

Güç Transformatörünün Kısa Devre Durumundaki Elektromanyetik Kuvvetlerin 3D Analizi.

3D Analysis of Electromagnetic Forces in Short Circuit State of Power Transformer.

Feyyaz ALPSALAZ¹, M. Salih MAMIŞ², Atilla MAMIŞ³

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Akdağmadeni Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü
feyyaz.alpsalaz@yobu.edu.tr,

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
mehmet.mamis@inonu.edu.tr

³Eren Transformer, Elektrik Dizayn Mühendisi
proje4@erentrafo.com.tr

Özet

Güç transformatörleri kısa devreye maruz kaldığında transformatörde ortaya çıkan elektromanyetik kuvvetler sargılarda önemli mekanik etkiler meydana getirmektedir. Bu geçici kuvvetler, büyük tahribatlara neden olmasının yanında, müdahale olmaması durumunda transformatörün patlamasına dahi neden olabilecek ciddi mekanik hasarlara neden olmaktadır. Bu nedenle, kısa devre akımına dayanma yeteneği, bir güç transformatörünün en temel özelliklerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, gerçek boyutları ve tasarımı bilinen 15 MVA transformatörün, en sık görülen arıza türlerinden biri olan tek faz arıza durumundaki sarılarda meydana gelen elektromanyetik kuvvetler incelenmiştir. Transformatörde oluşan elektromanyetik kuvvetler ANSYS@Maxwell ortamında 3D olarak tasarlanıp kuvvet analizleri Sonlu Elemanlar Yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kısa devre, Elektromanyetik kuvvetler, Traformatör 3D Analizi

Abstract

When the power transformer is exposed to a short-circuit state, the electromagnetic forces arising in the transformer act on the windings. These temporary forces cause serious mechanical damage that may even cause the transformer to explode, as well as causing great damage. Therefore, the ability to withstand short-circuit current is considered an essential feature of a power transformer. In this study, electromagnetic forces occurring in the single-phase fault state of a 15 MVA transformer whose actual dimensions and design are known, which is one of the most common fault types, are investigated. Electromagnetic forces were designed in

3D in ANSYS@Maxwell environment and force analyzes were performed with Finite Element

Keywords: Short circuit, Electromagnetic forces, Transformer 3D Analysis

1. Giriş

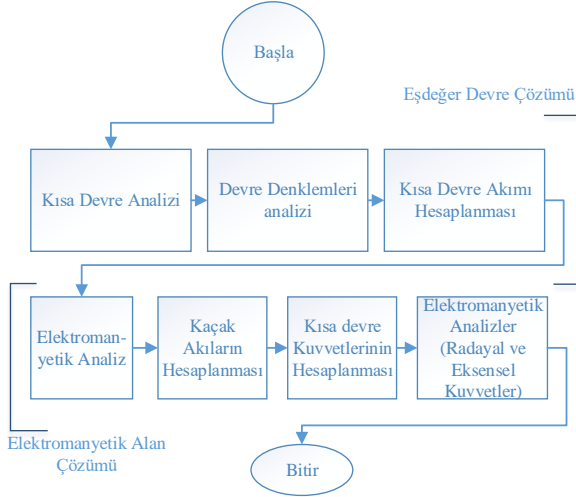
Enerji altındaki bir elektrik güç sisteminde kısa devre durumu oluştuğunda, bir transformatöre uygulanan kısa devre akımı sargılara akar. Bu geçici akım, bir transformatör üzerinde kritik mekanik baskıya neden olan kısa devre kuvvetine neden olur. Bu nedenle, bir transformatörün, tek hattan toprağa kısa devre, üç fazlı kısa devre ve benzeri gibi güç sistemi arızalarının ardından gelen ani akıma dayanacak şekilde tasarlanması gerekir [1-2]. Elektrik güç sistemine bir transformatör monte edilmeden önce, güvenli çalışma için kısa devre akımından kaynaklanan elektromanyetik kuvvet tahmin edilmelidir. Ancak transformatör sargılarının karmaşık yapısı nedeniyle geçici elektromanyetik kuvveti doğru bir şekilde tahmin etmek kolay değildir [3]. Bu kuvvetleri doğru tahmini için literatür incelendiğinde birçok farklı analiz çalışmaları yapılmış olduğu görülmüştür. Bu çalışmalar içinde Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) verilerin gerçek değerlere çok yakın olduğu belirlenmiştir. Özüpak ve Mamiş çalışmasında [4], bir güç transformatörünün 3 faz kısa devre durumundaki manyetik vektör potansiyeli, elektromanyetik akı yoğunluğu ve elektromanyetik kuvvetlerini SEY ile incelemiş olup gerçeğe yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Jahi ve Iskender çalışmasında [5], 3 faz kısa devre durumunda olan bir transformatördeki radyal ve eksenel yönlerden oluşan elektromanyetik kuvvetleri SEY ile gerçekleştirmiş olup simülasyon sonuçları ile analitik sonuçların birbiriyle uyum içinde göstermiştir.

Bu çalışmada, tasarım boyutları ve etiket değerleri bilinen güç transformatörü Maxwell@Ansys

programında 3D olarak tasarlandıktan sonra, tek faz arıza durumundaki Transformator üzerine etki eden radyal ve eksensel kuvvetleri SEY kullanarak analiz edilmiştir.

2. Kısa Devre Elektromanyetik Kuvvet Analizi

Bu bölümde Transformator'e ait Elektromanyetik analiz yöntemi, Kısa Devre Akımı ve Kaçak Akı Tahmini ve Elektromanyetik Kuvvet Hesabı ile ilgili matematiksel model ve hesaplamalara ait bilgiler vermektedir. Transformatorün 3D modelinin oluşturulmasına yönelik akış diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Transformator 3D modeli

2.1. Elektromanyetik analiz yöntemi

Kısa devre akımı ve kaçak akıdan kaynaklanan Lorentz kuvveti, sargılarda mekanik baskı ve deformasyona neden olur. Sargılar üzerinde ortaya çıkan mekanik kuvveti tahmin etmek için sıralı FEM önerilmiş olup, akış şeması Şekil 1'deki gibidir.

2.2. Kısa Devre Akımı ve Kaçak Akı Tahmini

Çok yüksek geçici akım, transformator sargılarına akar. Kısa devre akımı, transformator empedansı ve sistem empedansının toplamının ters bir fonksiyonudur. Tek fazlı bir transformator göz önüne alındığında, geçici durumdaki kısa devre akımı yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [3,7].

$$I_{sc}(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cos \omega t \quad (1)$$

Burada, I_{sc} kısa devre akımı [A], I_0 başlangıç akımı [A], sırasıyla R , L ve X gösterimleri direnç [Ω], indüktans [H] ve reaktansları [Ω], V_m ise Maksimum voltajı ifade etmektedir.

Bağlantı ve kaçak akı olan geçici manyetik akı, çekirdeğin manyetizasyon özelliğine bağlıdır [8]. Özellikle, kısa devre oluştuğunda, kısa devre akımından kaynaklanan kaçak akı yoğunluğu, kararlı durum

çalışmasına göre birkaç kat büyük ölçüde artar. Kaçak akı radyal ve eksensel yönlerden oluşur. Kaçak akımın bileşenleri, aşağıdaki gibi vektör potansiyeli kullanılarak ifade edilir [9].

$$B_r = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z}, B_\phi = 0, B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial A_\phi}{\partial r} \quad (2)$$

Burada B_r , B_ϕ ve B_z sırasıyla, kaçak akı yoğunluğunun sızıntı yönlü bileşenlerini [T], A_ϕ ise manyetik vektör potansiyelini ifade etmektedir.

2.3. Elektromanyetik Kuvvetlerin Hesaplanması

Bir transformatorün üretilen elektromanyetik kuvveti aşağıdaki gibi Lorentz kuvveti ile ifade edilir.

$$d\vec{F} = i\vec{dl} \times \vec{B} \quad (3)$$

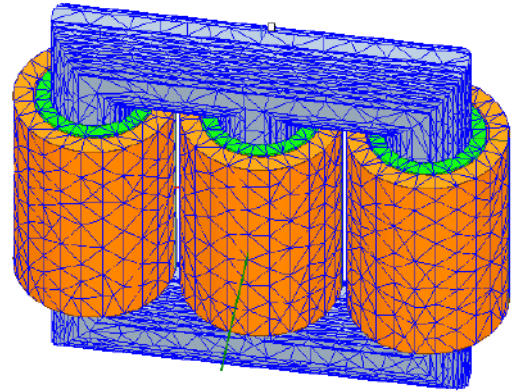
Burada, \vec{F} elektromanyetik kuvveti[N], \vec{B} ise kaçak akı yoğunluğunu[T] temsil etmektedir. Sargılarda üretilen mekanik baskı, dış kuvvetlerden kaynaklandığında çekme ve iç kuvvetlerden kaynaklandığında sıkıştırıcı etkiye sahiptir. Elektromanyetik kuvvet, akımın karesiyle orantılı olduğunda dolaylı tek yönlü titreşimli bir tiptedir. Kısa devre arızası oluştuğunda elektromanyetik kuvvet aşağıdaki [7,10] olarak ifade edilir.

$$\vec{F}(t) = F_m \left[\frac{1}{2} + e^{-2\frac{R}{L}t} - 2e^{-\frac{R}{L}t} \cos \omega t + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right] \quad (4)$$

Kısa devre kuvveti, denklem 5'te ifade edildiği gibi radyal ve eksensel yönlerden oluşur.

$$\vec{F} = \int_v J_\phi \hat{\phi} \times (B_r \hat{r} + B_z \hat{z}) \partial v = F_r \hat{r} + F_z \hat{z} \quad (5)$$

Burada, J_ϕ yönlü kısa devre akım yoğunluğunu, sırasıyla \hat{r} , $\hat{\phi}$ ve \hat{z} silindirik koordinat düzemelerini, ∂v ise hacimsel kapalı integrasyon operatörünü temsil etmektedir. Böylelikle, radyal ve eksensel olarak yönlendirilmiş kuvvetler sargılardaki her bir iletken üzerindeki elektromanyetik analizler hesaplanır.



Şekil 2. Transformator 3D modeli

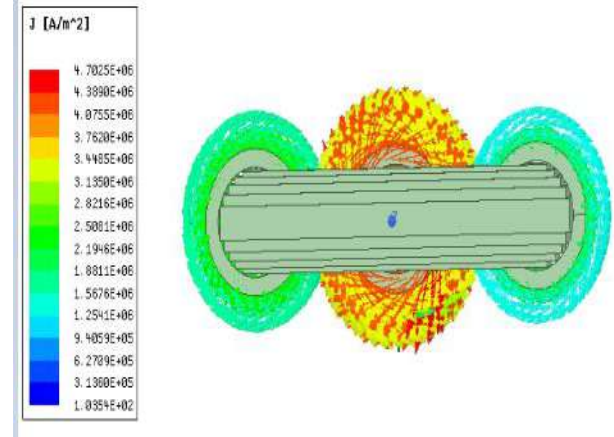
3. Transformatör modeli ve Ansys@Maxwel analizi

Gerçek boyutları ve etiket değerli bilinen Transformatörün 3D elektromanyetik geçici rejim modeli Şekil 2’de gösterilmiştir. Tasarım düşük frekanstaki Transformatör için oluşturulan SEY modeli ile analiz edilmiştir. Transformatör çekirdeği ve sargılarına dair bazı bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

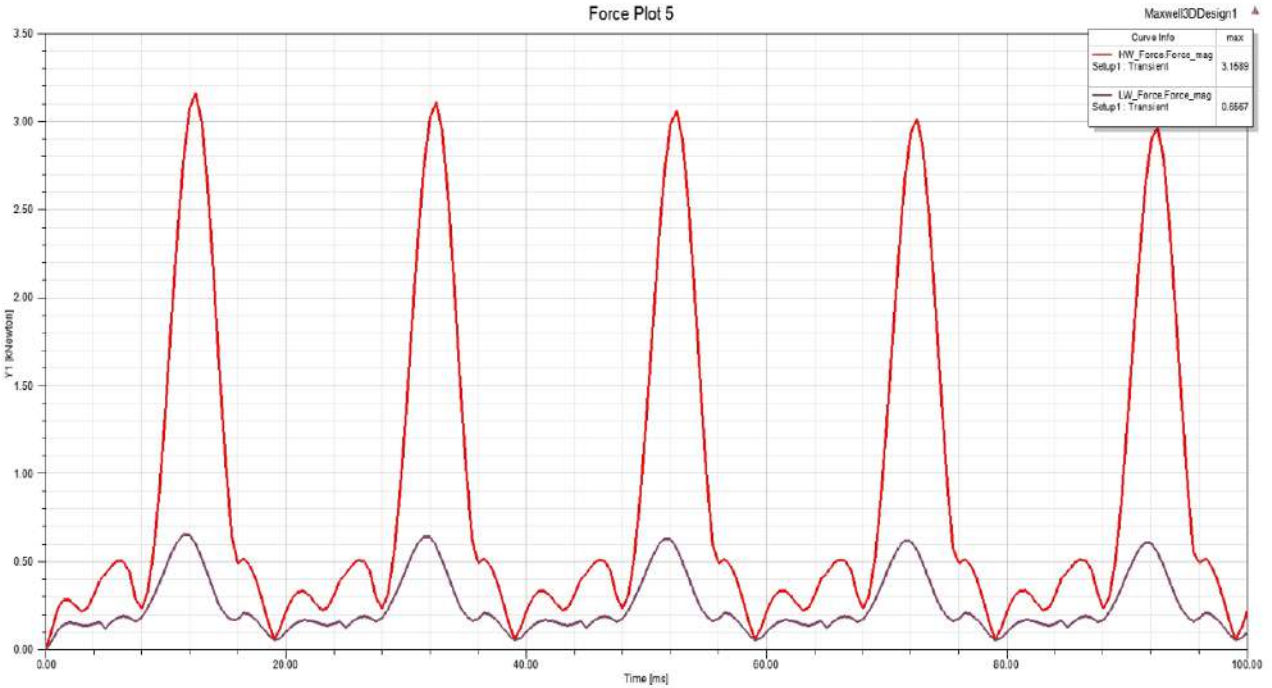
Tablo 1. Transformatöre ait tasarım öncesi bilgiler

Etiket Bilgisi	Değer
Transformatör Gücü	15 MVA
YG/AG Gerilimleri	33.000 / 11.000 V
Nüve Kaybı	12.000 W
Bakır Kaybı	97.000 W
Uk	%11
IO	%0.44
YG/AG bağlantı Tipi	DELTA / YILDIZ
YG/AG Spir Sayısı	665/128 Tur
YG/AG faz Akımı	152/785 A

Transformatör analizinde geçici durum halleri 0.08 sn ile 0.1s arasındaki geçici durumları değerlendirilmiş olup, analizler 0.005 s aralıklar ile değerlendirilmiştir. Transformatör Tasarım yönüne göre Soldan sağa doğru faz sargı sırası C-A-B şeklinde tasarlanmıştır. Şekil 3’te transformatör alçak gerilim sargısındaki A fazındaki akım yoğunluğu gösterilmektedir. Kısa devre anındaki manyetik akı yoğunluğunun nominal gerilim ve akımdaki B ve C fazlarındaki dağılıma göre daha fazla yayıldığı transformatör üst görünüşünden görülmektedir.

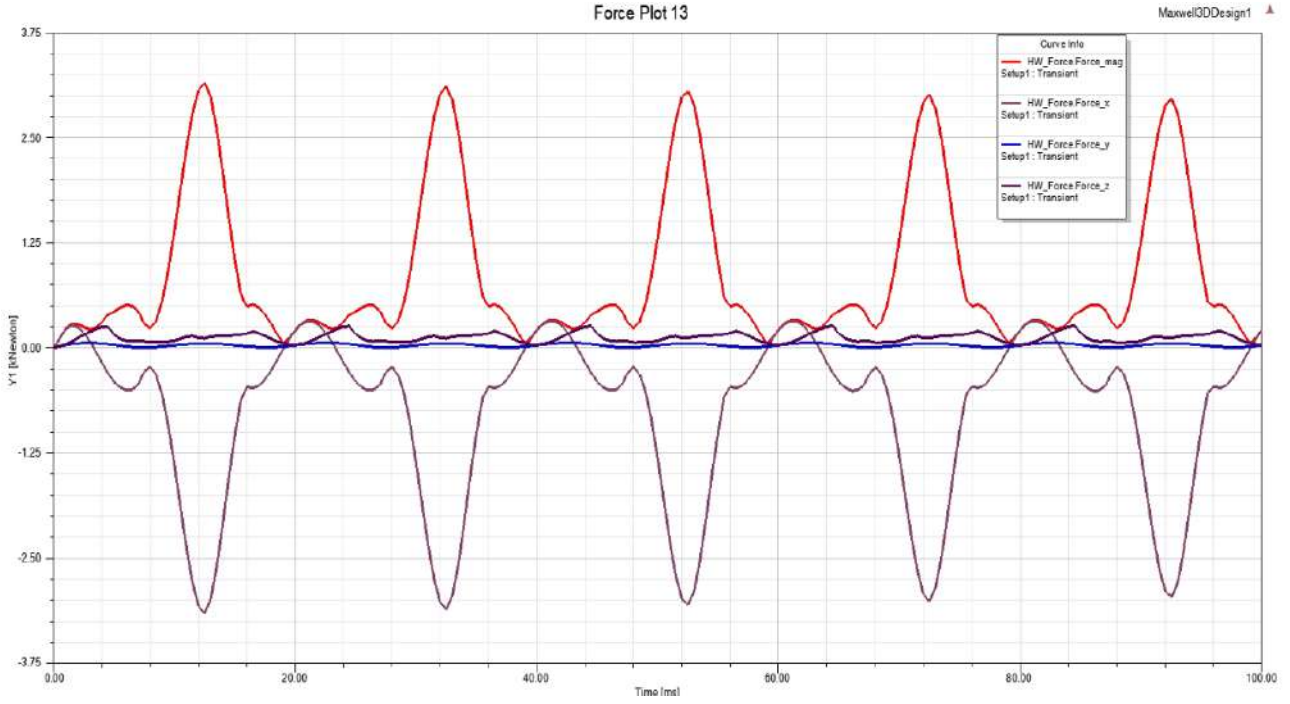


Şekil 3. AG fazına ait Manyetik akım yoğunluğu

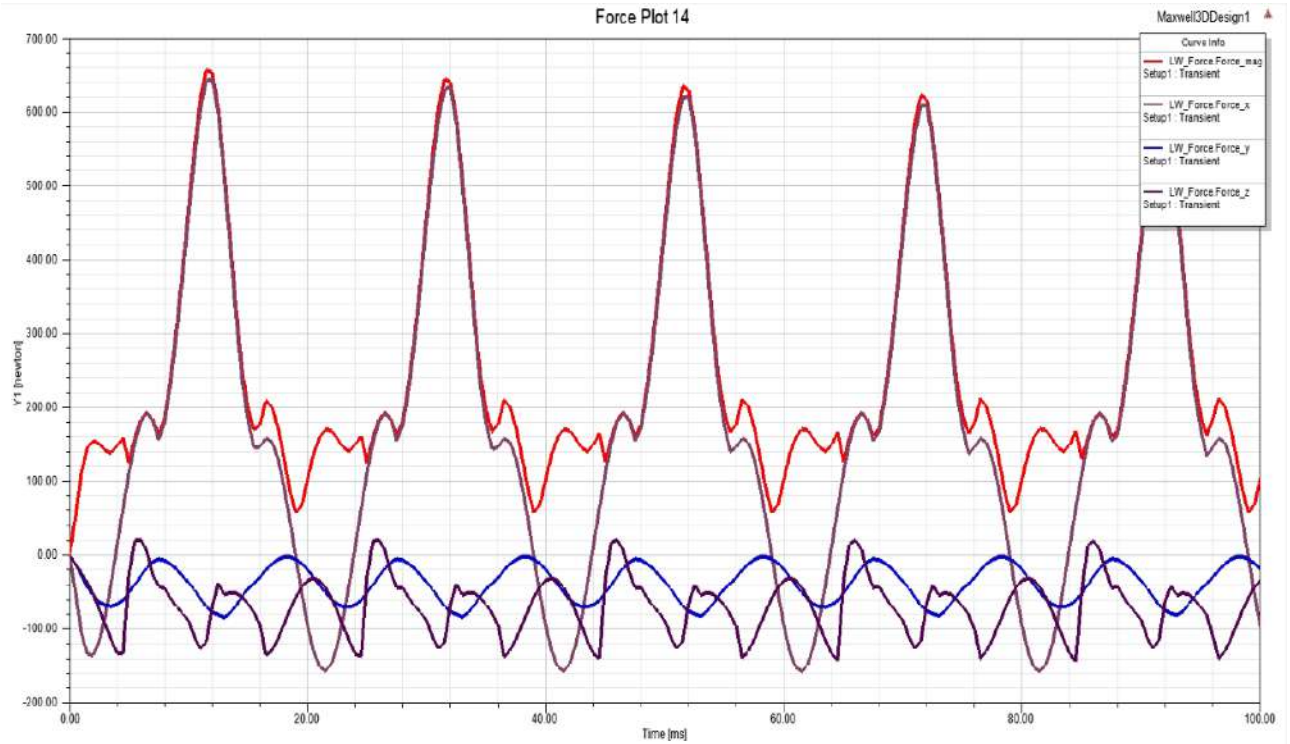


Şekil 4. AG ve YG sargılarına etki eden elektromanyetik radyal kuvvetler

Transformatörde meydana gelen alçak gerilim A-Faz arızası sonucunda AG ve YG sargılarına etki eden radyal kuvvetler şekil 4’te gösterilmektedir. Analiz sonuçlarına göre YG sargılarındaki radyal kuvvetler 3159 N, AG sargılarında ise 656 N etki ettiği belirlenmiştir. Şekil 5’te görüldüğü üzere YG sargısındaki her bir iletken hücrenin radyal kuvvetler incelediğinde, radyal kuvvet negatif bir yönü göstermektedir.



Şekil 4. YG sargılarına etki eden elektromanyetik radyal kuvvetler



Şekil 5. AG sargılarına etki eden elektromanyetik radyal kuvvetler

YG ve AG sargılarının her bir iletkeninin üzerindeki eksensel kuvvetler Tablo 2’de verilmiştir. YG sargılarında eksensel kuvvet (-z) yönlü iken, AG sargılarında eksensel kuvvetler ise (+z) yönlü olduğu görülmektedir. Net kuvvetin ise dikey çekme kuvveti gibi davrandığı değerlendirilmektedir.

Tablo 2. YG ve AG sarılarının aksel elektromanyetik kuvvetleri

Zaman	F(x)	F(y)	F(z)	Mag(F)	Zaman	F(x)	F(y)	F(z)	Mag(F)
0.080000s	216.81	32.491	42.651	223.35	0.080000s	-96.714	-19.415	-33.806	104.28
0.080500s	289.55	41.382	51.014	296.91	0.080500s	-130.9	-29.519	-30.776	137.67
0.081000s	325.24	49.704	69.735	336.33	0.081000s	-151.86	-40.246	-34.053	160.75
0.081500s	320.31	56.638	96.967	339.43	0.081500s	-157.53	-50.546	-43.3	171.01
0.082000s	275.15	61.506	130.06	310.5	0.082000s	-147.33	-59.411	-57.628	168.99
0.082500s	194.03	63.829	165.76	263.06	0.082500s	-122.23	-65.974	-75.623	158.15
0.083000s	84.749	63.379	200.55	226.76	0.083000s	-84.628	-69.593	-95.488	145.34
0.083500s	-42.278	60.2	231.02	242.45	0.083500s	-38.119	-69.914	-115.29	140.12
0.084000s	-174.77	54.605	254.16	313.25	0.084000s	29.921	-66.902	-133.04	149.46
0.084500s	-299.67	47.134	265.18	402.92	0.084500s	63.253	-60.803	-143.92	168.56
0.085000s	-403.78	38.325	181.47	444.34	0.085000s	110.81	-51.264	-47.77	131.11
0.085500s	-473.12	28.328	119.05	488.69	0.085500s	152.98	-39.82	13.219	158.63
0.086000s	-507.26	18.598	92.449	515.95	0.086000s	180.57	-28.383	20.069	183.89
0.086500s	-503.62	10.381	80.25	510.07	0.086500s	191.65	-17.516	7.6904	192.61
0.087000s	-453.16	47.545	83.155	460.75	0.087000s	183.62	-91.882	-19.794	184.91
0.087500s	-314.26	2.443	83.485	325.17	0.087500s	155.07	-48.968	-43.745	161.19
0.088000s	-225.35	46.989	66.972	235.13	0.088000s	162.93	-58.734	-42.063	168.37
0.088500s	-294.47	10.357	69.259	302.68	0.088500s	208.32	-10.572	-56.073	215.99
0.089000s	-504.83	17.551	71.503	510.17	0.089000s	269.81	-17.435	-67.615	278.7
0.089500s	-843.98	25.497	76.448	847.82	0.089500s	343.65	-25.781	-77.048	353.12
0.090000s	-1279.9	33.155	86.971	1283.2	0.090000s	423.69	-34.706	-88.195	434.16
0.090500s	-1762.7	40.309	110.61	1766.6	0.090500s	499.49	-44.753	-110.97	513.62
0.091000s	-2233.6	46.796	134.43	2238.1	0.091000s	560.89	-56.228	-126.59	577.75
0.091500s	-2631.3	51.967	140.7	2635.6	0.091500s	597.95	-67.516	-113.52	612.36
0.092000s	-2894.6	54.849	119.17	2897.6	0.092000s	597.68	-74.465	-61.863	605.47
0.092500s	-2963.1	56.105	118.76	2966	0.092500s	548.16	-78.69	-41.809	555.35
0.093000s	-2789.3	55.934	138.27	2793.3	0.093000s	469.07	-81.11	-54.18	479.11
0.093500s	-2415	53.54	143.2	2419.9	0.093500s	383.46	-75.548	-51.164	394.17
0.094000s	-1925.1	48.171	148.31	1931.4	0.094000s	292.69	-65.347	-52.837	304.52
0.094500s	-1403.8	41.112	154.46	1412.9	0.094500s	217.88	-54.377	-60.376	232.54
0.095000s	-922.62	33.63	160	937	0.095000s	168.77	-45.583	-69.873	188.26
0.095500s	-529.25	26.528	167.39	555.73	0.095500s	134.49	-38.397	-80.919	161.58
0.096000s	-457.35	20.012	190.16	495.71	0.096000s	145.97	-29.775	-108.5	184.3
0.096500s	-477.32	13.887	206.5	520.25	0.096500s	158.91	-20.16	-140.24	212.9
0.097000s	-443.52	93.274	179.42	478.53	0.097000s	152.6	-11.771	-130.26	200.98
0.097500s	-367.8	71.746	146.13	395.83	0.097500s	129.24	-55.074	-113.81	172.3
0.098000s	-261.58	76.835	112.36	284.79	0.098000s	92.56	-20.486	-94.515	132.31
0.098500s	-136.89	10.861	82.251	160.07	0.098500s	46.737	-18.045	-74.855	88.266
0.099000s	-6.704	16.433	59.146	61.751	0.099000s	-34.971	-48.469	-57.022	57.334
0.099500s	115.8	23.871	45.468	126.68	0.099500s	-53.095	-10.905	-42.854	69.097
0.100000s	218.43	32.454	42.636	224.91	0.100000s	-97.138	-19.4	-33.781	104.66

4. Sonuçlar

Çalışmada gerçek tasarımı, boyutları ve etiket değerleri bilinen bir güç transformatörü Ansys@Maxwell programında tasarlandıktan sonra, alçak gerilim A-faz sargılarına kısa devre durumundaki etki eden geçici elektromanyetik kuvvetlerin tahmini için SEY kullanılmıştır. Kısa devre geçici akımlarından kaynaklanan manyetik vektör potansiyeli, manyetik akı yoğunluğu ve elektromanyetik kuvvetler SEY ile analiz edilmiştir. Geçici durum analizleri 0.08s-0.1 s aralığında 0.0005s aralıklar ile analiz edilmiştir. Transformatör modelinin eksenel ve radyal elektromanyetik kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu çalışma ile kullanılan nümerik modelleme tekniğinin transformatörlerin tasarım aşamasında kolaylık sağlaması amaçlanmıştır.

5. Kaynaklar

- [1] Zakrzewski K., Tomczuk B, and Koterak D., “Simulation of forces and 3-D field arising during power autotransformer fault due to electric arc in HV winding,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 1153–1156, Feb. 2002.
- [2] Lure A. “Transformer connection under no-load and short-circuit events”, *Russian Electr. Eng.*, vol. 79, no. 2, pp. 57–70, 2008.
- [3] Peter GP, “Calculations for short circuit withstand capability of a distribution transformer,” *Int. J. Adv. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 142–150, 2011.
- [4] Özüpak Y. “Kısa Devre Durumunda Güç Trafosunda Meydana Gelen Elektromanyetik Kuvvetlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi”. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 6(10): 10-22, 2019.
- [5] Jahi A., Iskender I. “Analysis of Short Circuit Electromagnetic Force in a Three Winding Transformer Used in Solar System”. In *2021 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2021. pp. 393-397. IEEE.
- [7] Bertagnolli G. *Short-Circuit Duty of Power Transformer*” Zurich, Switzerland: ABB Ltd., 2007.
- [8] Schulz CA., Roger D., Duchesne S., and Vincent JN. “Experimental characterization of interlamination shorts in transformer cores,” *Trans. Magn.*, vol. 46, no. 2, pp. 614–617, Feb. 2010. IEEE.
- [9] Kulkarni SV. and Khaparde SA. *Transformer Engineering*. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [10] Mukund RP. “Instability of the continuously transposed cable under axial short-circuit forces in transformers,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 1, pp. 149–154, Jan. 2002.