

Transformatörlerinde Kapasitansların Yıldırım Darbe Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Investigation the Effect of Capacitances on Lightning Impulse in Transformers

Mustafa Akdağ¹, Mehmet Salih Mamiş²

¹Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
makdag@beu.edu.tr

²İnönü Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
mehmet.mamis@inonu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, güç ve dağıtım transformatörlerinde sargı ile nüve arası, sargılar arası ve nötr noktası ile toprak arası kapasitans değerlerinin primer tarafına uygulanan yıldırım darbesinin sekonder tarafına geçişi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Transformatör modelleri Alternative Transient Program'da (ATP) oluşturulmuştur. Benzetim çalışmalarında Primer tarafa 1.2/50 µs yıldırım darbesi uygulanmıştır. Güç transformatörlerinde, sargılar arası kapasitansların ve nötr ile toprak arası kapasitansların değerlerinin değişiminin sekonder yıldırım darbe geriliminin sadece genliğini etkilediği; dağıtım transformatörlerinde ise kapasitans değerlerinin sekonder yıldırım darbe gerilimini etkilemediği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yıldırım Darbe Tepkisi, Alternative Transient Program (ATP), Dağıtım Transformatörü, Güç Transformatörü, Yüksek Frekans Modeli.

Abstract

In this study, the effects of the values of winding, inter-winding and neutral-ground capacitances in power transformers and distribution transformers on the secondary side are investigated in the case of lightning impulse applied to primary side. Transformer Models are simulated in Alternative Transient Program (ATP). In the simulations, 1.2/50 µs lightning impulse wave is applied to the primary side. It is observed that the change in the values of inter-winding and neutral-ground capacitances affect only amplitude of the secondary lightning voltage in power transformer, in the case of distribution transformer, change in the values of capacitances have no effect on the secondary lightning voltage.

Keywords: Lightning Impulse Response, Alternative Transient Program (ATP), Distribution Transformer, Power Transformer, High Frequency Model.

1. Giriş

Transformatör modelleri, uygulanan kaynak frekansına göre düşük frekans [1] ve yüksek frekans [2] modelleri olarak sınıflandırılabilir. Düşük frekans modelleri, açık ve kısa devre testleri ile oluşturulur [3]. Düşük frekans modeli ile ilgili yapılan çalışmalar nüvenin lineer olmayan karakteristiklerini modellemeyi amaçlar [1,3]. Yüksek frekans modeli ile ilgili yapılan çalışmalar ise transformatörlerin arıza tespiti ve geçici rejim tepkisinin tespitini amaçlar [3,4]. Frekans bağımlı olan bu modellerde düşük frekans modelindeki parametrelere ek olarak kapasitanslar da dahil edilmektedir. Düşük frekanslarda bu kapasitansların etkisi ihmal edilebilir düzeyde düşüktür. Yüksek frekanslarda ise transformatör çıkışını önemli ölçüde etkiler.

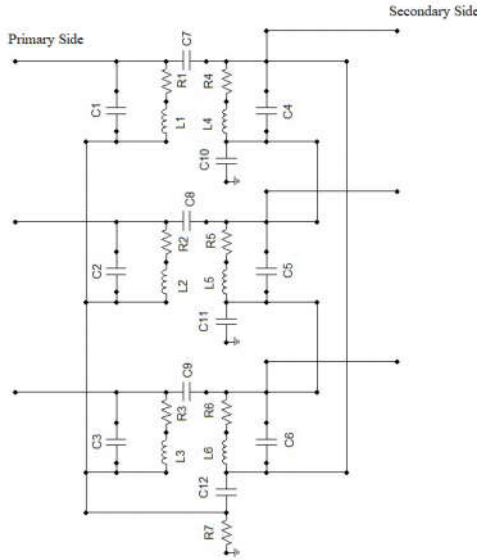
Transformatörlerin yıldırım darbe tepkisine yönelik çalışmalardan [3]'te akım transformatörüne deneysel testler yapılmış ve yıldırım darbe tepkisi ölçülmüştür. Test sonuçları ile transformatörün eşdeğer devresi ve transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. ATP'de hazırlanan benzetim ile ölçülen yıldırım darbe tepkisi karşılaştırılmıştır. [4]'te Frekans Tepkisi Analizi (FRA) yöntemi ve arıza tespiti için kullanılmak üzere üç fazlı bir güç transformatörünün frekans tepkisinin gelişmiş bir modeli sunulmaktadır. [5]'te güç transformatörüne ve dağıtım transformatörüne FRA (Frequency Response Analysis) cihazı ile testler yapılmış ve transformatörlerin eşdeğer devreleri çıkarılmıştır. [6]'da güç trafosu için Electromagnetic Transients Program'da (EMTP) kolayca uygulanabilecek frekans alanındaki ölçüm verilerine dayanan basit bir modelleme yöntemi sunmaya çalışılmıştır. Modelin önemli fonksiyonu, yıldırım çarpması veya anahtarlama sonrasında bir sargıdan diğerine aktarılan geçici rejim geriliminin benzetimini yapabilesidir.

Bu çalışmada, [5]'teki güç ve dağıtım transformatörleri modellerinde kapasitans değerlerinin değişiminin primer tarafına uygulanan yıldırım darbe durumunda sekonder tarafına etkisi incelenmiştir. Transformatör modelleri

ATP programında oluşturulmuştur. Primer Tarafa 1.2/50 μ s yıldırım darbe uygulanmış ve sekonder gerilim dalga formları karşılaştırılmıştır.

1.1. Güç Transformörü Modeli

[5] çalışması güç transformörü modelini [6] çalışmasından almıştır. 300 MVA 415/15,75 kV 'luk Y- Δ bağlı güç transformörüne 1.2/50 μ s yıldırım darbe uygulanması ile deneysel testler yapılmıştır. Şekil 1'de güç transformörü modeli verilmiştir.



Şekil 1. Yüksek Frekans Güç Transformörü Modeli [5]

Bu modelde bakır kayıpları hesaba katılmamıştır. C_1 , C_6 , sargı kapasitanslarını; C_7 , C_8 , ve C_9 sargılar arası kapasitansları; C_{10} , C_{11} , ve C_{12} ise nötr noktası ile toprak arasındaki kapasitansı temsil eder. R_1 - R_6 ve L_1 - L_6 demir kayıplarını (manyetik devre) temsil eder. R_7 ise nötr direncini temsil eder.

Şekil 2'de Primer - Toprak (V_{in}) ve Nötr- Toprak (V_{out}) gerilimlerinin Frekans Tepkisi Analizi (FRA) sargı empedansının ölçümü için gerekli test düzeneği yer almaktadır [6]. Sargı empedansının genliğinin ve açısının frekans spektrumu kullanılarak manyetik devre direnci ve endüktansı ile sargı kapasitansı elde edilebilmektedir [6]. Düşük frekanslarda (20 Hz) empedans endüktif olduğundan, sargı kapasitansı açık devre olarak kabul edilebilir ve böylece ölçülen reaktans değerinden manyetik devre endüktansı belirlenebilir. İlk rezonans frekansı ve düşük frekans hesabında bulunan endüktanstan yararlanarak sargı kapasitansı hesaplanır. Eşitlik (1) de gerilimler ile sargı empedansı arasındaki bağıntı verilmiştir. Eşitlik (2) de ise rezonans frekansı eşitliği verilmiştir.

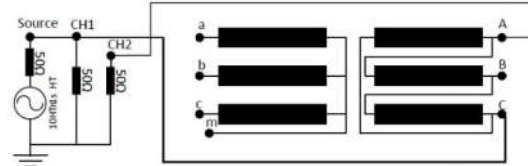


Şekil 2. Güç Transformörü Primer Test Düzeneği [2]

$$Z_s = \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot 50 - 50 = 50 \cdot \left(\frac{1 - He^\theta}{He^\theta} \right), \frac{V_{out}}{V_{in}} = |H| \angle \theta = He^\theta \quad (1)$$

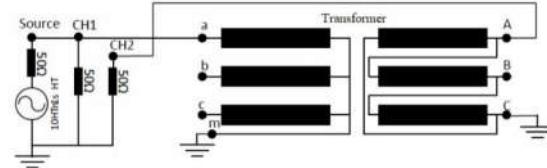
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Eşitlik (1) deki 50 Ω direnci ölçüm cihazının iç direncidir. Aynı test düzeneği sekonder sargı için oluşturularak gerekli parametreler belirlenebilir. Şekil 3 te Sekonder A fazı test düzeneği verilmiştir [2].



Şekil 3. Güç Transformörü Sekonder Test Düzeneği

Sargılar arası kapasitelerin belirlenmesi için Primer ve Sekonder gerilimler ölçülmüştür. Bu çalışmada, primer ve sekonder gerilimleri frekans analizinin sargılara arası empedansı verdiği yer verilmiştir. Düşük frekanslarda (20 Hz) bu empedans kapasitif olarak davranmaktadır ve rektanstan kapasitans değeri elde edilmiştir [2]. Çalışmada bu testin detaylarına yer verilmemiştir. Şekil 4'te bu testin düzeneği verilmiştir.



Şekil 4. Güç Transformörü Primer-Sekonder Test Düzeneği [2]

[1]'de geçen modelde sargılar arasında oluşan endüktif kuplajdan dolayı primer tarafın kapasitif etkisi sekonder tarafa kaçak endüktans olarak aktarılmıştır. Sekonder sargının frekans analizinde ikinci rezonans frekansında empedansın endüktif olduğu görülür. Bu frekandaki empedans değerinden endüktans; (2) eşitliğinden de C_{10} , C_{11} ve C_{12} kapasitansları bulunabilmektedir.

Şekil 1'de verilen güç transformörü modelinin yapılan testler ve hesaplamalar sonucundaki parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu çalışmada, manyetik devre dirençlerinin hesabına yer verilmemiştir. Bu dirençlerin düşük frekandaki (20 Hz) empedanstan çıkarılmadığı çalışmadan anlaşılabilir.

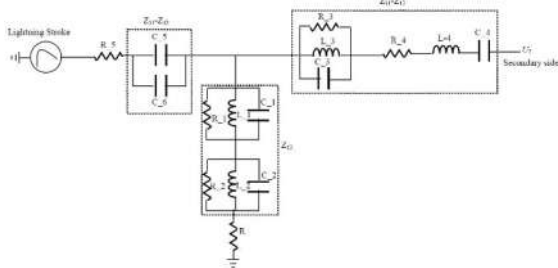
Tablo 1. Güç Transformörü Parametreleri [5]

R_1 (Ω)	0.8231
R_2 (Ω)	0.8235
R_3 (Ω)	0.8236
R_4 (Ω)	0.001053
R_5 (Ω)	0.001053
R_6 (Ω)	0.001053
R_7 (Ω)	1
L_1 (H)	39.69
L_2 (H)	58.34

L ₃ (H)	38.19
L ₄ (H)	0.257
L ₅ (H)	0.351
L ₆ (H)	0.366
C ₁ (nF)	0.03069
C ₂ (nF)	0.02088
C ₃ (nF)	0.03190
C ₄ (nF)	3.57
C ₅ (nF)	2.61
C ₆ (nF)	2.508
C ₇ (nF)	78.3
C ₈ (nF)	78.3
C ₉ (nF)	78.3
C ₁₀ (nF)	70.08
C ₁₁ (nF)	70.08
C ₁₂ (nF)	70.08

1.2. Dağıtım Transformatörü Modeli

[5]'te dağıtım transformatörü modeli ve 100 kVA, 21 kV/420 V dağıtım transformatörü parametreleri [7] çalışmasından alınmıştır. [7] çalışmasındaki transformatör modeli ve yapılan testler [8] çalışması referans alınarak oluşturulmuştur. Primer tarafına 940 V 1.2/50 µs Yıldırım darbe uygulanmış, sekonder uçları açık bırakılmıştır. İkinci bir testte ise sekonder tarafa aynı yıldırım darbe uygulanmış ve primer tarafı açık bırakılmıştır. Şekil 5'te transformatör modeli verilmiştir.



Şekil 5. Yüksek Frekans Dağıtım Transformatörü Modeli [7]

Parametre hesaplamaları temelde iki uçlu devre teorisine dayanır. Ölçülen akım ve gerilim değerlerine FFT uygulanır. Şekil 4 te verilen iki uçlu devrenin eşitlikleri (3) ve (4) te verilmiştir.

$$U_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad (3)$$

$$U_2 = Z_{22}I_2 + Z_{21}I_1 \quad (4)$$

Burada U_1 primer gerilim, U_2 sekonder gerilim, I_1 primer akımı I_2 sekonder akımıdır. Primer tarafa gerilim uygulandığı testte sekonder tarafı açık olduğu için bir akım oluşmaz ($I_2 = 0$). Aynı şekilde, sekonder tarafa gerilim uygulandığı testte primer tarafı açık olduğu için bir akım oluşmaz ($I_1 = 0$). Ayrıca $Z_{12} = Z_{21}$ şeklindedir. Sekonder tarafına da aynı şekilde yıldırım darbe gerilimi uygulanması durumunda empedans değerleri;

$$Z_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{I_2=0}, Z_{12} = \left. \frac{U_1}{I_2} \right|_{I_1=0}, Z_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{I_1=0}, Z_{21} = \left. \frac{U_2}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad (5)$$

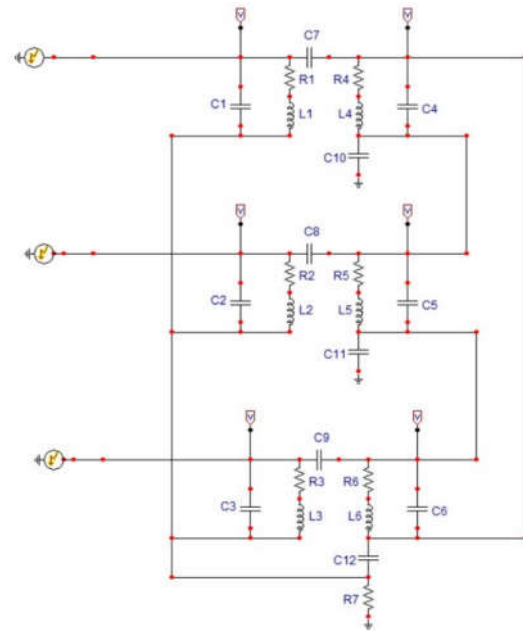
şeklinde olur. Bu empedansların frekans spektrumundan ilk ve ikinci rezonans frekansı kullanılarak modelin parametrelerinin detaylı hesabı [7] çalışmasının ek bölümünde yer verilmiştir. Bu parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Dağıtım Transformatörü Parametreleri [7]

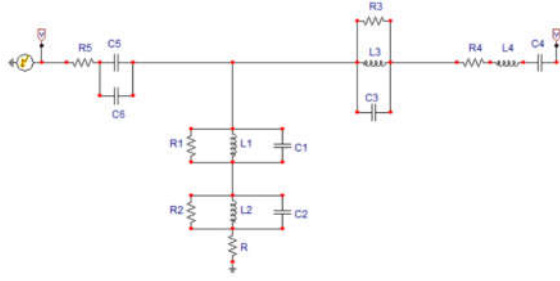
R ₁ (Ω)	500
R ₂ (Ω)	558.5405
R ₃ (Ω)	1000
R ₄ (Ω)	1*10 ⁻⁶
R ₅ (Ω)	50
R (Ω)	1500
L ₁ (mH)	0.00856
L ₂ (mH)	0.0046
L ₃ (mH)	0.036897
L ₄ (mH)	0.048296
C ₁ (µF)	0.021063
C ₂ (µF)	0.00302967
C ₃ (µF)	0.00512
C ₄ (µF)	0.00022167
C ₅ (µF)	0.0004221
C ₆ (µF)	0.00019152

2. Benzetim

[5]'teki güç transformatörü ve dağıtım transformatörü modelleri ATP de oluşturulmuş ve yıldırım darbe tepkisi incelenmiştir. Güç transformatörüne 500 kV 1.2/50 µs yıldırım darbe gerilimi, dağıtım transformatörüne ise 20 kV 1.2/50 µs yıldırım darbe gerilimi uygulanmıştır. Simülasyon 100 µs'ye ayarlanmış, örnekleme frekansı 833 Mhz'dir. Yıldırım darbe, gerilim dalgasını tam olarak görebilmek için 1. µs'de uygulanmıştır. Şekil 6'da güç transformatörü benzetim ekranı, Şekil 7 'de ise dağıtım transformatörü benzetim ekranı verilmiştir.



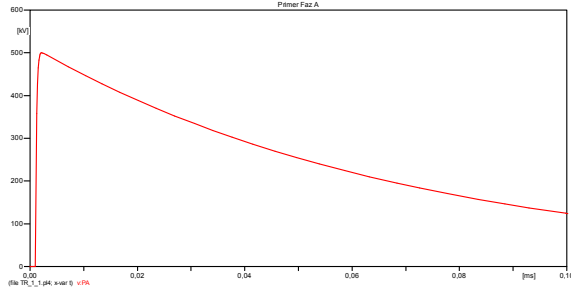
Şekil 6. Güç Transformatörü ATP Modeli



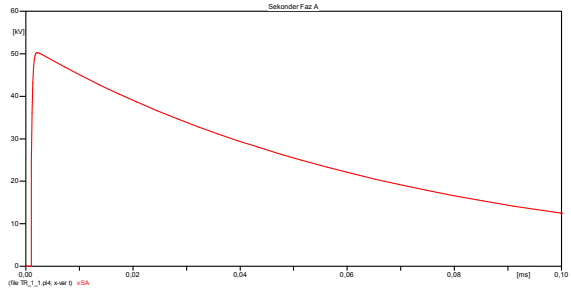
Şekil 7. Dağıtım Transformatörü ATP Modeli

3. Bulgular

Şekil 8 de güç transformatörünün primer A fazına uygulanan gerilimin formu, Şekil 9 da uygulanan bu gerilim sonucu sekonder A fazında oluşan gerilimin formu verilmiştir.

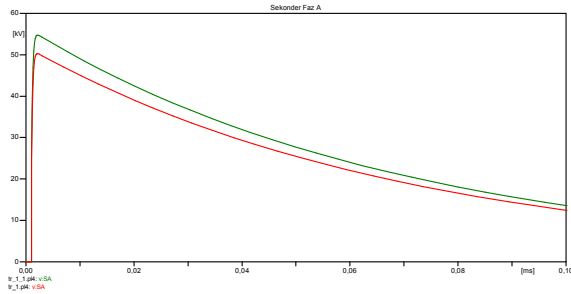


Şekil 8. Güç Transformatörü 500 kV 1.2/50 µs Yıldırım Darbe Uygulanması Primer Faz A Gerilimi

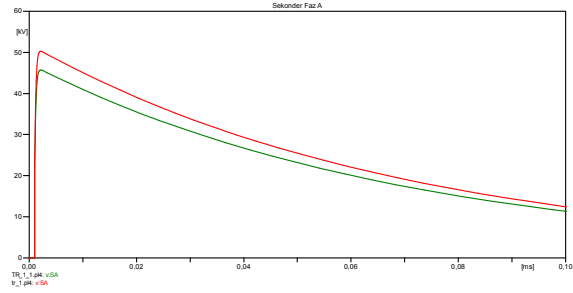


Şekil 9. Güç Transformatörü 500 kV 1.2/50 µs Yıldırım Darbe Uygulanması Sekonder Faz A Gerilimi

Şekil 10 ve 11'de güç Transformatörü C₇,C₈,C₉ kapasitans değerlerinin değişimi durumunda sekonder gerilimleri dalga formlarının karşılaştırılması verilmiştir.

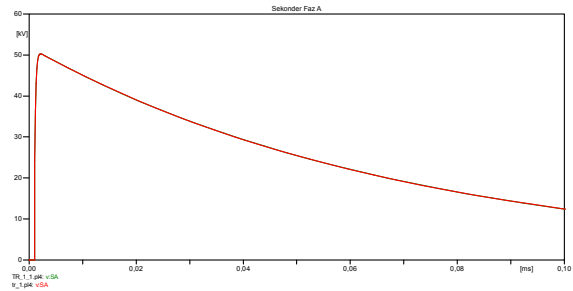


Şekil 10. Güç Transformatörü 500 kV 1.2/50 µs Yıldırım Darbe Uygulanması Sekonder Faz A Gerilimleri (C₇,C₈,C₉ %10 arttırılmış yeşil)



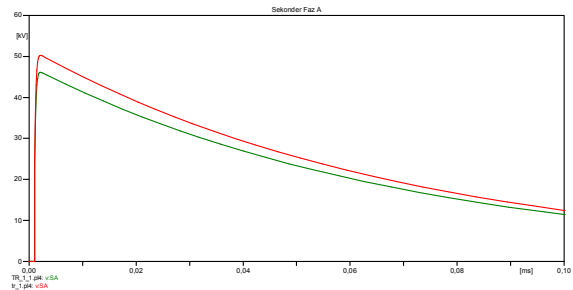
Şekil 11. Güç Transformatörü 500 kV 1.2/50 µs Yıldırım Darbe Uygulanması Sekonder Faz A Gerilimleri (C₇,C₈,C₉ %10 azaltılmış yeşil)

C₁,C₂,C₃ ve C₄,C₅,C₆ kapasitans değerlerinin arttırılması veya azaltılmasının sekonder gerilimi etkilemediği görülmüştür (Şekil 12).

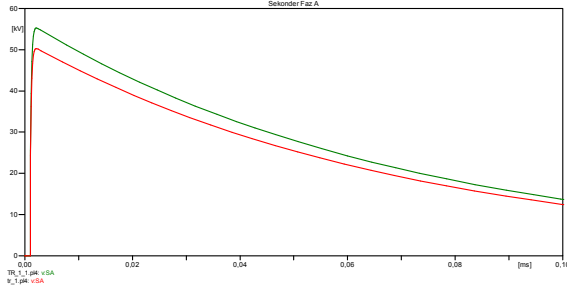


Şekil 12. Güç Transformatörü 500 kV 1.2/50 µs Yıldırım Darbe Uygulanması Sekonder Faz A Gerilimleri (C₁,C₂,C₃ veya C₄,C₅,C₆ kapasitans değerlerinin %10 arttırılması veya azaltılması, yeşil)

Şekil 13 ve 14'de güç transformatörü C₁₀,C₁₁,C₁₂ kapasitans değerlerinin değişimi durumunda sekonder gerilimleri dalga formlarının karşılaştırılması verilmiştir.

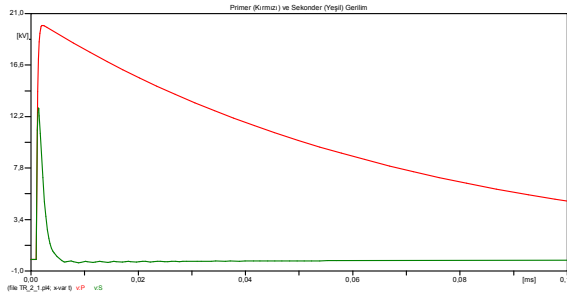


Şekil 13. Güç Transformatörü 500 kV 1.2/50 µs Yıldırım Darbe Uygulanması Sekonder Faz A Gerilimleri (C₁₀,C₁₁,C₁₂ %10 arttırılmış yeşil)

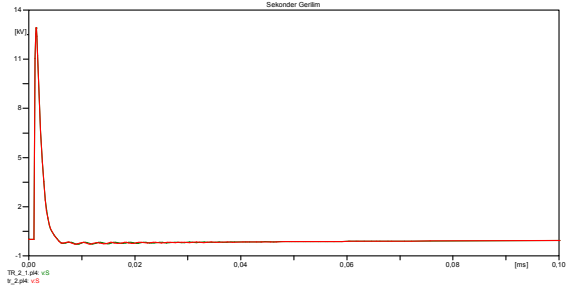


Şekil 14. Güç Transformatorü 500 kV 1.2/50 μ s Yıldırım Darbe Uygulanması Sekonder Faz A Gerilimleri (C_{10}, C_{11}, C_{12} %10 azaltılmış yeşil)

Şekil 15'de dağıtım transformatorü primerine uygulanan gerilim sonucu sekonderde oluşan gerilimin formu verilmiştir. Dağıtım Transformatorü kapasitans değerlerinin değişimi sekonder gerilimleri etkilemediği görülmüştür (Şekil 16).



Şekil 15. Dağıtım Transformatorü 20 kV 1.2/50 μ s Yıldırım Darbe Uygulanması Primer ve Sekonder Gerilimleri (Primer kırmızı, Sekonder yeşil)



Şekil 16. Dağıtım Transformatorü 20 kV 1.2/50 μ s Yıldırım Darbe Uygulanması Sekonder Gerilimleri (Kapasitans değerlerinin ayrı ayrı %10 arttırılması veya azaltılması, yeşil)

4. Sonuçlar

Güç transformatorü modelinde sargılar arası kapasitans değerleri (C_7, C_8 ve C_9) %10 arttırıldığında sekonder gerilimin genliğinin arttığı, %10 azaltıldığında ise genliğin azaldığı Şekil 10 ve 11 dan görülebilir. Nötr-Toprak arasındaki kaçak kapasitelerin (C_{10}, C_{11} ve C_{12}) %10 artması sekonderdeki gerilimin genliğinin azalmasını, %10 azalması ise gerilimin genliğinin artmasını sağlamıştır (Şekil 13 ve 14). Diğer kapasitans değerlerinin değişimi sekonder gerilim dalgasını değiştirmediği görülebilir (Şekil 12).

Dağıtım transformatorü modelinde kapasitans değerlerinin değişimi sekonder gerilimi etkilemediği söylenebilir (Şekil 16).

Gelecekte yapılacak bir çalışma ile deneysel çalışma sonucu elde edilecek transformator kapasitans ve diğer parametrelerinin kullanılarak simülasyonların yapılması ve sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması hedeflenmiştir.

5. Kaynaklar

- [1] Chen X. Venkata S. S. "A three-phase three-winding core-type transformer model for low-frequency transient studies", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, no. 2, s. 775-782, 1997.
- [2] Morched A., Marti L., Ottevangers J., "A high frequency transformer model for the EMTP", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, no. 3, s. 1615-1626, 1993.
- [3] Elhaffar A, ve Lehtonen M, "High Frequency Current Transformer Modeling for Traveling Waves Detection", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007.
- [4] Abeywickrama N., Serdyuk Y. V., Gubanski S.M., "High-Frequency Modeling of Power Transformers for Use in Frequency Response Analysis (FRA)", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, no. 4, s. 2042-2049, 2008.
- [5] Subedi D., *Lightning Induced Over-voltages in Power Transformer and Voltage Spikes in Connected Load*, Master Tezi, Aalto University, Helsinki, Finlandiya, 2017
- [6] Shirvani A., Malekian K., Schmidt U., ve Schufft W., "A New Power transformer Model Over Wide Frequency range for EMTP", *45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010*, 2010, s. 1-6.
- [7] Sabiha N. A., *Lightning-Induced Overvoltages in Mediumvoltage Distribution Systems and Customer Experienced Voltage Spikes*, Doktora Tezi, Aalto University, Helsinki, Finlandiya, 2010.
- [8] Piantini A., Malagodi C. V. S., "Modeling of Three-Phase Distribution Transformers for Calculating Lightning Induced Voltages Transferred to the Secondary", *IEEE, 5th International Symposium on Lightning Protection*, 1999.