

29229

T.C
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİNDE TOPRAK YOLUNDAKİ
AKIM DAĞILIMI VE OPTİMAL TOPRAKLAMA ANALİZİ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Cem BAYRAŞ

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İSTANBUL 1993

İÇİNDEKİLER

ÖZET

SUMMARY

1.GİRİŞ	1
2.TOPRAKLAMA TESİSLERİNİN GENEL TANITIMI	3
2.1.Topraklama çeşitleri	4
2.1.1.Koruma topraklaması	4
2.1.1.1.Alçak gerilim tesislerinde koruma topraklaması	5
2.1.1.2.Yüksek gerilim tesislerinde koruma topraklaması	6
2.1.2.İşletme topraklaması	12
2.1.2.1.Alçak gerilim tesislerinde işletme topraklaması	12
2.1.2.2.Yüksek gerilim tesislerinde işletme topraklaması	13
2.1.3.Yıldırıma karşı topraklama	13
2.2.Topraklama ile ilgili bazı temel kavramlar	14
2.2.1.Temas gerilimi	14
2.2.2.Adım gerilimi	16
2.2.3.Topraklama direnci	18
2.2.4.Topraklayıcı	18
2.2.4.1.Çubuk topraklayıcı	19
3.TOPRAKLAMA YOLUNDAKİ AKIM DAĞILIMI	24
3.1.Akım dağılımını doğuran nedenler	24
3.1.1.Tek faz-toprak arızaları	24
3.1.2.Dengesiz yükler	26
3.2.Topraklama yolundaki empedans bileşenleri	30
3.2.1.Direklerin topraklama dirençleri	30
3.2.2.Santral(Posta) ağ topraklamaları	30
3.2.3.Direklerin koruma telinin empedansı	31
4.TOPRAKLAMA YOLUNDAKİ AKIM DAĞILIMINA İLİŞKİN ANALİTİK YÖNTEMLER	33
4.1.Tek taraflı eliminasyon yöntemi	36
4.2.Çift taraflı eliminasyon yöntemi	38
4.3.Zincir empedansları yöntemi	40
5.OPTİMUM TOPRAKLAMA ANALİZİ	42
5.1.Üniform olmayan toprakta toprak elektrodu direncinin ölçülmesi ...	42

5.1.1.Küçük toprak elektrodu	43
5.1.2.Elektrod geometrisinin etkisi	47
5.2.İki tabakalı toprak içindeki topraklamanın optimum dizaynı	50
5.2.1.Potansiyelin hesaplanması	50
5.2.1.1.Nokta kaynak elektrodu yardımı ile potansiyelin hesaplanması..	50
5.2.1.2.Pratik elektrod yardımı ile potansiyelin hesaplanması	52
6.Sayısal uygulama ve sonuçları	58
REFERANSLAR	62
EKLER	64
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Topraklama ve topraklama tesisleri normal işletme esnasında varlığını hemen hemen hiç hissettirmedeği halde bir arıza durumunda etkili olmakta ve görevini yapmaktadır.Böylece elektrik tesislerinde çalışan şahısların hayatı korunduğu gibi,işletme emniyeti de sağlamış olmaktadır.Bundan dolayı,elektrik tesisleri içinde etkili bir koruma yapılabilmesi için,topraklamaya gereken önem verilmelidir.

Bu tez'de topraklama ve topraklama tesisleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Birinci ve ikinci bölümlerde,topraklama ve topraklama tesislerinin genel tanıtımı,topraklama ile ilgili bazı temel kavramlar,topraklama çeşitleri ve topraklama çeşitlerine göre alçak ve yüksek gerilim tesislerinde yapılan topraklamalar yer almıştır.Üçüncü bölümde,topraklama yolundaki akım dağılımını doğuran sebepler incelenerek,topraklama yolundaki empedans bileşenleri ele alınmıştır.Dördüncü bölümde,topraklama yolundaki akım dağılımına ilişkin tek taraflı eliminasyon yöntemi,çift taraflı eliminasyon yöntemi ve zincir empedansları yöntemi incelenmiştir.Beşinci bölümde,üniform olmayan toprakta,toprak elektrodu direncinin pratik olarak ölçülmesi ile iki tabakalı toprak içindeki topraklamanın optimum dizaynı ele alınmıştır.Altıncı ve son bölümde ise,bir sayısal uygulama ve sonuçları verilmiştir.

SUMMARY

Although grounding and grounding stations almost are not felt itself while normal operating, in case of a ground fault, they are being effectual and do all the functions what they have. Thus, they are not only protect the lives of people working in power stations but also exist a safety. Therefore we have to give required importance to grounding operation in order to make an effectual protection in power stations.

Both theoretical and practical knowledges about grounding will be given in this thesis.

The first and second part are devoted to the general introduction of grounding, and basic concepts about grounding, kinds of grounding, the grounding in low and high voltage stations which is equipped according to the kinds of grounding. The third part introduces the study about the causes reasoning current distribution on the grounding line. Part three also includes impedance components on the grounding lines. In fourth part of the thesis, one-sided elimination method relating to the current distribution on the grounding line is introduced, double-sided elimination method and network earth impedances methods are also followed. The fifth part begins with practical measurements of the ground electrode resistance in non uniform soil, and an optimum design of grounding in a two layer earth structure is emphasized.

In the final part six, there is a numerical example and conclusions.

1.GİRİŞ

Elektrik makinelerinde,elektrik cihazlarında ve elektrik tesislerinde meydana gelen bir izolasyon hatası,makinaların,cihazların ve tesislerin işletme ile doğrudan doğruya ilgisi olmayan madeni ve iletken gövdelerinin,muhafazalarının veya tesbit kısımlarının gerilim altında kalmasına sebep olur.Temas gerilimi veya adım gerilimi adı verilen bu gibi tehlikeli gerilimler,gerek işletme personeli ve gerekse elektrik tesisleri ile temas halinde bulunabilecek olan şahısları hayati tehlikeye maruz bırakırlar.İşletme personeli ve elektrik tesisleri ile temas edebilecek olan bu şahısları temas ve adım gerilimlerine karşı korumak amacıyla kuvvetli akım tesislerinde topraklama yapılır.Ayrıca,başka şebeke geriliminin toprağa karşı değerini belirli bir duruma getirebilmek için,şebekenin ve işletme araçlarının belirli noktaları da topraklanır.

Topraklama esasen,alçak gerilim tesislerinde insanları ve genel olarak canlıları tehlikeli temas ve adım gerilimlerine karşı korumak için kullanılan çeşitli koruma metodlarından biri olarak bilinir.Fakat,bugün alçak gerilim tesislerinde hata akımından ve hata geriliminden yararlanarak çalışan ve topraklama metodundan daha emin ve etkili koruma metodları da vardır.Buna karşılık yüksek gerilim tesislerinde,hata gerilimlerine karşı tek koruma metodu topraklamadır.Onun için,topraklamanın özellikle yüksek gerilim tesislerinde önemi çok büyüktür.

Gerek alçak gerilim tesislerinde ve gerekse yüksek gerilim tesislerinde topraklamanın etkili ve yararlı olabilmesi,bunun iyi yapılmış olmasına ve gerektiği anda öngörüldüğü şekilde çalışabilmesine bağlıdır.

Topraklamanın ve topraklama tesisinin birinci amacı,bir izolasyon hatasının meydana gelmesi halinde oluşacak olan temas ve adım geriliminin insan hayatını tehlikeye sokacak mertebede olmasını önlemek veya bu gibi tehlikeli gerilimleri tamamen ortadan kaldırmaktır.Böylece,bir taraftan insan hayatının emniyetinin sağlandığı gibi,diğer taraftan da işletme emniyeti şartları yerine getirilmiş olur.

Topraklamanın yapılışında birinci derecede,bir izolasyon hatası sonucunda insan vücudu tarafından köprülenen gerilimlerin tehlikeli değerlere yükselmemesine dikkat edilmelidir.İkinci derecede de atmosferik deşarjların düşük dirençli topraklamalar üzerinden toprağa sevk edilmeleri halinde birçok işletme arızaları önlenabilmektedir.Onun için,son yıllarda havai hat şebekelerinde büyük masraflar yapılarak düşük dirençli topraklamaların

yapılması sağlanmıştır.

Çeşitli ÷lkelerde topraklamanın nerelerde ve nasıl uygulanacağı ve ne şekilde tesis edilip işletileceği hakkında y÷netmelikler esas itibariy-
le birbirlerine çok benzerler.Memleketimizde yür÷rlükte olan y÷netmelikler
şunlardır.

1.Elektrik iç tesisat talimatnamesi ve fenni řartnamesi,

2.Kuvvetli akım elektrik dağıtım tesisatının bakım,işletme ve tesisine
ait y÷netmelik.

Ayrıca bu y÷netmelikler yanında,

1.Alçak gerilim tesisleri için VDE 0100 sayılı "Nominal gerilimi 1 KV'a
kadar olan kuvvetli akım tesislerinin kurulması için esaslar " isimli
Alman y÷netmeliđi ile,

2.Yüksek gerilim tesisleri için VDE 0141 sayılı"Nominal gerilimi 1 KV'un
÷stünde olan alternatif akım tesislerinde topraklamalar için esaslar" isim-
li Alman y÷netmeliđi belirtilmeye deđerdir.

2.TOPRAKLAMA TESİSLERİNİN GENEL TANITIMI

Yüksek gerilim tesislerinde genellikle işletme personeli, alçak gerilim tesislerinde ise, hem işletme personeli ve hem de çeşitli alçak gerilimli makineleri kullanan şahıslar, bir izolasyon hatası halinde tehlikeli temas ve adım gerilimine maruz kalabilirler. Enerji tesislerinde yapılan topraklama tesislerinin görevi ise, bir izolasyon hatası meydana geldiğinde, arızalı fazdan geçen hata akımının yardımı ile hata akım devresini kesmek veya bu akımların insan hayatını tehlikeye sokacak bir yoldan geçmelerini önlemek yahut da hata geriliminin tehlikeli sınır değerlerinin altında kalmasını sağlamaktır. Topraklama tesisinin yukarıda üç madde halinde sayılan görevi şu şekilde açıklanabilir. Meselâ, tesisin yıldız noktasının direkt topraklanmış olduğunu ve şebekeye bağlı olan cihazında topraklandığı kabul edilsin. Söz konusu cihazda bir izolasyon hatası neticesinde bir gövde teması (veya gövde kısa devresi) meydana gelirse, devreden büyük akım geçer. Bu akımın etkisi ile alçak gerilim tesislerinde sigorta ve magnetik açıcı, yüksek gerilim tesislerinde ise sigorta veya güç anahtarı kısa zamanda devreyi keserek tehlikeli hata gerilimini ortadan kaldırır. Böylece söz konusu cihaza temas eden insanın hayatı kurtulmuş olur. Yapılan topraklamalar sayesinde hata akımı şiddetlendirilir ve kısa devre akımı mertebesine çıkan bu hata akımlarının etkisi ile devrenin aşırı akıma karşı koruma cihazları (sigorta, magnetik açıcılı otomatik anahtar veya disjonktör) yardımı ile kesilmesi sağlanır.

Eğer tesisin yıldız noktası topraklanmamışsa ve korunması söz konusu olan cihaz bir topraklama tesisi ile donatılmışsa, bir faz iletkeninin cihazın gövdesi ile temas etmesi halinde, alçak gerilim tesislerinde pratik olarak bir akım geçmez. Buna karşılık yüksek gerilim tesislerinde küçük bir kapasitif akım geçer. Eğer böyle bir tesiste bir eli ile söz konusu cihaza dokunan bir şahıs, ayakları ile de çıplak zemin üzerinde durursa, topraklama tesisi bu şahıs tarafından köprülenir ve insanın gövde direnci topraklama tesisine paralel bağlanmış olur. Bu durumda insan hayatının tehlikeye düşmemesi için hata akımı insan üzerinden değil, topraklama tesisinden geçmelidir. Yani, insan tarafından köprülenen kısımda meydana gelen gerilim düşümü tehlikeli temas gerilimi sınırı altında kalmalıdır. Bu da topraklama direncinin çok küçük olması ile mümkündür.

Yukarıda verilen bilgileri şu örnekle açıklayabiliriz. Bir geçiş izolatörünün çatlamış ve böylece toprak teması meydana gelmiş olsun. İzolatörün yerleştirildiği duvarın dış yüzü rutubetli olup her metresi başına

10 ohm'luk bir direnci olsun.Duvar üzerinden toprağa 25 Amperlik bir akım geçerse, duvar üzerinde birbirinden 1 metre aralığı olan iki noktaya iki eli ile temas eden bir şahıs $U_t = 25 \cdot 1 \cdot 10 = 250$ Volt değerinde bir gerilim etkisi altında kalır.Böylece bu şahsın hayatı tehlikeye düşer.Eğer, geçit izolatörünün bağlandığı yer , yeteri derecede kalın bir hat ile topraklanırsa, bu taktirde toprak akımı toprak hattından ,çok az bir kısmı akım duvardan geçer.Bu sebeple,duvara dokunan şahıs herhangi bir tehlikeye maruz kalmaz(1).

2.1.Topraklama çeşitleri

Elektrik tesislerinde topraklamaların uygulama alanları ve yapılan topraklamaların amaçları ile etki tarzları birbirlerinden farklıdır.Aşağıda alçak ve yüksek gerilim tesislerindeki uygulamaları ayırt edilerek ,bu topraklama çeşitleri ayrı ayrı incelenecektir.Topraklamaların belli başlı üç çeşiti vardır.

- 1.Koruma topraklaması,
- 2.İşletme topraklaması,
- 3.Yıldırıma karşı koruma topraklaması.

2.1.1.Koruma topraklaması

İnsanları ve hayvanları tehlikeli temas ve adım gerilimlerine karşı korumak amacı ile tesislerin işletme akım devresine ait olmayan ve fakat bir izolasyon hatası veya ark tesiri ile gerilim altına girebilen ve insanların temas edebilecekleri iletken kısımlarını toprağa bağlamak için yapılan ilave topraklama tesislerine "koruma topraklaması" denir.

Elektrik tesislerinin,makinelerin ve cihazların işletme akım devresi ile ilgili olmayan madeni ve iletken gövdeleri ,muhafazaları daima işletme personeli veya tesisi kullanan şahıslar tarafından temas edilebilirler.Diğer taraftan , bu gibi iletken tesis kısımları ,gerilim altında bulunan tesis kısımlarının etki sahasının içinde bulunduklarından ,bir izolasyon hatası ile doğrudan doğruya veya bir ark tesiri sebebi ile veya meydana gelmiş kaçak akımlardan dolayı endirekt olarak bir potan-

siyel altına girebilirler.Böyle bir durumda hatalı tesise ,makineye veya cihaza temas eden veya bunun civarında bulunan bir insanın veya hayvanın hayatı ,maruz kaldıkları temas veya adım gerilimi tesiri ile tehlikeye düşer.Eğer söz konusu tesise ait iletken kısımlar topraklanacak olursa ,tesisnin durumuna göre ,ya devre kesilerek yada insan için tehlikeli olan toprak akımları başka yollardan toprağa sevk edilerek yahut da hata gerilimleri tehlikeli sınırın altında tutularak hayat tehlikesi önlenmiş olur.

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

İzolasyon hatası ya direkt veya endirekt sebeplerden meydana gelir. İzolasyon hatasına yol açan direkt sebepler ;iletken kopması ,aşırı akım yüzünden izolasyon maddesinin ısınarak elektriki dayanımının azalması,aşırı gerilimde izolasyon maddesinin zorlanarak delinmesi,malzemenin yaşlanması ve nihayet izolasyon maddesinin herhangi bir sebeple yalıtım özelliğini kaybederek kaçak akımların meydana gelmesidir.Endirekt sebepler ise, dış tesirlerle izolasyonun tahrip edilmesi,atmosferik deşarjlar,mesela yıldırım düşmesiyle meydana gelen arklar,havai hat'ta geçiş ve mesnet izolatörlerinin kirlenerek üzerlerinde kaçak akımların meydana gelmesi veya gerilim atlaması,izolatörlerin dış tesirlerle kırılmasıdır.

Koruma topraklaması temasa karşı bir topraklama olmayıp daha ziyade tehlikeli temas ve adım gerilimine karşı korumadır.Koruma topraklaması bu tip koruma tedbirlerinin en eskisidir ve sadece insan veya hayvan hayatını korumaya yarar (1).

2.1.1.1.Alçak gerilim tesislerinde koruma topraklaması

Yönetmeliklerde alçak gerilim tesislerinde toprağa karşı gerilimi 65 Volt'dan büyük olan her tesiste temas gerilimine karşı koruma tedbirinin alınması ve hiçbir faz hattının toprağa karşı 250 Volttan daha yüksek gerilimi olmaması şartı koşulmuştur.Alçak gerilim tesislerinde madeni su borusu şebekesine bağlamadan sadece koruma topraklaması hemen hemen hiç yapılmamaktadır.Ancak yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekelerde koruma topraklaması uygulanabilir.Yıldız noktası yalıtılmış şebekelerde ise, koruma hattı sisteminin kullanılması hariç tutulursa,koruma tedbiri olarak koruma topraklamasının kullanılmasına müsaade edilmez.

Eğer alçak gerilim tesislerinde koruma topraklaması yapılacaksa ,bu

taktirde uygulama alanı prensip itibarıyla toprağa karşı gerilimi 65V'dan daha yüksek olan ve sıfır noktası yalıtılmış veya direkt topraklanmış olan şebekelerde işletme araçları ve tesislerdir. Ancak koruma topraklamasının uygulandığı şebekelerde koruma tedbiri olarak sıfırlama yapılmamalıdır.

Koruma topraklaması özellikle ,topraklama için madeni su borusu şebekesinden veya yeraltı kablosu şebekesine ait madeni kablo muhafazasından yararlanmanın mümkün olduğu bölgelerde veya iletkenliği gayet yüksek olan bir zeminin bulunduğu yerlerde ucuz ve küçük dirençli topraklamaların yapılabilirdiği bölgelerde tercihan kullanılır.

Koruma topraklamasının uygulandığı bir şebekede topraklanacak olan en önemli tesisler şunlardır:

1.Evlerde kullanılan ve insanların temas edebilecekleri dış muhafazaları iletken olan her nevi tüketici makineler ve cihazlar.

2.Atölyelerde ve iş yerlerinde her çeşit elektrik motorları ve cihazlar.

3.Bağlama ve dağıtım tesislerinde saçtan mamul dağıtım tabloları ,kablo- ların madeni kılıfları ve ekranları ,madeni kablo başlıkları ,ek kutuları, madeni kapılar,kapaklar,koruma ızgaraları.

4.Transformatör istasyonlarında madeni muhafazalar ve madeni konstrüksiyon.

5.Havai hat şebekelerinde madeni direkler.

2.1.1.2. Yüksek gerilim tesislerinde koruma topraklaması

Yüksek gerilim tesislerinde koruma topraklaması ,genellikle burada görevli işletme personelinin ,kapalı işletme binalarının dışında ise bütün insanların ve hayvanların hayatını temas ve adım gerilimlerine karşı korumaya yarar.Eğer ayak basılan yerin yalıtılması ve potansiyelin düzenlenmesi gibi basit tedbirler,hesaba katılmazlarsa ,yüksek gerilim tesislerinde topraklama yapılması tek koruma metodudur.

Uygulama alanı olarak yüksek gerilim tesislerinde koruma maksadı ile topraklanacak olan kısımlar aşağıda belirtilmiştir (2).

1. Genel olarak,nominal gerilimi 1KV'un üzerinde olan tesislerin ve cihaz- ların işletme akım devresine ait olmayan, fakat izolasyon hatası veya ark te- siri ile gerilim altında bulunan kısımlarla iletken bağlantı durumuna gelen ve insanların temas edebileceği madeni ve iletken tesis kısımları,koruma mak- sadı ile topraklanır.Topraklanacak tesis kısımları,tesis elemanları,binalar, vs şunlardır;

-Generatörlerin,transformatörlerin,motorların ve her çeşit yüksek gerilim makinelerinin ve cihazların demir çekirdekleri ve dış madeni muhafazaları

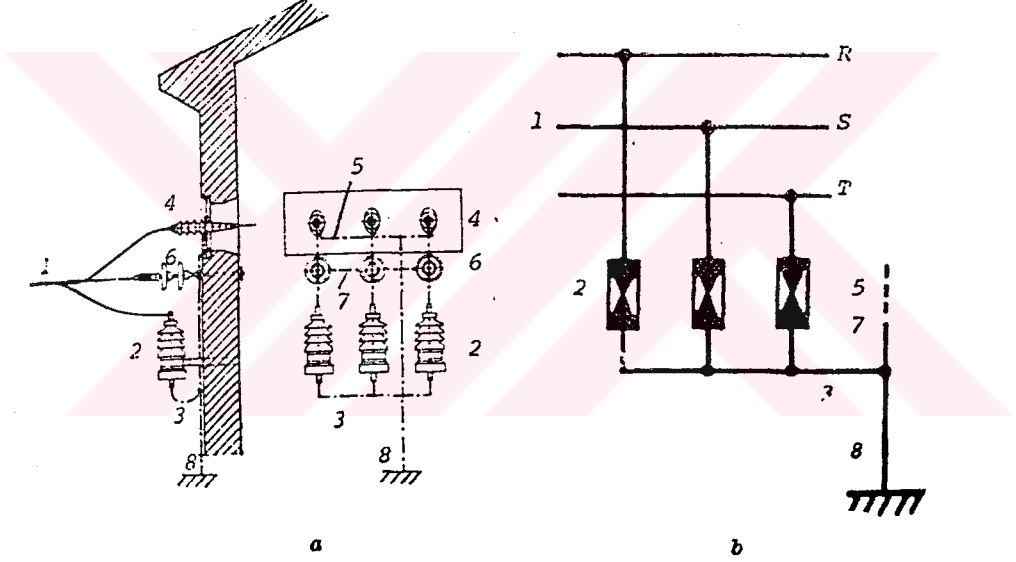
topraklanır.

-Topraklanmış kısımlarla iletken bağlantıda bulunmayan her çeşit madeni çerçeveler,kapılar,pencereler,merdiven korkulukları,merdivenler topraklanırlar.

-Topraklanmış kısımlarla iletken bağlantıda bulunmayan ve bulundukları yerden çıkarılabilen veya menteşe etrafında döndürülebilen madeni koruma ızgaraları ve kaplamalar topraklanırlar.

-İşletmede bulunan zincirler ,madeni halatlar,miller ve çubuklar bir hata halinde ark ile temas edebilirlerse,bunlarla madeni bağlantıda bulunan ve bunlara kumanda etmeye yarayan madeni el çarkları ,cihaz kolları ve manivela çubukları topraklanırlar.

-Gergi izolatörlerinin tesbiti için duvara gömülen kancalar topraklanırlar.

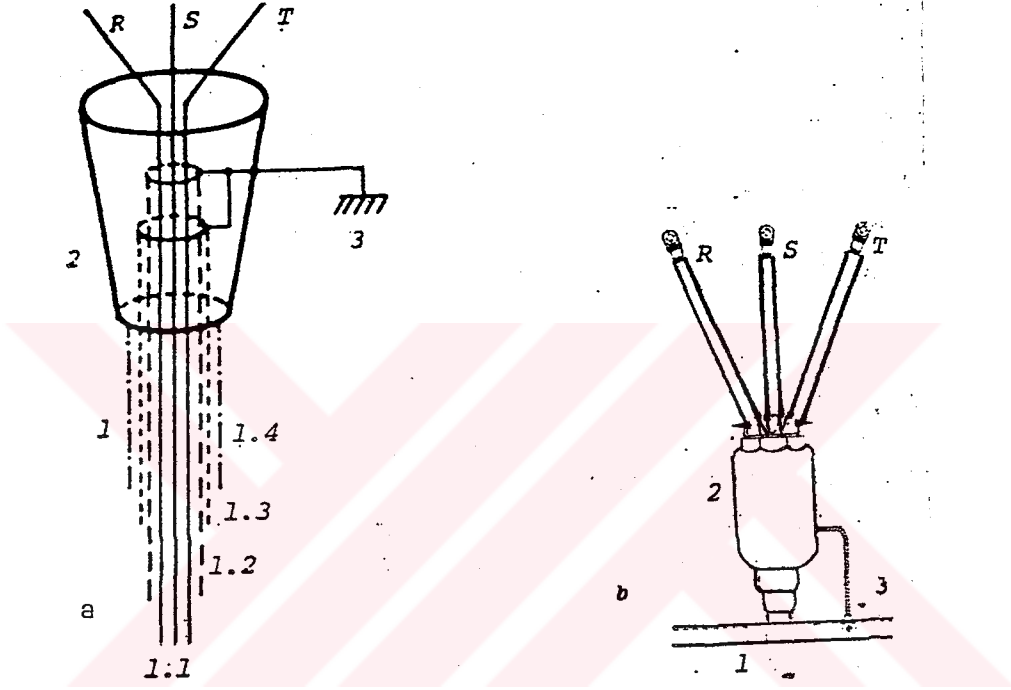


Şekil 2.1. Yüksek gerilim tesislerinde parafudrların topraklanması

- a. Parafudr topraklamasının yapılışı,
- b. Üç fazlı prensip bağlama şeması,
1. Faz iletkenleri,
2. Parafudr,
3. Parafudr topraklaması,
4. Geçiş izolatörü,
5. Geçiş izolatörü topraklaması,
6. Gergi izolatörü,
7. Gergi izolatörü topraklaması,
8. Koruma topraklaması.

-1KV'luk ve daha büyük gerilimli kabloların madeni muhafazalarının zırhla-

rı ve ekranları topraklanırlar.Ek kutularında muhafazalar,zırhlar ve ekranlar eklenecek olan kablonunkilerle ve madeni ek kutusu gövdesi ile bağlanır.Kablo başlıklarında madeni muhafazalar ,zırhlar ve ekranlar topraklanırlar.Nor-mal olarak bu topraklama bir kablo hattının her iki ucundaki başlıkta da yapılır.Şekil 2.2'de çelik zırlı,kurşun kılıflı bir yüksek gerilim kablosu-nun madeni kablo başlığı içinde topraklama hattına bağlanması şematik ola-rak gösterilmiştir.



Şekil 2.2.Çelik zırlı,kurşun kılıflı yüksek gerilim kablosunun madeni kablo başlığı ile topraklanması.

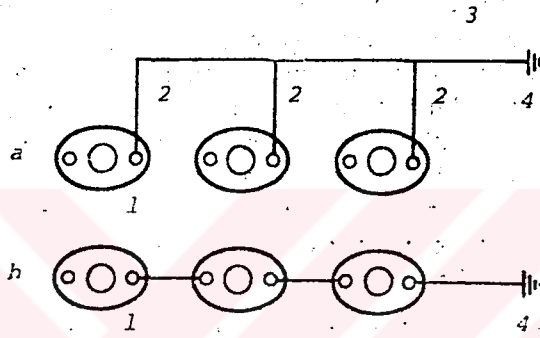
- a.Şematik gösteriliş,
b.Kablo başlığının tesisi,
1.Kablo,
1.1.İletkenler,
1.2.Kurşun kılıf,
1.3.Çelik zırh,
1.4.Yuta tabakası,
2.Madeni kablo başlığı,
3.Topraklama.

Eğer ,hem normal işletmede hem de arızalarda ,kablo tesislerinde tesadüfen temas edilebilen kısımlarda müsaade edilmeyecek kadar büyük temas gerilimlerinin meydana gelmemesi sağlanırsa ,ancak o zaman bir fazlı sistemlerde bir iletkenli ve çok iletkenli kabloların,muhafazalarının,zırhlarının ve ekranlarının bir taraflı olarak topraklanmasına müsaade edilir.Aynı şartlar al-

tında ,bir fazlı sistemlerde bir iletkenli ve çok iletkenli kabloların muhafazalarının,zırhlarının ve ekranlarının,korozyonu önlemek amacıyla bir veya iki taraflı olarak düşük ohm'lu dirençler ,delinme sigortaları veya kısa devreye dayanıklı parafudrlar üzerinden topraklanmasına müsaade edilir.

-Havai hat şebekelerinde çelik direkler ,betonarme direkler ve eğer ağaç direkler üzerinde madeni teller veya şeritler bulunuyorsa,bu gibi madeni kısımlar topraklanırlar.

2.Geçiş ve mesnet izolatörlerinin tesbit edildikleri madeni flanşlar ve kaideler topraklanırlar.(Şekil 2.3)



Şekil 2.3: Madeni flanşlı geçiş izolatörlerinin topraklanması.
a. Doğru bağlantı,
b. Yanlış bağlantı,
1. Geçiş izolatörünün madeni flanşı,
2. Topraklama iletkeni,
3. Ortak topraklama hattı,
4. Toprak.

3. Tekerlekler üzerinde hareket eden kısımları ihtiva eden bağlama tesislerinde bağlama tertibi ,hareket eden kısmın içeri sürülmesi esnasında işletme akım devresine ait bağlama elemanları kapanmadan evvel kontak yapmalı ve dışarı çıkarılması esnasında bağlama elemanları açıldıktan sonra ayrılmalıdır.

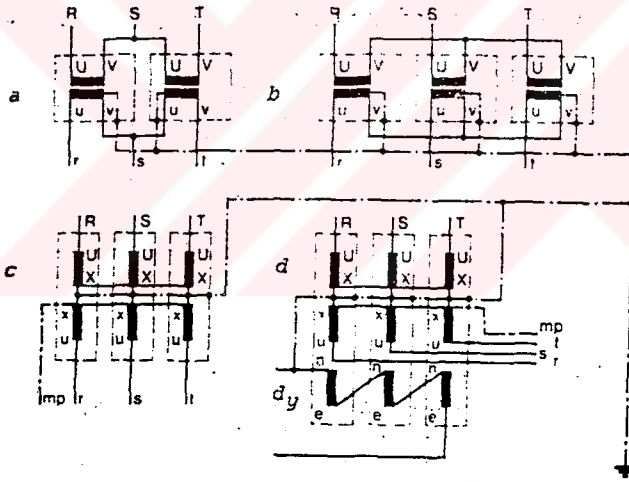
4. Ölçü transformatörlerinin alt gerilim devreleri, doğrudan doğruya ölçü transformatörünün bir bağlama ucundan topraklanmalıdır. Bir çok ölçü transformatörlerinin birlikte bağlanmaları halinde her bir ölçü transformatörünün ayrı ayrı topraklanması mümkün olmazsa hiç olmazsa mevcut devreler için müşterek bir topraklama yapılmalıdır. Bu arada ölçü transformatörleri arasındaki bağlama elemanları (iletkenleri) mümkün olduğu kadar kısa olmalıdır. Ara ölçü transformatörlerinin kullanılması halinde her bir ölçü transformatörü teker teker topraklanmalıdır.

Topraklanacak olan sekonder uçtan muhafazanın koruma topraklanması bağlantı vidasına kadar olan bağlantı iletkeninin kesiti en az 4 mm^2 olmalıdır.

4.1. Gerilim transformatörleri

Gerilim transformatörlerinin üzerinde bir topraklama ucu vardır. Gerilim altında olmayan ve şahısların dokunabileceği bütün madeni kısımlar ile sekonder sargı uçlarından biri bu topraklama ucuna bağlanır. Gerilim transformatörü ise bu topraklama ucuna bağlanan topraklama iletkeni üzerinden topraklanır.

Her iki kutbuda yalıtılmış gerilim transformatörlerinin v ucu topraklanır. İki kutbu yalıtılmış iki adet gerilim transformatörü ile teşkil olunan v montajında orta iletkenin bulunduğu uç topraklanır. İki kutbu yalıtılmış üç adet gerilim transformatörü ile teşkil olunan yıldız bağlamada hem primer ve hem de sekonder yıldız noktaları müştereken topraklanır. Üçüncü yardımcı sargısı olan üç fazlı gerilim transformatörlerinde n ucu topraklanır. Şekil 2.4 'de gerilim transformatörlerinin topraklanması gösterilmiştir.



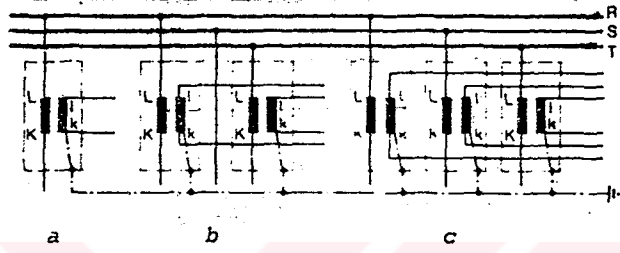
Şekil 2.4. Gerilim transformatörlerinin topraklanması

- a. V-montajı,
- b. Üç adet bir fazlı gerilim transformatörlerinin yıldız bağlanması,
- c. Yıldız bağlama,
- d. Yıldız bağlama, iki sekonder sargılı,
- dy Toprak temasını tesbit için yardımcı sekonder sargı,
- a, b. İki kutuplu yalıtılmış gerilim transformatörleri ile teşkil edilmiş,
- c, d. Bir kutuplu yalıtılmış gerilim transformatörleri ile teşkil edilmiş,
- U, V, X Primer sargı uçları
- u, v, x Sekonder sargı uçları,
- n, e Sekonder yardımcı sargı uçları.

4.2. Akım Transformatörleri

Akım transformatörlerinin üzerinde bir topraklama ucu vardır. Gerilim altında olmayan ve şahısların dokunabileceği tüm madeni kısımlar ile sekonder sargıya ait k bağlama ucu, bu topraklama ucuna bağlıdır. Akım transformatörü bu topraklama ucuna bağlanan topraklama iletkeni üzerinden topraklanır.

Şekil 2.5'de ihtiyaca göre mesela R fazına bağlı bir akım transformatörünün, R ve T fazlarına bağlı iki akım transformatörünün ve R,S,T fazlarına bağlı üç akım transformatörü gösterilmiştir (3),(4).



Şekil 2.5. Akım transformatörlerinin topraklanması.

- a. R fazına bağlı bir akım transformatörü,
- b. R, S fazlarına bağlı iki akım transformatörü,
- c. R, S, T fazlarına bağlı üç akım transformatörü,
- K, L Primer bağlama uçları,
- k, l Sekonder bağlama uçları,
- k Topraklanan uç.

5. Aşırı gerilime karşı koruma cihazları koruma topraklamasına bağlanırlar. Şekil 2.1'de yüksek gerilim tesislerinde parafudrların nasıl bağlandığı ve nasıl topraklandığı gösterilmiştir. Buradan anlaşıldığına göre, her faz hattı üzerine, hat'ta paralel olarak bir parafudr yerleştirilir ve parafudrların ikinci uçları birlikte topraklanır. Parafudr topraklaması koruma topraklamasına bağlanır. Her ne kadar parafudr topraklaması, esas itibariyle, insan hayatını korumaya yarayan bir koruma topraklaması değilse de, bunun koruma topraklaması ile bağlanması, parafudrların çalışmasını etkili hale getirir.

6. Bağlama tesislerinde ölçme, ihbar ve kumanda hatlarının madeni muhafazalarının, ark ile temas edebilseler bile topraklanmalarına lüzum yoktur.

7. Yüksek gerilim tesislerinde gerilim altında bulunan tesis elemanlarının yakınına yalıtılmış olarak yerleştirilen sabit veya nakledilebilen madeni kısımlar tesir yolu ile statik yüklenebilirler. Bu elektrik yüklerinin

toprağa akmasını sağlamak için bu gibi kısımlar topraklanırlar. Statik yükler sebebiyle geçen akım bakımından bu topraklama büyük zorlamalara maruz kalmaz. Ayrıca bu topraklama sadece insan hayatını korumaya yaradığından , bu da bir çeşit koruma topraklamasıdır.

Açık hava tesislerine ait madeni çitler üzerinde de statik yükler meydana gelebilir. Bu çitlere işletme ile ilgisi olmayan kimselerin dışarıdan dokunması mümkündür. Bir toprak hatasında bu çitler müsaade edilen sınıır değer olan 125 V'a kadar potansiyel kazanabilirler. Bu gibi hallerde tehlikeli temas gerilimini ortadan kaldırmak için çitler de topraklanırlar. Çitlerin topraklanması , yayılma direnci 500 ohm kadar olan küçük ve basit bir çubuk , levha veya şerit topraklayıcı üzerinden topraklanması yeterlidir. Eğer madeni ızgara veya örgü şeklindeki koruma çitleri parça parça yalıtkan direklere bağlanmışlarsa , herbir parçanın ayrı ayrı topraklanması gerekir. Tesis içinde her bir alana ait çit veya sınırlandırıcılar (manialar) koruma topraklaması ile bağlanabilir.

2.1.2. İşletme topraklaması

Elektrik tesislerinde işletme araçlarının aktif kısımlarının topraklanmasına işletme topraklaması denir. İşletme topraklaması işletme akım devresinin toprağa karşı potansiyelinin belirli bir değerde bulundurulmasına yarar. Bu sebeple işletme akım devresi ile toprak arasında direkt bir bağlantı yapılır ve hatta bu yüzden toprak işletme akım devresinin bir kısmını teşkil eder ve icabında toprak üzerinden bir akım geçer. İşletme topraklaması topraklanan noktayı toprak potansiyelinde tutar. İşletme topraklamasında normal topraklama direncinden başka direnç bulunmazsa buna direkt topraklama denir. Eğer topraklama ilave olarak ohmik, endüktif veya kapasitif bir direnç üzerinden yapılırsa buna endirekt topraklama denir.

2.1.2.1. Alçak gerilim tesislerinde işletme topraklaması

Alçak gerilim tesislerini doğrudan doğruya besleyen generatörün s-tator sargılarına ait yıldız noktasının ve bir üst gerilim kademesi üzerinden alçak gerilim tesislerini besleyen dağıtım transformatörünün alçak gerilim tarafındaki yıldız noktasının veya üçgen bağlı alçak gerilim sar-sında herhangi bir faz hattının topraklanması ve alçak gerilim şebekesinde nötr hattının topraklanması işletme topraklamasıdır.

Alçak gerilim şebekelerinde generatör veya transformatör yıldız noktası topraklandığı gibi şebeke boyunca nötr hattının mümkün olduğu kadar çok topraklanması tavsiye edilir ve ayrıca bunun şebekenin sonunda bir kere daha topraklanması şart koşulmuştur. Bu nedenle bir taraftan paralel bağlı topraklamalar sayesinde toplam işletme topraklamasının direncinin

küçük tutulması ve diğer taraftan da nötr hattında bir kopma olursa ,yıldız noktasından ayrılan şebeke kısmının topraksız olmaması sağlanmış olur.

2.1.2.2.Yüksek gerilim tesislerinde işletme topraklaması

Yüksek gerilim tesislerinde işletme topraklamasının uygulandığı işletme araçları veya işletme akım devrelerinin topraklanacak olan noktaları aşağıda sıra ile belirtilmiştir.

- 1.Gerilim transformatörlerinin üst gerilim sargıları,
- 2.Generatörlerin yıldız noktası bobinleri,
- 3.Toprak teması bobini,
- 4.Transformatörün yıldız noktası,
- 5.Yıldız noktası dirençleri.

2.1.3.Yıldırıma karşı topraklama

Topraklanmış elektrik tesislerine yıldırım düştüğünde yıldırım akımının toprağa akması gerekir.Onun için yıldırım isabet etmesi ihtimali olan parafudrlar,yıldırım yakalama uçları,açık hava bağlama tesislerinde madeni mesnet iskeleleri,havai hatlara ait madeni ve betonarme direkler, havai hatların koruma iletkenleri,ağaç direklerdeki madeni koruma telleri ve şeritleri vb. madeni ve iletken kısımlar topraklanırlar.Yıldırım akımına karşı yapılan bu topraklama ,etki bakımından bir parafudr topraklamasıdır ve görev bakımından özellikle havai hat tesislerinde ve açık hava bağlama tesislerinde koruma topraklamasıdır.Onun için parafudr topraklaması, koruma topraklamasına bağlanır (1).

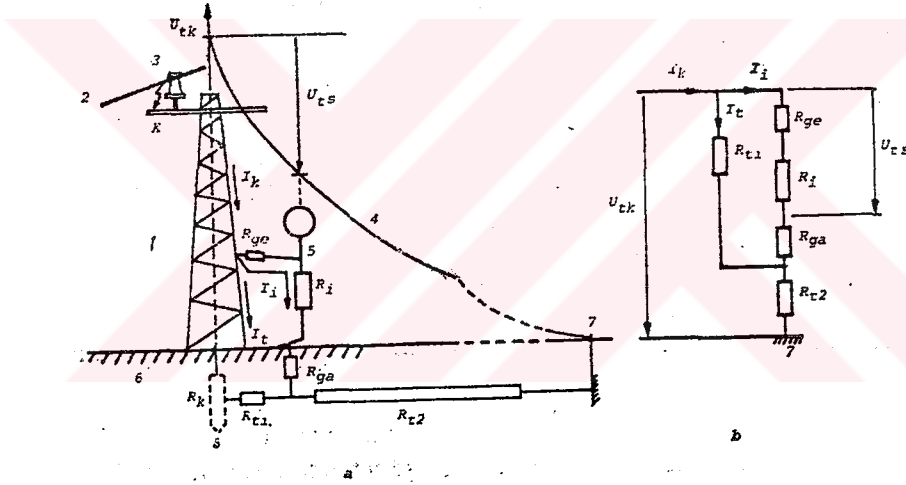
Yıldırıma karşı yapılan bu topraklamanın amacı, bir yıldırım isabeti halinde mesela direk üzerinden geçen büyük yıldırım akımının etki si ile yıldırıma karşı koruma topraklaması üzerinde meydana gelen gerilimin çok büyük olup gerilimin geriye tepmesine ve topraktan havai hat izolatörleri üzerine bir gerilim atlamasının meydana gelmesine engel olmaktır.Bunun için de topraklama direncinin yeteri kadar küçük olması gerekir.

2.2.Topraklama ile ilgili bazı temel kavramlar

2.2.1.Temas gerilimi

Topraklayıcı veya hata geriliminin insan tarafından köprülenen kısmı olup akım yolu elden ayağa veya elden ele gider.Genel olarak gövde kısa devresi olan cihaza dokunan ve yalıtılmamış zemin üzerinde duran bir şahıs temas gerilimine maruz kalır.Bu şahsın durduğu zemin ile referans toprağı arasında bir potansiyel farkı vardır.Onun için temas gerilimi,hata geriliminden küçüktür(1).

Şekil 2.6' de bir yüksek gerilim havai hat'ta ait direk üzerindeki bir izolatörün harap olması sonucunda bir faz hattının,direğin topraklanmış olan madeni gövdesine temas ettiği ve hata yerinden I_k gibi bir hata akımının geçtiği kabul edilmiştir.Burada temas gerilimi,hata geriliminin bir kısmını oluşturmaktadır.



Şekil 2.6. Bir yüksek gerilim tesisinde bir toprak teması olması halinde temas gerilimi.

a. Tesisin şeması,

b. Eşdeğer şema,

1. Madeni yüksek gerilim direği

2. Havai hat

3. İzolatör

4. Potansiyel dağılımı

5. Yüksek gerilim direğine dokunan insan

6. Toprak

7. Referans toprağı

8. Topraklayıcı

Şekil 2.6'da S; topraklayıcıyı, K; toprak temasını, R_k ; koruma topraklamasını, R_i ; insan vücutunun direncini, R_{ge} ; elden geçiş direncini, R_{ga} ; ayaktaki geçiş direncini, R_t ; toprak direncini, U_{tk} ; topraklayıcı gerilimini, U_{ts} ; insan

teması esnasındaki temas gerilimini, I_k ; bir fazlı toprak kısa devresi akımını, I_i ; insan vücudundan geçen akımı, I_t ; toprak akımını göstermektedir.

Toprak üzerinde duran ve hatalı tesis kısmına dokunan bir insan üzerinden toprağa elden ayağa doğru I_i gibi bir akım geçer. Burada insanın direk topraklayıcısından yaklaşık olarak $s=1$ metre yatay uzaklıkta bulunduğu kabul edilmiştir. Temas geriliminin sadece el ile ayak arasında olması şart değildir. İki el arasında da bir akım yolu meydana gelebilir. İnsan vücudunun direnci ile el ve ayaktaki geçiş dirençleri göz önüne alındığında meydana gelen temas gerilimi, topraklayıcı ile insanın durduğu yerdeki potansiyel farkından küçük olur. Bundan dolayı iki cins temas gerilimi vardır. Birincisi, insan vücudunun temas etmesinden önce ölçülebilen U_{te} ve ikincisi insan tarafından temas esnasında meydana gelen temas gerilimi U_{ts} 'dir. Temas esnasında meydana gelen temas gerilimi ise, el ve ayaktaki geçiş dirençleri ile insan vücudunun direncine isabet eden toplam gerilim düşümüdür. Genellikle $U_{te} > U_{ts}$ 'dir.

Şekilde, topraklayıcıya ait toplam yayılma direnci $R_t = R_y$ olup, ayağın bastığı yerden topraklayıcıya kadar olan kısmı R_{t1} ve referans toprağına kadar olan kısmı R_{t2} ile gösterilmiştir. Buna göre,

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} \quad (2.1)$$

dir. Temastan evvelki temas gerilimi de,

$$U_{te} = I_k \cdot R_{t1} = \frac{U_{tk}}{R_t} \cdot R_{t1} = U_{tk} \cdot \frac{R_{t1}}{R_{t1} + R_{t2}} \quad (2.2)$$

dir. Bu ifadede temas geriliminin, topraklayıcı geriliminin bir kısmı olduğunu gösterir. İdeal bir koruma topraklamasında $R_{t1} = 0$ olması gerektiğinden ideal durumda $U_{te} = 0$ olur.

İnsan vücudunun temas ettiği yerde hata akımı iki kola ayrılır. İnsan vücudundan geçen akım I_i ise, buna direk üzerinden geçen geri kalan akım,

$$I_t = I_k - I_i \quad (2.3)$$

dir. İnsan vücudunun direnci R_i 'dir. Direk üzerindeki el ile temas noktasının geçiş direnci R_{ge} ile ve zemin üzerindeki ayağın toprağına karşı geçiş direnci R_{ga} ile gösterilmiştir. Genellikle R_i 'ye seri olan, eldeki geçiş direnci R_{ge} küçüktür ve ihmal edilebilir.

Şekil 2.6.b 'deki eşdeğer şemada gösterilen paralel akım kollarındaki akımlar, kolların dirençleri ile ters orantılı olduğundan,

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{R_i + R_{ga} / 2}{R_{t1}} \quad (2.4)$$

veya,

$$\frac{I_k - I_i}{I_i} = \frac{R_i + R_{ga} / 2}{R_{t1}} \quad (2.5)$$

yazılabilir. Bu ifadeden yararlanarak insan vücudundan geçen akım için,

$$I_i = I_k \frac{R_{t1}}{R_i + R_{ga} / 2 + R_{t1}} \quad (2.6)$$

veya insan vücudunun teması esnasındaki temas gerilimi,

$$U_{ts} = I_i \cdot R_i \quad (2.7)$$

olduğundan,

$$U_{ts} = I_k \frac{R_{t1}}{R_i + R_{ga} / 2 + R_{t1}} R_i \quad (2.8)$$

veya denklem (2.2) ile,

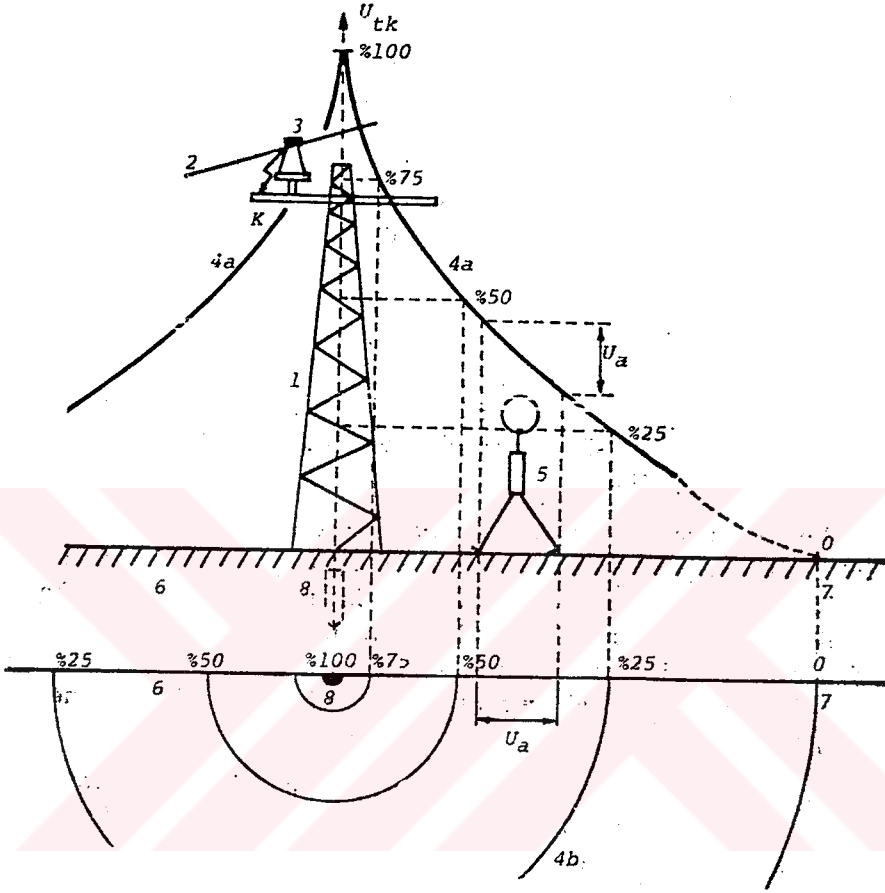
$$U_{ts} = U_{te} \frac{R_i}{R_i + R_{ga} / 2 + R_{t1}} \quad (2.9)$$

yazılır. Görülüyor ki, burada topraklama ile hata akımı için insan vücuduna paralel bir yol teşkil olunmuştur(1).

2.2.2. Adım gerilimi

Topraklayıcı geriliminin adım aralığı ile (yaklaşık 1 metre), köprülenebilen kısmı olup burada akım yolu ayaktan ayağa doğrudur. Bir açık hava tesisinde bir izolasyon hatası yüzünden toprağa bir hata akımı geçerse ve topraklayıcı ile referans toprağı arasında meydana gelen potansiyel alanına bir insan veya bir hayvan girerse bir adım gerilimine maruz kalır. Böylece insan vücudundan bir akım geçer. Şekil 2.7 'de bir toprak kısa devresi halinde meydana gelen potansiyel dağılımı ile toprak üzerinde buna karşılık gelen eşpotansiyel çizgiler ile bu alan içinde bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi gösterilmiştir. Adım gerilimi üzerinden akım geçen topraklayıcıya ait potansiyel alanı içinde bulunan her bir ayağa karşılık gelen potansiyellerin farkına eşittir. İnsanın veya hayvanın eşpotansiyel çizgilere dik olarak yürümesi halinde iki ayağı arasındaki potansiyel farkı yani adım gerilimi maksimumdur. Eşpotansiyel çizgilere paralel olarak hareket eden insanın ayakları arasındaki adım gerilimi sıfırdır. Başka yerlerdeki adım gerilimi maksimum değer ile sıfır arasında değişir. Ayrıca,

adım geriliminin değeri, adım uzunluğuna bağlıdır. Adım uzunluğu arttıkça adım gerilimi de artar.



Şekil 2.7. Bir toprak kısa devresinde meydana gelen potansiyel dağılımı ve toprak üzerindeki eşpotansiyel çizgiler ve bu alanda bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi.

1. Madeni direk,
 2. Havai hat,
 3. İzolatör,
 - 4.a. Potansiyel dağılımı,
 - 4.b. Eşpotansiyel çizgiler,
 5. Potansiyel alanındaki insan,
 6. Toprak,
 7. Referans toprağı,
 8. Topraklayıcı,
- U_{tk} topraklayıcı gerilimi
 U_a adım gerilimi

İnsanlar iki ayaklarını birleştirerek sıçramak suretiyle adım geriliminin tesirinden kurtulabilirler.Topraklayıcının yakınında potansiyel değişimi en büyük değeri aldığından,topraklayıcıya yakın olan yerlerde adım gerilimi daha büyük değer alır.Topraklayıcıdan uzaklaştıkça adım geriliminin değeri hızla düşer.

2.2.3.Topraklama direnci

Topraklama tesisinin R_t toplam direncine topraklama direnci denir. Bu direnç topraklama iletkeninin ve topraklama barasının R_i direncinin, topraklayıcı ile toprak arasındaki R_g geçiş direncinin,topraklayıcının R_y yayılma direncinin ve toprak zeminin R_z direncinin toplamına eşittir. Bunu şu şekilde gösterebiliriz:

$$R_t = R_i + R_g + R_y + R_z \quad (2.10)$$

Topraklama barası dahil,topraklama iletkeninin direnci,yayılma direncinden küçüktür.Ayrıca topraklayıcının toprağı ıslatarak gömülmesi veya topraklayıcının civarındaki toprağa sıkıştırılması veya toprağa çakılması ile geçiş direncinin çok küçük olması sağlanır.Onun için bir çok durumda iletken direnci ile geçiş direnci ihmal edilir.Zeminin toprak direnci de ihmal edilebilecek kadar küçüktür.Onun için topraklama direnci olarak sadece topraklayıcının yayılma direnci alınır.

$$R_t = R_y \quad (2.11)$$

Yayılma direncinin hesaplanmasında topraklayıcının cinsi,şekli,boyutları,toprağın özgül direnci ve gömülme derinliği,topraklayıcı üzerinden geçecek olan akım şiddeti rol oynarlar.Topraklama iletkeninden gelen akım ilk olarak topraklayıcıya oradan toprağa geçer.

2.2.4 Topraklayıcı

Topraklanması istenen makinenin,cihazın veya tesisin toprak ile iletken bir bağlantı sağlamasına yarayan tesis elemanına topraklayıcı denir.Topraklayıcılar genellikle sun'i olarak yapılırlar.Bazen tabii olan topraklayıcılardan yararlanılır.Topraklayıcı daima yeraltına gömülür. Topraklayıcının tesisinde en önemli husus ,bunun her yerinde toprakla iyi temas etmesini sağlamaktır.Topraklayıcının yanında taş ve çakılın bulunması yayılma direncini arttırır.Yayılma direncinin küçük olmasını sağlama amacıyla,topraklayıcının civarında taş ve çakıl bulunmamalıdır.Kuru zeminde killi ve benzeri kohezyonlu topraklar dikkatle dövülüp sıkıştırılır. Kumlu ve benzeri kohezyonsuz topraklar su ile ıslatılır.Topraklayıcının

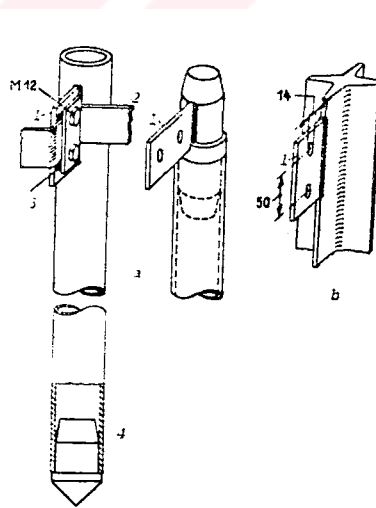
doğrudan doğruya göl veya nehir suyuna konulması uygun olmaz. Zira bu sularda erimiş maden tuzları az olduğundan bunların iletkenlikleri düşüktür. Topraklayıcının cinsine, şekline, gömülme derinliğine ve tesis tarzına göre temas ve adım gerilimlerinde farklı değerler alabilir. Topraklayıcılar genel olarak altı çeşittir;

1. Çubuk topraklayıcı,
2. Şerit topraklayıcı,
3. Levha topraklayıcı,
4. Tabii topraklayıcı,
5. Özel topraklayıcı,
6. Karma topraklayıcı.

Aşağıda en çok kullanılan topraklayıcı çeşiti olarak çubuk topraklayıcı incelenecektir.

2.2.4.1 Çubuk topraklayıcı

Çubuk topraklayıcı, genel olarak 1 inç çapında çelik borudan veya buna eşdeğer profil çelikten yapılırlar ve toprağa dik olarak çakılırlar. Çubuk topraklayıcının uzunluğu 3-5 metre kadardır, üst ucu 50 cm. kadar toprak altında kalır. Çubuk topraklayıcılar oldukça derine indiklerinden, yazın zemin kurusa bile topraklayıcı daima rutubetli zeminde bulunur. Ayrıca çok iyi bir topraklama olanağı sağlar. Aşağıdaki şekilde çubuk topraklayıcı gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Çubuk topraklayıcı

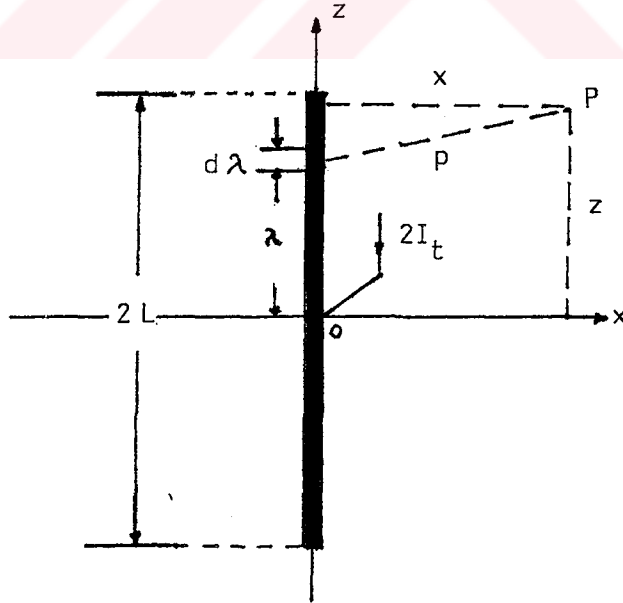
- a. Boru topraklayıcı,
- b. Profil topraklayıcı,
- 1 Bağlama ucu,
2. Topraklama iletkeni,
3. Kurşun tabaka,
4. Boru topraklayıcısının ucu.

Yayılma direnci çubuk uzunluğuna bağlıdır.Çubuk topraklayıcılar yere gömülmeyip,toprağa yerleştirildiklerinden toprak ile daha iyi temas ederler.Bu yüzden yayılma direnci küçük olur.Son 15-20 yıldan beri herbiri 1 metre uzunluğunda birbirine takılabilen boru veya çubuk parçalarından meydana gelen çubuk topraklayıcılar kullanılır.Bunlar parça parça toprağa çakılır.İki parçanın birleştiği yerde elektriki ve mekaniki bakımdan sağlam bir bağlantı yapılır.

-Sonsuz toprak içine gömülen çubuk topraklayıcı

Pratikte çubuk topraklayıcılar yeryüzüne dik olarak toprağa gömülürler.Sonsuz toprak içine gömülmüş bulunan çubuk topraklayıcının,ortasından z eksenine dik x-y düzlemi ile ikiye bölündüğü düşünülür.Bunun toprak içinde kalan kısmı gerçek topraklayıcı olduğu halde,ikinci yarısı toprak üstündeki görüntüsünü oluşturur.Topraklayıcıya akım "o" noktasından bağlanan iletken yardımıyla gelir.Topraklayıcı akımı $2I_t$ ' dir.Çünkü,topraklayıcı iletkeni,hem topraklayıcıyı ve hem de görüntüsünü beslemektedir.

Her yönden sonsuz boyutta toprakla çevrilmiş bir çubuk topraklayıcıya ait potansiyel dağılımını inceleyelim.Burada,topraklayıcının uzunluğu $2L$ 'dir.Çubuk topraklayıcıya verilen akım $2I_t$ ise,bu akım çubuk topraklayıcıdan toprağa her yerde ve her yönde eşit miktarda geçtiğine göre çizgisel akım yoğunluğu $2I_t / 2L$ 'dir, $d\lambda$ elemanına isabet eden akım ise, $(2I_t / 2L) \cdot d\lambda$ 'dır.



Şekil 2.9. $2L$ uzunluğundaki çubuk topraklayıcıya karşılık gelen çizgisel kaynak.

Koordinatları x, y ve z olan uzayda herhangi bir P noktasında $d\lambda$ noktasal kaynağın meydana getirdiği potansiyel,

$$d\varphi = \frac{2I_t}{2L} \cdot d\lambda \cdot \frac{\rho}{4\pi p} \quad (2.12)$$

dir. Burada, ρ ; toprağın özgül direncini göstermektedir. Eğer, $d\lambda$ 'nın çubuk topraklayıcının orta noktasından uzaklığı λ ise,

$$p = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - \lambda)^2} \quad (2.13)$$

olduğundan,

$$d\varphi = 2I_t \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \frac{d\lambda}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - \lambda)^2}} \quad (2.14)$$

bulunur. Çizgisel kaynağın toplam potansiyeli ise, $\lambda = -L$ 'den $\lambda = +L$ 'ye integral alınarak, çubuk topraklayıcıya ait potansiyel ifadesi,

$$\varphi = 2I_t \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \int_{-L}^{+L} \frac{d\lambda}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - \lambda)^2}} = 2I_t \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \ln \frac{z+L + \sqrt{x^2 + y^2 + (z+L)^2}}{z-L + \sqrt{x^2 + y^2 + (z-L)^2}} \quad (2.15)$$

elde edilir. Denklem (2.15)'de $x=d/2, y=0$ ve $z=0$ alınarak sonsuz toprak içindeki bir çubuğun kendi potansiyeli bulunur.

$$\varphi_0 = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L + \sqrt{(d/2)^2 + L^2}}{d/2} \quad (2.16)$$

Burada, $d/2$ boru yarıçapı, L boru uzunluğuna göre küçük olduğundan ihmal edilebilir. Böylece,

$$\varphi_0 = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} \quad (2.17)$$

yazılabilir. Buradan, sonsuz toprak içine gömülmüş bir çubuk topraklayıcının yayılma direnci olarak,

$$R = \frac{\varphi_0}{2I_t} = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{4L}{d} \quad (2.18)$$

bulunur.

-Bir ucu yeryüzünde bulunan çubuk topraklayıcı

Çubuk topraklayıcısının x veya y yönlerinde potansiyel dağılımı eşit olduğundan,denklem(2.15)'de $z=0$ alarak x-y düzleminde merkezden r radyal uzaklığında ($r=\sqrt{x^2+y^2}$) bulunan bir P(x,y) noktası için ,

$$\varphi_r = I_t \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln \frac{L + \sqrt{r^2 + L^2}}{-L + \sqrt{r^2 + L^2}} - I_t \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \ln \frac{L + \sqrt{r^2 + L^2}}{r} \quad (2.19)$$

elde edilir.Denklem (2.19)'da $r=s$ alınarak temas gerilimi bulunur.

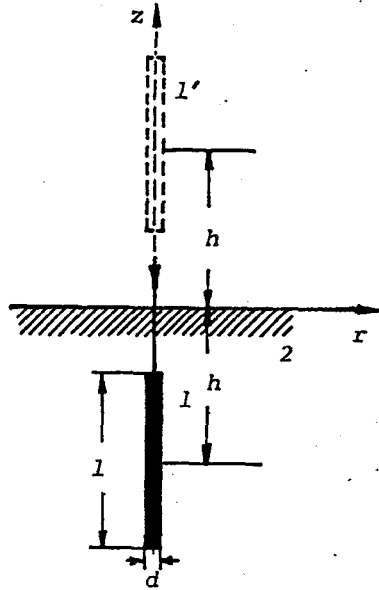
$$U_{te} = \varphi_0 - \varphi_s = I_t \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4 \cdot L \cdot s}{d(L + \sqrt{s^2 + L^2})} \quad (2.20)$$

Adım gerilimi ise,yeryüzündeki φ_r potansiyeli ile $\varphi_{(r+a)}$ potansiyeli arasındaki farka eşittir.

$$U_{ae} = \varphi_r - \varphi_{(r+a)} = I_t \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{(r+a)(L + \sqrt{r^2 + L^2})}{r \cdot (L + \sqrt{(r+a)^2 + L^2})} \quad (2.21)$$

-Derine gömülen çubuk topraklayıcı

Çubuk topraklayıcısının orta noktasının h derinliğinde bulunduğu ve çubuğun boyu L olduğuna göre $h \gg L$ olduğu kabul edilsin.Şekil 2.10'da derine gömülen çubuk topraklayıcı ile bunun görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Derine gömülen çubuk topraklayıcı

Şekil 2.10'da 1;topraklayıcıyı,1';topraklayıcının görüntüsünü,2; toprağı,L;çubuk topraklayıcının boyunu,d;topraklayıcı çapını,h;topraklayıcının ağırlık noktasının yeryüzünden derinliğini göstermektedir.

Derine gömülen çubuğun φ_o potansiyeli, φ_{ol} kendi potansiyeli ile bundan 2h uzaklıkta bulunan görüntüsünün çubuk elektrod üzerine katkısı olan φ'_{ol} potansiyelinin toplamına eşittir. φ_{ol} kendi potansiyeli,denklem. (2.17)'de L yerine L/2 alınarak,

$$\varphi_{ol}=I_t \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2.L}{d} \quad (2.22)$$

bulunur.Çubuk topraklayıcısından 2h uzaklıkta bulunan görüntüsünün katkısı ise,h $\gg$ L alınarak,

$$\varphi'_{ol}=I_t \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{2h} \quad (2.23)$$

dir.Buna göre,derine gömülen çubuk topraklayıcının potansiyeli,

$$\varphi_o = \varphi_{ol} + \varphi'_{ol} = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{d} + \frac{1}{4h} \right) \quad (2.24)$$

ve yayılma direnci,

$$R = \frac{\rho}{L \cdot 2\pi} \left(\ln \frac{2L}{d} + \frac{1}{4h} \right) \quad (2.25)$$

dir.

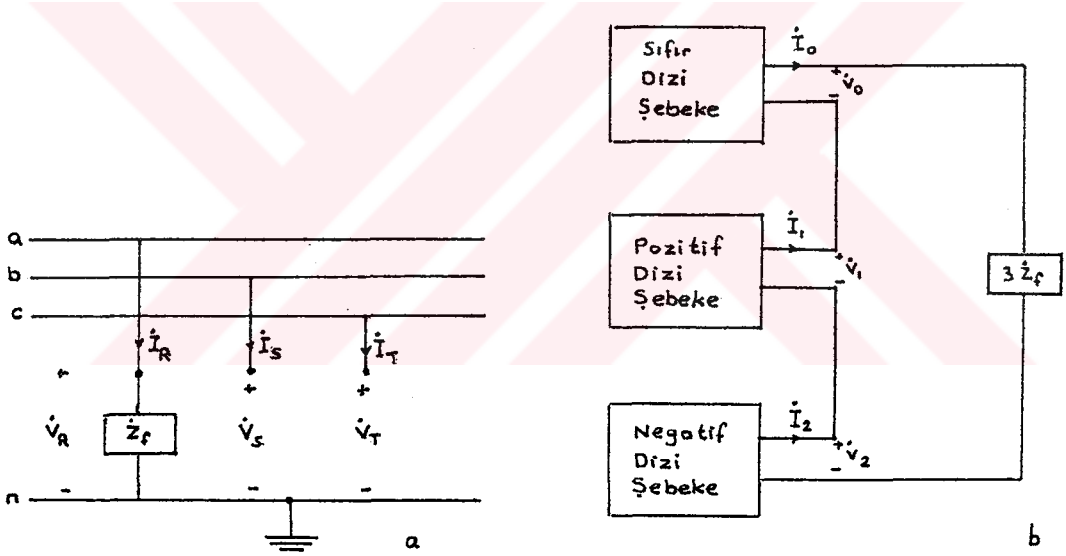
3.TOPRAKLAMA YOLUNDAKİ AKIM DAĞILIMI

3.1.Akım dağılımını doğuran nedenler

3.1.1.Faz toprak arızaları

Üç fazlı bir sistemde herhangi bir faz iletkeninin,nötr hattı veya toprak ile temas etmesi halinde tek faz toprak arızası meydana gelir.Arıza noktasında R fazı toprakla tam temas halinde olduğundan,toprak potansiye-
lindedir.Yani,toprağa karşı gerilimi sıfırdır.Bu fazda gerilim,besleme nok-
tasından arıza noktasına doğru lineer olarak azalmaktadır.Sağlam S ve T
fazlarının toprağa karşı gerilimleri de değişmeksizin aynen kalır.

Şekil 3.1'de bir F noktasında meydana gelen tek faz toprak arızası gösterilmiştir.Burada, Z_f arıza empedansını göstermektedir.Ancak,arıza ça-
lışmalarında Z_f empedansı genellikle ihmal edilir(5).



Şekil 3.1.Tek-faz toprak arızası.

a.Şematik gösterimi,

b.Dizi şebeke bağlantısı.

Burada uç şartlar,

$$\dot{I}_{Sf} = \dot{I}_{Tf} = 0 \quad (3.1)$$

ve

$$\dot{V}_{Rf} = \dot{Z}_f \cdot \dot{I}_{Rf} \quad (3.2)$$

dir.Simetrili bileşenlere göre,

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{Rf} \\ \dot{I}_{Sf} \\ \dot{I}_{Tf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ifadesinden, R fazındaki arıza akımı,

$$\dot{I}_{Rf} = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} \quad (3.4)$$

veya

$$\dot{I}_{Rf} = 3\dot{I}_{a0} = 3\dot{I}_{a1} = 3\dot{I}_{a2} \quad (3.5)$$

dir.Şekil 3.1.a'dan,

$$\dot{V}_{Rf} = \dot{Z}_f \cdot \dot{I}_{Rf}$$

idi.Denklem (3.5)'den,

$$\dot{V}_{Rf} = 3\dot{Z}_f \cdot \dot{I}_{a1} \quad (3.6)$$

yazılır.Simetrili bileşenlerden,

$$\dot{V}_{af} = \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} \quad (3.7)$$

ve buradan,

$$\dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} = 3\dot{Z}_f \cdot \dot{I}_{a1} \quad (3.8)$$

bulunur.(3.5) ve (3.8) ifadeleri sıfır,pozitif ve negatif dizi şebekelerinin birbirlerine seri olarak bağlandığını gösterir.Burada sıfır,pozitif, negatif dizi gerilimler ise,

$$\dot{V}_{a0} = -\dot{Z}_0 \cdot \dot{I}_{a0} \quad (3.9)$$

$$\dot{V}_{a1} = 1.0 - \dot{Z}_1 \cdot \dot{I}_{a1} \quad (3.10)$$

$$\dot{V}_{a2} = -\dot{Z}_2 \cdot \dot{I}_{a2} \quad (3.11)$$

3.1.2.Dengesiz yükler

Dengesiz yükte,her üç faza bağlı yük empedansları,hem değer hem de faz açısı bakımından birbirinden farklıdırlar.Eğer dış şebekenin veya bir transformatörün faz sargıları dengeli olarak yüklenmezse,bu durumda sistemin yükü dengesizdir.Sistemin dengesiz yüklenmesine sebep olan yük çeşitleri şunlardır (6,7,8).

-Bir fazlı yük

En çok rastlanan dengesiz yük şeklidir.Bir fazlı yükler,nötr hattı olmayan transformatörlerde yalnız iki faz hattı arasına,nötr hattı olan sistemlerde ise hem iki faz hattı arasına hemde bir faz hattı ile nötr arasına bağlanabilirler.(Şekil 3.2,3.3)

-İki fazlı yük

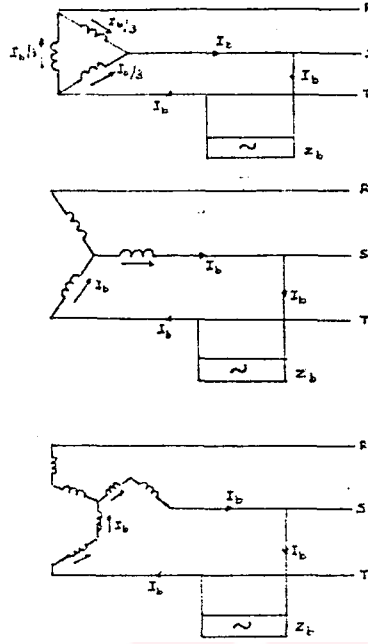
İki adet bir fazlı yük empedansının,nötr hattı olmayan sistemlerde iki ayrı faz hattı arasına ve nötr hattı olan sistemlerde iki ayrı faz ile nötr hattı arasına bağlanması ile sistem iki fazlı olarak yüklenir.(Şekil 3.4)

-Disimetrik yük

Eğer,nötr hattı olmayan transformatörlerde,simetrik yük ile birlikte iki faz hattı arasında bir fazlı yük daha bağlı ise buna,disimetrik yük adı verilir.Disimetrik yük,nötr hattı olmayan üç fazlı ve üç iletkenli alçak ve yüksek gerilim şebekelerinde söz konusu olur.Disimetrik yüklerde,akımların fazör toplamı daima sıfıra eşittir.(Şekil 3.5)

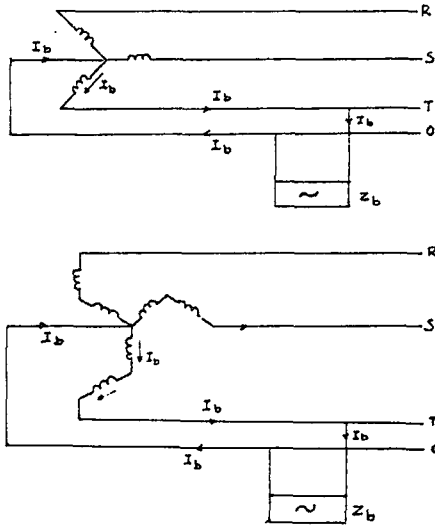
-Asimetrik yük

Nötr hattı çıkarılmış bulunan sistemlerde faz hatları ile nötr hattı arasına bağlanan yük empedansları birbirine eşit değilse buna asimetrik yük denilir.Asimetrik yükün özelliği ise,nötr hattından bir artık akımın geçmesidir.Başka bir deyişle,akımların fazör toplamı artık akımı verir.Asimetrik yüke,daha ziyade dört iletkenli alçak gerilim şebekelerinde veya nötrü topraklanmış yüksek gerilim şebekelerinde rastlanır.(Şekil 3.6)

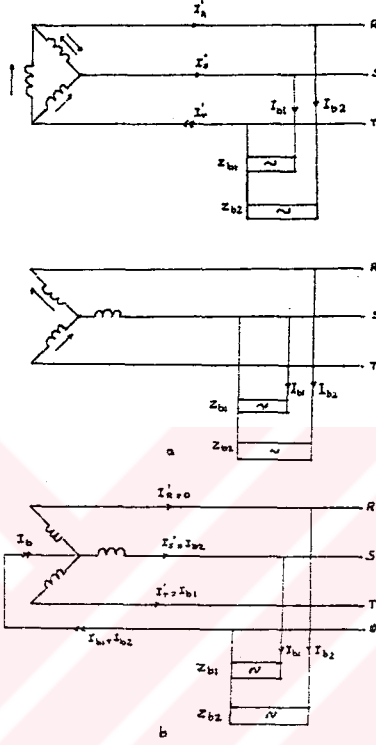


Şekil 3.2. Sekonder sargısı üçgen, yıldız, zigzag bağlı ve nötr hattı olmayan transformatörlerin iki faz arasında bir fazlı yüklerle yüklenmeleri.

Z_b Bir fazlı yük empedansı,
 I_b Bir fazlı yük akımı.



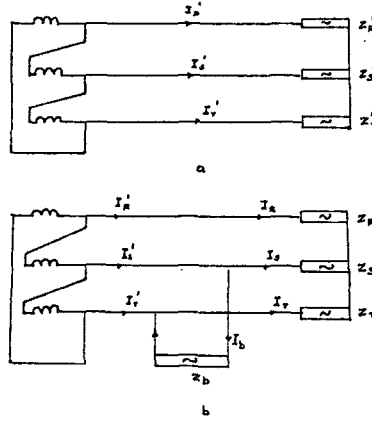
Şekil 3.3. Sekonder sargısı yıldız veya zigzag bağlı ve yıldız noktası çıkarılmış bir transformatörün bir fazi ile nötr arasında bir fazlı yük ile yüklenmesi.



Şekil 3.4. İki fazlı dengesiz yük ile yüklenmiş transformatörler.

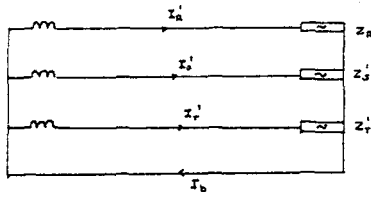
- a. Sekonder sargısı üçgen veya yıldız bağlı ve nötr hattı olmayan transformatörlerin iki fazlı yüklenmeleri,
- b. Sekonder sargısı yıldız(veya zigzag) bağlı ve nötr hattı olan transformatörlerin iki fazlı yüklenmeleri.

Z_{b1}, Z_{b2} Bir fazlı yükler,
 I_{b1}, I_{b2} Bir fazlı yük akımları,
 I_R', I_S', I_T' Hat akımları.



Şekil 3.5. Disimetrik yük.

- a. Üç fazlı yük empedansı,
- b. Üç adet simetrik yük empedansı ile
bir adet bir fazlı yük empedansı,
 T_r Transformatörün sekonder sargısı
- Z_R', Z_S', Z_T' Simetrik yük empedansları,
- Z_R, Z_S, Z_T Birbirinden farklı yük empedansları,
- Z_b Bir fazlı yük empedansı,
- I_R, I_S, I_T Simetrik yük akımları,
- I_R', I_S', I_T' Dengesiz yük akımları,
- I_b Bir fazlı yük akımı.



Şekil 3.6. Asimetrik yük.

- T_r Transformatörün sekonder sargısı,
- Z_R', Z_S', Z_T' Birbirinden farklı yük empedansları,
- I_b Nötr hattından geçen akım,
- I_R', I_S', I_T' Asimetrik yük akımları.

3.2. Topraklama yolundaki empedans bileşenleri

3.2.1. Direklerin topraklama dirençleri

Direklerin topraklama dirençleri, temel derinliği, toprak yapısı (batıklık, kayalık vs.), topraklayıcının geometrisi ve toprağın sıcaklığı, nemi ve benzeri koşullara bağlıdır. Hat boyunca zeminin yapısına bağlı olarak bu direnç değeri değişmektedir. Ancak, kolaylık açısından ortalama bir direnç değeri alınabilir. Bu değer,

$$R_d = 0.01 \rho \quad (3.12)$$

alınabilir. ρ değeri 100 ila 10.000 arasındadır. Türkiye elektrik kurumunun normlarına göre, R_d direncinin 20 ohm'un üzerine çıkmaması istenir. Bunun için direkler aşağıda belirtildiği şekilde iki yöntemle topraklanır (18).

-Birinci yöntem.

Topraklama elektrodu direnci 20 ohm'un altına düşmemek şartı ile temel çukurlarından kotu en düşük ve zemini en müsait olan ayakların temel tabanına çakılır. Bu şekilde yapılan topraklamada, topraklama direnci 20 ohm'un altına düşmemiş ise aşağıda belirtilen ikinci yöntemdeki gibi topraklama yapılmalıdır.

-İkinci yöntem.

Topraklama, direk ayaklarından herhangi biri merkez olmak üzere 30 metre yarıçaplı bir saha içinde 20 ohm'u sağlayacak en uygun bir doğrultu ve yerde olmak üzere, en az 150 cm. derinlikteki düşey düzlemde dikine yerleştirilmiş en az 200 cm. boyunda ve en az 5 cm. çapında galvanizli boru veya buna eşdeğer galvanizli profil ile yapılmalı ve topraklama elektrodu direk gövdesine en az 70 mm²'lik galvanizli örgülü çelik tel ile irtibatlandırılmalıdır.

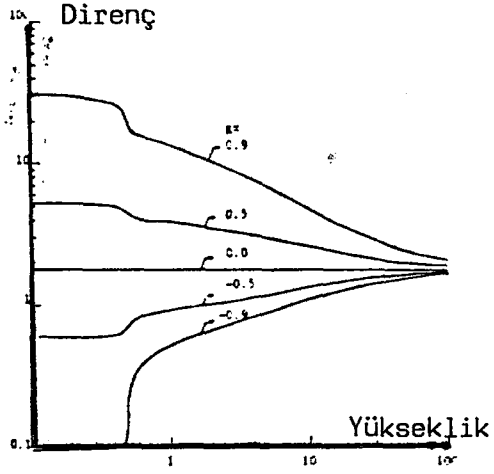
3.2.2. Santral (posta) ağ topraklamaları.

Topraklama ağının empedansı,

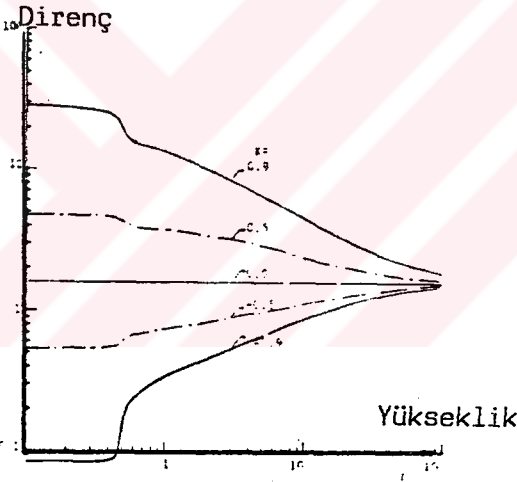
$$\dot{Z}_t = f(a) + j\varphi(b) \cong f(a) \quad (3.13)$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 3.7 ve 3.8, herhangi iki tabakalı toprak yapısı içine gömülmüş 4 veya 16 gözlü ağların toprak direncini hesaplamak amacıyla kullanılabilir. Şekildeki sayısal değerler, yeryüzünden 0.5 m. derinliğe gömülmüş 30x30 m. boyutunda bir ağ için geçerlidir.

Şekiller, topraklama ağının direncinin derin toprak öz direncinden etkileneceğini göstermektedir. Ayrıca, topraklama ağının yeri üst tabakadan alt tabakaya değiştiğinde ($h=z=0.5$ m.), ağ direncinin değişimi oldukça ani olmaktadır (k değeri 0.1 veya -0.1 değerine eriştiğinde).



Şekil 3.7. Dört gözlü ağ direnci



Şekil 3.8. Onaltı gözlü ağ direnci

3.2.3. Direklerin koruma telinin empedansı

Direklerin koruma (toprak) telinin öz(self) empedansı aşağıdaki ifade ile verilmektedir. Bu ifade, Carson bağıntısı olarak bilinmektedir.

$$\dot{Z}_t' = R_t + jX_t = R_t + (0.98f + 2.88f \cdot \log \frac{D_e}{d}) \cdot 10^{-3} \quad (3.14)$$

Birimi ohm/km.'dir. Faz iletkenlerinin çaprazlaştırılmamış oldukları kabulü ile ortak(karşılıklı) empedans,

$$\dot{Z}_{tm}' = (0.98f + j2.88f \cdot \log \frac{D_e}{D}) \cdot 10^{-3} \quad (3.15)$$

dır.

Burada,

f : Şebeke frekansı,

D : Faz iletkenleri ile koruma teli arasındaki ortalama uzaklıktır.

D ifadesi,

$$D = \sqrt[3]{d_{RT} + d_{ST} + d_{TT}}$$

D_e : Koruma telinin geometrik ortalama yarıçapıdır.

$$D_e = 655 \cdot \sqrt{\rho / f}$$

dir.

ρ : Toprağın özgül direncidir.

Eğer koruma teli çelik ise, koruma teli ile faz iletkeni arasındaki karşılıklı kuplaj $Z_{tm}' = 0$ alınabilir.



4.TOPRAKLAMA YOLUNDAKİ AKIM DAĞILIMINA İLİŞKİN ANALİTİK YÖNTEMLER

Topraklanmış bir enerji sisteminde,tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde,akım,besleme merkezine toprak ve nötr iletken üzerinden geri döner.Arıza akımının büyüklüğü ve arıza akımının toprak ile nötr iletkenlerdeki dağılımında,emniyetli topraklama tesisatı dizaynı,birbirine komşu devreler üzerinde elektromagnetik endüksiyonu doğru olarak hesaplama,koruma rölelerinin optimum durumunu gözönüne alma,birinci derecede önemlidir.Burada,toprak arıza akımının büyüklük ve dağılımını hesaplama da bir analitik yöntemi,tüm hava hattı ve yeraltı şebeke parametrelerini tam olarak hesaba katarak ,alan ölçümleriyle hesaplanmış olarak verilecektir. .

Faz-toprak kısa devre hesaplamalarında ,topraklama ağları ve havai direk temelleri gibi toprağa enterkonnekte bağlı nötr empedansları ihmal edilebilir veya çoğu kez sonsuz olduğu kabul edilir.Bununla beraber,topraklama empedanslarını dikkate alarak,uygun dönüş yolları üzerinde toprak arıza akımının dağılımını hesaplayan analitik yöntemleri içeren birkaç yararlı makale (10) ve kitap (11) vardır.Endreyni(10),bu alanda birkaç önemli makale yazmıştır.

Verma ve diğer yazarlar(10) benzer kabulleri kullanarak problemi analiz etmiştir.Burada ,genellikle pratikte doğrulanamayan yaklaşım ve hipotezler yer almaktadır.

a.Arıza akımının büyüklüğü sistem çalışmalarından bilinir ve (örneğin,toprak öz direnç değişimleri sebebiyle) arıza akımı topraklama empedanslarının değişmesinden etkilenmemiştir.

b.İki topraklanmış iletim direği ve direk zemin dirençleri arasındaki toprak iletkeni kısımlarının empedansları aynıdır.

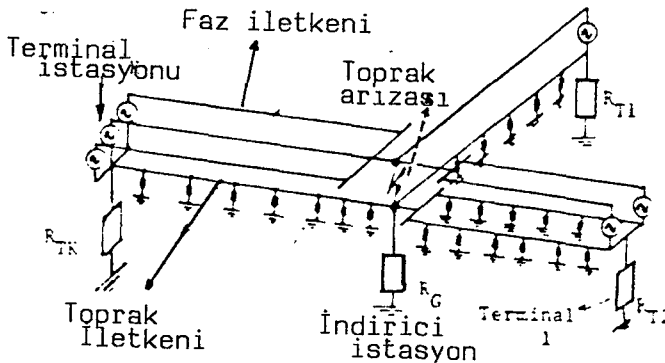
c.İki iletim hattının bir maksimumu ve iki toprak şebeke kutupları(sınırları) ,hatanın meydana geldiği noktanın her iki tarafında vardır.

d.Sonsuz hatlar veya çok sayıda kısımlar ,dağılmış parametre teknikleri(10) veya sonlu fark eşitliği (11)kullanarak problemi çözmek için gözönüne alınır.Bununla beraber Endreyni,kısa iletim hatları için düzeltici faktörler ortaya koymuştur.

Yukarıdaki tahminler daima gerçekçi değildir.Bir indirici istasyonda, birkaç (gelen ve giden) iletim hattı bulunabilir.Bu hatlar bazen 10 km'den az olabilir.Toprağın farklı oluşu sebebiyle ,iletim hattı temel dirençleri

tamamen aynı değildir. İletim hattının bazı kısımlarında ara bağlantı iletkenlerle donatılabilir. Diğer kısımlarında kötü bir topraklama yapılmış olabilir. Bazı durumlarda ,bir indirici istasyonun yakınlarında sadece alüminyum toprak iletken tesisatı yararlı ve ekonomik olabilir. Toprak elektrod yerinde (İl), elektrodan daha fazla toprak akımı dağıtarak tehlikeli potansiyellerin ortaya çıkması durumundan sakınmak için ,bu,istenebilir. Ayrıca, ara bağlantı(counterpoise) iletkenleri,bir indirici istasyon ağında toprak arıza akımını dağıtmak için çok yararlıdır. Bununla beraber,hava hattı ve ara bağlantı iletkenlerinden akan akımlardan dolayı,arıza noktasından az bir mesafede başlangıç değerlerinin birkaç yüzde değerine çabucak azaltılır. Tüm iletim hattının böyle iletkenlerle donatılması ekonomik değildir. Bundan dolayı,alüminyum toprak iletkeninin veya ara bağlantı iletkeninin optimum uzunluğu ,farklı iletim hattı kısımları gözönüne alınarak belirtilmelidir. Tüm bu açıklamalar şunu göstermektedir ki,ekonomik optimize edilmiş enerji şebekesi dizaynında (faz-toprak arızası etkilerine göre) çok kısımlı kısa iletim hatları kadar yeterli derecede genel ve çok yönlü sonuçları dikkate alan ve farklı iletim hattı kısımlarını açıklayan hesap yöntemleri gereklidir. Bu genel problemi çözmenin tek yolu ,bir bara ile gösterilen herbir direğin nötr iletken düğümü analog ve geleneksel kısa devre hesapları yöntemi-ni kullanmaktır. Bu yöntemi içeren elektrik devresi ,direkt veya iteratif yöntemler yardımıyla çözülür. Burada geliştirilen yöntem,bilgisayar uygulamalarında daha az bilgisayar hafızası gerektirmektedir.

Elektrik şebekeleri,terminal denilen istasyonlarda yer alan birkaç gerilim kaynağı içermektedir. Her bir kaynak bir gerçek generatör olabilir veya bir eşdeğer kaynak empedansı tarafından yerine konulabilen enerji sistem ağının bir kısmını gösterebilir. Transformatör empedanslarını içeren kaynak empedansı,terminale yakın iletim hattı kısımlarının empedansına ilave edilir. Birkaç iletim hattı,herbir terminali faz-toprak arızasına maruz kalan tali istasyon veya direğe bağlar.



Şekil 4.1. Bir enerji şebekesinin gösterimi

İletim hattının faz iletkenleri, tek faz -toprak arızası olduğu takdirde bir eşdeğer iletken yerine geçebilir. Bununla beraber, burada açıklanan yöntem ,çok fazlı iletkenlere kolaylıkla genişletilebilir veya sonradan verilen eşitliklerin herhangi bir modifikasyonu haricinde her bir faz iletkeni farklı iletim hattı olarak gözönüne alınabilir ve terminal kaynak gerilimleri ve terminal faz ve toprak iletkeni öz ve karşılıklı empedansları için uygun değerler kullanarak 3 fazlı hatlar kolaylıkla simule edilebilir. İletim direkleri ,direğin kendi empedansını içeren bir empedans gösterir. Zemin empedansı ve toprağa karşı kaçak kapasitans önemli olabilir. Tek faz-toprak arızasının büyüklüğü ve onun çeşitli dönüş yolları boyunca dağılımı, birkaç faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin en önemlileri şunlardır;

- a. Üretim kaynağı ve transformatör empedansları,
- a. Faz ve nötr iletkenlerinin öz ve karşılıklı empedansları,
- c. Terminal istasyonlarının ve ara indirici istasyonlarının topraklama ağı empedansları,
- d. İletim direkleri zemin empedansları,
- e. Arıza yeri.

c ve d şıklarında tanımlanmış empedanslar, esas itibariyle toprak karakteristiklerinin bir fonksiyonu olan bir gerçel kısma sahiptir (12,13) Ancak, bu karakteristikler, sadece zamanla değil ,aynı zamanda bir yerden diğerine sabit veya değişken değildir. Bu empedanslar şu şekilde gösterilebilir.

$$\hat{Z} = \ell(s) + j\zeta(s) \quad (4.1)$$

Burada s; toprak yapısını ve toprak elektrod şeklini tanımlayan bir grup parametreleri ,g; toprak iletkenlerinin sırasını tanımlayan parametrelerin grubunu gösterir. Çoğunlukla, $\ell(s)$ sabit olarak gözönüne alınır ve üst toprak direnciyle lineer olarak değişmesine müsaade edilir. Diğer fonksiyonlar, direnç değerlerinin değişimlerini simule etmek için kullanılabilir. Elektrod geometrisinin temel olarak bir fonksiyonu olan imajiner kısım $\zeta(s)$ sabit olarak dikkate alınır. Pek çok durumda $\zeta(s)$, $\ell(s)$ ye göre ihmal edilebilir. Bundan dolayı, bu ,büyük topraklama tesisatı veya dengeleyici iletkenler için doğru olamaz. Direk topraklama empedansı, sadece direğin topraklama iletkeni ile değil aynı zamanda bu hayali ara bağlantının her bir kısmı, empedans değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olarak ilave edilmelidir.

Burada geliştirilen analitik metod,bir direk çözümdür.Basitliğine rağmen bazı direk metodlar,bilgisayar uygulamaları için uygun olmaz.Çünkü,hasaplama esnasında bazı basamaklar kaybolur.

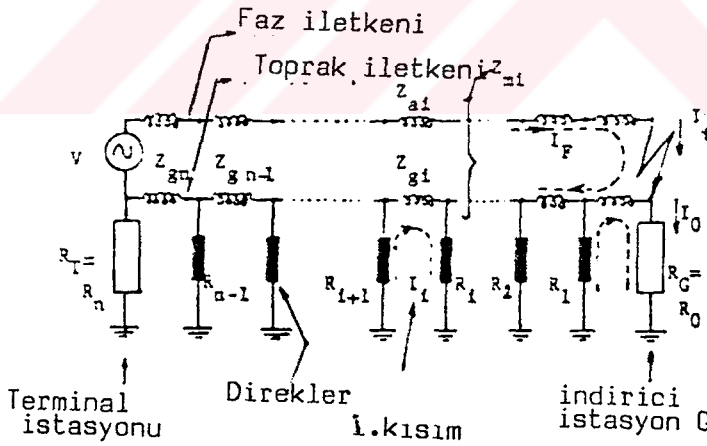
Burada ilk önce basit bir örnekla başlanır.Ayrıca,hesaplamadaki çeşitli yöntemler kısaca yorumlandıktan sonra,tek taraflı eliminasyon(yoketme) yöntemi ayrıntılarıyla gözönüne alınır.Analiz edilen problem şekil4.2 de gösterilmiştir.Üretim tarafı T, indirici istasyon G'de meydana gelen tek faz-toprak arızasını bir $\dot{I}_f$ akımıyla beslemektedir.İletim hattının toprak iletkeni de direklerde düzenli aralıklarla topraklanmıştır.

-Fark eşitliği yöntemi

Eğer hat yeteri derecede uzunsa (sonsuz hat) ve direk empedansı R ise ,faz ve toprak iletkeni öz empedansları ve karşılıklı empedansları $\dot{Z}_a$, $\dot{Z}_g$, $\dot{Z}_m$,tüm iletim hattı kısımlarında eşit olarak düşünülürse o zaman sonlu fark eşitliği yöntemi(11) uygulanabilir.Çözüm, n sayıda direğin bir üstel fonksiyonu ile orantılıdır.

-Sonlu hat düzeltme faktörü yöntemi

Eğer hat sonsuz olarak düşünülmez ise,hattın toprak şebeke empedansı arızaya ters taraftaki hat ucuna ,bağlıdır.Bu durumda,bir önceki tahminler baz alınarak,dağıtılmış parametreler metodu sonuçları,yarı ampirik faktör olan λ'_n kullanarak düzeltilir.



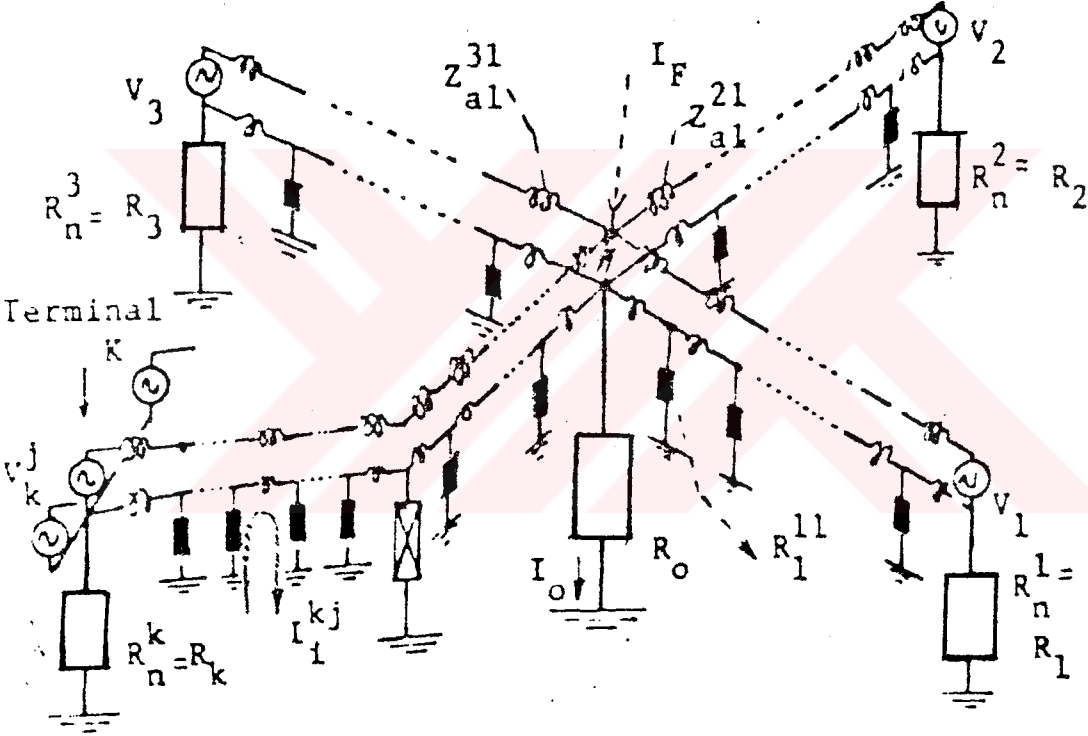
Şekil 4.2.Enerji sisteminin şematik gösterimi.

4.1.Tek taraflı eliminasyon yöntemi

Bu yöntem,diğer yöntemler gibi Kirchoff'un yasalarına dayandırılır. Aşağıdaki gerilim eşitlikleri şekil 4.2'de gösterilen çevrimlere göre yazılabilir.

4.2.Çift taraflı eliminasyon yöntemi

Tek taraflı eliminasyon yöntemi kullanıldığında ,bazı durumlarda meydana gelebilen yuvarlatma hataları,iletim hattının diğer tarafındaki değerlere göre geçerli olan ve iletim hattının bir tarafının bilgisini temel olarak kullanan hesaplama algoritmasının neticesini oluşturur.Ayrıca,iki taraflı eliminasyon yöntemi hattın her iki tarafındaki bilgiyi aynı zamanda kullanır.Bu durum ,şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3.Çift taraflı eliminasyon metodu için kullanılacak eşdeğer şema.

K terminelinin J hattına bağlı eşitlikler verilir.Aynı zamanda,bu hattaki (n_{kj}) kısımlarının toplam sayısı n olarak yazılır.

Çevrim

$$\begin{aligned}
 (0) \quad & \dot{H}_F^{KJ} - \sum_{i=1}^n (\dot{S}_i^{KJ} \dot{I}_i^{KJ}) = \dot{V}_K^J \\
 (1) \quad & -\dot{S}_1^{KJ} \dot{I}_F^{KJ} + \dot{T}_1^{KJ} \dot{I}_1^{KJ} - R_1^{KJ} \dot{I}_2^{KJ} + R_0 (\dot{I}_0 - \dot{I}_1^{KJ}) = 0 \\
 & \dots\dots\dots \\
 (i) \quad & -\dot{S}_i^{KJ} \dot{I}_F^{KJ} - R_{i-1}^{KJ} \dot{I}_{i-1}^{KJ} + \dot{T}_i^{KJ} \dot{I}_i^{KJ} - R_i^{KJ} \dot{I}_{i+1}^{KJ} = 0 \\
 & \dots\dots\dots \\
 (n) \quad & -\dot{S}_n^{KJ} \dot{I}_F^{KJ} - R_{n-1}^{KJ} \dot{I}_{n-1}^{KJ} + \dot{T}_n^{KJ} \dot{I}_n^{KJ} + R_K (\dot{I}_K - \dot{I}_n^{KJ}) = 0
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Burada,

$$\begin{aligned}
 \dot{H}_F^{KJ} &= \sum_{i=1}^n (\dot{Z}_{a1}^{KJ} + \dot{Z}_{g1}^{KJ} - 2\dot{Z}_{m1}^{KJ}) \\
 \dot{S}_i^{KJ} &= \dot{Z}_{g1}^{KJ} - \dot{Z}_{m1}^{KJ} \\
 \dot{T}_i^{KJ} &= R_{i-1}^{KJ} + \dot{Z}_i^{KJ} + R_i^{KJ}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Çevrim eşitlikleri (2)'den (n-1)'e kadar ,herbir K_j hattı için şunu yazarız.

$$\dot{I}_i = \dot{A}_i \dot{I}_{i-1} + \dot{B}_i \dot{I}_{i+1} + \dot{C}_i \dot{I}_F \quad ; \quad i=2, n-1 \tag{4.10}$$

Burada,

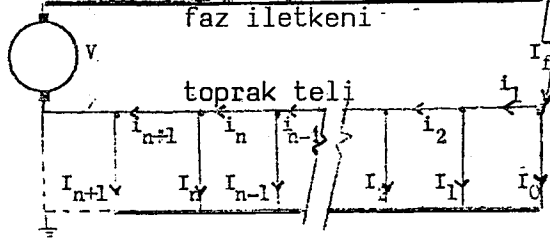
$$\begin{aligned}
 \dot{A}_i &= R_{i-1} / \dot{T}_i \\
 \dot{B}_i &= R_i / \dot{T}_i \quad \quad \quad i=2, n-1 \\
 \dot{C}_i &= \dot{S}_i / \dot{T}_i
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

$\dot{A}_i$, $\dot{B}_i$ ve $\dot{C}_i$ pozitif ve daima 1'den küçüktür.Bu,tanımlanmış (4.5) ve (4.7) eşitlikleri yardımıyla diğerlerine göre bir avantaj sağlar,yine tanımlarsak,

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_n &= R_{n-1} / (\dot{T}_n - R_n) \quad ; \quad \dot{A}_1 = -R_0 / (\dot{T}_1 - R_0) \\
 \dot{B}_n &= -R_n / (\dot{T}_n - R_n) \quad ; \quad \dot{B}_1 = R_1 / (\dot{T}_1 - R_0) \\
 \dot{C}_n &= \dot{S}_n / (\dot{T}_n - R_n) \quad ; \quad \dot{C}_1 = \dot{S}_1 / (\dot{T}_1 - R_0)
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

(4.11) eşitliği $i=1$ ve $i=n$ için geçerli olur.

4.3. Zincir empedans yöntemi yardımıyla arıza akımının toprak yolundaki dağılımı



Şekil 4.4. Arıza akımı dağılımının şematik gösterilimi

Şekil 4.4.'deki modelde, direkler arasında kalan toprak teli empedansının eşit (bir başka deyişle güzergâh boyunca direk açıklıklarının eşit) olduğu ve her direğin topraklama direncinin eşdeğer ve sabit olduğu varsayılmıştır. Z_g iki direk arasındaki toprak telinin empedansını, R_t direk topraklama direnci ve I_n , n'inci direkten akan akım olmak üzere,

$$\begin{aligned} \dot{I}_n &= i_n - i_{n+1} \\ \dot{I}_{n-1} &= i_{n-1} - i_n \end{aligned} \quad (4.13)$$

ve

$$i_n \cdot \dot{Z}_g - \mu \cdot \dot{I}_f \cdot \dot{Z}_g + \dot{I}_n \cdot R_t - \dot{I}_{n-1} \cdot R_t = 0 \quad (4.14)$$

Burada ,faz iletkeni ile toprak teli arasındaki karşılıklı kuplajı gösteren "Kuplaj faktörü" dür ve,

$$\mu = \frac{\log(b/a)}{\log(2h/r')} \quad (4.15)$$

ifadesiyle hesap edilir. Burada,

b: İletken ile toprak telinin görüntüsü arasındaki uzaklık,

a: İletken ile toprak teli arasındaki mesafe,

h: Toprak teli ile zemin arasındaki yükseklik,

r': Toprak telinin yarıçapı.

(4.23) ifadesinin yeniden yazılmasıyla,

$$i_n = \frac{(\dot{I}_{n-1} - \dot{I}_n) \cdot R_t}{\dot{Z}_g} + \mu \cdot \dot{I}_f$$

ve benzer şekilde,

$$i_{n+1} = \frac{(\dot{i}_n - \dot{i}_{n+1}) \cdot R_t}{\dot{Z}_g} + \mu \cdot \dot{i}_f$$

(4.13)' de yerine konularak,

$$\dot{i}_n = \frac{(\dot{i}_{n-1} - \dot{i}_n) \cdot R_t}{\dot{Z}_g} + \mu \cdot \dot{i}_f - \frac{(\dot{i}_n - \dot{i}_{n+1}) \cdot R_t}{\dot{Z}_g} - \mu \cdot \dot{i}_f$$

eşitlikleri yazılabilir.

Diferansiyel denklem gösterimine geçilecek olursa,

$$i_n = A \cdot e^{\alpha \cdot n} + B \cdot e^{-\alpha \cdot n} + \mu \cdot I_f \quad (4.16)$$

$$\alpha = \sqrt{Z_g / R_t}$$

yazılabilir(15). Burada diferansiyel denklem çözümüyle ilgili özdeşlikler kullanılarak,

$$i_n = A \cdot e^{\alpha \cdot n} / (1 - e^{-\alpha}) + B \cdot e^{-\alpha \cdot n} / (1 - e^{-\alpha}) + \mu \cdot I_f \quad (4.17)$$

yazılır(15,16). Ara işlemler yapıp düzenlenirse,

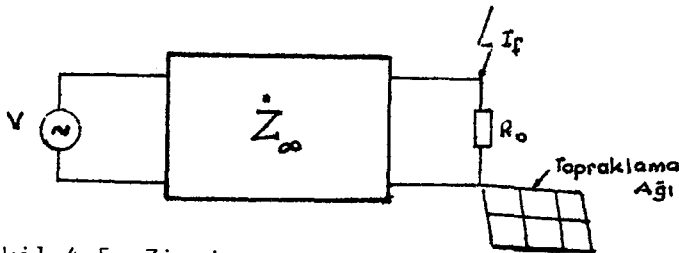
$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{i}_o \cdot R_t \\ &= \dot{i}_f (1 - e^{-\alpha}) (1 - \mu) \cdot R_t \\ &= \dot{i}_f \cdot \dot{Z}_\infty \end{aligned} \quad (4.18)$$

eşitlikleri yazılabilir. $Z_g \ll R_t$ koşulunun sağlanması halinde,

$$\dot{Z}_\infty = \sqrt{Z_g \cdot R_t} (1 - \mu) \quad (4.19)$$

elde edilir(15).

$\dot{Z}_\infty$, 'Zincir Empedansı' adını alır; bu empedans hattın uzunluğundan bağımsızdır. Ancak yeterince uzun olan hatlarda yeterli doğruluk sağlar.



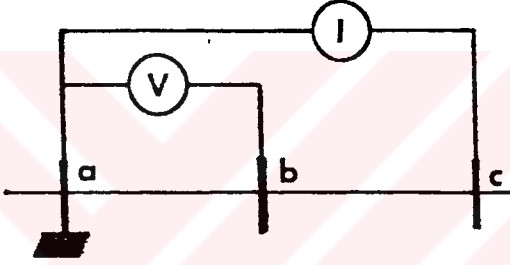
Şekil 4.5. Zincir empedansın basit gösterilimi

5.OPTİMUM TOPRAKLAMA ANALİZİ

5.1.Uniform olmayan toprakta toprak elektrodu direncinin ölçümü

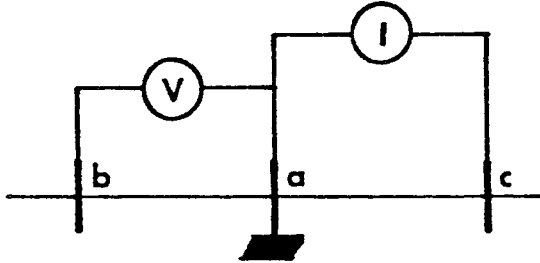
Bu bölümde,homojen olmayan toprak içindeki gerilim sondasının her iki durumu için deneysel ve teorik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Toprak elektrodu direncinin ölçümü,genellikle gerilim düşümü metodu ile yapılmaktadır.Topraklama direncinin ölçümünde iki çeşit gerilim düşümü metodu vardır.Birincisi,klasik gerilim düşümü metodudur,ikincisi ise alternatif gerilim düşümü metodudur.Klasik gerilim düşümü metodunda gerilim sondası,toprak ve akım elektrodu arasında yer alır.Bu durum şekil 5.1 de görülmektedir.



Şekil 5.1.Klasik gerilim düşümü metodu
a toprak elektrodu
b gerilim sondası
c akım elektrodu

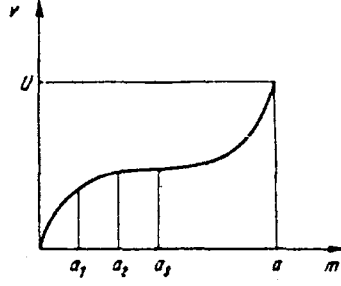
Alternatif gerilim düşümü metodunda ise,gerilim sondası toprak ve akım elektrodunun dışında yer alır.Bu durum da şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2.Alternatif gerilim düşümü metodu

Genel olarak,direnci ölçülmek istenen toprak elektrodundan uzakta bir yardımcı elektrod tesis edilerek toprağa alternatif akım gönderilir. Bu iki elektrod arasına gerilim sondası çakılır ve sondanın çakıldığı yer

ile toprak elektrodu arasındaki potansiyel farkı ölçülerek, toprak elektrodunun direnci belirlenir. Bu ölçme esnasında elektrodların yakınında gerilimin dik olarak yükseldiği, orta noktalarında ise gerilimin hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Bu ölçme sonucunda iki elektrod arasında elde edilen potansiyel dağılımı Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Elektrodlar arasındaki potansiyel dağılımı

Burada, ölçülecek olan toprak elektrodu direncinin, doğru olarak tayin edilebilmesi için akım elektrodunun, topraklama elektrodundan en az 40 metre uzakta olması gerekmektedir. Ancak bu uzaklık, normlara göre, topraklama tesisinin en az 5 katı olmalıdır (17,18). Teorik çalışma iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda elektrod geometrisinin etkisi ihmal edilmiştir. İkinci adımda ise, bu etki gözönüne alınmıştır.

5.1.1. I adım. Küçük toprak elektrodu.

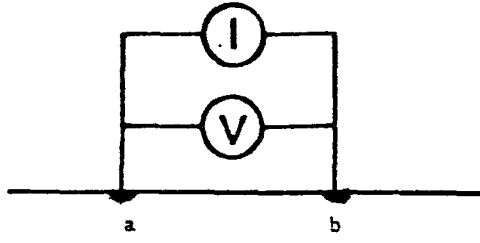
Burada, şu kabuller yapılmıştır.

- Elektrodun metalik iletkenliği ihmal edilmiştir.
- Elektrod, yarıçapı r olan bir yarıküreye eşittir.
- Toprak ve akım elektrodu arasındaki d mesafesi yeterli genişliktedir ve toprak elektrodunun boyutu, karşılıklı direnç değerini değiştirmemektedir. r/d oranı için uygun değer $1/20$ 'dir.
- r yarıçapı, birinci tabakanın kalınlığı olan h 'ye göre oldukça küçüktür. r/h oranı için uygun değer $1/15$ 'dir.
- Toprak elektrodu sadece birinci tabaka içine gömülmüştür.
- Elektroddaki akım yoğunluğu üniformdur.
- Empedansların tümünün sadece bir direnç bileşeni vardır. Reaktif bileşen, endüstri frekanslarında ve sabit durumlarda ihmal edilmektedir.

Aşağıdaki şekli gözönüne alalım. Burada, iki elektrodun arasındaki direnç,

$$R_{a-b} = \frac{V_{a-b}}{I_{a-b}} = R_{aa} + R_{bb} - 2R_{ab} \quad (5.1)$$

şeklinde yazılır.



Şekil 5.4. Toplam direnç ölçümü

Şekil 5.1 ,gözönüne alınarak,

$$R_{aa} = R + R_{ab} + R_{ac} - R_{bc} \quad (5.2)$$

bulunur.(Ek I'e bakınız).Burada,

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V_{a-b}}{I_{a-b}} \quad (5.3)$$

dir.

$$R_{ab} + R_{ac} - R_{bc} = 0 \quad (5.4)$$

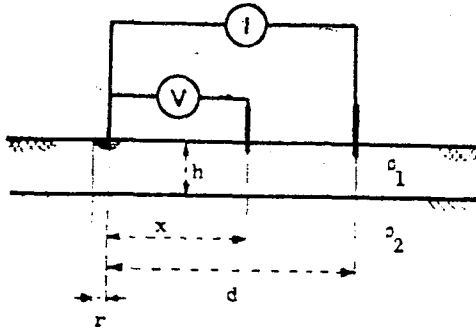
alınarak,(5.2)'deki a elektrodunun gerçek direncini bulmuş oluruz.

i ve j elektrodları arasındaki R_{ij} karşılıklı direnci,toprak tabakasının yapısına ve elektrod şekline bağlıdır.Şekil 5.5'de,d mesafesi ve bu mesafeye göre oldukça kaçak toprak elektrodu boyutları,iki tabakalı toprakta gösterilmiştir.

Burada,

$$R_{ij} = \frac{\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{x} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{x^2 + (2nh)^2}} \right) \quad (5.5)$$

yazılabilir.(Ek II'ye bakınız).



Şekil 5.5. İki tabakalı toprak yapısı

$$x = \frac{x}{d} \quad (5.6)$$

$$h = \frac{h}{d} \quad (5.7)$$

kabulü ile, (5.5)'deki ifade (5.4)'de yazılırsa,

$$\frac{1}{x} - \frac{1}{(1-x)} + 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{(1-x)^2 + (2nH)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + (2nH)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1+(2nH)^2}} \right] = 0 \quad (5.8)$$

bulunur.

(5.8) eşitliği sembolik olarak,

$$F(x, H, K) = 0 \quad (5.9)$$

yazılabilir (17). Bu durumda, gerilim elektrodunun istenen durumu,

$$x_0 = \phi(H, K) \quad (5.10)$$

dır. Şekil 5.6 ve 5.7, klasik ve alternatif gerilim düşümü metodlarındaki gerilim sondasının durumları için H'nin bir fonksiyonu olarak hesaplanmış olan x_0 değerlerini vermektedir. Bu şekillerin analizi, gerilim sondasının istenen durumlarının aşağıdaki parametrelere bağlı olduğunu göstermektedir.

- yansıma faktörü k

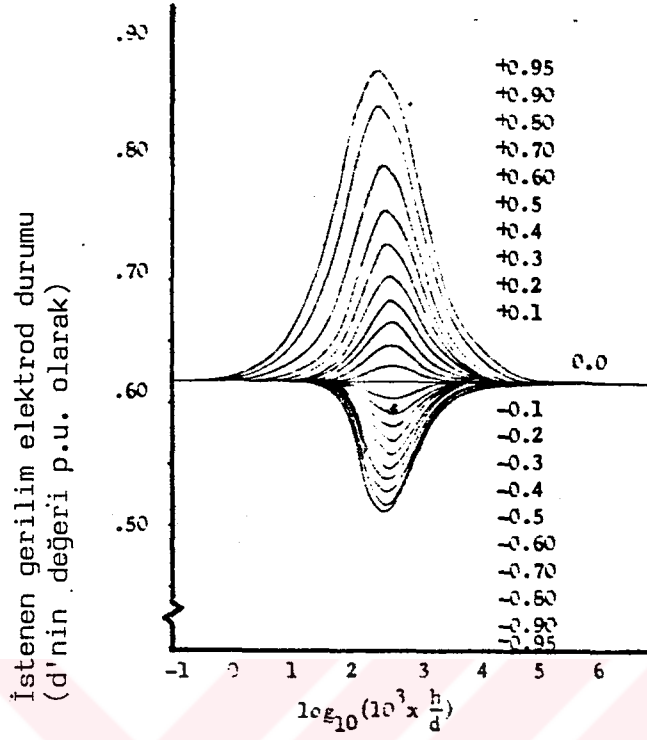
- H oranı (Birinci tabakanın yüksekliği ile topraklama ve akım elektrodları arasındaki mesafenin oranı)

- b elektrodunun, a ve c'ye göre fiziksel durumu.

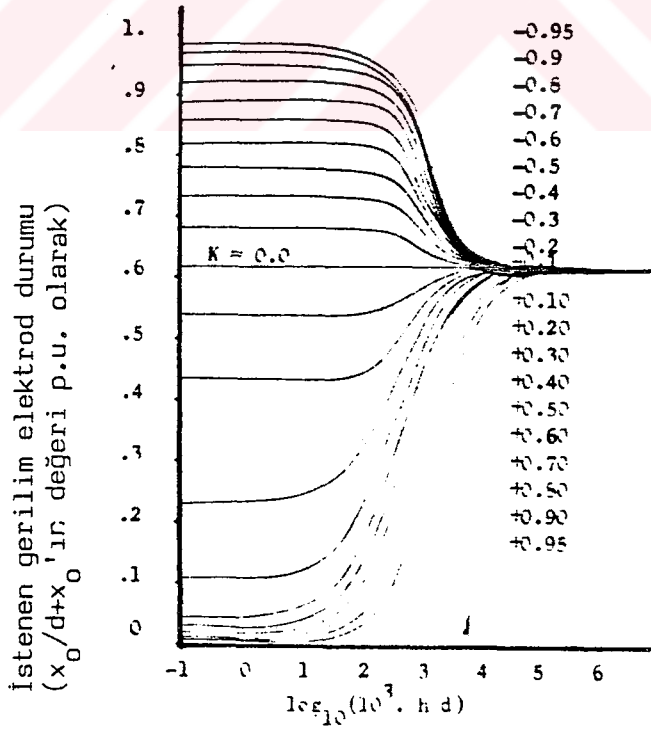
Sonuçlar,

1. Uniform toprakta $K=0$ olduğundan $x_0=0.618$ değerini alır.
2. K pozitif olduğunda ve düzenli olarak arttığında (t_0+1) gerilim elektrodu akım elektroduna daha yakın yerleştirilmelidir. Bu durum, x_0 'ın klasik elektrod durumu için 0.618 değerinden arttığını ve alternatif elektrod durumu için 0.618'den azaldığını göstermektedir.
3. K'nın negatif değerler alması halinde, gerilim elektrodu, akım elektrodundan daha uzağa yerleştirilmelidir.
4. ρ_1 öz dirençli ince tabakada, H değerinin 5.0'dan daha büyük olması ile x_0 değeri 0.618'e yaklaşır.
5. Her iki durumda, 0.618'den sapma, K'nın mutlak değeriyle artar. H'nin 0.05 ve 5.0 arasındaki değerleri için sapma oldukça hızlıdır.
6. Alternatif gerilim düşümü metodu ile, gerilim elektrodunun durumu, K'nın yüksek değerleri için 0'dan 1'e doğru değişebilir. Bu durum, yaklaşık 0.50 ile 0.90 arasında sınırlanan benzer durumlardan ötürü, klasik gerilim düşümü metodunu tercih edilebilir yapar. Ayrıca şunu da belirtmek gerekir ki K'nın pozitif değerleri için sapma, negatif değerlerinden daha büyüktür. Bu da yüksek öz dirençli ikinci tabakanın, toprak direnci ölçümü üzerinde olum-

suz etkilere sahip olabileceğini gösterir.



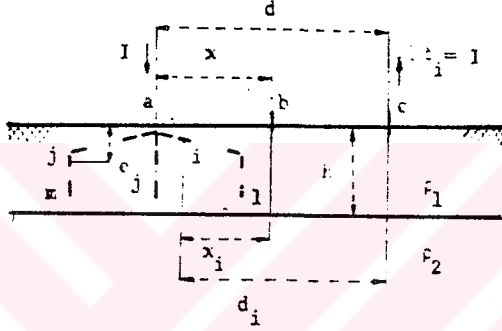
Şekil 5.6.Klasik gerilim düşümü metodundaki gerilim sondasının durumu grafiği (17).



Şekil 5.7.Alternatif gerilim düşümü metodundaki gerilim sondasının durumu grafiği (17).

5.1.2.II.adım.Elektrod geometrisinin etkisi.

Uniform toprakta,elektrodun şekli ve büyüklüğünün etkisi Curdts tarafından incelenmiştir(19).Eğer r/d oranı $1/10$ 'dan küçük ise gerilim sondasının durumu 0.62 değerine çok yakındır. $r/d=1/2$ için,gerilim sondasının durumu 0.70 değerine arttırılmalıdır.Toprağa gömülü iletken veya sondanın bu durumunda gerilim elektrodunun pozisyonunun,artan elektrod uzunluğu ile yavaşça azalacağını göstermektedir.İki tabakalı toprak durumunda,elektrod şeklinin etkisi d, k, η ve δ 'nın karmaşık bir fonksiyonu olacaktır.Şekil 5.8'de görüldüğü üzere,iki tabakalı bir toprağın,birinci tabakasına gömülmüş karmaşık bir toprak elektrodunu gözönüne alalım.



Şekil 5.8.İki tabakalı toprak içinde karmaşık bir elektrod.

δ_i faktörü ile h ve d 'ye göre küçük olan her bir lineer eleman uzunluğu şu şekilde seçilir.

1.Akım elektroduna en yakın lineer eleman,en yüksek değerine sahiptir.

2. δ_i ,elektrod şekline bağlıdır.

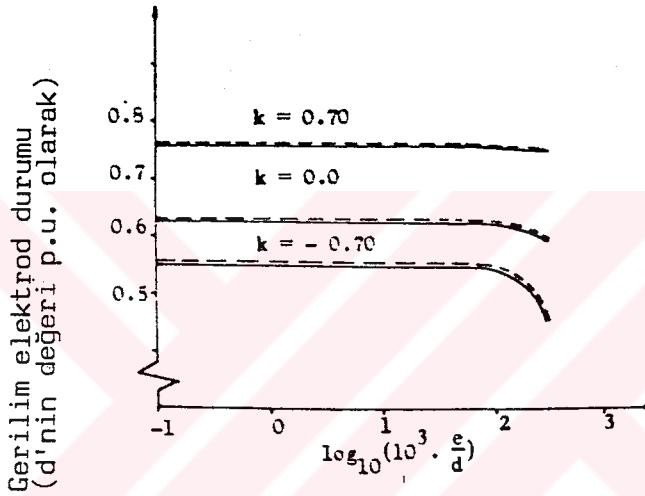
(5.4) ifadesi için sonuç eşitliği,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \delta_i \left[\frac{2}{\sqrt{(d_i-d+x)^2 + e_i^2}} + \frac{2}{\sqrt{d_i^2 + e_i^2}} - \frac{2}{(d-x)} \right. \\ \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{(d_i-d+x)^2 + (2nh-e_i)^2}} \right. \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{(d_i-d+x)^2 + (2nh+e_i)^2}} + \frac{1}{\sqrt{d_i^2 + (2nh-e_i)^2}} \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{d_i^2 + (2nh+e_i)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(d-x)^2 + (2nh)^2}} \right) \Big] = 0 \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$x_i = d_i - d + x \quad (5.12)$$

$$d_i = \varphi(x, d, \eta, \gamma) \quad (5.13)$$

yazılabılır. η ve δ verilmiş bir elektrod için kolayca hesaplanır. Farklı derinlik ve uzunlukta birinci tabakaya gömülmüş bir toprak iletkeninin gerilim sonda pozisyonu için hesaplanan değerler şekil 5.9 ve 5.10' da görülmektedir.



Şekil 5.9. Farklı toprak iletken uzunlukları için karmaşık elektrod durumu.

— akım yoğunluğu uniform ise,
- - - akım yoğunluğu uniform değilse.

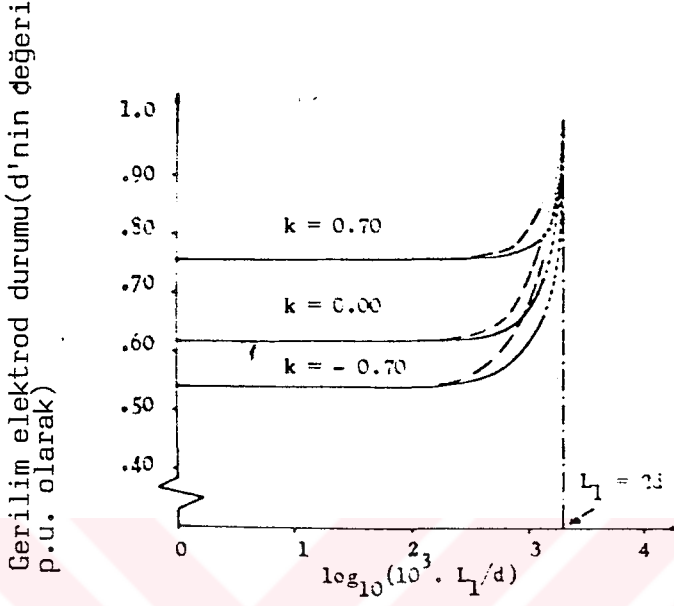
Uniform olmayan akım için, δ_i ifadesi,

$$\delta_i = \frac{(d-d_i)}{\sqrt{d_i^2 + e_i^2}}$$

dir. Şekil 5.9, elektrod uzunluğu $d/10$ 'dan büyük olduğunda, (elektrod uzunluğunun $L_1 = 2d$ olması halinde), x_0 değeri, teorik nokta kaynak elektrodu değerinden 1.0 değerine artar olduğunu göstermektedir. (5.11) ifadesi, toprak elektrodu iletkeninin a-b-c doğrultusuna dik olarak yerleştirilmesiyle, artan uzunluğun etkisi, x_0 'ın istenen durumundan azalacağını belirtir.

Şekil 5.10., derinliğin artması ile, x_0 değerinin azalacağını göstermektedir. K 'nın daha küçük değerleri ile sapma nispeten daha büyüktür. Ayrıca, K 'nın büyük pozitif değerlerinde x_0 'ın topraklama iletkeni derinliği

ile değişmeyeceği düşünülebilir(17).



Şekil 5.10. Toprak iletkeni elektrodunun farklı derinliğe gömülmesi ile değişen karmaşık elektrod durumu.

— akım üniform ise,
- - - - akım üniform değil ise (17).

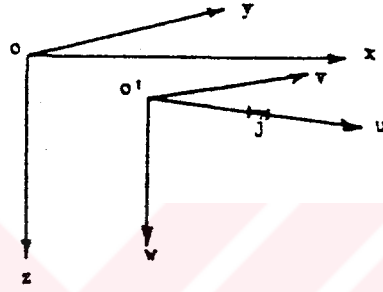
5.2.İki tabakalı toprak içindeki topraklamanın optimum dizaynı

Burada,bir nokta kaynak elektrodu ve pratik elektrod yardımı ile toprak potansiyelinin hesabı ile toplama ve entegrasyon metodları incelenmiştir.

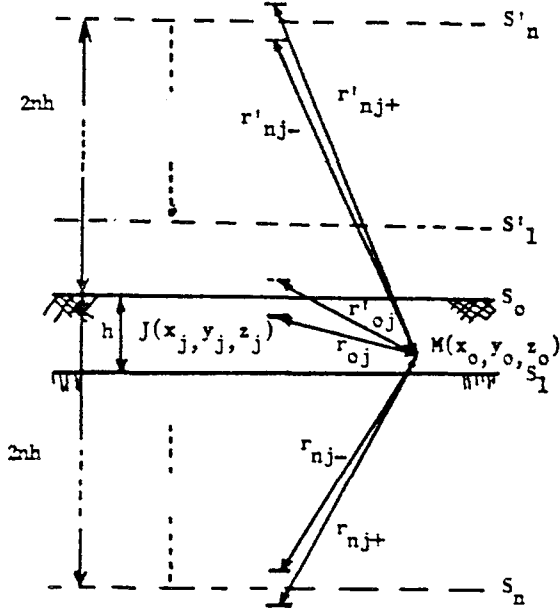
5.2.1.Potansiyelin hesaplanması

5.2.1.1.Nokta kaynak elektrodu yardımı ile potansiyelin hesaplanması

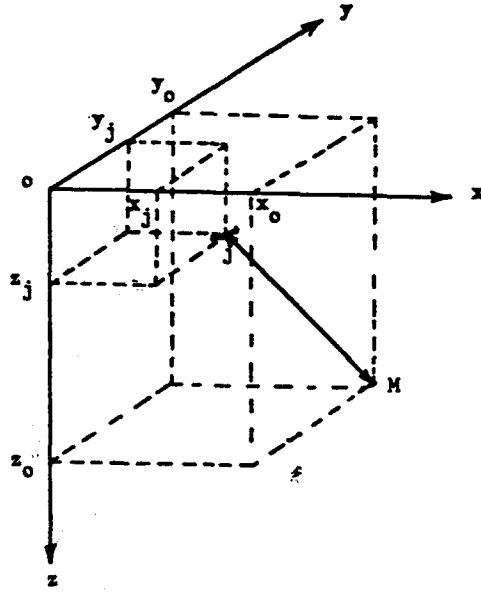
Referans eksenleri x,y,z olan bir sonsuz küçük j elektrodunu gözönüne alalım. j elektrodu, u,v ve w koordinat sistemindeki u eksenine yerleştirilmiş olsun.



Şekil 5.11.İki tabakalı topraktaki nokta kaynak elektrodu .



Şekil 5.12.Nokta kaynak elektrodunun iki tabakalı topraktaki gösterimi.



Şekil 5.13. j elektrodu ve M noktasının koordinatları

Elektrod, bir I_j akımını toprağa vermektedir. Elektrod uzunluğunun du olduğunu kabul edelim. Bu durumda,

$$I_j = i_j du \quad (5.14)$$

olur. Görüntü metodunu (20) kullanarak veya Laplace eşitliğinin direk çözümü ile (21), koordinatları x_0, y_0, z_0 (veya u_0, v_0, w_0) olan bir M noktasındaki potansiyel hesaplanabilir. İki tabakalı toprağın, üst tabakası içinde yer alan, herhangi bir noktadaki potansiyel şu şekilde verilebilir.

$$dv_j = \frac{\rho_1 I_j du}{4\pi} \left[\frac{1}{r_{oj}} + \frac{1}{r'_{oj}} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r'_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} + \frac{1}{r'_{nj+}} \right) \right] \quad (5.15)$$

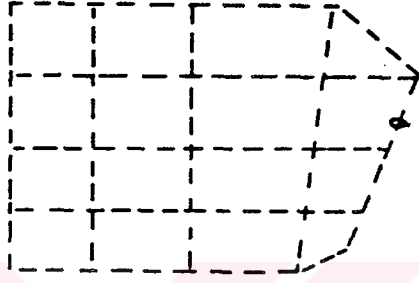
Burada,

$$\begin{aligned} r_o &= \left[(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{oj} &= \left[(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j + z_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r_{nj+} &= \left[(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + [2nh + (z_j - z_0)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{nj+} &= \left[(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + [2nh + (z_j + z_0)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r_{nj-} &= \left[(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + [2nh - (z_j + z_0)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{nj-} &= \left[(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + [2nh - (z_j - z_0)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5.16)$$

5.2.1.2. Pratik elektrod yardımı ile potansiyelin hesaplanması

-Toplama metodu

Elektrod, büyük ve karmaşık bir geometrik yapıya sahip ise, (5.15) eşitliği doğrudan doğruya kullanılamaz. Bunun için, elektrod, sonsuz küçük olarak düşünülebilen ve $1, 2, 3, \dots, j, \dots, m$ olarak küçük parçalara bölünür. (Şekil 5.14) Bu parçaların herbiri aynı du uzunluğundadır ve aynı I_j toprak akımına sahiptir.



Şekil 5.14. Büyük bir elektrodun alt bölümlerinin gösterimi

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_j + \dots + I_m \quad (5.17)$$

Elektrod iletkenlerinin toplam uzunluğunun L olduğunu gözönüne alalım. Bu durumda, elektroddaki lineer akım yoğunluğu için,

$$i = I/L \quad (5.18)$$

yazılır. (5.14) nolu eşitlikten,

$$I_j = \frac{1}{L} \int i \, du = \delta_j \int i \, du \quad (5.19)$$

ve (5.17), (5.18) ve (5.19) eşitlikleri ile,

$$\sum_{j=1}^m \delta_j = \frac{L}{du} \quad (5.20)$$

yazılabilir. $L/du = m$ ise,

$$\sum_{j=1}^m \delta_j = m \quad (5.21)$$

elde edilir.Yukarıdaki δ_j ifadesi,elektroddaki uniform olmayan akım dağılımında gözönünde bulundurulan bir sayısal faktördür.Eğer, tek faz-toprak arızasının yeri elektroddan uzak ise, δ_j sadece elektrodun geometrik şekline bağlıdır ve matrislerle hesaplanabilir(21).Bununla beraber,arıza yerine yakın iletkenlerde akım dağılımı daha yavaş olacaktır.Aşağıdaki bağıntı δ_j 'yi hesaplamada kullanılmaktadır.

$$\delta_j = a \frac{d_{cj}}{d_{fj}} \quad (5.22)$$

Burada,

a ; (5.21) eşitliğini sağlayan bir sabit,

d_{cj} ; j elemanı ile elektrodun merkezi arasındaki mesafe,

d_{fj} ; j elemanı ile arıza yeri arasındaki mesafedir.

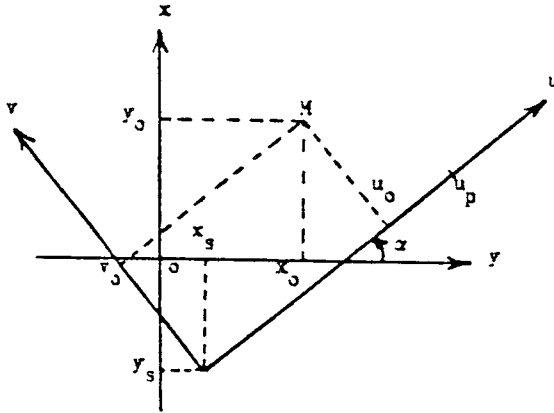
Elektrod içinde bir uniform akım dağılımını gözönüne alırsak, $\delta_j=1$, $j=1,2,\dots,m$ olur.Potansiyel sayısal bir değer olduğundan,üst tabakanın bir Mnoktasındaki potansiyel, I_j akımını toprağa akıtan herbir j elemanındaki potansiyellerin toplamıdır.Böylece,

$$V = \frac{\rho_l I}{4\pi L} \sum_{j=1}^m \delta_j \left[\frac{1}{r_{oj}} + \frac{1}{r'_{oj}} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r'_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} + \frac{1}{r'_{nj+}} \right) \right] \quad (5.23)$$

-Entegrasyon metodu

-Bir yatay lineer iletken durumu

Toprağın üst tabakasının içinde,e derinliğine gömülmüş bir lineer iletkeni gözönüne alalım.(Şekil 5.15)



Şekil 5.15.Yatay lineer iletken(üstten görünüş)

Bu iletken u,v,w koordinat sisteminde u ekseninde yer almaktadır.İ-letkenin koordinatları,

Tablo 5.1.İletkenlerin koordinatları

x,y,z sistemi	u,v,w sistemi	Tanımlama
(u_s, v_s, w_s)	(x_s, y_s, z_s)	Başlangıç
(u_p, v_p, w_p)	(x_p, y_p, z_p)	Bitim

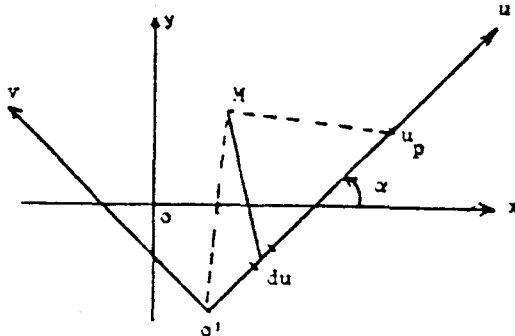
$v_s = v_p = w_s = w_p = 0$; $z_s = z_p = e$ ile, u, v ve w eksenleri, $u_s = 0$ olmak üzere seçilebilecektir. $M(u_o, v_o, w_o)$ 'deki potansiyel, iletkenin sonsuz küçük bir du parçasından dolayı (5.15) eşitliği ile verilir. İntegral işlemini çözmek için (5.16) nolu eşitliğin r terimleri u, v ve w'nin fonksiyonu olarak ifade edilmelidir. x, y, z koordinatlarının, u, v ve w ile ilişkisi aşağıda verilmiştir(22).

$$\begin{aligned} x &= u \cos \alpha - v \sin \alpha + x_s \\ y &= u \sin \alpha + v \cos \alpha + y_s \\ z &= w + z_s \\ z_s &= z_p = e \end{aligned} \quad (5.24)$$

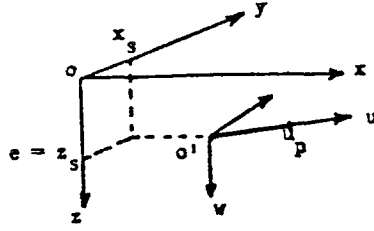
(5.16) eşitliğinde, x_o, y_o, z_o, x, y, z yerine (5.24) eşitliğinde verilen değerler ile $v=0, w=0$ gözönüne alınarak,

$$\begin{aligned} r_o &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + w_o^2]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{o+} &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (w_o + 2z_s)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r_{nj+} &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh + w_o)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{nj+} &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh + w_o + 2z_s)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r_{nj-} &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh - w_o - 2z_s)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{nj-} &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh - w_o)^2]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5.25)$$

yazılabilir.



Şekil 5.16. Entegrasyon metodu-yatay iletken



Şekil 5.17. Entegrasyon metodu-yatay iletken

(5.15) nolu eşitliği gözönüne alırsak,

$$dV = \vartheta(w_0) + \vartheta(w_0 + 2z_s) \quad (5.26)$$

yazılabilir. Burada,

$$\vartheta(w_0) = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-u_0)^2 + y_0^2 + w_0^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{(x-u_0)^2 + y_0^2 + (2nh+w_0)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-u_0)^2 + y_0^2 + (2nh-w_0)^2}} \right) \right] \quad (5.27)$$

İletkenden dolayı M noktasındaki toplam potansiyel,

$$V = \int_{u_s=0}^{u_p} \vartheta(w_0) \cdot du + \int_{u_s=0}^{u_p} \vartheta(w_0 + 2z_s) \cdot du \quad (5.28)$$

dir.

$$\begin{aligned} \int_0^{u_p} \vartheta(w_0) &= \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{(u_p - u_0) + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + y_0^2 + w_0^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + y_0^2 + w_0^2}} \right) \right. \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} k^n \text{Ln} \left(\frac{(u_p - u_0) + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + y_0^2 + (2nh + w_0)^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + y_0^2 + (2nh + w_0)^2}} \right) \\ &\left. + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \text{Ln} \left(\frac{(u_p - u_0) + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + y_0^2 + (2nh - w_0)^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + y_0^2 + (2nh - w_0)^2}} \right) \right] \quad (5.29) \end{aligned}$$

Yukarıdaki ifadede w_0 yerine $(w_0 + 2z_s)$ alınarak, V potansiyeli,

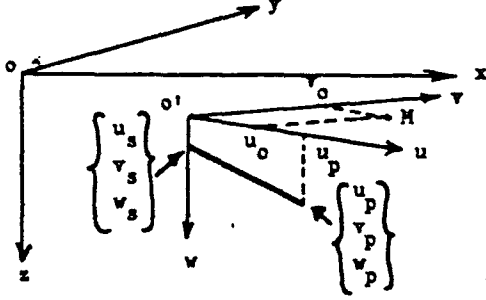
$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi L} \left[\left[u_p, u_0, y_0, w_0 \right] + \left[u_p, u_0, y_0, (w_0 + 2z_s) \right] \right] \quad (5.30)$$

bulunur. Buradaki u_p, u_0, y_0, w_0 değerlerinin x, y, z koordinatları ile ilişkisi şu şekilde verilebilir.

$$\begin{aligned} u_p &= (x_p - x_s) \cos \alpha + (y_p - y_s) \sin \alpha \\ u_0 &= (x_0 - x_s) \cos \alpha + (y_0 - y_s) \sin \alpha \\ y_0 &= (y_0 - y_s) \cos \alpha - (x_0 - x_s) \sin \alpha \\ w_0 &= z_0 - z_s \end{aligned} \quad (5.31)$$

$g_1, K, I, L, x_p, x_s, y_p, y_s, z_p$ ve z_s toprak ve elektrod değerlerinin bilinmesi her bir $M(x_o, y_o, z_o)$ noktasındaki V potansiyelinin bulunmasını sağlar.

-Yatay olmayan lineer iletken durumu.



Şekil 5.18.Entegrasyon metodu

Bu durum Şekil 5.18'de görülmektedir.İletkenin $uo'v$ düzleminde olması ile uvw koordinat sistemi seçilir.M noktası, $uo'v$ düzleminindedir.

$$u_s = v_s = 0$$

$$v_p = 0$$

$$w_s = z_s - z_o$$

$$w_p = z_p - z_o$$

$M(u_o, v_o, 0)$ noktasındaki bu iletkenin dolaylı potansiyel $o'u$ eksenindeki bir $M'(u'_o, v'_o, 0)$ noktasındaki yatay iletken ile özdeşdir.Böylece,yeni eşdeğer yatay iletken karakteristikleri şunlardır.

$$u'_s = v'_s = w'_s = 0$$

$$v'_p = w'_p = 0$$

(5.32)

$$u'_p = \sqrt{u_p^2 + (w_p - w_s)^2}$$

Yeni M' noktasındaki koordinatlar,

$$u'_o = [u_p u_o + w_s (v_s - v_p)] / u'_p$$

(5.33)

$$v'_o = [u_o^2 + v_o^2 + w_s^2 - u_p^2]^{1/2}$$

$$w'_o = v_o = 0$$

-Enterkonnekte bağlanmış lineer iletkenlerden yapılmış bir elektrod durumu

Üst tabakadaki bir $M(x_o, y_o, z_o)$ noktasında potansiyel (5.30) ifadesi ile hesaplanan her bir lineer iletkendeki potansiyellerin toplamına eşittir. Bir lineer iletken j ile gösterilirse toplam potansiyel,

$$V = \frac{\rho_l I}{4\pi L} \sum_{j=1}^m \left[\int \frac{u_p, u_o, v_o, w_o}{r_{jp}} + \int \frac{u_p, u_o, v_o, (w_o + 2z_s)}{r_{jp}} \right] \quad (5.34)$$

olur. Burada,

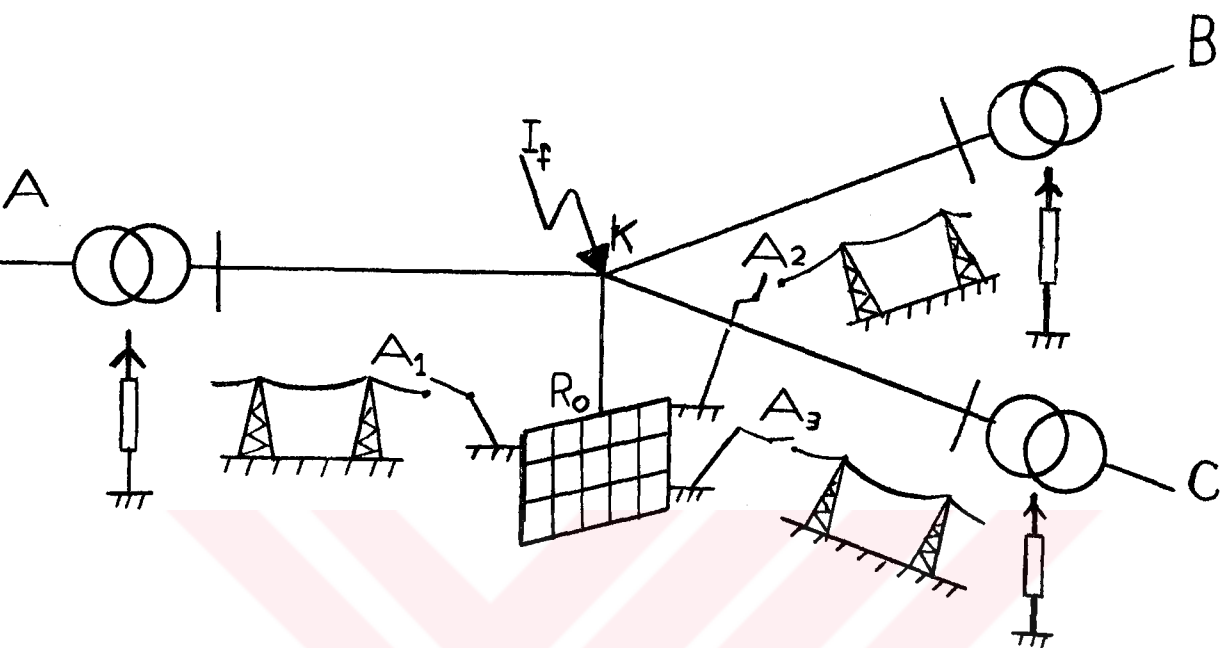
L ; Gömülmüş iletkenin toplam uzunluğunu,

m ; Lineer iletkenin toplam sayısını göstermektedir.

u_p, u_o, v_o, w_o değerleri yatay iletkenler için (5.31) eşitliği ile ve yatay olmayan iletkenler (5.32) VE (5.33) eşitlikleri ile verilmiştir. Böylece sonuç ifadeleri aşağıdaki parametrelerin fonksiyonu olacaktır.

$g_l, k, I, L, x_s, y_s, z_s, x_p, y_p, z_p, x_o, y_o, z_o$. Bunlar, toprak ve elektrod karakteristikleridir.

6.SAYISAL UYGULAMA



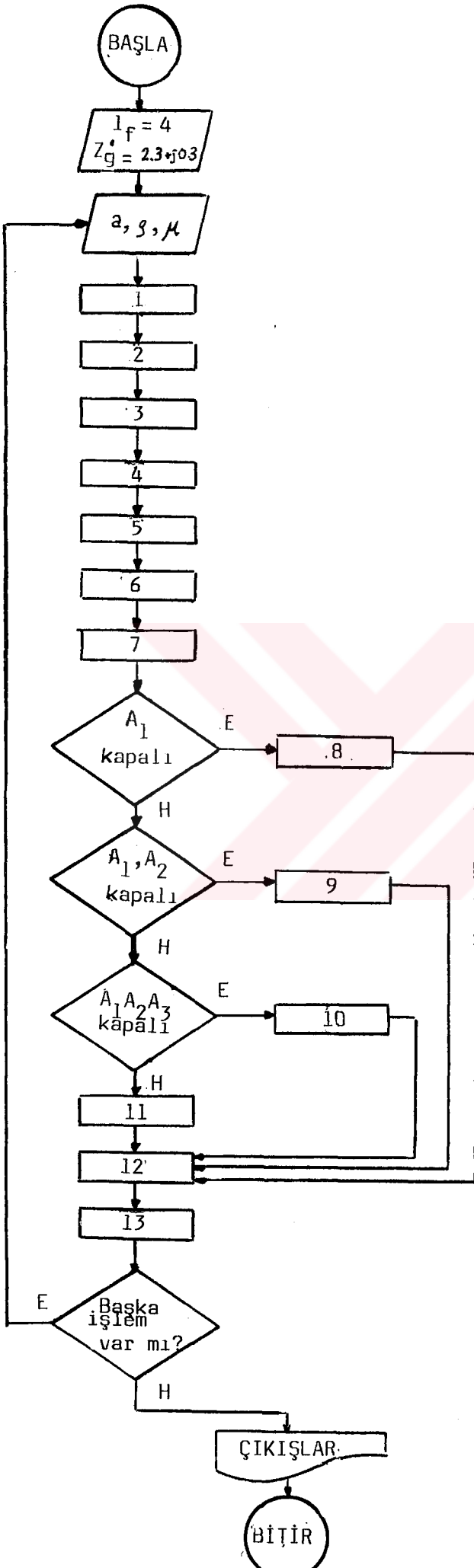
Şekil 6.1. 154 kV'lık bir şebeke gösterimi.

Şekil 6.1'de 154 kV'luk bir hava hattı göz önüne alınmıştır. K noktasında bir tek faz-toprak kısa devresi meydana gelmiştir. Tüm hatların toprak teli empedansları birbirine eşit ve $\hat{Z}_g = 2.3 + j0.3$ ohm/km'dir. Tek-faz toprak arıza akımı $\hat{I}_f = 4$ kA ve topraklama ağının direnci $R_0 = 0.02 \Omega$ 'dur. Sıra ile A_1, A_2, A_3 anahtarlarının kapatılması durumunda, sadece A_1 anahtarının kapatılması durumunda ve A_1, A_2 anahtarlarının kapatılması durumunda, $\mu = 0.0$ ve $\mu = 0.2$ ile $g = 200, 400, 600$ değerleri için $\hat{V}_0$ topraklama gerilimi hesaplanarak $\hat{V}_p = f(g)$ eğrileri elde edilmiştir.

Problemin çözümünde "Zincir empedansı yöntemi" kullanılmıştır. Aşağıda hesaplamalara ait uygun akış diyagramı verilmiştir.

Verilen akış diyagramına göre,yapılan işlemler neticesinde $\dot{V}_0=f(g)$ eğrileri çizilmiştir.

Bilgisayar akış diyagramı



$$1. \dot{Z}_g = \dot{Z}_g' \cdot a$$

$$2. R_{tA} = 0.004g$$

$$3. R_{tB} = 0.005g$$

$$4. R_{tC} = 0.003g$$

$$5. \dot{Z}_{\infty A} = \sqrt{\dot{Z}_g \cdot R_{tA}} (1-\mu)$$

$$6. \dot{Z}_{\infty B} = \sqrt{\dot{Z}_g \cdot R_{tB}} (1-\mu)$$

$$7. \dot{Z}_{\infty C} = \sqrt{\dot{Z}_g \cdot R_{tC}} (1-\mu)$$

$$8. \dot{Z}_{\infty A} = \dot{Z}_{\infty e\varnothing}$$

$$9. \dot{Z}_{\infty e\varnothing} = \dot{Z}_{\infty A} // \dot{Z}_{\infty B}$$

$$10. \dot{Z}_{\infty e\varnothing} = \dot{Z}_{\infty A} // \dot{Z}_{\infty B} // \dot{Z}_{\infty C}$$

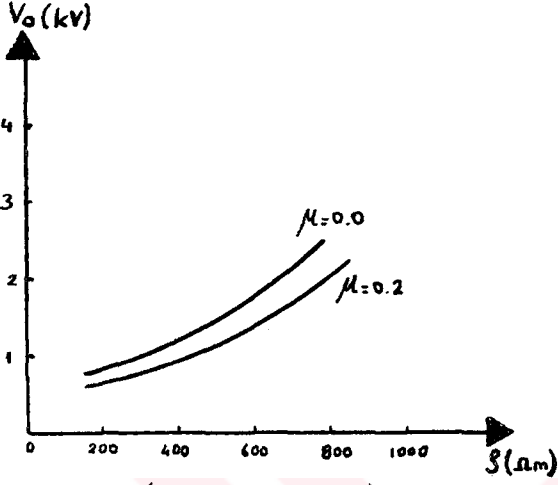
$$11. R_o = 0.02g$$

$$12. \dot{I}_o = \frac{\dot{Z}_{\infty e\varnothing}}{R_o + \dot{Z}_{\infty e\varnothing}} \dot{I}_f$$

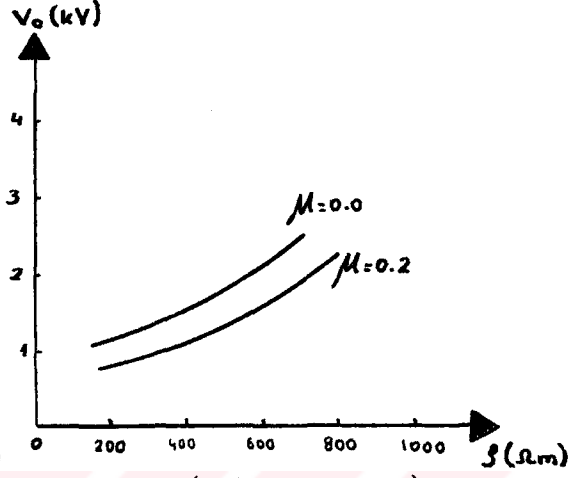
$$13. \dot{V}_o = \dot{I}_o \cdot R_o$$

$V_0 = f(g)$ eğrileri;

$-A_1, A_2, A_3$ kapalı ise,

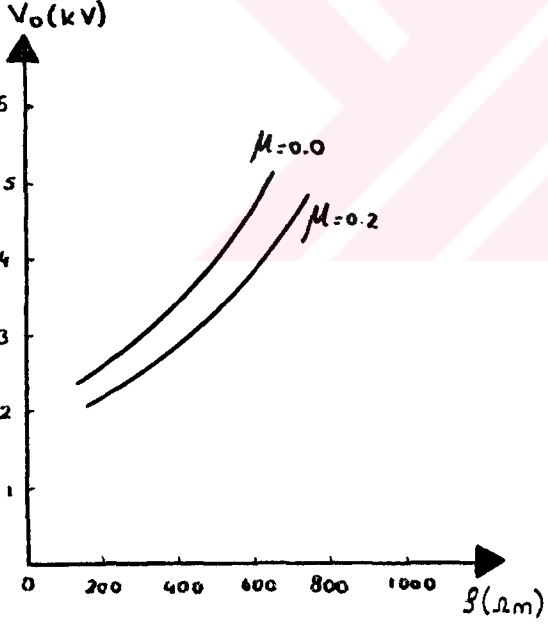


($a=300$ m. için)

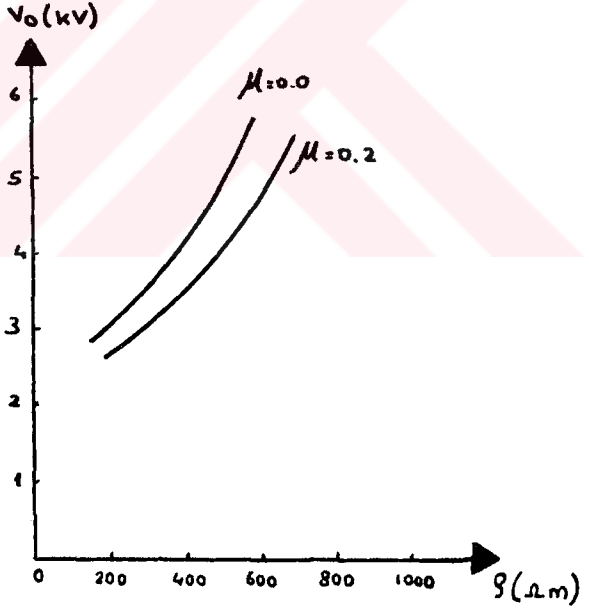


($a=500$ m. için)

$-A_1$ kapalı ise,

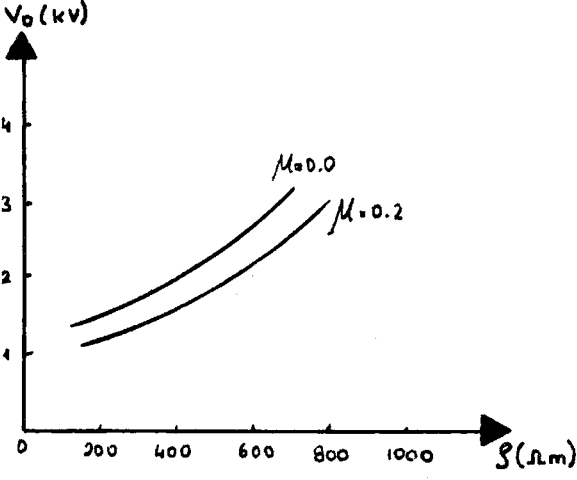


($a=300$ m. için)

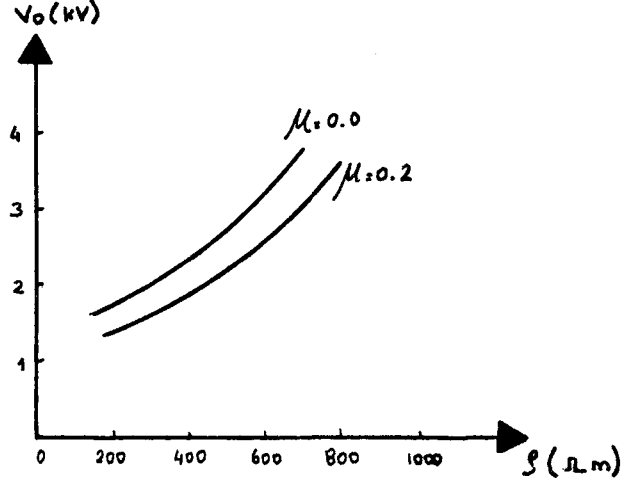


($a=500$ m. için)

A_1, A_2 kapalı ise,



($a=300$ m. için)



($a=500$ m. için)

Sonuçlar;

1. Menzil(a) arttıkça $\dot{V}_0$ gerilimleri artma eğilimi göstermektedir. Örneğin, $\mu=0.0, g=200$ ve $a=300$ m iken $\dot{V}_0$ gerilimi 923.2 V'tur. μ ve g değerlerini sabit bırakıp, a değeri 500 m'ye çıkarılırsa $\dot{V}_0$ gerilimi 1170.88 değerini almaktadır. Görüldüğü gibi menzil arttıkça $\dot{V}_0$ gerilimi de artmaktadır.

2. Toprak özgül direnci arttığında $\dot{V}_0$ gerilimi artmaktadır. Burada $\mu=0.0$, $a=300$ ve $g=200$ değerinde $\dot{V}_0=923.2$ V'tur. Yukarıdaki μ ve a değerleri sabit tutulup g değeri 400 $\Omega.m$ 'ye çıktığında $\dot{V}_0$ değeri 1324.8 V, 600 m'ye çıktığında $\dot{V}_0$ değeri 1634.4 V olmaktadır. Görüldüğü gibi, toprak özgül direnci arttıkça V_0 geriliminin değeri de artmaktadır.

3. Karşılıklı kuplaj faktörü arttığında, $\dot{V}_0$ gerilimi artmaktadır. $a=300$ ve $g=200 \Omega.m$ değerleri sabit kalıp $\mu=0.0$ 'dan 0.2'ye arttığında $\dot{V}_0$ gerilimi sıra ile 923.2 ve 9944 V olmaktadır. Görüldüğü gibi kuplaj faktörü arttığında $\dot{V}_0$ gerilimi artmaktadır.

Böylece, $\dot{V}_0$ gerilimi üzerine etki eden faktörler olarak a, μ ve g söylenebilir.

REFERANSLAR

- (1) Bayram,M. "Elektrik tesislerinde topraklama",Matbaa teknisyenleri Basımevi,1977.
- (2) VDE 0141/264 "Nominal gerilimi 1 Kv'un üstünde olan alternatif akım tesislerinde topraklamalar" ile ilgili yönetmelik.
- (3) Handbuch der elektrotechnik,Siemens AG.
- (4) Elektrische installationstechnik II,Siemens AG.
- (5) Stevenson,W. ,"Elements of power system analysis",1987.
- (6) Neumann,R.-Gürmen,H.,"Dengesiz çok fazlı sistemlerin simetrili bileşenler ile analizi.",İ.T.Ü.,1962 .
- (7) Guile,A.E.-Paterson,W.,"Electrical Power systems"-Pergamon Press, 1977.
- (8) Bayram,M.,"Dengesiz yüklerin transformatörler üzerine tesirleri", Matbaa teknisyenleri basımevi,1979.
- (9) Dawalibi,F.-Mukhedkar,D.,"Parametric analysis of grounding grids", IEEE Transactions on power apparatus systems Vol 98. no 5 ekim 1979,s.1662-1663.
- (10) Endreyne,J.,"Analysis of transmission tower potentials during ground faults"IEEE Transactions on power apparatus systems,vol 86,no 10, Ekim 1967.
- (11) Rudenberg,R.,"Transient performance of electric power systems",New York,Mc Graw Hill,1950,s.357-366
- (12) Dawalibi,F.-Mukhedkar,D.,"Parametric analysis of grounding grids", IEEE Transactions paper F 79 243-7 ,IEE PES 1979 meeting,N.Y.
- (13) Dawalibi,f.-Mukhedkar,D.,"Influence of ground rods on grounding grids",IEEE Transactions paper F 79 245-2,IEEE PES 1979 meeting,N.Y.
- (14) Verma,R.-Mukhedkar,D.,"Ground fault current distribution in substation,Towers and ground wire",IEEE Transactions on power apparatus and systems,Vol 98,s.724-726.
- (15) Electrical Transmission and Distribution Reference Book,East Pittsburgh,PA. Westinghouse Electric Co.,1950.
- (16) Kaplan,W.,"Ordinary diferantiel Equations",Addison Wesley Publishing Co.İnc.
- (17) Dawalibi,F.-Mukhedkar,D.,"Ground electrode resistance measurements in non-uniform soils" ,IEEE Transactions on power apparatus systems, s.109-112. ,Nisan.1973.
- (18) Dengiz,H.,"Enerji hatları mühendisliği",Emel matbaacılık sanayii, ANKARA,1982.

- (19) Curdts,E.B., "Some of the fundamental aspects of ground resistances measurements", AIEE Transactions, Pt 1, Vol 77, kasım 1958, s.767-770.
- (20) Maxwell, J.C., "A treatise on electricity and magnetism ", Vol 1, Dover Publications, N.Y., 1954.
- (21) Stefanescu, S.-Schlumberger, M., "Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales homogènes et isotropes", "Journal de Physique et Radium", Vol 1, serie VII, No 4, 1930.
- (22) Dawalibi, F.-Mukhedkar, D., "Optimum design of substation grounding in a two layer earth structure", IEEE Transactions on power apparatus systems, Vol 94, No 2, mart/nisan 1975, s.252-255.



EK I

Şekil 5.3'de, a ile topraklama elektrodu, b ve c ile yardımcı elektrodlar gösterilmiştir. Herbir toprak elektrodu çifti arasındaki direnç ölçümünde, akım sabit tutulursa,

$$R_{a-b} = \frac{V_{a-b}}{I} = R_{aa} + R_{bb} - 2R_{ab} \quad (E.1)$$

$$R_{a-c} = \frac{V_{a-c}}{I} = R_{aa} + R_{cc} - 2R_{ac} \quad (E.2)$$

$$R_{b-c} = \frac{V_{b-c}}{I} = R_{bb} + R_{cc} - 2R_{bc} \quad (E.3)$$

(E.1) ve (E.2) birbirine eklenip, (E.3) çıkarılırsa, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{V_{a-b} + V_{a-c} - V_{b-c}}{I} = 2R_{aa} - 2R_{ab} - 2R_{ac} + 2R_{bc} \quad (E.4)$$

b elektrodu, yüksek giriş empedanslı bir voltmetreye bağlanan bir gerilim elektrodudur. Pratik olarak b elektrodundan akım akmayacağından,

$$V_{a-c} = V_{a-b} + V_{b-c} \quad (E.5)$$

ifadesi, (E.4)'de yerine konursa,

$$R = \frac{V_{a-b}}{I} = R_{aa} - R_{ab} - R_{ac} + R_{bc} \quad (E.6)$$

$$R_{aa} = R + R_{ab} + R_{ac} - R_{bc} \quad (E.7)$$

yazılabilir.

EK II

Çok tabakalı toprak içinde, bir nokta kaynak elektrodu etrafındaki potansiyel dağılımına ilişkin çalışmalar Stefanescu ve Schlumberger tarafından yapılmıştır(27). İki tabakalı toprak yapısının, üst yüzeyindeki potansiyeli yazarsak,

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{x} + 2 \int_0^{\infty} \dot{\epsilon}_1(\lambda) J_0(\lambda x) d\lambda \right) \quad (E.8)$$

Burada,

$$\dot{\epsilon}_1(\lambda) = \frac{K \exp(-2\lambda h)}{1 - \exp(-2\lambda h)} \quad (E.9)$$

dur.

$J_0(\lambda x)$: Birinci mertebeden Bessel fonksiyonudur. Bu durumda, (5.8) nolu eşitlik,

$$v = \frac{F_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{x} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{x^2 + (2nh)^2}} \right) \quad (E.10)$$

olur. i 'den x kadar mesafedeki j noktası arasındaki karşılıklı direnç değeri,

$$R_{ij} = \frac{v}{I} = \frac{\rho_l}{2\pi} \left(\frac{1}{x} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{x^2 + (2nh)^2}} \right) \quad (E.11)$$

dir.

ÖZGEÇMİŞ

13 Ekim.1966 tarihinde İstanbul'da doğdum.İlk,orta ve lise öğrenimimi Terakki Vakfı Şişli Terakki Lisesinde tamamladım.1984 yılında girdiğim Üniversite sınavları sonunda Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünü kazandım.1988 yılında lisans derecem aldım.1988-1990 tarihleri arasında askerliğimi yedek subay olarak tamamladım.1990 yılında,girdiğim yüksek lisans sınavlarını kazanarak eğitime başladım.Yüksek lisans derslerinin tümünden başarılı olarak master tezi yapmaya hak kazandım.

Cem BAYRAŞ
Elek.Müh.