

LCR METRE KALİBRASYONU

Yakup GÜLMEZ
Gülay GÜLMEZ
Mehmet ÇINAR

ÖZET

LCR metreler, genel olarak indüktans (L), kapasitans (C), direnç (R) gibi parametreleri çeşitli frekanslardaki alternatif akımda ölçen cihazlardır. Bunun yanında admitans (Y), empedans (Z), iyilik faktörü (Q), kayıp faktörü (D), reaktans (X), kondüktans (G) ve süseptans (B) gibi diğer parametreler de LCR metreler kullanılarak ölçülür. Bu tip cihazlar çok fonksiyonlu olduğundan kalibrasyonlarında her aralık için uygun standartların seçilmesi ve doğru ölçüm noktalarının tespit edilmesi gerekir. Bunun yanında kullanılan konnektör ve aparatların istenilen özelliklerde olması ve bağlantı şekillerinden kaynaklanan bağlantı hatalarının yok edilmesi son derece önemlidir. Bu makalede LCR metrelerin kalibrasyonunda dikkat edilmesi gereken noktalardan, empedans ölçümünde kullanılan bağlantı şekillerinden bahsedilecek ve bağlantı hatalarının nasıl giderileceği üzerinde durulacaktır.

1. GİRİŞ

LCR metreler alternatif akımda (AC akım) empedans ölçümlerinde kullanılan cihazlardır. Kapasitans, indüktans ve AC direnç parametrelerinin ölçümünde kullanılan ve çok fonksiyonlu olan bu cihazların kalibrasyonları AC direnç, kapasitans ve indüktans standartları kullanılarak yapılmaktadır. Bunun yanında LCR metrenin frekans kalibrasyonları frekans ölçer kullanılarak, gerilim seviyesi kalibrasyonları da çalışma frekansına bağlı olarak ya multimetre ya da yüksek frekans güç sensörleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Kalibrasyonda kullanılacak cihazların, standartların ve ölçüm noktalarının seçimi LCR metrenin çalıştığı frekans aralığına, ölçüm doğruluğuna ve bağlantı şekline göre değişmektedir. Bu kararlar verilirken LCR metrenin üreticisinin verdiği tavsiyeler de dikkate alınmalıdır.

Değişken akımda elektriksel parametreler direnç, kapasitans, indüktanstan oluşur ve temelde hepsi empedansın bir bileşenidir. Bu üç parametre de aynı anda oluşur ve bunlardan hangisi baskınsa elektriksel eleman o isimle anılır. Örneğin bir kapasitörde kapasitans değeri baskındır ama direnç, indüktans da artık parametre olarak ortaya çıkar. LCR metreler elektriksel elemanların gerçel ve sanal kısmıyla birlikte empedans değerini ölçen, daha sonra da ölçülmek istenen parametreyi hesaplama yoluyla elde eden cihazlardır. Empedans gerçel ve sanal iki kısımdan oluşur ve açısı olan bir vektör biçiminde tanımlanabilir. Burada gerçel kısım dirençtir. Sanal kısım ise reaktans olarak adlandırılır. Reaktans iki şekilde gösterilebilir; bunlardan X_C kapasitif reaktans, X_L de indüktif reaktans olarak

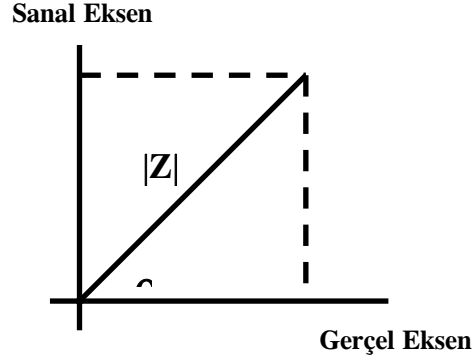
adlandırılır. Kapasitif reaktans $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C}$ ve indüktif reaktans

$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L$ olarak ifade edilir.

$$Z = R + jX = |Z| \angle \theta$$

$$\begin{cases} R = |Z| \cos \theta \\ X = |Z| \sin \theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) \end{cases}$$



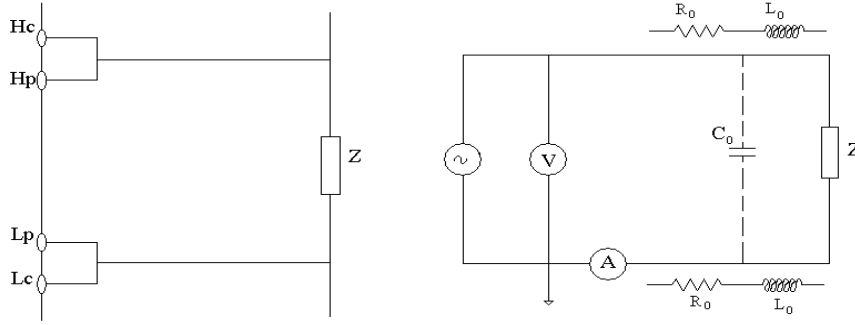
Şekil 1. Empedansın vektörel gösterimi ve formülleri

2. EMPEDANS ÖLÇÜMLERİNDE BAĞLANTI ŞEKİLLERİ

Empedans ölçümlerinde ölçülecek olan parametreye ve büyüklüğüne bağlı olarak ölçüm yöntemleri değişir. Bu bölümde ölçüm yöntemleri irdelenerek birbirlerinden farklı yanları anlatılmaya çalışılacaktır.

2.1 2 Uçlu Bağlantı Kullanılarak Empedans Ölçümü

En basit bağlantı şekli Şekil 2.1'de gösterildiği gibi 2 uçlu bağlantı şeklindedir. Daha çok el tipi ölçü aletlerinde kullanılır. Kablo bağlantılarının ölçüm sonucuna doğrudan etkisi vardır, bu nedenle düşük değerlerin metrolojik amaçlı ölçümlerinde kullanılamaz. 2-terminalli kapasitans ölçümlerinde hatayı düşürmek için kabloları sabit tutmak ve kablolardan kaynaklanan kapasitansın kararlılığını arttırmak gerekir. Bunun için kablolar birbiri üzerine bükülebilir. Bu durum kablo kapasitansını arttıracak fakat kararlılığı da arttıracaktır. Örneğin birbiri üzerine bükülmüş 0.5 metre uzunluğundaki iki kablonun oluşturduğu kapasitans değeri yaklaşık 20 pF'dır. Dairesel olarak birbirinden uzaklaştırılmış 0.5 metre uzunluğundaki iki kablonun kapasitansı ise yaklaşık 2 pF'dır. İndüktans ölçümlerinde ise tam tersine kabloların birbiri üzerine bükülmesi indüktansı düşürür. Bükülmemiş iki telin indüktansı 1 µH civarındadır ve değişkendir. Bükülmüş iki telin indüktansı ise 0.5 µH civarındadır ve daha kararlıdır. Direnç, kapasitans ve indüktans ölçümlerinde kablo, konnektör ve aparatlardan kaynaklanan artık parametre hatalarını azaltmak için sıfır düzeltmesi yapılmalıdır. Kapasitansta, ölçümden önce kablolar ölçüm konumunda standart bağlanmaksızın kapasitans değeri ölçülür ve standart ölçüldükten sonra ilk değer ikinci değerden çıkarılır. İndüktansta ise ölçümden önce kablolar birbirlerine kısa devre edilerek kablonun indüktansı ölçülür ve standart ölçüldükten sonra kablo indüktansı çıkarılır. Dirençte ise yine kablolar birbirine kısa devre edilerek kablonun direnci okunur ve standart ölçüldükten sonra kablo direnci çıkarılır. Birçok cihazda sıfır düzeltme özelliği vardır. Bu cihazlarda kalibrasyona başlamadan önce kısa devre ve açık devre testlerinin yapılması gerekir.



(a) Bağlantı Şeması

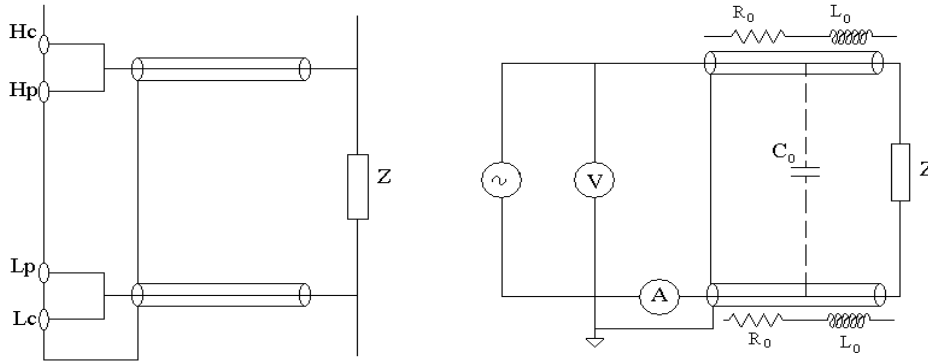
(b) Ölçüm devresi gösterimi

Şekil 2.1. 2 uçlu bağlantı ile empedans ölçümü

2 uçlu ölçüm kararını etkileyen iki unsur vardır; bunlardan biri ölçülecek değer, diğeri ise gerekli hassasiyettir. Bu iki unsurun bileşimi uygun olursa iki uçlu ölçüm alınabilir. İki uçlu yöntem indüktans ölçümlerinde, yüksek değerli kapasitans ve direnç ölçümlerinde kullanılabilir. Bu yöntemle ölçüm alınırken dikkatli olunmalı dış ortam etkilerini azaltmak için ölçüm bölgesine 30 cm mesafede metal olmamasına dikkat edilmeli ve kısa devre açık devre testinden sonra bağlantıların sabit kalmasına özen gösterilmelidir.

2.2 İki Uç ve Ekran Kullanılarak Empedans Ölçümü

İki terminalli ölçüme ekran ekleyerek terminaller arasındaki paralel kapasitör yok edilmiş olur (Şekil 2.2). İndüktans ölçümlerine bir etkisi yoktur. İndüktans ölçümlerinde kablolar yine bükülmelidir. 3 uçlu bağlantı olarak da adlandırılan bu bağlantı şekli daha çok küçük kapasitans değerlerinin ölçümlerinde önem taşır. 3 uçlu kapasitansın artık kapasitanslarının yok edilmesi ve ölçümün dış ortam elektrik alan etkilerinden etkilenmemesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu ölçüm şekli yüksek empedans değerleri için uygun, fakat kablo indüktanslarını ve kablo direncini yok edemediği için düşük empedans değerleri için yeterli değildir.



(a) Bağlantı Şeması

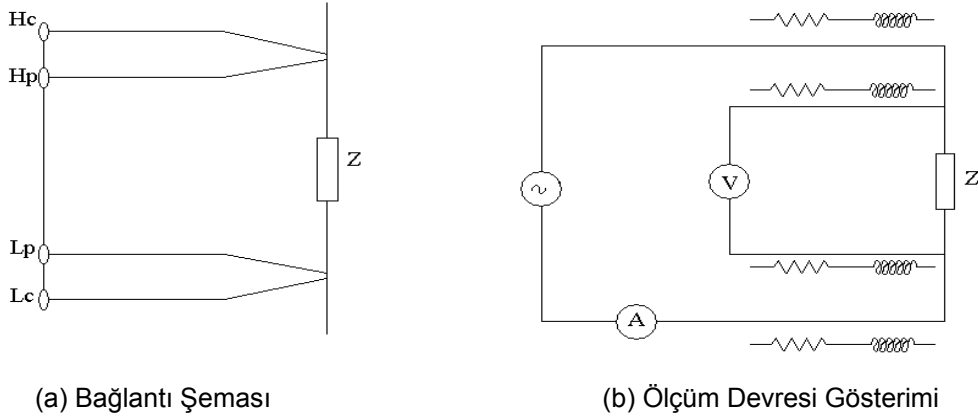
(b) Ölçüm Devresi Gösterimi

Şekil 2.2. 2 uç ve ekran kullanılarak empedans ölçümü

2.3 4 Uçlu Bağlantı Kullanılarak Empedans Ölçümü

4 uçlu yöntem (Şekil 2.3) bağlantı kabloları arasındaki paralel admittansların etkisinin az olduğu düşük empedans ölçümlerinde, kabloların seri empedans etkisini yok etmek için kullanılır. Akım ve gerilim

uçları arasında oluşan karşılıklı indüktans etkisinden kaçınmak için akım uçları birbiri üzerine, gerilim uçları da birbiri üzerine bükülmelidir.



(a) Bağlantı Şeması

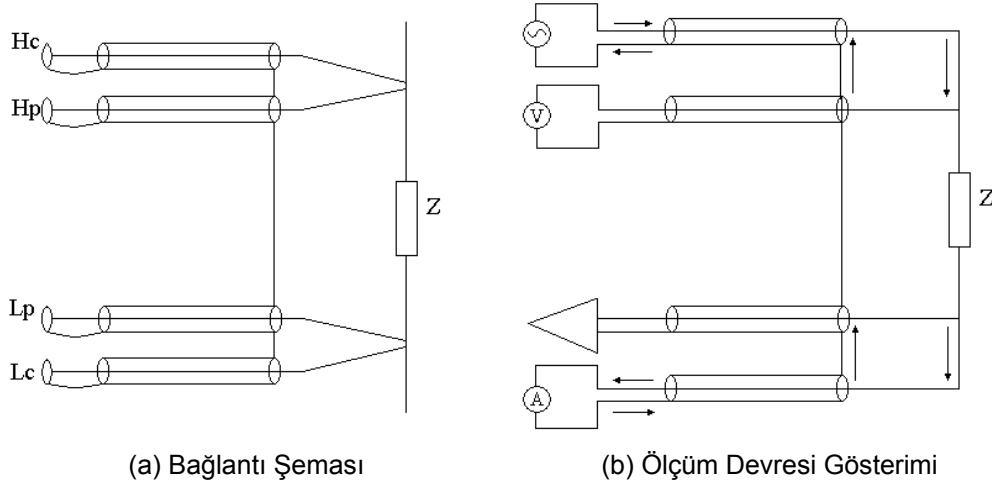
(b) Ölçüm Devresi Gösterimi

Şekil 2.3. 4 uçlu bağlantı ile empedans ölçümü.

Dört uçlu ölçümlerde kablo ve bağlantı hataları ölçüm tekniğiyle giderilir. Bu ölçüm tekniği akım kollarından akım verilirken gerilim kollarından da ölçülen eleman üzerinde düşen gerilimin okunması prensibine dayanır. Burada gerilim kollarına bağlanan gerilimölçerin giriş direnci yüksek olduğundan akan akım çok düşük olur, bu şekilde kablo ve bağlantı hataları düşürülmüş olur. Bu ölçüm tekniğinde bağlantılar ekranlı olmadığından dış ortamdan etkilenmektedir. Bu teknikle düşük değerli kapasitans ölçümünde yapılan hata yüksek olur.

2.4. 4 Uçlu Bağlantı ve Ekran Kullanılarak Empedans Ölçümü

Doğru akımda dört uçlu bağlantı şekli kullanılırken alternatif akımda ölçümlerin elektromanyetik gürültüden etkilenmemesi için ölçümde ekranlı bağlantıların kullanılması gerekir.



(a) Bağlantı Şeması

(b) Ölçüm Devresi Gösterimi

Şekil 2.4 4 uç ve ekran kullanılarak empedans ölçümü.

Şekil 2.4'teki gibi bir bağlantı sonucunda değişken akımda ölçüm sisteminin tüm dış gürültülerden yalıtılması ile düşük empedans değerlerinin yüksek hassasiyetle ölçülebilmesi sağlanmış olur.

Şekil 2.4 (b)'de oklar devreden geçen akımın yönünü belirtir. Bu devrede akım canlı uçtan verilir ve ekrandan geri alınır. Elektromanyetik ekranlamanın sağlanabilmesi için idealde ekran ile canlı uç arasında birbirine eşit fakat zıt yönlü akımların akması gereklidir.

Dört uç ve ekran (dört uç çift) bağlantılı ölçüm tüm parametrelerin hassas ölçümlerinde kullanılabilir. Fakat ölçüm frekansı yükseldikçe kullanılan kablo uzunluğuna dikkat edilmesi gerekir. Kablo uzunluğuna karar vermek için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$f \times l \leq 15$$

f : ölçüm frekansı (MHz)

l : kablo uzunluğu (m)

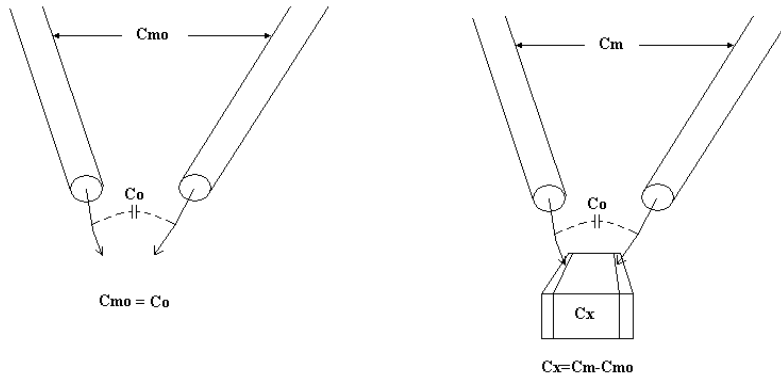
Örneğin 1 m'lik kablo kullanılıyorsa ölçüm frekansı en fazla 15 MHz'e kadar olabilir.[1]

3. ÖLÇME HATALARI VE KOMPANZASYON

Ölçüm ne şekilde alınırsa alınsın kablo ve bağlantılardan belli bir hata ortaya çıkacaktır. Burada karşılaşılabilecek bu tip hatalardan ve giderilme yollarından bahsedilecektir.

3.1 Ofset Kompanzasyonu

Yapılan ölçümde ölçüm sonucu yalnızca bir parametreden etkileniyorsa veya ölçüm cihazının açık devre ve kısa devre testi özelliği yoksa gerçek ölçüm değeri iki farklı ölçüm ile elde edilebilir.



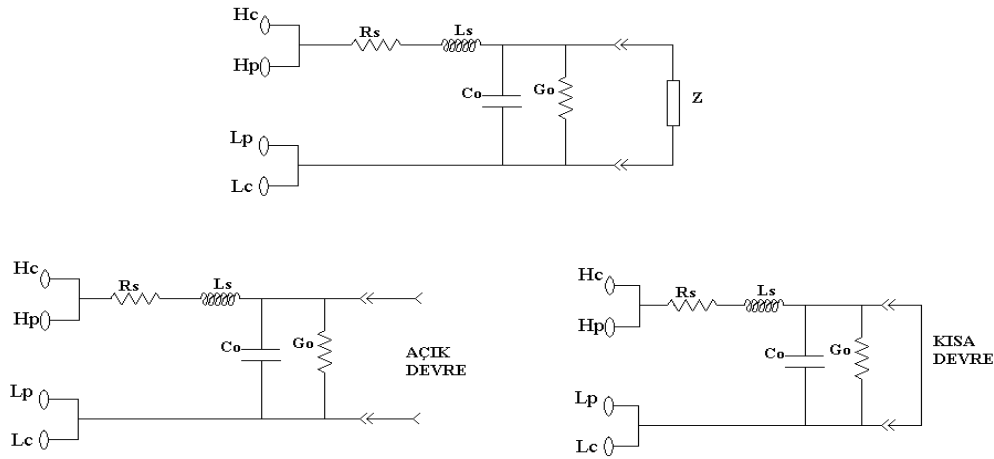
Şekil 3.1. Kapasitans ölçümünde ofset kompanzasyonu

Örneğin kapasitans ölçümünde Şekil 3.1'de görüldüğü gibi öncelikle bağlantı noktaları açık devre edilir ve açık devre kapasitansı ölçülür. Ölçülen kapasitansın gerçek değerini bulmak için açık devre kapasitansı ölçüm sonucundan çıkarılır. İndüktans ve direnç ölçümlerinde ise bağlantı noktaları kısa devre edilerek kısa devre indüktansı ve kısa devre direnci ölçülür ve ölçümlerden bu değerler çıkarılır.

3.2 Açık Devre / Kısa Devre Kompanzasyonu

Bu hata giderme yöntemi LCR ölçümü yapan birçok cihazda bulunur. Burada bağlantı kabloları ve bağlantı aparatları bir empedans oluşturduğu için, sırayla bağlantı uçları açık devre ve kısa devre edilerek açık devre ve kısa devre empedans değerleri okunur. Ölçüm cihazı bu değerleri belleğinde saklar. Hatayı gidermek için bu değerleri kullanarak ölçümde düzeltme yapar.

Bu testler yapılırken ölçüm cihazının empedansı ölçmek için kullanılan modda ve frekansta olmasına ve kalibrasyonda kullanılacak olan kablo, konnektör ve aparatlarla testin yapılmasına dikkat edilmelidir. Ayrıca kısa devre testinde kısa devre aparatının empedansının çok düşük olması gerekir. Bu durum, düşük empedans değerlerinin ölçümünde daha çok önem taşımaktadır. Kısa devre ve açık devre testleri için özel test aparatları da mevcuttur. Daha düşük belirsizlik gereken durumlarda bu test aparatlarının kullanılması gerekir. Kısa devre ve açık devre test bağlantıları Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen direnç indüktans ve kapasitanslar bağlantı kablolarının, konnektörlerin ve bağlantı aparatlarının artık parametrelerini göstermektedir. [3]



Şekil 3.2. Açık devre/kısa devre kompanzasyonu

4. KALİBRASYON AŞAMALARI

4.1 Frekans ve AC-DC Gerilim Seviyesi Ölçümleri

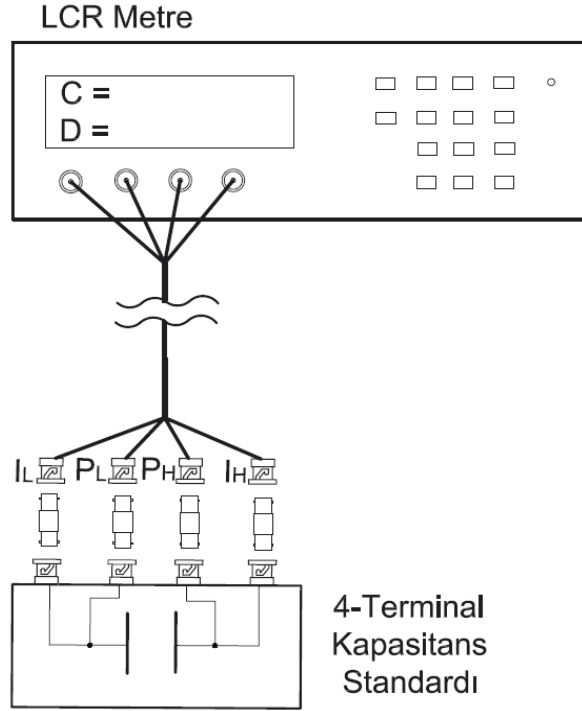
Empedanslar frekans ve gerilim seviyesine bağlı olarak farklı değerlere sahiptir. Bu nedenle empedans değerlerinin doğru ölçülmesi için uygulanan gerilimin seviyesi ve frekansı önemlidir. Bu nedenle de LCR metrelerin frekans, AC ve DC gerilim seviye kalibrasyonlarının yapılması gerekir.

Frekans ölçümleri, maksimum frekans değerine bağlı olarak multimetre veya frekans sayıcı cihazlar kullanılarak, DC sinyal seviyesi ölçümleri çözünürlüğü ve doğruluğu yeterli olabilecek bir multimetre kullanılarak, AC sinyal seviyesi ise düşük frekansta çözünürlüğü ve doğruluğu yeterli olabilecek bir multimetre ile 3 MHz'in üzerinde ise RF güç metre kullanılarak gerçekleştirilir.

4.2 Kapasitans Ölçümleri

Kapasitans ve kayıp faktörü ölçümleri için öncelikle uygun standartların kullanılması gerekir. Kullanılacak standartlar ya ölçüm yapılacak frekanslarda kalibre edilmiş olmalı ya da frekans bağımlılıkları bilinmelidir. Örneğin 1 kHz'te kalibre edilmiş bir kapasitans standardı 1 MHz'te kullanılamaz. Bu frekansta da kalibre edilmiş olmalıdır. Konnektör bağlantılarının cihaza ve ölçüm tekniğine uygun olması gerekmektedir. Eğer kablo kullanılarak ölçümlerin yapılması gerekiyorsa kullanılan kablonun olabildiğince kısa olması ve ekran ile canlı uçlar arasındaki izolasyon direncinin

yüksek olması (>1 Gohm) gerekir. Düşük frekans ve düşük değerli kapasitans ölçümlerinde 2-uç ve ekran ölçüm için yeterliken, yüksek frekanslarda 4 uç ve ekran bağlantısının kullanılması uygun olacaktır. Şekil 4.1'de 4-uç ve ekran bağlantı şekli görülmektedir. Standart, LCR metreye bağlanmadan önce cihazın ölçüm frekansında açık-devre ve kısa devre kompanzasyonlarının yapılması gerekir. Açık ve kısa devre kompanzasyonları yapıldıktan sonra, LCR metre cihazının her ölçüm aralığında farklı değerlerde kapasitans standartları kullanılarak ölçümleri gerçekleştirilir. Eğer farklı bir frekans değerinde kalibrasyonun gerçekleştirilmesi gerekiyor ise yine açık ve kısa devre kompanzasyonlarının yapılması gerekir. Bu işlemlerden sonra kapasitans ve kayıp faktörü ölçümleri alınır.



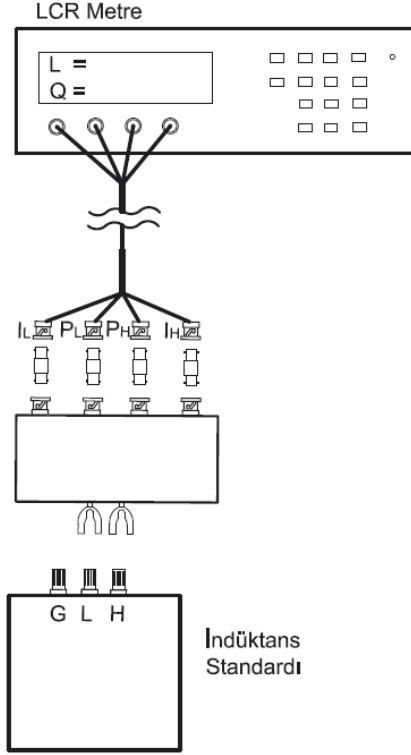
Şekil 4.1 4 uç ve ekran bağlantısı kullanılarak kapasitans ölçümlerinin gerçekleştirilmesi

4.3 İndüktans Ölçümleri

Cihazın indüktans kısmının kalibrasyonu için öncelikle kullanılacak standartların tespiti, ölçüm yapılacak frekanslardaki ulusal izlenebilirliğin sağlanmış olması gerekir. Ölçümlere başlamadan önce kullanılacak kablonun sabitlenmesi gereklidir. İndüktans ölçümlerine başlamadan önce cihazdan ve bağlantı kablolarından gelen hataların giderilmesi için açık devre ve kısa devre kompanzasyonlarının yapılması gerekir. İndüktans standardı LCR metreye 2-terminalli veya 2-terminalli ve ekranlı olarak bağlanabilir. 4-terminal LCR metre cihazların 2-terminal bağlantıya dönüştürülebilmesi için üretici firmaların bu konu ile ilgili üretmiş oldukları özel aparatlar kullanılarak veya uygun dönüştürücü adaptörler kullanılarak Şekil 4.2'de görüldüğü gibi standart indüktans LCR metreye bağlanır. Bu şekilde LCR metrede indüktans değeri okunur, devamında bağlantı kabloları hareket ettirilmeden indüktans standardının HIGH ve LOW uçları direnci düşük kısa bir bakır kablo veya bakır bir köprü vasıtası ile kısa devre edilir. Bu şekilde de kısa devre indüktans ölçümü gerçekleştirilir, daha sonra ilk okunan indüktans değerinden kısa devre indüktans değeri çıkartılarak indüktans standardının değeri elde edilmiş olur.

Farklı indüktans değerleri ve farklı frekans değerleri için yukarıda bahsedilen işlemler sırasıyla yeniden yapılarak LCR metre cihazının farklı ölçüm bölgelerinde kalibrasyonu gerçekleştirilir. İndüktans standartlarının sıcaklık katsayıları kapasitans standartlarına göre daha yüksektir ($30 - 50 \mu\text{H}/\text{H}^\circ\text{C}$).

Bu nedenle indüktans ölçümlerinde ortam sıcaklığının kararlı olması ve eldiven kullanılması hassas indüktans ölçümlerinin gerekliliklerindedir. Kullanılan indüktans standardının kalibre edildiği sıcaklık ile LCR metrenin kalibre edildiği sıcaklık farklı ise indüktans standardının sıcaklık düzeltilmesinin yapılması gereklidir. [2]



Şekil 4.2 2 uçlu bağlantı kullanılarak indüktans ölçümü.

4.4 AC Direnç Ölçümleri

LCR metre cihazının AC direnç kısmının kalibrasyonu için öncelikle kullanılacak standartların tespit edilmesi gerekir. Seçilen standartların frekans bağımlılığının düşük olması ve ölçüm frekansındaki değerinin kalibre edilmiş olması gerekir. AC direnç ölçümleri için en uygun ölçüm şekli 4-uçlu ve ekranlı bağlantı şeklindedir. 4-uçlu ve ekranlı AC direnç standartlarının kullanılması ve kablo kullanılacaksa ekranlı kablo kullanılması ile düşük belirsizlikli ölçüm sonuçları elde edilecektir.

Standart direnci LCR metreye bağlamadan önce cihazın ölçüm frekansında açık-devre ve kısa devre kompanzasyonlarının yapılması gereklidir. Açık ve kısa devre kompanzasyonları yapıldıktan sonra LCR metre cihazının her ölçüm aralığında farklı değerlerde AC direnç standardı kullanılarak ölçümleri gerçekleştirilir. Eğer farklı bir frekans değerinde kalibrasyonun gerçekleştirilmesi gerekiyor ise kalibrasyon frekansında yine açık ve kısa devre kompanzasyonunun yapılması gereklidir.

SONUÇ

Farklı firmaların ürettiği çok sayıda LCR metre çeşidi mevcuttur. Bu LCR metrelerin çalışma frekansına, bağlantı şekillerine ve kullanım alanlarına göre üreticinin tavsiye ettiği farklı kalibrasyon metodları vardır. Bu makalede genel olarak bu kalibrasyonlarda nelere dikkat edilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Empedans Standartları Laboratuvarı, Empedans Ölçümleri Eğitim Notları Gebze – KOCAELİ Haziran – 2008
- [2] Application for Precision Impedance Meters in a Standards Laboratory, IET Labs, Inc.
- [3] Application notes 346-3 Effective Impedance Measurement Using OPEN/SHORT/LOAD Correction

ÖZGEÇMİŞLER**Yakup GÜLMEZ**

1969 yılı Bursa doğumludur. 1990 yılında YTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Aynı üniversitede "İşletme Yönetimi" dalında yüksek lisansını tamamlamıştır. 1993 yılından itibaren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu bünyesinde bulunan Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde çalışmaya başlamıştır. Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde DC direnç, kapasitans, indüktans, AC direnç, indüktif gerilim bölücü, RF empedans, zayıflatma ve gürültü konularında çalışmaktadır. Biri SCI kapsamında olmak üzere 9 adet uluslar arası, 39 ulusal yayını ve raporu mevcuttur.

Gülay GÜLMEZ

1969 yılında Karaman'da doğmuştur. 1992 yılında Hacettepe Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 1993 yılından itibaren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu bünyesinde bulunan Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde çalışmaya başlamıştır. Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde DC direnç, kapasitans, indüktans, AC direnç, indüktif gerilim bölücü konularında çalışmaktadır

Mehmet ÇINAR

1974 yılı Afyonkarahisar doğumludur. 1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'ne bağlı Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 1993 yılından itibaren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu bünyesinde bulunan Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde çalışmaya başlamıştır. Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde DC direnç, kapasitans, indüktans, AC direnç ve indüktif gerilim bölücü konularında çalışmaktadır.