlarının her bir fazı için tipik charging kapasiteleri için eğriler ve tablolar değişik referans kaynaklarda mevcuttur.

Mevcut bir sistemde toplam kapasitans, ölçülen faz değişken akımını faz nötr gerilimine bölmekle hesaplanabilir. Topraklanmamış sistemin farklı bölgelerinde arızanın meydana gelmesi  $X_{OC}$  üzerinde önemli bir değişiklik yapmaz.  $X_{OC}$  ile karşılaştırıldığında seri empedans oldukça küçüktür. Arıza akımı pratik olarak aynıdır ve arıza yerinden bağımsızdır. Bu sebeple bu tür sistemlerde arıza bölgesinin selektivitesinin koruma röleleriyle yapılması elverişsizdir.

A fazında bir faz-toprak arızası meydana geldiğinde Şekil 5.1.1.b de görüldüğü gibi arızasız fazların nötre karşı gerilimleri  $\sqrt{3}$  kat artar. Bu sebeple bu tür sistemlerin fazlar arası gerilime göre yalıtılması gerekir. Normal dengeli sistemde (Şekil 5.1.1.a)  $V_{an}=V_{ag}$ ,  $V_{bn}=V_{bg}$  ve  $V_{cn}=V_{cg}$  dir.



Şekil 5.1.3. Topraklanmamış bir sistemde bir faz-toprak arızası için sequence devreleri ve bağlantıları

Eğer toprak arızası olursa, faz nötr gerilimleriyle faz toprak gerilimi oldukça farklıdır. Nötr noktasının gerilim durumu Şekil 5.1.1.b'dedir.

Şekilden üçgenin sağ tarafında gerilim düşümleri toplamı;

$$V_{bg}-V_{bn}-V_{ng} = 0 \quad (5.1.3)$$

ve sol tarafında,

$$V_{cg}-V_{cn}-V_{ng} = 0 \quad (5.1.4)$$

$$\text{Hem de, } V_{ng} + V_{an} = 0 \quad (5.1.5)$$

Temel eşitliklerden,

$$V_{ag}+V_{bg}+V_{cg} = 3V_0 \quad (5.1.6)$$

$$V_{an}+V_{bn}+V_{cn} = 0 \quad (5.1.7)$$

Bütün bu eşitliklerle yapılan işlemler sonucu  $V_{ag}=0$  olduğundan,  $V_{ag}-V_{an}+V_{bg}-V_{bn}+V_{cg}-V_{cn}=3V_0$

$$V_{ng}+V_{ng}+V_{ng}=3V_0$$

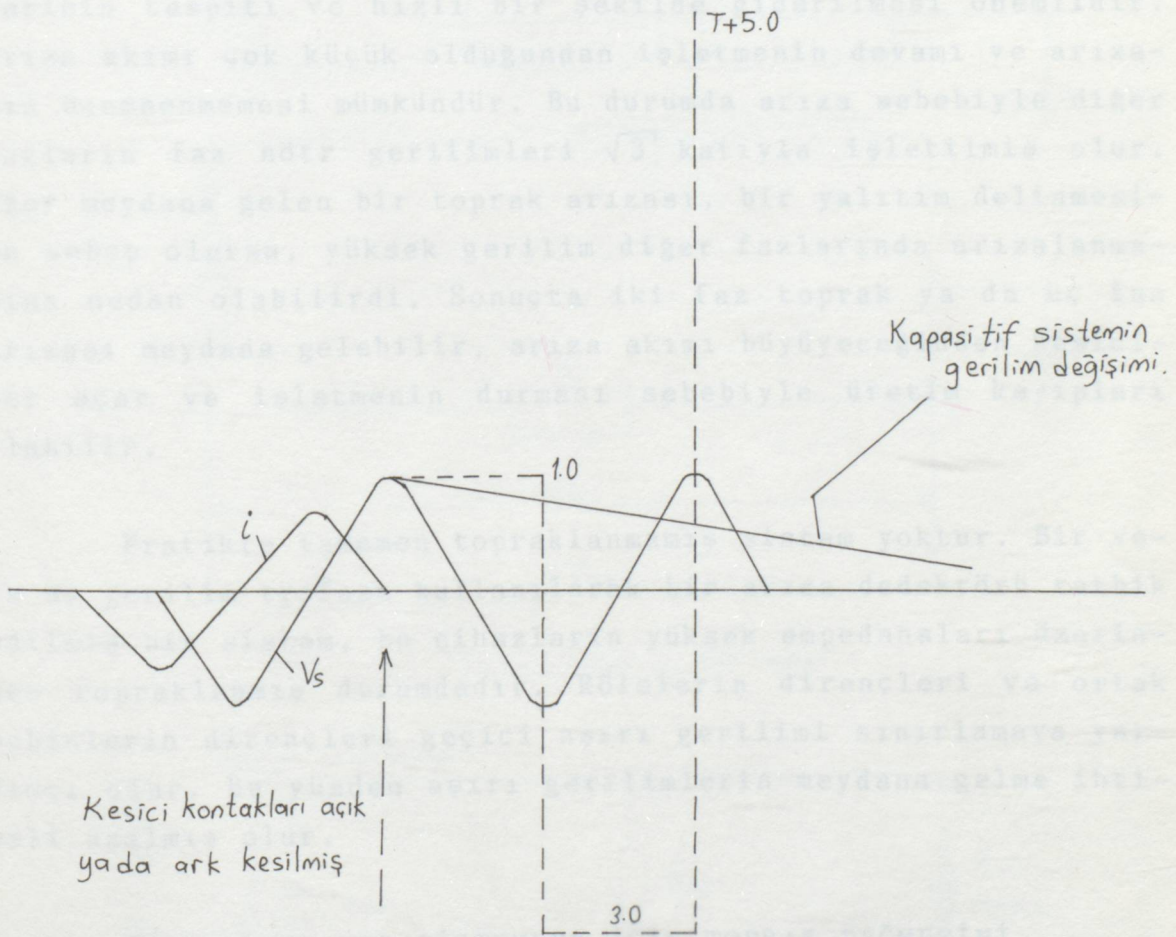
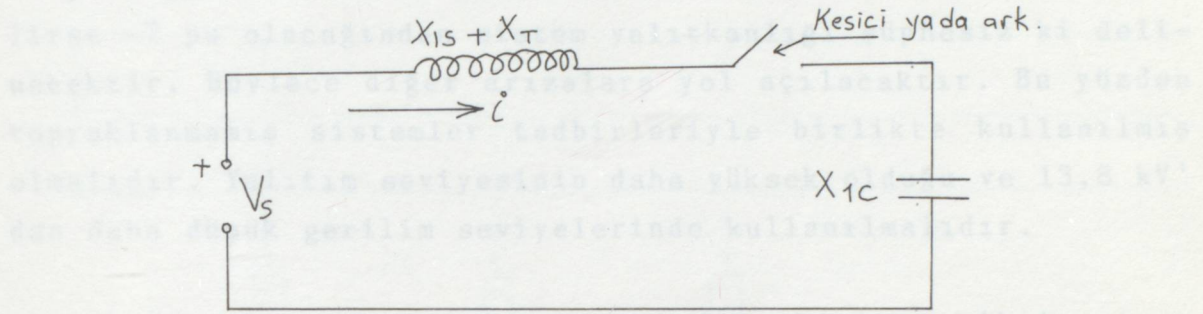
$$V_{ng}=V_0 \quad (5.1.8)$$

Böylece nötr gerilimi sıfır sequence gerilimine eşittir, dengeli sistemde  $n=g$  ve  $V_0$  sıfırdır ve nötr devresi yoktur.

### 5.1.1. GEÇİCİ AŞIRI GERİLİMLER

Topraklanmamış sistemlerde kesicideki veya arızadaki akımın kesilmesinden sonra; arkın sınırlandırılması, büyük zarar veren aşırı gerilimlere sebebiyet verebilir. Bu olay Şekil 5.1.4'de gösterilmiştir. Bilindiği gibi kapasitif sistemde akım gerilimden  $90^\circ$  ileridedir. Eğer akım sıfır değerini alacak kadar azalmış ya da ark söndürülmüşse, gerilim yaklaşık olarak maksimum değerine ulaşacaktır. Bu gerilim kapasitörlerin üzerinde zaman sabiti süresince kalır ve azalmaya devam eder. Kapasitelerin üzerindeki gerilim  $V_s$  den itibaren şekilde görüldüğü gibi değişir. Böylece bir yarı periyotta

açık uçlar arasındaki gerilim hemen hemen normal maksimum gerilimin iki katına çıkar.



Şekil 5.1.4. Topraklanmamış sistemde geçici aşırı gerilimler

Şekil 5.1.4'deki anahtar kapatılırsa özellikle +1 pu olan kapasitif sistemin gerilimi, -1 pu'lık sistem gerilimine eşit olması gerekirken sistemin endüktansı ve ataleti sebebiyle -3 pu'e kadar varabilen bir maksimum değere yükselecek-

tir. Anahtar açıldıktan ve arızın sönmesinden sonra tekrar anahtar kapatılırsa, sistem gerilimi +1 pu olması beklenirken +5 pu değerine yükselme ihtimali mevcuttur. İşleme devam edilirse -7 pu olacağından sistem yalıtkanlığı şüphesiz ki delinecektir. Böylece diğer arızalara yol açılacaktır. Bu yüzden topraklanmamış sistemler tedbirleriyle birlikte kullanılmış olmalıdır. Yalıtım seviyesinin daha yüksek olduğu ve 13,8 kV'dan daha düşük gerilim seviyelerinde kullanılmalıdır.

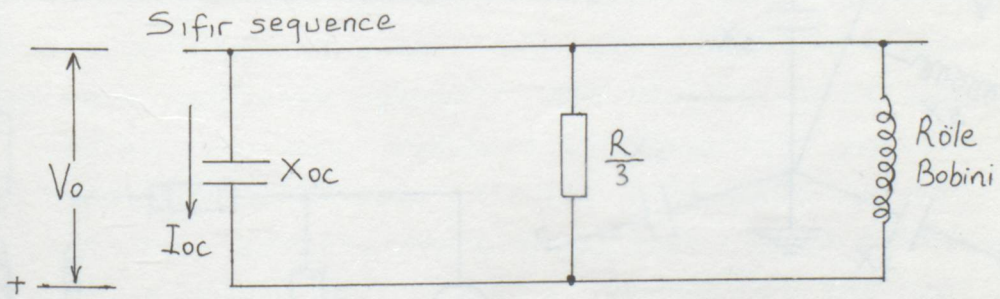
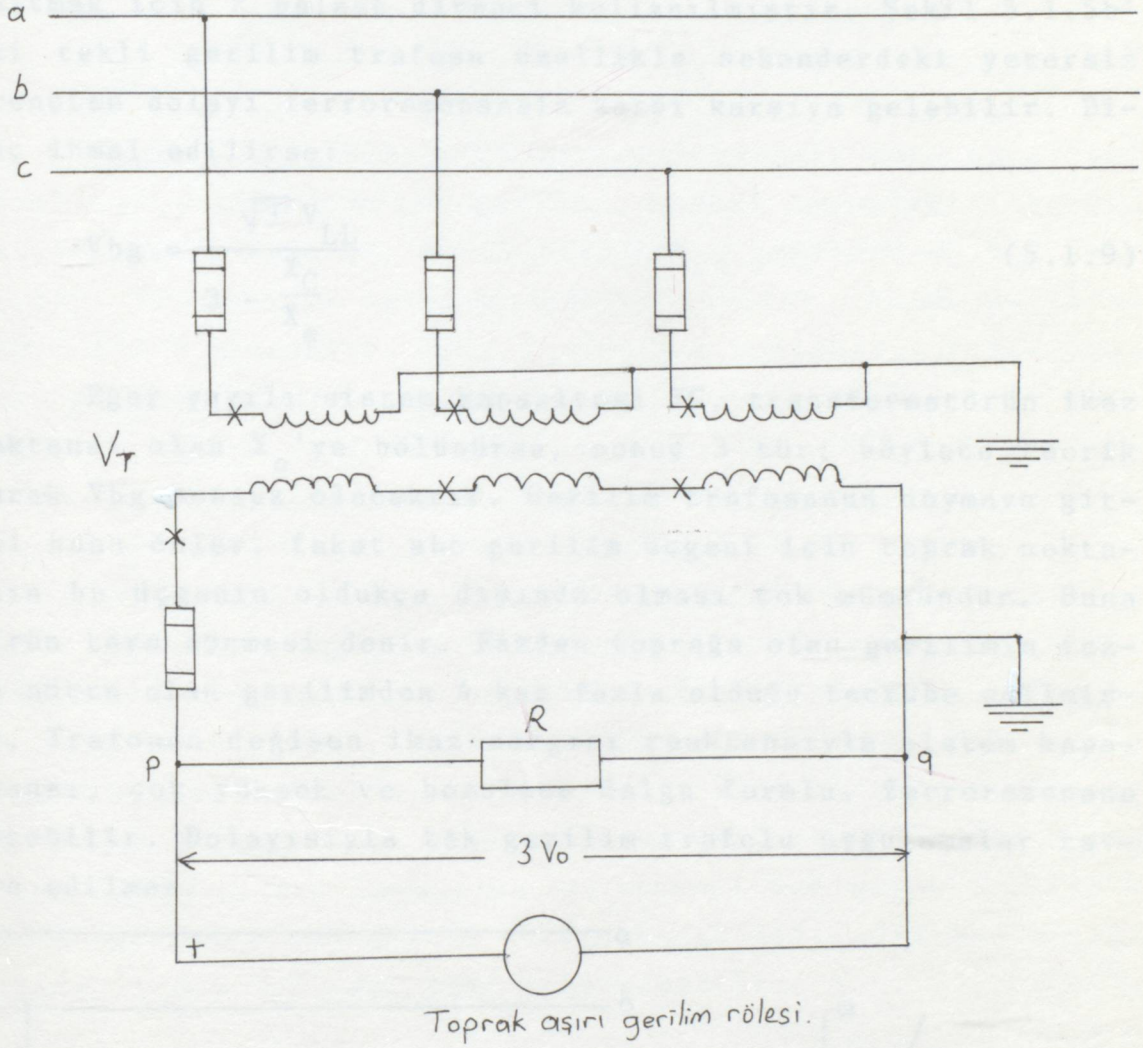
Topraklanmamış sistemler, kullanıldığı takdirde arıza yerinin tespiti ve hızlı bir şekilde giderilmesi önemlidir. Arıza akımı çok küçük olduğundan işletmenin devamı ve arızanın önemsenmemesi mümkündür. Bu durumda arıza sebebiyle diğer fazların faz nötr gerilimleri  $\sqrt{3}$  katıyla işletilmiş olur. Eğer meydana gelen bir toprak arızası, bir yalıtım delinmesine sebep olursa, yüksek gerilim diğer fazlarında arızalanmasına neden olabilirdi. Sonuçta iki faz toprak ya da üç faz arızası meydana gelebilir, arıza akımı büyüyeceğinden kesiciler açar ve işletmenin durması sebebiyle üretim kayıpları olabilir.

Pratikte tamamen topraklanmamış sistem yoktur. Bir veya üç gerilim trafosu kullanılarak bir arıza dedektörü tatbik edilmiş bir sistem, bu cihazların yüksek empedansları üzerinden topraklanmış durumdadır. Rölelerin dirençleri ve ortak bobinlerin dirençleri geçici aşırı gerilimi sınırlamaya yardımcı olur. Bu yüzden aşırı gerilimlerin meydana gelme ihtimali azalmış olur.

#### 5.1.2. TOPRAKLANMAMIŞ SİSTEMLER İÇİN TOPRAK DEĞMESİNİ TESPİT ETME METODLARI

Bir toprak arızası; arıza akımının çok küçük olması ve arıza bölgesiyle değişmemesi nedeniyle, en iyi şekilde gerilimle tespit edilebilir. Şekil 5.1.5'de görüldüğü gibi iki metod kullanılır. Bu metodlar bir toprak arızası olduğunu

gösterir, ama sistemin neresinde olduğu hakkında bilgi vermezler. Şekil 5.1.5a'daki yıldız tarafı topraklı, sekonderi kesik üçgen bağlı gerilim trafosu bağlantısı tercih edilir.

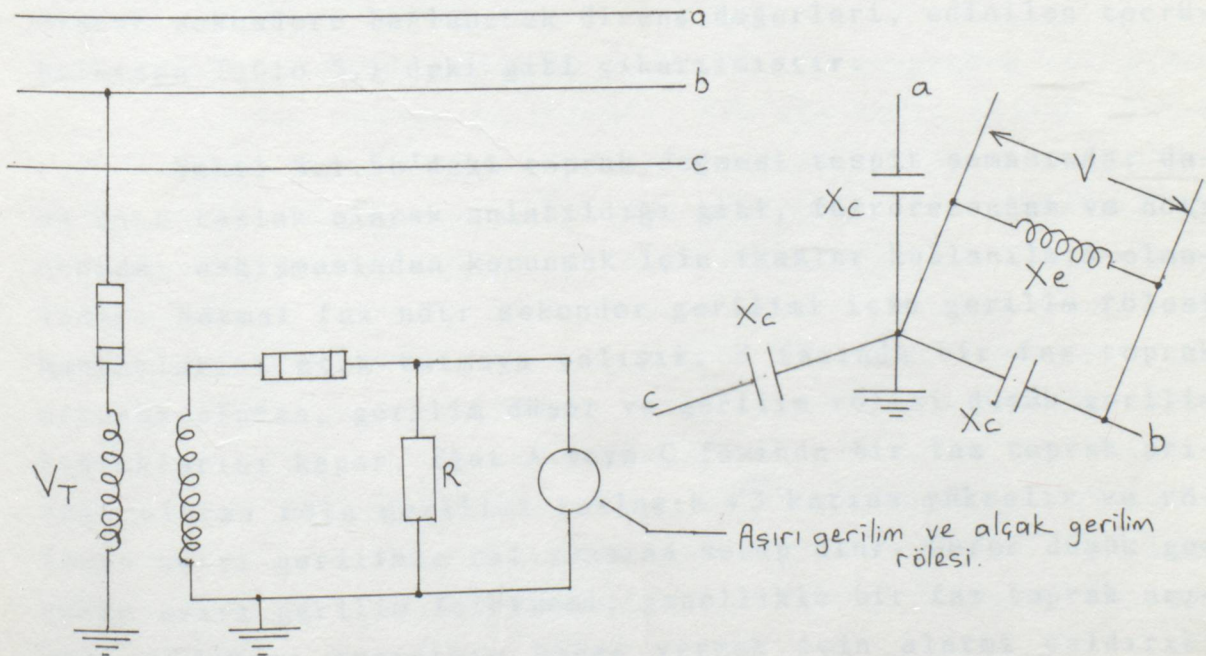


Şekil 5.1.5.a) Üç gerilim trafosu metodu ile toprak arızasının tespiti

Gerilim trafoları, röleler ve kapasitif sistemin reaktansları arasındaki ferrerezonansı önlemek ya da gerilim trafolarınının diğer dengesiz tahrik sebebiyle nötrün değişmesini azaltmak için R balast direnci kullanılmıştır. Şekil 5.1.5b' deki tekli gerilim trafosu özellikle sekonderdeki yetersiz dirençten dolayı ferrerezonansla karşı karşıya gelebilir. Direnç ihmal edilirse:

$$V_{bg} = \frac{\sqrt{3} V_{LL}}{3 - \frac{X_C}{X_e}} \quad (5.1.9)$$

Eğer yayılı sistem kapasitesi  $X_C$ , transformatörün ikaz reaktansı olan  $X_e$ 'ye bölünürse, sonuç 3 tür; böylece teorik olarak  $V_{bg}$  sonsuz olacaktır. Gerilim trafosunun doymaya gitmesi bunu önler, fakat abc gerilim üçgeni için toprak noktasının bu üçgenin oldukça dışında olması çok mümkündür. Buna nötrün ters dönmesi denir. Fazdan toprağa olan gerilimin fazdan nötre olan gerilimden 4 kat fazla olduğu tecrübe edilmiştir. Trafonun değişen ikaz sargısı reaktansı ile sistem kapasitansı, çok yüksek ve bozulmuş dalga formu, ferrerezonans üretebilir. Dolayısıyla tek gerilim trafolu uygulamalar tavsiye edilmez.



Şekil 5.1.5b. Tek gerilim trafosu metodu ile toprak arızasının tespiti

Şekil 5.1.5a da röle gerilimi; Şekil 5.1.5b den,

$$\begin{aligned} V_{pq} &= 3V_0 = V_{ag} + V_{bg} + V_{cg} \\ &= (\sqrt{3} V_{LN} \cos 30^\circ) \times 2 = 3 V_{LN} \end{aligned} \quad (5.1.10)$$

Böylece topraklanmamış sistemde arızalı faz toprak gerilimi için, röleye uygun gerilim, normal durumdaki faz-nötr geriliminin üç katıdır. Genel olarak  $V_{LN}$  gerilimi 69.3 V kullanılır. Bu sebeple maksimum efektif toprak rölesi gerilimi  $3 \times 69,3 = 208$  V olacaktır. Röle alarm için kullanılıyor ise, rölenin devamlı gerilim sınırı 208 V dan daha büyük ya da eşit olmalıdır. Aksi takdirde bir yedek kademe düşürücü gerilim trafosu kullanılması zorunludur.

Şekil 5.1.5a daki devre basitleştirilmiştir. Aslında yıldız noktaları topraklı bir trafonun sekonderine yedek bir trafo bağlantısı yapılmış olmalıdır. İkinci trafonun primerinin yıldızı topraklı, sekonderi ise kesik üçgen bağlantılı olmalıdır. Esas gerilim trafosunun bir çift sekonderi olmalıdır. Arıza sinyali için lambalar sekonderlerdeki herbir kesik üçgen bağlantısının karşısına (uçlarına) bağlanabilir. Tipik olarak sekondere bağlanacak direnç değerleri, edinilen tecrübelerden Tablo 5.1'deki gibi çıkarılmıştır.

Şekil 5.1.5b'deki toprak değmesi tespit şemasında; daha önce taslak olarak anlatıldığı gibi, ferrerezonans ve nötr noktası değişmesinden korunmak için ikazlar kullanılmış olmalıdır. Normal faz nötr sekonder gerilimi için gerilim rölesi kontaklarını açık tutmaya çalışır. B fazında bir faz toprak arızası olursa, gerilim düşer ve gerilim rölesi düşük gerilim kontaklarını kapar. Eğer A veya C fazında bir faz toprak arızası olursa röle gerilimi yaklaşık  $\sqrt{3}$  katına yükselir ve rölenin aşırı gerilimle çalışmasına sebep olur. Gerek düşük gerekse aşırı gerilim işletmesi, genellikle bir faz toprak arızası olduğunu operatöre haber vermek için alarmı çaldırır.

Böylece operatörler uygun bir şekilde arızayı giderir veya işletmeye son verirler.

Tablo 5.1

Nominal Sistem Gerilimi(kV)	VT Oranı	Direnç R	
		$\Omega$	280 V da gücü
2.4	2400:120	250	175
4.16	4200:120	125	350
7.2	7200:120	85	510
13.8	14400:120	85	510

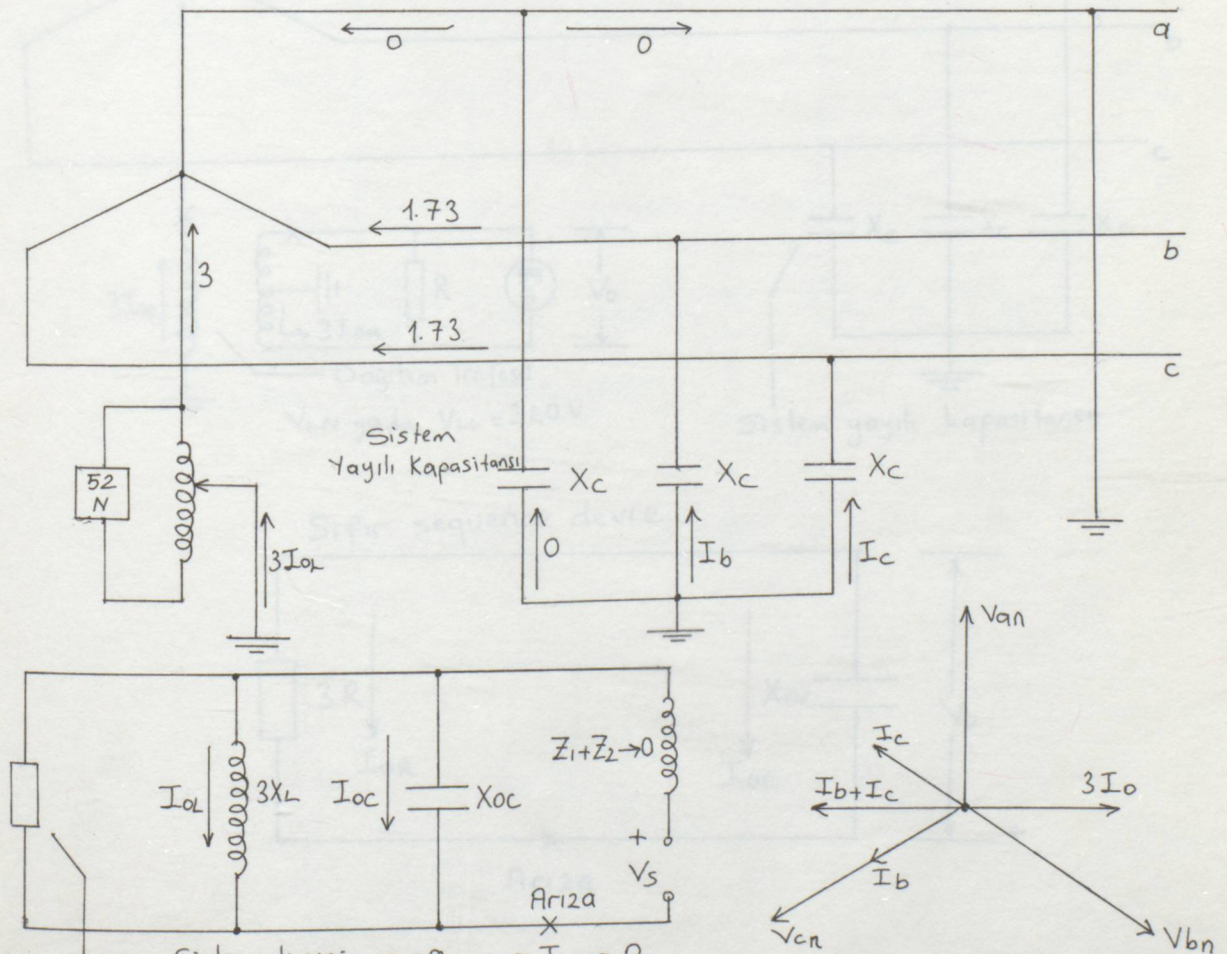
## 5.2. BÜYÜK EMPEDANS ÜZERİNDEN TOPRAKLI SİSTEMLER

İki tip büyük empedans üzerinden topraklı sistem vardır. Bunlar, yansıtmalı (Petersen bobini) ve büyük dirençli topraklama sistemleridir. Petersen bobini ile topraklı sistemler Amerika'da çok sınırlı kullanılmasına rağmen, diğer batı ülkelerinde yaygınca kullanılmaktadır. Büyük dirençle topraklanmış sistemler ise çoğunlukla generatörler ve endüstri tesisleri için kullanılır.

### 5.2.1. YANSITMALI TOPRAKLAMA SİSTEMİ

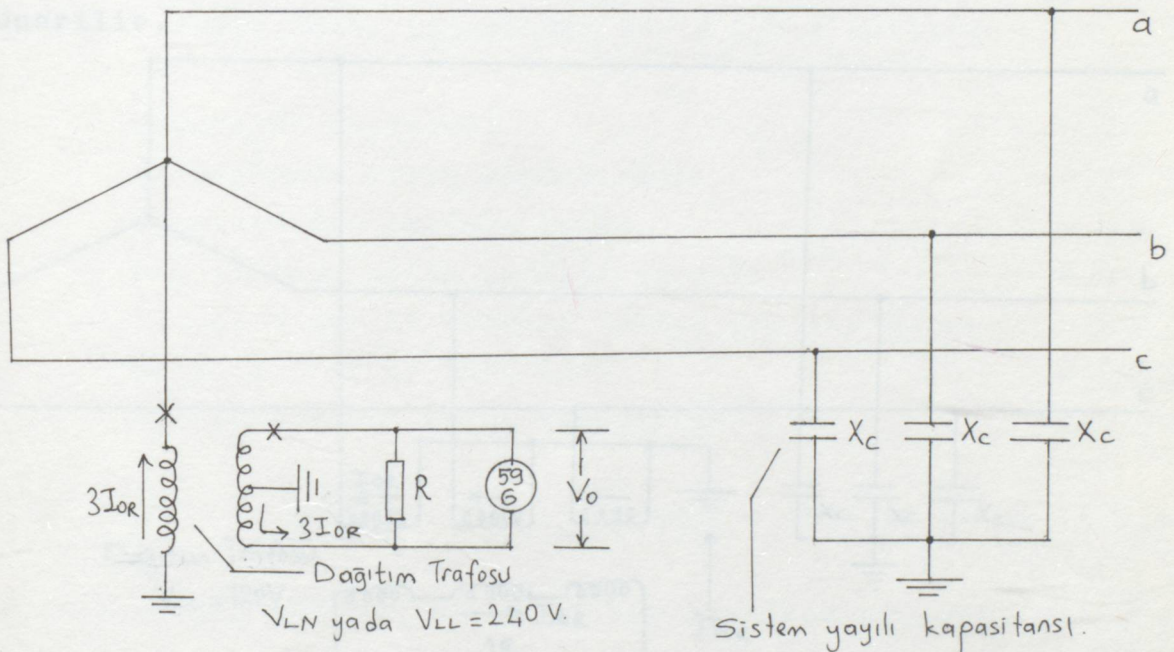
Bu sistemler Petersen bobinli veya toprak-arıza giderici sistemler olarak da bilinir. Toprağa karşı toplam sistem kapasitansı; bir eşdeğer endüktansa sahip bir bobin bağlantısının nötre yapılmasıyla, etkisiz hale getirilir (Şekil 5.2.1). Toplam sistem kapasitansı nötrdeki reaktör tarafından tamamen karşılanmışsa arızada akım akmayacaktır. Aslında reaktörün kademeli olması sebebiyle çok küçük bir akım akar ve arıza arki kendini devam ettiremez. Devre paralel rezonans devresidir ve arıza akımı çok az zarara sebebiyet verir. Ark söndükten sonra; reaktör kapasitansı, özellikle gerilim sistemin faz nötr gerilimine eşit oluncaya kadar devam eder. Böylece ark uçlarındaki gerilim küçük olur ve tekrar tutuşma ihtimali çok azdır.

5.2.2. Bu sistem dağıtım sistemlerinde kullanıldığında, sistem değişkenleriyle şalterlerin iyi uyum sağlamaları daima güçtür. Ek olarak, bu sistemler nadiren transpoze edilirler. Bütün bu sonuçlar küçük sıfır sequence gerilimlerinde, normal yük akımları tarafından meydana getirilmiştir. Bu gerilimler topraklama reaktörü ve şönt kapasitanslı seri rezonans devresinde olur. Reaktör ve kapasitans uçlarında yüksek gerilim meydana gelebilir. Sistem tamamıyla fazlar arası gerilime göre izole edilmelidir. Edinilen tecrübelerle göre çok sayıda fazlar arası arıza olabilir ve aynı anda birkaç arıza olma ihtimali de vardır. Bu sistem kullanıldığında, arıza tespiti çok hassas aşırı akım röleleri tarafından yapılmalı ve 10 ila 20 sn. arasında arıza giderilmelidir. Aksi takdirde arıza devam ederse reaktör kısa devre olabilir. Arızanın izolesi için, geçen yüksek toprak arıza akımı diğer rölelerin çalışmasını sağlar.

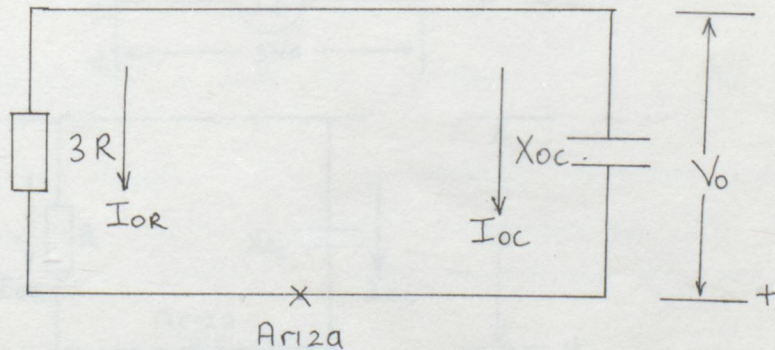


### 5.2.2. BÜYÜK DİRENÇLİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ

Bu sistemde, güç sistemi bir direnç üzerinden topraklıdır ve pratik uygulamalara göre kullanılacak direncin değeri, toprağa karşı toplam sistem kapasitansının değerinden daha az veya ona eşittir. Bu uygulama arızanın meydana getireceği zararı minimum yapmak için küçük bir arıza akımı sağlar ve mümkün olabilecek aşırı gerilim sınırı, toprağa karşı normal tepe değerinin 2.5 katından daha az olur. Bu metodla arıza akımı 1 ila 25 Amper arasında olmakla beraber genelde 1 ila 10 A. arasında kalır.

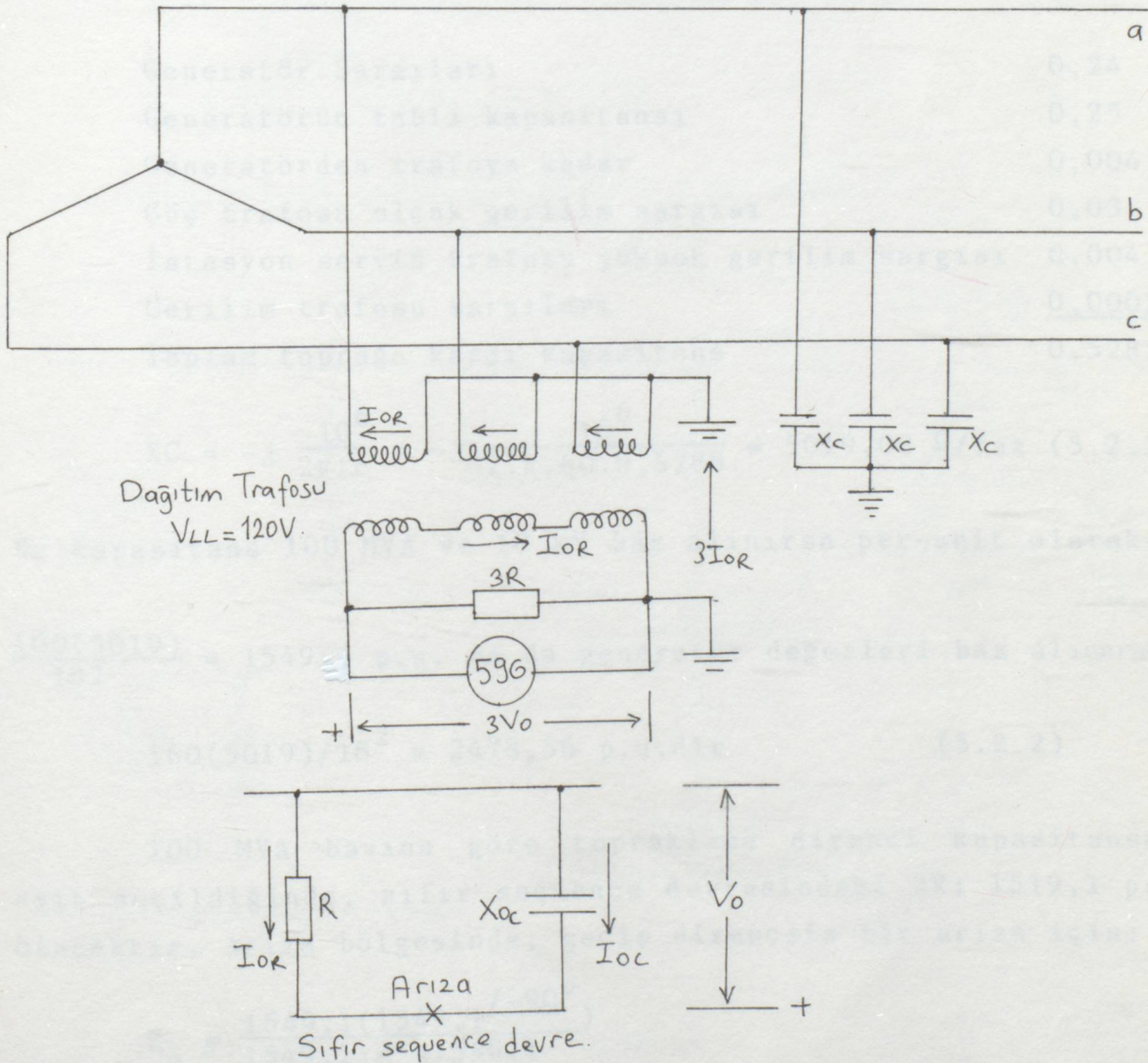


Sıfır sequence devre.



Şekil 5.2.2. Nötrde dirençle topraklama metodu

Topraklama direnci Şekil 5.2.2 de olduğu gibi generatörün nötrüne ya da güç trafosunun nötrüne bağlanabilir. İkinci bir uygulama ise Şekil 5.2.3'deki primeri yıldız, sekonderi kesik üçgen bağlantılı trafonun sekonderine direnci bağlamaktır. Şekil 5.2.2 uygulamasında bir toprak arızası olursa direnç uçlarında Şekil 5.1.1'de olduğu gibi, faz nötr gerilimine eşit bir maksimum  $V_0$  gerilimi bulunur. Bu yüzden normal faz-nötr değerli dağıtım trafosu kullanılır. Şekil 5.2.3'deki metotta ise, toprak arızası durumunda gerilim iki dağıtım trafosunda faz-faz değerine ulaşılacaktır. Eğer koruma sistemi özellikle direk hatayı bertaraf etmekten ziyade alarm için kullanılmışsa, bu uygulama için faz-faz değerleri önerilir.



Şekil 5.2.3. Dağıtım trafosunun sekonderinde dirençle topraklama metodu

Şekil 5.2.2'deki nötr bağlantısı, tek bir güç trafosuyla beslenen endüstriyel sistemlerde ve ünite generatörü uygulamalarında kullanılmıştır. Şekil 5.2.3'deki uygulama ise, birkaç güç kaynağı içeren sistemler için veya bir baraya bağlanmış çok amaçlı generatörler için yapılabilir.

### 5.2.3. TİPİK BİR BÜYÜK DİRENÇLİ NÖTR TOPRAKLAMASI

Bu tip bir topraklama 160 MVA, 18 kV'luk ünite trafosunda kullanılmıştır (Şekil 5.2.4). Toprak koruma bölgesi generatörden güç trafosuna, alçak gerilim sargısına ve yüksek gerilim sargısına kadardır. Bu bölgede faz başına mikrofara olarak toprağa karşı kapasitans şöyle kabul ediliyor:

Generatör Sargıları	0,24
Generatörün tabii kapasitansı	0,25
Generatörden trafoya kadar	0,004
Güç trafosu alçak gerilim sargısı	0,03
İstasyon servis trafosu yüksek gerilim sargısı	0,004
Gerilim trafosu sargıları	<u>0,0005</u>
Toplam toprağa karşı kapasitans	0,5285

$$X_C = -j \frac{10^6}{2\pi f c} = -j \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 0,5285} = 5019,08 \Omega/\text{faz} \quad (5.2.1)$$

Bu kapasitans 100 MVA ve 18 kV baz alınırsa per-unit olarak;

$$\frac{100(5019)}{182} = 1549,1 \text{ p.u. ya da generatör değerleri baz alınarak}$$

$$160(5019)/18^2 = 2478,56 \text{ p.u.dir} \quad (5.2.2)$$

100 MVA bazına göre topraklama direnci kapasitansa eşit seçildiğinde, sıfır sequence devresindeki  $3R$ ; 1519,1 pu olacaktır. Arıza bölgesinde, geçiş dirençsiz bir arıza için:

$$Z_o = \frac{1549,1(1549,1 \angle -90^\circ)}{1549,1 - j1549,1}$$

$Z_0 = 1095,38 \angle -45^\circ$  p.u. Buna karşılık bu sistem için pozitif ve negatif sequeunce reaktansı  $j0,066$  ise, bu ihmal edilebileceğinden 5.1.1 ve 5.1.2 eşitliklerinden;  $I_1 = I_2 = I_0$  ve,

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1.0}{1095,38 \angle -45^\circ} = 0,00091 \angle 45^\circ \text{ p.u.} \quad (5.2.3)$$

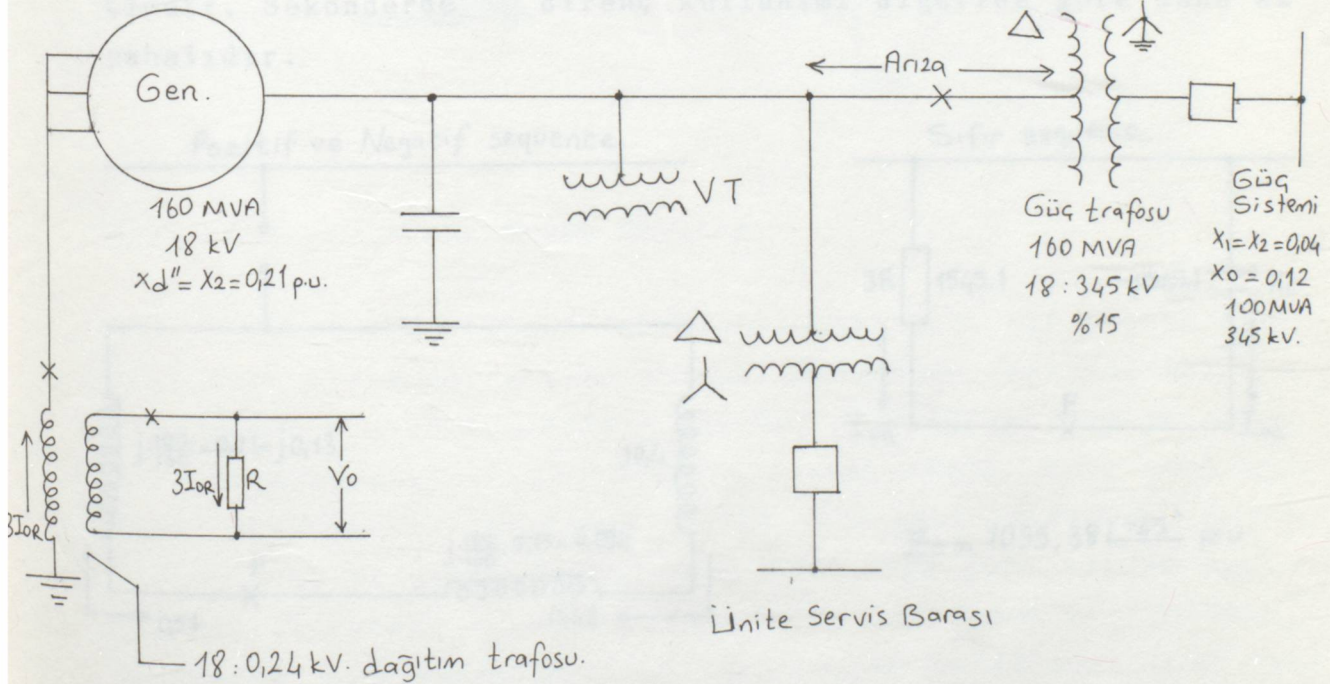
$$18 \text{ kV da Baz akım: } I_B = \frac{100000}{3.18} = 3207,5 \text{ A ise,} \quad (5.2.4)$$

arıza akımı;

$$I_1 = I_2 = I_0 = 0,00091 (3207,5) = 2,92 \text{ A} \quad (5.2.5)$$

$$I_a = 3I_0 = 3(2,92) = 8,76 \text{ A} \quad (5.2.6)$$

Arıza akımlarının dağılımı Şekil 5.2.4c dedir.



Şekil 5.2.4a. Generatör ünite sistemi

Direnç; primer direnci  $3R$  olarak  $X_C$ 'ye eşit seçildiğinden sekonderdeki değeri,  $5019,08/3=1673,03 \Omega$  dan (18 kV da) hesaplandığında,  $R=1673,03 \left(\frac{240}{18000}\right)^2 = 0,2974$  (5.2.7)

Sekonder akımı  $6,19(18000/240) = 464,38$  A olduğundan direnç uçlarındaki gerilim,  $V_o = (464,38)(0,2974)=138,12$  V (5.2.8)

Arıza esnasında direncin gücü;

$$(464,38)^2(0,2974)/1000 = 64,14 \text{ kW} \quad (5.2.9)$$

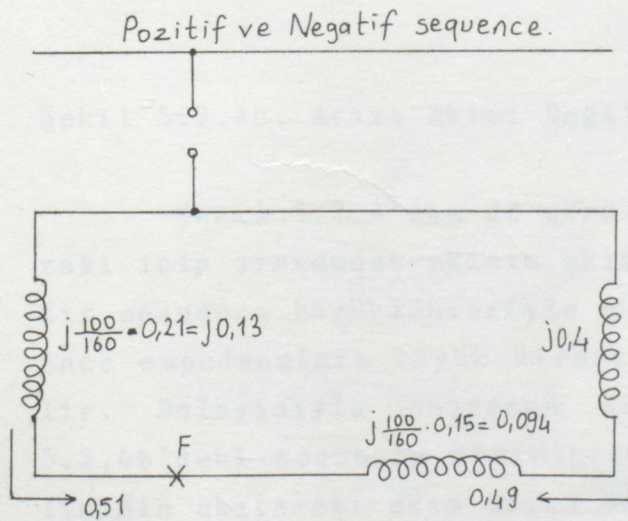
Benzer şekilde, dağıtım trafosu gücü;

$$6,19 (18/\sqrt{3}) = 64,33 \text{ kVA dır.}$$

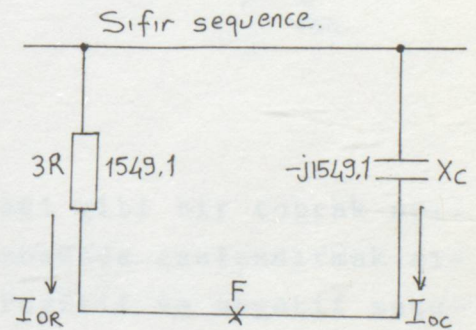
Arızasız durumda ise kapasite akımı bu sistem için;

$$I_c = \frac{18000}{3.5019} = 2,07 \text{ A/faz} \quad (18 \text{ kV da}) \quad (5.2.10)$$

Dağıtım trafosu kullanılması ve nötrde direk bağlı bir direnç yerine, sekonderdeki direnç oldukça ekonomik bir seçimdir. Sekonderde direnç kullanımı diğerine göre daha az pahalıdır.

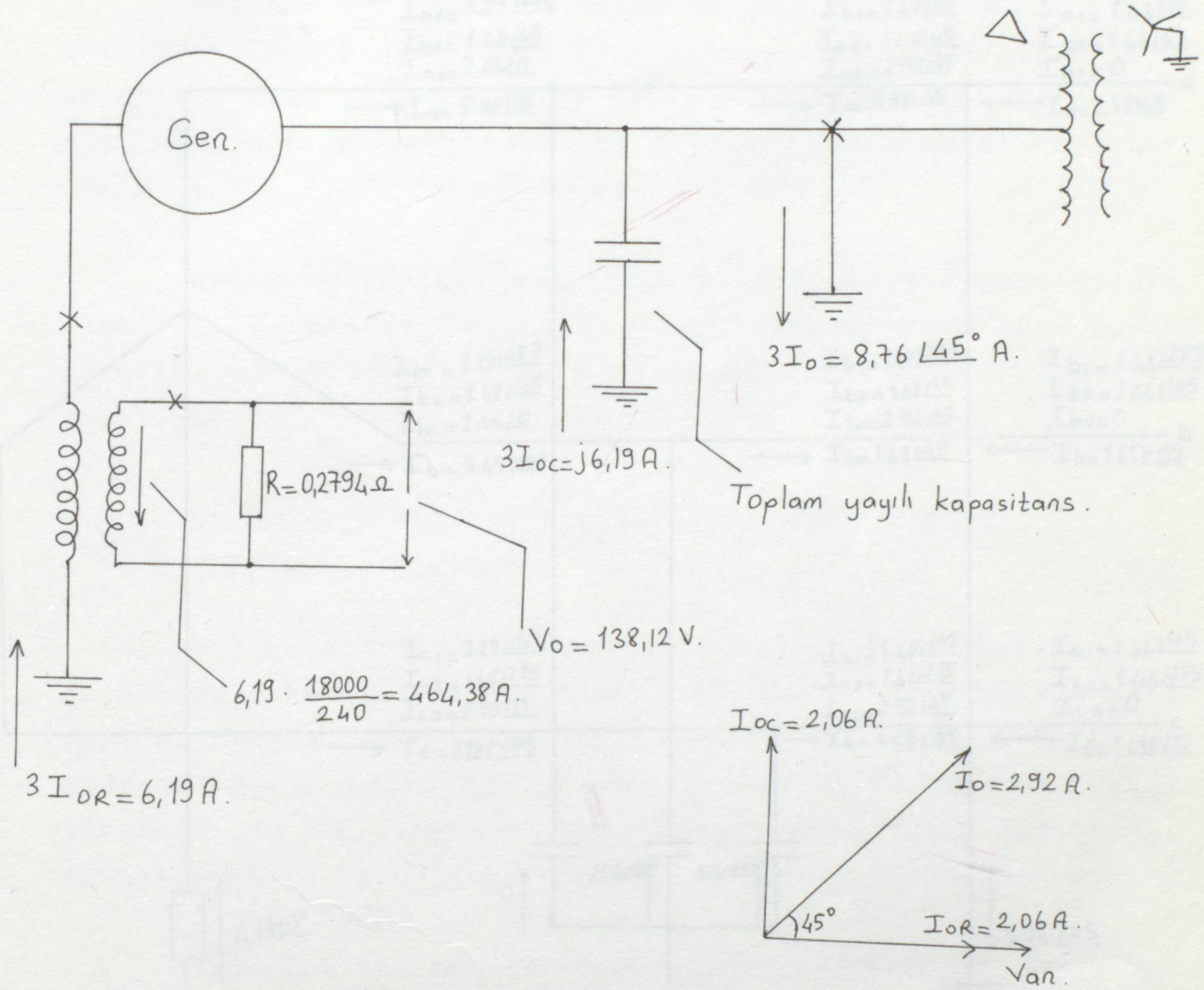


$$X_1 = X_2 = j \frac{0,13 \cdot 0,134}{0,264} = j0,066 \text{ p.u.}$$



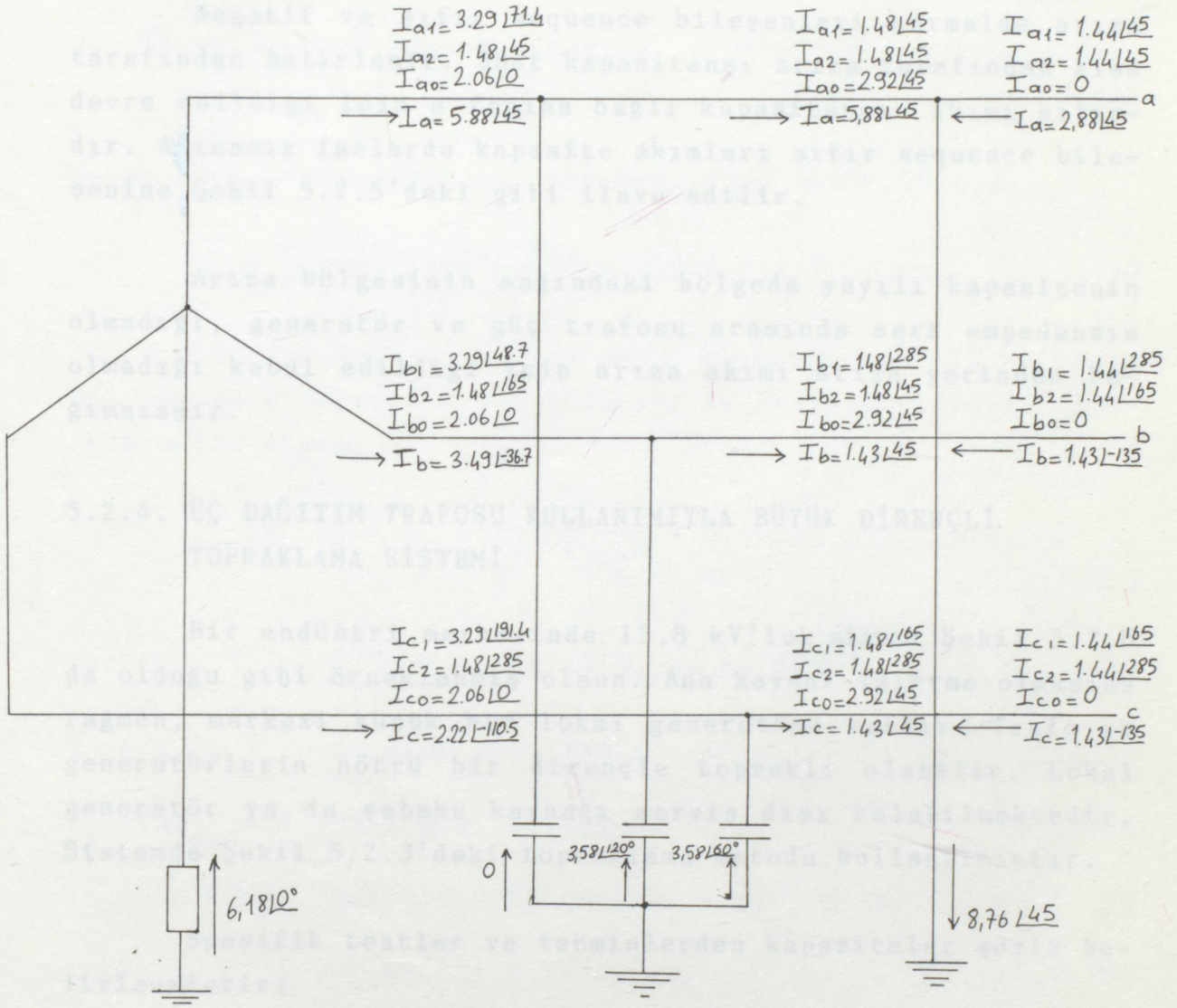
$$Z_0 = 1095,38 \angle -45^\circ \text{ p.u.}$$

Şekil 5.2.4b. Sequence devreler (100 MVA, 18 kV bazına göre)



Şekil 5.2.4c. Arıza Akımı Dağılımı

Şekil 5.2.4'den de görülebileceği gibi bir toprak arızası için sistemden akımın akışını gözönünde canlandırmak sıfır sequence büyüklükleriyle güçtür. Pozitif ve negatif sequence empedansları büyük dirençle topraklamada ihmal edilebilir. Dolayısıyla sequence devre akımları aynıdır. Şekil 5.2.4b'deki sequence devrelerden görüldüğü gibi kaynak geriliminin akıtacağı akım arıza öncesinde iki kısma ayrılmıştır. Generatör tarafından 0,51 pu ve sistem tarafından 0,49 pu akım geçmektedir. Şekil 5.2.5'de bu akımların dağılımı daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Arıza öncesi kapasite akımı bütün fazlarda simetriktir. Arıza esnasındaki akımların akışı ise süper pozisyon ve thevenin teoremleri ile bulunur.



Şekil 5.2.5. Şekil 5.2.4'deki sistemde bir faz toprak arızası için üç faz ve sequence akım dağılışı

Generatör tarafından, a fazından geçen akım;

$$I_{a1} = 2,07 \angle 90^\circ + 0,51 \cdot 2,92 \angle 45^\circ = 3,29 \angle 71,4 \text{ aynı şekilde,}$$

$$I_{b1} = 2,07 \angle -30^\circ + 0,51 \cdot 2,92 \angle -15^\circ = 3,29 \angle 48,7 \text{ ve,}$$

$$I_{c1} = 2,07 \angle 210^\circ + 0,51 \cdot 2,92 \angle 165^\circ = 3,29 \angle 191,41 \text{ dir.}$$

Negatif ve sıfır sequence bileşenleri normalde arıza tarafından belirlenir. Şönt kapasitansı arıza tarafından kısa devre edildiği için a fazına bağlı kapasitansın akımı sıfırdır. Arızasız fazlarda kapasite akımları sıfır sequence bileşenine Şekil 5.2.5'deki gibi ilave edilir.

Arıza bölgesinin sağındaki bölgede yayılı kapasitenin olmadığı, generatör ve güç trafosu arasında seri empedansın olmadığı kabul edildiği için arıza akımı arıza yerinden bağımsızdır.

#### 5.2.4. ÜÇ DAĞITIM TRAFOSU KULLANIMIYLA BÜYÜK DİRENÇLİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ

Bir endüstri merkezinde 13,8 kV'luk sistem Şekil 5.2.6 da olduğu gibi örneklenmiş olsun. Ana kaynak işletme olmasına rağmen, merkezi küçük bir lokal generatörü vardır. Trafo ve generatörlerin nötrü bir dirençle topraklı olabilir. Lokal generatör ya da şebeke kaynağı servis dışı kalabilmektedir. Sistemde Şekil 5.2.3'deki topraklama metodu kullanılmıştır.

Spesifik testler ve tahminlerden kapasiteler şöyle belirlenmiştir:

Kaynak trafosu	0,004
Lokal generatör	0,11
Motor	0,06
Güç Merkezi Trafosu	0,008
Toplam Kablolar	0,13
Karakteristik kapasite	<u>0,25</u>
Toplam Toprağa Karşı Kapasite	0,562 $\mu$ F/faz

$$X_C = -j \frac{10^6}{2\pi f C} = -j \frac{10^6}{2\pi \cdot 60 \cdot 0,562} = 4719,9 \quad \Omega/\text{faz} \quad (5.2.11)$$

$$13,8 \text{ kV da kapasite akımı } I_C = \frac{13800}{\sqrt{3} \cdot 4719,9} = 1,69 \text{ A/faz} \quad (5.2.12)$$

$$20 \text{ MVA ve } 13,8 \text{ kV baz alınır}; X_C = \frac{20(4719,9)}{13,8^2} = 495,68 \text{ p.u.} \quad (5.2.13)$$

Büyük dirençle topraklama için  $R=X_{OC}$  ise  $R=495,68 \text{ p.u.}$

$$Z_o = \frac{495,68 \cdot (-j495,68)}{495,68 - j465,68} = 350,5 \angle -45^\circ \text{ p.u.} \quad (5.2.14)$$

Bir faz-toprak arızası için sistemin pozitif ve negatif sequence değerleri çok küçüktür ve önemsenmeyebilir. Böylece arıza akımı,

$$I_1 = I_2 = I_o = \frac{1,0}{350,5 \angle 45^\circ} = 0,00285 \angle 45^\circ \text{ p.u.} \quad (5.2.15)$$

$$\text{Baz akım } I_B = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 836,74 \text{ A. Bu halde,} \quad (5.2.16)$$

$$I_1 = I_2 = I_o = 0,00285 (836,74) = 2,39 \text{ A. ve} \quad (5.2.17)$$

$$I_a = 3I_{ao} = 0,00856 \text{ p.u.} = 7,16 \text{ A.} \quad (5.2.18)$$

$$I_{OR} = 0,00285 \cdot \cos 45 = 0,00202 \text{ p.u.} = 1,69 \text{ A ise,} \quad (5.2.19)$$

$$I_{OR}(\text{sekonder}) = 1,69 \cdot 115 = 194,13 \text{ A.} \quad (5.2.20)$$

$$\text{Sekonderde direnç değeri } 3R = 3 \times \frac{4719,9}{115^2} = 1,071 \Omega \quad (5.2.21)$$

Tesisat için direnç değeri budur, aynı değer direkt yoldan,

$$3R = \frac{(\sqrt{3} V_{\text{sec}})^2}{2\pi f c (V_{\text{prim.LL}})^2} = \frac{(\sqrt{3} \times 120)^2}{377(0,562)(13,8)^2} = 1,071 \Omega \quad (5.2.22)$$

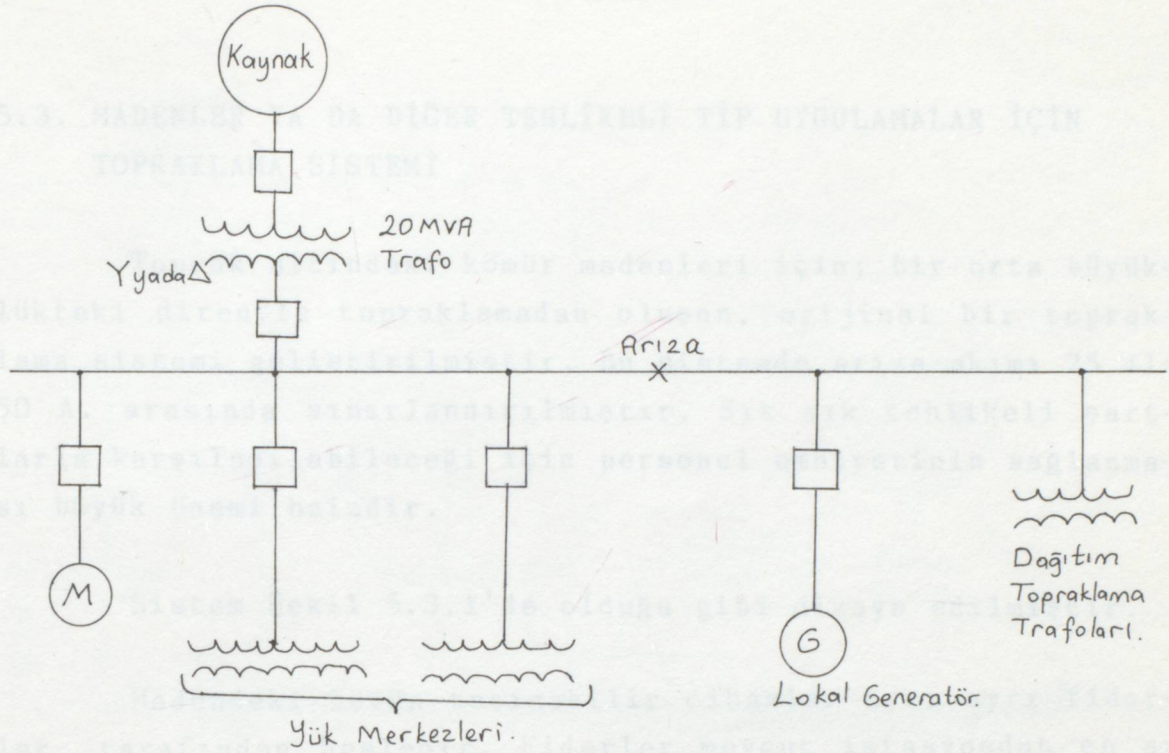
$$3V_o = 194,13 (1,071) = 207,85 \text{ V, sekonderde} \quad (5.2.23)$$

Güçler;

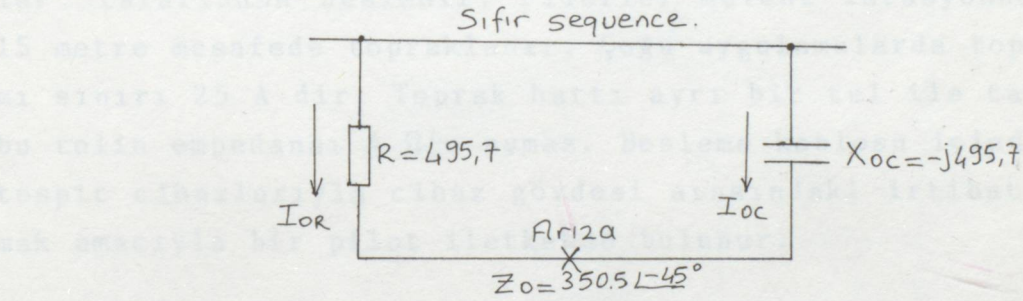
$$\text{Direnç: } I^2(3R) = (194,13)^2 (1,071) \cdot 10^{-3} = 40,36 \text{ kw} \quad (5.2.24)$$

$$\text{Trafo : VI} = 1,69(13,8) = 23,3 \text{ kVA} \quad (5.2.25)$$

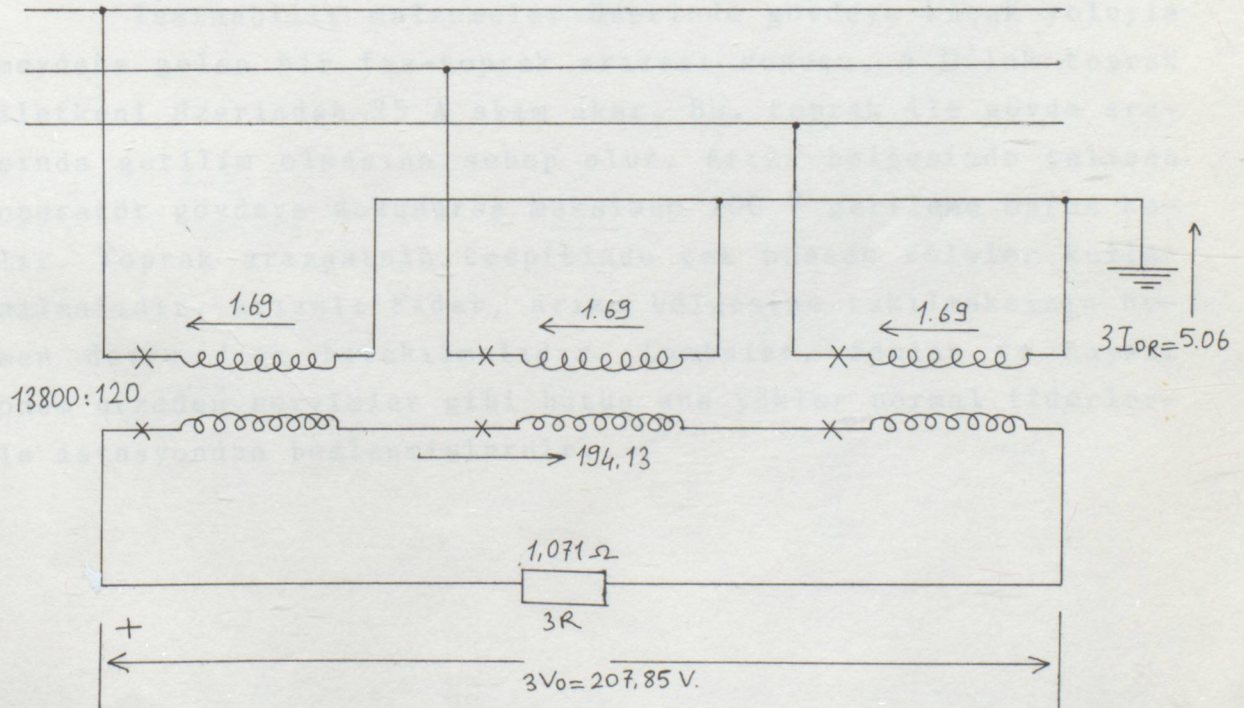
a)



b)



c)



Şekil 5.2.3. Tipik dağıtım trafolu, büyük direnç üzerinden topraklama a) Endüstri sistemi, b) Sıfır sequence devresi, c) Arıza anında akımların akışı

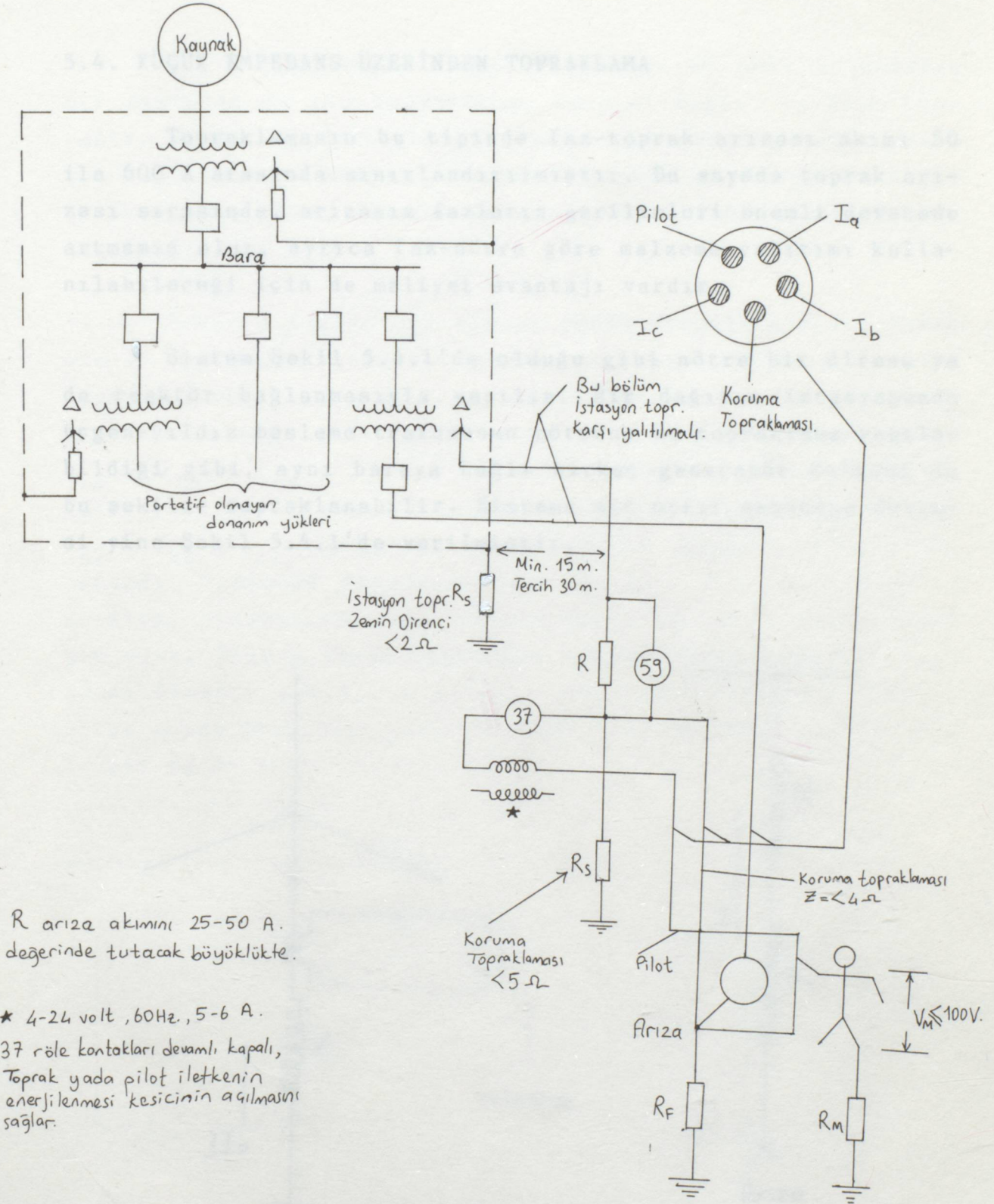
### 5.3. MADENLER YA DA DİĞER TEHLİKELİ TİP UYGULAMALAR İÇİN TOPRAKLAMA SİSTEMİ

Toprak altındaki kömür madenleri için; bir orta büyüklükteki dirençle topraklamadan oluşan, orijinal bir topraklama sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde arıza akımı 25 ila 50 A. arasında sınırlandırılmıştır. Sık sık tehlikeli şartlarla karşılaşılabilmesi için personel emniyetinin sağlanması büyük önemi haizdir.

Sistem Şekil 5.3.1'de olduğu gibi dizayn edilmiştir.

Madendeki bütün taşınabilir cihazlar ayrı ayrı fiderler tarafından beslenir. Fiderler mevcut istasyondan en az 15 metre mesafede topraklanır. Çoğu uygulamalarda toprak akımı sınırı 25 A dir. Toprak hattı ayrı bir tel ile taşınır ve bu telin empedansı  $4 \Omega$ 'u aşmaz. Besleme kablosu içinde, arıza tespit cihazlarıyla cihaz gövdesi arasındaki irtibatı sağlamak amacıyla bir pilot iletkeninde bulunur.

Taşınabilir malzemeler üzerinde gövdeye kaçak yoluyla meydana gelen bir faz-toprak arızası sonucu,  $4 \Omega$ 'luk toprak iletkeni üzerinden 25 A akım akar. Bu, toprak ile gövde arasında gerilim olmasına sebep olur. Arıza bölgesinde çalışan operatör gövdeye dokunursa maksimum 100 V gerileme maruz kalır. Toprak arızasının tespitinde çok hassas röleler kullanılmalıdır. Arızalı Fider, arıza bölgesine takılmaksızın hemen devre dışı bırakılmalıdır. Lambalar, fanlar ve hayati önem arzeden servisler gibi bütün ana yükler normal fiderlerle istasyondan beslenmişlerdir.

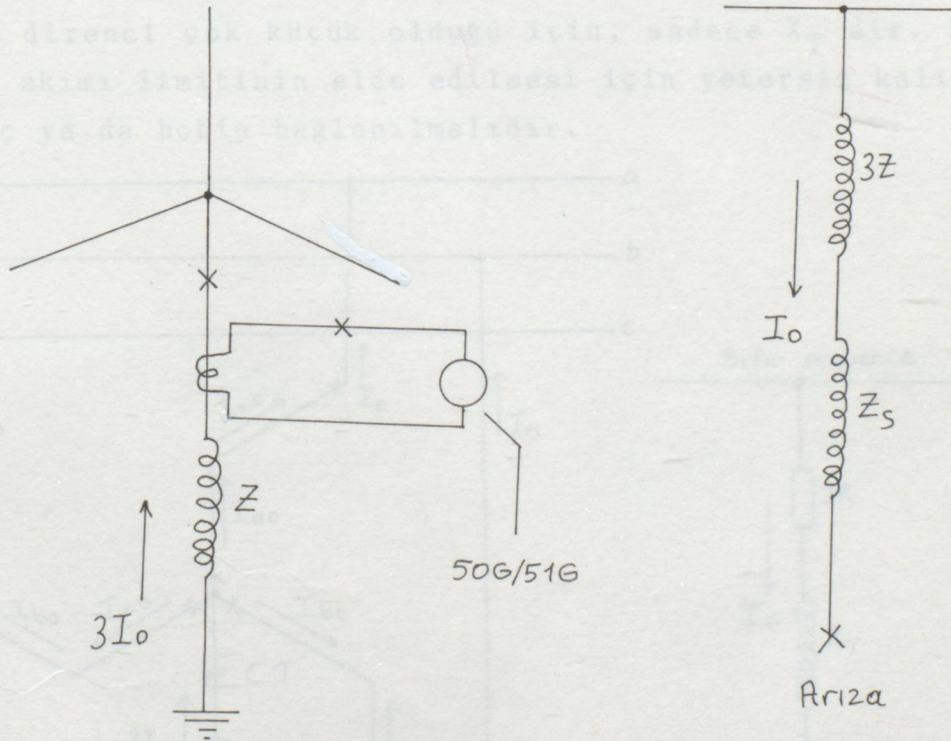


Şekil 5.3.1. Madenler ya da diğer tehlikeli uygulamalar için topraklama sistemi

#### 5.4. KÜÇÜK EMPEDANS ÜZERİNDEN TOPRAKLAMA

Topraklamanın bu tipinde faz-toprak arızası akımı 50 ila 600 A arasında sınırlandırılmıştır. Bu sayede toprak arızası sırasında, arızasız fazların gerilimleri önemli derecede artmamış olur, ayrıca faz-nötre göre malzeme yalıtımı kullanılabilceği için de maliyet avantajı vardır.

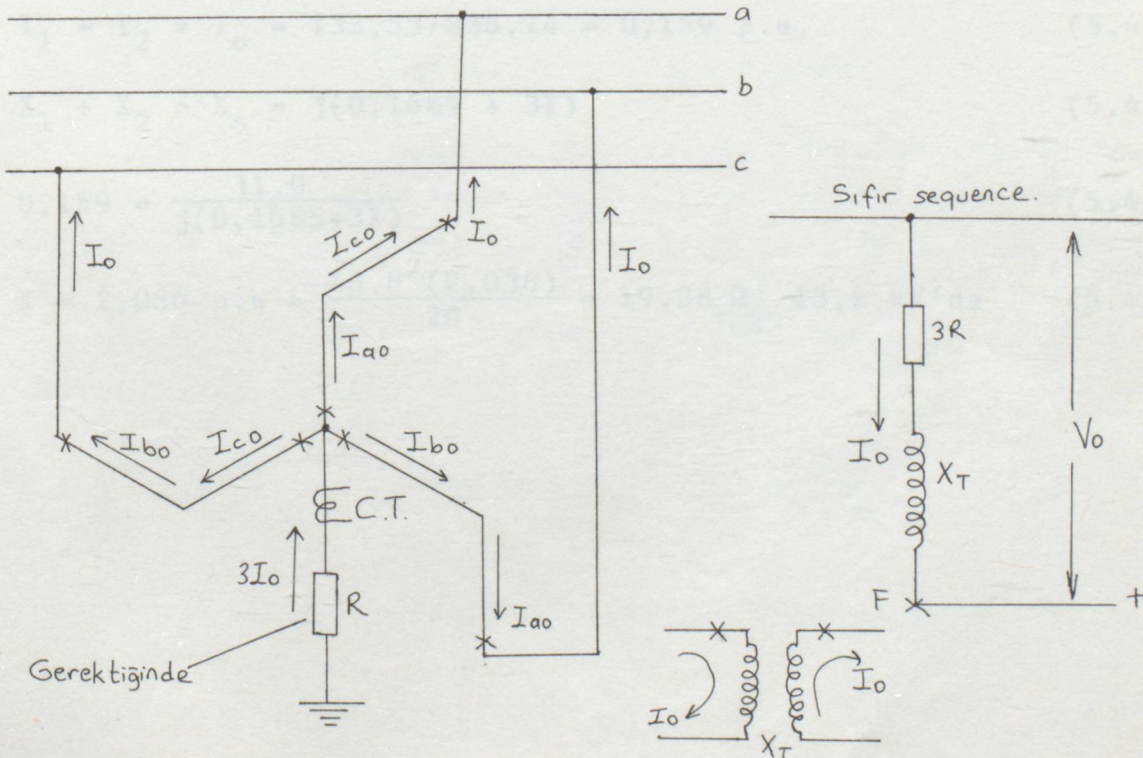
Şekil 5.4.1'de bir zigzag trafo topraklanmıştır. Tercih olarak Sistem Şekil 5.4.1'de olduğu gibi nötre bir direnç ya da reaktör bağlanmasıyla yapılır. Bir dağıtım istasyonunda üçgen-yıldız besleme trafosunun nötrüne bu topraklama yapılabildiği gibi, aynı baraya bağlı birkaç generatör ünitesi de bu şekilde topraklanabilir. Sisteme ait sıfır sequence devresi yine Şekil 5.4.1'de verilmiştir.



Şekil 5.4.1. Küçük empedans üzerinden topraklama sistemi

Bir güçgen bağlı trafo bulunan ya da nötr bulunmayan bir sistemde bu tip topraklama; paralel bağlı, yıldızı topraklı, yıldız-üçgen bağlı bir trafo ya da zigzag bağlı trafo ile yapılabilir. Böylece yıldızı topraklı yıldız-üçgen bağlı trafo taşıma amacı olmadan yalnızca topraklama amacıyla kullanılmış olur.

Şekil 5.4.2'de bir zigzag trafo örneklendiği görülmüştür. Temel olarak bu birim yalnızca sıfır sequence akımının geçmesi için; üç adet 1:1 oranlı trafoların bağlanmasıyla yapılmıştır. Trafoların polaritelerinden de anlaşılacağı gibi;  $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0$  dir ve sıfır sequence akımı akabilir, fakat pozitif ve negatif sequence akımları,  $I_{a1} \neq I_{c1} \neq I_{b1}$ ,  $I_{a2} \neq I_{b2} \neq I_{c2}$  olduğundan akamaz. Sıfır sequence yolunun empedansı, trafonun empedansı olan  $X_T$  dir. 1 pu.luk faz-nötr gerilimi alındığında her bobinin karşısındaki gerilim 0,866 p.u olur. Zigzag trafo üzerinden topraklamada empedans; trafonun direnci çok küçük olduğu için, sadece  $X_T$  dir. Eğer  $X_T$  arıza akımı limitinin elde edilmesi için yetersiz kalırsa bir direnç ya da bobin bağlanmalıdır.



Şekil 5.4.2. Zigzag trafo ile küçük empedans üzerinden topraklama

#### 5.4.1. TİPİK BİR REAKTÖRLÜ TOPRAKLAMA SİSTEMİ

Şekil 5.4.3'deki tipik sistemde topraklama reaktörü, maksimum 400 A lik faz-toprak arızası akımını sağlamak için kullanılmıştır. İşlemleri kolaylaştırmak maksadıyla 20 MVA bazı kullanılmıştır.

$$\text{Kaynak: } X_1 = X_2 = \frac{\text{MVA}_{\text{baz}}}{\text{MVA}_{\text{Sc}}} = \frac{20}{3200} = j0,00625 \text{ pu} \quad (5.4.1)$$

$$\text{Trafo: } X_T = j0,052 \text{ p.u.} \quad (5.4.2)$$

$$\text{Toplam: } X_1 = X_2 = j(0,0063 + 0,052) = j0,0583 \text{ pu} \quad (5.4.3)$$

$$\text{Toplam: } X_o = j(0,052 + 3x) \text{ p.u.} \quad (5.4.4)$$

400 A'lik primer arıza akımı için;

$$I_1 = I_2 = I_o = 400/3 = 133,33 \text{ A.} \quad 13,8 \text{ kV'da} \quad (5.4.4)$$

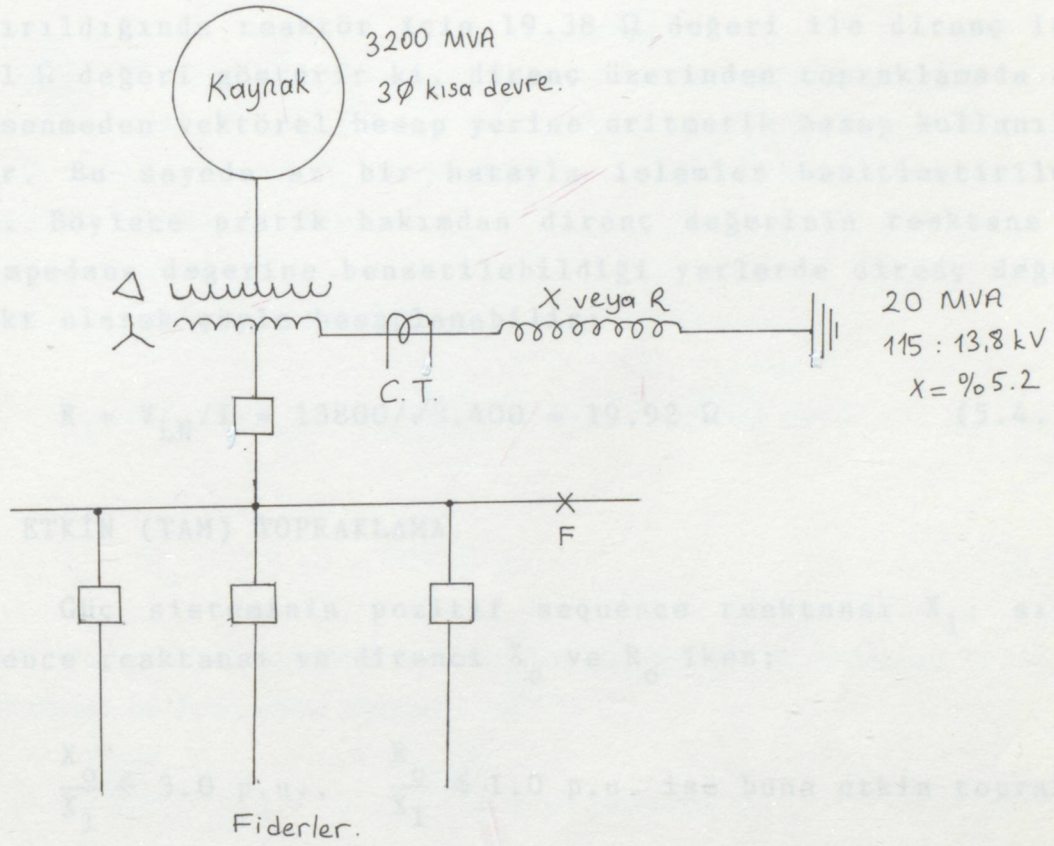
$$I_{\text{Baz}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 836,74 \text{ A.} \quad (5.4.5)$$

$$I_1 = I_2 = I_o = 133,33/836,74 = 0,159 \text{ p.u.} \quad (5.4.6)$$

$$X_1 + X_2 + X_o = j(0,1685 + 3X) \quad (5.4.7)$$

$$0,159 = \frac{j1.0}{j(0,1685+3X)} \quad (5.4.8)$$

$$X = 2,036 \text{ p.u} = \frac{13,8^2(2,036)}{20} = 19,38 \Omega \quad 13,8 \text{ kV'da} \quad (5.4.9)$$



Şekil 5.4.3. Tipik küçük empedans üzerinden topraklama örneği

#### 5.4.2. TİPİK BİR DİRENÇLİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ

Şekil 5.4.3'deki tipik sistemde, bir faz-toprak arızası akımınının 400 A'le sınırlandırılması için direnç kullanılmıştır. Önceki sistemde  $X_1=X_2=j0,0583$  idi. Bu durumda dirençle,  $Z_0=3R+j0,052$  p.u olur. Yine önceki gibi 400 A faz-toprak arızası için  $I_1=I_2=I_0 = 0,159$  p.u dır. Fakat açısı bilinmemektedir. Bu durumda;

$$I_1 = I_2 = I_0 = 0,159 \angle ? = \frac{j1.0}{3R+j0,1685} \quad (5.4.10)$$

$$R=2,09 \text{ p.u.} \quad R=13,8^2(2.09)/20 = 19,91 \Omega \quad 13,8 \text{ kV'da} \quad (5.4.11)$$

5.4.9 eşitliği ile 5.4.11 eşitliğinin değerleri karşılaştırıldığında reaktör için  $19.38 \Omega$  değeri ile direnç için  $19.91 \Omega$  değeri gösterir ki, direnç üzerinden topraklamada açılma önemsenmeden vektörel hesap yerine aritmetik hesap kullanılabilir. Bu sayede az bir hatayla işlemler basitleştirilmiş olur. Böylece pratik bakımdan direnç değerinin reaktans ya da empedans değerine benzetilebildiği yerlerde direnç değeri direkt olarak şöyle hesaplanabilir:

$$R = V_{LN}/I = 13800/\sqrt{3}.400 = 19,92 \Omega \quad (5.4.12)$$

#### 5.5. ETKİN (TAM) TOPRAKLAMA

Güç sisteminin pozitif sequence reaktansı  $X_1$ ; sıfır sequence reaktansı ve direnci  $X_0$  ve  $R_0$  iken;

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3.0 \text{ p.u.}, \quad \frac{R_0}{X_1} \leq 1.0 \text{ p.u.} \text{ ise buna etkin toprak-}$$

lama denilir. Sistem nötrü ile toprak arasında hiçbir empedans olmayabilir. Topraklama güç trafosunun yıldız sargısının nötr noktasının istasyon zemini veya toprağına irtibatlandırılmasıyla sağlanır. Şekil 5.4.1 veya Şekil 5.4.3'deki bağlantılar kullanılabilir, fakat X ve R bağlanmamış olur. Sonuç olarak faz-toprak arızası akımı oldukça değişebilir. Yani çok küçük bir akımdan, üç fazlı arıza akımını geçecek değere kadar akım akabilir. Akımın değeri güç sisteminin biçimine (elemanlarının düzeni), sabitlerine, arıza bölgesine ve arıza direncine bağlıdır. Arıza bölgesiyle arıza seviyesi değişebileceğine göre, koruma röleleriyle arızalı bölgenin selektif olarak yalıtılması ve arıza yerinin tespiti basitleşir. Şekil 5.4.1-5.4.2 ve 5.4.3'deki topraklı nötrde görülen akım trafosu; duyarlı bir aşırı akım zaman rölesi servisini çalıştırmak ve değişik hat, fider vs. ile zamanı koordine etmek için kullanılmıştır.

### 5.5.1. TİPİK BİR ETKİN TOPRAKLAMA SİSTEMİ

Şekil 5.4.3'deki sistemin trafosu etkin topraklanmış olsun ( $X, R=0$ ). F noktasında bir arıza için;  $X_1=X_2=j0,0583$  pu. (5.4.3 eşitliği) ve  $X_0 = j0,052$  pu. değerleri 20 MVA ve 13,8 kV bazına göredir. Böylece,

$$X_1+X_2+X_0 = j0,1685 \text{ pu ve,}$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{j1,0}{j0,1685} = 5.934 \text{ p.u} = 4965,8 \text{ A } 13,8 \text{ kV da} \quad (5.5.1)$$

$$I_a = 3I_0 = 17,8 \text{ pu} = 14897,5 \text{ A.} \quad (5.5.2)$$

Bu alçak empedansla topraklı örneğindeki 400 A değerinin 37 katıdır. F noktasında üç fazlı arıza akımı;

$$I_1 = \frac{j1,0}{j0,583} = 17,17 \text{ p.u} = 14364,6 \text{ A.}$$

Faz toprak arızası akımı, üç fazlı arıza akımından daha fazla çıktı. Bu örnekte farklılık küçüktür; çünkü kaynak, mevcut trafoya çok benziyor. Kaynak empedansı büyük olsaydı iki arıza akımı azalmasına rağmen aralarındaki fark çok artardı.

## 6. SONUÇ KRİTİĞİ VE TAVSİYELER

Bilindiği gibi elektrik enerjisi ucuz ve temiz olması sebebiyle günümüzün vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynağından verimli bir şekilde faydalanmak, üretim tesisleri ile tüketiciler arasındaki ilişkinin mükemmel olmasına bağlıdır. Enerji sistemlerinin gelişimiyle enterkonnekte güç sistemleri doğmuş ve bu sistemlerin sağlıklı işletilmesi büyük önem kazanmıştır. Bu sistemlerde; işletmenin sürekliliği sistemin kararlılığı, arızaların süratli bir şekilde giderilmesi için güç sistemi elemanlarının koordinasyonu ve organizasyonu şarttır.

Genel olarak güç sistemi; üretim, taşıma, dağıtım ve tüketim kısımlarından oluşur. Bu kısımlar koruma düzenleri, haberleşme ve otomasyon sistemleri vb... gibi sistemler gerektirirler. Bu sistemler arasında topraklama konusu çok önemli bir yer işgal etmesine rağmen, ülkemizde bu konuda çok fazla araştırma yapılmamıştır. Bu sebeple ve ayrıca, koruma sistemleriyle direkt alakası nedeniyle; işletme topraklaması içinde yer alan, güç sistemlerinde generatör ve transformörlerin yıldız (nötr) noktasının topraklanma prensipleri incelenmeye alınmıştır.

Dört ana başlık altında ele alınabilecek topraklama sistemlerinden ilki topraklanmamış sistemlerdir. Aslında topraklanmamış sistemler önceden belirtildiği gibi sistemin tabii kapasitansı üzerinden topraklı durumda olduğu için, herhangi bir faz-toprak arızası durumunda önemsenmeyecek kadar da olsa arıza akımı akar. Arıza akımının değeri sıfır sequen-ce devresindeki yayılı kapasitansın değerine bağlıdır. Diğer taraftan arıza akımı, arıza bölgesinden bağımsızdır. Arıza durumunda işletmeye devam edilirse, arızasız fazlar  $\sqrt{3}$  kat fazla bir değerle işletilmiş olur. Arıza bölgesinde kesintili ark meydana gelirse, sistem rezonansa girebilir ve yalıtım delinmesi meydana gelebilir. Çünkü bu sistemlerde geçici aşırı

rı gerilim olması ihtimali büyüktür. Aşırı gerilim sonucunda diğer fazlar arasında bir arızaya sebep olunmaması için arıza hemen giderilmelidir. Bu şartlar altında, bu sistemlerde arızanın tespiti basit olmasına rağmen selektif olarak arızanın giderilmesi oldukça güçtür. Arıza akımı küçük olduğu için cihazlar için risk teşkil etmez. Aşırı gerilim ihtimalinin fazlalığı nedeniyle koruma ve bakım önemlidir. Bu sistemler servisin devamlılığının istenildiği endüstri tesislerinde ve özellikle alçak gerilim seviyesinde kullanılabilir. Daha yüksek gerilim seviyelerinde kullanılamaz.

Diğer bir topraklama sistemi büyük empedans üzerinden topraklama sistemidir. Bu sistem topraklaması peterson bobinli topraklama ve büyük direnç üzerinden topraklama olarak iki şekilde yapılabilir. Peterson bobinli topraklama sistemi; kapasitif akımın, uygun boyutlandırılmış self bobinlerinin akımıyla giderilmesi esasına dayanır. Bu sistemde kademeli bobin kullanıldığı için, arıza sırasında sistem kapasitif akımın tamamını karşılayamaz, böylece bir kalıntı akım akar. Bu akım belirli bir limiti aşınca arıza yerindeki ark kendiliğinden sönmez. Örneğin, 220 kV'luk hava hattının uzunluğu 2000 km ise bu durumda ark kendiliğinden sönemez. Bu akımın üst sınırı 110 kV'da 100 A., 220 kV'da 150 A ve 400 kV'da 200 A kadardır. Kablo hatları için bu sınır 10 A.dir.

Bu sebeple peterson bobinleri yalnızca yıldız noktası yüklenebilen transformatörlere bağlanabilir. Bu transformatörlerde  $X_o/X_d \leq 1$  olmalıdır. Büyük direnç üzerinden topraklama sisteminde ise amaç, arıza akımının 1 ila 25 amper arasında kalmasını sağlamaktır. Genelde 1 ila 10 amper arasında olur. Bu sistemin avantajları topraklanmamış sistemlerle aynıdır. Fakat geçici aşırı akım limiti bu sistemde  $2.5 V_{LN}$ 'dir. Normalde bu sistem için kullanılacak direnç, bir dağıtım transformatörü üzerinden yıldız noktası ile toprağa irtibatlıdır. Büyük empedans üzerinden topraklama sistemi ve peterson bobinli sistemde topraklama katsayısı 0,8 değerinden daima

büyük olduğu için etkisiz topraklama olarak adlandırılır. Etkisiz topraklama orta gerilim ve 110 kV'a kadar gerilimli yüksek gerilim şebekelerinde kullanılmalıdır.

Küçük empedans üzerinden topraklama sisteminde arıza akımı 50 ila 600 A. arasında sınırlandırılır. Transformatörün yıldız noktasına reaktans veya direnç bağlamak suretiyle iki tipte yapılabilir. Ayrıca nötr noktası bulunmayan yerlerde zig-zag transformatör bağlantısı uygulanır. Zig-zag transformatör uygulamasında topraklama için  $X_T$  yeterli değilse ayrıca direnç bağlanmalıdır. Küçük empedans üzerinden topraklamanın etkisiz topraklı sistemlerden üstünlüğü, arıza tespitinin daha basit ve arızalı bölgenin selektif olarak ayrılmasını mümkün olmasıdır. Özellikle bu tip topraklamanın 1 ila 15 kV' luk tesislerde kullanılması gerekmektedir.

Son uygulama olarak etkin topraklama sistemi mevcuttur. Bu sistemde nötr noktası toprakla direkt olarak irtibatlandırılır. Alçak gerilim seviyesinden, yüksek gerilim seviyesine kadar bütün gerilim seviyelerinde kullanılabilir. Çünkü bu topraklamada arıza akımı; güç sistem elemanlarının sabitlerine, arıza bölgesine, arızanın geçiş dirençli veya dirençsiz olmasına bağlı olarak küçük bir değerden çok büyük bir değere kadar değişebilir. Fakat, etkin topraklama çok yüksek gerilimli taşıma hatlarında ve özellikle 70 kV'dan daha büyük gerilimli hatlarda kullanılır. Bu sistemde arıza akımı arıza bölgesine bağlı olduğu için, arızalı bölge selektif olarak ayrılabilir. Küçük empedans üzerinden topraklama ve etkin topraklama sistemlerinde topraklama katsayısı  $Z_o = U_o / U_d < 0,8$  olduğu için bu sistemler etkili topraklama olarak da adlandırılırlar.

## KAYNAKLAR

- 1- Protective Relaying, Principles and Applications. J.Lewis Blackburn, 1987.
- 2- Short-Circuit Currents in Three-Phase Systems Richard Roeper, 1985.
- 3- Elements of Power System Analysis William D.Stevenson, 1985.
- 4- Grounding for Substations - C.H.Jensen.
- 5- Elektrik Tesislerinde Aşırı Gerilimler ve Bunlara Karşı Koruma. Prof.Dr.Mustafa Bayram, 1984.
- 6- Elektrik Tesislerinde Topraklama. Prof.Dr.Mustafa Bayram.
- 7- Elektrik Enerjisi Dağıtımı, Nusret Alperöz, 1987.
- 8- Elektrik Tesislerinde Topraklama ve Kısa Devre, Nihat Taylan.
- 9- Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, 1982.

