

Şönt Reaktörlerde Hava Aralıklarının Demir Kayıplarına Etkisi

Atilla Dönük

Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Efeler, Aydın, +90 256 2137503
adonuk@adu.edu.tr

Geliş / Received: 29 Ocak (January) 2016
Kabul / Accepted: 10 Nisan (April) 2016
DOI: <http://dx.doi.org/10.18466/cbujos.56404>

Özet

Bu çalışmada demir çekirdekli şönt reaktörlerde hava aralığı kullanımının reaktör hacmi, boyutları ve demir kayıpları üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca hava aralığı sayısının reaktör demir kayıplarına etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Tek-fazlı, demir çekirdekli bir şönt reaktör için önce her bacakta sadece bir adet hava aralığı kullanılarak, sonrasında ise farklı sayıda hava aralığı reaktör bacakları boyunca eşit sayıda dağıtılarak Maxwell programı yardımıyla reaktör çekirdeği boyunca manyetik alan yoğunluğu dağılımları elde edilmiştir. İkinci bir analiz sonucunda ise yine aynı hava aralığı sayıları için şönt reaktörün toplam demir kayıpları hesaplanmıştır. Farklı sayıda hava aralıkları için saçaklanma akısı nedeniyle oluşan ekstra demir kayıplarını minimize edecek optimum hava aralığı sayısı tanımlanmıştır.

Anahtar Kelimeler — Demir kaybı, hava aralığı, saçaklanma akısı, sonlu elemanlar yöntemi, şönt reaktör.

Effects of Air Gaps on Core Losses of Shunt Reactors

Abstract

In this work, effects of inserting air-gaps in the iron core of shunt reactors on reactor volume, dimensions and core losses are investigated. In addition, effects of number of air gaps on core losses are analysed by Finite Element Method. For a single-phase, iron core shunt reactor, magnetic flux density distribution along the reactor core by Maxwell software is obtained firstly using a single air gap in each limb and then distributing different number of air gaps along the limb in the core. For these number of air gaps, a second analysis is performed to calculate the core losses of the shunt reactor. The optimum number of air gaps is defined to minimize extra core losses which occur due to the presence of fringing flux around the air gaps.

Keywords — Air gap, core loss, finite element method, fringing flux, shunt reactor.

1 Giriş

Reaktörler, elektrik mühendisliği alanında reaktif güç kompanzasyonu, harmonik filtreleme, düşük yüklü kablo ya da havai hatların tehlikeli yüksek gerilimlere karşı korunması, kısa devre akımlarının sınırlandırılması gibi çeşitli nedenlerle değişik gerilim seviyelerinde yaygın olarak kullanılırlar. Reaktörler

fonksiyonlarına göre sınıflandırılır ve adlandırılırlar. Şönt reaktörler, kullandıkları uygulama tipine göre kuru ya da yağlı tip, tek-fazlı ya da üç-fazlı olarak üretilirler. Manyetik çekirdek olarak hava ya da demir kullanılabilir. Demir çekirdekli reaktörlerin çekirdeklerinde, doğrusallığı sağlamak ve manyetik çekirdeğin hacmini küçültmek amacıyla hava

aralıkları bulunabilir. Çekirdeğinde hava aralıkları bulunan reaktörlerin çeşitli gerilim seviyelerindeki uygulamaları için eşdeğer devreleri literatürde değişik çalışmalarda tanımlanmıştır [1-4].

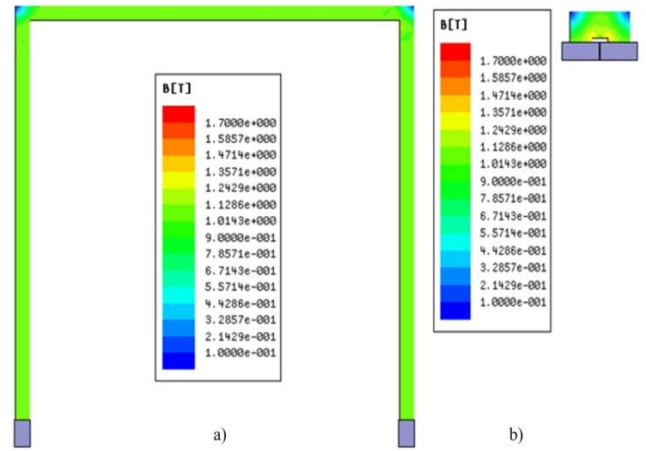
Çekirdekte hava aralığı bulunması nedeniyle hava aralıkları etrafında meydana gelen saçaklanma akısı sargılarda [5,6] ve manyetik çekirdekte ekstra kayıplara neden olmaktadır [7,8]. Saçaklanma akısının bir başka olumsuz etkisi de toplam relüktansı düşürerek reaktörün endüktans değerini artırmasıdır [9].

Çekirdekte hava aralığı kullanımının meydana getirdiği bu problemleri gidermek amacıyla değişik uygulama alanlarında yapılan çalışmalarda, hava aralıklarının tek parça olarak bacaklara konulması yerine bacak boyunca dağıtılması önerilmektedir [5-9].

Sonlu elemanlar yöntemi elektrik makineleri tasarımı ve analizi alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi ile ilk önce hava aralığı kullanımının reaktör hacmi ve boyutlar üzerine etkisi gösterilmiş, daha sonra demir çekirdekli şönt reaktörlerde hava aralığı sayısının reaktör demir kayıplarına etkisi incelenmiştir. Tek-fazlı demir çekirdekli bir şönt reaktör üzerinde, saçaklanma akısı nedeniyle oluşan ekstra demir kayıplarını minimize edecek optimum hava aralığı sayısı tanımlanmıştır.

2 Hava aralığı kullanımının reaktör hacmi ve boyutlarına etkisi

Demir çekirdekli reaktörlerin çekirdeklerinde, doğrusallığı sağlamak ve manyetik çekirdeğin hacmini küçültmek amacıyla hava aralıkları bulunabilir. Hava aralıklarının reaktör hacmi ve boyutlarına etkisini incelemek için tek-fazlı, demir-çekirdekli bir şönt reaktör iki farklı durum için tasarlanmış ve Maxwell 3D programı kullanılarak simüle edilmiştir. Birinci durumda çekirdekte hiç hava aralığı bulunmamakta, ikinci durumda ise her bir reaktör bacağında bir adet hava aralığı bulunmaktadır. Şekil.1'de her iki durum için simülasyon sonucunda elde edilen reaktörlerin çekirdeklerindeki manyetik alan yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Her iki reaktörün boyutları ve özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Aynı endüktans değerine sahip iki reaktör nüvesinin üst yarısı, a) çekirdekte hiç hava aralığı yok, b) her bacakta bir hava aralığı var

Şekil 1 ve Çizelge 1'den görüldüğü üzere, her iki reaktörün endüktans değeri aynı olmasına rağmen, çekirdeğinde hava aralığı olmayan reaktörün kesit alanı hava aralıklı reaktörün kesit alanının neredeyse iki katıdır. Hava aralıksız reaktörün manyetik yolu yaklaşık 32 metre iken hava aralıklı reaktör için bu değer yaklaşık 1 metredir. Havanın geçirgenliği ($\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$) herhangi bir ferromanyetik malzemenin geçirgenliğinden ($\mu_r =$ birkaç bin) çok düşük olduğu için, çekirdekte hava aralığı kullanılarak daha küçük bir reaktans dolayısıyla da daha yüksek bir endüktans değeri elde edilir.

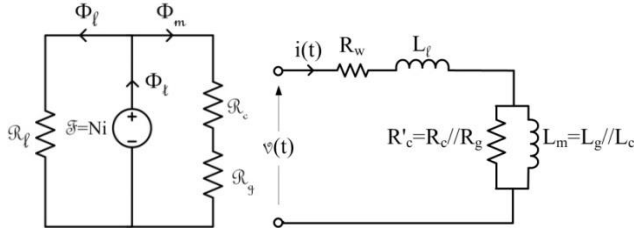
Çizelge 1. Reaktörlerin boyut ve özellikleri

Model	Hava aralığı yok	Her bacakta bir hava aralığı
Çekirdek kesit (mm ²)	306x180	197x116
Çekirdek genişlik mm)	5360	322
Bacak yükseklik (mm)	10684	193
Sargı yükseklik (mm)	684	153
Sargı-boyunduruk açıklık (mm)	5000	20
Pencere genişlik (mm)	5000	90
Hava aralığı (mm)	0	16.2
N (tur)	50	116
L (mH)	29	29

3 Hava Aralıklı Reaktörün Eşdeğer Devresi ve Hava Aralığı Sayısının Demir Kayıpları Üzerine Etkisi

3.1 Eşdeğer Devre

Şekil 2'de tek fazlı, hava aralıkları iki bacak boyunca eşit dağıtılmış, demir-çekirdekli bir şönt reaktörün manyetik ve elektrik eşdeğer devreleri verilmiştir. Burada, Φ_t , Φ_m , Φ_l sırasıyla, toplam, mıktanıslanma ve kaçak akıyı, R_c , R_g , R_l ise sırasıyla demir, toplam hava-aralığı ve kaçak relüktans değerlerini ifade etmektedir. Toplam endüktans değerinin çalışma zamanı boyunca sabit kalması için reaktör çekirdeği B-H eğrisinin doğrusal kısmında çalışmalıdır. Böylece; R_c , R_g , R_l değerleri de sabit kalacak ve şekilde verilen doğrusal manyetik devre elde edilecektir. Şekil 2'de verilen eşdeğer elektrik devresinden görüldüğü gibi mıktanıslanma endüktansı (L_m), hava-aralığı (L_g) ve demir çekirdek (L_c) endüktanslarının paralel eşdeğerine eşittir.



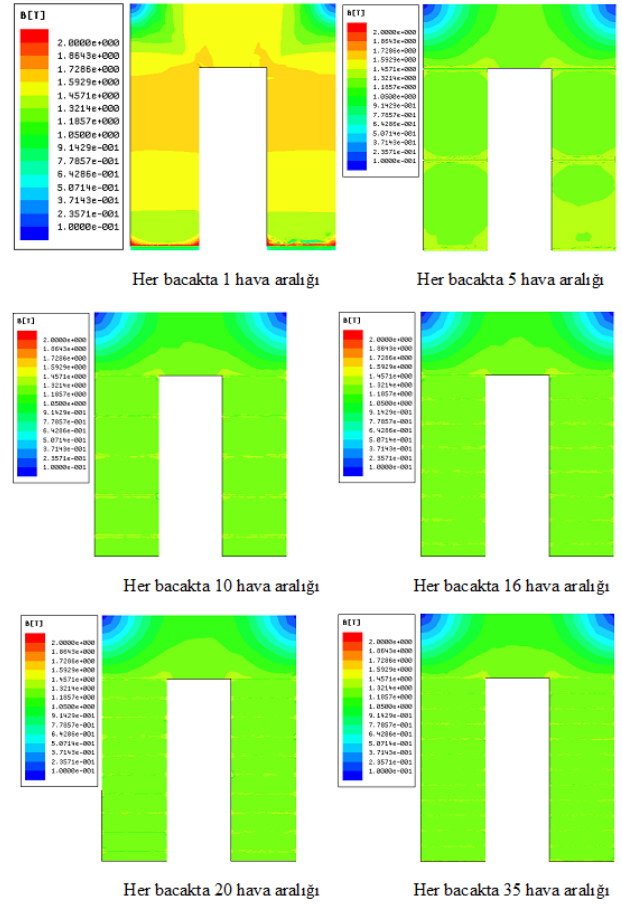
Şekil 2. Tek fazlı şönt reaktörün manyetik ve elektrik eşdeğer devreleri

Elektrik eşdeğer devresinde görülen R_w , R_c ve R_g dirençleri ise sırasıyla sargı, demir ve hava kayıplarını sembolize etmektedir. Hava aralıklı bir şönt reaktörün 50 Hz şebeke koşullarındaki kayıpları; sargı, demir ve hava aralığı kayıpları olarak kabul edilebilir. Hava aralığı kayıpları literatürde hava aralıkları etrafındaki saçaklanma (fringing) akısı nedeniyle oluşan ekstra eddy-akımlarının sebep olduğu kayıplar olarak tanımlanır [8, 10].

3.2 Hava Aralığı Sayısının Reaktörün Demir Kayıpları Üzerine Etkisi

Hava aralığı sayısının reaktör demir kayıplarına etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak (Maxwell 3D) incelenmiştir. Tek-fazlı, demir-çekirdekli bir şönt reaktör her bacadaki hava aralığı sayısı sırasıyla 1, 5, 10, 16, 20 ve 35 olacak şekilde Maxwell 3D programı kullanılarak (magnetostatic analiz) modellenmiş ve

simüle edilmiştir. Şekil 3'te reaktörün manyetik çekirdeği boyunca değişik sayıda hava aralığı için simulasyon sonucunda elde edilen manyetik alan yoğunluğu dağılımı görülmektedir.



(Reaktörlerin üst yarısını gösterilmiştir ve B skalası tüm şekiller için aynıdır, max 2.0 T ve min 0.1 T)

Şekil 3. Reaktör bacağı boyunca dağıtılmış değişik sayıda hava aralığı için manyetik alan yoğunluğu dağılımı

Çekirdek içerisindeki ortalama alan yoğunluğu 2 hava aralığı için 1.4-1.6 T civarında iken 10, 20, 32, 40 ve 70 hava aralığı için ise 0.9-1.2 T civarındadır. Şekilden açıkta görülmektedir ki, hava aralığı sayısı arttıkça çekirdek içerisindeki manyetik alan yoğunluğu tepe değeri azalmaktadır.

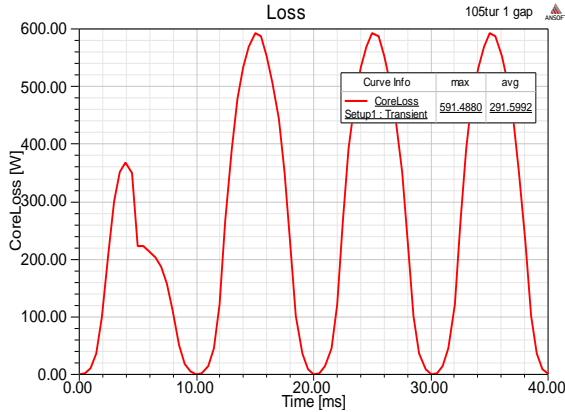
Hava aralıklarının bacak boyunca eşit şekilde dağıtılması, hava aralığı etrafındaki saçaklanma akısını da azaltmaktadır. Böylece kaçak endüktans değeri azalmakta, bu da reaktörün toplam endüktans değerini düşürmektedir.

Demir kayıpları çekirdekdeki akı yoğunluğunun tepe değerine bağlıdır [11-13]. Maxwell programı demir kayıpları hesabında çekirdek içerisindeki tüm yönlerdeki manyetik alan yoğunluğu dağılımını kullanır (1) [14].

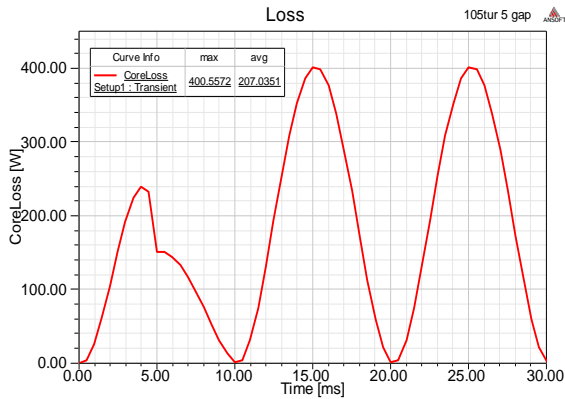
$$P_c = k_h f B_m^2 + k_c f^2 B_m^2 + k_e f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (1)$$

Burada P_c toplam demir kaybı, k_h , k_c ve k_e sırasıyla histerezis, eddy-akımı ve ekstra-kayıp katsayıları, f frekans (50 Hz), B_m ise çekirdekdeki manyetik alan yoğunluğu tepe değeridir. Demir kaybı hesabında çekirdek içerisindeki tüm yönlerdeki manyetik alan yoğunluğu dağılımı kullanıldığından, hava-aralığı kayıplarının da bu hesaba dahil olduğu görülmektedir.

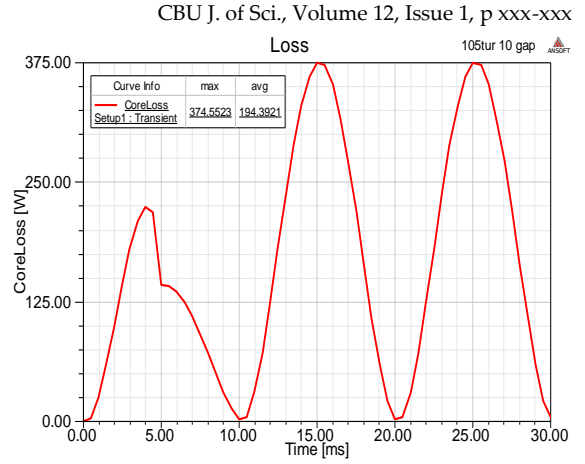
Şekil 4'te Maxwell (transient analiz) kullanılarak değişik sayıda hava aralıkları için elde edilen demir kaybı sonuçları verilmiştir.



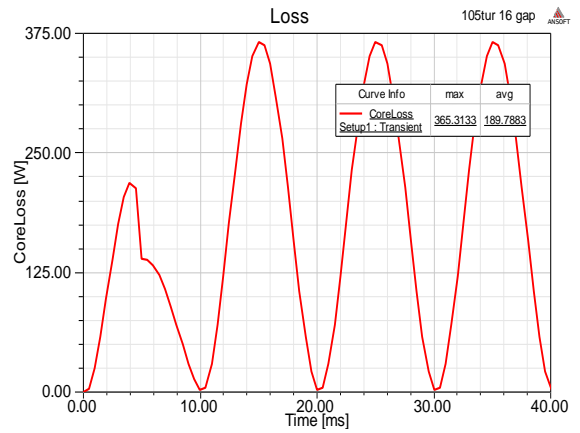
a) 2 adet hava aralığı için demir kayıpları değişimi



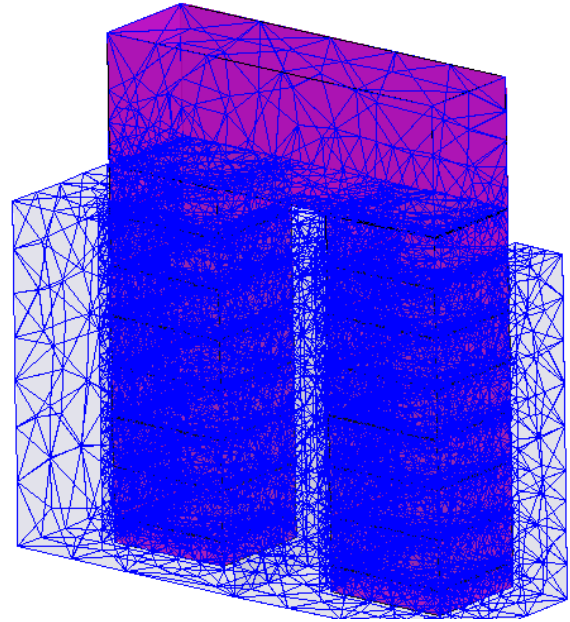
b) 10 adet hava aralığı için demir kayıpları değişimi



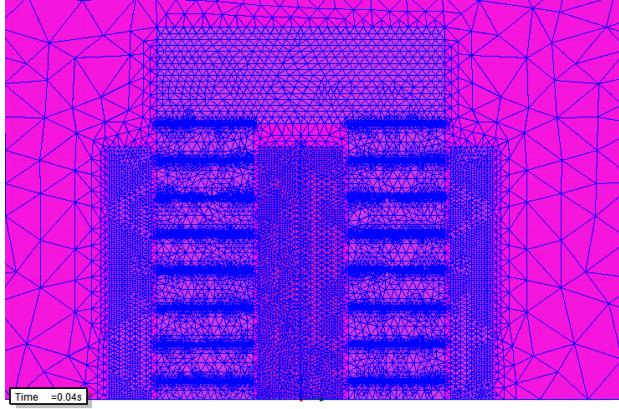
c) 20 adet hava aralığı için demir kayıpları değişimi



d) 32 adet hava aralığı için demir kayıpları değişimi



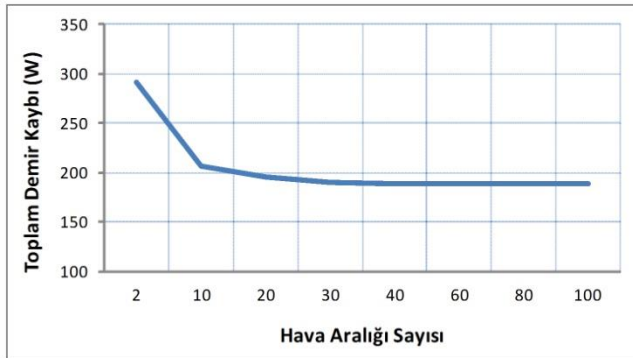
e) Maxwell 3D Magnetostatic analiz mesh çizimi (reactor çekirdeğinin üst yarısı, 32 hava aralığı için)



f) Maxwell 2D Transient analiz mesh çizimi
(reactor çekirdeğinin üst yarısı, 32 hava aralığı için)

Şekil 4. Tek-fazlı şönt reaktör demir kaybı değişimleri ve mesh çizimleri (Maxwell)

Şekil 5'te hava aralığı sayısına göre reaktör çekirdeğindeki toplam demir kaybı değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hava aralığı sayısı 2'den 20'ye çıktığında toplam demir kaybı 300 W seviyesinden 200 W seviyesine düşmektedir. Hava aralığı sayısı 32 civarındayken toplam demir kaybı 190 W seviyesine gerilemektedir. Hava aralığı sayısının 40 ve üzerinde olduğu durumlarda toplam demir kaybı seviyesinde bir değişim olmamaktadır.



Şekil 5. Tek-fazlı şönt reaktör değişik hava aralıkları için demir kaybı değişimi

Her bir bacakta tek parça hava aralığı kullanmak yerine toplam hava aralığı uzunluğunun bacaklar boyunca eşit dağıtılması durumunda reaktör toplam demir kayıplarının önemli ölçüde azaldığı ve iki bacak boyunca dağıtılması gereken optimum hava aralığı sayısının 30 ile 40 arasında olduğu görülmektedir. Hava aralığı sayısının 40 ve üzerinde seçilmesinin reaktörün toplam demir kaybı üzerinde önemli bir etkisi olmamaktadır.

4 Sonuç

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, şönt reaktör tasarımı ve uygulamasında her bir bacakta tek bir hava aralığı kullanmak yerine bacak boyunca dağıtılmış hava aralıkları kullanılmasının, reaktör çekirdeğinde manyetik akı yoğunluğunun daha düzgün bir şekilde dağılmasına sebep olduğunu göstermektedir. Böylece hava aralıkları etrafında meydana gelen saçaklanma akısı azalacak, reaktör çekirdeğindeki manyetik alan yoğunluğu tepe değeri düşecek ve böylece reaktörün toplam demir kayıplarında ciddi bir azalma sağlanacaktır. Hava aralığı sayısının belirli bir değerden sonra reaktör demir kayıpları üzerine etkisi olmadığı görülmektedir.

Büyük ölçekli reaktör üreticileri tasarım ve üretim aşamalarında genellikle sonlu elemanlar analizi programları (Maxwell, Ansys, MagNet, Opera, Flux, FEMM, JMAG, Comsol vs.) kullanmaktadır. Bir reaktörün çalışma ömrünün yaklaşık 20 yıl olduğu düşünülürse, optimum hava aralığı sayısı kullanılarak üretilen reaktörlerin ömürleri boyunca tüketilecekleri enerjiden büyük oranda tasarruf sağlanabilecektir. İmkanları sınırlı olan küçük ölçekli üreticiler ise tek bir hava aralığı kullanmak yerine daha fazla sayıda hava aralığı kullanarak reaktör demir kayıplarını azaltabilirler.

5 Teşekkür

Yazar, bu çalışmanın simulasyon aşamasında Maxwell sonlu elemanlar analizi programının kullanım imkanını sağlayan Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne katkılarından dolayı teşekkürlerini sunar.

6 Referanslar

- [1] Alexander, G.W.; Hopkinson, R.H.; Welch, A.U. Design and Application of EHV Shunt Reactors. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1966; 12, 1247-1258.
- [2] Yue, H.; Yonghai, X.; Yingying, L.; Yongqiang, Z.; Xiangning, X. Study of Nonlinear Model of Shunt Reactor in 1000kV AC Transmission System. International Conference on Energy and Environment Technology. 2009; 2, 305-308.
- [3] Saizen, S.; Hashiba, K.; Iwagami, M. 500/√3 kV 50/3 MVA Shunt Reactors for CTM Argentina. Fuji Electric Review. 1979; 2, 49-52.
- [4] Donuk, A.; Rotaru, M.; Sykulski, J.K. Defining and Com-

puting Equivalent Inductances of Gapped Iron Core Reactors. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2012; 7b, 52-55.

[5] Tomczuk, B.; Babczyk, K. Calculation of self and mutual inductances and 3-D magnetic fields of chokes with air gaps in core. *Electrical Engineering*. 2001, 41-46.

[6] Kutkut, N.H.; Divan, D.M. Optimal air-gap design in high-frequency foil windings. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1998; 5, 942-949.

[7] Lee, R.; Stephens, D. Influence of core gap in design of current-limiting transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1973; 3, 408-410.

[8] McLyman, T. *Transformer and Inductor Design Handbook*. 2004.

[9] Guozhu, C.; Smedley, K.M.; Zhaoming, Q. Tuned power inductors for hybrid active power filter with structure of hybrid magnetic core, distributed air gaps and three-phase five column. *The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2003; 3, 2023-2028.

[10] Lee, R.; Stephens, D. Influence of core gap in design of current-limiting transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1973; 3, 408-410.

[11] IEC 6076-6. *Power Transformers-Part6*. 2007.

[12] IEEE Loss Evaluation Guide for Power Transformers and Reactors. *IEEE Std. C57.120.1991*

[13] Bertotti, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1988, 621-630.

[14] Lin, D.; Zhou, P.; Fu, W.N.; Badics, Z.; Cendes, Z.J. A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2004; 2, 1318-1321.