

TOPRAK EMPEDANS VE DİRENÇ ÖLÇME METOTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Onur KATIPOĞULLARI

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
okatipogullari@penta.gyte.edu.tr

M. Hakan HOCAOĞLU

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
hocaoglu@penta.gyte.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Topraklama, Toprak Özdirenci, Topraklama Direnci, Topraklama Empedansı, Gerilim Düşümü Metodu

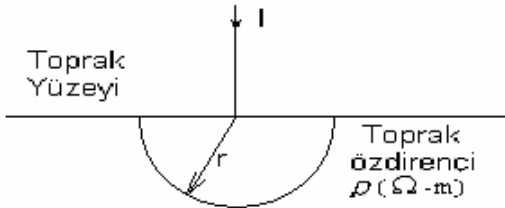
Özet

Günümüzde topraklama sistemleri geniş alanları kapsayan kompleks bir yapıya sahiptir. Bu çalışmada topraklama sistemleri hem direnç olarak hem de empedans olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Toprak direnci ölçme metotları özetlenerek, ölçme metotları arasındaki farklar belirlenmiştir. Topraklama direnci ölçme yöntemleri gerçek bir sistemde denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Toprak empedansını belirleyebilmek için bir ölçme sistemi düzenlenmiş ve gerçek bir sistem üzerinde denenmiştir. Toprak empedansı ölçme sistemi oluşturulurken basit gerilim düşümü metodu (B.G.D.M.) esas alınmıştır. Toprak direnci ile toprak empedansı değerleri karşılaştırılmış ve toprak empedansının toprak direncinden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Toprak empedansını göz önüne almadan yapılacak topraklama sistemi emniyet analizinin güvenlik sınırları içinde kalmayabileceği görülmüştür. Empedans ölçme sisteminin geniş topraklama sistemleri üzerinde denenmesi ileri çalışma olarak planlanmaktadır.

1 Giriş

Toprak direncinin doğru olarak ölçülmesi sağlıklı çalışan bir topraklama sistemi düzenlenmesinde önemli yer tutar. Standartlarda [1-3] topraklama sistemi Şekil 1'deki gibi toprak içine gömülmüş saf bakır yarı küre olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1 Toprak içine gömülü elektrot.

Bu şekilde tanımlanan elektrot toprak direncine etki eden faktörler şu şekilde sıralanabilir;

- İletken elektrotun metalik direnci
- Yarı küre yüzeyi ile onun çevresini kaplayan toprağın temas direnci
- Toprak özdirenci

İlk şık elektrotun uygun bir iletken yapılmaması ile ihmal edilebilir. Bundan dolayı elektrotun toprak direnci, en çok elektrotun etrafındaki toprağın karakteristiği ile elektrotun şekline bağlıdır. Pratikte, direnç genellikle elektrotun etrafındaki sınırlı hacim içinde kalan bölgede oluşmaktadır. Geniş alanları kapsayan topraklama sistemlerinde toprağın oldukça

büyük kısmı incelenmelidir. Bir metre yarıçaplı yarıküre için direncin %90'ı 10 metrelik yarıçap içini oluşturmaktadır [4].

Toprak özdirenci değişken niteliktedir 10 Ω-m ile 10000 Ω-m arasında olduğu gözlenmiştir. Toprak özdirenci toprak tipine, sıcaklığına, rutubetine, tuz oranına bağlıdır. Her tesis için toprak-elektrot direnç değeri toprak özdirencine bağlı olarak günlük ve mevsimsel olarak değişebilir, bu sebepten dolayı ölçümler %10 tolerans göz önüne bulundurularak yapılması uygun düşmektedir [4].

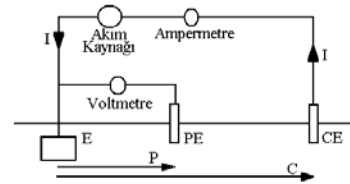
2 Test Teknikleri

Bu tekniklerin tamamında referans elektrotunun oldukça büyük ve direncinin yaklaşık sıfır olduğu kabul edilmektedir. Test elektrotları da bu özelliği paylaşmalıdır. Eskiden kullanılan ortak referans elektrotu su borularıydı. Fakat plastik boruların kullanımının yaygınlaşmasıyla uygunluğunu kaybetti. Aynı zamanda, su borularının kullanılması geniş alanları kapsayan devrelerde toprak sistem direncinin referansının başka sistemler tarafından da paylaşılmasına sebep olmaktadır.

Elektrik güç sistemlerinin etkin olarak topraklanmaya başlamasıyla beraber topraklama direncinin doğru olarak belirlenmesi birçok çalışmaya konu olmuştur [5]. Bu çalışmalar neticesinde farklı ölçme metotları ortaya çıkmıştır. Bu metotların en çok kabul görenleri aşağıda kısaca özetlenmektedir.

2.1 Basit Gerilim Düşümü Metodu

Topraklama sistemi direncinin bulunmasında en çok kabul gören metottur [6]. Ölçme düzeni Şekil 2'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2 Ölçme devresi.

Burada iki elektrot kullanılmaktadır. Bunlar akım elektrotu (CE) ile gerilim elektrotudur (PE). Akım elektrotu topraklama sisteminden C kadar uzakta toprağa çakılır. Böylelikle topraklama sisteminden toprağa akan I akımı, akım elektrotu yoluyla akım kaynağına dönebilmektedir. Akımın akışı toprak yüzeyi boyunca bir gerilim profili oluşturur. CE ve E'yi birleştiren hat boyunca ardıl noktadaki potansiyel, gerilim probu ile ölçüldüğünde bir eğri elde edilecektir. Bu eğri P mesafesi ile V/I oranının eğrisidir.

Diğer bir deyişle, potansiyel probunun pozisyonu ile ölçülen direncin işaretlenmesiyle elde edilen eğridir.

Toprak direncinin elde edilen bu eğrinin düz kısmında ortaya çıktığı kabul edilmektedir [6]. B.G.D.M' nun en önemli dezavantajı CE ve E arasında tam sonucu verecek mesafenin bilinmemesinden dolayı toprak direncinin belirlenmesinde esas olan düz bölgenin bazı durumlarda oluşmamasıdır.

Akım elektrotunun yerinin belirlenmesi sadece akım elektrotu ile topraklama sisteminin şekillerine bağlı değildir. Elektrotların içinde buldukları toprağın özellikleri de akım elektrotunun mesafesinin belirlenmesini etkilemektedir.

2.2 %61.8 metodu

%61.8 metodu [6], temeli basit gerilim düşümü metoduna dayanmaktadır. İlk teknikten tek farkı akım probu ile topraklama sistemi arasında birçok ölçme yerine, belirli bir mesafeden tek bir ölçümle sonucun belirlenmesidir.

Toprağı homojen, sabit öz dirençli varsayarak, aşağıdaki denklem elde edilir;

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{c} - \frac{1}{p} + \frac{1}{c-p} \right) \quad (1)$$

Denklem (1)'in göstereceği gibi verilmiş herhangi bir elektrot ve sabit C için gerçek direnç ölçümünü gösterecek gerilim probunun pozisyonunun bir tane olduğu gösterilmiştir [4, 6]. Bu nokta $P=0.618C$ 'in olduğu noktadır. Bu tekniğin avantajı, çok uzun ölçme işlemine gerek kalmadan tek ölçümle sistemin tüm toprak direncinin ölçülmesini sağlamasıdır. C artırılıp ölçmenin tekrarlanmasıyla işlemin sağlanması da yapılabilir. Bu ölçme tekniğinin dezavantajı ise ancak simetrik, kompleks olmayan ve homojen toprak içine gömülmüş sistemlerde gerçekleştirilebilir.

2.3 Dört Nokta Metodu

Dört nokta metodunun [6] ilk iki metoda göre bazı avantajları vardır. %61.8 metodunda eşdeğer yarı kürenin merkezini bilmesi gerekmektedir. Tek çubuklu ve simetrik sistemler için oldukça basit olan bu iş, geniş ve simetrik olmayan sistemler için güçtür.

Dört nokta metodunda kullanılan ekipman ile önceki metotlarda kullanılan ekipman arasında hiçbir fark yoktur. Fakat dört farklı gerilim ölçümünün yapılması gerekmektedir. Topraklama sistemi ile akım elektrotu arasında bizim seçeceğimiz dört farklı noktadan ölçüm yapılmasına dayanır.

$$P_1=0.2C \quad P_2=0.4C \quad P_3=0.6C \quad P_4=0.8C \quad (2)$$

Gerilim probunun yeri (2)'de verildiği gibi seçilerek bu dört farklı nokta için dört farklı direnç değeri ölçülmesi tavsiye edilmektedir. Gerçek direnç bu dört ölçüm kullanılarak şu şekilde hesaplanır [6];

$$R = (-0.1187)R_1 - (0.4667)R_2 + (1.9816)R_3 - (0.3961)R_4 \quad (3)$$

Denklem (3)'deki R_1, R_2, R_3, R_4 direnç değerleri her bir P değeri için ölçülen direnç değerleridir. Ölçülen direnç

değerleri seçilen referans noktasından bağımsızdır. Bu teknikte hatayı önlemek için P noktalarından yapılacak ölçümlerde aynı referans noktasının kullanılmasına dikkat edilmelidir. C artırılarak ikinci ölçümlerin yapılmasıyla sonuçların doğruluğu kontrol edilebilir

2.4 Kesişen Doğru Metodu

Kesişen doğru metodu [7] topraklama sisteminin elektriksel merkezini tam olarak belirlenememesi durumlarında P ve C noktaları için aynı hata miktarıyla ölçme yapılması ilkesine dayanan bir metottur. Üç farklı C noktası için ölçüm yapılarak toprak direnci eğrisinin bulunmasını önerir ve bu ölçme için B.G.D.M' a ihtiyaç duyar. Bu ölçme sonuçlarının hepsi aynı hatayı içerdiği için sistemin elektriksel merkezinden ölçüm yapılmış kadar doğru bir topraklama sistem direnci bulunacaktır. Bu metotta her C değeri bir önceki C değerinden 1.5-2 katı büyük alınması önerilmektedir. P noktasının değerleri aşağıdaki denklemle elde edilir

$$P_\lambda = 0,618 * (C + \lambda) - \lambda \quad (4)$$

Denklem (4)'de λ gerçek merkez ile kabul edilen merkez arasındaki mesafedir. R- λ arasındaki eğrinin çizilmesi gereklidir.

Pratikte üç farklı C için çizilen eğriler tek bir noktada kesişmezler fakat aralarında bir üçgen oluştururlar, oluşan üçgenin ağırlık merkezi kullanılarak R ve λ değerleri belirlenir [7].

2.5 Eğim metodu

Eğim metodunda [8] toprak direnç eğrilerinin değişim katsayısının belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Sabit C noktası için değişik üç P noktasından yapılan ölçüm yoluyla eğrinin değişim katsayısının hesaplanmasını esas alır. Gerilim probu $P_1=0.2C$, $P_2=0.4C$ ve $P_3=0.6C$ noktalarına sırasıyla yerleştirilir ve R_1 , R_2 ve R_3 direnç değerleri ölçülür. Böylece eğrinin değişim katsayısı şöyle hesaplanabilir;

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} \quad (5)$$

Denklem (5)'den hesaplanan μ değeri ile tablodan [8] P_T/C değeri elde edilir. C bilindiğinden doğru ölçmenin yapılabilmesi için gerilim probunun (P) nereye yerleştirilmesi gerektiği bulunabilir. Gerilim probu referans bölgeden P_T metre kadar ileriye yerleştirilir ve ölçme yapılır.

Test sonucunda elde edilen μ değeri 2'den büyük bulunursa, akım probunun yeri referans noktasından uzaklaştırılır ve ölçme tekrarlanarak tekniğin cevap vereceği μ değeri elde edilir

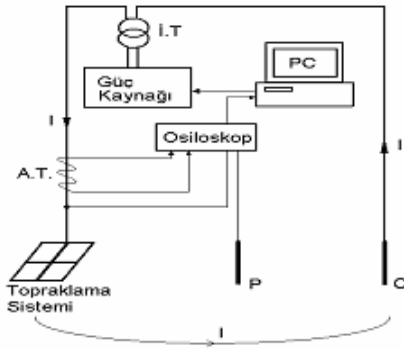
2.6 Toprak direnci ölçme metotlarının karşılaştırılması

B.G.D.M ile %61.8 metodu simetrik topraklama sistemlerinde yapılan ölçmelerde kullanılması en uygun metotlardır. Dört nokta metodu, kesişen doğru metodu ve eğim metotları simetrik olmayan sistemlerde kullanılmaktadır. Temel olarak B.G.D.M

baz alınmaktadır. Dört nokta metodu yapılan ölçme sonuçlarının denklem (3)'de yerine konulması ile toprak direnç değerini vermektedir. Simetrik olmayan topraklama sistemleri için geliştirilen diğer metotlarda ölçülen değerin tekrar işlenmesi ile bulunan P noktasından yeni ölçüm yapılması esasına dayanmaktadır.

3 Topraklama sistemlerinde empedansın ölçülmesi

Amerikan standartlarında [1-3] topraklama sisteminin empedansının ölçülmesi için sisteme alternatif akım enjekte edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Bununla birlikte, pratikte yaygın olarak topraklama sisteminin toprak direncinin ölçülmesi için DC ölçme yapan toprak direnci ölçme cihazları kullanılmakta ve sistem empedansı ile yaklaşık olarak aynı kabul edilmektedir. Bundan dolayı, arıza durumları için topraklama sistemdeki gerilim yükselmesinin tehlike sınırlarının hesaplanmasında topraklama direnci baz alınmaktadır.

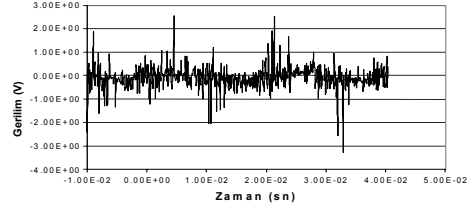


Şekil 3 Topraklama empedans ölçme devresi.

Şekil 3'de görülen ölçme sisteminde test edilecek sisteme, çıkışları kontrol edilebilen güç kaynağı ile akım uygulanmaktadır. Ölçme sistemi ile güç kaynağı izolasyon transformatörü ile tamamen izole edilmiştir. Topraklama sistemine enjekte edilen akım, akım probu, toprak yüzeyinde oluşan gerilim ise gerilim probu tarafından okunmaktadır. Sistemden elde edilen bu veriler işlemek üzere bilgisayara aktarılmıştır.

Ölçme sistemimizde akım probu (C) ile gerilim probu (P) aynı yönde atılmıştır. Ölçme tekniği olarak basit gerilim düşümü yöntemi kullanılmıştır. Basit gerilim düşümü metodundan farklı olarak sisteme değişik frekanslarda aynı genlikte akım enjekte edilmiştir. Akım probu (C) ile gerilim probunun (P) aynı yönde atılmadığı ölçme metotları da mevcuttur [5]. Bu metotlarda amaç akım probu kablosu ile gerilim probu kablosu arasındaki karşılıklı endüktans etkisini asgari düzeye çekebilmeştir.

Sisteme akım enjekte edilmeden önce akım probu ile test edilecek topraklama sistemi arasındaki gürültü sinyali okunmuştur. Bu sinyalin zaman domeynindeki değişimi Şekil 4'te sunulmuştur.

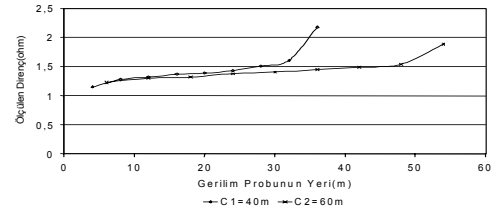


Şekil 4 Sistemde mevcut olan gürültü sinyali.

Gürültü sinyali önceden tespit edilmiş ve MATLAB programı yardımıyla sistemden ölçülen sinyalden gürültü sinyali arındırılmıştır. Frekans spektrumu incelendiğinde ağırlıklı olarak 50Hz ve katlarındaki frekanslarda gürültü olduğu tespit edilmiştir.

4 Metotların gerçek bir sistemde uygulanması

34/0.4kV'luk transformatör istasyonun toprak empedansının ölçülmesi için Şekil 3'deki ölçme düzeneği kullanılmıştır. Trafo merkezinin, topraklamasının nasıl bir yapıya sahip olduğu bilinmemektedir. Bu sistemde toprak direnci ve empedansı ölçme metotları denenmiştir.



Şekil 5 Gerçek sistemde basit gerilim düşümü metodu ile elde edilen direnç değişim grafiği.

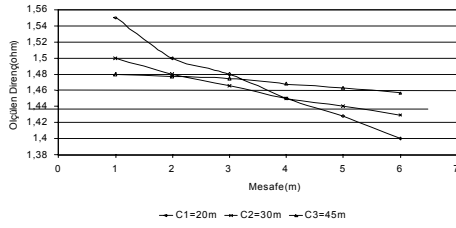
Şekil 5'de basit gerilim düşümü metoduyla yapılan ölçme sonuçları görülmektedir. Eğride toprak direncini verecek olan düz kısmın C=40m için tam olarak tespit edilemediği görülmektedir. C mesafesi artırıldığında düz kısmı daha belirginleşmektedir.

Tablo 1 Ölçülen topraklama direnci değerleri.

| %61.8 metodu | | | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|-------|--------------------|----------------|-------|
| C=40m | | | C=60m | | | |
| P(m) | R(Ω) | | P(m) | R(Ω) | | |
| 24.72 | 1.46 | | 37.08 | 1.45 | | |
| Dört nokta metodu | | | | | | |
| C=40m | | | C=60m | | | |
| P(m) | R _P (Ω) | R(Ω) | P(m) | R _P (Ω) | R(Ω) | |
| 8 | 1.28 | 1.405 | 12 | 1.3 | 1.405 | |
| 16 | 1.37 | | 24 | 1.38 | | |
| 24 | 1.43 | | 32 | 1.42 | | |
| 32 | 1.61 | | 48 | 1.54 | | |
| Eğim metodu | | | | | | |
| C=60m | | | | | | |
| P=0.2C | P=0.2C | P=0.2C | μ | P _T /C | P _T | R(Ω) |
| İçin R ₁ | İçin R ₂ | İçin R ₃ | | | | |
| 1.33 | 1.38 | 1.45 | 1.4 | 0.43 | 28.85 | 1.405 |
| C=60m | | | | | | |
| P=0.2C | P=0.2C | P=0.2C | μ | P _T /C | P _T | R(Ω) |
| İçin R ₁ | İçin R ₂ | İçin R ₃ | | | | |
| 1.28 | 1.378 | 1.43 | 0.67 | 0.602 | 24.1 | 1.40 |

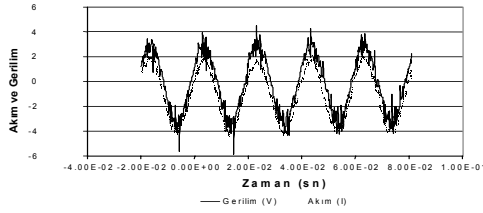
Ölçme sonucunda; B.G.D.M ve %61.8 metotlarında bulunan direnç değerinin diğer metotlara göre daha büyük olduğu görülmektedir. Kesişen eğri metodunda da kesişmenin tek noktada gerçekleşmemesi toprak direncinin tam olarak tespit edilmesini

zorlaştırmaktadır. Dört nokta ve eğim metodlarıyla ölçülen değerlerin aynı olduğu Tablo 1 de görülmektedir.



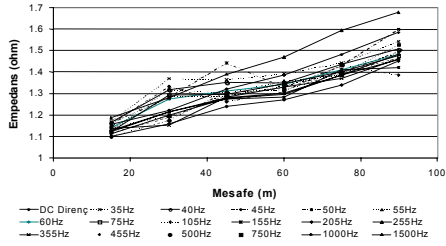
Şekil 6 Kesişen doğru metodunun uygulanması sonucu elde edilen direnç değerleri.

Aynı sistemde toprak empedansı ölçümleri de yapılmıştır.



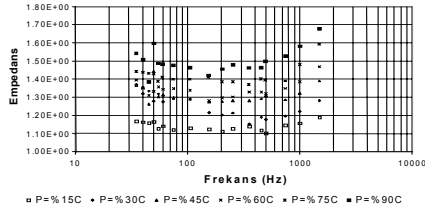
Şekil 7 Sistemden okunan harmonikli sinyal.

Şekil 7'de topraklama sistemine 50Hz'lik akım enjekte edildiğinde 75m. mesafedeki gerilim probundan okunan gerilim ile enjekte edilen akım görülmektedir. Sisteme değişik frekansta akımlar enjekte edilerek topraklama empedansı belirlenmiştir.



Şekil 8 Empedansın frekansa göre değişimi.

Şekil 8'de gerilim probu mesafesi ile empedans değeri arasındaki eğri verilmiştir. Farklı frekans değerleri için ayrı eğriler elde edilmiş ve frekansa bağlı olarak empedans değerinin değiştiği görülmüştür.



Şekil 9 Topraklama sistem empedansı.

Şekil 9'da frekans değişimi ile empedans değişimi arasındaki eğri ile 50Hz'de empedans da değişim gözlenmektedir. 50Hz'in katlarındaki frekanslarda akım enjekte edilmemiştir. Bunda amaç harmonik etkisini en aza indirmektir.

5 Sonuçlar

Topraklama sistemlerinde topraklama direnci ile topraklama empedansı ölçülmesinde temel ölçme

metotlarının benzer olduğu görülmektedir. Topraklama sistemlerinin gitgide daha kompleks bir yapıya sahip olmalarından dolayı akım enjekte edilecek merkez noktanın yerinin belirlenmesi oldukça güçleşmektedir. Tüm topraklama ölçme yöntemleri topraklama sistemini yarı küre olarak kabul edilmesi esasına dayanmaktadır.

B.G.D.M' da $C=40m$ için yapılan elde edilen R-P eğrisinde direnci verecek olan düz bölge elde edilememiştir. $C=60m$ için ölçümler tekrarlanmış ve eğrinin düz kısmının belirginleştiği fakat toprak direncinin değerini tam olarak belirleyebilecek şekilde oluşmadığı görülmektedir.

Dört nokta, eğim metodlarıyla elde edilen direnç değerlerinin birbirleri ile aynı olması ve bu direnç değerinin %61.8 metodundan farklı olması sistemimizin simetrik olmadığını göstermektedir. B.G.D.M ile %61.8 metodunun bu sistem için doğru bir yaklaşım göstermediği görülmüştür

Ölçmeler sonucunda küçük bir topraklama sisteminde dahi topraklama empedansının topraklama direncinden büyük olduğu görülmektedir. Buda emniyet değerlendirmesinde bazı problemler yaşanmasına sebep olabilmektedir. Geliştirilen ölçme düzeneği daha büyük topraklama sistemlerinde uygulanacak ve sonuçlar değerlendirilecektir.

KAYNAKLAR

- 1 IEEE: "ANSI/IEEE Std 81-1983, IEEE Guide For Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System", The Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, 1983
- 2 IEEE: "IEEE Std 81.2-1991, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", The Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, 1991
- 3 IEEE: "IEEE 80, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", The Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, 1980
- 4 Tagg, G.F: "Earth Resistances", George Newnes Limited 1964
- 5 Jones, P: "Electrical Measurement of Large Area Substation Earth Grids", Ph.D. Thesis, 2001
- 6 Tagg, G.F : "Measurement of Earth-Electrode Resistance with Particular Reference to Earth-Electrode Systems Covering a Large Area", Proc. IEE, Vol.111, No.12, December 1964
- 7 Tagg, G.F : "Measurement of the Resistance of an Earth-Electrode System Covering a Large Area", Proc. IEE, Vol.116, No.3, March 1969.
- 8 Tagg, G.F : "Measurement of the Resistance of Physically Large Earth-Electrode Systems", Proc. IEE, Vol.117, No.11, November 1970