

Düzlemsel Transformatörlerin Benzetiminde Kullanılan MLM Yönteminin Hızlandırılmasına Yönelik Bir Çalışma

A Study to Accelerate the MLM Method used for the Simulation of Planar Transformers

İ. Onur Loraz¹, M. Timur Aydemir²

¹Aselsan A.Ş., Ankara, Türkiye
ioloraz@aselsan.com.tr

²Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye
aydemirmt@gazi.edu.tr

Öz

Yüksek güç yoğunluğuna sahip, düşük maliyetli güç devrelerine olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamaya yönelik, düzlemsel (İng: planar) transformatör yapıları gün geçtikçe daha cazip hale gelmektedir. Düzlemsel transformatörlerin, sahip olduğu avantajların yanı sıra, prototip üretiminin uzun oluşu ve yapısından kaynaklanan parazitik etkilerin azaltılması için gerek duyulan çalışmaların tasarım süresini uzatması gibi sakıncaları da bulunmaktadır. Düzlemsel transformatörlerin başarılı bir biçimde tasarlanabilmesi için önceden modelleme ve benzetiminin sağlıklı olarak yapılması önemlidir. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden biri Modüler Katmanlar Yöntemi (MLM) olarak adlandırılır. Bu çalışmada hızlandırılmış MLM yöntemi kullanarak aktif ileri çevirici devresinde kullanılacak bir transformatörün benzetim çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar uygulama devresi ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Düzlemsel transformatör, planar transformatör, transformatör modelleme, benzetim.

Abstract

The demand for high power density and low-cost power electronic circuits increases day by day. Planar transformers that can meet this demand have been drawing more attention recently. Long production duration of the prototypes and long design duration due to the necessity of performing some work to reduce the parasitic effects are the negative sides of the planar transformers. Modelling and simulation of planar transformers should be carefully carried out before the production for a successful application. One of the methods used for this purpose is the "Modular Multi Layer Method" (MLM). In this paper, the design of a planar transformer for an active forward converter and its simulation by using accelerated MLM are discussed. The simulation and experimental results are compared.

Keywords: Planar transformer, transformer modeling, simulation.

1. Giriş

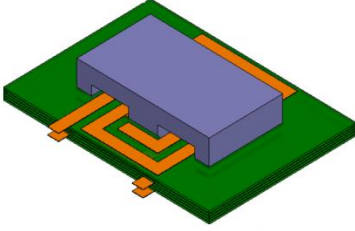
Son zamanlarda, standart düzlemsel (İng: planar) transformatörler sahip olduğu avantajlardan dolayı standart tel sargılı transformatörlere göre daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Düzlemsel transformatör yapılarının düşük profili ve yüksek güç yoğunluğu ve çok daha iyi ısı atım kabiliyetine sahip olması, üretilen her transformatörün birbirinin eşi olması ve benzer parazitik etkileri göstermesi düzlemsel transformatörlerin avantajlarından bazılarıdır [1,2]. Ayrıca, endüstri tarafından bakıldığında da düzlemsel transformatörlerin üretim süresinin kısalığı, az iş gücü gerektirmesi, Düzlemsel transformatörleri çok daha tercih edilir kılmaktadır. Fakat bu avantajlar tasarım sürecine aynı şekilde yansımamaktadır. Her ne kadar düzlemsel transformatörlerin büyük miktarlardaki üretimi hızlı olsa da düşük sayıdaki üretimi aynı oranda kısalınamamaktadır. Ek olarak, üretilen transformatörlerin değiştirilememesi de tasarımcıların transformatörler üzerinde küçük değişikliklere gitmesini engellemektedir. Bu da Ar-Ge aşamasının uzamasına, birden fazla düzlemsel transformatör üretimine; sonuç olarak da firmalara ek maliyet çıkmasına neden olmaktadır. Tüm bu nedenler düzlemsel transformatör yapıları için benzetim yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Bu makalede düzlemsel transformatör yapısı anlatılmış, ardından MLM metodu [3] ile düzlemsel transformatör benzetim yöntemleri incelenmiş ve daha sonra da MLM metodu kullanılarak "M2Spice" yazılımı [4] yardımıyla trafonun farklı devre yapıları ile benzetimi yapılmıştır. "M2Spice" yazılıma ek olarak yapılacak bazı iyileştirmelerle benzetim süresinin daha kısaltılacağı gösterilmiştir, benzetimde kullanılan yapının gerçekleştirilerek alınan ölçümlerin yapılan benzetimle tutarlı olduğu gösterilmiştir.

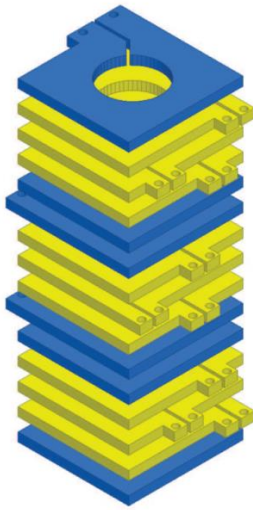
2. Düzlemsel Transformatör Yapısı

Düzlemsel transformatörlerin yapısı basit olarak Şekil 1'de gösterilmektedir. Standart transformatörlerinden farklı olarak, akım bakır teller yerine baskı devre kartlarına (BDK) çizilen bakır hatlar üzerinden akıtılmakta, çekirdek ise BDK üzerindeki boşluklardan BDK'ye bağlanmaktadır. Örnek bir düzlemsel transformatör için BDK'nin her bir katmanında bir

sarım olacak şekilde çizilen bakır hatlar Şekil 2’de gösterilmiştir. Sarımlar burada gösterildiği gibi her katmanda tek sarım olabileceği gibi birden fazla sarım ya da sargı da olabilir.



Şekil 1: Örnek düzlemsel transformatör yapısı. (Yeşil: Baskı Devre Kartı (BDK), Turuncu: BDK üzerindeki bakır hatlar, Mor: Çekirdek) [6]



Şekil 2: Düzlemsel transformatörler için örnek sarım şekli

Hatların BDK’lerin üzerinde olması ve çekirdeğin belli bir şekilde BDK’ye monte edilmesi; düzlemsel transformatörlerin kolaylıkla aynı biçimde üretilebilir olmasını, mıknatıslanma ve kaçak endüktans değerlerinin üretilen tüm transformatörler için aynı olmasını sağlamaktadır. Standart tel sargılı transformatörlerdeki sargı işlemi düzlemsel transformatörlerde olmadığı için seri üretimlerde üretim maliyeti de düşmektedir. Ayrıca, transformatörün üst yüzeyi, transformatör için gerekli taban alanını arttırmakla birlikte, ısı atımı için geniş bir alan sağlamaktadır. Düzlemsel transformatörler hem küçük hacimli oluşlarıyla hem de yüksek ısı atımı kabiliyetleri nedeniyle, özellikle yüksek frekanslarda (100 kHz’den birkaç MHz’e kadar) yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Düzlemsel transformatörlerin alternatif akım (AA) direnç değerleri standart transformatörlere göre yüksek olmakla birlikte, bu değer; sarımlar arasında kolaylıkla uygulanabilen sandviç yöntemi ile azaltılabilmektedir. Bu yöntem farklı sargılara ait sarımların BDK katmanları arasında belirli bir düzen ile sıralanmasını ve sarımların birbirleri üzerindeki etkisini kontrol etmeyi amaçlamaktadır [2, 5]. Ancak, BDK katmanlarında bakır hatların birbirine yakın, geniş ve paralel oluşu; hem yüzey ve yakınlık (İng: proximity) etkisi gibi olumsuzluklara hem de sarımlar arası kapasitenin standart tel

sargılı transformatörlere göre daha büyük olmasına, dolayısıyla ortak mod gürültüsünün yüksek düzeyde olmasına yol açmaktadır [6]. Literatürde, özellikle düşük güçlerde sıklıkla kullanılan ileri (forward) ve çapraz (flyback) çevirici uygulamalarına yönelik olarak, bu gürültünün azaltılması için yöntemler önerilmiştir [4]. Her ne kadar düzlemsel transformatörlerin kaçak endüktans değeri için bir genelleme yapılamasa da sarımların BDK içinde doğru dağıtılmasıyla düşük kaçak endüktans değerleri elde edilebilmektedir [2, 7].

Sahip olduğu olumlu özelliklere karşın parazitik etkilerin kaçınılmaz olması nedeni ile parazitik etkilerin devreye etkisini daha doğru tahmin edebilmek ve düzlemsel transformatörlerin tasarım süresini kısaltmak için tasarım sürecinde modelleme ve benzetim çalışmaları önem taşımaktadır. Literatürde tasarım sürecini kolaylaştırmaya yönelik modelleme ve benzetim çalışmaları yapılmış ve farklı yöntemler önerilmiştir. Çeşitli deneysel hesaplamaların kullanımı, elektriksel devre şeklinde modelleme ve sonlu eleman yöntemi ile benzetim yöntemleri düzlemsel transformatör benzetimi için önerilen yöntemlerden bazılarıdır [3,8-10]. Fakat bu yöntemler düzlemsel transformatörlerin çevre elemanları ile birlikte modellenmesine izin vermemekte ya da ücretli yazılımların kullanılmasını gerektirmektedir. "Modular Layer Method" (MLM; İng: Modüler Katmanlar Yöntemi) adı verilen yöntem ile düzlemsel transformatörler; endüktör, direnç ve ideal transformatörlerden oluşan bir elektrik devresi olarak modellenmektedir [3,10]. Bu yaklaşım diğer yöntemlerde olan dezavantajları ortadan kaldırmakta, benzetim süre ve maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır. Hatta bu yöntemi daha da kolaylaştırmak için gerekli devre elemanlarının büyüklüklerinin hesaplandığı "M2Spice" yazılımı da ücretsiz olarak sunulmuştur [11,12]. Bu yazılımların bazı inceliklerine dikkat edildiği sürece düzlemsel transformatörün tasarımı oldukça kolaylaşmaktadır. Söz konusu yöntem bir sonraki bölümde kısaca tanıtılmaktadır.

3. MLM Yöntemi İle Düzlemsel Transformatörlerin Modellenmesi

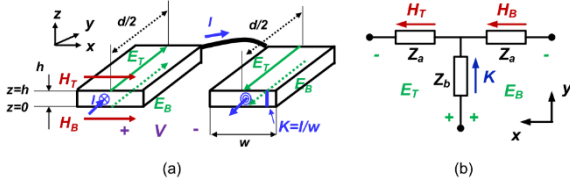
Düzlemsel transformatörün direnç, endüktör ve ideal transformatör olarak modellenmesinin ilk çıkış noktası Maxwell denklemlerinin 1-D (tek boyutlu) analizidir. Kullanılan çekirdeğin manyetik geçirgenlik değeri yeterince büyük olduğu ve iletkenler tüm pencere boşluğunu doldurduğu sürece bu varsayım geçerlidir. Bu varsayımlardan yola çıkarak düzlemsel transformatörün modellenmesi için MLM yöntemi geliştirilmiştir [3].

3.1. Tek Bir Sarımın Modellenmesi

Şekil 3’te düzlemsel transformatörün tek bir sarımı gösteren modelde, $d(m)$ hattın uzunluğunu, $w(m)$ genişliğini, $h(m)$ ise kalınlığını göstermektedir. Bu tek sarım üzerinden de $J(A/m^2)$ akım yoğunluğuna sahip $I(A)$ akımı akmaktadır ve $V(V)$ gerilimi endüklenmektedir. Bu akımın birim genişlikteki büyüklüğü ise $K(A/m)$ ile gösterilmektedir. Akan akımdan dolayı H manyetik alanı ve E elektrik alanı oluşmaktadır. Tek bir katman için 1-D difüzyon denklemlerinin çözülmesi ile birlikte denklem (1) elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} E_T &= Z_a H_T + Z_b K \\ E_B &= Z_a K - Z_a H_b \end{aligned} \quad (1)$$

Burada T indeksi ile gösterilen terim sarımın üst yüzünü, B indeksi ise sarımın alt yüzünü göstermektedir. Denklemde verilen Z (Ω) terimleri karmaşık sayılar olup denklem (2) deki gibi ifade edilmektedir.



Şekil 3.(a) Düzlemsel transformatörün tek bir sarımı, (b) bu sarımı modelleyen devre [3]

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{\psi(1-e^{-\psi h})}{\sigma(1+e^{-\psi h})} \\ Z_b &= \frac{2\psi e^{-\psi h}}{\sigma(1-e^{-2\psi h})} \\ \psi &= \frac{1+j}{\delta}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \end{aligned} \quad (2)$$

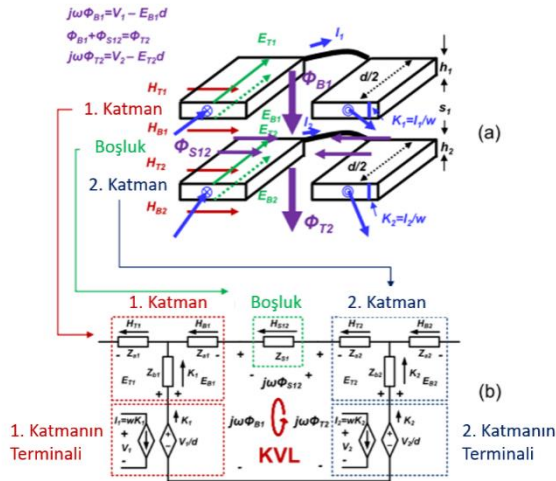
Denklem (1)'deki elektriksel ve manyetik bileşenler arasındaki ilişki Ampere yasası uygulanarak denklem (3)'teki gibi elde edilebilir. Denklem (1) ve (3), Şekil 2(b)'deki elektrik devresini analiz etmek için gerekli Kirchhoff denklemlerini oluşturur [3].

$$(H_T - H_B)w = I = Kw \quad (3)$$

3.2. Üst Üste Gelen İki Sarımın Modellenmesi

Şekil 4'te gösterildiği gibi üst üste gelen iki sarım PCB yalıtım malzemesi yardımıyla birbirinden ayrılır. Tek sarım modellenmesinde kullanılan denklemler; elektromanyetik teorideki sınır koşulu kuralına uygun olarak yalıtkan malzeme boşluğu ve bu boşluktaki manyetik alan da dikkate alınarak üst üste gelen iki sarım için çözülür.

Bir katmanda birden fazla seri sarım yapıldığı durumda ise Şekil 4'te gösterilen akım bağımlı gerilim kaynağı sarım sayısı oranında azaltılır.



Şekil 4: (a) Üst üste gelen iki sarım, (b) üst üste gelen iki sarımı modelleyen devre [3]

3.3. Çekirdek ve Hava Aralığının Modellenmesi

Çekirdeğin üst ve alt yüzündeki relüktans sırasıyla \mathcal{R}_T ve \mathcal{R}_B 'dir. Dowell formülü [11] kullanılarak m sarım sayısına sahip en üst ve alt (n) katmanlardaki değişkenlerin \mathcal{R}_T ve \mathcal{R}_B ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Bu değişkenler denklem (4)'te gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} dE_{T1} - \frac{V_1}{m_1} &= -\frac{jw}{\mathcal{R}_T} wH_{T1} \\ dE_{Bn} - \frac{V_1}{m_n} &= \frac{jw}{\mathcal{R}_B} wH_{Bn} \end{aligned} \quad (4)$$

Burada $Z_T = jw/\mathcal{R}_T$ ve $Z_B = jw/\mathcal{R}_B$ olacak şekilde iki farklı empedans tanımlanıp denklem (4) tekrar yazılabilir.

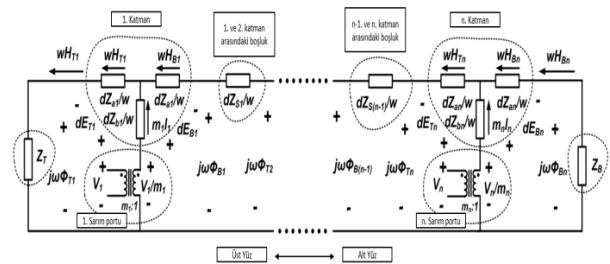
3.4. Düzlemsel Transformatörünün Eşdeğer Devre İle Gösterimi

Yukarıda bahsedilen adımlardaki işlemler yapıldıktan sonra düzlemsel transformatör Şekil 5'te gösterildiği gibi direnç, endüktör ve ideal transformatörden oluşan bir eşdeğer devre ile modellenebilir.

4. MLM Yönteminin Uyarlanması

Bu çalışma kapsamında, aktif ileri çevirici devresinde kullanılacak 1:2 sarım oranlı bir transformatörün modellenmesi ve benzetimi hedeflenmiştir.

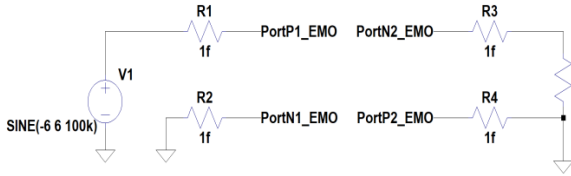
MLM yönteminin düzlemsel transformatöre uygulanması sırasında, bir önceki bölümde verilen formüllerin çözülmesi ve modelde kullanılacak devre elemanlarının değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu hesaplamaların yapılması için gelişmiş matematik araçlarının kullanılması, yöntemi oldukça pratik hale getirmektedir. Bu hesaplamaları kolay bir şekilde yapmak için, önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi, ücretsiz yayınlanan M2Spice yazılımı kullanılabilir [4]. M2Spice yazılımı sayesinde gerekli devre şeması değerleri ve bunların kendi arasındaki bağlantısını veren bir kod otomatik olarak üretilebilmektedir. Üretilen kodun LTSpice [13] yazılımına eklenmesiyle transformatör sargılarının artı ve eksi uçları diğer devre elemanlarına bağlanabilecek şekilde modellenebilmektedir [12]. Bu işlem esnasında LTSpice programının çözüm yöntemi "normal" mod yerine "alternate" moda ayarlanmalıdır. Her ne kadar "alternate" mod, "normal" moda göre çok daha yavaş çalışsa da "normal" modda yapılan bazı denemelerde yakınsama hatası gözlemlenmiştir.



Şekil 5: Düzlemsel transformatörün devre şeması modeli [3]

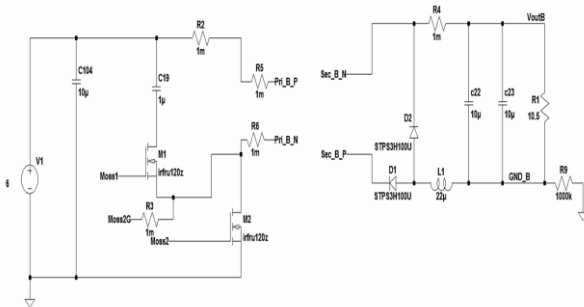
Kullanılacak transformatörün sarım sayıları birincil taraf için 6 ikincil taraf için 12 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla 18 katmanlı olacak BDK'nin ilk altı katmanı seri bağlanarak

birincil tarafı, ikinci 12 katmanı da kendi aralarında seri bağlanarak ikincil tarafı oluşturmaktadır. Hava aralıksız transformatörün çekirdeği 3F4 malzemesinden üretilen iki adet E/32/6/20 çekirdek kullanıldığı varsayılmıştır. 18 katmanlı transformatörün M2Spice programı kullanılarak basit bir benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim Şekil 6'da verilen basit devre kullanılarak yapılmıştır. Burada PortP1_EMO birincil sargının artı ucunu, PortN1_EMO ise birincil sargının eksi ucunu göstermektedir. İkincil taraf için de aynı gösterim kullanılmıştır. Şekilde gösterilen 1f değerleri 1 femto-ohm ($f\Omega$) anlamına gelmekte olup, devrenin çalışmasını etkilemeyen ancak benzetim programında düğüm tanımlayabilmek için kullanılan dirençlerin değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 6: M2Spice programını denemek için kullanılan basit devre

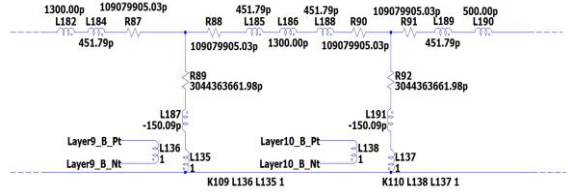
Transformatörünün birincil tarafına 100 kHz frekanslı 6V tepe değerli bir sinüs akımı uygulanmış, ikincil tarafına da 1 k Ω değerinde bir yük bağlanmıştır. İlk 10 μ s için yapılan benzetimin sonuçları 0.859 saniyede alınmıştır. Daha sonra aynı yapı bu kez de Şekil 7'e verilen aktif ileri çevirici yapısını oluşturan çevre elemanları da benzetime dâhil ederek tekrarlanmıştır. Anahtarlama frekansı olan 100 kHz aynı şekilde korunmuş ilk 10 μ s'lik sürenin benzetimi için gereken süre 9134.788 s'ye çıkmıştır. Benzetimin gerçekleşme süresi, M2Spice programının pratik uygulamalarda beklenen kolaylığı sağlamadığı, maliyetin süre bakımından çok fazla olduğunu göstermiştir.



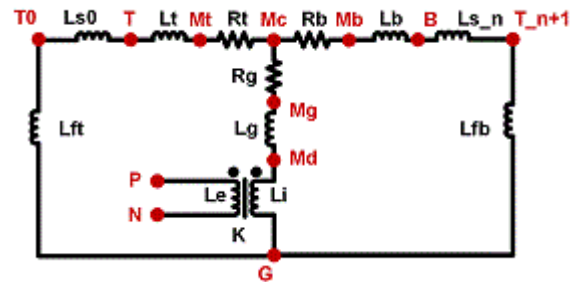
Şekil 7: Düzlemsel transformatör benzetiminde kullanılan aktif ileri çevirici devresi

Bu sorunu aşmak için M2Spice yazılımının ürettiği kodu kullanmak yerine, transformatörün her bir katmanı için model devrenin ayrı ayrı kurulup, devre elemanları değerlerinin elle girilip, bağlantıların da elle yapılması düşünülmüştür. Devre elemanlarının değerlerini elde etmek içinse M2Spice yazılımının ürettiği kodun içinde yer alan değerler kullanılmıştır. Alınan bu değerler Şekil 8'de verilen devre elemanlarının değerleridir [3]. Diğer bir deyişle, M2Spice yazılımının ürettiği kodu kullanmak yerine, bu kod ile aynı

yapıyı veren devre çizilmiştir. Şekil 7'de verilen aktif ileri çevirici yapısı, çevre elemanları ile birlikte tekrar modellenmiş ve benzetim çalışmaları tekrarlanmıştır. Aynı bilgisayarda yapılan benzetim çalışmalarında, 10 μ s'lik süreyi hesaplamının, katmanların devre elemanı olarak modellendiği durumda M2Spice yazılımının ürettiği koda göre yaklaşık 10.000 kat daha hızlı olduğu ve toplam benzetim süresinin 0.983 saniye olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7: Düzlemsel transformatörün katmanlarının modellenmesini gösteren bir kesit



Şekil 8: M2Spice yazılımında hesaplanan değerlerin devredeki karşılıkları [4]

M2Spice programının ürettiği kodu kullanarak yapılan benzetimin, maliyet bakımından pratik olmamasının yanı sıra aşağıdaki maddeler açısından da her bir katmanın ayrı ayrı modellenmesine göre eksik kaldığı gözükmektedir.

- M2Spice yazılımında her bir katmanın hangi sargıya ait olduğu belirtilebiliyor fakat o katmanın sargının kaçınıcı sarımına ait olduğu bilgisi benzetime dâhil edilemiyor. Yazılım katmanları sırası ile numaralandırıyor dolayısıyla sarımlar, katmanlar arasında istenildiği gibi dağıtılamıyor.
- M2Spice yazılımı, bir sargının tüm sarımlarının tümünün paralel ya da tümünün seri bağlanmasına izin veriyor. Aynı sargıya ait bazı dönüşlerin birbiri ile paralel bazılarının ise birbiri ile seri olduğu bilgisi benzetime eklenmiyor.
- Düzlemsel transformatörün katmanları arasındaki kapasitif etki MLM metodu ile hesaplanamıyor [3]. Bunu hesaplamak için katmanlar arasındaki kapasitenin benzetime ayrıca eklenmesi gerekiyor. M2Spice programının ürettiği koda bu kapasite değerlerini eklemek ise oldukça karmaşık.

5. Bir Düzlemsel Transformatörün Çevre Elemanları ile Modellenmesi ve Benzetim Sonuçları ile Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

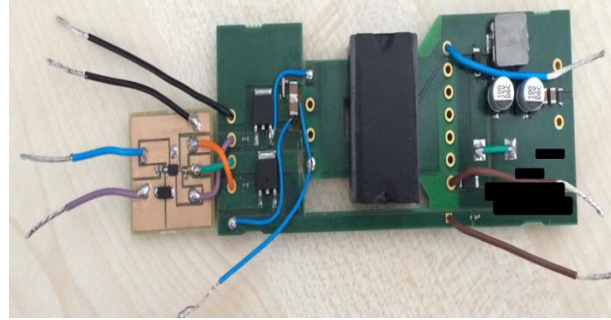
Her bir katmanın ayrı ayrı modellenmesinin, M2Spice yazılımının ürettiği kodu kullanmaktan daha kullanışlı olduğunu gösterdikten sonra, M2Spice yazılımının kabiliyeti

dışında kalan ve bu makalede önerilen yöntemle kolaylıkla benzetimi yapılan bir transformatör; aktif ileri çevirici yapısı içinde modellenmiş, ardından da gerçekleştirilmiştir. Bu iş için 1:2 sarım oranlı, ancak bu kez birincil sargısında 3 ikincil sargısında 6 sarım olan 18 katmanlı bir düzlemsel transformatör üzerinden benzetim yapılmıştır. Transformatörün katman yapısı ve sarım dağılımı Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1: Kullanılan düzlemsel transformatörün katman yapısı ve ilgili katmandaki sarım

Katman No	Bağlı Olduğu Sargı ve Sarım
1	İkincil 1. sarım - 1
2	İkincil 1. sarım - 2
3	İkincil 2. sarım - 1
4	İkincil 2. sarım - 2
5	İkincil 3. sarım - 1
6	İkincil 3. sarım - 2
7	Birincil 1. sarım - 1
8	Birincil 1. sarım - 2
9	Birincil 2. sarım - 1
10	Birincil 2. sarım - 2
11	Birincil 3. sarım - 1
12	Birincil 3. sarım - 2
13	İkincil 4. sarım - 1
14	İkincil 4. sarım - 2
15	İkincil 5. sarım - 1
16	İkincil 5. sarım - 2
17	İkincil 6. sarım - 1
18	İkincil 6. sarım - 2

Transformatörün iletken katmanlarının kalınlığı 70 µm, izolasyon malzemesinin kalınlığı ise 100 µm seçilmiştir. Çekirdek olarak yine 3F4 materyalinden yapılan E32/6/20 yapısı kullanılmıştır. Aktif ileri çevirici yapısı içinse; anahtarlama elemanı olarak IRFRU120Z güç MOSFET’i kullanılmış, bu MOSFET’i anahtarlama için LTC4449 MOSFET sürücü entegresi kullanılmıştır. Yapılan benzetimlerde aktif ileri çeviricinin yapısına odaklanmaktan ziyade transformatörün verilerine dikkat edilmiş; sıfır gerilim/akım anahtarlama, güç kayıpları, en yüksek verim gibi elde etme amacı güdülmüştür. Aktif ileri çevirici 6V ile beslenmiş, yük olarak ise 10Ω’luk endüktif etki göstermeyen direnç bağlanmıştır. Ardından LTSpice programında benzetim gerçekleştirilmiştir. 3500 µs’ye kadar sistem benzetimi yapılmış, bu işlem 240.227 s’de tamamlanmıştır.

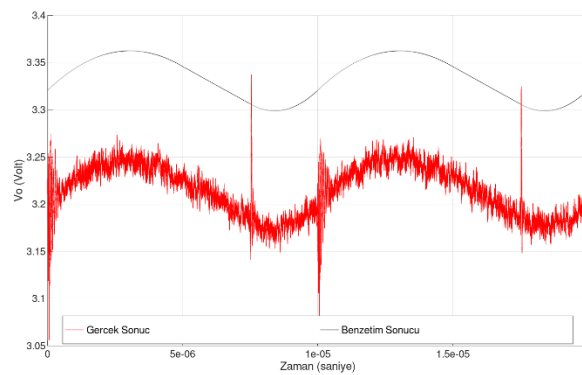


Şekil 8: Aktif ileri çevirici yapısı ile üretilen düzlemsel transformatör kartı

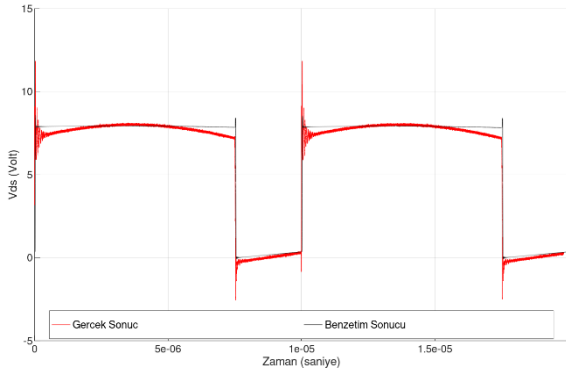
Ardından Şekil 8’de gösterildiği gibi transformatör aktif ileri çevirici devresiyle birlikte üretilmiş, aynı devre elemanları ile ölçüm alınmıştır. Yapılan benzetimden elde edilen sonuçlar ve ölçüm sonuçları Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir.

Şekil 9’da verilen çıkış gerilimi karşılaştırması küçük farklılıklar dışında tutarlıdır. Tasarlanan aktif ileri dönüştürücüde herhangi bir geri besleme mekanizması bulunmadığından dolayı çıkış gerilimi yük miktarı ile bağlantılıdır. Ek olarak, benzetimde kullanılan çevre elemanları her ne kadar gerçek birimler ile olabildiğince benzer şekilde modellenirse de endüktörlerin sargı kayıpları, yarıiletken malzemelerin doğrusal olmayan karakteristikleri gibi etkilerden dolayı hatalı sonuçlar alınabilmektedir. Bu karakteristikler göz önüne alındığında çıkış geriliminde görülen bu farklılıklar gayet makuldür.

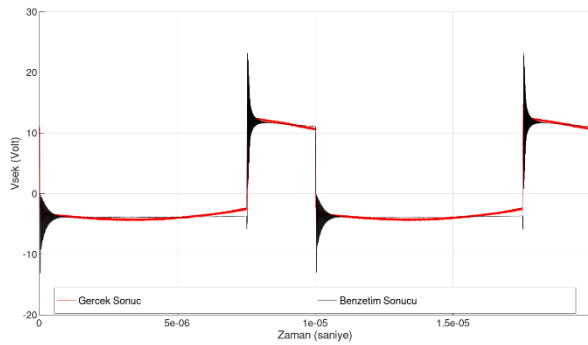
Şekil 10 ve Şekil 11’deki görülen alınan ölçüm ile benzetimden elde edilen dalga şekli arasındaki fark MLM metodunun hata payından, birincil taraftaki MOSFETlerin modellerinin gerçek değerlerle bire bir uyuşmamasından, baskı devre kartı ve düzlemsel transformatör üzerindeki parazitik elemanların modellenemiyor olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm bu etkilerle birlikte alanın ölçümlere benzetim sonuçları ile tutarlıdır demek mümkündür.



Şekil 9: Aktif ileri çeviricinin çıkış gerilimi



Şekil 10: Aktif ileri çevirici üzerinde bulunan Şekil 7'deki devrede M2 MOSFETi olarak gösterilen MOSFETin V_{DS} gerilimi



Şekil 11: Düzlemsel transformatörün sekonder sarmı gerilimi

6. Sonuç

Düzlemsel transformatörlerin tasarım sürecinin standart tel sargılı transformatörlere göre tasarımı süresi ve modifikasyona elverişlilik yönünden daha maliyetli oluşu düzlemsel transformatörlerin benzetim yöntemleri üzere çalışmalara yoğunluk verilmesine neden olmuştur. Bu yöntemler içinde MLM yöntemi hız, esneklik ve ulaşılabilirlik bakımından en avantajlı olanıdır. M2Spice yazılımı düzlemsel transformatörün karakteristik özelliklerinin; endüktör, direnç ve transformatör olarak modellenirken ara işlem basamakları yapmakta ve hızlı bir şekilde sonuç vermektedir. Fakat ürettiği bilgiyi doğrudan kullanmak benzetim süresini oldukça uzatmaktadır.

Her ne kadar M2Spice yazılımı çok başarılı bir şekilde benzetim işlemini kolaylaştırırsa da, çevre elemanları benzetime katıldığı zaman LTSpice yazılımı verimli çalışmamakta ve benzetim süresi oldukça uzamaktadır. Bu yüzden, M2Spice yazılımının ürettiği "text" dosyasının içinden gerekli değerler çıkartılmalı ve her bir katman ayrı ayrı LTSpice yazılımında modellenmelidir. Böylece benzetim süresi 10.000 kate yakın kısalmaktadır. Bununla birlikte farklı sarmı şekillerine yönelik çalışmalar da katmanların ayrı ayrı modellenmesi ile benzetime katılabilmektedir.

M2Spice programının çıktısına herhangi bir modifikasyon yapılmadan benzetime dâhil edilemeyecek bir düzlemsel transformatör; gerekli düzenlemelerle LTSpice yazılımında modellenmiş, ardından da gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlar benzetimin güvenilir bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın deneysel uygulamaları Aselsan A.Ş. olanakları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca gerekli her türlü teknik desteği sağladığı için Aselsan A.Ş.'ye sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- [1] M. T. Quirke, J. J. Barrett and M. Hayes, "Planar magnetic component technology-a review," in *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 15, no. 5, pp. 884-892, Oct. 1992.
- [2] Z. Ouyang and M. A. E. Andersen, "Overview of Planar Magnetic Technology—Fundamental Properties," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4888-4900, Sept. 2014.
- [3] M. Chen, M. Araghchini, K. K. Afridi, J. H. Lang, C. R. Sullivan and D. J. Perreault, "A Systematic Approach to Modeling Impedances and Current Distribution in Planar Magnetics," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 560-580, Jan. 2016.
- [4] Chen, M., & Pavlick, S. (2018, August 03). M2Spice: A Better Tool for Planar Magnetics Modeling. Retrieved January 04, 2019, <http://www.princeton.edu/~minjie/m2spice.html>
- [5] Z. Ouyang, O. C. Thomsen and M. A. E. Andersen, "Optimal Design and Tradeoff Analysis of Planar Transformer in High-Power DC-DC Converters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 7, pp. 2800-2810, July 2012.
- [6] M. A. Saket, M. Ordonez and N. Shafiei, "Planar Transformers With Near-Zero Common-Mode Noise for Flyback and Forward Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 1554-1571, Feb. 2018.
- [7] Z. Ouyang, O. C. Thomsen and M. A. E. Andersen, "The analysis and comparison of leakage inductance in different winding arrangements for planar transformer," *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Taipei, pp. 1143-1148, 2009.
- [8] S. R. Cove, M. Ordonez and J. E. Quaicoe, "Modeling of planar transformer parasitics using design of experiment methodology," *CCECE 2010*, Calgary, AB, pp. 1-5, 2010.
- [9] Y. Veli, A. M. Morega, M. Morega and L. Pîslaru-Dănescu, "Numerical modeling of a planar transformer for micro-power controllers," *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, pp. 206-210, 2017.
- [10] L. A. R. Tria, D. Zhang and J. E. Fletcher, "Planar PCB Transformer Model for Circuit Simulation," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, Art no. 8400804, July 2016.
- [11] S. J. Gunter, M. Chen, S. A. Pavlick, R. A. Abramson, K. K. Afridi and D. J. Perreault, "Applicability and limitations of an M2Spice-assisted "Planar-magnetics-in-the-circuit" simulation approach," *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, pp. 1138-1147, 2016.
- [12] P. L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformer windings," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 113, no. 8, pp. 1387-1394, August 1966. doi: 10.1049/piee.1966.0236
- [13] Engelhardt, M. (2016). LTSpiceIV (Version 4.23k) [Computer software]. Linear Technology.



İ. Onur Loraz

2016 yılında Ortadoğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu ve Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans çalışmalarına başladı. Halen ASELSAN A.Ş.'de analog tasarım mühendisi olarak çalışmaktadır.



Prof. Dr. M. Timur Aydemir

Lisans ve yüksek lisans derecelerini Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden 1983 ve 1985 yıllarında, doktora derecesini ise University of Wisconsin – Madison Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden 1995 yılında aldı. O tarihten beri Gazi Üniversitesi'nde görev yapmaktadır. 2001-2002 yıllarında Fulbright bursiyeri olarak ABD'de University of Wisconsin - Madison Üniversitesi'nde misafir araştırmacı olarak görev yaptı. Güç Elektroniği, Elektrik Makineleri ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları alanında çalışmaları bulunmaktadır.