



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Yalıtım transformatörlerinde ara-harmoniklerin transformatör nüve titreşimi üzerine etkisi

*The effect of interharmonics on transformer core vibration in isolation transformers*

Yazar(lar) (Author(s)): Funda BATTAL<sup>1</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-7233-2843

**To cite to this article:** Battal F., “Yalıtım transformatörlerinde ara-harmoniklerin transformatör nüve titreşimi üzerine etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 27(3): 1147-1159, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Battal F., “Yalıtım transformatörlerinde ara-harmoniklerin transformatör nüve titreşimi üzerine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 27(3): 1147-1159, (2024).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1206090

# Yalıtım Transformatörlerinde Ara-Harmoniklerin Transformatör Nüve Titreşimi Üzerine Etkisi

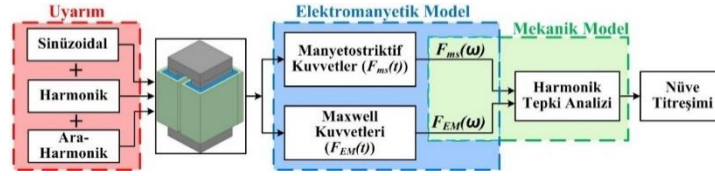
## The Effect of Interharmonics on Transformer Core Vibration in Isolation Transformers

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Harmonik ve ara-harmonik içeren uyarım altında yalıtım transformatörünün modellenmesi / Modeling of isolation transformer under excitation with harmonic and interharmonic
- ❖ Şebeke-frekanslı yalıtım transformatörünün nüve titreşiminin analiz edilmesi / Analyzing the core vibration of the line-frequency isolation transformer
- ❖ Ara-harmoniklerin transformatör nüve titreşimi üzerine etkileri / Effects of interharmonics on transformer core vibration

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bir elektrik şebekesinde karakteristik harmoniklerle beraber ara-harmoniklerin de bulunduğu durumlar göz önüne alınarak şebeke-frekanslı yalıtım transformatörünün nüve titreşiminin harmonik spektrumu analiz edilmiştir. / The core vibration harmonic spectrum of the line-frequency isolation transformer has been analyzed by considering the conditions in which characteristic harmonics and interharmonics are also present in an electrical grid.



Şekil. Ara-harmonikli uyarım altında nüve titreşiminin analizi /Figure. Analysis of core vibration under interharmonic excitation

### Amaç (Aim)

Farklı ara-harmonik frekanslı uyarımların bir yalıtım transformatörünün nüvesinin titreşim sinyallerine katkısının incelenmesi amaçlanmaktadır. / It is aimed to investigate the contribution of excitations with different interharmonic frequencies to the vibration signals of the core of an isolation transformer.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Farklı harmonik içerikli uyarımlar altında şebeke-frekanslı bir transformatörün titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. / Vibration analysis of a line-frequency transformer under excitations with different harmonic contents has been carried out.

### Özgünlük (Originality)

Şebeke-frekanslı transformatörlerde karakteristik harmoniklerin nüve titreşimine etkilerinin yanı sıra ara harmoniklerin etkileri incelenmiştir. / It is investigated in line-frequency transformers, the effects of interharmonics as well as the effects of characteristic harmonics on core vibration.

### Bulgular (Findings)

Ara-harmoniklerin nüve titreşimi üzerine etkisinin karakteristik harmoniklerinkinden çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, çok sayıda harmonik bileşenlerin ortaya çıkmasına da yol açtığı bulunmuştur. / It has been observed that the effect of interharmonics on core vibration is much higher than that of characteristic harmonics. It has also been found to cause to the emergence of a large number of harmonic components

### Sonuç (Conclusion)

Ara-harmoniklerden kaynaklanan yüksek titreşim genlikleri nedeniyle yalıtım transformatörleri için ek koruma önlemlerinin alınması sağlanabilir. / Due to the high vibration amplitudes caused by interharmonics, additional protection measures can be provided for isolation transformers.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Yalıtım Transformatörlerinde Ara-Harmoniklerin Transformatör Nüve Titreşimi Üzerine Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Funda BATTAL\***

<sup>1</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Müh. Bölümü, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Türkiye  
(Geliş/Received : 17.11.2022 ; Kabul/Accepted : 05.04.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 12.05.2023)

## ÖZ

Ara-harmonikler, güç sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerden, asenkron anahtarlamının yapıldığı anahtarlamalı sürücülerden veya geçici durumda çalışan yüklerdeki hızlı akım değişikliklerinden kaynaklanmaktadır. Böyle çalışma koşulları altındaki transformatör nüvelerinde doymanın meydana gelmesi ve aşırı ısınma gibi problemlerin yanında titreşim seviyelerinin anormal seviyelerde artması gibi mekanik problemler de ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık, ara-harmoniklerin yol açtığı titreşimlerdeki anormal artışın incelendiği çalışma sınırlı sayıdadır. Ara-harmoniklerin transformatör nüvesinin titreşimi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla bu çalışmada bir-fazlı 10 kVA anma gücündeki bir yalıtım transformatörünün nüvesindeki titreşim yer değiştirmesi değerleri çeşitli ara-harmonik frekanslarına sahip uyarımlar altında incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında, ara-harmonik frekansına bağlı olarak titreşim harmonik spektrumunda yan-bantlar şeklinde veya çift katları olacak şekilde bileşenler oluştuğu ancak bazı ara-harmonik frekanslarında ise kesirli frekanslarda bileşenlerin ortaya çıkmasına yol açtığı sonucu elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ara-harmonik, nüve titreşimi, yalıtım transformatörü.

## The Effect of Interharmonics on Transformer Core Vibration in Isolation Transformers

### ABSTRACT

Interharmonics are caused by nonlinear loads in power systems, switched drives with asynchronous switching, or rapid current changes in loads operating in a transient state. In addition to problems such as saturation and overheating of transformer cores under such operating conditions, mechanical problems such as abnormal increase in vibration levels also occur. On the other hand, few studies have examined the abnormal increase in vibrations caused by interharmonics. In this study, in order to determine the effects of interharmonics on the vibration of the transformer core, the vibration displacement values in the core of a single-phase 10 kVA rated insulation transformer were examined under excitations with various interharmonic frequencies and the results have compared. In the simulation studies, it was concluded that depending on the interharmonic frequency, components appear as sidebands or double multiples of the relevant frequency in the vibration harmonic spectrum, but in some interharmonic frequencies, it leads to the emergence of components at fractional frequencies.

**Keywords:** Interharmonic, core vibration, isolation transformer

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde ayarlanabilir hızlı sürücüler, ark fırınları, değişken yüklü sürücüler gibi birçok doğrusal-olmayan yük ve güç elektroniği devresi, elektrik güç şebekesine harmonikli akımlar ve gerilimler aktarmaktadır [1, 2]. Bununla birlikte, transformatörün girişinde yer alan doğrusal-olmayan yüke bağlı olarak uyarım geriliminde temel frekanstan daha düşük frekanslı olan ara-harmoniklerin bulunması da harmonik içerik bakımından daha zengin bir uyarım dalga şekline yol açmaktadır [3, 4]. Bu ara-harmonik bileşenler ilgili frekansın yan-bantları olarak ortaya çıkabileceği gibi herhangi bir frekansta da meydana gelebilmektedir [1]. Harmonik bileşen içeren uyarım altındaki transformatörlerde enerji kayıplarında artış, ölçüm hataları, transformatörlerde aşırı ısınma, titreşim ve gürültü seviyelerinde artış ve gerilimdeki dalgalanmalar sonucu kırışma ortaya çıkar

[5, 6]. Bununla birlikte harmonik ve ara-harmoniklerin bir arada bulunduğu uyarımlar, birçok sistemin önemli bir bileşeni olan transformatörlerde nüvede yüksek DA doyma durumuna [7-9], histerezis ve girdap akımları nedeniyle nüvede oluşan Joule etkisi sargılarda ek kayıplara [10] ve nüvenin manyetik büzülme değerinde değişime [11] yol açmaktadır. Bu durumlar, nüvede oluşan kuvvetlerin genliğini artırdığı için titreşim harmonik spektrumunda da karakteristik olmayan harmonik bileşenler ortaya çıkarak nüve titreşiminde anormal artışlara yol açtığı bilinmektedir [12, 13]. Nüve geometrisine de bağlı olarak bu anormal titreşim seviyeleri transformatörün performansını olumsuz yönde etkileyebilmekte, erken yıpranmasına yol açabilmektedir.

Transformatör nüvesinin titreşim karakteristiklerinin transformatörün çeşitli mekanik durumlarına göre [14-15] veya çeşitli elektriksel ve mekanik uyarımlara göre analiz edilmesi [16] şeklinde literatürde birçok çalışma

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : fbattal@bandirma.edu.tr

bulunmasına rağmen ara-harmoniklerin transformatör nüvesi titreşimine katkısını inceleyen çalışma sayısı çok sınırlı kalmıştır. [17]' te bir dağıtım transformatörünün yüksüz durum altında çeşitli frekans ve genlik seviyelerindeki ara-harmoniklerden kaynaklanan titreşim ve gürültüsü analiz edilmiştir. Ancak, sunulan çalışmada uyarım geriliminde sadece temel uyarım bileşeni ve ara-harmonik bulunmaktadır. Oysa, şebeke geriliminde temel uyarım bileşeninin yanında karakteristik harmonikler de yer alabilir. Ayrıca, transformatörler birçok durumda anma yüküne yakın değerlerde çalıştıkları için analizlerde bu durumun da göz önüne alınması gerekmektedir. Bu nedenle transformatörün daha gerçekçi bir çalışma koşulu altında analiz edilmesi daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlar. [18]' de bir-fazlı şebeke-frekanslı bir transformatörün akı yoğunluğu ve nüve titreşimi üzerine etkilerini inceleyen bir benzetim çalışması sunulmuştur. Ancak sunulan çalışmada şebeke-frekanslı transformatörün çalışma gerilimi çok düşük seviyede tutulmuştur.

Bu çalışmada bir-fazlı, 10 kVA anma gücündeki bir yalıtım transformatörünün uyarım akımında bulunabilecek ara-harmoniklerin transformatörün nüvesinde yol açtığı kuvvetler ve titreşim yer değiştirmeleri analiz edilmiştir. Anma yükünde çalışan yalıtım transformatörüne, referans değer sağlaması açısından ilk olarak sinüzoidal akım uygulanmıştır. Daha sonra karakteristik harmonik bileşen ve ayrıca bu harmonikle birlikte çeşitli frekanslardaki ara-harmonik içeren akım uygulanmış ve sonuç nüve kuvvetleri Ansys Electronics programında elde edilmiştir. Son olarak, bu nüve kuvvetleri kullanılarak her bir harmonik ve ara-harmonik nüve titreşimine olan katkısını belirlemek için Ansys Workbench programında elde edilen titreşim yer değiştirmeleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

## 2. ARA-HARMONİKLER VE TRANSFORMATÖRLER (INTERHARMONICS and TRANSFORMERS)

Güç elektroniği devreleri ve doğrusal-olmayan yüklerin geniş bir alanda kullanılması ile ortaya çıkan ara-harmonikler, güç sistemlerinde gün geçtikçe daha büyük problemler oluşturmaya başlamıştır. Böyle cihazların ve yüklerin kapasitelerinin artması ile birlikte ara-harmoniklerin genliklerinde de artış meydana gelmiş ve bu durum daha fazla önem kazanmıştır. Ara harmonikler, doğrudan frekans çeviriciler ve darbe genişlik modülasyonlu (PWM) dönüştürücüler gibi dönüştürücülerdeki yarı-iletken anahtarların şebeke frekansı ile senkronize olmayan şekilde anahtarlanmasından dolayı ortaya çıkmaktadır ve temel bileşenin sadece yan-bantları şeklinde değil herhangi bir bileşeni olarak da meydana gelmektedir [17]. Bunun yanında, güç sisteminde bulunan cihazlardaki ani akım değişimleri, akımın ve gerilimin genlik ve faz açılarında değişime yol açarken gerilimin temel ve diğer harmonik bileşenlerinde yan bantlar ortaya çıkarır. Bu duruma aynı zamanda akımın veya gerilimin genliklerinde genlik

modülasyonu şeklinde değişim meydana getirebilecek geçici durumdaki yükler de neden olmaktadır. Ara-harmoniklerin genlikleri çoğu durumda gerilimin temel bileşeninin %0,5' ini aşmamaktadır. Birçok doğrusal-olmayan yükün yol açtığı ara-harmoniklerin frekansı, şebeke frekansından daha düşük değerde olsa da yüksek frekanslarda ara-harmonikler de görülebilmektedir [17].

Ara-harmoniklerin bulunduğu bir sistemde ve bu sistemde yer alan cihazlarda kötü termal etkiler, floresan lambalarda gerilimdeki genlik modülasyonu nedeniyle bozulmalar, koruma elemanlarının aşırı yüklenmesi, transformatör nüvesinde doyma ve erken yıpranma meydana gelmesi, titreşim ve akustik gürültü seviyesinde aşırı artış meydana gelebilmektedir [1].

Transformatörlerde uyarım gerilimi, mümkün olabilecek harmonik ve ara-harmonik bileşenler bakımından Eş.1' de verildiği gibi ifade edilebilir:

$$v(t) = V_0 + V_1[\sin(2\pi f_0 t) + m \sin(2\pi f_{ih} t)] + V_h \sin(2\pi f_h t) \quad (1)$$

Eş.1' de  $V_0$ , uyarım geriliminde bulunabilecek DA bileşeni,  $V_1$  temel gerilimin genliğini,  $f_0$  çalışma frekansını,  $f_{ih}$  ara-harmonik frekansını,  $m$  temel gerilimin yüzdesi cinsinden ara-harmonik derecesini,  $V_h$  uyarım gerilimindeki temel frekansın tam sayı katlarında olan harmonik bileşenlerin genliklerini ve  $f_h$  tam sayı katlardaki harmonik bileşenlerin frekansını göstermektedir [1].

## 3. ARA-HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖR NÜVE TİTREŞİMİ ÜZERİNE ETKİSİ (EFFECT of INTERHARMONICS on TRANSFORMER CORE VIBRATION)

Transformatörlerde nüve, titreşimin temel kaynağını oluşturmaktadır. Bunun yanında sargıların ve bulunuyorsa soğutma sisteminin de transformatörün bütün titreşimine katkısının olduğu bilinmektedir. Nüve titreşimi, temel olarak nüve malzemesinin değişken manyetik alan içerisinde kalmasıyla meydana gelen ve nüve malzemesinin mekanik bir özelliği olan manyetik büzülme değerinin yol açtığı manyetostriktif kuvvetlerin üretilmesi ile ortaya çıkar. Buna ek olarak, nüveyi oluşturan lamine sacların üzerine etkiyen Maxwell kuvvetleri ve sargı akımından kaynaklanan Lorentz kuvveti de nüve titreşimine olumsuz yönde katkı sağlamaktadır [19, 20]. Nüve malzemesinin sadece malzeme boyundaki değişimi ele alınırsa manyetik büzülmeden kaynaklanan uzunluk değişimi Eş.2' de verilen formülün sol tarafındaki gibi yazılabilir,

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\lambda_s B^2}{B_s^2} \cos^2(\omega t) = \frac{\lambda_s V^2}{(N_1 A \omega B_s)^2} \cos^2(\omega t) \quad (2)$$

Eş. 2' de  $\lambda$  manyetik büzülme katsayısını,  $\Delta l$  uzunluğu ise lamine çelik levhanın boyundaki değişimi göstermektedir.  $l$  lamine çelik sacın ilk boyunu,  $\lambda_s$  doyma durumundaki manyetik büzülme değerini ve  $B_s$  doyma akı yoğunluğunu göstermektedir. Manyetik alan içerisinde kalan nüve malzemesinin boyundaki bu değişim, nüvede bir deformasyon meydana getirerek

nüve titreşimine yol açar. Manyetik büzülme değeri, uygulanan gerilim ve nüvedeki akı yoğunluğunun karesi ile değiştiği için doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahiptir.

Manyetik büzülmeden kaynaklanan nüvedeki hacim kuvvet yoğunluğu, nüvenin üzerinde meydana gelen manyetostatik kuvvetlerin oluşmasına yol açmaktadır ve bu kuvvet Eş.3' teki gibi ifade edilebilir,

$$F_{ms} = \frac{\omega \sin 2\omega t}{\Delta t} \int_v \frac{1}{2} E \lambda^2 dV \quad (3)$$

Eş.3' te görülen  $E$ , silikon çelik levhanın elastisite modülü değeridir. Buna göre, manyetostatik kuvvetlerin akı yoğunluğu, frekans ve gerilim ile doğrusal olmayan bir değişim gösterdiği söylenebilir [19, 21]. Transformatörlerde nüve titreşimine en büyük etkiyi silikon çelik levhanın manyetostatik etkisi oluşturduğu bilinmektedir [20].

Yukarıdaki eşitliklerden nüve yer değiştirmesi üzerine akı yoğunluğunun ve çalışma frekansının önemli bir katkısının olduğu görülmektedir. Uyarım dalga formunda bozulmaya yol açabilecek harmonik bileşen(ler) nüvenin manyetik akı yoğunluğunu değiştirerek titreşim harmonik spektrumunda daha fazla titreşim harmonik bileşeninin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Burada, uyarım dalga formundaki harmonikler ve ara-harmoniklerin frekansı ne kadar düşükse, nüve titreşim yer değiştirmesinin tepeden tepeye değerinin de o kadar büyük olabileceği görülebilir [17].

Nüvenin manyetik büzülme değerinden kaynaklanan titreşimine ek olarak, gerek nüve malzemesinin manyetik özelliğinden kaynaklanan gerekse sargı akımlarının da katkı sağladığı ve nüve malzemesi üzerinde harici bir manyetik kaynağın etkisi olarak ifade edilebilecek elektromanyetik kuvvetler, Maxwell kuvvetleri olarak bilinmektedir. Maxwell kuvvetlerini analiz etmek amacıyla Eş.4' te denklem kullanılmaktadır.

$$\vec{F}_{EM} = \int_A \vec{T} dA = \frac{1}{\mu_0} \int_A \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2} B^2 & B_x B_y & B_x B_z \\ B_y B_x & B_y^2 - \frac{1}{2} B^2 & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & B_z^2 - \frac{1}{2} B^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} dA \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemden transformatörde meydana gelen Maxwell kuvvetlerinin akı yoğunluğunun her bir

bileşeninin içeriği ile değiştiği görülebilir. Akı yoğunluğunda bulunabilecek harmonik bileşenler, Maxwell kuvvetlerinin de değişimine yol açmaktadır.

Bunlara göre uyarım akımında olabilecek herhangi bir harmonik bileşen hem manyetostatik hem de Maxwell kuvvetlerinin seviyesinde değişimlere yol açarak nüve titreşiminin karakteristiğini olumsuz olarak etkilemektedir. Uyarım akımında bulunan bütün harmonik bileşenler için hem manyetostatik kuvvetler hem de Maxwell kuvvetlerinin yol açtığı toplam nüve kuvvetleri frekans-bölgesinde Eş.5' teki gibi ifade edilebilir:

$$F_{Total}(\omega) = F_{ms}(\omega) + F_{EM}(\omega) \quad (5)$$

Transformatörün mekanik modelindeki kuvvetler zaman-bölgesinde Eş.6' daki gibi ifade edilebilir:

$$F = m \frac{d^2u}{dt^2} + b \frac{du}{dt} + ku \quad (6)$$

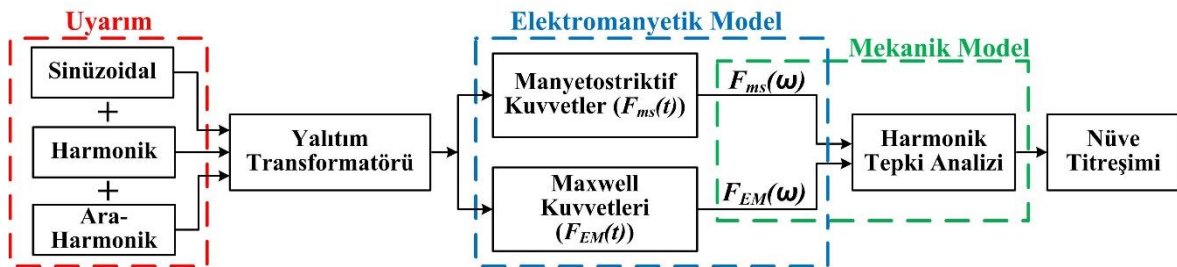
Mekanik modelde zaman-bölgesinde elde edilecek titreşim sinyallerinin karmaşıklığını azaltmak ve ara-harmonik bileşenlerinin etkilerini görebilmek frekans bölgesinde analiz yapmak daha çok tercih edilen bir yöntemdir. Bunun yanında analizi basitleştirmek adına sönümlenme katsayısı da ihmal edilerek yukarıdaki denklem frekans bölgesinde Eş.7' deki gibi yeniden yazılabilir:

$$F(\omega) = j^2 \omega^2 M U(\omega) + K U(\omega) \rightarrow$$

$$F(\omega) = U(\omega) [-\omega^2 M + K] \quad (7)$$

Eş.7' de verilen ifadede  $U(\omega)$ , frekans bölgesinde yer değiştirme,  $M$  kütle matrisi ve  $K$  ise katılık matrisidir. Dolayısıyla uyarım sinyalindeki ve bunun oluşturacağı manyetik akı yoğunluğundaki her bir harmonik bileşenin nüve kuvvetleri üzerinde, sonuç olarak da transformatörün titreşimi üzerinde bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Bunların yanında gerek nüve malzemesinin doğrusal-olmayan yapısından gerek geometrisinden ve gerekse nüve malzemesinin lamine yapıda olmasından dolayı nüve titreşiminde çok sayıda harmonik bileşen de görülebilmektedir [22].

Yukarıda verilen denklemlere göre bir yalıtım transformatörünün titreşimini analiz etmek üzere elektromanyetik ve mekanik modellerinde izlenen adımlar Şekil 1' de görülmektedir. Bu adımlarda, elektromanyetik modelleme için transformatörün uyarım koşulları tanımlanmakta, nüve ile sargı malzemelerinin manyetik özelliklerine göre hem manyetostatik

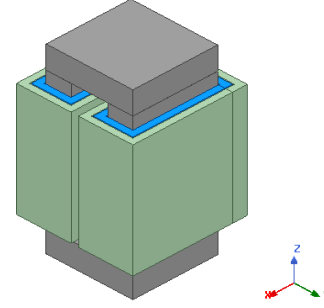


Şekil 1. Transformatörün titreşim analizi için kullanılan modeller (Models used for vibration analysis of transformer)

kuvvetler hem de Maxwell kuvvetleri zaman- ve frekans-bölgelerinde elde edilmektedir. Frekans-bölgesindeki kuvvet değerleri kullanılarak nüve ve sargı malzemelerinin mekanik ve geometrik özelliklerine göre harmonik tepki analizleri ile nüve titreşimi değerleri elde edilmektedir.

#### 4. BENZETİM ÇALIŞMALARI (SIMULTION STUDIES)

Gerçekleştirilen benzetim çalışmasında, 10 kVA anma-gücündeki bir-fazlı yalıtım transformatörünün anma yükünde çalışırken sargılarında sinüzoidal, harmonik ve ara-harmonik içeren akımların dolaşmasıyla oluşacak nüve kuvvetleri zaman-bölgesinde Ansys Electronics programında elde edilmiştir. Bu kuvvetler daha sonra frekans-bölgesine aktararak Ansys Workbench' te yapılan harmonik tepki analizleri için giriş parametresi olarak kullanılmış ve nüve titreşim yer değiştirmeleri elde edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen harmonik tepki sonuçları ise ara-harmonik frekanslarına göre karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Nüve titreşimleri



Şekil 2. Yalıtım transformatörünün modeli (Model of isolation transformer)

Şekil 3' te yalıtım transformatörünün uyarım dalga şekillerinden bazıları verilmiştir. Şekil 3(a)' da sinüzoidal uyarım altındaki primer akımı, Şekil 3 (b)' de 3. harmonik ile 10 Hz ara-harmonikli uyarım şekline (Koşul A3) ait akım ve Şekil 3 (c)' de ise 5. harmonik ile 10 Hz ara harmoniğin (Koşul B3) olduğu uyarım dalga şekli görülmektedir.

Çizelge 1. Yalıtım transformatörünün özellikleri (Characteristics of the isolation transformer)

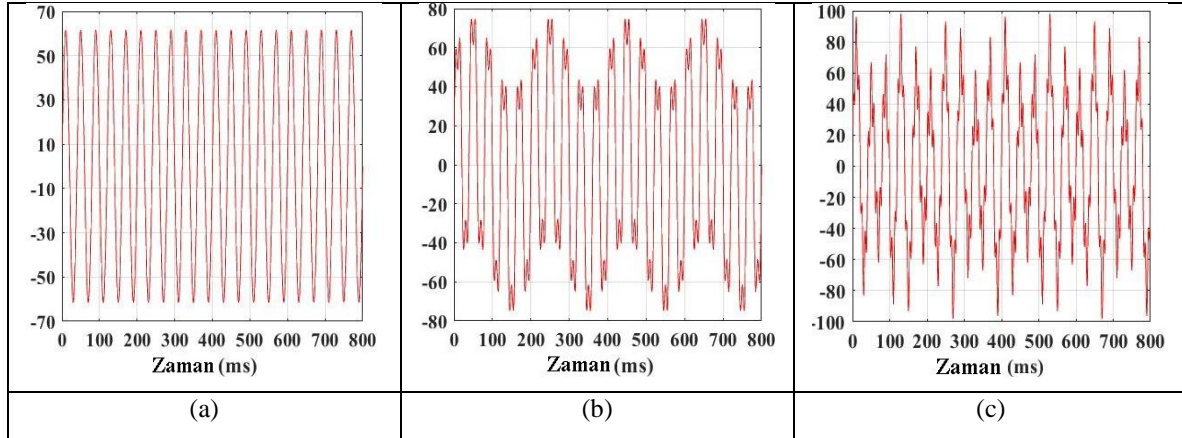
Güç Kapasitesi	10 kVA	
Gerilim	230 V / 230 V	
Çalışma Frekansı, $f_0$	50 Hz	
Nüve Malzemesi	M5 Elektrik sacı (0,30mm)	
Sargı Malzemesi	Alüminyum folyo	
Uyarım Koşulları	<b>KOŞUL A</b>	<b>KOŞUL B</b>
	Saf Sinüzoidal Akım (Koşul 1)	Saf Sinüzoidal Akım (Koşul 1)
	Sin. + 3. harmonik (Koşul 2)	Sin. + 5. harmonik (Koşul 2)
	Koşul 2 + 10Hz ara- harmonik (Koşul 3)	Koşul 2 + 10Hz ara- harmonik (Koşul 3)
	Koşul 2 + 25Hz ara- harmonik (Koşul 4)	Koşul 2 + 25Hz ara- harmonik (Koşul 4)
	Koşul 2 + 35Hz ara- harmonik (Koşul 5)	Koşul 2 + 35Hz ara- harmonik (Koşul 5)

için referans değerleri oluşturması açısından sinüzoidal uyarım altında yer değiştirme spektrumu ilk olarak elde edilmiştir. Böyle doğrusal-olmayan yüklerin temel karakteristiği, akımda çok yüksek üçüncü- ve/veya beşinci-harmonik içeriğe sahip olmalarıdır [23]. Bu nedenle bu çalışmada uyarım akımındaki karakteristik harmonik bileşenler olarak seçilmiştir. Ara-harmonik frekansları ise çalışma frekansından daha düşük frekans değerleri şeklinde seçilmiştir. Bunlara göre benzetim çalışmalarında kullanılan transformatöre ait model Şekil 2' de, parametreler ve uyarım durumları ise Çizelge 1' de sunulmuştur. 3. harmoniğin genliği, sinüzoidal akımının %30' u değerinde, ara harmoniklerin genliği de aynı şekilde sinüzoidal akımın maksimum %30' u değerinde seçilmiştir. Benzetim çalışmasında yatay (x-yönü) yöndeki değerler çok küçük genliklerde olduğu için sadece yatay (y-yönü) ve dikey yöndeki (z-yönü) nüve kuvvetleri ve yer değiştirmeleri değerlerine yer verilmiştir x-yönüne ait değerler bu çalışmada incelenmemiştir.

Şekil 4 ve Şekil 5' te, Çizelge 1' de belirtilen uyarım durumlarındaki nüve kuvvetlerinin harmonik spektrumu verilmiştir. Burada, frekans-bölgesine dönüşüm için FFT kullanılmıştır. Harmonik tepki analizinin giriş parametresi olarak kullanılacak harmonik bileşenler ile aynı olması açısından dikdörtgen pencereleme tercih edilmiştir. 500 Hz' den sonraki yer değiştirme genlikleri çok küçük oldukları için harmonik spektrumda yer verilmemiştir. Şekil 4a' da görülen Koşul A için y-yönündeki kuvvetlerin harmonik bileşenlerinde bütün uyarımlar altında 100 Hz' deki temel bileşenin en yüksek genliğe sahip olduğu görülebilir. Koşul A1 için, diğer çalışma koşullarından farklı olarak 400 Hz' deki bileşenin genliği ihmal edilebilir. Koşul A1 referans olarak alındığında, bütün çalışma koşullarının titreşimin temel bileşenin tamsayı katlarındaki bileşenlerine sahip olduğu görülebilir. Koşul A3 altında 10 Hz' in hem tek hem de çift katlarında bileşenler meydana gelmiştir. Bu ara-harmonikli uyarım şekli için elde edilen sonuçlardan çalışma frekansının ve ara-harmoniğin tek tamsayı katlarında meydana gelen kuvvet bileşenlerinin

genliklerinin, çift tam sayı katlarında elde edilen bileşen genliklerinden daha yüksek olduğu görülebilir. Diğer bir

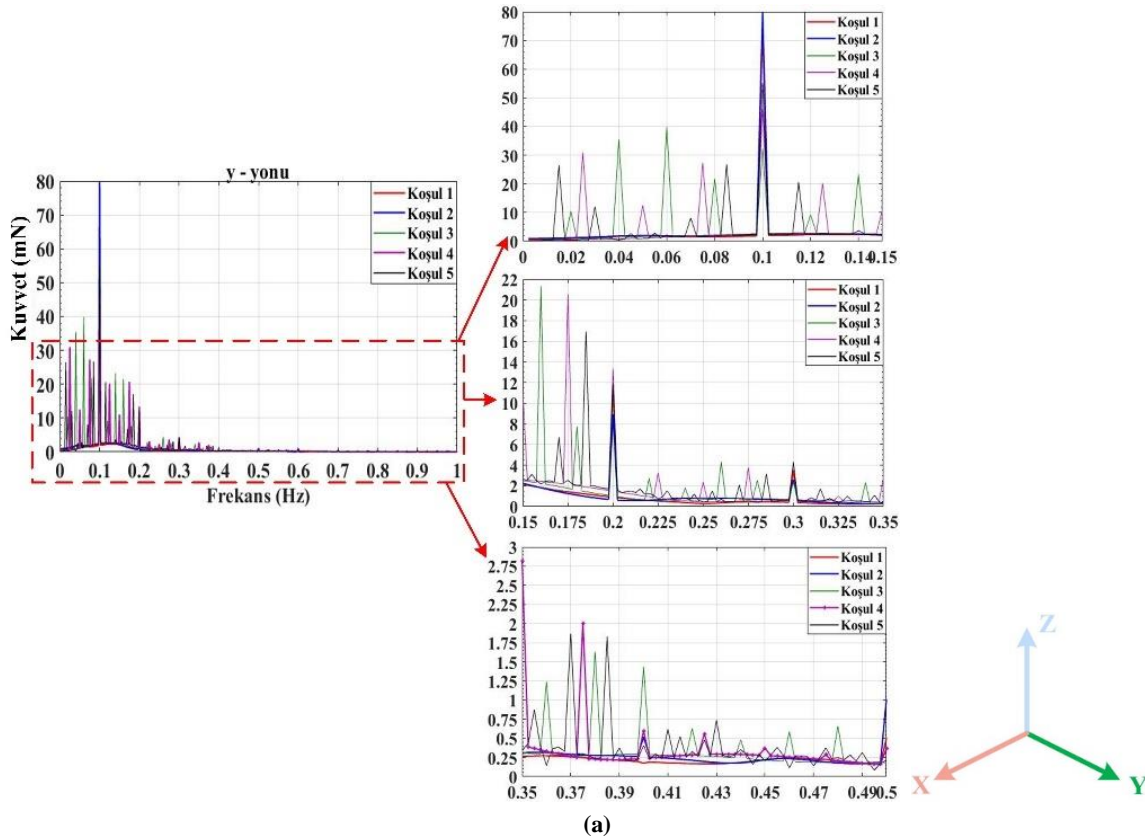
katlarında bileşenler görülmüştür. Koşul A3' te olduğu gibi bu uyarım şeklinde de ( $f_0 \pm f_{ih}$ ) frekanslarındaki

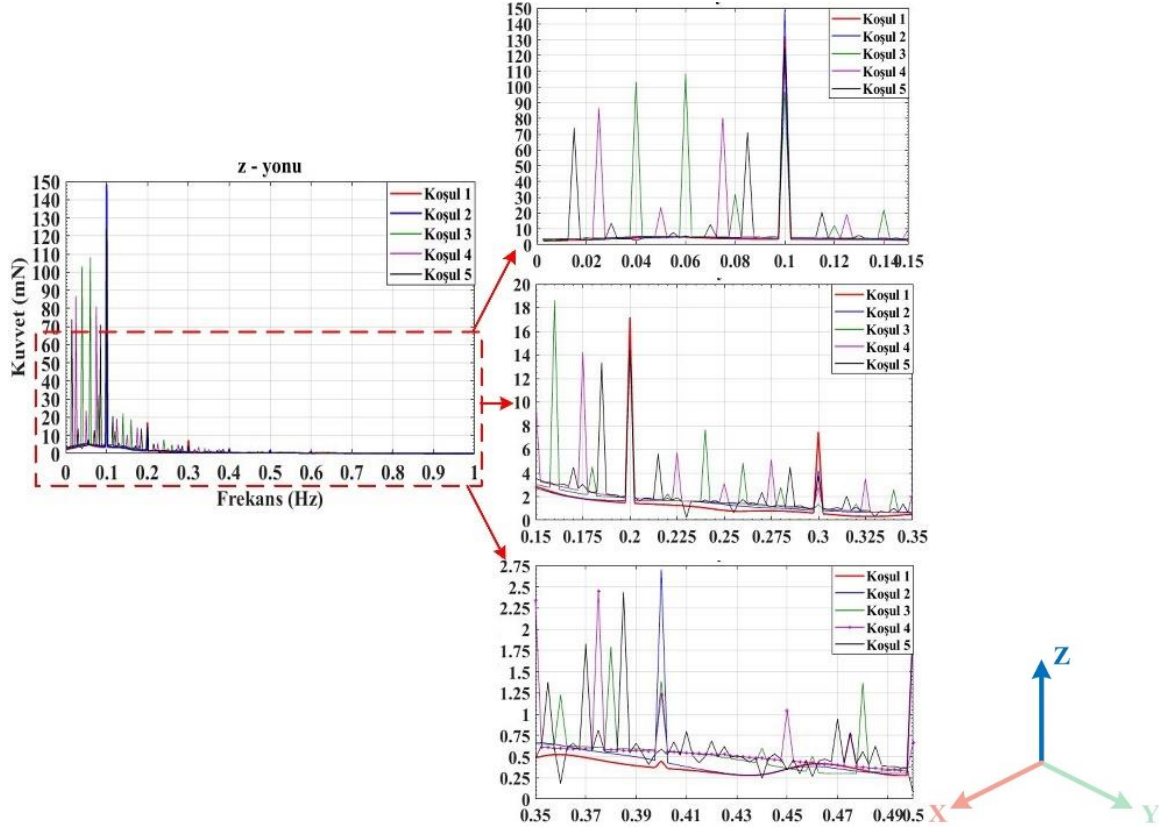


**Şekil 3.** Yalıtım transformatörün primer sarğı akımı dalga şekilleri a) Sinüzoidal uyarım, b) 3. harmonik ve 10Hz ara harmonikli uyarım, c) 5. harmonik ve 10Hz ara harmonikli uyarım (Primary winding current waveforms of the isolation transformer a) Sinusoidal excitation, b) 3<sup>rd</sup> harmonic and 10Hz interharmonic excitation, c) 5<sup>th</sup> harmonic and 10Hz interharmonic excitation)

ifade ile ( $f_0 \pm f_{ih}$ ) frekansı ve katlarındaki kuvvet bileşenlerinin genliklerinin daha yüksektir. Koşul A4 için de 25 Hz' deki ara harmoniğin tek ve çift tamsayı katsayı

kuvvet harmonik bileşenlerinin genlikleri ( $2f_0 \pm 2f_{ih}$ ) frekanslarındaki kuvvet harmoniklerinin genliklerinden daha yüksektir. Koşul A5 durumu için bakıldığında da





(b)

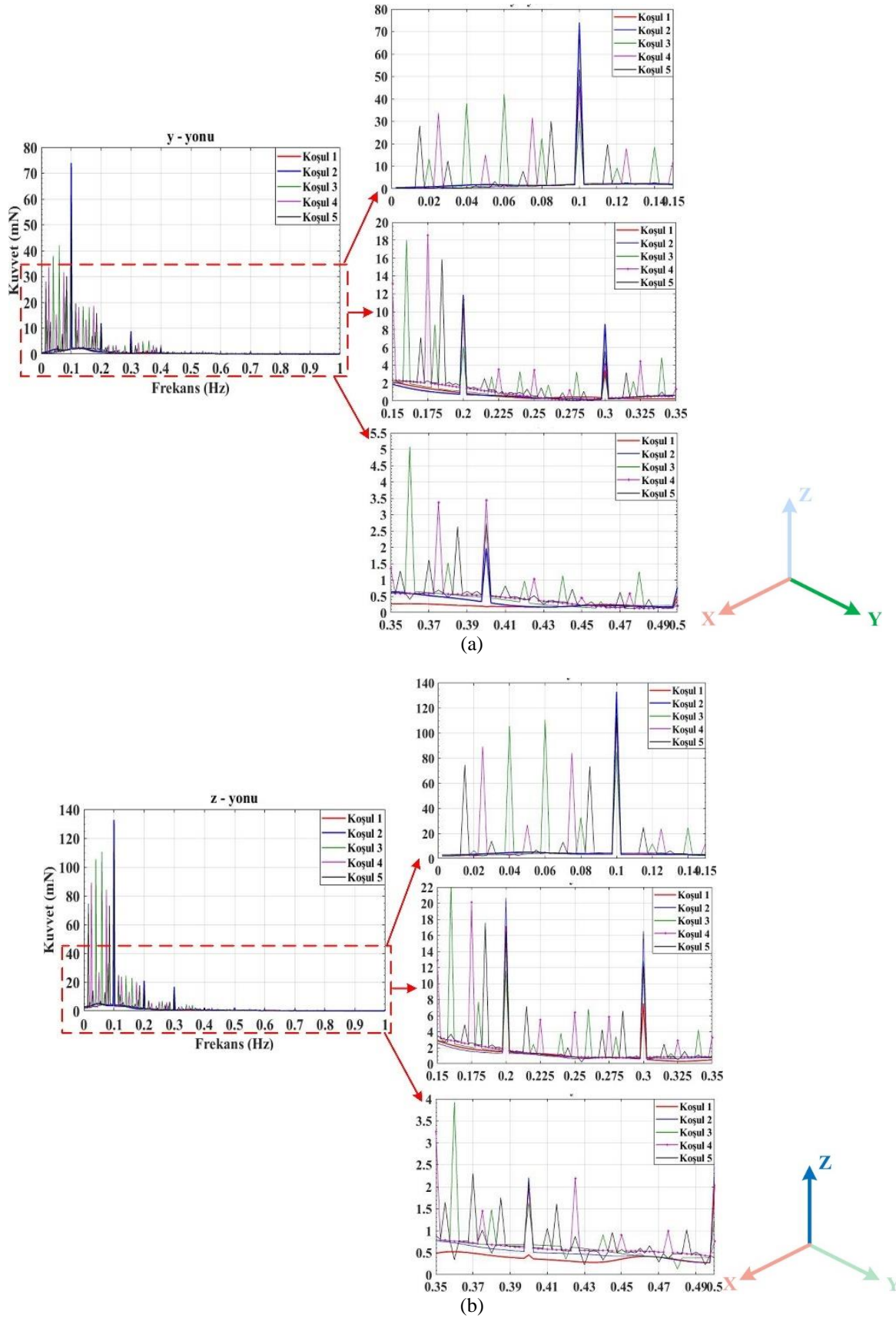
Şekil 4. Koşul A için elde edilen nüve kuvvetlerinin harmonik spektrumu a) y-yönü, b) z- yönü (Harmonic spectrum of core forces for Condition A a) y-direction, b) z-direction)

Koşul A3 ve Koşul A4 uyarımları altında elde edilen sonuçlara benzer şekilde ara-harmoninin tek tamsayı katlarındaki frekanslarda daha yüksek harmonik bileşen genlikleri meydana gelmişken çift tamsayı katlarındaki genlikler nispeten düşük değerlerde kalmıştır.

z-yönündeki kuvvetlerin harmonik spektrumunda y-yönüne kıyasla daha yüksek genliklerin aynı frekans değerlerinde meydana geldiği Şekil 4.b' den görülmektedir. Şekil 4.a' da verilen y-yönünden farklı olarak bütün uyarım şekilleri 100 Hz' de genlikleri birbirine yakın olan değerler alsalar da en yüksek değer Koşul A2' ye aittir. Bu spektrumda dikkat çeken bir nokta, Koşul A1' in diğer uyarım koşullarına kıyasla 200 Hz ve 300 Hz' de daha yüksek genliğe sahip olmasıdır.

Koşul A2- Koşul A5 çalışma koşulları altında dikey yönde meydana gelen kuvvetlerin genliklerinde de y-yönündekine benzer şekilde ( $mf_0 \pm mf_{ih}$ ) ve ( $nf_0 \pm nf_{ih}$ ) frekans değerlerinde harmonik bileşenler olduğu görülmektedir ( $m$ : tek tamsayı,  $n$ : çift tamsayı) ve tek tamsayı katlarında olanların genlikleri nispeten yüksek değerdedir. Şekil 4' ten Koşul A2 için titreşimin sadece temel ve tamsayı katlarında bileşenlerinin ortaya çıktığı, bunların dışında herhangi bir bileşene sahip olmadığı görülebilir. Koşul A2 altında 3. harmoninin frekansı, ara-harmonik frekanslarına göre daha yüksek kaldığı için kuvvet harmonik spektrumuna büyük bir katkı sağlamamıştır.





Şekil 5. Koşul B için elde edilen nüve kuvvetlerinin harmonik spektrumu a) y-yönü, b) z- yönü (Harmonic spectrum of core forces for Condition B a) y-direction, b) z-direction)

Şekil 5' te sinüzoidal uyarıma ek olarak uyarım akımında 5. harmonik bileşen ve ayrıca ara-harmoniklerin bulunduğu Koşul B için elde edilen nüve kuvvetlerinin harmonik spektrumu verilmiştir. Şekil 5.a' dan görüldüğü gibi nüve kuvvetinin temel bileşeni, Koşul B2 uyarım altında en yüksek değerdedir. Koşul B3' te 10 Hz' in sadece çift katlarında bileşenler meydana gelmiş ve en yüksek genlik değerini 60 Hz' de ( $f_0 + f_{ih}$ ) almıştır. Koşul B4, 25 Hz' in hem tek hem de çift tamsayı katlarında bileşenlere sahiptir. Koşul B5' te ise, 100Hz' de Koşul B2' den sonraki en yüksek genlik değeri elde edilmiştir ve bu uyarım şeklinde harmonik bileşenlerin ( $f_0 \pm f_{ih}$ ) frekanslarında oluştuğu görülmektedir. 5. harmonikli uyarım koşullarında da 3. harmonikli uyarımlarda olduğu gibi, uyarım akımında ara-harmonikler bulunuyorsa ara-harmoniklerin katkısı, 5. harmoniğin katkısına göre çok daha yüksek olmaktadır.

Şekil 5.b' de verilen z-yönündeki kuvvetlerin harmonik bileşenlerinde y-yönüne göre çok daha yüksek seviyelerde genlik değerleri elde edilmiştir. Şekil 4' te verilen uyarım durumlarında olduğu gibi Koşul B1 için sadece ilk üç kuvvet harmonik bileşeni meydana gelmiştir. Koşul B3' te, ( $f_0 \pm nf_{ih}$ ,  $n = 1, 3, 5, \dots$ ) frekanslarında bileşenler görülmüş ve bu bileşenlerden 40 Hz ve 60 Hz' de olanlar en yüksek genlik değerlerini almıştır. Koşul B4' te 25 Hz' in bütün tamsayı katlarında bileşenler bulunmaktadır. Koşul A4 uyarım şeklinde olduğu gibi 25 Hz' in tek katlarındaki bileşenlerin genlikleri, çift katlarında olanlara göre daha yüksektir.

Koşul B5, Koşul A5 uyarımında olduğu gibi ( $f_0 \pm f_{ih}$ ) frekanslarında bileşenlerin ortaya çıkmasına yol açmıştır.

Şekil 4 ve Şekil 5' te verilen nüve kuvvetlerinin harmonik spektrumlarındaki harmonik bileşenlerin frekans ve genlik değerlerinin ilişkisi, Çizelge 2 ve Çizelge 3' te özetlenmiştir.

Şekil 6 ve Şekil 7' de verilen nüve kuvvetlerinin dağılımına göre elde edilen titreşim yer değiştirmesinin harmonik spektrumları verilmiştir. Analizler üç-eksenli olarak yapılmış olsa da x-yönündeki yer değiştirme genlikleri çok düşük seviyede kaldığı için burada gösterilmemiştir. y- ve z-yönü titreşim harmonik spektrumlarında genliklerin daha net görülebilmesi adına bütün spektrum 0 Hz-150 Hz, 150 Hz-350 Hz ve 350 Hz-500 Hz frekans aralıkları olacak incelenmiştir.

Koşul A' daki uyarımlar altında y-yönü yer değiştirmenin harmonik spektrumları Şekil 6.a' da görülmektedir. Burada, 0-150 Hz aralığındaki harmonik bileşenler incelendiğinde; Koşul A1 için sadece titreşimin temel, ikinci ve ihmal edilecek kadar düşük genlikteki dördüncü bileşene sahip olduğu görülebilir. Burada ikinci bileşenin ortaya çıkması, nüve malzemesinin doğrusal olmayan özelliğinden ve ara-harmonik frekansının bu durumu artırmasından kaynaklanmaktadır. Koşul A2 temel bileşen ve tamsayı katlarındaki bileşenlere sahiptir. Bu koşul altında 200 Hz ( $f_0 + f_h$ ) ve 400 Hz ( $2f_0 + 2f_h$ ) frekanslarındaki bileşenler, diğer uyarımlara göre en yüksek değerlerdedir. Koşul A3

**Çizelge 2.** Koşul A için nüve kuvvetlerinin harmonik bileşenleri (Harmonic components of core forces for Condition A)

Çalışma Koşulları	Harmonik Bileşenin Frekansı		
Koşul 1, Koşul 2:	$\pm kf_s$		k= Tam sayı $f_0$ = çalışma frekansı $f_{ih}$ = ara-harmonik frekansı
Koşul 3, Koşul 4, Koşul 5:	$mf_0 \pm mf_{ih}$	Yüksek genlik	m = Tek tamsayı (1, 3, 5, ...) $f_0$ = çalışma frekansı $f_{ih}$ = ara-harmonik frekansı
	$nf_0 \pm nf_{ih}$	Düşük genlik	n = Çift tamsayı (2, 4, 6, ...) $f_0$ = çalışma frekansı $f_{ih}$ = ara-harmonik frekansı

**Çizelge 3.** Koşul B için nüve kuvvetlerinin harmonik bileşenleri (Harmonic components of core forces for Condition B)

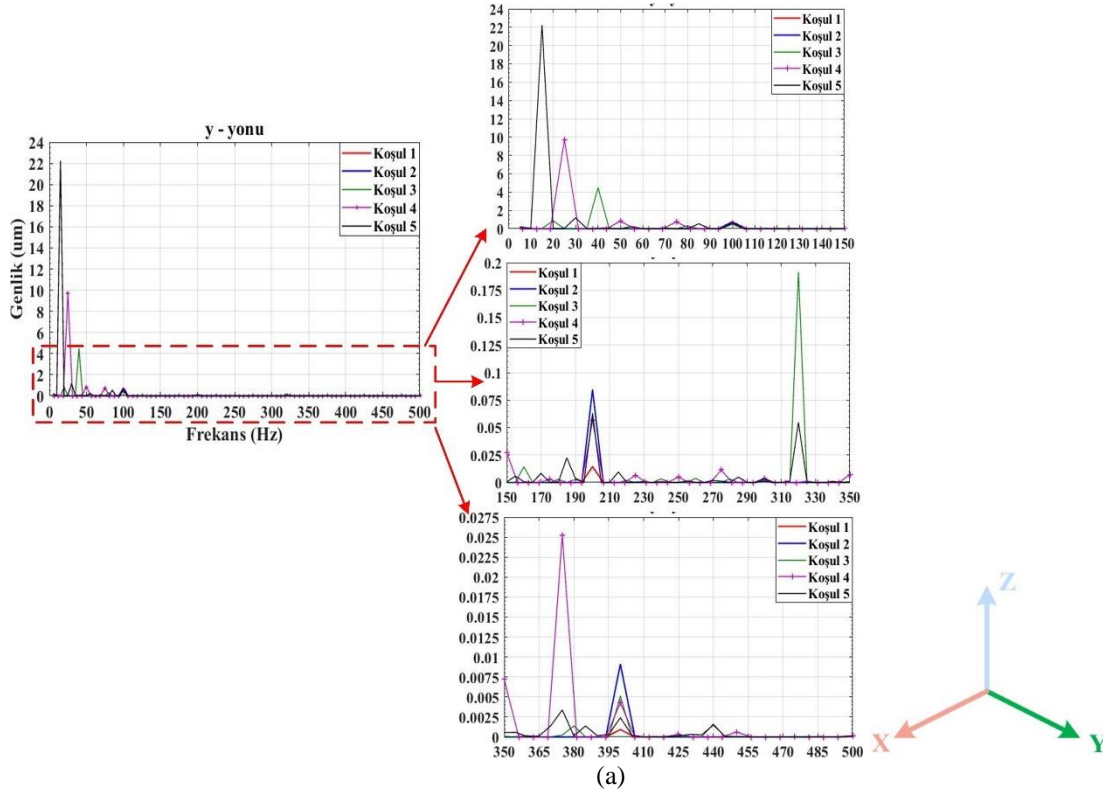
Çalışma Koşulları	Harmonik Bileşenin Frekansı		
Koşul 1, Koşul 2:	$\pm kf_s$		k= Tam sayı $f_0$ = çalışma frekansı $f_{ih}$ = ara-harmonik frekansı
Koşul 3:	$nf_0 \pm nf_{ih}$		n = Çift tamsayı (2, 4, 6, ...) $f_0$ = çalışma frekansı $f_{ih}$ = ara-harmonik frekansı
Koşul 4, Koşul 5:	$mf_0 \pm mf_{ih}$	Yüksek genlik	m = Tek tamsayı (1, 3, 5, ...) $f_0$ = çalışma frekansı $f_{ih}$ = ara-harmonik frekansı
	$nf_0 \pm nf_{ih}$	Düşük genlik	n = Çift tamsayı (2, 4, 6, ...) $f_0$ = çalışma frekansı $f_{ih}$ = ara-harmonik frekansı

için spektrum incelendiğinde 0-150 Hz aralığında 40 Hz' deki bileşen, 150 Hz-350 Hz aralığında ise 320 Hz' deki ( $2f_h + 2f_{ih}$ ) bileşen öne çıkmıştır. Bu sonuçtan 10 Hz ara-harmoniğin titreşim harmonik spektrumu üzerindeki etkisinin çalışma frekansı olan 50 Hz' e göre çok daha yüksek seviyede olduğu sonucu çıkmaktadır. Koşul A4 için, kuvvet harmonik spektrumunda olduğu gibi 25 Hz' in bütün tamsayı katlarında bileşenlerin olduğu görülmektedir. 25 Hz' deki bileşenin genliğinin en yüksek değerde olmasına rağmen 350 Hz ( $2f_h + 2f_{ih}$ ) ve 375 Hz frekanslar değerlerinde de bileşenler olduğu görülebilir. Koşul A5 ise y-yönündeki titreşim harmonik spektrumundaki en yüksek genliğe sahip uyarım şeklidir. 15 Hz' de ( $f_0 - f_{ih}$ ) meydana gelen bu bileşenden sonraki diğer harmonik bileşenlerinin genliği ise oldukça düşük kalmıştır çünkü ara-harmoniğin frekansı diğer ara-harmonik frekanslarına göre daha yüksektir.

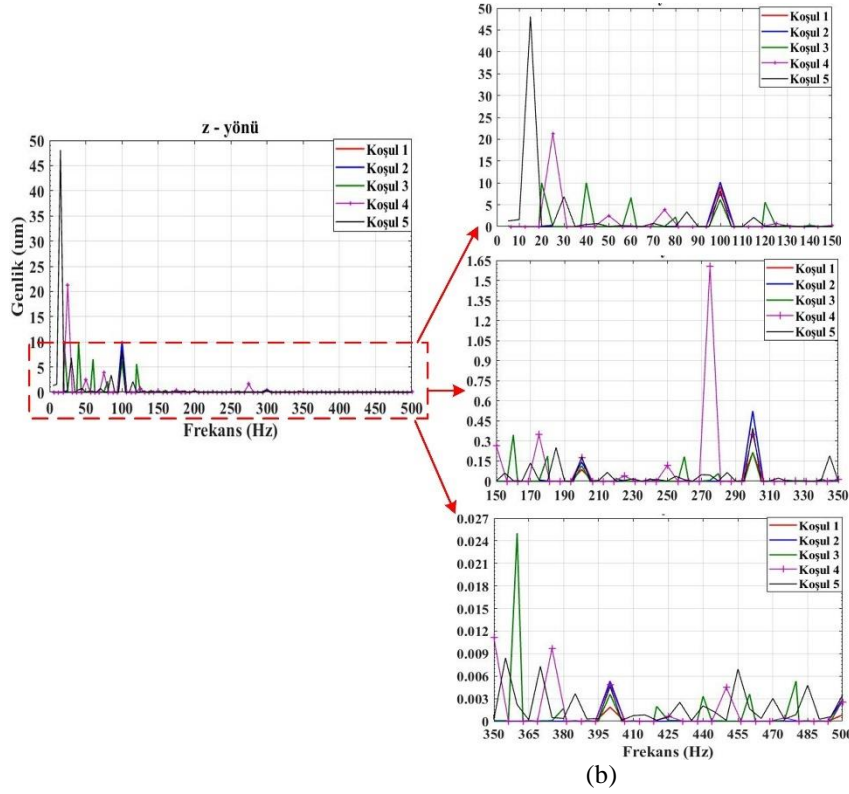
Koşul A için z-yönündeki titreşim harmonik spektrumu Şekil 6.b' de verilmiştir. y- ve z-yönlerindeki harmonik spektrumlar ( $f_0 - f_{ih}$ ) frekanslarındaki harmonik bileşenler açısından birbiri ile oldukça benzerdir. Ancak, dikey yöndeki genlikler beklendiği gibi daha yüksektir. Koşul A1 ve Koşul A2 uyarımlarının yine titreşimin ilk

dört bileşeni haricinde bileşenlere sahip olmadığı görülebilir. Ara-harmonikler Koşul A3' te 350 Hz – 500 Hz aralığında, Koşul A4' te 150 Hz-350 Hz aralığında ve Koşul 5' te 0-150 Hz aralığında belirgin tepeler oluşturmuştur. Ayrıca Koşul A5' in 350 Hz-500 Hz aralığında birçok frekansta bileşene sahip olduğu, bu bileşenlerin bir kısmının ise karakteristik olmayan frekanslarda meydana geldiği görülmüştür.

Bu uyarımlar altında çalışan bir transformatörün yer değiştirme harmonik spektrumlarından elde edilen sonuçlara göre, uyarım dalga şeklinde sadece 3. harmonik bileşeninin bulunması, nüvenin titreşim yer değiştirmesinin spektrumu üzerine büyük bir katkı sağlamamaktadır. Her ne kadar saf sinüzoidal uyarıma göre nispeten yüksek genlikte yer değiştirme harmonik bileşenlerine sahip olsa da 3. harmoniğin etkisi, frekansının daha yüksek olmasından dolayı ara-harmonikli durumlara göre daha az olmuştur. Ara-harmonikli uyarım şeklinin dikey yöndeki titreşim yer değiştirmelerinde daha karmaşık bir harmonik spektrum oluşturmasının yanında hem tamsayı olmayan frekanslarda da harmonik bileşenlere yol açtığı sonucu elde edilmiştir.



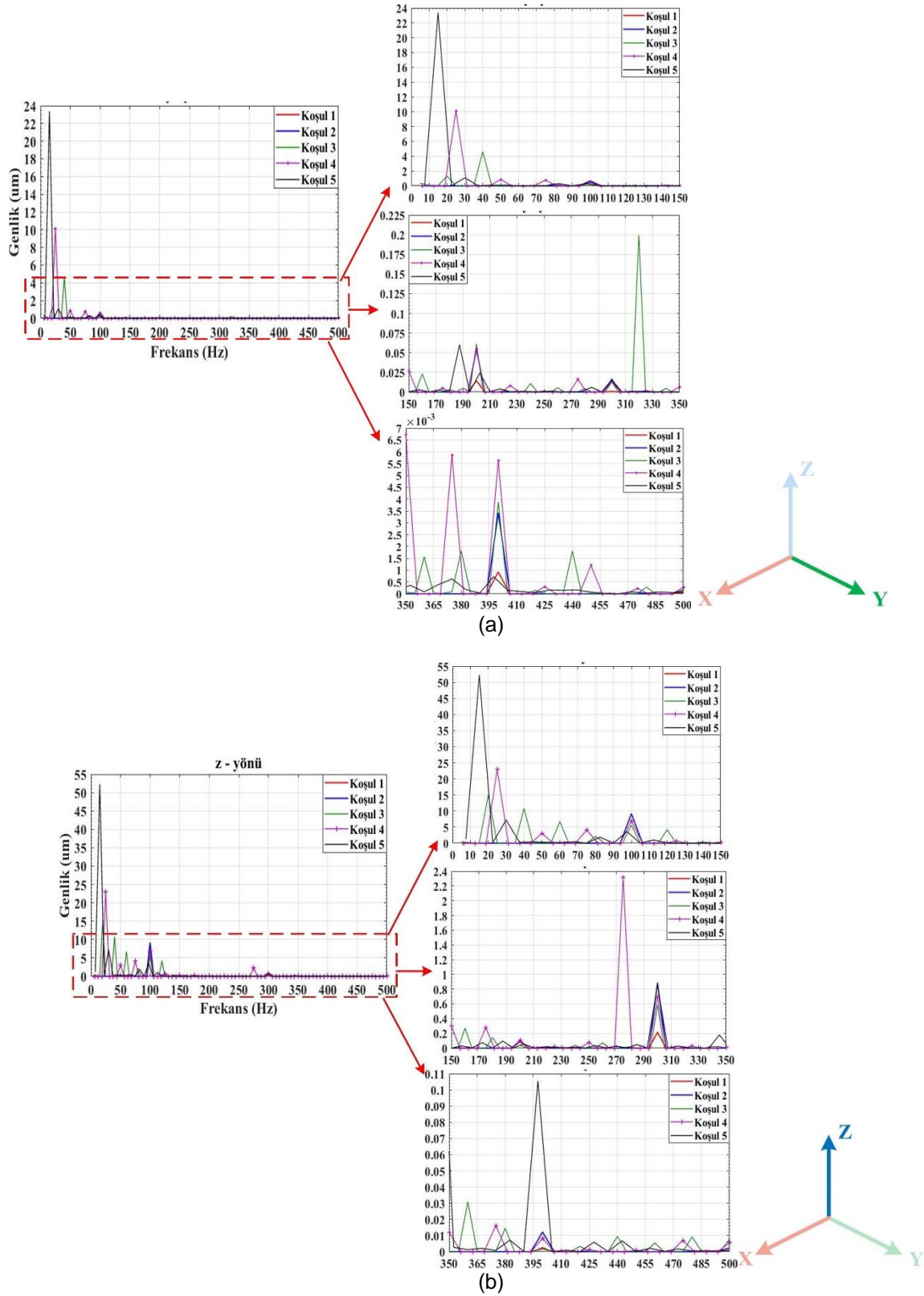
Şekil 6. Koşul A altında titreşim yer değiştirmesine ait harmonik spektrum a) y-yönü, b) z- yönü (Harmonic spectrum of vibration displacement under Condition A a) y-direction, b) z-direction)



Şekil 6. (Devam) Koşul A altında titreşim yer değiştirmesine ait harmonik spektrum a) y-yönü, b) z- yönü (Harmonic spectrum of vibration displacement under Condition A a) y-direction, b) z-direction)

Elektrik şebekelerinde karşılaşılan bir diğer harmonik bileşen 5. harmoniktir. Analizlerin ikinci kısmında 5. harmonik ve ara-harmoniklerin yalıtım transformatörü üzerindeki titreşim etkilerini görebilmek amacıyla belirtilen uyarımlar altında harmonik tepki analizleri yapılmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 7' de verilmiştir. Şekil 7a' da verilen y-yönü yer değiştirme harmonik spektrumunda y-yönündeki Koşul B1 ve Koşul B2 durumları için titreşimin temel, ikinci, üçüncü (Koşul B1 hariç) ve dördüncü bileşenleri görülmüştür. Ancak Koşul B1 için ikinci ve dördüncü bileşenlerin genliklerinin çok küçük olduğu görülebilir. Bu koşullar için ikinci ve dördüncü bileşenlerin bulunması, nüve malzemesinin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle artan manyetostriktif kuvvetler ve Maxwell kuvvetleridir. Koşul B2 için 5. harmoniğin uyarım sinyalinde bulunmasının bu durumu artırdığı söylenebilir. Koşul B3 – Koşul B5 uyarımları için 0-150 Hz aralığındaki spektrumun hem frekans değerleri hem de genlik değerleri bakımından Koşul A ile oldukça benzer olduğu görülebilir. Dolayısıyla bu düşük frekans aralığında 3. veya 5. harmoniğin bulunmasının frekansları nispeten yüksek olduğu için nüve titreşimi üzerinde büyük bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir. Koşul B3' te 150 Hz-350 Hz aralığında yine 320 Hz, 350 Hz-500 Hz aralığında

ise 360 Hz, 380 Hz, 400 Hz ve 440 Hz gibi birçok bileşenin ortaya çıktığı görülmüştür. Koşul B4, 25 Hz' de belirgin bir tepe değer almasına rağmen 25 Hz' in tamsayı katlarında birçok küçük genlik değerlerinde bileşenin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Koşul B5' te hem diğer çalışma koşullarına göre hem de kuvvet harmonik spektrumuna göre çok farklı sonuçlar elde edilmiştir. Her ne kadar 0-150 Hz aralığında yine ( $f_0 - f_{ih}$ ), 100 Hz-300 Hz gibi tam frekanslarda bileşenlere sahip olsa da birçok karakteristik olmayan frekansta bileşen görülmesine yol açmıştır. Şekil 7.b' deki z-yönü titreşim yer değiştirmelerinde 0-150 Hz aralığı için nispeten karmaşık ancak benzer bir spektrum görülmektedir. Koşul B1 ve Koşul B2 önceki çalışma koşullarıyla aynı frekanslarda ve birbirlerine yakın genlik değerlerinde bileşenlere sahiptir. Koşul B3- Koşul B5 uyarımları da Şekil 6.b' de verilen Koşul A' ya göre nispeten yüksek genliklerde ancak aynı frekanslarda bileşenlerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Koşul B5, oldukça küçük genliklerde ve tamsayı olmayan frekanslarda bileşenlerin görülmesine yol açmıştır. 350 Hz-500 Hz aralığında Koşul A5' ten çok farklı olarak Koşul B5' in iki belirgin bir tepe yaptığı görülebilir. Buna karşılık Koşul B3 ve Koşul B4' te sadece ara harmoniklerinin tamsayı katlarında bileşenlere sahip olduğu görülebilir.



Şekil 7. Koşul B için titreşim yer değiştirmesine ait harmonik spektrum a) y-yönü, b) z- yönü (Harmonic spectrum of vibration displacement under Condition B a) y-direction, b) z-direction)

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Havalimanı, hastane gibi yerlerde kullanılan yalıtım transformatörlerinde ara-harmonik içeren akımların dolaşması, transformatör nüvesinde doymaya, nüve titreşim seviyelerinde artışa, nüvedeki mekanik stresin artmasına ve sonuç olarak da transformatörün mekanik olarak erken yıpranmasına yol açmaktadır. Transformatörün yüklü çalışması sırasında hem manyetik büzülme hem de Maxwell kuvvetlerinin yol açtığı etkiler üst üste binmektedir. Bunun yanında transformatörün gerek geometrisi gerekse nüve malzemesinin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle de oldukça karmaşık bir titreşim harmonik spektrumunun ortaya çıkması kaçınılmaz hale gelmektedir. Sargı akımındaki ara-harmoniklerin frekansının çalışma frekansından düşük olması, nüve titreşiminin genliğini de o ölçüde artırmaktadır. Bu çalışmada yalıtım transformatörlerinin uyarım akımında bulunabilecek harmonik ve ara-harmonikler nedeniyle meydana gelen nüve kuvvetleri ve nüve titreşimi yer değiştirmeleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Uyarım akımında 3. ve 5. harmonik gibi karakteristik harmoniklerin bulunması, bu çalışmada ele alınan ara-harmoniklerin frekansından yüksek olduğu için yer değiştirme harmonik spektrumunda dikkate değer bir etki oluşturmamıştır. Ayrıca incelenen titreşim harmonik spektrumlarında titreşimin ikinci bileşeninden sonraki harmonik bileşenlerin genliklerinde belirgin bir düşüş görülmüştür.

Farklı karakteristik harmonik bileşenlerin bulunduğu uyarım koşulları için, titreşim harmonik spektrumunda şebeke-frekansının katı olmayan bir frekanstaki ara-harmonik bulunması, nüve titreşimi harmonik spektrumunun yüksek genlik değerlerine sahip çok sayıda harmonik bileşen içermesine yol açmıştır. Ayrıca böyle bir ara-harmonik frekansı, dikey yöndeki titreşim yer değiştirmelerinde çok sayıda harmonik bileşen oluşturduğu için nüve gürültüsüne de olumsuz olarak katkı sağlayacağını düşündürmektedir. Bu analizlerde elde edilen sonuçlardan yola çıkarak ara-harmonikli uyarımın yalıtım transformatörünün akustik gürültüsü üzerine etkilerinin incelenmesi çalışmanın bir sonraki aşamasını oluşturacaktır. Böylece bu tip transformatörlerde uyarım şekline kaynaklanan mekanik problemlerin sınıflandırması da daha etkin bir şekilde yapılabilecektir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Funda BATTAL:** Benzetim çalışmalarının yapılması, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hanzelka, Z., Bien, A. "Application Note Interharmonics", Cu0151 AN Interharmonics, Leonardo ENERGY, (2015).
- [2] Soltani, H.; Davari, P.; Zare, F.; Blaabjerg, F. "Effects of modulation techniques on the input current Interharmonics of adjustable speed drives", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65:167–178, (2018).
- [3] Guo, Q., Wu, J., Jin, H., Peng, C. "An innovative calibration scheme for interharmonic analyzers in power systems under asynchronous sampling", *Energies*, 12(121), (2019).
- [4] Ravindran, V., Busatto, T., Ronnberg, S.K., Meyer, J., Bollen, M. "Time-varying interharmonics in different types of grid-tied PV inverter systems", *IEEE Trans. Power Deliv.*, 35(2): 483-496, (2020).
- [5] Kalair, A.; Abas, N.; Kalair, A.R.; Saleem, Z.; Khan, N. "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 78: 1152–1187, (2017).
- [6] Arranz-Gimon, A., Zorita-Lamadrid, A., Morinigo-Sotelo, D., Duque-Perez, O. "A study of the effects of time aggregation and overlapping within the framework of IEC standards for the measurement of harmonics and interharmonics", *Appl. Sci.*, 9: 4549; (2019).
- [7] Buticchi, G., Lorenzani, E. "Detection method of the DC bias in distribution power transformers", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8): 3539-3549, (2013).
- [8] Baguley, C. A., Madawala, U. K., Carsten, B. "The impact of vibration due to magnetostriction on the core losses of ferrite toroidals under DC bias", *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(8): 2022-2028, (2011).
- [9] Yao, X. G., Moses, A. J., Anayi, F. "Normal Flux Distribution in a Three-phase transformer core under sinusoidal and PWM excitation", *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(6): 2660-2662, (2007).
- [10] Ramírez-Nino, J., Haro-Hernández, C., Rodríguez-Rodríguez, J. H., Mijarez, R. "Core saturation effects of geomagnetic induced currents in power transformers", *Journal of Applied Research and Technology*, 14: 87–92, (2016).
- [11] Zhang, Y., Wang, J., Sun, X., Bai, B., Xie, D. "Measurement and modeling of anisotropic magnetostriction characteristic of grain-oriented silicon steel sheet under DC bias", *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(2): 361 – 364, (2014).

- [12] Wang, J., Gao, C., Duan, X., Mao, K. “Multi-field coupling simulation and experimental study on Transformer vibration caused by DC bias”, *Journal of Electrical Engineering Technology*, 10(1): 176-187, (2015).
- [13] 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*, Anaheim, CA, USA, 263-266, (2000).
- [14] Xiong W., Ji R., “Nonlinear Time Series Analysis of Transformer’s Core Vibration”, *The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation 2*, Dalian, China, 5493 – 5496, (2006).
- [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] Wang Y. “Transformer vibration and its application to condition monitoring”, *Doktor Tezi, University of Western Australia*, School of Mechanical and Chemical Engineering, (2015).
- [17] He, Q., Fan, C., Yang, G., Li, H., Li, J., Chen, X. “Experimental analysis of transformer core vibration and noise under inter-harmonic excitation”, *Appl. Sci.*, 12: 1758, (2022).
- [18] He, Q., Fan, C., Yang, G., Li, H., Li, J., Chen, X. “Numerical calculation of vibration characteristics of transformer core under inter-harmonics”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2290:012099, (2022).
- [19] A. J. Moses, P. I. Anderson, and T. Phopongviwat, “Localized surface vibration and acoustic noise emitted from laboratory-scale transformer cores assembled from grain-oriented electrical steel,” *IEEE Trans. Magn.*, 52:10, 7100615, (2016).
- [20] Pan, C., Wang, C., Su, H. “Excitation current and vibration characteristics of DC biased transformer”, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7:3, 604 – 613, (2021).
- [21] B. X. Du, D. S. Liu, “Dynamic behavior of magnetostriction-induced vibration and noise of amorphous alloy cores”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51:4, (2015).
- [22] Yu, Z., Li, D., Chen, L. “Statistical analysis of vibration characteristics of power transformers with different voltage levels”, *12th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 694-699, Xi’an, China, (2018).
- [23] Santoso, S., Beaty, H. W., Dugan, R. C., McGranaghan, M. F. *Electrical Power Systems Quality*, Second Edition, The McGraw-Hill Companies, (2004)