

yüksek gerilim merkezlerinin topraklaması

erdoğan güner

UDK: 621.316.991:621.311.4

ÖZET

Yazar, elektrik sistemlerinin topraklanmasında gözönüne alınacak temel ilkeleri anlatıyor. Elektrot, adım, dokunma ve transfer gerilimlerinin tanımları ile topraklama sisteminde müsaade edilebilir gerilim yükselmelerine açıklık getiriliyor. Yazar ayrıca, topraklama projelerinde izlenecek yolları ve topraklama direncinin ölçümünde uygulanan yöntemleri anlatmaktadır.

SUMMARY

Principles which are fundamental in grounding electrical systems are described and the concepts of electrode, step, touch and transfer voltages/ and permissible voltage uses in the grounding system are clarified. Also, the steps to be followed in grounding projects and methods of measuring grounding resistance are discussed.

1. GİRİŞ

Enerji tesislerinin topraklanmasında güdülen amaçları aşağıdaki gibi üç bölümde toplayabiliriz:

- İnsanları ve hayvanları elektrik şoklarından korumak,
- Donatı (teçhizat) yada aygıtların elektrik arızalarında hasarlanmasını önlemek,
- Enerjinin güvenilirliğini ve sürekliliğini artırmak.

Bunların sağlanabilmesi için aşağıdaki koşulların yerine getirilmesi gerekir:

- Normal çalışma yada arıza koşullarında doğabilecek adlin ve dokunma gerilimlerinin tehlikeli

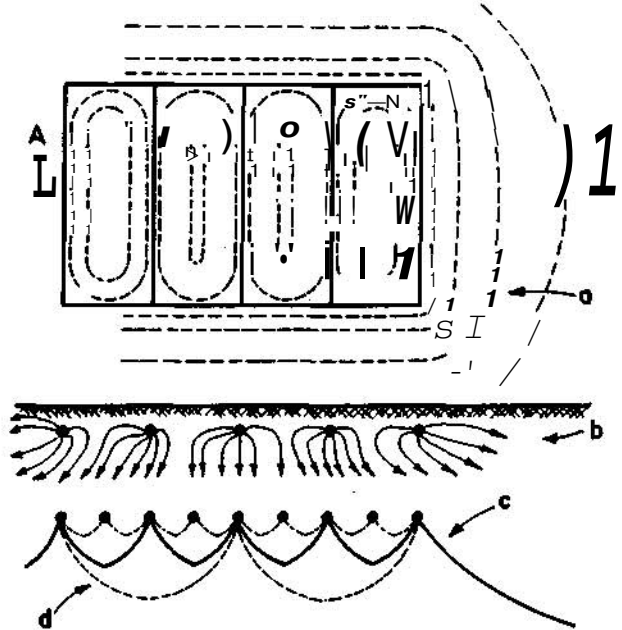
değerlere ulaşması önlenerek salt yada trafo merkezleri içerisindeki yada yakınındaki personelin güvenliğini sağlamak.

- Yıldırım akımlarının boşalmasını ve dağılımını kolaylaştırmak.
- Sistem arızalarında trafo merkezinden ayrılan denetim (kontrol) ve iletişim (muhabere) kabloları boyunca doğacak gerilim farklarını sınırlamak.
- Elektrik sistemlerindeki toprak arızalarında toprak arıza rölelerinin çalışmasını sağlamak.
- Faz-toprak arızalarında sistemde gerilim yükselmelerini önlemek için nötr noktalarını doğrudan yada uygun empedanslar üzerinden topraklamak.

2. EMNİYETLİ BİR TOPRAKLAMA İÇİN ANA İLKELER

Arızada toprağa akan akım, gerek trafo merkezinin içerisinde, gerekse dolayında kuvvet çizgileri (gradients) yaratır.

Şekil 1'de homojen toprakta ve gözlü bir topraklama altında doğan kuvvet çizgileri gösterilmiştir. Topraklama projesinde gerekli özen gösterilmezse; toprak arızalarında toprak yüzeyi boyunca doğacak gerilim farkları yürüyen bir insan için tehlikeli değerlere ulaşabileceği gibi, donatı yada kons-



Şekil 1. Topraklama ağındaki kuvvet çizgileri ve gerilim dağılımı.

- Eşgerilimli noktalar kesik çizgi ile gösterilmiştir
- AA kesiti boyunca akımın dağılımı
- Kısa devre sırasında uzaktan topraklı bir noktaya göre AA kesiti boyunca doğan gerilim yükselmesi

Erdoğan Güner, DSİ

trüksiyonla toprak arasında tehlikeli gerilim farkları da doğabilir.

Ne yazık ki, doğabilecek bu kuvvet çizgileri ile gerilim farklarını çok nadir durumların dışında önceden hassasiyetle hesaplamak çok zor olduğu gibi pratik de değildir. Çerçekte topraklama ağları genellikle Şekil 1'de gösterilenden daha karmaşıktır ve trafo r.erkazini örten toprağın alt katmanının nitelikleri konusunda yeterli bilgi toplamak oldukça güçtür.

Şu noktayı özellikle belirtmek gerekir ki merkezin topraklama direncinin düşük olması güvenlik için bir garanti değildir. Başka bir deyimle topraklama sisteminin direnci ile şok akımı arasında basit bir bağıntı yoktur. Göreli olarak düşük topraklama dirençli bir merkez bazı durumlarda tehlikeli olabileceği gibi, çok yüksek topraklama dirençli bazı merkezler de iyi projelendirilmişlerse emniyetli olabilir.

Şok akımının süresi, dokunma olasılığı insan vücudunun direnci ve fiziki durumu yerel gerilim yükselmeleri ile birlikte merkezin güvenliğini belirleyen önemli öğelerdir. Bu öğelerin projelendirmede değerlendirilmesinin güçlüğü de ayrı bir sorundur.

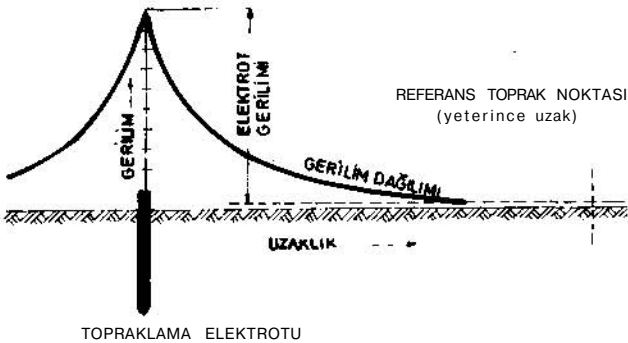
Yakın zamana kadar birçok kimsede topraklı her nesneye dokunulabileceği gibi yanlış bir kanı vardı. Ancak bugün özellikle çok yüksek gerilimli tesislerin işletmeye alınması ile bu sorun daha geniş bir elektrik mühendisi kitlesinin ilgi alanına girmiştir. Bu da sevindirici bir durumdur.

3. ELEKTROT, ADIM, DOKUNMA ve TRANSFER GERİLİMLERİ

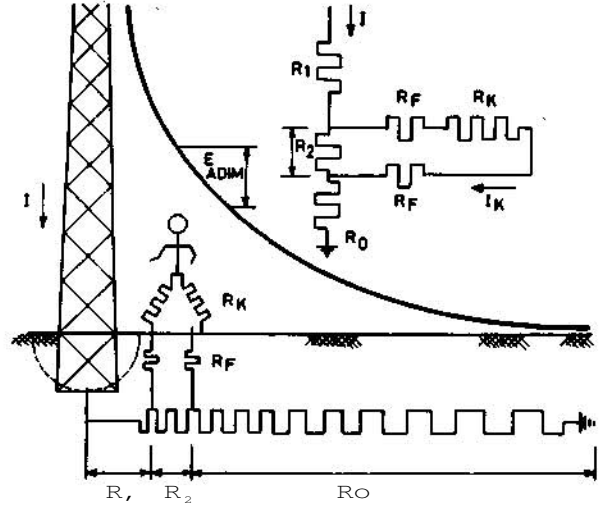
Bundan sonraki bölümlerin daha kolay anlaşılabilmesi için yukardaki gerilimlerin tanımlarının yapılması gerekir.

Bugün topraklama elektrotu olarak bakır yada demirden yapılmış aşağıdaki tiplerde iletken öğeler kullanılmaktadır:

- Şerit iletkenler
- Sım yada örgülü teller



Şekil 2. Elektrot geriliminin dağılımı.



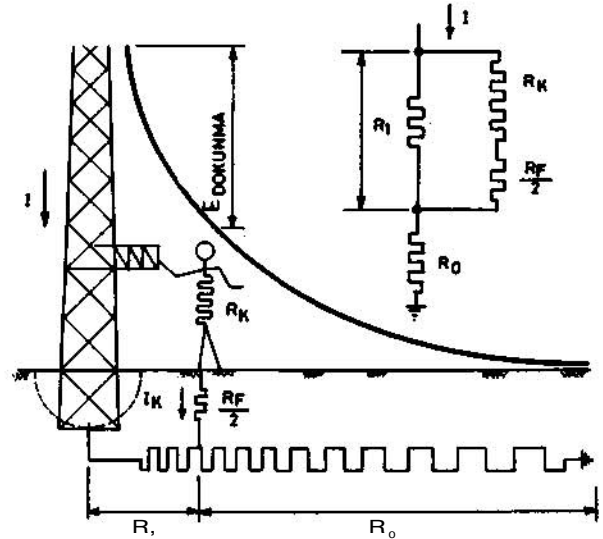
Şekil 3. Adım geriliminin gösterimi.

Eğri, kısa devre sırasında uzaktan topraklı bir referans noktasına göre yapının gerilim yükselmesini gösteriyor.

- Boru yada profil demirden yapılmış çubuklar
- Levhalar

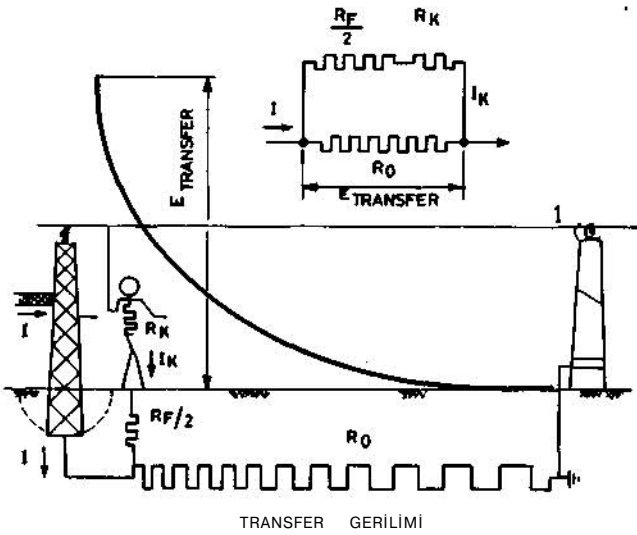
Elektrot Gerilimi: Referans olarak alınan yeterli uzaklıktaki bir toprak noktasına göre elektrotun yükseldiği gerilime denir. Şekil 2'de bir topraklama elektrotunun dolayındaki gerilim dağılımı görülüyor.

Adım Gerilimi: Adım aralığı yaklaşık bir metre olan bir kişinin köprülediği elektrot gerilimine denir. Bu durumda insan vücudu devreye Şekil 3'de



Şekil 4. Dokunma geriliminin gösterimi.

Eğri, kısa devre sırasında uzaktan topraklı bir referans noktasına göre yapının gerilim yükselmesini gösteriyor.



Şekil 5. Transfer geriliminin gösterimi.

Eğri, kısa devre sırasında uzaktan topraklı bir referans noktasına göre yapının gerilim yükselmesini gösteriyor.

1: Uzaktan topraklı iletişim ve toprak teli

gösterildiği gibi şönt olarak girer ve akım yolu bir ayaktan diğerine doğrudur.

Dokunma Gerilimi: Bir kimsenin yatay olarak bir metre uzaklıktan Şekil 4'te gösterildiği gibi köprülediği elektrot gerilimidir. Bu durumda akım yolu bir elden ayağa yada bir elden diğerine doğrudur.

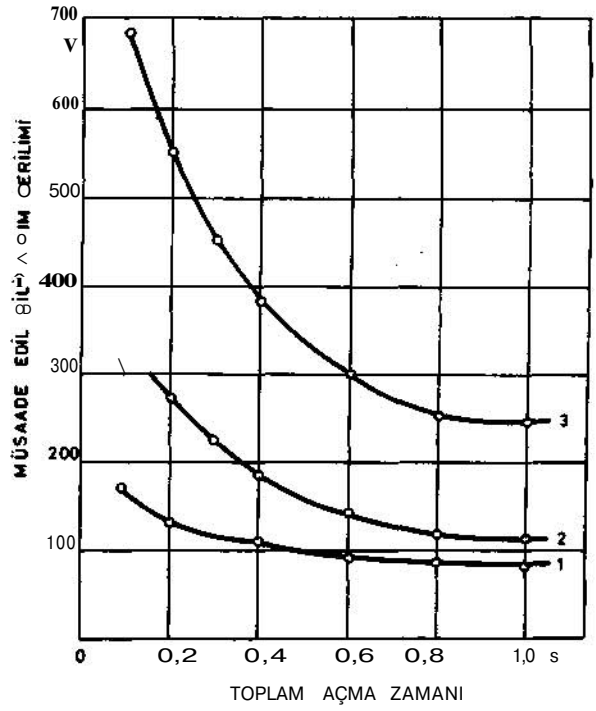
Transfer Gerilimi: Şekil 5'te gösterildiği gibi merkez içerisinde duran bir kişinin uzaktan topraklanmış bir iletken yada merkezin dışındaki bir kişinin merkezin topraklama şebekesine doğrudan bağlı bir iletken dokunması ile karşılaşacağı gerilim farkına denir. Transfer gerilimi topraklama şebekesinin yükseldiği gerilimin tamamına eşit olabilir.

4. MÜSADE EDİLEBİLİR GERİLİM YÜKSELMELERİ

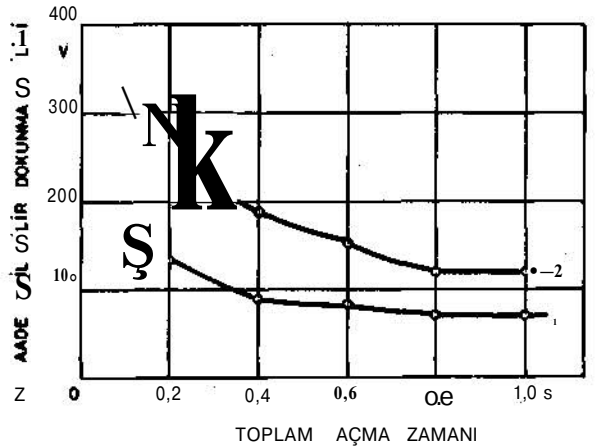
İnsan vücudunun can alıcı bölümlerinden geçen akımın tahrip etkisi; akımın frekansına, büyüklüğüne ve etki süresine bağlıdır. Prof. Dalziel'in Columbia Üniversitesinde hayvanlar üzerinde yaptığı deneylerin sonucuna göre, insanların Z 99,5'unun "ventricular fibrillation" (kalbin atış sıklığının ve gücünün değişmesi) olmadan dayanabileceği akım; etki süresine bağlı olarak aşağıdaki gibidir:

$$I_k = \frac{0,165}{\sqrt{t}} \text{ A}$$

Bu formül üç saniye etki süreli akımlar için ge-



a



b

Şekil 6. a) Müsaade edilebilir adım geriliminin arızanın toplam temizlenme süresine göre değişimi

- 1: Trafiği yoğun yolların yanındaki tesislerin dış bölümlerinde
- 2: Tesislerin içinde ve 1 maddesine girmeyen alanların dış bölümlerinde
- 3: Yalıtkan ayakkabı kullanılması durumunda açık hava tesislerinin içinde

b) Müsaade edilebilir dokunma geriliminin arızanın toplam temizlenme süresine göre değişimi

- 1: Tesis dışında
- 2: Tesis içinde

Kaynak: WE 0141/2.64

çerlidir, daha uzun süreli akımlarda kullanılmaz.

1^: Vücuttan geçen akımın etkin değeri (A)

t : Etki süresi (sn)

İnsan vücudunun el ile ayağı yada iki ayağı arasındaki direnci 1000 ohm ve ayak temas direnci olarak da, p ohm-m özgül direncinde bir toprak yüzeyi ile temasta olan yarıçapı sekiz santimetrelilik bir küre elektrotun eşdeğeri kabul edilerek 3p değeri alınır; müsaade edilebilir adım (E_a) ve dokunma (E_d) gerilimleri Şekil 3 ve 4'ten yararlanılarak aşağıdaki gibi çıkarılabilir:

$$E_a = (R_k + 2R_p) \cdot I_k$$

$$E_a = (1000 + 6p) \cdot \frac{0,165}{\sqrt{t}} = \frac{165 + p}{\sqrt{t}}$$

$$E_d = (R_k + \frac{R_p}{\sqrt{t}}) \cdot I_k$$

$$E_d = (1000 + 1,5p) \cdot \frac{0,165}{\sqrt{t}} = \frac{165 + 0,25 p}{\sqrt{t}}$$

VDE 0141/2.64 no'lu Alman Standardında; 1 kV ve üzerindeki AA tesislerinin topraklaması için tavsiye edilen adım ve dokunma gerilimleri Şekil 6'da açma zamanının işlevi olarak verilmiştir.

Dokunma ve adım gerilimleri için daha hassas değerler İsviçre standardında verilmiştir (Şekil 7).

Müsaade edilebilir maksimum topraklama direnci, maksimum faz-toprak akımına ve müsaade edilebilir gerilim yükselmesine bağlı olarak her trafo yada salt merkezi için ayrı ayrı tanımlanmalıdır.

VDE 0141 Alman standardında müsaade edilebilir adım ve dokunma gerilimleri belirlenmiş ise de müsaade edilebilir topraklama elektrotu gerilimi doğrudan verilmemiştir.

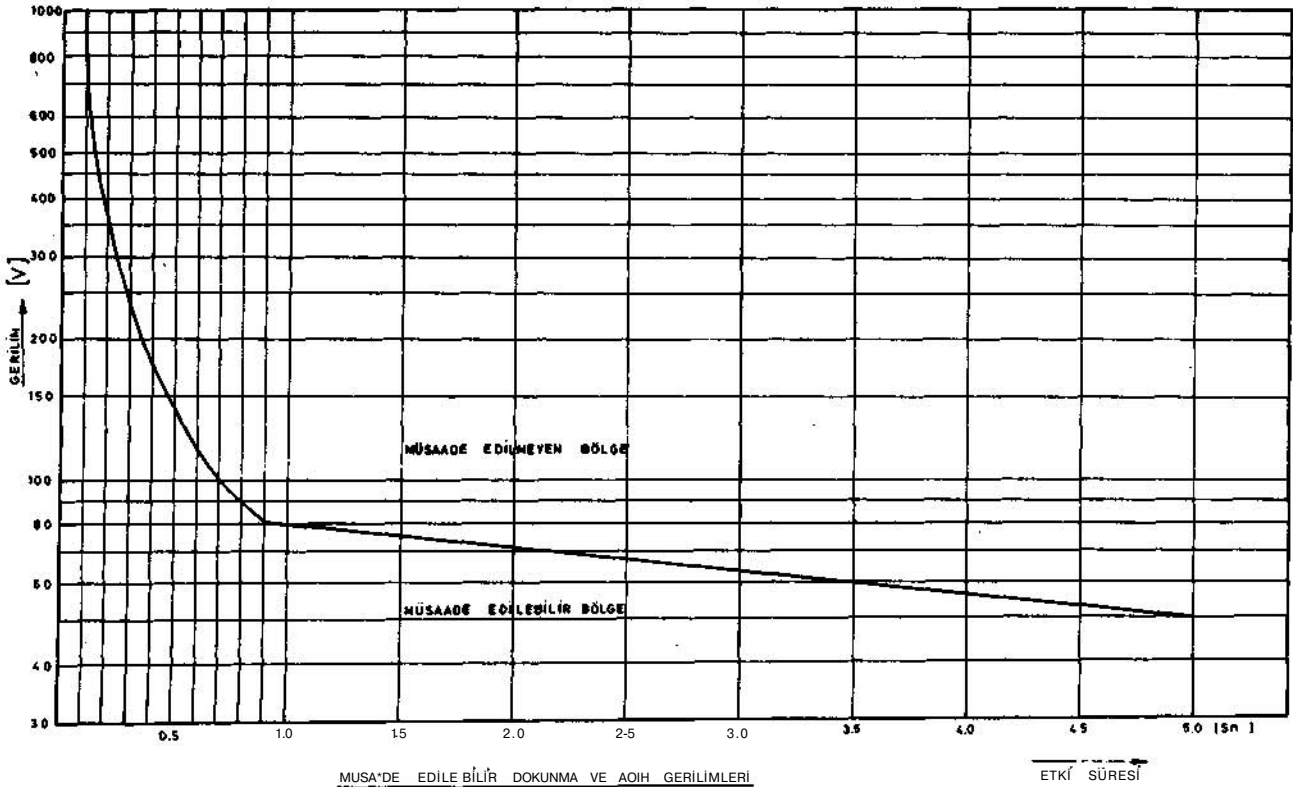
Amerikan pratiğinde ise müsaade edilebilir toprak gerilimi yükselmesi (elektrot gerilimi) santral, trafo ve salt merkezleri için normal sınır 3000 V, özel koşullarda da maksimum sınır 5000 V tavsiye edilmektedir.

5. PROJELENDİRME YÖNTEMİ

Topraklamanın önemi nedeni ile projesi yapılacak topraklama sistemi öncelikle bir bütün olarak ele alınmalı ve çok dikkatli bir biçimde incelenmelidir.

Proje yapımında sırasıyla aşağıdaki yolun izlenmesi özellikle tavsiye edilir:

- Toprak karakteristiklerinin irdelenmesi.
- Maksimum toprak arıza akımının saptanması.
- Topraklama sisteminin proje taslağının hazırlanması.

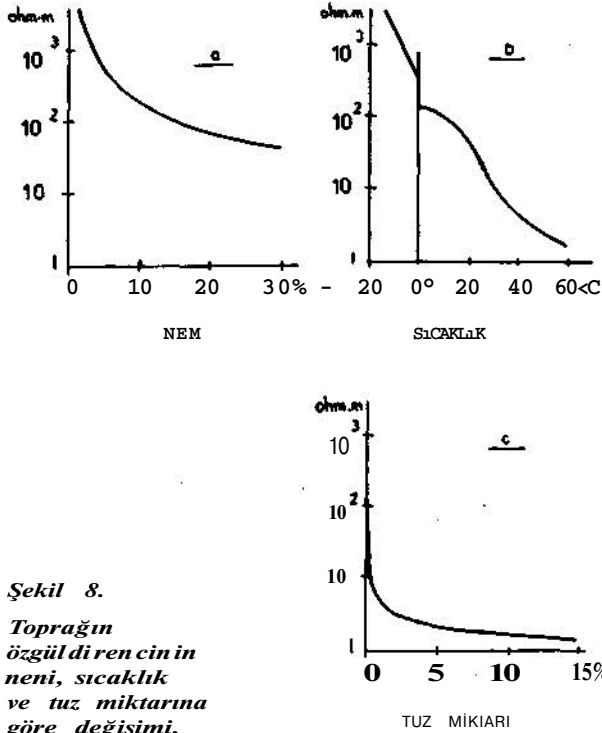


Şekil 7. Müsaade edilebilir adım ve dokunma gerilimlerinin etki süresine göre değişimi.

- d) Topraklama direncinin hesaplanması.
- e) Topraklama şebekesinin maksimum gerilim yük-selmesinin hesaplanması.
- f) Öngörülen adım ve dokunma gerilimlerinin sap-tanması.
- g) Topraklanan alan içerisindeki adım ve dokunma gerilimlerinin hesaplanması.
- h) Özel tehlike gösteren noktaların ve transfer gerilimlerinin incelenmesi.
- i) f, g ve h maddelerinde yapılan çalışmaların sonuçlarına göre taslak topraklama projesinin gözden geçirilmesi (revizyonu).
- j) Topraklama sisteminin yapı (konstrüksiyon) projesinin hazırlanması.
- k) Tesisi tamamlanmış topraklama sisteminin di-renci ile adım ve dokunma gerilimlerinin ölçülmesi.
- l) Bulunan ölçü sonuçlarına göre e, f, g, h mad-delerinde yapılan çalışmaların değerlendiril-mesi.
- m) 1 maddesinde yapılan bu değerlendirmeye göre topraklama sisteminin iyileştirilmesi (geniş-letme, çubuk çakılması, tel çit yapılması, vb.).

6. TOPRAK KARAKTERİSTİKLERİNİN İRDELENMESİ

Bir topraklama sistemi projelendirilirken önce toprağın kendisi incelenir. Ancak toprağın diren-



ci aşağıda sıralayacağımız etmenlere bağlı olarak değişir:

- a) Toprağın cinsi
- b) Toprak tabakasının kalınlığı
- c) Sıcaklık
- d) İçerdiği nem miktarı
- e) İçerdiği tuz miktarı.

Şekil 8'den toprak özgül direncinin sıcaklık, nem ve tuz miktarına göre nasıl değiştiği kolayca görülmüyor.

Toprak özgül direncinin ölçümünde genellikle dört elektrot yöntemi kullanılır. Bu yöntemde eşit aralıklarla toprağa düşey çakılı çubuklardan dış-taki iki elektrottan akım geçirilir ve içteki iki elektrot arasındaki gerilim farkı ölçülür. Dört uçlu toprak Megger'i genellikle bu ölçüm için kullanılan bir akım kaynağıdır, ölçü aygıtından okunan direnç R(ohm) ise, toprak özgül direnci p(ohm-m) aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

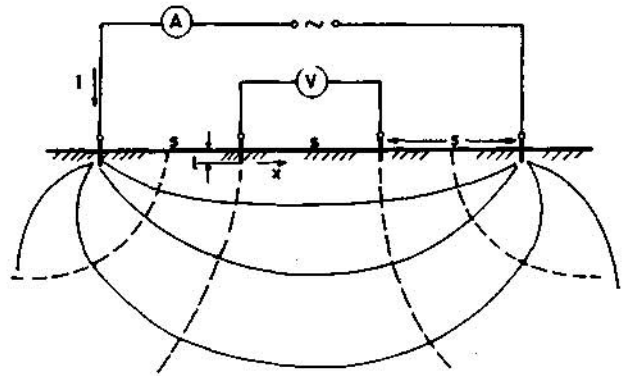
$$p = 2r \cdot S \cdot R$$

Burada S metre olarak elektrotlar arasındaki açıklığı gösteriyor.

Şekil 9'dan açıkça görüldüğü gibi, elektrotlar arasındaki açıklık büyüdükçe elektrotlar arasında akan deney akımının büyük bir bölümü yüzeye göre daha derinden akmaktadır.

Maksimum elektrot aralığına karşılık olan derinlikte toprağın üniform olup olmadığı hakkındaki fikir giderek artan elektrot aralıklarında ölçümler tekrarlanarak edinilebilir. Burada akımın nüfuz etme (penetration) derinliğinin elektrot aralığına bağlı olduğu kolayca görülebilir. Ayrıca nüfuz etme derinliğinin altındaki toprağın direncindeki değişmelerin ölçüme etkisi yok sayılabilir.

Alanı, topraklama şebekesinin alanına eşit olan dairenin yarıçapını "eşdeğer yarıçap" olarak tanımlıyoruz. Eşdeğer yarıçap derinliğine kadar olan toprağın, topraklama direncine etkisi yok



Şekil 9. Toprak özgül direncinin ölçümünde kullanılan dört elektrot yöntemi.

sayılamayacak düzeydedir. Buna göre; topraklama projesi yapılacak yerin toprakının uniform olup olmadığını saptamak için elektrot aralığını eşdeğer yarıçap uzunluğuna kadar artırmak gerekir.

Büyük alanlı merkezlerin eşdeğer yarıçaplarının ortalama 30-100 m gibi değerlere ulaştığı düşünülürse, dört uçlu Megger ile ölçmenin pratikte re gibi güçlükler doğuracağı kolayca anlaşılır. Bu nedenle ölçmeler genellikle elektrot aralığı 1,5 m'den başlanarak 5 ila 15 m'lik kademelerle 60 m'ye kadar artırılarak yapılır, eğer ölçüm sonuçlarına göre bir ölçümün bir önceki ile arasındaki fark % 30'dan fazla değilse; toprak uniform kabul edilir ve toprağın özgül direnci 4 no'lu denklemden bulunur.

$p = 2r \cdot S \cdot R$ denklemi, gömülü elektrot boyu (i) elektrot aralığına (p) göre çok küçükse geçerlidir. Ancak i/S oranının çok küçük olmaması durumunda aşağıdaki denklemin özgül direnç hesabında kullanılması daha uygun olur.

$$P = \frac{41-S-R}{1 + \frac{2S}{\sqrt{S^2 + 4l^2}} - \frac{S}{\sqrt{S^2 + l^2}}}$$

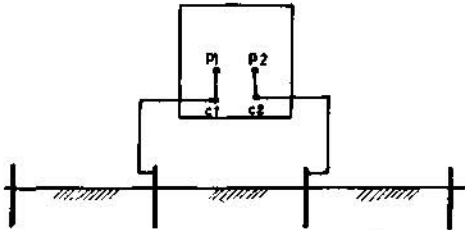
Gerilim elektrotları ile ölçü bağlantı kablolarının dirençleri toplamını R^* , voltmetre yada Megger gerilim devresinin direncini de R_y ile gösterirsek; özgül direnç hesabında kullanılan V gerilim düşümü seri bağlı olan $R_y + R_e$ dirençleri üzerindeki toplam gerilim düşümünü verecektir. Ancak voltmetreden okunan V_0 gerilimi R_y direnci üzerindeki gerilim düşümünü vereceğinden, gerilim ve özgül direnç değerlerinin aşağıdaki gibi düzeltilmesi gerekir:

$$V = \frac{R + R_y}{R_y} \cdot V_0$$

$$\rho' = \rho \frac{R + R_y}{R_y} \quad (6)$$

Şekil 10'da gerilim elektrotlarının toplam dirençlerinin dört uçlu Megger ile nasıl ölçüleceği gösteriliyor.

Salt yada trafo merkezinin kurulacağı yerde, belirli bir derinlikte uniform bir toprak özgül direncine çok seyrek raslanır. Genellikle toprak, özgül dirençleri farklı çeşitli tabakalardan oluşur.



Şekil 10. Gerilim elektrotlarının toplam direncinin dört uçlu Megger ile ölçümü.

Çoğu kez toprağın, kalınlığı d ve özgül direnci P_1 olan bir üst tabaka ile p_2 özgül dirençli ve sonsuz derinlikteki bir toprak alt katmanından oluştuğu varsayılır. Bu varsayımın bulunacak sonuçların doğruluk düzeyi yeterlidir.

Çoğu kez dört elektrotlu ölçü yöntemi ile bu büyüklüklerin nasıl bulunacağıdır. Sunde, Şekil 11'deki gibi, P_{am}/P_1 oranının yalnızca S/d ile P_2/P_1 oranlarının işlevi olduğunu göstermiştir.

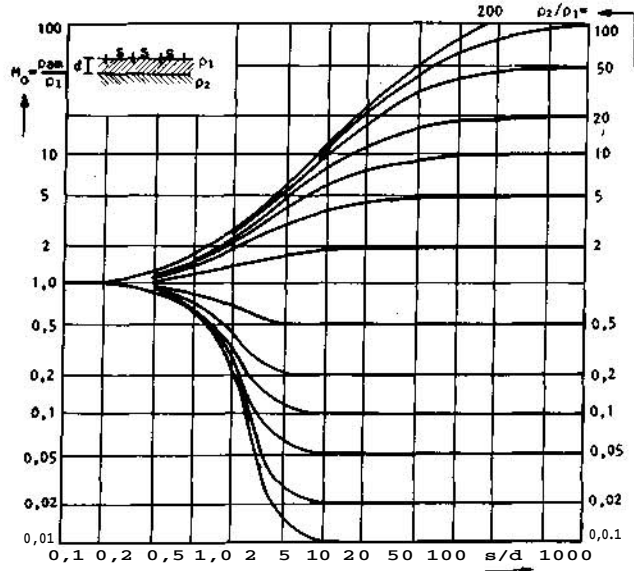
Küçük S/d oranları için ölçülen p_{am} değerinin P_1 değerine ve büyük S/d oranları için de P_2 değerine yaklaştığı şekilden görülebiliyor.

Belirli bir alan için d , p_1 ve P_2 değerleri hakkında bilgi edinilmek istenirse P_{am} değerleri çerşitli ölçü aralıkları (S) için ölçülerek $P_{am} f(S)$ eğrisinin çizilmesi ve Şekil 11'deki eğri ile karşılaştırılması gerekir. Eğrinin ilk yatay bölümü p_1 , yataylıktan ayrıldığı nokta ($S = d$) d hakkında ve eğrinin tekrar yataylaştığı bölüm ise P_2 hakkında tahminde bulunmaya yarayacaktır.

Çoğu kez eğrinin yataylıktan sapan bölümünün tekrar düzleşmesi ölçü aralığının yeterince büyütülmemesi nedeni ile sağlanamayabilir. Bu durumda "extra polation" yapmak yada mevcut jeofizik çalışmalarından yararlanmak gerekebilir.

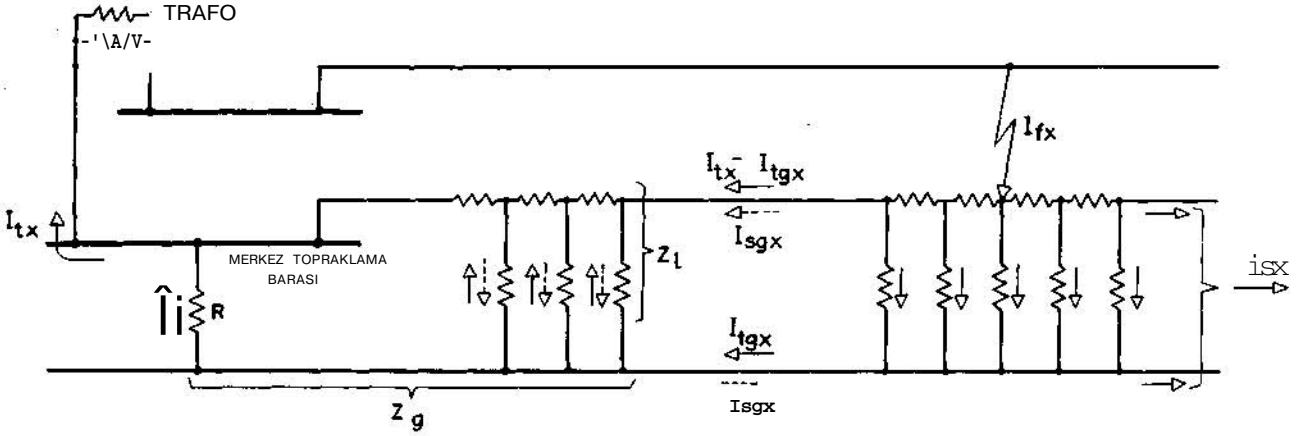
P_1 ve P_2 ve d büyüklükleri bilinirse; kullanılacak elektrot tipi de gözönüne alınıp eşdeğer p_a toprak özgül direnci hesaplanarak bir salt yada trafo merkezinin topraklama şebekesinin boyutları tahmin edilebilir.

Toprak özgül direnci toprak kalınlığı ile değişebileceği gibi uniform kabul edilen tabaka boyunca da değişebilir ve bu değişimler tehlikeli yerel gerilim yükselmelerine yolaçabilir. Bu da gözönünde tutulması gereken önemli sorunlardan biridir.



Şekil 11. Dört uçlu elektrot yöntemi ile ölçülen toprak özgül direnci (P_{gj}) değerleri.

$$P_{au}/P_1 = M_0(S/d, \rho_2/\rho_1)$$



Şekil 13. Toprak arızasının merkez dışında X kadar uzaklıktaki bir yerde olması durumunda arıza akımının dağılımı.

Bu kuplaj $y = Z_{jn}/Z_g$ biçiminde tanımlanabilir. Burada Z_g , toprak teli ile arızalı faz arasındaki karşılıklı (mutual) empedansı, Z_l ise daha önce tanımladığımız toprak telinin seri empedansını gösteriyor.

Bu durumda maksimum arıza akımı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_{g_{maks}} = (1 - \mu) I_g$$

$I_{g_0} > I_{g_0}$ olması durumunda bu akım, merkezin topraklama sisteminin gerilim yükselmesi hesabında kullanılabilir.

b) Arızanın merkezin dışında olması durumu. Merkezin arıza noktasında görünümü edilginidir.

Arıza merkezden x kadar uzaktaki bir noktada ise; sistemin buna karşılık olan eşdeğer devresi Şekil 13'deki gibi olacaktır.

Bu durumda Z_g empedansından geçen maksimum akım;

$$I_{g_{maks}} \text{ a } (1 - y) I_{g_0} \text{ dır.}$$

Burada I_{g_0} , arıza merkezin içinde iken merkezdeki transformatörlerin toplam arıza akımı içindeki payını gösteriyor.

c) Arızanın merkezin dışında olması durumu. Merkezin arıza noktasından görünümü etkindir.

Arıza akımının dağılımı önceki bölümdeki gibidir. Ancak bu durumda merkezdeki transformatörler üzerinden akan akım (I_{tx}) * uzaklığı arttıkça merkezin edilgin olması durumuna göre daha hızlı bir biçimde düşüyor:

$$I_{g_{maks}} = (1 - \mu) k I_{g_0}$$

Buradaki k çarpanı 1'den küçüktür ve hesaplanabilir.

8. TOPRAKLAMA DİRENCİ

Bir tesis için gerekli ortalama topraklama direnci (R), uzaktan topraklanmış bir noktaya göre bu tesis için müsaade edilen maksimum gerilim yükselmesi (ΔV) ile tesisten akan maksimum toprak arıza akımı (I_{g_0}) bilindiğine göre:

$$V = I_{g_{maks}} \cdot Z_g \leq V_{maks}$$

$$\frac{1}{Z_g} = \frac{1}{R} + \sum_{l=1}^n \frac{1}{Z_n}$$

eşitliklerinden bulunabilir.

Bugün geliştirilmiş olan topraklama sistemlerinin dayandığı ana ilke arıza anında doğacak aşırı gerilimleri, düşük topraklama direnci sağlayarak önlemektir. Düşük topraklama direnci elde etmek için uygulanan yöntemleri şöyle sıralayabiliriz.

- Hem salt yada trafo merkezi içerisindeki donatıyı topraklamak hem de toprak yüzeyinde düzgün gerilim dağılımı elde etmek için topraklama ağı kullanmak.
- Topraklama ağına topraklama çubuğu yada boru ilave etmek yada topraklama ağının kapladığı alanı artırmak.
- Topraklama ağının yerleştirileceği toprağın özgül direnci yüksekse yada mevsimlere göre büyük değişiklik gösteriyorsa,örneğin yazın toprağın özgül direnci çok yüksek değerlere ulaşıyorsa merkezin dışında daha düşük özgül dirence sahip bir ortama ilave topraklama ağı yada çubukları yerleştirmek.

Düşük topraklama direnci elde ederken projeci, topraklama sisteminin tipi, genel yerleştirmesi ve boyutları üzerinde sağlam bir ekonomik karşılaştırma yapmalıdır.

Eğer deneyler sonucunda istenen toprak özgül direnci elde edilmişse sorun geometrik biçimlerin fiyat karşılaştırmasına dönüşür.

8.1. Topraklama Direncinin Hesabı

Topraklama ağının ρ özgül dirençli uniform bir toprağa yerleştirildiğini varsayalım.

Topraklama ağının direnci R_g "Laurent" tarafından aşağıdaki formül ile yaklaşık olarak verilmiştir.

$$R_g = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

Burada;

r : Alanı topraklama ağının kapladığı alana eşit olan bir dairenin metre olarak yarıçapını,

L : Gömülü topraklama iletkenlerinin toplam uzunluğunu gösteriyor.

Bu denklem uzunluğunun genişliğine oranı 1 dolayında olan ve 60 ile 90 cm derinliğe gömülü ağlar için iyi bir yaklaşım verir.

Topraklama ağı direncinin hesabında daha geliştirilmiş bir formül, "Schwarz" tarafından verilmiştir. Buna göre;

$$R_g = \frac{\rho}{d_0} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt{d_0 h}} + \frac{k_1 L}{\sqrt{S}} - k_2 \right)$$

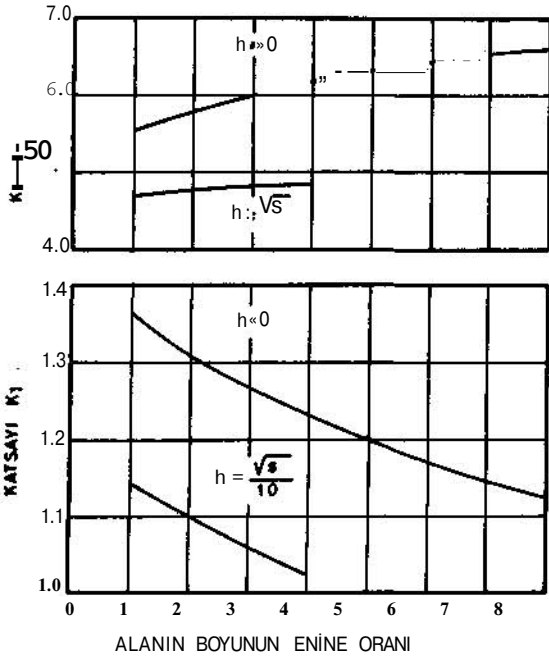
d_0 : Topraklama iletkeninin çapı

h : İletkenlerin gömülme derinliği

S : Ağın kapladığı alan

k_1 ve k_2 : Gerçek ağın kare biçimli ağdan sapma durumunu gözönüne alan katsayılar olup Şekil 14'deki eğrilerden bulunabilir.

"Schwarz" aynı zamanda birbirine yakın yerleştirilmiş topraklama çubuklarının eşdeğer dirençle-



Şekil 14. Schwarz'ın verdiği formülde kullanılan k_1 ve k_2 katsayıları.

ri R_{rb} için de aşağıdaki formülü geliştirmiştir.

$$R_{rb} = \frac{\rho}{2 \pi n \ell} \left[\ln \frac{8\ell}{d} - 1 + \frac{2k_1 \ell}{\sqrt{S}} (\sqrt{n} - 1) \right]$$

n : Toplam kazık sayısı

ℓ : Herbir çubuğun boyu

d : Kazık çapı

Topraklama ağı ile çubukların ortak direnci ise;

$$R = \frac{R_{rb} - V_m^2}{R_{rb} + R_g + 2R_m}$$

formülünden bulunabilir.

$$R_m = \frac{\rho}{2} \left(\ln \frac{L}{\sqrt{S}} + k_1 \frac{L}{\sqrt{S}} - k_2 + 1 \right)$$

8.2. Topraklama İletkenlerinin Boyutlandırılması

Topraklama sistemindeki her öge (topraklama iletkeni, elektrotu gibi) aşağıdaki ilkeler gözönüne alınarak boyutlandırılmalıdır.

- İletkenler en büyük arıza akımına, arıza süresince herhangi bir erime yada hasarlanma olmadan dayanabilmelidir.
- Özellikle yerleştirileceği yerde karşılaşacağı fiziksel zorlanmalara karşı büyük bir dayanıklılık göstermelidir.
- İletkenler yerel gerilim farklarını tehlikeli değerlere yükseltmeyecek şekilde gerekli elektriksel iletkenliğe sahip olmalıdır.

Bakır topraklama iletkeni ve bağlantı öğeleri için "Onderdonk" un geliştirdiği aşağıdaki bağlantı kullanılabilir:

$$I = A \sqrt{\frac{\log \left(\frac{T_m - T_a}{235 + T_a} + 1 \right)}{33 S}}$$

Burada;

I : Amper olarak arıza akımı

A : CM (circular mils) olarak bakır iletkenin kesiti ($1 \text{ mm}^2 = 1974 \text{ CM}$)

S : 1 arıza akımının saniye olarak aktığı süre

T_m : °C olarak müsaade edilen maksimum sıcaklık yükselmesi

T_a : °C olarak ortam sıcaklığı.

Yukardaki formülün uygulamasında normal olarak aşağıdaki kabuller yapılabilir.

- Ortam sıcaklığı $T_a = 40^\circ \text{C}$,
- Isınma, arıza kısa süreli olduğu için iletkende kalıyor.
- Bakırın erime sıcaklığı 1083°C .

- Lehimli bağlantılar için müsaade edilen sıcaklık yükselmesi 450°C.
- Cıvatalı bağlantılar için müsaade edilen sıcaklık yükselmesi 250°C.
- Arıza süresi olarak AIEE 'de 30 sn alınması tavsiye ediliyorsa da, pratikte yüksek kesme hızına sahip salt merkezleri için bu süre 4 sn'ye indirilebilir.

VDE 0141'de yangın tehlikesi olmayan yerler için maksimum sıcaklık yükselmesi 300°C, yangın tehlikesi olan yerler için ise 200°C alınarak hesaplar yapılmakta ve çıkan akım değerinin 1,2 katı 1 sn'lik müsaade edilen akım değeri olarak alınmaktadır.

Başka bir deyimle 1 sn süreyle müsaade edilen akım yoğunluğu bakır iletkenler için 160 A/mm², alüminyum için 105 A/mm² ve çelik için de 67 A/mm² alınmaktadır.

Yukarıda verilen bağıntıdan bulunacak sonuç ne olursa olsun AIEE'de lehimli bağlantılar için 1/0, cıvatalı bağlantılar için de 2/0 dan daha küçük kesitli iletken kullanılmaması tavsiye edilmektedir.

VDE 0141/2.64'de tavsiye edilen topraklama elektrotlarının minimum boyutları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Topraklama elektrotunun tipi	Galvanizli çelik	Bakır kaplamalı çelik	Bakır
1. Şerit elektrot	Minimum 3mm kalınlığında 100 m ² kesitli çelik şerit 95 mm ² örgülü iletken	50 mm ²	Minimum 2mm kalınlığında 50 m ² kesitli bakır şerit 35 m ² örgülü iletken
2. Çubuk elektrot	Çelik boru 1" Profil çelik: L : 65-65-7 U : 6 1/2 T : T 6 X : 50-3 yada eşdeğer diğer çubuklar	2,5 mm kalınlıkta bakır kaplamalı ve 1,5 mm çapında çelik	Minimum 2 mm kalınlığında ve 50 mm ² kesitli bakır şerit 35 m ² kesitli dolu yada örgülü iletken 30x3'lük bakır boru
3. Levha elektrot	3 ran'lik çelik levha	-	2 mm'lik bakır levha

Toprak iletkeninden yada elektrotundan akan akımın yarattığı ısı toprağın nemini azaltacağından toprağın özgül direnci artacaktır. Bu nedenle nispeten uzun süreli akan toprak akımları için bu konunun da gözönüne alınarak topraklama öğelerinin boyutlandırılması uygun olacaktır.

9. GERİLMİNİN DAĞILIMININ DENETLENMESİ

Herhangi bir tesiste adım ve dokunma gerilimlerini istenilen güvenlik sınırları içinde tutabilmek için topraklama sistemindeki gerilim dağılımının iyi bir biçimde denetlenmesi gerekir. Ağ biçimindeki bir topraklama sisteminde göz aralığı azaltılarak adım ve dokunma gerilimlerini istenilen değerlere düşürmek olanaklıdır.

Bir topraklama tesisinde dokunma gerilimleri gerilim dağılımının denetimi için yapılacak hesaplara temel alınır.

Bunun nedenini kısaca şöyle açıklayabiliriz:

Adım gerilimleri çoğunlukla dokunma gerilimlerine göre daha küçük değerlerdedir. Çünkü iki ayağın toprakla temas direnci devreye seri girdiğinden vücuttan geçen akım daha iyi sınırlanır.

Transfer gerilimlerinin sınırlandırılması ise çok daha zor ve genellikle yalıtıklanlığa ilişkin özel çözümler gerektirir.

Bundan önceki bölümlerde dokunma gerilimini toprak iletkeninden bir metre yatay uzaklıkta ölçülen gerilim olarak tanımlamıştık. Ancak öyle olasılıklar vardır ki bir metreden daha fazla uzaklıkta dokunulan donatı doğrudan yada dolaylı olarak topraklama ağı ile bağlantılı olabilir. Bu nedenle dokunma gerilimi yerine "göz gerilimi" diye tanımladığımız ve topraklı donatı ile dikdörtgen biçimli topraklama gözünün merkezi arasındaki gerilim temel alınır.

Genellikle bu gerilim, topraklama iletkeninden bir metre uzaklıkta ölçülen dokunma geriliminden daha büyük değerdedir. Gözlu olarak tesis edilmiş bir topraklama ağında; boyutları, iletken kesiminin ve gömülme derinliğinin işlevi olan göz gerilimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$E_r = K_g \cdot K_i \cdot p \cdot \sqrt{f}$$

Burada K_g paralel iletkenler arası açıklığın (D), iletken sayısının (n), iletken çapının (d) ve gömülme derinliğinin (h) etkilerini gözönüne alan bir katsayıdır:

$$K_g = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \dots$$

Burada ikinci terimde parantez içerisindeki çarpanların sayısı paralel iletken sayısının iki eksiği kadar alınmalıdır.

K[^]: Topraklama ağının çeşitli bölümlerinden akan toprak arıza akımının uniform olarak dağılmamasını gözönüne alan düzensizlik düzeltme çarpanıdır.

p : Ortalama toprak özgül direnci.

I : Topraklama ağından toprağa akan maksimum kısa devre akımının etkin değeri. Kısa devre akımındaki doğru akım bileşeninin etkisi ile ilerde şebekenin kısa devre gücünün artması olasılığı ayrıca gözönüne alınmalıdır.

L : Toprak içerisine gömülü iletkenlerin toplam uzunluğu.

Yukardaki göz gerilimini önceki bölümlerde açıklanan müsaade edilir dokunma gerilimine eşitleyelim;

$$\frac{K \cdot K_i \cdot p \cdot I}{L} = \frac{165 + 0,25 p_{\text{g}}}{7F}$$

Bu eşitlikten göz gerilimini istenen sınırlarda tutabilmek için gerekli topraklama iletkeni uzun-

luğu hesaplanabilir:

$$L = \frac{K_g \cdot K_t \cdot p \cdot I \cdot \sqrt{t}}{165 + 0,25 p_s}$$

p_s : Salt yada trafo merkezinin henen yüzeyindeki toprafln özgüldirenci (ohm-ir) .

t : Kısa devre akımının sistemde aktığı maksimum süre (sn) .

Yukardaki formüllerde kullanılan K_j düzensiz akım düzeltme çarpanı, topraklama ağının geometrik biçimine bağılı olarak 1,2 ile 2 arasında değışir.

Topraklama ağının kare yada dikdörtgen biçimli, toprak özgüldirencinin de uniform olması gibi ideal koşullar sağlansa bile; topraklama ağı iletkenlerinin birim uzunluğundan geçen akımın değeri köşelerde ve yanlarda ortadaki iletkenlere göre daha fazladır. Gerilim dağılımı da bu akım yoğunluğuna bağılı olarak değışecektir.

Uygulamada ise topraklama ağı için düzgün bir geometri ile uniform bir özgüldirenc elde etmek çok güçtür. Bu nedenle ağın geometrik biçimini gözönüne alan uygun bir K_i düzensizlik çarpanını kullanmak genellikle pratikte gerekli olmaktadır.

Topraklama ağı içerisindeki adım ve dokunma gerilimlerini, tabii fiyata bağılı olarak göz aralığını azaltarak istenilen değerlere düşürmek olanaklıdır. Başka bir deyimle kuramsal olarak yekpare bir levha kullanılırsa adım ve dokunma gerilimleri sıfır yapılabilir. Ancak ağın çevresinde durum yekpare levha kullanılsa bile farklıdır. Özellikle bu durum topraklama ağı sınırlı bir alanı kaplayan küçük merkezler için önemlidir.

Topraklama sistemlerinin tasarımında genellikle trafo merkezi yüzeyinin çakıl gibi nisbeten yalıtkanlık direnci yüksek malzeme ile örtülmesi kabulünün yapılması adım gerilimlerinin önemini azaltmakta ve bu nedenle topraklama ağının boyutlandırılması yalnız dokunma gerilimlerinin sınırlandırılması temeline dayanmaktadır.

Ancak, çakıl örtüsünün bulunmadığı salt merkezi çevresinde özellikle çevre çiti yakınında ve köşelerde dokunma gerilimleri kadar adım gerilimleri de önemli bir sorundur.

Adım gerilimlerinin hesabı için aşağıdaki formülden yararlanılabilir:

$$E_a = K_g \cdot K_i \cdot \rho \cdot \frac{I}{L}$$

Burada;

K_g ; paralel iletkenler arası açıklığın (D), paralel iletken sayısının (n), iletken çapının (d) ve gömülme derinliğinin (h) bir işlevidir:

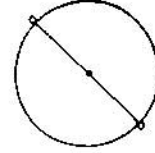
$$v = \frac{1}{n} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right]$$

Parantez içindeki terim sayısı, paralel iletken sayısına eşit alınmalıdır.

K_i çarpanının 1,2 ile 1,3. arasında alınması Niemann tarafından tavsiye edilmektedir.



DÖRT UÇLU YILDIZ TOPRAKLAMA
ELEKTROTU



HALKA TİPİ TOPRAKLAMA
ELEKTROTU



TOPRAKLAMA AĞI

Şekil 15.

Pratikte kullanılan topraklama elektrotları.

10. TOPRAKLAMA PRATIĞI

Salt ve trafo merkezlerinde topraklama sistemleri genellikle, donatı temelleri için kazılmış zemine çakılı çelik topraklama çubukları ile bu çubukları birbirine bağlayan gömülü bakır topraklama harasından oluşur. Bu topraklama barası yada başka bir deyimle ağı, topraklanacak donatı yada yapının kolaylıkla topraklanmasını sağlayacak biçimde düzenlenmelidir.

Zemin çubuk çakılmasına elverişli değilse ek topraklama iletkenleri gömülerek daha yoğun bir ağı oluşturulabileceği gibi, topraklama ağı etrafta koşulları daha elverişli bir yere yerleştirilecek topraklama elektrotlarına bağlanabilir.

Genellikle kullanılan topraklama elektrotlarının tipleri Şekil 15'te gösterilmiştir.

Biraz sonra hangi donatı ve çelik yapıların topraklanacağı sırasıyla anlatılacaktır, özellikle hatları topraklayan ve elle çalıştırılan topraklama ayırıcılarının altlarına topraklama ağı yerleştirilmelidir. Ayrıca merkezde son bulan enerji nakil hatlarının toprak telleri ile nötr iletkenleri yapılabilir ölçmeleri kolaylaştırmak amacıyla topraklama ağına bir link aracılığı ile bağlanmalıdır. Yine santrallarda toprak tecrübe linklerinin tesisi; santral topraklama ağı ile salt merkezi topraklama ağını birbirinden ayırmak için gereklidir.

Topraklama ağında kullanılacak iletkenlerin boyutu ile gömülme derinliği öncelikle mekanik hasar olasılığını en aza indirecek biçimde seçilmelidir. Topraklama iletkenlerinin gözler biçiminde oluşturulması yada paralel devreler biçiminde donatıya bağlanması, topraklama sisteminin bir bölümünde mekanik hasar olduğunda bile elektriksel iletkenliği diğer devre sağlayacağından güvenilir düzenlemelerdir.

Topraklama elektrotları ile donatı arasındaki bağlantıların kaynaklı, uygun civatalı yada sıkıştırılmalı tipte klemensler ile yapılması elektriksel ve mekanik güvenilirliği artırır.

Hem topraklama iletkeni, hem de bağlantı öğeleri mekanik ve termik zorlanmalarla korozyona karşı dayanıklı malzemelerden yapılmalıdır. 600°C'nin altında eriyen lehim ve kaynak maddeleri kulla-

nılmamalıdır. tki ayrı malzeme birleştirilirken elektrolitik korozyonu önleyecek önlemler alınmalıdır. Örneğin; alüminyum bir yapının topraklanmasında; bakır toprak terminal pabuçları kalayla kaplanmalı yada alüminyum pabuçlar kullanılmalıdır.

Topraklama iletkenleri yanabilecek maddelerden uzağa konmalı; açığa yerleştirilmişler ise tanınabilecek biçimde işaretlenmelidir. Çok zor geçilebilecek yerlerde boru içersine alınmalı yada iletken her an denetimi yapılabilecek genişlikteki bir boşluktan geçirilmelidir.

Aygıtların kendi muhafazaları, toprak hatları, izolatör altlıkları topraklama iletkenleri olarak kullanılabilirler. Ancak böyle bir bağlantı, başka bir aygıtın toprak bağlantısının kesilebilmesine engel olmamalıdır.

Bundan önce de belirttiğimiz gibi açığa yerleştirilmiş topraklama iletkenleri 16 mm^2 'den; toprak altındaki iletkenler de 50 mm^2 'den daha küçük kesitte olmamalıdır. Levha yada şerit tipi elektrotlarda kalınlık 3 mm 'den ve kesit de 50 mm^2 'den daha küçük olmamalıdır.

Özel topraklamalar için topraklama iletkenleri tesisatta doğacak en yüksek gerilime yada en az 4 kV 'a göre yalıtılmalıdır.

Trafo yada salt merkezinde topraklanması gereken aygıtları şöyle sıralayabiliriz:

- Generatör ve trafoların nötr noktaları ile muhafazaları.
- Kesiciler, ayırıcılar, sigortalar ve ark boyuzları.
- Ölçü trafoları.

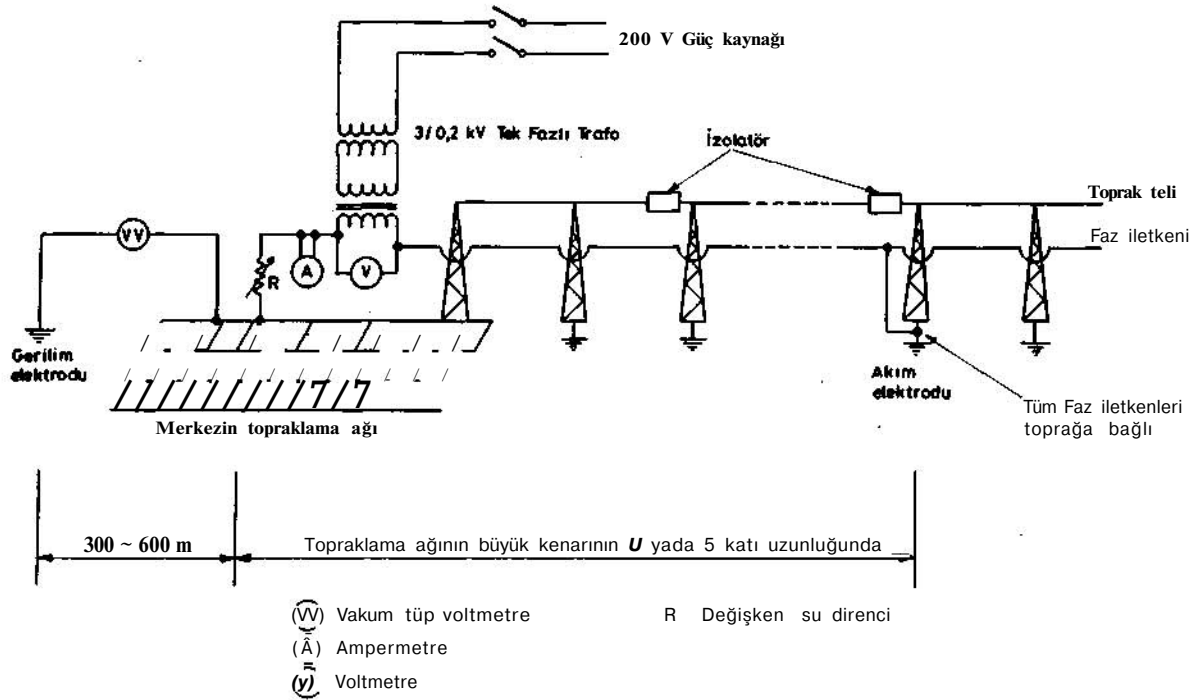
- Dağıtım hücre ve panoları.
- Kablo muhafazaları ve kablo başlıkları
- Parafudr ve izolatör altlıkları.
- Çevre çitleri, raylar , yağ ve yakıt tankları.
- Salt yada trafo merkezindeki tüm metal boru şebekeleri.
- Elektrik motoru, ısıtıcılar, yardımcı trafolar, redresörler gibi taşınamayan aygıtlar.
- Yapıların çelik öğeleri.
- Cebri borular, çelik kapak yuvaları, emme boruları.
- Her türlü anten.

11. TOPRAKLAMA SİSTEMİ DİRENCİNİN ÖLÇÜMÜ

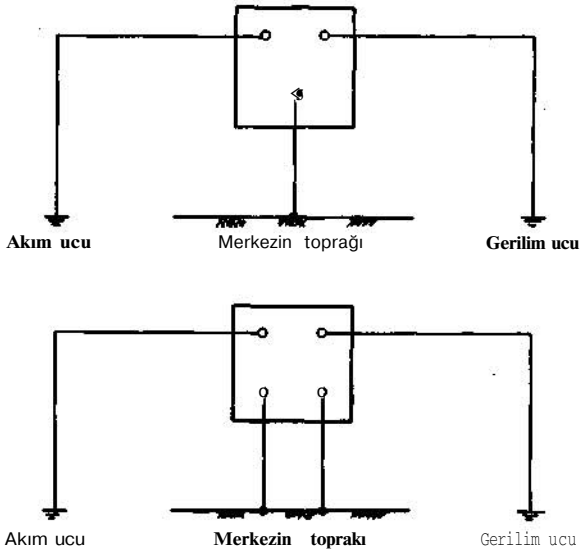
Topraklama sisteminin genellikle dirençli, kapasitif ve indüktif bileşenlerden oluşan bir empedansı vardır. Topraklama sisteminin dirençli bileşeni işletme frekansında (50 Hz), kapasitif ve indüktif bileşenleri de yüksek frekansta (yıldırım boşalması, iletişim frekansları gibi) etkinliklerini gösterir.

Topraklama direncinin ölçümündeki amaçları şöyle sıralayabiliriz:

- Topraklama sisteminin gerçek direncinin saptanması.
- Yapılan hesapların denetlenmesi.
- Topraklama sisteminde gerilim yükselmesinin ve bütün bir alan boyunca gerilim değişiminin belirlenmesi.



Şekil 16. Bir merkezin topraklama direncinin ölçülmesi.



Şekil 17. Uç ve dört uçlu toprak Megger'i ile ölçme yöntemi.

- d) Topraklama sisteminin yıldırım boşalmalarına karşı koruma etkinliğinin saptanması.
- e) Radyo frekansları ile uygunluğun sağlanması.
- f) Alan içerisinde yapılacak binaların koruma projelerinin hazırlanması için gerekli verilerin toplanması.

Topraklama sisteminin karakteristikleri gömülü topraklama elektrotlarının düzenine, kapladığı alana ve toprağın bileşimine bağlıdır.

11.1. Toprak Megger'i ile ölçme Yöntemi

Şalt yada trafo merkezlerinin topraklama dirençlerinin ölçümünde kullanılan en basit yöntem toprak Megger'i ile yapılan ölçmedir.

Bu ölçme yönteminde eğer üç uçlu Megger kullanılıyorsa Şekil 17.a'da görüldüğü gibi uçlardan biri merkezin toprağına diğer ikisi de ölçüme yardımcı olacak toprağına bağlanır. Dört uçlu Megger kullanılması durumunda ise Şekil 17.b'de görülen bağlantı yapılır. Her iki durumda da devre akımı merkezin toprağı ve toprağına bağlanan akım ucu yolu ile ölçü aygıtının akım devresinden akar. Ölçü aygıtının gerilim devresi ise merkezin toprağı ile aygıtın toprağına bağlı diğer gerilim ucu arasına bağlanır, üç uçlu Megger kullanılması durumunda ölçü aygıtı ile merkezin toprağı arasındaki bağlantının direnci ayrıca ölçülür ve deney değerlerinden çıkarılır. Eğer gerilim ucunun direnci yüksekse gerçek değerlerin elde edilebilmesi için yapıcı yönergesine başvurmak gerekecektir. Akım ucunun yüksek dirençli olması ise ölçü aygıtının duyarlılığını (hassasiyetini) düşürür, ancak okumanın doğruluğunu etkilemez.

Bu yöntemin aşağıdaki durumlarda kullanılması uygun değildir:

- a) ölçümü yapılacak merkezin topraklaması uzakta direnci düşük bir topraklamaya bağlı ise,
- b) İndüksiyon yada kaçak akımlar nedeni ile doğan gerilim yükselmeleri önemli düzeylerdeyse,

- c) Topraklamanın direnci Megger'den okunabilecek en küçük değerden daha küçükse,
- d) Eğer deney için kullanılan kablolar birbirine paralel ve en kısa kablonun direnci, ölçülecek topraklamanın direncinden büyükse.

Bu gibi durumlarda voltmetre-ampermetre yöntemini kullanmak daha doğru sonuçlar verir.

Ancak bu yöntemde de deney bağlantılarının doğrultuları farklı olmalıdır. Eğer deney için kullanılacak kablo bağlantılarının birbirlerine paralel olması zorunluluğu varsa bu durumda wattmetre-ampermetre yöntemini kullanmak daha doğru olur.

11.2. Voltmetre-Ampermetre Yöntemi

Voltmetre-ampermetre yöntemi, merkez ile yardımcı toprak uçları arasında paralel toprak kesitlerinin olmaması ve bu bağlantıların genel doğrultuları arasında 90°'den büyük açılarının olması durumunda uygulanır.

Bu yöntemin devre şeması Şekil 18'de gösterilmiştir. Ölçülen gerilim yükselmesi E_t ve deney akımı da I_t olduğuna göre; merkezin topraklama direnci R aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$R = K_i \frac{E_t}{I_t}$$

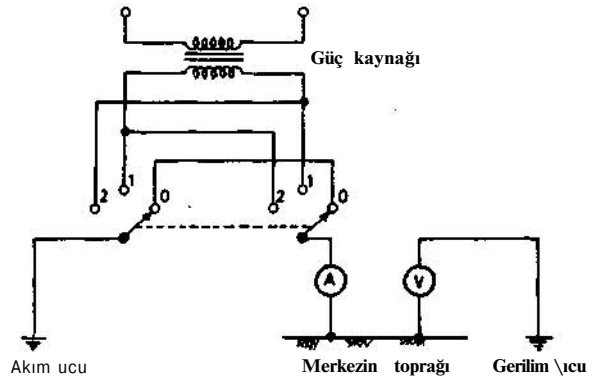
Burada K_i , yardımcı toprak uçlarının merkezden yeterince uzağına yerleştirilememesinden gelen ölçü hatasını düzeltmek için kullanılan bir çarpanıdır.

Bu yöntemde ampermetre ve voltmetre, olası temas dirençleri ile bağlantı kablolarının dirençlerinin etkilerini azaltmak için merkezin topraklamasına ayrı kablolar ile bağlanmalıdır.

Gerilim devresinin toprak ucunun direnci yüksekse voltmetreden ölçülen değerler aşağıdaki düzeltme çarpanı ile çarpılmalıdır.

$$K_v = \frac{R_{ölçü\ aygıtı} + R_{toprak\ ucu}}{R_{ölçülen}}$$

Burada; $R_{ölçü\ aygıtı}$ voltmetre devresinin iç direncini,



Şekil 18. Voltmetre-ampermetre yöntemi ile toprak direncinin ölçülmesi.

toprak ucu I_0 yardımcı topraklama elektrotunun direncini gösteriyor.

Paralel hatlar tarafından indüklenen gerilimler yada merkezin topraklamasından akan kaçak akımlar gibi haricî alternatif akımı ve gerilimler nedeniyle doğan hatalar, deney aşağıdaki gibi yapılarak önlenebilir.

- Akım ucu ampermetre ile, gerilim ucu da voltmetre ile birlikte merkezin topraklamasına bağlanmalı ve deney akımı verilmeden önce akım (I_0) ve gerilim (E_0) değerleri ölçü aygıtlarından okunmalıdır. Bu durum Şekil 18'deki (0) konumuna karşılıktır.
- Şekil 18'de (1) konumu ile gösterilen akım ucuna alternatif akım uygulanmalı ve ölçü aygıtlarından I_1 akımı ile E_1 gerilimi okunmalıdır.
- Şekil 18'de (2) konumu ile gösterilen uca ters işarette (polaritede) deney akımı akıtılarak I_2 ve E_2 değerleri alınmalıdır.
- Deney akımı kesildikten sonra ilk başta yapılan okuma tekrarlanmalıdır (I_0 ve E_0).

Deney akımının (I_t) büyüklüğü aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$I_t = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2} - I_0^2}$$

Deney akımının yarattığı gerilim yükselmesi (E_t) ise;

$$E_t = K_2 \sqrt{\frac{E_1^2 + E_2^2}{2} - E_0^2}$$

bağıntısından hesaplanabilir.

Ölçme hatasının küçük olması için E_t 'nin E_0 'dan büyük olması ve E_0 ile E_0' arasındaki farkın da E_t 'nin Z 10'unu geçmemesi gerekir. Bu koşul sağlanamazsa deney akımı; E_t gerekli değere yükselmeye kadar artırılır. Ayrıca bağlantı kablolarının dirençleri deney sonuçlarından çıkarılmalıdır.

11.3. Wattmetre-Ampermetre Yöntemi

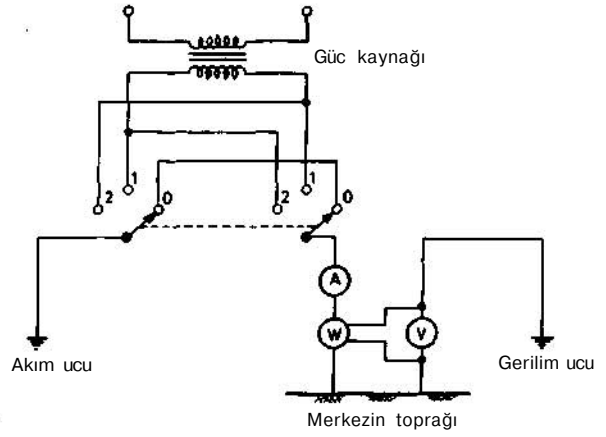
Merkezin topraklama iletkenleri ile yardımcı toprak bağlantılarının kısmen yada tamamen paralel olması durumunda bu yöntemin kullanılması daha uygun olur.

Bu yöntem voltmetre-ampermetre yöntemindeki devreye Şekil 19'daki gibi bir wattmetrenin ilave edilmesinden ibarettir.

Topraklama sisteminin direnci R ; ölçülen güç P_t ile deney akımı I_t bilindiğine göre aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir.

$$R = K_i \frac{P_t}{I_t^2}$$

K_i : Yardımcı toprak elektrotlarının birbirine yakınlığı nedeniyle doğan hatayı düzelter bir çarpanıdır.



Şekil 19. Wattmetre-ampermetre yöntemi ile toprak direncinin ölçülmesi.

İndüksiyon yada kaçak akımların yarattığı haricî alternatif akımların bozucu yöndeki etkilerini (interferans) azaltmak için bu deneyin aşağıdaki gibi yapılması uygun olur.

- Akım ucu ampermetre ile wattmetrenin akım bobinine, gerilim ucu da wattmetrenin gerilim bobini ile merkezin topraklamasına bağlanmalıdır. Deney akımı verilmeden önce ölçü aygıtlarından I_0 akımı ile P_0 gücü okunmalıdır. Bu durum Şekil 19'daki (0) konumuna karşılıktır.
- Şekil 19'daki (1) konumunda alternatif akım, akım ucuna uygulanmalı; ölçü aygıtlarından I_1 akımı ile P_1 gücü okunmalıdır.
- Şekil 19'daki (2) konumunda ters işaretli deney akımı akıtılarak I_2 ve P_2 değerleri okunmalıdır.
- Deney akımı kesildikten sonra ilk başta yapılan okuma tekrarlanmalıdır (I_t ve P_t).

I_t deney akımı ile P_t gücü aşağıdaki bağıntılardan bulunabilir:

$$I_t = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2} - I_0^2}$$

$$P_t = K_2 \left(\frac{P_1 + P_2}{2} - P_0 \right)$$

K_2 : Voltmetre-ampermetre yönteminde belirtildiği gibi gerilim elektrotunun direncini gözönüne alan bir düzeltme çarpanıdır. Ancak R güç aygıtı direnci, voltmetrenin iç direnci ile wattmetrenin paralel gerilim bobininin direncini kapsar.

Bu değerler başlangıçtaki direnç formülünde yerine konursa topraklama sisteminin direnci bulunabilir.

Bu yöntemde wattmetrede okunan değerlerin işaretleri farklı olabilir. Ancak bu değerlerin işaretleri yukardaki eşitliklere konurken dikkat edilmelidir. Ölçü hatalarını azaltmak için P_t , P_0 'dan büyük olmalı ve P_0 ile P_0' arasındaki fark da

Pt'nin % 10'unu geçmemelidir. Eğer bu durum sağlanamazsa deney akımı artırılarak P_t gerekli değere yükseltilebilir.

Yine deney sonuçlarından bağlantı öğelerinin dirençlerinin çıkarılması unutulmamalıdır.

11.4. Topraklı Uç Fazlı Alternatif Akım Kaynağı ile Deneyin Yapılması

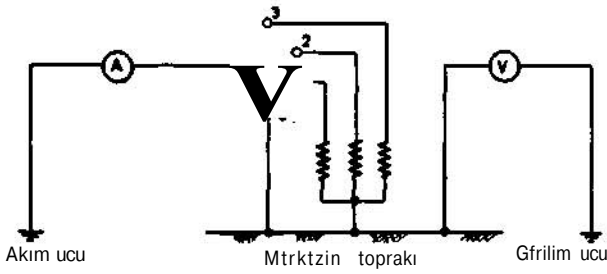
Topraksız tek fazlı güç kaynağı bulunamıyorsa Şekil 20'de gösterildiği gibi topraklı üç fazlı güç kaynağı kullanılabilir. Bu yöntemde üç fazlı güç trafosunun herbir sargısından sıra ile deney akımı geçirilerek I₁, I₂, I₃; EL E₂, E₃ ve P₁» P₂» P₃ değerleri okunur. Deney akımı verilmeden önceki I₀, E₀ ve P₀ değerleri ile deney akımı kesildikten sonra okunan I₀¹, E₀¹ ve P₀¹ değerleri bilindiğine göre; I_t, E_t ve P_t büyüklükleri aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$I_t = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}{3} - I_0^2}$$

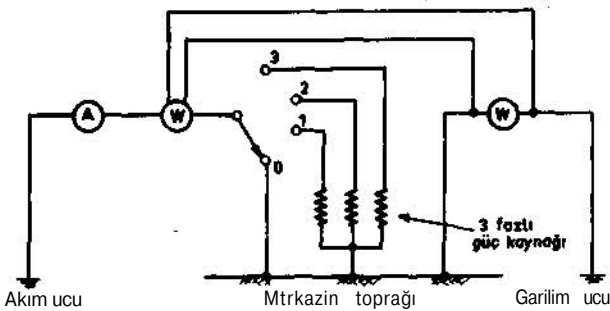
$$E_t = K_2 \sqrt{\frac{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2}{3} - E_0^2}$$

$$P_t = K_2 \left(\frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} - P_0 \right)$$

(0)



(b)



Şekil 20. Uç fazlı, güç kaynağı ile toprak direncinin ölçülmesi.

- a) Voltmetre-ampermetre yöntemi
b) Wattmetre-ampermetre yöntemi

11.5. Yardımcı Toprak Uçlarının Uygulama Noktalarının Saptanması

Yardımcı toprak elektrotları merkezin topraklamasından ve birbirlerinden yeterince uzağa yerleştirilmelidir. Büyük merkezlerde yardımcı toprak elektrotlarının daha kısa uzaklıklara konması ve deney sonuçlarının düzeltilmesi daha pratiktir.

Bunun için aşağıdaki yolun izlenmesi tavsiye edilir.

- a) Merkezin kapladığı alan saptandıktan sonra aynı alana eşit dairenin yarıçapı hesaplanır. Bu yarıçapın yarısı merkezin ölçmeye esas eşdeğer yarıçapı (r) olarak tanımlanır. Yardımcı toprak elektrotlarının, alanın merkezine ve birbirlerine olan uzaklıkları 5r'den az olmamalıdır.

Elektrotların gerekli uzaklıklara yerleştirilememesinden gelen hatayı düzeltmek için ölçülen topraklama direnci aşağıdaki çarpan ile çarpılmalıdır.

$$K = \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{X_{ab}}\right) - \left(\frac{r}{X_{sa}} + \frac{r}{X_{sb}}\right)}$$

Burada;

- r : Merkezin ölçmeye esas eşdeğer yarıçapını,
X_{ga} : Birinci elektrot ile alanın merkezi arasındaki uzaklığı (X_{ga} > 5r),
X_{gb} : İkinci elektrot ile alanın merkezi arasındaki uzaklığı (X_{gb} > 5r),
X_{a1} : İki yardımcı elektrot arasındaki uzaklığı (X_{a1} > 5r) gösteriyor.

b) İki yardımcı elektrotun arasındaki alandan yada bunlardan biri ile merkezin toprağı arasındaki alandan herhangi bir boru, ray, kablo yada toprak iletkenli enerji nakil hattı geçmemelidir. Böyle bir durumda deneyin yapılma zorunluluğu varsa yardımcı elektrotlar bu gibi tesislerden en az 150 m uzağa yerleştirilmelidir.

c) Yardımcı elektrotların yerleşim yerlerinin uygunluğundan emin olmak için ölçme elektrot yerleri değiştirilerek en az bir kere tekrarlanmalıdır.

d) Alanın merkezi ile yardımcı elektrotlar arasına çekilen iki hattın arasındaki açı mümkünse 90°'den büyük olmalıdır.

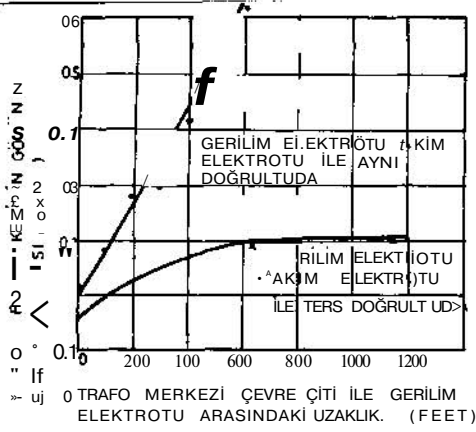
Bu durum gerçekleştirilemezse hatlar arasındaki karşılıklı empedans hesaba katılmalıdır.

e) Haricî devrelerin indüksiyon etkisinden elden geldiğince kaçınılmalıdır.

Bu nedenle gerilim iletkeninin doğrultusu, büyük akım taşıyan hatlar ile paralel olmamalıdır.

Merkez ile akım ucu arasındaki hatta doğan indüksiyon ölçü sonuçlarını etkilemez.

f) Aşırı indüksiyon yoksa akım ve gerilim elektrotlarının işlevleri aralarında değiştirilebilir. İlk ölçmede akım elektrotu olarak kullanılan elektrot, gerilim elektrotu; gerilim elektrotu olarak kullanılan elektrotta da akım elektrotu alınarak ikinci bir ölçme yapılır ve bütün düzeltmelerden sonra toprak direncinin iki değeri arasındaki fark % 10'dan büyük değilse ortalama



Şekil 21. Düşük topraklama dirençli bir merkezde ölçüm sonuçları.

değer merkezin topraklama direnci olarak alınabilir. Aradaki farkın çok büyük olması indüksiyon etkisinin dolayısıyla hatanın çok büyük olduğunu gösterir. Bundan sonra bu etkiyi giderici gerekli önlemler alınmalıdır.

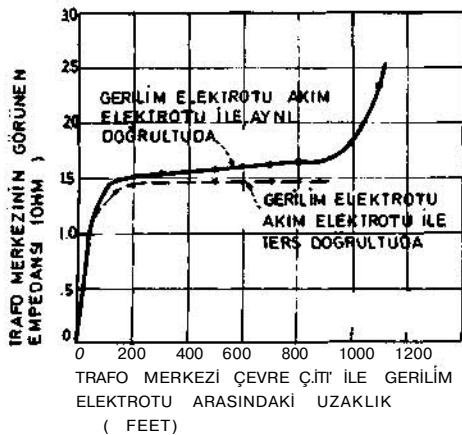
g) Merkezin topraklama direncini bulmak için en uygun yol, ölçülecek topraklama sisteminin diğer harici topraklama sistemleri ile olan bağlantılarını çözmek ve yalnız bu merkezin direncini ölçmektir.

Eğer gerekli ise diğer harici topraklamaların etkisi hesapla yada ayrı ölçülerle saptanabilir.

Direnci çok düşük bir harici topraklama sistemine bağlı salt yada trafo merkezinin direncini ölçebilmek için çok büyük yardımcı elektrot açığı (tercihan 8 km'den fazla) kullanılmalıdır.

h) Akım elektrotu, direnci ölçülecek topraklama sisteminin etkilerinden korunulması için yeterince uzağa yerleştirilmelidir.

Kuramsal olarak; uzaklığın topraklama direncine etkisi sonsuz uzaklığa kadar devam ederse de, bu



Şekil 22. Yüksek topraklama dirençli bir merkezde ölçüm sonuçları.

etki uzaklığın bir üstel işlevi ile ters orantılı değiştiğinden etkinin pratik bir sınırı bulunabilir.

Düşük topraklama dirençli ve geniş bir alanı kaplayan merkezlerin topraklama dirençlerinin ölçümünde gerilim elektrotu merkezden çeşitli uzaklıklara yerleştirilerek her kademe için ölçme yapılır. Bulunan topraklama dirençlerinin uzaklığın işlevi olarak çizilmesi ölçme konusunda bize gerekli bilgileri verebilir.

Şekil 21'de düşük topraklama dirençli bir merkezin ölçü sonuçları görülmektedir. B esrasi devrelerin birbirine (kapasitif, indüktif yada dirençli) etkileri nedeni ile doğan sapmayı gösteriyor. A eğrisi ise gerilim elektrotunun akım elektrotuna göre ters doğrultuda olması durumuna göre yapılmış deney sonuçlarını vermektedir. Buradan, yaklaşık 200 m'den sonra uzaklığın direnç üzerindeki etkisinin pratik olarak kaybolduğu görülüyor.

Bu uzaklıktaki nokta merkezin topraklaması için sonsuz uzaklıktaki bir toprak noktası olarak kabul edilebilir.

Şekil 22'de ise topraklama direnci yüksek bir merkezin ölçme sonuçları verilmiştir.

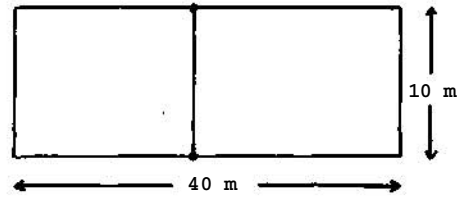
Görüldüğü gibi devrelerin birbirlerine etkisi hem azdır hem de elektrotların yerinin seçimi bir sorun değildir.

12. ÖRNEKLER

Bu bölümde tasarımı yapılmış bir topraklama sisteminin topraklama direncinin hesaplanmasına ilişkin birkaç örnek verilecektir.

Örnek 1.

Geometrik şekli ve boyutları aşağıda verilen, 120 mm² kesitli örgülü bakır iletken yapılmış ve özgül direnci 50 ohm.m olan bir toprağa 75 cm derinlikte gömülü bir topraklama ağının topraklama direncini bulalım:



a) "Laurent" formülünü kullanarak hesaplayalım.

$$R_g = \frac{P}{T} + \frac{P}{T}$$

Topraklama ağının kapladığı alan:

$$S = 40 \cdot 10 = 400 \text{ m}^2$$

Topraklama iletkeninin toplam uzunluğu:

$$L = 2 \cdot 40 + 3 \cdot 10 = 110 \text{ m}$$

Eşdeğer yarıçap:

$$r = \sqrt{\frac{400}{3,14}} = 11,28 \text{ m}$$

$$R_g = \frac{50}{4 \cdot 11,28} + \frac{50}{110} = 1,56 \text{ ohm}$$

b) "Schwarz" formülünü kullanarak hesaplayalım:

$$R_g = \int \hat{t} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt{d_0 h}} + k_1 \frac{L}{\sqrt{S}} - k_2 \right)$$

Öncelikle k_1 ve k_2 katsayılarını bulalım:

$$h = \frac{\sqrt{S}}{10} = \frac{\sqrt{400}}{10} = 2$$

$$X = \frac{\text{uzunluk}}{\text{genişlik}} = \frac{40}{10} = 4$$

Şekil 14'deki eğrilerden $k_1 = 1,18$, $k_2 = 5,3$.

$$R_g = \frac{50}{3,14 \cdot 110} \left(\ln \frac{2 \cdot 110}{1,34 \cdot 10^{-2} \cdot 0,75} + \frac{1,18 \cdot 110}{\sqrt{400}} - 5,3 \right)$$

$$R_g = 1,28 \text{ ohm}$$

örnek 2.

Yukarıda örnek olarak verilen topraklama ağının kapladığı alana $l = 3u$ boyunda ve $3/4''$ (2 cm) çapında 30 adet topraklama çubuğunun ilave edildiğini varsayalım. Çubukların topraklama direnci aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir.

$$R_k = \frac{\rho}{2\pi n \ell} \left[\ln \frac{8\ell}{d} - 1 + \frac{2k_1 \ell}{\sqrt{S}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

$$n = 30, \ell = 3 \text{ m}, k_1 = 1,18, d = 2 \text{ cm}$$

değerlerini yukardaki formülde yerine koyduğumuzda;

$$R_k = \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 30 \cdot 3} \left[\ln \frac{8 \cdot 3}{2 \cdot 10^{-2}} - 1 + \frac{2 \cdot 1,18 \cdot 3}{\sqrt{400}} (\sqrt{30} - 1)^2 \right]$$

$$R_k = 1,165 \text{ ohm bulunur.}$$

örnek 3.

Yukarıdaki örneklerde ayrı ayrı topraklama dirençleri hesaplanan ağ ve çubukların oluşturduğu sistemin ortak topraklama direnci de aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$R = \frac{R_g \cdot R_k - R_m^2}{R_g + R_k - 2R_m}$$

Burada R^* , topraklama ağı ile çubukların karşılıklı direncini gösteriyor.

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{\ell} + k_1 \frac{L}{\sqrt{S}} - k_2 + 1 \right)$$

$R_g = 1,28$ ohm ve $R_k = 1,165$ ohm olarak daha önce bulmuştuk. Şimdi de R_m 'yi hesaplayalım.

$$R_m = \frac{50}{3,14 \cdot 110} \left(\ln \frac{2 \cdot 110}{3} + \frac{1,18 \cdot 110}{\sqrt{400}} - 5,3 + 1 \right)$$

$$R_m = 0,94 \text{ ohm}$$

Topraklama ağı ile çubuklardan oluşan sistemin direnci;

$$R = \frac{1,28 \cdot 1,165 - (0,94)^2}{1,28 + 1,165 - 2 \cdot 0,94} = 0,6 \text{ ohm}$$

bulunur.

KAYNAKLAR

1. VDE Standardı 0141/2.64, Regulations for Earthings in AC Installations with Rated Voltages Above 1 kV.
2. AIEE No.80, Guide for Safety in Alternating-Current Substation Grounding.
3. IEEE Standardı No.81, IEEE Recommended Guide for Measuring Ground Resistance and Potential Gradient in the Earth.
4. Schwarz, S.J., "Analytical Expressions for the Resistance of Grounding Systems", AIEE, Ağustos 1954.
5. Elek, A., "Providing the Adequacy of Station Grounds", AIEE, Kasım 1962.
6. Ontario-Hydro Grounding Guide, Ocak 1963.
7. Endrenyi, J., "Fault-Current Analysis for Station Grounding Design", Ontario Hydro Research News, Haziran 1967.
8. Revisionsentwurf des Abschnittes, İsviçre Standardı, Dokument Nr. Prd.-1 73/15A, 25 Eylül 1973.
9. Schwarz, S.J., "Let's Look to Station Grounding", Electrical World, Mayıs 1955.
10. White, F.D., Calculation of Potential Rise of Station Ground Grids During Faults.
11. Miller, D.F., The Why and How of Safe Equipment Grounding, Industrial Power Systems, Eylül 1963.