

4 TERMİNAL DİJİTAL KOAKSİYEL EMPEDANS ÖLÇÜM SİSTEMİ

Enis TURHAN
Gülay GÜLMEZ

ÖZET

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde empedans standartlarını otomatik olarak ölçebilen, kurulumu ve çalıştırılması kolay ve maliyeti geleneksel ölçüm köprülerine göre daha düşük olan dört terminal ekranlı dijital bir ölçüm köprüsü tasarlanıp gerçekleştirilmektedir.

Bu ölçüm köprüsünde 1/1 ve 1/10 oran değerlerine sahip hassas oran transformatörü kullanılmaktadır. Değerleri karşılaştırılacak olan empedans standartları bu transformatöre bağlandıktan sonra dengeleme gerilimleri veri toplama kartları aracılığı ile otomatik olarak uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, empedans standartlarını 4 terminal ekranlı bağlantı ile otomatik ölçmek amacıyla veri toplama kartları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal ölçüm köprüsü anlatılacaktır. Sistem ele alınan sınırlar altında laboratuvar ortamında kurulmuş ve yazılımı hazırlanmıştır. Sayısal ölçüm köprüsünün hazırlanmasından sonra ölçümler alınmış ve sonuçlar laboratuvarında kurulu olan geleneksel bir empedans köprüsü ile kıyaslanmıştır. Sistemle ilk ölçüm sonuçları elde edilmiş olup kapsamlı performans testlerine başlanacaktır.

Anahtar Kelimeler: 4TP AC direnç, 4TP kapasitans, koaksiyel AC köprü, dijital empedans köprüsü

ABSTRACT

A four terminal pair impedance measurement bridge is being designed and realized in TUBİTAK UME. This bridge will be automated and userfriendly and low cost in comparison with traditional bridges.

A precise voltage ratio transformer with 1/1 and 1/10 ratios is used as main component in the bridge. In the measurement of two impedance standards, voltages from data acquisition cards are applied to balance the bridge.

In this paper, an automated impedance bridge is explained which uses data acquisition cards to perform automated measurements. The measurement system has been constructed in the laboratory. Measurement results have been compared with results obtained by a traditional bridge constructed in the laboratory. Preliminary results have been obtained and an extensive performance characterization for the bridge will be commenced.

Key Words: 4TP AC resistance, 4TP capacitance, coaxial AC bridge, digital assisted impedance bridge

1. GİRİŞ

Düşük frekans (DC – 100 kHz) empedans ölçümleri DC direnç, AC direnç, kapasitans ve indüktans ölçümlerini kapsar. Bu empedans birimlerinin evrensel sabitlerle olan bağlantısı (TÜBİTAK UME’de bulunan) Quantum Hall direnç standardı (QHR) aracılığı ile sağlanmaktadır.

Quantum Hall DC direnç standardı değerini aşağıdaki formülden alır:

$$R_K = \frac{h}{e^2} \quad (1)$$

Bu formülde h, Plank sabiti, e, birim elektriksel yük sabitidir [1].

Bu şekilde elde edilen DC direnç değeri TÜBİTAK UME Empedans Laboratuvarı’nda bulunan diğer referans DC direnç standartlarına CCC (Cryogenic Current Comparator: Çok Düşük Sıcaklık Akım Karşılaştırıcı) DC Direnç karşılaştırma sistemi ile aktarılır. Bu aktarma 1/1 ve 1/10 oranlarında karşılaştırma ölçümleri ile gerçekleştirilir ve 1 Ω değerinden 10 k Ω değerine kadar olan DC direnç standartlarının izlenebilirliğini sağlar.

AC direnç biriminin DC direnç biriminden elde etmede kullanılan iki temel araç vardır. Bunlardan birincisi hesaplanabilir AC direnç standartlarıdır, bu standartların DC değerleri ölçüldükten sonra boyutları yardımıyla hesaplanan AC-DC farkları eklenerek istenen frekansta değerleri belirlenebilir. Bir başka deyişle QHR yardımıyla DC değerleri belirlenen hesaplanabilir AC dirençler aynı zamanda AC değerleri de hesaplanmış transfer standartları olarak kullanılırlar.

AC direnç birimi QHR direncinden elde edildikten sonra bu değer 1 Ω - 100 k Ω arasındaki AC direnç değerlerine ve 1 pF – 1 mF aralığındaki kapasitans değerlerine aktarılması “Empedans Karşılaştırma Köprüleri” kullanılarak gerçekleştirilir.

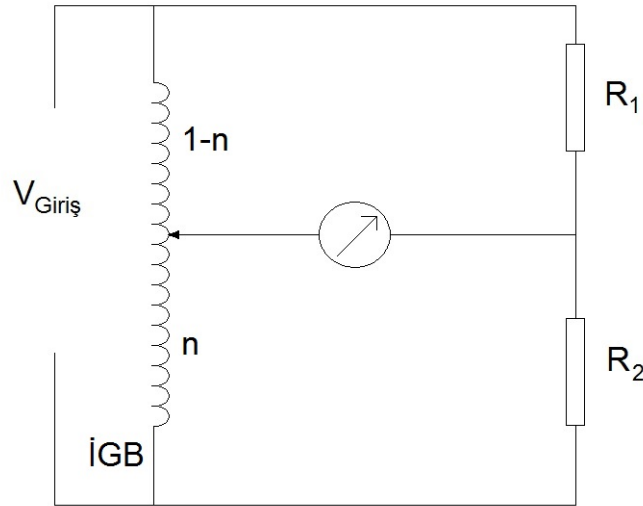
Bu köprüler yardımıyla örneğin 10 k Ω değerinde değeri belirlenen bir AC direnç değeri 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω AC direnç standartlarına 1/1 ve 1/10 karşılaştırma yöntemi ile aktarılır. Aynı şekilde 10 k Ω değerinde değeri belirlenen bir AC direnç değeri 1592 Hz ölçüm frekansında 10 nF değerine aktarılabilir. Ardından 10 nF değeri 1/1 ve 1/10 karşılaştırma köprüleri ile 1 pF – 1 mF aralığındaki kapasitans değerlerine aktarılır. Kapasitans ve AC direnç değerlerinden faydalanarak indüktans biriminin elde edilmesini sağlayan Maxwell-Wien köprüsü de bir empedans karşılaştırma köprüsüdür.

Sonuç olarak, empedans karşılaştırma köprüleri AC direnç, kapasitans ve indüktans birimlerinin elde edilmesi ve birbirileri arasında transfer edilebilmesi için kritik öneme sahip ölçüm araçlarıdır.

2. EMPEDANS ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

DC direnç karşılaştırma sistemlerinden farklı olarak empedans karşılaştırma sistemleri AC ölçüm sistemleri olduğu için indüktif gerilim bölücüler (İGB) kullanılarak yapılırlar. İndüktif gerilim bölücüler genellikle 50 Hz – 100 kHz aralığında çalışabilen çok kararlı gerilim bölücülerdir. Çıkış geriliminin giriş gerilimine oranını verdiklerinden ölçüm değerleri birimsizdir ve izlenebilirlikleri gerilim bölücülerinin kendisi üzerinden elde edilir. Bunun için UME’de kurulmuş olan birinci seviye indüktif gerilim bölücü kalibrasyon sistemi kullanılır. Böylece gerilim bölücülerinin oran değerleri birinci seviyede TÜBİTAK UME’de elde edilmiş olur.

Bu oran değerleri empedansların birbirine oranlarını belirlemek için kullanılır. Bunun için kurulabilecek en basit ölçüm sistemi 2 terminalli ekranlı (koaksiyel) ölçüm sistemidir [2]. Şekil 1’de 2 terminalli ekranlı ölçüm sistemi basitleştirilmiş olarak ekranları ihmal ederek gösterilmemiştir.

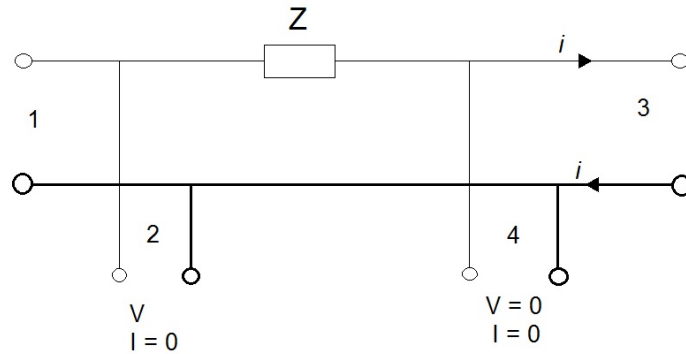


Şekil 1. 2-terminalli empedans ölçüm sistemi

Bu ölçüm sisteminde indüktif gerilim bölücü değeri denge elde edilinceye kadar değiştirilir. Denge durumunda dedektörden sıfır değeri okunur ve denge durumu için eşitlik (2) elde edilir. Basitçe, gerilim bölücü oran değeri karşılaştırılan dirençlerin oran değerlerine eşittir.

$$\frac{1-n}{n} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

Ancak Ekranlı 2 terminalli ölçüm yöntemi düşük empedans değerlerinde yüksek doğruluk elde etmek için uygun değildir. Bu yöntem kablo direncinden ve kablo indüktansından gelen etkileri gideremediği için özellikle 10 kΩ değerinden düşük empedans değerlerinde yüksek doğrulukta ölçüm almak gerektiğinde bu yöntem uygun değildir. Bağlantı kablolarından gelen hatalar ölçülerek doğruluk artırılabilir de özellikle 1 kΩ değerinden düşük empedans değerlerinde $10^{-6} \Omega/\Omega$ mertebesinde daha iyi bir doğruluk elde etmek oldukça zordur. Bu durumda düşük empedans değerlerinde daha yüksek doğruluk elde etmek için 4 terminalli ekranlı ölçüm sistemlerinin kullanılması gereklidir. Bu ölçüm sistemleri İGB'ler kullanılarak kurulabilen ölçüm sistemleridir ve oldukça karmaşıktır. Bunu anlamak için öncelikle 4 terminal ekranlı (terminal pair) empedans tanımını anlamak önemlidir [3]. 4 terminal ekranlı empedans tanımı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. 4-terminal ekranlı empedans tanımı (koaksiyel ekran kalın çizgi ile gösterilmiştir)

Şekil 2'de tanımı verilen 4 terminal empedansın değerinin doğru olarak belirlenebilmesi için bir takım koşulların sağlanması gereklidir.

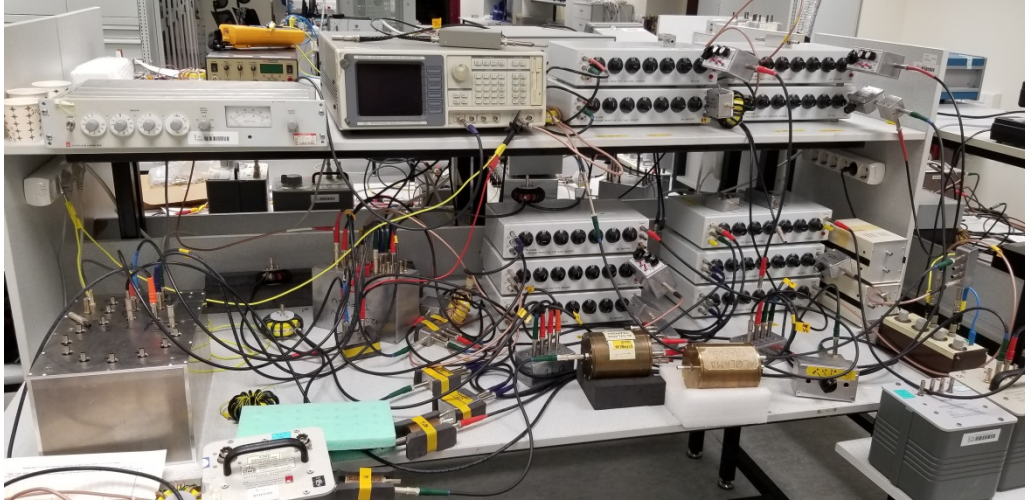
- Empedansa uygulanan akım kayıp yaşamadan ekran üzerinden geri dönmelidir.
- 2 ve 4 numaralı gerilim uçlarından akım akmamalıdır
- 4 numaralı uçta ekran ile canlı uç arasında gerilim farkı olmamalıdır.

Tüm bu şartlar sağlandığında empedans değeri uygulanan gerilim değerinin akım değerine oranına eşit olur.

$$Z = \frac{V}{i} \quad (3)$$

Geleneksel Empedans Karşılaştırma Köprüleri:

Tüm bu şartların sağlanması için kurulan ölçüm sistemi Şekil 1'de görülen sistemden çok daha karmaşık bir hal alır. Şekil 3'te UME'de kurulmuş 4 terminal ekranlı empedans sistemi görülmektedir. Tanım koşullarını sağlamak için 10 adet İGB kullanılmaktadır.



Şekil 3. UME'de bulunan 4-terminal ekranlı empedans karşılaştırma sistemi (köprüsü)

Şekil 3'te görülen karşılaştırma köprüsü 1/1 ve 10/1 oranlarında karşılaştırma yapabilen bir karşılaştırma köprüsüdür. 1 kHz frekansında 1 k Ω / 1 k Ω oran karşılaştırma belirsizliği 0,1 $\mu\Omega/\Omega$ 'dan daha iyidir.

Bu tür köprüler İGB'ler kullanılarak kurulan geleneksel empedans karşılaştırma köprüleridir. Bu köprülerde 8 ile 14 adet arasında İGB kullanımı söz konusu olabilmektedir. Bu da bu sistemleri oldukça karmaşık ve pahalı sistemler haline getirmektedir. Bu köprülerde dengeleme iteratif olarak yapılmakta, her bir İGB denge durumuna ayarlanmakta ve bir tur tamamlanınca yeni iterasyon döngüsüne başlanmaktadır. Çok tecrübeli kalibrasyon personeli gerektiren bu dengeleme işlemi için tek frekansta gerekli zaman 10-15 dakika kadar olabilmektedir. 1 Ω ile 100 k Ω arasındaki tüm AC dirençlerin 1/1 ve 1/10 oranlarında 50 Hz, 100 Hz, 400 Hz, 1 kHz ve 10 kHz frekans aralığında karşılaştırılması için 66 farklı ölçüm yapmak gereklidir. Her bir ölçümün tekrarlanabilirlik ve tekrar üretilebilirlik değerlerini elde etmek için en az 10 ölçüm almak gerekli olduğu düşünüldüğünde sadece AC direnç ölçümleri için aralıksız en az 110 saat ölçüm almak gereklidir.

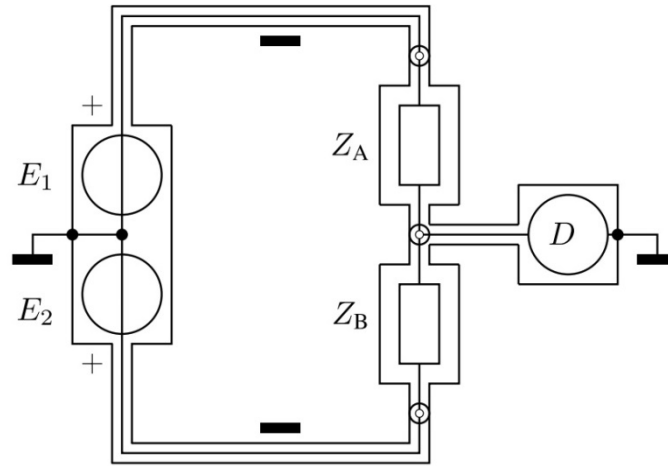
Tüm bu zorluklar geleneksel karşılaştırma köprülerinin yalnızca önde gelen metroloji enstitülerinde kurulabilmesine neden olmuştur. Ancak son yıllarda veri toplama kartları üretim teknolojilerindeki gelişmeler, daha kararlı ve gürültüsü daha az analog/sayısal örnekleme devrelerinin üretilmesi bu teknolojinin empedans karşılaştırma köprülerinde de kullanılabilmesi fikrini doğurmuştur. Bu veri toplama kartlarının (data acquisition card) kullanımı aynı zamanda bu ölçüm sistemlerinin bilgisayar kontrollü ve otomatik ölçüm yapabilmesinin de önünü açmıştır.

Dijital Empedans Karşılaştırma Köprüleri:

Dijital empedans karşılaştırma köprüleri genel olarak iki grupta sınıflandırılırlar:

- Tam dijital köprüler (Full digital bridges)
- Dijital yardımcı köprüler (Digital assisted bridges)

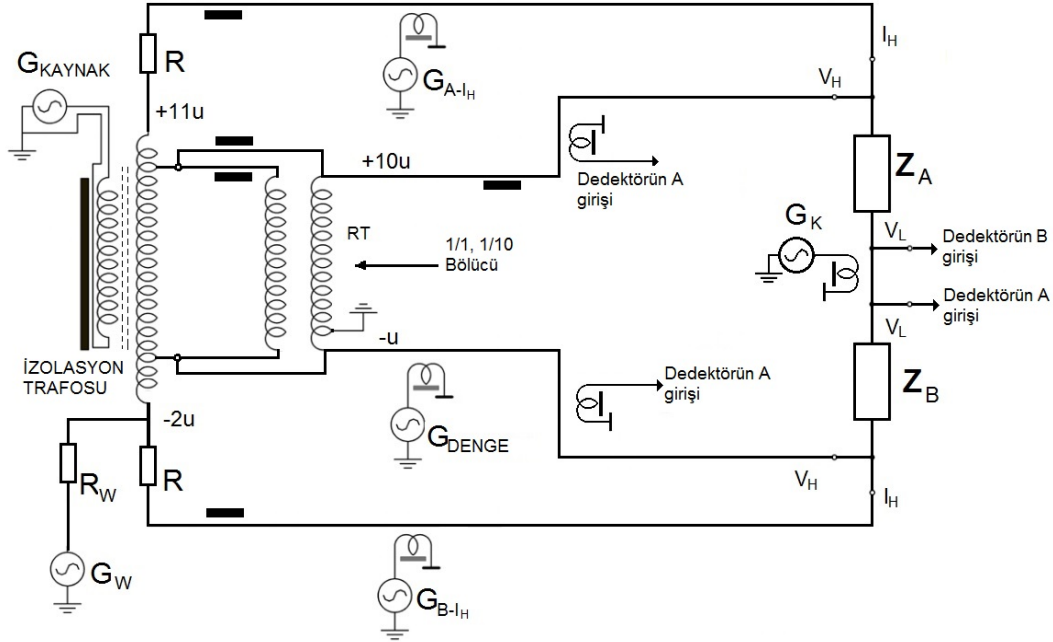
Tam dijital köprülerde hassas oran bölücü trafolar kullanmadan 1/1 ve 1/10 oranları oldukça kararlı gerilim kaynakları kullanılır, basitleştirilmiş bir 2 terminal ekranlı köprü çizimi Şekil 4'te görülmektedir [4]. Otomatik dengelemede bu gerilim kaynaklarından birinin genliği ve fazı değiştirilir. Gerilim kaynakları da bilgisayar kontrollü olduğu için tam otomatik ölçümler alınır. Ancak bu köprülerde gerilim kaynaklarının oran değerinin İGB'ler kullanılarak kalibre edilmesi çok önemlidir. 1/1 oran ölçümlerinde ölçülen empedanslar yer değiştirilerek ikinci bir ölçüm alınır ve ölçüm köprüsünün doğrusallık hatası giderilir, böylece 0,1 ppm ($\mu\text{V}/\text{V}$) değerine kadar düşük ölçüm belirsizlikleri elde edilebilir. Ancak 1/10 ölçümlerinde gerilim kaynaklarının genliklerinin 1/10 oranının ayrıca karakterize edilmesi gereklidir. Bunun için de İGB'ler kullanılır, zira 8,5 dijital bir multimetrenin AC gerilim ölçme doğruluk değerleri (hedeflenen belirsizlik değerinin 10 ppm ve aşağısında olduğu düşünülürse) yeterli değildir. Ayrıca 1/1 oran ölçümlerinden farklı olarak ölçülen empedansların uçlarının yer değiştirilmesi ile doğruluk hataları giderilemediğinden gerilim kaynaklarının doğruluk hatalarından ve ölçme köprüsünün bağlantı hatalarından kaynaklanan belirsizlik değeri ölçüm frekansı ve ölçülen büyüklüğe bağlı olmak kaydıyla 1-10 ppm arasında değişir.



Şekil 4. 2-Terminal Ekranlı Tam Dijital Köprü

Hassas oran trafoları ya da İGB'lerin 1/10 oran değerlerinin kalibrasyon belirsizlikleri 0,02 ppm değerine kadar düşebilir. Bu da özellikle 1/10 oran değerlerinde dijital köprülerde hassas oran trafoları yardımıyla ölçüm almak fikrini doğurur. Bu nedenle gerilim oranlarının 2 adet gerilim kaynağı ile sağlanması yerine bir adet gerilim bölücü ile sağlandığı "dijital yardımcı koaksiyel köprüler"e (digital assisted coaxial bridge) geçiş yapılır.

Bu köprülerde hem oran trafolarının düşük belirsizlikli ve kararlı oran değerleri hem de dengeleme mekanizmasında dijital veri kartlarının kullanım kolaylığı kullanılır. Bu şekilde kurulan köprüler de otomatik ölçüm alabilen, aynı zamanda geleneksel köprülere yakın belirsizlikle performans gösteren köprülerdir. Bu şekilde UME'de kurulan dijital yardımcı 4 terminal ekranlı köprü Şekil'5'te gösterilmiştir. Koaksiyel ekran bağlantıları şekli daha da karmaşıklaştırmamak amacıyla gösterilmemiştir.



Şekil 5. UME'de bulunan dijital ekranlı empedans karşılaştırma sistemi

3. KÖPRÜNÜN DENGELENMESİ

Köprünün dengelenmesi için kullanılan dedektör SRS 850 model bir frekans kilitlemeli kuvvetlendiricidir (Lock-in Amplifier: LIA). LIA, ana gerilim kaynağının frekansına kilitleyip yalnızca ana frekans bileşeninin çok hassas bir şekilde ölçülmesine olanak veren bir dedektördür.

Dengeleme çalışmasında ayarlı gerilim kaynakları olarak National Instruments (NI) 4461 kartları kullanılmıştır, bu kaynaklar Şekil 5'te G_W , G_{A-IH} , G_{B-IH} , G_K , G_{Denge} olarak gösterilmiştir. G_W RT'nin (hassas oran bölücü) sıfır çıkış ucu ile ekranı arasındaki gerilim farkını sıfırlamak için kullanılır. Denge durumunda RT'nin sıfır çıkış ucu toprağa bağlı iken ve değilken dedektör değerinin değişmemesi beklenir. Buna Wagner dengesi denir. Bundan sonra Z_A 'nın V_H koluna bağlı dedektörden sıfır değeri görülene kadar G_{A-IH} kaynağı ayarlanır, böylece Şekil 2'de görülen 4TP empedans tanımında gerilim kolundan akım akmama koşulu sağlanmış olur. Aynı şekilde G_{B-IH} kaynağı da Z_B 'nin V_H kolundaki dedektörde sıfır değeri görülene kadar ayarlanır. Her iki empedansın da gerilim kollarından akım akmaması ve böylece bu kollara bağlı ölçüm kablolarından bir ölçme hatası gelmemesi sağlanır.

Hata kaynaklarından bir diğeri de iki empedansın birbirine bağlandığı yerde kullanılan kablolardan gelebilecek hatalardır. Bunun için de Z_A ve Z_B 'nin V_L uçları LIA'nın A ve B girişlerine bağlanır. Dedektör A-B ölçme moduna alınır. G_K kaynağı aracılığı ile empedansların VL uçlarının arasına, burada olan gerilimi kompanse edecek bir gerilim değeri aktarılır. LIA'da A-B değeri sıfır olana kadar G_K değeri ayarlanır. Buna da Kelvin dengesi denir ve empedansların birbiri arasındaki kablo bağlantılarından gelen hatanın giderilmesi için kullanılır. Son olarak LIA tekrar "A" ölçme moduna alınır ve dedektörden sıfır değeri görülene kadar G_{Denge} kaynağı ayarlanır.

Tüm bu dengeleme işlemleri tek bir döngü olarak düşünülür. Her bir denge işlemi bir önceki dengeyi az da olsa etkiler. Bu nedenle dengeleme iteratif olarak yapılır. Bu döngüdeki işlemler sırası ile 2 ya da 3 defa tekrarlanır ve genelde 3 iterasyonla son denge değeri elde edilir. Elde edilen denge denklemleri (4-5) aşağıdaki gibidir [5].

$$\frac{Z_B}{Z_A} = \sqrt{\frac{1}{(1-\delta) \cdot (n + \delta_{RT})}} \quad (4)$$

Bu eşitlikte;

δ : G_{Denge} kaynağı aracılığı ile Z_B empedansına seri olarak eklenen bağıl gerilim değeri
 δ_{RT} : Hassas oran trafosunun “n” oran değerindeki oran hatasıdır.

1/1 oran değerinde Z_A/Z_B empedanslarının kabloları yer değiştirilerek bir ölçüm daha alınır ve δ' değeri elde edilir. Bu durumda yeni denge eşitliği aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{Z_B}{Z_A} = \sqrt{\frac{(1-\delta')}{(1-\delta)}} \quad (5)$$

4. ÖLÇÜM DEĞERLERİ

TÜBİTAK UME’de kurulan bu 4 terminal ekranlı empedans karşılaştırma sistemi ile kapsamlı direnç ve kapasitör ölçümleri gerçekleştirilecektir. Şu ana kadar yalnızca ilk değerlendirme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu ilk ölçümlerde oldukça tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Bu ölçümlerde 10 k Ω ve 1 k Ω değerinde AC direnç standartları 1 kHz ölçüm frekansında ilk önce geleneksel köprü ile ölçülmüş, sonra da dijital otomatik ölçüm köprüsü ile ölçülmüştür. Elde edilen değerler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. 10 k Ω / 1 k Ω AC Dirençlerin Oran Değerleri @1 kHz

	Ölçülen Oran Değeri (Ω/Ω)	Standart Sapma (Ω/Ω)	Standart Sapma (Bağıl)
Geleneksel Köprü	10,0009098	0,0000003	$0,03 \cdot 10^{-6}$
Dijital Otomatik Köprü	10,0009091	0,0000007	$0,07 \cdot 10^{-6}$
Fark	0,0000007		
Fark (Bağıl)	$0,07 \cdot 10^{-6}$		

Otomatik köprüde dengeleme gerilim kaynakları için başlangıç koşulları oluşturulmadığında (yani dengeleme için kullanılan gerilim kaynaklarının başlangıç değerleri sıfır olarak alındığında) dijital otomatik sistem 7-8 dakika içinde dengeye gelmektedir. İlk ölçümde elde edilen denge değerleri kullanıldığında ise dengeleme zamanı 3 dakikanın altına düşmektedir. Ölçülen standartların kararlı oldukları göz önüne alındığında her bir oran değerindeki yaklaşık denge değerleri bir kere elde edildiğinde, o denge değerleri o ölçüm için her zaman kullanılabilir.

SONUÇ

TÜBİTAK UME Empedans Laboratuvarı’nda 1/1 ve 1/10 oran değerlerinde kapasitans ve AC direnç karşılaştırmasını otomatik olarak gerçekleştirebilecek otomatik dijital 4 terminal ekranlı bir empedans karşılaştırma sistemi kurulmuştur. Bu sistemle ilk performans ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler tatmin edici sonuçlar vermiştir.

Geleneksel analog köprü ve dijital köprü ile 1 kHz frekansında gerçekleştirilen 10 k Ω / 1 k Ω AC direnç ölçüm sonuçları arasında $0,07 \cdot 10^{-6}$ (ppm) kadar fark olduğu görülmüştür.

Bundan sonra köprüsünün tasarlandığı tüm aralık içinde hem AC direnç hem de kapasitans değerlerinde 10 kHz'e kadar frekanslarda geniş kapsamlı bir karakterizasyon işlemi yapılacaktır. Elde edilecek sonuçlara göre hem köprü ölçüm doğruluğunun geliştirilmesi hem de otomatik ölçüm alma zamanının daha da azaltılması için düzeltici ve geliştirici faaliyetler gerçekleştirilecektir.

NOT

Bu çalışma kısmen, Avrupa Metroloji Yenilikçi ve Araştırma Programı (The European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR)) programına katılan ülkeler tarafından finanse edilmiş olup 17RPT04 VersICaL (A versatile electrical impedance calibration laboratory based on digital impedance bridges) kodlu proje içerisinde gerçekleştirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Nick Fletcher, Gert Rietveld, James Olthoff, Ilya Budovsky, and Martin Milton, "Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 Values", NCSLI Measure, Vol. 9, Iss. 3, 2014
- [2] 2 Terminal Ekranlı Sayısal Empedans Karşılaştırma Köprüsü ELECO 2018, Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı 30 Kasım-1 Aralık 2018 Sayfa : 369-370
- [3] Cutkosky, R. D., "Four-terminal-pair networks as precision admittance and impedance standards", Commun. and Electronics 70, 19- 22, Jan. 1964
- [4] Luca Callegaro et al., "Experiences With a Two-Terminal-Pair Digital Impedance Bridge", IEEE Trans. on Instrum. and Meas., vol. 64, no. 6, June 2015
- [5] Frédéric Overney et al., "Broadband Fully Automated Digitally Assisted Coaxial Bridge For High Accuracy Impedance Ratio Measurements", 2016 Metrologia 53 918

ÖZGEÇMİŞ

Enis TURHAN

1975 yılında Balıkesir'de doğdu. 1996 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1996 yılından beri TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde araştırmacı olarak çalışmaktadır. Empedans metrolojisi, primer seviyede indüktans, kapasitans AC direnç, DC Direnç, indüktif gerilim bölücü ölçüm sistemlerinin gerçekleştirilmesi alanlarında çalışmaktadır. 2008 yılından beri Türk Akreditasyon Kurumu'nda Elektrik alanında teknik denetçi olarak görev almaktadır.

Gülay GÜLMEZ

1969 yılında Karaman'da doğdu. 1992 yılında Hacettepe Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1992 yılından beri TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde araştırmacı olarak çalışmaktadır. Empedans metrolojisi, primer seviyede indüktans, kapasitans AC direnç, DC Direnç, indüktif gerilim bölücü ölçüm sistemlerinin gerçekleştirilmesi alanlarında çalışmaktadır. 20 nin üzerinde makalesi mevcuttur. TCEM Teknik komitesinde empedans alanında teknik denetçi olarak görev almaktadır aynı zamanda Türk Akreditasyon Kurumu'nda Elektrik alanında teknik denetçi ve baş denetçi olarak görev almaktadır.