

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Elektrik Enerji Sistemlerinde  
Toprak Yolunun Analizi**

**Reyhane Boruđlu**

**Yüksek Lisans Tezi**

152  
120

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

15,00

ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE  
TOPRAK YOLUNUN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elk. Müh. Reyhane BOZOĞLU

İSTANBUL 1991

152  
120

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elk  
15.000

ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE  
TOPRAK YOLUNUN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elk. Müh. Reyhane BOZOĞLU

İSTANBUL 1991

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON  
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot : R 152  
120

Alındığı Yer : FEN. BİL. ENS.

Tarih : 16.04.1992

Fatura : - - - - -

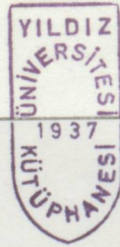
Fiyatı : 15.000 TL.

Ayniyat No : 1/2

Kayıt No : 48331

UDC : 621.3 378.242

Ek :



İÇİNDEKİLER	
ÖZET .....	iii
SUMMARY .....	iv
BÖLÜM 1. GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. TOPRAK YOLU ELEMANLARININ TANITILMASI .....	4
2.1. Hava Hatlarına İlişkin Toprak Yolu Elemanları .....	4
2.1.1. Direklerin Koruma İletkeni .....	4
2.1.2. Direklerin Topraklama Dirençleri .....	6
2.1.3. İndirici Transformator Merkezlerinin Topraklama Dirençleri .....	8
2.1.4. Toprağın Kendi Empedansı .....	11
2.1.5. Toprağın Kaçak Kapasiteleri .....	11
2.2. Yeraltı Kablolarına İlişkin Toprak Yolu Elemanları .....	12
BÖLÜM 3. ÇEŞİTLİ TİPTEKİ ENERJİ SİSTEMLERİNE TOPRAK YOLU MODELLERİNİN ELDE EDİLMESİ .....	14
3.1. Hava Hatlarında Toprak Yolunun Modellenmesi .....	16
3.1.1. Koruma İletkeninin Olmaması Halinde Toprak Yolunun Modellenmesi .....	16
3.1.2. Koruma İletkeninin Olması Halinde Toprak Yolunun Modellenmesi .....	22
3.2. Yeraltı Kablosunda Toprak Yolunun Modellenmesi .....	28
BÖLÜM 4. HAVA HATLARINDA TOPRAK YOLUNUN ANALİZİNE İLİŞKİN SİMÜLASYON YÖNTEMLERİ .....	30
4.1. Sabit Parametre Yaklaşımı .....	30
4.1.1. Dağılmış Parametre Yöntemi .....	31
4.1.2. Toplu Parametre Yöntemi .....	33

4.2. Değişken Parametre Yaklaşımı ..... 35  
4.2.1. Tek taraflı Yoketme Yöntemi ..... 36  
4.2.2. Çift Taraflı Yoketme Yöntemi ..... 39  
Genel 4.3. Zincir Empedans Yöntemi ..... 40  
Kabul edilir ve hesaplarda tek-hat diyagramları kullanılır.  
BÖLÜM 5. SAYISAL UYGULAMA ..... 46  
5.1. Giriş ve Açıklama ..... 46  
5.2. Hesap Sonuçları ..... 47  
yolu analizi" gerekli olacaktır.  
SONUÇLAR ve ÖNERİLER ..... 58  
REFERANSLAR ..... 61  
ÖZGEÇMİŞ ..... 64

Özgeçmiş kısmı boş bırakılmalıdır. Dengesiz yüklendikten sonra çıkan yükler artık sistemin toprak yolundan akacaktır.

Bu çalışmada, "Toprak Yolu" tanımlanmış ve değişik tipteki enerji sistemlerine ilişkin toprak yolu değerleri verilmiştir. Daha sonra, toprak yolundaki ekipmanlar için gerekli olacak bilgisayar destekli çözüm yöntemleri üzerinde durulmuştur. 154-kV'lık 3-bafalı bir sistem üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda, yükün topraklama eğrilerindeki gerilimini:

- Toprak özgül direnci ve direk açıklığına bağlı olarak arttığı, ayrıca topraklama direncine de bağlıdır.
- Kuplaj katsayısına bağlı olarak arttığı, gözlenmiştir. Topraklama eğrilerindeki ekipmanlar için topraklama direnci ve direk açıklığı ve kuplaj katsayısına bağlı olarak artmaktadır.
- Toprak özgül direncine bağlı olarak artmaktadır.

## ÖZET

Genel olarak, enerji sistemlerinin dengeli yüklendikleri kabul edilir ve hesaplarda tek-hat diyagramları kullanılır. Üç fazın eşit olarak yüklenmediği dengesiz yüklenmeye ilişkin güç dağılımı ya da güç akışı analizleri, dengeli yüklenmeden farklılıklar gösterir. Ayrıca "toprak yolu analizi" gerekli olacaktır.

Toprak yolu, örneğin hava hatlarında direkler arasındaki toprak teli ve direklerin topraklama dirençlerinden oluşan bir kafes biçimindedir. Dengesiz yüklenmeden ortaya çıkan artık akımın toprak yolundan akacağı açıktır.

Bu çalışmada, "Toprak Yolu" tanımlanmış ve değişik tipteki enerji sistemlerine ilişkin toprak yolu eşdeğerleri verilmiştir. Daha sonra, toprak yolundaki akım dağılımı için gerekli olacak bilgisayar destekli çözüm yöntemleri üzerinde durulmuştur. 154 kV'luk 3-baralı bir sistem üzerinde yapılan hesaplama sonuçlarından, yükün topraklama ağındaki gerilimin:

- Toprak özgül direnci ve direk açıklığına bağlı olarak arttığı,
  - Kuplaj katsayısına bağlı olarak azaldığı, gözlenmiştir.
- Topraklama ağındaki akım ise
- direk açıklığı ve kuplaj katsayısına bağlı olarak artmakta
  - toprak özgül direncine bağlı olarak azalmaktadır.

## SUMMARY

Usually, electric power systems are assumed to have balanced loading, and one-line diagrams are used in the computations. Power distribution or power flow analyses including asymmetrical currents for each phase differ from balanced case. Also, the "Earth Path Analysis" will be required.

Earth path, for example in overhead transmission lines, is in the form of a lattice which consists of ground wire between the towers and grounding resistances of the towers. It is clear that the residual current due to unbalanced loading will flow through the earth path.

In this study "Earth Path" is defined, and the earth path-equivalent circuits for the various power systems is given. Second, the computer-aided solution methods required for current distribution in earth path are discussed. From the computations upon a system with 154 kV 3-busbar, for the grid voltage drop the following discussions have been discussed:

- The grid voltage drop increases depending on the soil resistivity and span,
- The grid voltage decreases depending on the coupling coefficient.

However, grid current increases depending on the span and coupling coefficient, and decreases depending on the soil resistivity.



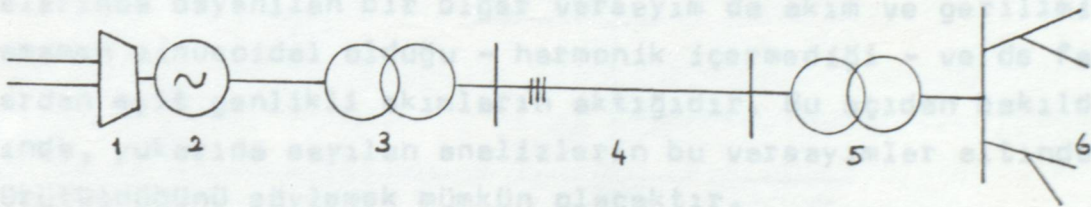
## BÖLÜM I. GİRİŞ

Kullanıma en elverişli ve yaygın enerji türü olan elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı, Elektrik Mühendisliğinin en önemli alanlarından birini oluşturmaktadır.

Ülkelerin gelişmiş olma ölçütlerinden birisi de, kuşkusuz kişi başına düşen elektrik enerjisi miktarıdır. Bu büyüklük özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrasında önemli artışlar göstermiştir. Bunun nedeni, nüfus artışıyla birlikte elektrik enerjisinin günlük hayatın her aşamasında kullanılmasına yol açan, teknolojideki baş döndürücü gelişmedir. Gelişen ve her geçen gün kalabalıklaşan dünyamızda enerji tüketiminin her yıl yaklaşık % 10 kadar arttığı bilinen bir gerçektir.

Enerjinin üretim, iletim ve dağıtım aşamalarını inceleyen Enerji (Güç) Sistemleri Mühendisliği, pek çok alt konu başlığında içermektedir.

Şekil 1.1. de bir enerji sisteminin prensip bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Bir enerji sisteminin basit bağlantı şeması

(1: Turbin, 2: Generatör, 3: Yükseltici transformator  
4: İletim hattı, 5: İndirici transformator ve  
6: Enerji dağıtım).

Söz konusu enerji sistemi, aslında pek çok yan ünite ve sisteme sahiptir. Örneğin üretim kademesinde senkron generatörden başka, uyarma devreleri, gerilim regülatörü, türbin meka-

nizmaları ve bunun gibi elemanlar yer alır. Aynı şekilde iletim hattı da, koruyucu röleler, devre kesicileri, kompanzasyon (seri/paralel) blokları, şönt reaktörler ve bunun gibi elemanların eşliğinde işletmede kalır.

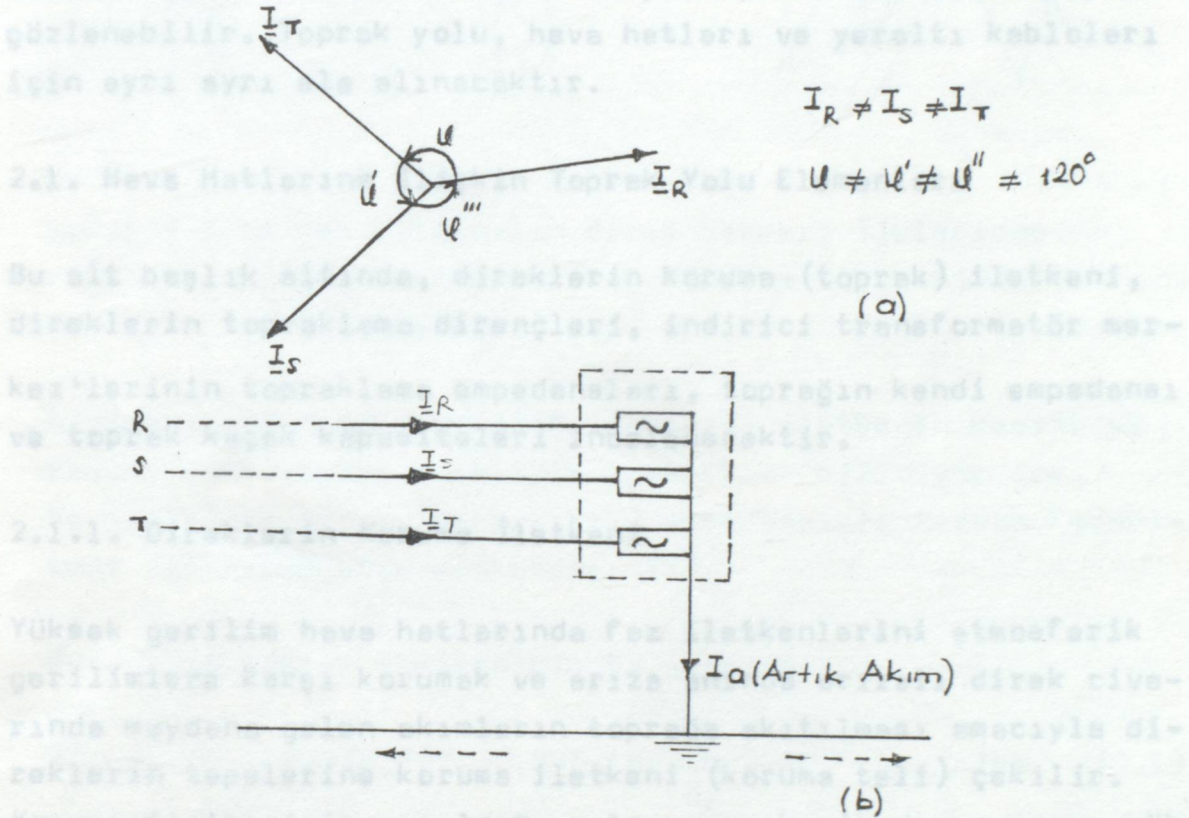
Enerji sistemlerinin tasarım, işletme ve geleceğe dönük işletme aşamaları, pek çok analizin duyarlı olarak yapılmasını gerektirir. Bu analizleri şöylece sıralamak mümkündür:

- Kısa devre incelemeleri
- Yük akış incelemeleri
- Geçici kararlılık analizleri
- Dinamik kararlılık analizleri
- Gerilimlerdeki geçici olayların analizi
- Röle koordinasyonu
- Yük tahmini
- Üretim Ünitelerinin yerlerinin seçimi
- Üretim ünitelerinin ekonomik yük paylaşımı
- Rezerv olanaklarının araştırılması vb.

Enerji sistemlerinin değişik modelleri bulunmakla birlikte, dünyadaki, ülkemizdeki genel yaklaşım: 3-fazlı sinüsoidal alternatif akımla yapılan enerji akışıdır. Sistemlerin çalışmalarında dayanılan bir diğer varsayım da akım ve gerilimin tamamen sinüsoidal olduğu - harmonik içermediği - ve de fazlardan eşit genlikli akımların aktığıdır. Bu açıdan bakıldığında, yukarıda sayılan analizlerin bu varsayımlar altında yürütüldüğünü söylemek mümkün olacaktır.

Bununla birlikte, enerji sistemlerinin her zaman bu varsayımlara izin verdikleri söylenemez. Örneğin özel karakterli yükler (ark fırınları, demiryolu tesisleri, VAR-kompanzasyon tesisleri vb.) nedeniyle fazlardan dengesiz akımlar akabilir. Bundan başka, simetrik olmayan arızalar sonucu - röleler devreyi kesinceye kadar - fazların dengesiz yüklenmesi söz konusu olabilir.

Yukarıda belirtilen dengesiz çalışma koşullarının analizi, geleneksel dengeli çalışmada olduğundan farklıdır. Çünkü bu durumda, artık sistem tek-kutuplu eşdeğer devre ile temsil edilemeyecektir. Bu bakımdan başka bir modelleme gerekecek ve çözüm yöntemleride değişmiş olacaktır. Dengesiz çalışma sonucu, sistemin nötr noktası yalıtılmamış ise toprak üzerinden ve toprakla bağlantılı elemanlar üzerinden bir artık akım (veya akım bileşenleri) akacaktır. Toprakten akan akımların dolaşım yolu, bu çalışmada, "Toprak Yolu" adıyla tanımlanmıştır.



Şekil 1.2. Dengesiz akım fazörleri (a) ve artık akımın oluşumu (b).

Bu çalışmada önce toprak yolu tanımlanmış, toprak yoluna ilişkin çeşitli elemanların empedanslarının hangi parametrelere bağlı oldukları irdelenmiştir. Daha sonra toprak yolu, çeşitli enerji sistem modelleri için ayrı ayrı modellenmiş ve ilgili matematiksel ifadeler çıkarılmıştır. Toprak yolundeki

akım dağılımına ilişkin nümerik çözüm algoritmaları incelenmiş ve son olarak sayısal bir örnek üzerinde toprak yolu ile ilgili hesaplama sonuçları sunulmuştur. Bulunan sonuçlardan dengesiz yüklenme halinde toprak yolunun enerji sistemlerinin analizinde çok önemli bir yer tutması gerekliliği vurgulanmıştır.

## BÖLÜM 2. TOPRAK YOLU ELEMANLARININ TANITILMASI

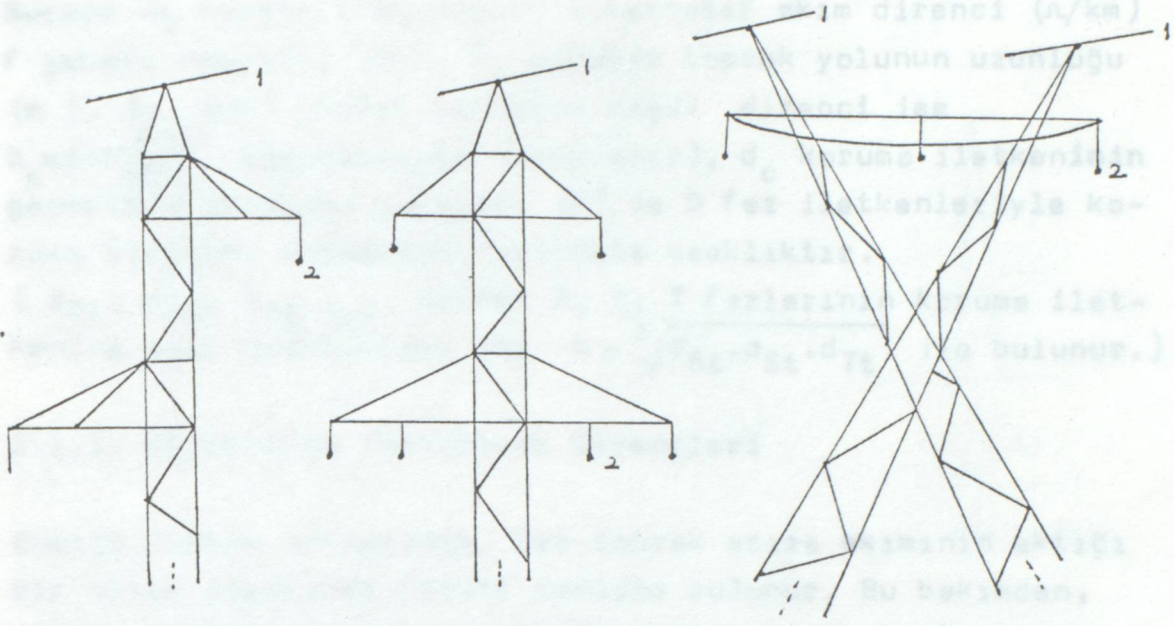
Toprakten geçen akıma karşı toprakla bağlantılı elemanların göstermiş oldukları empedans etkisi, toprak yolu elemanlarının tanımlanması ve empedanslarının ayrı ayrı ifade edilmesiyle gözlenebilir. Toprak yolu, hava hatları ve yeraltı kabloları için ayrı ayrı ele alınacaktır.

### 2.1. Hava Hatlarına İlişkin Toprak Yolu Elemanları

Bu alt başlık altında, direklerin koruma (toprak) iletkeni, direklerin topraklama dirençleri, indirici transformator merkez'lerinin topraklama empedansları, toprağın kendi empedansı ve toprak kaçak kapasiteleri incelenecektir.

#### 2.1.1. Direklerin Koruma İletkeni

Yüksek gerilim hava hatlarında faz iletkenlerini atmosferik gerilimlere karşı korumak ve arıza anında arızalı direk civarında meydana gelen akımların toprağa akıtılması amacıyla direklerin tepelerine koruma iletkeni (koruma teli) çekilir. Koruma iletkeninin yapıldığı malzeme, mekanik dayanımının yüksekliği dolayısıyla, çoğu kez çeliktir.



Şekil 2.1 En çok kullanılan direk travers tiplerinde koruma iletkenleri (1: Koruma iletkeni ve 2: Faz iletkeni).

Koruma iletkeninin yapıldığı malzeme, iletkenin kesiti ve travers ile ilgili geometrik açıklıklar biliniyor ise, öz (self) ve ortak (karşılıklı) empedansları Carson Formülleri ile hesaplamak mümkündür (1).

Buna göre toprak iletkeninin öz empedansı,

$$Z_t = R_t + jX_t = R_t + (0,98f + j2,88f \cdot \log \frac{D_e}{d_c}) \cdot 10^{-3} \dots (\Omega/\text{km}) \quad (2.1)$$

ve faz iletkenlerinin çaprazlaştırılmış olduğu kabulü ile ortak empedansı

$$Z_{tm}' = (0,98f + j2,88 \cdot \log \frac{D_e}{D}) \cdot 10^{-3} \dots (\Omega/\text{km}) \quad (2.2)$$

şeklinde hesap edilir.

Burada  $R_t$  koruma iletkeninin alternatif akım direnci ( $\Omega/\text{km}$ )  
 $f$  şebeke frekansı (Hz),  $D_e$  eşdeğer toprak yolunun uzunluğu  
(m), ( $\rho$ , ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) olarak toprağın özgül direnci ise  
 $D_e = 655\sqrt{\rho/f}$  bağıntısıyla hesaplanır),  $d_c$  koruma iletkeninin  
geometrik ortalama yarıçapı (m) ve  $D$  faz iletkenleriyle ko-  
ruma iletkeni arasındaki ortalama uzaklıktır.

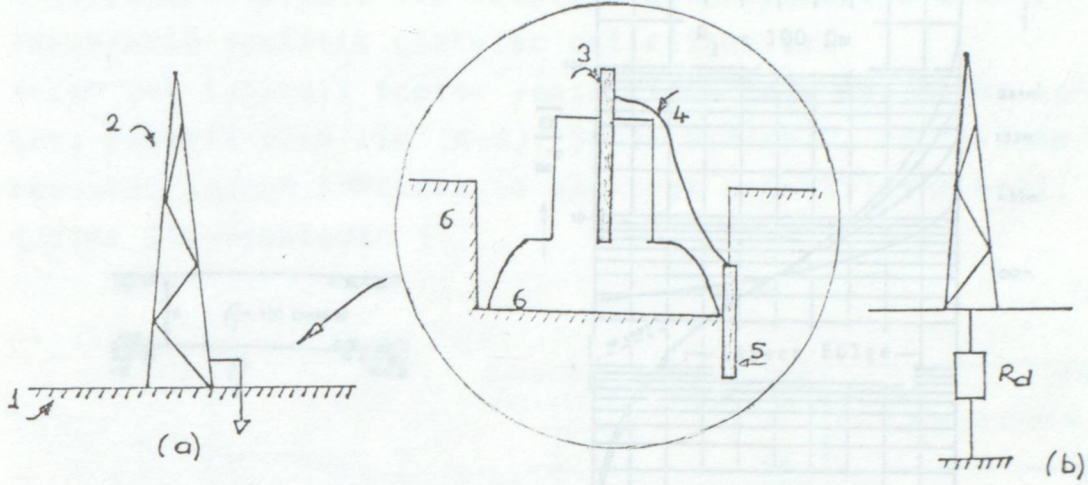
( $d_{Rt}$ ,  $d_{St}$ ,  $d_{Tt}$  (m) olarak R, S, T fazlarının koruma ilet-  
kenine olan uzaklıkları ise  $D = \sqrt[3]{d_{Rt} \cdot d_{St} \cdot d_{Tt}}$  ile bulunur.)

### 2.1.2. Direklerin Topraklama Dirençleri

Enerji iletim hatlarında, faz-toprak arıza akımının aktığı  
bir direk civarında hayati tehlike bulunur. Bu bakımdan,  
koruma iletkeninin bulunup bulunmamasına bakılmaksızın,  
direk civarındaki kaçaklardan korunmak için bütün iletim yo-  
lu boyunca direkler topraklanır.  $R_d$  ile gösterilecek olan  
bu topraklama dirençlerinin belirli bir değer altında olması  
gerektiğinden (uygulamada  $R_d \ll 20$  olması istenir), uygun top-  
raklama yönteminin seçilmesi gerekir (2).

$R_d$  topraklama direnci, genel olarak temel derinliği, toprağın  
yapısı ( bataklık, killi toprak, kil, kum vb.), toprağın tek  
tabakalı (üniform) veya çok tabakalı oluşu, topraklayıcıların  
geometrik yapısı, vb. faktörlerce etkilenir. Topraktaki ne-  
min çok büyük önemi vardır. % 20'nin altında, nemdeki çok kü-  
çük değişimler bile topraklama dirençlerinde büyük farklar  
oluşturur. % 20'den fazla nem toprağın özdirenci üzerinde  
fazla etkili değildir. Ancak % 20'nin altında, nemin azal-  
masıyla topraklayıcının direnci hızla artar. Nem, mevsimlere  
göre değişiklik gösterir; yaz aylarında % 10, yağışlı mev-  
simlerde % 35 kadedir.

Diğer taraftan sıcaklığında direnç üzerinde etkisi vardır.  
 $0^\circ\text{C}$  de toprağın içindeki su donar ve toprağın özdirenç ısı  
katsayısı artar. Düşük sıcaklıklarda özdirenç ve topraklama  
direnci artma eğilimine girecektir. Bu nedenle, topraklayıcılar  
her zaman dondan korunabilecek derinliklere çekilir.



Şekil 2.2 Direk topraklamasının şematik yapısı (a) elektriksel eşdeğeri (b) (1:Toprak, 2:Kafes direk, 3:Dikme ayağı, 4:Topraklama bağlantı iletkeni, 5:Topraklama kazığı ve 6:Direk temeli).

Çok tabakalı toprak için toprağın özgül direncini ( $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ )) hesap etmek oldukça zordur. Arazi yapısı ve mevsim koşullarına yakından bağlı  $\rho$  değeri için, çoğunlukla ölçüm sonuçlarıyla yetinilir. Şekil 2.3'de 2-tabakalı toprakta direk topraklama direncinin değişimi gösterilmiştir (3).

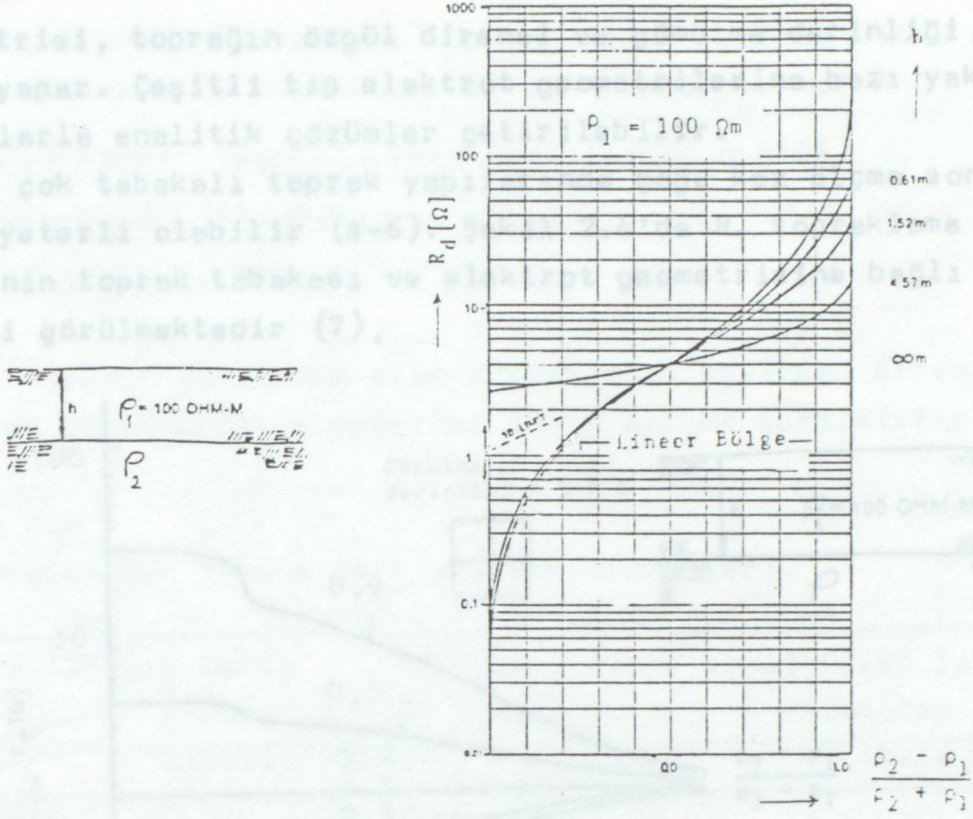
bu değer kullanılabilir. Hesaplamalarda  $R_d$  topraklama direnci için, alınması  $R_d = 0,1 \Omega$  (sabit)

$$R_d = 0,01 \rho \quad (\rho \text{ 'ya bağlı})$$

bu kabuller yapılabilir (4).

### 2.1.3. İndirici Transformator Merkezlerinin Topraklama Dirençleri

Enerji Üretim ve dağıtım merkezleri topraklama ağlarıyla topraklanırlar. Kuvvetli, şarjit ve çubuk biçimlerinde olabilen bu topraklama elektrotlarının dirençlerine elektrot



Şekil 2.3 2-tabakalı toprak için direk topraklama direncinin toprağın özgül direncine göre değişimi.

Öte yandan yıl boyunca direklerin topraklama dirençleri sabit kalmaz. Enerji iletim hattının geçtiği yol boyunca toprak özgül dirençleri ayrı ayrı olacağından ortalama bir değer kullanılabilir. Hesaplamalarda  $R_d$  topraklama direnci için, örneğin:  $R_d = 0,1 \Omega$  (sabit)

$$R_d = 0,01\rho \quad (\rho \text{ 'ya bağlı})$$

gibi kabüller yapılabilir (4).

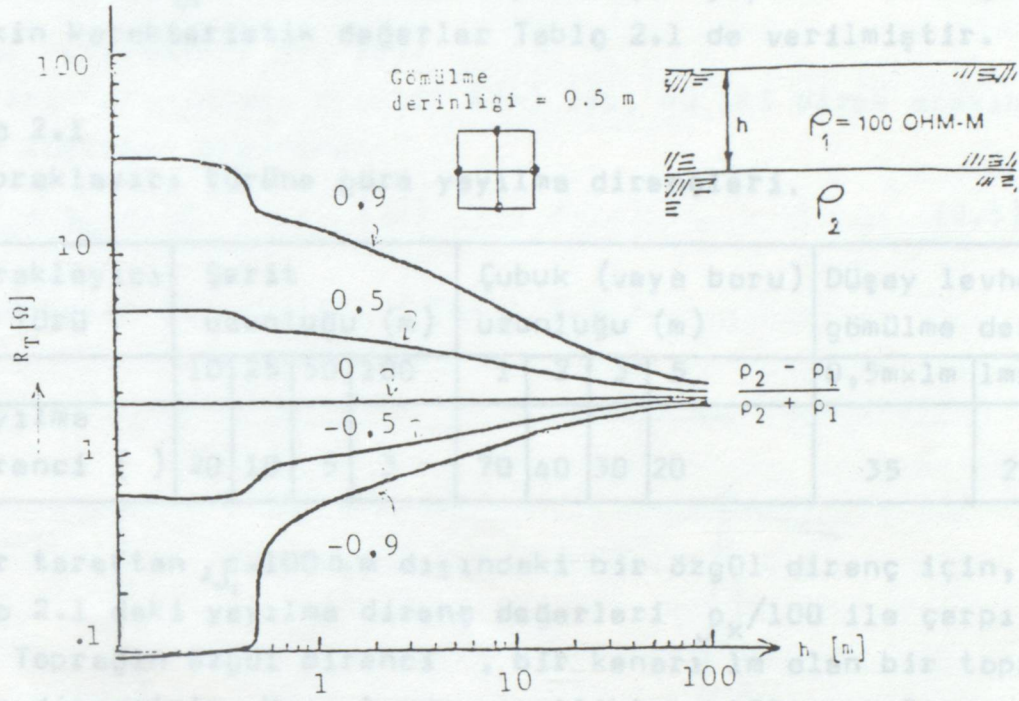
### 2.1.3. İndirici Transformator Merkezlerinin Topraklama Dirençleri

Enerji üretim ve dağıtım merkezleri topraklama ağlarıyla topraklanırlar. Küresel, şerit ve çubuk biçimlerinde olabilen bu topraklama elektrotlarının dirençlerine elektrot



geometrisi, toprağın özgül direnci ve gömülme derinliği etki yapar. Çeşitli tip elektrot geometrilerine bazı yaklaşımlarla analitik çözümler getirilebilir.

Ancak çok tabakalı toprak yapılarında çoğu kez ölçme sonuçları yeterli olabilir (4-6). Şekil 2.4'de  $R_T$  topraklama direncinin toprak tabakası ve elektrot geometrisine bağlı değişimi görülmektedir (7).



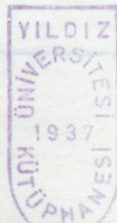
Şekil 2.4 Posta merkezindeki topraklama direncinin toprak tabakası ve elektrot geometrisine bağlı olarak değişimi.

Topraklama ağının empedansı

$$Z_T = f(a) + j\psi(b) \quad (2.3)$$

şeklinde genelleştirilebilir (8).

Burada  $a$  toprak yapısının ve  $b$  elektrot geometrisinin etkilerini yansıtmaktadır. Sanal kısım  $\psi(b)$ , gerçel kısım  $f(a)$  yanında ihmal edilecek kadar küçüktür.  $\psi(b)$  çoğu kez sabit



değerde alınır. Topraklama ağı çok büyük değilse ihmal edilebilir. Hesaplarda topraklama ağının empedansı için:

-  $Z_T = \text{sabit}$  ( $Z_T = 0,3 \Omega$  veya  $Z_T = 0,3 + j0,2 \Omega$  gibi)

-  $Z_T = f(\rho)$  ( $Z_T = 0,03 \rho \Omega$  gibi)

kabulleri yapılabilir.

Özgül direnci  $\rho_i = 100 \Omega \cdot m$  olan toprak için yayılma dirençlerine ilişkin karakteristik değerler Tablo 2.1 de verilmiştir. (9).

Tablo 2.1

- Topraklayıcı türüne göre yayılma dirençleri.

Topraklayıcı Türü	Şerit uzunluğu (m)				Çubuk (veya boru) uzunluğu (m)				Düşey levhe gömülme der. (1m)	
	10	25	50	100	1	2	3	5	0,5m x 1m	1m x 1m
Yayılma direnci ( )	20	10	5	3	70	40	30	20	35	25

Diğer taraftan,  $\rho_i = 100 \Omega \cdot m$  dışındaki bir özgül direnç için, Tablo 2.1 deki yayılma direnç değerleri  $\rho_x / 100$  ile çarpılır. Toprağın özgül direnci , bir kenarı 1m olan bir toprak kübün direncidir. Hesaplarda genellikle  $\rho_i = 100 \Omega \cdot m$  referans seçildiği halde, zemine ve iklim koşullarına göre değişiklikler gözükür. Tablo 2.2 de çeşitli toprak cinslerinin ortalama özgül dirençleri verilmiştir.

Tablo 2.2

Çeşitli toprak cinslerinin ortalama özgül dirençleri.

Toprağın Cinsi	Özgül Direnç ( m )
Bataklık	30
Killi toprak	100
Rutubetli kum	200
Rutubetli çakıl	500
Kurum kum/çakıl	1000
Taşlı zemin	3000

#### 2.1.4. Toprağın Kendi Empedansı

Toprağın içinden geçen akıma karşı gösterdiği empedans  $Z_e$ , toprağın özgül direnci ile yakından ilgilidir.  $f$ , (Hz) olarak frekansı ve  $\rho$  ( $\Omega.m$ ) olarak toprak özgül direncini göstermek üzere toprağın empedansı

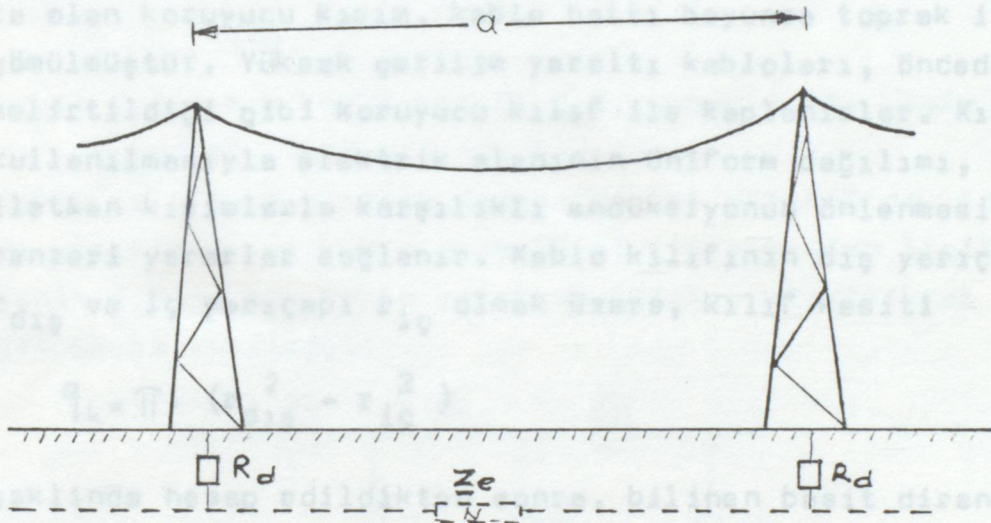
$$Z'_e = \left[ 0,98f + j1,26f \cdot \ln(2160\sqrt{\rho/f}) \right] \cdot 10^{-3} \dots (\Omega/km) \quad (2.4)$$

olarak verilebilir (9, 10).

İki direk arasındaki açıklık  $a$ (m) ise, bu iki direk arasında kalan toprağın empedansı

$$Z_e = Z'_e \cdot a \cdot 10^{-3} \dots (\Omega) \quad (2.5)$$

olarak hesap edilebilir. (Şekil 2.5 ).



Şekil 2.5 İki direk arasında kalan toprak empedansı.

#### 2.1.5 Toprağın Kaçak Kapasiteleri

Yüksek gerilimli enerji iletim hatlarınının toprağa kaçak kapasiteleri vardır. Bu kapasiteler orta uzunluktaki hatlarda belirli noktalarda toplanmış gibi düşünülebildiği helde

(hatların eşdeğer T ve  $\Pi$  modelleri), uzun iletim hatları için bu yaklaşımın yerine, kaçak kapasitelerin hat boyunca yayıldıklarını kabul etmek gerekir. Toprağın kaçak kapasiteleri, direk boyu, toprak iletkeninin olup olmaması, travers üzerinde iletkenlerin tertip biçimi ve iletkenlerin çaprazlaştırılıp olup olmadıklarıyla yakından ilgilidir.)

Toprağın kaçak kapasiteleri küçük değerli olduklarında büyük kapasitif reaktanslar oluştururlar. Hat boyunca direk topraklama dirençleri yanında çok büyük olan bu reaktanslar, açık devre olarak düşünülebilir.

## 2.2. Yeraltı Kablolarına İlişkin Toprak Yolu Elemanları

Bu başlık altında, kablo kılıfları ele alınacaktır. Topraklanmış bir yeraltı kablosunda kılıf ve bununla temasta olan koruyucu kısım, kablo hattı boyunca toprak içine gömülmüştür. Yüksek gerilim yeraltı kabloları, önceden de belirtildiği gibi koruyucu kılıf ile kaplanırlar. Kılıf kullanılmasıyla elektrik alanının üniform dağılımı, diğer iletken kısımlarla karşılıklı endüksiyonun önlenmesi ve benzeri yararlar sağlanır. Kablo kılıfının dış yarıçapı  $r_{dış}$  ve iç yarıçapı  $r_{iç}$  olmak üzere, kılıf kesiti

$$q_k = \pi \cdot (r_{dış}^2 - r_{iç}^2) \quad (2.6)$$

şeklinde hesap edildikten sonra, bilinen basit direnç bağıntısı yardımıyla omik direnç bulunabilir.

Faz iletkeni ile kablo kılıfı arasındaki karşılıklı endüktans

$$M_k = 2\ell \cdot \left[ -1 + \ln 2\ell - (r_{dış} r_{iç})/2 \right] \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilebilir (11).

$\ell$ , (m) olarak iletkenin uzunluğudur.

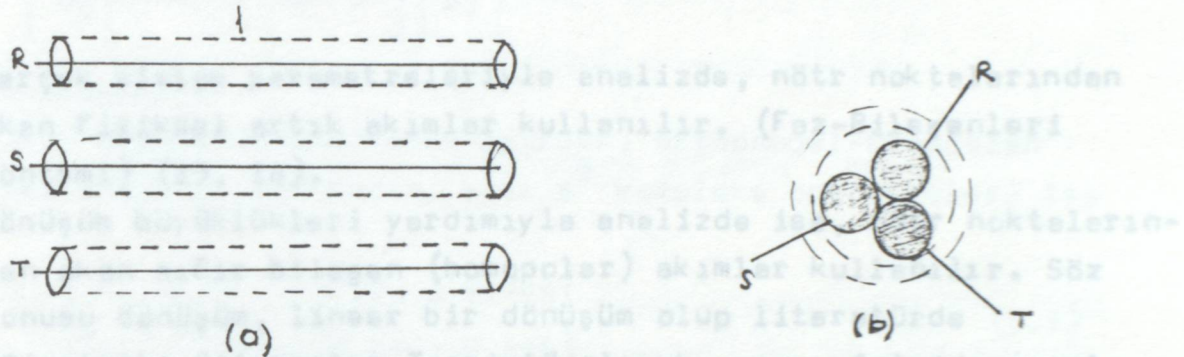
Kablo kılıfının öz endüktansı  $L_k$ , büyük bir yaklaşıkla iletken ile kılıf arasındaki karşılıklı endüktansa ( $M_k$ ) eşit

alınabilir. YÜZLÜ YÜZLÜ ENERJİ SİSTEMLERİNE İLİŞKİN  
TOPRAK YOLU MODELLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Bir faz iletkeni ile komşu kablolun kılıfı arasındaki kar-  
şılıklı endüktans ise

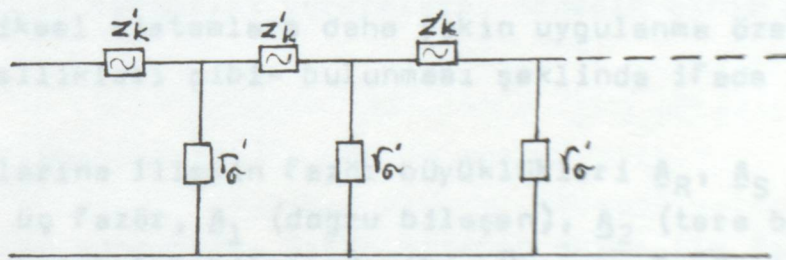
$$M_{km} = 2 \cdot l \cdot (-1 + \ln 2l/d) \quad (2.8)$$

olarak hesap edilir.  $d$ , iletkenler arası açıklıktır (11).



Şekil 2.6 Ayrık kablo kılıfı (a), kemerli tip kablo kılıfı (b), (l:Kablo kılıfı).

Kablo kılıfının toprağa karşı yayılma direnci  $r$ , toprağın öz emlikleri ve kablo geometrisi ile yakından ilgilidir. (12). Şekil 2.7 de bir kablo kılıfına ilişkin elektriksel eşdeğer devre verilmiştir.



Şekil 2.7 Kablo kılıfına ilişkin elektriksel eşdeğer devre. ( $Z_k$  birim uzunluk için kablo kılıfının empedansı ve  $r$  birim uzunluk için toprağa yayılma direncidir.)

### BÖLÜM 3. ÇEŞİTLİ TİPTEKİ ENERJİ SİSTEMLERİNE İLİŞKİN TOPRAK YOLU MODELLERİNİN ELDE EDİLMESİ

(3.1)

Dengesiz yüklenen enerji sistemlerinde nötr noktasının (veya noktalarının) toprakla ilişkisi olması halinde toprağa 'artık akımlar' geçecek ve dolayısıyla "Toprak Yolu" nun etkinliği gündeme gelecektir. Toprak yolunun modellenmesi için şu iki yoldan birisi izlenebilir:

1-Gerçek sistem parametreleri ile analiz.

(3.2)

2-Dönüşüm büyüklükleri yardımı ile analiz.

Gerçek sistem parametreleriyle analizde, nötr noktalarından akan fiziksel artık akımlar kullanılır. (Faz-Bileşenleri Yöntemi) (13, 14).

Dönüşüm büyüklükleri yardımıyla analizde ise, nötr noktalarından akan sıfır bileşen (homopolar) akımlar kullanılır. Söz konusu dönüşüm, lineer bir dönüşüm olup literatürde

(3.3)

"Simetrik Bileşenler Teorisi" olarak geçer. Aslında genelleştirilmiş bir isimdir. Simetrik Bileşenler, bu bileşenleri ortaya koyan araştırmacıların isimleriyle anılır

(Fortescue, Kimbark, Clarke, Park vb. simetrik bileşenleri).

Enerji sistemlerinin analizinde ise, çoğunlukla Fortescue'nin simetrik bileşenleri kullanılır (15). Bunun nedeni, simetrik bileşenler teorisinin ilk orjinal yayını olması (AIEE, 1918) ve de fiziksel sistemlere daha yakın uygulanma özelliğinin -ölçme özellikleri gibi- bulunması şeklinde ifade edilebilir.

R,S,T fazlarına ilişkin fazör büyüklükleri  $A_R$ ,  $A_S$  ve  $A_T$  olmak üzere: bu üç fazör,  $A_1$  (doğru bileşen),  $A_2$  (ters bileşen) ve  $A_0$  (sıfır-homopolar bileşen) gibi. Üç ayrı fazör takımının bileşimi şeklinde ifade edilebilir (15). Genel tanımlamada kullanılan  $A$  fazörü, yerine göre akım veya gerilim olabilir. Yukarıdaki tanımlamanın matematiksel karşılığı aşağıdaki lineer dönüşümle ifade edilmektedir:

$$\begin{bmatrix} \underline{A}_R \\ \underline{A}_S \\ \underline{A}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{A}_1 \\ \underline{A}_2 \\ \underline{A}_0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

veya ters dönüşüm

$$\begin{bmatrix} \underline{A}_1 \\ \underline{A}_2 \\ \underline{A}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{A}_R \\ \underline{A}_S \\ \underline{A}_T \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

yazılabilir.

(3x3) boyutundaki dönüşüm matrisi, Orthonogal-Hermitien özelliğini taşımaktadır.  $\underline{a}$  ve  $\underline{a}^2$  kompleks operatörleri ise

$$\left. \begin{aligned} \underline{a} &= 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j.0,866 \\ \underline{a}^2 &= 1 \angle -120^\circ = -0,5 - j.0,866 \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

şeklinde olup,

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \quad (3.4)$$

eşitliği gerçekleşmektedir.

Böylece (3.2) bağıntısı yardımıyla, örneğin sıfır bileşen akımı

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3} (\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T) \quad (3.5)$$

şeklinde bul unacaktır. Sıfır bileşen akımı ile "artık akım ( $\underline{I}_A$ )" arasında

$$\underline{I}_A = 3 \cdot \underline{I}_0 \quad (3.6)$$

ilişkisi vardır.

Enerji sistemlerinde, şebekenin tipine göre toprak yolu modeli elde edilirken,

- Hava Hattı

- Yeraltı Kablosu

için ayrı ayrı inceleme gerekir. Hava hatları için inceleme yapılırken de, koruma iletkenleninin olup olmaması ayrı bir kriterdir. Öte yandan yeraltı kablosu için de kablo kılıfının topraklı olup olmamasına bakmak gerekir. Aşağıdaki ayrıtlarda çeşitli enerji sistemi tipleri için toprak yolu modelleri ayrı ayrı çıkarılmıştır.

### 3.1. Hava Hatlarında Toprak Yolunun Modellenmesi

#### 3.1.1. Koruma İletkeninin Olmaması Halinde Toprak Yolunun Modellenmesi

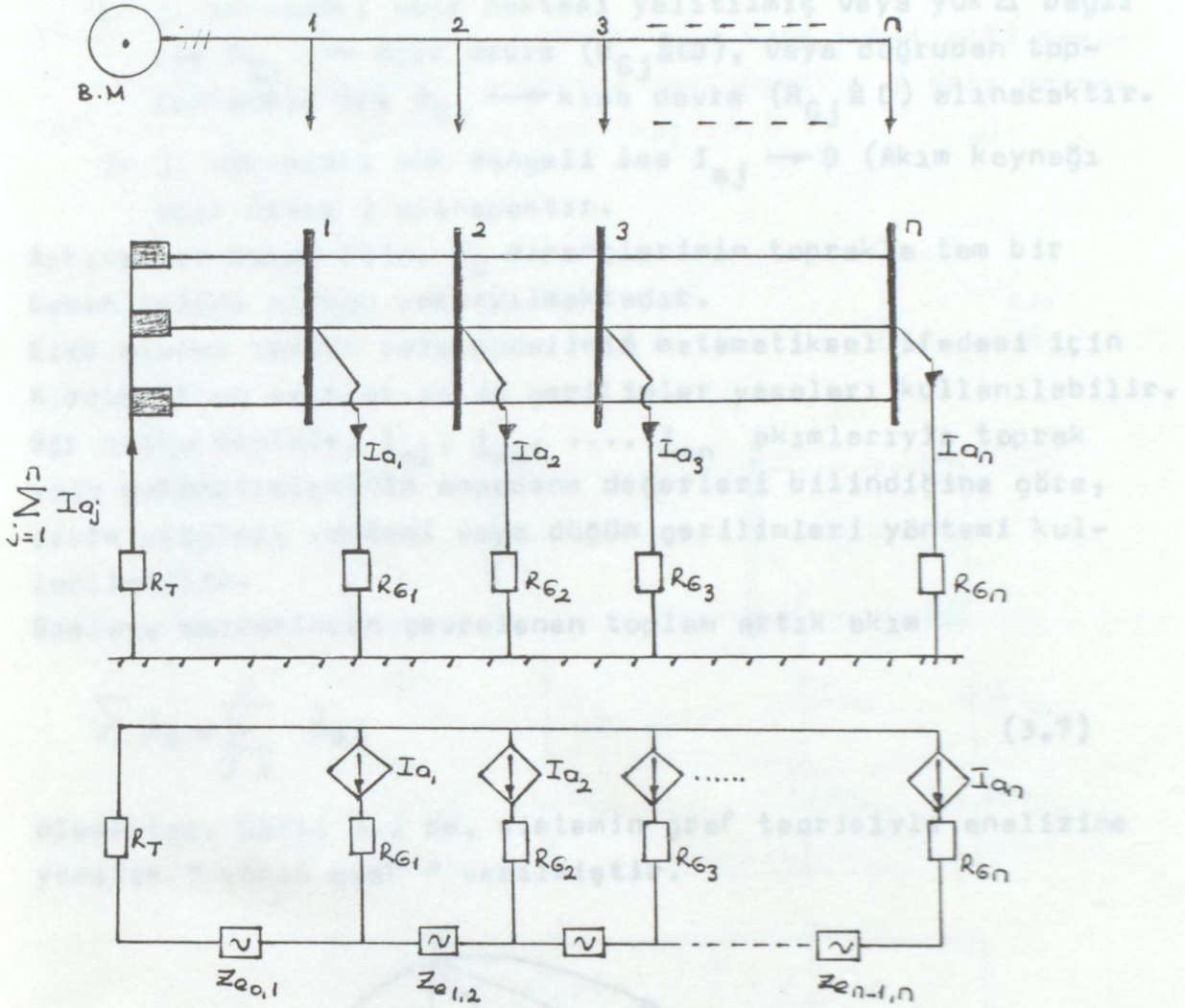
Pratik olarak, orta gerilim hava hatlarında ( $V \ll 66$  kV) çoğu kez koruma iletkeni kullanılmamaktadır. Bu durumda teorik olarak, toprağa geçen akımın sonsuz kesitte yayıldığı kabul edilirse, direklerin topraklama dirençlerinin ( $R_d$ ) artık akımın dağılımı üzerinde bir etkileri olmayacaktır. Bu açıdan incelendiğinde, aşağıdaki toprak yolu modelleri elde edilmiştir:

- Bir Merkezden Beslenen Enerji Sistemlerinde Toprak Yolu Modeli:

Şekil 3.1 de bir merkezden beslenen n tane tüketicili enerji sisteminin toprak yolu modeli verilmiştir.

( Nötr noktalarının topraklı olduğu varsayılmıştır.)





Şekil 3.1 Bir merkezden beslenen enerji sisteminin tek kutupla bağlantı şeması (a) ve toprak yolunun modeli (b ve c).

Burada  $R_{Gj}$  j. tüketicinin topraklama direnci ve  $R_T$  besleme merkezinin yayılma direnci,  $Z_{j-1,j}$  (j-1) ve j. tüketiciler arasında kalan toprak empedansdır.  $I_{Gj}$  artık akımları, o noktadaki yükün dengesizlik derecesine bağlı olduğu için, Şekil 3.1 de ( $\diamond$ ) şeklinde "bağımlı akım kaynağı" ile sembolize edilmiştir.

Söz konusu model için aşağıdaki iki özel durum da gözönüne alınmalıdır:

- 1- j. noktadaki nötr noktası yalıtılmış veya yük  $\Delta$  bağlı ise  $R_{Gj} \rightarrow$  Açık devre ( $R_{Gj} \triangleq \infty$ ), veya doğrudan topraklanmış ise  $R_{Gj} \rightarrow$  kısa devre ( $R_{Gj} \triangleq 0$ ) alınacaktır.
- 2- j. noktadaki yük dengeli ise  $I_{aj} \rightarrow 0$  (Akım kaynağı açık devre ) alınacaktır.

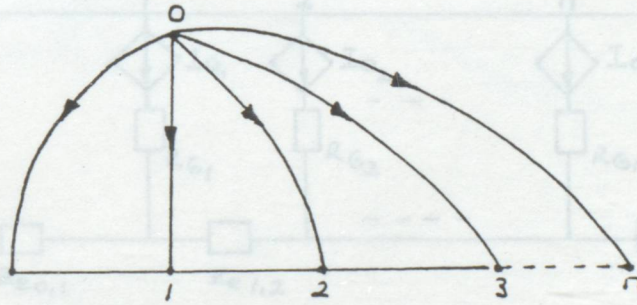
Ayrıca her durum için,  $R_G$  dirençlerinin toprakla tam bir temas içinde olduğu varsayılmaktadır.

Elde olunan toprak yolu modelinin matematiksel ifadesi için Kirchhoff'un akımlar ya da gerilimler yasaları kullanılabilir. Bir başka deyişle,  $I_{a1}, I_{a2}, \dots, I_{an}$  akımlarıyla toprak yolu parametrelerinin empedans değerleri bilindiğine göre, çevre akımları yöntemi veya düğüm gerilimleri yöntemi kullanılabilir.

Besleme merkezinden çevrelenen toplam artık akım

$$\sum I_a = \sum_{j=1}^n I_{aj} \quad (3.7)$$

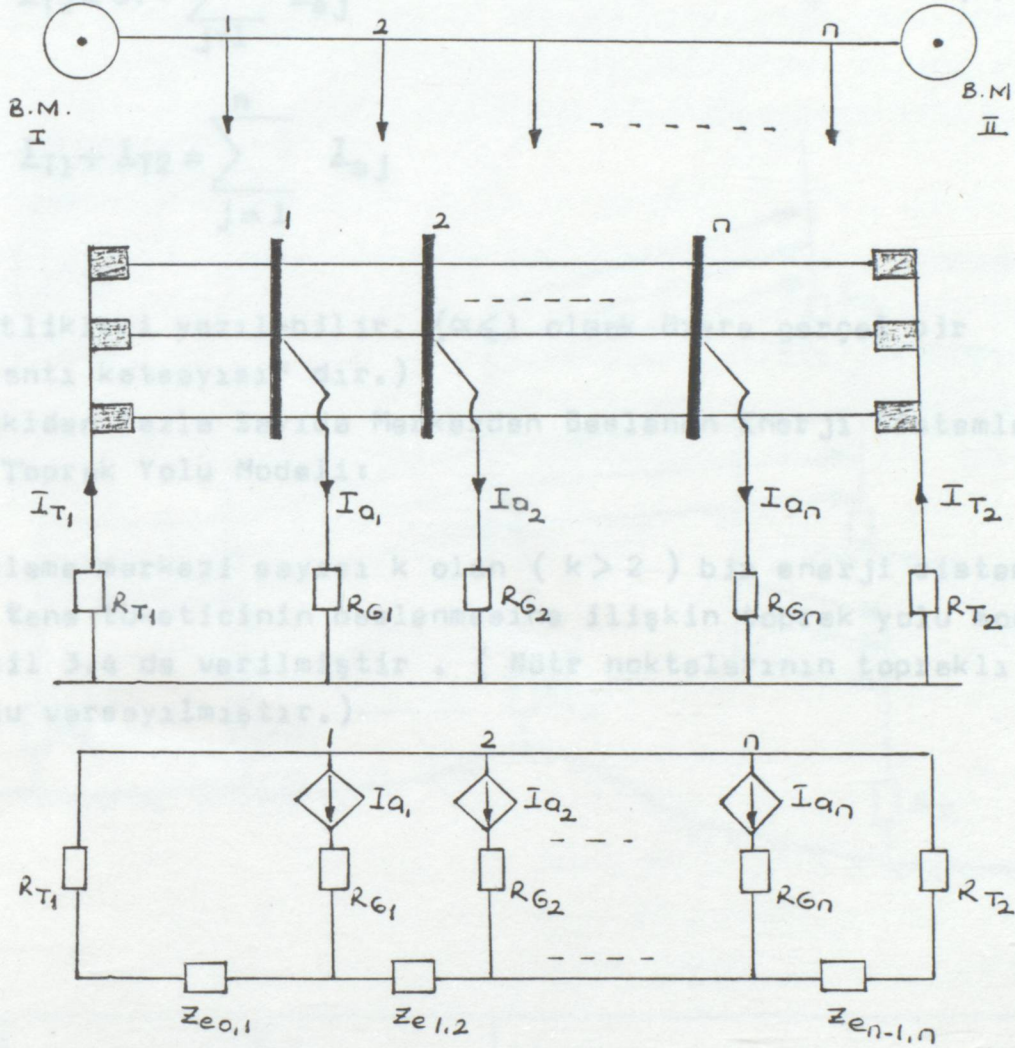
olacaktır. Şekil 3.2 de, sistemin graf teorisiyle analizine yönelik " yönlü graf " verilmiştir.



Şekil3.2 Sistemin toprak yolunu karakterize eden yönlü graf.

- İki Merkezden Beslenen Enerji Sistemlerinde Toprak Yolu Modeli:

Şekil 3.3 de iki merkezden beslenen n tane tüketicili enerji sisteminin toprak yolu modeli verilmiştir. ( Nötr noktalarının topraklı olduğu varsayılmıştır.)



Şekil 3.3 İki merkezden beslenen enerji sisteminin tek kutuplu bağlantı şeması (a) ve toprak yolunun modeli (b ve c).

Burada besleme merkezlerinden akacak artık akımların birbirine göre mertebesi, toprak yolu parametrelerinin empedans

değerleriyle ilgilidir .

Buna göre:

$$I_{T1} = (1 - \alpha) \sum_{j=1}^n I_{aj}$$

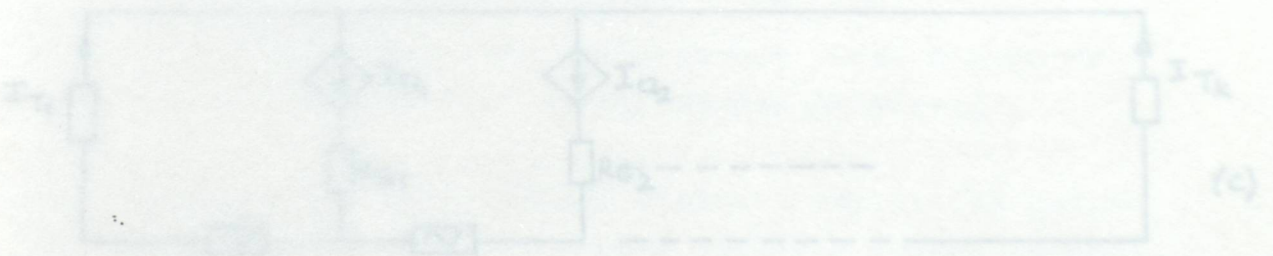
$$I_{T2} = \alpha \cdot \sum_{j=1}^n I_{aj}$$

$$I_{T1} + I_{T2} = \sum_{j=1}^n I_{aj}$$

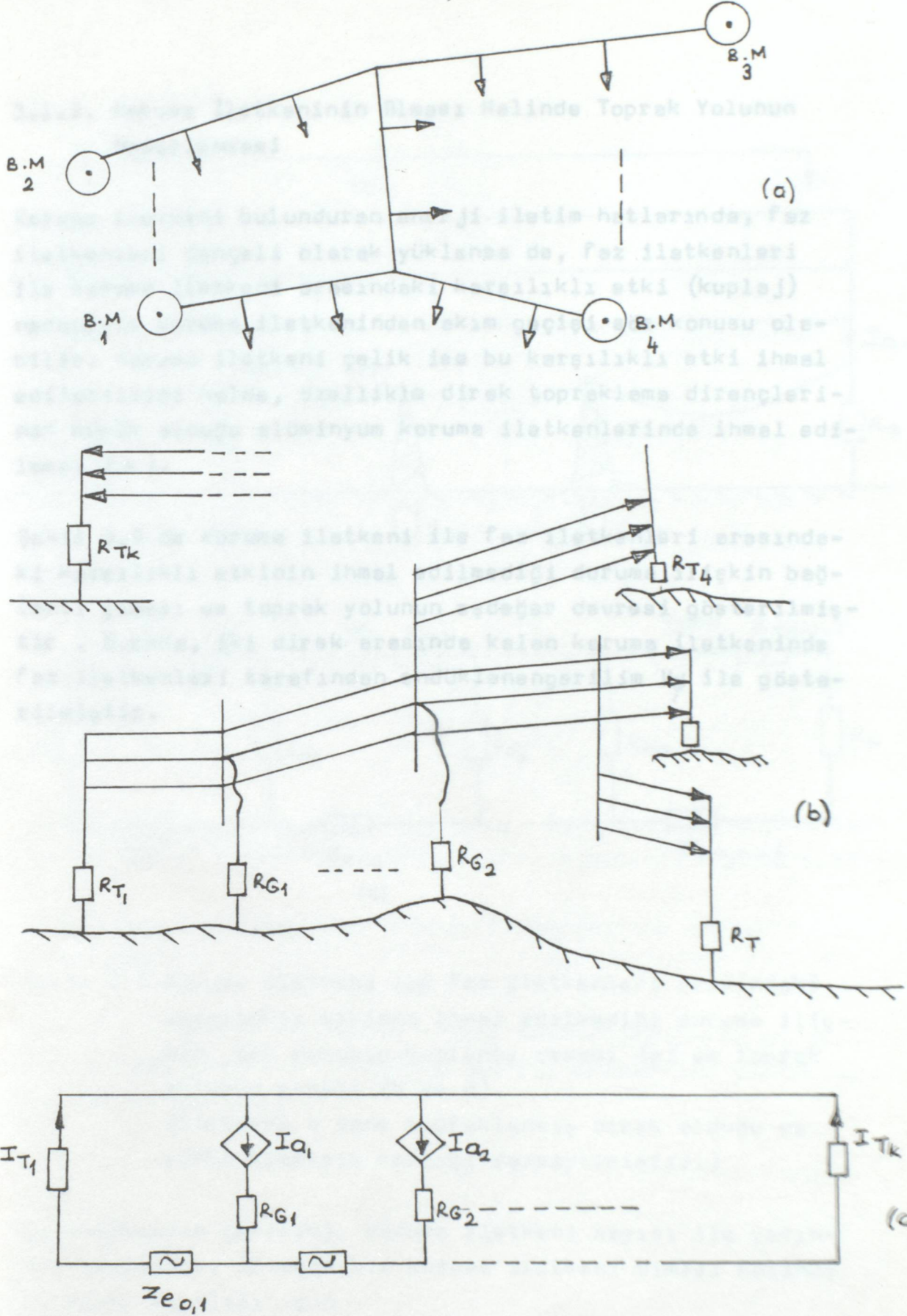
eşitlikleri yazılabilir. ( $\alpha \leq 1$  olmak üzere gerçel bir "oranlı katsayısı" dır.)

- İki den Fazla Seyide Merkezden Beslenen Enerji Sistemlerinde Toprak Yolu Modeli:

Besleme merkezi sayısı  $k$  olan ( $k > 2$ ) bir enerji sisteminde  $n$  tane tüketicinin beslenmesine ilişkin toprak yolu modeli Şekil 3.4 de verilmiştir . ( Nötr noktalarının topraklı olduğu varsayılmıştır.)



Şekil 3.4 - İki den fazla merkezden beslenen enerji sisteminin tek kutuplu topraklı şeması (a) ve toprak yolunun modeli (b ve c).

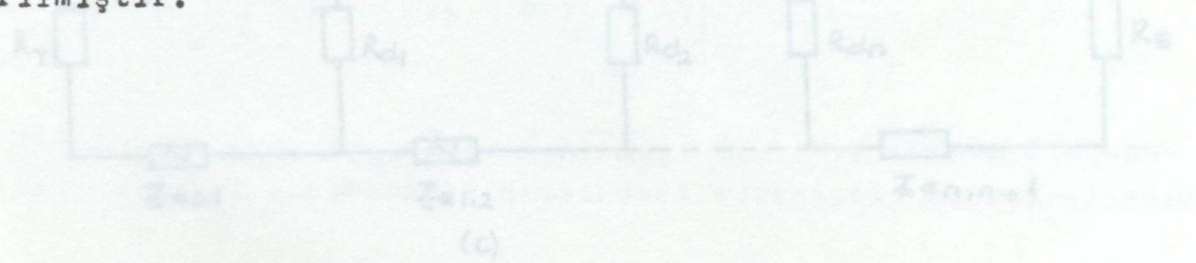


Şekil 3.4 k merkezden beslenen enerji sisteminin tek kutuplu bağlantı şeması (a) ve toprak yolunun modeli (b ve c).

### 3.1.2. Koruma İletkeninin Olması Halinde Toprak Yolunun Modellenmesi

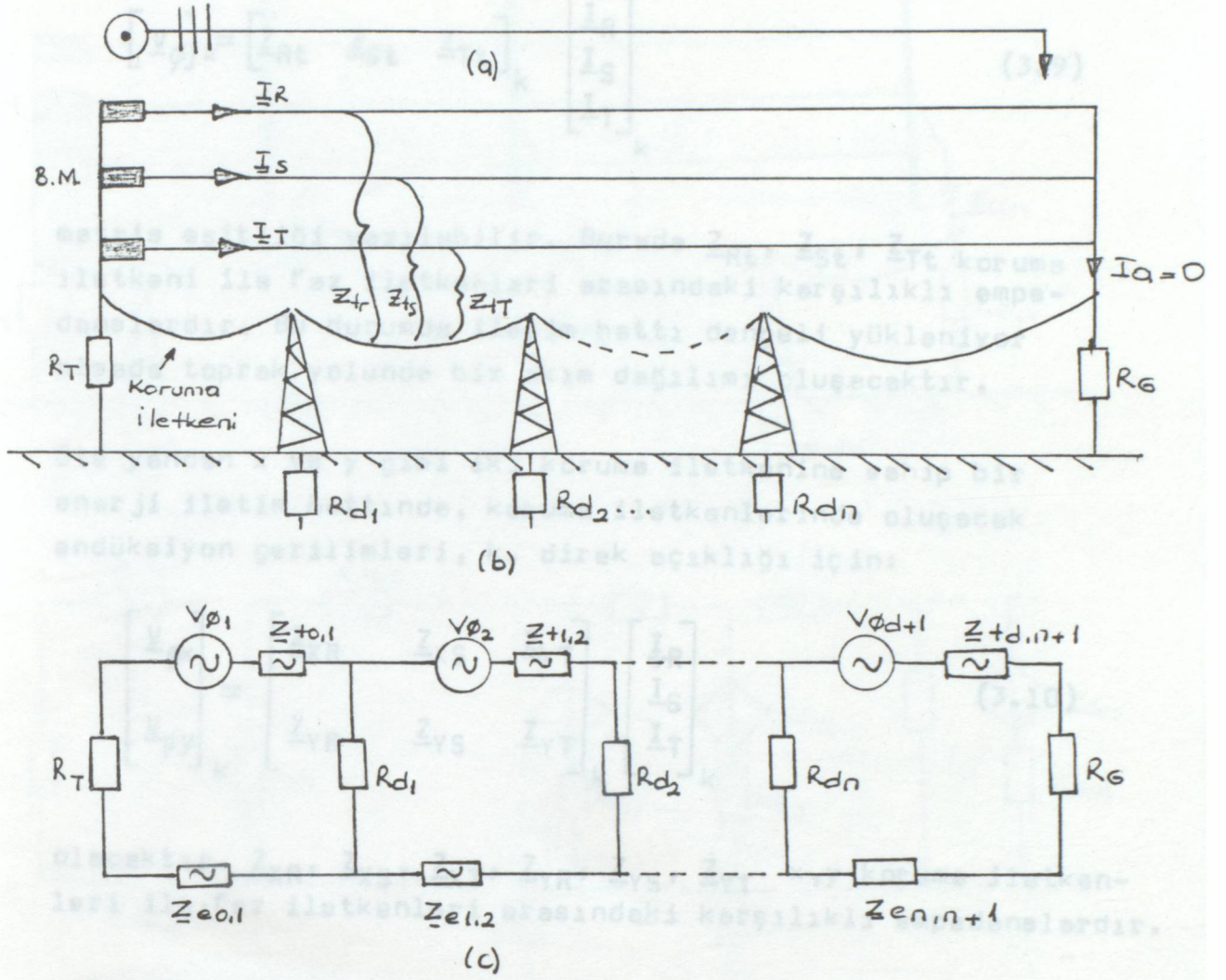
Koruma iletkeni bulunduran enerji iletim hatlarında, faz iletkenleri dengeli olarak yüklense de, faz iletkenleri ile koruma iletkeni arasındaki karşılıklı etki (kuplaj) nedeniyle koruma iletkeninden akım geçişi söz konusu olabilir. Koruma iletkeni çelik ise bu karşılıklı etki ihmal edilebildiği halde, özellikle direk topraklama dirençlerinin büyük olduğu alüminyum koruma iletkenlerinde ihmal edilemez (4).

Şekil 3.5 de koruma iletkeni ile faz iletkenleri arasındaki karşılıklı etkinin ihmal edilmediği duruma ilişkin bağlantı şeması ve toprak yolunun eşdeğer devresi gösterilmiştir. Burada, iki direk arasında kalan koruma iletkeninde faz iletkenleri tarafından endüklenen gerilim  $V_{\phi}$  ile gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Koruma iletkeni ile faz iletkenleri arasındaki karşılıklı etkinin ihmal edilmediği duruma ilişkin tek kutuplu bağlantı şeması (a) ve toprak yolunun eşdeğeri (b ve c).  
(Şekilde d tane topraklanmış direk olduğu ve yükün simetrik kaldığı varsayılmıştır.)

$V_{\phi}$  endüklenen gerilimi, koruma iletkeni sayısı ile yakından ilgilidir. Örneğin bir koruma iletkeni olması halinde  $K$  direk eşdeğeri için



Şekil 3.5 Koruma iletkeni ile faz iletkenleri arasındaki karşılıklı etkinin ihmal edilmediği duruma ilişkin tek kutuplu bağlantı şeması (a) ve toprak yolunun modeli (b ve c).  
(Sistemde d tane topraklanmış direk olduğu ve yükün simetrik kaldığı varsayılmıştır.)

$V_\phi$  endüksiyon gerilimi, koruma iletkeni sayısı ile yakından ilgilidir. Örneğin bir koruma iletkeni olması halinde k. direk açıklığı için

$$\begin{bmatrix} V_{\phi} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Z_{Rt} & Z_{St} & Z_{Tt} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix}_k \quad (3.9)$$

matris eşitliği yazılabilir. Burada  $Z_{Rt}$ ,  $Z_{St}$ ,  $Z_{Tt}$  koruma iletkeni ile faz iletkenleri arasındaki karşılıklı empedanslardır. Bu durumda iletim hattı dengeli yükleniyor olsada toprak yolunda bir akım dağılımı oluşacaktır.

Öte yandan x ve y gibi iki koruma iletkenine sahip bir enerji iletim hattında, koruma iletkenlerinde oluşacak endüksiyon gerilimleri, k. direk eğikliği için:

$$\begin{bmatrix} V_{\phi x} \\ V_{\phi y} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Z_{XR} & Z_{XS} & Z_{XT} \\ Z_{YR} & Z_{YS} & Z_{YT} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix}_k \quad (3.10)$$

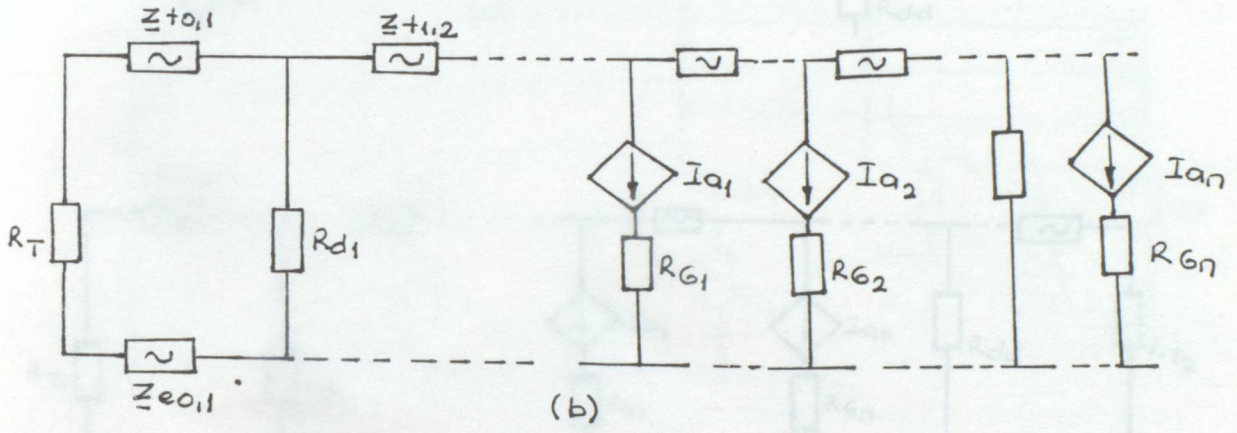
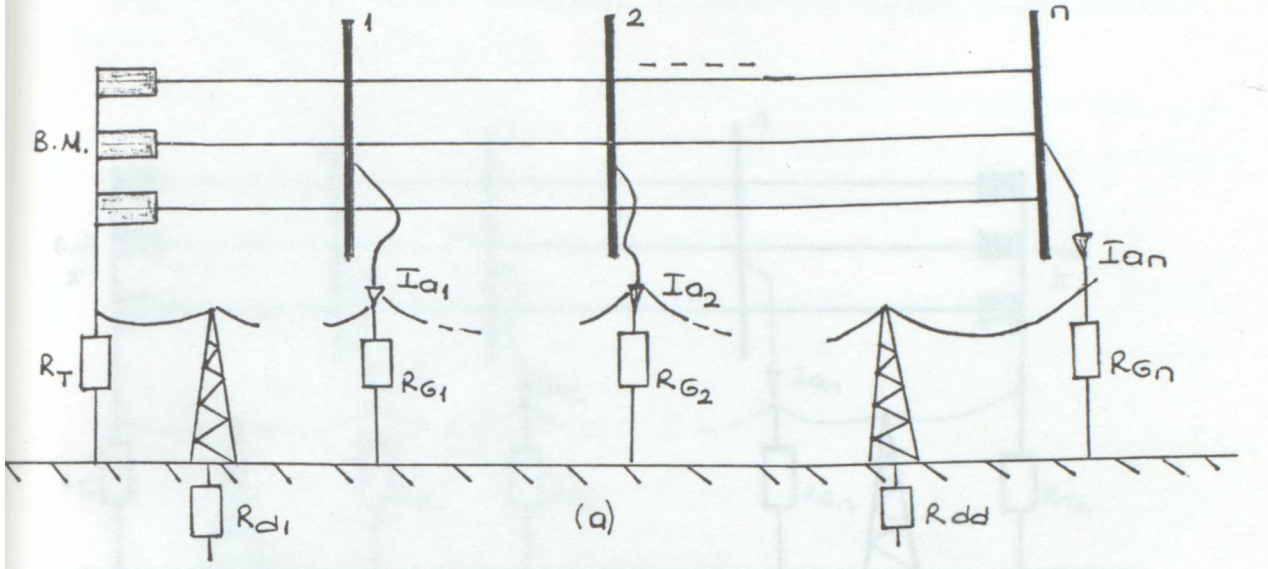
olecektir.  $Z_{XR}$ ,  $Z_{XS}$ ,  $Z_{XT}$ ,  $Z_{YR}$ ,  $Z_{YS}$ ,  $Z_{YT}$  x,y koruma iletkenleri ile faz iletkenleri arasındaki karşılıklı empedanslardır.

- Bir Merkezden Beslenen Enerji Sistemlerinde Toprak Yolu Modeli:

Şekil 3.6 da bir merkezden n tane tüketiciyi besleyen ve bir koruma iletkeni bulunduran enerji sisteminin toprak yolu modeli verilmiştir.

Şekil 3.7 de iki merkezden beslenen n tane tüketicili enerji sisteminin toprak yolu modeli verilmiştir.



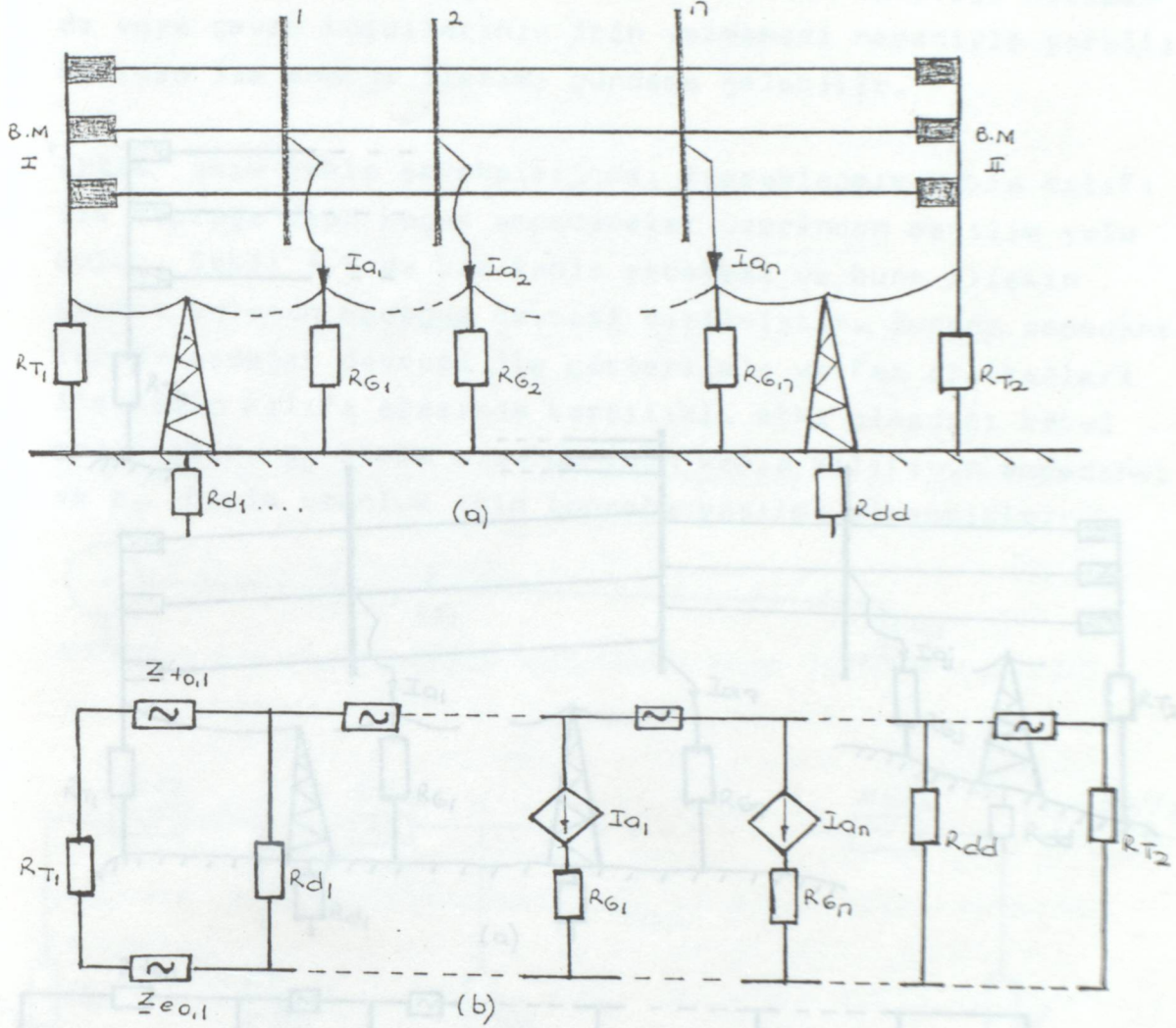


Şekil 3.6 Bir merkezden beslenen n tane tüketiciye ilişkin toprak yolu modelleri (a) ve (b).

- İki Merkezden Beslenen Enerji Sistemlerinde Toprak Yolu Modeli:

Şekil 3.7 de iki merkezden beslenen n tane tüketicili enerji sisteminin toprak yolu modeli verilmiştir.

n tane tüketicinin beslenmesine ilişkin toprak yolu modeli  
Şekil 3.8 de verilmiştir.



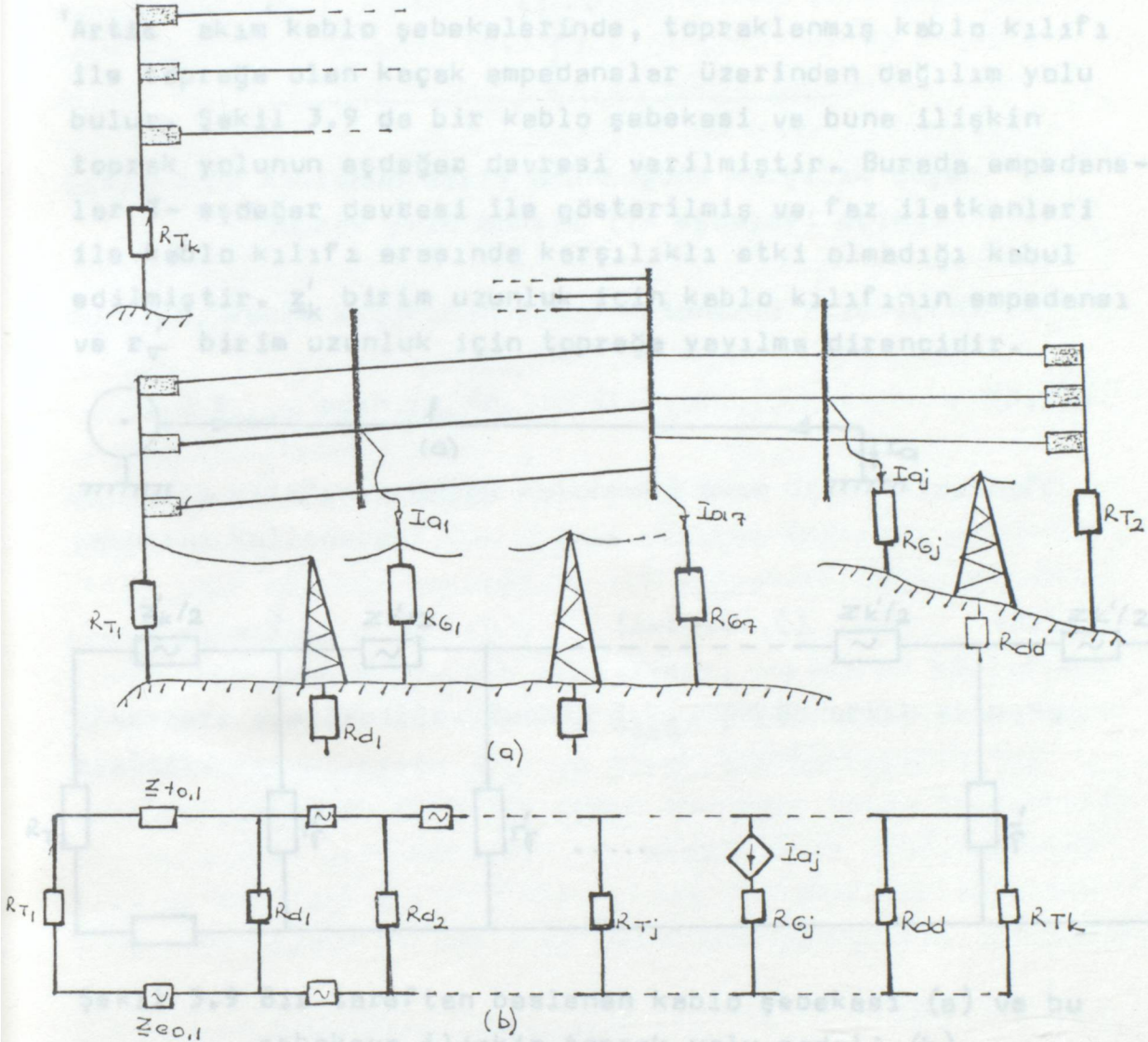
Şekil 3.7 İki merkezden beslenen  $n$  tane tüketicîye ilişkin toprak yolu modelleri (a ve b).

- İki'den Fazla Sayıda Merkezden Beslenen Enerji Sistemlerinde Toprak Yolu Modeli:

Besleme Merkezi sayısı  $k$  olan ( $k > 2$ ) bir enerji sisteminde

$n$  tane tüketicinin beslenmesine ilişkin toprak yolu modeli Şekil 3.8 de verilmiştir.

Hava hatları ile enerji iletiminin mümkün olmadığı hallerde veya çevre koşullarının izin vermemesi nedeniyle yeraltı kablolu ile enerji iletimini gündeme gelebilir.



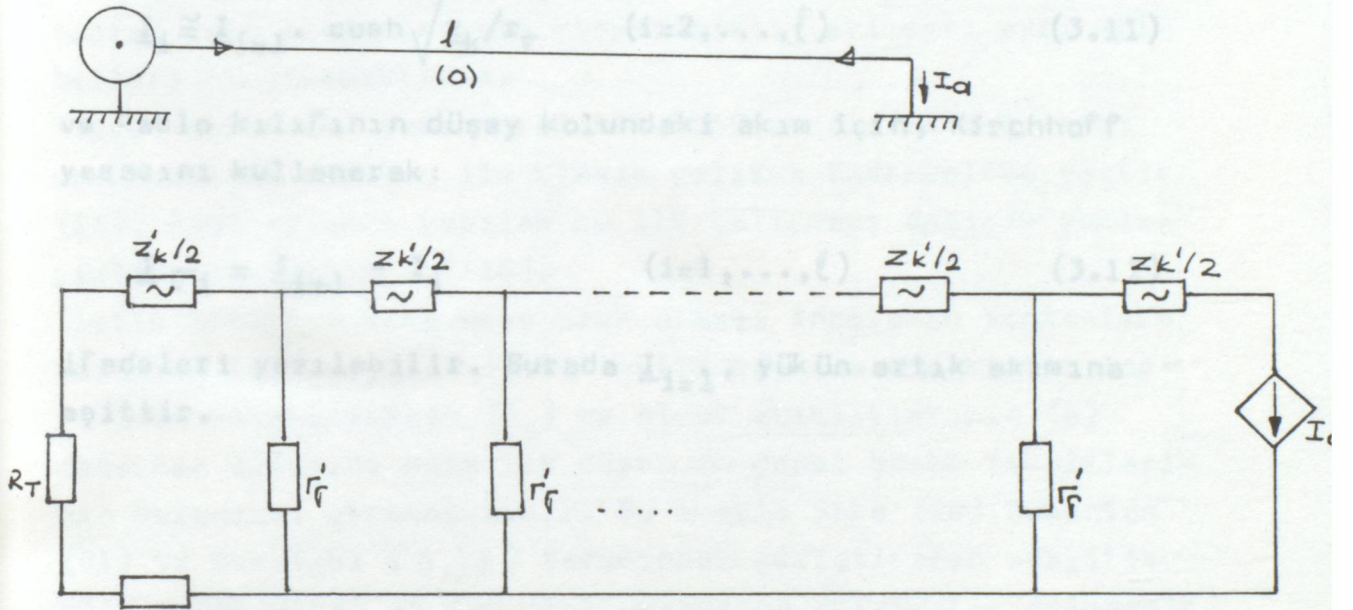
Şekil 3.8 İki merkezden beslenen  $n$  tane tüketiciye ilişkin toprak yolu modelleri (a ve b).

Kabloların birim uzunluğuna karşılık düşen toprak yolu

### 3.2. Yeraltı Kablosunda Toprak Yolunun Modellenmesi

Hava hatları ile enerji iletiminin mümkün olmadığı hallerde veya çevre koşullarının izin vermemesi nedeniyle yeraltı kablosu ile enerji iletimi gündeme gelebilir.

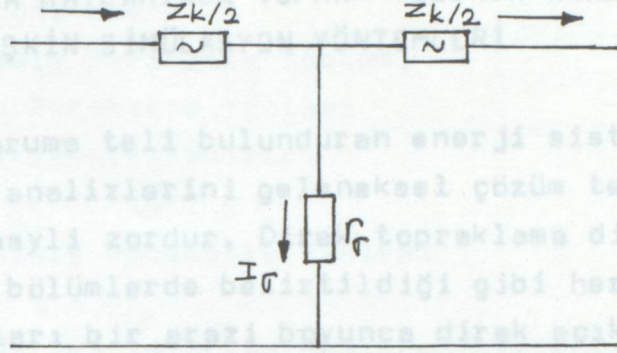
'Artık akım' kablo şebekelerinde, topraklanmış kablo kılıfı ile toprağa olan kaçak empedanslar üzerinden dağılım yolu bulur. Şekil 3.9 da bir kablo şebekesi ve buna ilişkin toprak yolunun eşdeğer devresi verilmiştir. Burada empedanslar T- eşdeğer devresi ile gösterilmiş ve faz iletkenleri ile kablo kılıfı arasında karşılıklı etki olmadığı kabul edilmiştir.  $z'_k$  birim uzunluk için kablo kılıfının empedansı ve  $r'_\sigma$  birim uzunluk için toprağa yayılma direncidir.



Şekil 3.9 Bir taraftan beslenen kablo şebekesi (a) ve bu şebekeye ilişkin toprak yolu modeli (b).  
( $l$ : kablo uzunluğudur.)

Kablo uzunluğu boyunca  $z'_k$  ve  $r'_\sigma$  parametrelerinin düzgün olarak yayıldıkları kabul edilirse, hiperbolik fonksiyonlar yardımıyla toprak yolundaki akım dağılımı bulunabilir. Kablonun birim uzunluğuna karşılık düşen toprak yolu

Şekil 3.10 da verilmiştir.



Şekil 3.10 Kablonun birim uzunluğuna karşılık düşen toprak yolu modeli (T- eşdeğeri için).

Literatürde toprak yolunun analizine yönelik çalışmalar Buradan, kablo kılıfının yatay kolundaki akım için:  $I_i \approx I_{i-1} \cdot \cosh \sqrt{z_k/r_g}$  (i=2,...,l) (3.11)

ve kablo kılıfının düşey kolundaki akım için, Kirchhoff yasasını kullanarak:

$$I_{\sigma i} = I_{i+1} - I_i \quad (i=1, \dots, l) \quad (3.12)$$

ifedeleri yazılabilir. Burada  $I_{i-1}$ , yükün artık akımına eşittir. dirençlerinin ( $R_g$ ) ve direk eğikliklerinin ( $e$ ) değişken olmasına karşılık düşen en genel çözüm tekniklerinin bulunması gerekmektedir. Bu amaçla Sebo (20), Dubanton (21) ve Besselabi (8,22) tarafından geliştirilen analitik çözüm yöntemleri en çok ilgi uyandıran çalışmalar içindedir.

#### 4.1. Sabit Parametre Yaklaşımı

Bu yöntemde, iletile hattı boyunca toprak yolu parametrelerinin sabit kaldığı varsayımı geçerlidir. Bir başka deyişle toprak telinin empedansı ile topraklama dirençlerinin her boyunda değişmediği kabul edilmektedir.

Sabit parametre kullanarak da iki ayrı yöntem kullanılarak  
BÖLÜM 4. HAVA HATLARINDA TOPRAK YOLUNUN ANALİZİNE  
İLİŞKİN SİMÜLASYON YÖNTEMLERİ

Özellikle koruma teli bulunduran enerji sistemlerinin toprak yolu analizlerini geleneksel çözüm teknikleriyle yapmak bir hayli zordur. Direk topraklama dirençlerinin daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi her an değişken değer almaları bir arazi boyunca direk açıklıklarının her zaman aynı değerde olmaması da hesaplamayı zorlaştırıcı unsurlar olarak gösterilebilir.

Literatürde toprak yolunun analizine yönelik çalışmalar çoğunlukla, faz-toprak kısa devresi için yapılmış çalışmalarlardır. Bu çalışmalarda şebekenin geometrik yapısı, toprak yolu elemanlarının karakteristikleri ayrı ayrı kriterleri oluşturmaktadır.

Toprak yolundaki parametrelerin üniform olarak dağıldığı varsayımıyla yapılan ilk klasik çalışma Endreyne'ye aittir (16). 1967 yılında yapılan bu ilk çalışmayı değişik yaklaşımlar izlemiştir (17-19).

İletim hattının kısa veya uzun olması incelenen yöntemlere üstünlük sağlamıştır. İletim hattı boyunca direklerin topraklama dirençlerinin ( $R_d$ ) ve direk açıklıklarının ( $a$ ) değişken olmasına karşılık düşen en genel çözüm tekniklerinin bulunması gerekmektedir. Bu amaçla Sebo (20), Dubanton (21) ve Dewalabi (8,22) tarafından geliştirilen analitik çözüm yöntemleri en çok ilgi uyandıran çalışmalar içindedir.

4.1. Sabit Parametre Yaklaşımı

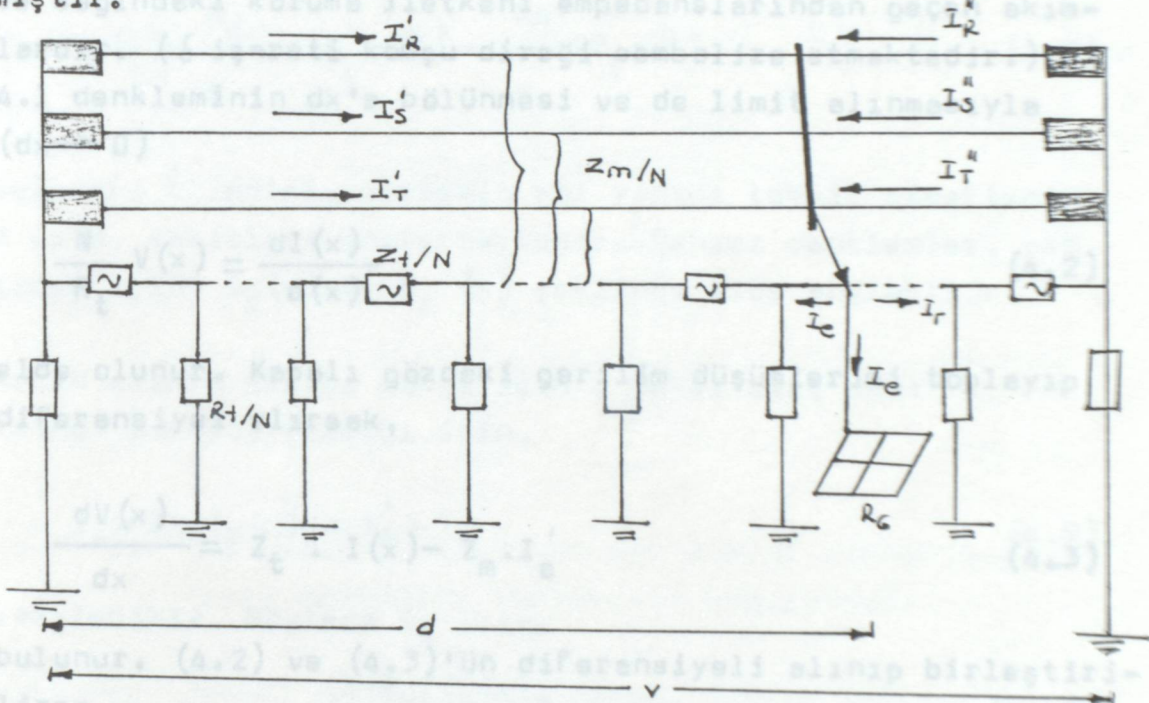
Bu yöntemde, iletim hattı boyunca toprak yolu parametrelerinin sabit kaldığı varsayımı geçerlidir. Bir başka deyişle toprak telinin empedansı ile topraklama dirençlerinin her boyunca değişmediği kabul edilmektedir.

Sabit parametre kullanarak da iki ayrı yöntem kullanılabilir. Bu yöntemler:

- Dağılmış Parametre Yöntemi
  - Toplu Parametre Yöntemi
- olarak sınıflandırılabilir.

#### 4.1.1. Dağılmış Parametre Yöntemi

Şekil 4.1 de iki taraftan beslenen bir enerji iletim sisteminde " Dağılmış Parametre Yöntemi " nin uygulanışı gösterilmiştir.



Şekil 4.1 İki taraftan beslenen bir enerji sisteminde dağılmış parametre yönteminin uygulanışı.

Dağılmış parametre yöntemi, genellikle, uzun enerji iletim hatlarında uygulanmaktadır (23). Aşağıda yöntemin analitik ifadesi verilmiştir:

Şekil 4.1 de  $R_t$  ve  $Z_t$ , sırasıyla, direklerin ortalama direncini ve iki direk arasında kalan koruma telinin empedansını göstermektedir. N ise, 1 km'lik uzunlukta bulunan direk

sayısını göstermektedir.

Faz iletkenleriyle koruma iletkeni arasındaki ortak empedans da, ortalama bir değerle ( $Z_m$ ) gösterilmiştir.

Şekil 4.1 de soldaki besleme merkezinden x mesafedeki direktteki akım i için:

$$\frac{V(x)}{R_d} = i(x) = I(x+\delta) - I(x) \quad (4.1)$$

yazılabilir. Burada  $I(x)$  ve  $I(x+\delta)$ , o direğin solundaki ve sağındaki koruma iletkeni empedanslarından geçen akımlardır. ( $\delta$  işareti komşu direği sembolize etmektedir.)

4.1 denkleminin dx'e bölünmesi ve de limit alınmasıyla ( $dx \rightarrow 0$ )

$$\frac{N}{R_t} V(x) = \frac{dI(x)}{dx} \quad (4.2)$$

elde olunur. Kapalı gözdeki gerilim düşümlerini toplayıp diferansiyel alırsak,

$$\frac{dV(x)}{dx} = Z_t \cdot I(x) - Z_m \cdot I'_a \quad (4.3)$$

bulunur. (4.2) ve (4.3)'ün diferansiyeli alınıp birleştirilirse

$$\frac{d^2 I(x)}{dx^2} - \alpha^2 \cdot I(x) = -\alpha^2 \cdot \frac{Z_m}{Z_t} \cdot I'_a \quad (4.4)$$

bulunur (25).

Buradan

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} - \alpha^2 \cdot V(x) = 0 \quad (4.5)$$

Şekil 4.2 de iki taraftan beslenen bir enerji iletim sisteminin de "Toplu Parametre Yönteminin" uygulaması gösterilmiştir.



Burada

$$\alpha = \sqrt{\frac{N \cdot Z_t}{R_d}} \quad (4.6)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

(4.4) ve (4.5)' in genel çözümleri:

$$I_\ell(x) = A_\ell e^{\alpha x} + B_\ell e^{-\alpha x} + \frac{Z_m}{Z_t} \cdot I_a' \quad (4.7)$$

$$V_\ell(x) = \frac{R_d}{N} \alpha \cdot A_\ell \cdot e^{\alpha x} - \frac{R_d}{N} \alpha B_\ell \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.8)$$

bulunur.  $\ell$  indisi, sistemin sol yanını temsil etmektedir. A ve B, sabitleri göstermektedir. Benzer denklemler, sağ taraf için  $I_r(x)$  ve  $V_r(x)$  şeklinde elde edilebilir.

Artık akımın aktığı nokta için, Şekil 4.1. den:  
 ( $x = d$ ;  $y = v-d$ ) olacağı için,

$$I_e = I + I_r + I_e = I_a' + I_a'' \quad (4.9)$$

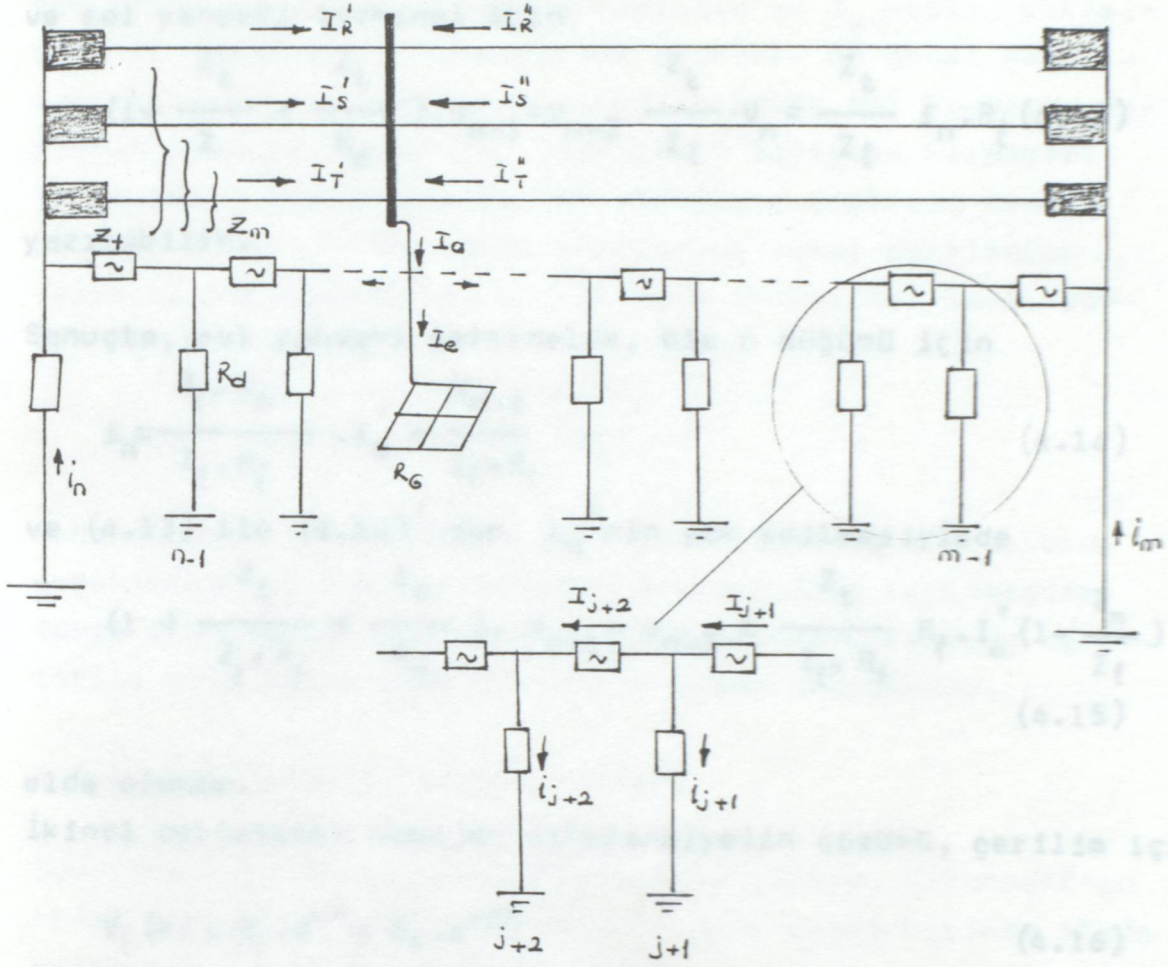
yazılabilir. Böylece  $I_e$  akımı

$$I_e = \frac{(1 - Z_m/Z_t) \cdot I_a}{1 + \frac{N}{\alpha} \left[ \frac{1}{\tanh(\alpha \cdot d)} + \frac{1}{\tanh[\alpha \cdot (v-d)]} \right]} \quad (4.10)$$

bulunmuş olur.

#### 4.1.2. Toplu Parametre Yöntemi

Şekil 4.2 de iki taraftan beslenen bir enerji iletim sisteminde " Toplu Parametre Yönteminin " uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 4.2 İki taraftan beslenen bir enerji sisteminde Toplu Parametre Yönteminin uygulanması.

Kirchhoff yasası gereği, her gözdeki toplam gerilim düşümünü sıfıra eşittir. Bu nedenle

$$I_{j+2} - \left(2 + \frac{Z_t}{R_d}\right) \cdot I_{j+1} + I_j - \frac{Z_m}{R_d} \cdot I_a' \quad (4.11)$$

(4.11) ifadesi  $j=2,3,\dots,n-2$  için gerçekleştirilen ikinci mertebeden bir diferansiyel denklemdir.

Artık akımın aktığı nokta için

$$-V_2 + \left(2 + \frac{Z_t}{R_d}\right) \cdot V_1 = I_a \cdot R_G \quad (4.12)$$

ve sol yandaki terminal için,

$$\left(1 + \frac{Z_t}{Z} + \frac{Z_t}{R_d}\right) \cdot V_{n-1} - V_{n-2} = \frac{Z_t}{Z_l} \cdot V_n = \frac{Z_t}{Z_l} i_n \cdot R_l \quad (4.13)$$

yazılabilir.

Sonuçta, sol yandaki terminalde, bir n düğümü için

$$i_n = \frac{Z_l - Z_m}{Z_l + R_l} \cdot I_a' - \frac{V_{n-1}}{Z_l + R_l} \quad (4.14)$$

ve (4.13) ile (4.14)' den  $i_n$ ' nin yok edilmesiyle

$$\left(1 + \frac{Z_t}{Z_l + R_l} + \frac{Z_t}{R_d}\right) \cdot V_{n-1} - V_{n-2} = \frac{Z_t}{Z_l + R_l} R_l \cdot I_a' \left(1 - \frac{Z_m}{Z_l}\right) \quad (4.15)$$

elde olunur.

İkinci mertebeden homojen diferansiyelin çözümü, gerilim için

$$V_l(k) = A_l \cdot e^{\alpha k} + B_l \cdot e^{-\alpha k} \quad (4.16)$$

olacaktır. Burada  $\alpha$  terimi

$$2 \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_t}{R_d}} \right) \quad (4.17)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Diğer taraftan, Şekil 4.2 deki  $I_e$  akımı, ara işlemler sonucu

$$I_e = \frac{(1 - Z_m/Z_t) \cdot I_a}{\coth(\alpha/2)} \quad (4.18)$$

olarak elde edilebilir. (23).  $Z_t$  ve  $Z_m$   $\Omega/\text{km}$  olarak birim empedans değeridir.

#### 4.2. Değişken Parametre Yaklaşım

Hat boyunca,  $R_d$  direk topraklama dirençlerinin,  $Z_t$  iki di-

rek arası koruma teli empedanslarının ve  $Z_m$  kuplaj etkisinin her zaman sabit kalmayacağı açıktır. En genel hal olması bakımından, sözkonusu parametrelerin her boyunca değişken alınması gerektiği açıktır. " Değişken Parametre Yaklaşımı " olarak bilinen bu yöntemde, analizin temeli aslında Kirchhoff'un temel akımlar ve temel gerilimler yasasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım içinde iki temel yöntem dikkat çekicidir.

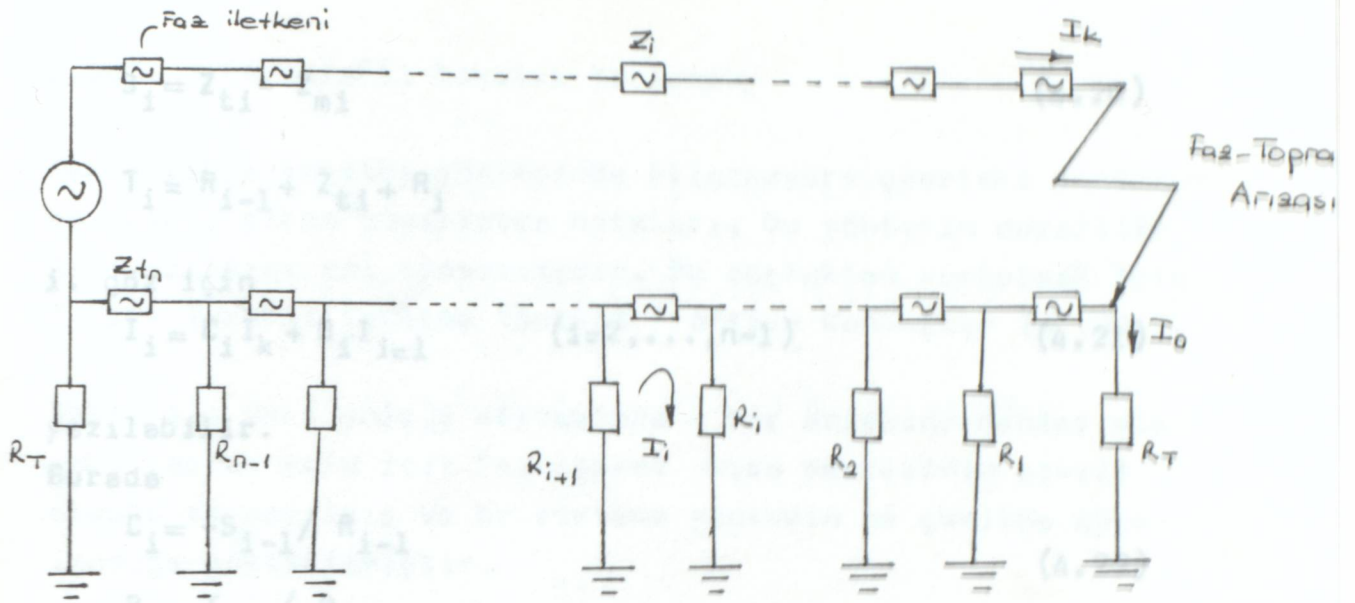
- Tek Taraflı Yoketme Yöntemi
- Çift Taraflı Yoketme Yöntemi

Daha önceden belirtildiği gibi bu yöntemler, literatürde çoğunlukla tek faz-toprak kısa devresi için verilmiştir. Ancak kısa devre halinden dengesiz işlemeye ve bunu karakterize eden artık akım kavramına geçmek mümkündür.

#### 4.2.1. Tek Taraflı Yoketme Yöntemi

Dawalibi ( 8 ) tarafından önerilen bu yöntem, Kirchhoff'un temel yasalarının bilgi işlem tekniğine uygun biçimde ifade edilmesinden başka birşey değildir.

Şekil 4.3 deki enerji sisteminde, toprak yolundan faz-toprak kısa devresi aktığı, bir başka deyişle dengesiz yüklenme yerine faz-toprak kısa devresinin gözönüne alındığı durum gözönüne alınmıştır.



Şekil 4.3 Bir taraftan beslenen basit bir sisteme "Tek Taraflı Yoketme Yönteminin" uygulanması,

Şekil 4.3 de

$$0. \text{ Göz için: } H_k \cdot I_k - \sum_{i=1}^n (S_i I_i) = V \quad (4.25)$$

$$1. \text{ Göz için: } -S_1 \cdot I_k + T_1 \cdot I_1 - R_1 \cdot I_2 = 0 \quad (4.26)$$

$$2. \text{ Göz için: } -S_2 \cdot I_k - R_1 \cdot I_1 + T_2 \cdot I_2 - R_2 \cdot I_3 = 0 \quad (4.19)$$

$$i. \text{ Göz için: } -S_i \cdot I_k - R_{i-1} \cdot I_{i-1} + T_i \cdot I_i - R_i \cdot I_{i+1} = 0 \quad (4.25)$$

$$(n-1). \text{ Göz için: } -S_{n-1} \cdot I_k - R_{n-2} \cdot I_{n-2} + T_{n-1} \cdot I_{n-1} - R_n \cdot I_n = 0 \quad (4.26)$$

$$n. \text{ Göz için: } -S_n \cdot I_k - R_{n-1} \cdot I_{n-1} + T_n \cdot I_n = 0$$

yazılabilir.

Burada  $H_k$ ,  $S_i$  ve  $T_i$  aşağıdaki gibi tanımlenmiştir;

$$H_k = \sum_{i=1}^n (Z_i + Z_{ti} - 2 \cdot Z_{mi})$$

$$S_i = Z_{ti} - Z_{mi} \quad (4.20)$$

$$T_i = R_{i-1} + Z_{ti} + R_i$$

i. göz için

$$I_i = C_i I_k + B_i I_{i-1} \quad (i=2, \dots, n-1) \quad (4.21)$$

yazılabilir.

Burada

$$C_i = -S_{i-1} / R_{i-1} \quad (4.22)$$

$$B_i = T_{i-1} / R_{i-1}$$

şeklinde tanımlanmıştır.

$R_G$  ağ direncinden geçen  $I_0$  akımını ise şu şekilde bulmak mümkündür:

$$I_0 = I_1 = \alpha_0 \cdot I_k + \gamma_0 \cdot I_1 = \alpha_1 \cdot I_k + \gamma_1 \cdot I_0 \quad (4.23)$$

$$\alpha_0 = \alpha_1 = 0 \quad (4.24)$$

$$\gamma_0 = \gamma_1 = 0$$

0 halde

$$I_1 = \alpha_i \cdot I_k + \gamma_i \cdot I_0 \quad (4.25)$$

$$\alpha_i = B_i \cdot \alpha_{i-1} + C_i \quad (4.26)$$

$$\gamma_i = B_i \cdot \gamma_{i-1}$$

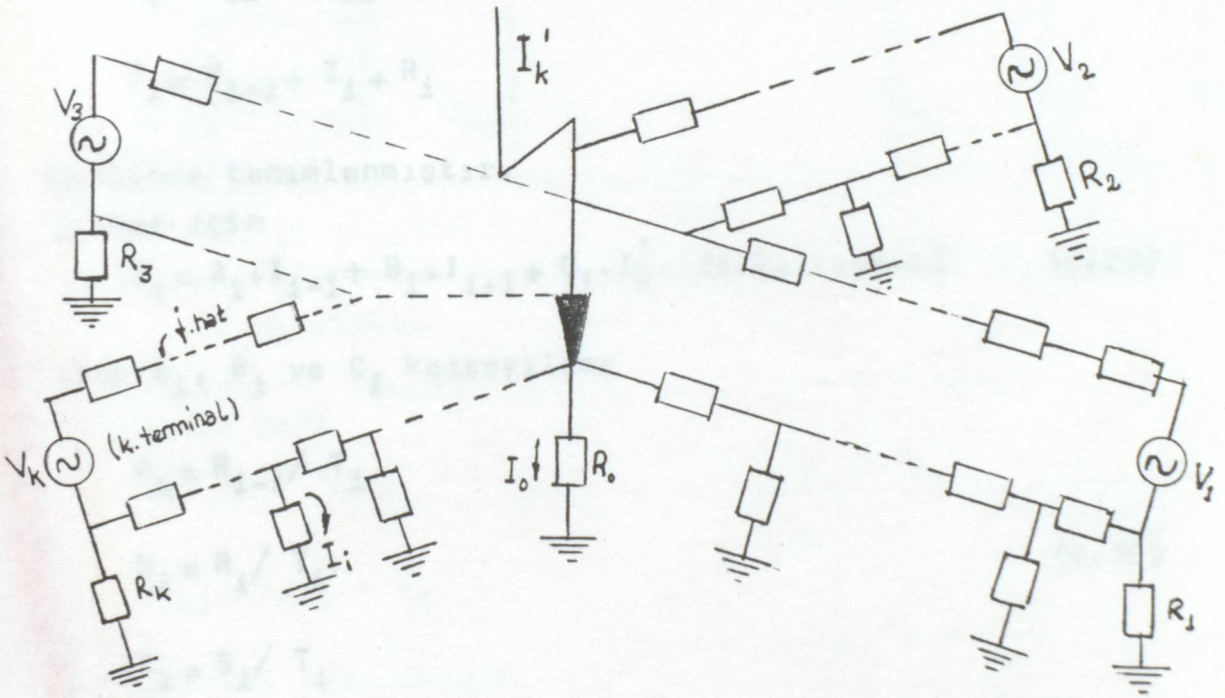
Şekil 4.4 Karşılıklı bir sisteme "Çift Taraflı Yönelim" eşitlikleri yazılabilir.

Şekil 4.4 de k. terminal ile j. iletim hattı arasında aşağıdaki denklemler yazılabilir.

#### 4.2.2. Çift Taraflı Yoketme Yöntemi

Tek taraflı yoketme yönteminde bilgisayara uyarlama esnasında ortaya çıkan yuvarlatma hataları, bu yöntemin duyarlılığını azaltıcı rol oynamaktadır. Bu zorluktan kurtulmak için " Çift Taraflı Yoketme Yöntemi " ortaya konmuştur ( 8 , 24 ).

Şekil 4.4 deki enerji sisteminde , bir öncekine benzer olarak , toprak yolu için faz-toprak kısa devresinin etkili olduğu varsayılmış ve bu sisteme yöntemin ne şekilde uygulandığı gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Karmaşık bir sisteme " Çift Taraflı Yoketme Yöntemi " nin uygulanması.

Şekil 4.4 de k. terminal ile j. iletim hattı arasında aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$\begin{aligned} 0. \text{ Göz için: } H_k \cdot I_k - \sum_{i=1}^n (S_i \cdot I_i) &= V_k \\ 1. \text{ Göz için: } -S_1 \cdot I_k + T_1 \cdot I_1 - R_1 \cdot I_2 + R_0 \cdot (I_0 - I_1) &= 0 \\ \text{---} & \\ i. \text{ Göz için: } -S_i \cdot I_k - R_{i-1} \cdot I_{i-1} + T_i \cdot I_i - R_i \cdot I_{i+1} &= 0 \\ \text{---} & \\ n. \text{ Göz için: } -S_n \cdot I_k - R_{n-1} \cdot I_{n-1} + T_n \cdot I_n + R_k \cdot (I_k - I_n) &= 0 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Burada:

$$\begin{aligned} H_k &= \sum_{i=1}^n (Z_i + Z_{ti} - 2 \cdot Z_{mi}) \\ S_i &= Z_{ti} - Z_{mi} \quad (j-k) \text{ arası} \quad (4.28) \\ T_i &= R_{i-1} + Z_i + R_i \end{aligned}$$

şeklinde tanımlanmıştır.

j. hat için

$$I_i = A_i \cdot I_{i-1} + B_i \cdot I_{i+1} + C_i \cdot I_k \quad (i=2, \dots, n-1) \quad (4.29)$$

olup  $A_i$ ,  $B_i$  ve  $C_i$  katsayıları

$$\begin{aligned} A_i &= R_{i-1} / T_i \\ B_i &= R_i / T_i \\ C_i &= S_i / T_i \end{aligned} \quad (4.30)$$

şeklinde tanımlanmışlardır. Çoğunlukla bu katsayılar pozitif ve 1'den küçük değerler alırlar.

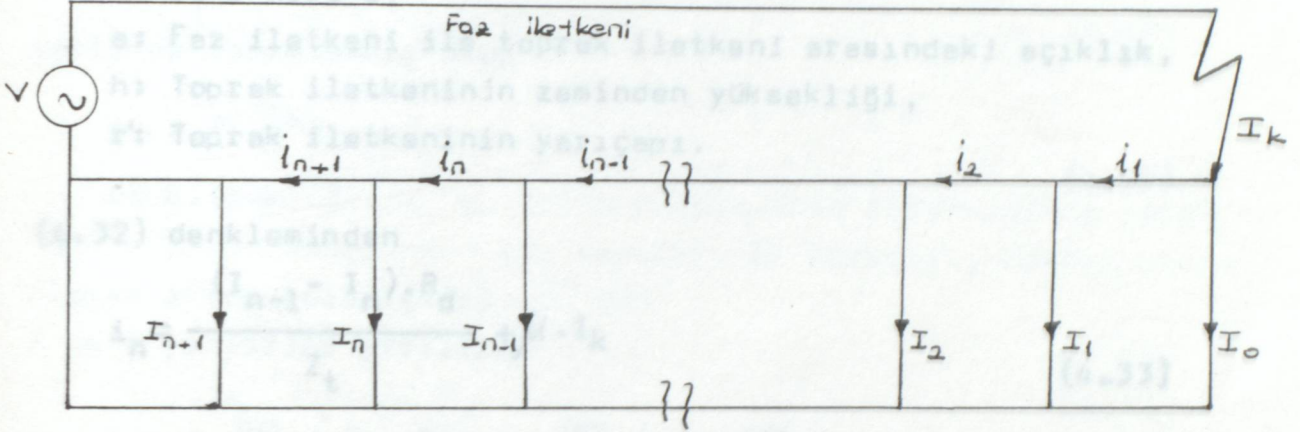
#### 4.3. Zincir Empedans Yöntemi

Verma et al (18), toprak yolunun analizine ilişkin olarak yaptıkları çalışmada, toprak yolundeki akım dağılımını



" Zincir Empedans " kavramını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yöntem, pratik ve bilgisayara kolaylıkla uygulanabilir özellikler taşımaktadır.

Şekil 4.5 de bir taraftan beslenen bir enerji sisteminde faz-toprak kısa devresi akım dağılımı graf üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Faz-toprak kısa devresi akımının graf üzerindeki dağılımı.

Şekil 4.5 den:

$$I_n = i_n - i_{n+1} \quad (4.31)$$

$$I_{n-1} = i_{n-1} - i_n$$

eşitlikleri yazılabilir.

Burada yatay kol akımları ( $i_1, i_2, \dots$ ) koruma telinden geçen akımları, düşey kol akımları ( $I_1, I_2 \dots$ ) ise direk topraklama dirençlerinden geçen akımları göstermektedir.

Şekil 4.5 den, ayrıca

$$i_n \cdot Z_t - \mu \cdot I_k \cdot Z_t + I_n \cdot R_d - I_{n-1} \cdot R_d = 0 \quad (4.32)$$

yazılabilir.

Burada  $\mu_1$  faz iletkeni ile koruma iletkeni arasındaki "kuplaj faktörü"dür. Bu faktör

$$\mu = \frac{\log(b/a)}{\log\left(\frac{2h}{r'}\right)} \quad (4.32)$$

şeklinde hesap edilir (12).

b: Faz iletkeni ile toprak iletkeninin görüntüsü arasındaki mesafe,

a: Faz iletkeni ile toprak iletkeni arasındaki açıklık,

h: Toprak iletkeninin zeminden yüksekliği,

r': Toprak iletkeninin yarıçapı.

(4.32) denkleminde

$$i_n = \frac{(I_{n-1} - I_n) \cdot R_d}{Z_t} + \mu \cdot I_k \quad (4.33)$$

$$i_{n-1} = \frac{(I_n - I_{n+1}) \cdot R_d}{Z_t} + \mu \cdot I_k \quad (4.40)$$

yazılabilir. Bu ifadeler (4.31) de yerlerine konursa

$$I_n = \frac{(I_{n-1} - I_n) \cdot R_d}{Z_t} + \mu \cdot I_k - \frac{(I_n - I_{n+1}) \cdot R_d}{Z_t} - \mu \cdot I_k \quad (4.34)$$

veya,

$$\frac{I_n \cdot Z_t}{R_d} = (I_{n+1} - I_n) - (I_n - I_{n-1}) \quad (4.35)$$

Diğer taraftan

$$I_n = A \cdot e^{\alpha n} + B \cdot e^{-\alpha} \quad (4.36)$$

şeklinde bir diferansiyel denkleme dönüşecektir (25).

(4.31) ve (4.32) yardımıyla

$$i_n = a \cdot e^{\alpha n} + b \cdot e^{-\alpha n} + \mu \cdot I_k \quad (4.37)$$

yazılabilir.

Burada

$$\alpha = \sqrt{Z_t / R_d} \quad (4.38)$$

şeklinde tanımlanmış olup

$$A = a \cdot (1 - e^{-\alpha}) \quad (4.39)$$

$$B = b \cdot (1 - e^{-\alpha})$$

olarak ifade edilmiştir.

A ve B yerlerine yazılırsa

$$i_n = A \cdot e^{\alpha n} / (1 - e^{-\alpha}) + B \cdot e^{-\alpha n} / (1 - e^{-\alpha}) + \mu \cdot I_k \quad (4.40)$$

bulunur. Hat yeterince uzun ise, akımın üstel bileşenleri sifire gider ve

$$I_n = B \cdot e^{-\alpha n} \quad (4.41)$$

$$i_n = B \cdot e^{-\alpha n} / (1 - e^{-\alpha}) + \mu \cdot I_k$$

bulunur. Arızanın olduğu noktada  $n=0$  olacağından  $I_0 = B$  bulunur.

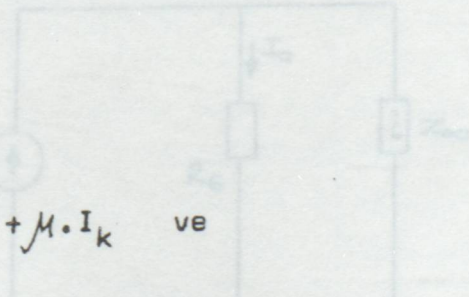
Şekil 4.5 den

$$I_k = I_0 + i_1 \quad (4.42)$$

olduğundan

$$I_k = B / (1 - e^{-\alpha}) + \mu \cdot I_k \quad \text{ve} \quad (4.43)$$

$$B = I_k \cdot (1 - e^{-\alpha}) \cdot (1 - \mu) = I_0$$



Şekil 4.6 Sistemin karakterize eden Norton Eşdeğer Devresi.

elde edilir. Sonuçta  $i_1$  'den geçen akımın değeri,

$$i_1 = I_k \cdot \left[ e^{-\alpha} + \mu \cdot (1 - e^{-\alpha}) \right] \quad (4.44)$$

bulunur. Arızanın olduğu direğin topraklama direncinde oluşan gerilim

$$\begin{aligned} V_d &= I_0 \cdot R_d \\ &= I_k \cdot (1 - e^{-\alpha}) \cdot (1 - \mu) \cdot R_d \\ &= I_k \cdot Z_\infty \end{aligned} \quad (4.45)$$

olacaktır. Burada  $Z_\infty$  'e, arıza noktasından bakıldığında görülen " Zincir Empedans " adı verilir. Bu büyüklük, hattın uzunluğundan bağımsızdır: (4.45) den

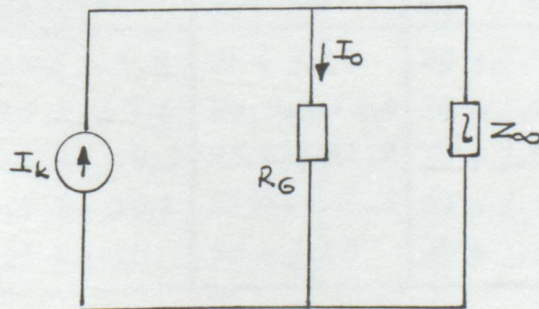
$$Z_\infty = (1 - e^{-\alpha}) \cdot (1 - \mu) \cdot R_d \quad (4.46)$$

olduğu görülür. Hiperbolik fonksiyonlarda gerekli kısaltmalar yapılırsa, sonuçta

$$Z_\infty = \sqrt{Z_t \cdot R_d} (1 - \mu) \quad (Z_t \ll R_d \text{ ise}) \quad (4.47)$$

bulunmuş olur.

Arıza noktasından bakıldığında, sisteme ilişkin Norton Eşdeğer Devresi ise Şekil 4.6 da gösterilmiştir.

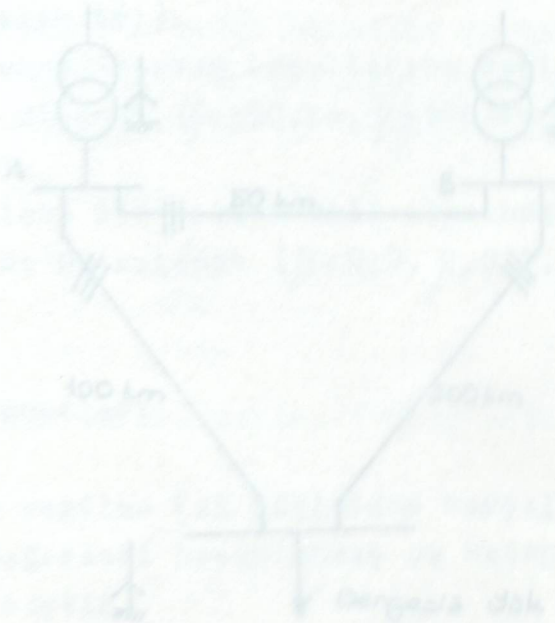


Şekil 4.6 Sistemi karakterize eden Norton Eşdeğer Devresi.

Böylece topraklama ağından geçen akımın değeri,

$$I_0 = \frac{Z_\infty}{R_G + Z_\infty} \cdot I_k \quad (4.48)$$

Bu bölümde toprak yolunun sayı ve analizi yapılmıştır. Bu bölüm için Şekil 5.1 de verilen 134 kV luk enerji sistemi seçilmiştir. C barasından dengesiz güçler çekilmektedir. Sistem topraklanmış olup, faz güçleri Tablo 5.1 de verilmiştir.



Şekil 5.1 Örnek sistemin tek kutuplu devrenti şeması.

Tablo 5.1

Örnek sistemin faz güçleri.

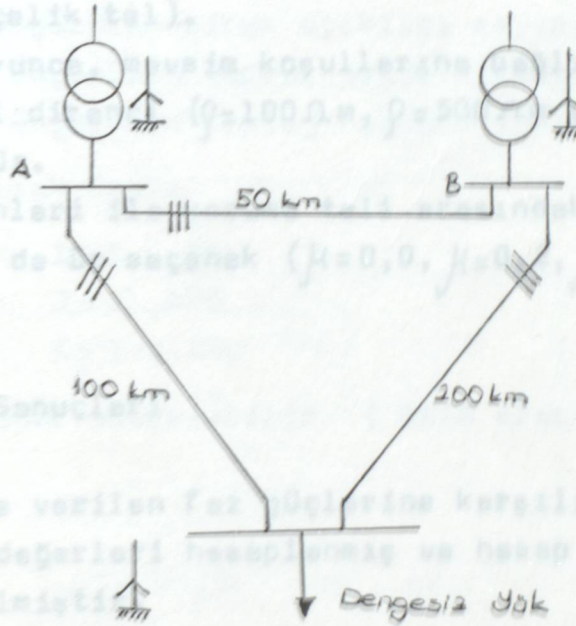
Fazlar kodu	$S_1$ (MVA/f)	$S_2$ (MVA/f)	$S_3$ (MVA/f)
1	$14 + j7,0$	$26 + j13$	$20 + j10$
2	$15,2 + j7,6$	$24,8 + j12,4$	$20 + j10$
3	$16,4 + j8,2$	$23,6 + j11,8$	$20 + j10$
4	$17,6 + j8,8$	$22,4 + j11,2$	$20 + j10$
5	$20 + j10$	$20 + j10$	$20 + j10$

Sisteminde G<sub>0</sub> sayı simetrik olarak seçilmiştir (G<sub>0</sub>=2000, 20000 ve 200000).

## BÖLÜM 5. SAYISAL UYGULAMA

### 5.1. Giriş ve Açıklama

Bu bölümde toprak yolunun sayısal analizi yapılmıştır. Bu amaç için Şekil 5.1 de verilen 154 kV luk enerji sistemi seçilmiştir. C barasından dengesiz güçler çekilmektedir. Sistem topraklanmış olup, faz güçleri Tablo 5.1 de verilmiştir.



Şekil 5.1 Örnek sistemin tek kutuplu bağlantı şeması.

Tablo 5.1

Örnek sistemin faz güçleri.

İşleme kodu	$\underline{S}_R$ (MVA/f)	$\underline{S}_S$ (MVA/f)	$\underline{S}_T$ (MVA/f)
1	$14 + j.7,0$	$26 + j.13$	$20 + j.10$
2	$15,2 + j.7,6$	$24,8 + j.12,4$	$20 + j.10$
3	$16,4 + j.8,2$	$23,6 + j.11,8$	$20 + j.10$
4	$17,6 + j.8,8$	$22,4 + j.11,2$	$20 + j.10$
5	$20 + j.10$	$20 + j.10$	$20 + j.10$

Sistemde üç ayrı simetrik direk açıklığı (a=300m, e=400 m ve

a=500 m ) öngörülmüştür. Direklerin topraklama dirençleri, tüm güzergah boyunca sabit değerlerde olmak üzere

$$R_d = 0,02 \cdot \rho \quad (\Omega) \quad (5.1)$$

seçilmiştir. Topraklama ağı direnci için ise

$$R_T = 0,005 \cdot \rho \quad (\Omega)$$

Kabul edilmiştir.

Hat boyunca tek devreli koruma teli çekilmiştir. (50 mm<sup>2</sup> = Galvanizli çelik tel).

Güzergeh boyunca, mevsim koşullarına bağlı olarak üç ayrı toprak özgül direnci ( $\rho = 100 \Omega m$ ,  $\rho = 500 \Omega m$  ve  $\rho = 1000 \Omega m$ ) öngörülmüştür.

Faz iletkenleri ile koruma teli arasındaki karşılıklı kuplaj için de üç seçenek ( $\mu = 0,0$ ,  $\mu = 0,2$ ,  $\mu = 0,3$ ) seçilmiştir.

## 5.2. Hesap Sonuçları

Tablo 5.1 de verilen faz güçlerine karşılık düşen " Artık Akım- $3I_0$  " değerleri hesaplanmış ve hesap sonuçları Tablo 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.2

Örnek sistemde artık akımlar.

İşleme kodu	$3I_0$ (A)
1	44
2	35
3	26
4	17
5	0

Topraklama ağından geçen akım payı  $I_T$  olmak üzere, topraklama ağında oluşan  $V_T$  gerilimi

$$V_T = R_T \cdot I_T \quad (5.1)$$

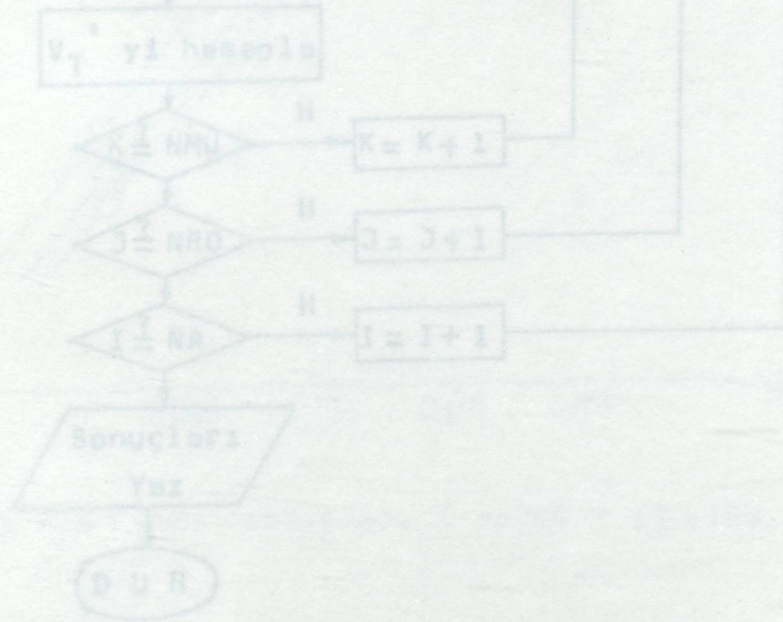
ifadesiyle hesaplanmıştır. Bu gerilimin artık akım eksi olmak üzere değişimi, çeşitli parametrelere ve işleme koşullarına göre Şekil 5.3 - Şekil 5.11 de verilmiştir. Şekil 5.2 de hesaplamaların dayandığı algoritmaya ilişkin bilgisayar akış diyagramı verilmiştir. Burada:

- NA → Öngörülen direk açıklığı sayısı
- NRO → Öngörülen toprak özgül direnci sayısı
- NMU → Öngörülen kuplaj faktörü sayısı

şeklinde olmak üzere

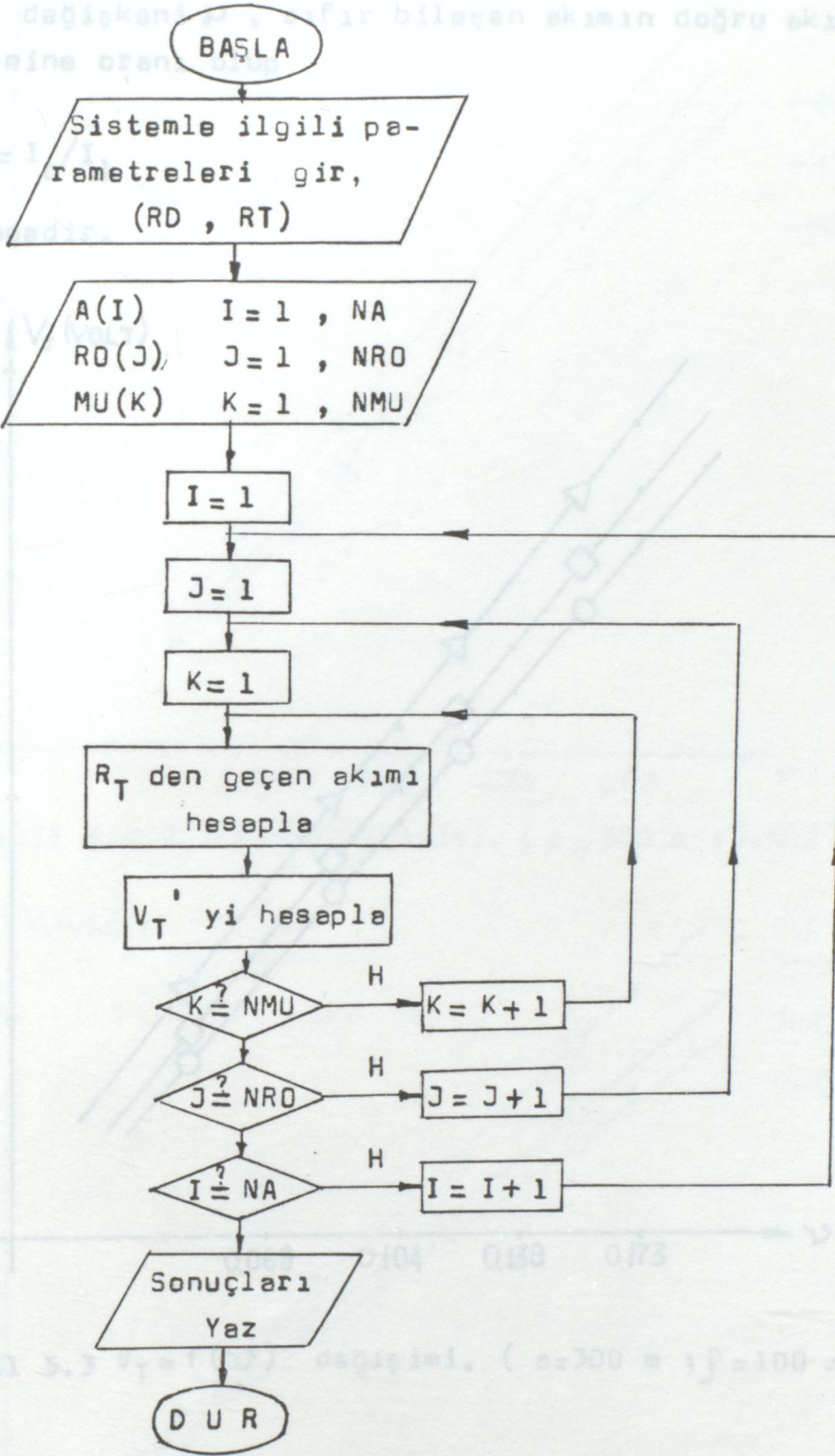
- A(I) : I = 1 , NA
- RO(J) : J = 1 , NRO
- MU(K) : K = 1 , NMU

diziler halinde okutulabilir ( DATA olarak verilebilir.)



Şekil 5.2 ilgili hesap yöntemine ilişkin bilgisayar akış diyagramı.



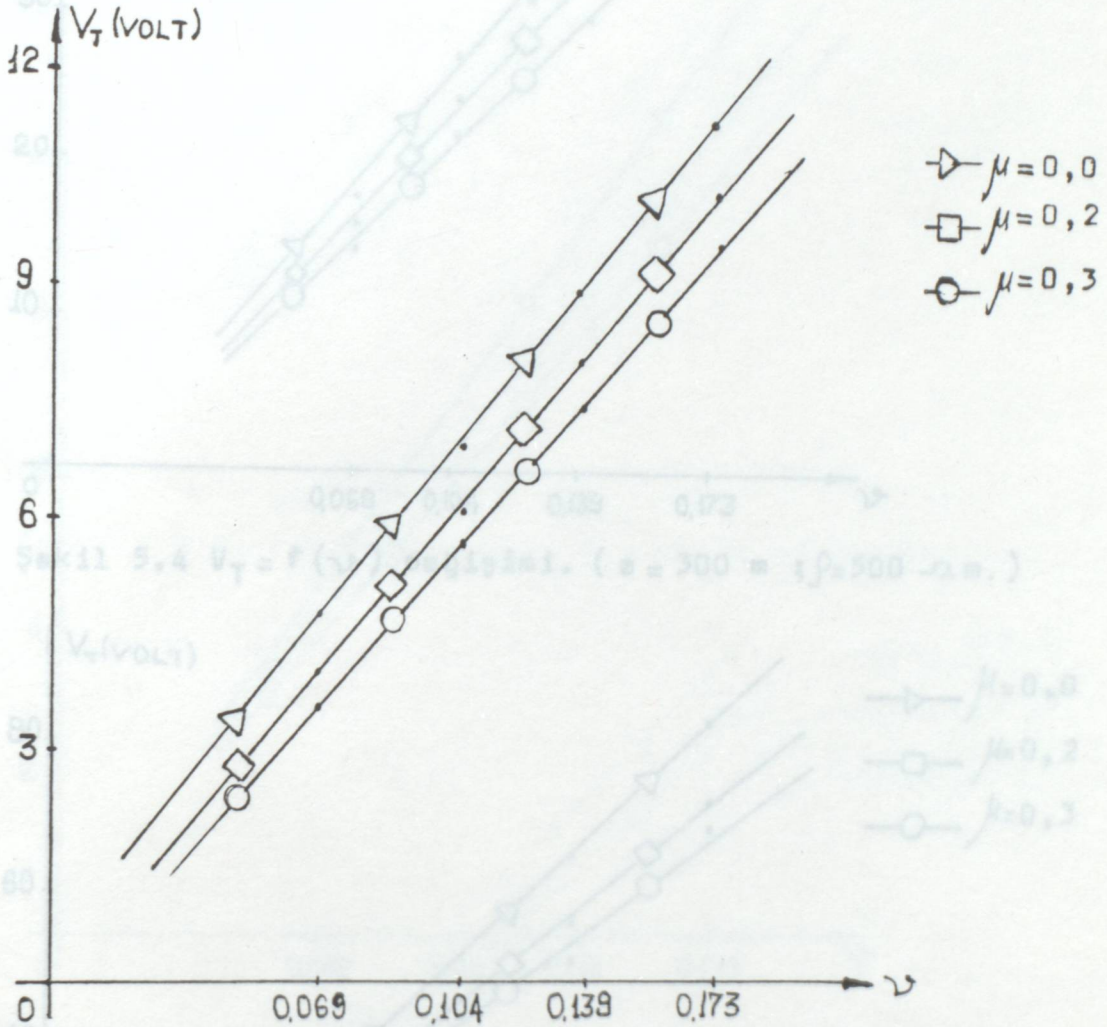


Şekil 5.2 İlgili hesap yöntemine ilişkin bilgisayar akış diyagramı.

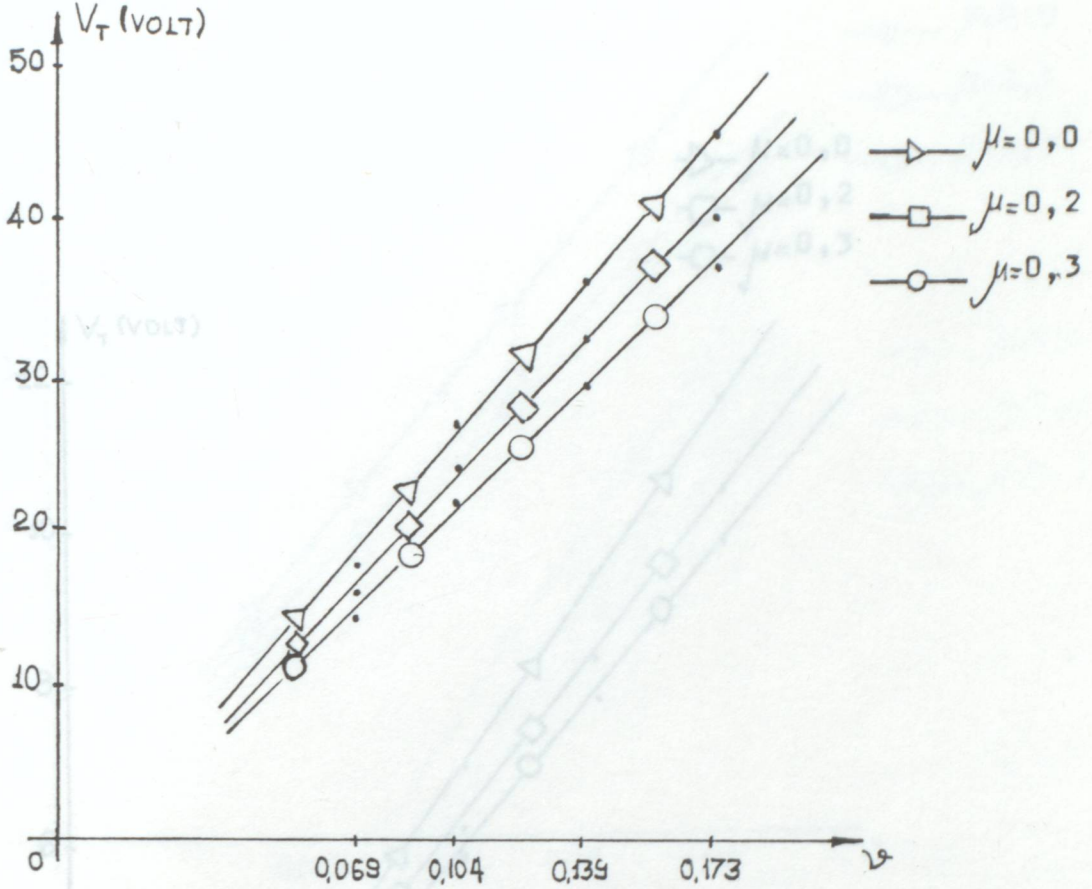
Apsis değişkeni  $\nu$ , sıfır bileşen akımın doğru akımı bileşenine oranı olup

$$\nu = I_0 / I_1$$

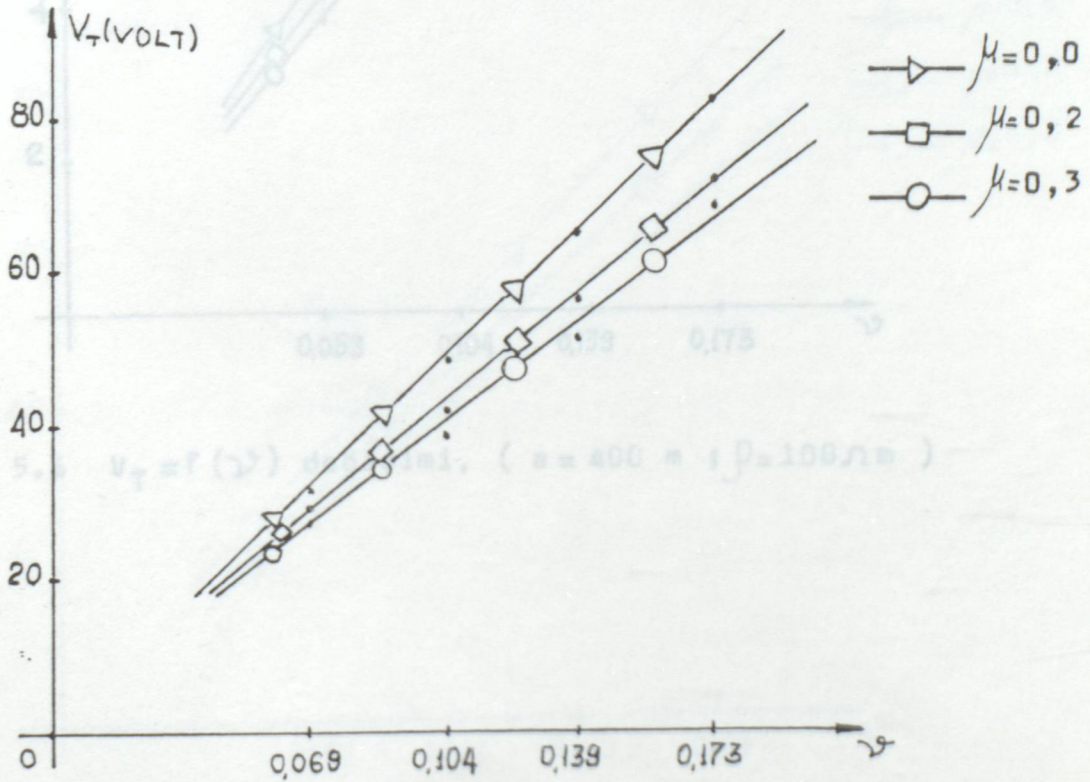
şeklindedir.



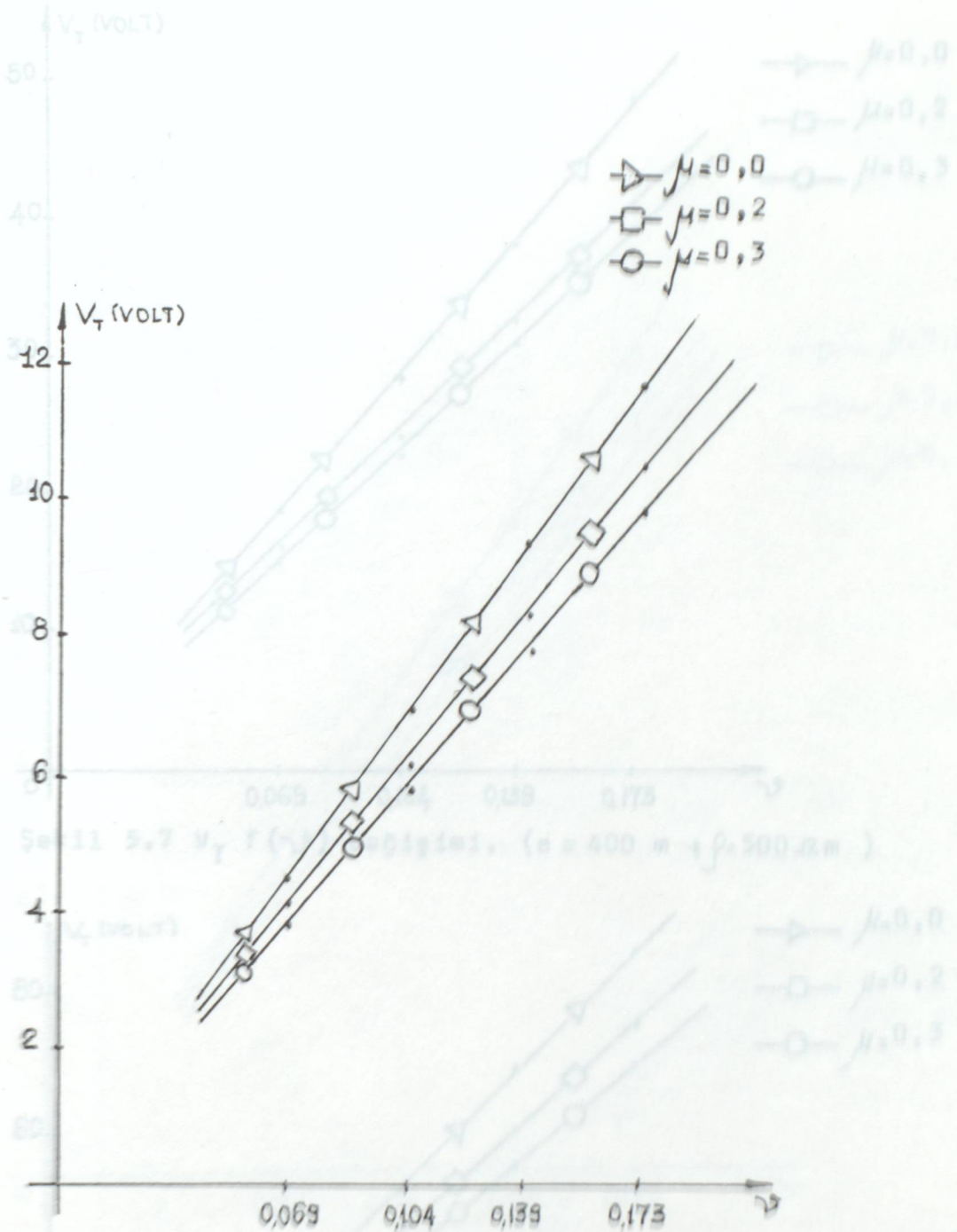
Şekil 5.3  $V_T = f(\nu)$  değişimi, ( $a = 300 \text{ m}$  ;  $\rho = 100 \text{ } \Omega \text{ m}$ )



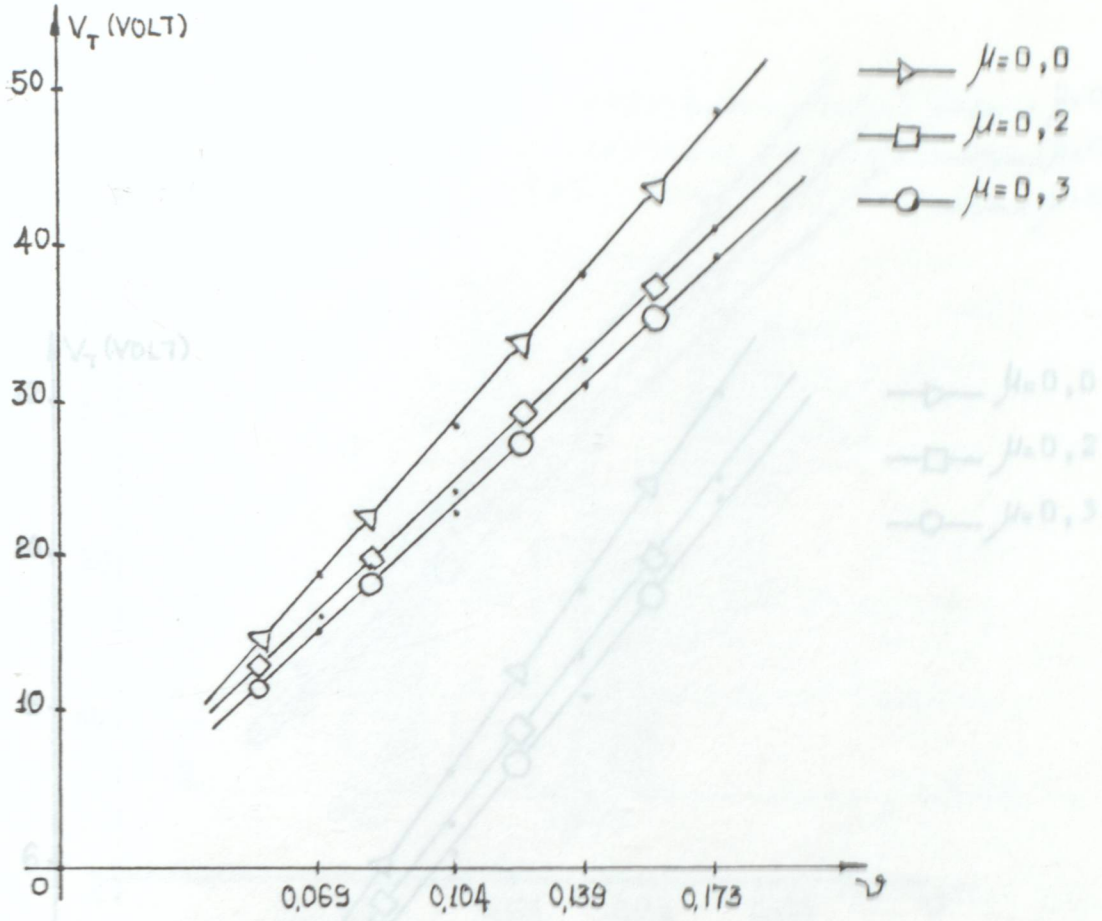
Şekil 5.4  $V_T = f(r)$  değişimi. ( $a = 300$  m ;  $\rho = 500 \Omega \cdot m$ .)



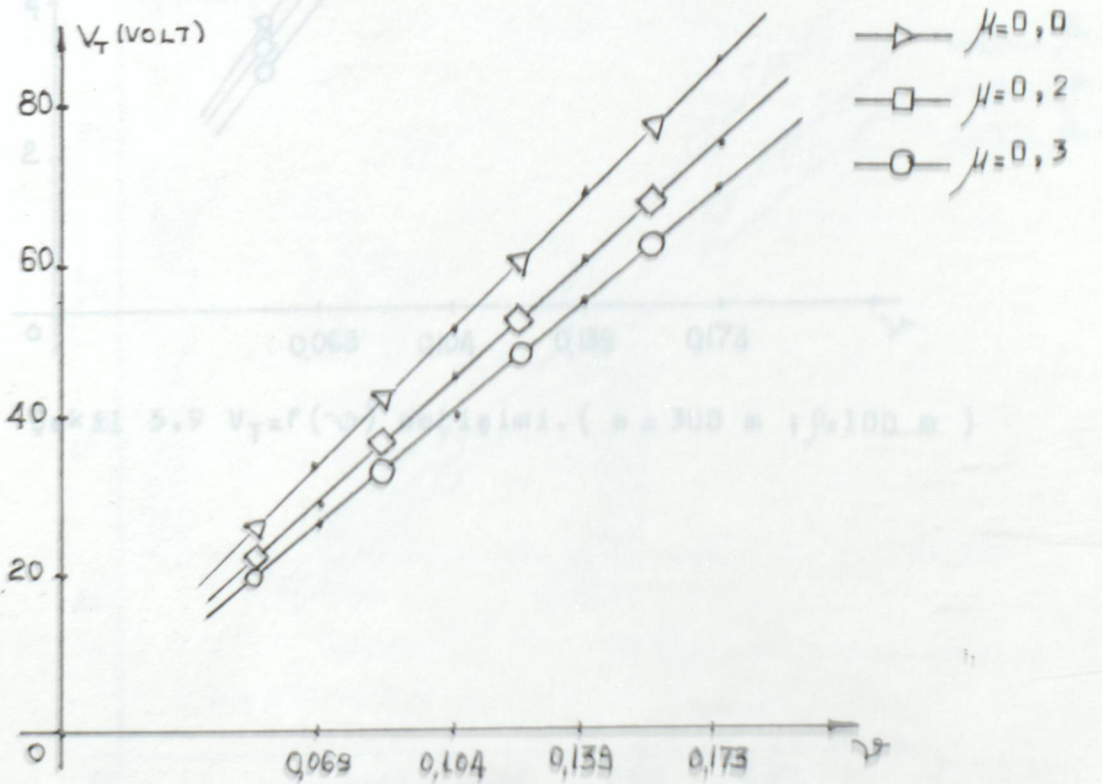
Şekil 5.5  $V_T = f(r)$  değişimi. ( $a = 300$  m ;  $\rho = 500 \Omega \cdot m$  )



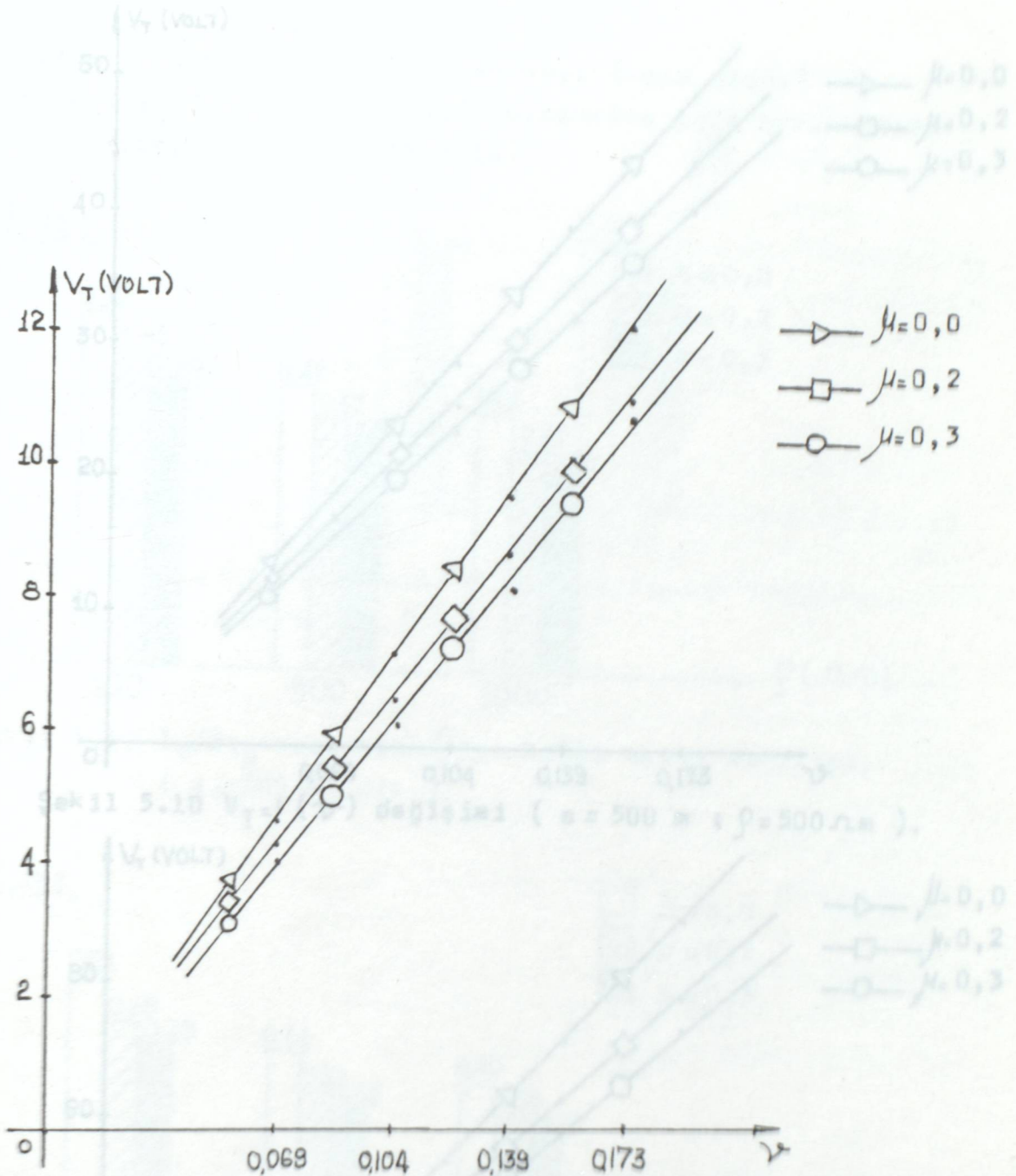
Şekil 5.6  $V_T = f(\gamma)$  değişimi, ( $a = 400 \text{ m}$  ;  $D = 100 \Omega \text{ m}$ )



Şekil 5.7  $V_T$  f( $\gamma$ ) değişimi. ( $a = 400$  m ;  $\beta = 500 \Omega \cdot m$ )

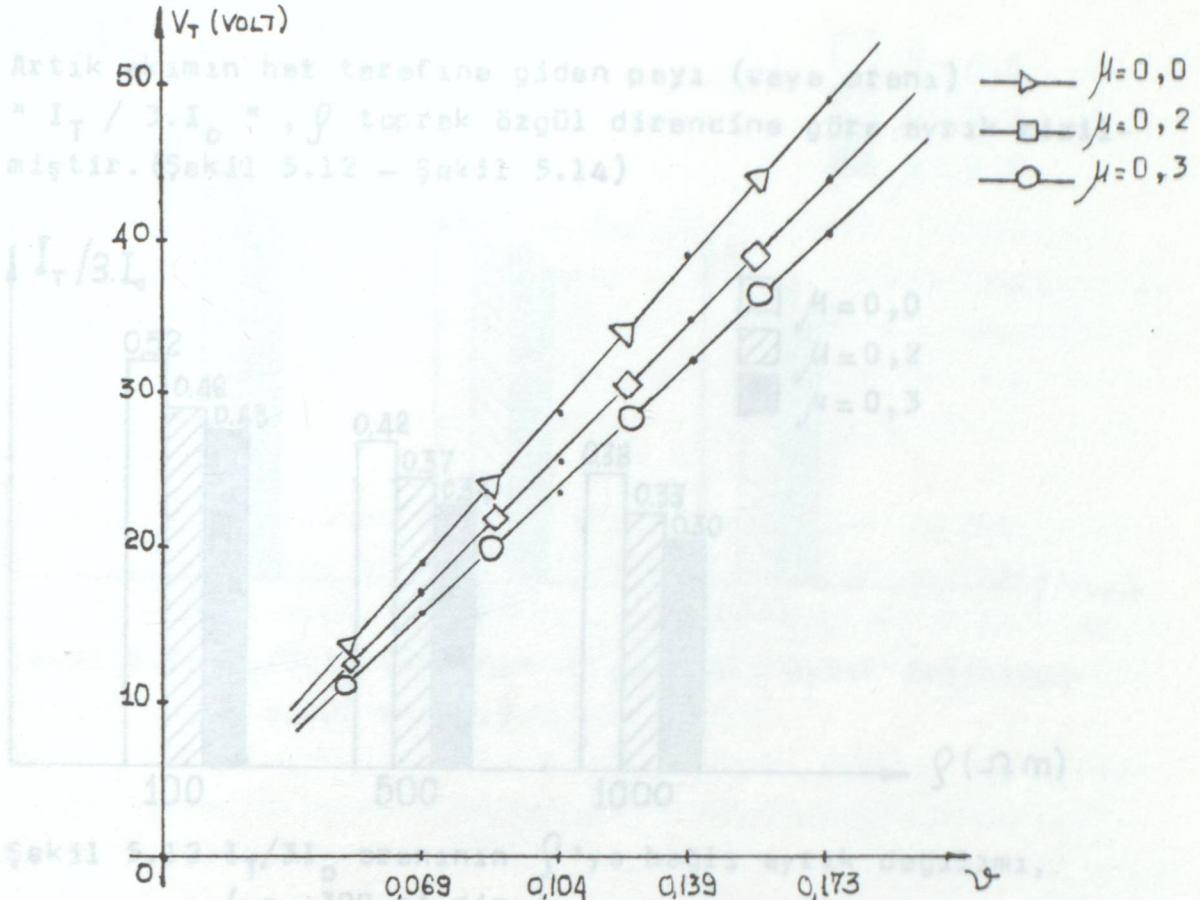


Şekil 5.8  $V_T$  f( $\gamma$ ) değişimi. ( $a = 500$  m ;  $\beta = 1000 \Omega \cdot m$ )

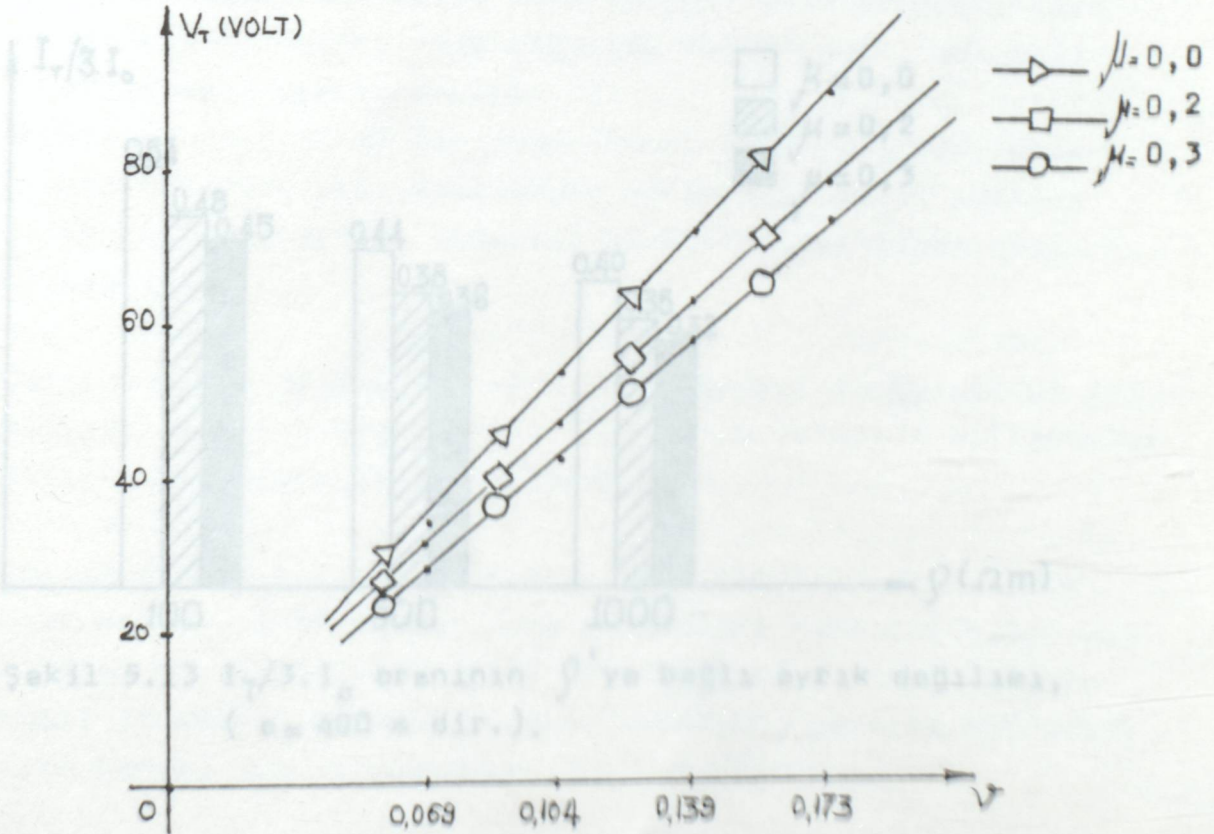


Şekil 5.9  $V_T = f(r)$  değişimi. ( $a = 300$  m ;  $\rho = 100$  m )

Şekil 5.11  $V_T = f(r)$  değişimi. ( $a = 500$  m ;  $\rho = 1000$  m )

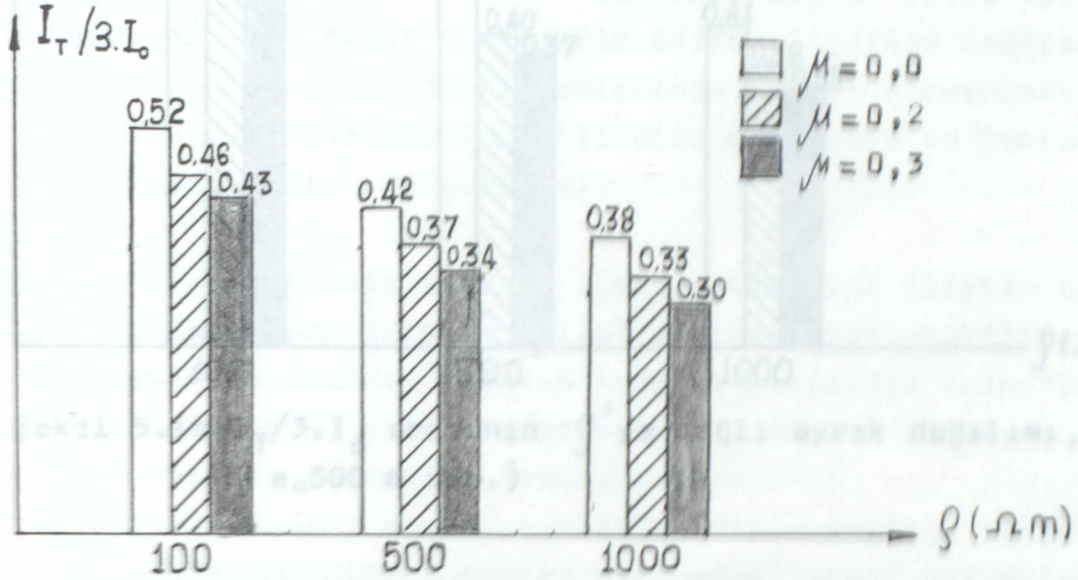


Şekil 5.10  $V_T = f(\psi)$  değişimi ( $a=500\text{ m}$  ;  $\rho=500\ \Omega\text{ m}$  ).

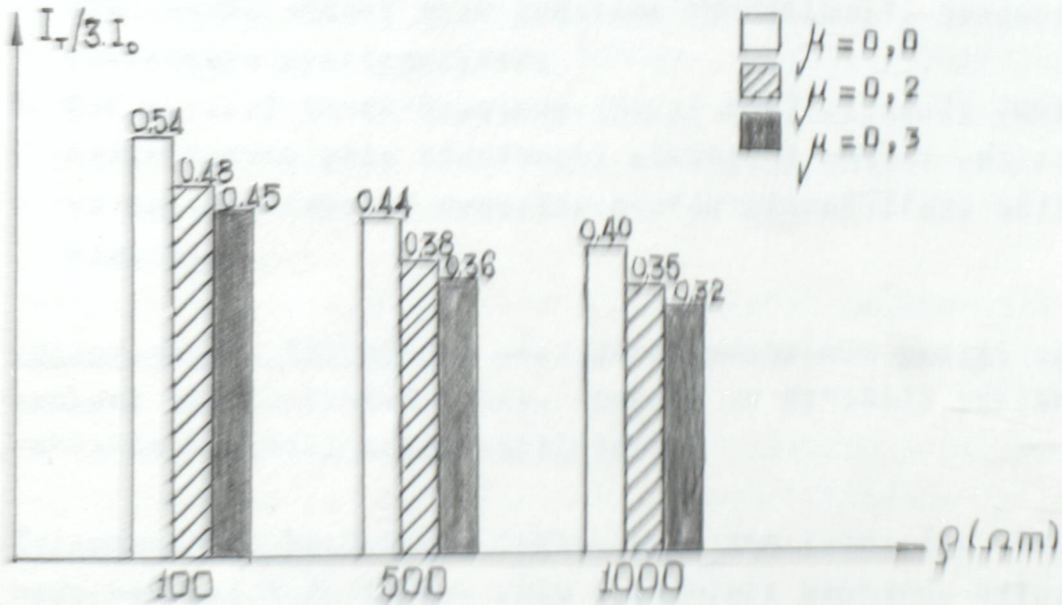


Şekil 5.11  $V_T = f(\psi)$  değişimi. ( $a=500\text{ m}$  ;  $\rho=1000\ \Omega\text{ m}$  ),

Artık akımın hat tarafına giden payı (veya oranı) " $I_T / 3.I_0$ ",  $\rho$  toprak özgül direncine göre ayrı ayrı çizilmiştir. (Şekil 5.12 - Şekil 5.14)

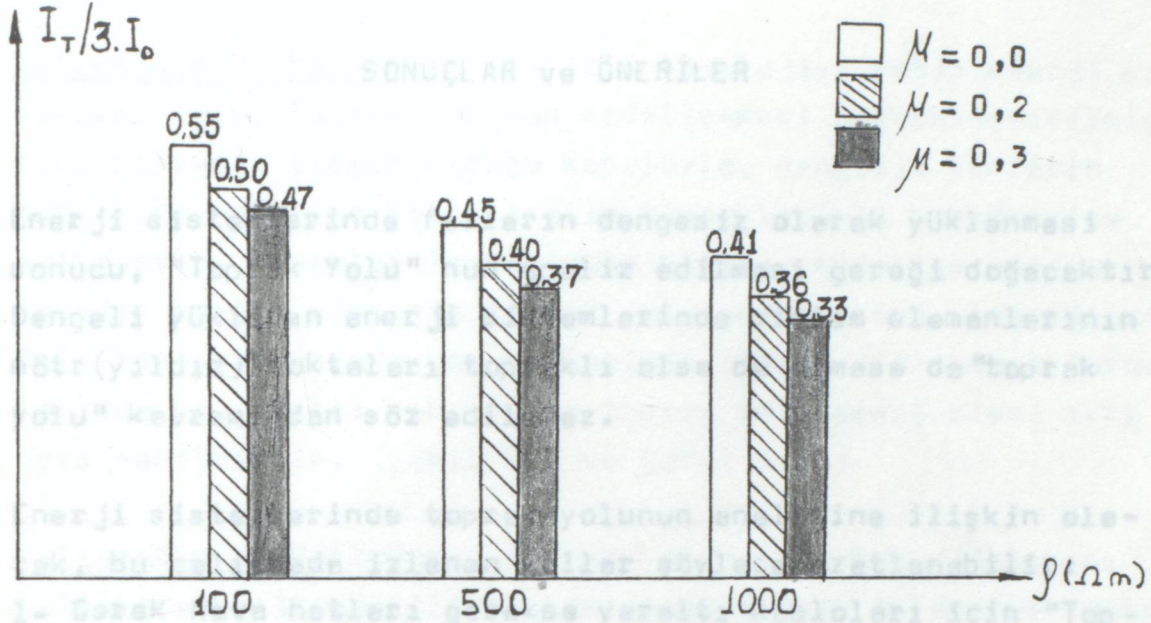


Şekil 5.12  $I_T / 3.I_0$  oranının  $\rho$ 'ye bağlı ayırık dağılımı, ( $a = 300$  m dir.).



Şekil 5.13  $I_T / 3.I_0$  oranının  $\rho$ 'ye bağlı ayırık dağılımı, ( $a = 400$  m dir.),





Şekil 5.14  $I_T/3.I_0$  oranının  $\rho$ 'ya bağlı ayırık dağılımı, ( $e=500$  m dir.)

- 1- Görev hatleri, hatleri ve yeraltı kabloları için "Toprak Yolu" kavramının dengesi olarak yüklenmesi sonucu, "Toprak Yolu" kavramı gereği doğacaktır. Dengeli yüklenmenin enerji sistemlerinin elemanlarının (örneğin; kablolar, hatler) üzerindeki etkisi de "toprak yolu" kavramı ile açıklanabilir.
- 2- Enerji sistemlerinde toprak yolunun enerji ile ilgili olarak, bu kavramın izlenmesi için "Toprak Yolu" kavramı kullanılmaktadır.
- 3- Çeşitli tipteki enerji sistemlerinin - değişik devre topraklama rejimlerine göre - toprak yolu modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modelleme doğrultusunda, toprak yolundaki akım dağılımları verilmiştir.
- 4- Literatürde faz-toprak kısa devresi için verilmiş olan "Toprak Yolundaki Akım Dağılımı Yöntemleri", dengesiz yüklenmeye uygulanmıştır.
- 5- Bir sayısal örnek üzerinde (Şekil 5.1) dengesiz yüklenmenin toprak yolu üzerindeki etkinliği analiz edilmiş ve elde edilen sayısal değerler grafik olarak ifade edilmiştir.

Çalışmanın 1. Bölümünde enerji sistemlerinin yapısal ve elemanları özeti alındıktan sonra, dengeli ve dengesiz yüklenmeler hakkında tanıtıcı bilgi verilmiştir.

Çalışmanın 2. Bölümünde toprak yolu tanımlanmıştır. Önce, hava hatleri için toprak yolu elemanları hakkında bilgi verilmiş, bu elemanların hangi parametre ya da büyüklüklere bağlı oldukları belirtilmiştir. Ardından, yeraltı kabloları için benzer yol izlenmiştir.

### Çalışmanın 3. Bölümü SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Enerji sistemlerinde fazların dengesiz olarak yüklenmesi sonucu, "Toprak Yolu" nun analiz edilmesi gereği doğacaktır. Dengeli yüklenen enerji sistemlerinde sistem elemanlarının nötr(yıldız) noktaları topraklı olsa da olmasa da "toprak yolu" kavramından söz edilemez.

Enerji sistemlerinde toprak yolunun analizine ilişkin olarak, bu çalışmada izlenen yollar şöylece özetlenebilir:

- 1- Gerek hava hatları gerekse yeraltı kabloları için "Toprak Yolu" nun tanımları yapılmış ve toprak yolunu oluşturan başlıca elemanlar tanıtılmıştır.
- 2- Çeşitli tipteki enerji sistemlerinin - değişik devre topolojilerine göre - toprak yolu modellemesi gerçekleştirilmiştir. Modelleme doğrultusunda, toprak yolundaki akım yük dağılımları verilmiştir.
- 3- Literatürde faz-toprak kısa devresi için verilmiş olan üç "Toprak Yolundaki Akım Dağılımı Yöntemleri", dengesiz yüklenmeye uyarlanmıştır.
- 4- Bir sayısal örnek üzerinde (Şekil 5.1) dengesiz yüklenmenin toprak yolu üzerindeki etkinliği analiz edilmiş ve bulunan sayısal değerler grafik olarak ifade edilmiştir.

Çalışmanın 1. Bölümünde; enerji sistemlerinin yapısı ve elemanları özetlendikten sonra, dengeli ve dengesiz yüklenmeler hakkında tanıtıcı bilgi verilmiştir.

Çalışmanın 2. Bölümünde; toprak yolu tanıtılmıştır. Önce, hava hatları için toprak yolu elemanları hakkında bilgi verilmiş, bu elemanların hangi parametre ya da büyüklüklere bağlı oldukları belirtilmiştir. Ardından, yeraltı kabloları için benzer yol izlenmiştir.

Çalışmanın 3. Bölümünde; çeşitli topolojiye sahip enerji sistemleri için, toprak yolunun modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Sistemin lineer olduğu kabulüyle, dengesiz yüklerin çekildiği noktalar bağımlı akım kaynaklarıyla karakterize edilmiştir. Devreler Teorisinden bilinen kurallar yardımıyla, her tipten sistemin toprak yolu eşdeğerleri elde edilmiştir. Hava hatlarında koruma telinin olması / olmaması durumlarında ve yeraltı kablosunda toprak yolu eşdeğerleri ayrı ayrı verilmiştir. (Şekil 3.1 ve Şekil 3.10)

Çalışmanın 4. Bölümünde; toprak yolundaki akım dağılımını bulmaya yönelik çeşitli yöntemler (Dağılmış Parametre Yöntemi, Toplu Parametre Yöntemi, Zincir Empedans Yöntemi, Tek Taraftan Yoketme Yöntemi ..... ) verilmiştir.

Çalışmanın 5. ve son Bölümünde; 154 kV'luk üç baryl bir enerji sistemi ele alınmıştır. Günün değişik saatlerindeki yüklenmeleri karakterize eden beş ayrı işleme kodunda, fazlar dengesiz yüklenmektedir. Toprak yolunun analizi için üç ayrı direk açıklığı (300 m - 400 m - 500 m) ve üç ayrı toprak özgül direnci (100  $\Omega$  - 500  $\Omega$  - 1000  $\Omega$ ) öngörölmüştür. Karşılıklı kuplaj ( $\mu$ ) için seçilen değerler ise 0.0, 0.2 ve 0.3 dür. Geliştirilen hesap yöntemine ilişkin olarak bir bilgisayar akış diyagramı geliştirilmiştir (Şekil 5.2).

Hesaplama sonuçlarından elde olunan grafik değişimlere (Şekil 5.3 - Şekil 5.14) göre, aşağıdaki noktalar ifade edilebilir:

- 1- Tanımlanan dengesizlik ölçütü ( $\gamma$ ) arttıkça, toprak yolunun etkinliği daha fazla önem kazanmaktadır.
- 2- Topraklama ağındaki gerilim ( $V_T$ ) ;
  - Toprak özgül direncine ( $\rho$ )
  - Direk açıklığına ( $a$ )bağlı olarak artış göstermektedir. Buna karşılık,  $\mu$  kuplaj katsayısına bağlı olarak azalma göstermektedir.

3- Dengesiz yüklenmedeki artık akımdan ( $3I_0$ ) topraklama ağı akımının ( $I_T$ ) aldığı pay ( $I_T/3I_0$  oranı) ise;  
- direk açıklığına ( $a$ )

(1) - kuplaj katsayısına ( $\mu$ )

bağlı olarak artış göstermektedir. Diğer taraftan, toprak özgül direncinin ( $\rho$ ) artması, bu payı azaltıcı etki yapmaktadır (Şekil 5.12 - Şekil 5.14).

Dengesiz yüklenme nedeniyle, Toprak Yolundan akım akması ve dolayısıyla toprak yolunun analizi gündeme gelmektedir.

Toprakla ilişkili kısımlardan akım geçmesi:

- toprakla ilişkili kısımlarda gerilimlerin oluşması
- bu elemanların omik dirençleri üzerinde ek joule kayıplarının oluşması

- faz iletkenleri üzerinde karşılıklı kuplaj etkisinin gözlenmesi

gibi bir dizi olayla sonuçlanmaktadır. Bu bakımdan dengesizlik derecesinin olabildiğince sınırlandırılması (hatta yok edilmesi), toprak yolundan akım akma nedenini ortadan kaldıracacağı için, üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Diğer taraftan, transformatörlerin kullanım türü, bağlantı tipi ve gerilim seviyeside dikkate alınarak

- İzole yıldız bağlantı ( $\lambda$ )

(6) - Zigzag bağlantı ( $\sphericalangle$ )

- Üçgen bağlantı ( $\Delta$ )

seçilerek, toprak yolundaki akım geçişine engel olunabilir.

(7) Dewalibi, F. and D. Mukherjee, "Perseometric Analysis of Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, pp. 1659-1677, 1979.

(8) Dewalibi, F. and D. Mukherjee, "Ground Fault Current Distribution Between Soil and Neutral Conductors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, pp. 452-460, 1980.

- (9) Keri, A.J.F. , A-REFERANSLAR D.M. Schneider, "The Open Loop Scheme: An Effective Method of Ground Wire Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, pp. 1777-1785, 1979.
- (1) Jones, D., "Analysis and Protection of Electrical Power Systems", Sir Isaac Pitman, 1971.
- (10) Beyran, M., "Elektrik Tesislerinde Topraklama", İ.T.Ü., 1982.
- (2) Dengiz, H., "Enerji Hatları Mühendisliği", Emel Matbaacılık, 1982.
- (11) Grneau, P. , "Underground Power Transmission - The",
- (3) Dawalibi, F. and W.G. Finney, "Transmission Line Tower Grounding Performance in Non-Uniform Soil", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, pp. 471-479, 1980.
- (12) "Transmission and Distribution Reference Book", Westinghouse Electric Co. , 1990.
- (4) Dawalibi, F., D. Bensted and D. Mukhedkar, "Soil Effects on Ground Fault Currents", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 3442-3449, 1981.
- (13) IEEE, vol. 155, pp. 1163-1172, 1968.
- (5) Alderton, J.R. P.C. Anderson and R.J. Cakebread, "Calculation and Measurement of the Earth Impedance of an ehv Substation", Proc. IEEE, vol. 125, pp. 1367-1375, 1978.
- (15) Fortescue, E.L. , "Method of Symmetrical Co-ordinates",
- (6) Zukerman, L.G., "Simplified Analysis of Rectangular Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, pp.1777-1785, 1979.
- (16) Endreyani, J. , "Analysis of Transmission Tower Potentials",
- (7) Dawalibi, F. and D. Mukhedkar, "Parametric Analysis of Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, pp. 1659-1677, 1979.
- (8) Dawalibi, F. and D. Mukhedkar, "Ground Fault Current Distribution Between Soil and Neutral Conductors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, pp. 452-460, 1980.

- (9) Keri, A.J.F., A. Novrei and J.M. Schneider, "The Open Loop Scheme: An Effective Method of Ground Wire Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, pp. 3615-3624, 1984.
- (10) Beyram, M., "Elektrik Tesislerinde Topraklama", İ.T.Ü., 1977. of HV Stations", SAKKO-Electricity, vol 53, pp. 305-308, 1980.
- (11) Grneau, P., "Underground Power Transmission - The Science, Technology and Economics of High Voltage Cables", John Wiley, 1979. Transactions, vol. PAS-86, pp. 910-919, 1969.
- (12) "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", Westinghouse Electric Co., 1950. the Location of the Fault on the Screening Effect of Earth Wires",
- (13) Laughton, M.A., "Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Co-ordinates, Part 1," Proc. IEE, vol. 155, pp. 1163-1172, 1968. ult Current Distribution in Power Systems - The Necessary Link",
- (14) Laughton, M.A., "Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Co-ordinates, Part 2," Proc. IEE, vol. 116, pp. 857-865, 1969. its and Computations of Fault Current Distribution on Overhead
- (15) Fortescue, C.L., "Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks", AIEE Transactions, vol. 37, pp. 102-1140, 1918.
- (16) Endreyani, J., "Analysis of Transmission Tower Potentials During Ground Faults", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, pp. 1274-1283, 1967.
- (17) Desiano, F. P. Marchenko and G.S. Vassel, "General Equations for Fault Currents in Transmission Line Ground Wires", IEEE Transactions on pp. 1891-1900, 1970.

- (18) Verma, R. and D. Mukhedkar, "Ground Fault Current Distribution in Sub-station Towers and Ground Wire", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968 vol. PAS-98, pp. 724-730, 1979.
- (19) Pesonen, A.J. "Effects of Shield Wires on the Potential Rise of HV Stations", SAHKO-Electricity, vol 53, Enst pp. 305-308, 1980.
- (20) Sebo, S.A. , "Zero Sequence Current Distribution Along Transmission Lines", IEEE Transactions, vol. PAS-88, pp. 910-919, 1969.
- (21) Dubanton, C. and G. Grand, "Influence of the Location of the Fault on the Screening Effect of Earth Wires", CIGRE Paper 36-01, August 1974.
- (22) Dawalibi, F. and D. Mukhedkar, "Ground Fault Current Distribution in Power Systems - The Necessary Link", IEEE Paper AF 77 754-S, Summer Meeting, Mexico, 1977.
- (23) Dawalibi, F. and G.B. Niles, "Measurements and Computations of Fault Current Distribution on Overhead Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, pp. 553-560, 1984.
- (24) Weitzenfeld, G. , "Power System Ground Fault Current Distribution Using the Double-Sided Elimination Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PWRS-1, pp. 17-25, 1986.
- (25) Kaplan, W., "Ordinary Differential Equations", Addison Wesley Publishing Co. Inc., pp. 145-147.

## ÖZGEÇMİŞ

1968 Samsun, Bafra doğumluyum. İlk, orta ve lise öğrenimi Bafra'da tamamladım. 1985 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektrik Bölümüne girdim. Aynı okuldan 1989 yılında mezun oldum. Yine aynı yıl Enstitünüzde yüksek lisans eğitimine başladım.





