

Sonlu Elemanlar Metodu ile AA Hat Reaktörlerinin Tasarımı

İbrahim SEFA^a, Selami BALCI^b, Necmi ALTIN^a

^aGazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

^bGazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

(Geliş / Received : 29.03.2015 ; Kabul / Accepted : 30.04.2015)

ÖZ

Elektrik şebekesinden beslenen ve girişlerinde doğrultucu bulunan motor sürücüler, kesintisiz güç kaynakları, AA gerilim ayarlayıcıları gibi elektronik cihazlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıları gereği şebekeden doğrusal olmayan akım çeken bu cihazlar, besleme hattı boyunca doğrusal olmayan gerilim düşümlerine sebep olurlar. Bu durumda, önlem alınmadığı takdirde aynı hattan beslenen diğer alıcılar için de güç kalitesi problemleri doğar. Şebeke frekanslı dönüştürücülerin girişinde uygun şekilde tasarlanmış silisli sac nüveli reaktörlerin kullanılması ile çekilen harmonik akımların seviyesi belli oranlara düşürülebilmektedir. Nüve malzemesinin seçimi ve reaktörün boyutlandırılması, akımın harmonik seviyesinin düşürülme kabiliyeti ile reaktörde oluşacak kayıpların belirleyicisi olmaktadır. Bu çalışmada, belirli bir hat akım değeri için nüveleri birbirinden farklı üç reaktör tasarlanmıştır. Tasarlanan reaktörlerin yük seviyesine bağlı endüktans değerlerindeki değişimleri görmek üzere, sonlu elemanlar metodu ile parametrik analizleri yapılmıştır. Analizlerin sonucunda reaktörlerin endüktans kararlılığı, kayıpları, standartlara uygunluğu gibi veriler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Manyetik devre Ansys-Maxwell ile modellenmiştir. Reaktörün gerçekçi davranışlarını görmek için, manyetik devresinin Simplorer ile eşzamanlı benzetimi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Reaktör tasarımı, nüve materyalleri, sonlu elemanlar analizi, nüve kayıpları, eş zamanlı benzetim

Design of the AC Line Reactors With Finite Element Method

ABSTRACT

Electronic devices which are fed from the grid and have a rectifier frontend, such as motor drives, uninterruptible power supplies, AC voltage regulators are commonly used. These devices which draw non-linear current from the grid by nature cause the nonlinear voltage drops along the supply line. In this case, if precautions are not taken, power quality problems also appear for the other loads fed from the same line. Level of the harmonic currents drawn can be reduced to specific level by using reactors with silicon steel core at the input of the line frequency converters. Selection of the core material with the sizing of the reactors becomes the determiner of the harmonic reducing ability and of the losses of the reactor. In this study, three reactors with different core materials are designed for a specific line current value. In order to see the inductance value variations depending on the load level of the designed reactors, the parametric analysis have been performed by the finite element method. As a result of analysis, data like the reactor inductance stability, the losses and the standards compliance have been presented comparatively. Magnetic circuits have been modeled with Ansys-Maxwell and co-simulated with the Simplorer to see the realistic behaviors of the reactors.

Keywords: Reactor design, core materials, finite element analysis, core losses, co-simulation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç elektroniğinde kullanılan şebeke frekanslı kontrollü veya kontrolsüz doğrultucular şebekeden harmonik bileşenler içeren akımlar çekerler. Asansör, vinç, pompa, fan, konveyör gibi uygulamalarda kullanılan motor sürücüler ile kritik yüklerin beslenmesinde yer alan kesintisiz güç kaynakları (KGK) bu dönüştürücülerin en yaygın kullanım alanlarıdır. Günümüzde üretilen elektronik cihazların girişlerinde (belli güç değerlerine kadar) güç faktörünü aktif olarak düzeltten yüksek frekanslı doğrultucular sıklıkla görülmektedir. Ancak çok yüksek güçler için tasarım zorluğu oluşmakta böylece şebeke frekansındaki çok darbeleri doğrultucular halen tek seçenek olmaktadır. Yukarıda sayılan elektronik cihaz-

ların yanında, AA gerilimi kıyarak gerilim ve dolaylı şekilde güç kontrolü yapan cihazlar da doğrultuculara benzer harmonikleri üreten cihazlar sınıfından sayılırlar. Bu sebeple şebekeden çektikleri akımın harmonik seviyelerini sınırlandırmak için AA hat reaktörlerinin kullanılmaları gereklidir. AA reaktörlerin uygun seçilmemesi veya hiç kullanılmaması halinde çekilen harmonik akım bileşenleri çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Böylece, şebekede geriliminde harmonikler, gerilim dalgalanmaları ve ani gerilim çökmeleri gibi güç kalitesi sorunları oluşmaktadır. Şebeke kirliliğini gidermenin en düşük maliyetli olan yöntemi kirliliğin kaynağında giderilmesidir. Bu amaçla, çoğunlukla cihazların doğrultucu girişlerinde harmonik seviyesinin azaltılması ve uluslara-

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: isefa@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2015.18.4 257-267

rası standartlara uygunluğunun sağlanabilmesi amacıyla AA giriş reaktörleri kullanılmaktadır [1-5].

Reaktörler genel olarak doğrultucu çıkışlarının filtre edilmesi için DA reaktörler ve doğrultucu girişlerinde bulunan AA reaktörler olarak iki sınıfa ayrılmaktadır [6]. Değişken hızlı motor sürücülerinin elektromanyetik uyumluluk gereksinimlerini karşılamak için AA ve DA reaktörler, şönt pasif filtreler, aktif harmonik filtreler ile çok darbeli doğrultucuların kullanımı gibi farklı çözümler uygulanabilmektedir. En düşük maliyetli çözümler oluşturmak veya diğer çözümlerin maliyetini düşürmek AA reaktörlerin kullanılması ile mümkün olmaktadır. Öyle ki, bu çözüm bazen cihazların içine entegre edilebilmekte bazen de kullanıcıya bırakılmaktadır. [7,8]. Değişken hızlı bir AA sürücüsü için IEEE standartlarına göre tasarlanmış bir reaktörün ilgili ANSI standartlarına göre, doğrultucuda meydana gelebilecek herhangi bir kısa devreye karşı arıza akımını güvenli bir şekilde sınırlayabilecek özellikte olması gerekmektedir. Ayrıca, beklenen mertebedeki harmonik akımları sınırlayacak şekilde tasarlanmış olmalı ve yalıtım sınıfına göre belirlenmiş sıcaklıklara dayanabilmeli ve soğutma şekline göre çalışma esnasında izin verilen sıcaklık artış limitlerini geçmemelidir [9].

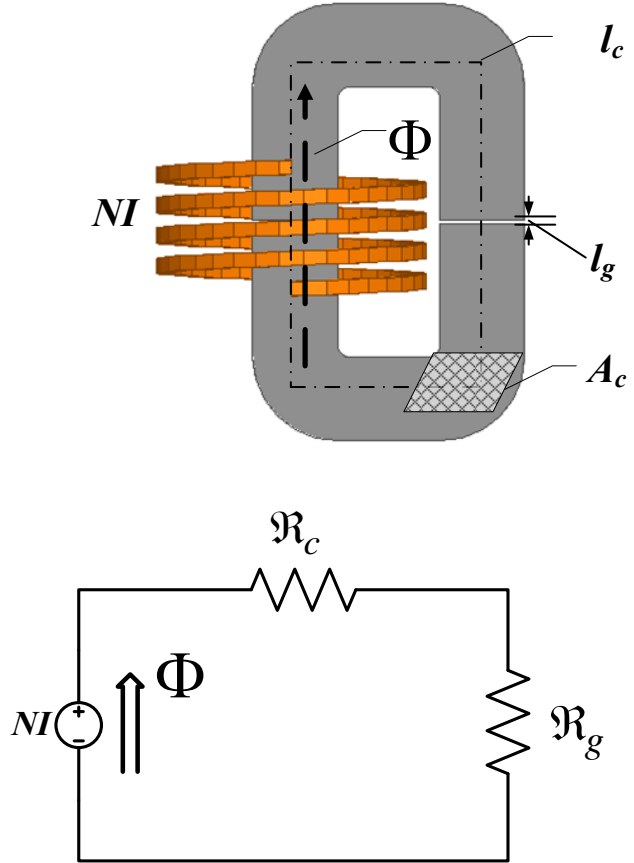
Reaktörlerde nüve malzemesinin manyetik özellikleri ile spesifik kayıp değerleri performanslarını etkilemektedir. Nüve malzemesi olarak yönlendirilmiş (grain oriented-GO) ve yönlendirilmemiş (non-grainoriented, NO) silisyumlu çelik alaşımlar çeşitli kalınlık ve manyetik özelliklerde kullanıma sunulmaktadır [10-14]. Reaktör parametrelerinin optimizasyonu sonlu elemanlar analizi (SEA) yazılımının parametrik çözücüsü kullanılarak hava aralığı mesafesi ve akım değişimine göre endüktans değerinin kararlılığı gibi değerler test edilebilmektedir. Böylece hava aralığı mesafesi en uygun değere ayarlanabilmektedir [1].

Bu çalışmada, AA reaktör tasarım süreci ele alınmış ve nüve malzemesi seçiminin işletme performansına etkisi, gerekli hava aralığı mesafesinin büyüklüğü ve endüktans değerinin yük akımına göre değişiminin belirlenmesi gibi işlemler ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Avrupa Birliği normları ile üretilen reaktör tasarımında kullanılacak M330-35A, M330-50A ve M150-30S gibi silisyum katkılı gerçekçi aday ticari malzemeler ile bir reaktörün farklı tasarımları yapılmıştır. Reaktörlerin endüktans değerleri 55 kW gücündeki standart bir motor sürücüsü girişine uygun olacak şekilde seçilmiştir. Yük çeşidine bağlı olarak (sabit moment, sabit güç vb.) motor sürücülerini anma yüklerinin bazen % 150 veya bazen de % 200 değerine kadar geçici bir süre aşırı yüklenebilir. Böylece anma değerleri aynı olsa dahi sürücülerin aşırı yüklenme süreleri farklı olduğu dikkate alınarak manyetik devrede doyma olmayacak şekilde tasarım yapılmalıdır. Bu kriterler dikkate alınarak tasarlanmış olan AA reaktörün SEA tabanlı elektromanyetik yazılımlar ile modelleme ve analiz işlemleri yapılmış ve daha sonra Simplorer yazılımı ile gerçek şartlara uygun şekilde benzetimi yapılarak performansları test edilmiştir. Bu testlerde, sayılan her farklı nüve malzemesinin

kullanılması durumunda yük akımı değişimlerine bağlı olarak endüktans değerlerinin nasıl değiştiğinin parametrik analizi yapılmıştır. Ayrıca anma akımlarındaki nüve kaybı, akı dağılımı ve doyma etkisi gibi özellikler detaylı olarak incelenmiştir.

2. AA REAKTÖR TASARIMININ TEMELLERİ (BASICS OF AC REACTOR DESIGN)

Reaktörler enerjiyi depo eden, transformatörler ise enerjiyi transfer eden manyetik devre elemanları olarak tanımlanırlar. Reaktörler, enerji depolayabilmek için nüve parçaları arasında hava aralığına ihtiyaç duymaktadırlar. Böylelikle, hava aralığı sayesinde $B-H$ mıknatıslanma eğrisi doğrusal hale gelmekte ve nüvedeki akı değeri kolaylıkla Amper-Sarım (NI) ile ayarlanabilmektedir. Reaktör nüvelerinde hava aralığı relüktansı ile manyetik devrenin relüktansı seri bağlı olarak temsil edilmektedir. Şekil 1'de, bir reaktöre ait manyetik devre ile eşdeğer elektrik devresindeki nüve ve hava aralığı relüktans elemanları görülmektedir.



Şekil 1. Hava aralıklı manyetik devre ve elektriksel eşdeğer devresi

Reaktör sargılarının sarım sayısı N ve sargıdan geçen akım I olarak tanımlandığında Amper-Sarım NI olarak nüvede dolaşacak manyetik akı Φ değerini belirlemektedir. Genellikle hava aralığı yüzeyi A_g nüvenin kesiti A_c ile aynı büyüklüktedir. Nüvenin geçirgenliği Eş. 1'deki

gibi boşluğun geçirgenliği ile nüve malzemesinin bağlı geçirgenlik değerine göre değişmektedir:

$$\mu_c = \mu_r \cdot \mu_0 . \quad (1)$$

Hava aralıklı bir reaktör nüvesinin toplam relüktans değeri Eş. 2' de verildiği gibi seri bağlı devre elemanlarının toplamıdır [1]:

$$\mathfrak{R}_t = \frac{l_t}{\mu_e A_c} = \mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} + \frac{l_g}{\mu_0 A_c} \quad (2)$$

Burada, l_c nüvenin ortalama uzunluğu, l_g hava aralığı mesafesi, \mathfrak{R}_c ve \mathfrak{R}_g sırasıyla nüve ve hava aralığı relüktanslarını simgelemektedir. Boşluğun geçirgenliği $\mu_0=4\pi 10^{-7} H/m$ olduğundan nüvede bulunan hava aralıklarında çok büyük değerde manyetik direnç oluşmakta ve herhangi bir manyetik devre için eşdeğer relüktans değeri hava aralığı mesafesine bağlı olarak değişmektedir [1]. Eş.2'de nüve kesiti çarpan olarak ayrıldığında Eş. 3'teki gibi basitleştirilebilmektedir.

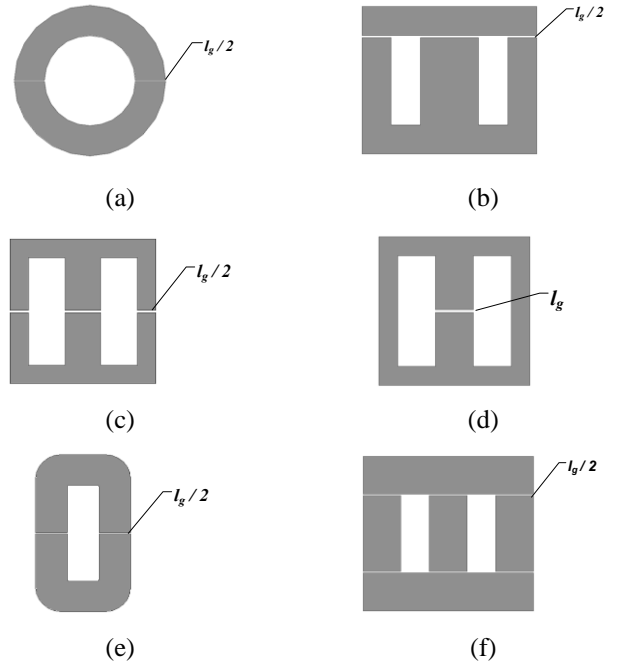
$$\frac{l_t}{\mu_e} = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r} + \frac{l_g}{\mu_0} \quad (3)$$

Böylece, reaktör nüvesinin boyutlarına ve hava aralığı mesafesine göre etkin geçirgenlik (μ_e) değeri Eş. 4'te ifade edildiği gibi hesaplanabilmektedir [15]. Bu eşitlikteki μ_c nüve malzemesinin geçirgenliğini temsil etmektedir.

$$\mu_e = \frac{\mu_c}{1 + \mu_c \left(\frac{l_g}{l_c} \right)} \times \frac{l_c \mu_c}{l_c \mu_c} = \frac{l_c}{\frac{l_c}{\mu_c} + l_g} \quad (4)$$

2.1. Reaktörlerde Kullanılan Hava Aralığı Seçenekleri (Air Gap Options Used in Reactors)

Reaktörlerin tasarımlarında temel olarak tekli ve çoklu (dağıtılmış) olmak üzere iki farklı türde hava aralığı kullanılmaktadır. Belirlenen hava aralığı mesafesi kadar tekli hava aralığı kullanıldığında saçak akıların genlikleri çok büyük değerde olacağından nüve ve sargı parametrelerinde sapmalara sebep olmaktadır. Bundan dolayı nüvenin bacak kısmının belirli aralıklarla bölünmesiyle tekli hava aralığı mesafesi ile aynı büyüklükteki dağıtılmış hava aralıkları oluşturulmaktadır. Dağıtılmış hava aralıklarındaki mesafe azalacağı için saçak akısı etkisi büyük ölçüde azalmaktadır. Ayrıca, hava aralıklarının dağıtılmasıyla yüksek frekanslarda daha çok etkili olan gürültüler azaltılabilmektedir. Hava aralıkları nüvenin geometrik yapısının ve statik dengesinin bozulmaması için kağıt, polyester, cam ve seramik gibi ferromanyetik özellikte olmayan ve aynı zamanda yalıtkan malzemeler ile doldurulmaktadır [15-17]. Hava aralıklarının yerleşimi Şekil 2'de görüldüğü gibi nüvenin geometrisine göre farklı biçimlerde tasarlanabilir. Burada saçak akısı gürültüsünün en az oluşacağı tasarım orta bacaklı hava aralığı ile EE geometrilidir [15].



Şekil 2. Reaktör nüvelerinde hava aralıklarının yerleşimi

(a) Bir kesimli toroid nüve, (b) EI nüve, (c) EE&EC nüve, (d) EE&EC nüve, (e) Bir kesimli C-nüve, (f) Üç fazlı üç bacaklı nüve

3. AA REAKTÖR TASARIMI ÖRNEĞİ (AC REACTOR DESIGN EXAMPLE)

AA reaktör tasarımı, transformatör tasarımına oldukça benzemesine rağmen farklı olarak bağlı olduğu hat üzerinde en çok %4 ile %6 arasında bir empedans artışı yapacağı dikkate alınarak endüktans değeri ve buna bağlı olarak diğer elektriksel parametreleri belirlenmektedir. Çizelge 1'deki teknik verilere göre %4,5 gerilim düşümü için reaktörün empedans değeri Eş. 5 ile elde edilebilir [8].

$$\%Z = \frac{2\pi \cdot f \cdot L \cdot I_{ac}}{V_{ac}} \times 100 \quad (5)$$

Çizelge 1. Tasarımı yapılan AA reaktöre ait elektriksel özellikler

Parametre	Değer
Sürücü Gücü	55 kW
Faz Sayısı	3
Anma Gerilimi (V_{ac})	230 V
Hat Akımı (I_{ac})	100 A
Hat Frekansı (f)	50 Hz
Güç Katsayısı ($\cos\phi$)	0,8
Gerilim Düşümü (%)	% 4,5
Akım Yoğunluğu (J)	2,5 A/mm ²
Akı Yoğunluğu (B_{ac})	1 Tesla
Pencere Kullanım Katsayısı (K_{cu})	0,35
Dalga Form Katsayısı (K_f)	4,44

Bu verilere göre tasarlanacak olan reaktör nüvesinin boyutlandırılması için gerekli elektriksel parametreler Çizelge 2’de verilmiştir. Burada güç kapasitesi görünür güç (VA) olarak Eş. 6 ile elde edilmiştir [15,18].

$$VA = A_p K_f K_{cu} B_{ac} f J (10^{-4}) \quad (6)$$

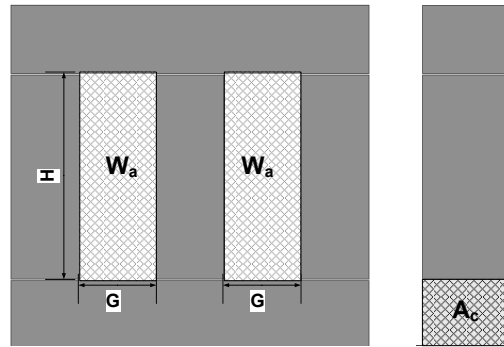
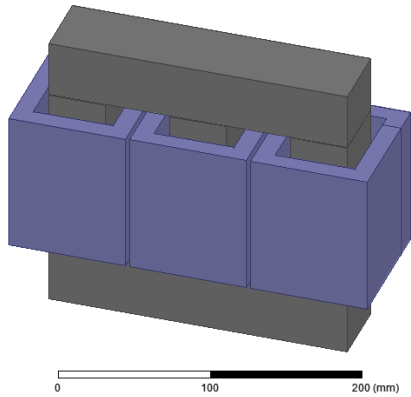
Burada K_f uyarım gerilimin dalga form katsayısıdır. Sinüzoidal dalga formu için 4.44 ve kare dalga ile uyarım için 4 olarak dikkate alınmaktadır. K_{cu} ise pencere bölgesine ne kadar iletken sığdırılabileceğini ifade etmektedir. Bu katsayı sargı iletken tipine, katlar arası yalıtım ve kabarma payına göre daha çok tecrübeye dayalı olarak belirlenmekte ve nüvenin boyutlandırılmasında oldukça etkili rol oynamaktadır. Bu çalışmada nüve ve sargılar arasındaki soğutma boşluğu, katlar arası yalıtım payı ile yan yana gelecek komşu sargıların arasında bırakılması gereken mesafeler düşünülerek 0,35 olarak kabul edilmiştir. Akım yoğunluğu değeri J doğal konveksiyon ile soğutma olacağı için 250 A/cm^2 olarak belirlenmiştir. Böylece sargıların yapımında $100 \times 0,5 \text{ mm}$ bakır folyo kullanılacağı için etkin değeri 100 A olan akımı taşıyabilecek kapasitede iletken seçilmiştir olmaktadır.

Çizelge 2. Reaktörün %4,5 gerilim düşümü için elektriksel parametreleri

X_L	V_L	S_L	L
0,1035 Ω	10,35 V	3105 VA	0,33 mH

Reaktörler üç fazlı üç bacaklı veya ayrıık olarak üç adet bir fazlı nüve yapısında tasarlanabilmektedir. Şekil 3’te görüldüğü gibi pencere kullanım alanı (W_a) ile nüve kesiti (A_c) boyutlandırma için temel teşkil etmektedir. Güç kapasitesine göre Eş.7 ile belirlenen ürün bölgesi (A_p) nüve kesiti ile pencere kullanım alanının çarpımına eşit olmaktadır [15,18].

$$A_p = A_c \cdot W_a \quad (7)$$



Şekil 3. Modellenen üç fazlı üç bacaklı reaktörün görünüşü

Nüve kesiti ve pencere alanı belirlendikten sonra Çizelge 3’te verilen pencere yüksekliği (H) ile pencere genişliğine (G) ait teknik özellikler kullanılabilir.

Çizelge 3. Nüvenin boyutlandırılmasında kullanılan teknik özellikler

A_p	A_c	W_a	G	H
1940 cm^4	36 cm^2	54 cm^2	45 mm	120 mm

Pencere yüksekliğinin büyüklüğü reaktör sargılarının yapılacağı $100 \times 0,5 \text{ mm}$ boyutlarındaki folyo sarım malzemesinin yüksekliğine ve sargılar ile nüvenin alt ve üst boyunduruk kısımlarında bırakılacak boşluklara göre 120 mm olarak belirlenmiştir. Sargıların kabarma payları ve komşu sargılar arasındaki mesafeler ile birlikte nüve ve sargı arasındaki soğutma boşluğu 8 mm düşünülerek pencere genişliği için 45 mm yeterli olmaktadır. Böylece 1940 cm^4 büyüklüğündeki üç fazlı üç bacaklı reaktör nüvesi için 3105 VA gücü taşıyabilecek kapasitede boyutlandırma yapılmıştır. Reaktörlerde sarım sayısı transformatörlerde olduğu gibi uyarım geriliminin etkin değeri dikkate alınarak Faraday Kanunu’na göre Eş. 8 ile hesaplanabilmektedir. Ancak reaktörlerde sarım sayıları %4,5 gerilim düşümü değerine göre belirlenmektedir [15,18].

$$N = \frac{(\%4,5)V_{ac}(10^4)}{K_f B_{ac} f A_c} \quad (8)$$

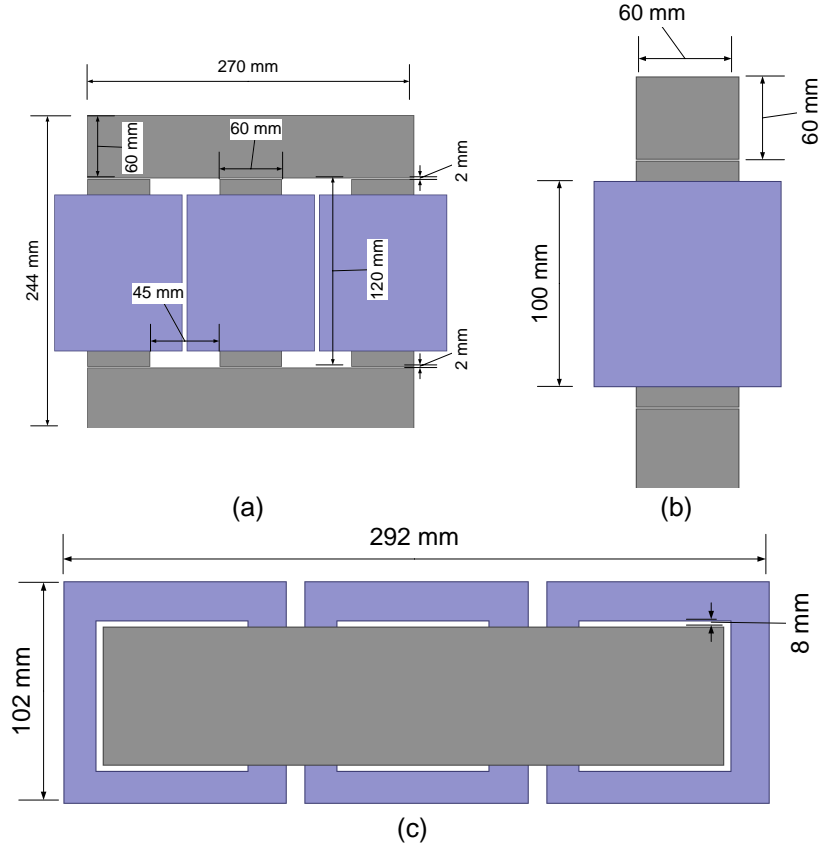
Böylece reaktörün eşdeğer endüktans değerinin 0,33 mH olabilmesi için gerekli sarım sayısı 17 tur ve nüvedeki toplam hava aralığı mesafesi ise Eş. 9 ile 4 mm olarak belirlenmiştir [1,15].

$$l_g = \left(\frac{0,4\pi N^2 A_c (10^{-8})}{L} \right) - \left(\frac{l_c}{\mu_c} \right), [cm] \quad (9)$$

Hava aralıkları nüvenin alt ve üst boyundurukları ile bacak kısımları arasında $2 \times 2 \text{ mm}$ olarak

düşünülmektedir. Buna göre boyutlandırma işleminde 60 mm genişliğindeki laminasyonun kullanılması durumunda metrik olarak nüvenin ölçüleri Şekil 4'te verilmiştir.

görülen manyetik eşdeğer devrede dolaşan akılar için belirtilen yönlere göre çevre denklemleri sırasıyla Eş. 10-15 ile verilmiştir. Asimetri etkisiyle orta bacak akısının dıştaki bacaklara göre daha büyük olacağı açıkça görülmektedir [19].



Şekil 4. Modellenen reaktörün görünüşü ve boyutları (a) ön görünüşü, (b) yan görünüşü, (c) üst görünüşü

3.1. Üç Fazlı Üç Bacaklı Reaktör Nüvesinin

Matematiksel Modeli (Mathematical Model of The Three-Phase Three-Leg Reactor Core)

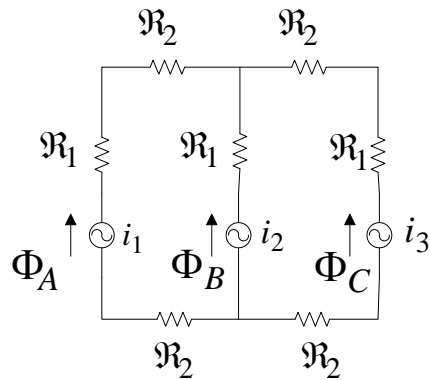
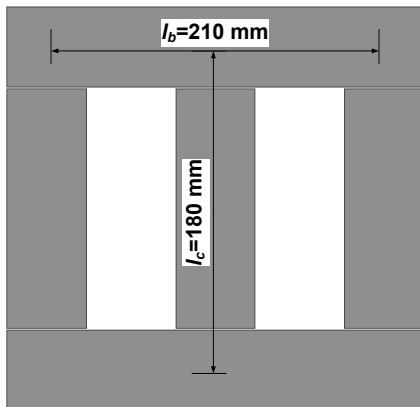
Üç fazlı üç bacaklı nüve yapılarındaki asimetrik davranış sebebiyle eşdeğer endüktans değeri dikkate alınarak matematiksel modeli geliştirilebilir. Şekil 5'te

$$i_1 = \Phi_A (\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2) \quad (10)$$

$$i_2 = \Phi_B \mathcal{R}_1 \quad (11)$$

$$i_3 = \Phi_C (\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2) \quad (12)$$

$$\Phi_B = -(\Phi_A + \Phi_C) \quad (13)$$



Şekil 5. Üç fazlı üç bacaklı nüve ve eşdeğer devresi

$$\frac{N \cdot i_2}{\mathcal{R}_1} = - \left(\frac{N \cdot i_1}{2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2} + \frac{N \cdot i_3}{2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2} \right) \quad (14)$$

$$i_2 = - \left(\frac{i_1 + i_3}{\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2} \right) \quad (15)$$

Bu devrede \mathcal{R}_1 ve \mathcal{R}_2 sırasıyla nüvenin bacak ve boyunduruk kısımlarının relüktansını ifade etmektedir. Üç bacaklı nüve yapılarında boyunduruk ve bacak boyutlarına bağlı olarak asimetri oranı değişmektedir. Böylece asimetri oranı (θ) per-unit olarak Eş. 16 ile belirlenebilmektedir [2].

$$\theta = \frac{l_b - l_c}{l_c} \quad (16)$$

N sargılı bir reaktör için Amper Kanunu Eş. 17 ile tanımlanmaktadır [20]. Dolayısıyla üç fazlı üç bacaklı nüvenin boyunduruk ve bacak kısımlarında manyetik alan şiddeti için denklemler sırasıyla Eş. 18 ve 19 olarak elde edilebilir.

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N \cdot i \quad (17)$$

$$H_b l_b = N(i_1 + i_3) \quad (18)$$

$$H_c l_c = N \cdot i_2 \quad (19)$$

Nüvenin boyunduruk ve bacak boyutlarının büyüklüğüne göre Eş. 16 ile ifade edilen asimetri oranı için manyetik alan şiddetine göre Eş. 20 yazılabilmektedir.

$$\theta = \frac{N(i_1 + i_3)/H_b - Ni_2/H_c}{Ni_2/H_c} \quad (20)$$

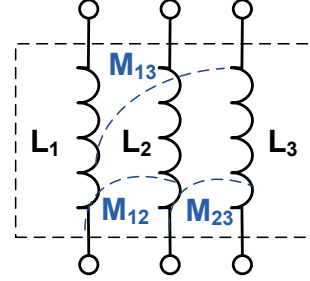
Buradan Şekil 5'te verilen nüvedeki boyunduruk ve bacak boyutlarına göre asimetri oranı 1/6 kadar olmaktadır. Transformatör nüvelerinde hava aralıkları bulunmadığı için asimetri etkisi daha fazla oluşmaktadır. Ancak reaktörlerde transformatörlerden farklı olarak hava aralıklarının etkisiyle nüvenin bacak kısımlarındaki relüktans çok büyük değerdedir. Hava aralıklı nüvelerde asimetri oranı boyunduruk ve bacak kısımlarının relüktans değerlerinin birbirine oranlanmasıyla Eş. 21 ile elde edilmektedir [2]. Nüvenin yapısal asimetrisi reaktörlerin eşdeğer endüktans değerini değiştirdiğinden filtreleme performansına etki etmektedir.

$$\theta = \frac{2\mathcal{R}_2}{\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_g} \quad (21)$$

Çizelge 4. Reaktör sargılarının SEA ile elde edilen endüktans değerleri

L_1	L_2	L_3	M_{12}	M_{23}	M_{13}	L_{eq}
0,24 mH	0,23 mH	0,24 mH	0,113 mH	0,113 mH	0,113 mH	0,34 mH

Üç bacaklı nüvede sargıların öz ve karşılıklı endüktans değerleri bağlaşım etkisiyle oluşmaktadır. Buna bağlı olarak reaktörün eşdeğer endüktans değerinin tasarım aşamasında dikkate alınması gerekmektedir. Reaktöre ait üç fazlı sargı eşdeğer devre modeli Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Reaktörün üç fazlı sargı modeli [2].

Tanımlanan sargı modeline göre endüktans matrisi Eş. 22'de verildiği gibi oluşturulabilir. Burada L_1 , L_2 ve L_3 sargıların öz endüktansları, M_{ij} ise karşılıklı endüktansları ifade etmektedir.

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Her sargı için öz ve karşılıklı endüktans değerlerinin asimetri oranına göre değişimi sırasıyla Eş. 23-26 ile verilmiştir [2]. Böylece üç bacaklı nüve için dıştaki bacakların endüktans değerleri ile komşu sargıların karşılıklı endüktans değerleri birbirine eşit olmaktadır.

$$L_1 = L_3 = \frac{L_{eq}(2 + \theta)}{3(1 + \theta)} \quad (23)$$

$$L_2 = \frac{2L_{eq}}{3} \quad (24)$$

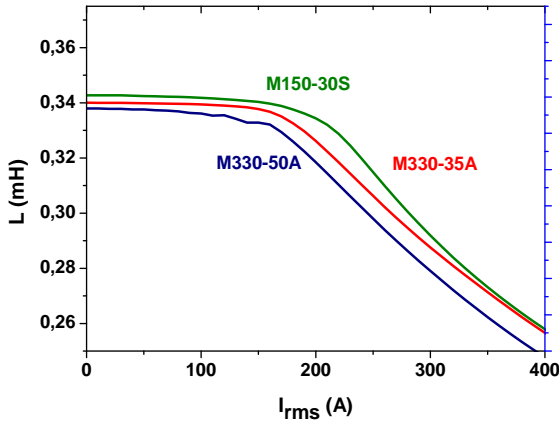
$$M_{12} = M_{23} = \frac{L_{eq}}{3} \quad (25)$$

$$M_{13} = \frac{L_{eq}}{3(1 + \theta)} \quad (26)$$

SEA ile modellenen reaktör sargılarına ait endüktans değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. Buradan reaktörün bağlı olduğu hat üzerinde oluşturacağı empedans için eşdeğer endüktans değeri kolaylıkla elde edilebilmektedir.

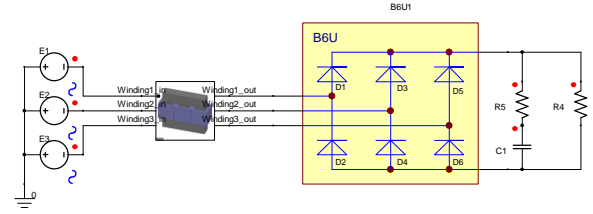
4. FARKLI NÜVE MALZEMELERİ İÇİN AA REAKTÖRÜN ANALİZİ (ANALYSIS of AC REACTOR for DIFFERENT CORE MATERIALS)

Elektriksel parametreleri belirlenen reaktörün farklı nüve malzemeleri kullanıldığı durumda performans testleri SEA yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Reaktörün kısa süreli aşırı yüklenme durumunda dahi görevini yerine getirebilmesi için genellikle anma akım değerinin %150'sine kadar endüktans değerinin kararlı olması gerekmektedir. Ayrıca herhangi bir kısa devre durumunda sürücü girişiindeki yarıiletkenleri korumak için aşırı akımlardaki reaktör empedansı büyük önem taşımaktadır. Bundan dolayı reaktörün yarıiletkenlerde oluşabilecek kısa devre durumundaki endüktans değeri tamamen sıfıra gitmemelidir. Doymaya bağlı endüktans değişimini test etmek için SEA parametrik çözücüsü kullanılarak sargılardan geçen akım değeri 10 A adım aralığında 400 A değerine kadar artırılmıştır. Böylece, M330-35A, M330-50A yönlendirilmemiş malzemeler ile M150-30S tip yönlendirilmiş malzemenin karşılaştırılması yapılmıştır. Parametrik analiz sonucunda Şekil 7'de görülen endüktans değişim grafiği elde edilmiştir. Anma akım değerinin 4 katında dahi endüktans değeri 0,24 mH seviyesindedir. Ayrıca, anma akımının 2 katına kadar reaktörün eşdeğer endüktansı boştaki değerinin yaklaşık %70'i kadar olmaktadır. M330-50A kullanıldığında %150 yüklenmede doymadan dolayı endüktans değeri azalmaya başlamaktadır.



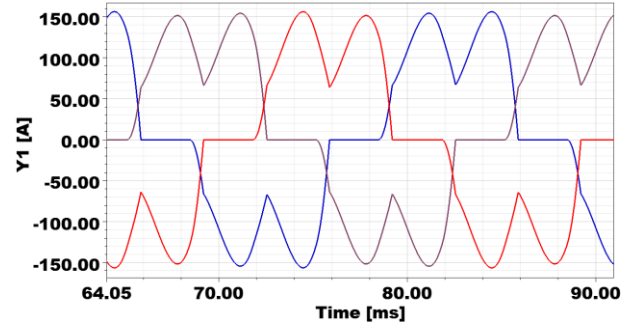
Şekil 7. Yük akıma bağlı olarak AA reaktörlerdeki endüktans değişimleri

Nüve kaybı açısından karşılaştırma yapabilmek için sinüsoidal (omik) ve doğrusal olmayan akım durumlarında analizler yapılmıştır. Doğrusal olmayan yük olarak yaygın biçimde kullanılan 6 darbeli olarak da bilinen üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi Şekil 8'de görüldüğü gibi Simplorer yazılımında oluşturulmuştur. SEA geçici durum çözücüsü kullanılarak 10 μ s adımlarla 100 ms periyot için eş zamanlı olarak benzetim yapılmıştır.



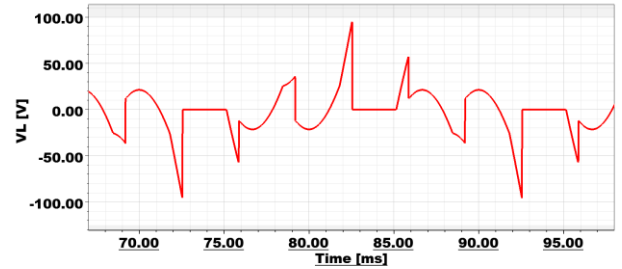
Şekil 8. Eş zamanlı SEA benzetimi için test devresi

Bu devrede doğrultucu çıkışına filtre kondansatörü olarak seri eşdeğer seri direnç (ESR) değeri 12 m Ω olan 10000 μ F kondansatör bağlanmıştır. Maxwell yazılımında üç boyutlu olarak modellenen reaktörün eşdeğer devresi doğrultucu giriş hattına seri olarak bağlanmıştır. Böylece, eş zamanlı benzetim yapılarak reaktörün performansı gerçek çalışma şartlarına yakın olarak Şekil 9'da görülen üç fazlı tam dalga doğrultucunun harmonik bileşenler içeren akımları ile test edilmiştir.



Şekil 9. Doğrusal olmayan yük durumunda reaktör faz akımları

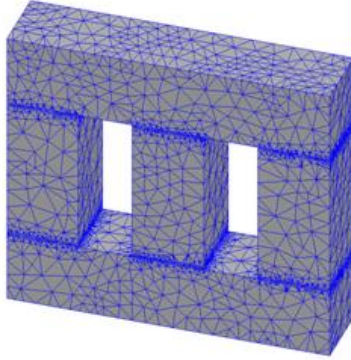
Ayrıca, 6-darbeli doğrultucunun bağlı olduğu durumda reaktör sargıları üzerine düşen gerilim dalga formu Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Doğrusal olmayan yük durumunda reaktör sargıları üzerinde düşen gerilim

SEA ile modellemesi yapılan reaktör nüvesinin sonlu eleman ağlara bölünmüş durumu Şekil 11'de görülmektedir. Burada sonlu elemanların sayısı 111722'dir. Nüvenin hava aralığı bulunan kısımlarında ağların daha sık biçimde ayrıntılı örüldüğü görülmektedir. Sonlu eleman ağlarının sayısına ve

boyutuna göre SEA çözüm süresi uzamakta ancak daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir.

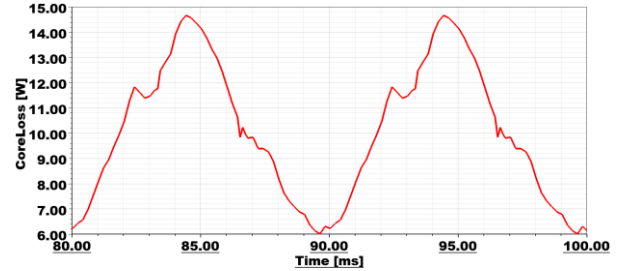


Şekil 11. Nüvenin sonlu elemanlara bölünmüş hali

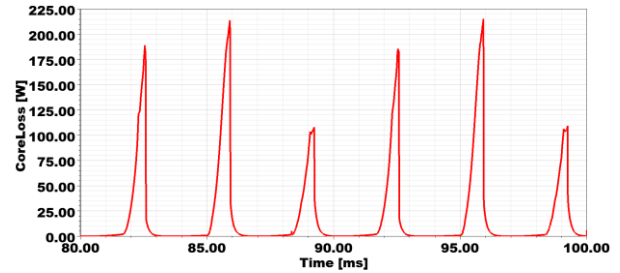
Nüve malzemesinin tipine göre elde edilen nüve kaybı değerleri Çizelge 5'te verilmiştir. Bu çizelgeye göre hem sinüzoidal uyarım hem de doğrusal olmayan uyarım durumlarında en az nüve kaybı M150-30S (M5) malzemenin kullanıldığı tasarımdır. En fazla kayıp M330-50A malzemede gerçekleşmiştir. Benzetimlerde sargı kayıpları sabit tutulduğundan verilen değerler nüvelerin kayıp değerleridir.

Uyarım durumuna göre kayıpların değişimi için M150-30S tip nüve malzemesi kullanılan reaktör için nüve kaybı grafikleri Şekil 12'de görülmektedir. Böylece sinüzoidal ve doğrusal olmayan akım ile uyarım durumları arasındaki fark daha net incelenebilmektedir.

Doğrusal olmayan uyarım durumunda akımın harmonik bileşenleri sebebiyle nüve kaybı grafiğinde ani artışlar oluşmaktadır. Bu grafiklerin ortalama değeri alındığında nüve kaybı verileri elde edilmektedir.



(a)



(b)

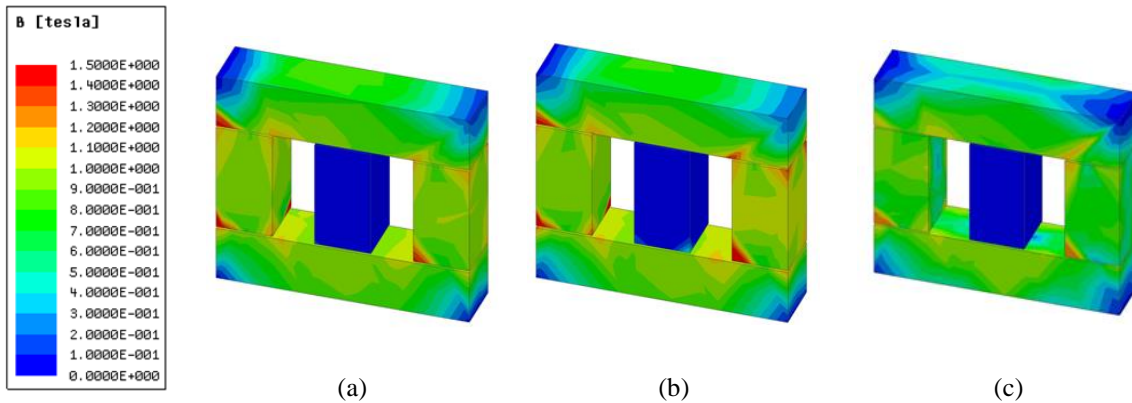
Şekil 12. M150-30S nüve malzemesi için uyarım durumuna göre nüve kaybı grafikleri

(a) Sinüzoidal uyarım durumu

(b) Doğrusal olmayan uyarım durumu

Çizelge 5. Nüve Materyali çeşidi ve yük seviyesine bağlı olarak doğrusal ve doğrultucu yüklerine göre nüve kaybı değerleri

Yük Yüzdesi ve Tipi	Nüve Materyal Tipi					
	M330-35A		M330-50A		M150-30S	
	Omik	Doğrultucu	Omik	Doğrultucu	Omik	Doğrultucu
%25	1,1 W	11,9 W	1,9 W	15,8 W	0,8 W	9,5 W
%50	3,9 W	27,8 W	5,8 W	34,8 W	2,4 W	23,4 W
%75	9,1 W	39,5 W	10,8 W	50,2 W	5,7 W	30,7 W
%100	17,4 W	50,9 W	23,1 W	67,9 W	10,2 W	36,2 W
%150	30,6 W	64,4 W	35,9 W	80,7 W	22,7 W	43,8 W
%200	36,7 W	95,6 W	54,7 W	125,1 W	31,4 W	66,4 W



Şekil 13. Sinüzoidal uyarım durumunda maksimum 1,5 T için akı dağılımları

(a) M330-35A

(b) M330-50A

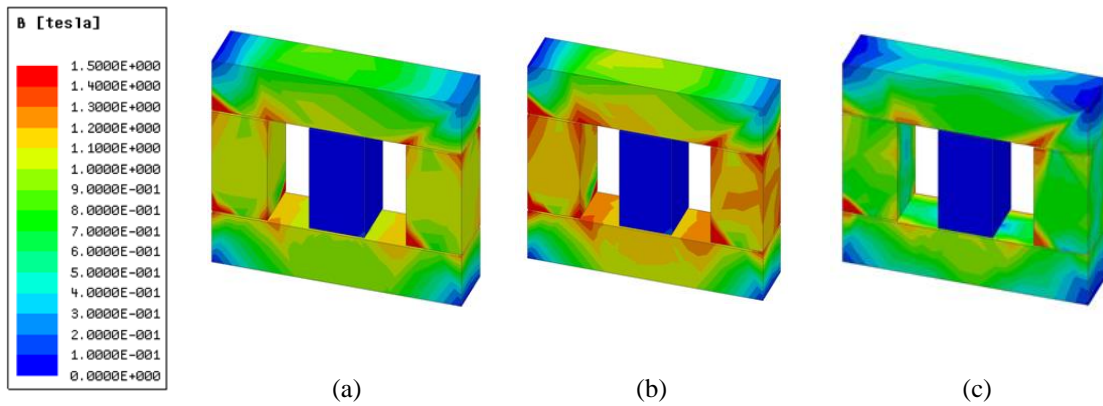
(c) M150-30S

Sinüzoidal uyarım durumu için akı dağılımı nüve malzemesinin farklılığına göre Şekil 13'te verilmiştir. Bu dağılımlar 85.ms'deki ani akım değerlerine göre çizdirilmiştir.

Sinüzoidal uyarım durumunda tasarım aşamasında öngörülen akı değerinin doğruluğu test edilmiş ve bu reaktör nüvesi için 2x2 mm hava aralığının uygun olduğu görülmüştür. Eğer nüvede doyma olursa elektriksel ve manyetik parametrelerin tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir. SEA yazılımında parametreler yeniden kurularak optimizasyon için gerekli önlemler hızlı bir şekilde alınabilmektedir. Ayrıca, tasarımı yapılan reaktörün gerçek şartlarda analiz edilebilmesini sağlayan güç elektroniği benzetim yazılımı ile elektromanyetik tasarımın yapıldığı SEA yazılımı eş zamanlı olarak çalıştırılmıştır. Böylece, doğrusal olmayan harmonikli akım uyarım durumundaki nüve davranışı ve kayıplar belirlenebilmektedir. Doğrusal olmayan uyarım durumu için akı dağılımı nüve malzemesinin farklılığına göre Şekil 14'te verilmiştir.

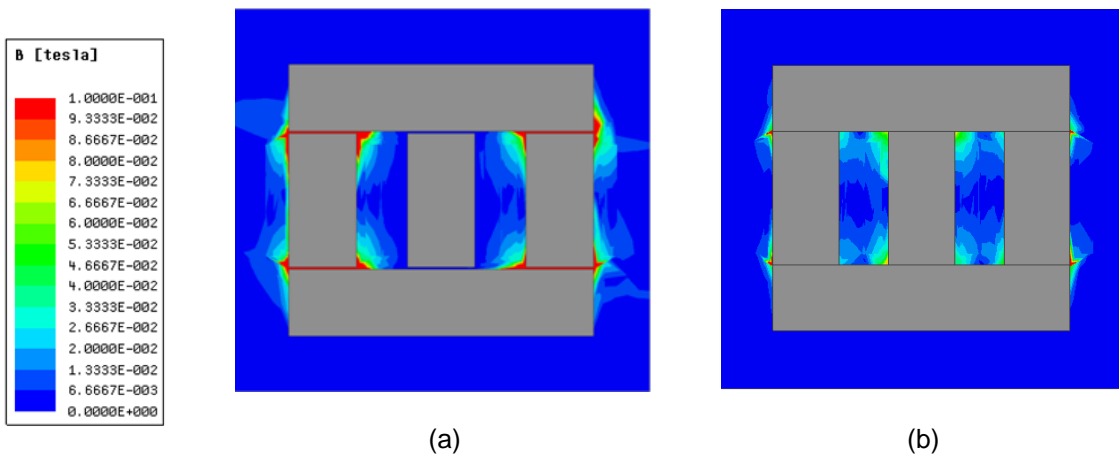
Burada 55 kW gücünde üç fazlı 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu hattına bağlanan reaktör nüveleri için akı dağılımları incelendiğinde en uygun malzemenin M150-30S olduğu görülmektedir. Nüvenin hava aralıklarına yakın olan kısımlarında meydana gelen saçak akıların etkisinin görülebilmesi için Şekil 15'te maksimum 0,1 T için saçak akı dağılımları verilmiştir. Saçak akıların maksimum genliği nüvede dolaşan faydalı akı değerinin yaklaşık olarak % 10'u kadar oluşmuştur ve ihmal edilebilecek kadar küçük değerdedir. Ayrıca, karşılaştırmanın daha iyi yapılabilmesi açısından hava aralıkları bulunmayan nüvedeki akı dağılımı da verilmiştir. Bu akı dağılımları iki boyutlu 2D düzlemsel olarak elde edilmiştir.

Ayrıca reaktörün giriş akımındaki toplam harmonik bozulunun tespiti IEC normlarına uygun olarak 51. harmonik bileşene kadar olan etki dikkate alınmıştır. Reaktörsüz durumdaki analizlerde, gerçek şebekeye uygun olacak şekilde hat empedansı 0,2 Ω olarak kabul edilmiştir. Bu analizlerin sonuçlarına göre reaktörün kullanılmaması halinde % 80 civarında olan giriş akım



Şekil 14. Doğrusal olmayan uyarım durumunda maksimum 1,5 T için akı dağılımları

(a) M330-35A (b) M330-50A (c) M150-30S



Şekil 15. Reaktör nüvesindeki saçak akı dağılımları

(a) Hava aralıklı durum, (b) Hava aralıksız durum

bozulumu (THDi) değeri tasarlanan reaktörle % 30 civarına düşmüştür.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 55 kW gücündeki bir motor sürücüsünün doğrultucu girişine % 4,5 empedans artışı oluşturacak şekilde AA reaktörlerin SEA ile tasarımı ve analizi yapılmıştır. Reaktör nüve malzemesi çeşidinin işletme performansına etkisi incelenmiş ve parametrik analiz yolu ile endüktans kararlılıkları test edilmiştir. Nüve malzemesi olarak bu türden bir tasarımda en çok tercih edilebilecek yönlendirilmemiş M330-35A, M330-50A ve yönlendirilmiş M150-30S silisli saclar kullanılmıştır. Bu malzemeler ile tasarlanan reaktörlerin nüve kayıpları ile akıma bağlı endüktans değişimleri analiz edilmiştir. Böylece doğrultucu girişlerindeki reaktörlerin klasik hesaplamaları doğrusal akımlara göre yapılmakta ise de, gerçekte doğrusal olmayan akım taşıdıkları, tepe değeri daha büyük olan bu akımların ise yaklaşık üç kat daha yüksek nüve kayıplarına sebep olduğu görülmüştür. Reaktörlerin tasarımında yönlendirilmemiş malzemelere göre yönlendirilmiş tanecikli malzemelerin kayıp ve sıcaklık artışı açısından daha uygun olduğu ancak düşük maliyetli yönlendirilmemiş tanecikli malzemelerden daha büyük kesitli nüvenin oluşturulması ile nüve kayıpları sabit tutulabilecektir. Hangi malzemenin kullanılacağı kararı ise, malzemelerin o andaki temin bedeli, reaktörün boyutlarındaki kısıtlılıklar gibi kriterlere göre alınacaktır. Çalışmada, güç elektroniği devresi ile manyetik devre eş zamanlı olarak benzetimi yapılmış böylece analiz süreci kısalmış ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Balci, S., Altin, N., Özdemir, S. and Sefa I., "FEM Based Parametric Analysis of AC Line Reactors", *IEEE (POWERENG) 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Istanbul, 1328-1333, (2013)
- Rodriguez, J.M.C., Orcajo G.A., Garcia C.H.R., Melero M.G., Cabanas M.F. and Gonzalez F.P., "Analysis of the Effects Caused by Structural Asymmetries in the Performance of Three-Limb Core Three-Phase Inductive Filters", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22 (3), 600-607, (2007)
- Rice, D.E., "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics-Their Effect on Power Systems Components", *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA22 (1), 161-177, (1986)
- Date, T.N. and Kushare, B.E., "Evaluation of Performance of AC Drive Under Unbalanced Voltage Conditions and AC Line Reactor Harmonic Mitigation Performance at Various Loading Conditions", *IET-UK International Conference on Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES 2007)*, Dr. M.G.R. University, Chennai, Tamil Nadu, India, 308-314, (2007)
- Shipp, D.D. and Vilcheck, W.S., "Power Quality and Line Considerations for Variable Speed AC Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32 (2), 403-410, March/April 1996.
- Liang, X., Obinna, I. and Lim, J., "Influence of Reactors on Input Harmonics of Variable Frequency Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47 (5), 2195-2203, (2011)
- Skibinski, G. L., Tallam, R. M., Pande, M., Kerkman, R.J. and Schlegel, D. W., "System Design of Adjustable Speed Drives, Part 2-System Simulation and Ac Line Interactions", *IEEE Industry Applications Magazine*, (2012)
- Kocman, S. and Orsag, P., "Efficiency Evaluation of Various Assemblies of Variable Speed Drive", *IEEE (EEEIC) 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Krakow, Poland, (2014)
- IEEE Standard for Performance of Adjustable-Speed AC Drives Rated 375 kW and Larger, *IEEE Industry Applications Society*, (2015)
- Donuk, A., "Modeling and Design of Iron-Core Shunt Reactors with Discretely Distributed Air-Gaps", A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Electronics Engineering, (2012)
- Donuk, A., Rotaruand, M. and Sykulsk, J.K., "Defining and Computing Equivalent Inductances of Gapped Iron Core Reactors", *ISEF 2011-XV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, Funchal, Madeira, (2011)
- Kohsaka, T., Takahashi, N., Nogawa, S. and Kuwata, M., "Analysis of Magnetic Characteristics of Three-Phase Reactor Made of Grain-Oriented Silicon Steel", *IEEE Transactions on Magnetics*, 36 (4), 1894-1897, (2000)
- Namikawa, M., Ninomiya, H. and Yamaji, T., "High Silicon Steel Sheets Realizing Excellent High Frequency Reactor Performance", *JFE Technical Report*, 6, (2005)
- Balci, S., "Evirici Çıkış Transformatörlerinin Modellenmesi ve Analizi", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, (2010)
- McLyman, C.W.T., "Transformer and Inductor Design Handbook", Marcel Dekker, Inc., (2004)
- Gao Y., Muramatsu K., Hatim M.J., Fujiwara K., Ishihara Y., Fukuchi S., Takahata T., "Design of a Reactor Driven by Inverter Power Supply to Reduce the Noise Considering Electromagnetism and Magnetostriction", *IEEE Transactions on Magnetics*, 46 (6), 2179-2182, (2010)
- Kuwata, M., Nogawa, S., Takahashi, N., Miyagi, D. and Takeda, K., "Development of Molded-Core-Type Gapped Iron-Core Reactor", *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (10), 4066-4068, (2005)
- Balci, S., Sefa, I. and Bayram, M.B., "Core Material Investigation of Medium-Frequency Power Transformers", *IEEE-16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, PEMC, Antalya, 861-866, 21-24, (2014)
- Altin, N., Balci, S., Ozdemir, S. and Sefa, I., "A comparison of single and three phase DC/DC converter

structures for battery charging", *IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Madrid, 1228-1233, (2013)

20. Wojda, R.P. and Kazimierzuk, M.K., "Analytical winding size optimisation for different conductor shapes using Ampère's Law", *Power Electronics*, IET, 6 (6), 1058-1068, (2013)