



Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak farklı tip sargılar için güç transformatörün 2B analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Mehmet ÇEÇEN*

Mardin Artuklu Üniversitesi, Mardin Meslek Yüksekokulu, Mardin

mehmetcecen@artuklu.edu.tr ORCID: 0000-0003-2803-7756, Tel: (482) 213 40 02 (3413)

Bilal GÜMÜŞ

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

bilgumus@dicle.edu.tr

Geliş: 28.11.2017, Kabul Tarihi: 21.02.2018

Öz

Bu çalışmada, kademeli bir güç transformatörünün sonlu elemanlar yöntemiyle 2 boyutlu (2B) simülasyon modeli tasarlanmıştır. Üç farklı tip sargının transformatörün birincil ve ikincil sargı gerilimleri, kademe gerilimleri, demir kaybı ve bakır kaybı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, birincil ana sargısı 1392 sarım, birincil kademe sargısı iki adet 37 sarımdan oluşan ve ikincil sargısında 32 sarım bulunan 250 kVA'lık 11/0.416 kV kademeli bir güç transformatörü sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS MAXWELL paket programında 2 boyutlu (2B) simülasyon modeli tasarlanmıştır. Bu model kullanılarak, Üç farklı tip sargının analiz sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. ANSYS MAXWELL kütüphanesinde bulunan bakır, alüminyum ve gümüş olmak üzere üç farklı tipte sargı malzemesi kullanılmıştır. Güç transformatöründe kullanılan bu üç farklı tip sargının transformatör kayıpları, transformatörün birincil ve ikincil sargılarında indüklenen gerilim ve faz akımlarına olan etkisi incelenmiştir.

Alüminyum, bakır ve gümüş sargıları için 120 ms süresince yapılan analizlere göre her üç sargı tipinde de ikincil sargıda indüklenen gerilim 215.02 Volt(rms), birincil ana sargıda indüklenen gerilim 9495.50 Volt(rms), birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim 253.25 Volt(rms), birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim 250.77 Volt(rms), ikincil faz akımı 258.97 Amper(rms), birincil faz akımı 15.33 Amper(rms) ve demir kaybı 397.47 Watt olmak üzere aynı değerler elde edilmiştir. Analiz sonucunda alüminyum iletkeninin ortalama sargı kaybı 2.26 kW, bakır iletkeninin ortalama sargı kaybı 1,48 kW ve gümüş iletkeninin ortalama sargı kaybı 1.40 kW olarak hesaplanmıştır. Alüminyum sargı kaybı görünür gücün % 0.90' ı, bakır sargı kaybı görünür gücün % 0.59' u ve gümüş sargı kaybı görünür gücün % 0.56' sı kadardır. En az sargı kaybı gümüş iletkeninde saptanmıştır. Sargı tipinin sadece sargı kaybını etkilediğini transformatörün diğer parametrelerini etkilemediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kademeli güç transformatörü; transformatör sargı kayıpları; sonlu elemanlar yöntemi; Ansys Maxwell 2B

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI:

Giriş

Transformatör alternatif gerilim frekansında değişiklik yapmadan gerilim değerini değiştirebilen, elektromanyetik indüksiyon yolu ile çalışan, sabit elektrik makineleridir.

Transformatörün hareketli veya döner kısımları olmadığı için yapıları basittir. Transformatörler güç sistemleri çıkışlarında istenen farklı gerilim değerlerini ekonomik olarak sağlarlar. Bir enerji dönüştürme makinesi olmamasına rağmen enerji dönüşüm sistemlerinde vazgeçilmez bir eleman olan transformatörler yaygın olarak kullanılan makinelerdir. Elektrik enerjisini en az kayıplarla istenen uzaklıklara iletmek ve hat kapasitesini yükseltmek için üretilen gerilimin seviyesi transformatörler aracılığıyla yükseltilir (Bal, 2008).

Transformatörler hareketsiz makineler olduğundan diğer elektrik makinelerinde olduğu gibi sürtünme ve rüzgar kaybı gibi mekanik kayıpları yoktur. Bu yüzden verimleri diğer elektrik makinelerine göre çok yüksektir. Transformatörde temel olarak iki kayıp türü mevcuttur. Bunlardan biri olan demir kayıpları transformatörün boşta çalışmada meydana gelen kayıplarıdır. Diğer kayıp türü olan bakır kaybı ise transformatörün yükte çalışmasında sargılar üzerinde meydana gelen kaybı ifade eder ve kısa devre deneyi ile bulunabilir (Ateş ve Peşint, 1990).

Elektrik makinelerinin analizinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi uygulanması, güç transformatörünün kayıplarının analizinde büyük bir ilerleme getirmiştir. Son otuz yılda problemleri hesaplamak için, üç boyutlu ve iki boyutlu sonlu elemanlar analizi; manyetik alan ve manyetik vektör kavramları geliştirilmiştir. Daha doğru bir sonuç elde etmek için üç boyutlu manyeto statik çözücü, esas problemi çok sayıda alt problemlere parçalayarak sonlu elemanlar ağı (mesh) oluşturmaktadır. Ağın kalitesi ve sayısı sonlu elemanlar analizinin doğruluğunu etkilemektedir (Arkan, 2005).

Sonlu elemanlar yöntemli yazılımlar, tasarlanacak elektrik motoru, transformatör gibi elektrik makinelerinin davranışlarının modellenmesini sağlamaktadır. Böylece çok sayıda prototip model oluşturulmasına gerek kalmadan değişik geometrilere ve özelliklere sahip makinelerin hızlı bir şekilde analiz edilmesine olanak vermektedir. Bu yazılımlarda genellikle gerçek hayatta üretilebilen bütün elektrik makineleri modellenabilir ve analiz edilebilir. Ayrıca bu tür yazılımlar, kullanıcıya değişik manyetik laminasyon malzemeleri ve sargılardan modeller tasarlayabileceği sanal bir laboratuvar ortamı sunmakta, manyetik alan çizimleri ve grafiksel analiz olanağı vermektedir. Ayrıca indüktans, nüve ve sargı kayıpları, geçici durum akım-gerilim ilişkileri gibi sayısal değerleri de hesaplamaktadır (Gürdal, 2001, Balcı, 2010).

ANSYS MAXWELL fiziksel problemlerin çözümünde kullanılan genel amaçlı sonlu elemanlar paket programıdır. Mühendislikte lineer veya lineer olmayan statik / dinamik yapısal analizler, akışkanlar mekaniği, mukavemet, titreşim, ısı transferi, elektromanyetik alan gibi fiziksel problemlerin çözümünde kullanılır. Problemlerin çözümünde sonlu elemanlar yöntemiyle işlem yapar. Gerçek sistemin imalatından önce bilgisayar ortamında sistemin 3 boyutlu veya 2 boyutlu modeli oluşturularak analiz sonucunda sistemin davranışları hakkında veriler elde edilebilir.

Bu çalışmada, ANSYS MAXWELL paket programında kademeli güç transformatörünün 2B simülasyon modeli oluşturulmuştur. Transformatörde alüminyum, bakır ve gümüş gibi farklı tip sargılar kullanılarak bu modeller 120 ms süresince analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmış ve sargı tipinin sadece sargı kaybını etkilediği, transformatörün diğer parametreleri etkilemediği tespit edilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Transformatör Sargıları

Transformatör sargıları genellikle bakır iletken yapıdır. Fakat alüminyum ve gümüş

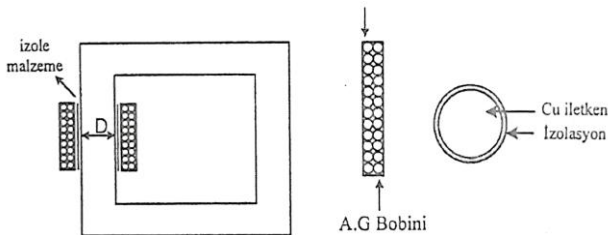
sargı tipli iletkenlerde mevcuttur. Sargılar transformatörün gücüne ve soğutma şekline göre yuvarlak veya dikdörtgen kesitli olabilir. Küçük akımlı transformatörlerde yuvarlak, büyük akımlı transformatörlerde ise dikdörtgen kesitli iletkenler kullanılır.

Tablo 1. Transformatörün sargı malzemeleri ve özellikleri

Malzeme	Yoğunluğu	Özgül direnci	Sıcaklık sabiti
Bakır	8.89	1.72	0.00393
Alüminyum	2.703	2.83	0.00410
Gümüş	1.59	10.49	0.00380

Transformatörün birincil ve ikincil devre sargılarının birbirine göre konumları önemlidir. Birincil ve ikincil sargıları üst üste sarıldığında, birincildeki manyetik akının etkisi ikincilde büyük olur. Buna karşılık sargılar ayrı ayaklara sarıldığında bu etki azalmaktadır. Çünkü kaçak akılar fazlalaşmaktadır. Transformatörde yalıtımayı kolaylaştırmak için alçak gerilim sargısı nüveye yakın sarılır. Yüksek gerilim sargısı bunun üzerine sarılır. Bunun bir başka faydası da daha çok arıza yapan yüksek gerilim sargısının üstte olması nedeniyle sökülmesinin kolay olmasıdır. Transformatör sargıları sarıldıktan sonra, sargı uçları ince ve çoklu iletkenlerle bağlantı yerlerine çıkartılır. Bu iletkenler sargı başlarına kaynak yapılır. Alçak ve yüksek gerilim uçlarının birbirinden yeteri derecede yalıtılmasına dikkat edilir. Çıkartılan bu uçlar dış kap üzerindeki izolatlara bağlanır (Peşint ve Ürkmez, 2000).

Alçak gerilim bobini demir bacağına etrafına izole malzeme ile beraber yerleştirilir (Şekil 1). Alçak gerilim bobininin sarım sayısının az olması ve yüksek akım taşınması sebebiyle bobin imalatı tek parça olarak imal edilir. Alçak gerilim sargısında alt bobinler kullanılmaz.



Şekil 1. Alçak gerilim sargısının konumu

Transformatörün indirici veya yükseltici oluşuna göre alçak gerilim bobini birincil veya ikincil sargıda kullanılır. Sarım başına düşen gerilim dikkate alındığında yüksek gerilim sargısının sarım sayısı alçak geriliminkine oranla daha yüksek olduğu açıktır. Sarım sayısı ve ölçüleri büyük olan yüksek gerilim sargısının imalatı zordur. Bu sargı dışarıdan enerjilendirildiği için transformatörün dışında meydana gelebilecek yüksek gerilimli deşarj olaylarından etkilenir. Bu nedenlerden dolayı yüksek gerilim sargısı farklı yapılara sahip alt bobinlerden oluşturulur. Mevcut sargıdan yeterince sarım sayısı çıkartmak veya hazırda bulunan sarımları devreye sokmak kademe bobinleri ile yapılır. Çıkış gerilim ayarı kademe bobinleri ile yapılır (Mergen ve Zorlu, 2005).

Transformatörün birincil ve ikincil sargıları farklı gerilimlerde olduğundan bu sargılar birbirinden yalıtıldığı gibi nüveye karşı da yalıtılması gerekir. Sargılar yalıtılmış iletkenlerden sarılmış olsa da sarım katları arasına ayrıca yalıtkanlar konarak katlar birbirinden yalıtılırlar. Yalıtkan malzeme olarak presbant, mika, kağıt, bazı plastik maddeler, çeşitli yağlar, reçine, pamuk, ağaç takozlar ve pertinaks gibi maddeler kullanılmaktadır. Yalıtma işi yapılırken soğutma durumu da göz önüne alınmalıdır. Transformatörde kullanılan yalıtkanların cinsi veya kalınlığı transformatör gerilimlerine bağlı olarak seçilir (Peşint ve Ürkmez, 2000).

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, gerilme analizi, ısı transferi, elektromanyetik dağılım ve akışkanların akışını kapsayan çoğu mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal bir yöntemdir. Mühendislik problemleri genel olarak fiziksel durumların matematiksel modeli ile ele alınarak çözülürler. Bu matematiksel modeller bir takım ilgili sınır ve başlangıç şartlarını içeren genellikle diferansiyel denklemlerdir. Bu diferansiyel denklemler, tabiatın temel kanun ve prensiplerinin bir sistem veya kontrol hacmine uygulanması ile elde edilmektedir. Bu temel denklemler kütle, kuvvet ve enerji dengesini temsil etmektedir. Bu

denklemlerin tam çözümünün elde edilmesi mümkünse bu çözüm verilen bir takım şartlar altında bir sistemin ayrıntılı davranışını tanımlamaktadır (Ayhan, 2015).

Tam çözümlerin elde edilemediği birçok mühendislik problemi bulunmaktadır. Çözümün tam elde edilememesi, temel denklemin karmaşık yapısından veya sınır ve başlangıç şartlarındaki zorluklardan kaynaklanabilmektedir. Bu tür problemlere çözüm üretmek için sayısal yaklaşımlara yönelinir. Bir sistem içerisindeki herhangi bir noktanın gerçek davranışını temsil eden analitik çözümlere karşılık, sayısal çözümler sadece düğüm noktaları (node) adı verilen belirli noktalarda tam çözümleri yaklaşık olarak temsil etmektedir. Herhangi bir sayısal yöntemin ilk adımı bölüntülemedir (ağ veya mesh yapma). Analiz edilecek olan ortam bu işlem ile belirli bir sayıdaki küçük alt bölgelere (elemanlar) ve düğüm noktalarına bölünmektedir. Yaygın olarak kullanılan sayısal yöntemler sonlu farklar yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemidir.

Transformatörün çalışma noktasının belirlenmesi için tasarımın doğru olduğunu kontrol etmek için sayısal yöntemler kullanılır.

Sonlu farklar yönteminde, her bir düğüm noktası için değerlendirilen diferansiyel denklemlerdeki türev terimleri fark denklemleri ile temsil edilmektedir. Böylece eş zamanlı olarak çözülmesi gereken bir doğrusal denklem takımı elde edilmektedir. Sonlu farklar yöntemi basit problemlere uygulanması kolay olmasına rağmen, karmaşık geometriye veya sınır şartlarına sahip problemlere uygulanması zordur.

Diğer taraftan, cebirsel denklemleri oluşturmak için sonlu elemanlar yönteminde fark denklemleri yerine, integral formülasyonları kullanılmaktadır. Ayrıca her bir eleman için yaklaşık çözümü sürekli bir fonksiyonun temsil ettiği kabul edilmektedir. Daha sonra, elemanlar arasındaki sınırlarda süreklilik sağlanarak elemanlardaki bireysel çözümler birleştirilerek genel çözüm elde edilmektedir (Ayhan, 2015).

Sonlu elemanlar yönteminde sistem davranışı daha önce belirlenmiş birçok elemana bölünür. Elemanlar nod adı verilen noktalarla tekrar birleştirilerek ve cebri bir denklem takımı elde edilir. Bu denklemler gerilme analizinde nodlardaki denge gerilimleridir. Probleme bağlı olarak yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımlarının çözümü ancak bilgisayarla mümkün olmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun uygulama alanları çok geniştir. Elektronik çipler, elektrikli cihazlar, valfler, borular, basınçlı kaplar, otomotiv motorları ve uçak gibi endüstriyel parçaların gerilme ve termal analizleri; barajların, generatörlerin, şehirlerin ve yüksek binaların sismik analizi; arabaların, trenlerin ve uçakların termal analizleri; soğutucu havuzların, kirletici maddelerin ve havalandırma sistemlerindeki havanın akış analizi; antenlerin, transistörlerin ve uçak haberleşme işaretlerinin elektromanyetik analizi; plastik cerrahi, çene rekonstrüksiyonu, skolyoz düzeltimi ve daha birçoğu gibi cerrahi girişimlere dair analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır (Deliktaş vd., 2007).

Sonlu elemanlar yönteminde temel adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Çözümü yapılacak bölgenin oluşturulması ve sonlu elemanlar ile bölüntülenmesi; problemin düğüm noktaları ve elemanlar olarak alt bölümlere ayrılması.
2. Bir elemanın fiziksel davranışını temsil edecek olan şekil fonksiyonunun seçilmesi; bir elemanın yaklaşık davranışını (çözümü) temsil edecek olan sürekli bir fonksiyonun ön kabul yapılması.
3. Bir eleman için denklemlerin geliştirilmesi.
4. Tüm problemi temsil etmek için elemanların birleştirilmesi. Global rijitlik matrisinin oluşturulması.
5. Sınır şartları, başlangıç şartları ve yüklerin uygulanması.
6. Düğüm noktalarındaki yer değişimleri veya bir ısı transferi probleminde sıcaklık cinsinden

çözüm değerlerini elde etmek için lineer veya lineer olmayan bir denklem takımının eş zamanlı olarak çözülmesi.

7. Çözümünden sonra diğer önemli bilgilerin elde edilmesi (Ayhan, 2015).

Sonlu Elemanlar Metodu Teorisi

Laplace Poisson denklem tipleri kısmı türevli diferansiyel denklemlerin çözümlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Sonlu elemanlar yöntemi laplace denklemini enerji denklemini minimum yapan potansiyel çözümü bulmak yoluna gidilir. Çözüm bölgesinde eleman sayısını gelişmiş algoritmalar kullanarak artırılabilir (Kürüm ve Cebeci, 1995).

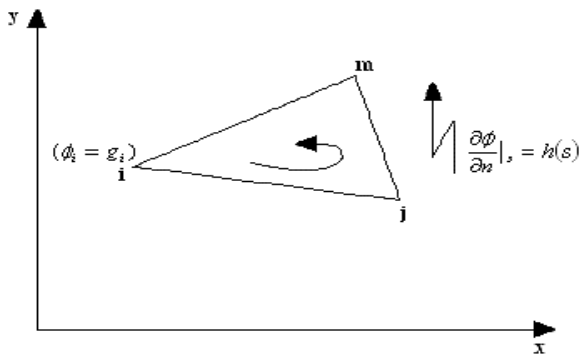
$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (2)$$

Deneme fonksiyonu aramada en yaygın olarak Rayleigh-ritz yöntemi kullanılır.

Rayleigh-Ritz Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminin temeli sınır koşullarının karmaşıklığı nedeniyle potansiyel fonksiyonu bulmanın mümkün olmadığı durumlarda, küçük elemanlar içinde çözümün aranmasına dayanır. Elemanların geometrik yapısı aynı kalmak şartıyla bütün çözüm bölgesi aynı geometrik elemanlara bölünür. Örneğin üçgen elemanlar kullanılabilir.



Şekil 2. Üçgen eleman

Çözüm için başlangıç bir deneme fonksiyonu seçilir. Seçilen bu fonksiyon alan değişimini temsil eder (Silvester vd., 1973).

Tek bir üçgen eleman için (Şekil 2) deneme fonksiyonu birinci dereceden bir polinom ile ifade edilir.

$$\phi(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (3)$$

Bu deneme fonksiyonunda ϕ , x ve y ' ye göre doğrusal olarak değişmektedir.

Şayet üçgenin köşelerindeki potansiyeller ϕ_i , ϕ_j , ϕ_m ise, deneme fonksiyonu köşe noktalarında bu değerleri sağlamalıdır. Bu sebeple aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\begin{aligned} \phi_i &= a_0 + a_1x_i + a_2y_i \\ \phi_j &= a_0 + a_1x_j + a_2y_j \\ \phi_m &= a_0 + a_1x_m + a_2y_m \end{aligned} \quad (4)$$

Ele alınan deneme fonksiyonunu üçgenlerin köşe (ϕ_i , ϕ_j , ϕ_m) değerleri ile denklem (4)' te verildiği biçimde ifade etmek için N_i , N_j , N_m şekil veya enterpolasyon fonksiyonları kullanılır (Chari, 1973).

$$\phi(x, y) = N_i(x, y)\phi_i + N_j(x, y)\phi_j + N_m(x, y)\phi_m \quad (5)$$

Her bir üçgen eleman içinde, potansiyel fonksiyonun Laplace diferansiyel denklemini sağladığı varsayıldığında, homojen sınır koşullarında Laplace denkleminin karşılık gelen fonksiyon

$$F = \iint \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Potansiyel fonksiyonları yerine denklem 4' te elde edilen deneme fonksiyonu kullanılırsa ve kısaltmalarıyla

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_i} = 2 (S_{ii} \phi_i + S_{ij} \phi_j + S_{im} \phi_m)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_j} = 2 (S_{ji} \phi_i + S_{jj} \phi_j + S_{jm} \phi_m)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_m} = 2 (S_{mi} \phi_i + S_{mj} \phi_j + S_{mm} \phi_m)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi} + \frac{\partial F}{\partial \phi_i} + \frac{\partial F}{\partial \phi_j} + \frac{\partial F}{\partial \phi_m} = 0$$

$$2 \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} & S_{im} \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

elde edilir. Şekilde verildiği haliyle $\phi_i = g_i$ sınır koşulu matrisin ilk satırına yerleştirilirse

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

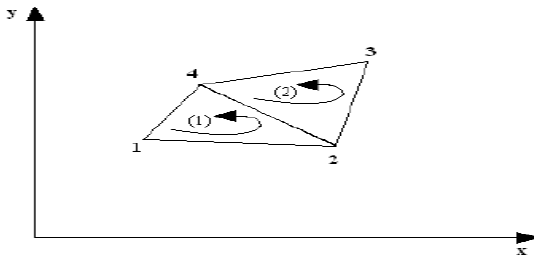
ve bu matris düzenlenirse

$$\begin{bmatrix} S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_i S_{ji} \\ -g_i S_{mi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

elde edilir (Demirchian vd, 1976).

Elemanların Birleştirilmesi

Elemanlar arasındaki sınırlarda potansiyel işlevin bütün bölge içinde çözümü sürekli olması gerekir. Üçgen elemanın kenarlarında ve içinde potansiyel doğrusal olarak değişir (Şekil 3).



Şekil 3. İki üçgenin birleşimi

Bazı düğümlerde problemin tabiatı gereği akım olabilir. Bu durumda denklem sistemi şu şekilde düzenlenir.

$$\begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} + S_{11}^{(2)} & S_{12}^{(2)} & S_{13}^{(1)} + S_{13}^{(2)} & S_{14}^{(2)} \\ S_{21}^{(1)} & S_{22}^{(1)} & S_{23}^{(1)} & 0 \\ S_{31}^{(1)} + S_{31}^{(2)} & S_{32}^{(1)} & S_{33}^{(1)} + S_{33}^{(2)} & S_{34}^{(2)} \\ S_{41}^{(2)} & 0 & S_{43}^{(2)} & S_{44}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ J_2/3 \\ 0 \\ J_4/3 \end{bmatrix} \Delta \quad (10)$$

Denklemin sağ tarafına düğümlerdeki akım yoğunluğu yazılır. Denklem sistemi

çözülürken, her düğüm için potansiyel değerler hesaplanmış olur.

Sınır Koşulları

Sınır koşulları üç gruba ayrılır.

Dirichlet Sınır Koşulu

Bütün sınır boyunca veya belirli bir kısmında potansiyel fonksiyonu ϕ_s belirli bir değerdedir. Şayet sınır koşulu sıfır ise buna homojen Dirichlet sınır koşulu denir.

Neuman Sınır Koşulu

Akı yoğunluğunun sınıra dik gelmesi durumunda meydana gelen sınır koşuludur.

Karışık Sınır Koşulu

Sınırdaki bulunan iletken malzeme sınıra normal doğrultuda gelen akıyı etkiler. Bu sınır koşulu daha önce yazılan sınır koşullarını da içerir.

Poisson Denklemlerinin Elde Edilmesi

Maxwell denklemleri manyetik alan problemlerinde kullanılır.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (11)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (12)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (13)$$

$$v = \frac{1}{\mu} \quad (14)$$

B: Manyetik indüksiyon (T),
H: Manyetik alan şiddeti (At/m),
 μ : Manyetik permabilite,
v: Manyetik rezistivite

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (15)$$

A vektör potansiyeli olup, birimi wb/m' dir. Denklem (11)' de H yerine denklem (12) eşitliği konulduğunda denklem (13) elde edilir. Bu denklemde B yerine eşitlik (15) konulduğunda denklem (17) elde edilir. Bu eşitlik denklem (18) düzenlendiğinde Poisson ifadesi elde edilir (Slade, 2006, Dlala ve Arkkiio, 2010).

$$\nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{J} \quad (16)$$

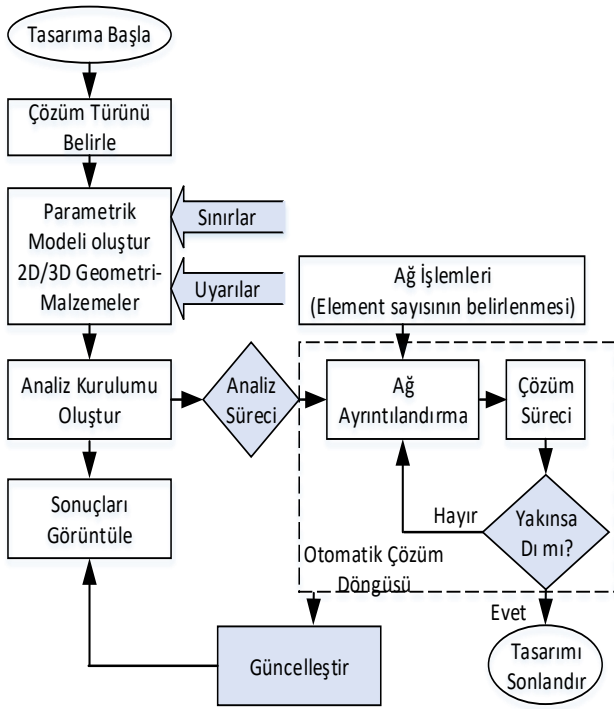
$$\nabla \times \frac{\nabla \times \vec{A}}{\mu} = \vec{J} \quad (17)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = \vec{J} \quad (18)$$

Sonlu elemanlar yönteminde iki boyutlu analiz yapılırken J akım yoğunluğu z ekseninde olduğundan manyetik potansiyel vektör A(x, y) = Az(x, y) olur.

Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Güç Transformatorünün Analiz Edilmesi

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak analizin akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



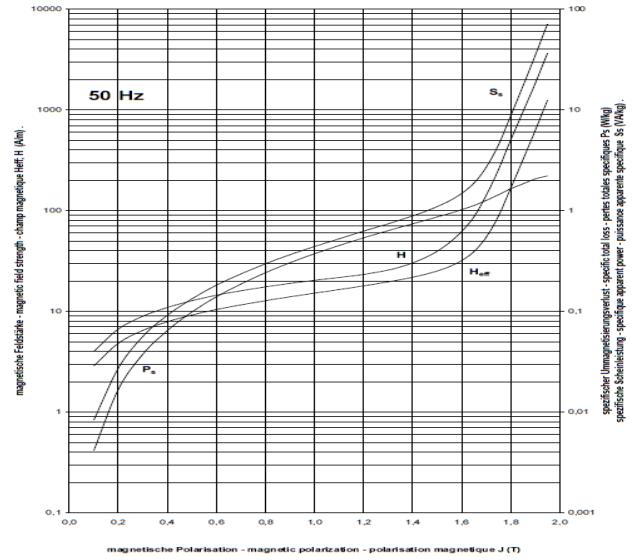
Şekil 4. Analiz akış diyagramı

Analiz edilen güç transformatorünün etiket bilgileri Tablo 2' de verilmiştir.

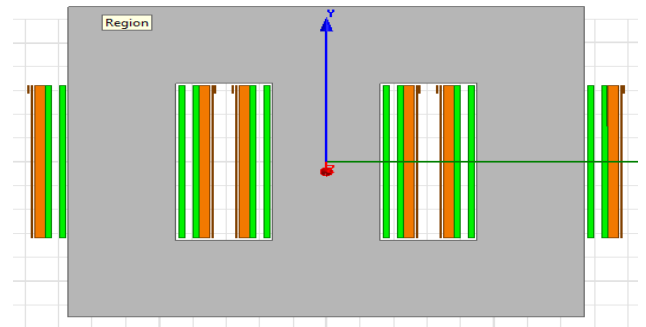
Tablo 2. Transformatorün etiket bilgileri

Parametre	Değerler
Güç (kVA)	250
Frekans (Hz)	50
Bağlantı Türü	Dyn
Birincil Gerilimi (V)	11000
İkincil Gerilimi (V)	416/240
Birincil Faz Akımı (A)	7.57
İkincil Faz Akımı (A)	346.96
Birincil Sarım Sayısı (N ₁)	1392
Birincil Kademe Sarım Sayısı	37 (iki adet)
İkincil Sarım Sayısı (N ₂)	32

Transformatorün nüve malzemesine ait manyetik alan (H), manyetik akı yoğunluğu (J), toplam kayıp güç (P_s) ve görünür güç (S_s) arasındaki ilişki Şekil 5' te gösterilmiştir. Benzetimi yapılan transformatorün 2 boyutlu görünümü Şekil 6' da gösterilmiştir.

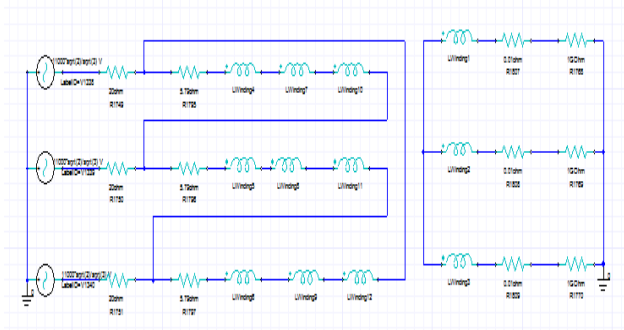


Şekil 5. Nüve malzemesinin manyetik davranışı



Şekil 6. Transformatorün 2 boyutlu görünümü

Analiz edilen kademeli güç transformatörünün birincil tarafı üçgen bağlı olup 2 adet 37 sarımlı kademe sargısına sahiptir. İkincil tarafı yıldız bağlı olup tam yükte 0.828 ohm' luk omik yük bağlanmıştır (Şekil 7).

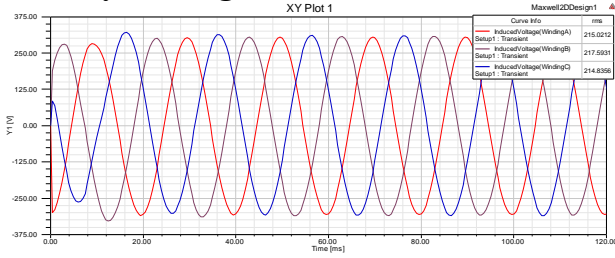


Şekil 7. Elektrik devresi

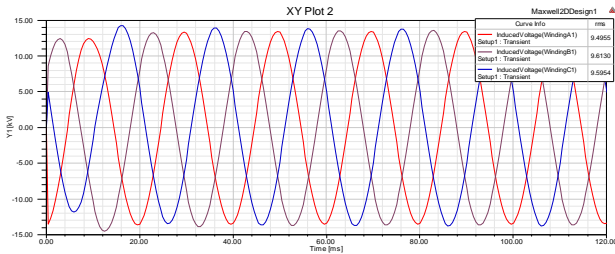
Araştırma Bulguları

Tasarlanan 2 boyutlu transformatör modeli, alüminyum, bakır ve gümüş olmak üzere üç sargı tipi için ayrı ayrı 120 ms analiz edilmiştir. Üç farklı sargı tipi için birincil ve ikincil sargılarında indüklenen gerilim, kademe gerilimi, faz akımları, demir kaybı ve sargı kaybı analiz sonucunda grafiksel olarak elde edilmiştir (Şekil 8-31).

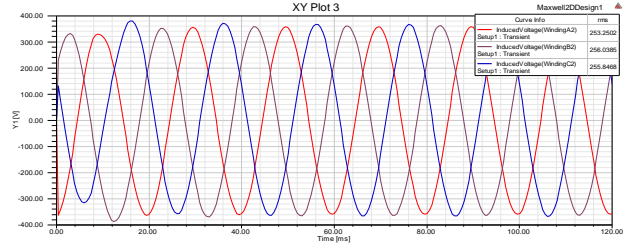
Alüminyum Sargı İçin Analiz Sonuçları



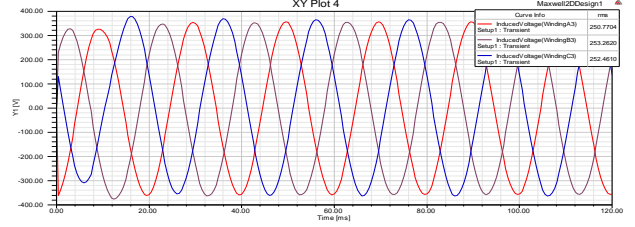
Şekil 8. İkincil sargıda indüklenen gerilim



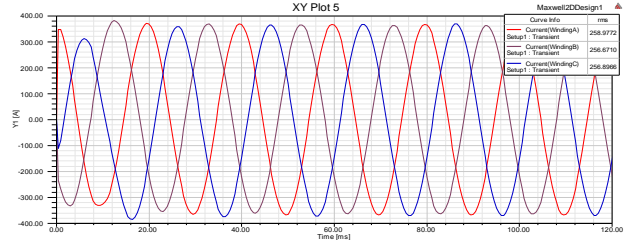
Şekil 9. Birincil ana sargıda indüklenen gerilim



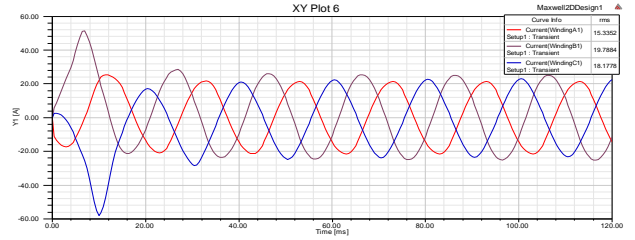
Şekil 10. Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim



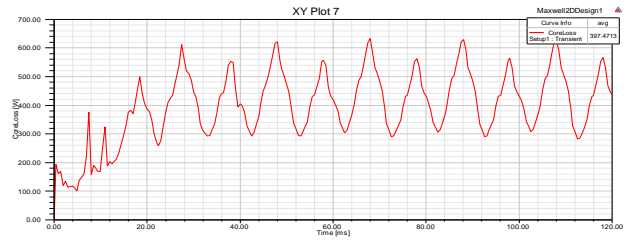
Şekil 11. Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim



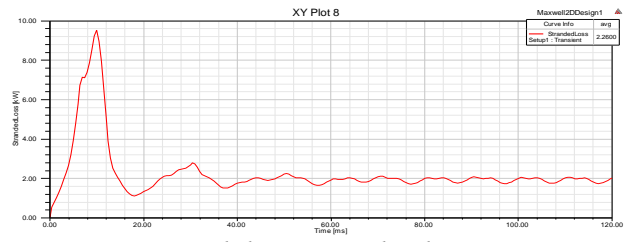
Şekil 12. İkincil faz akımı



Şekil 13. Birincil faz akımı

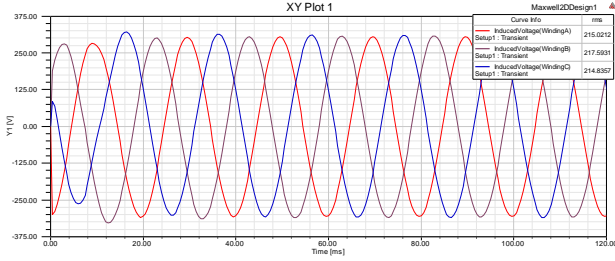


Şekil 14. Demir kaybı

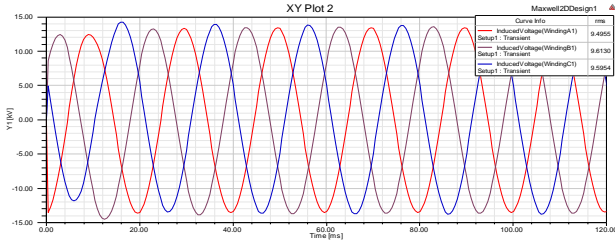


Şekil 15. Sargı kaybı

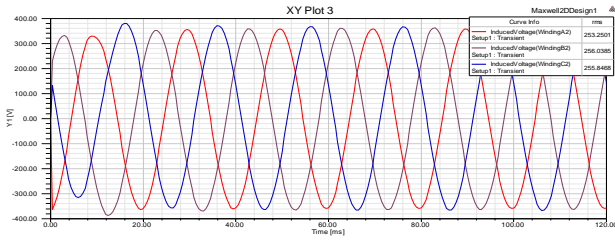
Bakır Sargı İçin Analiz Sonuçları



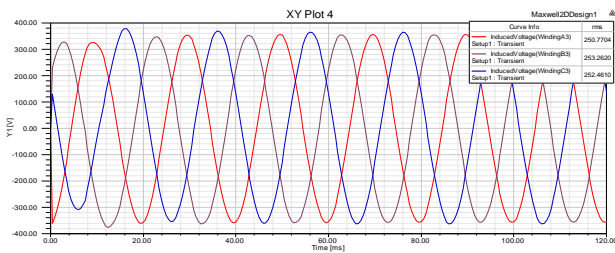
Şekil 16. İkincil sargıda İndüklenen gerilim



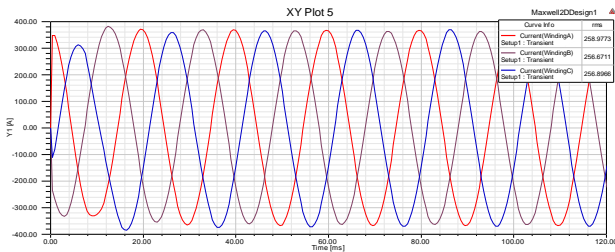
Şekil 17. Birincil ana sargıda indüklenen gerilim



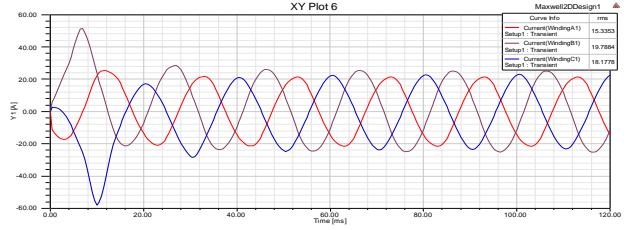
Şekil 18. Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim



Şekil 19. Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim



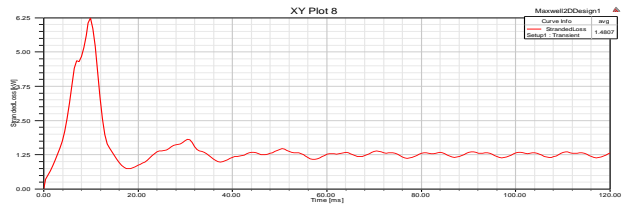
Şekil 20. İkincil faz akımı



Şekil 21. Birincil faz akımı

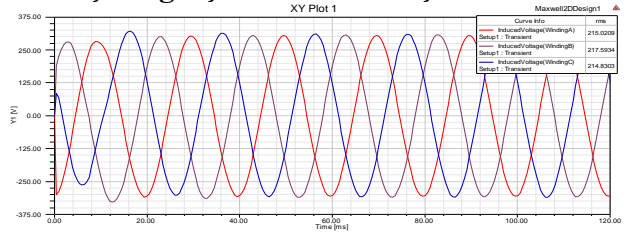


Şekil 22. Demir kaybı



Şekil 23. Sargı kaybı

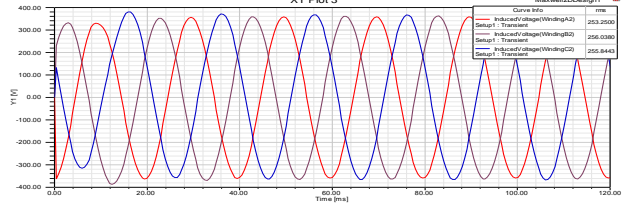
Gümüş Sargı İçin Analiz Sonuçları



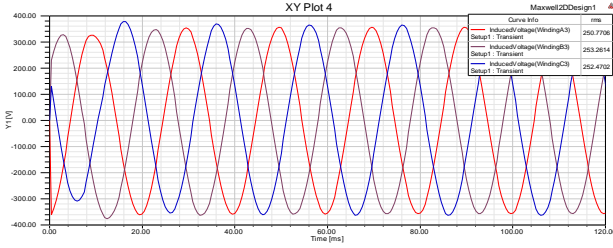
Şekil 24. İkincil sargıda indüklenen gerilim



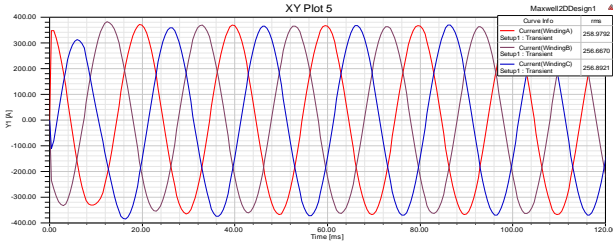
Şekil 25. Birincil ana sargıda indüklenen gerilim



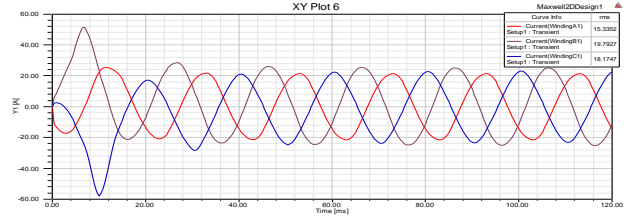
Şekil 26. Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim



Şekil 27. Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim



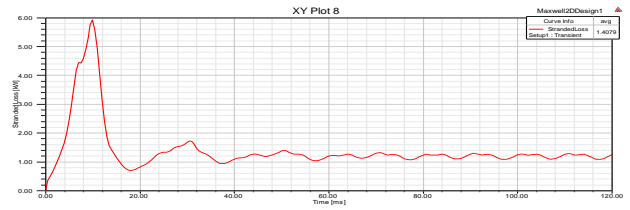
Şekil 28. İkincil faz akımı



Şekil 29. Birincil faz akımı



Şekil 30. Demir kaybı



Şekil 31. Sargı kaybı

Tablo 3. Üç farklı sargıda indüklenen gerilim (rms) değerleri

	İkincil Gerilimi (V)	Birincil Gerilimi (V)	Birinci kademe gerilimi (V)	İkinci kademe gerilimi (V)
Alüminyum	215.02	9495.50	253.25	250.77
Bakır	215.02	9495.50	253.25	250.77
Gümüş	215.02	9495.50	253.25	250.77

Tablo 4. Üç farklı sargının faz akımları (rms) ve 120 ms'deki ortalama kayıpları

	İkincil Faz Akımı (A)	Birincil Faz Akımı (A)	Demir Kaybı (W)	Sargı Kaybı (kW)	Trafo görünür gücüne oranı (%)
Alüminyum	258.97	15.33	397.47	2.26	0.90
Bakır	258.97	15.33	397.47	1.48	0.59
Gümüş	258.97	15.33	397.47	1.40	0.56

Sonuçlar ve Tartışma

Üç farklı sargı tipi için kademeli güç transformatörünün 120 ms süresince yapılan analizlerden elde edilen grafiklerin detaylı sonuçları Tablo 3 ve Tablo 4' te gösterilmiştir. Şekil 8, şekil 16 ve şekil 24' te her üç sargı tipinde de ikincil sargıda indüklenen gerilimler 215.02 Volt (rms), şekil 9, şekil 17 ve şekil 25'

te üç sargı tipi için birincil ana sargıda indüklenen gerilimler aynı olup değeri 9495.50 Volt (rms), şekil 10, şekil 11, şekil 18, şekil 19, şekil 26 ve şekil 27' de her üç sargıda birinci ve ikinci kademe gerilimleri aynı olup değerler sırasıyla 253.25 Volt (rms) ve 250.77 Volt (rms)' tir. Şekil 12, şekil 13, şekil 20, şekil 21, şekil 28 ve şekil 29' da ikincil ve birincil sargıların faz akımları her üç sargı için aynı olup değerler

sırasıyla 258.97 A ve 15.33 A' dir. Şekil 14, şekil 22 ve şekil 30' da her üç sargı tipinde demir kaybı aynı olup değeri 397.47 Watt' ır. Analiz sonuçlarına göre birincil ve ikincil sargılarında indüklenen gerilim, birinci ve ikinci kademe sargılarında indüklenen gerilim, ikincil faz akımı, birincil faz akımı ve demir kaybının her üç sargı tipinde de aynı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 15' te alüminyum sargı için ortalama sargı kaybı 2.26 kW, şekil 23' te bakır sargı için ortalama sargı kaybı 1.48 kW ve şekil 31' de gümüş sargı için ortalama sargı kaybı 1.40 kW hesaplanmıştır. Grafik sonuçlarına göre sargı tipinin sadece sargı kayıplarını etkilediği sonucuna varılmıştır. Alüminyum sargı kaybı görünür gücün % 0.90' ı, bakır sargı kaybı görünür gücün % 0.59' u ve gümüş sargı kaybı görünür gücün % 0.56' sı kadardır. En az sargı kaybının gümüş iletkeninde olduğu tespit edilmiştir.

Gümüş iletkeninin maliyeti yüksek olmasından dolayı günümüzde transformatör imalatında yaygın olarak bakır iletken kullanılmaktadır. Enerji üretim, iletim ve dağıtımın her safhasında kullanmak zorunda olduğumuz transformatörün kayıplarında yapılan küçük bir iyileştirme maliyet açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Artan enerji ihtiyacından dolayı devreye alınan transformatör sayılarında büyük artış olmaktadır. Buda iletim ve dağıtım sistemindeki sargı kayıp miktarının yükselmesine yol açmaktadır. Sargı kayıplarını azaltmak için gelecekte bakır yerine başka tip iletkenlerin kullanılabilceği düşünülmektedir.

Benzetimi yapılan transformatörün etiket bilgileri ile analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, aralarında farklar olduğu görülmektedir. Bu farklılığın nedenleri arasında, imal edilen transformatörlerde malzemelerin ideal özelliklerinden farklı olabilmesi, imalat hataları, analiz süresi ve en önemlisi transformatörün 2 boyutlu analiz edilmesinden kaynaklanan hatalar sayılabilir. 2 boyutlu simülasyon modelinde analiz sonuçları programda girilen derinlik değerine bağlı olarak değişir. Gerçeğe yakın sonuçları elde etmek için

3 boyutlu transformatör modelinin analizi yapılması faydalı olunabilir.

Kaynaklar

- Arkan, S., (2005). Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, *Yüksek lisans tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ateş, M.H., Peşint, M.A., (1990). *Elektrik Makinalarının Esasları*. Ankara: Gazi Üniversitesi Basın-Yayın Yüksekokulu Matbaası.
- Ayhan, O., (2015). *Sonlu elemanlar analizi teorisi ve ANSYS ile uygulamalar*. Ankara: Palme Yayıncılık.
- Bal G., (2008). *Transformatörler*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Balci, S., (2010). Evirici çıkış transformatörlerinin modellenmesi ve analizi, *Yüksek lisans tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Chari, M.V.K., (1973). Finite element solution of the eddy current problem in magnetic structures, IEEE PES Summer Meeting and EHV/UHV Conference, Vancouver, B.C. Canada.
- Deliktaş, B., Güler, M.A. ve Mülkoğlu, O., (2007). *Sonlu elemanlar yöntemine giriş*. HTC Ofset Matbaa:Ankara.
- Demirchian, K.S., Chechurin, V., Sarma, I., Boldea, A., (2002). The induction machine handbook, CRC Pres LLC, Washigton D.C., 133 159.
- Dlala, E., Arkkio, A., (2010). General formulation for the Newton Raphson method and the fixed – point method in finite element programs, Electrical machines (ICEM), 2010 XIX International conference on, page(s): 1-5.
- Gürdal, O., (2001). *Elektrik makinalarının tasarımı*. İstanbul: Atlas yayıncılık dağıtım ltd. şti.
- Kürüm, H., Cebeci M., (1995). Sonlu elemanlar yönteminde en az bellek ve çalışma zamanı için yeni bir yöntem, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Elazığ.
- Mergen, F. ve Zorlu, S., (2005). *Elektrik Makineleri I: Transformatörler*. İstanbul:Birsen Yayınevi.
- Peşint, M.Adnan., Ürkmez, A., (2000). *Elektrik Makinaları II* (Onbeşinci baskı). İstanbul:İlıcak matbaası.
- Silvester, P., Cabayan, H.S. ve Browne B.T., (1973). Efficient Techniques For Finite Element Analysis of electric machines, IEEE PES Winter Meeting , New York.
- Slade, G.W., (2006). Fast finite element solver for a reluctance mass accelerator, Magnetic, IEEE Transaction on, V:42, Issue:9, Page(s) :2184-2192.

Comparison of 2D analysis results of power transformer for different types of windings using the finite element method

Extended abstract

In this study, 2D (2B) simulation model of a stepped power transformer was designed by using finite element method and the effects of primary and secondary winding voltages, step voltages, iron loss and copper loss on transformer of different types of coils were investigated. In the study, two-dimensional (2B) simulation model was designed in the ANSYS MAXWELL package program using a finite element method of a 250 kVA 11/0.416 kV stepped power transformer with primary winding 1392 having a primary winding, two winding 37, and secondary winding 32 winding. Using this model, it is aimed to compare the analysis results for different types of coils. Three types of wrapping material, copper, aluminum and silver, available in the ANSYS MAXWELL library, are used. The effects of these three types of transformer windings used in the power transformer on the transformer losses, the induced voltage in the primary and secondary windings of the transformer, and the phase currents of the transformer have been investigated.

According to the analysis results of aluminum, copper and silver coils for 120 ms; Secondary winding Induced voltage 215.02 Volts (rms), Induced voltage in primary primary winding 9495.50 Volts (rms), Induced voltage in primary winding in primary winding 253.25 Volts (rms), Induced voltage in secondary winding in primary winding 250.77 Volts (rms), secondary phase current 258.97 Amps (rms), the primary phase current is 15.33 Amps (rms) and the iron loss is 397.47 Watts. The calculated values are the same for the three winding types. As a result of the analysis, the average winding loss of the aluminum conductor is 2.26 kW, the average winding loss of the copper conductor is 1.48 kW and the average winding loss of the silver conductor is 1.40 kW. The aluminum winding loss is 0.90% of visible power, the copper winding loss is 0.59% of visible power, and the silver winding loss is 0.56% of visible power. It has been determined that the minimum winding loss is in the silver conductor. It has been

found that the winding type only affects winding loss but not other parameters of the transformer.

Due to the high cost of the silver conductor, copper conductor is widely used in transformer manufacturing today. A minor improvement in the losses of the commonly used transformer provides significant cost advantages. There is a large increase in the number of transformers that are switched on due to the increased energy requirement. This leads to an increase in the amount of winding loss in the transmission and distribution system. It is contemplated that other types of conductors may be used in place of copper in the future to reduce winding losses.

Comparing the label information of the simulated transformer with the results obtained from the analyzes, it appears that there are differences between them. Among the reasons for this difference, transformers manufactured may be different from the ideal properties of the materials, manufacturing mistakes and important mistakes arising from 2D analysis of the transformer. In the 2D simulation model, the analysis results vary depending on the depth value entered in the program. An analysis of the 3D transformer model may be useful to obtain near-realistic results.

The finite element method allows analysis of systems with irregular and complex geometries. In addition, the finite element method can be easily applied to systems with different and complex material properties. Using the finite element method results in an approximate result instead of a definite result, since the original problem is reduced to a simpler probing. but it is possible to improve this result and approach the final result very much.

Keywords: Stepped power transformer; transformer winding losses; finite element method; Ansys Maxwell 2B