

# Transformatör T-Bağlantı Yapısının Çekirdek Kayıplarına Etkisi

Ahmet KARADEMİR<sup>1</sup>, Mehmet Kubilay EKER<sup>2</sup>

Balıkesir Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

(Geliş / Received : 04.09.2015 ; Kabul / Accepted : 17.12.2015 )

## ÖZ

Modern imalat sürecinde, transformatör çekirdek saçları, 3 adet bacak, üst ve alt boyunduruk olmak üzere 5 adet kesilmiş parçadan istifleterek oluşturulmaktadır. Çekirdek kayıplarının en fazla olduğu orta bacak uzantısı olan T-bağlantı kısmı ise farklı kesim açılarında üretilmektedir. Bu çalışmada elektrik makineleri için gelişmiş bir elektromanyetik analiz programı olan Ansoft Maxwell kullanılarak, 7 farklı T-bağlantı formu için, toplam çekirdek kayıpları ve akı yoğunluğu dağılımları analiz edilmektedir. Ayrıca çalışmada, farklı T-bağlantı tasarımları için oluşan atıl malzemedeki değişimler incelenmektedir. Çalışma sonucunda, orta bacak boyunun mümkün olduğunca kısaltılmasının, hem kayıplar hem de atıl malzeme açısından iyileştirmeye neden olacağı belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Transformatör, T-bağlantı Açısı, Çekirdek Kaybı, Sonlu Elemanlar Yöntemi

# Effect of The Different T-Joint Design at Power Transformer

## ABSTRACT

In the modern manufacturing processes, sheets of the transformer core composed as stacked with 5 pieces of cut parts which have top and bottom yoke and 3 legs. Also it is seen literature resarch about a part of experimental and a part of computer analysis that is emphasized maximum core loss of no-load transformer at T-joint sections. Using electromagnetic analysis program Ansoft Maxwell which developed for electric machines, analysis are performed for 7 different T-joint design for this aim. Furthermore total core losses, flux density distributions and sections of the maximum loss of power on the core is analyzed. Also another aim of this study is to find proper design with regard to minimum discarded material for different T-joint designs at core production stage.

**Keywords:** Transformers, T-joint, Core Loss, Finite Element Method

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji sistemlerinde, her türlü güç seviyesinde yoğun olarak kullanılmak zorunda olan transformatörlerin, imalat maliyetlerini düşük ve verimini yüksek seviyede tutmak için transformatör tasarımı ve optimizasyonu alanında yapılan çalışmalar güncelliğini korumaktadır [1-2]. Enerji sistemine bağlı olduğu sürece sistemden güç çeken ve yükün çektiği güç haricinde, transformatörün akım taşıyan kısmı (iletken) ve manyetik akı oluşan kısmının (demir çekirdek) çektiği güçler kayıp olarak adlandırılmaktadır [3].

Geçici durum davranışlarında sargılardaki gerilim dağılımının, izolasyon problemi oluşturmayacak biçimde farklı tiplerde sarılması [4], girdap akımı kayıplarının değişimini kısmen azaltsa da [5], bu tasarım tiplerinin iletken kayıplarına etkisi büyük oranda olmayacaktır. İzole edilmiş alt iletkenlerle sargıların oluşturulmasının yanında daha iyi bir iletkenliğe sahip malzemelerin [6-7] kullanılması gerekecektir ki, maliyetler göz önüne alındığında, alüminyum veya bakır malzeme kullanımı güncelliğini halen devam ettirmektedir.

Yüksüz çalışma şartlarında dahi enerji sisteminden güç çeken transformatörde, çekirdek kayıpları olarak da adlandırılan, manyetik akının, çelik malzeme içinde ürettiği histerisiz kayıpları ve girdap akımı kayıpları boşa çalışma kayıplarını oluşturur. Histeriz ve girdap akımı kayıplarının hesaplamalara dahil edilmesi için matematiksel ifadeler geliştirilse de, deneysel yollarla ölçülen çekirdek kayıpları, hesaplamalarla elde edilen değerden daha büyük olmaktadır ve aradaki kayıp değeri literatürde anormal kayıplar olarak adlandırılmaktadır [8].

Histerisiz kayıpları; frekans, akı yoğunluğunun tepe değeri, kullanılan çekirdek çeliğinin tipi, çelik tanelerindeki akı yönlendirmelerine bağlı olarak değişir. Sistem frekansı hariç, bu sayılan faktörlerin hepsi, transformatör tasarımcısının tercihi ile değiştirilebilir [5]. Çekirdek kısmında oluşan kayıpların azaltılabilmesi için farklı manyetik özelliklere sahip malzemelerin kullanılması da [9] belirli maliyet kısıtları içinde dikkate alınmaktadır.

Çekirdek malzeme içinde oluşan girdap akımı kayıpları; çekirdek levhalarının kalınlığının karesi, frekansın karesi ve akı yoğunluğu etkin değerinin karesi ile orantılıdır [8]. Elektrik sisteminin frekansı sabit değerde olması

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

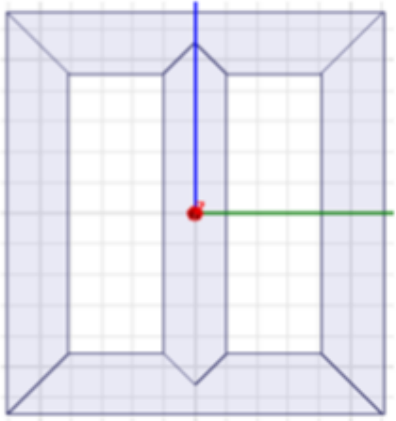
e-posta: ahmet.karademir@hotmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 389-397

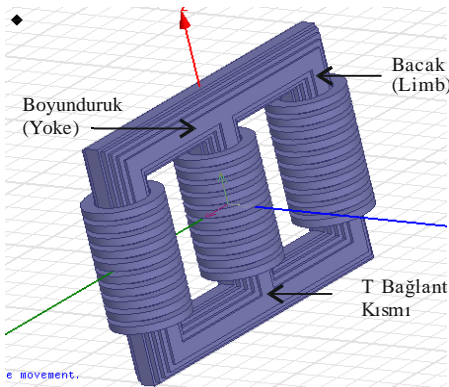
gerektiğinden, kayıpların azaltılması için ince çekirdek levhalarının kullanılması mümkünse de, ince saçların tasarımının gerektirdiği teknolojik birikim, fazladan bir maliyet olarak üretimi etkileyen bir unsur olacaktır.

Günümüzde orta ve büyük güçteki transformatör imalatçıları, kullanılan çekirdek saçının kesme esnasındaki çapaklardan kaynaklanan kayıplarını en aza indirmek için profesyonel kesme makineleri kullanılmaktadır [10]. Kesim esnasında saç levhası kenarı boyunca oluşan çapaklar, levhalar arasında elektriksel bir köprü oluşturmakta ve bu kısımlarda akan girdap akımlarına bağlı olarak kayıpların artmasına neden olmaktadır [5].

3 fazlı transformatör imalatlarında çekirdek tasarımları, Şekil-1'de görüldüğü gibi, 3 adet bacak kısmı ve 2 adet boyunduruk kısmı için olmak üzere, toplam 5 adet yığınlanmış paket ile transformatör çekirdeği oluşturulmaktadır [11]. Böylelikle transformatör çekirdeğinin 6 farklı kısmında hava aralığı oluşmaktadır. Bobinlerin sarmal yapısından dolayı oluşan hava aralığının etkisini azaltmak için ise Şekil-2'de görüleceği gibi iç kısımlardaki çekirdek genişlikleri daha büyük, dış kısımlardakiler ise daha küçük olarak tasarlanmakta ve adım kaydırma (step lap) tekniği ile çekirdek saçları dizilmektedir [10,12].



**Şekil 1.** 5 parçadan oluşan 3 fazlı transformatörün 2 boyutlu gösterimi (two-dimensional representation of 3-phase transformers consisting of 5 parts)



**Şekil 2.** Adım kaydırma tekniği dikkate alınarak tasarlanmış 3 fazlı transformatör modeli (3-phase transformer model designed with step lap technique)

## 2. TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEK TASARIMLARI (TRANSFORMER CORE DESIGN)

Boşta çalışma şartlarında dahi güç tüketimi olan çekirdek kısmındaki kayıpların azaltılmasına yönelik çalışmalar hem deneysel [11-15] hem de benzetim çalışmaları [16-18] ile literatürde yer almaktadır. Transformatör çekirdeklerinin manyetik özelliklerini temel olarak, çekirdek malzeme kalitesi, çekirdek imalatı sırasında çelik levhanın işlenmesi ve çekirdek tasarımı olmak üzere üç faktör belirlemektedir [13]. Kayıpların %70'i'nin çekirdek kısmında olduğu güç transformatörlerinin, çekirdeğin oluşturulması esnasında, üst üste gelen bağlantı kısımlarının ve istifleme işleminde kullanılan deliklerden kaynaklanan kayıpların etkisinin de, çekirdek kayıpları içinde önemli bir yer tuttuğu bilinmektedir [16].

Farklı çekirdek tasarımlarında oluşturulan transformatörde, ölçülen toplam çekirdek kaybının, imalat öncesi çekirdeğin karakteristik olarak verilen kilogram başına kaybına oranı bulunarak elde edilen yapı faktörü tanımlaması, tasarımların kayıplarını karşılaştırmak amacıyla literatürde kullanılmaktadır [8,19]. Yapı faktörü küçük değerli olan çekirdek tasarımı, kayıplar açısından en verimli transformatörleri ortaya çıkarmaktadır.

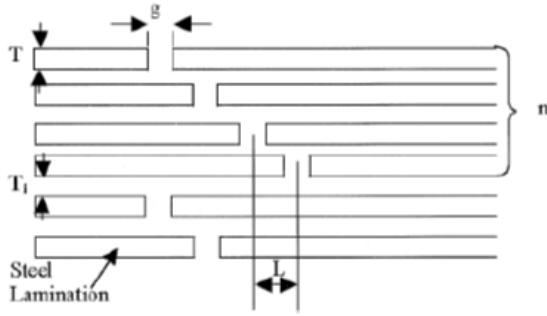
Yapılan bir çalışmada bacak kalınlıkları arttıkça yapı faktörünün büyüdüğü, dolayısıyla kayıpların arttığı belirtilmektedir. Aynı çalışmada, transformatör köşe kısımlarının tasarımında yapı faktörünün, 90° açıyla üst üste bindirilerek oluşturulan tasarımın, 45° açıyla oluşturulan tasarıma göre daha büyük değerde olduğu ve köşe kısımlarında üst üste binme uzunluğu arttıkça kayıplarda artış olduğu ortaya koyulmaktadır [13].

Kullanılan malzemelerin cinsine ve kalınlığına bağlı olarak, güç transformatörlerindeki kayıpların etkisinin incelendiği bir çalışmada, verim faktörü olarak yeni bir tanımlamanın dikkate alındığı, 1 fazlı transformatör tasarımlarının 3 fazlı olanlara göre daha iyi olduğu, ayrıca çekirdek boyutları ile kayıp azalımı arasında ilişki olduğu belirtilmektedir [14]. Büyük güçlü (20-150 MVA) 3 fazlı transformatörlerde verim faktörünün, 1 fazlı modellere yaklaştığı, çalışmada incelenen malzemeler içinde, lazer ile tanecikleri yönlendirilmiş malzemenin, diğer malzemelere göre veriminin en iyisi olduğu ve çekirdekte en fazla kayıpların T-bağlantı kısmında olduğu vurgulanmaktadır.

Adım kaydırma yönteminin çekirdek köşe noktalarında kayıplar üzerine etkisinin, adım kaydırma tekniği uygulanmayan tasarıma göre yapılan karşılaştırılmasında, manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak %2 ile %4 arasında toplam çekirdek kaybında azalma olduğu belirtilmektedir [12].

Çekirdek tasarımında, adım kaydırma tekniği için laminasyon sayısının 4 ile 25 (Şekil-3) arasında değiştirilmesinin mümkün olduğu vurgulanan bir çalışmada, aynı tasarımı korumak için laminasyon sayısı artırılırken, çakışma uzunluğu azaltılması durumunda çekirdek kaybında net bir değişimin olmadığı, ancak sadece

çakışma uzunluğunun artmasına bağlı olarak kayıplarda artış olduğu sonucu ortaya koyulmaktadır [15].



Şekil 3. 4 laminasyonlu durum için adım kaydırmalı tasarım (step lap design for 4 laminated case)

Löffler ve arkadaşları, hava aralığı uzunluğu, her bir adım arası uzaklık ve her bir adımdaki laminasyon sayısının kayıplar üzerine incelemesini yapmışlardır [20]. Yapılan birçok deneysel karşılaştırma ile hava aralığı uzunluğunun güç kaybına açık etkisi olmasına rağmen, adımlar arası uzaklığın belirleyici bir parametre olmadığı belirtilmektedir. Çalışmada ortaya çıkan önemli bir sonuç ise, hava aralığına bağlı olacak kritik bir manyetik akı yoğunluğu değerinin grafiklerde ortaya çıkmasıdır. Laminasyon sayısı artıkça, kritik manyetik akı yoğunluğu değerinde bir artış olduğu vurgulanmaktadır.

Ilo ve arkadaşları, Löffler'in çalışmasına atıfta bulunarak, laminasyon sayısı ile kritik akı yoğunluğuna bağlı bir indüksiyon penceresi oluşturmuşlardır [21]. Adımdaki laminasyon sayısının 8'den büyük olması durumundaki tasarımların, kayıplar açısından iyi sonuçlar vermeyeceği çalışmada ortaya koyulmaktadır.

Literatür taraması sonucu ele edilen bulgular irdelendiğinde, çekirdek tasarımları ile ilgili farklı görüşler ortaya atılmıştır:

- 1- Adım kaydırma (step lap) tekniğindeki, laminasyon sayısının 4 ile 25 arasında değişmesinin kayıplar üzerinde değişime neden olmadığı vurgulayan [15] ve laminasyon sayısı çok fazla artıkça kayıpların artacağını belirten [20] çalışmalar mevcuttur.
- 2- Adım kaydırma tekniğinde, laminasyonların çakışma uzunluğunun önemli olduğunu vurgulayan [15] ve bunun önemsiz olduğunu belirten [21] çalışmalar mevcuttur.

Literatür taraması sonucunda, çekirdek tasarımları için aşağıda sıralanan konularda ortak bir bakış açısının olduğu görülmektedir:

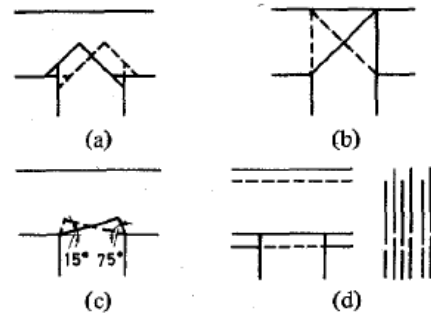
- 1- Transformatör kayıplarının önemli bölümü çekirdek kısmında oluşmaktadır.
- 2- Maliyet önemli değilse manyetik özelliği iyi malzemeler kullanılabilir.
- 3- Çekirdek levhanın işlenmesi önemlidir ve az çapak bırakan profesyonel kesim makinası kullanılması kayıpları azaltacaktır.

- 4- İstifleme deliklerinin çekirdek kayıpları üzerine önemli bir etkisi mevcuttur.
- 5- Çekirdek köşe kısımlarının 45° olarak tasarlandığı modelde kayıplar daha azdır.
- 6- Adım kaydırma (step lap) yöntemiyle çekirdek dizilimi, kayıpları azaltmaktadır.
- 7- Çekirdekte en fazla kayıplar T-bağlantı kısmında oluşmaktadır.

### 3. T-BAĞLANTI KISMI TASARIMLARI (DESIGN OF T-JOINT)

Transformatörde orta bacağın alt ve üst boyunduruk kısımları ile manyetik akı yolunun sağlanması için orta bacağın, kısmen boyunduruklara doğru uzatılarak tasarım yapılması imalat sürecinde devam eden bir uygulamadır [10]. T-bağlantı kısmı olarak adlandırılan bu kısımda, orta bacağın kaç derecelik açıyla boyunduruk kısımlarına uzatılması noktasında literatürde farklı bakış açıları mevcuttur.

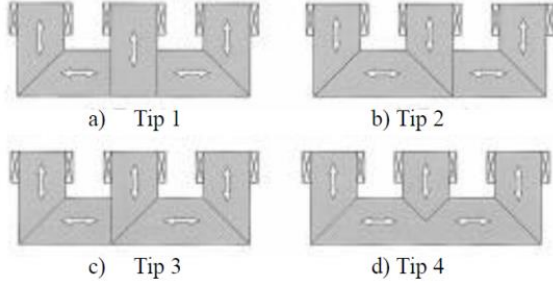
Çekirdek tasarımları konusunda en çok deneysel çalışmayı yapan Valkovic, farklı T-bağlantı kısmı tasarımları için de çalışmalar yapmıştır [13]. Bu çalışmada, günümüzde çok yoğun olarak kullanılan Şekil-4 (a) ve (b)'deki tasarımların yanında iki yeni tasarım olan Şekil-4 (c) ve (d)'de verilen tasarımlar dikkate alınarak, yapı faktörleri açısından değişimler incelemiştir. Kayıplar açısından en iyi tasarımdan, kötü tasarıma doğru sıralamanın 4-(d), 4-(c), 4-(a) ve 4-(b) şeklinde olduğunu vurgulamıştır. Valkovic, bu çalışmada, en iyi tasarımın Şekil 4-(d)'deki tasarım olduğunu belirtmesine rağmen, bu sonucun 45°-90°-45°'lik (Şekil-4-(a)) T-bağlantı açısının en iyi bağlantı formu olduğuna ilişkin bilinenin aksine bir durum oluşturduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 4. Farklı T-bağlantı tasarımları (different T-joint designs)

Soda ve Enokizono, kendilerinin geliştirdikleri ve malzemenin histerisiz davranışını da içeren, E&S adını verdikleri matematiksel model üzerinden sonlu elemanlar yöntemini kullanarak T-bağlantı kısımlarındaki tasarımların çekirdek kayıpları üzerine etkisini incelemişlerdir [17]. 3 fazlı transformatör çekirdeklerinin T-bağlantı kısmında dönel güç kaybının üretildiğini, genellikle dönel güç kaybının, alternatif güç kaybindan daha büyük olduğunu belirtmektedirler. Bu nedenle

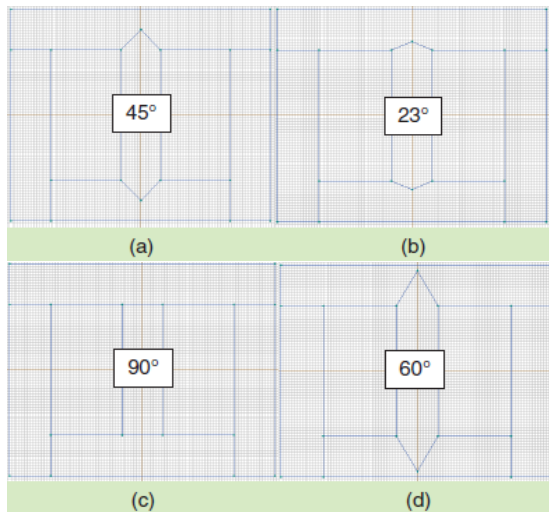
T-bağlantı kısmının optimum olarak tasarlanmasının önemi vurgulanmakta ve Şekil 5’de görüldüğü gibi 4 farklı tip T-bağlantı kısmına ilişkin model üzerinde inceleme yapıldığı belirtilmektedir.



Şekil 5. 4 farklı T-bağlantı kısmı tasarımı (4 different T-joint designs)

Bu tasarımlardan kayıplar açısından iyiden kötüye doğru sıralamanın Tip-4 ( $45^\circ$ - $90^\circ$ - $45^\circ$ ’lik tasarım), Tip-3, Tip-2 ve Tip-1 şeklinde olduğu belirtilmektedir [17]. Çalışma sonucunda, simetrik tasarım yapısına sahip Tip-2 ve Tip-3 için birbirinden çok farklı kayıp değerlerinin elde edildiği, ayrıca 7 parçadan oluşan (8 bağlantı kısmında hava aralığı mevcut) Tip-3 ile 5 parçadan oluşan (6 bağlantı kısmında hava aralığı mevcut) Tip-4 için oluşturulan güç kaybı eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu belirtilmektedir.

Haidar ve Al-Dabbagh yapmış oldukları çalışmada, QuickField sonlu elemanlar manyetik modelleme programını kullanarak, Şekil-6’da görülen  $45^\circ$ - $90^\circ$ - $45^\circ$  (a),  $23^\circ$ - $134^\circ$ - $23^\circ$  (b),  $90^\circ$ - $0^\circ$ - $90^\circ$  (c) ve  $60^\circ$ - $60^\circ$ - $60^\circ$  (d) T-bağlantı açılımlarına sahip, 1 MVA gücündeki güç transformatorünü modellediklerini vurgulamaktadırlar. Bu sonuçlara göre, toplam kayıpların en az olduğu güç transformatorü tasarımlarının sırasıyla Şekil-6’daki (d), (a), (c) ve (b) şıklarında verilen tasarımlar olduğu belirtilmektedir [18]. Bu sonuçlar dikkate alındığında, bağlantı açısının büyümesi veya küçülmesinin kayıplar üzerine doğrusal artış veya azalışının olmadığı görülmektedir.

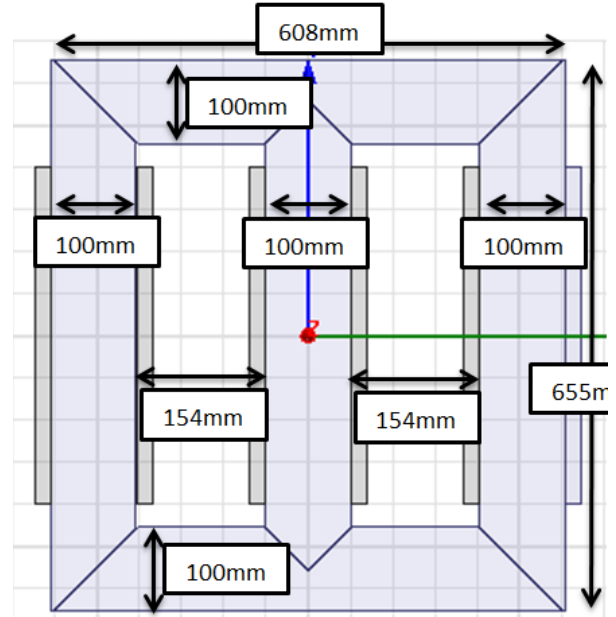


Şekil 6. Farklı T-bağlantı modelleri (different T-joint designs)

DeneySEL çalışmalarla sonuca ulaşan Valkovic, T-bağlantı açısı düştükçe kayıpların azaldığına ilişkin bir sonuca doğru yaklaşım ortaya çıkarırken, benzetim çalışmalarıyla konuyu irdeleyen diğer iki çalışmanın sonuçları, konunun net olarak analiz edilmesini mümkün kılmamaktadır. Transformator kayıplarının en fazla çekirdek kısmında, çekirdek kısmında en fazla kayıpların da T-bağlantı kısmında olduğu dikkate alındığında, kayıpların en az olduğu, T-bağlantı tasarımının belirlenmesi, çekirdek tasarımlarında en fazla kaybın olduğu bu kısım için uygun tasarımın ortaya çıkarılmasını sağlayacaktır.

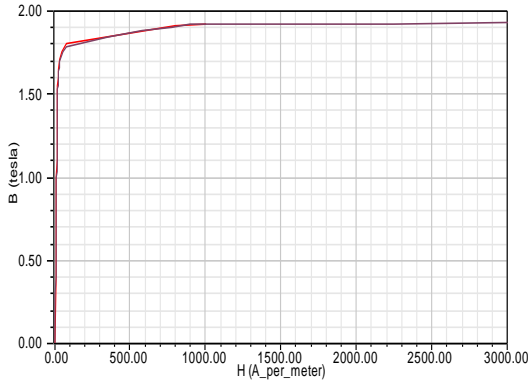
#### 4. FARKLI T-BAĞLANTI AÇILARI İLE YAPILAN BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS OF DIFFERENT T-JOINT)

Bu çalışmada, anma değerleri 33kV/0.4kV, 50 kVA olan 3 fazlı transformatorün manyetik analizleri için, çekirdek malzemesi olarak yoğun biçimde üretimde kullanılan 0.23 mm kalınlığındaki M5 manyetik sacı tercih edilmiştir. Benzetim sırasında, 50 kVA gücündeki transformator boyutları için Şekil-7’deki ölçüler kullanılmış ve çekirdek derinliği 100 mm ve parçalar arası hava aralığı ise 2 mm olarak alınmıştır.

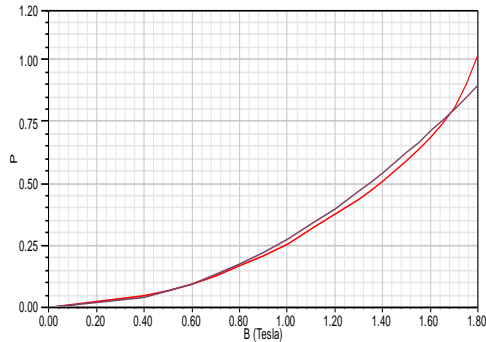


Şekil 7. Benzetimi yapılan 3 fazlı transformatorün boyutları (dimensions of 3-phase transformer analyzed at this study)

Analizler esnasında, 0.23 mm kalınlığındaki, M5 manyetik malzemesinin B-H (B-akı yoğunluğu, H-manyetik alan şiddeti) karakteristiği için Şekil-8’deki, B-P (B-akı yoğunluğu, P-malzemenin kg başına güç kaybı) karakteristiği için ise Şekil-9’daki eğriler kullanılmıştır [22]. Malzemenin kütle yoğunluğu ise  $7650 \text{ kg/m}^3$  olarak alınmıştır.



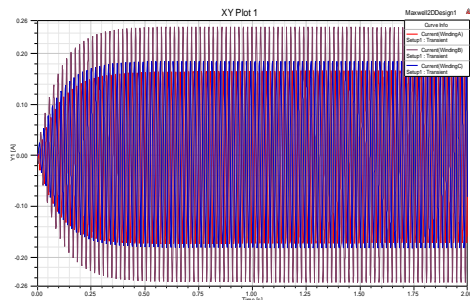
Şekil 8. M5-0.23 malzemesinin B-H eğrisi (B-H curve of the M5-0.23 material)



Şekil 9. M5-0.23 Malzemesinin B-P Eğrisi (B-P curve of the M5-0.23 material)

Analizler, Ansoft Maxwell paket programı kullanılarak yapılmıştır [23]. Ansoft Maxwell manyetik modelleme programı ile yapılan benzetimler sırasında, programın özelliklerinden kaynaklandığı anlaşılan çeşitli problemler ile karşılaşmıştır.

Anma değerinde sargılara gerilimler uygulanarak benzetim çalışması yapılması durumunda, başlangıç değerleri sıfır olan 3 fazlı akımların, sürekli durum değişimleri için ortaya çıkan eğrilerde, faz farklarının  $120^\circ$  dereceden farklı olduğu ve sinüzoidal forma sahip olmadıkları gözlenmiştir. Benzetim programının başlangıç koşullarına çok fazla bağlı olduğu dikkate alınarak, akımların sıfır başlangıç değerinden yavaş bir formda artışının sağlanması için 0.5 sn sonrasında geçici durumunun ortadan kalkacağı bir eksponansiyel bir büyüklükle besleme gerilimlerin çarpılması yolu tercih edilmiştir (Şekil-10).



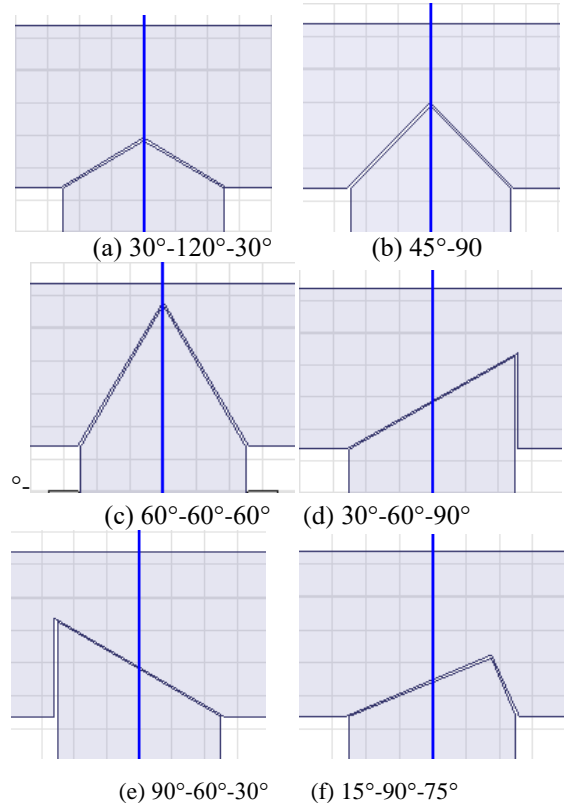
Şekil 10. Sargılara uygulanan eksponansiyel artımlı 3 faz gerilim değişimleri (Exponential incremental sinusoidal voltage applied to windings of 3-phase transformer)

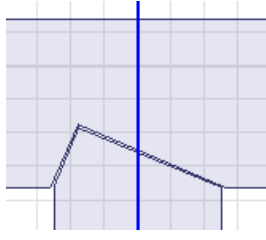
Yaşanan başka bir problem ise benzetimi yapılan elemanın sınır koşullarının sonlanacağı bölgenin belirlenmesidir. Program, benzetimi yapılan elemanın boyutlarını dikkate alarak % cinsinden analiz yapılacak alanı başlangıç için %100 olarak belirlemesine rağmen, bu büyüklükteki bir transformatör için bu bölgenin %50 olmasının yeterli olduğu belirlenmiştir.

Karşılaşılan diğer bir problem ise analiz esnasında hesap adımları arasında geçen süredir. Programda bu süre için 0.01 sn tanımlaması yapılmasına rağmen, akım eğrilerinin düzgün bir sinüzoidal formda elde edildiği sonuçlar için bu sürenin 0.0001 sn olması gerektiği belirlenmiştir. Bu değişiklikler sonucunda programın analizler için harcadığı toplam süre 12 saat değerine kadar ulaşmıştır.

#### 4.1. Benzetim İçin Oluşturulan T-bağlantı Formları (T-joints Designs For Simulation)

Çalışmada 7 farklı T-bağlantı formu kullanılmış ve analizler yapılarak programın akım ve güç değişimlerini üretmesi sağlanmıştır. Şekil-11'de analizi yapılan T-bağlantı formları görülmektedir. Simetrik açıyla boyun-duruk kısmına uzanan (a), (b) ve (c) formları yanında, Valkovic'in  $15^\circ-90^\circ-75^\circ$ 'lik tasarımı [13] dikkate alınarak taban açıları eşit olmayan modeller için de analizler yapılmıştır. Valkovic'in  $15^\circ-90^\circ-75^\circ$ 'lik tasarımında bir adım grubu bu açıyla dizilirken, bir üstteki adım grubu  $75^\circ-90^\circ-15^\circ$ 'lik düzende dizilerek simetri oluşturulmasına rağmen, böyle bir analiz için 3 boyutlu bir inceleme gerekeceği için ve benzetim süresinin 2 boyutlu inceleme için bile yeterince büyük olmasından dolayı Valkovic'in tasarımından farklı olarak, 2 farklı açı grubu ( $15^\circ-90^\circ-75^\circ$  veya  $75^\circ-90^\circ-15^\circ$  olarak) ayrı ayrı analiz edilmiştir.



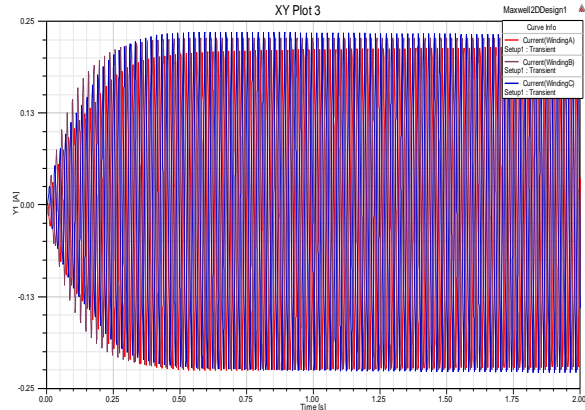


(g) 75°-90°-15°

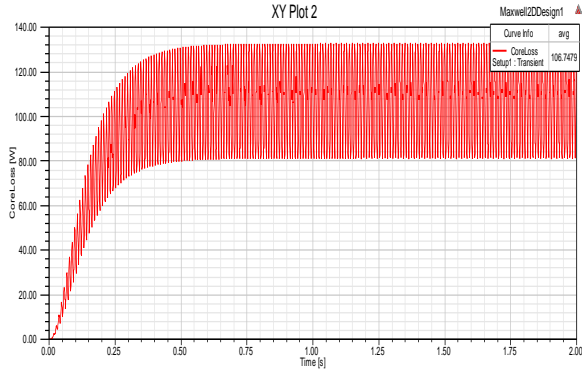
Şekil 11. Analizi yapılan farklı T-Bağlantı formları (different T-joint designs analysed at this study)

#### 4.2. Farklı T-Bağlantı Formları İçin Akı Yoğunluğu ve Kayıpların Değişimi (Flux Density and Loss Variations for Different T-joint Forms)

Ansoft Maxwell programı kullanılarak her model için yapılan analiz sonrasında sargılardan çekilen akım ve çekirdek kısmında tüketilen değişimler için grafikler oluşturulmuştur. Faz akımlarının sürekli durum değerlerine 0.5 sn'de ulaşmasından dolayı toplam benzetim süresi 2 sn alınmıştır. 45°-90°-45° T-bağlantılı model için sargı akımlarının değişimi Şekil-12'de, çekirdek kayıplarının değişimi ise Şekil-13'de, görülmektedir.

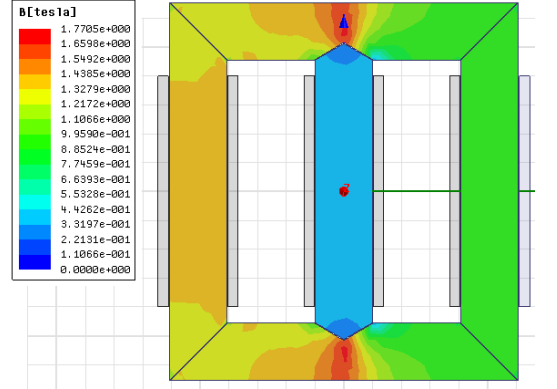


Şekil 12. 45°-90°-45° T-bağlantılı model için sargı akımlarının değişimi (changing of winding current for 45°-90°-45° T-joint design)

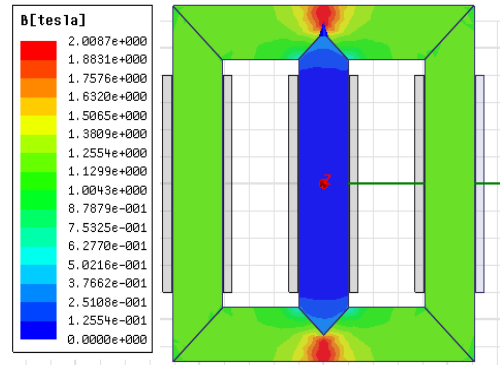


Şekil 13. 45°-90°-45° T-bağlantılı model için çekirdek kayıplarının değişimi (changing of core loss for 45°-90°-45° T-joint design)

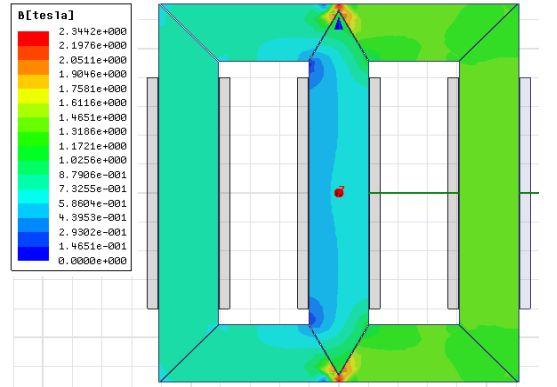
Benzetimler sonucu, farklı T-bağlantı formları için maksimum akı yoğunluğunun elde edildiği anlara ilişkin değişimler Şekil-14'de verilmektedir.



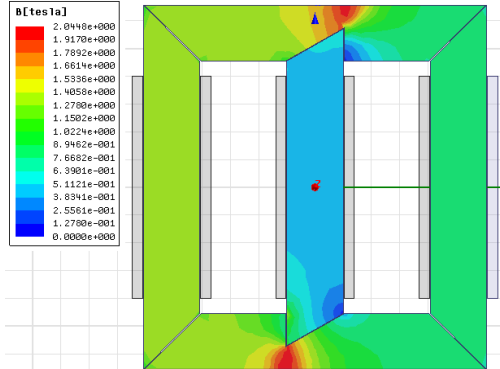
(a) 30°-120°-30°



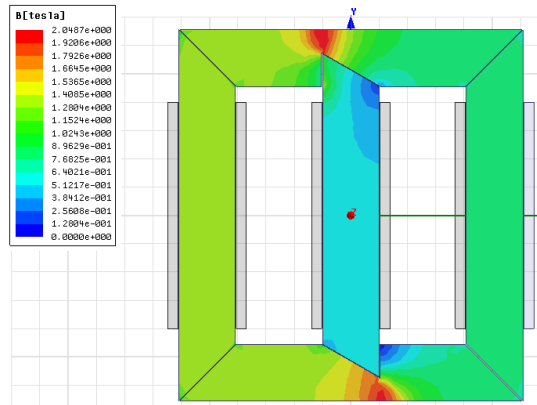
(b) 45°-90°-45°



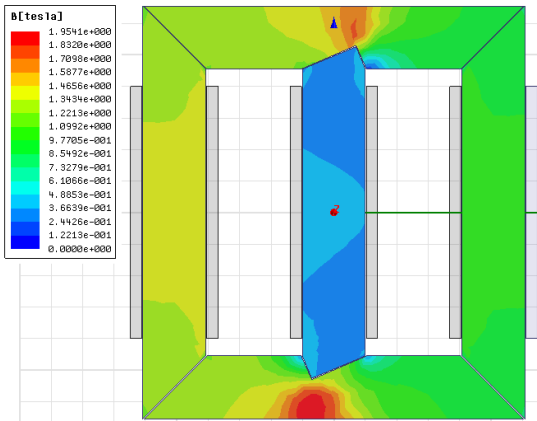
(c) 60°-60°-60°



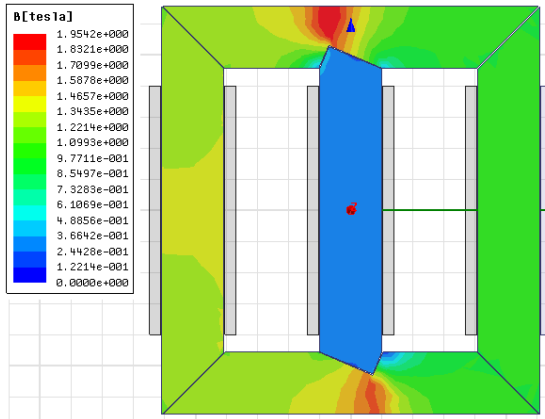
(d) 30°-60°-90°



(e) 90°-60°-30°



(f) 15°-90°-75°



(g) 75°-90°-15°

**Şekil 14.** Farklı T-Bağlantı formları için akı yoğunluğunun maksimum anlarına ilişkin değişimler (changing of flux density for the different T-joint forms)

Şekillerden görüleceği gibi T-bağlantı kısmı etrafında akı yoğunluğu maksimum değerlere ulaşmaktadır. Çekirdek kayıpları akı yoğunluğu ile orantılı olarak arttığından, bu kısımlardaki kayıp değerleri ve dolayısıyla ısınmalar diğerlerine göre daha büyük olacaktır.

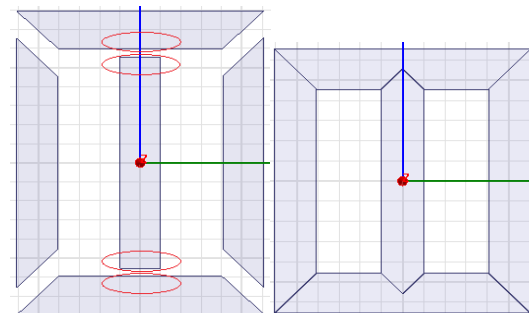
**Çizelge 1.** Farklı tasarımlar için maksimum akı yoğunluğu ve kayıp değerleri (maximum flux density and loss values for different designs)

T-bağlantı tasarım tipi	Ortalama çekirdek kaybı (W)	Maksimum akı yoğunluğu (T)
30°-120°-30°	104.2259	1.7705
75°-90°-15°	105.3891	1.9542
15°-90°-75°	105.4957	1.9541
45°-90°-45°	106.7479	2.0087
30°-60°-90°	107.7174	2.0448
90°-60°-30°	107.7305	2.0487
60°-60°-60°	108.9477	2.3442

Farklı T-bağlantı tasarımları için maksimum akı ve ortalama kayıp değerleri Çizelge-1'de verilmektedir. Kayıp değeri hesaplamaları için akımların sürekli durum değerine ulaştığı 0.5 sn ile 2 sn arasındaki ortalama değerler alınmıştır. Çizelgeden görüleceği gibi, orta bacağın, boyunduruk kısımlarına uzanma mesafesi arttıkça, çekirdek kayıplarında da artma oluşmaktadır. Yapılan çalışmada T-bağlantı kısmının en az uzama mesafesine sahip tasarımlardan birisi olan 30°-120°-30°'lik tasarımın, kayıplar açısından en iyi model olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca benzetim programının, simetrik yapıya sahip 75°-90°-15° ve 15°-90°-75° ile 30°-60°-90° ve 90°-60°-30° T-bağlantı tasarımlarının maksimum akı yoğunluğu ve ortalama çekirdek kaybı değerleri açısından birbirine yakın değerler ürettiği görülmektedir.

#### 4.3. Çekirdek Kesim İşleminde Atıl Malzemeler (Discarded Material for Process of Cutting Core)

Çekirdek imalatında kullanılan ve rulolar halinde üretim tesisine gelen saçlar, uygun genişliklerde dilimlendikten sonra köşe kısımların ve T-bağlantı kısımlarının oluşturulması için kesim makinasında kesilir [10]. Özel kesim makinaları köşe kısımlarını 45°'lik açıyla kesmektedir ve bu kısımlarda kesimlerden kaynaklanan atıl malzeme oluşmamaktadır. Orta bacak ve boyundurukların kesiminde ise Şekil-15'de görülen kısımlar için atıl malzeme ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 15.** Orta bacak ve boyunduruk kısımlarında kesim öncesi ve sonrası durum (situations for leg and yoke parts before cutting and after that)

Analizi yapılan 7 farklı tip T-bağlantı yapısına ilişkin ortaya çıkan atıl malzeme miktarı Çizelge-2’de verilmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere boyunduruk kısmına doğru en az uzamayı  $15^{\circ}$ - $90^{\circ}$ - $75^{\circ}$  açılara sahip tasarım yapmaktadır. Bu çalışmada incelenen ve boyunduruk kısmına en fazla uzamayı yapan  $60^{\circ}$ - $60^{\circ}$ - $60^{\circ}$ ’lik tasarım, ilk tasarıma göre atıl malzeme açısından %246 daha fazla saçın kesilerek hurdaya atılmasına yol açacaktır.

**Çizelge 2.**Farklı tasarımlar için atıl malzeme değişimleri (changing of discarded material for different designs)

T-Bağlantı açıları (derece)	Orta bacak uzunluğu (mm)	Toplam atıl malzeme miktarı (mm <sup>2</sup> )	İlk tasarıma göre artış (%)
15-90-75	505	5000	0
30-120-30	512,7	5773	13,4
45-90-45	555	10000	100
30-60-90	570,4	11547	131
60-60-60	628,2	17320	246

## 5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, 2’şer tanesi simetrik yapıya sahip olmak üzere 7 farklı tasarım dikkate alınarak, transformatör T-bağlantı modellerine göre çekirdek kayıpları ve atıl malzeme miktarındaki değişimler analiz edilmiştir. Çekirdek kesim makinesi üretici firmaların ortaya koyduğu çözüme bağlı olarak, T-bağlantı kısmı için  $45^{\circ}$ - $90^{\circ}$ - $45^{\circ}$  açılarla yürütülen kesim modeli dışında,  $15^{\circ}$ - $90^{\circ}$ - $75^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ - $120^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ - $60^{\circ}$ - $90^{\circ}$  ve  $60^{\circ}$ - $60^{\circ}$ - $60^{\circ}$  T-bağlantı tasarımları dikkate alındığında, kayıplar açısından en iyi tasarımın uygulamada kullanılan modelden farklı olarak  $30^{\circ}$ - $120^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ’lik açığa sahip tasarım olduğu görülmektedir. Atıl malzeme açısından ise  $15^{\circ}$ - $90^{\circ}$ - $75^{\circ}$ ’lik tasarıma sahip modelin, şu an üretimde kullanılan modele göre %50 oranında hurda malzeme azalmasına yol açacağı anlaşılmaktadır. Çalışmadan elde edilen bulgular neticesinde, kayıpların en az olduğu  $30^{\circ}$ - $120^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ’lik model ve atıl malzemenin en az olduğu  $15^{\circ}$ - $90^{\circ}$ - $75^{\circ}$ ’lik model dikkate alındığında, orta bacak boyunun boyunduruklara uzanan kısmının mümkün olduğunca kısaltılmasının hem kayıplar, hem de atıl malzeme açısından iyileştirmeye neden olacağı sonucu ortaya çıkmaktadır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Amoiralis E.I., Tsili M.A., and Kladas A.G., "Transformer design and optimization : A Literature Survey", *IEEE Trans. Power Del.*, 24(4): 1999-2024, (2009).

[2] Lopez-Fernandez X.M., Ertan H.B., Turowski J., "Transformers Analysis, Design, and Measurement", *CRC Press*, (2013).

[3] Georgilakis P.S., "Spotlight on modern transformer design", *Springer*, London (2009).

[4] Bharat Heavy Electrical Limitids, Transformers, *McGraw-Hill Education*, (2005).

[5] Winders J.J., "Power Transformers Principles and Applications", *CRC Press*, (2002).

[6] Sykuiski J.K. ve diğerleri, "Prospects for large high-temperature superconducting power transformers: conclusions from a design study", *IEEE Proceedings: Electric Power Applications*, 146(1): 41-52, (1999).

[7] Sykuiski J.K., Goddard K.F., Stoll R.L., "A Method of estimating the total AC loss in a high- temperature superconducting transformer winding", *IEEE Trans. On Magnetics*, 36 (4): 1183-1187, (2000).

[8] Kulkarni S.V., Khaparde S.A., "Transformer Engineering Design, Tecnology, and Diagnostics", *CRC Press*, (2013).

[9] Işık F., Uyaroğlu Y., "Amorphous core transformers efficiency analysis in Turkish electrical distribution systems", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, DOI: 10.3906/elk-1312-147

[10] GEORG Co., "GEORG (Convincing with outstanding solutions) Brochure", [http://www.georg.com/cms/files/pdf/trafoanlagen/trafoanlagen\\_Imagebroschuere-EN.pdf](http://www.georg.com/cms/files/pdf/trafoanlagen/trafoanlagen_Imagebroschuere-EN.pdf), (2015).

[11] Ramsis S.G., teNijenhuis E.G., "Experimental investigations on effect of core production attributes on transformer core loss performance", *IEEE Trans. On Power Delivery*, 13(2): 526-531, (1998).

[12] Valkovic, Z., Rezic A., "Improvement of transformer core magnetic properties using the step-lap design", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 112(1-3): 413-415, (1992).

[13] Valkovic, Z., "Influence of Transformer Core Design on Power Losses", *IEEE Trans. Magn.*, 18(2): 801-804, (1982).

[14] Valkovic Z., "Recent Problems of Transformer Core Design", *Physica Scripta*, 24: 71-74, (1988).

[15] Oliveras J.C., Perez R.E., "Reducing Losses in Distribution Transformers", *IEEE Trans. On Power Delivery*, 18(3): (2003) .

[16] Hajipour E., Vakilian M., Ghafouri M., " A Novel Fast FEA No-Load Loss Calculation Method for stacked core three phase distribution transformers", *Int. Trans. Elec. Comp. Eng. Sys.*, 2(1): 34-38, (2014).

[17] Soda N., Enokizono M., "Improvement of T-Joint Part Constructions in three phase transformer by using direct loss analysis with E&S model", *IEEE Trans. Magn.*, 36(4): 1285-1288, (2000).

[18] Haidar, M.A. and Al-Dabbagh, "The influences of T-Joint core design on the no load losses in transformers", *IEEE Potentials*, 40-46, (2013).

[19] Vecchio R.M.D., Poulin B., Feghali P.T., Shah D.M., Ahuja R., Transformer design principles with applications to core-form power transformer, *CRC Press*, (2010).

[20] Löffler F., Booth T., Pfützner H., Bengtsson C., Gramm K., " Relevance of step-lap joint for magnetic characteristics of transformer cores", *IEE Proc. Power Appl.*, 142(6): 371-378, (1995).



- [21] Ilo A., Pfützner H., Nakata T., “Critical induction - a key quantity for the optimisation of transformer core operation”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216: 637-640, (2000).
- [22] Beckley, P., “Electrical Steels for rotating machines”, *The Institution of Engineering and Technology, Stevenage*, (2002).
- [23] ANSYS Co. “Maxwell Electromagnetic Field Simulation Software Brochure”, <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-maxwell-brochure.pdf>, 02.09.2015.