Demiryolu Mühendisliği **Railway Engineering**
Temmuz 2025 July 2025
Sayı:22, Sayfa: 76-90 Issue:22, Page: 76-90
Araştırma Makalesi Research Article
doi: 10.47072/demiryolu.1721553
http://dergipark.org.tr/demiryolu
e-ISSN: 2687-2463, ISSN: 2149-1607

Cer Transformatörlerinde Kaçak Reaktansın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Farklı Geometrik Eksen Sistemi ile Hesaplanması

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE*[1], Oluş SÖNMEZ[1], Bora ALBOYACI[2], Yunus Berat Demirol[3]

[1] Sönmez Transformatör San. ve Tic. A.Ş., Kocaeli, Türkiye
[2] Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye
[3] Genetek Güç Enerji Ltd., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli, Türkiye

**s.curukova@sonmeztrafo.com.tr*

(Alınış/Received: 23.06.2025, Kabul/Accepted: 17.07.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Elektrikli lokomotif sistemlerinde gerilim dönüşümünü gerçekleştirip konverter ve trenin iç ihtiyaç donanımlarına güç sağlayan eleman cer transformatörüdür. Cer transformatörlerinin tasarımı aşamasında, belirlenmesi gerekli olan kritik elektriksel parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelerden en önemli olanlardan biri de transformatörün kaçak reaktans değeridir. Transformatörün kaçak reaktans değerine göre konverter sistemlerinin çalışması etkilenmektedir. Uyum açısından cer transformatörlerinin kaçak reaktans değerleri belirlenen aralıklarda olmalıdır. Bundan dolayı da tasarım aşamasında cer transformatörü dizaynının kaçak reaktans değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi önem taşımaktadır. Bu aşamada ise teorik hesaplamalar cer transformatörünün yapısı gereği yetersiz kalabilmektedir. Cer transformatörlerinde genellikle birden fazla sayıda cer çıkışı olmakla beraber yüksek gerilim tarafında paralel sargı yapısı bulunmaktadır. Bu paralel sargıların kendi aralarında bulunan kuplajdan dolayı teorik hesaplamaların doğruluğu sınırlı olmaktadır. Bu aşamada sonlu elemanlar yöntemi (SEY) gibi nümerik analiz programları ile modelleme gerçekleştirilip sonuçlar hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada örnek bir cer transformatörü üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile kaçak reaktans hesaplama uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışmaları yapılırken farklı geometrik eksen sistemleri kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunun yanında ilgili cer transformatörü üzerinde saha testleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda cer transformatörlerinde kaçak reaktans hesaplamalarında sonlu elemanlar yönteminin kullanımı açıklanmış ve gerekliliği vurgulanmıştır.

***Anahtar kelimeler**:* Cer transformatörü, Sonlu Elemanlar Yöntemi, IEC 60310, Kaçak reaktans, Kısa devre empedansı

Calculation of Leakage Reactance in Traction Transformers with Three Different Geometric Axis Systems by Finite Element Method

Abstract: In electric locomotive systems, the traction transformer is the component that performs voltage transformation and provides power to the converter and internal equipment of the train. During the traction transformers' design phase, critical electrical parameters need to be determined. One of the most important of these parameters is the leakage reactance value of the transformer. The operation of the converter systems is affected by the leakage reactance value of the transformer. In terms of compliance, the leakage reactance values of the traction transformers should be within the specified ranges. Therefore, it is important to accurately calculate the leakage reactance values of the traction transformer during the design phase. Theoretical calculations may be insufficient due to the structure of the traction transformer. Traction transformers usually have more than one traction output and parallel winding structure on the high-voltage side. The theoretical calculations are insufficient due to the coupling between these parallel windings. Calculations can be performed with numerical analysis programs such as the finite element method, and results can be calculated. In this study, leakage reactance calculation applications were performed on a sample traction transformer using the finite element method (FEM). Different geometric axis systems were used during the modeling studies, and the results were compared. In addition, field tests were performed,

Atıf için/Cite as: S. Çürükova Kale, O. Sönmez, B. Alboyacı, Y. B. Demirol, "Cer transformatörlerinde kaçak reaktansın sonlu elemanlar yöntemi ile üç farklı geometrik eksen sistemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 76-90, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1721553

and the analysis results were compared. As a result of the study, the use of the finite element method in leakage reactance calculations in traction transformers is explained, and its necessity is emphasized.

***Keywords**:* Traction transformer, FEM, IEC 60310, Leakage reactance, Short-circuit impedance

1. Giriş

Demiryolu ulaşım sistemlerinde kullanılan elektrikli lokomotiflerin tahrik gücünü üretebilmesi için, lokomotif içerisinde birden fazla ekipman ve sistem bulunmaktadır. Bu sistemler basitçe pantograf, cer transformatörü, konvertör ve cer motorları olarak sıralanabilir. Bu ekipman ve sistemler içerisinde cer transformatörü de önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada cer transformatörünün elektriksel parametrelerinden biri olan kaçak reaktans değeri üzerine inceleme yapılmıştır. Elektrikli lokomotif sisteminin genel yapısı düşünüldüğünde, ekipman ve sistemler kendi aralarında bir düzen ve uyum içinde çalışmaktadır. Bu uyumun sağlanması için ise çeşitli elektriksel ve mekanik parametrelerin belirli isterleri sağlanması gereklidir. Cer transformatörleri için inceleme yapıldığında birden fazla elektriksel ve mekanik parametre vardır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir: sargı doğru akım direncine bağlı oluşan kayıplar, sargı girdap akımı kayıpları, yapısal bileşenler üzerinde meydana gelen kayıplar, kaçak reaktans, inrush akımları, boşta çalışma kayıpları, boşta çalışma akımı, kısa devre dayanımı özellikleri, termal yüklenme özellikleri, harmonikli yüklenme durumlarında oluşan kayıplar, titreşim davranışı, kapasitans değerleri, elektrik alan dayanımı özellikleri.

Bu özelliklerin her biri ayrı bir çalışma konusu olmakla beraber, bu çalışma içerisinde kaçak reaktans parametresi üzerinde durulmuştur. Cer transformatörleri, katener sisteminden pantograf ve kesici üzerinden aldıkları yüksek gerilimi, uygun seviyede alçak gerilime dönüştürmekte ve bu gerilim ile konverter sistemini beslemektedir. Konverter sisteminde bulunan yarı-iletken tabanlı güç elektroniği elemanlarından kaynaklı olarak bu sistem üretmiş olduğu belirli bir akım harmoniği spektrumu ile işletilmektedir. Bu harmonik spektrumu ise sistem empedansına bağlı olarak değişmektedir. Bu aşamada cer transformatörünün de kaçak reaktans değeri, bu harmonik spektrumunun oluşumunda belirleyici olmaktadır. Sistem tasarımı aşamasında, konverter sisteminin özelliklerine göre cer transformatörünün sağlaması gerekli olan bir kaçak reaktans değeri bulunmaktadır. Bundan dolayı cer transformatörlerinin tasarım aşamasında kaçak reaktans değerinin doğru bir şekilde hesaplanması önem taşımaktadır.

Kaçak reaktans parametresinin üretim tolerans değerleri önemlidir. IEC 60310:2016 standardına göre üretilen transformatörün kısa devre empedansı ile garanti değeri arasındaki fark %10'dan az olmalıdır [1]. Bu standart, cer transformatörlerinin tabi olduğu bir standarttır. Standart içerisinde direkt olarak kaçak reaktans değeri sınır toleransı tanımlanmamıştır. Bunun yerine kısa devre empedansı değeri tanımlanmıştır. Bir transformatörün nominal gücü baz güç ve nominal gerilimi baz gerilim alındığında transformatörün bağıl kısa devre gerilimi (%Uk) değer olarak transformatörün kısa devre empedansına eşit olmaktadır. Bağıl kısa devre geriliminin ise indüktif ve rezistif olmak üzere iki bileşeni bulunmaktadır. Buna göre %Ur, bağıl kısa devre geriliminin rezistif bileşenidir ve transformatörde oluşan toplam kayıplara bağlıdır. %Ux ise bağıl kısa devre geriliminin indüktif bileşenidir ve transformatörün geometrik yapısına bağlı olarak oluşan kaçak indüktanstan kaynaklanmaktadır.

Kısa devre empedansı deney yolu ile IEC 60076-1:2011 standardına göre belirlenmektedir [2]. Buna göre transformatörün sekonderi kısa devre edilip primer gerilimi akım nominal akıma gelinceye kadar arttırılmaktadır. Elde edilen gerilimin nominal gerilime oranının yüzdesi alındığında bağıl kısa devre gerilimi (%Uk) dolayısıyla kısa devre empedansı deney yöntemi ile elde edilmiş olunmaktadır. Bunun yanında kısa devre empedansının teorik ve analitik olarak hesaplanması için literatürde çeşitli formüller bulanmaktadır. Bu formüllerden Bölüm 2. içerisinde bahsedilmiştir.

Transformatör sargı parametrelerine göre %Ux ile %Ur arasındaki oran değişmekle beraber, genellikle konverter sistemini besleyen sargılarda %Ux değeri çok daha baskın olmaktadır. %Ur değeri transformatörün toplam yükte çalışma kayıplarının, baz güce oranının yüzdesini ifade etmektedir. Bundan dolayı, %Ur değerinin hesaplanması için transformatörün yükte çalışma kayıplarının ayrı ayrı olarak hesaplanması gerekmektedir. Yükte çalışma kayıpları ise şu şekilde sıralanabilir: sargı doğru akım direncine bağlı olarak oluşan doğru akım kayıpları, sargıda kullanılan iletken özelliklerine ve transformatörün geometrik yapısına bağlı olarak iletkenlerde oluşan radyal ve eksenel girdap akımı kayıpları, transformatör kazanı gibi metal yapısal bileşenler üzerinde oluşan girdap akımı kayıpları. Buna göre, kayıp hesaplamaları, üzerinde çalışma yapılması gerekli olan ayrı bir konu olduğundan dolayı, bu çalışma içerisinde sadece kaçak reaktans değerini oluşturan %Ux üzerinde durulmuştur.

Literatürde çeşitli güç transformatörlerinin kısa devre empedanslarının farklı analitik yaklaşımlar ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile hesaplandığı ve bu hesaplamaların deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır [3], [4]. Ayrıca, wound-core tip transformatörlerde kısa devre empedansının teorik yöntemlerle ve SEY ile belirlenip deneysel sonuçlarla doğrulandığı araştırmalara da rastlanmaktadır [5]. Güç transformatörlerinde kısa devre empedansı için farklı teorik modellerin, SEY sonuçlarının ve yeni önerilen yöntemlerin karşılaştırmalı analizlerinin yapıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır [6]. Bununla birlikte, kuru tip cer transformatörlerinde kısa devre empedansının SEY ile modellenip deneysel verilerle karşılaştırıldığı çalışmalar da mevcuttur [7], [8]. [9] çalışmasında cer transformatörlerinde sargılar arası kısa devrelerin simülasyon ortamında analiz edilerek transformatör performansına etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu tür transformatörlerde çeşitli tasarım parametrelerinin etkisi [10], [11], eksenel boşlukların manyetik davranış ve kayıplar üzerindeki rolü [12], farklı sargı konfigürasyonlarının endüktif özellikler üzerindeki etkisi [13] gibi konular incelenmiştir. Bunun yanında cer transformatörlerinde sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilebilen hesaplamalardan bahsedilen [14], boşta çalışma analizleri gerçekleştirilen [15], cer trafosu ve baralar etrafında oluşan manyetik alan analizi gerçekleştirilen [16] çalışmaların olduğu görülmektedir. Bunların yanında, cer transformatörlerinde primer ve sekonder sargılarının farkı kombinasyonlarda üst üste yerleştirildiği durumlarda üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile kısa devre empedansının hesaplandığı [17], sekonder sargısı kademeli yapıda olan bir cer transformatöründe sargı indüktansları kullanılarak matematiksel model oluşturulan [18], manyetik akı saptırıcı kullanılan cer transformatöründe kısa devre empedansının hesaplandığı [19], cer transformatöründe LCL filtre elemanı tasarlanırken aynı zamanda kısa devre empedansı hesaplarının da gerçekleştirildiği [20] çalışmalar bulunmaktadır.

Bu kapsamda, cer transformatörlerinde sonlu elemanlar yaklaşımı ile farklı geometrik eksen sistemlerinde kısa devre reaktanslarının hesaplandığı ve karşılaştırma yapıldığı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, örnek bir cer transformatörünün kaçak reaktans hesaplamaları sonlu elemanlar yönteminde üç boyutlu geometrik eksen sisteminde modelleme ile, iki boyutlu kartezyen geometrik sisteminde modelleme ile ve iki boyutlu silindirik geometrik sistemde modelleme ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında ilgili cer transformatörü üretilmiş ve üzerinde doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak literatürde bulunan teorik yaklaşımlar ile de hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve bu teorik hesapların ilgili cer transformatörü yapısında neden sınırlayıcı olduğu, sonlu elemanlar yönteminin neden kullanılması gerektiği açıklanmıştır. Bu kapsamda çalışma literatüre cer transformatörlerinde kısa devre empedansının farklı modelleme yaklaşımları ile hesaplanması ve test sonuçları ile doğrulanması alanında katkı sağlamaktadır.

Bu kapsamda ikinci bölümde ilgili transformatör yapısı, analitik yaklaşımlar, sonlu elemanlar yaklaşımları, iki boyutlu kartezyen sistem modeli, iki boyutlu silindirik sistem modeli, üç boyutlu model, teorik yöntemlerin hesaplamalarda neden yetersiz kaldığı, test yöntemi ve test düzeneği

açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ise hesaplama sonuçları detaylı olarak paylaşılmıştır ve dördüncü bölümde çalışmanın sonucu özetlenmiştir.

2. Metot

İlgili çalışmada kullanılmış olan cer transformatörünün bir adet 25kV gerilim ve 1900kVA güçte yüksek gerilim sargısı, dört adet 1.04kV gerilim ve 425kVA güçte cer sargısı, bir adet 0.6kV gerilim ve 100kVA güçte filtre sargısı, bir adet 0.4kV gerilim ve 100kVA güçte yardımcı sargısı bulunmaktadır. Cer transformatörlerinde lokomotifin farklı güç ihtiyaçları için farklı özelliklerde sargılar bulunmaktadır. Cer sargıları konverterleri beslemektedir, yardımcı sargı ise trenin iç ihtiyaçları ve kontrol sistemleri için kullanılmaktadır. Filtre sargısının oluşturduğu indüktanslar ise filtreleme elemanı olarak kullanmaktadır.

Cer transformatörlerinde çok sayıda sargı olduğundan dolayı çok sayıda kaçak reaktans değeri bulunmaktadır. Örneğin bu çalışmada incelenen cer transformatöründe 21 adet empedans değeri bulunmaktadır. Tüm sargıların birbirleri arasında bulunan kaçak reaktans değerleri bunu oluşturmaktadır. Tren sistemi üreticilerine göre değişmekle beraber, genellikle garanti değerleri yüksek gerilim ve cer sargıları arasında istenmektedir. Bundan dolayı ve aynı zamanda makalenin amacından sapmamak adına hesaplamalar sadece yüksek gerilim ve cer sargısı arasında bulunan kaçak reaktans için gerçekleştirilmiştir. Bütün senaryoların bulunduğu empedans matrisinin oluşturulmasının ayrı bir çalışma kapsamında gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

2.1. Analitik yaklaşım

Transformatörlerde kaçak reaktans değerinin hesaplanması için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu bölümde bunlardan biri gösterilmiştir. Literatürde bulunan kaçak reaktans hesaplama yaklaşımları paralel sargılar olması durumunda yetersiz kalmaktadır. İlgili cer transformatöründe paralel yüksek gerilim sargıları bulunmaktadır. Paralel sargıların kendi aralarındaki kuplajdan dolayı, kaçak reaktans değerleri etkilenmektedir. Örneğin yüksek gerilim ve cer-1 sargısı arasında kaçak reaktansın bir büyük bir bölümü cer-1 sargısının karşısında bulunan yüksek gerilim sargısından gelmektedir. Ancak diğer yüksek gerilim sargılarının paralel yapısından dolayı kaçak reaktans bir miktar azalmaktadır. Bu durum sargıların yüksekliklerine göre, paralel sargılar arasında bulunan mesafeye göre ve nüve yapısına göre değişmektedir.

Teorik yaklaşımlar bu durumu değerlendirmeye almamaktadır. Buna karşın, yüksek gerilim sargıları ile tüm cer sargılarının kısa devre olması durumunda ise teorik yaklaşımlar daha tutarlı olmaktadır ancak bu durumda da sargı yüksekliklerine bağlı olarak sapmalar olabilmektedir. Bu çalışma içerisinde gerçekleştirilen hesaplamalar ile bu durumlar gösterilmiş ve incelenmiştir. Literatürde bulunan, kaçak reaktansın hesaplanması için kullanılan olan analitik formül aşağıda bulunan Denklem 1.-4. arasında gösterilmiştir [21].

$$\%X = 2.48x10^{-5}.f\frac{(Amper - sarım)}{H_{eq}(\frac{Gerilim}{Sarım})}\sum_{k=1}^{n} ATD \tag{1}$$

$$\sum ATD = \frac{1}{3}(T_1xD_1) + (T_gxD_g) + \frac{1}{3}(T_2xD_2) \tag{2}$$

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} \tag{3}$$

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w/(T_1+T_g+T_2)}}{\pi H_w/(T_1 + T_g + T_2)} \tag{4}$$

Burada, T_1 = Birinci sargının kalınlığı, T_2= İkinci sargının kalınlığı, T_g= Sargılar arasında bulunan boşluğun kalınlığı, D_1 = Alçak gerilim sargısının ortalama çapını, D_2= Yüksek gerilim sargısının ortalama çapını, D_g = Hava aralığının ortalama çapını, H_w=Sargı yüksekliğini, K_R=Rogowski faktörünü, ATD =Amper-sarım diyagramı olarak tanımlanmaktadır. Formülasyondan görüleceği üzere paralel sargı yapısı ile ilgili bir parametre bulunmamaktadır. İlgili transformatörün nüvesi üzerinde dört adet yüksek gerilim ve cer sargısı bulunmaktadır. Bunların ikisi nüvenin bir bacağına eksenel olarak, diğer ikisi ise nüvenin diğer bacağına eksenel olarak yerleştirilmiştir. Bu hesaplama tüm cer sargılarının aktif olduğu durumdaki kaçak reaktansı ifade edecektir. Buna göre gerçekleştirilen hesaplama sonuçları Bölüm 3. içerisinde gösterilmiştir.

2.2. Sonlu elemanlar yöntemi

Güç sistemlerine yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalarda elektrik ve manyetik alanlar, iletkenlerden akan akımların dağılımları, akımın iletken kesiti içerisindeki dağılımı, öz ve karşıt endüktans değerleri, manyetik indüksiyon değerleri, enerji dağılımları gibi elektriksel parametrelerin elde edilmesi oldukça zahmetli çalışmalardır. Birçok faktör tarafından etkilenen bu parametrelerin elde edilmesinde analitik yöntemler çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu gibi hesaplamaların kısa zamanda ve yüksek doğrulukla gerçekleştirilmesinde nümerik yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi önemli avantaj sağlamaktadır. Sonlu elemanlar analizleri ile güç sistemlerinin tasarımı aşamasında elektriksel parametrelerin hesaplanması ve tasarım optimizasyonu mümkün olmaktadır. Bu yöntem ile sadece transformatörlerde değil, baralı kanal birimi [22], yüksek gerilim yeraltı kablosu sistemleri [23], alçak gerilim kablo sistemleri [24], kablo başlıkları [25], yüksek gerilim izolatör sistemleri [26],yüksek gerilim teçhizatları [27] gibi sistemler üzerinde de elektriksel ve termal parametreler hesaplanabilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile model üzerinde sonlu sayıda üç yüzlü veya dört yüzlü eleman oluşturulmakta ve bir ağ yapısı oluşturan bu elemanlara Maxwell denklemleri uygulanmaktadır. Bu işlemin yapılması çok basit yapılar dışında analitik olarak mümkün olmamakla beraber sonlu elemanlar yöntemi gibi nümerik yöntemler kullanan programlar ile işlem basitleşmektedir. Oluşturulan ağ yapısı üzerinde çözülen Maxwell denklemleri Denklem 5.-8. Arasında gösterilmiştir [21].

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{5}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{6}$$

$$\nabla . B = 0 \tag{7}$$

$$\nabla . D = \rho \tag{8}$$

Burada E elektrik alan şiddeti (V/m), B manyetik akı yoğunluğu (Wb/m^2), H manyetik alan şiddeti (A/m), J akım yoğunluğu (A/m^2), D elektrik akı yoğunluğu (C/m^2), ρ yük yoğunluğu (C/m^3) olarak tanımlanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile sistemde oluşan enerji miktarı hesaplandıktan sonra, kaçak reaktans değeri Denklem 9.-12. yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$L = \frac{2W_m}{I^2} = \frac{1}{I^2}\int B.H\ dv = \frac{1}{I^2}\int A.J\ dv \tag{9}$$

$$X_L = \frac{2.\pi.f.2W_m}{I^2} \tag{10}$$

$$Z_B = \frac{V_{phase}}{I_{phase}} \tag{11}$$

$$\%U_k = \frac{2.\pi.f.2W_m.100}{I^2.Z_B} \tag{12}$$

Burada, L Endüktans, W_m Kapalı bir yolda akan akım I tarafından üretilen manyetik alandaki enerji, X_L Reaktans, I Akım, Z_B Baz empedans değeri olarak tanımlanmaktadır. Burada enerji değeri sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi standart olmayan sargı yapısına sahip olan transformatörlerin kaçak reaktans hesabında yaygın olarak kullanılmakta olan bir yöntemdir. Standart dışı sargı yapısında bulunan transformatörlerin kaçak reaktans hesabının gerçekleştirilmesi oldukça zor olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi bu kısımda kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır.

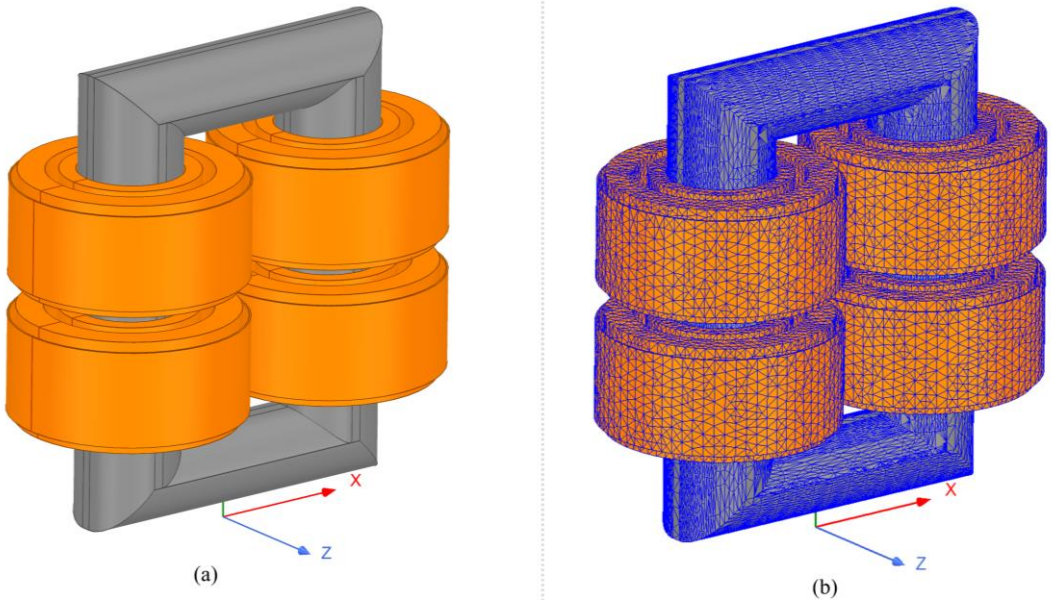
Analiz çalışmalarında Ansys Electronics Suite 2022R1 versiyonunda bulunan düşük frekanslı manyetik analizler için kullanılan Maxwell modülü kullanılmıştır. Analizlerin gerçekleştirildiği iş istasyonunda “128 Gb 1866 Mhz” bellek, “NVIDIA Quadro K2000” ekran kartı ve iki adet “Intel(R) Xenon(R) CPU E5-2683 v3 işlemci kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminde ağ yapısı önemli bir rol oynamaktadır ve analiz sonuçları oluşturulan ağ yapısının kalitesinden etkilenmektedir. Ansys Maxwell modülünün adaptif ağ yapısı oluşturma özelliği bulunmaktadır. Bu özelliğe göre program tarafından başlangıçta bir ağ yapısı oluşturulmaktadır, daha sonra bu ağ yapısı iyileştirilerek tekrar oluşturulmaktadır. İki ağ yapısı için oluşan enerji miktarı ve aralarında bulunan fark hesaplanmaktadır. Enerji miktarları arasında bulunan fark, belirlenen kriteri sağlayana kadar ağ yapısı iyileştirilmektedir. Analizler için enerji hatası %1 olarak ayarlanmış ve ağ yapısı program tarafından buna göre oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar programı içerisinde malzeme tanımlamaları, uyarma akımlarının ve gerilimlerinin tanımlanması, sarım sayılarının tanımlanması, ağ yapısı özelliklerinin tanımlanması, harici devre bağlantılarının tanımlanması gibi uygulamalardan sonra sonlu elemanlar modeli analize hazır duruma gelmektedir.

Ansys Electronics Suite yazılımının Maxwell modülü içerisinde manyetik alan çözücü bölümünde manyetostatik, eddy ve transient çözücü bulunmaktadır. Manyetostatik çözücü anlık olarak analiz gerçekleştirmektedir, eddy çözücüsü frekans domeninde, transient çözücü ise zaman domeninde çözüm gerçekleştirmektedir. Hesaplanması istenen parametrelerin isterlerine göre uygun çözücüde modelleme yapılmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamalarda frekans domeni çözücüsü olan eddy çözücüsü kullanılmıştır. Uygun modelleme çalışmaları ile manyetostatik ve transient çözücüler de kaçak reaktans hesabında kullanılabilir ancak, bu hesap için hem zaman tasarrufu hem de verilerin işlenebilmesi açısından eddy çözücü tipi daha uygundur.

2.3. Sonlu elemanlar modeli: 3D eksen modeli

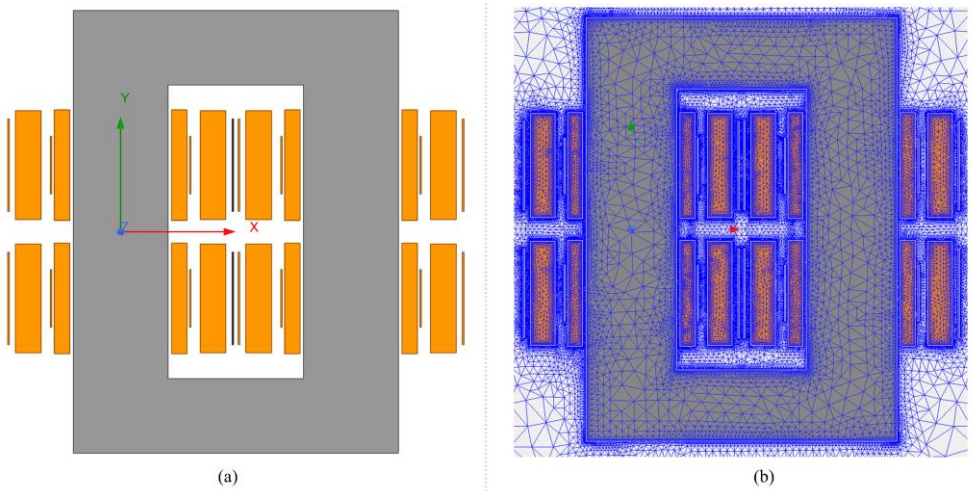
Modelleme çalışmaları kapsamında hazırlanan üç boyutlu model ve bu model üzerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 1. üzerinde gösterilmiştir. Program içerisinde bulunan her bir sargı, harici devrede uygun bağlantı ile bağlanmaktadır.



Şekil 1. (a) üç boyutlu model (b) üç boyutlu model üzerinde oluşturulan ağ yapısı

2.4. Sonlu elemanlar modeli: 2DXY eksen modeli

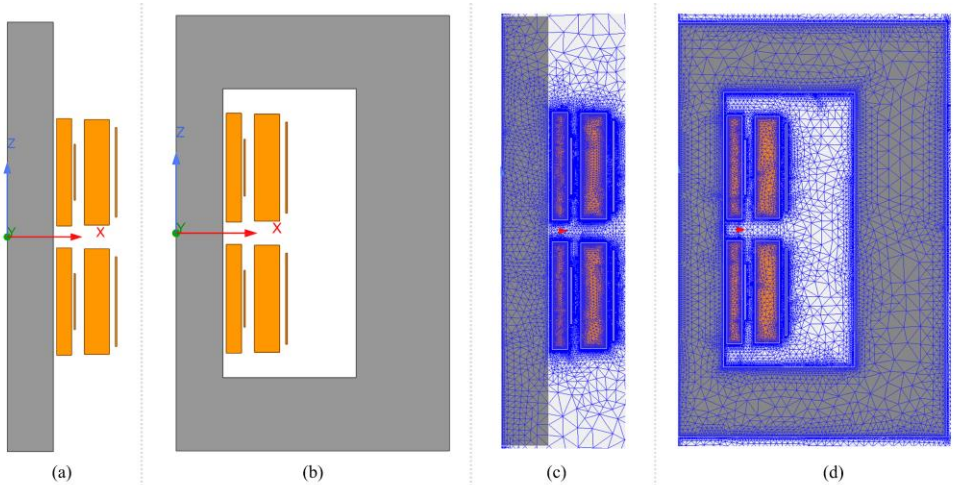
Modelleme çalışmaları kapsamında hazırlanan iki boyutlu XY kartezyen sistem modeli ve bu model üzerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 2. üzerinde gösterilmiştir. İki boyutlu modelde, program ilgili geometrinin bir model derinliğine sahip olduğunu varsaymakta ve buna göre çözüm yapmaktadır. Programın verdiği enerji değeri ise program içerisinde otomatik olarak bir metre için hesaplanmaktadır. Kaçak reaktans hesaplarında ise uygun model derinliğinde oluşan enerji miktarına göre hesap yapılması gerekli olmaktadır.



Şekil 2. (a) iki boyutlu XY kartezyen sistem modeli (b) iki boyutlu XY kartezyen sistem modeli üzerinde oluşturulan ağ yapısı

2.5. Sonlu elemanlar modeli: 2DRZ eksen modeli

Modelleme çalışmaları kapsamında hazırlanan iki boyutlu RZ silindirik sistem modeli ve bu model üzerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 3. üzerinde gösterilmiştir. İki boyutlu RZ modelinde, program ilgili geometrinin Z ekseni merkezli olarak üç yüz altmış derece döndürüldüğünü varsaymakta ve buna göre çözüm yapmaktadır. RZ ekseninin doğasından dolayı tek bir modelde transformatör sargısının tamamı modellenememektedir. Pencere içinde kalan ve pencere dışında kalan kısımlar ayrı ayrı modellenerek yaklaşım yapılmış ve ilgili alanlardaki sonuçlar birleştirilmiştir.



Şekil 3. (a) iki boyutlu RZ silindirik sistem modeli (b) iki boyutlu RZ silindirik sistem modeli üzerinde oluşturulan ağ yapısı

2.6. Test yöntemi

Transformatörler üretildikten sonra elektriksel parametrelerinin uygunluğunun test edilmesi gerekmektedir. IEC 60310:2016 standardında, cer transformatörleri üzerinde yapılması gerekli olan tüm testler detaylı olarak açıklanmıştır. Üretimi gerçekleştirilmiş olan cer transformatörü üzerinde kısa devre empedansının ölçümüne yönelik testler gerçekleştirilip sonuçlar kaydedilmiştir. Buna göre kaçak reaktans olan %Ux değeri Denklem 13.'e göre hesaplanmıştır.

$$\%U_x = \sqrt{\left(\frac{100 * (V_m) * (I_n)}{25000 * (I_m)}\right)^2 - \left(\frac{100 * (L_m) * \frac{(I_n)^2}{(I_m)^2}}{(S)}\right)^2} \tag{13}$$

Burada V_m ölçülen uyarma gerilimi, I_n nominal akım, I_m ölçülen akım, L_m ölçülen kayıp, S baz güç olarak tanımlanmaktadır.

3. Bulgular

Bu bölümde gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen bulgular gösterilmiştir. Analiz ve hesaplama gerçekleştirilen senaryolar Tablo 1. üzerinde gösterilmiştir. Transformatörün geometrik yapısına göre cer sargılarının konumları simetriktir. Bundan dolayı, HV-CER1, HV-CER-2, HV-CER3, HV-CER4 empedanslarının ideal şartlarda birbirleri ile aynı olması beklenmektedir. Bundan dolayı hesaplamalarda sadece bir adet tek cer kısa devresi durumu incelenmiştir. Ancak üretim şartlarına bağlı olarak, tüm bu sargıların konumlarının tamamen

simetrik olması mümkün değildir, bundan dolayı farklı cer sargıları arasında gerçek hayatta sapma olabilmektedir. Bundan dolayı test sonuçları ise farklı cerler arasında ayrı ayrı olarak gösterilmiştir.

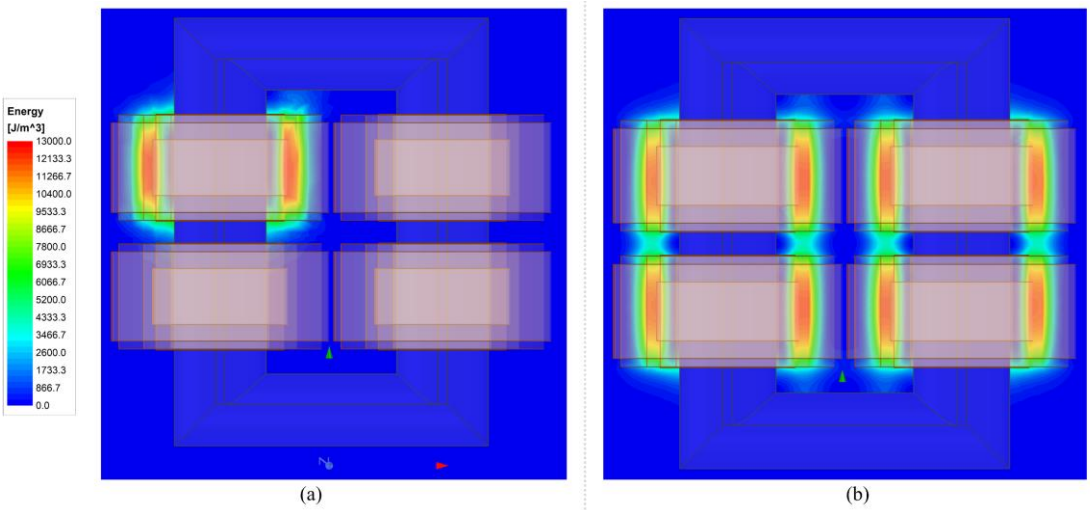
Tablo 1. Analiz senaryoları

Senaryo	Besleme yapılan sargı	Kısa devre edilen sargı	Baz güç (kVA)	Hesap yöntemi
1	YG	CER1	425	3D
2	YG	CER1	425	2DXY
3	YG	CER1	425	2DRZ
4	YG	CER1234	1700	3D
5	YG	CER1234	1700	2DXY
6	YG	CER1234	1700	2DRZ
7	YG	CER1234	1700	Teorik

3.1. Teorik yaklaşım ve sonlu elemanlar analizi sonuçları

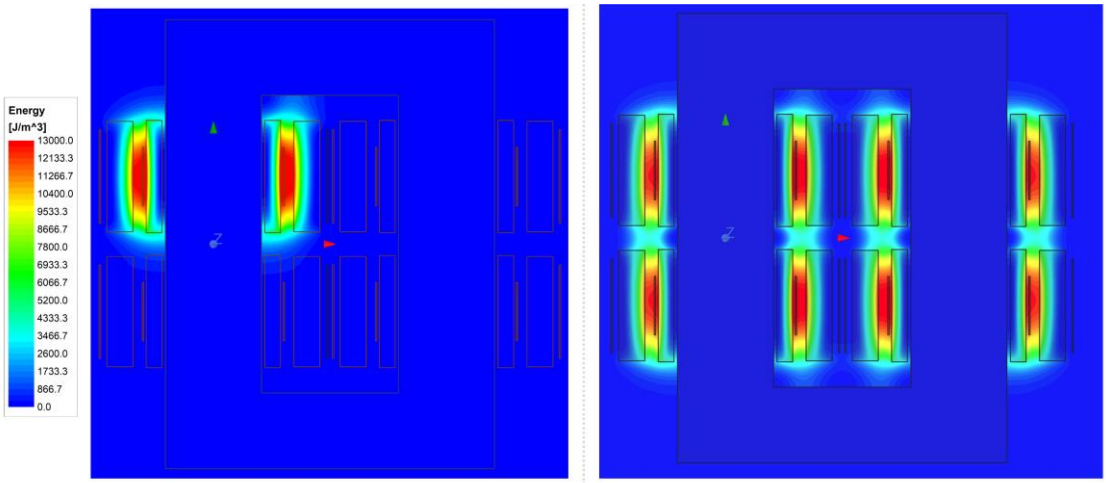
İlgili transformatör geometrisi üzerinde teorik hesaplama gerçekleştirildiğinde kaçak reaktans değeri %24.56 olarak bulunmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde ise 3D model kullanımında HV-CER1 (senaryo-1) durumunda %21.97, HV-CER1234 (senaryo-4) durumunda ise %23.70 olarak hesaplanmıştır. Bu durumlar için modeller üzerinde oluşan enerji dağılımının kesit görünümü Şekil 4. üzerinde gösterilmiştir (yatay eksen X eksenini, düşey eksen Y eksenini ifade etmektedir).



Şekil 4. (a) 3D model kullanımında HV-CER1 durumunda enerji dağılımı (b) 3D model kullanımında HV-CER1234 durumunda enerji dağılımı

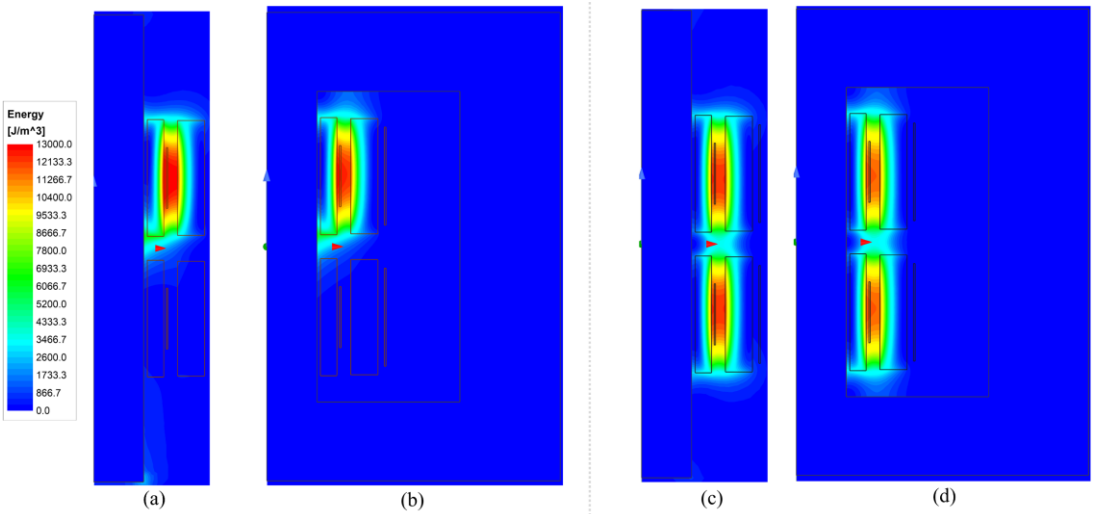
Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde ise 2DXY modeli kullanımında HV-CER1 (senaryo-2) durumunda %22.04, HV-CER1234 (senaryo-5) durumunda ise %23.42 olarak hesaplanmıştır. Bu durumlar için modeller üzerinde oluşan enerji dağılımı Şekil 5. üzerinde gösterilmiştir(yatay eksen X eksenini, düşey eksen Y eksenini ifade etmektedir).



(a) (b)

Şekil 5. (a) 2DXY model kullanımında HV-CER1 durumunda enerji dağılımı (b) 2DXY model kullanımında HV-CER1234 durumunda enerji dağılımı

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde ise 2DRZ modeli kullanımında HV-CER1 (senaryo-3) durumunda %19.42, HV-CER1234 (senaryo-6) durumunda ise %22.49 olarak hesaplanmıştır. Bu durumlar için modeller üzerinde oluşan enerji dağılımı Şekil 6. üzerinde gösterilmiştir (yatay eksen R eksenini, düşey eksen Z eksenini ifade etmektedir)..



(a) (b) (c) (d)

Şekil 6. (a) 2DRZ model kullanımında pencere içinde HV-CER1 durumunda enerji dağılımı (b) 2DRZ model kullanımında pencere dışında HV-CER1 durumunda enerji dağılımı (c) 2DRZ model kullanımında pencere içinde HV-CER1234 durumunda enerji dağılımı (d) 2DRZ model kullanımında pencere dışında HV-CER1234 durumunda enerji dağılımı

Farklı senaryolarda modeller üzerinde empedans hesapları gerçekleştirmek için uygulanan gerilimlerin nominal gerilimin yüzde kaçı olduğu, bu durumda oluşan akımlar, oluşan toplam enerji, hesaplanan kaçak indüktans değeri ve buna bağlı olarak hesaplanan kaçak reaktans değerleri Tablo 2. üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 2. Analiz sonuçlarına bağlı olarak hesaplanan değerler

Senaryo	Kısa devre edilen cer sargısı	Baz güç (kVA)	Hesap yöntemi	Uygulanan gerilim (%)	YG sargı akım (Arms)	Enerji (J)	L (H)	XL (Ohm)	Zbaz (Ohm)	%Ux
1	1	425	3D	25.00	19.21	189.83	1.029	323.14	1470.59	21.97
2	1	425	2DXY	25.00	19.15	189.10	1.032	324.13	1470.59	22.04
3	1	425	2DRZ	25.00	21.76	215.17	0.909	285.53	1470.59	19.42
4	1234	1700	3D	25.00	71.23	703.64	0.277	87.15	367.65	23.70
5	1234	1700	2DXY	25.00	72.08	711.94	0.274	86.10	367.65	23.42
6	1234	850	2DRZ	25.00	37.55	370.96	0.526	165.33	735.29	22.49

3.2. Test sonuçları

Üretimi gerçekleştirilen cer trafosu üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Buna göre test sonuçları farklı cer sargıları için Tablo 3. üzerinde gösterilmiştir. Trafonun cer sargıları arasında bulunan fark ise gerçek hayatta oluşan geometrik farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

Tablo 3. Test sonuçları

Besleme yapılan sargı	Kısa devre edilen sargı	Baz güç (kVA)	%Ux
YG	CER-1	425	22.58
YG	CER-2	425	22.17
YG	CER-3	425	21.78
YG	CER-4	425	21.69
YG	CER-1234	1700	23.95

Eş cer çıkışlarının ortalama %Ux değeri %22.06 olarak hesaplanmıştır. Cer sargılarının kendi aralarında ortalama değere göre olan sapmaları ise maksimum %2.38 olarak hesaplanmıştır. Test laboratuvarından bir kesit Şekil 7. üzerinde gösterilmiştir. İlgili cer transformatörü ise Şekil 8. üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 7. Test laboratuvarı

Şekil 8. Çalışmada incelenen cer transformatörü

3.2. Sonuçları karşılaştırılması

Gerçekleştirilen analiz ve test sonuçlarına göre sonuçların doğrulukları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde üç boyutlu ve iki boyutlu XY kartezyen sistem modelinin sonuçlarının tutarlı olduğu görülmektedir. Sonuçların incelenmesi için Tablo 4. üzerinde hesaplanan tüm değerler gösterilmiştir. Tüm durumlar için test sonuçları referans alındığında oluşan sapma Tablo 5. üzerinde gösterilmiştir. İki boyutlu silindirik sistemde modelin gerçeği tam olarak temsil etmesi mümkün olmadığı ve pencere içinde kalan alanlar ile pencere dışında kalan alanların arasında bulunan farktan dolayı sonuçlarda sapma olmaktadır.

Tablo 4. Analiz ve test sonuçları

Besleme yapılan sargı	Kısa devre edilen sargı	Baz güç (kVA)	Test %Ux	Teorik %Ux	Analiz 3D %Ux	Analiz 2DXY %Ux	Analiz 2DRZ %Ux
YG	CER-1	425	22.58	-	21.97	22.04	19.42
YG	CER-2	425	22.17	-	21.97	22.04	19.42
YG	CER-3	425	21.78	-	21.97	22.04	19.42
YG	CER-4	425	21.69	-	21.97	22.04	19.42
YG	CER-1234	1700	23.95	24.56	23.70	23.42	22.49

Tablo 5. Analiz ve test sonuçları arasındaki % cinsinden sapma

Besleme yapılan sargı	Kısa devre edilen sargı	Teorik %Hata	Analiz 3D %Hata	Analiz 2DXY %Hata	Analiz 2DRZ %Hata
YG	CER-1	-	-2.70	-2.40	-14.03
YG	CER-2	-	-0.90	-0.60	-12.43
YG	CER-3	-	0.89	1.20	-10.86
YG	CER-4	-	1.30	1.61	-10.49
YG	CER-1234	2.55	-1.02	-2.21	-6.11

4. Sonuç

Elektrikli lokomotif sistemlerinde transformatör empedansı sürücü sistemleri için önemli bir parametredir ve dizayn aşamasında yüksek doğruluk ile hesaplanması gerekmektedir. Çalışma kapsamında örnek bir cer transformatörü üzerinde kaçak reaktans hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hem teorik yöntem ile hem de sonlu elemanlar yöntemleri ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Teorik yöntemler ile kuplaj yapısı hesaplamalara dahil edilemediğinden dolayı tek sekonder kısa devre reaktanslarının hesaplanmasında yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı sonlu elemanlar gibi yöntemlerin kullanılması gerekli olmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde ise farklı geometrik eksenlerde modelleme çalışmaları yapılabilmektedir. Bu kapsamda sonlu elemanlar programında modelleme çalışmaları üç boyutlu, iki boyutlu kartezyen ve iki boyutlu silindirik geometrik eksenlerde gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre tüm cer sargıları kısa devre edilmiş ve tek cer sargısı kısa devre edilmiş durumlarda %Ux değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Bu durum sargılar arasında bulunan kuplajdan kaynaklanmaktadır. Teorik yaklaşım ile farklı sargılar arasında bulunan kuplajlar hesaplanamadığından dolayı, tek cer kısa devre durumlarındaki %Ux hesaplamalarında teorik yaklaşım yetersiz kalmaktadır. Analiz ve test sonuçları karşılaştırıldığında 3D ve 2DXY modellerinin sonuçlarının birbirine yakın ve test sonuçları ile tutarlı olduğu görülmektedir. Buna göre 3D modelde tüm cer sargıları kısa devre edilmişken hata %-1.02, 2DXY modelinde %-2.21 olarak bulunmuştur. Tek cer sargı kısa devre edildiğinde ise 3D modelde hata %-2.7 ile %1.30 arasında, 2DXY modelinde ise hata %-2.4 ile %1.61 arasında bulunmuştur. Üretim toleranslarına bağlı olarak oluşabilen sapmalar ile birlikte incelendiğinde 3D ve 2DXY model yaklaşımlarının test ile tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. 2DRZ modelleme yaklaşımında ise tüm cer sargıları kısa devre edilmişken hatanın %-6.11, tek cer sargısı kısa devre edilmişken hatasının %-14.03 ile %-10.49 arasında olduğu görülmektedir. Bu durum 2DRZ modelinin ilgili proje için güvenilirliğinin düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, 2DRZ modelinde transformatörün geometrik sargı yapısının tam olarak temsil edilememesinden kaynaklanmaktadır. Buna bağlı olarak ilerleyen çalışmalarda, 2DRZ modelleme çalışmalarının geliştirilmesine ve transformatörün tüm sargıları arasında oluşan kaçak reaktans değerlerinin hesaplanmasına yönelik olarak çalışmaların gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Kaynakça

[1] *Railway applications - Traction transformers and inductors on board rolling stock*, IEC 60310, 2016.

[2] *Power transformers - Part 1: General*, IEC-60076-1, 2011.

[3] K. Dawood, B. Alboyaci, M. A. Cinar, and O. Sonmez, “A new method for the calculation of leakage reactance in power transformers,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 5, pp. 1883–1890, 2017, doi: 10.5370/JEET.2017.12.5.1883.

[4] K. Dawood, M. A. Cinar, B. Alboyaci, and O. Sonmez, “Calculation of the leakage reactance in distribution transformers via numerical and analytical methods,” *J. Electr. Syst.*, vol. 15, no. 2, 2019.

[5] R. L. C. Hernandez, G. A. D. Florez, J. J. P. Gelves, and E. E. Mombello, “Analytic formulation for the calculation of leakage reactance in wound-core transformers,” *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 65, no. 2, 2021, doi: 10.3233/JAE-190140.

[6] B. S. Alves, P. Kuo-Peng, and P. Dular, “Contribution to power transformers leakage reactance calculation using analytical approach,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 105, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.044.

[7] D. Azizian and M. Bigdeli, “Leakage inductance calculations in different geometries of traction transformers,” *ECTI Trans. Electr. Eng. Electron. Commun.*, vol. 12, no. 2, pp. 28–34, 2014.

[8] D. Azizian, “Winding temperature prediction in split-winding traction transformer,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24, no. 4, 2016, doi: 10.3906/elk-1403-304.

[9] C. Yang, Y. Ding, H. Qiu, and B. Xiong, "Analysis of turn-to-turn fault on split-winding transformer using coupled field-circuit approach," *Processes*, vol. 9, no. 8, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/pr9081314.

[10] I. Sitar, M. Bilo, and D. Vale, "New design of traction transformers for fixed installations," *in International Colloquium Transformer Research and Asset Management*, 2009, pp. 1–10.

[11] I. Sitar and M. Jurković, "Modern design of EMU traction transformers," *in Automation in transportation 2014*, 2014, pp. 234–237.

[12] D. Liu, B. Xiong, Z. Cheng, and F. Liu, "Effects of axial gap length between disc windings on magnetic fields and power losses of evaporative cooling traction transformers," *in Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference,* APPEEC, 2020, vol. 2020-Septe, doi: 10.1109/APPEEC48164.2020.9220626.

[13] B. G. Park, T. S. Kim, K. J. Lee, R. Y. Kim, and D. S. Hyun, "Magnetic-field analysis on winding disposition of transformer for distributed high-speed train applications," *in IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, no. 6, doi: 10.1109/TMAG.2010.2043646.

[14] S. Çürükova, Y. B. Demirol, O. Sönmez, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, "Cer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 66–78, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1110515.

[15] S. Çürükova Kale, O. Sönmez, Y. B. Demirol, E. Sakallioglu, and B. Alboyacı, "Calculation of no-load losses in traction transformers with finite element method," *Railw. Eng*., vol. 19, no. 1, pp. 171–183, 2024, doi: https://doi.org/10.47072/demiryolu.1395174.

[16] S. Çürükova Kale, Y. B. Demirol, O. Sönmez, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, "Elektrikli lokomotif sistemlerinde cer transformatörü ve baraların oluşturduğu manyetik alanların sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 17, pp. 54–65, 2023, [Online]. Available: 10.47072/demiryolu.1175771.

[17] Z. Ye et al., "A Calculation Method to Adjust the Short-Circuit Impedance of a Transformer," in IEEE Access, vol. 8, pp. 223848-223858, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3042983.

[18] A.M. Evstaf'ev, A.Y.Yakushev, & A.G. Sereda,. A simulation mathematical model of a traction transformer with tapped secondary windings. Russ. Electr. Engin. 87, 275–281 (2016). https://doi.org/10.3103/S1068371216050072

[19] C. Tian, J. Fang and X. Zhao, "Short-Circuit Impedance Analysis of HTS Traction Transformer With Flux Diverters Using Magnetic Energy Method," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 34, no. 8, pp. 1-5, Nov. 2024, Art no. 5501405, doi: 10.1109/TASC.2024.3420293

[20] J. Xiang, J. Xu, Q. Wu, Z. Shuai, N. Tong, and Y. Liu, "Traction transformer integrated LCL filtering method for high-frequency harmonic and resonance suppression in AC train," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 148, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108922

[21] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer engineering design, technology, and diagnostics*. CRC Press, 2004.

[22] B. Alboyacı, M. A. Çınar, and Y. B. Demirol, "Influence of busbar trunking system design on thermal performance operating with non-sinusoidal currents," *Electr. Power Syst. Res*., vol. 214, no. 108815, pp. 1–9, 2023.

[23] Y. B. Demirol and Ö. Kalenderli, "Investigation of effect of laying and bonding parameters of high-voltage underground cables on thermal and electrical performances by multiphysics FEM analysis," *Electr. Power Syst. Res*., vol. 227, p. 109987, 2024, [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109987.

[24] Y. B. Demirol, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, "Evaluation of cable and busbar system in multiconductor distribution systems in terms of current and magnetic field distributions," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci*., vol. 29, no. 7, pp. 3119–3132, 2021, doi: 10.3906/ELK-2103-108.

[25] B. Alboyacı, M. A. Çınar, Y. B. Demirol, and A. Ince, "Evaluation of the effect of structural defects in the heat-shrink cable terminal on electric field distribution," *Eng. Fail. Anal*., vol. 132, no. 105920, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105920.

[26] B. Alboyacı, M. A. Çınar, Y. B. Demirol, and M. Uzar, "Reducing the failures with adding glass insulators to composite insulators of 400 kV transmission line at high altitude," *Eng. Fail. Anal*., p. 106678, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106678.

[27] M. Uzar, Y. B. Demirol, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, "Investigation of the effect of corona ring design parameters on electric field distribution by finite element method," *Turk J Electr Power Energy Syst*., vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2023, [Online]. Available: https://tepesjournal.org/en/investigation-of-the-effect-of-corona-ring-design-parameters-on-electric-field-distribution-by-finite-element-method-1679.

Özgeçmiş

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE
Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi'nde 2013 yılında tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini 2015-2017 yılları arasında aynı üniversitede 'Transformatörlerin Kazan Duvarlarında Meydana Gelen Kayıpların Azaltılması için En Uygun Şönt Eleman Boyutunun Belirlenmesi' konulu tez çalışması ile tamamlamıştır. 2013 yılından beri Sönmez Transformatör Sanayi ve Ticaret A.Ş 'de tasarım müdürü olarak görev yapmaktadır. İlgi alanına giren çalışma konuları, transformatörler ve bunlara dair hesapların geliştirilmesidir.
E-Posta: s.curukova@sonmeztrafo.com.tr

Oluş SÖNMEZ
Elektrik mühendisliği alanında lisans eğitimini 2009 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi'nde, yüksek lisans eğitimini ise 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamladı. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktora eğitimine devam etmektedir. Transformatör ve reaktör tasarımı, elektriksel ve termal modellenmesi ve benzetimi konu başlıklarında araştırmalar gerçekleştirmektedir.
E-Posta: osonmez@sonmeztrafo.com.tr

Bora ALBOYACI
Elektrik mühendisliği lisans eğitimini 1995 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi'nde, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini ise sırasıyla 1995 ve 1998 yıllarında Kocaeli Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Halen aynı üniversitede Elektrik Tesisleri ABD'da öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2008-2010 yılları arasında Milli Güç Kalitesi Projesi'nde ODTÜ'de doktora sonrası araştırmacı olarak görev yapmıştır.2012 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Teknoparkta bulunan GENETEK Güç & Enerji Ltd. Şti.'nde Ar-Ge Müdürlüğü görevini yürütmektedir. Uzmanlık alanları enerji dağıtım sistemleri, güç kalitesi ve manyetik dizayn uygulamalarıdır.
E-Posta: alboyaci@kocaeli.edu.tr

Yunus Berat DEMİROL
Elektrik mühendisliği lisans programını Kocaeli Üniversitesi'nde 2020 yılında tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans programını 2024 yılında tamamlamıştır. 2024 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde başladığı doktora programına devam etmektedir. 2020 yılından beri Genetek Güç Enerji şirketinde elektrik mühendisi olarak transformatörler başta olmak üzere güç sistemi ekipmanlarının sonlu elemanlar analizi ile elektriksel parametrelerinin hesaplanması alanında çalışmaktadır.
E-Posta: yunusberat.demirol@genetek.com.tr

Beyanlar:
Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.
Yazarların katkıları: Serenay ÇÜRÜKOVA KALE: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Doğrulama, Kaynaklar, Görselleştirme. Oluş SÖNMEZ: Kaynaklar, Doğrulama, İnceleme, Kontrol. Bora ALBOYACI: İnceleme, Kontrol. Yunus Berat DEMİROL: Yazılım, Görselleştirme, Kavramsallaştırma.