

Geniş Bantlı Akım Algılayıcı için Gerekli Aktif Entegratör Devresi Tasarım ve Gerçeklemesi

Buket TURAN AZİZOĞLU¹, Haldun KARACA¹

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh. Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, 35160, İzmir

(Alınış / Received: 02.05.2016, Kabul / Accepted: 16.11.2016,
Online Yayınlanma / Published Online: 09.01.2017)

Anahtar Kelimeler
Akım algılayıcılar,
Aktif entegratör
devresi,
Ölçüm sistemi,
Rogowski bobini,
Yüksek frekans

Özet: Osiloskoplar, akım ölçmek için, gerilim karşılığını (belirli bir ölçekte) üreten akım algılayıcıları ile beraber akım dalga şeklini görme düzeneklerinin bir elemanı olarak kullanılabilir. Akım algılayıcı çeşitlerinden biri olan rogowski bobini son yıllarda özellikle güç elektroniği ve elektromanyetik uyumluluk testlerinde çok ilgi çekmektedir. Rogowski bobinlerinde sekonder kısmı bobinin kendisidir, primer ise bobin içinden geçen iletkenidir. Bu algılayıcılarda sekonder direnci sadece yüksek frekans bobin rezonanslarını bastırmak için bağlanır. Sekonder geriliminden akım bilgisini elde etmek için önce bu gerilimin entegre edilmesi gerekir. Bu çalışmada entegrasyonu bir endüktans elemanı ve direnç ile sağlayan geniş bantlı bir aktif entegratör devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan ve gerçekleştirilen bu devrenin bakır bir tüp kesilerek elde edilen Rogowski Bobini ile birlikte ölçüm sistemi oluşturulmuş ve simülasyonları yapılmıştır.

A Required Active Integrator Circuit Design and Implementation for a Wideband Current Sensor

Keywords
Current sensors,
Active integrator
circuit,
Measuring
system,
Rogowski Coil,
High frequency

Abstract: Oscilloscopes can be used as an instrument of current waveform viewing devices with current sensors which generate voltage equivalent (at a certain scale) to measure current. Rogowski Coil, one of the current sensor types, attracts great attention in the last years, especially in the power electronics and electromagnetic compliance tests. In a Rogowski coil, the seconder is the coil itself and the primer is the conductor which passes through the coil. In this sensor, seconder resistance is connected, just to suppress the coil resonances in higher frequency. To obtain the current waveform from the secondary voltage, this voltage must be integrated firstly. In this work, a wideband active integrator circuit was designed which provides integration by using an inductor element and a resistor. A measuring system of the designed and implemented circuit was formed and simulated with Rogowski Coil which is made by cutting a copper tube.

*Sorumlu yazar: Buket Turan Azizoğlu: buket.turan@deu.edu.tr

1. Giriş

Bu Akım dalga şekilleri, başarılı bir tasarım ya da problemleri görmek için son derece faydalı bilgiler sağlayabilir. Geniş bantlı bir algılayıcı ile akımları görmek tasarımcının güvenilir bir devreyi gerçekleştirmesine yardımcı olacak faydalı bilgiler sağlayabilir. Akımın zamanla değişimini, osiloskop ekranından gösterimini sağlayan akım algılayıcıları çalışma ilkelerine göre akım şöntleri, akım transformatörleri, Rogowski bobinleri, hall-effect algılayıcılar gibi gruplara ayrılırlar [1,2,3]. Rogowski bobinler akım transformatörleriyle aynı fiziksel görünüme sahip olmakla beraber çalışma ilkesi bir ölçüde farklıdır[4,5,6].

Rogowski algılayıcılarda sekonderde endüklenen gerilim küçük olduğundan (manyetik çekirdek olmadığından) pek çok uygulamada yükseltilmesi gerekmektedir. Sadece Direnç-Kondansatör (D-K) ya da Direnç-Endüktans (D-E) elemanları ile gerçekleştirilmiş olan pasif entegratör devrelerinde entegratör devresi çıkış işareti genliği her zaman giriş işareti genliğinden küçük olacaktır [7]. İşlemsel yükselteç kullanılarak gerçekleştirilmiş entegratör devreleri ise düşük frekanslardaki ölçümler için uygundur [8]. Bu durumda en azından osiloskop ile gözlenebilecek sonuçlar elde edebilmek için geniş bantlı bir aktif entegratör gerekmektedir.

Bu çalışmada D-E içeren bir aktif entegratör devresi tasarlanmış ve tüp biçimindeki Rogowski Bobini ile birlikte ölçüm sisteminin simülasyonları yapılmıştır. Bu tasarlanan devrenin ölçümü yapılacak işaret bant genişliğinin üzerinde bir bant genişliğine sahip olması elde edilecektir. Bu durum dalga şeklinin gerçek akım dalga şekline çok benzemesi için gereklidir. Bu sayede kısa

sürelilik ancak genliği oldukça yüksek akım darbeleri osiloskop ekranında görülebilecek ve görülen bu değer gerçek akımı yansıtacaktır. Simülasyon aşamasında Rogowski bobinli yapının tüm özelliklerini tanımlamak ve s-parametrelerini (scattering parameters) elde etmek için FEKO simülasyon programından yararlanılmıştır. Bu programda HFSS, CST gibi diğer 3 boyutlu simülasyon programlarında olduğu gibi doğru sonuç elde etmek için küçük parçalara ayrılması (meshing) aşamasının çok dikkatli oluşturulması gerekmektedir [9].

2. D-E Aktif Entegratör Devresi

2.1. Entegratör devre ve şeması

Akım transformatörü algılama mekanizması ve Rogowski bobin algılama mekanizmasının basitleştirilmiş transformatör modelleri şekil 1.a. ve şekil 1.b.'de gösterilmiştir. Her ne kadar model olarak aynı görünse de çalışma prensipleri farklılık göstermektedir.

Akım transformatörü algılama mekanizmasında sekonder uçları arasında görülecek gerilim denklem 1'de belirtildiği gibidir [10]:

$$V = R i \frac{N1}{N2} \quad (1)$$

Rogowski bobin algılama mekanizmasında, manyetik çekirdek bulunmadığından L_m çok küçüktür ve ölçülecek akımın nerede ise tamamı L_m içinden geçer. Bu neden ile mıknatıslanma endüktansı (L_m) uçları arasında oluşan gerilim aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$V_{Lm} = L_m \frac{d_i}{d_t} \quad (2)$$

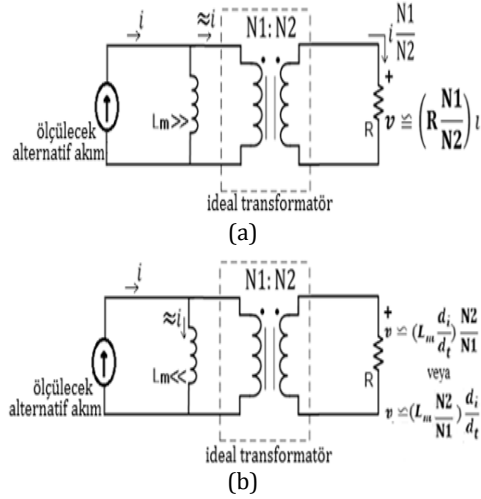
i = ölçülecek akım

Sekonder uçlarında görülecek gerilim ise denklem 3'teki gibi olacaktır.

$$V_{Lm} = L_m \left(\frac{d_i}{d_t} \right) \frac{N_2}{N_1} \quad (3)$$

Bu gerilim, L_m 'nin pratikdeki değerinin çok küçük olmasından dolayı, (N_2/N_1) oranı ile çarpılmış olsa bile yine de küçük (milivolt mertebesinde) değerler alır.

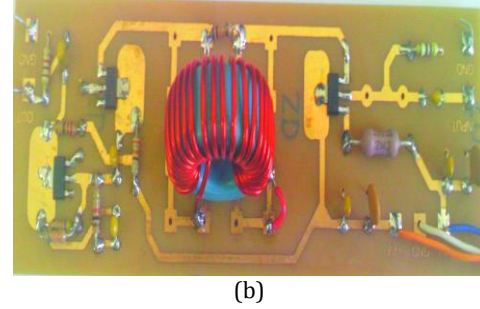
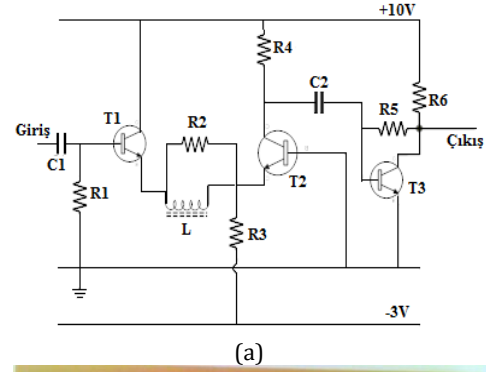
Rogowski bobini çıkış (secondary) yükü yeteri kadar yüksek veya açık devre seçilir ise, manyetik çekirdek de olmadığından (L_m küçük) ölçülecek akımın nerede ise tamamı L_m 'den geçecek ve uçları arasında bir gerilim indükleyecektir. Giriş bir akım kaynağı olarak düşünülebilir nedeni ise L_m sadece Rogowski bobini içinden geçen iletkenin kısmi (partial) endüktansıdır. Diğer bir deyiş ile Rogowski bobinin devreden çıkarılmış olduğu durumda da bu endüktans devre içinde vardır.



Şekil 1 a. Akım transformatörü algılama mekanizması **b.** Rogowski bobin algılama mekanizması

Rogowski bobinin uçları arasındaki gerilimi entegre etmek için bilinen RC ya da RL devrelerinden yararlanarak pasif

entegratör gerçekleştirilebilir. Ancak pasif entegratör devrelerinin çıkış genliği her zaman giriş işareti genliğinin çok altındadır. Bu durumda zaten küçük olan Rogowski bobini çıkış genliği çok daha azalır ve osiloskop ile gözlemlemek için yükseltilmesi zorunlu duruma pek çok uygulamada gelir. Bu durumda aktif entegratör devreleri iyi bir çözüm olabilir.



Şekil 2. a. Tasarlanmış aktif entegratör devresinin şematik diyagramı **b.** R-L prototip devresinin görünümü

Önerilen aktif entegratör devresinin şeması ve prototip modeli Şekil 2. a. ve Şekil 2. b. 'de görülmektedir. Şekil 2.b.'de görülen endüktans bobin algılayıcı değil, entegral alma işlevinin bir parçası olan endüktans değerini sağlamaktadır.

2.2 Entegratör devresinin çalışma ilkesi

Tasarlanıp gerçekleştirilen D-E aktif entegratör devresinde T1 transistörü emitör çıkışlı kattır ve entegre edici

bobinin (L) küçük bir direnç ile sürülmesini sağlar. Entegratör devresi endüktansının diğer ucuna yine bir emitör çıkışı bağlıdır ancak bu ikinci katı süren endüktans akımıdır. Bu devrede L endüktansı içinden geçen akımı yaratan eşdeğer kaynak iç direncinin değeri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$r_e + r_e = 2r_e \quad (4)$$

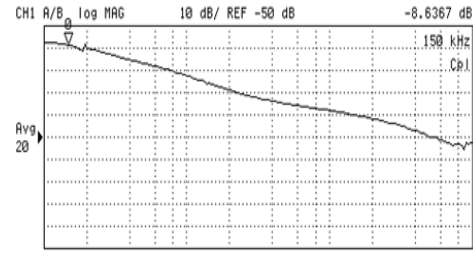
Burada belirtilen r_e , T1 ya da T2 transistörleri emitöründen görülen dirençtir diğer bir deyiş ile bilinen transistör küçük işaret parametresidir ve devredeki değeri 4Ω kadar küçük bir değerdir. T1 ve T2 transistörlerinden yaklaşık eşit emitör akımları geçmektedir. Bu direncin küçük olması ile devrenin entegral almaya başlayacağı köşe frekansı değeri nispeten alt frekanslarda başlayacak ve bu amaç için fiziksel boyutu keza elektriksel olarak endüktans değeri büyük olmayan endüktans elemanları yeterli olabilecektir. Devrenin entegral almaya başlayacağı alt frekans sınırının bağıntısı denklem 5'teki gibi gösterilebilir.

$$f_c = 2 \frac{r_e}{L} \quad (5)$$

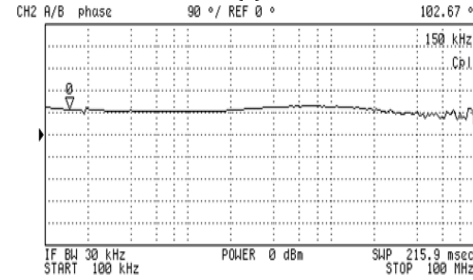
Şekil 2.a'da gösterilen devrede T2 ve T3 transistörlerinin oluşturduğu katlar gerilim kazancı sağlamaktadır. T1 katı ise sadece akım kazancı sağlayarak girişe bağlanacak Rogowski Bobininin devrenin giriş empedansı ile yüklenmesini çok düşürmektedir. Böylece Rogowski Bobini devrenin giriş direnci dikkate alınmadan bağımsız bir şekilde uçlarına bağlanacak bir sonlandırma direnci ile sağlanıp testler sırasında kolaylıkla kontrol edilebilen duruma getirilebilmiştir.

2. Entegratör devrenin ölçüm sonuçları

Gerçekleşmiş bu yeni entegratör devresinin 4395A Agilent Network Analyzer ile alınmış Bode Diyagramı şekil 3.a. ve şekil 3.b.'de verilmiştir. Bu deneysel grafikten devrenin 100 kHz (cihazın ölçüm alt sınırı) ile 100 MHz arasında oldukça başarılı bir şekilde entegratör olarak çalışacağı anlaşılmaktadır. Frekans arttırıldığında kazanç beklendiği gibi 20dB/dekad eğimi ile azalmaktadır ve kazanç açısı -90° derecede olmaktadır.



(a)

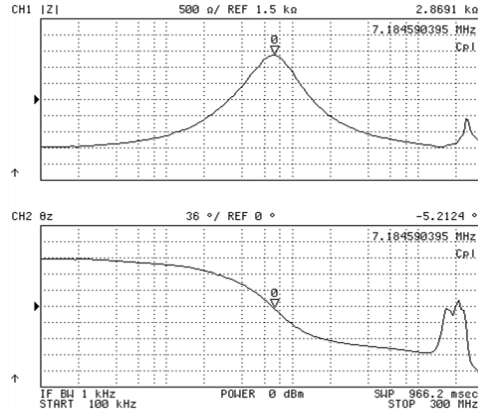


(b)

Şekil 3. Endüktans ve direnç elemanları ile entegrasyon sağlayan aktif devrenin Bode diyagramı ölçüm sonucu, **a.** genlik (-20 db/dekad eğimli), **b.** faz (tüm bant boyunca sabit ve -90°)

Aktif entegratör devresi içerisindeki elemanın parazitik değerlerinden dolayı bu devrenin de kendine özgü entegratör olarak çalışma bant genişliği sorunları olduğu gözlenmiştir. Gerçekte entegral için devreye bağlanmış endüktans elemanının Şekil 4'te yine Network Analyzer ile empedans ölçüm sonucundan görüldüğü üzere 7.18 MHz

civarında paralel rezonans ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4. Akif enetgratör devresi içindeki L endüktansının empedans karakteristiği, karakteristikten 7.18 MHz'de endüktansın paralel rezonans etkisi ortaya çıkmaktadır (sargı kapasiteleri nedeni ile)

Entegral alıcı devre üzerinde yapılan birtakım kompanzasyonlar ile entegral alma sınırı 100 MHz üzerine çıkarılabilmektedir. Yukarıda Şekil 4'ten görüleceği üzere çok daha alt bir frekansta bobin (entegral alıcı) rezonansa girmekte ancak kompanzasyonlar ile entegratör işlevi bant genişliği Şekil 3'te görüldüğü gibi 100 MHz üzerine çıkarılabilmektedir.

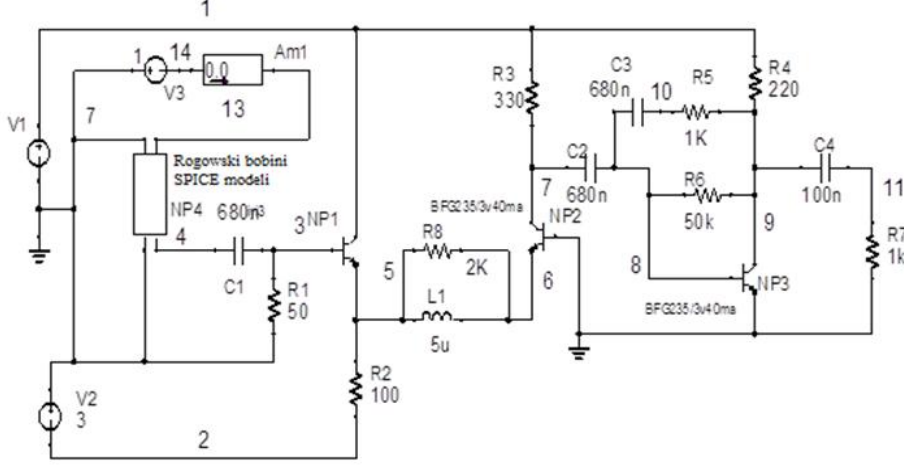
4. Tüp Biçimindeki Rogowski Bobini ile Birlikte Ölçüm Sisteminin Simülasyonları

Bakır tüp ile gerçekleştirilmiş Rogowski Bobini algılayıcısı Şekil 5.'te verilmiştir.

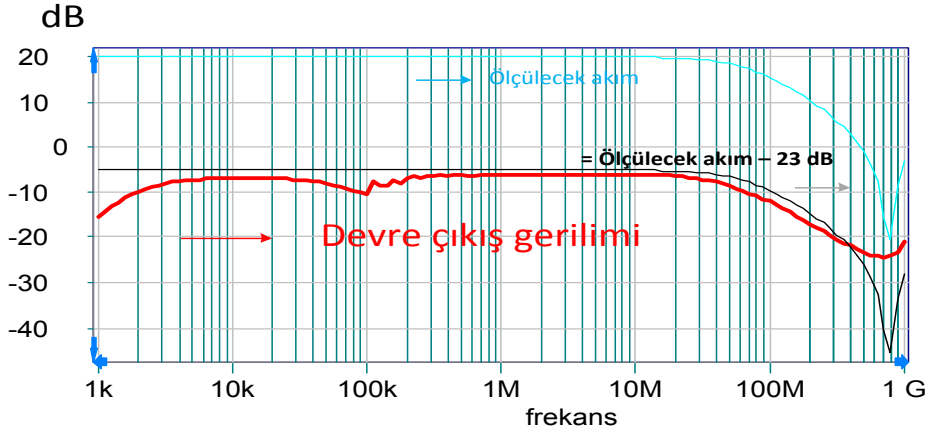


Şekil 5. Bakır tüp ile gerçekleştirilen algılayıcı

Algılayıcı ve ölçülecek akımın geçtiği tel ile bu akımı yaratan kaynak FEKO elektromanyetik simülasyon programı yardımı ile analiz edilmiştir. Simülasyonlarda prototiplerdeki gerçek fiziksel boyutlar ve elektriksel bilinen değerler yerine konmuştur. FEKO 5.5 programı yardımı ile elde edilen s-parametreleri (scattering) Spice programı içerisine eleman modeli olarak aktarılmıştır. Böylece elektromanyetik yapı ile onu takip eden elektronik analog entegratör devresinin birlikte başarımı benzetim ile görülebilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.a. Ölçüm sisteminin Spice içinde toplanmış model simülasyon devresi, burada NP4 bloğu elektromanyetik yapının Spice modelidir **b.** Sistemin simülasyon sonuç grafiği içinde mavi eğri ölçülecek akım, kırmızı ise ölçüm sonucu siyah ise iki karakteristiği daha iyi karşılaştırabilmek için mavi eğriden 23 dB (sabit) çıkarılması ile oluşan eğridir.

Rogowski Bobinli elektromanyetik sistem Şekil 6'daki Spice devresine NP4 blok'u olarak FEKO simülasyon programında elde edilen s-Parametreleri yolu ile dahil edilmiştir. Simülasyon sonuçlarından, ölçüm sistemi ile 300 MHz üstüne kadar ölçüm yapılabileceği anlaşılmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Rogowski bobini ile akım dalga şekillerini osiloskopta görebilmek amacı ile geniş bir frekans bandı içinde entegratör işlevini sağlayan elektronik devre önerilmiştir. Bu sayede Rogowski Bobin çıkışındaki işareti zamana göre entegre ederek akım ölçümünün bir parçası olmuştur. Bu devrenin aktif bir devre olması basit bir osiloskop ile akım

şekillerini görebilmeyi sağlayan yeterli genlikte işaretler elde edilmesini sağlamıştır. Yine belirtilen Rogowski bobini konsepti içinde bilinen klasik yapıdaki sargıların olmaması çok geniş bir frekans bantı içinde bu yapının Rogowski bobini olarak yararlanılabileceğini göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından, 106E196 NOLU proje kapsamında desteklenmiştir

Kaynakça

[1] Mónica V., Rojas-Moreno, Robles G., Tellini B., Zappacosta C., Martínez-Tarifa J. M., Sanz-Feito J., 2011, Study of an Inductive Sensor for Measuring High Frequency Current Pulses, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, Cilt. 60, No. 5, s. 1893 - 1900.

[2] Ziegler S., Woodward R.C., and Iu H. Current sensing techniques: A review, *IEEE Sensors Journal*, Cilt. 9, No. 4, 2009, s. 354-376.

[3] Ripka P., 2010, Electric current sensors: a review, *Measurement Science and Technology*, Cilt. 21, No. 11, s. 1-23.

[4] Christian S., Stefan T., Werner E., 2015, Impact of Rogowski sensors on the EMC performance of medium voltage power substations, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 16-22 Ağustos, Dresden, 203 - 208.

[5] Di Noia L. P., Rizzo R., 2015, Vilaragut Llanes M., Design of sensors for a Smart Power Substation, 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 22-

25 Kasım, Palermo, İtalya, s. 1442-1445.

[6] Chiampi M., Crotti G., and Morando A., 2011, Evaluation of flexible Rogowski coil performances in power frequency applications, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Cilt. 60, No. 3, s. 854-862.

[7] Minjiang X., Houlei G., Baoguang Z., Chengzhang W., and Chun T., 2011, Analysis on transfer characteristics of Rogowski coil transducer to travelling wave, *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, 16-20 Ekim, Beijing, Cilt. 2, s. 1056-1059.

[8] Wang B., Wang D., Wu W., 2009, A Rogowski Coil Current Transducer Designed for Wide Bandwidth Current Pulse Measurement, *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPERC '09.*, 17-20 Mayıs, Wuhan, s. 1246 - 1249.

[9] Garg R., 2008, Analytical and Computational Methods in Electromagnetics, Boston, London, s.157-160.

[10] Bluhm H., 2006, Pulsed Power Systems. New York, NY, USA: Springer, 323s.