



Design and implementation of smart impulse voltage calibrator

Ahmet Merev*

TÜBİTAK National Metrology Institute, Gebze, 41470, Kocaeli, Turkey

Highlights:

- Construction of impulse calibrator
- Generation of reference lightning and switching impulses
- Uncertainty analysis of reference calibrator

Keywords:

- Metrology
- High-voltage techniques
- Voltage measurement
- Impulse voltages
- Calibration

Article Info:

Research Article
Received: 17.06.2018
Accepted: 12.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.434299

Acknowledgement:

The author thanks to Serkan Dedeoğlu, İsmail Karaman and Volkan Ayva for their supports.

Correspondence:

Author: Ahmet Merev
e-mail: ahmet.merev@tubitak.gov.tr
phone: +90 262 6795000 / 4300

Graphical/Tabular Abstract

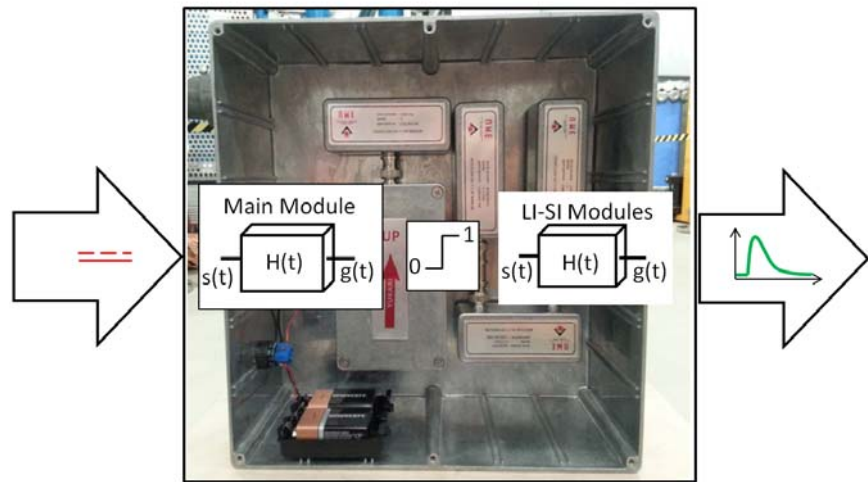


Figure A. General view and diagram of the input and output signals of calibrator

Table A. Uncertainty budget of implemented reference impulse calibrator

Impulse voltage type	Uncertainties (Coverage factor k=2)			
	Peak value (U_p)	Front time (T_f)	Peak time (T_p)	Time to half value (T_2)
Lightning	0.03%	0.3%	N/A	0.1%
Switching	0.1%	N/A	0.2%	0.04%

Purpose: In this study, new generation reference calibrator has been designed and implemented by considering with different wave-shape properties and higher output impedances.

Theory and Methods:

Design, construction and uncertainty calculations of high accuracy calibrator having positive and negative polarity properties up to 600 V are provided for the calibration of digital recorders in lightning and switching pulse voltages.

Results:

The estimated uncertainties for lightning impulses are 0.03% for peak value, 0.3% for front time and 0.1% for time to half value. For switching impulses, the corresponding values are 0.1% for peak value, 0.2% for peak time and 0.04% for time to half value. The uncertainties of the output impulse of the calibrator meet the requirements of relevant international measuring standards such as IEC 60060-2, IEEE Standard 4, etc.

Conclusion:

The lightning and switching impulse calibrator up to 600V has been developed with high impedance output for impulse voltage metrology. The traceability of impulse voltage measurements is determined by using national standards of direct voltage, capacitance, and resistance. The calibrator based on this work has been constructed with 10 modules for the calibration of digital recorders with different LI and SI waveforms.



Akıllı darbe gerilimi ölçümleyicinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi

Ahmet Mersev*^{ID}

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze Yerleşkesi Gebze, Kocaeli, , 41470, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Darbe gerilim ölçümleyici yapımı
- Referans yıldırım ve anahtarlama darbelerinin üretimi
- Referans ölçümleyicinin belirsizlik hesaplamaları

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.06.2018

Kabul: 12.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.434299

Anahtar Kelimeler:

Metroloji,
yüksek gerilim tekniği,
gerilim ölçme,
darbe gerilimleri,
ölçümleme

ÖZET

Yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimi ölçmelerinde kullanılan sayısal kaydedicilerin ölçümlemesi (kalibrasyonu), yüksek darbe gerilimlerinin izlenebilirliğinde büyük önem taşır. Bu nedenle darbe gerilimi ölçümleyicileri (kalibratörleri), izlenebilirlik zincirinde çok önemli bir rolü olan cihazlardır. Sayısal kaydedicilerin ölçümlemesinde, gerilimin tepe değeri ve zaman parametrelerinin referans değere göre sapması, farklı çözünürlükte ve ölçüm aralıklarında belirlenmektedir. Bir yüksek darbe gerilimi ölçme sisteminin ölçek faktörü ve ölçülen zaman parametrelerindeki sapmalar, ölçümleyiciden uygulanan referans değerlerle karşılaştırılarak belirlenir. Bu çalışmada, yüksek darbe gerilim ölçmelerinin izlenebilirliğinde kullanılabilecek özelliklere sahip, akıllı bir darbe gerilimi ölçümleyici tasarımı ve gerçekleştirilmesi için yapılan çalışmalar sunulmuştur. Yapımı gerçekleştirilen ölçümleyici, TÜBİTAK UME'de (Ulusal Metroloji Enstitüsü), Türkiye'nin birincil seviye referans standart ölçümleyicisi olarak kullanılmaktadır. Tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen ölçümleyicisi, Uluslararası Ölçüler ve Ağırlıklar Birliğine (BIPM) üye ulusal yüksek gerilim laboratuvarları arasında 50 V-600 V aralığındaki yıldırım ve anahtarlama darbelerinin izlenebilirliğini en düşük belirsizlik değerinde sağlayan birincil referanstır. Referans yıldırım darbe gerilimlerinde belirsizlik değerleri tepe değer (U_P) için % 0,03, cephe süresi (T_1) için % 0,30 ve sırt yarı değer süresi (T_2) için % 0,01'dir. Referans anahtarlama darbe gerilimlerinde ise belirsizlik değerleri tepe değer (U_P) için % 0,10, tepe değer süresi (T_P) için % 0,20 ve sırt yarı değer süresi (T_2) için % 0,04'tür.

Design and implementation of smart impulse voltage calibrator

H I G H L I G H T S

- Construction of impulse calibrator
- Generation of reference lightning and switching impulses
- Uncertainty analysis of reference calibrator

Article Info

Research Article

Received: 17.06.2018

Accepted: 12.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.434299

Keywords:

Metrology,
high-voltage techniques,
voltage measurement,
impulse voltages,
calibration

ABSTRACT

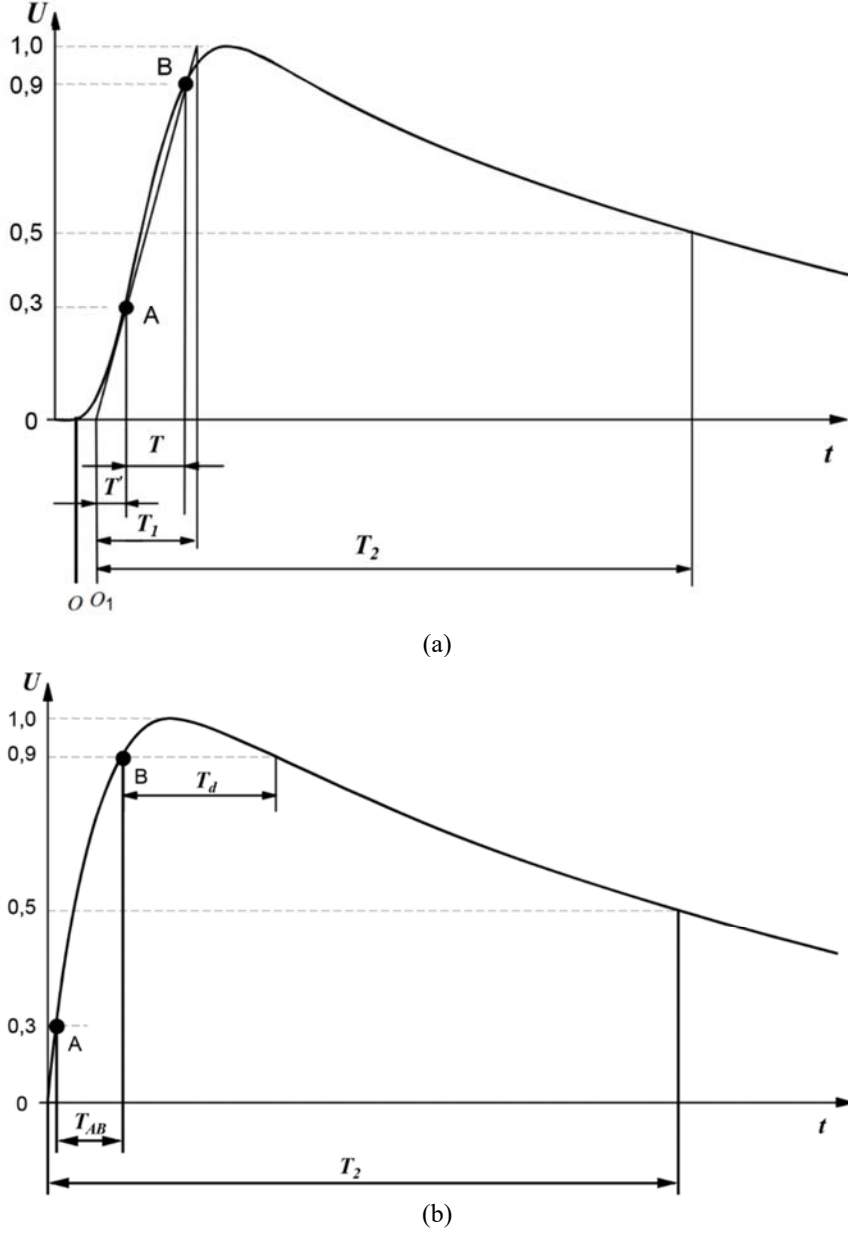
The calibration of digital recorders has special significance for the traceability of high voltage impulse measuring systems to the national or international references. Lightning impulse (LI) and switching impulse (SI) calibrators are the main important devices for this purpose. In a calibration of a digital recorder, the deviations of the peak value and time parameters according to the reference values are determined at different resolutions and each measuring range. The scale factor and the deviations of the time parameters of digital recorder result from a comparison of measured values with the corresponding reference values applied from the impulse calibrator. This paper summarizes the design, implementation and performance of a new design calculable impulse voltage calibrator. The constructed calibrator is used as a primary reference standard in National Metrology Institute of Turkey. The calibrator designed and implemented in this work is the primary reference for providing the lowest uncertainty in the traceability of lightning and switching pulses in the range between 50 V and 600 V between national high voltage laboratories affiliated to the International Bureau of Weights and Measures (BIPM). The estimated uncertainties of the LI calibrator are 0.03% for the peak value, (U_P), 0.30% for the front time, (T_1), and 0.10% for the time to half value, (T_2). For the SI calibrator, they are 0.10% for the peak value, (U_P), 0.20% for the front time, (T_1), and 0.04% for the peak time value, (T_P).

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji iletim ve dağıtım sistemleri üzerindeki bozucu etkilerin nedeni, şebekeye doğal veya dolaylı yollardan etki eden geçici gerilim artışlarıdır. Bunlardan en önemlileri doğada oluşan yıldırım gerilimleri ve şebeke içerisindeki açma kapama (anahtarlama) olaylarının yaratmış olduğu anahtarlama darbe gerilimleridir. Güç sistemlerinin tasarımı, bu tür geçici gerilimlerin etkilerini en aza indirecek şekilde yapılmaktadır. Ancak yine de öngörülemez aşırı gerilim genlikleri veya sistem içerisinde bulunan donanımların yalıtım zayıflıkları, tüm sisteme ciddi boyutlarda zarar verebilmektedir. Bu yüzden güç sistemlerinde kullanılan donanımların tasarımı, yalıtım koordinasyonu kavramına ve standartlarına uygun olarak yapılmakta ve üretimi gerçekleştirilen donanımlar, şebeke içerisinde kullanılmadan önce laboratuvar ortamında karışılacakları aşırı gerilimlere göre test edilmektedir. Yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimlerinin laboratuvar ortamlarında üretilmesi ve ölçülmesi için çeşitli Uluslararası standartlarda tanımlar ve koşullar belirtilmiştir [1-4]. Günümüzde üretimi gerçekleştirilen elektromekanik ürünlerin darbe gerilimler altındaki yalıtım deneyleri, sadece standart dalga şekline sahip yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimler altında değil, IEC 60060-1:2010 standardında da belirtildiği gibi kombine deneyler adı altında birçok parametrenin ölçülmesine ve test edilmesini zorunlu kılmaktadır [5-6]. Yüksek darbe gerilimleri, tek katlı darbe gerilimi üretici devresi olarak temeli Charles P. Steinmetz'in (1865 – 1923) oluşturduğu, 1924 yılında Erwin Otto Marx (1893 – 1980) tarafından çok katlı darbe gerilimi üretici olarak geliştirilen ve bugün Marx üreteçleri olarak bilinen özel devreler tarafından üretilmektedir [7-8]. Sadece standart yıldırım ve anahtarlama darbe üreteçleri değil, özellikle izolatör teknolojinde ve askeri ekipmanların deneylerinde kullanılan, yükselme süreleri 100 ns ve altında olan çok hızlı darbelerin üretilmesinde de bu temel prensip devreleri kullanılmaktadır [9-10]. Yıldırım darbe gerilimlerini tanımlayan dört temel parametre bulunmaktadır. Bunlar tepe değeri (U_p), cephe süresi (T_1) ve sırt yarı değer süresi (T_2) ve kutuptur. Anahtarlama darbe gerilimlerinde de benzer biçimde tepe değeri (U_p), tepe süresi (T_p) ve sırt yarı değer süresi (T_2) ve kutupları ile tanımlanırlar. Uluslararası standartlar, darbe gerilimlerinin referans zaman parametrelerini yıldırım darbe gerilimleri için $1,2/50 \mu s$ (T_1/T_2) ve anahtarlama darbe gerilimleri için $250/2500 \mu s$ (T_p/T_2) biçiminde tanımlanmıştır [2, 3]. İlgili dokümanlara göre standart darbe gerilimi dalga şekilleri, Şekil 1'de gösterilmiştir.

Yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimlerinin ölçülmesinde ise IEC 60060-2 standardının 1962 yılında basılan ilk sürümünden yayında olan en son 2010 sürümüne kadar birçok teorik ve deneysel yaklaşımlar gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yöntemleriyle ilgili olarak en son sürümün tekrar güncellenmesi için IEC bünyesinde kurulan ve IEC TC-42 teknik komitesi altında faaliyet gösteren teknik çalışma grubunun çalışmaları devam etmektedir [11-13]. IEC 60060-2 standardına göre yıldırım ve anahtarlama darbe

gerilimlerinin ölçümü için gerekli ölçüm sistemi, çeşitli ölçüm cihaz ve yardımcı elemanlarının birleşiminden oluşmaktadır. Tipik bir yüksek gerilim ölçüm sistemi, yüksek gerilim bölücüsü veya ölçü transformatörü adı verilen dönüştürücü cihazdan, multimetre, voltmetre, osiloskop veya sayısal kaydedici adı verilen ölçüm cihazlarından ve ölçüm kablosu veya empedans uyumlaştırıcı ara biriminden oluşan elemanlardan oluşmaktadır. Bu üç farklı türdeki cihaz ve elemanların bir arada kullanıldığı sistemlere kısaca yüksek gerilim ölçüm sistemi adı verilmektedir. Deney ve ölçümleme (kalibrasyon) düzeneklerinin kullanılabilme yeterliliğine sahip olabilmesi için ölçüm sisteminin belirli ölçütleri sağlaması gerekir. Bu ölçütler uluslararası standartlarda tanımlanmıştır ve bu koşulları sağlayan sistemlere “kabul edilebilir ölçüm sistemleri” adı verilmektedir [3]. Bir yüksek gerilim ölçüm sisteminin kabul edilebilir olmasının en önemli koşullarından birisi, uluslararası yedi temel ölçü birimine (SI) izlenebilir olmasıdır. Ölçüm sistemlerinin izlenebilirliği ölçümlenmelerle gerçekleştirilmektedir. Yıldırım ve anahtarlama yüksek darbe gerilim ölçüm sistemlerinin ölçülmesi; ölçümlenecek ölçüm sistemi ile referans olarak kabul edilen ölçüm sisteminin karşılaştırmalı ölçümlerinin aynı anda gerçekleştirilerek ölçek faktörünün ve zaman parametrelerindeki hatanın belirlenmesi biçimde gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem, önerilen referans bir yöntem olmasına rağmen, standartlara göre farklı yöntemler de bulunmaktadır. Darbe gerilimi ölçüm sistemi içerisindeki ölçüm donanımlarının tek başına çeşitli referanslar kullanılarak ölçülmesi alternatif yöntemlerden biridir. Sayısal kaydediciler, IEC 61083-1 standardının gerekliliklerine uygun olması durumunda yüksek darbe gerilim ölçüm sistemi içerisinde kullanılması uygundur [3, 4]. Sayısal kaydedicilerin ölçek faktörünün ve zaman parametrelerindeki tek başına belirlenmesi için referans darbe gerilimlerine gereksinim duyulmaktadır. Bu referans büyüklükler yıldırım ve anahtarlama darbe gerilim ölçümleyicisinden (kalibratöründen) uygulanabilmektedir [14-16]. Bu çalışmada yüksek darbe gerilim ölçüm sisteminin en önemli yapı taşlarından birisi olan sayısal kaydedicilerinin yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimlerinde ölçülmesi için yüksek doğruluğa sahip, pozitif ve negatif kutuplu ve 600 V'a kadar gerilimler üretebilen bir ölçümleyicinin tasarımı, yapımı ve belirsizlik hesapları sunulmuştur. Referans ölçümleyici (kalibratör), giriş empedansı yüksek ($\geq 1 M\Omega$) sayısal kaydedicilerin ölçümlenmelerini gerçekleştirmek için düşük çıkış empedansına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu şekilde referans darbe gerilimi işaretlerinin gürültüsü ihmal edilebilir seviyeye çekilerek ölçüm düzeneğindeki yükün değişimine bağlı olarak ortaya çıkacak ölçüm hatalarının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Günümüzde yüksek çözünürlüğe ve örnekleme sürelerine sahip kaydedicilerinin kullanımının yaygınlaşmasıyla, düşük belirsizliğe sahip ölçümleyicilere olan gereksinim artmıştır. Bu çalışmaya konu olan ölçümleyicinin tasarımı ve yapımında 1000 V dielektrik dayanıma sahip, sıçramasız (bounce-free) çalışma özelliği sebebiyle 600 V'a kadar kararlı çalışabilen cıva



Şekil 1. Standart a) yıldırım ve b) anahtarlama darbe gerilimi dalga şekilleri
(Waveforms of standard lightning (a) and switching (b) impulse voltage)

kontaklı hızlı röleler kullanılmıştır [14-17]. Ölçümleyicilerin çıkışında, kaçak endüktansı ve kapasitesi ihmal edilebilir seviyede olan hassas devre elemanları kullanılmıştır. Darbe gerilimi ölçümlerinde kullanılan sayısal kaydedicilerinin IEC 61083 standardına göre kabul edilebilir olabilmesi için genlikte % 0,7 ve zaman parametrelerinde % 2'den daha düşük belirsizliğe sahip olması gerekmektedir. Bu koşulları sağlayabilecek kaydedicilerin ölçümlemesi, metroloji alanında kullanılan ölçümleyicilerle gerçekleştirilmektedir. Bu ölçümleyicilerin belirsizlik değerleri genlik için % 0,14 ve zaman parametreleri için % 0,5 olup en fazla 300 V'a kadar referans darbe gerilimleri üretebilmektedir. IEC 60060-2 standardının gereklilikleri sağlamasına rağmen, farklı belirsizlik yeteneğine sahip ölçümleme

laboratuvarlarının sayısının artmasıyla, bir başka deyişle izlenebilirlik zincirinin büyümesi sebebiyle, darbe ölçümlerinde belirsizlik değerlerinin aşağılara düşürülmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu konuda birçok özel ölçüm sistemlerinin geliştirilmesi ve hesaplama tekniklerinin iyileştirilmesi için çalışmalar bulunmaktadır [18-21].

Bu çalışmayla birlikte tasarım ve yapımı gerçekleştirilen yıldırım ve anahtarlama darbe referans ölçümleyicisiyle 3 önemli yenilik ortaya konmuştur. Bunlardan birincisi sıçramasız çalışma özelliğine sahip özel tasarım cıva kontaklı hızlı röleler sayesinde ölçümleyicinin gerilim seviyesi emsallerininkinden 2 katına çıkartılmıştır. Böylece herhangi bir bozucu etki olmaksızın sayısal kaydedicilerin

doğrusallığı 600 V'a kadar tespit belirlenebilmektedir. İkincisi, günümüzde metrolojik uygulamalarda kullanılan ölçümleyicilerden yıldırım darbe ölçümleri için 0,84/60 μ s ve 1,56/60 μ s gibi en fazla 2 farklı dalga şekillerinde darbe gerilimleri uygulanabilirken, bu çalışmaya konu olan ölçümleyicisi 0,84/60 μ s, 0,84/40 μ s, 1,2/50 μ s, 1,56/40 μ s ve 1,56/60 μ s gibi 5 farklı dalga şekillerinde referans darbeler uygulayabilmektedir. Bu özellik, ölçümlemesi yapılan sayısal kaydedicilerinin karakterizasyonunu 1,2/50 μ s standart darbe şeklinin alt ve üst tolerans sınırlarındaki farklı dalga şekillerinde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen ölçümleyicinin sağladığı en önemli diğer farklı özellik ise belirsizlik değerlerindeki iyileştirmelerdir. Referans ölçümleyicinin yıldırım darbe gerilimlerdeki genlik ve zaman parametreleri belirsizlik değerleri, günümüzde kullanılan ölçümleyicilerin belirsizlik değerlerinden % 40 ile % 80 arasında değişen oranlarda daha düşüktür.

2. AKILLI DARBE GERİLİMİ ÖLÇÜMLEYİCİ (SMART IMPULSE VOLTAGE CALIBRATOR)

Darbe gerilimi ölçümleyicileri tek katlı darbe gerilimi üreteçlerinin temel ilkesine göre çalışmaktadır. Yükleme kondansatörünün doğru gerilimle yüklenmesinin ardından istenilen gerilim seviyesinde ve farklı dalga şekillerinde ölçüm devresine boşaltılmaktadır. Farklı darbe gerilimi şekillerinin oluşturulmasında kullanılan yükleme ve boşalma direnç ve kondansatörleri, gerilim ve sıcaklık bağılılığı ihmal edilebilecek kadar düşük ve endüktansız hassas elemanlardan seçilmektedir.

2.1. Tasarım ilkesi (Design principle)

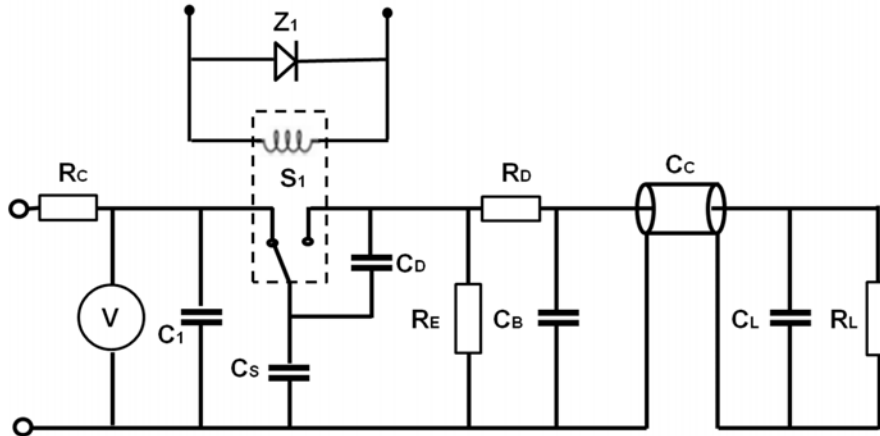
Yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimi ölçümleyicisi, içerisinde yazılım ve donanım olan bir tür ölçümleyici sistemidir. Sistemde donanım içerisindeki en önemli yapı taşı anahtarlama modülüdür. Tetikleme sonucunda ortaya çıkan nano saniye mertebelerindeki gecikme ihmal edilebilir bir seviye kabul edilmekte ve belirsizliğe etkisi bulunmamaktadır. Anahtarlama modülünün en önemli elemanı çok hızlı çalışabilen ve özel olarak üretilen cıva

kontaklı röledir. Günümüzde yarı iletken teknolojisi çok gelişmiş olsa da, darbe gerilimi ölçümleyicilerinde olması gereken düşük gecikme süreli ve 600 V mertebesinde anahtarlama özelliği, cıva kontaklı röle kullanımını bu çalışmada zorunlu hale getirmiştir. Röle, cam bir kapsül içerisindeki bir sargının manyetik olarak indüklenmesiyle çalışmaktadır. Röle, ihmal edilebilir seviyede bir gecikmeye sahip olduğundan ideal bir anahtarlama elemanı gibi çalışmaktadır. Şekil 2'de ölçümleyicinin genel prensip devre şeması gösterilmiştir.

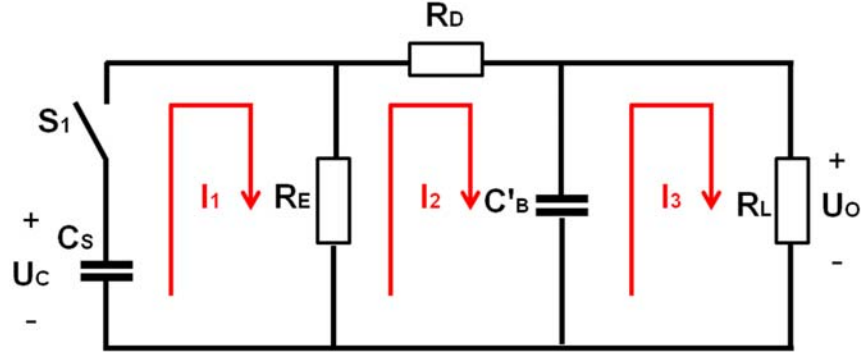
C_S yükleme kondansatörü değeri bilinen yüksek doğru gerilimle yüklenir ve Şekil 2'de S_1 olarak gösterilen cıva kontaklı rölenin kapanmasıyla biriken enerji yük kondansatörüne aktarılır. Rölenin sol tarafındaki devrede bulunan R_C akım sınırlayıcısının direnci, V ile gösterilen devredeki yükleme gerilimini kontrol eden voltmetrenin giriş empedansı ve C_1 depolama kondansatörünün indüktif etkisi bulunmamaktadır. Çünkü anahtar açık pozisyonuna geldikten sonra bu devre elemanlarının yer aldığı kısım, üretimin çıkış işaretine etki etmeyen pasif bölümünde kalmaktadır. \dot{U}_p , T_1 , T_p ve T_2 parametreleri, daha önce değerleri düşük belirsizlikle tespit edilen C_S ve C_B kondansatörleri ve R_E ve R_D dirençlerinden hesaplanmaktadır. Bu devre elemanlarına ek olarak devredeki ölçüm kablolarından, uyumlaştırıcı elemanlardan, ölçümleyicinin bağlı olduğu sayısal kaydedicinin giriş uçları arasındaki kapasitif C_L ve empedans etkileri R_L de dalga şekli hesaplamalarına etki etmektedir. Devrede yer alan C_D kondansatörü, rölenin anahtarlama sonucunda ortaya çıkan geçici etkilerin sönmülmesi amacıyla kullanılmaktadır ve devredeki darbe geriliminin şekline etkisi bulunmamaktadır [15-22].

2.2. Çalışma ilkesi (Working principle)

Darbe gerilimi ölçümleyicinin Şekil 2'den türetilmiş prensip devre şeması Şekil 3'te verilmiştir. S_1 anahtarı kapalı duruma geldiğinde, C_S kondansatöründe depolanmış olan yük devredeki dirençler üzerinden ölçümleyicinin çıkış uçlarında U_0 darbe geriliminin oluşmasına yol açar. Devredeki C_B kondansatörü, C_L yük etkisi ve C_C kablo kapasitelerinden



Şekil 2. Ölçümleyicinin prensip devre şeması (Principle circuit diagram of calibrator)



Şekil 3. Darbe gerilimi parametrelerinin oluşturulması için sadeleştirilen eşdeğer devre
(Simplified equivalent circuit for determination of impulse voltage parameters)

oluşan toplam kapasitif etki kapasitesi $C'_B = C_B + C_L + C_C$ şeklinde ifade edilmiştir. Darbe gerilimi ölçümleyici eşdeğer devresinin analitik çözümü için Şekil 3'teki devre yapısı göz önünde bulundurularak Eş. 1 bağıntısı oluşturulmuştur.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{sC_S R_E} & -R_E & 0 \\ -R_E & R_E + R_D + \frac{1}{sC'_B} & -\frac{1}{sC'_B} \\ 0 & -\frac{1}{sC'_B} & -\frac{1}{sC'_B} + R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_C}{s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Devrenin çıkış gerilimi $U_o = R_L I_3$ hesabı ve (1) eşitliğindeki matris yapısı göz önünde bulundurularak darbe gerilimi için s domeninde Eş. 2 ile yazılır.

$$U_o(s) = U_C \frac{d}{as^2 + bs + c} \quad (2)$$

Burada;

$$a = C'_B C_S R_D R_E R_L \quad (3)$$

$$b = C_S R_E (R_D + R_L) + C'_B R_L (R_E + R_D) \quad (4)$$

$$c = R_E + R_D + R_L \quad (5)$$

$$d = C_S R_E R_L \quad (6)$$

Çıkış geriliminin zaman domeninde çözümünde, Eş. 2 denklemin köklerinin belirlenmesi için Eş. 7 denklemini kullanılır.

$$U_o(s) = U_C \frac{d}{a(s-s_1)(s-s_2)} \quad (7)$$

burada s_1 and s_2 Eş. 8 denklemin kökleridir ve a , b , ve c sabitleriyle ifade edilirler.

$$as^2 + bs + c = 0 \quad (8)$$

Devrenin çıkış geriliminin zaman domenindeki çözümünde ters Laplace dönüşümü kullanılmış ve darbe gerilimi ölçümleyicinin çıkış gerilimi Eş. 9 eşitliğiyle belirlenmiştir.

$$U_o(t) = U_C \frac{d}{a(s_1 - s_2)} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \quad (9)$$

Darbe geriliminin tepe süresi T_p ise, Eş. 9 bağıntısının zamana göre türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesiyle belirlenir. Buna göre Eş. 10 kullanılarak tepe süresi Eş. 11'deki gibi hesaplanır:

$$\frac{dU_o(t)}{dt} = U_C \frac{d}{a(s_1 - s_2)} (s_1 e^{s_1 t} - s_2 e^{s_2 t}) = 0 \quad (10)$$

$$T_p = \frac{\ln\left(\frac{s_1}{s_2}\right)}{s_2 - s_1} \quad (11)$$

Elde edilen tepe süresi bağıntısı Eş. 9 verilen genlik bağıntısında yerine konduğunda darbe geriliminin tepe değeri Eş. 12 ifadesindeki gibi elde edilir:

$$\hat{u}_o = u_o(T_p) = U_C \frac{d}{a(s_1 - s_2)} (e^{s_1 T_p} - e^{s_2 T_p}) \quad (12)$$

Cephe süresi T_1 ve sırt yarı değer süresi T_2 'nin IEC 60060-2:2010 standardına göre belirlenebilmesi için Eş. 9 ifadesindeki zamana bağlı gerilim eşitliğindeki tepe gerilim değerinin %30, %50 ve %90 değerlerinin hesaplanmasına gerek duyulmaktadır ve çözüm için bazı yaklaşımların kullanılması gerekir. Burada bunun için doğrusal olmayan denklem çözüm yöntemlerinden Newton-Raphson Yöntemi kullanılmıştır. Bu yinelemeli (iteratif) yöntemde denklem Eş. 13'deki iterasyon bağıntısı kullanılır:

$$t_{i+1} = t_i - \frac{u(t_i)}{w(t_i)} \quad (13)$$

Bu çalışmada kullanılan Newton-Raphson yönteminde yinelemelere ardışık yinelemeler arasındaki fark 1 ppm'den düşük olana kadar sürdürülmüştür. Cephe süresi T_1 ve sırt yarı değer süresi T_2 'nin belirlenmesi için gereken tepe gerilim değerinin %30, %50 ve %90 değerlerinin bilinmesi gerekir ve Newton-Raphson iterasyonu için Eş. 9 bağıntısı kullanılarak elde edilen bağıntılar Eş. 14, Eş. 15 ve Eş. 16'da gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

$$U_C \frac{d}{a(s_1 - s_2)} (e^{s_1 t_{30}} - e^{s_2 t_{30}}) - 0,3 \hat{u}_o = 0 \quad (14)$$

$$U_C \frac{d}{a(s_1-s_2)} (e^{s_1 t_{90}} - e^{s_2 t_{90}}) - 0,9\hat{u}_o = 0 \quad (15)$$

$$U_C \frac{d}{a(s_1-s_2)} (e^{s_1 t_{50}} - e^{s_2 t_{50}}) - 0,5\hat{u}_o = 0 \quad (16)$$

t_{30} , t_{50} ve t_{90} zaman parametreleri Newton-Raphson Yöntemi ile en doğru şekilde hesaplanmıştır. Buna göre yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimlerinin tepe değer ve zaman parametrelerinin yaklaşık ifadeleri Tablo 1'deki verilmiştir [15].

2.3. Yazılım ilkesi (Software principle)

Zaman parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan Newton-Raphson Yöntemi ile hesaplamalar için "Symbolic Math Toolbox" yardımcı programıyla birlikte MATLAB ana programı kullanılmıştır. Program, bu tür doğrusal olmayan denklemlerin çözümünde etkin bir programdır. Bu çalışmada U_p , T_1 , T_p ve T_2 parametrelerinin hesaplanmasında bu program kullanılmıştır. Şekil 4'te gösterilen yazılımın arayüzü aracılığıyla, ölçümleyicinin besleme gerilimi, kondansatör ve direnç elemanlarının yüksek doğrulukla belirlenmiş değerleri kullanarak modüllerin parametreleri kısa sürede otomatik olarak hesaplanabilmektedir. Yazılımın temel olarak dayandığı yöntem, mutlak değerce $t_{i+1} - t_i = 1 \times 10^{-12}$ iterasyon farkına ulaşıldığında sonlanmaktadır [14, 15].

3. ÖLÇÜMLEYİCİNİN YAPIMI (IMPLEMENTATION OF CALIBRATOR)

Akıllı ölçümleyici sistemi, darbe gerilimi parametrelerinin hesaplamalarında kullanılan yazılım ve bilgisayar ile, yüksek çözünürlüğe sahip sayısal multimetre, yüksek kararlılığa

sahip doğru akım güç kaynağı, anahtarlama mekanizmasını içeren ana modül ve çeşitli darbe gerilimi şekillerinin üretilmesini sağlayan yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimi modüllerinden oluşmaktadır. Darbe gerilimi ölçümleyicinin ana modülü ve yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimi modüllerinin genel görünümü Şekil 5'te verilmiştir.

3.1. Ana Modül (Main Module)

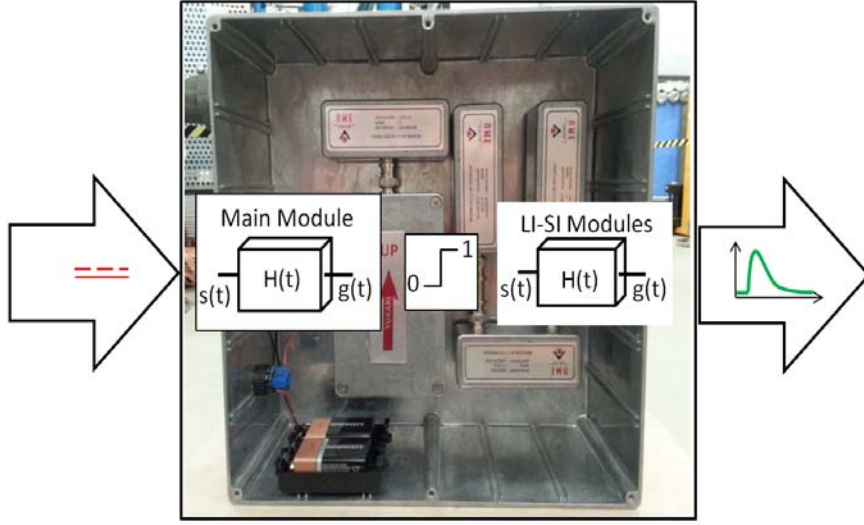
Darbe gerilimi devresinin anahtarlama devresinde kullanılan röle, ölçümleyici ana modülünün başlıca devre elemanıdır. Anahtarlama elemanı olarak kontaklar arası delinme dayanımı 1000 V olan, özel yapım SANYU marka, 51W-1E21N0 model cıva kontaklı röleler kullanılmıştır. Bu rölelerin iç yapısında tahrik bobini ve kontakları birbirinden bağımsız ekranlı yapı bulunmaktadır. Bu rölelerin kararlı çalışma gerilimi 10 V-600 V arasındadır. 600 V'un üzerindeki gerilimlerdeki anahtarlama rölenin kararlı çalışmadığı ve sıçramasız çalışma (bounce-free) özelliğini yitirdiği tespit edilmiştir. Röle, kararlı kontak direnci yapısı, yüksek akım taşıyabilme özelliği ve nano saniye mertebelerindeki gecikmeye sahip kısa tepki süresiyle uygun bir anahtarlama elemanıdır. 10-600 V çalışma bölgesinde rölenin gecikmesi 1 ns'nin altındadır. Röle anahtarlama geriliminden bağımsız 12 V doğru gerilimle beslenmektedir. Rölenin iç yapısındaki bobinin uyarılmasıyla oluşan manyetik alanın tetiklemeyle röle çalışmaktadır [22].

Şekil 6'da devre yapısı gösterilen ölçümleyicinin girişine V_{in} doğru gerilimi uygulanır. Aynı zamanda cıva kontaklı röle ise harici 12 V pille beslenmektedir. Bu başlangıç durumunda devrenin beslenmesiyle Şekil 6'da kırmızı akım yoluyla C_S kondansatörünü yüklemektedir. Devrenin

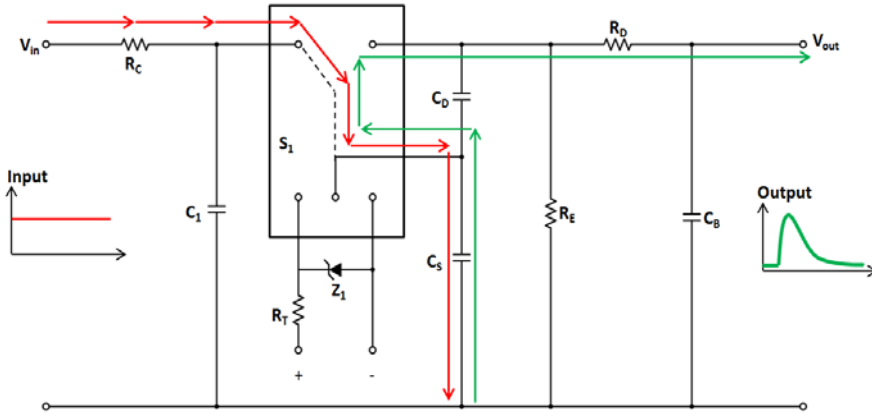
Tablo 1. Newton-Raphson yöntemi ile belirlenen darbe gerilimi parametreleri
(The impulse voltage parameters determined by the Newton-Raphson method)

Darbe gerilimi tipi	U_p	T_1	T_p	T_2
Yıldırım darbe gerilimi	\hat{u}	$1,67(t_{90} - t_{30})$	-	$(t_{50} - t_{30}) + 0,5(t_{90} - t_{30})$
Anahtarlama darbe gerilimi	\hat{u}_o	-	t_p	t_{50}

Şekil 4. MATLAB tabanlı hesaplama programı ara yüzü (Interface of calculation software based on MATLAB)



Şekil 5. Darbe gerilimi ölçümleyicinin iç yapısı (Internal structure of impulse calibrator)



Şekil 6. Referans darbe gerilimi ölçümleyicinin devre şeması ve çalışma prensibi (Circuit diagram and working principle of the reference impulse voltage calibrator)

beslendiği doğru gerilim yüksek çözünürlüğe sahip sayısal multimetre ile kaydedilmektedir. Rölenin tetiklenmesi ve kontakların hareket etmesiyle yüklü durumdaki C_S kondansatöründe biriken yük, Şekil 6'daki devrede yeşil akım yoluyla darbe geriliminin biçimlendiği kondansatör ve dirençlerden oluşan devreye aktarılmaktadır. Rölenin aktif ve pasif duruma geçişleri sırasında oluşan salınımların bastırılması için C_D sönümleme kondansatörü kullanılmıştır. R_C direnci yükleme akımının sınırlandırılması amacıyla kullanılmakta olup darbe gerilimi şekline herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Devrede bulunan R_E , R_D ve C_B elemanları, darbe üretici devresindeki gerilim türüne (yıldırım veya anahtarlama) etki eden devre elemanlarıdır ve darbe geriliminin genlik ve zaman parametrelerinin belirlenmesinde etkin rol oynamaktadırlar.

Darbe geriliminin yıldırım darbe gerilimi için cephe süresi ve anahtarlama darbe gerilimi için tepe değer süresi yaklaşık olarak $C_B \times R_D$ ve her iki darbe gerilimi biçimi için sırt yarı değer süresi ise $C_S \times R_E$ çarpımlarından türetilmektedir [23].

3.2. Yıldırım ve Anahtarlama Darbe Gerilimi Modülleri (Modules of lightning and switching impulse voltage)

Ölçümleyiciden farklı tipte dalga şekillerinde referans darbe geriliminin üretilmesi ve kaydedicinin bu farklı dalga şekillerinde ölçülmesi IEC 60060-2 standardında belirtilen zorunluluklardan bir tanesidir. Buna göre bu çalışmada toplamda 10 farklı dalga şekillerine sahip yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimi modüllerinin tasarımı ve yapımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımdaki en önemli unsur, yapımında kullanılan devre elemanlarından direnç ve kondansatör elemanlarının ideale yakın davranış göstermesidir. Bu davranışa yakın kararlı devre elemanlarının seçimi ve karakterizasyonuna önem verilmiştir. Kondansatör olarak NP0 tip, ± 30 ppm/K sıcaklık katsayısına sahip ve 1000 V çalışma gerilimine sahip devre elemanları tercih edilmiştir. Ayrıca SMD tipinde ve 1000 V çalışma gerilimine ± 10 ppm/K'den düşük sıcaklık katsayısı ve geniş bant aralığına sahip dirençlerin kullanılmasına özen gösterilmiştir. Tablo 2 ve Tablo 3'de farklı yıldırım ve

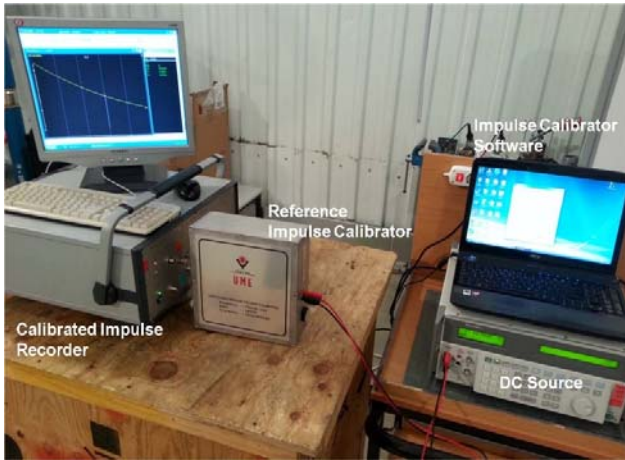
anahtarlama darbe gerilimi modülleri ve bu modüllerde kullanılan devre elemanlarının değerleri verilmiştir. Kondansatörlerin kapasite değerleri 1 kHz frekanstaki değerlerdir. Yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimi modülleri, ana modülün içerisine gömülü olarak Şekil 7’de gösterildiği gibi kapalı bir sistem olarak tasarlanmıştır. Modüllerin ana anahtarlama devresine bağlantısı, self endüktif etkisini ve kesintisiz ekranlama performansı için BNC konnektörlerle gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Yıldırım darbe gerilimi modülleri ve devre elemanları
(Lightning impulse voltage modules and circuit elements)

Darbe şekli	R_E (k Ω)	R_D (Ω)	C_B (nF)	C_S (nF)
0,84/60 μ s	4,6091	227,4070		
0,84/40 μ s	3,1022	233,0419		
1,2/50 μ s	3,8609	337,2264	1,2555	16,5833
1,56/40 μ s	2,9899	453,7143		
1,56/60 μ s	4,5904	438,1160		

Tablo 3. Anahtarlama darbe gerilimi modülleri ve devre elemanları
(Switching impulse voltage modules and circuit elements)

Darbe gerilimi şekli	R_E (k Ω)	R_D (k Ω)	C_B (nF)	C_S (nF)
250/2500 μ s	55,6343	7,5609		
200/1000 μ s	17,7035	8,3755		
300/1000 μ s	12,6883	18,4687	9,9433	49,7950
200/4000 μ s	99,7163	4,8856		
300/4000 μ s	96,2415	8,2320		



Şekil 7. Referans ölçümleyici sisteminin performans test düzeneği
(Performance test setup of reference calibration system)

4. BELİRSİZLİK ANALİZİ (UNCERTAINTY ANALYSIS)

Bir ölçüm sisteminin referans olarak kabul edilebilmesi için, 7 temel ölçü birimine göre doğrudan izlenebilir olması gerekir. Bu izlenebilirliğin en temel araçlarından birisi de ölçümleme işlemidir. Referans ölçümleyicinin yapısı itibarıyla, sistemin birincil sistemlere izlenebilirliği, yüksek doğru gerilim, kapasite ve direnç büyüklüklerinin düşük belirsizliklerle ölçülmesi ile sağlanmaktadır. Bu bileşenlerin toplam belirsizliğe etkisinin ne kadar olduğunu belirleyebilmek için, ölçüm sisteminin model fonksiyonunun belirlenmesi ve giriş büyüklüklerinin tespiti gerekmektedir [8]. Model fonksiyonun çıkış büyüklükleri U_p , T_1 , T_p ve T_2 'dir ve doğrudan hesaplamalarla değerleri tespit edilememektedir. Bu büyüklükler ölçümleyicinin giriş büyüklüklerine bağlı karmaşık hesaplamalar sonucu tayin edilmektedir. U_p ve T_p parametreleri (7) ve (11) bağıntılarından elde edilmektedir. Cephe süresi T_1 ve sırt yarı değer süresi T_2 parametreleri ise kapalı biçimde çözümü mümkün olmadığından devre analizi yönteminde kullanılan yaklaşık ilkeleri göz önünde bulundurularak model fonksiyonları oluşturulabilmektedir. Bu ilkeler ve yaklaşımlar göz önünde bulundurularak Tablo 4’de yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimlerinin parametreleri için oluşturulmuş model fonksiyon tanımları verilmiştir [15, 23].

Tablo 4. Ölçümleyici parametrelerinin model fonksiyonları
(Model functions of calibrator parameters)

Parametre	Model fonksiyonu
Tepe değer, U_p	$f(X_{U_p}) = U_C \frac{1}{C'_B R_D (s_1 - s_2)} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t})$
Cephe süresi, T_1	$f(X_{T_1}) = 3R_D \frac{C_S C'_B}{(C_S + C'_B)}$
Tepe süresi, T_p	$f(X_{T_p}) = \frac{\ln(s_1/s_2)}{(s_2 - s_1)}$
Sırt yarı değer süresi, T_2	$f(X_{T_2}) = 0,7(R_E + R_D)(C_S + C'_B)$

Model fonksiyonunun doğrusal olmaması ve giriş büyüklüklerinin çoklu olması durumunda belirsizlik analizinin gerçekleştirilmesi için özel yazılımlar büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu çalışmadaki belirsizlik analizinde GUM Workbench Pro paket yazılımı kullanılmıştır. Programda her bir parametre için model tanımlaması yapılmış, belirsizlik bileşenlerinin değerleri girilmiş ve duyarlılık katsayıları Eş. 17 temel bağıntısı göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Burada c_i duyarlılık katsayısını, f model fonksiyonunu ve x_i ise model fonksiyonun V_C , C_S , C_B , C_L , R_E , R_D , ve R_L gibi giriş büyüklüklerini ifade etmektedir. Belirsizlik hesabı giriş büyüklükleri göz önünde bulundurularak $k = 2$ kapsam faktörü ve % 95 güvenilirlik seviyesi için Tablo 5 ve Tablo 6’daki gibi hesaplanmıştır:

$$c_i = \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_i=x_i} \quad (17)$$

Tablo 5. 1,2/50 μ s darbesi için yıldırım darbe gerilimi ölçümleyicinin belirsizlik bütçesi
(Uncertainty budget of 1,2/50 μ s lightning impulse calibrator)

Büyükölçüm			Tepe değer için	Cephe süresi	Sırt yarı değer süresi
Devre elemanı	Nominal değer	Belirsizlik (k = 2)	duyarlılık katsayısı (U_p)	için duyarlılık katsayısı (T_1)	için duyarlılık katsayısı (T_2)
CS	16,58 nF	% 0,05	$3,4 \cdot 10^9$	5,3	2900
CB	1,26 nF	% 0,01	$-44 \cdot 10^9$	870	2900
CL	40,00 pF	% 10	$-44 \cdot 10^9$	870	2900
RD	337,20 Ω	% 0,005	-0,045	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$13 \cdot 10^{-9}$
RE	3,86 k Ω	% 0,005	$3,9 \cdot 10^{-3}$	-	$13 \cdot 10^{-9}$
RL	1,00 M Ω	% 10	$< 10^{-12}$	-	-
UC	668,0 V	% 0,0003	0,90	-	-
UO	600,6 V				
Geniřletilmiş Belirsizlik (k = 2)			% 0,03	% 0,30	% 0,10

Tablo 6. 250/2500 μ s darbesi için anahtarlama darbe gerilimi ölçümleyicinin belirsizlik bütçesi
(Uncertainty budget of 250/2500 μ s lightning impulse calibrator)

Büyükölçüm			Tepe değer için	Tepe süresi için	Sırt yarı değer süresi
Devre elemanı	Nominal değer	Belirsizlik (k = 2)	duyarlılık katsayısı (U_p)	duyarlılık katsayısı (T_p)	için duyarlılık katsayısı (T_2)
CS	49,795 nF	% 0,05	$1,9 \cdot 10^9$	1600	44000
CB	9,944 nF	% 0,05	$-9,7 \cdot 10^9$	17000	44000
CL	40 pF	% 10	$-9,7 \cdot 10^9$	17000	44000
RD	7,561 k Ω	% 0,005	$-4,2 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-9}$	$42 \cdot 10^{-9}$
RE	55,634 k Ω	% 0,005	$500 \cdot 10^{-6}$	-	$42 \cdot 10^{-9}$
RL	1 M Ω	% 10	$< 10^{-12}$	$< 10^{-12}$	-
UC	600,0 V	% 0,0003	0,76	-	-
UO	457,7 V				
Geniřletilmiş Belirsizlik (k = 2)			% 0,10	% 0,20	% 0,04

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 600 V çalışma gerilimine sahip yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimi ölçümleyicinin tasarımı, yapımı, performans testleri ve belirsizlik çalışmalarını içermektedir. Günümüzde sınırlı sayıda darbe şekillerinde ve en fazla 300 V'a kadar gerilim üretebilen darbe gerilimi ölçümleyicileri kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki en önemli farklılık, darbe şekillerinin çeşitliliği ve 600 V anahtarlama geriliminde kusursuzca çalışabilen cıva kontaklı anahtarlama elemanı içeren ölçümleyicilerin tasarımı ve yapımıdır. Geliştirilen ölçümleyici, darbe ölçümlerinde kullanılan ve yüksek giriş empedansına sahip sayısal kaydedicilerinin ölçümlemesini referans sinyaldeki bozucu etkiler en aza indirecek şekilde düşük çıkış empedanslı tasarımda üretilmiştir. Darbe gerilimi ölçümleyicinin izlenebilirliği, referans laboratuvarlardaki birincil seviyedeki doğru gerilim, kapasite ve direnç büyükleri üzerinden sağlanabilmektedir. Yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimi modüllerindeki çeşitlilik, darbe kaydedicilerinin farklı darbe gerilimi şekillerindeki karakterizasyonu için önemli avantajlar sunmaktadır. Yıldırım darbe gerilimi modülleri 0,84/60 μ s, 0,84/40 μ s, 1,2/50 μ s, 1,56/40 μ s ve 1,56/60 μ s ve anahtarlama darbe gerilimi modülleri ise 250/2500 μ s, 100/1000 μ s, 300/1000 μ s, 200/4000 μ s ve 300/4000 μ s dalga şekillerinde tasarlanmıştır. Hesaplanan yıldırım darbe gerilimi belirsizlikleri tepe değer için % 0,03, cephe süresi

için % 0,30 ve sırt yarı değer süresi için % 0,10'dur. Anahtarlama darbe gerilimi belirsizlikleri ise tepe değer için % 0,10, tepe süresi için % 0,20 ve sırt yarı değer süresi için % 0,04'dür.

Yapımı gerçekleştirilen ölçümleyicinin belirsizliği uluslararası standartlarda izin verilen belirsizlik değerlerinin 30 kat altındadır. Metroloji alanında kullanılan benzer ölçümleyiciler arasında ise yıldırım darbe ölçümlerinde genlik için % 0,14'den % 0,03'e % 80 oranında ve zaman parametrelerinde de % 0,5'den % 0,1-% 0,3 aralığına düşerek, % 40-% 80 arasında değişen oranlarda, belirsizlik değerlerinde iyileştirme sağlanmıştır. Yıldırım ve anahtarlama ölçümleyici düşük giriş empedanslı kaydedicilerle kullanıldığında referans darbe şekli bozulmaya uğradığından řu aşamada sadece giriş empedansı yüksek (1 M Ω) sayısal kaydedicilerinin ölçümlemesinde kullanılabilirlikte [23]. Çalışmanın bu yönü geliştirilmeye açıktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, G1YG-E1-02-I referans numaralı araştırma projesiyle TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü tarafından desteklenmiştir. Yazar, çalışmanın gerçekleştirilmesinde proje çalışanları Serkan DEDEOĞLU, İsmail KARAMAN ve Volkan AYVA'ya katkıları için teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. IEC 60071-1, Insulation co-ordination, Part 1: Definitions, principles and rules, Geneva, Switzerland, 2006+A1:2010.
2. IEC 60060-1, High-voltage test techniques, Part 1: General definition and test requirements, Geneva, Switzerland, 2010.
3. IEC 60060-2, High-voltage test techniques, Part 2: Measuring systems, Geneva, Switzerland, 2010.
4. IEC 61083, Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests - Part 1: Requirements for instruments, Geneva, Switzerland, 2001.
5. Khanali, M., Jayaram, S., A Study on PD Activities of Oil-impregnated Paper under Pulse Voltages using Gas Analysis, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24 (4), 2503-2510, 2017.
6. Ueta, G. Tsuboi, T., Takami, J. Okabe, S., Insulation Characteristics of Gas Insulated Switchgear under Lightning Impulse and AC Superimposed Voltage, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21 (3), 1026-1034, 2014.
7. Naidu, M. S., Kamaraju, V., *High-Voltage Engineering*, 5th Ed. McGraw Hill, New Delhi, 2013.
8. Schon, K., *High impulse voltage and current measurement techniques*, Switzerland, Springer, 2013.
9. Hlavacek, J., Knenicky, M., Very Fast High Voltage Impulse Generator, 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, Czech Republic, 16-18 May 2018.
10. Krithika, G., Usa, S., v-t Characteristics using Extended Disruptive Effect Model for Impulses of Varying Front Times, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22, 4, 2191-2195, 2015.
11. Okabe, S., Tsuboi, T., Ueta, G., Uncertainty in K-factor Measurement for Lightning Impulse Voltage Test, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22, 1, 266-277, 2015.
12. Okabe, S., Takami, J., Tsuboi, T., Ueta, G., Discussion on Standard Waveform in the Lightning Voltage Test, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20, 1, 147-156, 2013.
13. Barbosa, C. R. H., Da Silva, M., T., F., Azevedo, L., C., Faria, L., C., Validation of a System for Evaluation of High-Voltage Impulses According to IEC 60060:2010, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64, 6, 1378-1382, 2015.
14. Ren, X., Ding, W., Long, Z., Li, W., Li, F., Zhang, G. J., Uncertainty evaluation of the waveform parameters of 1 kV low-impedance impulse voltage calibrator, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65, 7, 1605-1613, 2016.
15. Hallström, J., Chekurov, Y., Aro, M., A calculable impulse voltage calibrator for calibration of impulse digitizers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52, 2, 400-403, 2003.
16. Wakimoto, T., Hallström, J., Chekurov, Y., Ishii, M., Lucas, W., Piironen, J., Shimizu, H., High-accuracy comparison of lightning and switching impulse calibrators, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56, 2, 619-623, 2007.
17. Sheehy, R., An impulse voltage calibrator of low output impedance, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20, 1, 15-22, 2005.
18. Pan, Y., Haiming, S., Xiao, D., Lai, L., Shi, L., Zhou, L., Zhao, W., Development of 300 kV Air-Insulation Standard Impulse Measurement System, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64, 6, 1627-1635, 2015.
19. Velandy, J., Nonlinear Interpretation Technique for Lightning Impulse Test, Nonlinear Interpretation Technique for Lightning Impulse Test, *IEEE Transaction on Power Delivery*, 30, 3, 1623-1625, 2015.
20. Pattanadech, N., Yutthagowith, P., Fast Curve Fitting Algorithm for Parameter Evaluation in Lightning Impulse Test Technique, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22, 5, 2931-2936, 2015.
21. Barbosa, C. R. H., Hallström, J., Da Silva, M., T., F., Azevedo, L., C., Faria, L., C., Tail-Chopped Lightning Impulses Time Parameters Estimated According to IEC 60060-1:2010, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64, 6, 1369-1372, 2015.
22. Mercury Relay Technical Datasheet, Sanyu Model Number 51W-1EX1NO, Doc. No. SE0504-050, Sanyu Electric Inc. Sanyu Switch Co. Ltd. 2015.
23. Hallström J., A Calculable Impulse Voltage Calibrator, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland, 2002.

