



# Doyum ve Histerezis Etkilerini İçeren Tek Fazlı Transformatörün Modellenmesi ve Nonlinear Yük Etkilerinin İncelenmesi

## Modeling of a Single Phase Transformer Including Saturation and Hysteresis Effects and Examining Nonlinear Load Effects

Şilan ÇALIŞKAN<sup>1\*</sup>, Hüseyin ALTUN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, Elazığ, [silancaliskan@tcdd.gov.tr](mailto:silancaliskan@tcdd.gov.tr) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5215-017X>

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elazığ, [haltun@firat.edu.tr](mailto:haltun@firat.edu.tr) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3124-1232>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 25.03.2024  
Revizyon 02.04.2024  
Kabul 20.04.2024  
Online 30.06.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Jiles-Atherton Histerezis Model,  
Transformatör Modelleme,  
Harmonik etkiler, Doğrusal  
Olmayan Yük

### ÖZET

Bu makalede güç sistemlerinde elektrik enerjisini bir elektrik sisteminden diğerine aktarmak için kullanılan en önemli ekipmanlardan birisi olan transformatörlerin doyum ve histerezis etkilerini içeren transformatör modeli oluşturulmuştur. Bu etkiler yüksüz durum sırasında uyarma akımı dalga biçimini bozar. Ayrıca, geçici durumlar sırasında transformatörün davranışı üzerinde önemli bir rol oynarlar. Bu amaçla transformatörün modelleme sürecinde histerezis döngüsünün hesaba katılması, doyum etkisi, harmonik etkiler ve ani akımların etkilerini içerecek şekilde analiz yapmak için ters Jiles-Atherton histerezis modeli kullanılarak Matlab/Simulink benzetimi gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan yük koşullarının transformatör üzerindeki etkileri tek fazlı kontrollü doğrultucu eklenerek farklı tetikleme açıları için analiz edilmiştir. Farklı yük durumları için transformatörün giriş çıkış büyüklüklerine ait harmonik analiz ve toplam harmonik bozunum değişimleri detaylı olarak verilmiştir.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 25.03.2024  
Received in revised form 02.04.2024  
Accepted 20.04.2024  
Available online 30.06.2024

#### Keywords:

Jiles-Atherton Hysteresis Model,  
Transformer Modeling, Harmonic  
Effects, Nonlinear Load

### ABSTRACT

In this article, a transformer model was created that includes the saturation and hysteresis effects of transformers, which are one of the most important equipment used to transfer electrical energy from one electrical system to another in power systems. These effects distort the excitation current waveform during the no-load state. They also play an important role on the behavior of the transformer during transients. For this purpose, Matlab/Simulink simulation was carried out using the inverse Jiles-Atherton hysteresis model to take into account the hysteresis loop in the modeling process of the transformer, and to analyze the saturation effect, harmonic effects and the effects of inrush currents. The effects of non-linear load conditions on the transformer were analyzed for different trigger angles by adding a single-phase controller rectifier. Harmonic analysis and total harmonic distortion changes of the input and output quantities of the transformer for different load situations are given in detail.

Doi: 10.24012/dumf.1458359

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Güç sistemlerindeki en önemli ekipmanlardan biri transformatörlerdir. Transformatörlerin nonlineer olma durumu; çekirdekdeki doyma, histerezis ve girdap akımlarından kaynaklanmaktadır. Bu etkiler yüksüz durumda uyarma akımı dalga biçimini bozar [1]. Ayrıca, bu etkiler transformatörün geçici durum davranışı üzerinde önemli bir rol oynarlar. Bu nedenle, transformatörün modellenmesinde histerezis döngüsünün hesaba katılması, çekirdeğin doğrusal olmama durumunun etkilerini anlamak için çok gereklidir [2]- [3].

Histerezis manyetik malzemelerin önemli bir özelliğidir. Manyetik alanın hesaplama sonuçlarının doğruluğunu arttırmak için, manyetik alanın sayısal hesaplanmasında manyetik malzemelerin histerezis etkilerinin dikkate alınması gerekir [4].

Doğrusal olmayan yükler, elektrik hatlarında harmoniklerin akmasına neden olur ve bu da kabloları ve transformatörleri aşırı yükleyebilir. Birçok masaüstü, kişisel bilgisayar, güç kaynaklarının tasarımı (kapasitör giriş güç kaynağı) nedeniyle AC kaynağına doğrusal olmayan yükler sunar [5].

Enerji hatlarında harmoniklerin varlığı, düşük güç faktörüne, düşük verimliliğe, dağıtım sisteminde güç kayıplarının artmasına ve iletişim sistemlerinde girişim sorunlarına neden olur. Bu durum bazen voltaj ve akım bozulmalarına karşı çok hassas olan elektronik ekipmanların arızalanmasına yol açmaktadır [6].

Transformatörleri doğrusal olmayan yük altında beslerken, çekirdek kayıpları ve bakır kayıpları dahil elektromanyetik kayıplar artar. Bu durum, sıcaklığın artmasına ve dolayısıyla izolasyonun bozulması nedeniyle transformatör ömrünün kısalmasına neden olur. Doğrusal olmayan yükün artışı aynı zamanda THD'nin artmasına neden olur ve dolayısıyla transformatör üzerindeki yüklenmeyi de artırır. Sorunu çözmek için, harmonik yüke bağlı transformatörün nominal kapasitesi genellikle azaltılır [7]- [8].

Doğrusal olmayan yükler, elektrik tesisleri için harmonik akımın kaynağıdır. Harmoniklerin yüksek seviyesi, elektrik gücü kayıplarının artışı büyük ölçüde etkiler. Harmoniklerin etkisi, dengesiz doğrusal olmayan akımlardan dolayı daha da artar. Dolayısıyla doğrusal olmayan dengesiz yüklerin, transformatörün kayıplarını artırabileceği sonucuna varılabilir [9].

Güç sistemi harmonikleri, ana üretilen (temel) frekansın tam katları olan frekanslardaki sinüzoidal gerilim ve akımlar olarak tanımlanır. Şebeke gerilimi ve yük akımı dalga formlarının ana bozucu bileşenlerini oluştururlar. Bununla birlikte, güç sistemi ara harmoniklerinin artan içeriği, yani temel değerlerin tam katları olmayan frekanslardaki bileşenlerin bozulması, bunlara daha fazla dikkat edilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Çoğu ülke geçmişte yerel koşullara uyacak şekilde kendi harmonik standartlarını veya önerilerini geliştirmiştir. Bununla birlikte, küresel ticaretin büyümesiyle birlikte, bir ülkede üretilen ekipmanın diğer bir ülkedeki standartlara uyma ihtiyacı, harmonikler ve ara

harmonikler konusunda uluslararası standartların formüle edilmesi konusunda yoğun çabalara yol açmıştır [10].

Bir dizi kaynaktan gelen harmoniklerin güç sistemi üzerindeki etkileşim şekli, bu tür kaynakların doğası ve bunların sistem içindeki dağılımının hem fiziksel hem de zamana göre değişimi tarafından yönetilir. Rahatsız edici yüklerin gerçek derecelendirmelerini etkili bir derecelendirmeye dönüştürür ve bu daha sonra standartla ilişkisinin değerlendirilmesinde kullanılır [10]-[11].

Manyetik bir malzemenin davranışını alanlar düzeyinde yakalamak için histerezis döngüsü Jiles-Atherton modeli ile oluşturulmuştur. Ölçülen döngüye daha iyi yaklaşmayı kolaylaştırmak için orijinal hesaplama modeli değiştirilerek ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur [12].

Bir bilgisayar programındaki bir hesaplama algoritmasını kullanarak mıknatıslanma eğrisini simüle etmek için Jiles-Atherton modelinin denklemleri kullanılır. Bu programın amacı deneysel olarak elde edilen ana mıknatıslanma eğrisi için regresyon eğrisi bulunduğunda Jiles-Atherton modelinin parçası olan parametrelerin değerlerini bulmaktır. Bu parametrelerin değerleri kademeli olarak artırılabilir veya azaltılabilir. Bu makale aynı zamanda farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş birkaç kobalt ferrit numunesinin mıknatıslanma eğrilerinin uydurulmasıyla elde edilen Jiles-Atherton modeli parametrelerinin değerlerini de sunmaktadır [13].

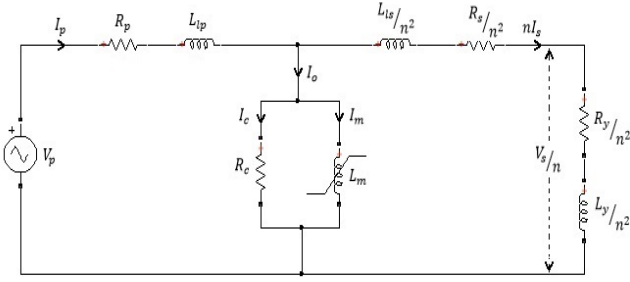
Ferromanyetik malzemelerin manyetik alan analizi, elektrikli güç ekipmanının performansını tahmin etmek ve analiz etmek için oldukça önemlidir. Bu bileşenlerde kullanılan manyetik çekirdek malzemesinin histerezis davranışının simülasyon modelinde doğru bir şekilde temsil edilmesi gerekmektedir. Jiles ve Atherton tarafından önerilen yumuşak manyetik malzemelerdeki mıknatıslanma süreçlerinin tanımı hala en yaygın kullanılanlardan biri olmaya devam etmektedir. Jiles-Atherton (JA) histerezis modeli, mıknatıslanma sürecine ilişkin fiziksel anlayışa dayanmaktadır ve bu nedenle manyetikliğin fiziksel bir modeli olarak kabul edilmektedir [14]- [15].

Manyetik malzemelerde mıknatıslanmanın modellenmesi incelendiğinde, bazı manyetik malzemelerin manyetik alanın varlığında uzadığı görülmüştür. Bu malzemeler tam doğrusal değildir ve dolayısıyla kontrol edilmesi zordur. Deneysel veriler Preisach, ve Jiles-Atherton modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu modellerin malzeme davranışının tahminindeki kullanım kolaylığı ve doğruluğu açısından karşılaştırılması yapılmıştır [16].

Sonlu elemanlar analizinde uygulanan J-A ve Preisach modellerini yumuşak manyetik kompozit çekirdek bobini üzerine uygulanarak karşılaştırılmıştır. Her iki model de temel davranış (B-H eğrisi) ve aynı oranlardaki akım, demir kayıpları için benzer sonuçlar vermektedir. Ayrıca uygulaması daha kolay ve hızlı olan J-A modeli, çalışılan sistem için Preisach modeline benzer sonuçlar vermiştir [17].

## Doyum ve Histeresis Etkilerini İçeren Transformatörün Modellenmesi

Elektrik sistemleri arasında enerji aktarımı sırasında transformatörde güç kayıpları ortaya çıkar. Bu kayıplar doğrusal olmayan yüklerden dolayı artabilmektedir. Günümüzde doğrusal olmayan yüklerin çoğunluğunu gerilim ve akımlarda daha yüksek dereceli harmonikler üreten güç elektroniği cihazları oluşturur. Genellikle transformatöre dengesiz yükler oluşturacak şekilde bağlanırlar. Doğrusal olmayan ve dengesiz yüklerden dolayı ortaya çıkabilecek anormal çalışma koşullarını transformatör modelinde doğru şekilde ortaya koymak oldukça önemlidir [18].



Şekil 1. Tek fazlı transformatörün elektriksel eşdeğer devresi

Transformatörü temsil eden matematiksel denklemler, Şekil 1'de verilen elektriksel eşdeğer devreye dayanarak türetilebilir. Şekil 1'de, sarımdan akan her akımın ürettiği akımın, iki akı bileşeninden oluştuğu kabul edilir. Akı bileşenlerinden biri yalnızca hava yoluyla sarıma ve kısmen akımın aktığı demir çekirdeğe bağlanırken, diğeri demir çekirdek aracılığıyla hem birincil hem de ikincil sargıları bağlar [19].

Şekil 1'de değişken mıknatıslanma indüktansına paralel olarak histeresis ve fuko akımları nedeniyle oluşan çekirdek kayıplarını temsil eden  $R_c$  direnci eklenmiştir. Bu direnç sabit olmamasına rağmen modelde yaklaşık sabit kabul edilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, sabit  $R_c$  direncinden akan akım  $I_c$  akımına karşılık gelmektedir. Devredeki  $I_o$  akımı, açık devre çalışma akımına karşılık gelir.  $R_y/n^2$  ve  $L_y/n^2$  indüktif yük empedansının bileşenleridir.

Gerçek bir transformatörde demir çekirdeğin doygunluğu, histeretik davranışı ve sargı dirençlerine ek olarak girdap akımlarının etkisi nedeniyle manyetik bağlantı ideal olarak sağlanamaz. Bu ideal olmayan durumları bir transformatörün formülasyonuna dahil ederek, her bir taraf için gerilim eşitliklerini şu şekilde ifade edebiliriz:

$$V_p = I_p \cdot R_p + N_p \frac{d\phi_p}{dt} \quad (1)$$

$$V_s = -I_s \cdot R_s + N_s \frac{d\phi_s}{dt} \quad (2)$$

Burada  $V_p$  ve  $V_s$  terminal gerilimlerini,  $R_p$  ve  $R_s$  sargı dirençlerini ve  $N_p$  ve  $N_s$  sırasıyla primer ve sekonder sargılarının spir sayılarını,  $\phi_p$  ve  $\phi_s$  ise sırasıyla birincil ve ikincil sargıları için akı bağıntı temsil eder. Denklem 1 ve

2'nin sağ tarafındaki ikinci terimler elektromanyetik indüksiyondan kaynaklanmaktadır.

$$V_p = I_p \cdot R_p + L_p \frac{dI_p}{dt} - L_M \frac{dI_s}{dt} \quad (3)$$

$$V_s = -I_s \cdot R_s - L_s \frac{dI_s}{dt} + L_M \frac{dI_p}{dt} \quad (4)$$

$L_M$  ortak endüktans;  $L_p$ ,  $L_s$  sırasıyla primer ve sekonder sargılarının self indüktanslarını göstermektedir. Self indüktanslar, Denklem 5 ve 6'daki gibi kaçak indüktans ve ortak indüktans cinsinden ifade edilebilir.

$$L_p = L_{lp} + \frac{N_p}{N_s} L_M \quad (5)$$

$$L_s = L_{ls} + \frac{N_s}{N_p} L_M \quad (6)$$

Burada  $L_{lp}$  ve  $L_{ls}$  sırasıyla primer ve sekonder sargısı kaçak indüktanslarını göstermektedir. Denklem 5 ve 6'yı denklem 3 ve 4'de yerine yazarsak gerilim eşitliklerini kaçak indüktans ve ortak indüktans cinsinden ifade edebiliriz.

$$V_p = I_p \cdot R_p + L_{lp} \frac{dI_p}{dt} + \frac{L_M}{n} \frac{d(I_p - nI_s)}{dt} \quad (7)$$

$$V_s = -I_s \cdot R_s - L_{ls} \frac{dI_s}{dt} + L_M \frac{d(I_p - nI_s)}{dt} \quad (8)$$

Denklem 7'de  $N_s/N_p$  dönüştürme oranına karşılık gelen  $n$  ifadesi kullanılmıştır.  $(I_p - nI_s)$  ve  $L_M/n$  terimleri, sırasıyla mıknatıslanma akımına ve mıknatıslanma indüktansına karşılık gelen  $I_m$  ve  $L_m$  ile yer değiştirebilir.

$$V_p = I_p \cdot R_p + L_{lp} \frac{dI_p}{dt} + L_m \frac{dI_m}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{V_s}{n} = -nI_s \cdot \frac{R_s}{n^2} - \frac{L_{ls}}{n^2} \frac{d(nI_s)}{dt} + L_m \frac{dI_m}{dt} \quad (10)$$

Şekil 1'deki elektriksel eşdeğer devrede yük tarafı için aşağıdaki eşitliği yazabiliriz.

$$\frac{V_s}{n} = nI_s \cdot \frac{R_y}{n^2} + \frac{L_y}{n^2} \frac{d(nI_s)}{dt} \quad (11)$$

$$L_m = L_M/n = K L_p = K \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 L_s \quad (12)$$

$$L_m \frac{dI_m}{dt} = N_p \frac{d\phi_m}{dt} = \frac{d\lambda_m}{dt} = N_p S \frac{dB}{dt} \quad (13)$$

Burada  $\lambda_m = N_p \phi_m$  mıknatıslama akı bağıdır ve  $\phi_m = B \cdot S$  'dir. İndüklenen gerilim eşitliği,  $B$  ve  $H$  arasındaki ilişkiyi yansıtacak şekilde Denklem 14'deki gibi tanımlanabilir.

$$V_m = L_m \frac{dI_m}{dt} = \frac{N_p^2 S}{l} \frac{dB}{dH} \frac{dI_m}{dt} \quad (14)$$

Burada  $l$  akı yolunun ortalama uzunluğudur.

### Ters Jiles Atherton Modeli

Transformatörlerde elektromanyetik indüksiyon olayı meydana geldiğinde, yani akı tarafından elektromotor kuvvet indüklendiğinde, indüklenen gerilim mıknatıslanma akımından önce bilinebilir. Bu nedenle transformatörün geçici durum modeliyle klasik J-A modeli birleştirilemez.

Trafo geçici durum hesaplamalarına histerezi dahil etmek için, J-A modelinin tersine çevrilmesi gerekir. Manyetik akı yoğunluğunu bağımsız bir değişken olarak kabul eden ve manyetik alan yoğunluğu için çözülmesi gereken bir matematiksel model, demir çekirdek malzemesinde mevcut olan doygunluğu ve B-H ilişkisini hesaba katan bir transformatör modeline dahil edilebilir.

Modelin, demir çekirdek malzemesinin doygunluğu ve B-H ilişkisini hesaba katması ve farklı koşullar için ani akım ve doğrusal olmayan yük akımının değişimini gerçekleştirme amaçlanmaktadır. Tersine çevrilmiş Jiles-Atherton modeli, B-H ilişkisinin temsili için kullanılır.

Bu modelde  $B$  ve  $H$  sırasıyla giriş ve çıkış değişkenleri olarak ele alınır. Ters Jiles-Atherton modeli ile transformatörlerin geçici durumlarını içeren bir modelleme gerçekleştirilebilir [20]. Model, manyetik akı yoğunluğunun ( $B$ ) bağımsız bir değişken olarak ele alındığı diferansiyel denklemlerin doğrudan Jiles-Atherton modelinden uyarlandığı diferansiyel denklem takımlarından oluşur.  $B$ 'den  $M$  ve  $H$  'yi hesaplamak için referansta verilen sayısal prosedür,  $B(t)$  ve  $H(t)$ 'nin önceki hesaplama adımından bilindiğini varsayar [19]- [20].

$$\Delta B = B(t + \Delta t) - B(t) \quad (15)$$

$$M(t) = \frac{B(t)}{\mu_0} - H(t) \quad (16)$$

$$H_e(t) = H(t) + \alpha M(t) \quad (17)$$

$H_e$  manyetik alan yoğunluğu,  $\alpha$  ise alanlar arası bağlantıları temsil eden Weiss düzeltme faktörüdür.  $M_{an}$  histerik olmayan mıknatıslanma Denklem 18 ile bulunur.

$$M_{an}(t) = \left[ \coth\left(\frac{H_e(t)}{a}\right) - \frac{a}{H_e(t)} \right] \quad (18)$$

Burada,  $a$  histeretik mıknatıslanma eğrisinin eğimini ayarlayan şekillendirme parametresidir.  $M_{irr}$ , geri dönüşü olmayan mıknatıslanma bileşeni ise Denklem 19 ile bulunur.

$$M_{irr}(t) = \frac{M(t) - cM_{an}(t)}{1 - c} \quad (19)$$

$$\frac{dM_{an}}{dH_e} = \frac{M_s}{a} \left[ 1 - \coth^2\left(\frac{H_e(t)}{a}\right) + \left(\frac{a}{H_e(t)}\right)^2 \right] \quad (20)$$

$$\frac{dM_{irr}}{dB_e} = \frac{M_{an}(t) - M_{irr}(t)}{\mu_0 k \delta} \quad (21)$$

Buradaki  $B_e$  manyetik akı yoğunluğu,  $c$  ise tersinirlik katsayısıdır.  $k$ , modelde geri döndürülemez kaybı temsil eden Boltzmann sabitidir. Burada  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} H/m$  boşluğun manyetik geçirgenliğidir.

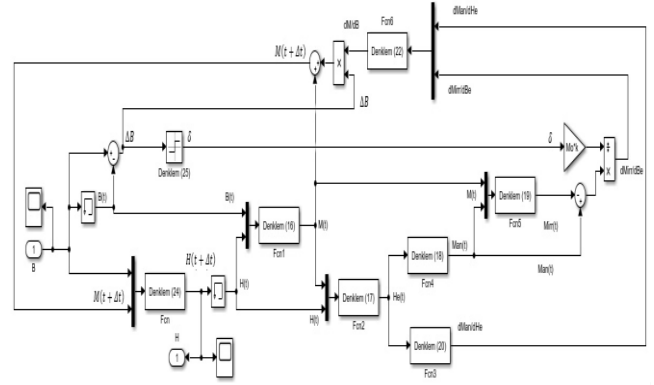
$$\frac{dM}{dB} = \frac{(1-c) \frac{dM_{irr}}{dB_e} + c \frac{dM_{an}}{\mu_0 dH_e}}{1 + \mu_0 (1-c) (1-c) \frac{dM_{irr}}{dB_e} + c (1-c) \frac{dM_{an}}{dH_e}} \quad (22)$$

$$M(t + \Delta t) = M(t) + \frac{dM}{dB} \Delta B \quad (23)$$

$$H(t + \Delta t) = \frac{B(t + \Delta t)}{\mu_0} - M(t + \Delta t) \quad (24)$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } \left(\frac{dH}{dt}\right) > 0 \\ -1 & \text{Eğer } \left(\frac{dH}{dt}\right) < 0 \end{cases} \quad (25)$$

Denklem 15-25'de verilen eşitlikler kullanılarak oluşturulan ters Jiles-Atherton histerezi modelinin Matlab/Simulink benzetimi Şekil 2'de görülmektedir.



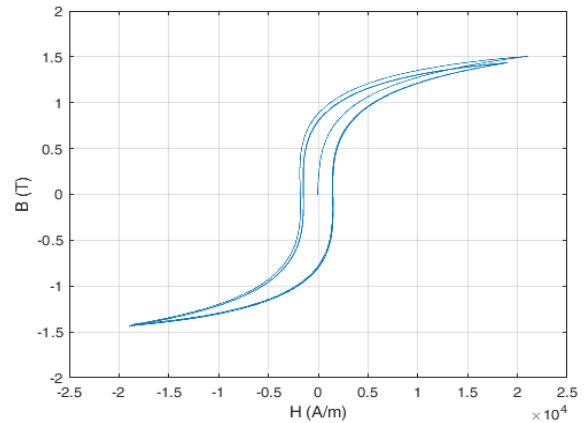
Şekil 2. Ters Jiles-Atherton modelinin Matlab/Simulink benzetimi

Bu çalışmada kullanılan 220/110 V, 50 Hz'lik transformatörün ve Jiles-Atherton modelinin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Transformatör ve Ters Jiles-Atherton parametreleri

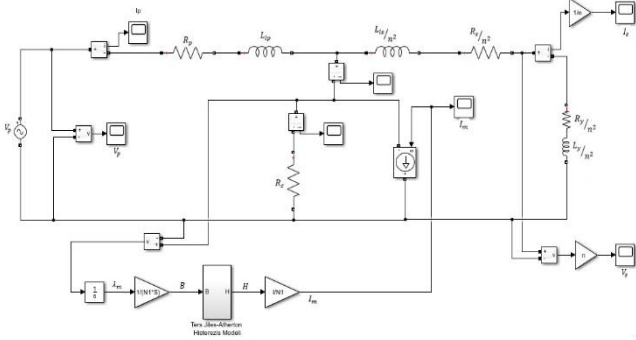
Transformatör	Ters Jiles-Atherton
$N_p=1000$ , $N_s=500$	$a=1290 \text{ A/m}$
$R_p=2,5 \Omega$ , $R_s=1 \Omega$	$\alpha=0,025$
$L_{lp}=2.10^{-3} \text{ H}$ , $L_{ls}=2.10^{-3} \text{ H}$	$k=5000 \text{ A/m}$
$R_c=1500 \Omega$ , $S=10 \text{ cm}^2$	$c=0,89$
$l=40 \text{ cm}$	$M_s=1,7.10^6 \text{ A/m}$

Şekil 2'deki  $B$  ile gösterilen girişe sinüzoidal bir sinyal uygulanarak elde edilen B-H değişimi Şekil 3'te görülmektedir. Akıdaki hızlı değişim doyma bölgesinde doğrusal bölgeye göre daha yüksektir. Bu durum doğrusal bölgedeki geçirgenliğin doyma bölgesindeki kadar büyük olduğu anlamına gelir.



Şekil 3. Ters Jiles-Atherton modeli için B-H değişimi

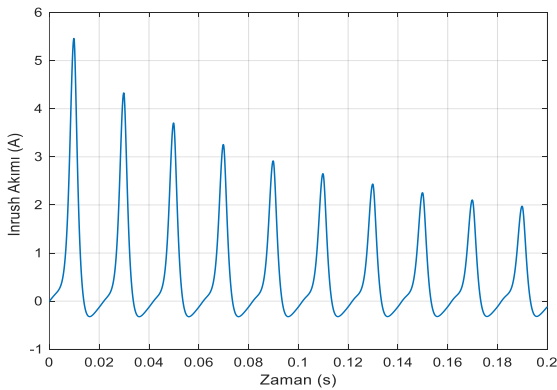
Doyum etkileri göz önüne alınarak oluşturulan tek fazlı transformatörün Matlab/Simulink benzetimi Şekil 4'de görülmektedir.



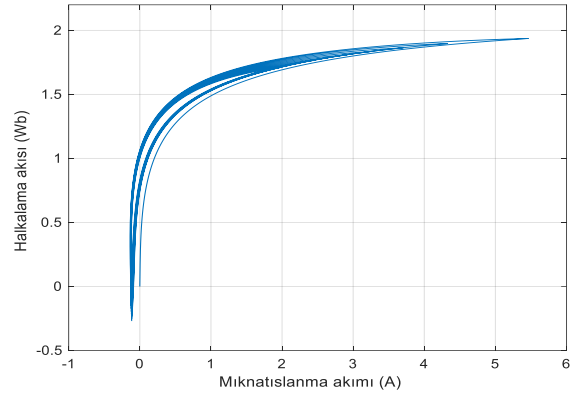
Şekil 4. Tek fazlı transformatörün Matlab/Simulink modeli

Transformatörün enerjilendirilmesi sırasında kaynak geriliminin başlangıç durumu ve demir çekirdeğe bağlı olarak akım, gerilim ve akı arasındaki ilişkide normal duruma göre bir dengesizlik meydana gelecektir. Enerjilenme anındaki dengesizlik düzeyine bağlı olarak akı ve akım, kısa sürede normal şartlara ulaşacak şekilde değişir. Bu kararsızlığı çözmek için gereken süre, transformatörün ne kadar hızlı enerji alabileceğine bağlı olarak birkaç döngüden birkaç milisaniyeye kadar değişebilir. Transformatöre enerji verildiği anda demir çekirdekte artık akı yoksa hem akı hem de akım sıfır değerinden değişmeye başlayacaktır. Aksi takdirde, demir çekirdekte artık akı varsa, akı demir çekirdekte zaten mevcut olanın üzerine eklenecektir ve yalnızca akım sıfır değerinden değişmeye başlayacaktır.

Şekil 4'teki model yüksüz olarak çalıştırılarak kaynak geriliminin farklı enerjilendirme açıları için enerjilendirme akımının (inrush akımı) etkileri incelenmiştir. Kaynak geriliminin 0°'lik enerjilendirme açısı için enerjilendirme akımının değişimi Şekil 5'de görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde primer akımının (enerjilendirme akımı olarak kabul edilebilir) tepe ani akım değeri, primer anma akımından neredeyse 3 kat daha yüksektir. Miknatıslanma akımının halkalama akısı ile olan histeresis ilişkisi Şekil 6'da verilmiştir. Ani akım yüksek olduğunda transformatörün doyma bölgesinde çalıştığını Şekil 6 için söyleyebiliriz.

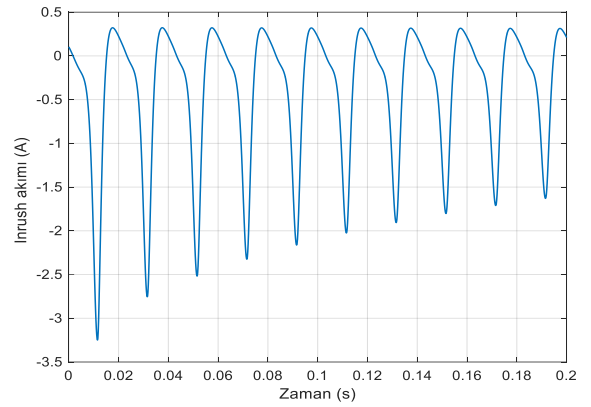


Şekil 5. Enerjilendirme akımının zamana bağlı değişimi (0°'lik enerjilendirme açısı için)

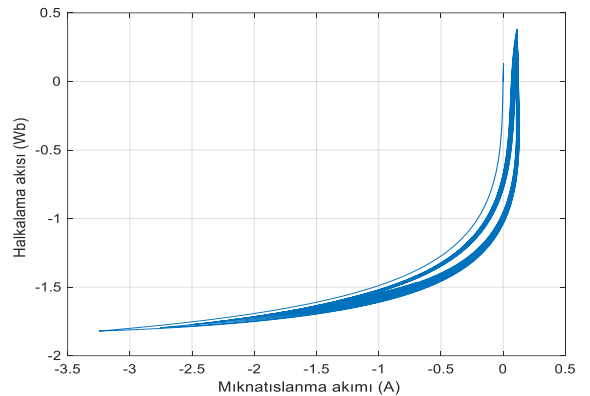


Şekil 6. Halkalama akısının miknatıslanma akımına göre değişimi (0°'lik enerjilendirme açısı için)

Kaynak geriliminin 150°'lik enerjilendirme açısı için enerjilendirme akımının değişimi Şekil 7'de, miknatıslanma akımının halkalama akısı ile olan histeresis ilişkisi ise Şekil 8'de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde kalkış akımının değerine etkisi açısından transformatöre enerji verilirken enerjilendirme açısının önemli olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 7. Enerjilendirme akımının zamana bağlı değişimi (150°'lik enerjilendirme açısı için)



Şekil 8. Halkalama akısının miknatıslanma akımına göre değişimi (150°'lik enerjilendirme açısı için)

## Nonlinear Yüklerin Transformator Üzerine Etkileri

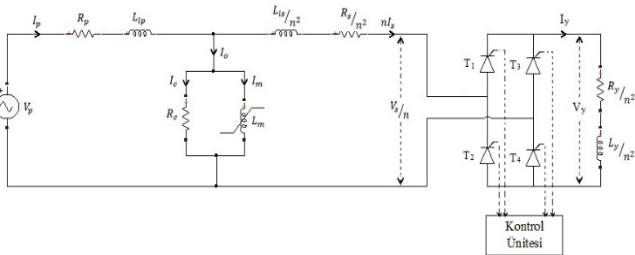
Doğrusal olmayan yükler sürekli olarak artmaktadır. Önümüzdeki 10 yıl içerisinde kamu hizmetleri sistemlerindeki yüklerin %60'ından fazlasının doğrusal olmayan yük olacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca elektronik yükteki artışın büyük bir kısmı konut sektörü ve ev aletlerini kapsamaktadır. Doğrusal olmayan yüklerin yaygın kullanımı, güç dağıtım transformatorlerinin çalışmasına yönelik endişe verici durumlara neden olur. Göze çarpan etkiler arasında manyetik sargının ve transformator çekirdeğinin çalışma sıcaklığının yükselmesi yer alır. Bu da transformatorün çalışma kapasitenin düşmesine yol açar. Güç transformatorlerinin artık çok fazla doğrusal olmayan özelliklere sahip yükleri beslemek zorunda olması, ek kayıpların artmasına neden olur [21].

Elektrik güç sistemlerinin sadece sinüzoidal akım ve gerilimlere göre değil aynı zamanda doğrusal olmayan ve elektronik anahtarlama yükleri için de tasarlanması gerekir. Son zamanlarda bu tür yüklerde bir artış olmuştur ve bunlar harmonik kirliliğe neden olabilir, akım ve gerilim dalga biçimlerini bozabilir, rezonans oluşturabilir, sistem kayıplarını artırabilir ve elektrikli ekipmanın kullanım ömrünü kısaltabilir. Harmoniklerin, belirli bir güç kalitesinin sağlanmasında en önemli sorunlardan biridir. Harmonik üretiminin ve ölçümlerinin dikkatli bir analizinin yapılması ve zararlı etkilerinin kabul edilebilir seviyelere sınırlandırılması gerekir [22].

Günümüzde kullanılan birçok uygulama için DC gücüne dönüşüm yapmak gerekir. Özellikle bilgisayarlar, video ekipmanları, akü şarj cihazları, UPS (kesintisiz güç kaynakları) için elektroliz sistemleri, DC sürücü ve benzer uygulamalar için güç dönüşümü yapmak gerekir [23]- [24].

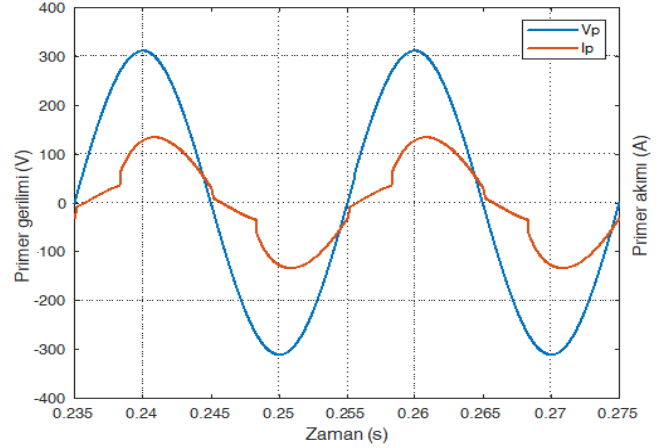
Güç sistemlerindeki harmonikler, ferrezonans, manyetik doyum, eş zamanlı olmayan rezonans ve doğrusal olmayan ve elektronik olarak anahtarlama yükleri gibi çeşitli durumlardan kaynaklanır. Doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonikler daha baskındır. Birçok araştırmacı doğrusal olmayan yüklerin arttığı modern uygulamaların etkisiyle güç sisteminde oluşan harmoniklerin analizi ve eliminasyonu ile ilgili araştırmalar yapmaktadırlar [25].

Transformator çıkışına kontrollü tam dalga doğrultucu bağlanması durumundaki devre Şekil 9'da görülmektedir.

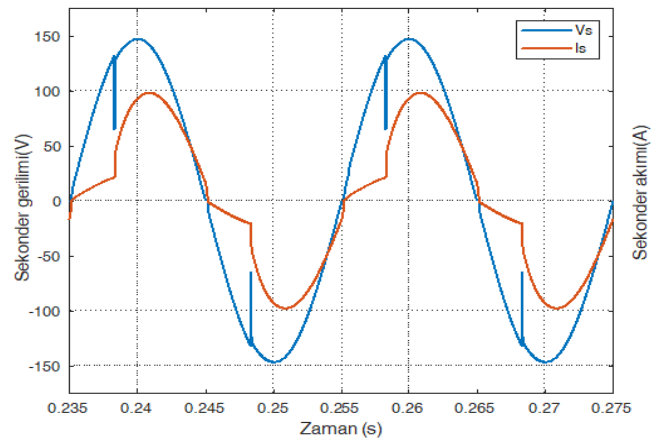


Şekil 9. Tek fazlı transformatörden beslenen tam dalga kontrollü doğrultucu devre şeması

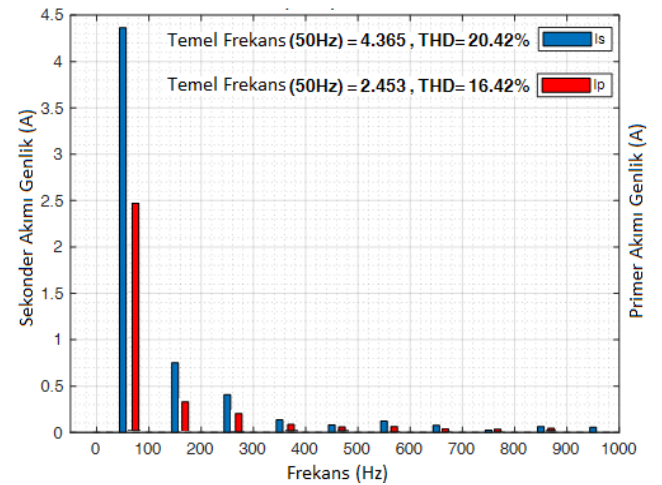
Şekil 9'daki devre  $R_y=50 \Omega$ ,  $L_y=50 \text{ mH}$ 'lik indüktif yük durumu ve tetikleme açısı  $60^\circ$  için çalıştırıldığında transformatorün primer gerilimi ve primer akımının değişimi Şekil 10'da, sekonder gerilimi ve sekonder akımının değişimi Şekil 11'de, sekonder ve primer akımının harmonik değişimi ise Şekil 12'de görülmektedir.



Şekil 10. Primer gerilimi ve primer akımının değişimi (RL yükü ve tetikleme açısı  $60^\circ$  için)



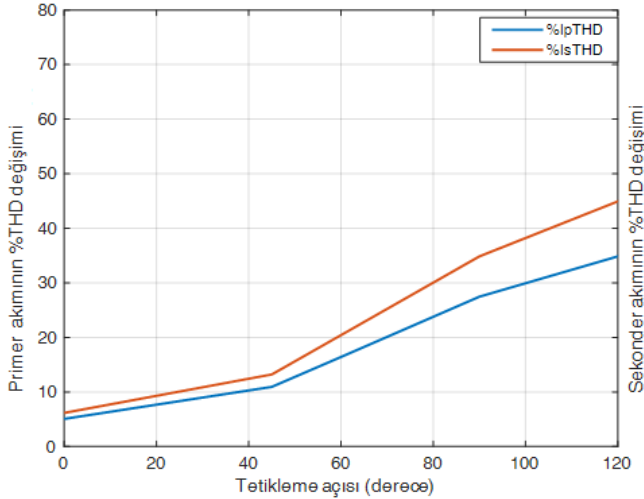
Şekil 11. Sekonder gerilimi ve sekonder akımının değişimi (RL yükü ve tetikleme açısı  $60^\circ$  için)



Şekil 12. Sekonder ve primer akımının harmonik analizi (RL yükü ve tetikleme açısı  $60^\circ$  için)

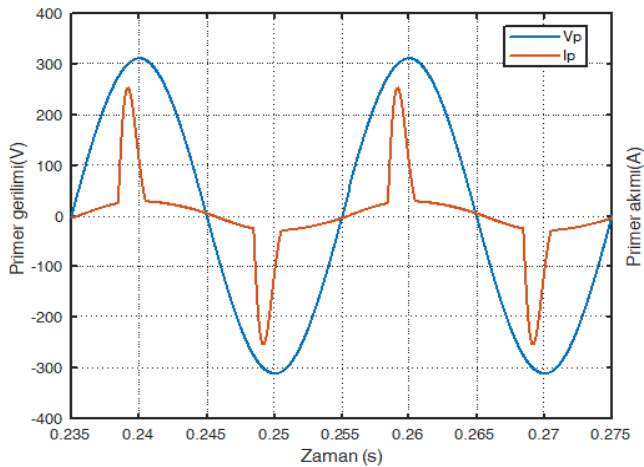
Sekonder ve primer akım dalga şekillerinin harmonik spektrumlarını gösteren Şekil 12 incelendiğinde temel frekansın (50 Hz) üçüncü, beşinci ve yedinci katına karşılık gelen harmoniklerin daha baskın olduğu tek harmonikleri içerdiği görülmektedir. Bu harmonikler trafo ömrünün kılmasına ve güç kalitesinin bozulmasına yol açacaktır.

RL yük durumu için doğrultucu tetikleme açısının  $0^{\circ}$ - $120^{\circ}$  aralığında değiştirilmesiyle sekonder ve primer akımlarının toplam harmonik bozunum değişim oranı (%THD) elde edilerek Şekil 13'de gösterilmiştir. Tetikleme açısı arttıkça %THD değerinin arttığı açıkça görülmektedir.

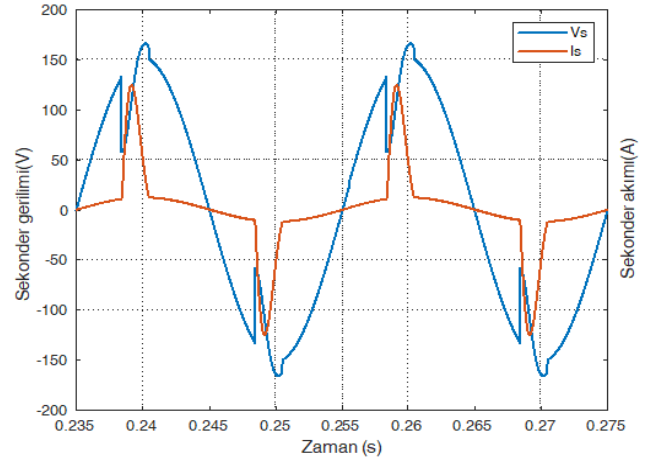


Şekil 13. Sekonder ve primer akımının %THD değişimi (RL yükü ve tetikleme açısı  $0^{\circ}$ - $120^{\circ}$  aralığı için)

Şekil 9'daki devre çıkışındaki  $R_v=100 \Omega$ 'luk dirence paralel  $C=200 \mu F$ 'lık kapasite bağlanması durumunda ve tetikleme açısının  $60^{\circ}$  olma durumu için çalıştırıldığında transformatörün primer gerilimi ve primer akımının değişimi Şekil 14'de, sekonder gerilimi ve sekonder akımının değişimi Şekil 15'de, sekonder ve primer akımının harmonik değişimi ise Şekil 16'da görülmektedir.

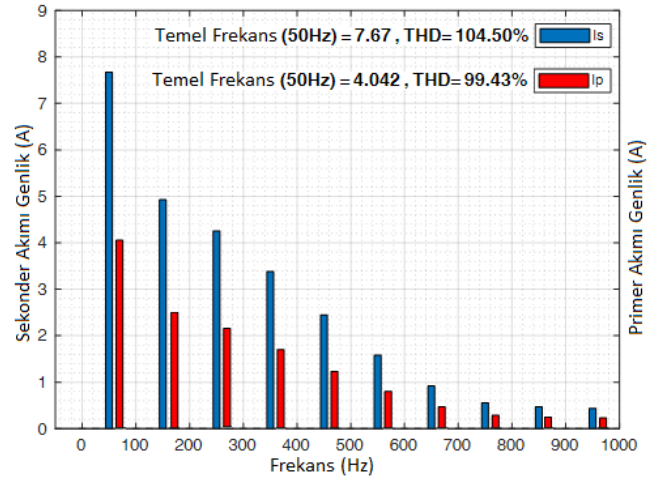


Şekil 14. Primer gerilimi ve primer akımının değişimi (RC yükü ve tetikleme açısı  $60^{\circ}$  için)



Şekil 15. Sekonder gerilimi ve sekonder akımının değişimi (RC yükü ve tetikleme açısı  $60^{\circ}$  için)

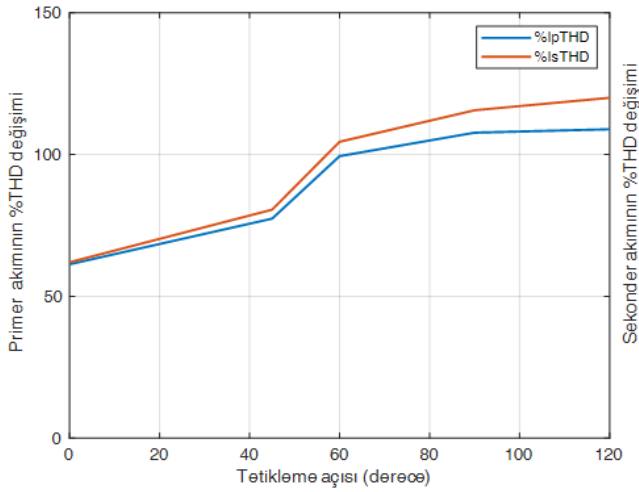
Şekil 15'de, sekonder terminallerdeki voltaj çökmesi, doğrultucunun filtre kapasitörünün şarj edildiği zamana karşılık gelir ve transformatörün kaçak indüktansından kaynaklanır. Bu durum, kaynaktan direkt beslendiği için primer gerilim dalga şeklinde (Şekil 14) görülmez.



Şekil 16. Sekonder ve primer akımının harmonik analizi (RC yükü ve tetikleme açısı  $60^{\circ}$  için)

Şekil 16 tetikleme açısının  $60^{\circ}$  ve RC yük durumu için sekonder ve primer akım dalga şekillerinin harmonik spektrumlarını gösterir. Temel frekansın üçüncü, beşinci, yedinci ve dokuzuncu katına karşılık gelen harmoniklerin daha baskın olduğu tek harmonikleri içerdiği Şekil 16'dan açıkça görülmektedir.

RC yük durumu için doğrultucu tetikleme açısının  $0^{\circ}$ - $120^{\circ}$  aralığında değiştirilmesiyle sekonder ve primer akımlarının toplam harmonik bozunum değişim oranı (%THD) elde edilerek Şekil 17'de gösterilmiştir. Burada (Şekil 17) tetikleme açısı arttıkça %THD değerinin artış oranının RL yük durumuna göre (Şekil 13) daha fazla olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 17. Sekonder ve primer akımının %THD değişimi (RC yükü ve tetikleme açısı 0°-120° aralığı için)

Şekil 12 ve 13'de gösterilen harmonik spektrumlar ve THD değişimi, Şekil 16 ve 17'dekilerden çok daha iyidir. Çünkü endüktansın yük akımı üzerindeki filtre etkisi kapasitörden daha etkilidir.

## Sonuç

Histerezis, doyum ve ani akım etkileri uyarma akımı dalga biçimini bozar ve geçici durumlar sırasında transformatörün davranışı üzerinde önemli bir rol oynarlar. Bu etkileri içeren tek fazlı transformatör modeli ters Jiles-Atherton yöntemi kullanılarak oluşturuldu. Önerilen model kolay uygulanabilir ve hesaplamalarda kolaylık sağlar.

Aşırı ani akımlar transformatörü koruyan diferansiyel rölenin yanlışlıkla açılmasına ya da arızaya neden olabilir. Yüksek ani akımlar gerilim düşüşlerine ve mekanik strese neden olabilir ve dolayısıyla güç kalitesinin ve transformatör ömrünün kısalmasına yol açabilir. Enerjilendirme açısının ani akım üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak önerilen model üzerinden ortaya konmuştur.

Doğrusal olmayan yük koşullarının transformatör üzerindeki etkileri tek fazlı kontrollü doğrultucunun farklı tetikleme açıları ve farklı yük durumları için analiz edilmiştir. Farklı yük durumları için transformatörün giriş çıkış büyüklüklerine ait harmonik analiz ve toplam harmonik bozunum değişim oranları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. RL yük durumu için elde edilen harmonik spektrumlar ve THD değişimi, RC yük durumuna göre daha iyi çıkmıştır. Benzer şekilde RC yük durumunda tetikleme açısı arttıkça %THD değerinin artış oranının RL yük durumuna göre çok daha yüksek olduğu açıkça ortaya konmuştur.

## Kaynaklar

- [1] Moses, Paul S., and Mohammad AS Masoum. Experimental and simulation analysis of ferroresonance in single-phase transformers considering magnetic hysteresis effects. In: *IEEE PES General Meeting*. IEEE, 2010. p. 1-6.
- [2] Thanawarithorn, Rujirawat, and Pichai Aree. An extension of Takács model for hysteresis loop representation of single-phase transformer. In: *2014*

*11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. IEEE, 2014. p. 1-5.

- [3] Santos, Filipe Freire, et al. Non-linearity of Hysteresis and Eddy Current Losses of Single-phase Distribution Transformers. In: *2021 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. IEEE, 2021. p. 626-630.
- [4] Mayergoyz, Isaac. Mathematical models of hysteresis. *IEEE Transactions on magnetics*, 1986, 22.5: 603-608.
- [5] Abba, Gado ESR Dr, and GAD Jeng Hassan ABO. Effect of types of loads in rating of transformers supplying harmonic-rich loads. In: *CIREED 2019, 21st International Conference on Electricity Distribution*. 2011. p. 150-151.
- [6] Subjak, Joseph S., and John S. Mcquilkin. Harmonics-causes, effects, measurements, and analysis: an update. *IEEE transactions on industry applications*, 1990, 26.6: 1034-1042.
- [7] Fakhrian, Ali, et al. De-rating of transformers under non-sinusoidal loads: modeling and analysis. In: *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE, 2019. p. 1-5.
- [8] Khristiana, Harrij Mukti, et al. Analysis of Loss on Single-Phase Dry Transformers With Non-Linear Load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 5.8: 113.
- [9] Rinas, I. Wayan, I. Made Suartika, and Anak Agung Maharta Pemayun. Analysis of the increase of transformer power losses due to the operation of unbalanced nonlinear loads. *J. Electr. Electron. Inform.*, 2018, 2: 38.
- [10] Arrillaga, Jos, and Neville R. Watson. *Power system harmonics*. John Wiley & Sons, 2004.
- [11] Pottker, Fabiana, and Ivo Barbi. Power factor correction of non-linear loads employing a single phase active power filter: control strategy, design methodology and experimentation. In: *PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Formerly Power Conditioning Specialists Conference 1970-71. Power Processing and Electronic Specialists Conference 1972*. IEEE, 1997. p. 412-417.
- [12] Roubal, Z., and V. Smejkal. Determination of parameters in the Jiles-Atherton model for measured hysteresis loops. In: *The 9th International Conference MEASUREMENT 2013 was organized by the Institute*



- of Measurement Science, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia. 2013. p. 207.
- [13] Pop, N., and O. Caltun. Jiles-Atherton magnetic hysteresis parameters identification. *Acta physica polonica A*, 2011, 120.3: 491-496.
- [14] Bai, Baodong, Jiayin Wang, and Keqing Zhu. Identification of the Jiles-Atherton model parameters using simulated annealing method. In: *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*. IEEE, 2011. p. 1-4.
- [15] Unniachanparambil, Greeshma Mohan, and Shrikrishna V. Kulkarni. Comparison of Dynamic Loss Inclusion under Asymmetrical Minor Loops using Lavers Formula and Inverse Jiles-Atherton Model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2023.
- [16] Valadkhan, Sina, Kirsten Morris, and Amir Khajepour. Review and comparison of hysteresis models for magnetostrictive materials. *Journal of intelligent material systems and structures*, 2009, 20.2: 131-142.
- [17] Benabou, Abdelkader, Stéphane Clénet, and Francis Piriou. Comparison of the Preisach and Jiles-Atherton models to take hysteresis phenomenon into account in finite element analysis. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 2004, 23.3: 825-834.
- [18] Toman, Matej, et al. Nonlinear model of a distribution transformer appropriate for evaluating the effects of unbalanced loads. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320.20: e1011-e1015.
- [19] Altun, Hüseyin, Sedat Sünter, and Ömür Aydoğmuş. Modeling and analysis of a single-phase core-type transformer under inrush current and nonlinear load conditions. *Electrical Engineering*, 2021, 1-12.
- [20] Sadowski, N., et al. An inverse Jiles-Atherton model to take into account hysteresis in time-stepping finite-element calculations. *IEEE transactions on magnetics*, 2002, 38.2: 797-800.
- [21] Nadhem Abbas Al-Mousaoy, Zainab. Effect of Non-Linear Load Harmonics on Single phase Transformer Losses and Design Active Filter. *Engineering and Technology Journal*, 2011, 29.11: 2143-2155.
- [22] Harmonics, Power System. Power system harmonics: an overview. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, 8: 2455-2460.
- [23] Baran, Mesut E., and Nikhil R. Mahajan. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges. *IEEE transactions on industry applications*, 2003, 39.6: 1596-1601.
- [24] Shahl, Suad Ibrahim. Simulation and Analysis Effects of Nonlinear Loads in the Distribution Systems. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 2019, 10: 888-892.
- [25] Das, J. C. *Power system harmonics and passive filter designs*. John Wiley & Sons, 2015.