

Yıldırım Darbe Geriliminin Kuru Tip Transformatör Sargılarındaki Dağılımının İncelenmesi

Muzaffer ERDOĞAN^{1*}, Mehmet Kubilay EKER²

¹BEST TRAFO, Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri, BALIKESİR

²Balıkesir Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, BALIKESİR

(Geliş / Received : 24.03.2015 ; Kabul / Accepted : 13.05.2015)

ÖZ

Yıldırım darbelerine karşı transformatörlerin dayanımının sağlanabilmesi, uzun işletme koşullarına imkan vereceğinden, tasarım aşamasında aşırı gerilimlere maruz kalan bölgelerinin bilinmesi önemlidir. Çeşitli modelleme çalışmaları ile transformatörlerin yıldırım darbelerine karşı dayanımı analiz edilirken, çoğunlukla yağlı tip transformatörler analiz için tercih edilmişken, imalatta gittikçe büyük bir pazara sahip olmaya başlayan kuru tip transformatörlerin davranışının incelenmesi de önem kazanmaktadır. Bu çalışmada daha önceki çalışmalardan farklı olarak kat sargı yöntemi kullanılarak profil iletken ile sarılmış ve epoksi reçine ile izole edilmiş bobinin yıldırım darbe gerilimi dağılımı analizi yapılmıştır. İlk olarak, katı izolasyon yapısı ile sargılarda meydana gelen kuvvetlere karşı yüksek mukavemet sağlayan kuru tip transformatörlerin önemi açıklanmış ve merdiven tip ağ metodu üzerine bilgi verilmiştir. Sonrasında, transformatöre ait LC parametrelerinin çıkarılması için gerekli hesaplama yöntemleri verilmiştir. Son olarak literatürde yer alan düğüm denklemlerinden elde edilen matris yapının çözümü sunulmuş ve yıldırım darbe geriliminin kuru tip transformatör bobinindeki dağılımı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yıldırım darbe testi, kuru tip transformatörler, RLC merdiven tipi ağ modeli

Research of Lightning Impulse Voltage Distribution In Dry Type Transformer Winding

ABSTRACT

It is important to have knowledge of parts of transformer under high voltage during designing of transformer, because of withstanding of transformer against lightning impulse make lifespan of transformer longer. Oil-immersed type transformer lightning impulse modeling has been carried out frequently in the past. Studies on dry type transformer lightning impulse modeling gains more important because of growing marketing share of it. This study differs from old studies because during studies, cast resin insulated layer type coils with rectangular shape wire are used as dry type transformer windings. First, it has given an explanation about importance of dry type transformer which have very straight endurance to force because of their solid windings and ladder type network model. Then, some calculation methods of LC parameters of transformer have been given. Finally a solution method of matrix obtained from node equations has been presented and lightning impulse voltage distribution in dry type transformer winding is obtained.

Keywords: Lightning impulse test, dry type transformer, RLC ladder network model

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisinin iletiminde ve dağıtımında anahtar rol oynayan transformatörlerin aşırı gerilimlere karşı da dayanıklı olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Özellikle transformatörlerin yıldırım darbesi ya da anaharlama sırasında meydana gelen yüksek frekanslı gerilimlere karşı dayanıklı olması beklenir.

Büyük güç trafoların üretilmesi ile birlikte darbe geriliminin sargılar içerisindeki dağılımı ve darbeye maruz kalmayan sargılardaki etkinin incelenmesi amacıyla yıldırım darbe geriliminin net bir şekilde analiz edilmesi önemli bir hal almıştır. Özellikle darbeye maruz kalmayan sargıların izolasyon yapısı belirlenmelidir. Ayrıca sarımda kullanılan aparatların

izolasyon malzemeleriyle olan koordinasyonunun sağlanması gereklidir [1]. İşletme geriliminde çalışan transformatörlerin modeli direnç ve endüktans parametrelerinden oluşur. Ancak transformatörler güç sistemine bağlı iken aşırı gerilime, aşırı akıma, arıza ve kesicilerin açılma ya da kapanma işlemlerinden kaynaklanan darbe gerilimlerine maruz kalırlar. Bu hallerde transformatörün iç kapasite parametreleri baskın hale gelir [2].

Yüksek frekanslı aşırı gerilimlere maruz kalan transformatörün sargılarının iç yapısında baskın hale gelen paralel ve seri kapasitelerin oranlarının farklılığı ve iç rezonanslar nedeniyle sargıların farklı bölgelerinde lineer olmayan gerilim dağılımları meydana gelir [3]. Transformatörün işletmede kullanımı sırasında yüksek frekanslı aşırı gerilimlerden zarar görmeden çalışması için üretilen transformatörler standart olarak 1,2µs tepe

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: : muzaffer.erdogan@besttransformer.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.1 21-30

ve 50µs yarılanma süresi olan yıldırım darbe gerilimi ile test edilir [4]. Transformatörün testi geçebilmesi için test sırasında, sargıların içerisinde meydana gelen elektrik alandan zarar görmeyecek şekilde sargı izolasyonunun tasarlanması gerekmektedir. Amaç en az üretim ve işletme maliyeti ile aşırı gerilimlere karşı dayanıklı yıllarca çalışan transformator dizayn etmektir [5]. Bunun başarılabilmesi için yıldırım darbe testi sırasında sargılarda meydana gelen gerilim dağılımı analiz edilmelidir. Gerilim dağılımının analizi sargıların RLC eşdeğer devresinin çözümü ile elde edilir.

Darbe dağılımının sargı içerisinde önemli olduğunun anlaşılmasıyla, sargı yapısındaki kapasite ve endüktansların düzenli olarak dağıldığını varsayan yaklaşımlarla analitik incelemeler yapılmıştır. Ancak transformator sargılarına ait kapasite ve endüktansların düzensiz dağılımı nedeniyle bu yaklaşımların transformatorler için uygulanması mümkün değildir. Lewis'in [6] amaçladığı merdiven tipi ağ yapısı modeli kullanılarak transformator sargıları eşit bölmelere ayrılmış ve sargıların analiz edilmesi mümkün olmuştur. Ancak bu model de sargıları düzenli olarak tasarlanmamış transformatorler için uygun değildir. Dent [7] tarafından yapılan çalışmalarda merdiven tipi ağ modelinin düzensiz yapıdaki sargılar için uygulanması mümkün olmuştur. Bu çalışmanın ardından araştırmacılar RLC parametrelerin bulunması üzerine yoğunlaşmışlardır. Fergestad [8] sargıların öz ve ortak endüktansın, Stein [9] ise sarımlar arasındaki seri ve paralel kapasitenin hesaplama yöntemini sunmuştur. Fergestad [10] bu yöntemi çoklu sargı yapısına uygulamıştır. Miki ve arkadaşları ise [1] merdiven tipi ağ modelini darbe geriliminin doğrudan uygulanmadığı, transfer edilen gerilimin etkisi altında kalan sargıları da modele dahil ederek irdelemişlerdir.

Yüksek frekans altında darbe geriliminin dağılımının incelenmesi üzerine çalışmalar yoğun olarak yağlı tip transformatorler üzerine yapılmıştır [1-2,6-10,12-13]. Bu konuda, kuru tip transformatorler üzerine çalışmalar ise sınırlı sayıda gerçekleştirilmiştir [3,5,11]. Bu çalışmalarda LC parametreleri sayısal yöntemlerle elde edilmiş ve strip iletken türü ile sarılmış bobinler incelenmiştir.

Bu çalışmada daha önceki çalışmalardan farklı olarak imalatı daha kolay ve büyük güçte kuru tip transformatorlerde sıklıkla kullanılan kat sargı yöntemi kullanılmıştır. Her güçte bobin sarımına uygun profil iletken tipi seçilmiştir. Epoksi reçine ile izole edilmiş bobinin yıldırım darbe gerilimi dağılımı analizi yapılmıştır. Hesaplama da kullanılan parametreler analitik ve sayısal yöntemlerle hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Model bobinin LC devresi elde edilen parametrelerle çözülerek, yıldırım darbe geriliminin bobinin içerisindeki dağılımı analiz edilmiştir.

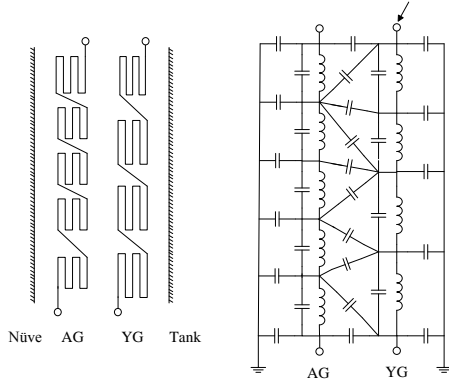
2. KURU TİP TRANSFORMATÖRLER (DRY TYPE TRANSFORMER)

Sargıları epoksi reçine ile örtülmüş kuru tip transformatorler yağlı transformatorlere göre daha güvenli olmaları nedeniyle hastane, metro sistemleri, alışveriş merkezleri gibi toplu yaşanan alanlarda kullanılmaktadır. Yapısında yanıcı madde bulundurmaması, kısa devre anında meydana gelen kuvvetlere karşı yüksek mukavemete sahip olması, izolasyon malzemesi olarak yağ gibi kirlenici malzemelerin kullanılmaması ve bakım gerektirmemesi, kuru tip transformatorlerin tercih edilmesini sağlamıştır.

Kuru tip transformatorlerin bobinleri, sarım işlemi tamamlandıktan sonra kalıp içerisine yerleştirilir ve vakum altında reçine döküm işlemi gerçekleştirilir. Döküm sonrası bobinler çekirdeğin bacalarına geçirilir ve alt üst takozlarla sıkıştırma demirlerine sabitlenir. İzolasyon olarak yağ kullanılmaz ve bu nedenle yağı muhafaza edecek tanka ihtiyaç yoktur. Sargı içinde kullanılan izolasyon malzemesi epoksi reçinedir. Sargılar arasında ise epoksi reçine ve hava vardır. İzolasyon malzemesi olarak havanın kullanılması nedeniyle zorlanmanın en çok gerçekleştiği yer sargılar arasındaki hava boşluklarıdır.

3. MERDİVEN TİPİ AĞ MODELİ (LADDER NETWORK MODEL)

Merdiven tipi ağ modelinde her bir sarım bir L endüktans parametresi olarak kabul edilir. Öz ve diğer sarımlara göre ortak endüktansı hesaplanarak N sarımlı bir transformatorün bobininin NxN endüktans matrisi elde edilir. İletken izolasyonu, kat arası izolasyonu ve diskler arasındaki yağ gibi dielektrik malzemeler nedeniyle her bir sarım bitişiğindeki sarımla birlikte bir seri kapasite ve tank ya da diğer sargılara karşıda paralel kapasite oluşturur. Sargıların sarım sayısının fazla olması nedeniyle parametreler sarım için değil, bir grup için çıkarılır. Disk sargı tekniğine göre sarılmış bir bobin için bir disk çifti ya da kat sargı tekniğine göre bir kat sarım bir eleman olarak gruplanır. Bu şekilde işlemler basit hale getirilerek çözüm kolaylaştırılır. Şekil 1'de yağlı tip transformatöre ait merdiven tipi ağ modeli verilmiştir. Merdiven tipi ağ modeli ile sargılar gerilim bilgisi elde edilmek istenen düğümlere göre gruplanabilir. Böylelikle transformator sargılarının herhangi bir noktasının analizini yapmak mümkündür [12].

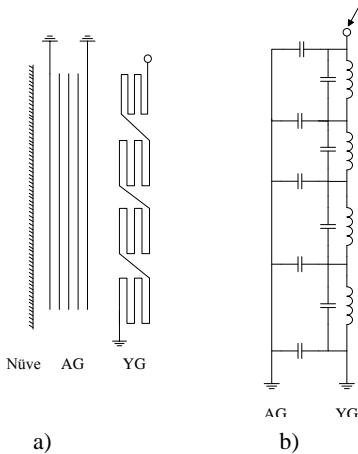


Şekil 1- Merdiven tipi ağ modeli(Ladder type network model)

Kayıplar sargı içerisinde darbe gerilim dağılımına çok az sönümlenme etkisi yaptığından hesaba katılmaktadır [1].

Yıldırım darbe testinin uygulanması sırasında test edilecek bobinin giriş terminaline gerilim verilirken bobinin çıkış terminali ve diğer bobinlerin hepsi topraklanır. Alçak gerilim bobininin giriş ve çıkış terminalleri topraklı iken, nötr ucu topraklı bir yüksek gerilim bobinine yıldırım darbe gerilimi uygulanır. Alçak gerilim bobininin topraklı olması nedeniyle çekirdeğin içinden akı geçmez. Sadece bobinler arasında kaçak akımlar dolanır ve endüktans parametresinin oluşmasını sağlayan bu akılardır. Bobinin içerisindeki yıldırım darbe dağılımı transformatörün çekirdekli ya da çekirdeksiz olması durumunda aynı şekilde olur [13].

Kuru tip transformatörlerde izolasyon malzemesi olarak havanın kullanılması nedeniyle tank bulunmaz. Paralel kapasite sadece sargılar arasında meydana gelir. Ayrıca dağıtım tipi kuru tip transformatörlerde alçak gerilim sargısı band sargıdır. Yıldırım darbe testi sırasında alçak gerilim sargısının topraklanması nedeniyle, alçak gerilim dış çapı toprak geriliminde bir silindir gibi davranır. Bunun sonucunda yüksek gerilim sargısı ile toprak arasında kapasiteler meydana gelir (Şekil 2).



Şekil 2- Folyo Sargılı Kuru Tip Transformatörün a) Fiziksel Modeli b) LC Modeli

4. PARAMETRELERİN HESAPLANMASI (CALCULATION OF PARAMETERS)

4.1. Parametrelerin Analitik Hesaplamaları (Analytical Calculation Of Parameters)

4.1.1. Endüktans (Inductance)

Yüksek gerilim bobinleri çok sayıda sarımdan oluşur. Bu sarımların kendisinden kaynaklanan öz endüktansı ve diğer sarımlardan kaynaklanan ortak endüktansı vardır. Silindirik yapıdaki sargıların analitik olarak endüktans hesaplamalarında her bir sarım bir eleman olarak alınarak, bu elemanların öz ve ortak endüktansları hesaplanmıştır. Üzerinden I akımı akan iletkenin d uzaklığındaki noktada meydana getirdiği A manyetik vektör potansiyeli ifadesi Eşitlik 1’de verilmiştir. μ ise boşluğun manyetik geçirgenliğidir ve değeri $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m’dir.

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \frac{\oint I dl}{d} \quad (1)$$

L endüktans ifadesi ϕ manyetik akısının I ya oranından elde edilir (Eşitlik 2).

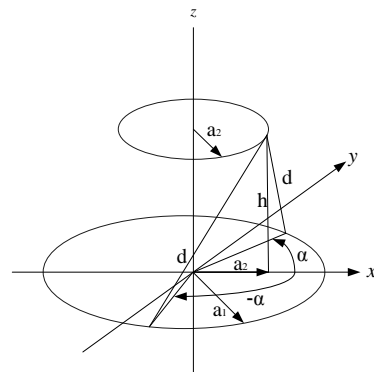
$$L = \frac{\phi}{I} \quad (2)$$

A ’nın çizgi integrali ise ϕ değerini verir (Eşitlik 3). Böylece bir iletkenin akan akımın uzak bir noktadaki başka bir iletkenin bir noktasında oluşturduğu vektör potansiyelinin çizgi integrali hesaplanarak akı değeri elde edilir ve akım değerine oranlanarak endüktans parametresi elde edilir.

$$\phi = \oint A dl \quad (3)$$

4.1.1.1. Ortak endüktans (Mutual inductance)

Yarı çapları a_1 ve a_2 olan z ekseninde aralarındaki mesafe h olan iki sarımın ortak endüktans ifadesi Şekil 3’deki gibi birinci sargıdan akan akımının ikinci sargının P noktasında oluşturduğu manyetik alan vektörü ifadesi Eşitlik 4’te verilmiştir [14].



Şekil 3- Eş Merkezli İki Sarım (Two coaxial turns)

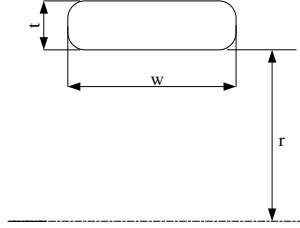
$$A = \frac{\mu I}{2\pi} \frac{a_1 \cos(\alpha) d\alpha}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + h^2 - 2a_1 a_2 \cos(\alpha)}} \quad (4)$$

Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'ün Eşitlik 4'ten elde edilen sonuca uygulanmasıyla elde edilen M_{12} ortak endüktans ifadesi:

$$M_{12} = \mu a_1 a_2 \int_0^\pi \frac{\cos(\alpha) d\alpha}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + h^2 - 2a_1 a_2 \cos(\alpha)}} \quad (5)$$

olarak bulunur.

4.1.1.2. Öz endüktans (Self inductance)



Şekil 4- Dikdörtgen İletken (Rectangular wire)

Öz endüktans iletkenin içerisindeki enerji ve sarımın oluşturduğu halkanın içerisinde geçen akıdan yola çıkılarak hesaplanır. t kalınlığında ve w genişliğinde profil iletkenli r yarıçaplı sarımın (Şekil 4) içerisindeki B manyetik akı yoğunluğu dağılımını veren ifade Eşitlik 6'da verilmiştir.

$$B(x) = \frac{\mu I x}{2t(t+w)} \quad (6)$$

V hacminin içerisine depolanan manyetik alanının oluşturduğu E enerji ifadesi ise Eşitlik 7'de verilmiştir.

$$E = \frac{1}{2\mu} \int B^2 dV = \frac{\mu I^2 \pi r w}{2(w+t)^2 t^3} \int_0^t x^3 dx \quad (7)$$

Enerjinin L endüktans ifadesine bağlı denklemden ve iletken içerisinde depolanan enerjiden yola çıkılarak elde edilen L_e endüktans ifadesi Eşitlik 8 ve Eşitlik 9'da verilmiştir.

$$E = \frac{\mu I^2 \pi r w t}{8(w+t)^2} = \frac{1}{2} L I^2 \quad (8)$$

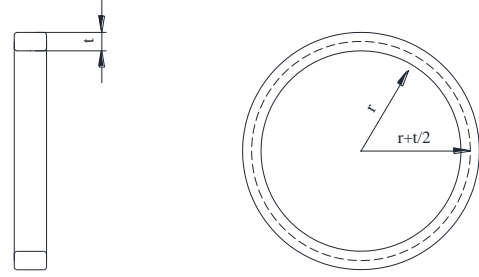
$$L_e = \frac{\mu \pi r w t}{4(w+t)^2} \quad (9)$$

İletken halkanın içerisindeki enerji ve sarımın oluşturduğu halkanın içerisinde geçen akıdan kaynaklanan öz endüktans hesaplamasında, manyetik alanın üreticisi ve manyetik alandan etkilenen, iletkenin kendisi olması nedeniyle h 'ın değeri 0 olur [11]. Şekil 5'teki gibi ortalama yarıçapı $r + \frac{t}{2}$ olan sarımın manyetik akının sargı halkasının içinden geçmesinden kaynaklanan L_i öz endüktansı Eşitlik 10'da verilmiştir.

$$L_i = \mu r \left(r + \frac{t}{2}\right) \int_0^\pi \frac{\cos(\alpha) d\alpha}{\sqrt{\left(r + \frac{t}{2}\right)^2 + r^2 - 2\left(r + \frac{t}{2}\right)r \cos(\alpha)}} \quad (10)$$

L_s toplam öz endüktans değeri ise Eşitlik 11'de verilmiştir.

$$L_s = L_e + L_i \quad (11)$$



Şekil 5- r yarıçaplı ve t kalınlığında iletkenin sarımı (A turn of wire with radius r and thickness t)

N sarımdan oluşan transformatörün sargısının her bir sarımın öz ve diğer $N-1$ sarım ile olan ortak endüktansı $N \times N$ endüktans matrisini oluşturur. Örneğin 1000 sarımdan oluşan bir sargının 1000x1000 boyutunda endüktans matrisinin çözümü çok zahmetlidir. Bu nedenle gruplara ayrılmış sargıların toplamından bir endüktans değeri elde edilir. Grup sayısı kadar endüktans matrisi elde edilir. N sarımdan oluşan bir $N \times N$ matrisi (Eşitlik 12) alt gruplamalar ile $N' \times N'$ matrisine indirgenir (Eşitlik 13).

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n-1} & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n-1} & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{n-1,1} & L_{n-1,2} & \dots & L_{n-1,n-1} & L_{n-1,n} \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{n,n-1} & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

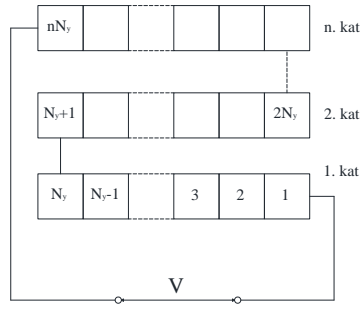
$$\begin{bmatrix} L'_{11} & \dots & L'_{1n'} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L'_{n'1} & \dots & L'_{n'n'} \end{bmatrix} \quad (13)$$

4.1.2. Kapasite hesaplamaları (Calculation of capacitance)

LC parametrelerinin hesaplanması için transformatörün yüksek gerilim bobini alt bobin gruplarına bölünür. Her bir alt bobin grubunu oluşturan iletkenlerin birbirlerine göre kapasitelerinin eşdeğeri seri kapasiteleri meydana getirir. Bu alt bobin grupları ile alçak gerilim bobini arasında da paralel kapasiteler meydana gelir. Transformatörün LC modelinin elde edilebilmesi için her bir kapasitenin bulunması gerekir.

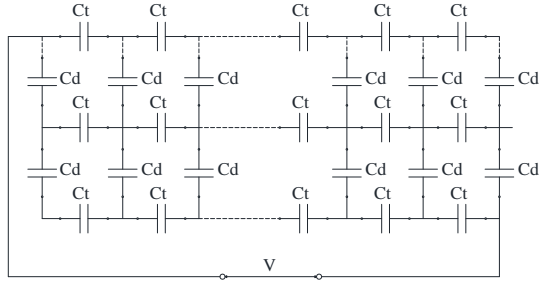
4.1.2.1. Seri kapasite (Serial capacitance)

Kat sargı yöntemi ile sarılmış transformatör sargılarında iletkenler aksiyal yönde N_y adet sarılardan bir üst kata geçilir ve n kat sarıldıktan sonra sarım tamamlanır (Şekil 6).



Şekil 6- Kat sargı (Layer type winding)

Her bir iletkenin izoleli olması ve kat arasında izolasyonların kullanılması nedeniyle, her bir sarım ile bitişiğindeki sarım arasında ve bir üst ya da alt katındaki iletken arasında kapasiteler meydana gelir. Komşu olmayan sarımlar arasındaki kapasiteler ihmal edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7- Kat sargının kapasitif modeli (Capacitance model of layer type winding)

Her bir kapasitenin enerjilerinden yola çıkılarak n kattan oluşan bobinin toplam kapasitesi iki aşamada hesaplanır. Birinci aşamada yan yana sarılan iletkenler arası toplam kapasite enerji yöntemi ile elde edilir [15]. Eşitlik 14'te yan yana sarılan r yarı çaplı aralarındaki izolasyon mesafesi d_{il} ve iletken izolasyonu dielektrik sabiti ϵ_{il} olan iki iletkenin C_t kapasitesi verilmiştir. ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti olup değeri $8,85 \times 10^{-12}$ F/m'dir.

$$C_t = \frac{\epsilon_{il}\epsilon_0 2\pi r t}{d} \quad (14)$$

Uçlarına V gerilimi uygulanan n katlı bir sargıdaki toplam kapasite bulunur ve C_{tr} eşdeğer kapasite değeri Eşitlik 15 ve Eşitlik 16'daki gibi hesaplanır.

$$\frac{1}{2} C_t \left(\frac{V}{2N_y} \right)^2 n(N_y - 1) = \frac{1}{2} C_{tr} V^2 \quad (15)$$

$$C_{tr} = \frac{C_t}{2N_y^2} n(N_y - 1) \quad (16)$$

Kat sargının kapasite hesabının 2. aşamasında, sargının katları arasında meydana gelen kapasiteler hesaplanır.

Üst üste gelen iki iletkenin arasında bulunan iletken izolasyonu ve bağıl dielektrik sabiti ϵ_{iz} ve kalınlığı d_{iz} olan olan kat izolasyonu C_d kapasitesini oluşturur (Eşitlik 17).

$$C_d = \frac{\epsilon_0 2\pi r t}{\frac{d_{il}}{\epsilon_{il}} + \frac{d_{iz}}{\epsilon_{iz}}} \quad (17)$$

Katlar arası sarımlardaki gerilim farkları doğrusal olarak artar (Eşitlik 18).

$$\left(\frac{2V}{nN_y} \right), \left(\frac{4V}{nN_y} \right), \left(\frac{6V}{nN_y} \right), \dots, \dots, \left(\frac{2(N_y - 1)V}{nN_y} \right) \quad (18)$$

Katlar arasında izolasyon malzemeleri içerisinde depolanan toplam enerji ise Eşitlik 19'da verilmiştir.

$$E = (n - 1) \frac{1}{2} C_d \left[\left(\frac{2V}{nN_y} \right)^2 + \left(\frac{4V}{nN_y} \right)^2 + \left(\frac{6V}{nN_y} \right)^2 + \dots + \left(\frac{2(N_y - 1)V}{nN_y} \right)^2 \right] \quad (19)$$

Eşitlik 20'deki ardışık sayıların karelerinin toplamı ifadesinden yararlanılarak Eşitlik 19 sadeleştirilir.

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + (k - 1)^2 = \frac{k(k - 1)(2k - 1)}{6} \quad (20)$$

Kat arası iletkenlerin kapasitelerinden meydana gelen toplam enerji:

$$E = (n - 1) \frac{1}{\sqrt{2}} C_d \frac{V^2}{n^2 N_y^2} \left[\left(\frac{2}{2} \right)^2 + \left(\frac{4}{2} \right)^2 + \left(\frac{6}{2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{2(N_y - 1)}{2} \right)^2 \right] \quad (21)$$

ifadesi ile hesaplanır.

Eşitlik 21'de gerekli sadeleştirme işlemleri yapılarak Eşitlik 22 elde edilir.

$$E = \frac{(n - 1)(N_y - 1)(2N_y - 1)C_d V^2}{6\sqrt{2}n^2 N_y} = \frac{1}{2} C_{dr} V^2 \quad (22)$$

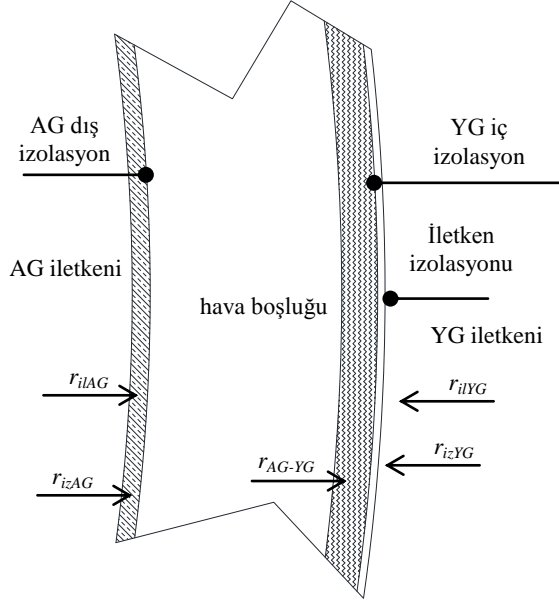
C_{dr} kat arası eşdeğer kapasite Eşitlik 23'te verilmiştir.

$$C_{dr} = \frac{(n - 1)(N_y - 1)(2N_y - 1)C_d}{3\sqrt{2}n^2 N_y} \quad (23)$$

Eşitlik 17 ve Eşitlik 23'ün toplamından elde edilen kat sargının toplam eşdeğer kapasitesinden seri kapasite elde edilir (Eşitlik 24).

$$C_s = \frac{C_t}{2N_y^2} n(N_y - 1) + \frac{(N_y - 1)(2N_y - 1)C_d}{3\sqrt{2}n^2N_y} \quad (24)$$

4.1.2.2. Paralel kapasite (Parallel capacitance)



Şekil 8- AG-YG Sargıları Arası (Insulation between LV-HV windings)

Paralel kapasite yüksek gerilim (YG) bobini ile içte kalan alçak gerilim (AG) bobini arasında meydana gelir. Eş merkezli iki silindirin oluşturduğu kapasitenin plaka alanı YG bobinini oluşturan alt bobinlerinin en alt katındaki iletkenlerin AG bobinine bakan yüzeyi kadardır. AG bobinini oluşturan çıplak iletkenlerin dış yarı çapı r_{ilAG} 'dir. İletkenin dış yüzeyinde bağıl dielektrik sabiti ϵ_{izAG} ve dış yarı çapı r_{izAG} olan izolasyon vardır. AG ve YG sargıları arasında bağıl dielektrik sabiti 1 ve dış yarı çapı r_{AG-YG} olan hava boşluğu vardır. YG bobininin iç yüzeyini bağıl dielektrik sabiti ϵ_{izYG} ve dış yarı çapı r_{izYG} olan izolasyon malzemesi ile bağıl dielektrik sabiti ϵ_{iLYG} , kalınlığı d_{iLYG} ve dış yarı çapı r_{iLYG} olan YG bobini iletken izolasyonu oluşturur (Şekil 8). Paralel kapasitesinin hesaplama yöntemi Eşitlik 25'te verilmiştir.

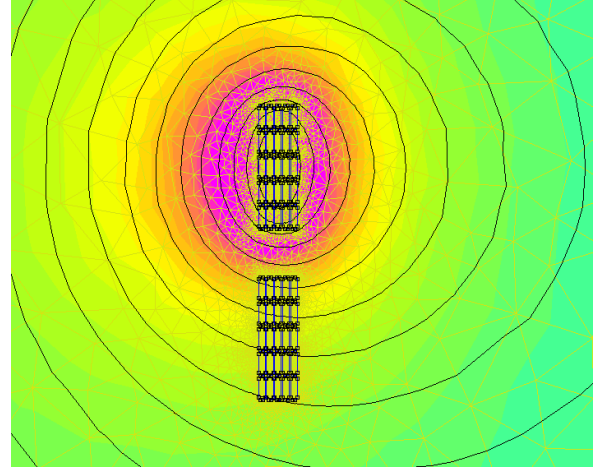
$$C_p = \frac{\epsilon_0 2\pi N_y (w + d_{iLYG})}{\frac{1}{\epsilon_{izAG}} \frac{r_{izAG}}{r_{ilAG}} + \frac{r_{AG-YG}}{r_{izAG}} + \frac{1}{\epsilon_{izYG}} \frac{r_{izYG}}{r_{AG-YG}} + \frac{1}{\epsilon_{iLYG}} \frac{r_{iLYG}}{r_{izAG}}} \quad (25)$$

4.2. Parametrelerin Sayısal Hesaplamaları (Numerical Calculation of Parameters)

Parametrelerin sayısal hesaplamasında en iyi sonuç veren yöntemlerden bir tanesi sonlu elemanlardır [15]. Bu yöntemde çalışma alanı çok sayıda alt elemana bölünerek elemanların içerisindeki enerji hesaplanır.

Bu enerjiden yola çıkarak gerilim, akım ve parametrik değerler elde edilir. Sonlu elemanlar yönteminin (SEY) sağladığı en büyük fayda düzgün geometriye sahip olmayan bölgelerin alan dağılımlarının kolaylıkla hesaplanabilir olmasıdır.

4.2.1. Endüktans (Inductance)



Şekil 9- FEMM 4.2 ile Endüktans Hesaplama (Calculation of inductance with FEMM 4.2)

SEY ile iki bobin arasında endüktans hesaplanırken bir bobine akım uygulanır. Diğer bobinden akan akım 0 olarak belirlenir ve manyetik alana maruz kalan bu bobinde endüklenen gerilim bulunur. Şekil 9'da verilen iki bobinden birincisine akım uygulanmış ve bu akımdan kaynaklanan manyetik akı çizgileri ve manyetik akı yoğunluğunun alan içerisindeki dağılımı farklı renk kodları ile verilmiştir. SEY yazılımı bu alanı üçgen şeklinde küçük parçalara ayırarak her bir üçgenin içerisindeki alanın elektromanyetik denklemlerini çözer. Alanın her noktasındaki elektromanyetik akı değeri hesaplandığı için üzerinden akım akan bobinin oluşturduğu manyetik akının alanın içerisindeki başka bir bobine olan etkisi incelenir. Böylece bir iletken üzerinden akan I akımının bölgedeki başka bir iletken üzerinde endüklediği V gerilimi elde edilir. Eşitlik 26 ile L endüktans değeri hesaplanır. Bazı SEY ile çalışan programlar ise L değerini doğrudan hesaplar.

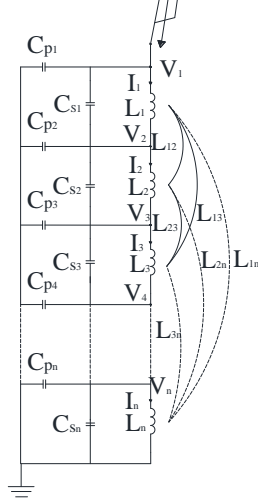
$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (26)$$

4.2.2. Kapasite (Capacitance)

SEY yöntemi ile kapasite hesaplamalarında enerji yöntemi uygulanır. Kat sargının ilk katını oluşturan iletkenlere 0 potansiyel, son katına oluşturan iletkenlere V potansiyeli uygulanır. Ara katlarda kalan iletkenlere potansiyel atanmaz ve böylece sargının içerisindeki izolasyon malzemeleri elektrik alanın içerisinde kalmış olur. Dielektrik malzemelerin içerisinde depolanan enerji SEY ile hesaplanır. Elde edilen E enerjisinden C eşdeğer kapasite değeri hesaplanır (Eşitlik 27).

$$E = \frac{1}{2} C V^2 \quad (27)$$

5. MATEMATİKSEL MODELİN KURULMASI (BUILDING A MATHEMATICAL MODEL)



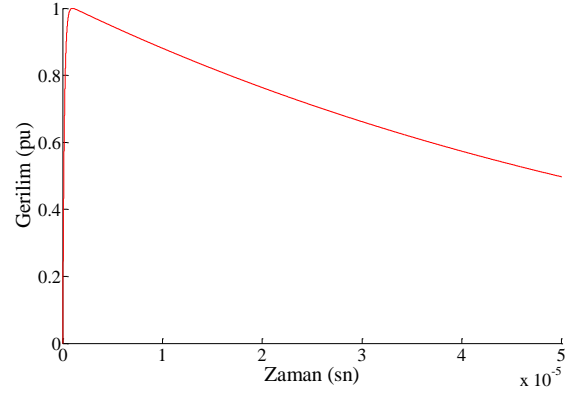
Şekil 10- L ve C Parametrelerinde Oluşan Transformatör Modeli (Model of transformer consisting of L and C parameters)

Bakır kayıpları çok az bir sönmüleme meydana getirdiği için ihmal edilir. Ayrıca yıldırım darbe gerilimi testi sırasında alçak gerilim sargısının kısa devre edilmesinden dolayı manyetik çekirdeğin bir etkisi yoktur [1]. Kuru tip transformatörlerde alçak gerilim sargısı bant sargı olması ve topraklanması nedeniyle sadece yüksek gerilim bobine ait parametrelerden oluşan transformatör modeli yıldırım darbe geriliminin dağılımını modellemek için yeterlidir. Şekil 10'da yüksek gerilim bobinini oluşturan sargı gruplarının birbirileri ile olan L endüktansı, her bir sargı grubunu oluşturan sarımların meydana getirdiği C_s seri kapasitesi ve her bir sargı grubunun toprağa karşı C_p paralel kapasitesinden oluşan kuru tip transformatöre ait yıldırım darbe geriliminin dağılımının analizinde kullanılacak LC devresi verilmiştir. Düğüm gerilimlerinden ve endüktans üzerinden akan akımlardan yola çıkılarak elde edilen denklemlerin çözümü ile gerilim dağılımı analizi yapılır [1].

Şekil 10'daki modelde, V_1 transformatöre uygulanan yıldırım darbe testinin gerilimidir. Darbe gerilimi testi standartta [4] belirtildiği şekilde Eşitlik 28'de matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$V_1 = 1.0167 (e^{-14230t} - e^{-6069100t}) \quad (28)$$

Yıldırım darbe gerilimi tepe değerine $1,2\mu\text{s}$ n içerisinde, yarılanma süresine ise $50\mu\text{s}$ n içerisinde ulaşır (Şekil 11).



Şekil 11- Yıldırım Darbe Gerilimi (Lightning impulse voltage)

Eşitlik 29'da endüktanslar üzerinden akan akımlara bağlı olarak düğüm gerilimleri verilmiştir [1].

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 &= L_{11} \dot{I}_1 + L_{12} \dot{I}_2 + L_{13} \dot{I}_3 + \dots + L_{1n} \dot{I}_n \\ V_2 - V_3 &= L_{21} \dot{I}_1 + L_{22} \dot{I}_2 + L_{23} \dot{I}_3 + \dots + L_{2n} \dot{I}_n \\ V_3 - V_4 &= L_{31} \dot{I}_1 + L_{32} \dot{I}_2 + L_{33} \dot{I}_3 + \dots + L_{3n} \dot{I}_n \\ &\vdots \\ V_n - 0 &= L_{n1} \dot{I}_1 + L_{n2} \dot{I}_2 + L_{n3} \dot{I}_3 + \dots + L_{nn} \dot{I}_n \end{aligned} \quad (29)$$

Eşitlik 30'da ise denklem takımı matris halinde verilmiştir. (30)

$$[A] V_1 + [B] [V] = [L][\dot{I}]$$

Düğüm noktalarında akımların toplamının 0 olması ilkesine dayanılarak kapasiteler üzerinden akan akımların ifadesi çıkarılır (Eşitlik 31).

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= C_{s1}(\dot{V}_2 - \dot{V}_1) + C_{p2}\dot{V}_2 + C_{s2}(\dot{V}_2 - \dot{V}_3) \\ I_2 - I_3 &= C_{s2}(\dot{V}_3 - \dot{V}_2) + C_{p3}\dot{V}_3 + C_{s3}(\dot{V}_3 - \dot{V}_4) \\ I_3 - I_4 &= C_{s3}(\dot{V}_4 - \dot{V}_3) + C_{p4}\dot{V}_4 + C_{s4}(\dot{V}_4 - \dot{V}_5) \\ &\vdots \\ I_{n-1} - I_n &= C_{s_{n-1}}(\dot{V}_n - \dot{V}_{n-1}) + C_{pn}\dot{V}_n + C_{sn}\dot{V}_n \end{aligned} \quad (31)$$

Eşitlik 32'de ise denklem takımı matris halinde verilmiştir.

$$[-B^T] [I] = [C][\dot{V}] + [F] \dot{V}_1 \quad (32)$$

Eşitlik 31'deki matrisin türevi alınarak (Eşitlik 33) $[\dot{I}]$ matrisi yalnız bırakılır (Eşitlik 34) ve Eşitlik 30'daki yerine konur (Eşitlik 35).

$$[-B^T] [\dot{I}] = [C][\dot{V}] + [F] \dot{V}_1 \quad (33)$$

$$[\dot{I}] = -[B^T]^{-1} [C][\dot{V}] - [B^T]^{-1} [F] \dot{V}_1 \quad (34)$$

$$\begin{aligned} [A] V_1 + [B] [V] \\ = [L] \left([-B^T]^{-1} [C][\dot{V}] + [-B^T]^{-1} [F] \dot{V}_1 \right) \end{aligned} \quad (35)$$

$[\dot{V}]$ matrisi yalnız bırakılarak LC devresinin çözümü elde edilir (Eşitlik 36). Bu denklem Runge-Kutta-Nystrom yöntemi ile kolaylıkla çözülebilir.

$$[\dot{V}] = -[C]^{-1}[B^T][L]^{-1}[A] V_1 - [C]^{-1}[B^T][L]^{-1}[B] [V] - [C]^{-1}[F] \dot{V}_1 \quad (36)$$

$t=0$ anında [1]:

$$[\dot{V}]_{t=0} = [C]^{-1}[F] \dot{V}_{t=0} \quad (37)$$

olarak bulunur.

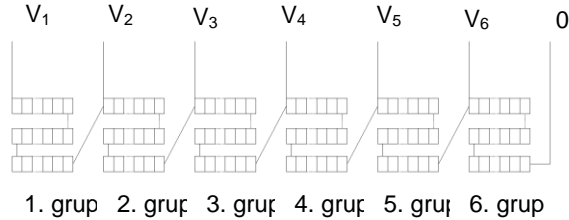
6. YAPILAN ÇALIŞMALAR (STUDIES)

6.1. Modellemede Kullanılan Kuru Tip

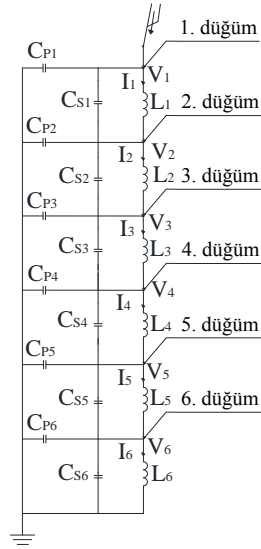
Transformatörün Özellikleri (Specification of Dry Type Transformer Used for Modelling)

- Güç : 1000 kVA
- Gerilim : 22000/400 V
- Yıldırım darbe gerilimi : 125 kV
- Sargı malzemesi : AL
- İzolasyon malzemesi : Epoksi reçine
- Yüksek gerilim bobini sarım sayısı : 1534
- Yüksek gerilim bobini alt sargı grupları adedi : 6 (4x 260 sarım + 2x247 sarım)
- İletken ölçüleri : 7mm x 2mm

6.2. Matematiksel Modelin Kurulması (Building A Mathematical Model)



Şekil 12- Modelde Kullanılan Tranformatörün Sargı Sarım Şekli (Schematic of transformer's winding used in model)



Şekil 13- Transformatörün LC Modeli (LC model of transformer)

6 alt sargı grubundan oluşan transformatörün LC modelinde 6 adet öz endüktans ve 30 adet ortak endüktans olmak üzere 36 adet L elemanı, 6 adet seri kapasitesi ve 6 adet toprağa karşı paralel kapasitesi mevcuttur. Transformatörün sarım şekli Şekil 12'de ve LC modeli Şekil 13'de verilmiştir.

6.2.1. Parametreler (Parameters)

Parametrelerin her biri 4. bölümde verilen analitik yöntemler ve SEY ile hesaplanmıştır. Endüktans parametrelerin analitik hesaplama sonuçları Çizelge 1'de, sayısal hesaplama sonuçları ise Çizelge 2'de verilmiştir. Analitik ve sayısal hesaplamalarda elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, endüktans değerlerini daha kısa sürede hesaplayabilmek için SEY yerine analitik yöntemi kullanarak doğru sonuca ulaşmak mümkündür.

Çizelge 1- Analitik Yöntemlerle Hesaplanan Endüktans Değerleri (Inductance values calculated by the analytical methods)

mH	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
L_1	41,2	12,5	4,01	1,66	0,78	0,44
L_2	12,5	41,2	12,5	4,01	1,6	0,8
L_3	4,01	12,5	41,2	12,5	3,87	1,65
L_4	1,66	4,01	12,5	41,2	12,1	4,01
L_5	0,78	1,6	3,87	12,1	38,0	11,7
L_6	0,44	0,8	1,65	4,01	11,7	38,0

Çizelge 2- Sayısal Yöntemlerle Hesaplanan Endüktans Değerleri (Inductance values calculated by numerical methods)

mH	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
L ₁	40,3	12,6	4,01	1,66	0,78	0,45
L ₂	12,6	40,3	12,6	4,02	1,6	0,8
L ₃	4,01	12,6	40,3	12,6	3,88	1,65
L ₄	1,66	4,02	12,6	40,3	12,22	4,04
L ₅	0,78	1,6	3,88	12,3	37,1	11,9
L ₆	0,45	0,8	1,65	4,04	11,9	37,1

Çizelge 3 ve 4'ten de görüleceği gibi kenar etkisi nedeniyle C_p parametresi için analitik hesaplamalar ile sayısal hesaplamalar arasında farklılıklar meydana gelmektedir. İletken kenarlarının kapasiteye olan katkısı analitik hesaplamalarda dahil edilememektedir. C_s parametresi için analitik ve sayısal hesaplamalardaki farklılıkların kaynağı ise köşeleri yuvarlanmış iletken kullanılmasıdır. Köşeleri yuvarlanmış iletken kullanılması nedeniyle iki iletken arası ortalama mesafe artmıştır. Köşeleri yuvarlak ve ortası düz iki elektrodun kapasitesinin hesaplanması analitik yöntemle tam olarak mümkün olmadığından analitik hesaplamalarda elektrod yüzeyleri düzlem kabul edilmiş ve bu nedenle de kapasite değerleri sayısal hesaplamalara göre yüksek çıkmıştır.

Çizelge 3- Analitik Yöntemlerle Hesaplanan Kapasite Değerleri (Capacitance values calculated by analytical methods)

(pF)	1.grup	2.grup	3.grup	4.grup	5.grup	6.grup
C _p	22,2	22,2	22,2	22,2	21,1	21,1
C _s	375,3	375,3	375,3	375,3	355,2	355,2

Çizelge 4- Sayısal Yöntemlerle Hesaplanan Kapasite Değerleri (Capacitance values calculated by numerical methods)

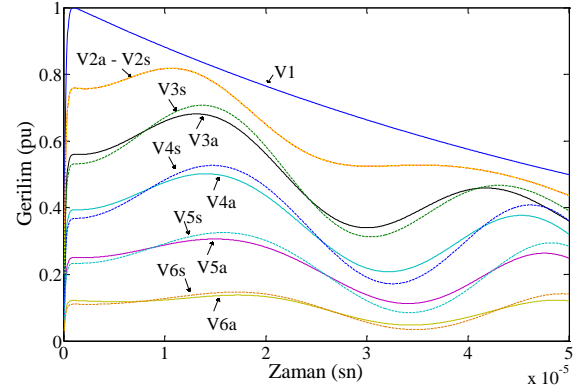
(pF)	1.grup	2.grup	3.grup	4.grup	5.grup	6.grup
C _p	36,2	36,2	36,2	36,2	39,74	35,7
C _s	371,8	371,8	371,8	371,8	351,9	351,9

6.2.2. Gerilim dağılımı (Distribution of voltage)

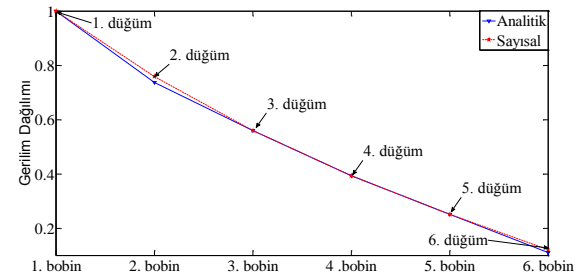
Analitik ve sayısal parametre hesaplama sonuçları ve Eşitlik 35 kullanılarak Şekil 14'te düğüm noktalarının toprağa karşı gerilim dağılımını verilmiştir. V₁ gerilimi, uygulanan gerilim olup analitik ve sayısal hesaplamalarda aynıdır. Şekil 13'de verilen düğüm noktalarına göre grafikler elde edilmiş; gerilimler, düğüm numarası ve analitik parametrelerden elde edilen grafikler a harfi ile, sayısal hesaplamalardan elde edilenler ise s harfi ile ifade edilmiştir. Düğüm noktalarındaki gerilimlerin en yüksek değerleri test geriliminin en yüksek değerini aşmamaktadır. Bobinin düğüm noktalarındaki toprağa karşı zorlanmalar standartta belirtilen gerilimin zorlanmasından daha azdır.

Kat sargı sarım tekniğine göre sarılmış olan bir kuru tip transformatörün sargıların arasındaki gerilim dağılımı

analitik ve sayısal parametrelere göre elde edilmiştir. Bu verilere göre bobinin iç yapısındaki gerilim dağılımının V₁ kaynak geriliminden farklılaştığı görülmektedir. Bobinlerin sargı içerisindeki konumuna göre düğüm noktalarındaki gerilimler daha yüksektir. Örneğin lineer gerilim dağılımında V₃ düğüm noktasının gerilimi en yüksek 0,66 pu olması gerekirken sayısal hesaplamalarda 13,4 µs anda 0,682 pu değeri elde edilmiştir. V₁ kaynak gerilimi doğrusal iken bobinlerin içerisindeki gerilim dağılımında osilasyon meydana gelmektedir.

**Şekil 14-** Yıldırım Darbe Geriliminin Alt Bobinlerdeki Dağılımı (Lightning impulse voltage distribution in the sub-coils)

Şekil 15'te düğüm noktalarının birbirleri arasındaki gerilim farkları verilmiştir. Bobinlerin düğüm noktalarındaki gerilimler birbirlerine göre lineer olarak dağılmaktadır. Bu nedenle bobinler arasındaki zorlanmalar için özel önlem almaya gerek kalmamaktadır. Gerilim dağılımının eğiminin bazı bobinler arasında büyük olması yani lineer dağılmaması durumunda ilgili bobinlerde elektriksel zorlanma daha büyük olacağı için ayrıca önlemler alınması gerekmektedir. Model transformatörde bobin izolasyonunun test gerilimine göre tasarlanması izolasyon dayanıklılığı açısından yeterlidir.

**Şekil 15-** 1µs Anında Düğümlerdeki Gerilim Dağılımı (Voltage distribution in the nodes at 1µsec)

7. SONUÇ (RESULT)

Kat sargı yöntemi ile sarılmış epoksi reçineli kuru tip transformatör bobinindeki gerilim dağılımı incelemesi sonucunda bobine ait LC devresinin analizi için L ve C

parametreleri analitik ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan analitik hesaplamaların sayısal hesaplamalarla tutarlı olduğu görülmektedir. Bu parametreler ile devrenin düğüm gerilimleri analizi literatürde yer alan yöntemle yapılarak bobin içerisinde gerilim dağılımı incelenmiştir.

Bu çalışma ile kat sargılı kuru tip transformatörün YG bobini içerisindeki yıldırım darbe analizi yapılarak darbe geriliminin bobinin içerisinde meydana getirdiği gerilim zorlanmaları tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Miki A., Hosoya T., Okuyama K., “A Calculation Method For Impulse Voltage Distribution and Transferred Voltage in Transformer Windings”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no.3, (1978, May/June).
- [2] Ang S.P., S. M., “Modelling of High Frequency Characteristic of a 6.6 kV Transformer”, *Universities Power Engineering Conference (UPEC)* (s. 1-6). London: IEEE, (2012).
- [3] J. Smajic, T. Steinmetz, M. Rüegg, Z. Tanasic, R. Obrist, J. Tepper, B. Weber, M. Carlen, “Simulation and Measurement of Lightning-Impulse Voltage Distributions Over Transformer Windings.” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, 553-556, (2014).
- [4] IEC International Standard, IEC 60076-3, “Power Transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air”, *International Electrotechnical Commission (IEC)*, Geneva, Switzerland, (2004).
- [5] Smajic J., Obrist R., Rüegg M., Cranganu-Cretu B., Roy C., Weber B., Rahimpour E. “Lightning impulse modeling and simulation of dry-type and oil-immersed power and distribution transformers” (2014).
- [6] Lewis, T., “The Transient Behavior of Ladder Networks of the Type Representing Transformer and Machine Windings”, *Proc. IEEE*, vol. 101 pt. II, pp. 541-553, (1954).
- [7] Dent BM, H. E., “A Method of Analysis of Transformer Impulse Voltage Distribution Using a Digital Computer”, *IEEE Proceedings*, 445-459, (1958).
- [8] Fergestad PI, H. T., “Inductances for Calculation of Transient Oscillations in Transformers”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 500-509,(1974).
- [9] Stein, M., “A Study of the Initial Surge Distribution in Concentric Transformer Windings”, *AIEE Transactions*, 877-892, (1964).
- [10] Fergestad PI, H. T., “Transient Oscillations in Multiwinding Transformers”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 500-509, (1974).
- [11] Vahdi B., E. M., “Transient Simulation of Cast Resin Dry Type Transformers Using FEM”, *European Transactions on Electrical Power*, 363-379, (2011),
- [12] Alexandru B.M., M. M., “Calculation methods for lightning impulse voltage distribution in power transformers”, *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)* (s. 71-76). Bran: IEEE, (2014).
- [13] Bhuyan K., C. S., “Surge Modelling of Transformer Using Matlab-Simulink”, *India Conference (INDICON)* (s. 1-4). Assam: IEEE, (2009).
- [14] O'Loughlin, J. P., “Calculation of the Inductance of a Circular Coil Consisting of any Number of Coaxial Turns, Each Individual Turn being of any Wire Size Located in Parallel Planes and of any Spacing to the Other Turns.”, *Circuit and Electromagnetic System Design Notes*. Kirtland, ABD. (1998).
- [15] Kulkarni S.V., Khaparde S.A. “Transformer Engineering”, cilt no:1, *CRC Press*, ISBN 978-1-4398-5377-1, New York, (2004).