

TRANSFORMATÖRLERDE ELEKTRİKSEL KİSMİ BOŞALMALARIN YERİNİN BULUNMASI

Ö. Kalenderli

İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul

ÖZET

Yüksek gerilim transformatörlerinin yapılarının karmaşıklığı, amaca uygun ve pratik bir elektriksel kısmi boşalma yeri bulma yöntemi bulabilmeyi ve bunu rutin (standard) hale getirebilmeyi zorlaştırmaktadır. Bunun için uluslararası çapta pek çok araştırma yapılmış ve bunun sonucunda geliştirilmiş çok sayıda boşalma yeri bulma yöntemi bulunmaktadır. Yazıda özellikle yağlı tipten güç transformatörlerinde, elektriksel ve elektriksel olmayan (akustik) yer bulma yöntemleri kısaca tanıtılıp, karşılaştırılmış ve uygulama problemleri ortaya konmuştur.

1. GİRİŞ

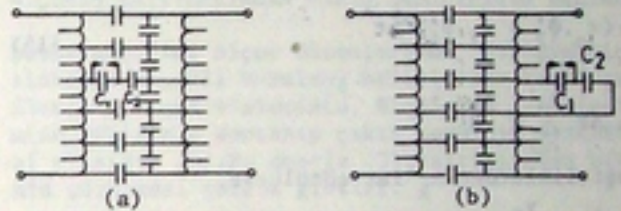
Yüksek gerilim güç transformatörleri, elektriksel kısmi boşalma deneyi yapılan aygıtlar içinde en karmaşık yapıda olanıdır. Trafolarla tasarım, yapım, malzeme veya yetersiz vakumlama hataları gibi hatalar gerilim altında kısmi boşalmalara yol açar. Boşalmaların görünür bir yerde olmaması nedeniyle sadece transformatör uçlarından yapılan kısmi boşalma ölçmeleri ile boşalma yerlerinin ve zararlarının doğru olarak belirlenmesi önemli bir problemdir. Kısmi boşalma yerinin bulunabilmesi boşalma sebebinin belirlenmesine, hatanın giderilip üretimin düzeltilmesine ve aygıtın geliştirilmesine yardımcı olur /1/.

Bir trafoda kısmi boşalmalar geçit izolatörlerinde veya trafo içinde (sargılarında veya yalıtımında) olur. Geçit izolatörleri genellikle trafoya monte edilmeden önce ayrı olarak denetlenirler. Trafo içinde ise kısmi boşalmalar trafonun yüksek gerilim sargısı ile alçak gerilim sargısı arasında veya sargılar ile topraklı kısımlar (örneğin kazan) arasında veya aynı sargının sarımları arasında veya sistemdeki katı (sert kağıt gibi) veya sıvı (yağ gibi) yalıtkanlar içinde olabilir. Şekil-1'de bir trafonun sargılarındaki kısmi boşalmaları incelemek için kullanılan eşdeğer devreler gösterilmiştir /2/.

Bir transformatörün yüksek ve alçak gerilim sargıları arasında bir gerilim uygulandığında kısmi boşalmalar sargılar arasında olur, aynı sargının sarımları arasında kısmi boşalma olmaz. Endüklenen gerilimde ise her iki durumda da kısmi boşalma olabilir /2/. Bu arada aynı anda birden fazla yerde boşalma meydana gelebilir.

Genel olarak kısmi boşalmalar akım darbeleri, elek-

tromagnetik dalgalar gibi elektriksel, ısı, ışık, ses ve kimyasal bozulma gibi elektriksel olmayan etkilere sebep olurlar /3/. Transformatörlerde, daha çok, kısmi boşalmaların trafonun mekanik yapısından ve yağından yayılan ultrasonik ses dalgaları şeklindeki etkisi ve trafo sargılarındaki elektriksel darbeler şeklindeki etkisi gözönüne alınır /4/.



Şekil-1. Kısmi boşalmalı bir trafo sargısının eşdeğer devreleri. a) Sargılar arası kısmi boşalma durumu, b) Aynı sargının sarımları arasında boşalma durumu.

C₁: Boşalma kaynağının kapasitesi,

C₂: Boşalma kaynağı ile diğer gerilim sargısı arasındaki kapasite.

Bir sargıdaki bir kısmi boşalma prensip olarak sargı uçlarında üç tür gerilim darbesine sebep olur /2/, /4/.

1. Kapasitif olarak iletilen bir darbe,
2. Yürüyen dalga şeklinde bir darbe,
3. Alçak frekanslı salınımlar.

Prensip olarak elektriksel olarak yer bulma yöntemleri de yukarıda söylenen bu üç darbeden birinin ölçülmesini esas alır.

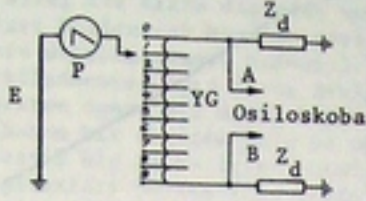
Transformatörlerde kısmi boşalma yer bulma yöntemlerini elektriksel ve elektriksel olmayan (akustik) yöntemler olarak iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Aşağıda uluslararası çapta yapılan pek çok çalışma sonucu geliştirilmiş yüksek gerilim yağlı güç trafoları için uygulanan yer bulma yöntemleri kısaca tanıtılmıştır.

2. ELEKTRİKSEL KİSMİ BOŞALMA YER BULMA YÖNTEMLERİ

2.1. Yürüyen Dalga Yöntemi

Trafo sargılarının yürüyen dalgalara karşı davranışı eskiden dikkat çekmektedir. Kısmi boşalmaların yerinin bulunmasında bu olaydan yararlanma düşüncesi geçitli sargı modelleri üzerinde denenmiş ve trafolarla kullanılabilirliği görülmüştür. Modeller üzerinde yapılan deneylerde sargıların farklı yer-

lerinden değeri bilinen ve gerçek kısmı boşalma darbelerine benzeyen ayar darbeleri verilmiş ve sargı uçlarından hızlı osiloskoplarla darbelerin davranışları incelenmiştir /2/,/3/,/4/. Şekil-2'de bir trafo sargısında boşalma darbelerinin yayılmasını incelemek amacıyla kullanılan deney bağımları gösterilmiştir /2/.



Şekil-2. Bir trafo sargısında boşalma darbelerinin yayılmasının incelenmesi.
P: Darbe generatörü (ayar kaynağı),
E: Alçak gerilim sargısı yerine metal ekran.

Yürüyen dalga yöntemi, yürüyen dalga ilerleme zamanının, katettiği sargı uzunluğu ile doğru orantılı olmasına dayanır. Yürüyen dalgaların trafo sargılarındaki yayılma hızları da yaklaşık 150-200 m/μs mertebesindedir /4/. Yürüyen dalgaların bu hızı gerçek trafoda da ölçülüp, kontrol edilebilir /2/. Bunun için uzunluğu belli bir sargının bir ucundan bir ayar darbesi uygulanıp diğer uca ulaşma süresinin ölçülmesi gerekir. Bu süre genellikle mikrosaniyeler mertebesindedir /5/. Kısmi boşalma darbeleri boşalmanın olduğu yerden sargının her iki ucuna doğru yayılan yürüyen dalgalar oluşturur. Bu dalgaların sargı uçlarına ulaşma anları arasındaki zaman farkı da boşalma yerinin sargı uçlarına olan uzaklığı için bir ölçüdür.

Yürüyen dalgalar sargılarda hızla zayıflarlar. Bu bakımdan bu yöntemin büyük genlikli boşalmaların yerinin bulunmasında kullanılması daha uygundur. Bu yöntemde yürüyen dalgaların yansıma ve kırılmaları büyük hatalara yol açar. Yöntem birden fazla yerde boşalma olması durumunda da kullanılabilir. Ancak bu durumda sargı uçlarından birine ayarlanabilir bir geciktirme devresi bağlanır. Sarımlar arasındaki veya yüksek gerilim sargısı ile topraklı kısımlar arasındaki boşalmaların yeri bu yöntemle bulunabilir.

Yürüyen dalga yöntemi yalnızca özel ve tipik yürüyen dalga davranışına sahip trafolarla kullanılabilir. Bu trafolarla sargılar kesintisiz ve küçük seri kapasiteli ve sargıları yöntemi uygulamaya yetecek kadar uzun olmalıdır /4/. Bu bakımdan kısa ve yüksek seri kapasiteli sargılı trafolarla yöntemin uygulanması mümkün olmamaktadır. Ayrıca yöntemin başarısı yürüyen dalga darbelerinin diğer darbelerden ayırtebilmesine bağlıdır. Bunun için kapasitif olarak iletilen darbelerin küçük olması veya istenmeyen darbelerin yeterince bastırılması gereklidir.

2.2. Kapasitif Olarak İletilen Darbe Yöntemi

Trafo sargısındaki bir kısmı boşalma darbesinin ilk anda bir kapasitif gerilim dağılımına yol açtığı bilinmektedir /6/. Yöntem bu dağılım sonucu sargı uçlarından kapasitif iletilen darbelerin veya tepe değerlerin ölçülmesine dayanır. Sargı uçlarından ölçülen kapasitif gerilim darbeleri oranı yalnızca kapasitif devredeki boşalma kaynağının yerine

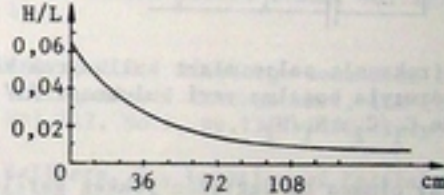
bağlıdır /4/,/5/,/6/. Bu oran boşalma genliğinden bağımsızdır.

Kısmi boşalma tarafından üretilen ve seri kapasitelerde yayılan darbeler sargılarda kısmi boşalmanın yerine göre zayıflar. Bu zayıflamanın trafosu kabaca kapasitif bir gerilim bölücü kabul edip her bir basamağındaki gerilim düşümünden ileri geldiği düşünülebilir /3/. Sargının iki ucundan ölçülen akım veya gerilim tepe değerleri arasındaki oran (x)

$$x = e^{-n \sqrt{C_t/C_i}} \quad (1)$$

dir /3/,/4/. Burada, C_t : Sargının toprağa göre kapasitesi, C_i : Sarımlar arasındaki kapasite, n: boşalma yeri ile yüksek gerilim ucu arasındaki sarım sayısıdır.

Darbelerin sargılardaki zayıflamasını belirlemek için, yürüyen dalga yönteminde olduğu gibi, bir ayar kaynağı ile trafo yağı ile doldurulmadan önce sargının çeşitli yerlerinden darbeler vererek sargının her iki ucundaki işaret ölçülür. Bunun için sargı uçlarından biri, bir osiloskobun x girişine, diğeri y girişine bağlanır veya çift ışınlı bir osiloskop kullanılır. Bu işaretlerin oranı boşalma yerinin konumunun fonksiyonu olarak, bir kısmi boşalma öngörme (tahmin) eğrisi şeklinde çizilir (Şekil-3). Bu işlemin trafonun yağı ile doldurulmasından sonra tekrarlanması havada yapılandan fazla farklı bir eğri vermeyeceğini göstermiştir /4/.



Şekil-3. Kapasitif olarak iletilen darbe yöntemi.
Bir trafo sargısının yüksek ve alçak gerilim uçlarından ölçülen darbelerin oranının kısmi boşalma kaynağının yeri ile değişimi. Yatay eksen boşalma kaynağının yüksek gerilim ucuna olan uzaklığını gösterir /4/.

Bir trafonun dağılmış kapasiteli bir eşdeğer devre olarak düşünülmesi, bir kısmi boşalmanın hemen ardından sargılardaki gerilim dağılımının hesabı için kullanılabilir. Bu yolla da sargı uçlarındaki kapasitif iletilen darbelerin tepe değerlerinin oranı ile kısmi boşalma yeri arasındaki ilişkiyi gösteren kısmi boşalma yeri öngörme eğrileri çıkarılabilir. Trafo ikiden fazla uçlu ise birden fazla eğri çıkarılır. Çıkarılan kısmi boşalma öngörme eğrileriyle de enerjili bir trafoda bir kısmi boşalma olduğunda sadece uçlarındaki kısmi boşalmalardan kaynaklanan kapasitif iletilen darbelerin oranının ölçülmesiyle kısmi boşalma yeri bulunabilir /6/.

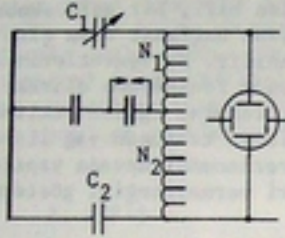
Yöntem düşük α değerli, yüksek endüktanslı ve seri kapasiteli sargılarda büyük doğruluk verir. Kapasitif darbelerin sürekli ve ölçülmesinin kolay olması yanında yöntemin sakıncaları daha karmaşık devrelerde sargılardaki zayıflamanın oldukça farklı olması ve birden fazla boşalma yeri olması durumunda yöntemin kullanılamamasıdır /6/.

2.3. Darbe Şekillerinin Karşılaştırılması

Darbe deneylerinde akım darbelerinin değişimleri kaydedilerek, deney sırasında olan boğalmaları bulmada kullanılabilir /4/. Bu amaçla bir kısmı boğalma ayar kaynağı sargı boyunca hareket ettirilerek bir osiloskoptan uçlardaki darbe şekillerinin değişimleri gözlemlenebilir. Her şekil sadece sargının bir noktasındaki boğalmayla ilgilidir. Bu şekilde bir işlem ile bir osilogram takımı elde edilip daha sonra karşılaştırma amacıyla kullanılabilir. Ölçme sargının her iki ucundan yapılarak daha fazla bilgi elde edilebilir. Yöntemin doğruluğu karşılaştırılan osilogramların iyi yorumlanmasına bağlıdır /1/, /3/, /4/, /5/.

2.4. Alçak Frekanslı Salınımların Ölçülmesi

Bir kısmı boğalma kaynağından sargı uçlarına ulaşan dalgaların üçüncü özelliği sönümlü alçak frekanslı salınımlardır. Sönümlü salınımlar, boğalmanın sargı üzerindeki konumu ile orantılıdır. Bu alçak frekanslı salınımlardan yararlanarak bir köprü yöntemi ile boğalma yeri bulunabilir (Şekil-4).



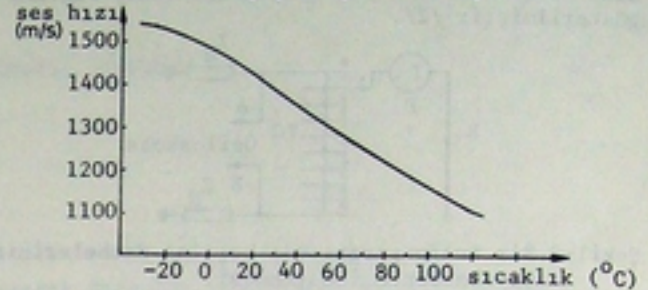
Şekil-4. Alçak frekanslı salınımları kullanarak köprü yardımıyla boğalma yeri bulunması /5/.
Dengede $C_1/C_2 = N_1/N_2$

Bunun için kolay olmasa da değişken yüksek gerilim kondansatörleri kullanmak gerekmektedir. Oluşturulan köprüde sargının her iki ucuna seri olarak bağlanan kapasitelerin oranı, boğalma noktasının her iki tarafında kalan sarım sayılarının oranı ile ters orantılıdır. Birden fazla boğalma yerinin varlığı yöntemin uygulanmasını zorlaştırır /4/, /5/.

3. AKUSTİK YER BULMA YÖNTEMİ

Transformatörlerdeki kısmi boğalmaların fiziksel olarak yerinin bulunması için kullanılan yöntemlerden biri de akustik yöntemdir. Bir trafoda kısmi boğalmalar, magnetik devre, sargılar, yalıtım elemanları ve yağ içinde yayılan, yansıyan, kırılan ve zayıflayan ses dalgalarına sebep olurlar. Bu sesin frekans spektrumu duyulabilir ses bölgesinden, ultrasonik (sesüstü) frekans bölgesine kadar oldukça geniştir. Kısmi boğalmalardan kaynaklanan bu sesler boğalmaların yerinin bulunması için kullanılabilir. Akustik yöntem, kısmi boğalmanın olduğu an ile boğalma sesinin bir alıcı tarafından alındığı an arasındaki zamanın ölçülmesi ve ses dalgalarının yayıldığı ortam içindeki hızının doğru olarak bilinmesi esasına dayanır. Boğalma sesini, trafodaki ve ortamdaki diğer seslerden ayırt etmek için ultrasonik frekanslarda çalışılır. Ses dalgalarının akustik enerjisi boğalmanın elektriksel enerjisine bağlı olarak değişeceğinden çok küçük boğalmaların dahi yerinin belirlenmesi için duyarlı ses alıcıları-

na ihtiyaç vardır /3/, /4/, /5/. Yer bulma işleminin doğruluğuna etkiyen değişkenlerden biri olan trafo yağındaki ses hızı, yayılan sesin frekansı, yağın sıcaklığı, yağ içindeki nem ve yabancı gazlar gibi birçok etkene bağlıdır /7/. Şekil-5'de yağ sıcaklığı ile ses hızının değişimi gösterilmiştir.



Şekil-5. Trafo yağında sıcaklıkla ses hızının değişimi /7/. (Ses frekansı 150 kHz)

Akustik yöntemin ilk uygulamaları çok eskilere dayanmaktadır. İlk zamanlarda yağlı trafolarla boğalmaların gürültüsü, uzun yalıtıma bir boru ile dinlenerek boğalma yeri belirlenmeye çalışılmıştır /3/. Kimura, 1939'da boğalma yeri bulmada bir ultrasonik alıcıdan yararlanmıştır. Çalışmasında trafo yağındaki boğalmalardan kaynaklanan sesleri belirlemek için 14,5-50 kHz rezonans frekanslı yağ emdirilmiş kristal bir mikrofon kullanmıştır /3/. 1950'de Beldi, güç trafolarında darbe deneyleri sırasında boğalmaların alçak frekanslı ses dalgalarını belirlemek için alıcıyı trafo içine yerleştirmiştir /3/. 1956'da Anderson, ultrasonik frekanslarda çalışan daha duyarlı alıcılar kullanarak yöntemi daha da geliştirmiştir /3/. Bunu gelişen teknoloji olanaklarına paralel olarak akustik yöntemin başarısını arttırıcı yenilikler izlemiştir.

Akustik yer bulma çalışmaları genellikle güç trafolarında darbe deneyi ve endüstriyel frekanslı gerilim deneyi sırasında yapılır.

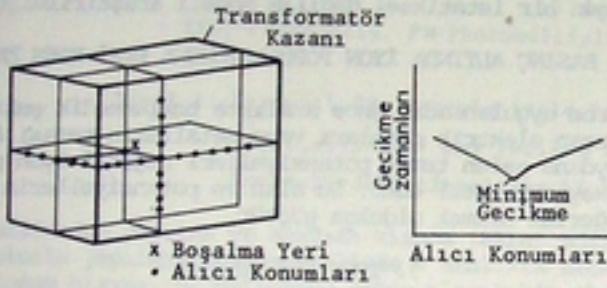
3.1. Darbe Deneyinde Akustik Yer Bulma

Darbe deneyi yapılırken bir güç trafosunda boğalma yerini akustik olarak bulma çalışması yapılabilir. Bunun için trafodaki boğalma sesleri bir alıcı tarafından alınıp, kuvvetlendirilerek tetikleme darbe generatöründen alınan bir işaret ile yapılan bir osiloskoba verilir. Osiloskobun tetikleme anı ile boğalma sesinin alıcıya ulaşması anı arasındaki süre ve yağdaki ultrasonik ses hızı (25°C'de yaklaşık 1400 m/s) dikkate alınarak boğalma yeri ile alıcı arasındaki uzaklık hesaplanır. Daha çok alıcı kullanarak veya alıcının yerini değiştirerek üçgenleme yoluyla yer bulmanın doğruluğu arttırılabilir. Bütün dünyada yaygın olarak kullanılan bu yöntemde normalde trafo kazanı dışına yerleştirilen ve rezonans frekansı 50-300 kHz arasında olan piezoelektrik kristalli alıcılar kullanılır. Magnetik devreden ve diğer yollardan alıcılara ulaşan ultrasonik işaretler yöntemin uygulanmasında karşılaşılan problemlerdir /3/, /5/.

3.2. Endüstriyel Frekanslı Gerilim Deneyinde Yer Bulma

Trafoların endüstriyel frekanslı gerilim deneyleri sırasında da benzer akustik (ultrasonik) yöntemler

kullanılabilir /3/. Genel olarak ölçülecek akustik işaretler darbe deneyinde ölçülenlerden çok daha küçüktür. Bu yöntemle ilgili olarak Örneğin Anderson, trafonun farklı yerlerine birçok alıcılar yerleştirilmiş bir düzen kullanmış ve farklı yerlerdeki alıcılara sesin ulaşma anları arası farklardan boşalma yerini tahmin etmeye çalışmıştır /3/. Oğihara'da bir alıcı ile trafo dışından ve değişik alıcı konumları kullanarak boşalma yeri bulunmuştur. Alıcının trafo dışında olması nedeniyle, dış parazitlerden etkilenmemesi için alıcı trafo yüzeyine yerleştirildikten sonra bir metal kapakla ekranlanmıştır /3/ (Bunun bir değişik yolu da alıcının yağ dolu ince plastik bir torba içine konulmasıdır). Allan'da, boşalmaları bulmak için trafo dışından bir yatay çizgi ve bir düşey çizgi halinde alıcılarını gezdirmiş ve bunu trafonun diğer yüzlerinde de tekrarlayarak minimum zaman gecikmeli akustik işaret alan alıcının konumunu belirlemiştir (Şekil-6) /3/.



Şekil-6. Trafo yüzeyinden farklı alıcı konumlarında akustik gecikme zamanlarını kullanarak boşalma yeri bulma /3/.

Akustik yöntemler elektriksel parazitlerden bağımsız olup, özellikle çekirdek tipi trafolarla iyi sonuçlar verirler /8/.

4. SONUÇ

Yüksek gerilim güç transformatörlerinde kısmi boşalmaların yerinin belirlenmesi için pek çok elektriksel ve akustik yöntem bulunmaktadır. Elektriksel yöntemler daha çok sargılardaki, akustik yöntemler de sargı dışında ve trafo yağı içindeki boşalmaların bulunmasında daha duyarlı ve yararlı olurlar. Transformatör yapısının karışıklığı yöntemlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu etkilemektedir. Kısmi boşalma yer bulma yöntemlerinin kusursuz olmadığı açıktır. Ayrıca başarı, yöntemi uygulayan kişinin yeteneğine, deneyimine, kullandığı yönteme ve olanaklarına bağlıdır. Yine de yer bulma da ± 1 ile ± 30 arasında bir hata beklenebilir.

Literatürde temelde yukarıda anlatılan yöntemlerden pek farklı olmayan fakat farklı adlarla verilen pek çok yer bulma yöntemi bulunmaktadır. Örneğin sargılarda elektriksel işaretlerin değişik frekanslardaki zayıflamalarını esas alan ve kapasitif iletilen darbe yöntemine benzeyen radyo frekans spektrum analizi ile yer bulma yöntemi gibi /8/ veya x ışınlarının boşalma başlangıç gerilimini düşürmesinden yararlanıp kısmi boşalma başlangıç geriliminin biraz altında bir gerilimle zorlanan bir trafoya farklı yönlerden ince bir x ışını demeti göndererek boşalma yeri bulma yöntemi gibi /1/.

Kısmi boşalma yer bulma yöntemleri genellikle bir

fazlı, basit sargılı, yağlı güç trafolarında incelenmiştir. Çok ve değişik sargılı ve uç fazlı trafolar ile kuru tip ve işletmedeki trafolar için uygulama olanakları araştırılmaktadır/9/. Daha duyarlı ölçü aletleri, hızlı ve hafızalı osiloskoplar, işaret analizörleri, bilgisayardan yararlanma gibi olanaklar her tipten trafodaki boşalma yerinin bulunmasına yardımcı olacaktır.

Transformatörlerde kısmi boşalma yeri bulma çalışmaları devam etmekle birlikte standard verilebilecek bir uygulama yoktur. Genellikle kullanılan yöntem, akustik yer bulma yöntemidir.

5. KAYNAKLAR

- 1/ Kreuger, F.H., Discharge Detection in High Voltage Equipment, London Press, 1964.
- 2/ Theong, A.T., Some Aspects of the Travelling Wave Detection Method for Locating Partial Discharges in Transformers, CIGRE, Vol.1, Report 12-09, 1968.
- 3/ Bartnikas, R., McMahon, E.J., Engineering Dielectrics, Vol.1, Chapter 6 by Dakin, T.W. and Chapter 10 by Harrold, R.T., American Society for Testing and Materials STP 669, 1979.
- 4/ Haraldsen, S., Winberg, K., Investigations on Different Partial Discharge Location Methods on Power Transformers, CIGRE, Vol.1, Report 12-09, 1968.
- 5/ James, R.E., Discharge Detection in High-Voltage Power Transformers, IEE Proceedings, Vol.117, No.7, pp.1352-1362, July 1970.
- 6/ Kallberg, B., Location of Partial Discharges in Power Transformers by Computation and Measurement of Capacitively Transmitted Voltage Pulses, IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol. PAS-99, No.2, pp.589-596, March/April 1980.
- 7/ Howells, E., Norton, E.T., Parameters Affecting the Velocity of Sound in Transformer Oil, IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol. PAS-103, No.5, pp.1111-1115, May 1984.
- 8/ Harrold, R.T., Sletten, A.M., Corona Location in Transformers by Radio Frequency Spectrum Analysis, Part I and II, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No.7, pp. 1584-1602, Sept./Oct. 1970.
- 9/ Howells, E., Norton, E.T., Location of Partial Discharge Sites in on-Line Transformers, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.1, pp.158-161, January 1981.