

## An Analysis on Vibration Effects of Dry Type Transformers Operating Under Nonlinear Load Conditions

 Funda BATTAL<sup>1,\*</sup> İbrahim SEFA<sup>2</sup> Selami BALCI<sup>3</sup>
<sup>1</sup> Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Hacıbektaş MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 50800, Hacıbektaş/NEVŞEHİR

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, ANKARA

<sup>3</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 70200, KARAMAN

### Graphical/Tabular Abstract

The use of non-linear loads in transformers leads to increased losses, heat and more vibration and noise are generated. Vibrations should be investigated because they cause to decrease the nominal values of the transformer and its service life. Figure A shows the variation of core vibration with respect to these harmonic components with current harmonic components of linear load, 3-phase and 1-phase rectifier, respectively.

### Article Info:

Received: 21/06/2019

Revision: 23/08/2019

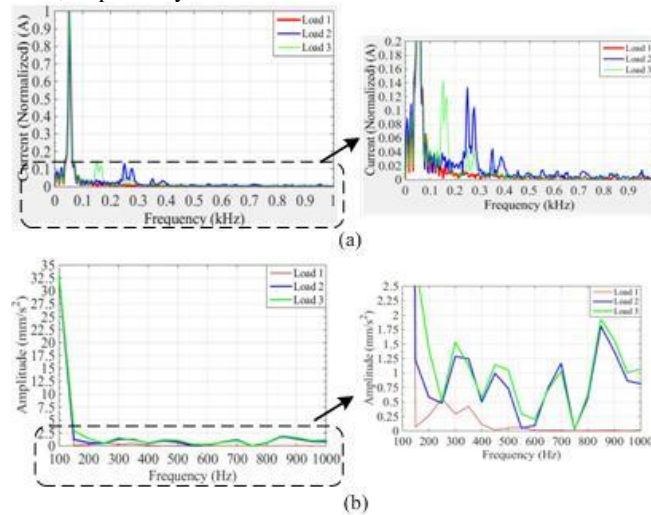
Accepted: 29/08/2019

### Highlights

- A dry-type isolation transformer
- THD and nonlinear loads
- Transformer core vibration and effects of harmonics on the amplitude of the vibration frequency

### Keywords

Transformer Core  
 Vibration  
 Non-linear Load  
 Total Harmonic Distortion  
 Finite Element Analysis



**Figure A.** Signals obtained according to load condition a) current harmonic spectrum, b) axial acceleration harmonic spectrum

**Purpose:** It is aimed to investigate the vibration signals of a dry type isolation transformer core which operates different load conditions.

**Theory and Methods:** Transformer and loads are modelled and simulated by using ANSYS Maxwell and Simplorer. And then core forces obtained from Maxwell are used as input parameters in ANSYS Mechanical. Finally, vibration signals as harmonic responses are obtained.

**Results:** Increase in the THD value leads to an increase in the number and amplitude of vibration harmonic components. With the increase in the THD value, the second and third harmonic components of the vibration have increased in amplitude. It has been shown that the increase of the THD value caused by using the 1-phase rectifier leads to only the increase of the peak value amplitude in the radial force frequency spectrum, there is no similar increase in the axial force frequency spectrum.

**Conclusion:** The increase of the THD value, the fundamental components of the vibration signals in the axial direction the second and third harmonic component amplitudes are increased. Also, the increase in THD value has led to a greater number of regional maximum points depending on the grades of the harmonic currents in the vibration frequency spectrum. Vibration signals must be carefully monitored since vibrations in the axial direction may cause a failure such as core deformation on the transformer.



## Doğrusal Olmayan Yük Koşullarında Çalışan Kuru Tip Transformatörlerin Titreşim Etkileri Üzerine Bir Analiz

Funda BATTAL<sup>1</sup>, \* İbrahim SEFA<sup>2</sup>, Selami BALCI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Hacıbektaş MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 50800, Hacıbektaş/NEVŞEHİR

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, ANKARA

<sup>3</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 70200, KARAMAN

### Öz

Transformatörler genel olarak doğrusal yüklerde çalıştırılmak üzere tasarlanırlar. Ancak son yıllarda doğrusal olmayan yüklerin toplam yük içerisindeki oranının artması ile bu şartlarda çalışabilecek tasarımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Transformatör sargılarından geçen akımların harmonik oranlarının artması ile transformatörün hem sargılarında hem de nüvelerinde daha fazla ısı oluşmakta ve işletme veriminin düşmesine yol açmaktadır. Doğrusal olmayan yüklerin diğer önemli bir etkisi de titreşim genlik değerlerinin büyümesine yol açarak transformatörlerin nüve ve sargılarının servis ömründe azalmaya yol açmalarıdır. Artan titreşim genlikleri ve dereceleri hem gürültü kirliliği oluşturur hem de transformatörün anma değerlerinin değişmesine yol açar. Transformatörlerin arıza teşhis ve koruma fonksiyonlarının tam olarak yapılabilmesi için sadece akım gerilim gibi elektriksel ve termal parametreleri ile değil aynı zamanda titreşim gibi mekanik parametrelerinin de tam ölçülebilmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu nedenle transformatörlerin titreşim sinyallerinin izlenmesi ve değişen çalışma koşulları altında değişim sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, yapılan çalışmada 500kVA anma gücündeki bir yalıtım transformatörünün doğrusal olmayan farklı yük şartları altındaki elektromanyetik analizleri yapılarak nüve kuvvetleri elde edilmiş daha sonra bu değerlere karşılık gelen titreşim değerleri belirlenmiş ve sonuçları rapor edilmiştir.

### Makale Bilgisi

Başvuru : 21/06/2019

Düzeltilme: 23/08/2019

Kabul: 29/08/2019

### Anahtar Kelimeler

Transformatör nüvesi

Titreşim

Doğrusal olmayan yük

Toplam Harmonik

Bozunum

Sonlu Elemanlar Analizi

### Keywords

Transformer Core

Vibration

Non-linear Load

Total Harmonic Distortion

Finite Element Analysis

## An Analysis on Vibration Effects of Dry Type Transformers Operating Under Nonlinear Load Conditions

### Abstract

Transformers are generally designed to operate in linear loads. However, in recent years because of the increase in the percentage of nonlinear loads within general load ratio, designs that can operate in these conditions are needed. Due to the harmonic ratios of currents passing through transformer windings increase, more heat is generated in both of windings and cores of transformer and it leads to decrease of operating efficiency. Another important effect of nonlinear loads is that it leads to an increase in vibration amplitudes, which causes a decrease in life core and windings of transformer. Vibrations in transformers can not only lead to noise pollution, but also they can cause both the nominal values of the transformer to change and the service life to decrease. It is possible to be able to fully conduct fault diagnosis and protection functions of transformers by not only precisely measuring electrical and thermal parameters like current-voltage but also mechanical parameters such as vibration. For this reason, it is necessary to monitor the vibration signals of the transformers and to determine the limits of change under changing operating conditions. For this purpose, in this study, core forces were obtained by performing electromagnetic analysis under nonlinear different load conditions of an insulation transformer at rated power of 500kVA and then vibration values corresponding to these values were determined and the results were reported.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Farklı güç ve gerilim seviyelerindeki enerji sistemlerinin en önemli ve pahalı bileşenlerinden olan transformatörler [1] genel iletim ve dağıtım sistemleri için tasarlanabildikleri gibi medikal cihazlar, şarj

cihazları, şebeke etkileşimli eviriciler ya da kesintisiz güç kaynakları gibi uygulamalarda birimleri birbirinden elektriksel olarak yalıtılmak veya daha yaygın bir ifade ile galvanik izolasyon sağlamak için de sıklıkla kullanılmaktadırlar [2-3]. Transformatörler genellikle doğrusal yüklerde ve belirli bir güç faktöründe çalışmak üzere tasarlanmışlardır. Ancak günümüzde gittikçe artan sayıda kullanılan, anahtarlama güç kaynakları, motor sürücüler, gerilim ayarlayıcılar, şarj cihazları gibi yükler harmonik bileşenler içeren akımlar çekmektedirler. Böylelikle, transformatörlerin sargılarından geçen akımların dalga şekilleri de doğrusal olmaktan uzaklaşmaktadır [4]. Sinüzoidal olmayan akımlar çeken bu yükler yüksek dereceli harmonik bileşenlerin ortaya çıkmasına yol açarak transformatörlerde kayıpların artması, nüve ve sargı gibi bileşenlerinde fazladan ısı artışı, rezonans tehlikesinin ortaya çıkması, güç faktöründe kötüleşme ve verimin azalmasının yanında titreşim ve gürültünün artması gibi birçok olumsuz değişime yol açmaktadır [5-6]. Bakım kolaylığı, daha az alan gerektirmesi ve benzeri sebeplerle tercih edilen kuru tip transformatörler, belirli bir gerilim seviyelerine kadar daha çok kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada kuru tip bir izolasyon transformatörünün doğrusal ve doğrusal olmayan yük koşullarına bağlı olarak değişen nüve titreşim değerleri ve yük akım formuna bağlı olan ilişki analiz edilmektedir.

Transformatörler gerek yüksüz gerekse yüklü çalışma durumlarında enerji uygulandığı andan itibaren çeşitli manyeto-mekanik etkilerden dolayı aktif kısımlarında titreşim oluştururlar. Yüksüz çalışmada sargılarda ihmal edilebilecek kadar küçük değerlerde akım dolaşacağı için sargı kuvvetleri oldukça küçük değerlerde olmaktadır. Buna bağlı olarak sargı titreşimi de ihmal edilecek kadar oldukça düşük değerlerde olmaktadır. Bu nedenle yüksüz çalışma durumunda sadece nüvede titreşim görülmektedir. Transformatörlerde nüve titreşiminin temel nedeni nüve malzemesinin manyetik özelliğinden kaynaklanan manyetik büzülme etkisinin varlığıdır. Yüklü durumda ise manyetik büzülme ek olarak sargı akımlarından kaynaklanan elektromanyetik kuvvetler hem nüvedeki titreşimi etkilemekte hem de sargılarda titreşimin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ancak transformatör doğrusal olmayan bir yükü beslerken sargılarda dolaşan akımda temel bileşen haricindeki diğer harmonik bileşenler de görülmeye başlanır. Bu harmonik akımlar genliğine bağlı olarak transformatörün titreşim değerini artırmakta ve transformatörün özellikle mekanik açıdan daha kısa sürede yıpranıp ömrünün azalmasına ya da tamamen devre dışı kalmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle sargı akımındaki harmoniklerden kaynaklanan dalga şekli bozunum seviyesi olan Toplam Harmonik Bozunum (THD) belirlenerek buna göre titreşim sinyalindeki değişimlerin de belirlenmesi gerekmektedir [7-9].

Transformatörlerde meydana gelebilecek herhangi bir mekanik arızanın belirlenmesinde titreşim-tabanlı tanımlama, detaylı bilgi sağlanmasından dolayı yaygın kullanılan metotlardan biridir [10]. Bu nedenle literatürde transformatörlerin titreşim analizlerine yönelik yapılan çalışmalar da gittikçe artmaktadır. Transformatörlerin titreşim analizleri ağırlıklı olarak yüksüz durumdaki nüve titreşimi ya da belirli doğrusal yük seviyelerinde veya kısa devre durumdaki titreşim analizleri şeklindedir. Ancak bu çalışmalar genelde nüve ve/veya sargıların mekanik/gevşeklik durumlarına göre [11-17], bu durumlara ek olarak sargı yalıtım malzemelerinin yıpranma durumlarına göre [19] yapılmaktadır. Yüklü çalışma durumlarında ise genellikle çeşitli seviyelerdeki doğrusal yükler incelemektedir. Ancak günümüzde doğrusal yükler kadar doğrusal olmayan yüklerin kullanımı da gittikçe yaygınlaştığından titreşim analizinde bu yük durumunun da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Kaynak [19]' da transformatörler normal ve deformasyon içeren anormal olarak sınıflandırılmış ve her biri için THD değerleri verilmiştir. Anormal durumda olan transformatörlerde yüksek frekanslı harmonik bileşenler, normal sınıflandırılan transformatörlere kıyasla çok daha yüksek çıkmıştır. [20]' de sargı deformasyonlarının belirlenebilmesi için titreşim sinyalinin gerçek ve sanal bileşenleri incelenmiş, güç faktörünün değişmesiyle birlikte titreşimin genliğinde değişme olmadığı ancak titreşimin gerçek ve sanal bileşenlerinde değişme olduğu rapor edilmiştir. [21]' de bir güç transformatöründe çeşitli yapısal problemlere göre titreşim sinyallerinin değişimi incelenmiş, buna ek olarak elektriksel ve mekanik uyarımlardan kaynaklanan titreşim sinyali değişimleri belirlenmiştir.

Transformatörlerde titreşim üzerine yapılan araştırmaların çoğunun sinüzoidal yüklerle çalışmaları içerdiği literatürden görülmektedir. Halbuki, günümüzde doğrusal olmayan bir ve üç fazlı yüklerin genel yük içerisindeki kullanım oranları giderek artmaktadır. Ayrıca, doğrusal olmayan yük akımları, transformatörün doğrusal yüklenme esnasındaki kayıplarının yanında titreşimlerinin de artmasına yol açmaktadır. Artan bu titreşimler, yıpranmayı hızlandırdıkları ve transformatör yapılarında mekanik arızalara yol açabildikleri için hata ve arızalara karşı önceden bilgi edinilmesi ve izlenmesi gereken sinyallerdir. Doğrusal olmayan yükler altında çalışan transformatörlerin titreşim analizine ilişkin olarak düşük dereceli harmonik bileşenlerin de

titreşim üzerindeki etkilerinin rapor edildiği bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada, 3-fazlı şebeke frekanslı 500kVA güç değerindeki kuru tip bir yalıtım transformatorünün farklı yük koşulları altında elektromanyetik modellemesi yapılmış ve bu koşulların nüve kuvveti üzerindeki değişimleri belirlenmiştir. Bu kuvvetlerinin değişimi ve buna bağlı olarak titreşim sinyallerinin değişmesi harmonik tepki analizleri yapılarak araştırılmış ve sonuçları karşılaştırmalı olarak rapor edilmiştir.

## 2. TRANSFORMATÖRLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN YÜKLER (NONLINEAR LOADS IN TRANSFORMERS)

Bir yüke uygulanan gerilim ile yükün çektiği akım arasında doğrusal olmayan bir ilişki bulunduğunda bu yük güç sistemlerinde harmonik akımların ortaya çıkmasına neden olur. Direnç, bobin ve kondansatör gibi yükler doğrusal yüklerdir. Eğer böyle yüklere sinüzoidal gerilim uygulanırsa çekecekleri akım da sinüzoidal olmaktadır. Ancak, günümüz güç sistemlerinde transformatorler, güç elektroniği devrelerini içeren anahtarlamalı güç kaynakları (SMPS), tasarruflu floresan lambalar, ark fırınları, ayarlanabilir hızlı AA ve DA sürücüler, yenilenebilir enerji kaynakları ve yüksek gerilim DA (HVDC) uygulamaları gibi doğrusal olmayan yapıda olan bileşenler, sistem frekansının tam sayı katlarındaki frekans değerlerinde harmoniklerin üretilmesine yol açmaktadırlar [7-9]. Bu yüklerin çektiği harmonikli akımlar, sistem empedansı üzerinde harmonikli gerilimleri oluşturur. Bu harmoniklerin temel etkileri kontrol ve koruma cihazlarının yanlış çalışması, telefon girişimleri, rezonans frekanslarının oluşması, aşırı ısınma, ek gürültü oluşumu, ek hat kayıpları (temel ve harmonik frekanslarda) ve elektrik makineleri gibi şebeke elemanları ile tüketici cihazlarının ömürlerinin azalmasına yol açmasıdır.

Herhangi bir akım/gerilim sinyali Fourier serileri ile ifade edilebilir. Fourier serisindeki her terim, dalga şeklinin harmonik bileşeni olarak adlandırılır. Harmoniklerin frekansları genellikle temel frekansın tam sayı katlarıdır. Bir akım/gerilim sinyali Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2' de verildiği gibi tanımlanır:

$$v(t) = V_{DC} + \sum_{h=1}^n V_h \cos(h\omega_0 t + \alpha_h) = V_{DC} + v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) + \dots + v_n(t) \quad 2.1$$

$$i(t) = I_{DC} + \sum_{h=1}^n I_h \cos(h\omega_0 t + \beta_h) = I_{DC} + i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + \dots + i_n(t) \quad 2.2$$

Burada  $\omega_0$  temel frekansı,  $h$  ise harmonik derecesini,  $V_h$ ,  $I_h$ ,  $\alpha_h$  ve  $\beta_h$  terimleri ise  $h$ . dereceden harmonik için sırasıyla gerilim ve akımların RMS genlik ve fazlarını göstermektedir. Dalga şeklinin sinüzoidal dalga gibi simetrik olduğu durumlarda Fourier serisi sadece tek dereceli harmoniklerden oluşur. Ancak sistemde yarım-dalga doğrultucular, ark fırınları ya da Geomanyetik-İndüklemeli Akımlar (GIC) görülüyorsa çift harmonikler de ortaya çıkarlar. Sinüzoidal olmayan bir dalga şeklinin harmonikleri, bu fonksiyonun Fourier serisi bileşenlerinin çift ve tek bileşenlerine karşılık gelmektedir. [22].

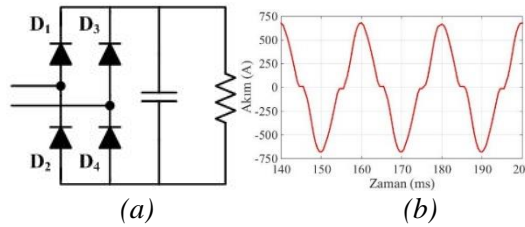
Bozulmuş bir dalga şeklinin harmonik içeriğini göstermek için Toplam Harmonik Bozunum (THD), Güç Faktörü (PF), Tepe Faktörü (CF), Harmonik Kayıp Faktörü (K-faktör), transformator güç indirgeme (derating) faktörü (TDF) gibi çeşitli parametreler kullanılmaktadır. Bunların içerisinde kolay hesaplanabilmesinden dolayı THD yaygın şekilde kullanılmaktadır. THD ile harmonik bileşenlerin temel bileşene oranı olarak hesaplanır ve yüzde cinsinden ifade edilir ve akım dalga şekli için THD değeri Eşitlik 2.3' te verildiği gibi belirlenebilmektedir.

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad 2.3$$

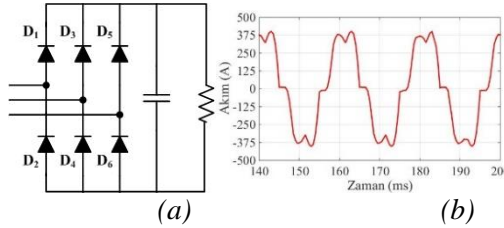
Burada  $I_1$  temel bileşenin rms değeri ve  $I_h$  de  $h$ . dereceden harmonik bileşenin genliğidir. Harmonik bileşen içeren bir dalga şeklinin rms değeri temel bileşeni de içerecek şekilde tüm harmonik bileşenlerin rms değerlerinden hesaplanabilmektedir. THD ile bir dalga şeklinin bozunum seviyesini göstermenin temel avantajları, hızlı şekilde ölçümün yapılabilmesi ve kolaylıkla belirlenebilmesidir. En büyük dezavantajı ise doğrudan genlik ve frekans spektrumu bilgisi sağlamamasıdır [9].

Günümüz elektrik şebekesindeki yüklerin büyük bir bölümü geçmişte olduğu gibi doğrusal yüklerden oluşmamaktadır. Doğrusal olmayan bu yükler, geçmişte üretilen ve harmonikler açısından standart dışı olarak kabul edilebilecek şebeke frekanslı doğrultucular ile standartları bütün bir çalışma aralığında

karşılama yüksek frekanslı tasarımlardan kaynaklanmaktadır. Genel olarak meskenlerde bir fazlı kontrolsüz doğrultucular ile endüstride kullanılan üç fazlı kontrollü ve kontrolsüz doğrultucular dağıtım şebekesindeki enerji kalitesi açısından problem oluşturan ve en çok kullanılan yük çeşitleridir. Bu yüklerin harmonik değerleri ve dereceleri doğrultucunun faz ve darbe sayısına göre farklılıklar göstermektedirler. Yapılan bu çalışma ile hem bir fazlı ve hem de üç fazlı doğrusal olmayan yükler ile ayrı ayrı yüklenecek olan bir transformatörün titreşim davranışları analiz edilerek referans titreşim değeri olabilecek doğrusal yüklemeye anındaki titreşim değerleri karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarında ilk olarak, bir fazlı doğrusal olmayan yüklerin, transformatörün her üç faz sargısına da eşit olarak dağıtıldığı durum ile daha sonra ise yükün tamamının üç fazlı doğrusal olmayan altı darbeleri bir doğrultucu yükü ile yapılmıştır. Böylece olabilecek en kötü doğrusal olmayan yük davranışına göre analiz edilmektedir. Benzetim çalışmalarında kullanılan doğrusal olmayan yüklerin toplam harmonik bozunum değerleri gerçek ortamdaki yük değerleri ile uyumludur ve doğrusal olmayan yükler altında çalışan transformatörün titreşimlerinin harmoniklerle ilişkisi araştırılarak ortaya konulmuş olacaktır. Benzetim devresinde kullanılan doğrusal olmayan bir fazlı yük ve giriş akımı Şekil 1’de, üç-fazlı altı darbeleri doğrultucu ve giriş akımları Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 1. 1-fazlı doğrultucu a) devre şeması, b) giriş akımı



Şekil 2. 3-fazlı doğrultucu a) devre şeması, b) giriş akımı

### 3. TRANSFORMATÖRLERDE TİTREŞİM VE BİLEŞENLERİ (VIBRATION AND ITS COMPONENTS IN TRANSFORMERS)

Transformatörlerdeki titreşimler transformatörün servis ömrünü azalttığı gibi elektriksel ve mekanik performansını da olumsuz yönde etkilemesinin yanı sıra gürültü kirliliği oluşturduğu için izlenmesi gereken parametrelerdir [23].

Transformatörde oluşan titreşimler, transformatörün çalışması süresince nüve ve sargı gibi aktif kısımları başta olmak üzere hemen hemen bütün parçalarında oluşmaktadır. Sargı ve nüve titreşimleri, bu parçalarda görülen çeşitli kuvvetler tarafından üretilmekte olup, sargı ve nüve malzemelerinin manyetik ve mekanik özellikleri ile ilişkilidir. Bunun yanında, soğutma amaçlı fan kullanılması halinde fan kaynaklı titreşimler de toplam titreşim seviyesine eklenmektedir. Genel olarak bir transformatörde yapısal titreşimler üç tip elektromanyetik kuvvet tarafından uyarılmaktadır. Bunlar; Maxwell kuvveti, manyetik büzülme kuvveti ve Lorentz kuvvetidir [24]. Transformatörün mekanik yapısında titreşimleri ortaya çıkaran bu kuvvetler gerilime bağlı ve yüke bağlı etkilerden kaynaklanmaktadır [25].

#### 3.1. Maxwell Kuvvetleri (Maxwell Forces)

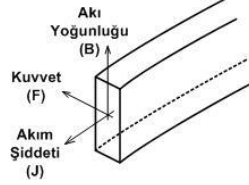
Transformatör nüvelerinin birleşme noktaları, hava aralığı bölgeleri ve yüzeyleri gibi farklı manyetik özelliklere sahip iki ortam arasında ortaya çıkan kuvvetlerdir [26]. Maxwell kuvvetleri itici kuvvetler ve çekici kuvvetler olmak üzere iki kısma ayrılabilir [26]. İtici kuvvetler, lamine yapıya sahip nüvenin hava aralığından uzak olan kısımlarında meydana gelir. Bu nedenle yoğunlukları zayıftır. Çekici kuvvetler ise

akının bir levhadan diğerine gitmesi nedeniyle hava aralığının olduğu yerlerde yoğunlaşır. Çekici kuvvetler manyetik büzülmeden kaynaklanan titreşime göre daha yüksek değerlerde ortaya çıkar.

### 3.2.Lorentz Kuvveti (Lorentz Forces)

Lorentz kuvveti olarak da bilinen sargı kuvvetlerinin temel nedeni kaçak akı alanı olarak adlandırılan elektrik ve manyetik alanlar arasındaki etkileşimlerdir [22, 27]. Bu elektromanyetik kuvvet (F), akım şiddeti (J) ile akı yoğunluğunun (B) vektörel çarpımı olarak Eşitlik 3.1' deki gibi ifade edilmektedir [24]. Şekil 3 ise oluşan kuvvet ile akım şiddeti ve akı yoğunluğu arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$F = J \times B \quad 3.1$$



**Şekil 3.** Manyetik akı yoğunluğu, akım şiddeti ve oluşan kuvvetin bir iletkendeki yönü [28]

Sargılarda dolaşan akım hem akı yoğunluğunu hem de akım şiddetini dolayısıyla oluşan kuvvetin genliğini etkilemektedir. Bu kuvvet her iki büyüklüğün çarpımıdır ve akımın karesiyle orantılıdır. Şekil 1, oluşan kuvvet ile akım şiddeti ve akı yoğunluğu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sargıda meydana gelen kuvvetin yönü hem akımın hem de akı yoğunluğunun yönüne diktir.

Sargı kuvvetleri genel olarak radyal ve ekstenel olmak üzere iki bileşen halinde incelenmektedir [27-28]. Her iki kuvvet bileşeni sargıların farklı kısımlarında ortaya çıkabilir. Radyal ve ekstenel kuvvetler sargılar üzerinde yüksek baskıya neden olarak sargı deformasyonuna yol açmaktadırlar.

### 3.3. Nüve Kuvveti ve Manyetik Büzülme (Core Forces and Magnetostriction)

Manyetik malzemeler, manyetik alan içerisinde kaldıkları zaman boyutlarında oldukça küçük bir değişim gözlenmektedir. Bu değişim manyetik büzülme, bu kuvvete de manyetik büzülme kuvveti olarak adlandırılmaktadır. Malzeme boyundaki uzaman, hacmindeki uzamadan daha fazla olduğu için değişim  $\mu\text{m/m}$  ile ifade edilmektedir. Genel olarak boydaki uzama miktarı akı yoğunluğunun karesi ile orantılı olarak değişirken malzeme doyma noktasına ulaştığında maksimum değerini almaktadır. Malzemenin boyundaki değişim, akı yoğunluğunun karesi ile değiştiği için manyetik büzülmenin harmonik bileşenleri çalışma frekansının çift katları olan frekans değerlerinde oluşmaktadır. Bundan dolayı nüve titreşiminin temel frekansı çalışma frekansının iki katı olmaktadır [29]. Temel bileşenin genliği ise uygulanan gerilimin karesi ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

Transformatör nüvesi şebeke frekanslı uygulamalarda genellikle lamine levhalardan meydana geldiği için nüve bacakları ile boyunduruk arasındaki bağlantılar genelde çakışık durumda bulunmaktadır. Nüve bacakları ve boyunduruklar arasındaki istenmeyen hava aralıklarının küçük değişimleri de düzensiz bir akı dağılımına yol açtığı için manyetik büzülme kuvvetleri nüveye dik bir düzlemde oluşmaktadır [25-26, 30].

Transformatör sargılarına sinüzoidal bir gerilim uygulandığında sargıda indüklenerek olan gerilim değeri Eşitlik 3.2' de görülmektedir. Bu eşitlikte  $N_1$  sarım sayısını,  $B$  akı yoğunluğunu,  $A$  nüvenin kesit alanını ( $\text{m}^2$ ) ve  $U_0$  ise uygulanan gerilimi göstermektedir.

$$U_0 \sin \omega t = -N_1 A \frac{dB}{dt} \quad 3.2$$

Sargılara uygulanan gerilim ve dolayısıyla akı yoğunluğu göz önüne alındığında ortaya çıkan manyetik büzülme değeri Eşitlik 3.3' te verilmiştir. Eşitlik 3.3' te  $\lambda_s$ , doyma manyetik büzülme değerini,  $B_s$  ise doyma akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Buna göre manyetik büzülme kuvvetleri, akı yoğunluğunun karesi ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir [25-26, 30].

$$\lambda = \frac{\lambda_s B_0^2}{B_s^2} \cos^2 \omega t \quad 3.3$$

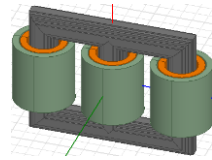
Eş.3.3 aynı zamanda manyetik büzülme değerinin akı yoğunluğu ile doğrusal olmayan bir değişim göstermektedir. Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3' ten yola çıkarak nüve titreşim ivmesi  $a_c$  Eş.3.4' teki gibi ifade edilebilir. Bu eşitlikte  $\omega$  açısal frekans  $\omega = 2\pi f$  i (f kaynak geriliminin frekansı),  $L$  akı yolunun uzunluğunu göstermektedir.

$$a_c = -\frac{2\lambda_s L U_0^2}{(N_1 A \omega B_s)^2} \cos^2 \omega t \quad 3.4$$

Bu bağlamda, Eş.3.4' te verilen matematiksel ifade nüve titreşim ivmesinin genliğinin ve frekansının kaynak geriliminin genliğinin karesi ve manyetik büzülme katsayısı ile doğrusal olarak değiştiğini göstermektedir. Son olarak Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4' e göre manyetik büzülme ve nüve titreşimi temel bileşenlerinin çalışma frekansının 2 katı olduğu söylenebilir. Nüve manyetik büzülmesinin doğrusal olmaması yüksek dereceli harmoniklerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır [29].

#### 4. MODELLEME VE BENZETİM (MODELING AND SIMULATION)

Bu çalışmada 3-fazlı kuru-tip 500kVA anma gücünde bir yalıtım transformatorünün çeşitli yükler altındaki titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4' te benzetim çalışmalarında kullanılan transformatorün modeli, Tablo 1' de de bu transformatorün özellikleri yer almaktadır.

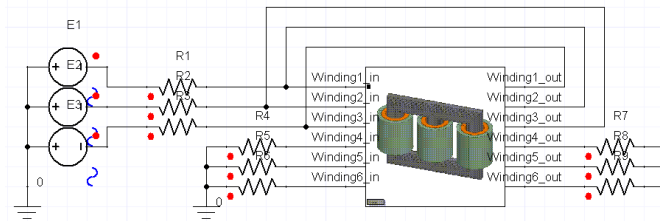


Şekil 4. Modellenen yalıtım transformatorü

Tablo 1. Benzetimde kullanılan transformatorün özellikleri

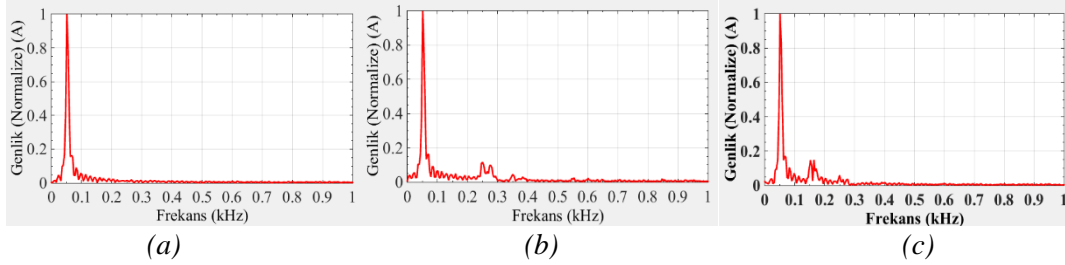
Güç kapasitesi	500 kVA
Gerilimi değeri	400 V / 400 V
Çalışma frekansı	50 Hz
Nüve malzemesi	M5 Yönlendirilmiş Silisli Sac (0,30mm)
Sargı malzemesi	Alüminyum
Yük Özellikleri	Doğrusal yük (Yük 1)
	Doğrusal olmayan yük (THD <sub>i</sub> ~%35) (Yük 2)
	Doğrusal olmayan yük (THD <sub>i</sub> ~%55) (Yük 3)

Benzetim çalışmalarında elektriksel uyarımlar için ANSYS Simplorer ve ANSYS Maxwell yazılımları ile eş zamanlı olarak her bir yük durumu için analizler yapılmıştır. Şekil 5'te farklı THD değerlerini elde etmek için kullanılan Simplorer devresi doğrusal yük için verilmiştir. Tablo 1' de belirtilen yüklerle göre ANSYS Maxwell ile yapılan elektromanyetik modelleme ile yüklü durumlar için nüvede oluşan kuvvetler belirlenmiş daha sonra bu kuvvetler ANSYS Workbench Mechanical ile yapılan harmonik tepki analizi için giriş parametrelerini oluşturmuştur.



Şekil 5. Doğrusal yük için Simplorer yazılımında benzetim devresi

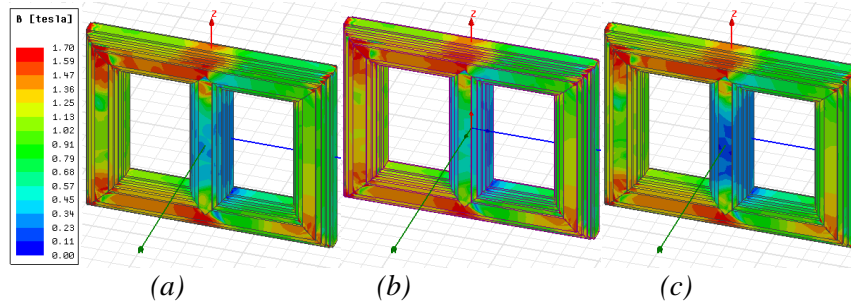
Transformatörler normal şartlarda doğrusal yük altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak günümüz uygulamalarında doğrusal yükler kadar çeşitli harmonik bozunum seviyelerine sahip doğrusal olmayan yükler de bulunmaktadır. Bu doğrusal olmayan yüklerin transformatör titreşimine olan etkilerini belirlemek amacıyla çalışmanın bu kısmında 3 farklı yaygın yük kullanılmıştır. Bu yükler ve THD değerleri Tablo 1’de verilmiştir. 1-fazlı doğrultucu ile yüklenme durumunda transformatörün her fazı ayrı ayrı 1-fazlı doğrultucu ile yüklenmiştir. Her 3 yük durumu için transformatör anma yük seviyesinde çalışmaktadır.



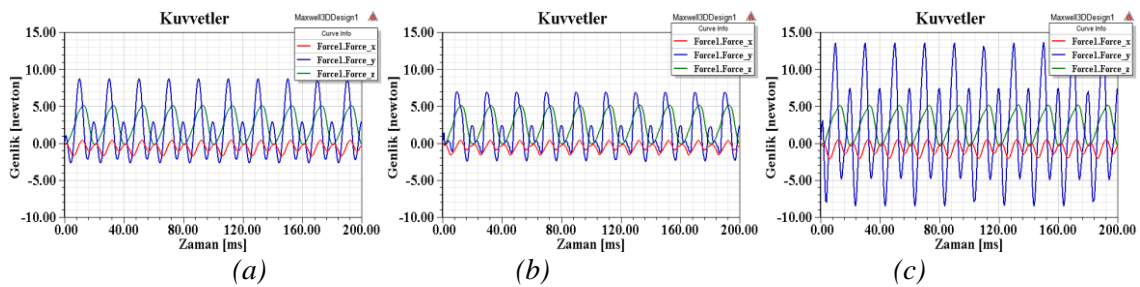
**Şekil 6.** Transformatörün şebekeden çektiği akımların harmonik spektrumu a) doğrusal yüklenme durumu, b) 3 fazlı doğrultucu ile yüklenme, c) 1 fazlı doğrultucu ile yüklenme

Şekil 6’ daki benzetim sonuçlarından elde edilen yük akımlarının harmonik spektrumlarından görüleceği gibi doğrusal yükte sadece 50Hz’ de temel bileşen, üç fazlı doğrultucuda ise temel bileşene ek olarak sırasıyla temel bileşenin %11,5’ i ve %4,3’ ü kadar genliğe sahip 5. ve 7. harmonik bileşenler yer almaktadır. Bir fazlı doğrultucuda ise temel bileşenin yanı sıra temel bileşenin sırasıyla %14,6, %5,8 ve %2’ si kadar genliklere sahip 3., 5. ve 7. harmonik bileşenler bulunmaktadır.

Belirtilen çalışma koşullarında nüvede oluşan akı yoğunlukları Şekil 7’ de görülmektedir. Her üç nüve için gerilimin en yüksek değerini aldığı 0,185ms anı seçilmiş ve akı yoğunluğu skalası üç nüve için ortak olacak şekilde belirtilmiştir. Bu nüvelere ilişkin nüve yapısının bütününe ait üç yöndeki kuvvet eğrileri ise Şekil 8’ de verilmiştir.



**Şekil 7.** Nüve akı yoğunlukları a) doğrusal yük, b) 3 fazlı doğrultucu, c) 1 fazlı doğrultucu

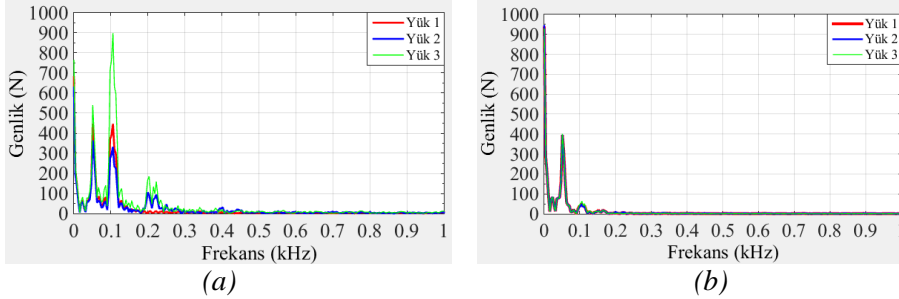


**Şekil 8.** Nüve kuvvetleri a) doğrusal yük, b) 3 fazlı doğrultucu, c) 1 fazlı doğrultucu

Bütün yük koşullarında y-yönündeki kuvvetin tepe değeri z-yönündeki kuvvetlerin genliklerine kıyasla daha yüksek değerde olduğu Şekil 8’ den görülmektedir. Şekilden ayrıca x-yönündeki kuvvetlerin çok



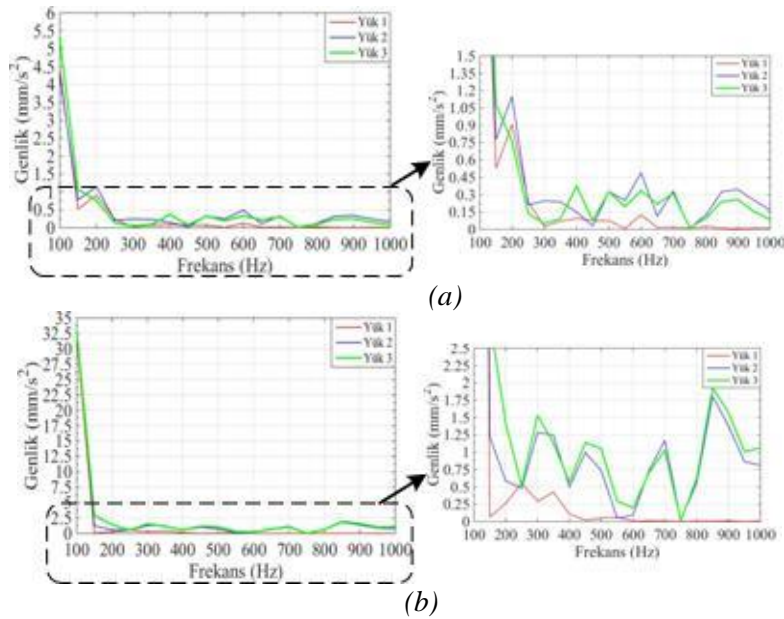
düşük genliklerde ve periyodik olduğu da görülmektedir. Bu nedenle x-yönüne ait ivme harmonik bileşenleri bu çalışmada incelenmemiştir. Elektromanyetik modelleme ile elde edilen bu nüve kuvvetlerinin Şekil 9' da verilen harmonik bileşenleri Ansys-Mechanical programında giriş parametresi olarak kullanılmış ve bunlara göre titreşim ivmesinin harmonik tepkileri elde edilmiştir.



**Şekil 9.** Nüve kuvvetlerine ilişkin harmonik spektrumları a) y-yönü (radyal), b) z-yönü (eksenel)

Şekil 9 (a)' da görülen radyal kuvvetlere ilişkin harmonik spektrumda doğrusal yük durumunda sadece DA bileşen, 50Hz ve temel bileşen ortaya çıkmıştır. Harmonik bozunum değerinin artmasıyla birlikte bu bileşenlere ek olarak 200Hz' de de bir bileşen ortaya çıkmış ve genlikleri de temel bileşene göre Yük 2 ve Yük 3 için sırasıyla %789 ve %1467 oranlarında artış göstermiştir. Şekil 9 (b)' deki eksenel kuvvetlerde ise; akım harmonik bozunumunun artmasıyla kuvvet harmonik bileşenlerinde çok küçük bir değişim olduğu ve radyal kuvvetlerin aksine eksenel kuvvetlerde sadece DA, 50Hz ve temel bileşen bulunduğu görülmektedir.

Şekil 10' da belirtilen 3 farklı çalışma durumu için titreşim ivmelerinin frekans bileşenleri verilmiştir.



**Şekil 10.** Yük tipine göre elde edilen ivme sinyalleri (a) y-yönü titreşimler, (b) z-yönü titreşimler

Şekil 10 (a)' da verilen y-yönündeki titreşimlerde temel bileşen genliği harmonik bozunum derecesiyle paralel bir değişim göstermiştir. Yük 3 titreşiminin 2. bileşeni diğer yüklere göre daha düşüktür. Yük 1' e ait ivme harmonik genlikleri diğer yük tiplerine göre daha düşük değerlerde ortaya çıkmıştır. Yük 1' e ait ivme değerleri referans olarak alındığında Yük 2 ivme genlikleri 100Hz' de %3,8 azalırken 200Hz' de %27,7 oranında artmıştır. Yük 3 ivme genlikleri ise 100Hz' de %2,83, 200Hz' de ise %123 oranında artış göstermektedir.

Şekil 10 (b)' de verilen eksenel ivmelerde ise Yük 1 haricindeki diğer iki yükün harmoniklerinin genlikleri ve frekansları yakın değerlerdedir. Yük 1' e ait 100Hz' deki ivme bileşeninin genliği referans alındığında

Yük 2 için %2,83, Yük 3 için %3,78 oranlarında artış meydana geldiği görülmektedir. Yük 1' de ise 250Hz ve 350Hz frekanslarında karakteristik olmayan iki harmonik bileşen görülmüş ve bunların haricinde başka bir harmonik bileşen oluşmamıştır. Yük 2 ve Yük 3'te ise akım sinyalindeki harmonik bileşenler transformatör titreşiminin yüksek dereceli harmonik bileşenlerinin ortaya çıkmasına yol açmakta ve genliklerini etkilemektedir.

Şekil 6 ile Şekil10 birlikte incelendiğinde akım harmonik bileşenleri ile ivme harmonik bileşenleri arasında doğrudan bir ilişki bulunamamıştır. Örneğin, Yük 2 akımının 3. harmonik bileşeni bulunmamasına rağmen eksenel yöndeki ivme frekans spektrumunda 3. bileşen olduğu görülmektedir. Şekil 9 ile Şekil 10 birlikte incelendiğinde yine benzer şekilde nüve kuvvetlerinin harmonik bileşenleri ile ivme harmonik bileşenleri arasında frekans açısından doğrudan bir ilişki bulunmamasına rağmen Yük 2 ve Yük 3' te görülen 200Hz ile 400Hz' deki bileşenleri ivme harmonik spektrumunda da bu frekanslardaki bileşenlerin genliğini artırmıştır.

Benzetim sonuçları değerlendirildiğinde;

- THD değerinin artması, titreşim ivmesinin harmonik bileşen sayısı ve genliğinde artışa yol açmaktadır (Şekil 10(b)).
- THD değerindeki artış ile beraber nüve kuvveti harmonik spektrumunda 2. ve 4. bileşenler ortaya çıkmış bu durum ise ivmenin 2. ve 3. harmonik bileşen genliğini artırmıştır. 2. Harmonik bileşen nüvede herhangi bir mekanik problemin ortaya çıkmasını önceden belirlemek için incelenmelidir.
- Bunlara ek olarak 1-fazlı doğrultucunun kullanılmasıyla oluşan THD değerinin artması, nüve kuvvetinin temel bileşenini doğrusal yük için %61, 3-fazlı doğrultucu için %45 oranında artırmış olsa da eksenel ivme genliklerinde benzer oranda bir artışın oluşmadığı, sadece frekans spektrumunda tepe değeri ifade eden genliğin artmasına yol açtığı görülmüştür.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Güç sistemlerinde doğrusal olmayan akımlar çeken yükler giderek artmakta ve bu yüklerin büyük genlikli harmonik bileşen dereceleri transformatörlerin kayıplarını artırdığı gibi titreşimlerinin de artmasına yol açmaktadır. Doğrultucu devreleri gibi doğrusal olmayan yükleri besleyen transformatörlerde bu durum birçok olumsuz gelişmeyi de beraberinde getirmektedir. Bu olumsuzluklardan birisi olan titreşimler, yıpranmayı hızlandırdıkları ve transformatör yapılarında mekanik arızalara yol açabildikleri için izlenmelidirler. Bu çalışmada doğrusal yük ile farklı THD değerlerinde akım çeken doğrultucu yüklerinin transformatör nüve titreşimleri üzerine olan etkileri incelenmiştir. Yapılan analizlerde, her yük durumunun nüve üzerinde oluşturduğu kuvvetlere göre titreşim harmonik tepkileri belirlenmiştir. Elde edilen harmonik tepkilere göre, THD değerinin artmasıyla birlikte radyal ve eksenel yönlerdeki titreşim sinyallerinin temel bileşen ile 2. ve 3. harmonik bileşen genliklerinde artışlar olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak, THD değerinin artması titreşimin frekans spektrumunda, harmonik akımların derecelerine bağlı olarak daha fazla sayıda bölgesel maksimum noktaları oluşmasına yol açmaktadır. Eksenel yöndeki titreşimler transformatör üzerinde nüve deformasyonu gibi arızalara yol açabileceği sebebiyle özellikle kritik önemdeki uygulamalarda transformatörlerin vibrasyona yönelik davranışlarının dikkatle izlenmesi ile arızaların önceden tespit edilebilmesi ve yaşanmanın geciktirilmesi mümkün olabilecektir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gezeğin, C., Dirik, H., Özdemir, M. Transformatörlerin Ortalama Sargı Dirençlerinin Gerçek Zamanlı Ölçümü, GU J Sci, Part C, 6(3): 592-604, (2018).
- [2] Ahmad A.A., Abrishamifar A., Jamarani M. E., Designing 3-Phase Inverters with  $\Delta/Y$  Output Isolation Transformer, The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014), 2014, pp. 223-226.
- [3] Greco N., Parisi A., Palmisano G., Spina N., Ragonese E., Integrated Transformer Modelling for Galvanically Isolated Power Transfer Systems, 13th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 2017, pp. 325-328.

- [4] Ertl M., Voss S. The Role of Load Harmonics in Audible Noise of Electrical Transformers, *Journal of Sound and Vibration*, 333 (2253-2270), (2014).
- [5] Biricik S., Özerdem Ö. C., Experimental Study and Comparative Analysis of Transformer Harmonic Behaviour under Linear and Nonlinear Load Conditions, 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011.
- [6] Cazacu E., Ionita V., Petrescu L., Thermal aging of power distribution transformers operating under nonlinear and balanced load conditions, *Power Engineering and Electrical Engineering*, 16(1), 92-100, (2018).
- [7] Galli W., Skvarenina T. L. (2002). *Power Quality and Utility Interface Issues*, CRC Press LLC.
- [8] Abu Dhabi Distribution Company, Al Ain Distribution Company, Abu Dhabi Supply Company for Remote Areas (RASCO), Limits for Harmonics in the Electricity Supply System, Engineering Recommendation No.1 of the Electricity Distribution Code, <https://www.aadc.ae/img/41f76c6a-90c5-46e4-aabc-1414e6e4896b.pdf>. Yayın tarihi 2005. Erişim tarihi: Nisan 28, 2018.
- [9] Fuchs E., Masoum M. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Elsevier Science, 19-20, (2008).
- [10] Zizins-Malisevs S., Poiss G., Power Transformer Mechanical Condition Assessment with A Vibration-Based Diagnostic Method, 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2015.
- [11] Berler Z., Golubev A., Rusov V., Tsvetkov V., Vibro-Acoustic Method of Transformer Clamping Pressure Monitoring, In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2000, 263-266.
- [12] Xiong W., Ji R., Nonlinear Time Series Analysis of Transformer's Core Vibration, *The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation 2*, 2006, 5493 – 5496.
- [13] Borucki S., Time-Frequency analysis of mechanical vibrations of the dry type power transformer core, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 120 (4), 571-574, (2011).
- [14] Borucki S., Diagnosis of technical condition of power transformers based on the analysis of vibroacoustic signals measured in transient operating conditions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, (27) 2, 670-676, (2012).
- [15] Munir B. S., Smit J. J., Rinaldi I G. M. R., Diagnosing Winding and Core Condition of Power Transformer by Vibration Signal Analysis, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2012.
- [16] Zheng J., Pan J., Huang H., An experimental study of winding vibration of a single-phase power transformer using a laser doppler vibrometer, *Applied Acoustics* 87, 30-37, (2015).
- [17] Qian G., Research on Spectrum Eigenvalues of Transformer Vibration and its Application on Diagnosis, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, (2016).
- [18] Naranpanawe L., Ekanayake C., Finite Element Modelling of a Transformer Winding for Vibration Analysis, *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, (2016).
- [19] Bartoletti C., Desiderio M., Di Carlo D., Fazio G., Muzi F., Sacerdoti G., Salvatori F, Vibro-Acoustic techniques to diagnose power transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, (19) 1, 221-229, (2004).

- [20] García B., Burgos J. C., Alonso A., Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations—Part 2: Experimental verification, *IEEE Transactions Power Delivery*, 21 (1), 164-169, (2006).
- [21] Wang Y. (2015). Transformer vibration and its application to condition monitoring, PhD Thesis, University of Western Australia, School of Mechanical and Chemical Engineering.
- [22] Najafi A., Iskender I., Electromagnetic force investigation on distribution transformer under unbalanced faults based on time stepping finite element methods, *Electrical Power and Energy Systems* 76, 147–155, (2016).
- [23] Wei G. S., Xin L., Qiang L., Hong W., Duanchunjian Z., Vibration finite element analysis of SC10 dry-type transformer core, *Sensors and Transducers*, 173 (6), 75-81, (2014).
- [24] Shuai P., Biela J., Investigation of Acoustic Noise Sources in Medium Frequency, Medium Voltage Transformers, *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)*, 2014, pp. 1-11.
- [25] Garcia B., Burgos J. C., Alonso A., Winding deformations detection in power transformers by tank vibrations monitoring, *Electric Power Systems Research* 74, 129-138, (2005).
- [26] Tabrizi S., Study of effective methods of characterization of magnetostriction and its fundamental effect on transformer core noise, PhD thesis, Cardiff University Wales, 2013.
- [27] Gutten M., Janura R., Jurcik J., Determination of Electromagnetic Forces Caused by Short-Circuit Currents, *56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2015, 1-4.
- [28] Mohamed, N., Electromagnetic forces in transformers under short circuit conditions, *Powertech Transformers*, 36-40, 2011.
- [29] Du B. X., Liu D. S., Dynamic behavior of magnetostriction-induced vibration and noise of amorphous alloy cores, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (4), (2015).
- [30] Hong K., Huang H., Zhou J., Winding condition assessment of power transformers based on vibration correlation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30 (4), 1735-1742, (2015).