

DAĞITILMIŞ HAVA ARALIKLARININ TRANSFORMATÖR NÜVE PERFORMANSINA ETKİLERİ

Mehmet Aytaç ÇINAR¹

Bora ALBOYACI²

Mehlika ŞENGÜL³

aytac@kocaeli.edu.tr

alboyaci@kocaeli.edu.tr

mehlika@kocaeli.edu.tr

¹ İzmit Meslek Yüksekokulu, Kocaeli Üniversitesi

² Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi

³ Sivil Havacılık Yüksekokulu, Kocaeli Üniversitesi

ÖZET

Bu çalışmada, üç farklı konfigürasyona sahip sekizgen şekilli sarılı nüve yapısı incelenmektedir. Sekizgen şekilli sarılı nüve yapısının geleneksel yapıya göre üstünlükleri literatürde yer almaktadır. İncelenen her bir nüve konfigürasyonu, sac lamellerinin nüve üzerindeki birleşim bölgelerinin yapısı ve konumu bakımından farklılık göstermektedir. Çalışmada nüve üzerindeki manyetik akı dağılımları ile nüvelerin güç kayıpları incelenmekte ve karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, birleşim bölgelerinin yapısının ve nüve üzerindeki konumlarının bölgesel akı yığılmalarına neden olduklarını ve ortaya çıkan güç kayıplarını etkilediklerini göstermektedir.

Anahtar sözcükler: Transformator, sekizgen sarılı nüve yapısı, akı dağılımı, nüve kaybı

1. GİRİŞ

Transformatörler, iletim ve dağıtım sistemlerinde gerilim seviyesini düşürmek veya yükseltmek amacıyla kullanılan elektrik makinalarıdır. Çalışma verimleri oldukça yüksek olsa da, sahip oldukları yüksek güç değerleri ve enerji şebekesinde varolan toplam transformator sayısı gözönünde tutulduğunda, kayıplarının azaltılması amacıyla yapılan çalışmalar önemini korumaktadır. Bakır kayıplarının sadece yüklü çalışma durumunda oluşmasına karşın demir kayıplarının, transformatorün enerjili olduğu her an meydana gelmesi nedeniyle minimize edilmesi özellikle önemlidir.

Geçmişten günümüze kadar farklı nüve oluşturma yöntemleri transformator üretiminde uygulanmıştır. Dikdörtgen şekilli trafo saclarının kullanıldığı yöntem (butt lap), yönlendirilmemiş sacların kullanıldığı dönemlerde başarılı sonuçlar vermiştir. Buna karşın yönlendirilmiş (grain oriented) sacların kullanımıyla birlikte, sac lamellerin birleşim bölgelerinde 45 derecelik açıyla kesilmesi, manyetik akının sac lamelleri arasında geçişini kolaylaştırdığı için tercih edilmektedir [1]. Manyetik malzemelerin manyetik özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha başarılı nüve

tasarım teknikleri ile kayıplar önemli oranda azaltılmıştır [2], [3]. Modern çok adımlı mimari (multistep-lap) ile oluşturulan nüveler ise, her bir sac lamelinin diğerine göre kaydırılmış biçimde dizilmesi nedeniyle başarılı sonuçlar vermektedir. Buna karşın sac lamellerinin birleşim bölgelerinde (joint zone) varolan boşluklar, geçirgenliği oldukça düşük olan hava veya yağ ile dolmakta, dolayısıyla manyetik akı bu bölgelerde komşu sac lamellerine atlayarak o lameldeki manyetik akı yoğunluğunu ve kayıpları artırmaktadır. Bu kayıpların sac malzemenin fiziksel özelliklerine ve birleşim bölgelerindeki adım sayısı, her bir adımdaki lamel sayısı, hava aralığı genişliği ve sac lamel kalınlığı gibi parametrelere bağlı olduğu literatürde varolan çalışmalarla ispatlanmıştır [4]-[9]. Böyle bir nüve mimarisinde akı yolu, tek fazlı çekirdek tip bir transformatorde en az dört kez, üç fazlı mantel tip bir transformatorde ise en az sekiz kez boşluklar ile kesintiye uğramaktadır. Boşluklara ek olarak sac kesimi esnasında sacın kesilen yüzeyinde oluşan yapısal bozulmalar da ilave kayıplar yaratmaktadır. Sarılı nüveler bu gibi sorunlara karşı üstün özellikli bir seçenektir. Bununla birlikte, kesintisiz sarılı nüveye sahip bir transformator üretmek için ya şerit halindeki sac malzeme önceden hazırlanmış sargıların içerisine sarılmalı, ya da faz sargıları önceden hazırlanmış nüvenin etrafına sarılmalıdır. Bu da üretimi zorlaştırarak üretim süresi ve maliyetini artırmaktadır [10].

İlk kez 1990'larda, AEM Cores Ltd tarafından ve Unicore olarak da adlandırılan sekizgen şekilli sarılı nüve yapısı duyurulmuştur. Bu yapının, üretim süreci ve boyut, ağırlık, uyarma akımı ve eddy-akımı kayıpları gibi kriterler göz önünde tutularak klasik sarılı nüve yapısıyla karşılaştırılması sonucunda, klasik nüve yapısının tüm avantajlarına sahip olmasının yanısıra üretim maliyeti, ağırlık, uyarma akımı ve kayıplar yönünden daha avantajlı olduğu görülmektedir [11], [12].

Bu çalışmada üç farklı sekizgen şekilli sarılı nüve yapısı incelenmektedir. Her nüve bir diğerine göre biçimi ve nüve üzerinde farklı konumda birleşim bölgelerine sahiptir. Bu farklılıkların akı dağılımına ve

nüve kayıplarına olan etkileri hem deneysel hem de simülasyon çalışmaları yardımıyla karşılaştırılmakta ve yorumlanmaktadır.

2. İNCELENEN NÜVE YAPILARI

Bu çalışmada incelenen üç farklı transformatör nüve yapısı Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. İncelenen nüve yapıları, (a) Nüve-1, (b) Nüve-2, (c) Nüve-3

Nüve-1 temel sekizgen şekilli sarı nüve yapısıdır. Nüve, şerit halinde kesilmiş olan sac malzeme kesintisiz olarak sarılarak oluşturulmaktadır. Akı yolu üzerinde herhangi bir hava aralığı olmadığından, nüvede dolaşan manyetik akı kesintiye uğramamaktadır.

Nüve-2’de sadece sol bacak üzerinde birleşim bölgesi bulunmaktadır. Bu nüve yapısı, her katmanda sekiz adım ve her adımda iki sac lameli bulunan çok adımlı sac dizilimi ile elde edilmektedir.

Nüve-3’te ise her iki bacakta da birleşim bölgesi bulunmakta olup, bu yapı “duo-core” olarak da adlandırılmaktadır. Bu yapının her katmanında beş adım ve her adımda iki sac lameli bulunmaktadır.

Test düzeneğinde nüveler, 0.6T ile 1.5T indüksiyon aralığında test edilmiştir. Bu sürede, nüvelerin saf sinüsoidal gerilimle beslenebilmesi için California Instruments 4500Lx model programlanabilir AC güç kaynağından faydalanılmıştır. Gerilim, akım, manyetik alan ve güç ölçümleri için ise Tektronix TPS2024 model sayısal osiloskop ve FLUKE 41B güç analizörü kullanılmıştır.

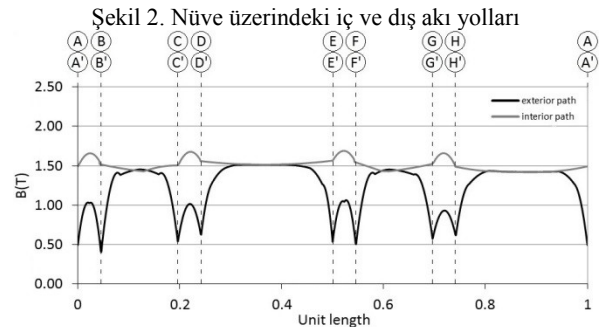
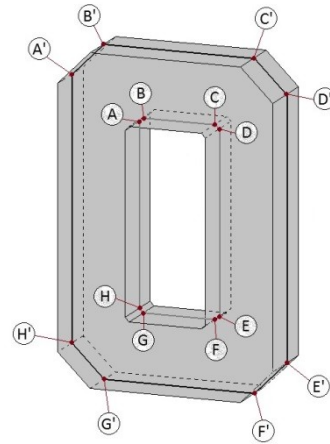
3. AKI DAĞILIMLARI

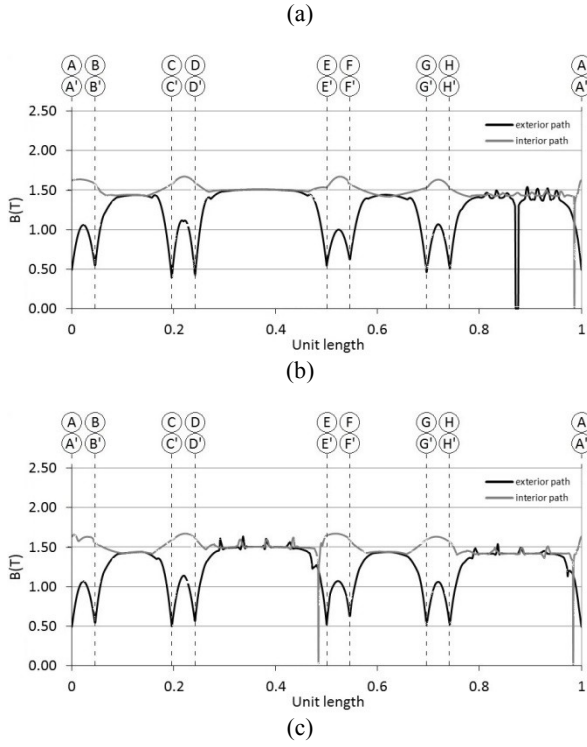
Birleşim bölgelerinin nüve üzerindeki akı dağılımlarına olan etkileri incelenmektedir. Bu amaçla, nüve üzerinde iki ayrı varsayımsal akı yolu tanımlanmıştır. İlk akı yolunun, nüvenin merkeze en yakın olan sac lamelinin ortasından geçtiği öngörülmüştür. İkinci akı yolunun ise nüvenin merkezden en uzaktaki sac lamelinin ortasından geçtiği varsayılmıştır. Bu iki akı yolu Şekil 2 üzerinde gösterilmekte olup, sırasıyla A ve A’ olarak

Nüveler 1 kVA gücünde, 220/110V gerilimde, tek fazlı olarak M5 tip sacdan, 1.5T indüksiyonda çalışacak şekilde tasarlanarak imal edilmiştir.

isimlendirilmekte ve saat yönünde ilerleyerek yollarını tamamlamaktadır.

Oluşturulan varsayımsal akı yolları üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının değişimi her bir nüve için Şekil 3’te gösterilmektedir. Bu iki akı yolunun uzunluğu farklı olduğundan dolayı, bu uzunluklar birim uzunluğa dönüştürülerek aynı eksen üzerinde gösterilmektedir. Verilen değerler, 1.5T indüksiyon için elde edilen akı yoğunluğu değerleridir.





Şekil 3. (a) Nüve-1, (b) Nüve-2, (c) Nüve-3 için iç ve dış akı yolları üzerindeki manyetik akı dağılımları

Şekil 3(a)'da, üzerinde birleşim bölgesi bulunmayan Nüve-1'in akı dağılımları gösterilmektedir. Buna göre, nüvenin bacak ve boyundurukları boyunca akı dağılımlarının düzgün olduğu görülmektedir.

Geleneksel sarı nüvelerde akı yoğunluğunun düşük olduğu köşeler, sekizgen yapıda ortadan kaldırılmıştır. Buna karşın bu çalışmada incelenen nüvelerin A'-H' olarak isimlendirilen dış köşelerindeki akı yoğunluğunun 0.6T civarındaki değeriyle halen ortalama akı yoğunluğundan daha düşük olduğu görülmektedir.

Manyetik akı çizgileri kendi yolları üzerinde bir boşlukla karşılandığında bir diğer sac lameli üzerine yönelmektedir. Bu boşluklar bölgesel akı yoğunluklarına neden olmakta, bu da Şekil 3(a) ve Şekil 3(b)'den anlaşıldığı gibi akı yoğunluğu dağılımında bölgesel artış ve azalmalar yaratmaktadır. Bu bölgesel değişimlerin büyüklüğü, boşluğun genişliği, laminasyon sayısı ile yakın boşlukların yatay ve dikey doğrultuda birbirlerine olan uzaklığına bağlıdır.

Birleşim bölgelerinin sadece sol bacak üzerinde bulunduğu Nüve-2'de hava boşlukları aynı yatay doğrultu üzerindedir. Bir başka ifadeyle hava boşluklarının dağılımı her bir katman içerisinde dağıtılmış, fakat katmanlar arasında simetriktir. Bu sac diziliminde göre nüve içerisindeki akı yoğunluğu değeri birleşim bölgelerinde 1.6T değerine ulaşmaktadır.

Nüve-3'te ise her iki bacadaki hava boşlukları yatay doğrultuda farklı noktalardadır. Bir başka ifadeyle hava boşluklarının dağılımı tüm katmanlarda ve tüm adımlarda farklıdır. Bunun sonucunda dış akı yolu üzerinde akı yoğunluğu değeri 1.65T olarak elde edilmektedir.

İncelenen tüm nüvelerde hava boşluklarından uzaklaştıkça akı yoğunluğu değerinin aynı ve nüve indüksiyonuna eşit olduğu görülmektedir. Yine benzer şekilde akı yoğunlukları, ortalama değerlerin %15-20'si kadar yüksek olan maksimum değerlerine nüvenin iç köşelerinde ulaşmaktadır.

4. NÜVE KAYIPLARI

Sinüsoidal besleme durumunda nüve kaybı eşitliği,

$$P_c = P_h + P_e + P_{ex} \quad (1)$$

olarak yazılmaktadır. Burada eşitliğin sağ tarafındaki üç bileşen sırasıyla histeresis kaybı, eddy akımı kaybı ve ekstra kayıplardır. Bu ifadeler,

$$P_h = k_h f B^n \quad (2)$$

$$P_e = k_e f^2 B^2 \quad (3)$$

$$P_{ex} = k_{ex} f^{1.5} B^{1.5} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada B akı yoğunluğu, f besleme geriliminin frekansı, k_h , k_e ve k_{ex} ise ilgili kayıp bileşeni katsayılarıdır. Burada her üç kayıp bileşeni de doğrudan doğruya indüksiyon değeriyle ilişkilidir. Bununla birlikte kayıp katsayılarının da indüksiyon değerine bağlı olduğu literatürde ispatlanmaktadır [13], [14]. Buradan yola çıkarak nüve üzerinde bölgesel olarak meydana gelen akı yığılmalarının nüve kaybını artıracığı görülmektedir.

Her nüvedeki kayıp değerleri deneysel olarak ölçülerek Tablo 1'de verilmektedir. Burada sargılarda oluşan bakır kayıpları da değerlendirilmiş olup, değerlerinin çok küçük olması nedeniyle ihmal edilmesi uygun görülmüştür.

Nüve-1 beklenildiği gibi en iyi performansı sunmaktadır. Nüve üzerinde akı yığılması yaratan herhangi bir boşluk bulunmadığından en düşük kayıp değerini ölçmek mümkün olmaktadır. Bu değer aynı zamanda diğer nüve kayıplarının değerlendirilmesinde referans kabul edilmektedir.

Hava boşluklarının sayısına ve nüve üzerindeki dağılımlarına bağlı olarak nüve kaybı değerleri değişmektedir. Nüve-1 ile karşılaştırıldığında toplam 88 adet hava aralığı olan Nüve-2 ve 176 adet hava aralığı olan Nüve-3'ün kayıpları sırasıyla %4.86 ve %19.53 daha fazladır. İki kat fazla hava aralığı sayısına rağmen Nüve-3'ün kaybının bu kadar yüksek olmasının nedeni Nüve-3'teki hava aralıklarının daha geniş olmasıdır.

Tablo 1. Ölçülen nüve kayıpları ve kayıp değişimleri

$B(T)$	Nüve-1		Nüve-2		Nüve-3	
	$P_c(W)$	$P_c(W)$	$\Delta P(\%)$	$P_c(W)$	$\Delta P(\%)$	$\Delta P(\%)$
0.6	1.978	2.104	+6.37	2.288	+15.67	
0.9	4.362	4.491	+2.96	5.053	+15.84	
1.2	7.608	7.991	+5.03	9.138	+20.11	
1.5	13.786	14.455	+4.86	16.479	+19.53	

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı sekizgen sarılı nüve yapılarının manyetik akı dağılımları ve nüve kayıpları incelenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ve deneysel ölçümler, nüvenin akı yolu üzerindeki birleşim bölgelerinde bulunan boşlukların akı dağılımları ve güç kayıpları üzerindeki olumsuz etkilerini kanıtlamaktadır. Aynı zamanda bu boşlukların nüve üzerine dağılımları, boşluk uzunlukları gibi fiziksel farklılıkların da akı dağılımlarını ve kayıpları etkilediği görülmektedir.

Buna karşın, nüvenin üretim süreci de göz önünde tutulması gereken bir kriterdir. Kesintisiz bir sarılı nüvenin uzun ve zahmetli üretim süreci ve maliyeti ile karşılaştırıldığında, özellikle bu çalışmada incelenen Nüve-3 yapısının imalat sürecinde sağlayacağı kolaylıklar bu yapının ön plana çıkması ve sağlayacağı bu avantajın değerlendirilmesi gerektiği sonucunu ortaya koymaktadır.

* Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından, 2012/20 no'lu "Elektrik Tesisleri Laboratuvarı Altyapı Destekleme Projesi" kapsamında desteklenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada incelenen sekizgen şekilli sarılı nüve yapılarının sağlanmasındaki katkılarından dolayı MKS Transformatör San. Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] J. J. Winders, Jr., *Power Transformers Principles and Applications*, Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [2] M. Jones, Comparison of the localized power loss and flux distribution in the butt and lap and mitred overlap corner configurations, *IEEE Transactions on Magnetics*, 10, 1974, pp. 321-326.

- [3] A. Basak, C. Higgs, Flux distribution in three phase transformer cores with various T-joint geometries, *IEEE Transactions on Magnetics*, 18, 1982, pp. 670-673.
- [4] G. E. Mechler, R. S. Girgis, Magnetic flux distributions in transformer core joints, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15, 2000, pp. 198-203.
- [5] F. Löffler, T. Booth, H. Pfützner, C. Bengtsson, K. Gramm, Relevance of step-lap joints for magnetic characteristics of transformer cores, *Electric Power Applications*, 142, 1995, pp. 371-378.
- [6] E. G. teNyenhuys, R. S. Girgis, G. F. Mechler, Other factors contributing to the core loss performance of power and distribution transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16, 2001, pp. 648-653.
- [7] I. Daut, A. J. Moses, Some effects of core building on localised losses and flux distribution in a three-phase transformer core assembled from POWERCORE strip, *IEEE Transactions on Magnetics*, 26, 1990, pp. 2002-2004.
- [8] Y.-H. Chang, C.-H. Hsu, C.-P. Tseng, Magnetic Properties Improvement of Amorphous Cores Using Newly Developed Step-Lap Joints, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46, 2010, pp. 1791-1794.
- [9] T. Nakata, N. Takahashi, Y. Kawase, Magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores, *IEEE Transactions on Magnetics*, 18, 1982, pp. 1055-1057.
- [10] R. M. Del Vecchio et al., *Transformer Design Principles, second ed.*, CRC Press, 2010.
- [11] I. Hernandez, J. C. Olivares-Galvan, P. S. Georgilakis, A Novel Octagonal Wound Core for Distribution Transformers Validated by Electromagnetic Field Analysis and Comparison With Conventional Wound Core, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46, 2010, pp. 1251-1258.
- [12] B. Alboyacı, M. A. Çınar, M. Şengül, Transformatör Manyetik Devre Yapısının Boşta Çalışma Akımına Etkisi, *IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, sayfa 88-91, 2011, Kocaeli.
- [13] D. M. Ionel, M. Popescu, S. J. Dellinger, T. J. E. Miller, R. J. Heideman, M. I. McGilp, On the Variation With Flux and Frequency of the Core Loss Coefficients in Electrical Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42, 2006, pp. 658-667.
- [14] D. M. Ionel, M. Popescu, M. I. McGilp, T. J. E. Miller, S. J. Dellinger, R. J. Heideman, Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43, 2007, pp. 1554-1564.