

Transformatörde Kısa Devre Kuvvetleri Short Circuit Forces In Transformers

Serhat GÜNERİ, Güven KÖMÜRĞÖZ, Tayfun GÜNDOĞDU

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi

serhat.gnr@gmail.com, komurgoz@itu.edu.tr, tgundogdu@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada 25 MVA 3 faz bir güç transformatörünün ANSYS Maxwell® benzetim programı kullanılarak 2 boyutlu (2D) tasarımı yapılmış, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile kısa devre çalışmasına ilişkin sargılarında meydana gelen elektromanyetik aksiyal ve radyal kuvvetler hesaplanmış ve incelenmiştir. Analizler sonucunda nominal ve kısa devre çalışmaya ilişkin demir çekirdek, alt ve üst gerilim sargıları ve hava aralığında meydana gelen manyetik akı ve kaçak akı dağılımlarıyla birlikte alt ve üst gerilim sargılarında meydana gelen kuvvet dağılımları elde edilmiştir. Kuvvet hesaplamaları analitik olarak da hesaplanmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Kısa devre kuvvetlerinin sargıları hangi noktada daha çok zorladığı tespit edilmiş ve gösterilmiştir.

Abstract

In this study, the radial and axial electromagnetic forces due to short circuit currents on both inner and outer of low voltage and high voltage windings are calculated. 25 MVA, 3-phase large power transformer is modeled in ANSYS Maxwell® software program using the Finite Element Method (FEM). This model leads to the precise results of the magnetic flux density on iron core, air gap, inner and outer windings, radial and axial electromagnetic forces. Force calculations are also done analytically and derived results are compared with FEM analysis and commented on. Enforced points of the coil by short circuit forces are detected and illustrated.

1. Giriş

Güç transformatörlerinin buluşu 19. Yüzyılın sonlarına dayanır. Daha önceleri, elektrik ihtiyacı doğru akım sistemleri ile sadece yakında bulunan yükler için karşılanmaktayken sabit alternatif akımın kullanılmasıyla birlikte elektrik, enerji iletim hatları ile kilometrelerce uzağa taşınabilmektedir. Bu işlem gerçekleştirilirken güç istasyonları kurulmuş ve transformatlere ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Böylece elektrik iletim ve dağıtım sistemleri transformatlere ile çok daha kapsamlı ve geniş bir seviyeye ulaşmıştır [1].

Transformatörler enerji üretim ve dağıtım sistemlerinde güvenilirlik ve performans açısından maliyeti yüksek ve kritik bir ügedir. Gelişen teknoloji ile transformatörlerin boyutu gittikçe artmıştır. Gerilim seviyesi yükseldikçe yeni bir

transformatör tasarlamak için gereken zaman giderek artış göstermiş ve önem kazanmıştır. Transformatör tasarımındaki en önemli aşamalardan birisi kısa devre akımının karesiyle değişen ve etkili hale gelen aksiyal ve radyal kuvvetlerin hesabıdır. Kaçak akı ve kısa devre akımının etkileşimi sonucu meydana gelen büyük kısa devre kuvvetleri, sargılarda yer değiştirmeye neden olmaktadır. Bu kaçak akılar aynı zamanda transformatörün içinde büyük ısınmalara sebep olmaktadır. Kısa devre akımı büyük güçlü transformatlarda nominal akımdan 8-10 kat daha büyüktür. Bu yüzden kısa devre durumdan ortaya çıkan kuvvetler binlerce kat daha yüksek değerlere ulaşabilir. Bu büyük güçlerin yol açtığı en büyük zarar transformatör sargılarında meydana gelen deformasyonlardır. Kısa devre kuvvetlerinin neden olduğu transformatör hataları güç üreticileri için büyük bir önem teşkil eder. Bu tehlikelerden sakınmak için önceden yapılan düzgün hesaplamalar ile termal ve mekanik zorlanmalara karşı sargıların nasıl yerleştirileceği ve kalıcı deformasyonlar ile sargıların hareketinin nasıl önüne geçileceğinin hesabı yapılabilir [2].

2. Transformatör Sargılarına Etkiyen Kuvvetler

Normal işletme koşulları için tasarlanan transformatlarda tüm mukavemet hesapları bu kuvvetler doğrultusunda yapılır. Transformatör kısa devre olduğu zaman akacak kısa devre akımının anma akımına göre çok büyük olması kısa devre kuvvetlerinin çok büyük değerlere çıkabileceğini gösterir. Transformatörün imalatını bu kuvvet değerlerine göre yapmak maliyeti aşırı derecede arttıracığından, transformatörün kısa devre olmaması için bütün imkânlar kullanılır [3].

Sargılar arasındaki manyetik alan alt ve üst gerilim sargılarının kuvvet üretmesine neden olur. Bu kuvvetlerin hesaplanması son derece karmaşıktır. Transformatlarda iki farklı kuvvet meydana gelir. Bunlardan ilki *radyal* kuvvetlerdir. Radyal kuvvetler ile alt gerilim sargısı çekirdeğe doğru, üst gerilim sargısı ise dışa doğru genişler ve iletken bükülür. Oluşan diğer kuvvetler ise *aksiyal* kuvvetlerdir. Aksiyal kuvvetler sargıları sıkıştırarak şekilde bir basınç oluşturur ve bunun sonucunda sargılarda çökme veya iletken devrilmesi gibi durumlar meydana gelir [1, 4].

2.1. Radyal Elektromanyetik Kuvvetler

Radyal manyetik kuvvet sargılardan akan akım ile kendi yarattığı manyetik akımın aksiyal bileşeni ile etkileşime girdiği anda artar. Dıştaki sargının çapı basıncın etkisiyle genişler,

içteki sargı ise üzerindeki baskının etkisiyle çekirdeğe doğru uzama eğilimindedir. Silindirik sargıların güç transformatörleri için seçilmesi daha akılcıdır, çünkü bu geometrinin mekanik olarak radyal kuvvetlere karşı dayanımı çok daha güçlüdür.

Bu kuvvetlerin etkilerini azaltabilmek için alçak gerilim sargılarının demir gövdeye bitişik gelen taraflarına destekleyici ve yalıtkan malzemeler ile radyal hareketleri kısıtlayacak tedbirlerin alınması gereklidir. Bunların ihmal edilmesi halinde sargı silindireleri üzerinde deformasyonlar meydana gelir.

Radyal kuvvetler sargı uzunluğunun tamamı boyunca ortaya çıkar ve genlikleri aksiyal akı bileşenlerinin en büyük değeri aldığı anda maksimum seviyededir. Radyal kuvvetler sargı merkezlerinde en büyük değerdedir ve sargı başlarına doğru gidildikçe bu kuvvetlerin etkisi küçülmektedir [1, 4, 5, 6].

2.2. Aksiyal Elektromanyetik Kuvvetler

Aksiyal kuvvetlerin oluşmasındaki en büyük etken sargı boyunca uzanan kaçak akının radyal bileşenidir. Bu kuvvetin iki ögeden oluşur. Sargılarda amper-sarım dengeli ise bu kuvvetler sargıyı ortadan sıkıştırma eğilimindedir ve simetrik sargılarda bu kuvvetler çok küçük değerdedir. Bu kuvvet sıkıştırıcı kuvvet olarak adlandırılır. Eğer sargılarda bir simetriden bahsedilmiyorsa bu kuvvetler itici kuvvet olarak isimlendirilir ve sargıları orta yerinden koparma eğilimindedir.

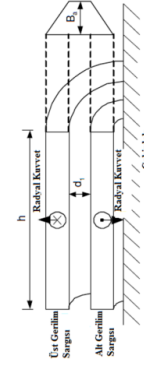
Aksiyal kuvvet dağılımı çekirdek çevresi boyunca meydana gelir ve alçak gerilim sargılarında meydana gelen kuvvetlerin büyüklüğü yüksek gerilim sargılarında meydana gelen kuvvetlerin büyüklüğünün 1,5 ile 3 kat arasında daha büyük bir değer alır [5].

3. Radyal Elektromanyetik Kuvvet Hesabı

Aralarında 180° farz farkı olan alt ve üst gerilim sargılarını etkileyen radyal kuvvetler kanalı genişletme eğilimindedir. Bu kuvvetin büyüklüğü ise kanaldaki dağılıma alanının aksiyal bileşeni ile hesaplanır. Radyal kuvvetler dış sargının çapını genişletme eğiliminde olan baskı meydana getirir ve aynı zamanda iç sargılarda eğilmeye sebep olan sıkıştırıcı bir etki bırakır. Bu kısımda çekirdek tip silindirik sargılı transformatörlere ait yaklaşık radyal kuvvet hesabı ele alınmıştır [3, 4].

Hesapların yapılması için kullanılan hesaplar geniş bir aralıkta olabilir. Basit deneye dayalı hesap yapılan yöntemlerde basitleştirilmiş yaklaşımlara dayanılarak hesap yapılır. Deneysel yapılan çalışmalar ardından elde edilen sonuçlara dayanarak ortaya konan düzeltme faktörleri ile yaklaşık bir hesaplama yapmak mümkündür. Düzeltme faktörlerinin kullanılmasının amacı hata oranlarını azaltmaktır. Sonuç olarak radyal kuvvetler basit hesaplama yöntemleriyle kolay bir şekilde hesaplanabilmektedir. Daha karmaşık hesaplamalar daha kesin ve gerçekliğe yakın sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu yöntemlere örnek olarak iki veya üç boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) örnek verilebilir.

Kuvvet hesaplamaları yapılırken transformatör sargıları 2 boyutlu olarak gösterilebilir. Şekil 1’de 2 boyutlu olarak transformatör sargıları görülmektedir. Radyal kuvvet dıştaki sargının iletkenine dışarıya doğru uzatacak şekilde bir etki gösterirken içteki sargı için büzülme ve göçme etkisi gösterir. Radyal kuvvetler sargı başlarında göreceli olarak biraz daha az şiddetlidir. Bunun nedeni manyetik akının sargı uçlarında kıvrılması ve yön değiştirmesidir [1, 4].



Şekil: Transformatör sargılarının 2D gösterimi ve radyal kuvvetler [4]

Şekil 1’e göre kanal içindeki aksiyal akı yoğunluğu dağılımı,

$$B_A = 4\pi 10^{-7} I_k \frac{N}{h} \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Burada, I_k kısa devre akımı [A], N sargının sarım sayısı ve h alt ve üst gerilim sargı uzunluğu [m] olarak alınmaktadır. Kuvvet sargılardan akan akım ile kendi yarattığı manyetik akının aksiyal bileşeni ile etkileşime girdiği için akının aksiyal yöndeki bileşeni dikkate alınır.

Dış sargı bir halka gibi ele alınıp halkasal bir şiddet hesabı yapılır. Bu durumu ince bir silindirik parçası olarak ele almak mümkündür. Bu sayede yüzey üzerindeki toplam kuvvet hesabı kolayca yapılır. Dış sargının çapı D_d ve iç sargının çapı ise D_i olarak ifade edilir. Her iki yarıdaki enine uzanan kuvvetler çap üzerinde eşit olarak dağılmaktadır.

Sargıların her biri B_A endüksiyonunun yarısı ile halkalandığına göre sargıları etkileyen radyal kuvvet

$$F_R = I_k N \frac{B_A}{2} \pi D \quad (2)$$

olarak bulunur. Burada D alt ve ya üst gerilim sargısına ait çap değeridir. Hangi sargıya ait kuvvet hesaplanmak isteniyorsa o sargıya ait çap kullanılmalıdır. 2 nolu denklemde B_A ’yı yerine koyarsak

$$F_R = 4\pi 10^{-7} I_k^2 N^2 \pi D \frac{K}{2h} \quad (3)$$

bulunur. Burada K Ragowski düzeltme katsayısı olup,

$$K = 1 - \frac{s}{\pi h} \left(1 - e^{-\frac{s}{\pi h}} \right) \quad (4)$$

formülü ile hesaplanır. Formülde yer alan s değeri,

$$s = d_1 + c_1 + c_2 \quad (5)$$

ile hesaplanır. Burada, d_1 sargılar arasında yer alan soğutma kanalı boşluğu [m], c_1 ve c_2 , alt ve üst gerilim sargı genişliği [m] olarak temsil edilmektedir. O halde alt ve üst gerilim sargılarında meydana gelen radyal kuvvetler ayrı ayrı aşağıda yer alan denklemler ile hesaplanır. Alt gerilim sargısı için,

$$F_R = 4\pi 10^{-7} I_k^2 N^2 \pi D_i \frac{K}{2h} \quad (6)$$

olarak hesaplanır. Üst gerilim sargısı için ise,

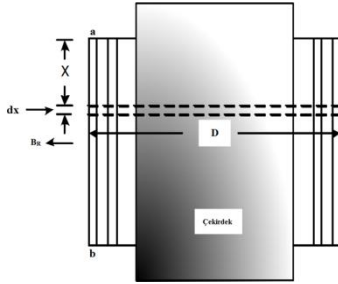
$$F_R = 4\pi 10^{-7} I_k^2 N^2 \pi D_d \frac{K}{2h} \quad (7)$$

ile hesaplanır [3].

4. Aksiyal Elektromanyetik Kuvvet Hesabı

Eş merkezli sargıların herhangi bir noktasındaki amper sarımların toplamı sıfırdır. Dengeli amper sarım olarak isimlendirilen bu durum iki gruba sahiptir. Bunlardan ilki aksiyal alan ve diğeri ise radyal alan üretir. Sargılarda aksiyal kuvvet meydana getiren kısım radyal alanın yarattığı radyal akıdır. Aynı zamanda bu durum yüzde olarak reaktansın çok küçük oranda artışına neden olur. Açık bir şekilde söylenebilir ki eş uzunlukta sargılara sahip, ayar sargısı olmayan sargılar ve aksiyal yer değiştirmeden söz edilemediği durumlarda sargılarda artık amper sarım yoktur ve sargılar arasındaki kuvvet sıfıra eşittir veya çok küçük değerdedir.

Küçük bir aksiyal uzunluk üzerine etki eden bir aksiyal kuvvet ele alınsın. Bu kuvvet sargının x eksenindeki aksiyal mesafesi ve radyal yöndeki sargı genişliğini kapsayacak şekildedir. Bu aksiyal mesafe şekil 2’de de görüleceği gibi dx olarak gösterilmektedir. Bu yüzeyin uzunluğu sargıların dairesel çevresi olan πD şeklinde hesaplanır ve D sargı çapı olarak tanımlanır.



Şekil 2. Radyal akı hesaplama yöntemi [4]

$$B_R = 4\pi 10^{-7} I_k \frac{N}{h} \quad (8)$$

Denklemler 8 manyetik akı dağılımının radyal bileşenidir. Meydana gelen aksiyal kuvvet bu akı tarafından meydana gelir ve bütün yüzey üzerine etkiyen aksiyal kuvvet aşağıdaki gibi gösterilir.

$$F_A = N I_k \pi D B_R d_x \quad (9)$$

Burada B_R akı yoğunluğunun radyal yöndeki bileşenidir. Eğer bir sargı boyunca birim yüzeye düşen amper-sarım aynı ise toplam aksiyal kuvvet,

$$F_A = N I_k \pi D \int_a^b B_R d_x \quad (10)$$

şekindedir. Burada sargı uzunluğu şekil 5’te görüldüğü gibi a ile b noktaları arasındaki mesafedir. Formüldeki $\pi D \int_a^b B_R d_x$ kısmı sargı yüzeyi boyunca akan toplam radyal akı ifadesidir. Birim uzunluktaki amper-sarım aynı olan sargılarda, bu durum dengeli amper-sarım olarak da isimlendirilir, sargının herhangi bir noktası için aksiyal kuvvetin hesaplanmasında bu formül kullanılır. Denklem 8 aksiyal kuvvet denkleminde yazılırsa

$$F_A = 2\pi 10^{-7} N^2 I_k^2 \frac{1}{h^2} \left(\frac{c_1 + c_2}{3} + d_1 \right) \quad (11)$$

elde edilir. bu denklem yazılırken Ragowski düzeltme katsayısı dikkate alınmıştır. Denklemlerde yer alan I_k değeri kaçak akının bobinler arasında yer değiştirdiği alanın ortalama çevresel uzunluğudur. Alt ve üst gerilim sargıları için farklı değerdedir [4,5].

5. Analiz Sonuçları

25 MVA 3 faz güç transformatörü kısa devre çalışma durumu için 75 ms analiz edilmiştir. IEC 60076-5 standardına göre maksimum kısa devre test süresi 2 saniyedir [7].

5.1 Model

Çalışmada ele alınan transformatöre ilişkin plaka değerleri tablo 1’de yer almaktadır. Modelde her bir faza ait sargılar 15 parça bobin olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede sargılardaki kuvvet dağılımı daha iyi bir şekilde incelenmiştir. Alçak ve yüksek gerilim sargıları ile bobinlerin yer aldığı transformatör geometrisi şekil 3’de görülmektedir.

Tablo 1: Transformatör Plaka Değerleri

Anma Gücü [S]	25 MVA
Anma Gerilimi [U]	34,5/6,3 kV
Anma Akımı [In]	241,5/2291,1 A
Anma Frekansı [f]	50 Hz
Bağlantı Grubu	Dyn5
Bağlı Kısa Devre Gerilimi	%9

Plaka değerlerini kullanarak transformatöre ait kısa devre akım ifadesi elde edilmiştir. Elektromanyetik kuvvetlerin hesaplanabilmesi için geçici halde sargılardan geçen akım önemli bir parametredir. Kısa devre çalışmada bu değer nominal çalışma akımına göre çok daha yüksek değerlere çıkmaktadır. Nominal çalışma akımı

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (12)$$

olarak hesaplanır. Bu durumda kısa devre akımı

$$I_k = \frac{I_n}{v_k} \quad (13)$$

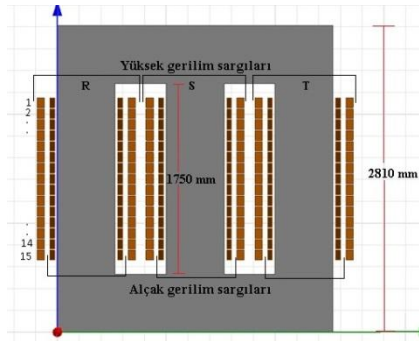
formülü ile hesaplanır. I_n nominal çalışma akımı [A] ve v_k bağlı kısa devre gerilimi [%] şeklinde temsil edilir. Kısa devre akım ifadesi başka bir şekilde aşağıda yer aldığı gibi de hesaplanabilir. Kısa devre akımının tepe değeri olan akım ifadesi ise denklem 14’te yer aldığı gibidir.

$$I_t = \sqrt{2} I_k \quad (14)$$

O halde alt ve üst gerilim sargılarından akan akım ifadeleri aşağıda yer aldığı gibidir.

$$I_{AG} = 2291,2\sqrt{2}\sin 2\pi ft + 25457,7\sqrt{2}\sin 2\pi ft \text{ A} \quad (15)$$

$$I_{YG} = 241,5\sqrt{2}\sin 2\pi ft + 2683\sqrt{2}\sin 2\pi ft \text{ A} \quad (16)$$



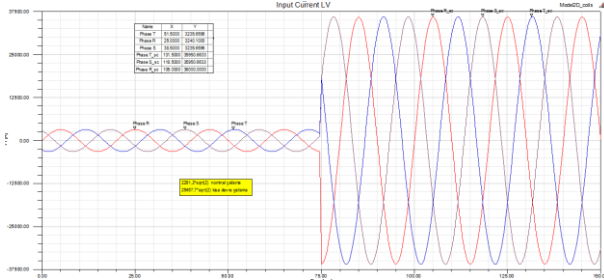
Şekil 3. Bobin numaraları, AG ve YG sargıları

5.2 Elektromanyetik Sonuçlar

Transformatör simülasyonunu gerçekleştirmek için gerekli olan model oluşturulduktan sonra analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon en başından sonuna kadar aşağıda yer alan adımlar takip edilmiştir.

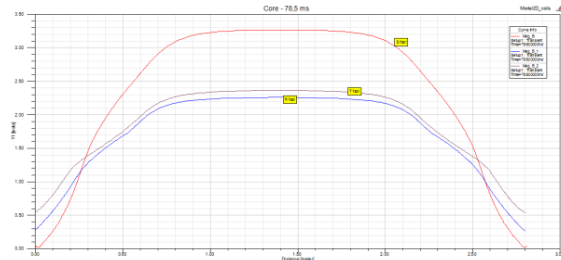
- 1) Geometrik model yaratılması
- 2) Transformatör yapısındaki malzemelerin seçilmesi
- 3) Sınır koşullarının belirlenmesi
- 4) Ağ gözü modeli oluşturulması
- 5) Sargılardan akan akım değerlerinin uygulanması
- 6) Analizler
- 7) Sonuçların değerlendirilmesi

İlk olarak sargılardan akan kısa devre akımı incelenmiştir.



Şekil 4. Alçak gerilim sargılarından akan akım

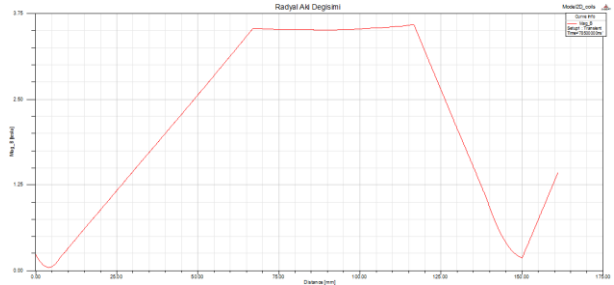
İlk 75 ms nominal çalışma ardından kısa devre akımı sargılardan akmaya başlamıştır. Kısa devre akımı ilk kez 78,5 ms anında tepe değerine ulaşmıştır. Sargılar tarafından meydana getirilen akımın aksiyal yöndeki fazlara ilişkin değeri aşağıda yer aldığı gibidir.



Şekil 5. Kısa devre durumunda aksiyal yönde akı değişimi

Şekil 5'te her 3 faz içinde sargılar arasında kalan demir çekirdek üzerindeki ϕ değişimleri görülebilir. Burada en yüksek akı değeri faz akımı en büyük değerinde olan S fazındadır. T fazında ise akım R fazına göre daha yüksek

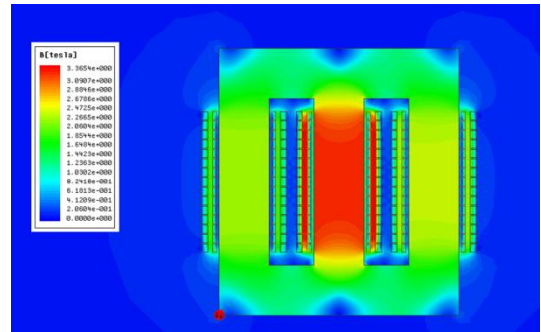
değerdedir ve ϕ 'nin maksimum değeri burada daha büyüktür. Buradan sargılardan geçen akım ile meydana gelen ϕ 'nin doğru orantılı olarak değiştiği çıkarımı yapılır. Çünkü manyetik akımın değişimi akımın değişimine bağlıdır.



Şekil 6. Kısa devre durumunda sargılar arasında radyal yönde akı değişimi

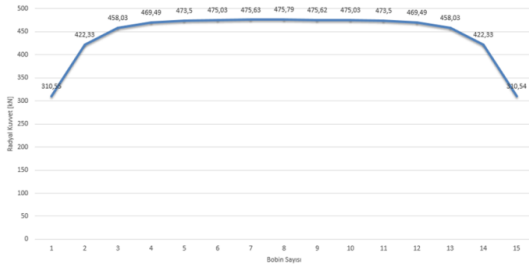
Aksiyal kuvveti meydana getiren radyal manyetik akımın sargı boyunca maksimum ve minimum değere ulaştığı, hava aralığında ise maksimum değerde sabitlendiği şekil 6'da görülmektedir.

Kaçak akılarda meydana gelen artış elektromanyetik kuvvetlerin ani olarak çok yüksek değerlere çıkmasına sebebiyet verir. Demir çekirdek üzerindeki akı yoğunluğu şekil 7'de görülmektedir. Bu akı dağılımı elektromanyetik kuvvetlerin genliğinin bulunmasında önemli rol oynar. Aynı zamanda şekil 7'den transformatör üzerinde meydana gelen bozulmalar kolay bir şekilde anlaşılabilir.

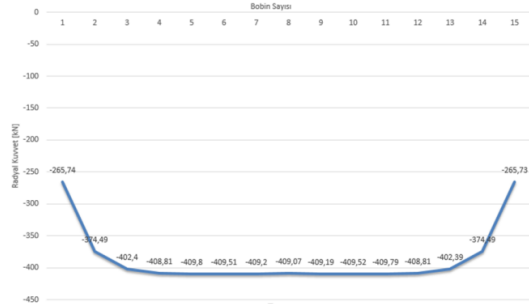


Şekil 7. Transformatör üzerindeki akı dağılımı

Alçak ve yüksek gerilim sargılarında meydana gelen aksiyal ve radyal kuvvetlerin hesabı Maxwell® programı kullanılarak elde edilmiştir. Sargıların 15 bobinden tasarlanmasının nedeni kuvvetlerin tam olarak nerede daha fazla etkin olduğunu belirleyebilmek ve doğrulayabilmek içindir. Her bobinde meydana gelen kuvvetlerin vektörel toplamı o sargıda meydana gelen toplam kuvveti vermektedir. Örnek olarak 78,5 ms anında yüksek gerilim sargısında meydana gelen radyal kuvveti ele alalım. Kuvvetler 1. ve 15. bobinlerde en küçük değerindedir. Kuvvetlerin şiddeti sargı ortalarına gittikçe yükselen bir karakteristik göstermektedir. Radyal kuvvetler üst gerilim sargılarını orta noktalarından koparma eğilimindedir. Her bir bobinde meydana gelen radyal kuvvet kN mertebesinde olup yüksek gerilim sargısında etki eden toplam kuvvet 78,5 ms anı için 6,64 MN büyüklüğündedir. Aynı şekilde yapılan işlemlerle alt gerilim bobinlerindeki toplam kuvvet ise -5,77 MN olarak bulunmuştur. Aşağıda yer alan şekilde yüksek ve alçak gerilim bobinlerinde meydana gelen kuvvetlerin dağılımı elde edilmiştir.

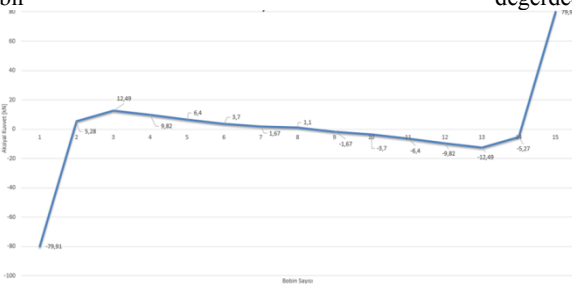


Şekil 8. Yüksek gerilim bobinlerindeki radyal kuvvetler

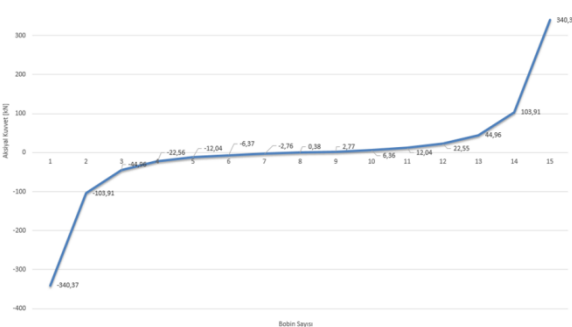


Şekil 9. Alçak gerilim bobinlerindeki radyal kuvvetler

Radyal kuvvetlerin ardından aksiyal kuvvet sonuçlarını ele alınmıştır. Aksiyal kuvvetlerin oluşmasındaki etken kaçak akının radyal bileşenidir. Dengeli amper-sarıma sahip olan transformatör sargılarında bu kaçak akının radyal bileşeni çok küçük değerdedir ve aksiyal kuvvetlerin toplamı 0'a çok yakın bir değerdedir.



Şekil 10. Yüksek gerilim bobinlerindeki aksiyal kuvvetler



Şekil 11. Alçak gerilim bobinlerindeki aksiyal kuvvetler

Alçak gerilim sargılarında meydana gelen aksiyal kuvvetler yüksek gerilim sargılarında meydana gelen aksiyal kuvvetlere göre daha büyük değerdedir. İlk olarak yüksek gerilim sargılarında meydana gelen aksiyal kuvvetleri incelenmiştir. Bobin başlarında bu kuvvetlerin diğer bobinlere göre çok yüksek bir değerde olduğu görülmüştür. Analitik hesaplamalar ile analiz sonuçları karşılaştırılmış ve aşağıda yer alan tablo 2'de bu değerler görülmektedir.

Tablo 2. Radyal ve aksiyal kuvvetlerin karşılaştırılması

	Radyal kuvvet [MN]		Aksiyal kuvvet [kN]	
	SEY	Analitik	SEY	Analitik
Yüksek gerilim sargısı	6,64	6,58	0,97	0,95
Alçak gerilim sargısı	-5,77	-5,51	-0,1	-0,12

6. Sonuç

Bu çalışmada gücü 25 MVA olan 3 fazlı bir güç transformatörü 2D olarak ANSYS Maxwell® benzetim programında modellenerek kısa devre çalışma durumu için analiz edildi. Analizler sonucunda nominal ve kısa devre çalışmaya ilişkin demir çekirdek, sargılar ve hava aralıklarında meydana gelen manyetik akı ve kaçak akı dağılımlarıyla birlikte alçak ve yüksek gerilim sargılarında meydana gelen elektromanyetik aksiyal ve radyal kuvvetler elde edildi. Bu çalışmada görüldü ki kısa devre durumunda meydana gelen kuvvetlerin büyüklükleri MN mertebelerine kadar yükselmektedir. Radyal kuvvetlerin daha çok sargıların orta kısımlarında meydana geldiği görülmüştür. Bu kuvvetlerin etkisi ile dış sargının çapı genişleyerek kanalı daraltmaya yönelik bir etki meydana getirir. İç sargılar ise bu kuvvetler ile eğilir, sıkışır ve demir çekirdeğe doğru yaklaşır. Bu etkilerden korunmak için alt gerilim sargıları ile demir çekirdek arasına destek koyulmalıdır. Aynı zamanda dış sargıların boyundurukla olan etkileşiminin önüne geçebilmek için radyal hareketi kısıtlayıcı tedbirler alınmalıdır. Çalışmada ortaya çıkan bir önemli sonuç ise aksiyal kuvvetlerin sargı baş ve sonlarında en büyük değerde olduğudur. Bu kuvvetler sargılarda kopma ve göçme, sargıların üst üste yığılması ve sargı yalıtımlarına zarar verme şeklinde transformatörü olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda aksiyal kanalı daraltır. Alt gerilim sargılarında meydana gelen aksiyal kuvvetler üst gerilim sargılarında meydana gelen aksiyal kuvvetlerden daha büyük olduğu sonucu da elde edilen bir diğer çıktıdır. Dengeli amper-sarıma sahip olan transformatörlerde aksiyal kuvvetlerin genliğinin 0'a yakın ya da çok küçük değerde olduğu analiz sonuçlarında görülmüştür.

7. Kaynaklar

- [1] **The J&P.**, 1998. Transformer Book, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Great Britain.
- [2] **Düzgün, B., Kömürgöz, G., Sonmez, O.**, 2012. Proper Location of the Regulating Coil in Transformers from Short Circuit Forces Point of View.
- [3] **Güzelbeyoğlu, N.**, 1989. Elektrik Makinalarında Aşırı Zorlanmalar, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- [4] **Minhas, M. S. A.**, November, 2007. Dynamic Behaviour of Transformer Winding under Short-Circuits, PhD Thesis, Johannesburg.
- [5] **Karsai, K., Kerényi, D., Sanders, W.**, 1987. Large Power Transformers, Elsevier
- [6] **Mergen, A. F., Zorlu, S.**, 2009. Elektrik Makineleri I Transformatörler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [7] **IEC Standard 60076-5**, 2006. Power Transformers-Part 5, Ability to Withstand Short-Circuit.