

100 KİLOVOLTluk BİR DİRENÇSEL GERİLİM BÖLÜCÜNÜN DOĞRU GERİLİMDE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİN KESTİRİMİ

Ahmet MEREV¹ Özcan KALENDERLİ²

¹ TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), TÜBİTAK Yerleşkesi, 41470 Gebze-Kocaeli

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Müh. Bölümü, 34469 Maslak-İstanbul

¹e-posta: ahmet.merev@ume.tubitak.gov.tr ²e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

ÖZET

Bir yüksek gerilim ölçme sistemi, gerilim bölücü veya ölçü transformatörleri gibi dönüştürücü elemanlardan, ölçü kabloları gibi iletim elemanlarından ve dijital kaydediciler ve ölçü aletleri gibi düşük gerilim düzeyinde çalışan ölçme donanımlarından oluşur. Dönüştürücü elemanlar yüksek genlik değerini iletim elemanları ve kaydedici cihazlar için uygun düzeye indiren elemanlardır. Ancak bunu yaparken dönüştürücü elemanların örneğin gerilim bölücülerin genlik, sıcaklık ve frekans bağımlılıklarının çok iyi biliniyor olmaları, bölücünün bölüm oranının belirlenmesinde çok önemli rol oynamaktadır. Dirençsel yüksek doğru gerilim bölücülerinde sıcaklığa bağlı olarak direnç değerlerinin değişimi, kaçak akımlar ve korona boşalmaları bölüm oranına etki eden en önemli faktörlerdir. Bu etkiler başta olmak üzere ölçmelerde tüm bozucu etkiler göz önünde bulundurularak yüksek gerilim ölçüm belirsizliği kestirilmelidir. Bu çalışmada, yapımı yazarlar tarafından gerçekleştirilen 100 kV'luk dirençsel yüksek doğru gerilim bölücüsünün ölçüm belirsizliğine etki eden faktörler tespit edilmiş, bu faktörler göz önünde bulundurularak oluşturulan belirsizlik bütçesiyle bölücünün ölçüm belirsizliği hesaplanmıştır.

Anahtar sözcükler: Yüksek gerilim ölçme, Yüksek doğru gerilim, Gerilim bölücü, Ölçüm Belirsizliği, Kalibrasyon.

1. GİRİŞ

Yüksek doğru gerilim ölçmelerinde genellikle dirençsel gerilim bölücüler kullanılır. Yüksek doğru gerilim, bir dirençsel gerilim bölücü yardımıyla voltmetre, osiloskop gibi alçak gerilim ölçü aletleriyle ölçülebilecek düzeye indirilir ve ölçülür. Gerilim bölücünün çıkış alınan, düşük gerilimli bölümüne alçak gerilim direnç kolu, geri kalan bölümüne de yüksek gerilim direnç kolu denir. Gerilim bölücünün çıkışından ölçülen gerilim, bölücünün bölüm oranı ile çarpılarak gerilim bölücünün böldüğü, uygulanan veya ölçülmek istenen yüksek gerilim değeri belirlenir. Bu nedenle bir gerilim bölücünün bölme (çevirme) oranı doğru olarak bilinmeli ve bu oran akım, gerilim gibi devre ve

sıcaklık, basınç, nem gibi çevre koşullarına bağlı olmamalıdır. Örneğin, uygulanan gerilim değiştiğinde bölücüdeki direnç değerleri değişebilir. Gerilim (U) yükseldikçe ($I = U/R$) ohm yasasına göre dirençten (R) akan akım (I) artar ve artan akıma bağlı olarak dirençte ısı ($W = P \cdot t$) olarak harcanan ve dolayısıyla dirençlerin ısınmasına neden olan kayıp güç ($P = R \cdot I^2$) artar. Dirençlerin ısınması sıcaklık katsayılarına bağlı olarak direnç değerlerinin ve buna bağlı olarak gerilim bölücü çevirme oranının değişmesine yol açar.

Gerilimin yüksekliği, bölücünün yalıtım malzemelerinin yüzeysel ve hacimsel dirençlerine, yüzey ve ortam koşullarına bağlı olarak genelde gerilim bölücü yalıtımının yüzeyinden akan kaçak akımlara neden olur. İstenmeyen yerden akan kaçak akımlar, bölücüden akması beklenen akımın yararlanılamayan bir bölümü olarak ölçme doğruluğu etkilerler. Uygulanan gerilim yükseldikçe bölücü üzerindeki elektrik alan düzeyi yükselir ve öncelikle eğrilik yarıçapı küçük iletken parçalarda başlayan korona boşalmalarına sebep olurlar. Korona da güç kaybı, ısınma, elektromanyetik girişim gibi elektriksel ve elektriksel olmayan etkileri ile ölçme doğruluğunu etkiler [1, 2].

2. YÜKSEK GERİLİM BÖLÜCÜSÜNÜN YAPISI

Yapımı yazarlar tarafından gerçekleştirilen gerilim bölücünün yüksek gerilim kolunun toplam direnci 100 MΩ'dur. Bu kolda kullanılan dirençlerin her biri, 2 W gücünde 1 MΩ'luk sarım tel dirençtir (Şekil 1). Bu dirençlerin yapımında bifilar sarım tekniği kullanılmış olması nedeniyle endüktans değerleri ihmal edilecek kadar küçüktür.

Direnç telleri üzerinde oluşacak yüksek elektrik alanı azaltmak için dirençlerin yüzeyi karbon miktarı yüksek yalıtkan malzeme ile kaplanmıştır. TÜBİTAK UME'de 5 ppm belirsizlikte yapılan ölçmeler sonucunda dirençlerin kapasitesinin 50 Hz-10 MHz frekans aralığında 1,1 ile 1,2 pF arasında değiştiği ve aynı frekans aralığında endüktansın 100 nH'den daha küçük oldukları belirlenmiştir.



Şekil 1. Dirençsel gerilim bölücünde kullanılan dirençler

Direnç elemanlarının sıcaklık katsayılarının ± 5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ve gerilim katsayılarının da ± 0.05 ppm/V aralığında oldukları deneysel olarak saptanmıştır.

Yapımı gerçekleştirilen gerilim bölücünün alçak gerilim kolunda kullanılmak üzere seçilen direncin değeri 99,9944 $\pm 0,0003$ k Ω 'dur. Bu direncin seçiminde göz önünde bulundurulmuş en önemli faktör, direnç eleman değerinin 23-43 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında 3 ppm değişim göstermesidir.

Bölücünün yüksek gerilim kolunu oluşturan dirençler yalıtkan bir boru üzerine özel kroşelerle yerleştirilmiştir. Dirençlerin birbirleri ile bağlantılarında; kontak direncini düşük tutmak amacıyla %2 oranında gümüş içeren bağlantı malzemesi kullanılmış ve bağlantı sırasında sivri uçların oluşumundan kaçınılmıştır.

Gerilim bölücünün tasarımında, korona oluşumunun en aza indirilmesine ve bölücü boyunca düzgün elektrik alanın sağlanmasına yönelik hesaplamalar ve çalışmalar yapılmıştır. Bu aşamada bölücünün elektrik alan analizi yapılarak kaçak akımların ölçüm belirsizliğine etkisi teorik olarak hesaplanmıştır. Montajı tamamlanmış gerilim bölücünün görüntüsü Şekil 2'te verilmiştir [3, 4].

3. BÖLÜCÜNÜN BELİRSİZLİK BÜTÇESİ

3.1. Çıkış Geriliminin Ölçüm Belirsizliği

Yapımı gerçekleştirilen yüksek doğru gerilim bölücüsü, 100 kV'a kadar gerilimleri yaklaşık olarak 1000:1 oranında bölmektedir. Bu çevirme oranına göre bölücünün çıkışında oluşabilecek maksimum gerilim 100 Voltur. Yapılan gerilim bölücünün çıkış gerilimini ölçmek için Ulusal gerilim standardı zinciri içerisinde bulunan, 8,5 dijitalik HP3458A modeli bir dijital multimetre kullanılmıştır. TÜBİTAK UME kalibrasyonlu bu multimetrenin 10 V-100 V ölçme bölgesindeki giriş empedansı 10 M Ω , bağıl belirsizliği, $k = 2$ kapsam faktöründe $u_L = \pm 20 \times 10^{-6}$ dir. Bu ölçüm belirsizliğinin içine cihazın yıllık kayması ve uzun dönem kararlılığı dahildir.



Şekil 2. Yapımı gerçekleştirilen 100 kV'luk dirençsel yüksek gerilim bölücüsü

3.2. Çevirme oranının belirlenmesindeki belirsizlik

Alçak gerilimde çevirme oranının belirlenmesinde üç alt belirsizlik bileşeninden yararlanılmıştır. Bunlar, alçak gerilim kolundaki direncin değerindeki belirsizlik $u_u = \pm 5 \times 10^{-6}$, yüksek gerilim kolunu oluşturan toplam direncin seri-paralel yaklaşım ile elde edilmiş değerinin belirsizliği $u_{sp} = \pm 10 \times 10^{-6}$ ve bu yaklaşımdaki hata $u_w = \pm 0.03 \times 10^{-6}$ dır. Bu bileşenler kullanılarak elde edilen u_B bileşik belirsizliği

$$u_B = \sqrt{u_u^2 + u_w^2 + u_{sp}^2} \quad (1)$$

bağıntısı yardımıyla $u_B = \pm 11.2 \times 10^{-6}$ olarak bulunur.

3.3. Sıcaklıktan Kaynaklanan Belirsizlik

Gerilim bölücünde kullanılan dirençlerin seçimi, 23 $^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı ile anma gerilimindeki çalışma sıcaklığı olan 33 $^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklık katsayıları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Direnç elemanlarının anma gerilimindeki yüzey sıcaklıklarının 33 $^{\circ}\text{C}$ olması, tüm gerilim bölücüsünün anma gerilimindeki sıcaklık dağılımının 33 $^{\circ}\text{C}$ olacağı anlamını taşımamaktadır. Gerilim bölücü anma gerilim altında sıcaklık bakımından dengeye gelmeye başladığı 4. saat ile dengeye geldiği 6. saat arasında, en düşük sıcaklık bölücünün alt bölgesinde 31 $^{\circ}\text{C}$, en yüksek sıcaklık orta bölgesinde 41 $^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu değerler göz önünde bulundurularak, gerilim bölücünün 33 $^{\circ}\text{C}$ ile 43 $^{\circ}\text{C}$ arasındaki toplam sıcaklık

katsayısının teorik olarak $-50 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Buna göre gerilim bölücünün sıcaklık etkisinden gelen bağıl belirsizliği $u_T = \pm 50 \times 10^{-6}$ dır.

3.4. Gerilim Etkisinden Kaynaklanan Belirsizlik

Kullanılan her bir direncin gerilim katsayısından kaynaklanan hatanın $\pm 0.05 \text{ ppm/V}$ olduğu göz önüne alınırsa, sisteme 100 adet dirençten gelecek bağıl belirsizlik

$$u_V = \sqrt{100 \times (0.05 \times 10^{-6})^2} \quad (2)$$

işleminden $u_V = 0,5 \times 10^{-6}$ olarak bulunur.

3.5. Kaçak akımdan kaynaklanan belirsizlik

Gerilim bölücünden 100 kV anma geriliminde toprağa akan kaçak akım 14,053 nA olarak ölçülmüştür. Bölücünün anma geriliminde anma akımı 1 mA olduğundan kaçak akımın neden olduğu bağıl hata $u_I = \pm 14.1 \times 10^{-6}$ olur.

3.6. Koronadan kaynaklanan belirsizlik

Gerilim bölücünün korona deneyi, 71 kV etkin değerli şebeke frekanslı alternatif gerilim uygulanarak yapılmıştır. Deney süresince herhangi bir korona boşalması gözlenmemiştir. Bu yüzden belirsizlik bütçesine, koronaya bağlı bir belirsizlik bileşeni katılmamıştır.

3.7. Kısa Dönem Kararlılığı

Gerilim bölücünde 3 ay aralıkla yapılan iki ölçme ile 100 kV anma gerilimdeki çevirme oranındaki değişim incelenmiştir. Bölücünün kısa dönem kararlılığından sisteme gelen belirsizlik $u_K = \pm 10 \times 10^{-6}$ olarak belirlenmiştir.

3.8. Ölçüm Belirsizliği

Gerilim bölücünün belirsizlik bileşenlerini, bölünmüş gerilim değerinin ölçüm belirsizliği (u_L), alçak gerilimde bölücünün çevirme oranının belirlenmesindeki belirsizlik (u_B), sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik (u_T), gerilim etkisinden kaynaklanan belirsizlik (u_V), kaçak akımların neden olduğu belirsizlik (u_I) ve kısa dönem kararlılığı (u_K) oluşturmaktadır. Bileşik belirsizlik

$$u_x = \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad (3)$$

bağıntısı kullanılarak elde edilir. Belirsizlik bütçesi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Gerilim bölücünün belirsizlik bütçesi

Belirsizlik Kaynağı	Bağıl Belirsizlik (u_i)	Dağılım (k)
Bölücü çıkış geriliminin ölçülmesindeki belirsizlik	$u_L = 20,0 \times 10^{-6}$	Normal (k = 2)
Bölüm oranının belirlenmesindeki belirsizlik	$u_B = 11,2 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k = $\sqrt{3}$)
Sıcaklıktan kaynaklanan belirsizlik	$u_T = 50,0 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k = $\sqrt{3}$)
Gerilim etkisinden kaynaklanan belirsizlik	$u_V = 0,5 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k = $\sqrt{3}$)
Kaçak akımlardan kaynaklanan belirsizlik	$u_I = 14,1 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k = $\sqrt{3}$)
Kısa dönem kararlılığı	$u_K = 10,0 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k = $\sqrt{3}$)
Bileşik belirsizlik	$u_X = 32,8 \times 10^{-6}$	k = 1
Genişletilmiş belirsizlik	$U_X = 65,6 \times 10^{-6}$	k = 2

Bileşik belirsizlik k = 1 kapsam faktörü için elde edilmiştir. Bu değer 2 ile çarpılmasıyla k = 2 kapsam faktörü için yani %95 güvenilirlik düzeyi için genişletilmiş belirsizlik $U_X = 66 \times 10^{-6}$ olarak elde edilir [5, 6].

4. SONUÇ

Yüksek gerilimde duyarlı ölçmelerin yapılabilmesi için en temel unsur, gerilim bölücünün zaman ve gerilim değişimi ile birlikte çok az sapma gösteren çevirme oranına sahip olmasıdır. Gerilim bölücünün çevirme oranı değişimi, kullanılan dirençlerin sıcaklık artışı karşısındaki değişimine, bölücünden toprağa olan kapasitelerin neden olduğu kaçak akımlara ve korona oluşumuna bağlıdır. Bu çalışmada, söz konusu bu üç faktörün etkisini en aza indirecek şekilde 100 kV'luk bir dirençsel gerilim bölücü tasarlanmış ve yapımı gerçekleştirilmiştir. Gerçeklemeden sonra yapılan belirsizlik kestirimi çalışmaları sonunda, gerilim bölücünün k = 2 kapsam faktöründe 66×10^{-6} civarında bir ölçüm belirsizliğine sahip olduğu görülmüştür. Belirsizlik bütçesine en büyük pay sıcaklık bileşeninden gelmektedir. Bu bileşen, gerilim bölücünde

soğutma, sıcaklık kontrolü gibi önlemler alınarak azaltılabilir. Sonuç olarak bu özelliği ile söz konusu gerilim bölücü, yüksek doğru gerilim uygulamalarında kullanılan tüm ölçü aletlerinin 100 ppm'den küçük ölçüm belirsizliğinde kalibrasyonu için kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Merev, *Yüksek Doğruluğa Sahip 100 kV Yüksek Doğru Gerilim Bölücüsü*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kasım 2005.
- [2] H. M. Ryan, *High-Voltage Engineering and Testing*, Institution of Electrical Engineers Publication, Peter Peregrinus Ltd., London, 726 sf., 2001.
- [3] A. Merev, O. Yılmaz ve Ö. Kalenderli, "Selecting Resistors for a High Voltage Divider", 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Delft-The Netherlands, 2003.
- [4] J. H. Park, "Special Shielded Resistor for High-Voltage DC Measurement", Journal of Research of the National Bureau of Standards, No. 66C1, pp. 19-24, 1962.
- [5] D. Peier ve V. Graetsch, "A 300 kV DC Measuring Device with High Accuracy", 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 43.08: 1-4, Milan-Italy, 1972.
- [6] F. Poletti ve F. Viola, "Design of a High Voltage Precision Resistive Divider with SF6 Insulation", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 4513: 1-4, Austria, 1995.