

100 ppm'den küçük ölçüm belirsizliğine sahip 100 kV yüksek doğru gerilim bölücüsü

Ahmet MEREV*, Özcan KALENDERLİ

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul

Özet

Bu makalede, 100 ppm ölçüm belirsizliğine sahip, kalibrasyon standardı olarak kullanılmak üzere tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen 100 kV'luk bir yüksek doğru gerilim bölücüsüyle ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur. Yüksek doğru gerilimlerin ölçülmesinde yaygın olarak dirençsel gerilim bölücüler kullanılır. Bunların çevirme oranları, kesin olarak bilinmeli ve gerilime bağlı olmamalıdır. Uygulanan gerilimin yüksekliğiyle çevirme oranı, temelde üç faktöre bağlı olarak değişir. Bunlar, dirençlerin ısınmasına bağlı olarak direnç değerlerindeki değişim, kaçak akımlar ve korona boşalmalarıdır. Gerilim bölücünün yapımı, bu faktörler hesaplanarak gerçekleştirilmiştir. Yapım sonrasında performans deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları ile teorik sonuçların uyumlu oldukları görülmüştür. Son olarak gerilim bölücünün belirsizlik bütçesi oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüksek doğru gerilim bölücüsü, ölçüm belirsizliği, yüksek gerilim izlenebilirliği.

100 kV DC high voltage divider having lower than 100 ppm measurement uncertainty

Abstract

The aim of this paper is to show that the designing and constructing of the direct current (DC) high voltage divider having lower than 100 ppm (part per million) measurement uncertainty ($k = 2$) for using as a standard divider at 100 kV. The ratio of a resistive standard divider used for precisely measuring DC high voltages should have been known accurately and independent of voltage. A change in effective resistance of a divider with voltage may be due to combination of three factors. These are heating of entire resistance wire related to temperature coefficient, current leakage which increases with voltages through the insulation material and corona discharges may occur at location of high electrical field along to the entire resistor. The aim of this study is to construct an accurate DC high voltage reference divider considering these factors. This divider is constructed by considering these factors, theoretically. After construction of the divider, performance tests are carried out experimentally. These are stability, linearity, temperature distribution, corona, leakage current, partial discharge and scale factor tests. The results obtained from the tests have been compared with theoretical calculations and it has been shown that the results are compatible. Finally the uncertainty budget of the high voltage divider has been formed and uncertainty of the divider has been obtained to be 66 ppm.

Keywords: DC high voltage divider, measurement uncertainty, high voltage traceability.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ahmet MEREV. ahmet.merev@ume.tubitak.gov.tr; Tel: (262) 67950 00 dahili:43500. Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Yüksek doğruluğa sahip 100 kV Yüksek doğru gerilim bölücüsü" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 17.11.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 19.12.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Yüksek gerilim ölçmeleri, gerilim genliğinin yüksek olması nedeniyle zordur ve alçak gerilimden bilinen ölçme sistemleri kullanılarak doğrudan ölçülemezler. Bir yüksek gerilim ölçme sistemi, yüksek gerilimi alçak gerilim aletleri ile ölçülebilir gerilim düzeyine düşüren bir gerilim bölücünden veya bir gerilim ölçü transformatöründen, bu elemanların çıkışındaki gerilimi, alçak gerilim ölçme düzeni elemanlarına ileten bir ölçü kablosundan ve voltmetre, osiloskop ve bilgisayar gibi ölçme, görüntüleme, izleme ve kaydetme amaçlı aletlerden oluşmaktadır. Ölçmelerin doğruluğu, dönüştürücü elemanların dönüştürme özelliklerine bağlıdır. Yüksek gerilim ölçmelerinde kullanılan gerilim bölücü ve ölçü transformatörü gibi dönüştürücü elemanların çıkış gerilimi, girişlerindeki orijinal yüksek gerilimin dalga şekli, genlik ve zaman büyüklükleri ile orantılı olmalıdır. Bu nedenle dönüştürücü elemanların dönüştürme özellikleri tanımlı ve sözü edilen gereksinimleri karşılayacak biçimde olmalıdır (Ryan, 2001).

Yüksek doğru gerilim ölçmelerinde yaygın olarak dirençsel gerilim bölücüler kullanılır. Bir gerilim bölücü, yüksek gerilimi alçak gerilime dönüştüren bir dönüştürücü elemandır. Dirençsel bir gerilim bölücüde yüksek gerilim dirençler yardımıyla dilimlenir ve gerilimi ölçülebilir düzeyde olan bir dilimden çıkış alınır. Çıkış alınan dilime alçak gerilim direnç kolu, gerilim bölücünün geri kalan direnç koluna da yüksek gerilim direnç kolu denir. Direnç kollarındaki dirençlerin değerleri, gerilim bölücünün çevirme oranı denilen gerilim dönüştürme oranını belirler. Gerilim bölücünün çıkışından ölçülen gerilim, bölücünün çevirme oranı ile çarpılarak gerilim bölücünün böldüğü yüksek gerilim değeri belirlenir. Bu nedenle bir gerilim bölücünün çevirme oranı doğru olarak bilinmeli ve akım, gerilim, sıcaklık gibi devre ve çevre koşullarına bağlı olmamalıdır. Örneğin bölücüdeki direnç değerleri uygulanan gerilim yükseldikçe değişebilir. Gerilim yükseldikçe ohm yasasına göre dirençten akan akım artar ve artan akıma bağlı olarak dirençte ısı olarak harcanan ve dolayısıyla dirençlerin ısınmasına neden olan kayıp güç artar. Dirençlerin ısınması sıcaklık katsayılarına bağlı olarak direnç değerlerinin ve buna bağlı

olarak gerilim bölücü çevirme oranının değişmesine yol açar. Gerilimin yüksekliği bölücüde kullanılan yalıtım malzemelerinin yüzeysel ve hacimsel dirençlerine, yüzey ve ortam koşullarına bağlı olarak genelde gerilim bölücü yalıtımının yüzeyinden akan kaçak akımlara da neden olur. İstenmeyen yerden akan kaçak akımlar, bölücüden akması beklenen akımın yararlanılamayan bir bölümü olarak ölçme doğruluğunu 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, elektromanyetik girişim, ısınma gibi elektriksel ve elektriksel olmayan etkileri ile ölçme doğruluğunu etkiler (Kuffel vd., 2000).

Uygulanan veya uygulanacak gerilimin belirleyicisi olan ölçme sistemleri üzerine geçmişten günümüze çalışmalar artmış, hiç eksilmemiştir. Bu sistemlerde, gelişen teknolojilerin yansımaları hep görülmüş ve ölçüm belirsizlikleri azaltılmaya çalışılmıştır. Özellikle bir ülkedeki ölçme sistemlerinin referanslarını oluşturan metroloji enstitülerinde bu konu çok daha önemli olmuştur. Türkiye’de de metrolojinin kalbi olan Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)’de bu konuda çalışmalar yapılmaktadır. Dünyada az sayıda yerde bulunan yüksek gerilim metrolojisi içinde ölçüm belirsizliği düşük bir dirençsel doğru gerilim bölücüsünün varlığı çok önemlidir. Yüksek doğru gerilimlerin enerji iletimi dışında, sağlık, askeri ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı böyle bir bölücünün varlığının önemini arttırmaktadır. Çünkü ölçüm kalitesindeki artışın, ürün kalitesine ve gelişimine yansımaları ülke teknolojisine ve ekonomisine katkısı büyük olacaktır. Metroloji enstitüsü gibi en üst düzey ölçme, kalibrasyon ve ayar kuruluşlarında yüksek gerilim ölçmelerinde 100 ppm’den düşük ölçüm belirsizlikleri arzu edilir. Sayıları çok az olan, düşük belirsizlikli düzenler çok özel olarak tasarlanır ve üretilirler.

Bu çalışmada da yukarıda belirtilen etkenleri göz önüne alarak olabildiğince olumsuz etkilerini elimine edecek biçimde tasarlanmış ve yapılmış 100 ppm’den düşük ölçüm belirsizliğine sahip bir dirençsel gerilim bölücünün tasarım ve

yapım çalışmaları açıklanmış, gerçekleştirilen gerilim bölücünün karakteristiklerini ve ölçüm belirsizliğini belirlemek için yapılan kuramsal ve deneysel çalışmalar ile sonuçları verilmiştir.

Park tipi yüksek gerilim bölücü

1950'li yıllarda J. H. Park'ın yapmış olduğu ve Park tipi gerilim bölücü olarak bilinen dirençsel gerilim bölücü, düşük ölçüm belirsizliğine sahip dirençsel gerilim bölücüler için öncü olmuştur. Park bu çalışmasında, kaçak akımların, koronanın ve düzensiz gerilim dağılımının önüne geçebilmek amacıyla farklı yapıda elektrot tasarımı gerçekleştirmiş, ekranlanmış ve sıcaklık katsayıları düşük, sarım tel dirençler kullanmıştır (Park, 1962). Dirençler, yüksek gerilim elektrodu ile toprak elektrodu arasına helisel biçimde yerleştirilmiştir. Bu şekilde bölücü boyunca oluşacak gerilim dağılımı düzensizliği en aza indirilmiştir. Gerilim bölücünün tepesinde bulunan toroid elektrot ile, koronanın etkisi ve toprağa olan kaçak akımların oluşumu engellenmiştir. Gerilim bölücünün yüksek gerilim kolunu oluşturan dirençler, bu kolun direnç sıcaklık katsayısı minimum olacak şekilde birbiri ile eşleştirilmiştir.

Kaçak akımların ve koronanın yaratacağı problemler, tasarım aşamasında görülemeyebilir ve dolayısıyla çözülemeyebilirler. Bu tür problemlerin büyüklükleri ve yerleri, gerçekleştirme sonrasındaki gerilim uygulama ve yükseltme çalışmalarıyla saptanır ve yok edici veya azaltıcı önlemler alınarak çözümler.

Her bir dirençte oluşacak korona ve kaçak akımların etkisini en aza indirmek için, dirençleri ekranlanmak ve uygun geometri ve boyutlu tepe elektrodu kullanarak bölücü boyunca alan dağılımını düzeltmek gerekir (Kuffel vd., 2000; Marx, 2001).

Sıcaklık etkisi, yüksek gerilim bölücüsünde kullanılan dirençlerin sıcaklık katsayısıyla ilişkilidir. Bölücünün toplam direncine ilişkin sıcaklık katsayısı, çalışılacak sıcaklık aralığında birbirine eşit veya yakın, zıt sıcaklık katsayılı dirençlerin birbirleriyle eşleştirilmesiyle en aza düşürülmüş ve sıcaklık etkisi azaltılmıştır.

Yüksek gerilim bölücüsünde kullanılacak dirençlerin gerilim bakımından seçimi, gerilim bölücünün ve dolayısıyla her bir direnç üzerinde düşecek gerilim düzeyinin bilinmesiyle başlar. Her bir direnç üzerinde düşecek gerilim belirlendikten sonra bu gerilimde dirençten geçecek akıma bağlı olarak ortaya çıkacak güç kaybından dolayı sıcaklığın direnç yüzeyindeki dağılımının ve ortalamasının bilinmesi gerekir. Bu bilgi yardımıyla dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirleneceği sıcaklık aralığı saptanmış olur. Dirençlerin bulunduğu ortamın sıcaklığı ile maksimum gerilim altındaki yüzey sıcaklığı arasındaki sıcaklık aralığında, dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirlenmesi gerekir. Elde edilen bilgilerle uygun direnç eşleştirmeleri ile sifıra yakın sıcaklık katsayısına sahip direnç eşleri oluşturulur. Bu şekilde gerilim bölücüsüne sıcaklığın etkisi en aza indirilmiş olur (Merev vd., 2003; Ziegler, 1970).

Tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen dirençsel yüksek gerilim bölücüsü

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



Şekil 1. Bölücüde kullanılan dirençler

Her bir direnç birbirine seri bağlı sekiz bölüm dirençten oluşmaktadır. Seri bölümlerdeki direnç tellerinin sarımı birbirinin tersi yönünde yapılmıştır. Her sarım bölümü silikon bazlı yalıtkan malzeme ile kaplanmıştır. 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.

Yüksek gerilim kolunda kullanılan dirençlerin yüzey sıcaklıklarının belirlenmesi

Dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirleneceği sıcaklık aralığının belirlenmesi için farklı gerilimler altında direnç yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Bunun için dirençlerin anma geriliminin %100, %75, %50 ve %25’i değerlerinde üç ayrı yüzey noktasındaki sıcaklıklar ölçülmüş ve kararlı haldeki sıcaklık değerleri kaydedilerek bunların ortalaması ortalama yüzey sıcaklığı olarak alınmıştır. Deney sonuçlarına göre dirençlerin ortalama yüzey sıcaklıkları %100 anma geriliminde 33°C, %75 anma geriliminde 28°C, %50 anma geriliminde 24°C ve %25 anma geriliminde 23°C olarak belirlenmiştir.

Dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirlenmesi

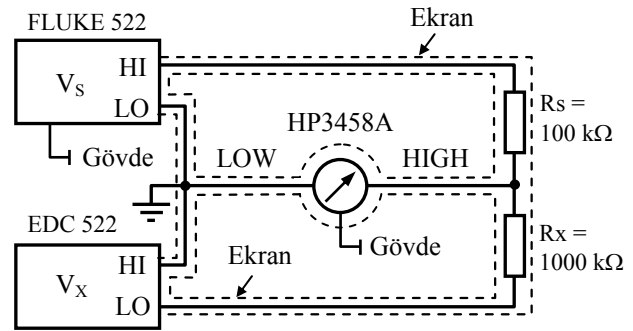
Yüksek gerilim bölücüsünün yapımında kullanılmak üzere temin edilen 194 adet direncin 13, 23, 33 ve 43°C sıcaklıktaki değerleri, oluşturulan bir düzen yardımıyla ölçülmüş ve sıcaklıkla direnç değeri değişim eğrileri oluşturulmuştur. Dirençlerin yüzey sıcaklığının 33°C (T_{33}) ve ortam sıcaklığının 23°C (T_{23}) olduğu göz önünde bulundurulurken tüm dirençlerin TC sıcaklık katsayıları

$$TC = \frac{1}{T_{33} - T_{23}} \cdot \left(\frac{R_{33}}{R_{23}} - 1 \right) \quad (1)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Burada R_{33} 33°C’deki ve R_{23} 23°C’deki direnç değerini göstermektedir. Ölçüm sonuçlarına göre tüm dirençlerin sıcaklık katsayılarının ± 5 ppm/°C arasında kaldığı, 108 tanesinin pozitif ve 86 tanesinin de negatif katsayılı olduğu belirlenmiştir.

Dirençlerin gerilim katsayılarının belirlenmesi

Gerilim bölücüde kullanılacak dirençlerin gerilim katsayılarının bilinmesi de bölücü karakteristiğinin belirlenmesi açısından önemlidir. Bu amaçla 194 direnç arasından rasgele seçilen 10 adet direncin gerilim katsayısı, Şekil 2’deki ölçüm köprüsü kullanılarak %10 ve %80 anma geriliminde belirlenmiştir. Gerilim katsayısı;



Şekil 2. Wheatstone köprüsü

$$VC = \frac{R_1 - R_2}{R_2} \cdot \frac{1}{V_1 - V_2} \quad (2)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır (Kim, vd., 2002). Burada R_1 anma gerilimin %80’indeki direnç değerini, R_2 anma gerilimin %10’undaki direnç değerini, V_1 anma gerilimin %80’ini ve V_2 ise anma gerilimin %10’unu belirtmektedir. Seçilen dirençlerin gerilim katsayılarının ± 0.05 ppm/V arasında kaldığı belirlenmiştir.

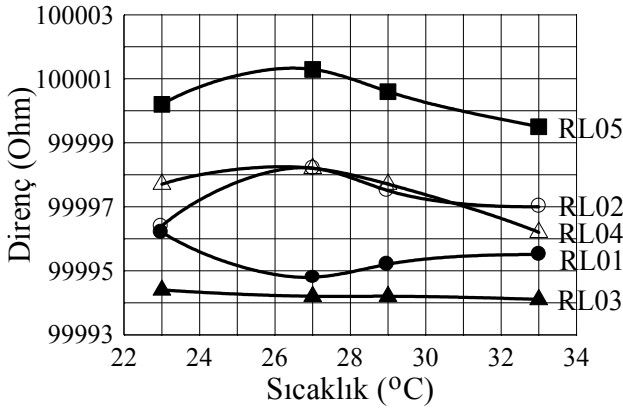
Yüksek gerilim kolunda kullanılan dirençlerin seçimi

Gerilim bölücünün ısıl davranışı, yüksek gerilim direnç kolunun toplam sıcaklık katsayısıyla ilişkilidir. Buna göre gerilim bölücü, 100 adet direncin yarısı pozitif ve diğer yarısı negatif sıcaklık katsayılı dirençten oluşturulmuştur. Her pozitif sıcaklık katsayılı direnç aynı değerde negatif sıcaklık katsayılı bir başka dirençle eşleştirilerek yüksek gerilim kolunun sıcaklık katsayısı minimuma indirilmiştir. Direnç seçiminde en küçük sıcaklık katsayısına sahip dirençler tercih edilmiştir. Seçilen dirençlerin sıcaklık katsayıları ± 4.2 ppm/°C arasında kalmıştır. Bölücünün toplam sıcaklık katsayısı, 100 adet direncin

sıcaklık katsayılarının toplanmasıyla -4.4×10^{-10} 1°C olarak elde edilmiştir (Ziegler, 1970; Merev, vd., 2003).

Alçak gerilim kolunda kullanılan direncin seçimi

Alçak gerilim koluna bağlanacak $100 \text{ k}\Omega$ 'luk direnç, altı adet, bifilar sarımlı tel direnç arasından seçilmiştir. Bu dirençlerin direnç-sıcaklık eğrileri 5 ppm belirsizlikle yağ banyolu köprü sistemi kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Alçak gerilim kolunda kullanılmak için seçilecek dirençlerin sıcaklıkla değişimleri

23-33°C sıcaklık aralığında en az değişimi gösteren R_{L03} direnci, bölücünün alçak gerilim kolunda kullanılmak üzere seçilmiştir.

Çevirme oranı

Gerilim bölücünün yüksek gerilim koluna ilişkin dirençlerin toplamı olan R_{YG33} direnci $99999.806 \text{ k}\Omega$ olmuştur. Bu değer, seçilen dirençlerin anma geriliminde, 33°C yüzey sıcaklığındaki direnç değerlerinin toplamıdır. Alçak gerilim kolunda kullanılan R_{AG33} veya R_{L03} direncinin 33°C 'deki değeri ise $R_{AG33} = 99.99414 \text{ k}\Omega$ 'dur. R_{YG33} ve R_{AG33} direnç değerlerinden gerilim bölücünün 33°C 'deki teorik çevirme oranı

$$K_{33^\circ\text{C}} = \frac{R_{YG33} + R_{AG33}}{R_{AG33}} = 1001.057 \quad (3)$$

olarak hesaplanır. Gerilim bölücünün 23°C 'deki çevirme oranı ise

$$K_{23^\circ\text{C}} = \frac{R_{YG23} + R_{AG23}}{R_{AG23}} = 1001.051 \quad (4)$$

olur. Bu bağıntıda R_{YG23} ve R_{AG23} sırasıyla yüksek gerilim ve alçak gerilim kolunun 23°C 'deki direnç değerleridir.

Gerilim bölücünün gerçekleştirilmesi

Bölücünün yüksek gerilim kolunu oluşturan dirençler, 1350 mm boyunda, 100 mm çapında, 5 mm et kalınlığında bir pleksiglas boru üzerine yerleştirilmiştir. Bu yapı, 1450 mm boyunda, 200 mm çapında, 3 mm et kalınlığında başka bir saydam pleksiglas boru içine eş eksenli olarak yerleştirilmiştir. Dirençler, pleksiglas boruya plastik vida ile sabitlenmiş karbon katkılı kroşerlerle tutturulmuştur. Dirençlerin birbirleri ile bağlantılarında; kontak direncini düşük tutmak amacıyla %2 oranında gümüş içeren bağlantı malzemesi kullanılmış ve bağlantı sırasında sivri uçların oluşumundan kaçınılmıştır. Yüksek gerilim bölücüsündeki dirençlerin dizildiği iç pleksiglas ile bu yapıyı çevreleyen dış pleksiglas hareketli bir taban üzerine yerleştirilmiştir. Bölücünün hareketi sırasında oluşabilecek mekanik kuvvetler karşısında, yapının dayanıklı kalabilmesi için üst bölüme bir flanş ve alt kısma da bir kaide yapılmıştır. Montajda kullanılan flanş ve kaide için, işlenmesi kolay, elektriksel yalıtım özellikleri iyi olan Derlin malzemesi kullanılmıştır. Montajı tamamlanmış gerilim bölücünün görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir.

Bölücünün elektrik alan hesaplamaları

Dirençlerin dizilişi ve elektrotların tasarımında göz önünde bulundurulması gereken çok önemli iki ortak ölçüt bulunmaktadır. Bunlar, ölçme duyarlılığını etkilememesi için, dirençlerde ve yüksek gerilim elektrodunda korona olmaması ve bölücü boyunca elektrik alan dağılımının düzgün olmasıdır.

Gerilim bölücüdeki olası korona kaynaklarını önlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yüzey malzemesinin karbon oranı yüksek dirençler kullanılmış, dirençlerin birleşme noktalarına pürüzlülük ve sivriliklerin etkisiz kılınması için

yine karbon oranı yüksek makaronlar geçirilmiştir. Bölücüde kullanılan elektrotlar da korona oluşumuna neden olmayacak eğrilik yarıçapında ve düzgün elektrik alanı yaratacak biçim ve konumda tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dirençlere gerilimin düzgün dağılması için dirençler üst ve alt bölümlerde seyrek, orta bölümlerde ise sıkışık düzende yerleştirilerek birbirlerine ve toprağa göre kaçak kapasitelerinden gerilim dağılımını düzeltmesi yönünde yararlanılmıştır.



Şekil 4. Tasarlanıp gerçekleştirilen standart gerilim bölücü

Dirençlerin dizilişi

Yüksek gerilim bölücüsüne yerleştirilecek dirençler, düzgün gerilim ve elektrik alan dağılımı sağlamak için helisel düzende yerleştirilmiştir. Yüksek gerilim bölücüsünün alan dağılımındaki düzgünlük, kaçak akımları en aza indirmekte ve dolayısıyla gerilim bölücünün çevirme oranına en az etkiyi yapmaktadır. Yüksek gerilim elektrot sistemlerinde, alan şiddetinin yüksek olduğu yerler gerilimin yüksek ve eğrilik yarıçapının küçük olduğu yerlerdir. Alan şiddetinin en düşük olduğu yerler ise potansiyelin düşük ve eğrilik yarıçapının büyük olduğu yerlerdir.

Bölücünün alan dağılımı öncelikle küre-düzlem elektrot sistemi yaklaşımı ile incelenmiştir. Yaklaşımda eş merkezli küresel elektrot sisteminin maksimum elektrik alan şiddeti:

$$E_{\max} = U \cdot \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{1}{r_2 - r_1} \quad (5)$$

bağıntısı kullanılmış ve üst elektrot için maksimum alan şiddeti hesabı yapılmıştır. Bu bağıntıda E_{\max} maksimum elektrik alanı, r_1 üst elektrodun yarıçapı, r_2 alt elektrodun yarıçapı ve U ise elektrotlar arasına uygulanan gerilimdir (Özkaya, 2003).

Korona boşalmaları ve eğrilik yarıçapı

Korona, başlangıç gerilim değeri aşıldığında küçük yarıçaplı elektrotlarda ya da düzgün olmayan alanlarda oluşan tam olmayan fakat kendi kendini besleyen boşalmadır. (6) denklemi ile verilen korona gerilimi bağıntısı her iki doğru gerilim kutbiyeti için verilmiş korona gerilimi bağıntısıdır.

$$U_k = U_0 \cdot m \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}}\right) \quad (6)$$

Burada U_k korona gerilimini, U_0 çarpma ile iyonizasyonun başladığı gerilimi, m elektrodun yüzey pürüzlülük derecesini hesaba katan ve parlatılmış yüzeylerde 1 olarak alınan bir katsayıyı, r iletkenin cm cinsinden yarıçapını ve δ ise bağıl hava yoğunluğunu göstermektedir.

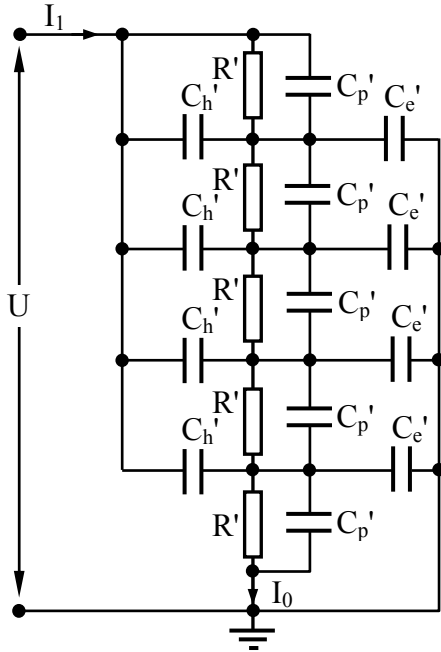
Tasarımı yapılan yüksek gerilim bölücüsünün kullanılacağı UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda ortalama hava basıncı 750 mmHg ve ortalama hava sıcaklığı 23°C'dir. Pürüzlülük katsayısı $m = 1$ ve korona oluşumunun önlenmesi açısından korona geriliminin iyonizasyon geriliminden %25 daha büyük olduğu varsayılırsa, bölücünün elektrot yarıçapının minimum $r = 1.36$ cm olması gerekir. Yapım aşamasında en az 1.36 cm eğrilik yarıçapına sahip elektrotlar ve bağlantı elemanları kullanılmıştır. Bölücüde dört ayrı tip elektrottan yararlanılmıştır. Bunlar:

1. Bölücünün yüksek gerilim bağlantısının yapıldığı 40 mm çapındaki küre elektrot,
2. Bölücünün üst kısmının kapatıldığı 350 mm çapında, 40 mm kalınlığındaki disk elektrot,
3. Yüksek gerilim ana elektrodu (bu toroid elektrodun dış çapı 750 mm ve silindir çapı 70 mm'dir),

4. 400 mm dış çapa ve 250 mm yüksekliğe sahip iki parçadan oluşan toprak elektrotudur.

Bölücünün eşdeğer devresi

Yüksek gerilim bölücüsündeki frekansa bağlılık problemi, yüksek gerilim bölücüsü boyunca ortaya çıkan düzgün olmayan alan dağılımı ile ilişkilidir. Bölücünün girişindeki ve sonundaki yük dağılımlarındaki farklılıkların kaçak kapasitelerden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu nedenle bölücüde kaçak kapasitelerin varlığı, direnç boyunca akımın genliğinin ve fazının değişimine yol açmaktadır.



Şekil 5. Kaçak kapasiteleri ile dirençsel bir gerilim bölücünün eşdeğer devresi

Bir yüksek gerilim bölücüsünde üç tür kaçak kapasite bulunmaktadır. Bunlar;

- C_p' : Bölücüdeki her bir dirence paralel kaçak kapasite,
- C_h' : Her bir potansiyel noktasından yüksek gerilim elektroduna kaçak kapasite ve
- C_e' : Her bir potansiyel noktasından toprağa kaçak kapasitedir (Naidu ve Neto, 1985).

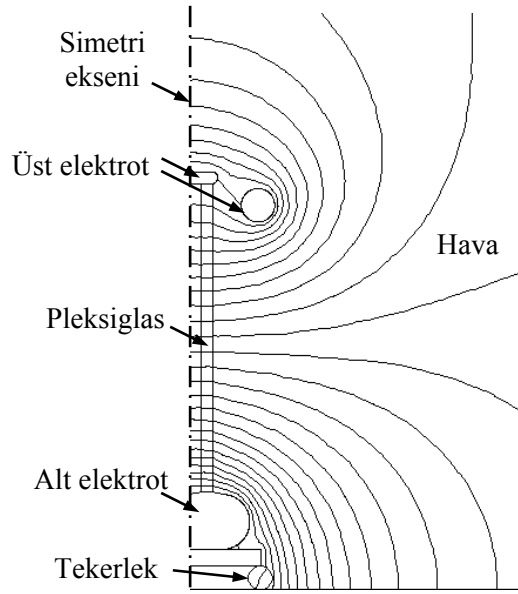
Kaçak kapasitelerle birlikte ortaya çıkan eşdeğer devre oldukça karmaşık bir yapıdadır. Şekil 5'te sadece 5 adet dirençten oluşan bir gerilim bölü-

cüsünün kaçak kapasiteleriyle birlikte eşdeğer devresi verilmiştir. Bölücüde kullanılan her bir direnç değeri birbirine eşit olsa da kaçak kapasiteler birbirine eşit değildir.

Kaçak kapasiteler nedeniyle ortaya çıkan hatalar, yüksek gerilim bölücüsünün ve bölücüyü oluşturan her bir direncin ekranlanmasıyla ya da uygun elektrot sistemi kurulmasıyla azaltılmaktadır. Gerilim bölücüde düzgün elektrik alan dağılımının sağlanması amacıyla toroid elektrot kullanılmıştır.

Gerilim bölücünün elektrik alan analizi

Tasarımı yapılan gerilim bölücünün alan dağılımının incelenmesi sırasında temeli Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)'e dayanan FEMM (Finite Element Method Magnetics) Version 4.0 serbest kullanım bilgisayar programından yararlanılmıştır.



Şekil 6. Gerilim bölücünün elektrik alan dağılımı

Yüksek gerilim bölücüsünün elektrot tasarımı ile ilgili olarak, FEMM programında üç farklı tipte elektrot yapısı analiz edilmiş ve sonuçlar, alan dağılımı, potansiyel dağılımı ve kaçak kapasite cinsinden değerlendirilmiş ve Şekil 6'da verilen elektrot düzeninin kullanılmasına karar verilmiştir. Sayısal analizler silindriksel koordinatlarda yapılmış ve bölücünün aksel simetrisinden yararlanılmıştır. Karar verilen elektrot

düzeninde elektrik alan şiddetinin mutlak değeri olarak en büyük radyal bileşeni $E_r = 97.09$ V/m ve en büyük aksel bileşeni $E_z = 2867.82$ V/m olarak elde edilmiştir.

Bölücünün performansının deneysel olarak belirlenmesi

Bu bölümde yapımı gerçekleştirilen gerilim bölücünün yüksek gerilim altındaki davranışını belirlemek amacıyla yapılan deneyler hakkında bilgiler verilmiştir.

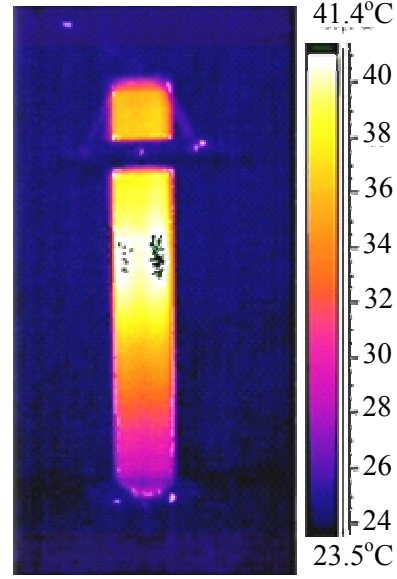
Çevirme oranı kararlılığının belirlenmesi

Bir gerilim bölücü ile gerilim ölçmede beklenen en önemli özellik, gerilim bölücü çevirme oranının belirli ve değişmez olmasıdır. Ancak çevirme oranı birçok etkene bağlı olarak değişir. Bu etkenlerden birisi uygulanan gerilimdir. Bunu düşünerek gerilim bölücü $U_1 = 100$ kV sabit bir gerilim altında 6 saat süreyle tutulmuş, bu süre içinde her 15 dakikada bir yapılan U_2 çıkış gerilimi ölçmeleri ile $K = U_1/U_2$ çevirme oranı deneysel olarak izlenmiştir. Çevirme oranının ilk 4 saat içinde değişim gösterdiği, 4-6 saat arasında ise 1007.5 değerinde sabit kaldığı belirlenmiştir. Yapılan deney koşullarında gerilime bağlı olarak gerilim bölücünden geçen akımın ($I = U/R$), akıma bağlı olarak kayıp gücün ($P = RI^2$) ve dolayısıyla ısıl ($W = P.t$) dengenin kurulması 4 saat almıştır. 4 saat sonunda ulaşılan kararlı çevirme oranı, teorik çevirme oranından (1001.057) farklıdır. Bu farka, direnci 99,994 k Ω olan alçak gerilim koluna, U_2 alçak gerilimini ölçmek için 10 M Ω iç empedansa sahip bir voltmetrenin bağlanması sonucu çıkış eşdeğer direncinin değişmesinin neden olduğu söylenebilir.

Sıcaklık dağılımının belirlenmesi

Gerilim bölücünde sıcaklık dağılımı deneyi, gerilimin bölücüye 6 saat süreyle 100 kV yüksek doğru uygulanmışken bu süre içinde her 15 dakikada bir bölücüdeki sıcaklık dağılımının bir termal kamera ile ölçülmesi yoluyla yapılmıştır. Ölçmelerde; bölücünün üst, orta ve alt bölgele-
rindeki sıcaklıklar ölçülmüş ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Deney sonucunda, gerilim bölücünün çevirme oranının kararlı duruma ulaştığı 4 saat sonunda gerilim bölücü ortalama

sıcaklığının 36°C civarında olduğu saptanmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Gerilim bölücünde 100 kV'ta 6 saat sonundaki sıcaklık dağılımı

Doğrusallığın belirlenmesi

Yüksek gerilim bölücüsünün doğrusallık deneyi, bölücüye 5, 50 ve 100 kV uygulanması ve bölücünün ısınmasına olanak tanımadan çıkış geriliminin ölçülmesi yoluyla yapılmıştır. Referans ölçme sistemi olarak % 0.8 ölçme belirsizliğine sahip UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı referans ölçme sistemi kullanılmıştır. Tablo 1'de verilen deney sonuçlarından çevirme oranının doğrusallığı görülmektedir.

Tablo 1. Doğrusallık deneyi sonuçları

Uygulanan Gerilim (kV)	Ölçülen Gerilim (V)	Çevirme Oranı (kV/V)
5.1	5.063	1007.3
50.0	49.627	1007.5
100.1	99.364	1007.4

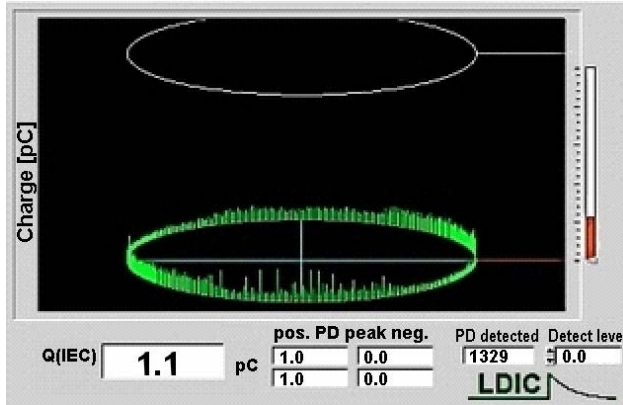
Yüksek alternatif gerilimde bölücünün çevirme oranının belirlenmesi deneyi

Yapımı gerçekleştirilen gerilim bölücünün aynı zamanda yüksek alternatif gerilimlerin ölçülmesinde de kullanılması düşünülmektedir. Bu nedenle, gerilim bölücünün 50 Hz frekanslı yüksek alternatif gerilimde çevirme oranı belir-

lenmiştir. Deneylede gerilim bölücüyeye, 50 kV ve 100 kV tepe değerli doğru gerilimlere karşılık gelen yaklaşık 35 kV ve 71 kV etkin değerli alternatif gerilimler uygulanmıştır. Her gerilim kademesinde 12 ölçme yapılmıştır. Bu ölçmelerden hesaplanan çevirme oranlarının aritmetik ortalamasından gerilim bölücünün alternatif gerilimdeki çevirme oranı 1011.2 olarak belirlenmiştir.

Kısmi boşalma (PD) deneyi

Anma geriliminde gerilim bölücünün kısmi boşalma ölçümleri için; UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı kısmi boşalma ölçme sistemi kullanılmıştır. Kısmi boşalma deneyi öncesinde ölçme sistemi kısmi boşalma kalibratörü ile 5 pC'da kalibre edilmiştir. Ölçmeler, 100 kV tepe değerli doğru gerilime karşılık gelen $100 \text{ kV}/\sqrt{2} = 71 \text{ kV}$ etkin değerli alternatif gerilimde yapılmıştır. Ortamdan kaynaklanan yük miktarının 1.1 ile 1.2 pC arasında değiştiği saptanmıştır. Gerilim bölücüyeye gerilim uygulanmasından sonra da yine kısmi boşalma yükünün 1.1 ile 1.2 pC arasında değiştiği yani gerilim bölücünden ek olarak herhangi bir kısmi boşalma gelmediği görülmüştür. Şekil 8'de anma geriliminde, kısmi boşalma ölçü aletinde görülen kısmi boşalma darbeciklerinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 8. Gerilim bölücüsünde anma geriliminde görülen kısmi boşalmaların görüntüsü

Korona deneyi

Bu deney, iki aşamalı yapılmıştır. Birinci aşamada gerilim bölücü 100 kV yüksek doğru gerilim altında 60 dakika bekletilmiş ve bu arada korona bakımından gözlenmiştir. Bu koşullarda herhangi bir korona oluşumuna rastlanmamıştır.

İkinci aşamada korona başlangıç geriliminin belirlenmesi için, gerilim bölücünün direnç gruplarına zarar vermemek amacıyla, direnç grupları kendilerini taşıyan pleksiglas boru ile birlikte bölücünden çıkartılmış ve yerine aynı ölçülerde üzerinde herhangi bir direnç elemanı bulunmayan pleksiglas boru yerleştirilerek deney yapılmıştır. Bölücüyeye uygulanan pozitif ve negatif yüksek doğru gerilim, pozitif ve negatif 375 kV'a kadar çıkartılmış ve bu gerilim seviyesinde korona belirtisi olan herhangi bir ses ya da ışıltıya rastlanmamıştır. Bu deneyin yapıldığı UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nın yüksek doğru gerilim kaynağının maksimum gerilim düzeyi 400 kV olduğundan, bu düzeyin üzerine çıkılamamıştır.

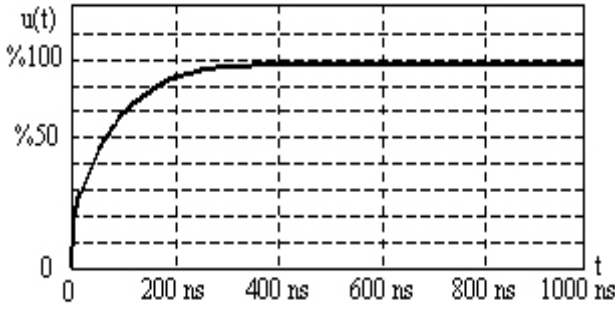
Kaçak akımın belirlenmesi

Bölücüsünde taşıyıcı ve koruyucu elemanlar olarak kullanılan pleksiglas borular, kaide ve ayırıcı elemanlar olarak kullanılan derlin gibi yalıtım malzemelerinden akan kaçak akımların ölçülmesi amacıyla, direnç grupları ve onları taşıyan pleksiglas boru bölücünden çıkartılmış ve yerine aynı ölçülerde boş bir pleksiglas boru yerleştirilmiştir. Kaçak akım deneyinde, korona deneyindeki düzen ve cihazlar kullanılmıştır. Bu düzene ek olarak, bölücünün alt elektrodu ile toprak arasına, kaçak akımı ölçmek için, L34/15 modeli 50Ω empedanslı, 15 m uzunluğunda, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo üzerinden 8.5 dijital bir ampermetre bağlanmıştır. 100 kV gerilimde kaçak akım, 14.053 nA olarak ölçülmüştür.

Birim basamak yanıtının belirlenmesi

Yüksek gerilim bölücüsünün birim basamak yanıtının belirlenmesi deneyi, UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda darbe kalibratöründen üretilen 1000 V'luk referans darbenin, birim basamak üretici üzerinden gerilim bölücüyeye uygulanmasıyla yapılmıştır. Gerilim bölücünün çıkış uçlarındaki işaretler darbe kaydedici üzerinden incelenmiştir. Birim basamak darbeleri, 5 s aralıklarla 20 kez gerilim bölücüyeye otomatik olarak uygulanmış ve elde edilen sonuçlar 200 MS/s bit örnekleme oranında ve 12 bit çözünürlükte işlenerek sonuçlandırılmıştır. Deney sonucunda elde edilen verilere göre gerilim bölücünün birim basamak yanıtının yükselme süresinin 204

ns olduğu belirlenmiştir. Bölücünün birim basamak yanıtlarından birinin görüntüsü Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. Bölücünün birim basamak yanıtı

Dirençsel gerilim bölücülerin birim basamak yanıtının T yükselme zaman sabiti, teorik olarak

$$T \approx \frac{1}{6} RC_E \quad (7)$$

yaklaşık bağıntısı ile ifade edilmektedir (Poletti ve Viola, 1995; Kato ve Okabe, 1995). Bu bağıntıda R gerilim bölücünün direncini, C_E de kapasitesini göstermektedir. Buna göre $T = 204$ ns, $R \cong 100$ M Ω olduğundan gerilim bölücünün kapasitesi yaklaşık olarak $C_E = 12.24$ fF (1 femto-Farad = 10^{-15} F) bulunur.

Gerilim bölücüde kullanılan dirençlerin 50 Hz ile 10 MHz bölgesindeki kapasite değişiminin 1.1 pF ile 1.2 pF arasında olduğu, yapılan kapasite ölçümleri sonucunda belirlenmiştir. 100 adet direncin seri olarak bağlandığı göz önünde bulundurulursa sistem kapasitesi teorik olarak 11 fF ile 12 fF arasındadır ve bu değer (7) bağıntısından bulunan değerle uyumludur. Birim basamak yanıtı giriş empedansı 1 M Ω ve 30 pF olan sayısal bir kaydedici ile gerçekleştirilmiştir.

Bölücünün belirsizlik bütçesi

Yapılan gerilim bölücü için ölçmeye etki eden etkenlerden gelen belirsizliklerin oluşturduğu belirsizlik bütçesi ve sonucunda bulunan toplam belirsizlik bu bölümde verilmiştir.

Bölücü çıkış geriliminin ölçülmesindeki belirsizlik

Yüksek gerilim bölücüsü çıkışındaki gerilim, bilinen ve çok kullanılan duyarlı voltmetreler ile

ölçülebilir. Bu ölçmenin duyarlılığı, tüm yüksek gerilim ölçüm sisteminin belirsizliğine etki etmektedir. Gerçeklenen yüksek doğru gerilim bölücüsü, 100 kV'a kadar gerilimleri teorik olarak yaklaşık 1000:1 oranında bölmektedir. Bu çevirme oranına göre bölücünün çıkışında oluşabilecek maksimum gerilim 100 Volttur. Bu doğru gerilim, eldeki olanaklarla en düşük belirsizlikle ölçülmelidir. Yapılan gerilim bölücünün çıkış gerilimini ölçmek için Ulusal gerilim standardı zinciri içerisinde bulunan, 8.5 dijital HP3458A modeli bir dijital multimetre, kullanılmıştır. 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.

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 $u_w = \pm 0.03 \times 10^{-6}$ dir. Bu bileşenler kullanılarak elde edilen u_B bileşik belirsizliği

$$u_B = \sqrt{u_u^2 + u_w^2 + u_{sp}^2} \quad (8)$$

bağıntısı (Peier ve Graetsch, 1979) yardımıyla $u_B = \pm 11.2 \times 10^{-6}$ olarak bulunur.

Sıcaklıktan kaynaklanan belirsizlik

Gerilim bölücüde kullanılan dirençlerin seçimi, 23°C ortam sıcaklığı ile anma gerilimindeki çalışma sıcaklığı olan 33°C arasındaki sıcaklık katsayıları göz önünde bulundurulmuş ve gerçekleştirilmiştir. Direnç elemanlarının anma gerilimindeki yüzey sıcaklıklarının 33°C olması, tüm gerilim bölücüsünün anma gerilimindeki sıcaklık dağılımının 33°C olacağı anlamını taşımaktadır. 100 kV anma geriliminde bölücünün kararlı sıcaklığa ulaştığı 6 saat boyunca, bölücünün üst, orta ve alt noktalarında yapılan ölçümlerle sıcaklık dağılımı belirlenmiştir. Geri-

lim bölücü, sıcaklık bakımından dengeye gelmeye başladığı 4. saat ile dengeye geldiği 6. saat arasında, en düşük sıcaklık bölücünün alt bölgesinde 31°C, en yüksek sıcaklık orta bölgesinde 41°C olarak ölçülmüştür. Bundan dolayı gerilim bölücünün sıcaklık etkisi belirsizlik bileşeni belirlenirken, dirençlerin 33°C ile 43°C arasındaki sıcaklık katsayıları göz önünde bulundurulmuştur. Gerilim bölücünün 33°C ile 43°C arasındaki toplam sıcaklık katsayısı -50 ppm/°C olarak belirlenmiştir. Buna göre gerilim bölücünün sıcaklık etkisinden gelen bağıl belirsizliği $u_T = \pm 50 \times 10^{-6}$ dır.

Gerilim etkisinden kaynaklanan belirsizlik

Kullanılan her bir direncin gerilim katsayısından kaynaklanan hatanın ± 0.05 ppm/V olduğu varsayılırsa, sisteme 100 adet dirençten gelecek bağıl belirsizlik

$$u_V = \sqrt{100 \times (0.05 \times 10^{-6})^2} \quad (9)$$

işleminde $u_V = 0.5 \times 10^{-6}$ olarak bulunur.

Kaçak akımlardan kaynaklanan belirsizlik

Gerilim bölücünden 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.

Koronadan kaynaklanan belirsizlik

Gerilim bölücünün korona deneyi, 71 kV etkin değerli şebeke frekanslı alternatif gerilim uygulanarak yapılmıştır. Deney süresince herhangi bir korona boşalması gözlenmemiştir.

Kısa dönem kararlılığı

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

Ölçüm belirsizliği

Gerilim bölücünün belirsizlik bileşenlerini, bölünmüş gerilim değerinin ölçüm belirsizliği (u_L), alçak gerilimde bölücünün çevirme oranının be-

lirlenmesindeki 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. Tüm belirsizlik bileşenleri $k = 1$ kapsam faktöründe normal dağılıma dönüştürüldükten sonra bileşik belirsizlik hesaplanmıştır. Bileşik belirsizlik

$$u_x = \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad (10)$$

bağıntısı kullanılarak elde edilir. Belirsizlik bütçesi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. 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 $k = 2$ ile çarpılması ile %95 güvenilirlik düzeyi için genişletilmiş belirsizlik $U_X = 66 \times 10^{-6}$ olarak elde edilir.

Sonuçlar

Yüksek gerilim tekniğinde 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 bir tasarım yapılmış ve bölücünün yapımı bu teorik hesaplamalara göre gerçekleştirilmiştir. Bu cihazın yapımı ile Türkiye’de yüksek doğru gerilim tekniğinde kullanılan tüm ölçme cihaz ve sistemlerinin, 100 ppm’den küçük ölçüm belirsizliğinde kalibrasyonuna olanak tanıyacak 100 kV yüksek doğru gerilim bölücüsünün tasarımı ve yapımı gerçekleştirilmiş olmaktadır.

Bölücüdeki belirsizlik bileşenleri arasında bulunan, bölücünün sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik bileşeni, toplam belirsizliğe en baskın etkiyi yapmaktadır. Bu belirsizlik bileşeninin düşürülmesi ile gerilim bölücüdeki toplam belirsizliğin ciddi anlamda düşürülmesi mümkündür. Bu ancak gerilim bölücünün ısı dağılımının çok daha kararlı ve düzgün dağılımlı olmasına bağlıdır. Gerilim bölücüdeki ısı dağılımının kararlılığı, tüm dirençlerin aynı sıcaklıkta çalışması anlamına gelmektedir. Çok iyi bir ısı kararlılığı sıcaklık kontrollü gerilim bölücülerden elde etmek olanaklıdır. Bu tür yapılarda, sıcaklık kontrol devresinin gerçekleşmesi ve kontrolün yağ ya da gaz ile yapılması uygun olabilecektir. Sıcaklık kontrol sistemi olan bölücülerde, sıcaklık gerilim bölücü boyunca düzgün olarak dağılır, tüm direnç elemanları tüm gerilim düzeylerinde eşit sıcaklıklarda çalışır ve bölücü, ortamdan gelecek ısı etkilerden korunmuş olur. Bölücülerini sıcaklık kontrollü olarak yaparak, çevirme oranından gelecek belirsizliği ve kısa dönem kararlılığından gelecek sapsmaları da azaltmak mümkün olabilecektir.

Kaynaklar

- Kato, S. and Okabe, S., (1995). Response analysis of voltage divider by numerical electromagnetic field computation, *9th International Symposium on High Voltage Engineering*, **4524: 1-4**, Graz-Austria.
- Kim, K. T., Lee, S. H., Chung, J. ve Song, Y. S., (2002). Determination of voltage coefficient of high DC voltage resistor, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements’2002*, Ottawa-Canada.
- Kuffel, E., Zaengl, W. S. ve Kuffel J., (2000). *High-Voltage Engineering Fundamentals*, 539 sf., Newnes, Toronto.
- Marx, R., (2001). New concept of PTBs standard divider for direct voltages of up to 100 kV, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **50**, 426-429.
- Merev, A., Yılmaz, O. ve Kalenderli, O., (2003). Selecting resistors for a high voltage divider, *13rd International Symposium on High Voltage Engineering*, Delft-The Netherlands.
- Naidu, S. R. ve Neto, A. F. C., (1985). The stray-capacitance equivalent circuit for resistive voltage dividers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **IM-34** No:3, 393-398.
- Özkaya, M., (2003). *Yüksek gerilim tekniği, Cilt 1*, 332 sf., Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Park, J. H., (1962). Special Shielded Resistor for High-Voltage DC Measurement, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, **66C1**, 19-24.
- Peier, D. ve Graetsch, V., (1979). A 300 kV DC measuring device with high accuracy, *3rd International Symposium on High Voltage Engineering*, **43.08**, 1-4, Milan-Italy.
- Poletti, F. ve Viola, F., (1995). Design of a high voltage precision resistive divider with sf6 insulation, *9th International Symposium on High Voltage Engineering*, **4513, 1-4**, Austria
- Ryan, H. M., (2001). *High-Voltage Engineering and Testing*, Institution of electrical engineers publication, 726, Wiltshire.
- Ziegler, N. F., (1970). Dual highly stable 150 kV divider, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **IM-19**, 281-285.