nH Seviyesinde İndüktans Ölçümü

Yakup Gülmez[1], Enis Turhan[1], Turgay Özkan[1], Gülay Gülmez[1]
[1]TÜBİTAK UME, Gebze, Kocaeli, Tel: 0-262-6795000
yakup.gulmez@tubitak.gov.tr, enis.turhan@tubitak.gov.tr,

Özet: *Yeni referans AC akım şöntlerinin geliştirilmesi ile nH değerindeki indüktansların değerlerinin belirlenmesi ve izlenebilirliğinin sağlanması konusu önem kazanmıştır. nH değerindeki indüktansların değerinin belirlenmesi ve izlenebilirliğinin sağlanması indüktans metrolojisinin önemli konularından birini oluşturmaktadır. Bu nedenlerle TÜBİTAK UME'de nH değerindeki indüktansların değerlerinin belirlenmesi ve metrolojik izlenebilirliğinin oluşturulması amacıyla deneysel bir çalışma başlatılmıştır. Bu bildiride bu çalışma esnasında üretilen nH indüktans standartları, kullanılan ölçüm metotları ve alınan ölçüm sonuçları anlatılacaktır.*

Abstract: *Development of new reference AC current shunts have order of nH level self inductances values. More importantly, determining values and providing traceability for nH level inductances constitutes one of the major subjects in the inductance metrology. For these reasons, an experimental study was initiated in order to determine nH level inductance values and to establish metrological traceability at TUBITAK UME. In this paper, nH inductance standards produced in the study, measurement methods and the results of the measurements will be explained.*

1. Giriş

UME Empedans Grubu Laboratuvarı'nda 100 µH – 10 H aralığındaki indüktans standartları birincil seviye ölçümlerde Maxwell-Wien Köprüsü, ikincil seviye ölçümlerde RLC metreler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. RLC metrelerde kullanılan ölçüm yöntemi dört terminal çift ölçüm yöntemidir. Bu çalışmada da kullanılan 4-terminal çift ölçüm tekniği 1964 yılında NIST araştırmacılarından Cutkosky tarafından ortaya atılmıştır [1].

En düşük referans değer olan 100 µH indüktans değerinden izlenebilirliğin akım şöntlerine aktarılması için, ilk önce akım şöntlerine uygun 100 µH indüktans standardı tasarlanıp üretilmiştir. 100 µH standardı akım gerilim yöntemine uygun olarak tasarlanmıştır. UME'de mevcut bulunan 100 µH standartları ve yeni 100 µH standardının RLC metre bağlantı kabloları ve konnektörlerinden kaynaklanan artık indüktans ve kapasitans parametrelerini yok etmek için 4-terminal tanım noktasını belirleyecek açık ve kısa devre aparatları tasarlanmış ve üretilmiştir. Akım ve gerilim kabloları ayrı ayrı birbirlerinin üzerine bükülerek oluşacak karşılıklı indüktans etkisi minimum düzeye indirilmiştir. Böylelikle indüktans ölçümlerinin tekrarlanabilirliği arttırılmıştır. [2,3]. Bütün ölçümler bilgisayar kontrollü olarak Labview'de yazılmış bir program kullanılarak her bir ölçüm için on ölçüm alıp ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir.

100 µH indüktans standardını kalibre etmek için 7600 model RLC metreye Marconi TM 1438 model 1 mH standardı ile 100 µH indüktans standardı seri olarak bağlanarak, ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir. RLC metreye 1 mH indüktans standardı tek başına bağlanarak ikinci ölçüm gerçekleştirilmiştir. 100 µH indüktans değeri belirlenirken seri bağlantı kablolarından gelen etki ihmal edilemeyeceği için her iki ölçümde de aynı bağlantı kablosu bağlantı konumları hiç değiştirilmeden kullanılmıştır. Denklem 1 ile gösterilen birinci ölçüm sonucundan denklem 2 ile gösterilen ikinci ölçüm sonucu çıkartılarak 100 µH indüktans standardının değeri denklem 3'deki şekliyle elde edilmiştir.

$$L_1 = L_{1\,mH} + L_{Kablo} + L_{100\mu H} \tag{1}$$

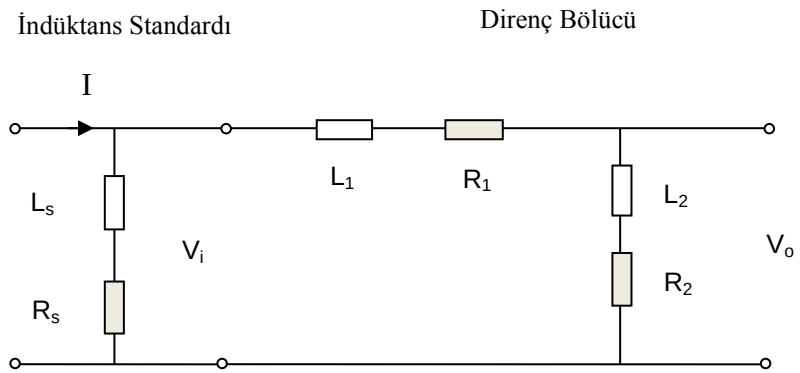
$$L_2 = L_{1\,mH} + L_{Kablo} \tag{2}$$

$$L = L_1 - L_2 = L_{100\mu H} \tag{3}$$

Referans 100 µH ve 1 µH indüktansları kullanılarak 1 µH indüktans değeri elde edilmiştir. RLC metre bağlantı kabloları ve konnektörlerinden kaynaklanan indüktansları yok etmek için dört terminal tanım noktası 1 µH referans standardı ile aynı geometrik yerde olan kısa devre aparatı geliştirilmiştir. RLC metre ile birbirlerine seri bağlı olan Marconi 100 µH ve 1 µH'nin toplam indüktans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 100 µH standardı ölçülmüştür. Bu iki ölçüm sonuç değerlerinin farkı alınarak Marconi model 1 µH indüktans standardının değeri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen işlemler denklem 1,2 ve 3 gösterilen işlemlerin bir benzeridir. RLC metrenin 1 µH ölçümü gerçekleştirdiği düşük indüktans ölçüm bölgesinde 1 µH okuma hatasını belirlemek için 1 µH indüktans standardı doğrudan RLC metreye bağlanmıştır. Birinci ölçüm işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra 1 µH short aparatı RLC metreye bağlanarak ikinci ölçüm işlemi gerçekleştirilir. Bu iki ölçümün farkı alınarak ile RLCmetrenin PCB 1 µH standardı için gösterdiği değer elde edilir. Tasarlanan Lshort kısa devre indüktansı 0,1 nH değerinden düşük olduğu için ölçüm sonuçları üzerine etkisi ihmal edilecek mertebededir. RLC metrenin okuma hatası PCB 1 µH sonuçlarına eklenerek PCB 1 µH standardının gerçek değeri elde edilir. 27 nH hesaplanabilir indüktansın 100 katı olan 2,7 µH değerinde indüktans standardına ihtiyaç duyularak bu değerde indüktans standardı üretilmiş ve değeri belirlenmiştir. Ölçüm metodları yine 1 µH değeri belirlenirken kullanılan ölçüm metotlarıdır.

2. 100/1 Direnç Bölücünün Geliştirilmesi ve Oran Değerinin Belirlenmesi

Geniş frekans aralığına sahip referans indüktans standartları ve direnç bölücü tasarımları ile daha büyük değerli indüktans değerleri referans alınarak, daha küçük indüktans değerleri Şekil 1'de gösterilen devre kurularak ile elde edilmiştir. Şekil 1'deki devrenin girişine bağlanan referans indüktans standardına RLC metrenin akım uçları tarafından I akımı uygulanır. Referans indüktans standardının uçlarında Vi gerilimi elde edilir ve bu gerilim direnç bölücünün belirlediği gerilim oranı ile Vo değerine indirilir ve bu çıkış gerilimi, RLC metrenin gerilim giriş uçlarına uygulanır.



Şekil 1. İndüktans standardı ve 1/100 direnç bölücünün elektriksel bağlantı şeması

Şekil 1'de gösterilmiş olan indüktans standardı ve direnç bölücü kullanılarak çıkışta elde edilen seri indüktans ve direnç değerleri Rydler tarafından matematiksel olarak modellenmiş ve 1 MHz frekansına kadar alınan indüktans ölçümleri daha önce incelenmiştir, bu çalışmada Rydler'in matematiksel modeli kullanılmıştır.[4].

Projede 100/1 oranında direnç bölücü, ve bu bölücüye uygun açık devre / kısa devre aparatları tasarlanıp üretilmiştir. Daha sonraki aşamada Şekil 1'de gösterilen devre kurularak, 100 µH referans indüktansı ile 100/1 oranında direnç bölücünün elektriksel bağlantıları gerçekleştirilmiştir. RLC metrenin akım ve gerilim uç bağlantıları projedeki kapsamında yapılan bağlantı kablosu ile gerçekleştirilmiştir. Direnç bölücü kullanılarak elde edilen ve RLC metrenin gösterdiği yaklaşık 1 µH indüktans değerleri kaydedilmiştir. Modelin kullanılabilmesi için bölücü devresindeki R1 ve R2 dirençlerinin R1 ve R2 dirençleri, L1 ve L2 indüktansları, kullanılan 100 µH indüktansının Rs iç direnci ölçülmüştür. Rydler'in matematiksel modeli kullanılarak 100 µH indüktans standardının değeri modele göre yaklaşık 1/100 oranında küçültülmüş oldu. Daha sonra, teorik olarak model kullanılarak hesaplanan oran ile ölçümlerle elde edilen oranın karşılaştırılmıştır. Bölücünün girişine 100 µH standardı bağlanmış ve çıkışta okunan yaklaşık 1 µH değerinden, RLC metrenin daha önce elde edilmiş olan 1 µH okuma hatası çıkartılarak çıkışta okunan gerçek değerler elde edilmiştir. Çıkışın girişe oranı alınarak bölücünün gerçek ölçümlerle elde edilmiş oran değerleri farklı frekanslar için belirlenmiş ve teorik oran değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Daha sonra bölücünün girişine referans olarak 1 µH indüktans standardı Şekil 1'de gösterildiği gibi bağlanmış ve çıkışta yaklaşık 10 nH değeri elde edilmiştir. Yine burada RLC metrenin nH ölçüm bölgesinde okuma hatası

tespit edilmiştir. RLCmetrenin okuma hatasının tespitinde 27 nH indüktansı kullanılarak, bu ölçüm kademesi kalibre edilmiştir. Çıkışın girişe oranı alınarak bölücünün gerçek oran ölçüm değerleri bulunmuş ve teorik oran değerleriyle karşılaştırılmıştır.

3. nH Mertebesindeki İndüktans Standartlarının Geliştirilmesi ve Ölçüm Sonuçları

Akım terminalleri olan IH ve IL, gerilim terminalleri VH ve VL, BNC tip konnektörler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki BNC konnektörün birbirlerine göre 90º olacak şekilde konumlandırılması ile karşılıklı indüktansların oluşması engellenmiştir. nH mertebesindeki indüktanslar baskılı devre kullanılarak üretilmiştir. Bu kapsamda nH mertebesindeki indüktanslar için kısa devre aparatı da üretilmiştir. 27 nH ve 65 nH değerindeki indüktanslar baskılı devre bakırı kullanılarak oluşturulmuş indüktanslardır ve geometrisi dikdörtgen formundadır. Bağlantılardan oluşan indüktif bileşenler RLCmetre ile dört uçlu olarak short ölçümü gerçekleştirilerek yok edilmektedir. nH mertebesindeki indüktans standardı üç adet dikdörtgen bakır plakanın bileşiminden oluşmaktadır. Geometrisine bağlı olarak indüktans hesaplama formülleri konusunda NIST'te Rosa, Cohen ve Grover 1900'lerin başlarında başlayan ve uzun yıllar alan araştırma çalışmaları yürütmüşlerdir.[5] Dikdörtgen geometrik formu için geliştirilmiş olan formüllerin en son hali olan ve yaygın olarak kullanılanı Grover'ın formülüdür. Bu çalışmadaki hesaplamalarda da bu formül kullanılmıştır. nH'ler mertebesindeki indüktansların değerleri 27,278 nH ve 65,828 nH olarak hesaplanmıştır. RLC Metre ile ölçümlere başlamadan önce 27 nH ölçümleri için tasarlanan kısa devre ve açık devre standartları kullanılarak RLC metrenin açık devre, kısa devre testleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 27 nH indüktans standardı ve kısa devre standardı sırasıyla ölçülmüştür. İlk ölçümden ikinci ölçüm çıkarılarak RLC metrenin 27 nH okuma değeri elde edilmiştir. Aynı şekilde 65 nH hesaplanabilir indüktans standardı da ölçülerek RLC metrenin 65 nH okuma değer elde edildi. 27 nH ve 65 nH indüktans standartlarının RLC metre alınan ölçüm sonuçlarının hata değerleri Grover tarafından belirtilen denklemler kullanılarak elde edilen indüktans sonuçlarından RLC metre ölçüm sonuçları çıkartılarak Tablo 1'deki gibi hata değerleri elde edilmiştir. RLC metre ölçüm sonuçları 65 nH için 0,5 nH'den 27 nH 0,9 nH'den düşük olarak olarak ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde RLCmetrenin farklı frekanslar için okuma hatası belirlenmiş oldu.

Frekans (Hz)	65 nH hesaplanan değer	27 nH hesaplanan değer	65 nH	27 nH	65 nH okuma hatası (nH)	27 nH okuma hatası (nH)
5000	65,83	27,28	66,00	26,67	-0,17	0,61
10000	65,83	27,28	66,35	26,89	-0,52	0,38
50000	65,83	27,28	65,78	26,40	0,05	0,88
90000	65,83	27,28	66,00	26,55	-0,17	0,72
200000	65,83	27,28	65,92	26,67	-0,09	0,61
400000	65,83	27,28	65,72	26,52	0,10	0,75
500000	65,83	27,28	65,61	26,48	0,21	0,80

Tablo 1: 7600 RLCmetre ile 27 nH ve 65 nH ölçümleri

4. Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışmalar ile 2,7 µH ve 1 µH indüktans değerleri 1/100 direnç bölücü ve RLC metre kullanılarak k=2 güvenlik seviyesinde ± 30 nH'den düşük belirsizlikle elde edilmiştir. 1 nH'den daha düşük indüktans değerleri 1/100 direnç bölücü ve RLC metre kullanılarak k=2 güvenlik seviyesinde ± 2 nH'den düşük belirsizlikle elde edilmiştir.

Kaynaklar

[1] R. D. Cutkosky, "Four-terminal-pair networks as precision admittance and impedance standards," IEEE Trans.Commun. Electron., 83, s.19–22, 1964.
[2] B. P. Kibble ve G. H. Rayner, "Coaxial AC Bridges", Bristol, U.K., Adam Hilger, 1984
[3] K.-E. Rydler ve V. Tarasso, "A method to determine the phase angle errors of an impedance meter", CPEM 2004 Digest, s. 123-124
[4] K.-E. Rydler ve P. Simonson, "High-accuracy low-voltage ac-dc transfer standards", CPEM 1994 Digest, s. 382-383
[5] F. W. Grover, "Inductance Calculations: Working. Formulas and Tables",Dover Publications Inc., 1973.