

Birincil Seviyede Kısmi Boşalma (PD) Ölçüm Sisteminin Oluşturulması

The Construction of Primary Partial Discharge Measurement System

İsmail KARAMAN, Ahmet MEREV, Serkan DEDEOĞLU, Volkan AYVA

TÜBİTAK UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü)
Yüksek Gerilim Laboratuvarı

ismail.karaman@tubitak.gov.tr, ahmet.merev@tubitak.gov.tr, serkan.dedeoglu@tubitak.gov.tr, volkan.ayva@tubitak.gov.tr

Özet

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımında yüksek gerilimin kullanılması vazgeçilmez bir olgudur. Yüksek gerilimin kullanılması ile enerji kayıpları düşürülürken, elektriksel yalıtım problemleri ortaya çıkmaktadır. Elektriksel yalıtım problemlerinin tespiti için laboratuvar ortamlarında birçok test gerçekleştirilmektedir. Bu testlerden en önemlilerinden biri de kısmi boşalma ölçümleridir. Kısmi boşalma ölçümleri ile hem hata büyüklüğü hem de hata yer tespiti yapılabilmektedir.

Bu çalışmada kısmi boşalma ölçümlerinde doğruluğunun artırılması için yeni test ve kalibrasyon metodları araştırılmış, ölçüm sistemleri için dijital darbe jeneratörü, kapasite ve direnç modülleri tasarlanmış, yüksek çözünürlüklü kaydedici ile ölçülen darbe işaretlerinin ortalama görünen yük değeri, yükselme süresi ve standart sapma değerlerini hesaplayabilecek yazılım geliştirilmiştir.

Abstract

Production, transmission and distribution of electrical energy are an indispensable phenomenon in the use of high voltage. Electrical insulation problems emerge while decreasing energy losses by the use of high voltage. Several tests are carried out in the laboratory to determine the electrical insulation problems. The one of the most important of these tests is the partial discharge measurements. PD measurements allow not only determination of defect effect but only determination of fault location.

In this paper, the new test and calibration methods for improving the accuracy of partial discharge measurement have been investigated; digital pulse generator, capacitance and resistance modules for measurement systems have been designed, the software has been implemented for calculation of apparent charge, rise time and standard deviation of partial discharges.

1. Giriş

Elektriksel kısmi boşalma (PD), iki iletken elektrot arasındaki yalıtkan malzemenin yapısındaki boşluklar ya da devamlılığındaki problemler sebebiyle tam bir köprü

oluşturamaması sonucu oluşan elektriksel boşalma ya da kıvılcımlar olarak tanımlanmaktadır. IEC 60270'deki tanımına göre ise kısmi boşalma, iletkenlere bitişik veya ayrıık yalıtımı sadece kısmi olarak aşarak ortaya çıkan, iletkenler arasında oluşan elektriksel boşalmalardır [1]. Diğer bir deyişle; iki aktif iletken arasındaki yalıtım malzemesindeki kısmi boşalmalardır.

2. Referans PD Ölçüm Sistemi

Elektriksel kısmi boşalma tespitleri birçok metod ile yapılabilir. IEC 60270'de standart PD test metodu, kuplaj kapasitörlü metod olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu metod kullanıldığında, kısmi boşalmada görünen yük değeri PD dedektörde analiz edilen PD işaretinin maksimum genlik değeri ile karşılaştırılarak tanımlanır. PD dedektörde ölçülen maksimum genlik değeri ölçüm düzeneğinde kullanılan kapasitans değerine ve ölçüm devresine bağlıdır. PD dedektörde tanımlanan PD darbeleri kalibreli PD işaretleriyle karşılaştırılarak PD görünen yük değeri hesaplaması yapılmış olur. PD kalibratörden uygulanan PD darbeleri periyodik olarak ölçülüp kontrol edilmesi gerekmektedir. IEC 60270 standardına göre PD kalibratörden uygulanan darbe parametre değerleri Tablo 1. de belirtildiği gibi olmalıdır.

Tablo 1. IEC 60270 standardına göre PD kalibratör belirsizlik değerleri [1]

Parametreler	Belirsizlik Değerleri
Görünen yük (q_0)	$\pm \%5$ veya ≤ 1 pC
Yükselme süresi (t_r)	$\pm \%10$ (≤ 60 ns)
Tekrarlama oranı (N)	$\pm \%1$

Programlanabilir darbe yük kalibratörü (PDCAL), TÜBİTAK UME de geliştirilen standart PD kalibratördür. PDCAL dijital darbe üretici ve kapasitör modüllerinden oluşmaktadır. PDCAL ile uygulanan PD darbeleri osiloskop ile ölçülerek karakterize edilir. PDCAL karakteristik belirsizlik değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu değerler gelecekte yapılması planlanan Uluslararası veya Ulusal karşılaştırmalarla doğrulanacaktır.

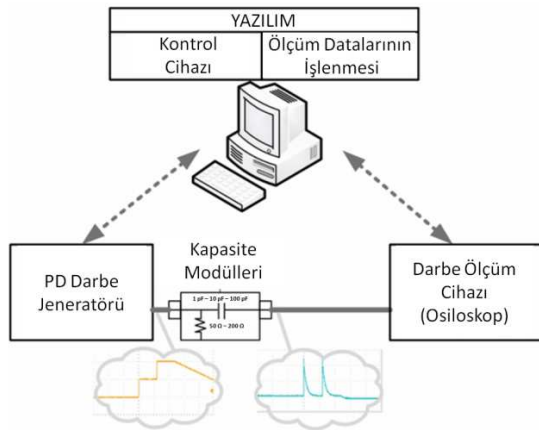
Tablo 2’de verilen darbe parametreleri Tablo 1’de verilen değerlere göre farklılıklar olduğu görülmektedir. Fakat bu parametrelerin karakteristikleri aynıdır. IEC 60270 de tanımlanan yükselme süresi Tablo 2’de belirtilen gecikme süresi ve üst limit frekans değerlerini yansıtmaktadır [1]. Standart PD kalibratör belirsizlik değerleri yükselme süresi ve görünen yük değeri Tablo 1’deki gibi olması gerekmektedir. PDCAL ile uygulanan darbe işaretlerinin görünür yük değeri 1 pC–1000 pC aralığındadır. Yükselme süresi 4ns ve frekans aralığı ise 10Hz - 1MHz olarak değiştirilebilmektedir.

Tablo 2. PDCAL Parametre Değerleri

PDCAL Belirsizliği 1 - 1000 (pC)	Parametreler	Belirsizlik Değerleri
	Görünen yük (q_0)	$\pm \% 1$ veya ≤ 0.2 pC
	Gecikme süresi (t_d)	$\pm \% 0.1$ (≤ 4 ns)
	Frekans Aralığı (f_{low} - f_{upper})	$\pm \% 0.2$

Standart PD kalibratörün sayısal darbe üretici, kapasitör-direnç modülleri, sayısal osiloskop ve ölçüm değerlerinin transferi ve işlenmesini sağlayabilecek yazılımdan oluşmaktadır. Bu sistem tasarımı Şekil 1’de verilmiştir. PD kalibratörün oluşturulmasında kullanılan, programlanabilir sayısal darbe üretici seçili farklı tiplerde darbeler uygulayabilmektedir.

PD darbelerini ölçeklendirmek için yüksek çözünürlüklü ve yüksek hızda örnekleme yapabilen sayısal osiloskop (kaydedici) kullanılmıştır (LeCroy WaveRunner). Osiloskobun karakteristik değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Görünür yük değeri aralıklarının ayarlanması için 1, 10 ve 100 pF değerlerindeki kapasitör modülleri kullanılmıştır. Sayısal osiloskop ve darbe üreticinin programlanması için Agilent VEE programı kullanılmıştır.



Şekil 1. Referans Kısmi Boşalma Ölçüm Sistemi Kavramsal Düzenegi

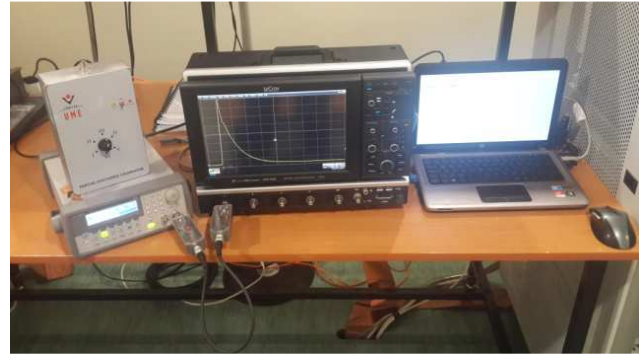
Tablo 3. Standart PD Kalibratör Karakteristiği

Sayısal Darbe Üretici (Agilent 33220A)	Kapasite Modülü	Darbe Ölçüm Cihazı (LeCroy WaveRunner)
20 MHz Darbe Jeneratörü 14-bit DAC Örnekleme Oranı: 50 MS/s Maksimum Genlik: 10 V	1 pF (X_1) 10 pF (X_2) 100 pF (X_3)	600 MHz Osiloskop Ort. 12-bit Örnekleme Oranı: 2GS/s Maksimum Genlik: 80 V

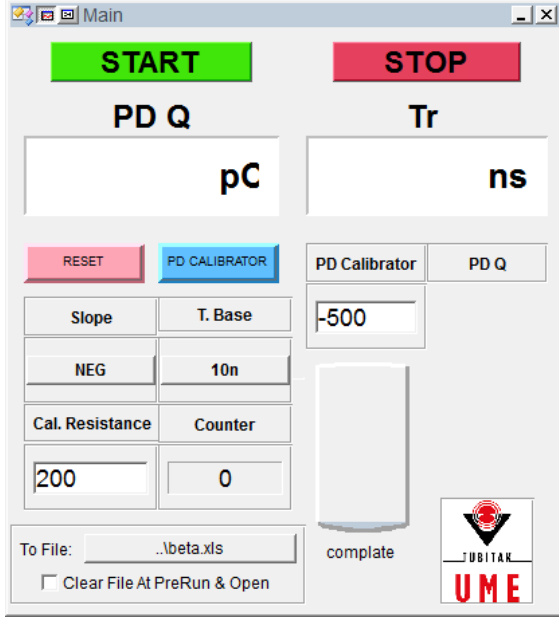
3. Standart PD Ölçüm Sistemi Düzenegi

Şekil 1’de kavramsal gösterimi yapılan PD ölçüm sisteminin uygulama gösterimi Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2 PD ölçüm sisteminin donanımsal gösterimidir. Şekil 3’de ise sayısal darbe jeneratörünün kontrolünün yapıldığı ve otomatik olarak darbe işaretlerinin işlenmesini sağlayan programın kullanıcı ara yüzü gösterilmiştir. Bu yazılım ile darbe şekli seçilebilir ve seçili darbe parametreleri olan şekil, büyüklük ve tekrarlama süresi tanımlanması yapılır.

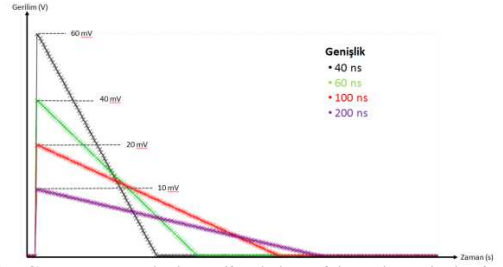
Yazılım kullanıcı yüzü kısmından uygulanan darbelerin ortalama görünür yük ve yükselme süresi değerleri hesaplanarak gözlemlenebilir. Ana ekran kısmında standart sapma ve belirsizlik değerleri ölçüm verilerinden hesaplanmaktadır. Bu yazılım ile osiloskop offset gerilim değerleri ve insan gözünün algılamayacağı hata parametrelerinden arındırılır. Bu yeni sistem yazılım kontrollü, GPIB haberleşmeli ve veri işlemeli bir yöntemdir.



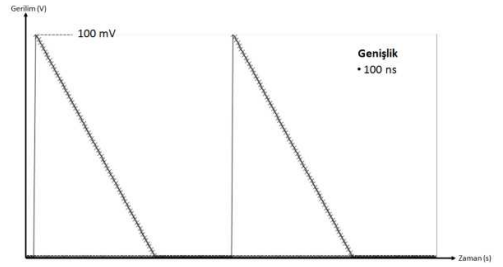
Şekil 2. Referans Kısmi Boşalma Ölçüm Sistemi Deneysel Düzenegi



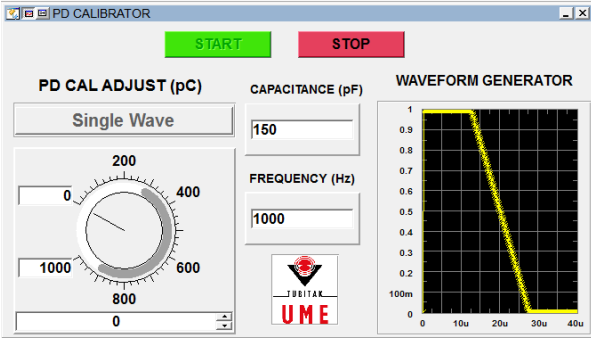
a) PD Dedektör Yazılımı (Agilent VEE)



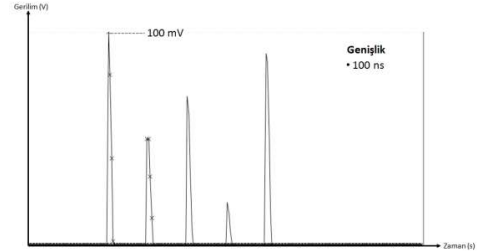
a) 20 pC görünür yük değerli tek kısmi boşalma darbe işareti



b) 20 pC görünür yük değerli çift darbeli kısmi boşalma işareti



b) PD Kalibratör Yazılımı (Agilent VEE)



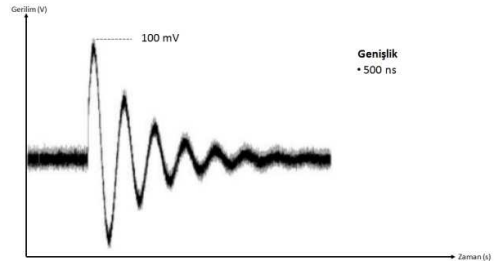
c) Farklı görünür yük değerli rastgele darbeli kısmi boşalma işareti

Şekil 3. PD Ölçüm Sistemi Yazılımı Kullanıcı Arayüzü

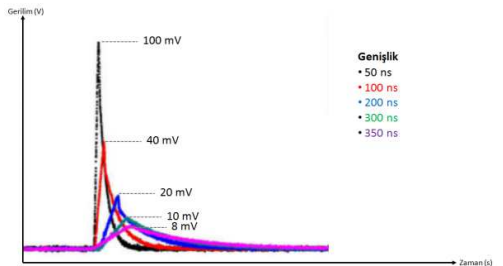
Şekil 4'de gösterilen kalibrasyon darbeleri programlanabilir PD kalibratör (PDCAL) tarafından uygulanır. Darbe şekilleri tek, çift, rastgele, salınan, uzun yükselme süreli darbeler olarak adlandırılır. Tek kısmi boşalma darbe işaretleri aynı yük değerlerinde (20 pC) farklı zaman süreli olarak gösterilmiştir. Çift darbeli işaret aralarında 100 ns olacak şekilde gösterilmiştir. Rastgele darbeli işaret 6 darbeden oluşan ve 20 μ s ara süreli durumu Şekil 4'de gösterilmiştir. Salınımlı darbe işareti 20 MHz salınım frekansına sahiptir. Uzun yükselme süreli darbe işaretleri yükselme süreleri farklı, görünür yük değerleri (20 pC) aynı olacak biçimde gösterilmiştir.

4. PD Kalibratör Kalibrasyonu

IEC 60270 standardına göre, PD kalibratörlerin analizleri için 2 farklı metod bulunmaktadır. Bunlardan ilki standart bir PD kalibratör ile analizi yapılacak PD kalibratörün PD ölçüm sistemi üzerinde karşılaştırılmasıdır. İkinci metod ise PD kalibratörden uygulanan darbe işaretlerinin bir direnç üzerinden osiloskoba uygulanması ve bu işaretlerin analizidir [1].



d) Salınımlı kısmi boşalma darbe işareti



e) Farklı yükselme süreli kısmi boşalma darbe işareti

Şekil 4. Farklı Kalibrasyon Darbeleri

İlk olarak tanımlanan metot karmaşık bir yapıya sahiptir. Çünkü bu yöntemin gerçekleştirilmesi için PD kalibratör, PD dedektör ve PD ölçüm düzeneğine ihtiyaç duyulmaktadır. İkinci yöntemde ise sadece darbenin parametre değerlerini hesaplanabilecek yazılım ve osiloskop yeterli olmaktadır. Bu çalışmada ikinci yöntem kullanılarak analizler gerçekleştirilecektir.



Şekil 5. PD Kalibratör Analizi (Alternatif Metot)

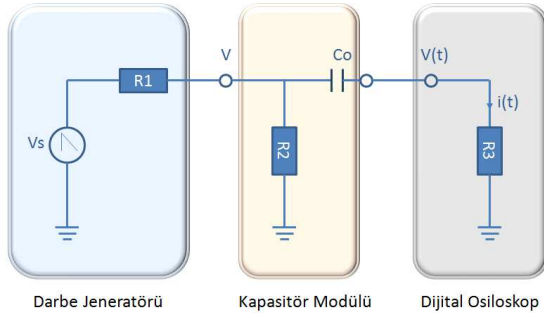
PD kalibratörün karakteristik değeri görünür yük (Q), değeri bilinen ve kararlı bir direnç yardımı ile darbe integrasyon metodu kullanılarak hesaplanır. Gerilim integrasyonu (1) bağıntısında tanımlanmıştır ve yöntem olarak yazılımsal integrasyon hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak, PDCAL yapısında görünür yük ile yükselme ve gecikme sürelerinin ortalamaları hesaplanır, standart sapma değerleri belirlenir ve direnç üzerinde oluşan gerilim sayısal osiloskop yardımı ile analiz edilir.

$$q = \int i(t) \cdot dt = Ct \cdot \Delta U(t) \quad (1)$$

50 Ω değerindeki R_i ölçüm direncine seri bağlı osiloskop ile analiz edilen darbenin yükselme süresi t_r , darbenin yükselme anındaki %10 ve %90 arasında kalan süre olarak tanımlanmaktadır. Darbenin başlangıç anındaki %10 değeri ile sönümlenme anındaki %10 değeri arasında kalan süre ise gecikme süresi t_d olarak tanımlanmıştır.

5. PD Ölçüm Sistemi Belirsizlik Hesaplamaları

PD kalibratör belirsizliğini tanımlamak için model fonksiyonun oluşturulması gerekmektedir. Model fonksiyonu belirlenmesinde devre modelinden faydalanılmaktadır. Şekil 6'da ölçüm sisteminin model devresi gösterilmiştir.



Şekil 6. Referans PD Ölçüm Sisteminin Model Devresi

Burada, V_s darbe jeneratörünün kaynak gerilimini, V darbe üreticinin çıkış gerilimini, R_1 darbe üreticinin çıkış empedansını, R_2 kapasitör modülünün yük empedansını, C_0 kapasitör modülündeki kuplaj kapasitörü, R_3 sayısal osiloskobun giriş empedansını, $i(t)$ R_3 direnci üzerinden geçen devre akımını ve V_n ise devrenin çıkış gerilimini ifade etmektedir [2].

Devrenin darbe görünür yük değeri R_3 direnci üzerinden akan devre akımının integrasyonu alınarak hesaplanmaktadır. Bu

hesaplamaındaki integrasyon değeri ile kapasitör üzerindeki yük değeri aynıdır. Görünür yük değeri (2) ve (3) bağıntılarındaki gibi ifade edilir [3,4].

$$q = \int i(t) \cdot dt \quad (2)$$

$$q_0 = C_0 \cdot U_0 \quad (3)$$

R_3 direnci üzerinden geçen $i(t)$ akımını analiz edilerek, osiloskopda gözlemlenen darbenin görünür yük hesaplaması (2) yardımıyla (4) bağıntısındaki gibi elde edilir [3,4].

$$q = \sum_{n=1}^N \frac{V_n}{R_3} \cdot \Delta T \quad (4)$$

Burada, V_n n. örnekleme gerilim değeri, ΔT ise örnekleme arasındaki süredir.

Referans PD kalibratörün belirsizlik hesaplamasında hassasiyet katsayısı ve devrede kullanılan elemanların standart belirsizlik değerleri kullanılmaktadır [4]. Ayrıca ölçümlerde kullanılan darbe üreticinin ve osiloskobun kalibrasyon sertifikalarındaki belirsizlik değerleri, PD kalibratörün belirsizlik hesaplamalarında göz önünde bulundurulmaktadır. Tüm hassasiyet katsayıları ve kullanılan elemanların standart belirsizlik değerleri göz önünde bulundurularak PD kalibratörün standart belirsizlik değeri %95 güvenilirlik seviyesinde hesaplanır.

6. Referans PD Ölçüm Sistemi Tanımlama

Standart kısmi boşalma ölçümü için tasarlanmış bu sistem, yüksek örnekleme oranına ve oldukça kolay programlanabilme özelliğine sahiptir. Buna ek olarak standart PD kalibratörden istenilen yük değerlerinde darbeler uygulanabilmekte ve süre ayarları kolaylıkla yapılabilmektedir.

Standart PD kalibratör yapısındaki darbe jeneratöründen tek, çift, rastgele, salınan ve uzun yükselme süreli darbe şekilleri uygulanmakta ve kapasite modülleri ile 1 - 1000 pC aralığında yük değeri ayarlanabilmektedir. Yazılımsal PD kalibratör kullanılarak insan gözüyle gözlemlenemeyen hatalar yok edilir ve ölçüm datalarının sapma değerleri düşürülerek, görünen yük değerinin ölçüm doğruluğu artırılır. Buna ek olarak tasarlanmış standart PD kalibratör ile PD ölçüm sisteminin doğru ölçüm yapabilme kabiliyeti de artırılarak ve PD kalibratörün belirsizlik değeri PD ölçüm sistemi belirsizlik değerine çok yakın değer olarak da göz önünde bulundurulabilir.

7. Sonuç

Standart PD kalibratörünün analizleri tek, çift, rastgele, salınan ve uzun yükselme süreli darbeler uygulanarak TÜBİTAK UME Yüksek Gerilim Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu referans PD kalibratörün görünür yük ve yükselme süresi düşük belirsizlik değerlerine sahiptir. Görünür yük ve yükselme süresi için hesaplanan belirsizlik değerleri IEC 60270 de tanımlanan değerlere göre oldukça küçüktür. Geliştirilmiş olunan standart PD kalibratör istenilen darbe şekillerine göre uygulanabilen, görünür yük değeri ve yükselme süresi hesaplanarak programlanabilen ulusal alandaki ilk referans PD kalibratördür. Yazılımsal teknolojinin

kullanılması ile insan kaynaklı hataların yok edilmesi sağlanmış ve yapılan doğru ölçümler ile mevcut kalibrasyon teknolojisi gelişimi sağlanmıştır.

Buna ek olarak tasarlanan referans PD ölçüm sistemi ise, ülkemizdeki elektromekanik sanayi tarafından kullanılan PD kalibratör ve PD dedektör sistemlerinin kalibrasyonu için kullanılabilir.

8. Kaynaklar

- [1] IEC 60270, High Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements, 2000.
- [2] M. Chiampi; G. Crotti; Y. Hu; A. Sardi, Calibration of partial discharge measuring systems by a reference impulse charge generator, 16. IMEKO TC4 Sempozyumu, İtalya, 2008.
- [3] F.H Kreuger, Partial discharge detection in High Voltage Equipment, Butterworth & Co.Ltd., Londra, 1989.
- [4] K. Schon, H. D. Valentini, "Programmable Impulse Charge Generator for Calibrating PD Instrument", in 10th International Symposium on High Voltage Engineering, 1997.