
Araştırma Makalesi / Research Article

Tarama Frekans Cevap Metodu Kullanılarak Güç Transformatorlerindeki Çekirdek ve Sargı Yapısının Mekanik Bütünlüğünün Tespiti

Nihat PAMUK*

TEİAŞ, 5. İletim Tesis ve İşletme Grup Müdürlüğü, Sakarya, Türkiye

Özet

Elektrik şebekesinin en önemli elemanlarından biri olan güç transformatorünün mekanik bütünlüğünü değerlendirmek için çeşitli teşhis yöntemleri vardır. Tarama Frekans Cevap Metodu (TFCM) ile transformatorler yerinde analiz edilmekte ve arızalı durumlar tespit edilerek gerekirse yerinde yapılan müdahaleler ile giderilebilmektedir. TFCM transformator empedansını etkileyen mekanik arızaların ve sargılarda oluşan kaymaların tespiti için etkili teşhis yöntemlerinden birisidir. Diğer arıza teşhis yöntemleri ile karşılaştırılan TFCM'nin üstün noktaları, önceki referans ölçümlerine bağımlılığının daha az olması ve mekanik arızaların çeşitliliğine yönelik kanıtlanmış duyarlılığının bulunmasıdır. Örnek çalışmalarda TFCM'nin ayrıntıları, üretim ve ulaşım aşamalarında gerçekleştirilen diğer testler sunulmuştur. Detaylı analiz ve bulgular ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç transformatorü, Tarama frekans cevap metodu, Arıza tespiti

Using Sweep Frequency Response Method to Identify Mechanical Integrity of Core and Winding Structure in Power Transformers

Abstract

There are various diagnostic methods to assess the mechanical integrity of power transformers which are one of the most substantial elements of the power network. Sweep Frequency Response Method (SFRM) enables us to analyze transformers in situation, detect faulty cases and if necessary, faults can be repaired. SFRM is an effective diagnostic tool for detection of winding movement and other mechanical faults which affects the power transformer impedance. Key advantages of SFRM compared to other diagnostics are its proven sensitivity towards variety of mechanical faults and a lesser dependency on previous reference measurements. In case studies, the details of SFRM and other tests performed during manufacturing and transportation stages are presented. Elaborative analyses and findings are discussed in detail.

Keywords: Power transformer, Sweep frequency response method, Fault detection

1. Giriş

Elektrik enerjisi kalitesinin en önemli unsuru sürekliliğidir. Değişik gerilim seviyelerinde meydana gelecek arızalardan etkilenen müşteri sayıları birbirlerinden farklılık göstermektedir. Bu durum özellikle yüksek gerilimli elektrik teçhizatlarının rutin testlerini arıza olmadan önce kestirip, teçhizatların planlı olarak servis harici edilerek, gerekli bakım ve onarımlarının yapılmasına olanak sağlar. Güç transformatorleri kapalı bir metal gövde görünümünde olmasına rağmen, elektrik elektronik endüstrisinin birçok disiplini içeren bütünlük bir elektromekanik elemandır. Güç transformatorleri elektrik enerjisinin gerilim değerini değiştirerek tüketicilerin kullanımına uygun hale getiren cihazlardır [1].

Bu çalışmada, transformatordeki küçük arızaların büyümeden önce tespit edilmesi amacıyla TFCM kullanılmaktadır. TFCM yeni bir test tekniği olmasına rağmen güç transformatorlerinde durum

*Sorumlu Yazar: *nihatpamuk@gmail.com*

tespiti yapmak amacıyla hızla kullanılmaktadır. TFCM'nin en büyük avantajı diğer testlerle anlaşılması çok güç olan, sargılarda kısa devre arızaları sonucu olabilecek mekanik bozulmayı açıkça gösterebilmesidir [2]. Frekans transformatörde R-L-C devresindeki davranış şekli ile transformatör kısımlarının yapısal durumunun kontrolüne olanak sağlar [3]. TFCM transformatörlerin çalışma performanslarının izlenmesi, transformatör arızalarının etkin ve kesin bir şekilde tespit edilebilmesi, transformatörler için önleyici bakım çalışmalarının yapılabilmesi ve arızalanan transformatörlerin tekrar servise dönmeden önceki durumunun izlenmesi bakımından önemli bir testtir [4].

2. Tarama Frekans Cevap Metodunun (TFCM) Temelleri

Tarama Frekans Cevap Metodunun gelişimi ilk defa 1960'lı yıllarda Polonya'da transformatör sargı arızasını tespit etmek amacıyla uygulanmıştır. TFCM ilk yıllarda darbe ölçüm tekniği kullanılarak yapılmıştır. TFCM yazılım programı, sonuçların zaman bölgesinden frekans bölgesine çevrilmesinde kullanılmıştır. 1970'li yıllarda Ontario Hydro at Dick ve Erven tarafından sisteme sinüs formunda bir dalga verilip frekans tepkisinin doğrudan ölçülmesi gerçekleştirilmiştir [5]. 1980'li yıllarda "National Grid Company" şirketi, ilk olarak darbe yönteminin kullanılmasını sağlamış, elde edilen verilerin toplanmasının sonucunda TFCM'nin saha ölçümleri için daha uygun ve daha iyi frekans cevapları aldığını ortaya çıkarmıştır. 1990'lı yıllarda, üretim sahasında test yapılmasına izin veren ilk ticari test sistemi ortaya çıkmıştır. Mevcut tarama ve darbe yöntemlerinden biri ile çalışan bu sistemin dünya çapında birçok kullanıcısı mevcuttur. Güç transformatörleri üzerinde uygulanan elektriksel testlerin geleneksel yöntemlerinden olan sargı kapasitesi, ikaz akımı, kaçak reaktans ölçümleri sargı hareketlerinin tespitinde tek başına yeterli değildir [6]. Söz konusu yöntemlerin her birinin birbirinden farklı sakıncaları mevcuttur. Referans alınabilecek kaynak bilgi mevcut ise veya ölçümler her faz için ayrı olacak şekilde yapılırsa, sargı kapasite ölçümü, sargıda meydana gelmiş yer değiştirmeleri başarılı bir şekilde ortaya çıkarmaktadır. Fakat eski transformatörlerde bu kaynak bilgi her zaman mevcut değildir ve sahada her faz için ölçüm yapmak mümkün değildir. Transformatörlerde sargı yer değiştirmeleri sonucu ortaya çıkan sarım-sarım arızasını tespit etmede ikaz akımı metodu bilinen en iyi yöntemdir [7].

Eğer transformatörde sarım-sarım arızası yoksa sarım kaymasının nelere sebep olduğu tam olarak tespit edilememektedir. Elektrik üretim kapasitesinin artmasıyla, enterkonnekte şebekelerde büyük kısa devre akımları oluşmaktadır. Kısa devre akımları transformatör sargılarında büyük hasarlara sebep olmaktadır. Kısa devre akımları, transformatörlerin sargı yapısında çökme ve deformasyona, sargıların iç içe geçmesine, bağlantıların gevşemesine ve fiziki dış etkilerden dolayı sargılarda kaymaya neden olur [8]. Yıldırım düşmesi, anahtarlama olayları, enterkonnekte sistemde meydana gelen aşırı gerilimler güç transformatörünün rezonans frekansına eşit olduğunda sargılar arasında ark oluşmasına neden olur [9]. Şekil 1'de güç transformatörü sargısındaki bozulma gösterilmiştir.

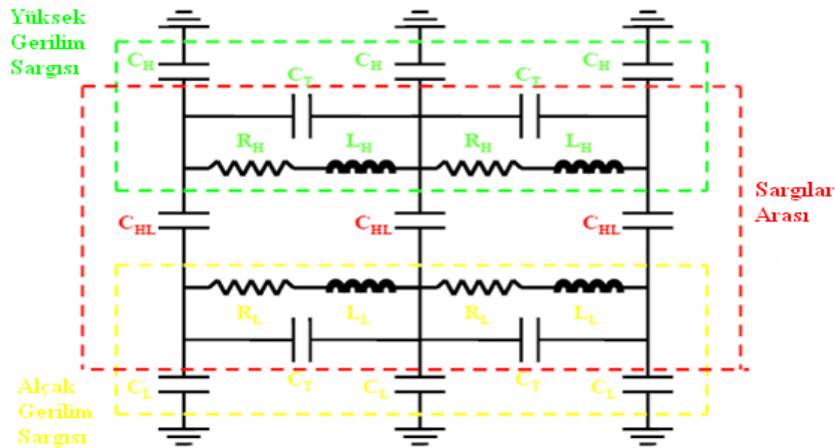
TFCM ile güç transformatörü üzerinde tespit edilen mekanik ve elektriksel arızalar;

- Sargı hareketleri ve bozulmaları,
- Sargılardaki çökme,
- Bağlantı elemanlarındaki kopma veya gevşeklik,
- Çekirdekdeki yer değişimleri,
- Sargılardaki kısa devre veya açık devrenin tespiti,
- Transformatör gövdesinin topraklama durumunun tespitidir [10].



Şekil 1. Güç transformatörü sargısındaki bozulma

Güç transformatörleri elektriksel olarak karmaşık R-L-C devreleri ile ifade edilir. Söz konusu R-L-C devrelerindeki omik değerler bakır sargıların direnci ile endüktif değerler nüve endüktansı ile kapasitif değerler ise nüve ile kollar arası, sargılar ile nüve arası, nüve ile tank arası ve tank ile sargılar arasındaki kapasite değerleridir [11]. Şekil 2’de güç transformatörünün sadeleştirilmiş eşdeğer R-L-C devresi gösterilmiştir. Burada C_H , yüksek gerilim sargısı ile tank arasındaki kapasite değerlerini, C_T , transformatör sargılarının birbirleri arasındaki kapasite değerlerini, R_H , yüksek gerilim transformatör sargılarının birbirleri arasındaki direnç değerlerini, L_H ; yüksek gerilim transformatör sargılarının birbirleri arasındaki indüktans değerlerini, C_L , alçak gerilim sargısı ile çekirdek arasındaki kapasite değerlerini, R_L , alçak gerilim transformatör sargılarının birbirleri arasındaki direnç değerlerini, L_L , alçak gerilim transformatör sargılarının birbirleri arasındaki indüktans değerlerini, C_{HL} , transformatördeki yüksek gerilim ve alçak gerilim sargıları arasındaki kapasite değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 2. Güç transformatörünün sadeleştirilmiş eşdeğer R-L-C devresi

Güç transformatöründe oluşacak olan fiziksel bir hasar, transformatörün R-L-C eşdeğer devresinin değişmesine neden olur. TFCM kullanarak transformatörün R-L-C eşdeğer devresindeki değişiklikleri kestirmek mümkündür. TFCM, transformatör sargılarına değişik frekans değerlerinde

düşük bir gerilim sinyali uygulayarak, giriş ve çıkış sinyallerini ölçme yöntemine dayanır [12-13]. Giriş ve çıkış sinyalleri oranlanarak gerekli tepki cevabı elde edilir. Hem genlik hem de fazı içeren bu oran güç transformatörünün transfer fonksiyonu olarak adlandırılır. R-L-C devreleri, farklı frekans değerlerinde farklı empedanslar üretir. Bu sebeple belirlenen frekanslardaki transfer fonksiyonu, transformatörün R-L-C devresinin etkin empedansı olarak tanımlanır. Transfer fonksiyonu frekans domeninde Fourier değişkeni $H(j\omega)$ olarak gösterilir.

Giriş ve çıkış transfer fonksiyonu için Fourier bağıntısı Eşitlik 1’de verilmiştir.

$$H(j\omega) = V_{\text{çıkış}}(j\omega) / V_{\text{giriş}}(j\omega) \quad (1)$$

Transfer fonksiyonu $H(j\omega)$ ölçüldüğünde, gerçek transformatör empedansı $Z(j\omega)$ ’yı izole edemez. $Z(j\omega)$ ölçüm cihazları arasında yer alan R-L-C devresine aittir ve test cihazı tarafından sağlanan herhangi bir empedansı içermez. Buna göre bode diyagramı genlik ve fazı Eşitlik 2’ye göre çizer. Eşitlik 2’de sadeleştirilerek Eşitlik 3 elde edilir [14].

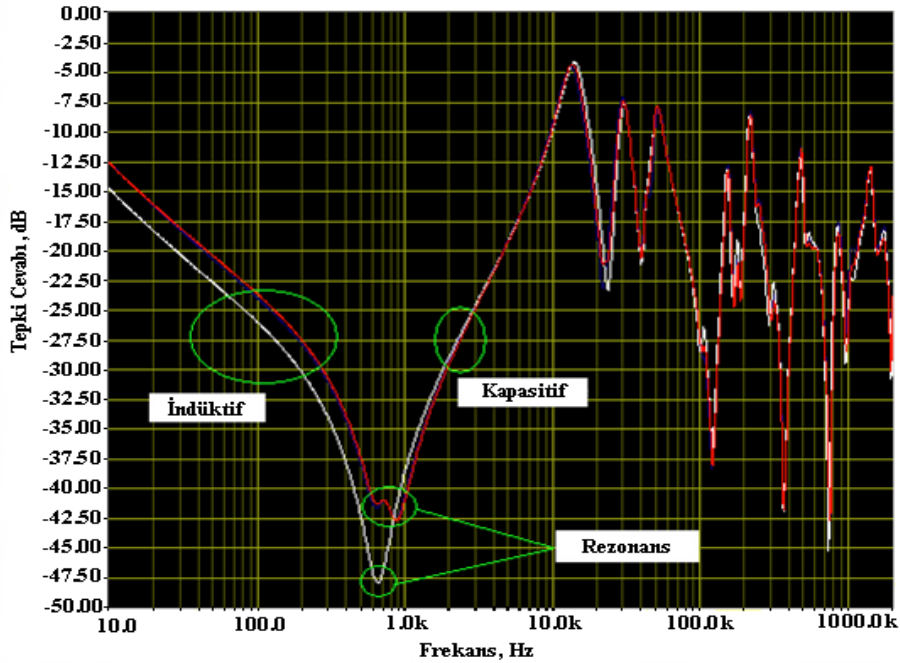
$$A \text{ (dB)} = 20 \log_{10} (H(j\omega)) \quad (2)$$

$$A(\Theta) = \tan^{-1} (H(j\omega)) \quad (3)$$

Logaritmik çizim, değişmeyen çözümün elde edilmesini sağlar. Ölçüm sonucu bulunan tepki cevapları aşağıda verilen koşullardan herhangi biri ile analiz edilir [15].

- Başlangıç desibel değerleri,
- Yıldız –Üçgen bağlantı yapısı ve şekli,
- Frekans tepki cevabının fabrika üretim değerleri ile kıyaslanması,
- Frekans tepki cevabının aynı transformatörün diğer bir fazı ile kıyaslanması,
- Frekans tepki cevabının benzer transformatör tepki cevapları ile kıyaslanması,
- Yeni rezonans frekansları oluşturarak, mevcut rezonans frekanslarını yok etmek.

Şekil 3’de 154/34.5 kV, 50(62.5) MVA bir güç transformatörünün tarama frekans cevabı gösterilmiştir.



Şekil 3. 154/34.5 kV, 50(62.5) MVA güç transformatörünün tarama frekans cevabı

Şekil 3 incelendiğinde, düşük frekans aralıklarında transformatörün kapasite değerleri ihmal edilmektedir. Transformatörün frekans cevabı zayıf endüktiftir. Bu frekans değerlerinde manyetik devrenin endüktans değeri baskındır. Transformatörün orta fazı ile diğer iki fazı arasında frekans cevabı olarak belirgin farklar görülmektedir. Bu durumun sebebi nüvedeki akı yoludur.

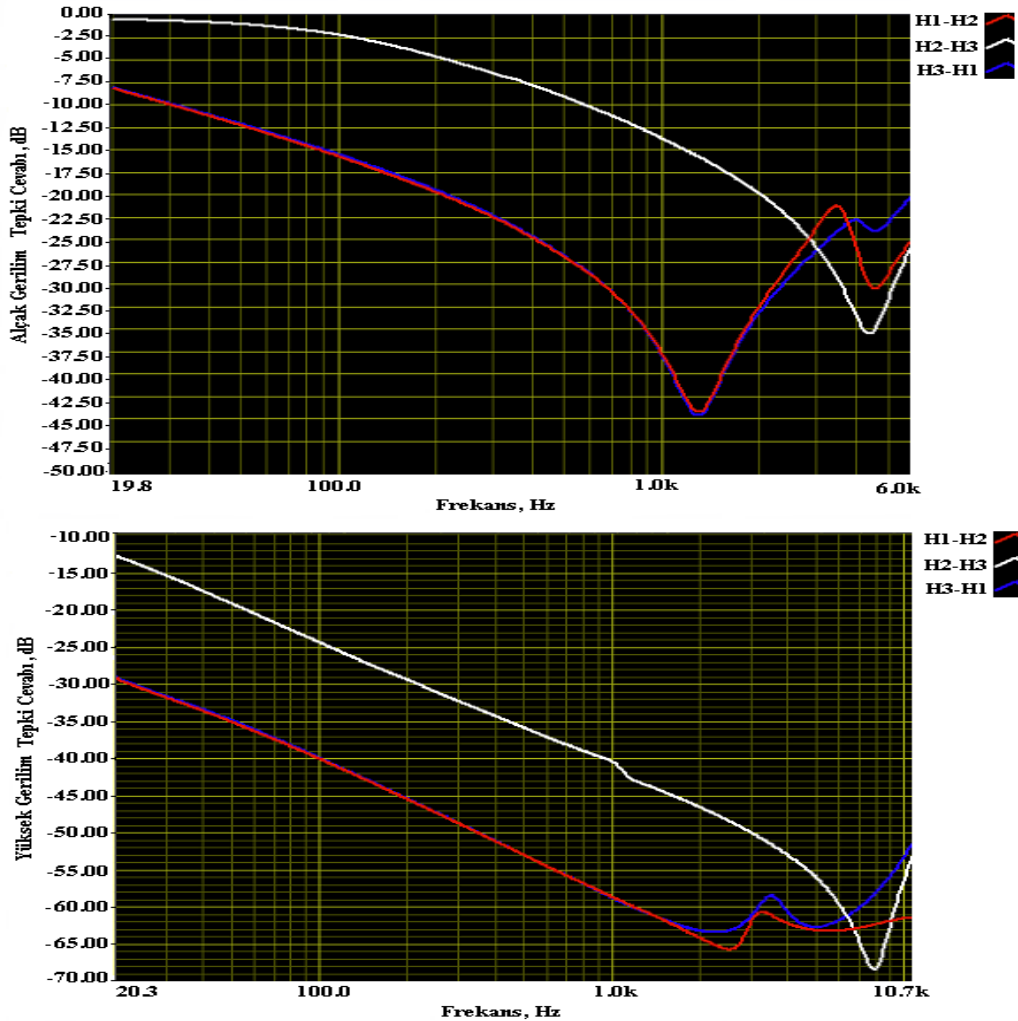
Transformatörün orta faz eşdeğer relüktans değeri farklı iki akı yoluna sahiptir. Transformatörün dış faz eşdeğer relüktans değeri ise farklı bir relüktans değerinin farklı iki akı yoluna sahiptir. Bu nedenle transformatör dış fazları farklı iki adet rezonans noktasına sahiptir. Orta faz ise tek bir rezonans noktasına sahiptir. Bu durum aynı zamandaki farklı desibel değerlerinin açıklanması olarak yorumlanabilir. Yüksek frekans değerlerindeki frekans cevabı, çok sayıda rezonans noktası olması nedeniyle karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu frekans aralığında sargı endüktansının etkisi azdır. Endüktans etkisi ekranlanmış manyetik devre ile baskın bir hal alır. Sargının frekans cevabı, düşük oranda manyetik devreye bağlı olması nedeniyle daha hassastır. Daha yüksek frekans aralıklarında endüktans ihmal edilmekte ve cevap kapasitif olmaktadır.

3. Farklı Arıza Örneklerinin İncelenmesi

Bu bölümde enterkonnekte güç şebekesindeki transformatörlerde yaşanan problemler incelenerek çözüm önerileri getirilmiştir.

3.1. Sarım Kısa Devre Arızası

Şekil 4'de arızalı bir güç transformatörünün alçak ve yüksek gerilim sargılarının tarama frekans tepki cevapları gösterilmiştir.

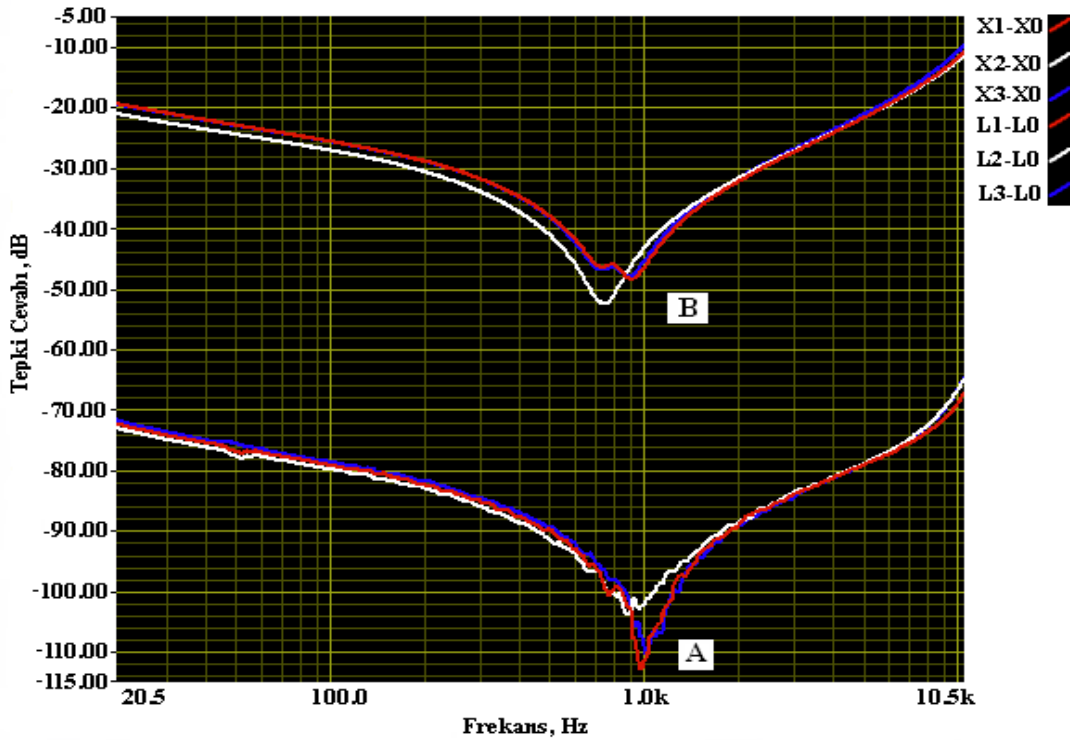


Şekil 4. Arızalı bir güç transformatörünün alçak ve yüksek gerilim tarama frekans tepki cevapları

Sarım kısa devre arızası tarama frekans tepki cevabı, güç transformatörünün yüksek ve alçak gerilim sargılarından alınmıştır. Beyaz renk ile gösterilen fazın tarama frekans tepki cevabı, diğer iki fazın tarama frekans tepki cevabından farklıdır. Söz konusu fark, sarım kısa devre arızasının sonucudur. Beyaz renk ile gösterilen tarama frekans tepki cevabından, güç transformatörünün sarım ve nüve bacaklarından birinde kısa devre olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu kısa devre, relüktanstaki dengesizliğin oluşmasına sebep olmaktadır. Güç trafosunun relüktansındaki dengesizlik, alçak gerilim tarama frekans tepki cevabında görülen karakteristik değişimi üretmektedir. Güç transformatörü için yapılan ikaz akımı ve oran testi sonuçları da bu durumu desteklemektedir.

3.2. Üç Faz Toprak Arızası

Şekil 5’de üç faz toprak arızasına sahip güç transformatörünün tarama frekans tepki cevabı gösterilmiştir.



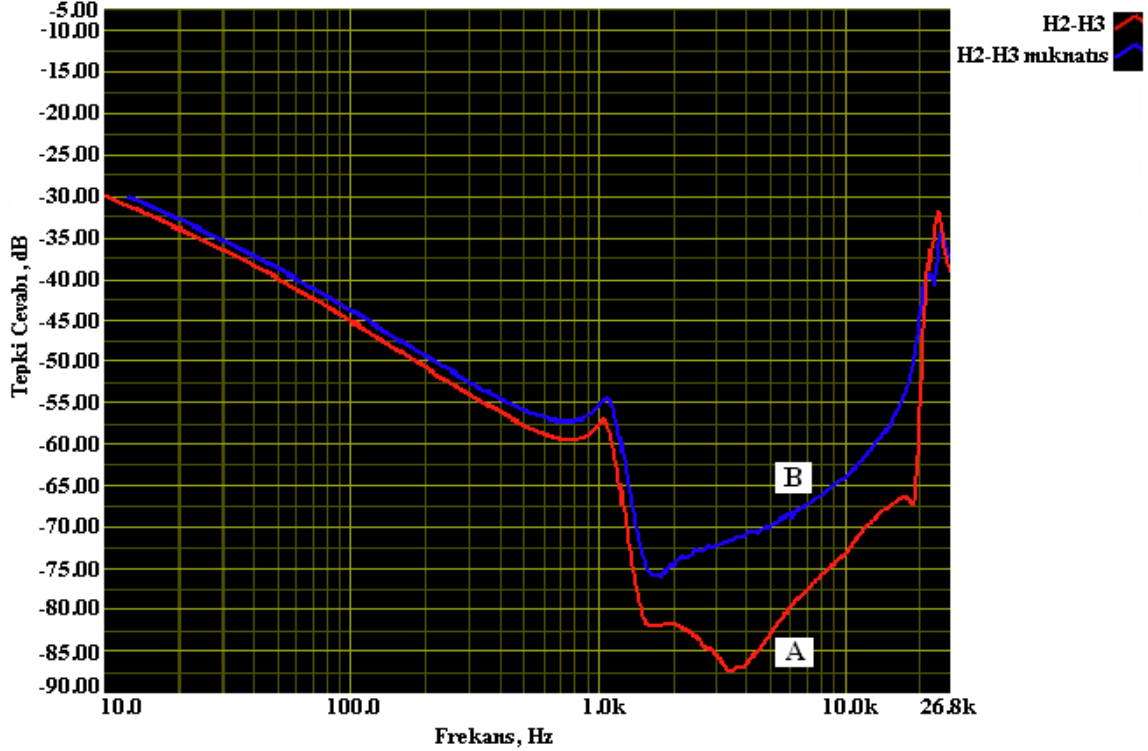
Şekil 5. Üç faz toprak arızalı bir güç transformatörünün tarama frekans tepki cevabı

Şekil 5’deki A grafiği üç faz toprak arızalı bir güç transformatörünün tarama frekans tepki cevabını, B grafiği ise güç transformatörünün arızası onarıldıktan sonraki tarama frekans tepki cevabını göstermektedir. Her iki cevabın kıyaslanması sonucunda, başlangıç desibel değerlerinde önemli farklılıklar görülür. Desibel değerlerindeki bu farklılıklar veya üç faz arıza grafiğindeki dikey kayma, güç transformatörünün direnç değerlerinin değişimine neden olmaktadır.

3.3. Nüve Mıknatıslanma Arızası

Şekil 6’da güç transformatörünün nüve mıknatıslanma arızasındaki tarama frekans tepki cevabı gösterilmiştir. Şekil 6’daki A grafiği güç transformatörünün fabrika üretim sonrasındaki tarama frekans tepki cevabını, B grafiği ise mıknatıslanmış nüvenin tarama frekans tepki cevabını vermektedir. Söz konusu güç transformatörü yük altında kademe değiştirici arızası sonucunda servis harici edilmiştir. Güç transformatörünün kademe arızası onarılarak tekrar güç transformatörüne monte

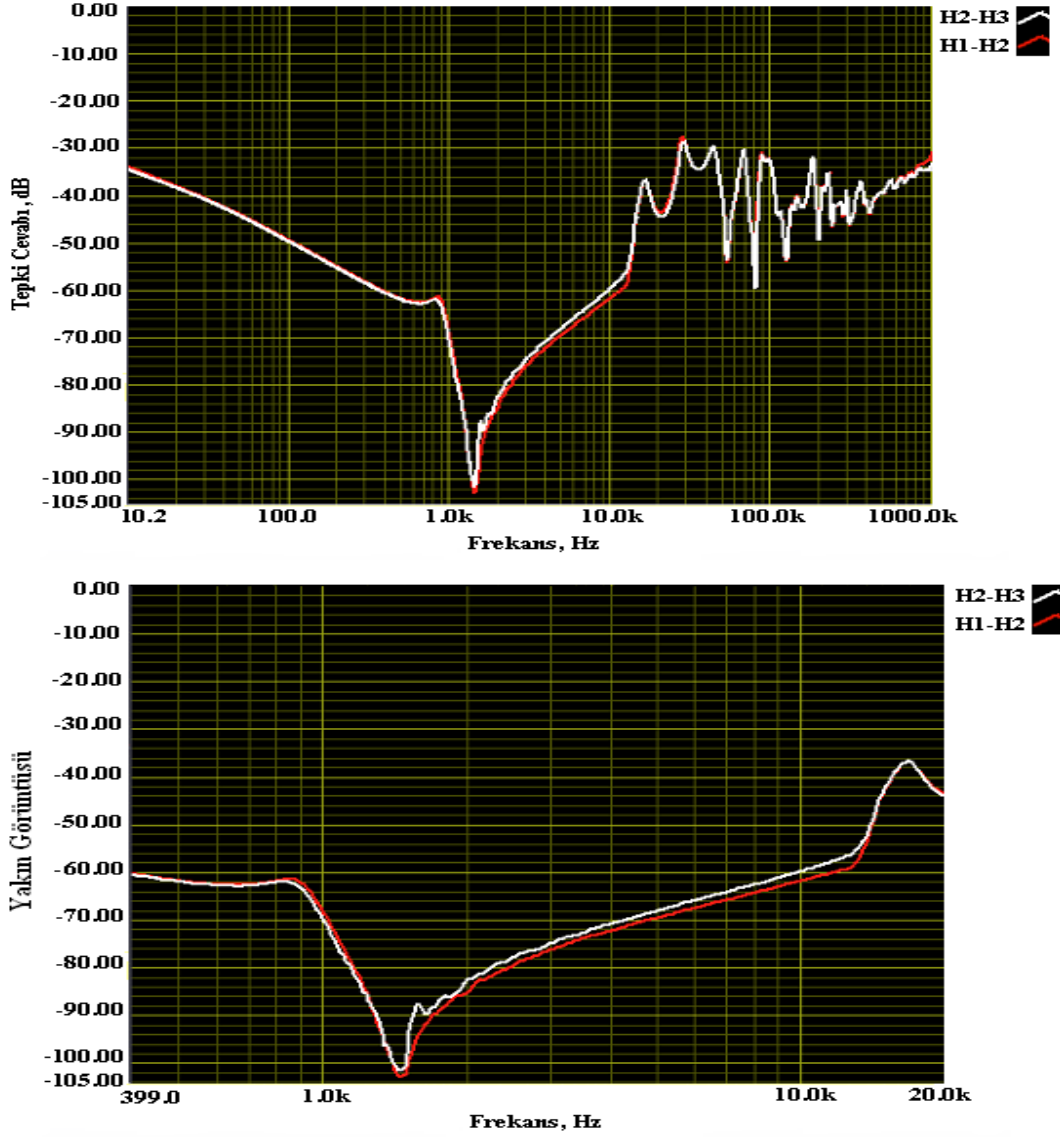
edilmiştir. Güç transformatörü servise alınmadan önce kontak geçiş dirençleri DC direnç testi ile ölçülmüştür. Yapılan DC direnç testi, güç transformatörü nüvesinin mıknatıslanmasına neden olmuştur. Şekil 6'da B grafiği, mevcut rezonans frekans kaymalarının yok edildiğini göstermektedir. Güç transformatörü için yapılan ikaz akımı testi sonuçları da bu durumu desteklemektedir. İkaz akımı testi ile akım değerinin önemli bir şekilde arttığı görülmektedir.



Şekil 6. Güç transformatörünün nüve mıknatıslanma arızasındaki tarama frekans tepki cevabı

3.4. İlave Topraklanmış Nüve Arızası

Şekil 7'de güç transformatörüne ait ilave topraklanmış nüve arızasının tarama frekans tepki cevabı gösterilmiştir. Şekil 7'de A grafiği, güç transformatörünün orta fazına ait ilave topraklanmış nüve arızasını, B grafiği ise A grafiğindeki tarama frekans tepki cevabının yakın görüntüsünü vermektedir. Şekil 7'de beyaz renkli grafik, güç transformatörünün ilave topraklanmış orta fazının tarama frekans tepki cevabını, kırmızı renkli grafik ise ilave topraklanmamış diğer fazların tarama frekans tepki cevaplarını göstermektedir. Şekil 7 incelendiğinde her üç fazda da farklılık gözlenmesine rağmen orta fazdaki farklılık çok açıktır. Şekil 7'de yakın görüntü grafiği yaklaşık 1.5 kHz ile 14 kHz frekans aralığındaki kapasite tarama tepki cevabı farklılıklarını göstermektedir. Ayrıca, beyaz renk ile kodlanmış tarama frekans tepki cevabı, kırmızı renk ile kodlanmış tarama frekans tepki cevabında olmayan 1.6 kHz frekans değerinde bir rezonansa sahiptir. Güç transformatörünün ilave topraklanmış nüvesi sonucunda söz konusu yeni rezonans frekansı oluşmuştur.



Şekil 7. Transformatördeki nüve toprak arızasının tarama frekans tepki cevabı ve yakın görüntüsü

4. Sonuçlar

Elektrik enerji sisteminin temel elemanı olan güç transformatörlerinin fabrika ve saha testlerinin düzenli olarak yapılması, test sonuçlarının değerlendirilmesi, olası arızaların önceden kestirilip, istenmeyen enerji kesintilerinin önlenmesi, enerji kalitesinin devamı açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada, güç transformatörlerinde kullanılan TFCM ölçüm metodundan bahsedilmekte, söz konusu metottaki tarama frekans tepki cevabı dört bölgeye ayrılmaktadır. Tarama frekans tepki cevabındaki bu bölgeler:

- Çekirdek deformasyonunu, açık devre ve artık manyetizmayı 2 kHz altındaki tarama frekanslarında,
- Sargılardaki deformasyonu ve bağlantı kelepçelerinin hareketliliğini 2 kHz – 20 kHz aralığındaki tarama frekanslarında,
- Ana veya kademe sargılarındaki arızayı 20 kHz – 400 kHz aralığındaki tarama frekanslarında,
- Ana sargıların hareket etmesi sonucunda oluşacak olan arızayı ise 400 kHz – 2 MHz aralığındaki tarama frekanslarında işaret etmektedir.

Transformatör durumlarının kritik olduğu enerji sistemlerinde TFCM cihazları kullanılarak transformatör arızalarını önleyici bakım çalışmaları yapılabilir. Bu sayede enerjinin verimli bir şekilde kullanılması sağlanmakta, enerji kaynakları en uygun şekilde kullanılarak tasarruf sağlanmaktadır.

Kaynaklar

1. İlkahraman, M. 2008. Güç Transformatör Arızalarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 57s, Ankara.
2. Jinsim, H., Digby, S.H. 2004. *Power Transformers Waukesha Electric Systems*. Electric Power Transformer Engineering, CRC Press, 36-40.
3. Bartley, W.B. 2003. Analysis of Transformer Failures, International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference, pp. 1–5, Stockholm.
4. Allan, D.J. 1999. *Failure and Causes*, The J&P Transformer Book, Iliffe Books, Ninth Edition, Stafford, 660-680.
5. Sweetser, C., Mcgrail, T. 2010. *Sweep Frequency Response Analysis Transformers Applications*. A Technical Paper From Doble Engineering, 12s.
6. Kraetge, A., Krüger, M., Viljoen, H., Dierks, A. 2009. Aspects of the Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers, 6th Southern Africa Regional Conference CIGRE, pp. 1–10.
7. Moser, H.P. 1983. *Transformerboard*, Weidmann Co., USA, 104-108.
8. Nirgude, P.M., Gunasekaran, B., Channakeshava, N., Rajkumar, A.D., Singh, B.P. 2004. Frequency Response Analysis Approach for Condition Monitoring of Transformer, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP'04, Annual Report Conference, pp. 186–189.
9. Ryder, S. 2001. Frequency Response Analysis for Diagnostic Testing of Power Transformers, Electricity Today Magazine, 11(4): 24-31.
10. Tanrıöven, K. 2013. Transformatörlerin Arıza Durumunun Tarama Frekans Cevap Analizi Metodu (SFRA) ile İncelenmesi, 19th International Energy and Environment Fair and Conference, pp. 79 – 83, İstanbul.
11. Aponte, G., Castano, C.E., Gonzalez, C., Garcia, A. 2009. The Use of FRA Technique for Diagnosis of Transformers, International Conference on High Voltage Isolation ALTAE, pp. 42-47, Medellin, Colombia.
12. Bjerkan, E. 2005. High Frequency Modeling of Power Transformers, Norwegian University of Science and Technology, Doctoral Thesis, pp. 83-88, Norway.
13. Shubhangi, P., Kushare, B.E. 2013. SFRA Sensitivity Towards Detection of Transformer Insulation Damage, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering IJETAE Exploring Research and Innovations, 3(4): 774–777.
14. Yadav, K.S. 2012. Analyzing Transformer Winding Movements by Using Real - Rational Polynomial Function Model from FRA Data, IRACST – Engineering Science and Technology: An International (ESTIJ), 2(6): 1017–1023.
15. Gralta Research Group, 2010. Evaluation of the Mechanical Condition of the Transformers by Analyzing the Frequency Response – Use of Physical and Circuital Model. Universidad del Valle, Technical Report, 17-23.

Geliş Tarihi: 29.06.2014

Kabul Tarihi: 01.11.2014