

ELEKTRİKSEL REZONANS FREKANSI BELİRLEMEK AMACIYLA IEC 60076-16 STANDARDI İLE UYUMLU BİR TEST PROSEDÜRÜ GELİŞTİRMEK

Ahmet KÖKSOY Özgür KARACASU M. Hakan HOCAOĞLU
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Bölümü
41400 Gebze, KOCAELİ
{akoksoy, karacasu, hocaoglu}@gyte.edu.tr

Nihat DİLER
Schneider Elektrik
TOSB Org. San. Bol.1. Cad. No:6
41480 Cayırova, KOCAELİ
nihat.diler@schneider-electric.com

ÖZET

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından yayınlanan Güç Transformatörleri ile ilgili IEC 60076 Standart serisine 2011 yılında IEC 60076-16 “Rüzgâr Türbini Uygulamaları için Transformatörler” bölümü eklenmiş ve bu bölümde rüzgâr türbini uygulamalarında kullanılacak transformatörlerin uyması gereken şartlar detaylı bir şekilde tanımlanmıştır. Projelendirme sırasında büyük önemi olan transformatör rezonans frekansının belirlenebilmesi için uygun test sistemi de yine bu kısımda detaylandırılmıştır.

Bu çalışmada detayları standartta verilen elektriksel rezonans frekans test devresi kullanılarak ölçümler yapılmış, testler ve verilerin işlenmesi sırasında karşılaşılan güçlükler vurgulanmıştır. Standartta verilen yöntemle hesaplanan rezonans frekans değeri, Frekans Cevap Analizi (Frequency Responce Analysis, FRA) testi ile elde edilen sonucu doğruladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Türbini, Transformatör Rezonans Frekansı, SFRA, TRV, Toparlanma Gerilimi

1.GİRİŞ

Boşta çalışan bir transformatörün şebekeden çıkarılması sırasında akımın doğal sıfır geçişinden önce ani bir şekilde kesilmesi ile Geçici Aşırı Gerilimler (Transient Recovery Voltage, TRV) oluşabilmektedir [1]. Geniş bir çalışma alanına sahip olan bu konu hakkında literatürde birçok yayın bulunmakta ve bu yayınlarda devre elemanlarının yüksek frekans davranışları açıklanmaktadır [2]. Transformatörün maruz kalabileceği aşırı gerilimler anahtarlama sebebiyle olabileceği gibi bir yıldırım darbesi kaynaklı da ortaya çıkabilmektedir [2]. Transformatör sarımlarında oluşan izolasyon hasarlarının transformatör doğal rezonans frekansı üzerinde değişime sebep olduğu da literatürde rapor edilmiştir [3].

Güç elektroniğindeki gelişmeler rüzgâr türbinlerinde kullanılan mekanik sürücülerin yerine daha fazla esneklik sağlayan yarıiletken temelli değişken hızlı sürücülerin kullanılmasına imkân sağlamıştır [4]. Bu gelişmeler, değişken hızlı sürücü kullanılan rüzgâr türbinlerinde sürücü kaynaklı gerilim dalgalanmaları ve harmonik bozulma sorunlarını beraberinde getirmiştir [5]. Her ne kadar değişken

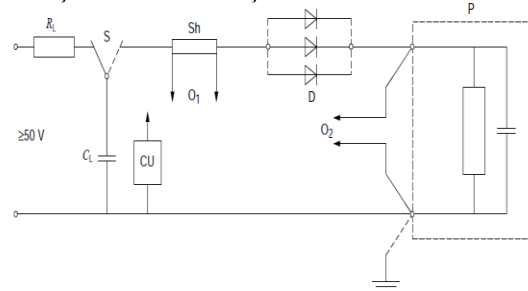
hızlı sürücüler bu tür problemleri önlemek amacıyla elektronik düzeltme devrelerine sahip olsalar da problemin tamamen ortadan kaldırılması güçtür.

Rüzgâr türbinleri, emniyetli çalışma sınırları dışında kalan rüzgâr hızlarında mekanik bütünlüğün korunması amacıyla devreden çıkarılabilir ve rüzgâr hızının güvenli çalışma sınırları içine geri dönmesi ile tekrar devreye alınabilirler. Rüzgâr türbinlerinin boşta devreden çıkarılması veya daha zayıf ihtimalle de olsa tekrar devreye alınması sırasında küçük endüktif akımın erken kesilmesi (Current Chopping) sebebiyle TRV gözlenmesi mümkündür [6], [7].

Güç Transformatörleri ile ilgili standartları IEC 60076 serisinde tanımlayan Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), seriye 2011 yılında eklediği IEC 60076-16 “Rüzgâr Türbini Uygulamaları için Transformatörler” bölümü ile rüzgâr tribünlerinde kullanılan güç transformatörlerinin uyması gereken şartları daha da detaylandırmıştır [8]. Rüzgâr sistemlerinde kullanılan transformatörlerin geçici aşırı gerilimlere maruz kalma ihtimallerinin diğer transformatörlere nazaran daha yüksek olduğu bu standart tarafından da vurgulanmış ve dik cepheli bir darbeye maruz kalma durumunda transformatör sargıları arasında oluşabilecek iç rezonansın belirlenmesi tavsiye edilmiştir.

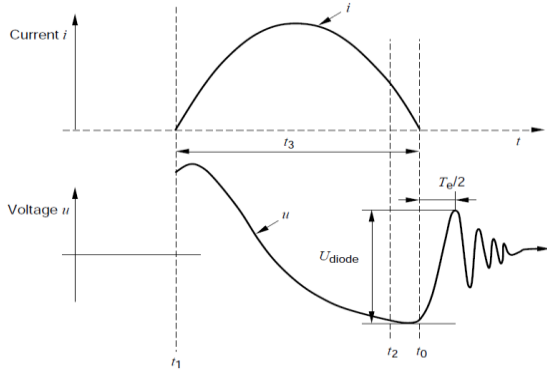
Standartın 7.4.3 bölümünde “Elektriksel Rezonans Frekansı Testi” ile transformatör rezonans frekansının belirlenmesi amacıyla uygun bir test düzeneği önerilmektedir. Önerilen test sistemi temel olarak transformatör üzerine uygun bir yüklü kondansatörün boşaltılması esasına dayanmaktadır. Boşalma esnasında ortaya çıkan akım - gerilim dalga şekilleri özel cihazlarla kaydedilmekte ve kaydedilen bu verilerle transformatörün doğal rezonans frekansı tespit edilebilmektedir.

Standartta önerilen test sistemine ilişkin devre şeması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Rezonans Frekansı Test Devresi [8]

Verilen devrede C_L şarj kapasitesi, R_L şarj devresi eşdeğer direnci, P TRV davranışı ölçülmek istenen devre/cihaz, D paralel bağlı hızlı anahtarlama silikon diyotları temsil etmektedir. O_1 ve O_2 sırasıyla akım ve gerilim dalga formlarının ölçülmesi için bağlantı noktalarını göstermektedir. Akım dalga formu Sh akım şöntü üzerinden okunmaktadır. Test esnasında O_1 ve O_2 noktalarından gözlenmesi beklenen, akım ve gerilim cevabı dalga şekilleri Şekil 2'de görülebilmektedir.



Şekil 2. Beklenen Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri [7]

Şekil 2'de verilen akım ve gerilim dalga formları incelendiğinde t_1 zamanının, enerji depo etmiş olarak bekleyen şarj kapasitesi C_L 'nin S anahtarı yardımı ile rezonans testi yapılmak istenen P elemanı üzerine boşaltılmaya başladığı an olduğu görülmektedir. S anahtarının konum değiştirmesi ile C_L kapasitesi üzerinde depo edilmiş enerji Şekil 2'de t_0 olarak gösterilen ana kadar test yapılmak istenen P elemanına aktarılmaktadır. Bu an itibarıyla devrede bulunan D diyotları tıkama yönünde kutuplanarak akımın ani olarak kesilmesini sağlamaktadır. Akımın ani olarak kesilmesi, P elemanının iç rezonansa girmesine sebep olmaktadır.

Test sırasında elde edilen dalga formlarından akımın ani olarak kesildiği t_0 anı ile gerilimde görülen ilk tepe değeri arasındaki $T_e/2$ süresi ölçülerek, test yapılan P elemanının iç rezonans frekansı tespit edilebilmektedir.

Bu bildiriye standartta [7] öngörülen testi gerçekleştirmek için gerekli olan test devresinin oluşturulması, kullanılması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sırasında karşılaşılan güçlükler vurgulanmış, elde edilen sonuçların son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan Süpürme Temelli Frekans Cevabı Analizi (Sweep Frequency Response Analysis, SFRA) ile uyumluluğu incelenmiştir.

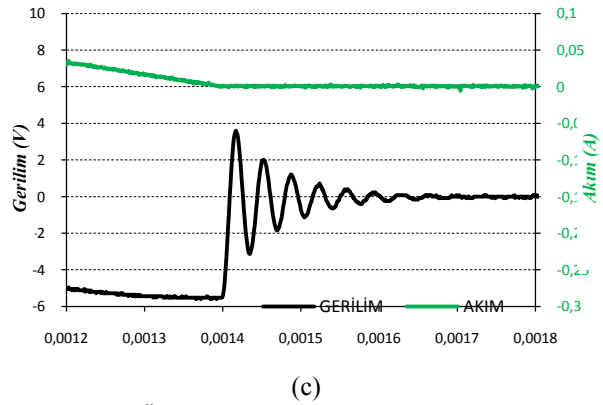
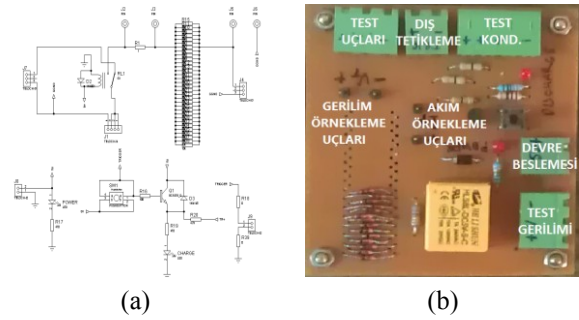
2. GELİŞTİRİLEN TEST PROSEDÜRÜ

2.1. Test Devresinin Tasarlanması

Doğal Rezonans Frekansı tespit edilmek istenen transformatöre standartta önerilen testin uygulanabilmesi için geliştirilen test devresine ait devre şeması ve geliştirilen devrenin fiziksel görüntüsü sırasıyla Şekil 3 a ve b'de verilmiştir. Test devresi Şekil 1'de verilen devre şemasına sadık kalınarak tasarlanmıştır. Geliştirilen test sisteminin

başarılı bir şekilde çalıştığı Şekil 3 c'de verilen akım ve gerilim dalga formu görülmektedir.

Geliştirilen devrede şarj kapasitesinin sürekli tam şarjda tutulması amaçlanmıştır. Test bir anahtar yardımıyla başlatılmakta ve kapasitede depo edilen enerji transformatöre aktarılmaktadır. Aynı anahtar aracılığıyla osiloskop dış tetikleme girişine uygun sinyal üretilmekte ve akım - gerilim dalga formlarının kaydedici osiloskop tarafından off-line analize imkan vermek için kayıt altına alınması sağlanmaktadır.



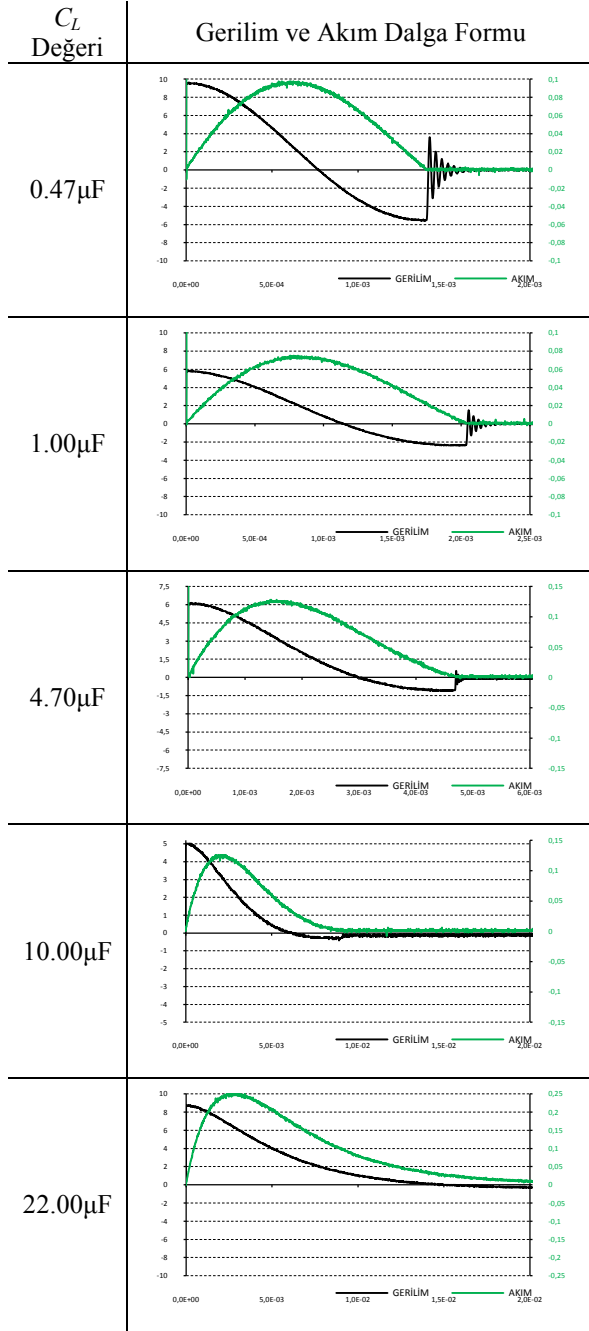
Şekil 3. (a) Önerilen test için geliştirilen devre şeması, (b) hazırlanan devre ve (c) örnek sonuç

2.2. Test Devresi ile Yapılan Ölçümler

Laboratuar ortamında 220/2x12V transformatöre, standartta [7] belirtildiği üzere yüksek gerilim sargısı tarafına farklı kapasite değerleriyle testler gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında alçak gerilim sargısı [7] belirtildiği şekilde açık devre bırakılmıştır. Farklı kapasite değerleriyle gerçekleştirilmiş testler sonucunda elde edilen akım-gerilim dalga formları Şekil 4'te görülmektedir.

Şekil 4'te verilen akım-gerilim dalga formları incelendiğinde, test yapılan transformatöre özgün olarak, kapasite değerinin artması ile elde edilen akım dalga formunun sinüzoidal formdan uzaklaştığı görülmüştür. Akım dalga formunun sinüzoidalden uzaklaşması ile test yapılan transformatörden ölçülen gerilim dalga formunda TRV salınımının gözlemlenmesi de güçleşmektedir.

Kapasite değeri ile TRV gerilimini arasındaki ilişki, IEC'nin 62271-100 Yüksek Gerilim Kesicileri Standardında [8], IEC 60076-16 standardına göre daha detaylı olarak ele alınmış ve gerekli koşullar "rezonans frekansının hesaplanabilmesi için kullanılacak akım ve gerilim dalga formlarının sahip olması gereken özellikler" başlığında tanımlanmıştır.



Şekil 4. Seçilen Kapasite Değerinin Dalga Formları Üzerindeki Etkisi

2006 yılında son revizyonu yapılan IEC 62271-100 standardında rezonans frekansının hesaplanabilmesi için kullanılacak akım dalga formu frekansı ile gerilim dalga formu frekansı arasında bir bağıntıya değinilmiştir. Buna göre ölçülen akımın frekansı f_i ve ölçülen TRV gerilimi frekansı f_v olmak üzere

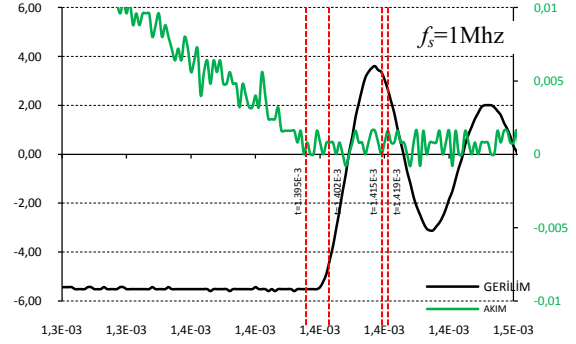
$$\frac{f_v}{f_i} \geq 8 \quad (1)$$

şartının sağlanması durumunda doğal rezonans frekansının tespiti yapılabilmektedir. Uygun dalga formlarının elde edilmesi amacıyla doğru kapasite değerinin tespiti ve tedarik edilmesi test sisteminde karşılaşılan önemli problemlerden biridir.

Önerilen test sisteminde karşılaşılan bir diğer önemli problemde akım dalga formu üzerinden sıfır

geçiş noktasının okunarak, rezonans frekansının tespit edilmesinde kullanılacak, t_0 anının doğru olarak belirlenmesidir. Kapasite üzerinden sürülen akımın genlik değeri alışılmış değerlere nazaran küçük olduğundan, testler sırasında kullanılan ölçüm ve veri kayıt cihazları ile t_0 anının belirlenmesi oldukça zordur.

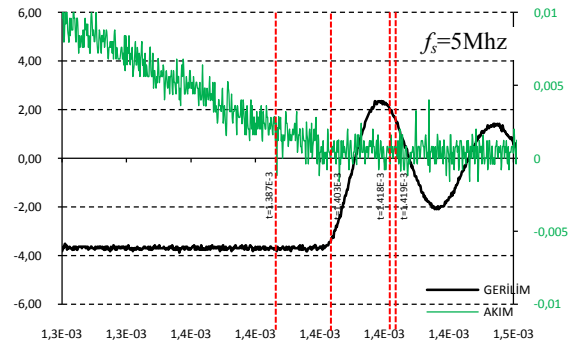
t_0 anının doğru belirlenmesinde karşılaşılan zorluğu Şekil 4'te verilen 0.47 µF değerinde kapasite kullanılarak gerçekleştirilen testten elde edilen veriler üzerinden açıklanabilir. 1 MHz örnekleme frekansında alınan akım ve gerilim verisinin TRV başlangıcı Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Test Transformatörünün 0.47 µF ile test edilmesi ($f_s=1$ Mhz)

Şekil 5'te verilen akım değişimi incelendiğinde dalga formunda t_0 anı olarak belirlemek için birden fazla sıfır değerinin okunabileceği görülmektedir. Bununla birlikte gerilim dalga formunun ilk tepe değeri için grafik üzerinden iki farklı nokta seçilebilmektedir. Bu durumda belirlenen noktalar kullanılarak yapılacak bir hesaplama ile test yapılan transformatöre ait rezonans frekansının 41 kHz ile 77 kHz aralığında olduğu söylenebilir.

Kullanılacak ölçüm ve veri kayıt cihazlarının hassasiyeti de önerilen test sistemi performansını etkileyen önemli bir faktördür. Aynı transformatör için 5 Mhz örnekleme frekansında alınan akım ve gerilim verisinin TRV başlangıcı Şekil 6'da görülmektedir.

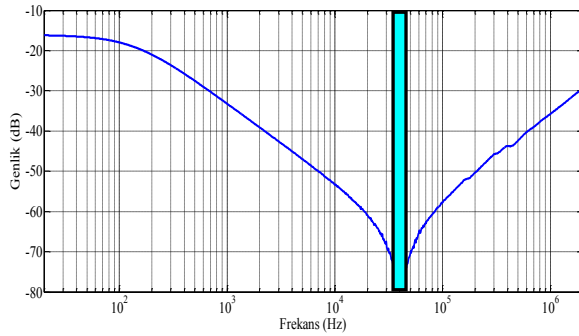


Şekil 6. Test Transformatörünün 0.47 µF ile test edilmesi ($f_s=5$ Mhz)

Şekil 6'da verilen dalga formları üzerinden rezonans frekansı değerinin 31 kHz ile 66 kHz aralığında olacağı hesaplanmaktadır. Aynı transformatöre ait farklı çözünürlükte alınmış akım - gerilim verisinden iki farklı doğal rezonans frekansı tespit edilebilmektedir.

2.3. Frekans Cevabı Analizi

Transformatör rezonans frekansının belirlenmesinde kullanılan bir diğer metod ise Frekans Cevabı Analizi (Frequency Response Analysis, FRA)'dir. Bu metotta test edilen cihazın frekansa bağlı empedans değişimi belirlenmektedir. Darbe tipi (Impulse FRA) ve Süpürme tipi (Sweep FRA) olmak üzere temelde iki tipi bulunmaktadır. Darbe tipi FRA, 1966 yılında Polonya 'da gerçekleştirilen, geniş frekans çeşitliliğine sahip düşük genlikli gerilim darbesinin (Low Voltage Impulse - LVI) transformatör uçlarına uygulanmasıyla rezonans frekansının belirlenmesi esasına dayanmaktadır [9]. SFRA'da ise test edilen cihaza uygulanan sabit frekanslı girişlere karşılık elde edilen sabit frekanslı çıkışlar yardımıyla frekansa bağlı empedans değişimi belirlenmektedir [11]. Piyasada muhtelif marka ve modellerde SFRA testi yapabilecek cihazlar bulunmaktadır. Bu çalışmada sahada yaygın olarak kullanılan Doble marka SFRA cihazı kullanılmıştır [11]. Şekil 7'de rezonans frekansı belirlenmek istenen transformatöre ait 20 Hz~20 MHz aralığında yapılan SFRA ölçüm sonucu verilmiştir.



Şekil 7. Test Transformatörünün SFRA cihazı ile belirlenen frekans cevabı

Şekil 7'de verilen SFRA ölçümü sonucuna göre test yapılan transformatöre ait rezonans frekansı 41 kHz olarak belirlenmiştir. Standartta önerilen test sistemi ile elde edilen rezonans frekans aralığı da aynı şeklin üzerinde bant olarak görülmektedir. SFRA ile yapılan ölçüm ile belirlenen rezonans frekansı, standartta önerilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilen test sonucunda elde edilmiş rezonans frekansı aralığındadır.

3. SONUÇ

Bu çalışma ile transformatör rezonans frekansının belirlenmesinde uygulama kolaylığı ve ölçüm güvenilirliği açısından FRA cihazının kullanımının tercih edilmesinin uygun olacağı görülmüştür.

Yapılan çalışma neticesinde elektriksel rezonans frekansı, IEC 60076-16 standardında [7] önerilen test devresi kullanılarak belirlenmek istendiğinde, yüksek örnekleme süratine sahip ve veri kaydetme özelliği bulunan ölçüm ekipmanları ile konusunda deneyimli personele gereksinim duyulduğu görülmüştür. Bu sebeplerle uygulanabilirlik açısından güçlük arz etmektedir.

Standartta belirtilen dalga formunun elde edilmesinde ihtiyaç duyulan kapasite değerinin tespiti ve temini karşılaşılan başka bir zorluktur.

IEC 60076-16 standardında [7] belirtilen yöntem kullanılarak yapılan ölçüm ile elde edilen rezonans frekansının, FRA cihazı ile elde edilen rezonans frekansının doğruluğunu desteklediği görülmüştür.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda söz konusu test gerçek boyutlu güç transformatörlerine uygulanacaktır. Bahsi geçen testin kuru ve yağlı tip güç transformatörlerine uygulanması düşünüldüğünden, geliştirilen devre büyük güçlü transformatörleri test etmeye olanak sağlayacak şekilde iyileştirilecektir.

Birbirlerine yakın ve birden fazla rezonans frekansının SFRA yöntemi ile tespit edilmesi durumunda alınması gereken tedbirler üzerinde de ayrıca durulacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya verdikleri destek sebebiyle **Schneider Elektrik Sanayi ve Ticaret A.Ş.**'ye teşekkür ederiz.

4. KAYNAKLAR

- [1] Popov, M., Van Der Suluis, L., "Improved Calculations for No-Load Transformer Switching Surges", *IEEE Trans. on Power Del.*, Vol. 16, No. 3, July 2001, pp. 401-408
- [2] Popov, M., Van Der Suluis, L., Smeets, R. P. P., Roldan, J.L., "Analysis of Very Fast Transients in Layer-Type Transformer Windings", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 22, No. 1, Jan.2007, pp. 238-247
- [3] Zhijian, Z.M.Z.Z.J., Zhiyin, Q., "Investigation of Internal Resonances and Winding Insulation Stresses in Grounding Transformer Failures", 6th Int. Conf. on Properties and App. of Dielectric Materials, June 2000
- [4] Carlin P. W., Laxson A. S., Muljadi E. B., "The History and State of the Art of Variable-Speed wind Turbine Technology", *Wind Energy*. 2003; pp:129-159
- [5] Chen Z., "Grid Power Quality with Variable Speed Wind Turbines", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 16, No. 2, June 2001, pp. 148-154
- [6] Popov, M.: Switching Three Phase Distribution Transformer with a Vacuum circuit Breaker, analysis overvoltages and protection of equipment, PhD Thesis, Delft University of Technology, 2002
- [7] Larsson Å., "Flicker Emission of Wind Turbines Caused by Switching Operations", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 17, No. 1, 2002, pp. 119-123
- [8] IEC 60076-16: 2011-08: Power Transformers. Part 16: Transformers for Wind Turbine App.
- [9] IEC 62271-100: 2006-10: High voltage switchgear and controlgear. Part 100: High voltage alternating current circuit breakers.
- [10] Tenbohlen S., Ryder S.A., "Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods" XIII Int. Symp. on High Voltage Eng., 2003
- [11] Dick, E.P., Erven, C.C., "Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-97, No.6, PP.2144-2153, Nov. 1978
- [12] http://www.doble.com/products/sweep_frequency_response_analysis.html