



ZASEY'E DAYALI HARMONİKLİ YÜK VE DENGESİZ BESLEME GERİLİMİ ALTINDA TRANSFORMATÖRÜN İNDİRGENMESİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Atabak NAJAFİ

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Eskişehir, TÜRKİYE
atabak.najafi61@gmail.com

(Geliş/Received: 12.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.12.2019)

ÖZ: Endüstri ve dağıtım merkezlerinde yaygın olarak kullanılan dağıtım trafoları, gerilim dengesizliğinden ve harmonik yüklerden en fazla etkilenen elektrik makinalarıdır. Bu durumlar dağıtım trafoların verimini, nüve kaybı ve bakır kaybı gibi parametreleri üzerinde olumsuz etkisi vardır. Bu makalede, harmonikli yükler ve dengesiz besleme gerilimi koşulları altında Dağıtım Trafosunun İndirgenmesi ve kayıplardaki artış incelenmiştir. Transformatorün indirgemisini gerçekleştirmek için k-faktörü ve harmonik kayıp faktörü (H_{FL}) kullanılmıştır. Bu çalışmada dağıtım transformatorünün sargılarında ve çekirdeğinde oluşan manyetik akı yoğunluğunu gözlemlemek için üç boyutlu zaman adımı sonlu elemanlar yönteminden (ZASEY) faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre IEEE standardının yüksek harmonikli akım (THDI) ve dengesiz koşulları altında transformatorün indirgenmesi için yetersiz, ZASEY'nin ise daha uygun doğru bir yöntem olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İndirgeme, ZASEY, harmonik yük, dengesiz gerilim

Comparison of Derating in Transformer under Non-Linear Load and Imbalanced Supply Voltage Based on Tsfem

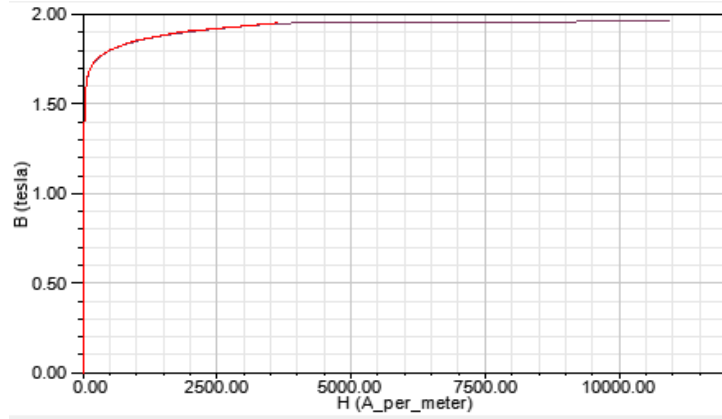
ABSTRACT: Distribution transformers which are widely used in industry and distribution centers are the most affected by voltage imbalance and harmonic loads. These situations have a negative impact on efficiency, core loss and winding loss of distribution transformers, In this article, derating as well as losses increase of transformer under non-linear loads and imbalanced supply voltage conditions are examined. Harmonic loss factor (H_{FL}) and K-factor have been used to perform the transformer derating. In this study, 3D time-step finite element method (TSFEM) used to observe the magnetic flux density formed in the windings and core of the distribution transformer. According to the results obtained, it is seen that the IEEE standard is insufficient for the derating of the transformer under high harmonic current (THDI) and unbalanced conditions and Time Stepping Finite Element Method is a more suitable method.

Keywords: derating, TSFEM, harmonic load, unbalanced voltage

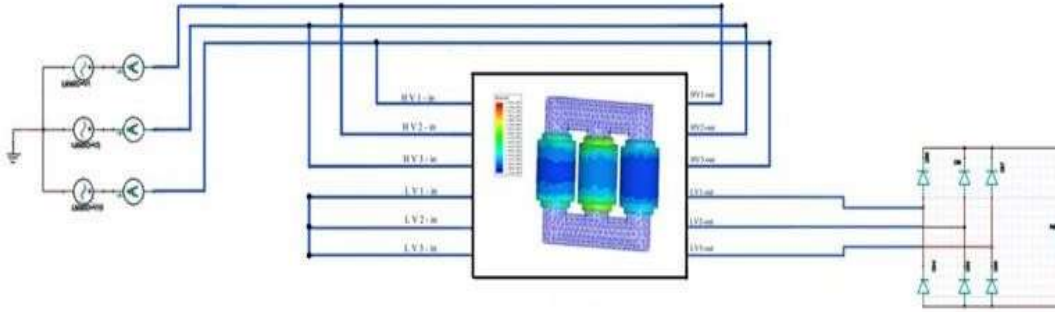
GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç transformatorleri enerji sisteminin temel parçasıdır ve yatırımların en pahalı kısmıdır. Endüstride enerji verimliliğindeki sürekli artış evirici, doğrultucu, yumuşak yol verici gibi güç elektroniği elemanlarının kullanımını da arttırmaktadır. Bu tip doğrusal olmayan yükler güç sistemlerini ve elemanlarını olumsuz yönde etkileyen harmonik akımlarına sebep olmaktadır (Emadi ve diğ., 2008). Ayrıca dengesiz gerilimler de ek kayıpların yanında güvenlik problemlerine neden olur (Taiwo ve diğ., 2018). Günümüzde harmonikli yük ve dengesiz besleme gerilimi, güç sistemlerinde meydana

getirdiği ek bakır kayıpları, transformatör içindeki sıcaklık artışı, yalıtımın zarar görmesi, transformatörün ömrünün azaltılması ve sonuç olarak transformatörün bozulması gibi problemlerden dolayı güç kalitesi ile uğraşan uzmanlar için önemli bir konu haline gelmiştir (Najafi ve diğ., 2014). Sinüzoidal olmayan yük akımı ve dengesiz besleme gerilimi ile çalışma durumunda transformatörün indirgenmesi güvenli çalışma için basit ve kullanışlı bir yöntemdir. İndirgeme harmonikli yük ve dengesiz çalışma durumunda yük kapasitesini azaltmaktır. IEEEc57.110 bilinen yöntemleri açıklar ve harmonik yük altında, k-faktörü ve harmonik kayıp faktörü F_{HL} 'ye bağlı basit ve temel indirgeme için çözümler sunar (ANSI/IEEE Std., 1988).k-faktörüne bağlı transformatörün indirgemesi özellikle yük akımları yüksek harmonikli olduğu zaman ısınmanın tehlikeli boyutta olmayacağını göstermekte kullanılabilir. Sinüzoidal olmayan besleme gerilimi olduğu zaman indirgeme faktörünü hesaplamak için (Taheri ve diğ., 2012)'de iteratif bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma frekans ve zaman domeni tekniklerinin birleşiminden oluşmaktadır. İndirgeme faktörünü hesaplamak için yazarlar tarafından nominal kayıplar ve çıkış gerilimi durumunda görünür gücü kullanılmıştır. IEEEc57.110 standartlarına bağlı k-faktörü (Gouda ve amer.2011)'in açıkladığı harmonikli yük akımının neden olduğu aşırı ısınmaya karşı korunmak için tasarlanmıştır. Bu makalede 25 MVA, 220/ 66 KV transformatörlü Toshke pompa incelenmiştir. k-faktörü harmonik filtreli ve harmonik filtresiz durumları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonucu harmonik filtresiz hesaplanan k-faktörünün harmonik filtreli hesaplanan k-faktörünün değerinden yüksek olduğunu göstermiştir.(Faiz ve diğ., 2015)'de, sinüzoidal olmayan yük durumunda transformatörün indirgenmesi için IEEE standartları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Eşdeğer KVA'yı hesaplamak için girdap akımı kayıpları ve diğer sargı kaçak kayıpları için F_{HL} hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda harmonik yüklerin transformatör kayıplarında artışa sebep olduğu görülmüştür. Bu sebeple harmonikli durumda transformatörün eşdeğer KVA'sı azalır. (Rahmat, 2013)'de, harmonik akımlarının sebep olduğu ısınmalara karşı transformatörün korumasında k faktörünün önemini örneklerle gösterilmiştir. Çalışmamızın bir diğer kısmı dengesiz besleme gerilimi üzerinedir. Çoğunlukla, üç faz gerilimlerin dengesizlik yüzdesini belirlemek için negatif bileşenin pozitif bileşenine oranı kullanılır (Taghikhani ve rafiei.2011). Bu oran gerilim dengesizlik faktörü olarak tanımlanır (VUF). Gerilim dengesizliğinin tam tanımı için genlik ve açı bileşenlerinden oluşan kompleks gerilim dengesizlik faktörü (CVUF) kullanılır. (Bhushan ve diğ., 2012)'de bir indüksiyon motorunun performansını değerlendirmek için CVUF kullanmıştır. Endüstriyel güç sistemlerinde tek fazlı indüksiyon motorları, lokomotifler, indüksiyon ısıtma gibi büyük tek fazlı yükler gerilim dengesizliği oluşturan tipik örneklerdir. (Patne ve Takhre.2010)' da transformatör bağlantı tiplerinin gerilim ve akım dengesizlik yayılımı üzerine etkilerini göstermiştir. Bu çalışmada dengesizlik yayılımını hesaplamak için VUF ve IUF indeksleri kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda transformatörün bağlantı tipinin dengesizlik yayılımı üzerinde önemli rol oynadığı gösterilmiştir. Asimetrik yük koşulları altında wye/wye ve delta/wye bağlantı şekillerinin büyük dengesiz gerilim ve akım yayılımına neden olmaktadır. Bu çalışmada, dengesiz besleme gerilimi ve harmonik yük altında transformatörü modellemek için zaman adımlı sonlu elemanlar yöntemi (ZASEY) kullanılmıştır. ZASEY bu koşullar altında dağıtım transformatörünün modellenmesi ve analizi için etkin bir yöntemdir. IEEEc57.110 standardına ve ZASEY'den elde edilen verilere dayanarak, bir dağıtım transformatörü farklı harmonik yükler ve dengesiz besleme gerilimi durumlarında harmonik kayıp faktörü (F_{HL}) ve k-faktörünü kullanılarak indirgenmiştir.



Şekil 1. M5 malzemesi B-H eğrisi
Figure 1. B-H curve of M5 material



Şekil 2. Harmonik yük altında Δ / Y bağlı üç fazlı transformatör
Figure 2. Three-phase transformer Δ / Y connected under harmonic load

Çizelge 1. Transformatörün elektriksel parametreleri

Table 1. Electrical parameters of the transformer

Nicelik	Değer	Birim
Birincil gerilim	34.5	KV
İkincil gerilim	0.4	KV
Anma gücü	100	KVA
Birincil sargının sarım sayısı	7469
İkincil sargının sarım sayısı	50
Pencere genişliği	180	Mm
Pencere yüksekliği	360	Mm
AG sargısı yüksekliği	310	Mm
YG sargısı yüksekliği	254	Mm

Euler, Runge Kutta gibi standart yöntemler, Klasik diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılabilir. SEY'in temelinde çalışılan bölgenin sonlu elemanlar olarak adlandırılan çok küçük alt bölgelere ayırmaktadır. Bu çalışmada 3 fazlı, Dy11, 100 kVA, 34.5kV/400V dağıtım transformatörü analiz edilmiştir. Kullanılan transformatörün karakteristik özellikleri Çizelge 1'de kısaca gösterilmektedir. Üç boyutlu modelde tüm ağ hücreleri tetrahedral şeklindedir. Transformatörün manyetik parametreleri ve geometrik büyüklükleri kullanılarak, transformatör içindeki manyetik alan dağılımını hesaplamak için SEY uygulanmıştır. (Ahn ve diğ., 2011)'da, manyetik vektör potansiyeli A 'nın geçici ve uzaysal değişimini:

$$\nabla^2 A - \mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu J_0 = 0 \quad (1)$$

olarak göstermiştir. Verilen eşitlikte μ manyetik geçirgenlik, σ elektriksel iletkenlik ve J_0 ise uygulanan akım yoğunluğudur.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j\omega A \quad (2)$$

Kartezyen koordinatlarda, üç boyutlu modelde, manyetik alanın karmaşık modeli kullanılarak:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - j\omega \sigma A + J_0 = 0 \quad (3)$$

elde edilir. Manyetik vektör potansiyeli,

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

Elektrik devresinin temel eşitliği:

$$V_s = R_s i + L_s \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Bu çalışmada transformatör çekirdek laminasyonu için 0.30 mm kalınlığında silikon alaşımlı çelik levhalar kullanılmıştır. Şekil 1'de manyetik malzemenin B-H eğrisi gösterilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi doymuş akı yoğunluğu 1.9 tesladır. Şekil 2'de sinüzoidal kaynağa ve doğrusal olmayan yüke bağlı Δ/Y bağlı 3 fazlı transformatör gösterilmiştir. Diğer bir ifade ile transformatör manyetik modeli ile elektrik devresi arasındaki bağlantı gösterilmiştir. 0.2 ms zaman adımı ile geçici durum analizi benzetim çalışması yapılmıştır. Şekil 3'te farklı harmonik yükleri altında transformatör sargılarındaki vektörel akı dağılımı gösterilmiştir. Çizelge 2'de farklı harmonik koşullar altında transformatör sargılarındaki maksimum akı yoğunluğu gösterilmiştir. Benzetim sonuçlarına dayanarak, Şekil 3 ve Çizelge 2'den harmonik yük altında ve yük akımının THD_i'sı artarken transformatör sargılarındaki maksimum akı yoğunluğunun da arttığı anlaşılmaktadır. Sinüzoidal yük akımı durumunda, transformatör sargısındaki maksimum akı yoğunluğu 0.424 T'dir.

Çizelge 2. Transformatör sargılarındaki maksimum akı yoğunluğu

Table 2. Maximum flux density in transformer windings

Yük profili	Maksimum akı yoğunluğu (T)	Akı yoğunluğunun artışı
Sinüzoidal durum	0.424
Harmonikli durum 1 (THD _i =12%)	0.466	9.9%
Harmonikli durum 2 (THD _i =23%)	0.471	11%

Çizelge 3. Harmonik yük akımı

Table 3. Harmonic load current

H	5	7	11	13	17	19	THD _i
Durum 1	0.104	0.061	0.02	0.0095	0	0	12%
Durum 2	0.22	0.064	0.04	0.034	0.012	0.0098	23%

Eğer harmonik yük akımı durumunda maksimum akı yoğunluğunun artışı sinüzoidal durumdaki ile karşılaştırılırsa, Çizelge 2'den de görülebileceği gibi, THD_i %12 iken %9.9, THD_i %23 iken %11 artış olmuştur. Şekil 4'te, verilen transformatör için farklı THD_i durumlarında sinüzoidal ve bozulmuş dalga şekilleri gösterilmiştir. Akımın harmonik spektrumu şekil 5'te görülmektedir. Çizelge 4'te THD_i=%12 ve THD_i=%23 için harmonik yük akımının özellikleri özetlenmiştir.

HARMONİK YÜK AKIMININ KAYIPLARA ETKİSİ (THE EFFECT OF HARMONIC LOAD CURRENT ON LOSSES)

Harmonik yük akımının transformatör üzerindeki en önemli etkisi nominal güç kayıplarını arttırmasıdır. Bu kayıplar da transformatör içinde ilave ısınmalara sebep olacaktır. Sıcaklıktaki ilave artışlar yalıtımın zarar görmesine ve arızalara neden olur. Harmonik akımın transformatör üzerindeki etkisi DC kayıplar, sargı girdap akımı kayıpları ve diğer kaçak kayıplardır.

DC Kayıplar (DC Losses)

Harmonik yük, yük akımının etkin değerinde artışa sebep olur. Sonuç olarak DC kayıplar yük akımının karesi ile orantılı olarak artacaktır.

$$P_{dc} = R_{dc} \times I^2 = R_{dc} \times \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_{h,\max}^2 \quad (6)$$

Sargı Girdap Akımı Kayıpları (Winding Eddy Current Losses)

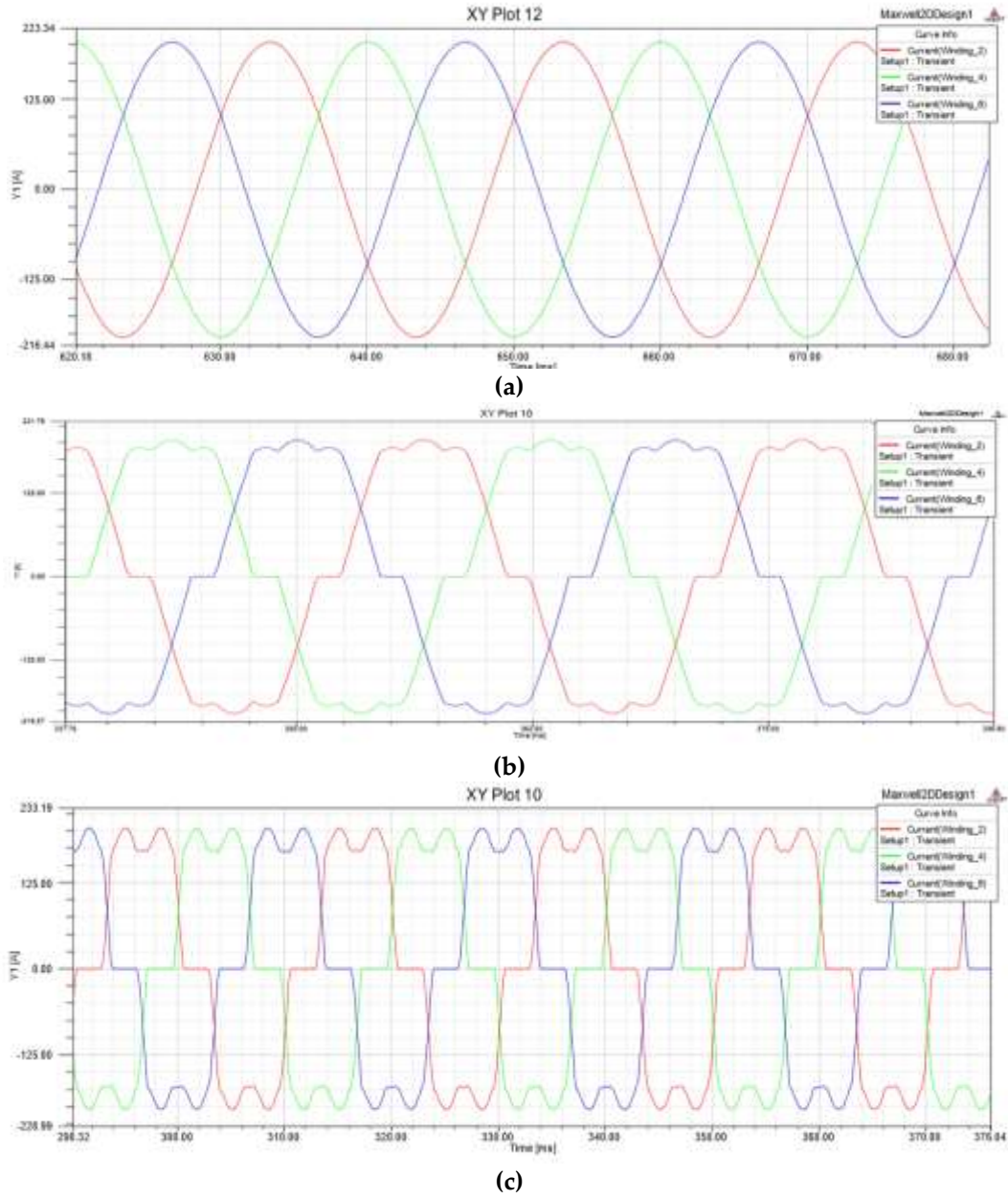
Sargı girdap akımı kayıpları yük akımının karesi ve harmonik frekansı ile orantılıdır. Harmonik yük akımının artması durumunda sargı girdap akımı kayıpları da artacaktır.

$$P_{EC} = P_{EC-o} \times \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^2 \quad (7)$$

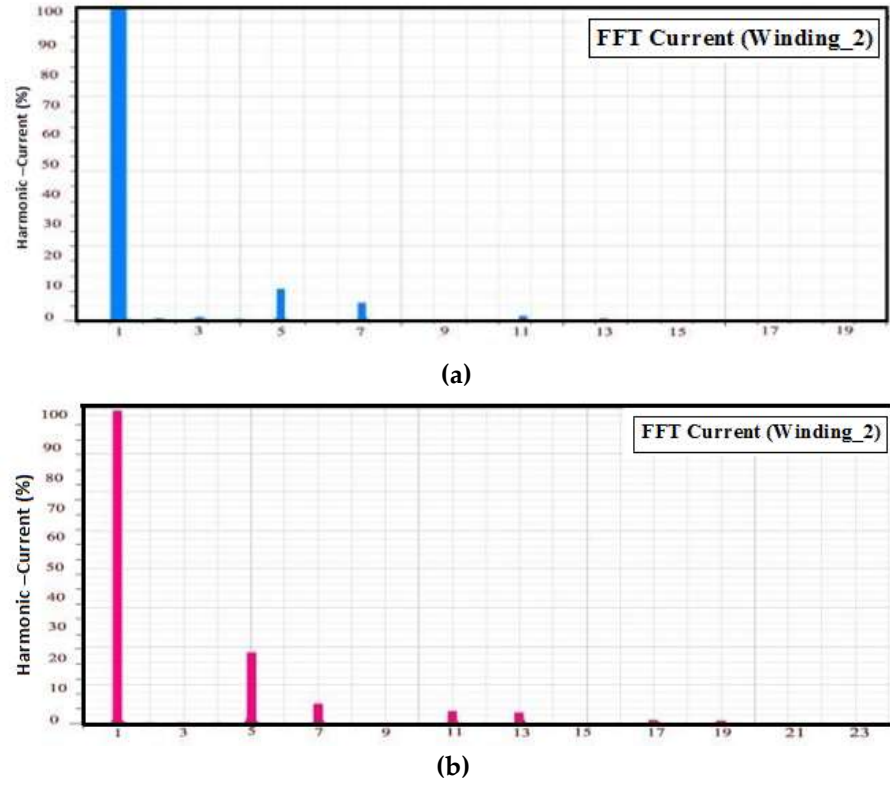
Sargı girdap akımları için harmonik kayıp faktörü:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-o}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 (\text{pu}) \times h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h)^2 (\text{pu})} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 4: Yük akımı a) Sinüzoidal durum b) $THD_I = 12\%$ c) $THD_I = 23\%$
 Figure 4: Load current a) Sinusoidal case b) $THD_I = 12\%$ c) $THD_I = 23\%$



Şekil 5: Yük akımının harmonik spektrumu a) $THDI = 12\%$ b) $THDI = 23\%$

Figure 5. Harmonic spectrum of load current a) $THDI = 12\%$ b) $THDI = 23\%$

Diğer Kaçak Kayıplar (Other Stray Losses)

Diğer kaçak kayıplar akımın etkin değerinin karesi ve harmonik derecesinin 0.8. kuvveti ile orantılıdır. Diğer kayıplar için harmonik kayıp faktörü:

$$P_{OSL-L} = P_{OSL-o} \times \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0.8} \quad (9)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Çizelge 4. Sinüzoidal ve harmonik yük durumunda transformatör kayıpları ($THDI = 12\%$)

Table 4. Transformer losses in case of sinusoidal and harmonic load ($THDI = 12\%$)

Kayıp türü	Anma kayıp gücü (w)	Harmonik yük akımı durumunda kayıplar ($THDI = 12\%$) (w)	Harmonik kayıp faktörü (SEY&IEEE)	Harmonik yük durumunda düzeltilmiş kayıplar (w)
Yüksüz	271	271	-----	271
DC	1575	1711	-----	1711
Sargı girdap akımı	50	63.34 (SEY)	1.266 (SEY)	80.188 (SEY)
		75,7 (IEEE)	1.49 (IEEE)	112.793 (IEEE)
Toplam	1896	2045,34 (FEM)	-----	2062,188 (FEM)
		2057.7 (IEEE)	-----	2094.793 (IEEE)

Çizelge 5. Sinüzoidal ve harmonik yük durumunda transformatör kayıpları (THD₁ %23)*Table 5. Transformer losses in case of sinusoidal and harmonic load (THDI 23%)*

Kayıp türü	Anma kayıp gücü (w)	Harmonik yük akımı durumunda kayıplar (THD ₁ =%23)(w)	Harmonik kayıp faktörü (SEY&IEEE)	Harmonik yük durumunda düzeltilmiş kayıplar(w)
Yüksüz	271	271	-----	271
DC	1575	1809	-----	1809
Sargı girdap akımı	50	88.53 (SEY)	1.77 (SEY)	156.69 (SEY)
		147 (IEEE)	2.78 (IEEE)	408,66 (IEEE)
Toplam	1896	2169 (FEM)	-----	2236.69 (FEM)
		2227 (IEEE)	-----	2488.66 (IEEE)

Diğer kaçak kayıplar için harmonik kayıp faktörü şöyle hesaplanır:

$$F_{HL-STR} = \frac{P_{OSL}}{P_{OSL-o}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 (pu) \times h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h)^2 (pu)} \quad (10)$$

Çizelge 4 ve 5, harmonik yükten dolayı oluşan bakır kaybı ve girdap akımı kayıplarındaki artışı göstermektedir. Çizelgelerde görüldüğü üzere, harmonik yük altında ve THD₁ %12 iken toplam kayıp SEY'ye göre %8.7, IEEE standardına göre %10.4 artmıştır. Harmonik yük altında ve THD₁ %23 iken toplam kayıp, SEY'e göre %17.9, IEEE standardına göre %31.2 artmıştır.

F_{HL} ve K-FAKTÖRÜNE GÖRE HARMONİK YÜK AKIMI ALTINDA TRANSFORMATÖRÜN İNDİRGENMESİ (DERATING OF TRANSFORMER UNDER HARMONIC LOAD CURRENT ACCORDING TO F_{HL} and K-FACTOR)

Transformatörün indirgenmesi sinüzoidal olmayan ve dengesiz çalışma koşullarında güvenli işletme için basit ve faydalı bir yöntemdir. Denklem (8) IEEE c57.110 standardına göre harmonik kayıp faktörünün hesaplanmasını göstermektedir. Bu eşitlikte F_{HL}'nin harmonik derecesinin karesi ile orantılı olduğu görülmektedir. Bu hipotez küçük transformatörler için geçerlidir, fakat yüksek THD₁'ya sahip büyük transformatörler için bu hipotez yetersiz kalabilir. Çizelge 6 ve 7, THD₁=%23 ve THD₁=%12 için IEEE standardına göre hesaplanmış F_{HL} değerlerini göstermektedir. Çizelge (8) ise IEEE standardına ve SEY'e göre harmonik kayıp faktörü değerlerini göstermektedir. Çizelge 8'e göre THD₁ arttıkça IEEE ve SEY'e göre hesaplanan F_{HL} arasındaki fark artmaktadır. Durum 1 (THD₁=%12) için, F_{HL}, IEEE standardına göre 1.49, SEY'e göre 1.266 çıkmıştır. Durum 2 (THD₁=%23) için, F_{HL}, IEEE standardına göre 2.78, SEY'e göre 1.77 çıkmıştır. Sonuçlara göre fark %36.3 olmuştur. Elde edilen verilere göre, yüksek THD₁ durumunda IEEE standardı ve SEY'e göre hesaplanan F_{HL} değerleri arasındaki fark artmaktadır.

Çizelge 6. IEEE standartlarına göre hesaplanan harmonik kayıp faktörü (THD_i=%23)*Table 6. Harmonic loss factor calculated according to IEEE standards (THDI = 23%)*

H	I _h /I ₁	(I _h /I ₁) ²	h ²	(I _h /I ₁) ² *h ²
1	1	1	1	1
5	0.22	0.0484	25	1.21
7	0.064	0.004	49	0.196
11	0.04	0.0016	121	0.193
13	0.034	0.00156	169	0.263
17	0.012	0.00014	289	0.041
19	0.009	0.00009	361	0.0346
	8	6		
		Σ=1.055		Σ=2.94
F_{HL}= 2.78				

Çizelge 7. IEEE standartlarına göre hesaplanan harmonik kayıp faktörü (THD_i=%12)*Table 7. Harmonic loss factor calculated according to IEEE standards (THDI = 12%)*

H	I _h /I ₁	(I _h /I ₁) ²	h ²	(I _h /I ₁) ² *h ²
1	1	1	1	1
5	0.104	0.0108	25	0.27
7	0.061	0.0037	49	0.181
11	0.02	0.0004	121	0.048
13	0.009	0.00009	169	0.0152
	5			
		Σ=1.0149		Σ=1.514
F_{HL}= 1.49				

Çizelge 8. IEEE standartlarına ve SEY'e göre hesaplanan harmonik kayıp faktörü (THD_i=%12)*Table 8. Harmonic loss factor calculated according to IEEE standards and FEM (THDI = 12%)*

	F _{HL} (SEY)	F _{HL} (IEEE)
Durum 1 (THD _i =12%)	1.266	1.49
Durum 2 (THD _i =23%)	1.77	2.78

Gücü 630 kVA'dan az olan transformatörler için maksimum girdap akımı kayıpları,

$$P_{EC-max}(pu) = \frac{0.8P_{EC-R}}{I_{2-R}^2 R_2} \quad (11)$$

Gücü 630 kVA'dan fazla olan transformatörler için,

$$P_{EC-max}(pu) = \frac{2.8P_{EC-R}}{3I_{2-R}^2 R_2} \quad (12)$$

şeklinde hesaplanabilir. İzin verilen maksimum sinüzoidal olmayan akımın etkin değeri,

$$I_{mak}(pu) = \left[\frac{P_{LL-R}(pu)}{1+F_{HL}P_{EC-max}(pu)} \right]^{0.5} \quad (13)$$

şeklinde hesaplanır.

Çizelge 9. (FHL) kullanılarak IEEE ve FEM'e göre harmonik yük akımı altında trafo indirgenmesi

Table 9. Derating of transformer under harmonic load current using (FHL) according to IEEE and FEM

	Durum1 THDI=%12	Durum 2 THDI =%23
FHL 'e göre Imak FHL (SEY)	0.917	0.885
FHL 'e göre Imak (IEEE)	0.90	0.83
Kapasitedeki azalışın yüzdesi (SEY)	8.3	11.5
Kapasitedeki azalışın yüzdesi (IEEE)	10	17
FHL 'e göre eşdeğer kapasite (SEY)	91.7	88.5
FHL 'e göre eşdeğer kapasite (IEEE)	90	83

Çizelge 9, izin verilebilecek maksimum sinüzoidal olmayan yük akımı ve harmonik kayıp faktörü kullanılarak IEEE standardı ve sonlu elemanlar yöntemine göre harmonikli yük akımı durumunda transformatörün indirgeme sonucunu göstermektedir. Ayrıca, durum 1 (THDI=%12) için SEY'e göre 91.7 IEEE'ye göre 90 kVA ve fark %1.7, durum 2 (THDI=%23) için SEY'e göre 88.5 IEEE'ye göre 83 kVA ve farkın %5.5 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek THDI için, IEEE standardı ile SEY'e göre hesaplanan değerler arasındaki fark artmaktadır. Başka bir ifade ile, IEEE standardına göre hesaplanan eşdeğer kVA, SEY'e göre hesaplanan değerden daha küçüktür. Bu nedenle yüksek THDI durumunda, transformatörün indirgenmesi için IEEE standardı basit ve yetersiz bir yöntem iken SEY daha kesin ve doğru sonuç veren bir yöntemdir.

IEEE Standardı Ve ZASEY İle k-Faktörüne Dayalı Transformatörün İndirgenmesi (Derating of transformer based on k-factor with IEEE Standard and TSFEM)

Harmonik yük akımı durumunda, standart transformatörler aşırı ısınabilir ve erken arıza verebilir. K-oranlı transformatörler harmonik akımlarından dolayı oluşan ısınmayı analiz etmek için tasarlanmıştır. Standart transformatörlerde k-faktörünün değeri birdir. K-faktörünü hesaplamak için ilk adım toplam akımın etkin değerinin hesaplanmasıdır. Durum 1 (THDI=%12) için bu değer 1.0074, durum 2 (THDI=%23) için ise 1.027 A'dır. Daha sonra, her bir harmonik akımın orantısal kareleri hesaplanabilir ve k-faktörünün değeri hesaplanabilir. k-faktörü

$$K - \text{faktör} = \sum_{h=1}^{h=h_{\text{mak}}} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 = \frac{1}{I_R^2} \sum_{h=1}^{h=h_{\text{mak}}} I_h^2 h^2 \quad (14)$$

şeklinde verilebilir. Çizelge (10) ve (11), THDI=%12 ve THDI=%23 durumları için IEEEc57.110 standardına göre hesaplanmış k-faktörünün değerlerini göstermektedir. Çizelge (12), THDI artarken, IEEE standardı ve SEY'e göre hesaplanan k-faktörleri arasındaki farkın arttığını göstermektedir. Durum 1 (THDI=%12) için, k-faktörü IEEE standardına göre 1.495, SEY'e göre 1.284 bulunmuştur ve hesaplanan değerler arasındaki fark %14.1'dir. Durum 2 (THDI=%23) için, k-faktörü IEEE standardına göre 2.73, SEY'e göre 1.867 bulunmuştur ve hesaplanan değerler arasındaki fark %31.6'dir. k-faktörünü ve transformatör parametrelerini kullanarak, sinüzoidal olmayan yük akımının maksimum izin verilebilen etkin değeri

$$I_{\text{mak}}^{\text{pu}} = \sqrt{\frac{R_{\text{DC}} + R_{\text{ECL-R}}(1-k) \frac{\Delta P_{\text{fe}} + \Delta P_{\text{osl}}}{I_R^2}}{R_{\text{DC}}}} \quad (15)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Çizelge 10. THD_r=%12 için hesaplanan k-faktörü*Table 10. k-factor calculated for THDI =12%*

H	I _h /I ₁	(I _h /I ₁) ²	I _h /I	(I _h /I) ²	(I _h /I) ² *h ²
1	1	1	0.992	0.984	0.984
5	0.104	0.0108	0.1032	0.0106	0.27
7	0.061	0.0037	0.060	0.0036	0.178
11	0.02	0.0004	0.0198	0.00039	0.048
13	0.0095	0.00009	0.0094	0.000088	0.015
	ΣToplam rms = 1.0074	Σ=1.0149			Σ=1.495
k-faktör = 1.495					

Çizelge 11. THD_r=%23 için hesaplanan k-faktörü*Table 11. k-factor calculated for THDI = 23%*

H	I _h /I ₁	(I _h /I ₁) ²	I _h /I	(I _h /I) ²	(I _h /I) ² *h ²
1	1	1	0.973	0.948	0.948
5	0.22	0.0484	0.214	0.0459	1.147
7	0.064	0.00409	0.062	0.0039	0.191
11	0.04	0.0016	0.0389	0.00156	0.188
13	0.034	0.00115	0.0331	0.0011	0.186
17	0.012	0.000144	0.0116	0.000137	0.0395
19	0.0098	0.000096	0.0095	0.000091	0.0328
	ΣToplam r.m.s=1.027				Σk-faktör=2.73
k-faktör=2.73					

Çizelge 12. IEEE standardı ve FEM'e göre hesaplanan k-faktörü*Table 12. K-factor calculated according to IEEE standard and FEM*

	k-faktör (SEY)	k-faktör (IEEE)
Durum 1 (THDI =%12)	1.284	1.495
Durum 2 (THDI =%23)	1.867	2.73

Denklem (15)'te, R_{DC} sargı direnci, RECL-R nominal frekansta oluşan girdap akımlarını temsil eden dirençtir ve ölçüm yöntemleri ile hesaplanabilir.

I_{mak}^k ve I^{FHL}_{mak} arasındaki ilişki

$$I_{\text{mak}}^{K2} = I_{\text{mak}}^{\text{FHL}^2} + F_{\text{HL}} P_{\text{EC-R}} (I_{\text{mak}}^{\text{FHL}^2} - I^2) \quad (16)$$

olarak verilebilir.

Çizelge 13. Harmonik yük akımı altında k-faktörünü kullanarak SEY ve IEEE standardına göre transformatörün indirgenmesi

Table 13. Derating of transformer according to FEM and IEEE standard using k-factor under harmonic load current

	Durum 1 THD _i =%12	Durum 2 THD _i =%23
K-fakör'üne bağlı I _{max} (FEM)	0.90	0.876
K-fakör'üne bağlı I _{max} (IEEE)	0.893	0.81
Kapasitedeki azalmanın yüzdesi (FEM)	10	12.4
Kapasitedeki azalmanın yüzdesi (IEEE)	0.107	0.19
k-faktör'üne göre eşdeğer kapasite (FEM)	90	87.6
k-faktör'üne göre eşdeğer kapasite (IEEE)	89.3	81

Çizelge 13, k-faktörü kullanılarak IEEEc57.110 standardına ve sonlu elemanlar yöntemine göre izin verilen azami sinüzoidal olmayan yük akımını ve harmonik yük akımı altında trafo indirgeme sonucunu göstermektedir. Çizelge 13'e göre durum 1 (THD_i=%12) için zaman adımlı sonlu elemanlar yöntemine ve IEEE standardına göre hesaplanan KVA değeri sırasıyla 90 ve 89.3'tür ve nominal KVA durumuna göre fark %0.7 olmuştur. Ayrıca durum 2 (THD_i=%23) için zaman adımlı sonlu elemanlar yöntemine ve IEEE standardına göre hesaplanan KVA değeri sırasıyla 87.6 ve 81 ve nominal KVA durumuna göre fark %6.6 olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre THD_i arttıkça IEEE standardı ve SEY'e göre hesaplanan değerler arasındaki fark artmaktadır. Başka bir ifadeyle, IEEE standardına göre hesaplanan eşdeğer KVA SEY'e göre hesaplanan değerden daha düşüktür. Eğer k-faktörü ve F_{HL}'ye dayanan transformatör indirgeme sonuçlarını karşılaştırırsak, k-faktörüne göre hesaplanan KVA F_{HL}'ye göre hesaplanan değere göre daha doğru ve kapsamlı, F_{HL}'ye göre hesaplanan I_{max} ise daha ekonomiktir. Bu nedenle k-faktörü tasarımdaki uygun trafoyu seçmek için kullanışlıdır.

**DENGESİZ GERİLİM DURUMUNDA DAĞITIM TRANSFORMATÖRÜNÜN İNDİRGENMESİ
(DERATING OF DISTRIBUTION TRANSFORMER IN UNBALANCED VOLTAGE CASE)**

Gerilim Dengesizliğinin Büyüklüğünü Belirleme (Determining the Voltage Unbalanced Factor)

Dengesiz gerilim miktarını belirlemek için birkaç tanım mevcuttur.

IEEE Tanımı (IEEE Definition)

Son IEEE Std.1159 hem IEEE 112 ve 936 tanımlarını hem de negatif ve pozitif seri gerilimin ("gerçek değer") oranını vermektedir. IEEE gerilim dengesizliği miktarı

$$\%PVUR = \frac{\text{ortalama faz gerilimden maksimum sapma}}{\text{ortalama faz gerilimi}} \%100 \quad (17)$$

$$VUF = \frac{\max(V_a, V_b, V_c) - \min(V_a, V_b, V_c)}{V_{\text{ort}}} \quad (18)$$

şeklinde verilmektedir.

Doğru Miktar (IEC)

Fortescue bileşenleri veya simetrik bileşenler, üç fazlı bir sistemlerde gerilim veya akımındaki dengesizliği belirlemek için kullanılır. Üç fazlı sistem doğru veya pozitif bileşen ters veya negatif bileşen ve sıfır bileşen olarak üç sisteme ayrılmaktadır.

IEC tanımı:

$$\%VUR = \frac{\text{negatif dizi gerilim bileşeni}}{\text{pozitif dizi gerilim bileşeni}} \times \%100 \quad (19)$$

şeklinde verilmektedir.

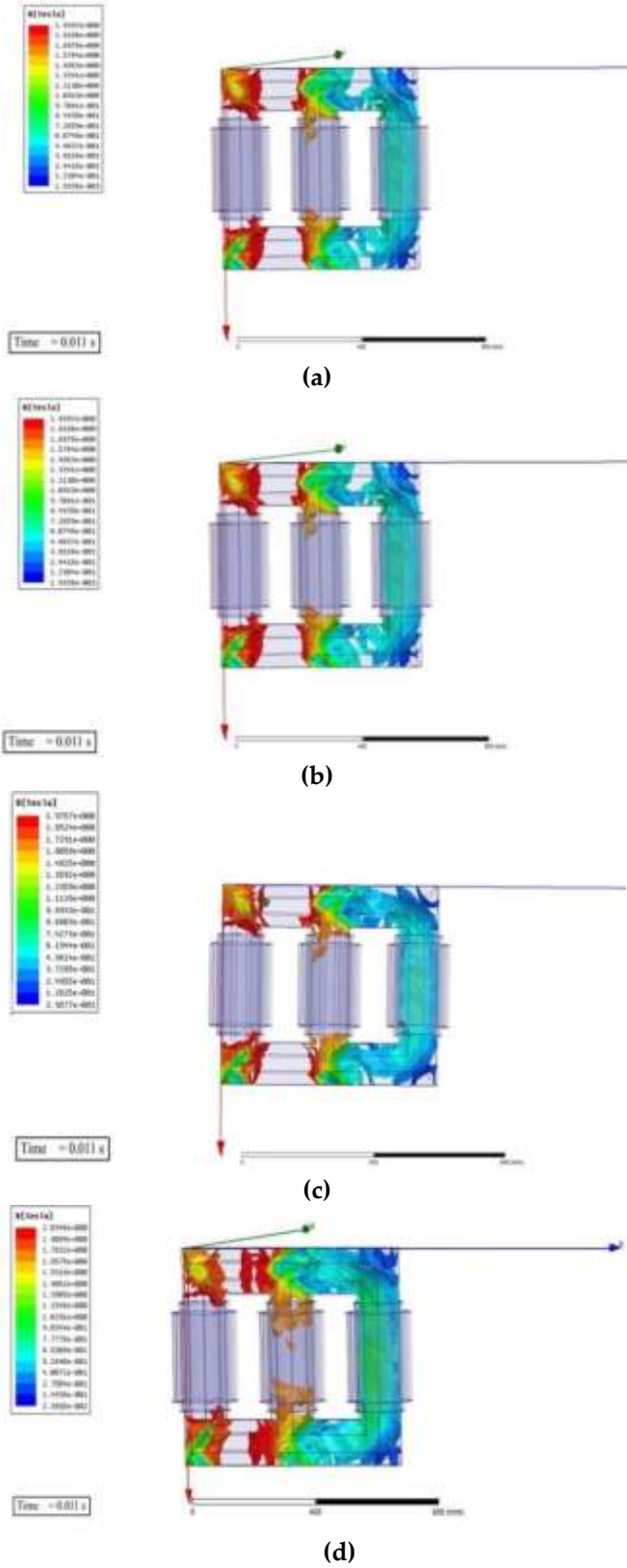
Yaklaşık Tanım (Approximate Description)

Gerilim Dengesizliğinin Yaklaşık Değeri Şöyle Hesaplanabilir:

$$VUF = \sqrt{\frac{1-\sqrt{(3-6\beta)}}{1+\sqrt{(3-6\beta)}}} \times \%100 \quad (20)$$

$$\beta = \frac{v_{ab}^4 + v_{bc}^4 + v_{ca}^4}{(v_{ab}^4 + v_{bc}^4 + v_{ca}^4)^2} \quad (21)$$

Burada V_{ab} , V_{bc} ve V_{ac} temel frekanstaki 3 fazlı sistemdeki faz-faz gerilim fazörlerini temsil etmektedir. Şekil (6) dengeli ve farklı dengesiz gerilim değerleri altında transformatör çekirdeğindeki akı yoğunluk dağılımını göstermektedir. Manyetik akı yoğunluğu ve manyetik vektör potansiyeli birbiri ile bağlantılıdır. Dengesiz gerilim altında transformatör çekirdeği içindeki akı yoğunluğu ve akı yoğunluğu dağılımı asimetriktir. Bu nedenle çekirdek ve bakır kayıpları artmaktadır. Çizelge (14) VUF artışına karşı maksimum akı yoğunluğundaki artışı göstermektedir. Çizelge (14)'teki değerlere göre, kaynak gerilimi dengeli olduğu zaman maksimum akı yoğunluğu 1.91 tesla olmaktadır.



Şekil 6: Transformör çekirdeğindeki manyetik alan dağılımı a) dengeli gerilim b) dengesiz gerilim (durum 1) c) dengesiz gerilim (durum 2) d) dengesiz gerilim (durum 3)

Figure 6: Distribution of the magnetic flux density in the transformer core a) balanced voltage b) unbalanced voltage (state 1) c) unbalanced voltage (state 2) d) unbalanced voltage (state 3)

Eğer dengeli ve farklı dengesiz kaynak gerilimleri altındaki maksimum akı yoğunluğundaki artış karşılaştırılırsa, Çizelge 14'te görüldüğü gibi, birinci durumda VUF=0.015 iken artış %1.5, ikinci durumda VUF=0.032 iken artış %3.1 ve üçüncü durum için VUF=0.037 iken artış %6.3 olmuştur.

Çizelge 14. Transformatör çekirdeğindeki maksimum akı yoğunluğu

Table 14. Maximum flux density in transformer core

Gerilim tipi	Maksimum akı yoğunluğu (T)	
Dengeli durum	1.91
Dengesiz durum 1	1.94	1.5%
Dengesiz durum 2	1.97	3.1%
Dengesiz durum 3	2.03	6.3%

Çizelge 15. Dengesiz gerilim altında kayıplardaki artışlar

Table 15. Increases in losses under unbalanced voltage

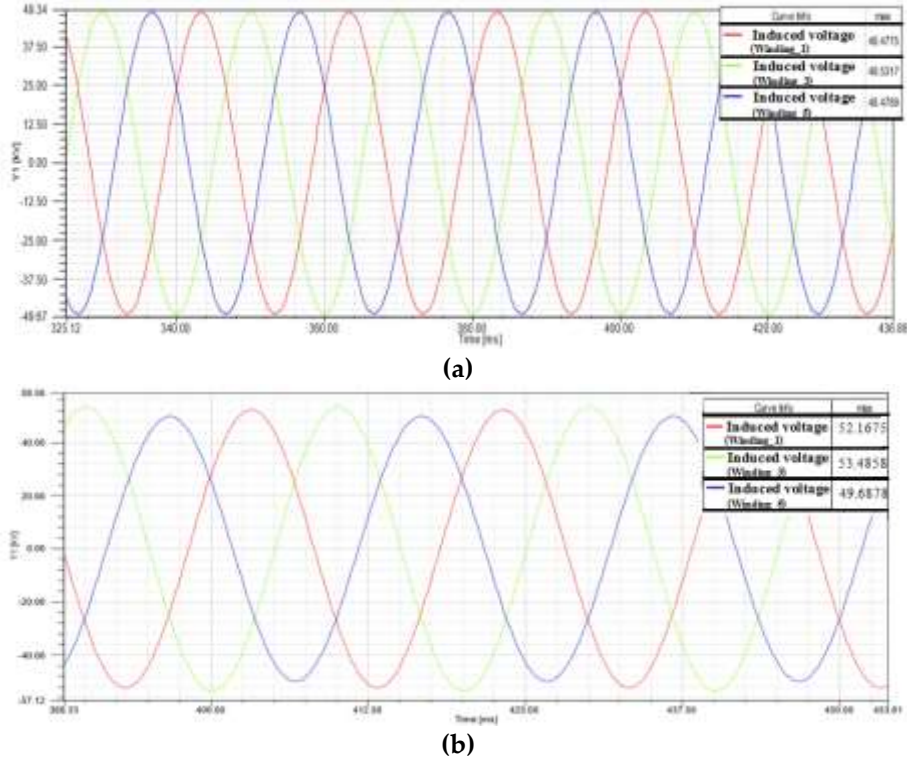
Besleme Gerilimi	Faz (a-b-c)	P fe(w)	P cu (w)	AC Kayıp (w)	Toplam Kayıp (w)	IEEE VUF %	Yaklaşık VUF %
Dengeli Durum	%0-%0-%0	271	1575	50	1896	-----	-----
Dengesiz Durum 1	0.015-0.043-0.03	288,13	1725	52,87	2066	0.015	0.017
Dengesiz Durum 2	0.07-0.09-0.025	307,49	1947	55.51	2310	0.032	0.035
Dengesiz Durum 3	0.12-0.10-0.08	332,55	1963	56.45	2351	0.037	0.039

Çizelge 16. Uygulanan indirgeme sonuçları

Table 16. Results of applied Derating

Dengesiz Gerilim	Dengesiz Gerilim Durum 1	Dengesiz Gerilim Durum 2	Dengesiz Gerilim Durum 3
I _{max} (pu)	0.931	0.92	0.90
Eşdeğer KVA	93.1	92	90

Şekil 7, verilen transformatörün denge ve dengesiz gerilim için indüklenen birincil maksimum gerilimi göstermektedir (durum 2). Çizelge 15 farklı dengesiz kaynak gerilimi altında çekirdek ve bakır kayıplarının önemli ölçüde arttığını ve VUF yüzdesindeki artışın, bu kayıplarda büyük bir artışa neden olduğunu göstermektedir. Çizelge 15'ten girdap akımı kayıplarındaki artışın az olduğu görülmektedir. Çizelge 16'da, gerilim dengesizliğinin yüzdesi artarken, üç durum için uygulanan indirgemenin sonuçları gösterilmiştir. Çizelge 16'ya göre gerilim dengesizliğinin derecesi artarken çekirdek ve bakır kayıpları artmaktadır ve bu nedenle indirgeme faktörü artmaktadır.



Şekil 7. Birincil sargıda indüklenen gerilim a) dengeli gerilim b) dengesiz gerilim (durum 2)
Figure 7. Induced voltage in primary winding a) balanced voltage b) unbalanced voltage (case 2)

SONUÇ (RESULT)

Bu çalışmada, harmonik yük akımı ve zaman bölgesinde sonlu elemanlar yöntemi ile üç fazlı Dy11, 100 kVA, 34.5Kv/400V dağıtım transformatörünün benzetim çalışması yapılmıştır. Dağıtım transformatöründeki manyetik alan dağılımını görselleştirmek için üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (3-D SEY) kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları Çizelge 4 ve 5'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre harmonik yük altında bakır ve girdap akımı kayıpları artmaktadır. Çizelge 2' de gösterildiği gibi THD'nun artması ile transformatör sargısındaki maksimum akı yoğunluğu artmaktadır. F_{HL} ve k-faktörü kullanılarak IEEE standardı ve SEY'e göre yapılan transformatör indirgeme sonuçları Çizelge 9 ve 13'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre yüksek THD_i durumunda IEEEc57.110 standardı daha koruyucu bir yöntemdir çünkü IEEE standardına göre hesaplanan eşdeğer KVA, SEY'e göre hesaplanan KVA değerinden daha düşüktür. Bu nedenle SEY transformatörün indirgenmesi için daha kesin bir yöntemdir. Çizelge 14 farklı dengesiz gerilim durumlarında transformatör çekirdeğindeki maksimum akı yoğunluğunu göstermektedir. Sonuçlar, dengesi gerilim ve VUF oranında artış olması durumunda transformatör çekirdeğindeki akı yoğunluğu artmaktadır. Çizelge 15'e göre dengesiz gerilim durumunda çekirdek ve bakır kayıpları önemli ölçüde artmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- A. Emadi , Y. J. Lee , K. Rajashekara "Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles" IEEE Transactions on Industrial Electronics , Volume: 55 , Issue: 6 , Page(s): 2237 - 2245 ,June 2008 .
- O. P. Taiwo , R. Tiako, I. E. Davidson "Voltage Unbalance Mitigation and Voltage Profile Enhancement in Secondary Distribution System Using Dynamic Voltage Restorer" International Journal of Engineering Research in africa ,Volume 34,pages : 81-101, 2018.

- A. Najafi, I. Iskender, N. Genc, "Evaluating and Derating of Three-Phase Distribution Transformer Under Unbalanced Voltage and Unbalance Load Using Finite Element Method" *IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO-2014*.
- S. Taheri, A. Gholami, I. Fofana, H. Taheri "Modeling and simulation of transformer loading capability and hot spot temperature under harmonic conditions" *Electric Power Systems Research*, Volume 86, Pages 68-75, May 2012.
- O. E. Gouda, G. M. Amer, "A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation, ETASR-Engineering, Technology & Applied Science Research, 114-120, Vol. 1, no. 5. 2011.
- J. Faiz, M. Ghazizadeh, H. Oraee "Derating of transformers under non-linear load current and non-sinusoidal voltage—an overview" *IET Electric Power Applications*, Volume 9, Issue 7, p. 486 – 495, 2015.
- M.A. Taghikhani, M. Rafiei "Thermal coefficient measurements of typical distribution transformers operating under imbalance conditions, 16th Electrical Power Distribution Conference, 2011.
- S. Bhushan, K. Asheesh, P. Thakur "Assessment of induction motor performance under voltage unbalance condition" *IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Hong Kong, 2012.
- N.R. Patne¹ and K.L. Thakre¹ "Effect of transformer type on estimation of financial loss due to voltage sag-PSCAD/EMTDC simulation study" *IET Generation, Transmission & Distribution*, Volume 4, Issue 1, pages:104-114, 2010.
- Hyun-Mo Ahn, Ji-Yeon Lee, Joong-Kyoung Kim "Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer" *IEEE Transactions on Industry Applications* (Volume: 47, Issue: 3, Page(s): 1267 – 1272, May-June 2011).
- E. Rahmat "Analisa Pengaruh Harmonisa Terhadap Faktor-K Pada Transformator" *SP - Electrical Engineering'* <http://respository.usu.ac.id/handle>, 2013.