

# güç transformatörlerinde sargı dirençlerinin ölçülmesi

ilhami çetin

UDK: 621.317.331 : 621.314.21

## ÖZET

Güç transformatörlerinde sargı dirençlerinin ölçülmesi kolay değildir, çünkü özellikle alçak gerilim sargısında direnç küçük yada çok küçük, buna karşılık istenen ölçme doğruluğu büyüktür. Yazıda transformatör sargı dirençlerinin yeterli doğrulukta ölçülebilmesi için kullanılan yöntemler ve dikkat edilmesi gereken noktalar anlatılmakta, ölçmede oluşan geçici olayların çabuk sönmesi bakımından ölçme akımı alt sınırının transformatör boşa akımı ile ilgisi açıklanmaktadır. Uygulamada çok önemli olan bu konular yazında pek bulunmamaktadır.

## SUMMARY

Measurement of the resistance of windings in power transformers is not easy since the resistance to be measured in the low voltage winding is small and in addition the required accuracy is high. The article discusses the methods of measurement which yield the required high accuracy, with particular emphasis on the important points of the subject.

it further discusses the dependence of the lower limit of the measurement current on the transformer no-load current in having the transients during the measurement to decay rapidly.

These particulars which are of great practical interest do not take place in the literature as a whole.

## 1. GİRİŞ

Ek yük kayıpları, sargı sıcaklığı, verim hesaplamaları ve daha az önemli olarak eşdeğer devre için belirli bir sıcaklıktaki sargı dirençlerinin kesinlikle bilinmesi ve ölçülmesi gerekir. Ölçme soğuk durumda, yani çevre sıcaklığında yapılır ve sargılar daima bir akümülatörden sağlanan doğru akımla bir seri direnç üzerinden beslenir. Sıcaklık termometre ile kolayca ölçülür. Direnç ölçülmesi kolay değildir, çünkü büyük transformatörlerin özellikle alt gerilim sargısında direnç çok küçük, buna karşılık istenen ölçme doğruluğu büyüktür. Örneğin 60,3 MVA'lık Keban ana güç transformatörünün 19,5°C'de ölçülen sargı dirençleri  $R_{AG} = 3,9936 \text{ m}\Omega$  ve  $R_{VG} = 0,9697 \text{ Q}$  dur.

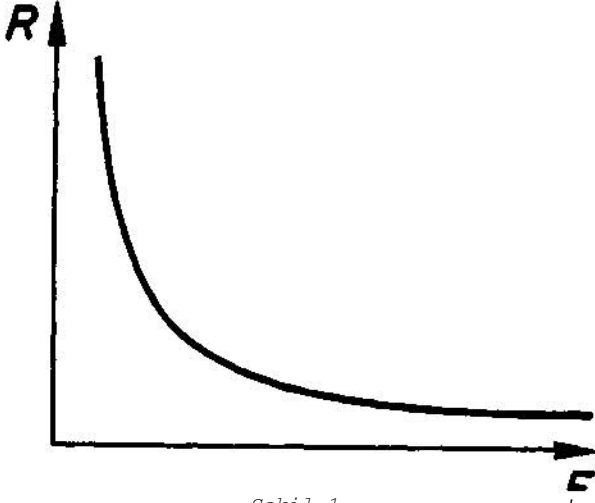
Pratikte başlıca iki ölçme yöntemi uygulanır:

1) Gerilim akım yöntemi, 2) Köprü yöntemi.

Küçük dirençler ölçülürken iki önlem önemlidir:

- 1) Ölçmede kullanılan temas yüzeyleri temiz ve parlak olmalıdır. Temas dirençleri temas yüzeylerinin temizliğine ve temas basıncına bağlıdır (Şekil 1). Cıvatalı bağlantı yerleri varsa, somunlar iyice sıkılmalıdır.
- 2) Küçük dirençlerde dört uç ilkesi kesinlikle uygulanmalıdır. Bu ilkeye göre sargı iki akım ucu ile beslenir, tki ayrı gerilim ucu akım

Doç.Dr.İlhami Çetin, İTÜ Elk.Fak.



Şekil 1.

uçlarının iç tarafında direnç uçlarına değdirilir ve böylece akım geçiş yerlerindeki gerilim düşümleri ölçülen gerilime sokulmamış olur.

## 2. GERİLİM AKIM YÖNTEMİ

En çok uygulanan ve son derece basit olan bu yöntemde sargının gerilimi bir voltmetre, akımı bir ampermetre ile ölçülerek direnç tanım formülüne göre sargı direnci hesaplanır.

$$R = U/I$$

Kullanılan voltmetre ve ampermetrenin duyarlı ölçü aletleri olması gerekir. Doğruluk sınıfı (accuracy class) 0,1 yada 0,2 alınır, yöntemin doğruluğu % 0,4 kadar olabilir. Voltmetrenin skala sonunda çektiği akım 30 mA'yi geçmediğinden, öz tüketimi nedeniyle düzeltme, küçük transformatörler dışında gerekmez.

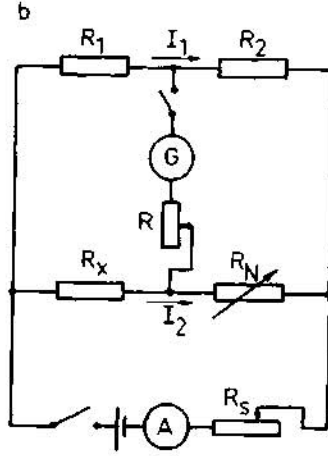
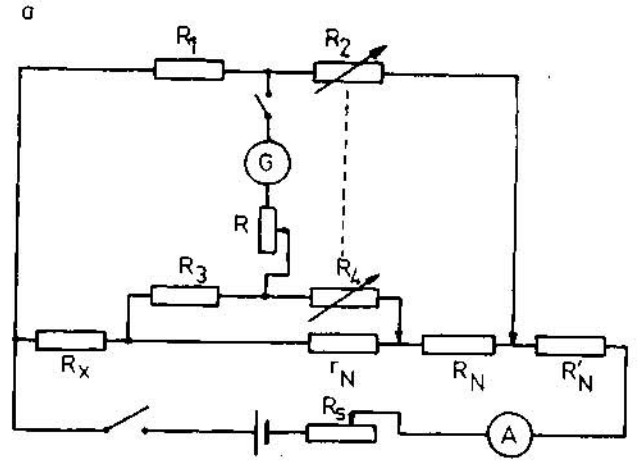
Sargıdan geçen ölçme akımının yeterli doğruluk sağlayacak kadar büyük, fakat sargı sıcaklığını değiştirmeyecek kadar küçük olması gerekir. Yoksa, ısınan sargının direnci yükselir ve ölçme yanlış olur. Pratikte transformatör boşa akımının 1,2 katı ile en fazla akımının % 10'u arasında bir ölçme akımı tercih edilir ve duruma göre 100 A'e kadar çıkılabilir.

$$1,2I_0 \leq I \leq 0,1I_N$$

Ölçme akımının transformatör boşa akımı ile ilgisi ayrıca açıklanacaktır. Ölçme akımı birincil ve ikincil sargıda değişiktir. Örneğin en fazla akımları 4186 A ve 274 A, bağıl boşa akımı % 1, boşa akımları 41,86 A ve 2,74 A olan 60,3 MVA'lık tek fazlı bir transformatörde ölçme akımları yaklaşık 50 A ve 3,3 A olabilir.

## 3. KÖPRÜ YÖNTEMLERİ

Köprü yöntemlerinden Thomson (daha sonra Lord Kelvin adını almıştır) köprüsü en fazla, Wheatstone köprüsü daha az kullanılır (Şekil 2). Her iki köprü de yalnız doğru akımla çalışan direnç elemanlarından yapılmıştır. Birincisinden 1 mΩ ile 100Ω arasındaki, ikincisinden ise 1Ω ile 1000Ω



Şekil 2.

arasındaki dirençlerin ölçülmesinde yararlanılır. Bazen her iki köprü bir aygıt içine yerleştirilir. Sıfırlamaya dayanan köprü yöntemlerinde sıfırlama aygıtının ayar hatası ortadan kalkar. Bu durumda, dirençler gerilim akım yöntemine göre daha doğru ölçülebilir. Sıfırlama aygıtı olarak, çok duyarlı yapılabildiğinden, galvanometre kullanılır.

En çok kullanılan Thomson yada Kelvin çift köprüsü Wheatstone köprüsünün geliştirilmiş bir şeklidir. Üstünlüğü, ölçülecek direnç ile köprü arasındaki temas dirençlerinin ve bağlantı dirençlerinin hatasını gidermesidir. Bunun sağlanabilmesi için ölçülecek dirençte gerilim düşümünün yeterli büyüklükte, dolayısıyla ölçme akımının yüksek olması ve dört uçlu direnç ilkesinin uygulanması gerekir. Ölçme akımı çok kez 15 A kadar alınır. Daha büyük değerler kullanılması yeğlenir, ancak bu yönde etalon direncin en fazla akımı, asla aşılması gereken bir sınırdır. Ölçülen dirençte ve etalon dirençte gerilim düşümleri çok küçük olduğundan, Kelvin köprüsünde Wheatstone köprüsüne göre daha duyarlı bir galvanometre kullanılmaktadır.

6 V'luk bir akümülatörden alınan ölçme akımı seri bağlı etalon dirençlerden ve ölçülecek dirençten geçer. Etalon direncin seçilen bölümündeki ve ölç-

gülecek dirençteki gerilim düşümleri gerçek köprüde karşılaştırılır. Çift köprü tamamen aynı şekilde yapılmış iki koldan oluşur. Her bir kolde seçilebilen sabit bir direnç ( $R_1$  yada  $R_2$ ) ile ayarlanabilen bir direnç ( $R_3$  yada  $R_4$ ) bulunur, tki koldaki sabit dirençler  $R_j$  ve  $R_3$  aynı seçilir. Değişken dirençler ise aralarındaki mekanik bağlantı nedeniyle, birbirlerine daima eşit kalır. Dirençler ayarlanarak galvanometre sıfırını gösterdiğinde köprüde denge sağlanır. Denge koşulu ile bilinmeyen  $R^x$  direnci hesaplanır. % etalon direnci  $R_x$  ile aynı düzeyde seçilmelidir.

$$R_1 = R_3 ; R_2 = R_4 ; \frac{R_x}{R_N} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$R_3/R_4$  onun üssü seçilirse, sonucun okunması kolaylaşır. Doğruluk % 0,1 kadardır.

Hassas sıfırlama galvanometresini korumak için seri bağlı bir koruma direnci kullanılır. Köprü dengeye yaklaştıkça, bu direnç azaltılarak duyarlılık artırılır. Tam denge için koruma direnci devreden tamamen çıkarılır. Bu durumda akımın kesilmesi, indükleme olayı ile sıfırlama aygıtını bozabilir. Bu nedenle, akımı kesmeden önce, sıfırlama aygıtının anahtarı açılmalıdır. Etalon direncin tamamı akım devresinde, kullanılmayan küçük bölümü orta tarafta, kullanılmayan büyük bölümü ise kenar tarafta bulunmalıdır.

Daha az kullanılan Wheatstone köprüsünde değişken direnç ayarlanarak (galvanometrenin sıfır göstermesi ile) denge sağlanınca, paralel dirençlere aynı gerilim uygulanmış olur. Paralel dirençlerde gerilimlerin, seri dirençler de akımların eşitliği gözönüne alınarak elde edilen denge koşulundan bilinmeyen direnç hesaplanır.

$$R_1 I_1 = R_x I_2 , R_2 I_1 = R_N I_2 , \frac{R_x}{R_N} = \frac{R_1}{R_2}$$

Köprü kollarındaki çapraz dirençlerin çarpımı dengede birbirine eşittir. Sıfırlama aygıtı ile akım kaynağı yer değiştirirse, denge koşulu değişmez, ancak köprü duyarlılığı değişebilir. Küçük dirençlerde V/heatstone köprüsünün duyarlılığı yeterli değildir.

ölçme akımı diğer yöntemlerde kullanılanlara göre çok daha düşüktür ve 0,5 A kadardır. Ölçülen dirence konan akım uçlarının akım altında kaldırılması kullanıcı için tehlikeli olmaz, ancak hassas sıfırlama aygıtını bozabilir. Bu nedenle, Thomson köprüsündeki anahtar önleminin burada da uygulanması gerekir.

Direnç ölçülmesinde kullanılan köprüler zaman zaman bir etalon direnç ile denetlenmelidir.

#### 4. SARGI SICAKLIĞININ ÖLÇÜLMESİ yada HESAPLANMASI

Direnç sıcaklıkla değiştiğinden, belirli bir direnç değeri, ancak hangi sıcaklığa ait olduğu bilinirse, bir anlam taşır. Bu nedenle, her soğuk durum direnç ölçülmesinde, sıcaklığın da ölçülmesi ve kaydedilmesi asla unutulmamalıdır. Sı-

caklık genellikle termometre ile ölçülür. Ölçülen bu sıcaklık ısınma ve verim hesaplarında kullanılır. Sargı dirençlerinin ölçülebilmesi için transformatör hiç bir besleme yapılmadan yeterli süre bekletilir ve böylece sargıların yağ sıcaklığını alması sağlanır. Bu durumda ölçülen yağ sıcaklığı sargı sıcaklığına eşit kabul edilir. Büyük transformatörlerde yağ sıcaklığı kazanın üst ve alt taraflarında ölçülerek, ortalama değeri alınır. Bir sıcaklıkta ölçülen direnç ile herhangi bir sıcaklıktaki sargı direnci yada herhangi bir dirençteki sargı sıcaklığı bulunabilir. Diğer bir deyişle, sargı sıcaklık ve direncinden biri bilinmiyorsa, diğeri hesaplanabilir. Standartlarda genellikle sargıların 75°C deki dirençlerinin kullanılması öngörülmüştür.

$$R_2 = R_1 \frac{T + t_2}{T + t_1} , t_2 = \frac{R_2}{R_1} (T + t_1) - T$$

$R_1, t_1$  : Soğuk durumda sargı direnci ve sıcaklığı,  
 $R_2, t_2$  : Sıcak durumda sargı direnci ve sıcaklığı,  
 $T$  : Sargı iletken malzemesine özgü bir sınırlı sıcaklık.

Bakır ve alüminyum için  $T=235^\circ\text{C}$  dir. Bazen bakır için  $234,5^\circ\text{C}$ , alüminyum için  $230^\circ\text{C}$  alınır. Transformatörlerde ve elektrik makinelerinde ısınmış bir sargının sıcaklığını bulmak için direncini ölçüp, direnç sıcaklık bağıntısını uygulamak pratik ve en çok kullanılan ve standartlarca kabul edilen değerli bir yöntemdir. Ancak, bu yöntem ile sargı ortalama sıcaklığının bulunabildiği unutulmamalıdır.

Direnç artışı yöntemi ile sıcaklığın sağlıklı bir biçimde bulunabilmesi için dirençlerin yeterli doğrulukta ölçülmesi gerekir. Bu amaçla, sıcak durumda bir sargı direnci ölçülürken, soğuk durumda kullanılan ölçme yöntemi uygulanmalıdır. Akım gerilim yönteminde akım şiddetleri, köprü yönteminde etalon dirençler aynı olmalıdır.

Direnç ölçülmesi eşdeğer devreler bakımından önemli değildir, çünkü en çok kullanılan L eşdeğer devre ve en basit eşdeğer devre elemanlarının bulunabilmesi için direncin bilinmesi gerekmez. Direnç deneyi en önemli uygulamasını sargı sıcaklığının ve yük kayıplarının hesaplanmasında bulur. Bu uygulamalar transformatörler ve elektrik makineleri için son derece önemlidir.

#### 5. ÜÇ FAZLI SARGILARDA DİRENÇ ÖLÇÜLMESİ

Transformatörlerde ve elektrik makinelerinde ölçme yaparken daima mevcut uçları kullanmak ve iç bağlantıları elden geldiğince sökmek önemli bir ölçme ilkesidir. Bu ilkeye göre üç fazlı sargılarda direnci, hat bağlantılarının yapıldığı uçlarda ölçmek gerekir. Mümkünse, yıldız noktası da kullanılabilir. Tabii, faz sargı dirençlerinin doğrudan ölçülmesi yeğlenir. Bu durumda, faz direnci üç sargı direncinin ortalama değeridir.

Faz dirençleri doğrudan ölçülemiyorsa, ölçme hat uçları arasında yapılır. Böylece, yıldız ve zikzak bağlantıda iki faz sargısının seri direnci, üçgen bağlantıda ise iki faz sargısının seri bağlantısı ile bir faz sargısının paralel direnci

ölçülebilir. Yıldız bağlantıda faz direnci iki uç arasında ölçülen direncin yarısına, üçgen bağlantıda ise 1,5 katına eşittir.

$$R_Y = 2R, R = \frac{1}{2} R_Y, -L = \frac{A}{2R} + \frac{JL}{R} = \frac{3}{2R},$$

$$R = \frac{1}{3} R_Y$$

Genellikle uçlar arasında ikişer ikişer üç direnç ölçülür ve ortalama değeri alınır.

$$R_Y = \frac{1}{3} (R_{Y1} + R_{Y2} + R_{Y3}),$$

$$R_{\Delta} = \frac{1}{3} (R_{\Delta1} + R_{\Delta2} + R_{\Delta3})$$

Eşdeğer devrelerde daima faz direnci kullanılır.

#### 6. GERİLİM AKIM YÖNTEMİNDE DİKKAT EDİLECEK NOKTALAR

Transformatör ve elektrik makinelerinin sargıları genellikle boşa yüksek indüktanslı olduğundan, direnç ölçülmesinde dikkatli olmak gerekir. Pratikte, ölçülecek dirence akım ve gerilim bağlantıları doğrudan değil, elle tutulan tarafı yalıtılmış özel iletken uçlar direnç uçlarına bastırılarak yapılır. Akım uçlarının değdirilip yada kaldırılması akımlı durumda yapılmamalıdır. Yoksa, kuvvetli ölçme akımının değişmesi ile büyük indüktansın indüklediği gerilim aygıtları zedeleyebileceği gibi, oluşan ark akım uygulama uçlarını tutan kişi için tehlikeli olabilir.

Dirençlerin ölçülmesinde kullanılan doğru akımın pürüzsüz olması gerekir. Az da olsa bir alternatif akım içerdiklerinden, güç elektroniği düzenleri ile elde edilen doğru akımlar pratikte kullanılamaz. Akım kaynağı olarak ancak akümülatörlerden yararlanılabilir. Akümülatörün gerilimi 100 ile 200 V, kapasitesi 100 ile 200 Ah alınabilir.

Ölçme akımı sargıya seri bağlanan bir direnç yardımı ile ayarlanır. Doğru akımı artırma ve azaltma yavaş yapılmalıdır, yoksa devrede büyük bir gerilim indüklenebilir. Transformatörün büyük olan boşa indüktansı ve manyetik devredeki doyma indüklemeyi belirlediğinden, tehlikeli aşırı gerilimler oluşabilir. Bu nedenle aşağıdaki noktalara dikkat edilmesi gerekir.

1) Akım ayarlanmasındaki geçici olay yatıştıktan sonra ölçme yapılmalıdır. Özellikle üçgen bağlı, beş bacaklı transformatörlerde akımın sakinleşmesi 1-2 dakika sürebilir. Ölçü akımı sabit olunca ya kadar geçen süreyi kaydetmek yararlıdır. Transformatörün ısınma deneyinden sonra dirençler tekrar ölçülürken, bu süre gözönüne alınmalıdır. Yoksa, ölçme sonuçları yanlış olabilir.

2) Geçici olay süresi ölçme devresindeki  $R_j$  sargı direncine seri bağlanan  $R_s$  direncini artırarak kısaltılabilir, çünkü zaman sabitesi artan dirençle küçülür.

$$T = L/R = L_{1h} / (R_x + R_s)$$

Boşa zaman sabitesinin büyüklüğünü göstermek için, örnek olarak, 60,3 MVA'lık Keban güç trans-

formatöründeki başlangıç değerini yaklaşık olarak hesaplayalım.

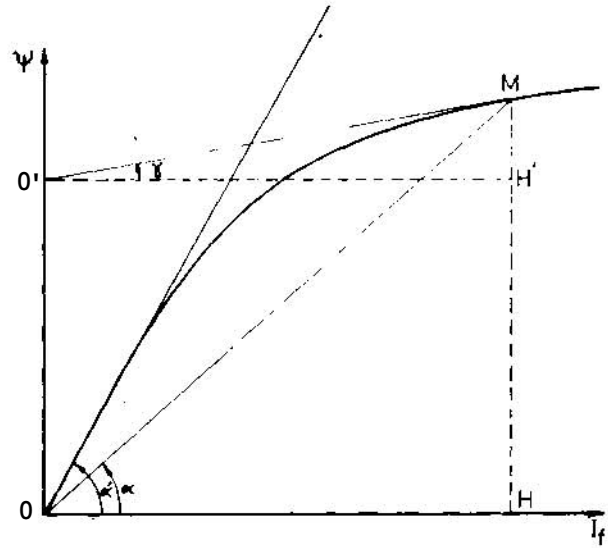
$$X_{1h} = 437\Omega, L = L_{1h} = X_{1h} / 2\pi f$$

$$L = 437 / 2\pi \cdot 50 = 1.391H$$

$$T = L/R = 1.391H / 4m\Omega = 348sn = 5,8 \text{ dak.}$$

3) Ölçme devresinde oynak ve kötü temaslar geçici olaylara yol açacağından, önlenmeli ve gerilim doğrudan sargı uçlarında ölçülmelidir.

4) Ufak akım değişmelerinde indüklenen gerilimin küçük ve ölçmenin sağlıklı olması için ölçme, manyetik bakımdan transformatörün doyma bölgesinde, yani manyetik karakteristiğinin en yatık bölümünde yapılmalıdır. Bu nedenle direnç ölçülmesinde kullanılan doğru akım, transformatör boşa akımının en az 1,2 katı olmalıdır. Bununla ancak manyetik karakteristiğinin doyma bölgesinde çalışmakta ve indüklemeyi belirleyen  $L_D$  diferansi-



Şekil 3.

yel indüktansının [1, 2] çok küçük olması sağlanmaktadır.  $L_p$  ile beraber zaman sabitesi de küçülür. -'

$$e = -L_D di/dt, L_D = df/dl, T = L_D/R$$

Manyetik karakteristiğinin bir noktasındaki diferansiyel indüktansın o noktadaki teğetinin tanjantı ile ölçülür. Doyma bölgesinde teğetin tanjantı çok küçüktür (Şekil 3).

#### KAYNAKLAR

- [1] Çetin, I., Induktivitäten bei Gleich-Wechsel- und Mischstrom. Archiv für Elektrotechnik 50 (1965) s.105-111.
- [2] Çetin, I., Definition und Berechnung der Induktivitäten bei Gleich- und periodischem Strom. Archiv für Elektrotechnik 50 (1965) s.184-189.