

39130

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE AŞIRI GERİLİM DAĞILIM SORUNU VE ALINAN ÖNLEMLER

39130

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elek. Müh. Sadık ŞENOL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21 Ocak 1993

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Şubat 1993

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nurdan GÜZELBEYOĞLU

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nesrin TARKAN

Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarımı destekleyen tez danışmanım Prof. Dr. Nurdan GÜZELBEYOĞLU'na, tezin yazılımı sırasında yardım eden Selma ŞENOL'a, Elek. Müh. Ertan HACIAHMET'e destek ve yardımlarından ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

İstanbul, Ocak 1993

Sadık ŞENOL

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
SUMMARY.....	vi
1.BÖLÜM GİRİŞ	1
2. BÖLÜM YÜRÜYEN VE DURAN DALGALAR.....	5
3. BÖLÜM TRANSFORMATÖR SARGISININ TOPLU SABİTELİ EŞ- DEĞER DEVRESİ	9
3.1- Başlangıç Gerilim Dağılışı	9
3.2- Son Gerilim Dağılışı	12
3.3- Gerilim Salınımları	13
4. BÖLÜM KLASİK WAGNER MODELİNİN İNCELENMESİ VE AŞIRI GERİLİM DAĞILIŞI HESABIYLA İLGİLİ SON ARAŞTIRMALAR.....	16
5. BÖLÜM TRANSFORMATÖR SARGILARINDA AŞIRI GERİLİM DAĞILIŞI.....	18
5.1- Seri ve Paralel Kapasiteler	18
5.2- Öz ve Ortak Endüktanslar	42
6. BÖLÜM BİR TRANSFORMATÖRÜN DAĞILMIŞ SABİTELİ EŞDEĞER DEVRESİNDE ELEMAN SAYISININ BELİRLENMESİ.....	48
7. BÖLÜM HOMOJEN OLMAYAN SARGILARDAKİ GERİLİM DAĞILIŞI.....	50
8. BÖLÜM TRANSFER EDİLEN AŞIRI GERİLİMLERİN HESABI.....	57
9. BÖLÜM TRANSFORMATÖRLERDE AŞIRI GERİLİME KARŞI KORUMA.....	74
9.1 - Sargıya Hat Potansiyelindeki Ekran Eklenmesi Durumunda Gerilim Dağılımı.....	78
9.2 - Lineer Gerilim Dağılışı Oluşturmak İçin Gerekli Olan Ekran Kapasitelerini Sağlayacak Olan Ekranın Sargıyla Arasındaki Açının Hesabı	81

SONUÇ	87
KAYNAKLAR.....	88
ÖZGEÇMİŞ	89



ÖZET

Çalışmada enerji iletim hatlarında her türlü elektriksel iç ve dış etkilere açık olan güç transformatörlerin sargılarında oluşan aşırı gerilim dağılışı bulunmuştur. Gerilim dağılışı belirleyen transformatör sargı kapasitelerinin matematiksel ifadeleri çıkarılmıştır. Daha sonra başlangıç gerilim dağılışı düzelten yöntemler incelenmiştir. Önce seri kapasitenin artırılması yöntemi ve buna bağlı olarak sargıda oluşabilecek düzgünsüzlüğün etkileri örneklerle incelenmiştir. Ardından bu yöntemlerden biri olan ve pratikte de uygulama bulan toprağa karşı paralel kapasitelerin etkilerini yok eden yöntemin matematiksel bağıntıları çıkarılmış ve ekranın sargıyla yapması gereken açı hesaplanmıştır. Çıkan sonucu bir örnek transformatör üzerinde uygulayarak gerçekte yapılanla bir uyum gösterip göstermediği kontrol edilmiştir.

SUMMARY :

"THE PROBLEM OF OVERVOLTAGE DISTRIBUTION ALONG POWER TRANSFORMERS AND MEASURES TO BE TAKEN"

First of all, the main purpose of this study is to investigate the problem of the overvoltage distribution along a power transformer. Since a transformer is subjected to various external and internal harmful effects, optimum solution for this problem, that is to construct a transformer which withstands overvoltages and also works in normal conditions without increasing cost of transformer, should be found. So far various methods of the transformer protection, for example, different kinds of dischargers, special spark gaps called co-ordinators, proper choice of the transmission line route, the reactive coils and capacitors, were employed. These ones are not used today, since experience has shown and subsequent analysis has confirmed that the efficiency of such protection is insufficient. Nowadays, concepts of reinforcement of the input and output coil insulation, interleaving coil windings and capacitive protection are argued.

In the first chapter, this study investigates overvoltage waves along a transformer windings on the basis of standing and travelling waves and according to Wagner theory, starting from the sets of differential equations describing the transient process and using the simplified mathematical model of a winding, the equations giving the voltage distribution within the transformer winding are given. In this chapter depending on if the winding end is open or earthed, the initial and the final voltage distribution are studied on and found as follows:

For at one end earthed winding; the initial voltage

$$\frac{u(\frac{x}{l}, 0)}{U} = \frac{\sinh \alpha (1 - \frac{x}{l})}{\sinh \alpha}$$

the final voltage

$$\frac{u}{U} = (1 - \frac{x}{l})$$

For an open end winding; the initial voltage

$$\frac{u(\frac{x}{l}, 0)}{U} = \frac{\cosh \alpha (1 - \frac{x}{l})}{\cosh \alpha}$$

the final voltage

$$\frac{u}{U} = 1$$

Here:

U : Terminal voltage, [kV]

l : the full winding length, [m]

x : the coordinate of a given point of the winding, [m]

$$\alpha = l \sqrt{\frac{C}{K}} = \sqrt{\frac{C_r}{K_r}}$$

$C_r = C \cdot l$ the resultant parallel capacitance, [F]

$K_r = K/l$ the resultant series capacitance, [F]

And then voltage oscillations taking place between these two processes are found out. The primary importance of the Wagner model and of the calculation based on it, is the very informative qualitative picture provided by the phenomena taking place in transformer windings under the effect of steep-front overvoltage waves. Also from a practical point of view, the factor calculated from the resultant shunt and series capacitances is of great significance, since conclusions can be drawn from it also as to the uniformity of initial voltage distribution within the winding and to the liability of the latter oscillations. This method, however, is unsuitable for the purpose of voltage distribution calculations required for the insulation design. The infinitesimal homogenous winding model proposed by Wagner, where the series and parallel capacitances and the self-inductances are alone taken into account, idealizes the real conditions very much. Therefore Wagner's classic model is also criticized. As a matter of fact, a real transformer winding is composed of a finite number of elements (e.g. discs, pairs of discs), therefore it is more obvious to present it by a model consisting of a finite number of elements than by an infinitesimal model. Thus in the case of disc type transformer windings, it is convenient to consider each disc, each pair of discs or each group of discs as a separate element. Further, real transformer windings are not homogeneous in every case but generally at the beginning and end of the winding, and sometimes inside it, often contain winding elements (discs) in which the number of turns, geometrical arrangement or shape deviates from the majority of elements constituting the winding. The Wagner model also simplifies real condition by neglecting the mutual inductance within the winding and the damping effect of eddy current losses on voltage oscillations. Finally, in the majority of cases, it is not a single winding that is to be investigated, but a transformer or a winding system consisting of two or more windings. Then according to these opinions overvoltage distribution along a transformer winding is

investigated.

As it is known that there are capacitances present between transformer windings, series capacitances, and earthed parts (core, tank, etc.), grounded or parallel capacitances, within each winding between discs, turns and layers, and between individual coils. These series and parallel capacitances determine the voltage distribution. Therefore expression of the series and the parallel capacitances are found out in details. The series capacitance of normal disc windings is,

$$K = \frac{27,8D}{N} \left[\frac{\epsilon_t (h + 2\delta_t)}{2n\delta_t} + \frac{4}{3} \frac{r + \delta_d}{\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}} \right] 10^{-12} F$$

and the parallel capacitance between two concentric cylindrical windings of heights H_1 and H_2 is

$$C = \frac{27,8D \frac{H_1 + H_2}{2}}{\frac{\delta_o}{\epsilon_o} + \frac{\delta_s}{\epsilon_s}} \cdot 10^{-12} F$$

Here,

- D : the mean winding diameter, [m]
- N : the number of layers
- n : the number of turns in a layer
- h : the size of copper conductor used for calculating the turn capacitance, [m]
- δ_t : the thickness of inter turn insulation, [m]
- ϵ_t : its permittivity, [F/m]
- r : radial size of winding, [m]
- δ_d : the thickness of spacers between discs, [m]
- ϵ_d : the resultant permittivity of (oil and solid) insulation of thickness δ_d , [F/m]
- δ_o : the thickness of oil insulation between the surface of two cylinders, [m]
- δ_s : the thickness of solid insulation between the two surfaces, [m]
- ϵ_o : the permittivity of the oil insulation, [F/m]
- ϵ_s : the permittivity of the solid insulation, [F/m]

Meanwhile, since one of the methods of increasing the series capacitance is interleaving disc windings, series capacitances of interleaved disc windings are studied. The series capacitance of a normal disc winding can be increased by several orders of magnitude by interleaving the turns, i.e. by removing geometrically adjacent turns farther away from each other electrically, thereby increasing the voltage between adjacent turns. Although it is not necessary to reinforce the interturn insulation. The series capacitances of windings wound of several wires in parallel can be influenced by modifying the arrangement of the parallel wires. If these parallel wires line one next to the other, the series capacitance remains

unchanged. If, however, the wires in parallel are separated from one another the series capacitance of the winding increases considerably. Thus the series capacitance can be varied in the ratio of 1/32 without modifying either its geometrical dimensions and operating characteristics. For the purpose of calculation the voltage distribution more accurately than Wagner self and mutual inductances and damping resistances are taken into account.

As a requirement of primary importance, the voltage oscillations calculated on the basis of the model should as closely as possible approach the oscillations taking place in the real winding or winding system. Therefore it is important to choose the right number of element in the model. Because the higher the number of winding sections, the higher the probability of making an error in determining characteristics of individual elements. Experience has shown that for the purpose of voltage distributions calculations, when not only the initial distribution but also the voltage oscillations are to be determined, it is not expedient to use models consisting of more than 10 - 12 elements. This is enough for calculation of large transformers. A voltage distribution satisfying practical requirements can be calculated within an accuracy of + 20 %.

The discs next to the line terminals of disc type transformers often differ from the discs inside the winding. Generally, the outermost discs contain a reduced number of turns for constructional reasons, to provide space for end insulation and to reinforce the insulation to cope with the higher mechanical stresses arising here. This kind of inhomogeneous design of windings may considerably influence the voltage distribution. Generally, it is sufficient to examine the effect of inhomogeneity by checking the initial voltage distribution, i.e. on the basis of a network containing capacitances only. The effect on the initial voltage distribution of an inhomogeneity arising at the initial section and final section of the winding are calculated on the basis of the n-element capacitance network. An inhomogeneity in the initial section of the winding primarily affects the voltage distribution prevailing at the initial section of the winding and has a minor influence on its remaining sections. Similarly, a winding-end inhomogeneity will mainly modify the stresses arising there, and will but slightly affect the voltage distribution of the initial section of the winding.

Generally, two or more windings are mounted on a limb of a transformer. An overvoltage directly affecting one of the windings will, due to existing capacitance and inductive couplings, also give rise to overvoltage in the other windings, thereby also indirectly jeopardizing the latter. The investigations described here, mainly serving the purpose of demonstrating the nature of the phenomenon, relate to single phase transformer containing two homogeneous concentric windings. One winding of the transformer being investigated is that directly hit by the overvoltage (referred to as impulsed), while the other is the winding not directly affected (referred to as non-impulsed). The case is investigated, depending on whether one end of the non-

impulsed winding is earthed or not, the five different connections are distinguished. As regards initial voltage distribution, three of them are found as identical. Therefore just three of them are examined. For these 3 basic cases, 3 different sets of equations are written, considering the respective boundary conditions. It is convenient to treat the three cases in common by means of matrix calculus and to express the result also in matrix form. Starting from the relations given in this section and regarding the equations derived for winding capacitances, the voltage distribution developing along the impulsed and non-impulsed windings can be determined by computer for all concrete cases. The above method is not only suitable for describing the phenomenon of voltage transfer, but by its means the transferred voltages of given winding systems divided in not too many elementary sections and consisting of two homogeneous windings can be calculated. In systems consisting of more than two windings or when the number of elementary windings is too high, instead of solving the matrix equations directly, it is more practical to employ some method utilizing computer capacity more economically, e.g. some iteration method or Gaussian elimination.

In the last chapter, transformer overvoltage protection (especially capacitive one) is investigated. As it is known that there are two kinds of transformer protection from overvoltages. They are external and internal protection. The object of external protection is to render sufficiently harmless the wave hitting the transformer, by lowering its amplitude and making it flatter. Internal transformer protection from overvoltages includes the required reinforcement of the input and output coil insulation where the maximum voltage gradients can be expected, the capacitive protection of transformers and interleaving coil windings. In transformers for 110 kV and higher, in addition to coil end insulation, capacitive protection is used so that overvoltage pulses are distributed along the winding approximately in the same manner as the final voltage distribution, i.e. sufficiently uniformly. The idea of capacitive protection consists in the following. If a winding could be made so that the parallel (grounded) capacitance is

$$C=0$$

we would have, for α

$$\sqrt{\frac{C}{K}} = 0$$

The case of " $\alpha = 0$ " corresponds uniform distribution. Unfortunately, it is physically impossible to eliminate the grounded capacitances but it is possible to compensate the currents required for charging these capacitances with the currents flowing from the line through a system of screening protective capacitors C_s connected to the winding. The protective capacitor has the form of a special screen made of an insulating material with a metal-coated surface and connected to the line end of the winding. The important thing is the appropriate choice of the screening capacitance and the screening angle between screen and the surface of the winding.

In this method the equation giving the screening capacitance is,

$$C_k = C \left(\frac{n}{k} - 1 \right) \quad k=1 \dots n-1$$

and the equation giving the screening angle necessary for obtaining the above capacitance is

$$\theta = \text{Arctan} \left(\frac{2\pi\epsilon r_1}{C_k \left(k - \frac{1}{2} \right)} \right)$$

Here,

C : Winding parallel capacitance, [F]

ϵ : Permittivity of oil and solid, [F/m]

r_1 : The radius of mean winding, [m]

n : The number of division in the winding,

k : The number of division belonging to the screening capacitance to be found,

And then in order to prove that the equation investigated for the angle is right, some data of a transformer to be protected are taken and as it is expected to be small, it is found as a small angle. It is a general practice to assume that it is zero degree and to wind the screen parallel to the winding.

1.BÖLÜM GİRİŞ :

Transformatörler bir taraflarından uzak mesafelere enerji ileten hatlara bağlı olduklarından, şebekelerde meydana gelen çeşitli aşırı gerilimlere maruz kalırlar.

Aşırı gerilimleri oluş şekillerine göre 3 ana grupta toplayabiliriz.

- 1- Devre açıp kapama sonucu oluşan iç aşırı gerilimler,
- 2- Atmosferik etkenlerden dolayı oluşan dış aşırı gerilimler,
- 3- Alternatif akım tesislerinde işletme sırasında toprak kısa devrelerinden dolayı oluşan aşırı gerilimler,[1]

Devre açıp kapama sonucu oluşan impuls şeklindeki gerilim dalgalanmalarının frekans spektrumu birkaç bin Hz'e ve atmosferik etkenler (yıldırım düşmesi gibi) sonucu ortaya çıkan yürüyen dalgaların darbe gerilim frekans spektrumu birkaç yüz Hz'e kadar ulaşıyor. Transformatör sargılarının kapasitesi gücün iletiildiği frekanslarda bir önemi olmamasına karşın bu tür yüksek frekanslı olaylar incelenirken hesaba katılmalıdır. Transformatörde şu tipde kapasiteler mevcuttur: Sargıların demir çekirdek, tank gibi topraklanmış kısımlara karşı kapasitesi, disk, sargı ve tabakaların arasındaki kapasite ve herbir bobinin kapasitesi. Bu kapasiteler sebebiyle basamak şeklindeki aşırı gerilimin dağılışı lineer olmayacaktır. Yani diskler veya sargılar arasındaki yalıtkanın zorlandığı gerilim, sargı-toprak arası delinme zorlanması ve herbir sargının birbirine karşı delinme zorlanması gibi çeşitli bölümlerin gerilim dağılışı normal çalışmasındaki gerilim dağılışıdan farklı olacaktır.

Bir aşırı gerilim dalgası nötr ucundan topraklanmış bir transformatörün

yüksek gerilim sargısına geldiğinde ilk anda sargı boyunca gerilim dağılımı doğrusal değildir (başlangıç gerilim dağılımı). Fakat bir zaman sonra bu gerilim dağılımı doğrusal olur (son gerilim dağılımı). Başlangıç gerilim dağılımından son gerilim dağılımı oluşana kadar sargı içinde serbest titreşimler meydana gelir. Eğer sargı boyunca başlangıç gerilim dağılım eğrisi son gerilim dağılım eğrisinden oldukça uzakta olacak şekilde farklı ise serbest titreşimlerin genlikleri çok büyük olur. Serbest titreşimlerin genliklerinin bu ölçüde büyük olması transformatör sargısında komşu sarımlar ve bobinler arası dielektrik zorlanmaların artmasına dolayısıyla yalıtım malzemelerinin delinerek sargının kısa devre olmasına yol açar.

Transformatörde aşırı gerilim dağılışını incelenmesinde; gücün iletildiği normal frekanslarda sargının endüktansı ve direnci yanında ihmal edilen toprağa karşı kapasitesi aşırı gerilimde gerilimin zamana göre değişimi çok büyük olduğundan ihmal edilemez. Hatta başlangıç gerilim dağılımında sargının endüktansına sonsuz gözü ile bakıp, gerilim dağılımının yalnız kapasiteler üzerinde meydana geldiği düşünülür. Yapılan hesaplara göre aşırı gerilimin sargı kapasitesindeki ilk andaki dağılımı birkaç yüz mikro saniyede oluşur. Bu da ilk anda bobin kapasitelerinden giderek gerilim dağılışını incelemek için yeterli bir süredir.

Kapasitelerin ve öz endüktansların tek başına hesaba katıldığı, klasik Wagner dağılmış sabiteli sargı modeli gerçek koşulları çok fazla idealleştirmektedir: Gerçek transformatör sargıları her zaman homojen dağılmamıştır. Genellikle sargı başında ve sonunda hatta içinde sargının diğer elemanlarından farklı şekilde veya geometrik düzenlemede, farklı sarım sayısına sahip elemanlara rastlanır. Ayrıca klasik Wagner modeli mıknatıslanma akımı kayıplarının söndürücü etkisini ve sargı içindeki ortak endüktansları ihmal ederek gerçek koşulları basite indirgemiş bir modeldir. İncelenmesi gereken tek bir sargı değil birçok durumda bir transformatör veya 2 yada daha fazla sargıdan oluşmuş bir sargı sistemidir.

Bütün yüksek gerilim sargısının birim uzunluğa düşen toprağa karşı

kapasitesini C ve birim uzunluğa düşen seri kapasitesini K ile gösterirsek

$$\sqrt{\frac{C}{K}} = \alpha \dots \left[\frac{1}{m} \right]$$

olarak tanımlanır. $\alpha = 0$ için başlangıç gerilim dağılımı doğrusaldır. Yani K'yı büyütürsek veya C'yi küçültürsek doğrusala yakın bir başlangıç gerilim dağılımı elde etmek mümkündür. K'yı büyütme için sargı izolasyonu kuvvetlendirilir. C'yi küçültmek için ise, sargıdaki elektrostatik alan dağılımına etki edilir. Bunun için de sargının çeşitli yerlerine ekranlar konulur. Sargı seri kapasitesinin büyütülmesi veya sargının toprağa karşı kapasite etkisinin küçültülmesiyle ilgili birçok çalışmalar yapılmış ve pratikte büyük güçlü transformatörlerde kullanılan birçok konstrüktif düzenler geliştirilmiştir.

Sargının seri kapasitesinin büyütülmesi, sargıyı oluşturan bobinlerin karşılıklı kapasitelerinin ve sarımlar arası kapasitelerinin büyütülmesi ile olur. Bunu bütün yüksek gerilim sargısı boyunca yapmak maliyeti çok yükseltir. Bu sebepten, pratikte zaman zaman dielektrik zorlanmaların çok olduğu giriş bobinlerinde yalıtım kuvvetlendirilir. Bu önlem sargı seri kapasitesinin çok az büyütülmesine karşılık, sargı radyal genişliği bütün bobinlerde eşit tutulmak istendiğinden yalıtım kuvvetlendirildiği yerlerde sarım sayısının değişmesine yol açar. Sarım sayısının değişmesi ise yalıtımın kuvvetlendirildiği yerlerde sargı empedansını değiştirir. Bu nedenle sargıda girişte küçük ve sonra gittikçe artan bir endüktans dağılımı meydana gelir. Bu ise empedansın değişmesine ve empedansın değiştiği yerlerde aşırı gerilimin yansımaya sebep olur.

Seri kapasiteyi artırmanın diğer bir yöntemi de sarımları birbirinden ayırmak diğer bir deyişle geometrik olarak birbirine komşu sarımları elektriksel olarak birbirinden ayırarak normal disk sargılarının seri kapasitesi birkaç katına çıkarılabilir. Sarımları birbirinden ayırmak komşu sarımlar arası gerilimi artıracaktır. Gerilim büyümesine rağmen sarımlar arası yalıtımı bir önceki duruma göre güçlendirmeye gerek yoktur. Hatta bazı durumlarda maliyetten tasarruf

sağlanabilir. İlk zamanlarda sargı içindeki gerilim dağılışıını hesaplamak için kullanılabilecek güvenilebilir metodlar yoktu. Bu sebeple sargıda oluşması beklenen aşırı gerilim zorlanmasına karşı normal disk sargılarında, sargının yalıtımı kuvvetlendirilirdi. Fakat yine de oluşacak aşırı gerilime karşı yalıtıma yeterli dayanımı sağlama problemi çözülemedi. Buna karşılık sarımları birbirinden ayırarak, yani çeşitli yerlere serpiştirerek, sarımların yalıtımında herhangi bir güçlendirmeye gerek duymaksızın, güç frekansında ve aşırı gerilimdeki zorlanmanın her ikisine birden yeterli dayanıma sahip olan sargılar tasarlanabilir.



2.BÖLÜM - YÜRÜYEN VE DURAN DALGALAR : [2]

Şekil 2-1'de homojen dağılmış tek tabakalı bir transformatör sargısında sözü edilen kapasitelerin etkisi görülmektedir. Sargılarla demir çekirdek arasındaki kapasite C_1 ve komşu sargılar arasındaki seri kapasite K_1 ile gösterilmiştir. Bu tip bir sargının basitleştirilmiş bir matematik modeli endüktans, seri ve paralel kapasiteden oluşan gözlü bir devredir. (Şekil 2-2) Bu model basitleştirilmiş enerji iletim hattı eşdeğer devresinden seri kapasitenin olması sebebiyle farklılık gösterir. Şekil 2-3'de herbirinin uzunluğu dx olan iki sargı parçası ele alınmıştır. Birim uzunluktaki sargının endüktansı L (H/m), paralel kapasitesi C (F/m) ve seri kapasitesi K (Fm) ile gösteriliyor. Şekil 2-3'deki devreki işaretlemelerin yönleri dikkate alınarak ve Kirchof Kanununa göre sargıda olan geçici olayı ifade eden diferansiyel denklemler şu şekilde olur.

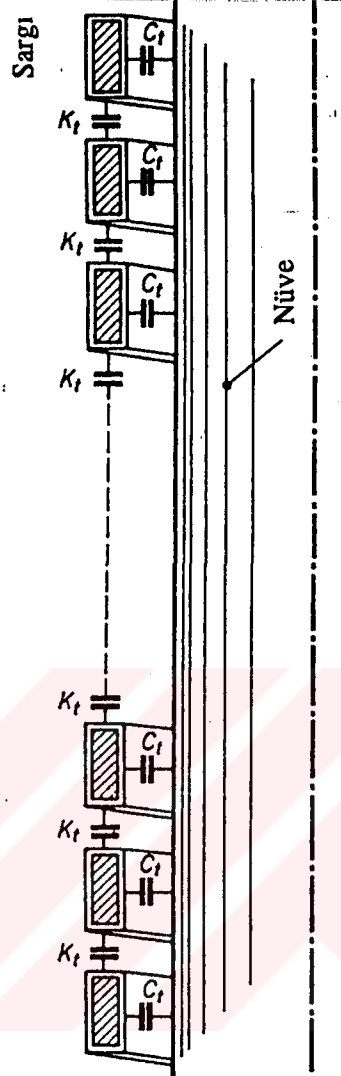
$$\frac{\partial i_L}{\partial x} + \frac{\partial i_K}{\partial x} = -C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$i_K = -K \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i_L}{\partial t} \quad (2.3)$$

Denklemden ortaya çıkan akım ve gerilimler zaman ve uzayın fonksiyonudurlar.

Akımlar elimine edilerek 3 denklemden oluşan denklem takımı yalnızca



Şekil 2-1 - Tek tabakalı transformatör sargısı

gerilimleri içeren tek bir denkleme dönüştürülebilir.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + LK \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (2.4)$$

Geçici olaylar bu denklemden başlayarak yürüyen ve duran dalga teorisiyle incelenebilir.

Duran dalga teorisine göre duran dalgalar zaman domeninde

$$\frac{\omega}{2\pi}$$

ve uzay domeninde

$$\frac{\gamma}{2\pi}$$

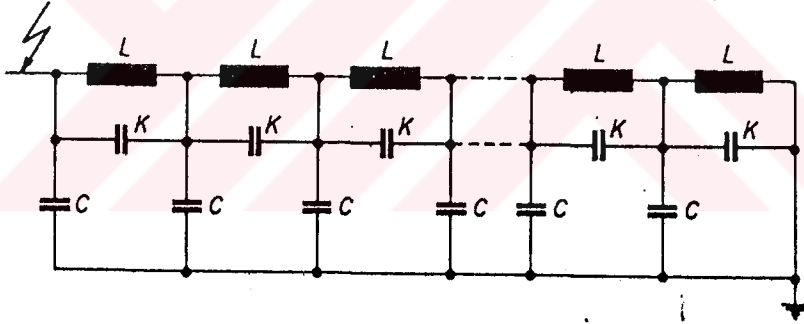
frekansında olurlar. Açısal frekanslar

ω ve γ

arasındaki ilişki şöyledir.

$$\omega = \frac{\gamma}{\sqrt{LC(1 + \frac{K}{C}\gamma^2)}} \quad (2.5)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{LC\omega^2}{1 - \omega^2 LK}} \quad (2.6)$$

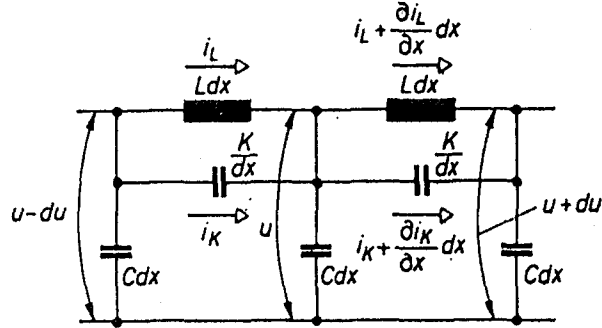


Şekil.2-2 - Tek tabakalı transformör sargısının basitleştirilmiş matematik modeli

Böylece yukardaki denklemlerden çıkarılacak sonuç uzay domenindeki herbir frekans zaman domeninde bir frekansa karşılık geleceğidir. Aralarındaki ilişki : γ artarsa ω da artacaktır. γ 'yı sonsuza götürerek limit halde kritik açısal frekans

$$\omega_{cr} = \frac{1}{\sqrt{LK}} \quad (2.7)$$

olarak bulunacaktır. Bu frekans sargının (zaman domeninde) osilasyon yapabildiği



Şekil 2-3 - Şekil 2-2'deki modelden bir bölüm

en yüksek açısal frekanstır.

Yürüyen dalga teorisine göre, ω açısal frekansındaki yürüyen dalgalar sargıdan

$$v = \frac{\omega}{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{K}{C} \omega^2} \quad (2.8)$$

hızıyla geçerler. Dalga'nın γ frekansı ne kadar büyük ise yayılım hızının o kadar az olacağı görülebiliyor. Açısal frekans $\omega \geq \omega_{cr}$ olan dalgalar sargıda yayılamazlar. Bu nedenle sargı açısal frekansı $\omega < \omega_{cr}$ olan dalgaları geçiren alçak geçiren filtre gibi davranır.

İleride inceleyeceğimiz duran dalga teorisinde gerilim dağılımı daha kolay belirlenecektir.

3.BÖLÜM - TRANSFORMATÖR SARGISININ TOPLU SABİTELİ EŞDEĞER DEVRESİNİN BELİRLENMESİ : [3]

Bilindiği gibi aşırı gerilimlerin en tehlikelisi cephesi dik olan aşırı gerilimdir. Bu gerilimi sembolize etmesi bakımından şek2-2'deki basitleştirilmiş transformatör sargısı modelinin bir ucuna basamak şeklinde U gerilimi uygulansın

$$(\text{ yani } u(t)=0 \quad t < 0$$

$$u(t)=U \quad t \geq 0 \text{ dir.})$$

diğer ucu da topraklansın. Gerilim uygulandığında sargıda başlangıç gerilim dağılımı oluşacaktır. Bir süre sonra son gerilim meydana gelecektir. Sargıda kapasiteler ve endüktanslar olduğundan başlangıç gerilim dağılımından son gerilim dağılımına geçişte sargıda gerilim osilasyonları oluşacaktır. Gerçekte sistemdeki dirençler bu salınımları söndürücü yönde etki yaparlar. Fakat bu etki ilerdeki hesaplarda gözönüne alınmayacaktır.

3.1- Başlangıç Gerilim Dağılımı :

Yalnızca başlangıç gerilim dağılımı incelenecek olursa, gerilimi temel alan (2.4) denkleminde ilk anda L sonsuz kabul edilirse denklem

$$\frac{\partial^2 u(x, 0)}{\partial x^2} = -\frac{C}{K} u(x, 0) \quad (3.1)$$

şeklini alır. l uzunluğunda bir uçundan topraklı sargılar için yukardaki denklem

$$"u(0,0)=U \text{ ve } u(l,0)=0"$$

yani sargı girişinde ve sonunda osilasyon olmadığı, sınır koşullarıyla çözüldükten sonra; l sargının tüm uzunluğu, x gözönüne alınan sarım noktasının koordinatı ise, sargının çeşitli noktalarındaki gerilimlerin toprağa göre dağılışı hat gerilimi U'ya oranlı ve x/l 'nin fonksiyonu olarak şu ifadeyle verilir.

$$\frac{u(\frac{x}{l}, 0)}{U} = \frac{\sinh\alpha (1 - \frac{x}{l})}{\sinh\alpha} \quad (3.2)$$

$$\alpha = l \sqrt{\frac{C}{K}} = \sqrt{\frac{C_x}{K_x}} \quad (3.3)$$

Bu denklemlerde sargının toprağa karşı toplam (paralel) kapasitesi,

$$C_x = C \cdot l$$

ve sargının toplam seri kapasite ise

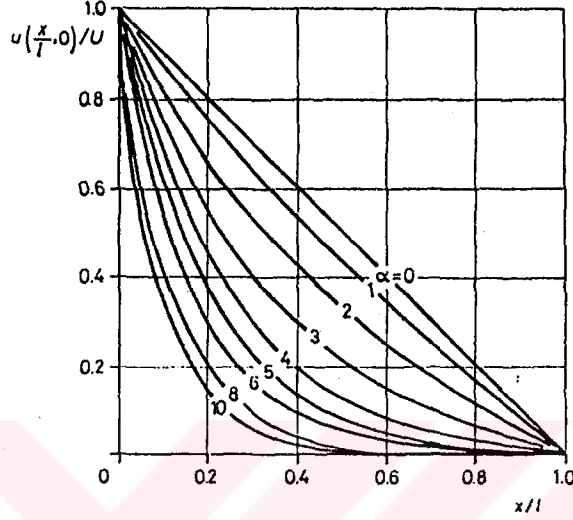
$$K_x = \frac{K}{l}$$

dir.

Neticede başlangıç gerilim dağılımı α faktörüne bağlı olduğu yukardaki ifadelerden görülmektedir. (3.2) nolu denklemde birim basamak girişi uygulandığında farklı α değerleri için oluşan başlangıç gerilim dağılımı eğrileri şekil 3-1'de görülüyor. Eğrilerden α faktörü ne kadar büyük olursa; diğer bir deyişle toplam seri kapasite ne kadar küçük olursa sargı boyunca başlangıç gerilim dağılımının lineerlikten o kadar uzaklaşacağı görülmektedir. Yani seri kapasiteleri artırarak yada α faktörünü azaltarak ($\alpha = 0$ ile tanımlanan) lineer gerilim dağılımına yaklaşılr. Gerilim dağılımı eğrisinin eğimi (sargıdaki potansiyel farkı) başlangıç bölgede en yüksek değere ulaşır.

$$g_{\max} = -\frac{\alpha}{l} \coth \alpha \quad (3.4)$$

Lineer gerilim dağılışı için



Şekil 3-1 - Sonu topraklanmış sargılarda α 'ye bağlı olarak başlangıç gerilim dağılımı eğrileri

$$g = -\frac{1}{l}$$

olduğu düşünülerek, maximum gerilim farkının değeri şu formülden bulunabilir.

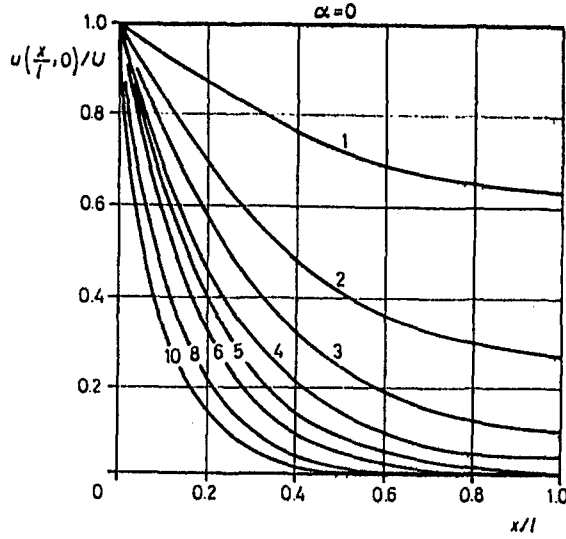
$$\delta = \alpha \cdot \coth \alpha \quad (3.5)$$

Yukardaki mantığı yürüterek bir ucu açık bırakılmış sargıda başlangıç gerilimin toprağa göre dağılışının aşırı gerilime oranı olarak

$$\frac{u(\frac{x}{l}, 0)}{U} = \frac{\cosh \alpha (1 - \frac{x}{l})}{\cosh \alpha} \quad (3.6)$$

ifadesi bulunur.

Şekil 3-1 ve şekil 3-2'in karşılaştırılmasından elde edilen sonuç; bir ucu açık



Şekil 3-2 - Topraklanmamış sargıların başlangıç gerilim dağılım eğrileri

bırakılmış sargı ile bir ucu topraklı sargıların başlangıç gerilimleri arasında görülen esaslı fark $\alpha < 5$ gibi küçük α değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Bu tür olaylarda bir ucu açık sargının ilk bölümündeki başlangıç potansiyel farkı topraklı sargıdakinden daha az fakat sarımların toprağa göre gerilimleri bir ucu topraklı sargıdakinden daha fazladır.

3.2- Son Gerilim Dağılışı :

Son gerilim dağılışı için tekrar (2.4) nolu diferansiyel denklemini gözönüne alalım. Ancak bu sefer denklem zamandan bağımsız olacaktır. Yani $u(0)=U$ ve $u(l)=0$ olan sınır koşullarını kullanarak

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (3.7)$$

diferansiyel denklem çözüldükten sonra bir ucu topraklanmış sargıda son gerilim dağılışını

$$\frac{u}{U} = \left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad (3.8)$$

bağıntısı ile verilir. Sonu topraklanmamış sargıda

$$\frac{u}{U}=1 \quad (3.9)$$

dir. Bu yüzden sürekli hal gerilim dağılışı şekil 3-1 ve şekil 3-2'deki gibi düz bir çizgi şeklinde olacaktır.

3.3- Gerilim Salınımları :

Transformatör sargısı içinde oluşan bütün salınımların şeklini sınır koşullarını gerçekleyen (2.4) diferansiyel denklemin çözümü vermektedir. $u(0,t)=U$ ve $u(l,t)=0$ sınır koşullarını kullanarak , herhangi bir t anında bir ucu topraklı sargının x noktasındaki gerilim

$$u(x, t) = U \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right) - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{n\pi} \sin n\pi \frac{x}{l} \cos \omega_n t \right] \quad (3.10)$$

Burada

$$A_n = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (n\pi)^2} \quad (3.11a)$$

ve

$$\omega_n = \frac{n\pi}{\sqrt{\alpha^2 + (n\pi)^2}} \omega_{cr} \quad (3.11b)$$

$n = 1, 2, 3, 4, \dots$

α ve ω_{cr} (2.7) ve (3.3) formülünden bulunabilir.

Bir ucu topraklanmamış sargıda başlangıç koşulları $u(0,t) = U$ ve

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=1} = 0$$

yi kullanarak

$$u(x, t) = U \left[1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n^*}{\left(\frac{n\pi}{2} \right)} \sin \left(\frac{n\pi}{2} \right) \frac{\pi}{l} \cos \omega_n^* t \right] \quad (3.12)$$

Burada

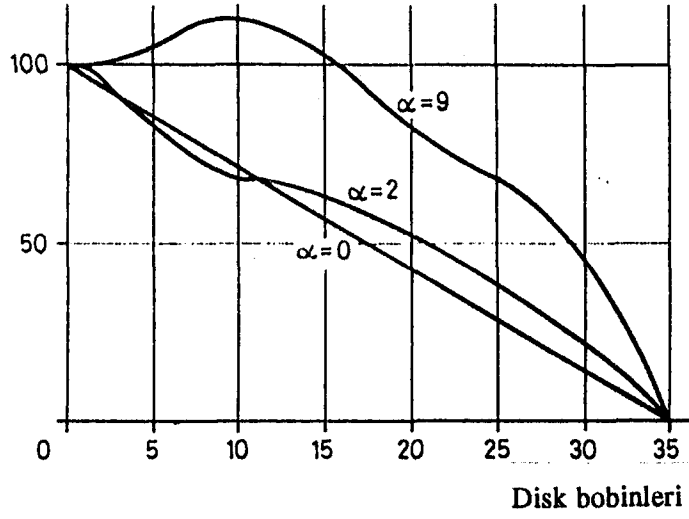
$$A_n^* = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \left(\frac{n\pi}{2} \right)^2} \quad (3.13a)$$

ve

$$\omega_n^* = \frac{\frac{n\pi}{2}}{\alpha^2 + \left(\frac{n\pi}{2} \right)^2} \omega_{cr} \quad (3.13b)$$

Bu sonsuz toplam $n = 1, 3, 5, \dots$ gibi tek değerler için yapılır. α ve ω_{cr} yine (2.7) ve (3.3) denklemlerinden bulunabilir.

Sargının her noktasında gerilim $t = 0$ anındaki başlangıç değerinden başlayarak gelişecek ve en son gerilim dağılışı etrafında salınım yaparak sargılara dağılacaktır. Sargının çeşitli noktalarındaki geçici gerilim salınımlarının maximum değerlerini sargı uzunluğunun fonksiyonu olarak çizersek toprağa göre maximum gerilimlerinin dağılımı diğer bir deyişle zarf eğrisi elde edilir. Gerilim salınımlarının genliği ne kadar küçülürse başlangıç gerilim dağılımı son gerilim dağılımına o kadar yaklaşır diğer bir deyişle α faktörü o kadar küçük olur. Böylece α faktörünü düşürerek yalnızca başlangıç gerilim dağılışı daha düzgün yapılırken aynı zamanda gerilim salınımlarının genliği de düşürülecektir. Örnek olarak Şekil 3-3 de iki değişik transformatörden ölçülen zarf eğrileri görülmektedir. Küçük



Şekil.3-3- Çeşitli α değerleri için zarf eğrileri

seri kapasitesi olan ($\alpha = 9$) çok salınım yapıyor oysa büyük seri kapasitesi olan ($\alpha = 2$) salınıma daha az yatkındır.

Wagner modeli ve bu modele dayalı olan hesaplar, cephesi dik basamak şeklindeki aşırı gerilim dalgasının etkisiyle oluşan olayın niteliği hakkında bilgi veren çok iyi bir görüntü vermektedir. Pratik bakış açısından da paralel ve seri kapasitelerden hesaplanan α faktörü sargı içindeki başlangıç gerilim dağılışının düzgünlüğü ve sargının salınım eğilimine etkisi hakkında bilgi verir.

4.BÖLÜM - KLASİK WAGNER MODELİNİN İNCELENMESİ VE AŞIRI GERİLİM DAĞILIŞI HESABIYLA İLGİLİ SON ARAŞTIRMALAR :

Seri ve paralel kapasiteler ve self endüktansların tek başına hesaba katıldığı, Wagner'in önerdiği dağılmış sabiteli sargı modeli gerçek koşulları çok fazla idealleştiriyor. Bu idealleştirmelerden biri şudur : Bir gerçek transformatör sargısı sonlu sayıdaki diskler ve disk çiftleri gibi elemanlardan oluşur, bu yüzden transformatörün sonsuz sayıdaki dağılmış sabiteli elemanlardan oluşan modelle modellenmekten çok sonlu sayıdaki eleman içeren modelle modelleneceği açıktır. Bundan dolayı disk tipi transformatör sargılarında herbir diski, herbir disk çifti veya disklerin herbir grubunu ayrı bir eleman olarak düşünmek uygun olacaktır. Bir başkası ise; gerçek transformatör sargıları her transformatör tipinde homojen dağılmamıştır. Genellikle sargı başı ve sonunda ve bazen içinde, sargıyı oluşturan elemanların çoğundan farklı şekilde veya geometrik düzenlemede olan, farklı sarım sayısına sahip sargı elemanlarına sıkça rastlanır. Wagner Modeli Eddy akım kayıplarının söndürücü özelliğinin gerilim salınımlarına etkisini ve sargı içindeki ortak endüktansları ihmal ederek gerçek koşulları basite indirgemiş oluyor. Son olarak da, araştırılacak olan tek bir sargı değil birçok durumda bir transformatör veya iki yada daha fazla sargıdan oluşmuş bir sargı sistemidir.

Bunlardan başka Wagner Metodu basamak şeklinde düz bir alına sahip aşırı gerilim etkisi altında gerilim dağılımını verdiği için olayın yalnızca niteliğine ait bilgiler sunuyor. Gerçekte asıl aşırı gerilimler eksponansiyel cepmeli ve sırtlı peryodik olmayan gerilim dalgaları yada peryodik sönümlü salınımlardır.

Bir gerilim dağılışı hesaplamak için ilk olarak sargı veya sargı sisteminin darbe gerilim karakteristikleri; seri ve paralel kapasiteleri, self ve ortak endüktans katsayıları ve sönüm faktörü (bölüm 5) ile birlikte bilinmesi gerekir. Sonlu bir model oluştururken, modeldeki eleman sayısı uygun seçilmelidir.(Bölüm 6)

Pratik hesaplarda yukarıda temas edilen noktaların hepsini birden hesaba katmak her zaman gerekli değildir. Bir tasarım yaparken; gerilim dağılışının iyi bir tahmini, birçok alternatifin ivedi olarak karşılaştırılması veya sargı kapasitelerinin kabul edilebilecek sınırlarının seçilmesi gereklidir. Bu sebepten sargı başında ve sonunda mevcut olan düzensizliğin etkilerini tahmin etmek için, yalnızca kapasitelerden oluşmuş bir devreyi ele almak genellikle yeterli olmaktadır. Benzer olarak aynı kapasitif model, bir sargıdan diğerine aktarılan darbe gerilimi şiddetini bulmak için ve teknik ve ekonomik bakımdan tercih edilen sargı kapasitelerinin belirlenmesi için yeterli bilgiyi verecektir.

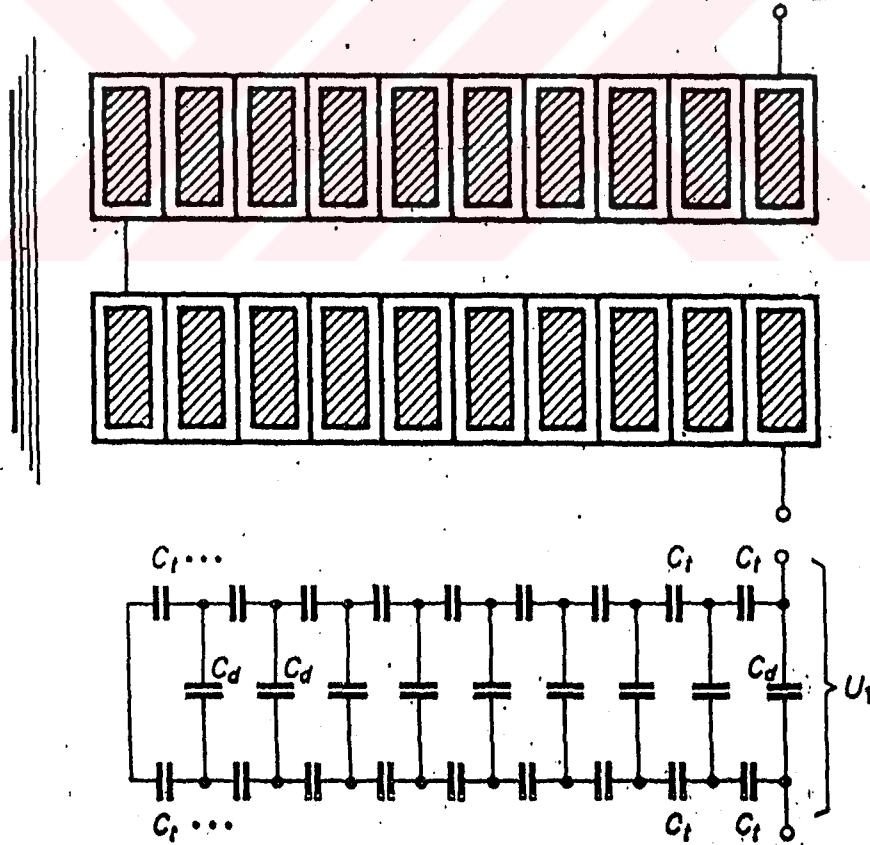
Yalnızca kapasitelerden oluşan devrelerde, gerilim dağılışı hesabı sıfır yükselme zamanı ve sonsuz düşme zamanı (yani dik cepheli basamak şeklinde) olan bir dalga yaklaşımına göre yapılır. Endüktansları da içeren gerçek bir sistemdeki gerilim dağılışı incelemesinde asıl dalga şekli hesaba katılmalıdır.

Homojen dağılmış bir transformatör sargısı içindeki gerilim dağılışı sargıdaki ortak endüktansı da hesaba katarak Wagner Metodundakinden daha doğru bir şekilde hesaplanabilir. Büyük değerli seri kapasiteli regülasyon sargıları ve esas sargısı olan regülasyon transformatörlerinde gerilim dağılışı iki elemandan oluşan modelle hesaplanabilir. Keyfi seçilen herhangi bir şekilde yıldırım ve açma-kapama darbe gerilimlerinin etkisi altındaki yine keyfi bir şekilde düzenlenmiş sargı sisteminin içinde gelişen gerilim dağılışının çıkartılması matris hesabı kullanan bir genel yöntemle, şayet gerekli ise sönüm etkisi de hesaba katılarak, mümkün olur.

5.BÖLÜM - TRANSFORMATÖR SARGILARINDA AŞIRI GERİLİM DAĞILIMI [2]

5.1-Seri ve Parelel Kapasiteler

Burada yalnızca en sıkça rastlanan sargı kapasitelerinin bağıntıları incelenecektir. Bu bölümde kapasite hesaplarının temeli sıradan disk tipi sargılarda



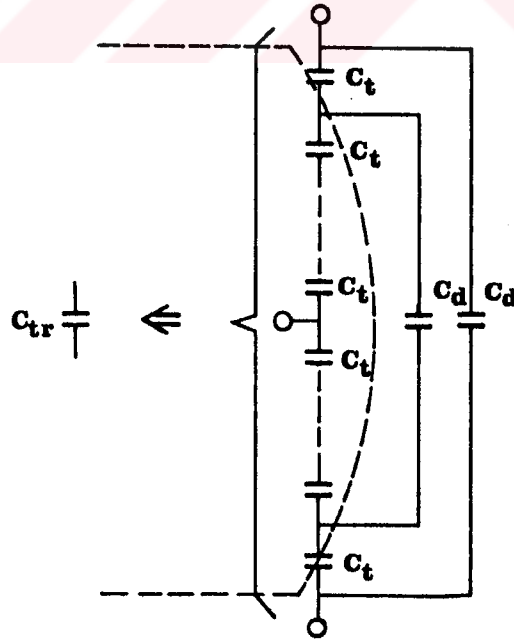
Şekil 5-1-Disk bobini ve eşdeğer kapasite devresi

gösterilecektir. Aynı prensibi kullanarak burada gösterilmeyen tipte sargı kapasiteleri kolaylıkla hesaplanabilir.

Disk tipi bobin sargılarının seri kapasitesi :

Şekil 5-1'de iki bölümden oluşan bir disk bobininin ve bunun kapasite eşdeğer devresinin şematik olarak çizimi görülmüyor. Disk bobinin seri kapasitesi biri " sarımlar arası kapasite - C_t " diğeri " karşılıklı dilimler arası kapasite - C_d " olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır.

Eşdeğer kapasiteyi hesaplamak için gerilimin disk bobini içinde düzgün bir şekilde dağıldığı kabul edilir. Şekil 5-1'de görülen 2 kısmi bölümden oluşan bir disk bobininin uçlarında U_1 gerilimi olsun. Hesabın prensibi o bölgede bulunan kapasitelerin tümünün enerjilerini toplamı bobinin eşdeğer seri kapasitesinin enerjisine eşittir (enerjinin korunumu prensibi). Ele alınan bobinde n adet sarım varsa şekil 5-2'den görüldüğü gibi $2(n-1)$ adet C_t kapasitesi vardır. Bu bobin 2 kısmi bölümden oluştuğuna göre bir bölümdeki gerilim $U_1 / 2$ ve bu bölümde n adet



Şekil 5-2- C_r Kapasitesinin bulunması için kullanılan eşdeğer devre

sarım varsa her sarım gerilimi ($U_i / 2n$) olur. Sarım kapasitesi C_i nin enerjisi

$$\frac{1}{2} C_{\epsilon} \left(\frac{U_1}{2n} \right)^2 \quad (5.1)$$

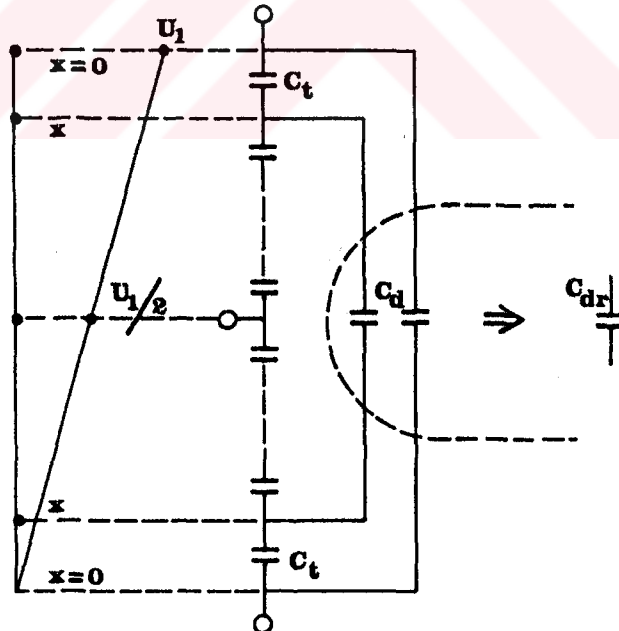
dir. C_1 kapasitesinden $2(n-1)$ adet olduğundan toplam enerji; (C_{tr} toplam eşdeğer sarım kapasitesi)

$$\left[\frac{1}{2} C_t \left(\frac{U_1}{2n} \right)^2 \right] 2(n-1) = \frac{1}{2} C_{tr} U_1^2 \quad (5.2)$$

eşdeğer kapasite ise

$$C_{tr} = \frac{C_t}{2n^2} (n-1) \quad (5.3)$$

olur. Herbir bölümde lineer bir gerilim dağılışı olduğu kabuluyla bölge içi eşdeğer kapasitesi şekil 5-3'e göre bulunabilir. Şöyleki;



Şekil 5-3- C_d kapasitesinin bulunması için kullanılan eşdeğer devre

Şekil 5-3a'dan görüldüğü gibi üst bölgedeki gerilimin fonksiyonel ifadesi

$$U_u(x) = U_1 \frac{2l-x}{2l} \quad (5.4)$$

alt bölgedeki gerilimin fonksiyonel ifadesi,

$$U_l(x) = U_1 \frac{x}{2l} \quad (5.5)$$

dir. Öyleyse herhangi bir C_d kapasitesi uçlarındaki gerilim

$$[U_u(x) - U_l(x)] = [U_1 \frac{2l-x}{2l} - U_1 \frac{x}{2l}] = U_1 (1 - \frac{x}{l}) \quad (5.6)$$

Böylece x noktasındaki birim uzunluğundaki sargının C_{dl} kapasitesinin enerjisi

$$\frac{1}{2} C_{dl} [U_u(x) - U_l(x)]^2 \quad (5.7)$$

l uzunluğundaki eşdeğer kapasiteyi bulmak için yukardaki ifadenin x 'e göre 0'dan l 'ye kadar integralini almak gerekir.

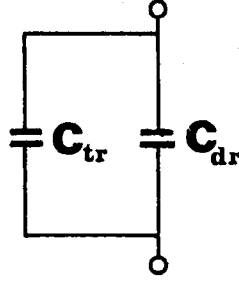
$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C_{dx} U_1^2 &= \int_0^l \frac{1}{2} C_{dl} [U_1 (1 - \frac{x}{l})]^2 dx \\ &= \frac{1}{2} C_{dl} U_1^2 \int_0^l [1 - \frac{2x}{l} + \frac{x^2}{l^2}] dx = \frac{C_{dl} U_1^2}{2} [x - \frac{x^2}{l} + \frac{1}{3l^2} x^3]_0^l \end{aligned}$$

$$C_{dx} = C_{dl} [1 - \frac{1}{l} l^2 + \frac{1}{3l^2} l^3]$$

$$C_{dx} = \frac{C_{dl} \cdot l}{3} \quad (5.8)$$

Dilimler arasındaki toplam kapasite geometrik boyutlardan elde edilen kapasitenin $1/3$ 'ü olur.

Bir disk bobininin eşdeğer seri kapasitesi sarım arası eşdeğer kapasitesinin eşdeğer dilimler arası kapasiteye paralel bağlanmasıyla elde edilir. Bilindiği gibi toplam

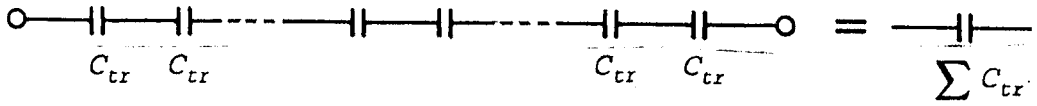


Şekil 5-4- Diskin seri kapasitesi

paralel kapasite her iki kapasitenin toplanmasıyla elde edilir.

$$C_r = C_{tr} + C_{dr}$$

Tüm sargının eşdeğer seri kapasitesi disk bobinlerinin kapasitelerinden aşağıdaki yolla hesaplanır. N adet kısmi diskten oluşan sargıda eşdeğer seri kapasite, herbir kısmi disk çiftinin seri kapasiteleri yanyana bağlanarak elde edilir. Her 2 kısmi disk çifti bir C_r kapasitesini veriyorsa ($N/2$) adet seri kapasite seri bağlanacak demektir.



Şekil 5-5- Diskin toplam seri kapasitesi

$$\sum C_{tr} = \frac{1}{\frac{1}{C_{tr}} + \frac{1}{C_{tr}} + \dots + \frac{1}{C_{tr}}} = \frac{C_{tr}}{(\frac{N}{2})} \quad (5.9)$$

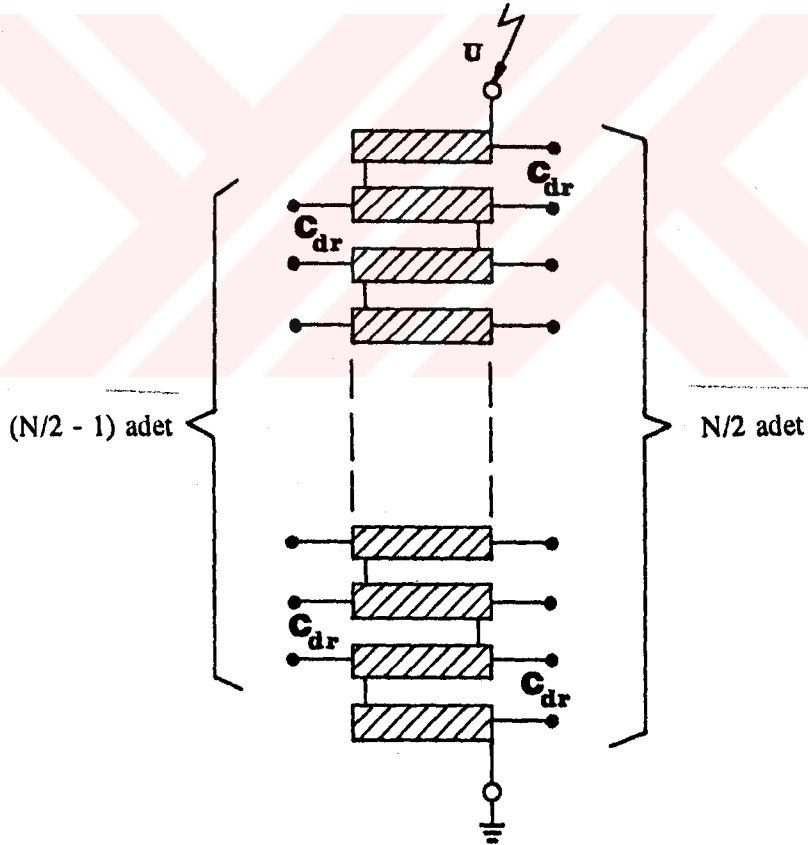
C_r 'nin değerini yerine koyarak bu denklem şu hali alır.

$$\sum C_{tr} = \frac{\left(\frac{C_t (n-1)}{2n^2} \right)}{\frac{N}{2}} \quad (5.10)$$

$$\sum C_{tr} = \frac{C_t}{Nn^2} (n-1) \quad (5.11)$$

Tüm sargı uçlarında U gerilimi varsa $N/2$ adet disk bobininden oluşmuşsa herbir bobinin uçlarındaki gerilim

$$\left[\frac{U}{\frac{N}{2}} \right]$$



Şekil.5-6- Disk tipi sargının C_{dr} kapasitelerinin sembolik gösterimi

dir. Şekil 5-6'dan görüldüğü gibi toplam

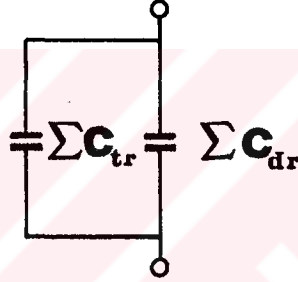
$$\left[\frac{N}{2} + \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \right] = [N-1]$$

adet C_{dr} vardır. Öyleyse toplam enerji,

$$\frac{1}{2} C_{dr} \left(\frac{U}{\frac{N}{2}} \right)^2 (N-1) = \frac{1}{2} \sum C_{dr} U^2$$

dir. Öyleyse toplam bölge içi kapasite ise

$$\sum C_{dr} = 4 \frac{N-1}{N^2} C_{dr} \quad (5.12)$$



Şekil 5-7-Eşdeğer seri kapasite

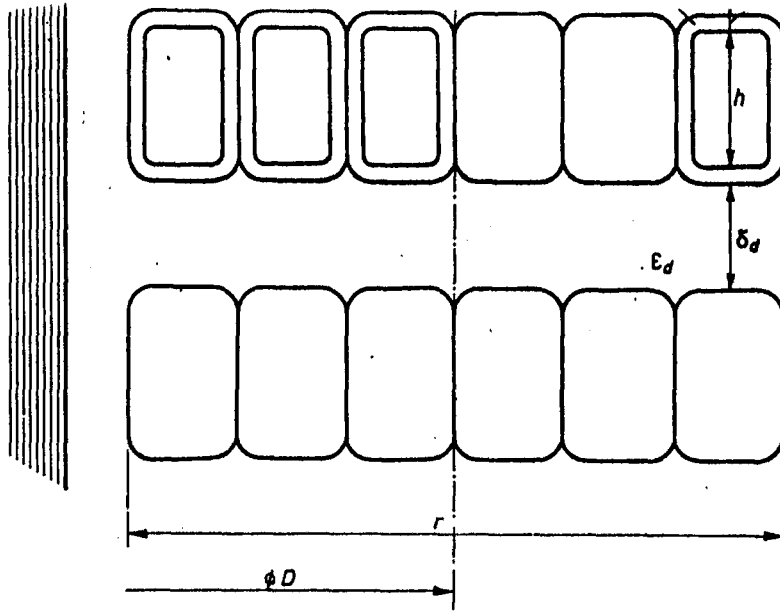
olur. Sargının toplam seri kapasitesi ise her iki toplam kapasitenin toplamıdır.

$$K = \sum C_{tr} + \sum C_{dr} = \frac{1}{N} \left[\frac{n-1}{n^2} C_t + 4 \frac{N-1}{N} C_{dr} \right] \quad (5.13)$$

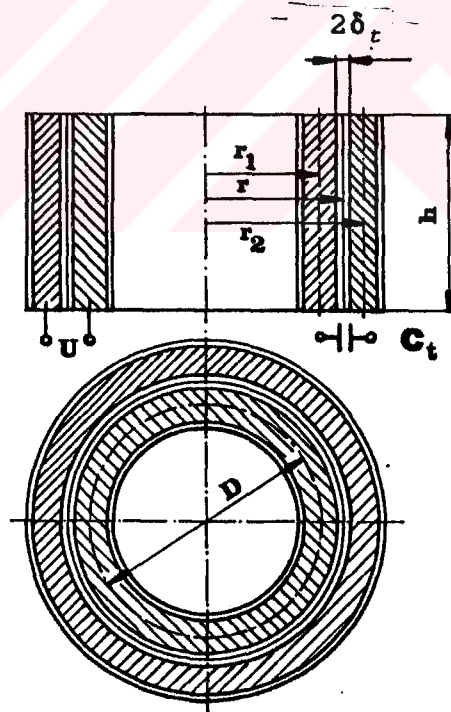
$$K = \frac{1}{N} \left(\frac{C_t}{n} + 4 C_{dr} \right) \quad (5.14)$$

Pratikte çoğunlukla $n > 10$ ve $N > 30$ olduğundan yukardaki (5.13) nolu denklemi (5.14) deki gibi basit şekle dönüştürülebilir.

Ortalama sargı çapı D , kullanılan bakır iletkenin yüksekliği h , sargı içi yalıtkanın kalınlığı δ_i dielektrik sabiti ise ϵ_i sargının radyal genişliği r , diskler arasındaki boşluğun kalınlığı δ_d ve (yağ ve katı) yalıtkanın toplam dielektrik sabiti ϵ_d ise sarımlar arası ve karşılıklı dilimler arası kapasite şöyle hesaplanır:



Şekil 5-8 - Disk bobinleri seri kapasitesini hesaplamada kullanılan sembollerin açıklaması



Şekil 5-9- İki sargı arasındaki kapasite

2 sarım arasındaki kapasiteyi hesaplamak için (C) şekilde görüldüğü gibi eş eksenli

silindirik elektrod sisteminin kapasitesinden faydalanalım [4];

Şekildeki gibi yarıçapları r_1 , r_2 ve uzunluğu h olan ve elektrodlarına U gerilimi uygulanan sistemin V potansiyeli yarıçapa (r) bağlı olarak değişir. Silindirsel koordinat sisteminde laplace denklemi,

$$\frac{d^2V}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dV}{dr} = 0 \quad (5.15)$$

şeklini alır. Bu denklemin genel çözümü

$$V = A + B \cdot \ln r \quad (5.16)$$

şeklindedir. A ve B sabitleri sınır koşullarından bulunur.

$$r = r_1, V = V_1 = U$$

$$r = r_2, V = V_2 = 0 \text{ olduğu gözönünde tutulursa}$$

$$r = r_1, V = U = A + B \cdot \ln r_1$$

$$r = r_2, V = 0 = A + B \cdot \ln r_2$$

her iki denklemin farkını alarak

$$U = -B \cdot (\ln r_2 - \ln r_1) = -B \cdot \ln (r_2 / r_1) \text{ buradan}$$

$$B = - \frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (5.17)$$

olarak bulunur.

$$A = -B \cdot \ln r_2$$

$$A = \frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \ln r_2 \quad (5.18)$$

Sabitler yerine konularak gerilimin açık ifadesi

$$V = \frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \ln r_2 - \frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \ln r = \frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r} \quad (5.19)$$

olur. Alan şiddeti için de

$$E = -\frac{dV}{dr} = -\frac{d}{dr} \left(\frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r} \right) \quad (5.20)$$

bağıntısından,

$$E = \frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{1}{r} \quad (5.21)$$

denklemini elde edilir.

r_1 yarıçaplı silindiri kuşatan r yarıçaplı bir silindir gözönüne alalım. Bu silindir yüzeyinde silindirsel simetriden dolayı D deplasmanı her noktada aynı olduğundan,

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (5.22)$$

denklemini

$$2\pi r \cdot h \cdot D = Q \quad (5.23)$$

şeklini alır.

$D = \epsilon E$ olduğu düşünülürse elektrik alan,

$$E = \frac{Q}{2\pi \epsilon h} \cdot \frac{1}{r} \quad (5.24)$$

olur. Diğer taraftan U gerilimi

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E \cdot dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon h} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{Q}{2\pi\epsilon h} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

olduğundan sistemin kapasitesi

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\epsilon h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (5.25)$$

olur. Buradaki değişkenleri ele aldığımız olaya indirgersek, ortalama yarıçap r_m ise

$$r_1 = r_m \text{ ve } r_2 = r_m + 2\delta_t \text{ dir.}$$

Öyleyse kapasiteyi

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln \frac{r_m + 2\delta_t}{r_m}} \quad (5.26)$$

şeklinde gösterebiliriz. Burada logaritmanın özelliğini kullanarak

$$\ln \left(\frac{r_m + 2\delta_t}{r_m} \right) = \ln \left(1 + \frac{2\delta_t}{r_m} \right)$$

bilindiği gibi yukardaki ifadenin seriye açılımından şayet

$$\frac{2\delta_t}{r_m} \ll 1$$

ise o zaman logaritma yerine yaklaşık olarak

$$\ln \left(1 + \frac{2\delta_t}{r_m} \right) \approx \frac{2\delta_t}{r_m}$$

yazabiliriz. Ortalama kapasite ise,

$$C_{ort} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\frac{2\delta_t}{r_m}} \quad (5.27)$$

olur. $2.r_m = D$ ortalama çap ise

$$C_{ort} = \epsilon_0\epsilon_r \frac{D\pi h}{2\delta_t} \quad (5.28)$$

Parazit kapasitelerin etkilerini de hesaba katmak için $2.\delta_t$ 'yi eklemek gerekir.

$$C_{ort} = \epsilon_0\epsilon_r \frac{D\pi (h+2\delta_t)}{2\delta_t} \quad (5.29)$$

İki disk arasındaki kapasite de şöyle bulunabilir;

Bobinler ve bobinleri oluşturan dilimler arasındaki aksiyal uzaklıklar bütün yüksek gerilim sargısı boyunca aynı alınmıştır. şekilden de görüldüğü gibi C_d 3 adet seri bağlı kapasitenin eşdeğeridir.

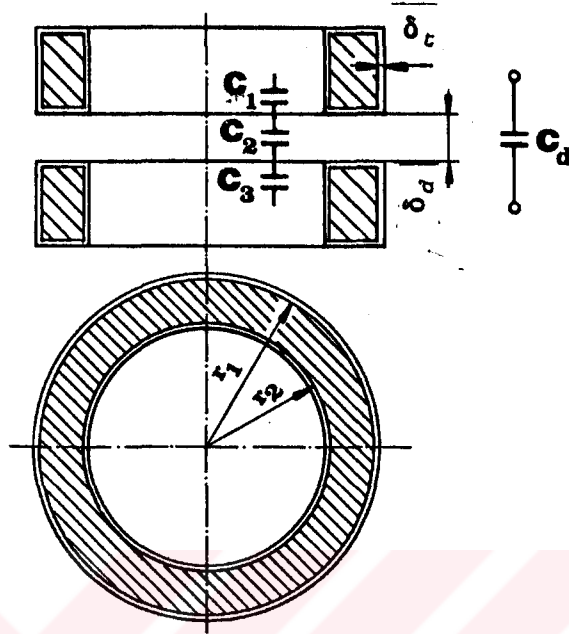
$$C_d = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \quad (5.30)$$

sargılar tamamen aynı olduğundan

$C_1 = C_3$ dir.

Sistemi düzlem kondansatörlere benzeterek

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (5.31)$$



Şekil 5-10- İki disk arasındaki kapasite

genel formülünü kullanarak,

$$C_{d_i} = \frac{1}{\frac{2}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \epsilon_0 \frac{S_i}{\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}} \quad (5.32)$$

$$C_{d_{topl}} = \sum C_{d_i} \quad (5.33)$$

Burada hesabın temeli birbirinden farklı olan bölge arası kapasitelerini birim uzunlukta ve birbirine eşit C_d 'ler şekline getirmektir. Bunun için önce bütün kapasiteler birbirine paralel bağlınmış gibi tek tek toplanacak daha sonra toplam kapasite ele alınan sargı parçasının uzunluğu olan l 'ye bölünecektir. Böylelikle sargı birim uzunlukta birbirine eşit kapasitelerle modellenecektir. Her iki durumda da toplam kapasite değişmediği için depolanan enerji de değişmeyecektir.

$$\sum C_{d_i} = \frac{\epsilon_0}{\left[\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d} \right]} \pi [(r_1^2 - r_0^2) + (r_3^2 - r_2^2) + \dots + (r_{2n-1}^2 - r_{2n-2}^2)]$$

$(r_1 - r_0) = (r_3 - r_2) = \dots = x$ diyelim. köşeli parantez içindeki ifadeleri çarpanlarına ayıralım

$$\begin{aligned} \sum C_{d_i} &= \frac{\varepsilon_0}{\left[\frac{2\delta_t}{\varepsilon_t} + \frac{\delta_d}{\varepsilon_d} \right]} \pi [(r_1 - r_0) (r_1 + r_0) + (r_3 - r_2) (r_3 + r_2) + \dots] \\ &= \frac{\varepsilon_0}{\left[\frac{2\delta_t}{\varepsilon_t} + \frac{\delta_d}{\varepsilon_d} \right]} \pi x [(r_1 + r_0) + (r_3 + r_2) + \dots] \end{aligned} \quad (5.34)$$

burada yarıçap ifadelerini daha açık yazarsak

$$r_3 + r_2 = r_1 + r_0 + 2 [1 \cdot (x + 2\delta_t)]$$

$$r_{2n-1} + r_{2n-2} = r_1 + r_0 + 2 [(n-1) (x + 2\delta_t)]$$

$$\sum C_{d_i} = \frac{\varepsilon_0 \pi x}{\left[\frac{2\delta_t}{\varepsilon_t} + \frac{\delta_d}{\varepsilon_d} \right]} [(r_1 + r_0) + [(n-1) (r_1 + r_0) + 2 (x + 2\delta_t) [1 + \dots n-1]]]$$

şimdi sadece köşeli parantez içini inceleyelim,

$$[n (r_1 + r_0) + 2 (x + 2\delta_t) \sum_{k=1}^{n-1} k]$$

bilindiği gibi 1'den n-1'e kadar olan sayıların toplamı $(n-1).n/2$ dir. Bunu yukardaki denklemde yerine koyarak işleme devam edelim

$$[n (r_1 + r_0) + 2 (x + 2\delta_t) \frac{(n-1)n}{2}]$$

$2\delta_t$ 'yi bir ekleyip bir çıkartarak köşeli parantez

$$n. [(r_1 + r_0) + 2\delta_t - 2\delta_c + (x + 2\delta_c) (n-1)]$$

$r_1 = r_0 + x$ olduğu da gözönüne alınırsa

$$[2r_0 - 2\delta_c + (x + 2\delta_c) n]$$

$$2r_0 - \delta_c + (x + 2\delta_c) n = D$$

olduğu şekilden görülebilir. Burada $(D - \delta)$ yaklaşık olarak D kabul edilebilir.

$$\sum C_{d_i} = \frac{\epsilon_0 \pi}{\left[\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d} \right]} x n D \quad (5.35)$$

$$x = r_1 - r_0 = \frac{(r - n 2\delta_t)}{n} \approx \frac{r}{n} \quad (5.36)$$

$$\sum C_{d_i} = \frac{\epsilon_0 \pi D}{\left[\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d} \right]} \frac{r}{n} n = \frac{\epsilon_0 \pi D}{\left[\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d} \right]} r \quad (5.37)$$

C_d birim uzunluktaki kapasite olduğu için sonsuz toplamı 1'ye bölmek gerekir.

$$C_d = \frac{\sum C_{d_i}}{l} = \frac{\epsilon_0 \pi D r}{\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}} \frac{1}{l}$$

parazit kapasiteleri de hesaba katmak için δ_d 'yi eklemek gerekir,

$$C_{dr} = \frac{1}{3} \left[\epsilon_0 D \pi \frac{r + \delta_d}{\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}} \right] \cdot F \quad (5.38)$$

(5.14), (5.29), ve (5.38) formüllerine dayanarak normal bir disk sargılarının

seri kapasitesi her bir geometrik boyutun m cinsinden olduğu aşağıdaki (5.39) denkleminde hesaplanabilir.

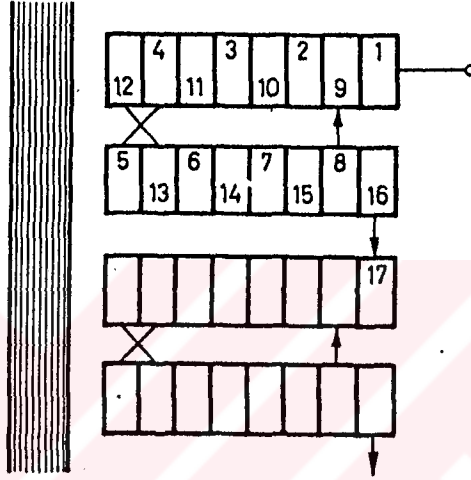
$$K = \frac{27,8D}{N} \left[\frac{\epsilon_t (h+2\delta_t)}{2n\delta_t} + \frac{4}{3} \frac{r+\delta_d}{\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}} \right] 10^{-12} F \quad (5.39)$$

Tabaka sargılarının seri kapasitesi (5.13) bağıntısından hesaplanır. Ancak bu olayda N disk sayısı ve n bir diskteki sarım sayısıdır, oysa C_t ve C_d geometrik boyutlardan ve uygun bir şekilde düzenlenmiş sargının dielektrik geçirgenliğinden belirlenir.

Ayrık disk sargılarının seri kapasiteleri

Sargının α faktörü ne kadar küçükse; diğer bir deyişle paralel kapasitesine oranla, seri kapasitesi ne kadar büyükse, bir transformatörde oluşan gerilim dağılımının o kadar düzgün olacağı bir önceki bölümde gösterildi. Sarımları birbirinden ayırarak, diğer bir deyişle geometrik olarak birbirine komşu sarımları elektriksel olarak birbirinden ayırarak normal disk sargılarının seri kapasitesi boyut olarak birkaç katına artırılabilir. Fakat sarımları birbirinden ayırmak komşu sarımlar arası gerilimi artıracaktır. Gerilim büyümesine rağmen sarımlar arası yalıtımı bir önceki duruma göre güçlendirmeye gerek yoktur ve hatta bazı durumlarda maliyetten tasarruf sağlanabilir. İlk zamanlarda sargı içindeki gerilim dağılımını hesaplamak için kullanılabilecek güvenilebilir metodların eksikliğinden beklenen aşırı gerilim zorlanmasına karşı normal disk sargılarında sargı içi yalıtımında boyutları artırmak genellikle kabul gören bir uygulamaydı. Oluşacak darbe gerilimine karşı yalıtıma yeterli dayanımı sağlama problemi yalıtımın artırılmasına rağmen çözülememiştir. Buna karşın sarımları birbirinden ayırarak sarım içi yalıtımda herhangi bir güçlendirmeye gerek duymaksızın güç frekansı ve darbe gerilimindeki zorlanmanın her ikisine birden yeterli dayanıma sahip olan sargılar tasarlayabilmek için gerilim dağılışı çok daha düzgün yapılabilir. Dielektrik dayanım incelemeleri, 36 kV dolaylarındaki gerilimlere kadar, her durumda normal

disk sargılarının uygun darbe gerilim şiddetine göre tasarlanabildiğini göstermiştir. 52 kV'dan 170 kV'a kadar olan gerilimlerdeki darbe gerilim şiddeti seviyelerine tatmin edici bir dayanım normal disk sargılarıyla ve artırılmış seri kapasiteli disk sargılarının her ikisiyle elde edilebilir. Ancak bununla birlikte 245 kV'luk gerilim ve daha yukarısı için gerekli darbe gerilim dayanımı genellikle yalnızca artırılmış seri kapasiteli sargılar kullanılarak sağlanabilir..[5]



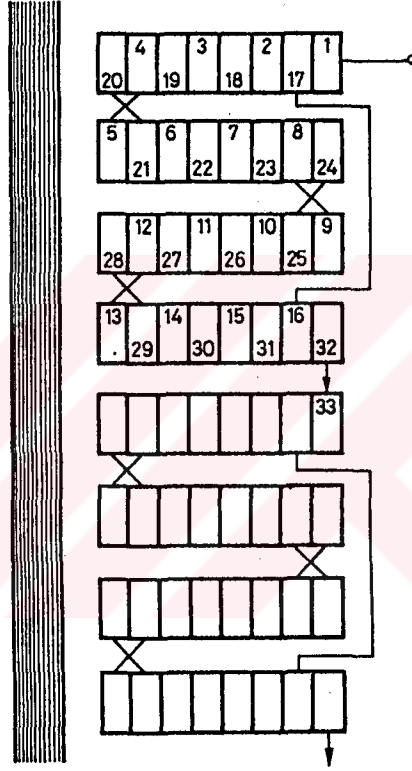
Şekil 5-11- Seri kapasitesi artırılmış sargı (E=2) (Eng. El. Co.)

Sarımların birbirinden ayrılması vasıtasıyla seri kapasitesi artırılmış ilk sargı 1945 yılında Eng. El. Corp. tarafından tanıtılmıştır. 2 bölümü içeren bu disk bobin daha sonra 4, 6, 8 .. gibi çift sayılı sargı parçalarına ayırarak Ganz Electric Works tarafından geliştirildi.

Sarımları ayrılmış sargıların seri kapasitesi hesaplandığında, dilimler arası kapasite seri kapasiteye oranla ihmal edilebilecek derecede küçük olduğundan yalnızca sarım arası seri kapasiteyi düşünmek yeterlidir. Benzer bir düşünce ile ayrıntı sargıların seri kapasitesini hesaplarken normal disk tipi durumunda da izlenebilir. Şekil 5-12'de görülen (E=4) 4 bölümden oluşan disk bobini durumuna benzer olarak aşağıda E gibi herhangi bir sayıda bölümden oluşan disk bobini için genel bir bağıntı çıkarılacaktır. Toplam seri kapasiteyi bulurken E

bölümden oluşan disk bobininin herbir bölümündeki sarım sayısı n olsun herbirinin büyüklüğü C_1 olan (sarım içi kapasite) $E.(n-1)$ adet kapasitede depolanan enerji hesaba katılmalıdır. Herbir bölgede düzgün bir gerilim dağılışı kabulüyle $E/2 .(n-1)$ adet kapasiteye karşılık gelen komşu sarımlar arasındaki gerilim

$$\frac{U_E}{E.n} \frac{E.n}{2} = \frac{U_E}{2}$$



Şekil 5-12- Seri Kapasitesi Artırılmış Sargı (E=4)

dir. Diğer kalan $E/2.(n-1)$ kapasitesi uçları arasındaki gerilim

$$\frac{U_E}{E.n} \left(\frac{E.n}{2} - 1 \right)$$

dir. U_E ; toplam seri kapasitesi bulunmak istenen herbir sargı elemanının uçları arasında görülen gerilimdir. Sonuç olarak herbir sargı elemanının toplam seri

kapasitesi;

$$C_x = \frac{C_t \left(\frac{U_E}{2} \right)^2 \frac{E}{2} (n-1) + C_t \left[\frac{U_E}{En} \left(\frac{En}{2} - 1 \right) \right]^2 \frac{E}{2} (n-1)}{U_E^2} =$$

$$C_x = C_t \frac{E}{2} (n-1) \left[\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \left(\frac{En-2}{En} \right)^2 \right] \quad (5.40)$$

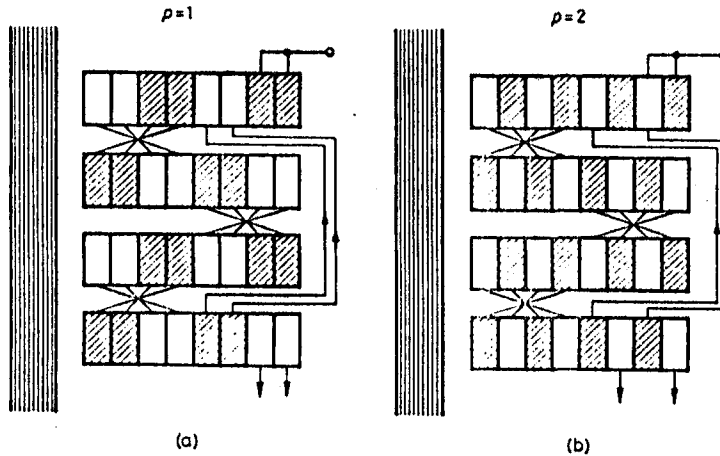
$n=10 - 30$ ve $E \geq 2$ gibi pratik değerleri alarak yapılan yaklaşımlarla bu kapasite

$$C_x = \frac{EC_t}{4} (n-1) \quad (5.41)$$

şekline girer.

N/E adet sargı elemanının enerjilerini toplayarak (N , sargıdaki disklerin sayısıdır), tüm sargının toplam seri kapasitesi

$$K = \frac{E^2 C_t}{4N} (n-1) \quad (5.42)$$



Şekil 5-13 - Artırılmış seri kapasiteli sargılarda paralel dalların düzenlenmesi

Parelel bağılı birkaç tel sarımından oluşan sargının seri kapasitesi paralel tellerin düzenini ayarlayarak değiştirilebilir. Şayet şekil 5-13a'deki gibi bu paralel teller birbiriyle yanyana sarılırsa seri kapasite değişmez. Buna karşılık teller birbirinden ayrılırsa (Şekil 5-13b) sargının seri kapasitesi epeyce artar. Böylece ikinci durumda ($p=2$) gerilim tarafından zorlanan sarım içi yalıtım sayısı birinci olaydakinin 2 katı olur.

Diğer taraftan iki sarım arasındaki yağ kanalı seri kapasiteyi azaltmaktadır. Bir yağ kanalı tarafından birbirinden ayrılan iki sarım arasındaki kapasitenin değeri, birbirinden yalnızca sarım içi yalıtkanla ayrılan ve birbiri üzerine sarılı sarımlar arasındaki kapasiteyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek derecede azdır. Birbirine komşu olmayan paralel tellerin sayısına (p), bir sarım içindeki yağ kanalı sayısı (o) olsun, (5.29) denklemine sarım içi kapasitenin detaylı ifadesini ekleyerek ayrılgı sarımların seri kapasitesi için aşağıdaki ifade elde edilir.

$$K = \frac{27,8D}{N} \left[\frac{\epsilon_t (h+2\delta_t)}{2\delta_t} \right] (pn-o-1) E^2 \cdot 10^{-12} F \quad (5.43)$$

Denklemdede boyutlar metre cinsindendir.

Dielektrik dayanım ve ekonomik kaygılar ön plana çıktığında, ayrılgı sarımların büyük bir avantajı geometrik boyutları ve sarım sayısını değiştirmeksizin seri kapasitelerinin geniş bir bant içinde kolaylıkla ayarlanabilmesidir. Sargının geometrik boyutları, N ve n gibi değerlerin hepsi sabit tutulursa ve yağ kanalı olmazsa ($o=0$) ve pn 1'den çok çok büyükse (5.42) bağıntısı şu şekli alır.

$$k = \frac{27,8D}{N} \left[\frac{\epsilon_t (h+2\delta_t)}{2\delta_t} \right] n 10^{-12} \cdot F$$

$$K = k p E^2$$

k görüldüğü gibi daha önce bahsi geçen sabitlere bağılı bir faktördür. Paralel bağılı iki telden oluşan bir sargı için p 'nin değeri 1 veya 2 olabilir. Pratik tasarımlarda

bir sargı elemanı içindeki bölüm lerin sayısı $E=2, 4, 6$ veya 8 olabilir. Bu nedenle seri kapasitenin maksimumunun ve minimumuna oranı

$$\frac{K_{\max}}{K_{\min}} = \frac{2 \cdot 8^2}{1 \cdot 2^2} = 32$$

olur.

Görüldüğü gibi sargının geometrik boyutları ve işletme karakteristiklerini veya gerilimi ve akımı değiştirmeksizin seri kapasitesini $1/32$ oranında değiştirebileceğimiz görülüyor. Buna karşılık bir sargı elemanındaki bölümlerin sayısındaki aşırı bir artış sargı içi gerilimde tehlikeli bir artış doğuracaktır. Bu artış sargı içi yalıtımın güçlendirilmesini gerektirecek bu da seri kapasiteyi azaltacak, sonuçta teknik ve ekonomik olarak istenmeyen bir durum meydana gelecektir. Bu sebeple E değerini sargının karakteristik bilgilerine ve boyutlarına bağlı bir sınıra kadar artırmak yerinde olur.

Ayrılmış sarımlarda bölgeler arası en yüksek zorlanma birinci ve ikinci elemanda daha genel olarak E . ve $(E+1)$. bölgeler arasında meydana gelir. Daha açık bir ifadeyle zorlanma sarım sayıları arasındaki farkın $[n(E+1)-1]$ olduğu, ilk sargı elemanın $[n/2 (E-1)+1]$ 'inci sarımıyla ilk sargı elemanının ilk sarımından itibaren sayıldığında ikinci sargı elemanının $[nE+n/2(E+1)]$ 'inci sarımı arasında meydana gelir. Bölgeler arası en büyük zorlanma bir elemana düşen gerilimden $[n(E+1)-1]/nE$ defa daha büyük olur. Gerçekte görülen durumlar incelendiğinde ($n \geq 10$) bölgeler arası maksimum gerilim bir elemanın gerilimini $E=2$ için yaklaşık % 50, $E=4$ için % 25, $E=6$ için % 16, $E=8$ için % 13 dolaylarında geçtiği görülmüştür. Herbir elemanda düzgün bir gerilim dağıldığı kabulüyle sarımlar arasındaki maksimum zorlanma bir eleman geriliminin yarısına eşittir.

Sargılar üzerinde yapılan deneysel ölçümlerden görülebileceği gibi son söylenen koşul her zaman tamamıyla yerine getirilemez. Yüksek frekanslı (birkaç yüz kHz) salınımlar, düzgün dağılmış temel gerilime eklenirler. Sonuçta da ayırık sargıların sarımları ve bölgeleri arasındaki zorlanmayı gözle görülür bir şekilde

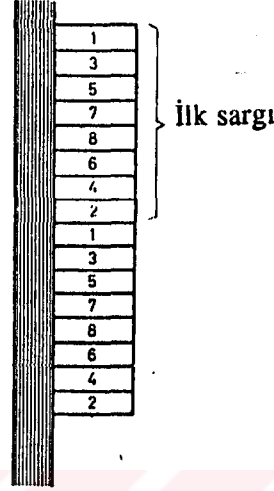
artırırlar. Her bölgesinde 18 sarımdan oluşan sargıda ($n=18$) $E=2, 4$ ve 6 değerleri için iç salınımları % 10'un altında kalır. Ve bu iç salınımlar sebebiyle gerilim yükselir fakat $E=8$ için iki komşu bölge arasındaki gerilim düzgün dağılımdaki değerinden 1,5 kez fazla olur. Şayet her bölümdeki sarım sayısı aşırı yüksek olsaydı ($n > 36$) benzer bir olayın her elemanında yalnızca 2 bölüm ($E=2$) olan sargılarda da ortaya çıktığı bulunabilirdi. $5 - 10 \mu s$ 'e kadar süreli bu tip salınımlar kıyılmış dalgali olaylarda zararlı olabilir. Bu da herbir bölümde oldukça büyük sayıda sarımdan kaçınılması gerektiğinin diğer bir sebebidir. Şayet bu tür bir çözümü seçmek zorunda kalınırsa bu tip zorlanmaların görüleceğinin de yalıtım tasarımında hesaba katılmalıdır.

Ayrılmış sarımlı sargıların burada tartışılan tiplere ek olarak birkaç çeşidi vardır. Bu sargıların seri kapasiteleri de bütün parça kapasitelerin enerjilerini tüm enerjiye eşit alarak yaptığımız yöntemle benzer bir yöntemle hesaplanabilir.

Helisal Sargının Seri Kapasitesi :

Helisal tip sargı, alçak gerilim sargısı ve bölmelenmiş transformatör sargısı olarak kullanılır. İkinci tipteki sargıda, bölüm basamaklarını oluşturan ard arda gelen bölgeler şekil 5-14'e göre paralel dallar gibi biri diğerinin yanına sarılır. Şekilde 2 basamaklı olan helezon sargının ilk iki sarımı gösterilmektedir. Sarımlar şekilde görüldüğü gibi birbirinden ayrık sarıldığında, olayların çoğunda olduğu gibi komşu sarımlar arasındaki gerilim farkı basamak geriliminin 2 katına eşittir. Doğal olarak sargıları ayrık sarmanın başka birçok şekli vardır. Yukarda yalnızca genel hatlarıyla çıkarılan sonuca göre, spiral sargıların seri kapasitesi aşağıdaki bağıntıyla verilir. Burada C_i (5.29) bağıntısından hesaplanan sarım kapasitesi, k_i sargıyı ayrık sarma sonucu oluşan ve ölçmeyle bulunan bir faktör, n_i bir basamaktaki sarım sayısı, n_s sargıdaki toplam sarım sayısı olarak tanımlanabilir. Burada (n_s/n_i) adet basamak varsa ve birbirine eşit seri kapasitelerin toplamı

$$K = C_t \frac{k_t n_t p}{\left(\frac{n_a}{n_t} \right)} \quad (5.44)$$



Şekil 5-14- Helisal Sargı

Şekil 5-14'deki sargı için bu büyüklüklerin sayısal değerleri $k=4$, $p=1$, $n_t = 10$ ve $n_a = 80$ dir. Bu değerleri (5.44)'da yerine koyarak

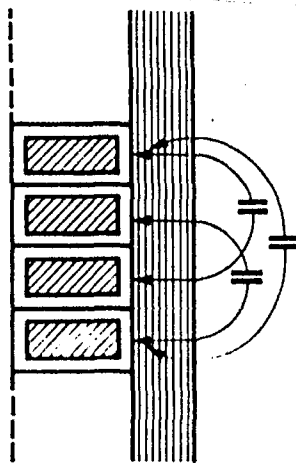
$K=5.C_t$ olur.

Basit bölmelendirilmiş bir spiral sargıda ise $n_t=1$ değeri (5.44)'da yerine konmalıdır.

Ayrılmış sarımlı helisal sargılarda birbirine komşu olmayan sarımlar arasındaki parazit kapasitelerden dolayı seri kapasite artabilir (Şekil 5-15). Tecrübeler gösteriyor ki bu etki, K kapasitesini bir düzeltme faktörü $k_f > 1$ ile çarparak hesaba katmak gerekir. (5.29)'dan hesaplanan C_t seri kapasitesinin değerini alıp ve düzeltme faktörünü de hesaba katarak (5.44) denklemi şu bağıntıya dönüşür. Benzer şekilde (Büyüklükler metre boyutundadır.)

" helisal sargıların seri kapasitesi "

$$K = k_c \frac{27,8D}{\left(\frac{n_a}{n_t} \right)} \frac{\epsilon_t (h+2\delta_t)}{2\delta_t} k_t n_t p \cdot 10^{-12} F \quad (5.45)$$



Şekil 5-15- Helisal Sargıdaki Parazit Kapasiteler

Parelel kapasiteler

Eş eksenli sargılar arasındaki ve en içteki sargı - nüve arasındaki kapasiteleri hesaplamak için, sargılar ve nüve düzgün yüzeyli eş eksenli silindirler olduğu ve çaplarının sargılar arasındaki boşluğa oranla yeterince büyük olduğu kabul edilir. Daha sonra kapasiteler düzlem kondansatörler için geçerli olanbağıntıyla hesaplanır. H_1 ve H_2 yüksekliğindeki 2 eş eksenli silindirik sargılar arasındaki kapasite şu bağıntıyla verilir.

$$C = \frac{27,8D \frac{H_1 + H_2}{2}}{\frac{\delta_0}{\epsilon_0} + \frac{\delta_s}{\epsilon_s}} \cdot 10^{-12} F \quad (5.46)$$

Burada D iki sargı arasındaki yağ kanalının ortalama çapı, δ_0 iki silindir yüzeyi arasındaki yağın kalınlığı, δ_s iki yüzey arasındaki katı yalıtkanın kalınlığı ($\delta_0 + \delta_s$ silindirler arası radyal mesafe) ϵ_0 ve ϵ_s sırasıyla yağın ve katı yalıtkanın dielektrik sabitidir. En içteki sargı ve nüve arasındaki kapasiteyi hesaplamak için (5.46) bağıntısındaki $(H_1 + H_2 / 2)$ ifadesi sargının yüksekliği olan H 'ın 1,1 katı ile yer değiştirmelidir.

En dıştaki sargılar arasındaki kapasite de paralel silindirler için geçerli olan kapasite formülünden hesaplanır. Bu da

$$C = \frac{27,8H}{\ln \frac{\sqrt{a^2 - D^2} + s}{D}} \cdot \frac{(\delta_o + \delta_s)}{\frac{\delta_o}{\epsilon_o} + \frac{\delta_s}{\epsilon_s}} \cdot 10^{-12} F \quad (5.47)$$

olur. Burada H en dıştaki sargıların yüksekliği, D çap, s iki sargının eksenleri arasındaki kaçıklık, $(\delta_o + \delta_s)$ iki sargı arasındaki minimum mesafe, δ_o yağın kalınlığı ve δ_s katı yalıtkanın kalınlığıdır (Transformatör kağıt yalıtkanı). Büyüklükler metre boyutundadır. Ortadaki faz sargısı ve dışardaki iki komşu sargı arasındaki kapasiteyi bulmak için, (5.47) formülündeki C değerini 2 ile çarpmak gerekir. Dışardaki sargı ile komşu tank yüzeyi arasındaki kapasite de (5.47)'deki formülden bulunan değerin 2 katıdır. Buna karşılık burada s büyüklüğü sargı eksen ve tank yüzeyi arasındaki mesafenin 2 katını verir.

Genellikle, sargılar ve daha uzaktaki topraklanmış parçalar (boyunduruk ve ona bağlı metal parçalar) arasındaki kapasite sadece tahmin edilebilir. Bu kapasiteler hiçbir zaman hesaplanmış toprak kapasitelerin % 10 - 20'sini geçmez.

5.2- Öz ve ortak endüktanslar

Öz ve ortak endüktanslar kapasiteler kadar kesin belirlenemezler. Demir nüvenin endüktivitesi frekansın bir fonksiyonudur: **Frekans yükselirken endüktans azalır.** Bir sargıda oluşan salınımlar yalnızca tek bir frekanstan ibaret değildir; Temel harmoniğe ek olarak daha yüksek harmonikler de görülür. Sargının tipine ve düzenlenme şekline bağlı olarak bu salınım frekansları 1000 Hz ile 1 000 000 Hz arasındadır. Transformatörün endüktans-frekans karakteristiği bilinse bile, frekans bağımlı endüktans içeren matematik modele dayalı hesaplar gereğinden fazla karışık olacaktır. Deneyler sonucu elde edilen tecrübeler transformatörün darbe gerilim hesaplarında endüktansın frekans bağımlılığının hesaba katılmasının gerekmediğini göstermiştir. Ölçmeler ve yapılan hesapların birbiriyle karşılaştırılmasıyla darbe

gerilimine karşı incelenecek transformatör sargılarının endüktansının transformatörün yüksüz endüktansının 1/15 ile 1/40 arasında olduğu bulunmuştur. Büyük transformatörler için bu hesabı yaparken yüksüz endüktansı 15 - 20 arasındaki bir sayıyla, küçük transformatörler için ise 20 - 40 arasındaki bir sayıyla bölünmelidir.

Büyük transformatörlerin yüksüz endüktansı çok iyi bir yaklaşıklıkla şu bağıntıdan bulunabilir.

$$L_{nl} = \mu_r \mu_o \frac{A}{l_c} N^2 \quad (5.48)$$

Bu bağıntıda μ_r nüvenin bağıl geçirgenliği, $\mu_o = 1,256.10^{-6}$ H/m⁻¹ olan boşluğun geçirgenliği, A [m²] boyutunda manyetik akının geçtiği demir nüve kesidi, l_c [m] boyutunda demir nüvenin uzunluğu ve N sargının sarım sayısıdır.

Böylece darbe gerilim dağılışı incelenecek endüktansın bağıntısı

$$L = \frac{1}{15-40} L_{nl} \quad (5.49)$$

şeklini alır.

Hesaplarda gözönüne alınacak ortak endüktif kuplaj herbir sargıda ve eş eksenli sargılar arasında mevcuttur. Deneylere göre, l uzunluğundaki homojen sargının bir ucundan ölçülerek bulunan sarım uzaklığını veren koordinatlar x ve y ise iki sargı arasındaki ortak endüktans

$$M(x, y) = L^{-\nu} \left| \frac{x-y}{l} \right| \quad (5.50)$$

dır. Burada L birim uzunluktaki sargının öz endüktansıdır. Üstteki ν büyüklüğü sargının geometrik boyutlarına ve manyetik koşullarına bağlıdır. Sonlu bir model için (5.50) formülüne göre birbirine eşdeğer i. ve j. elemanlar arasındaki ortak endüktans

$$M_{ij} = L_1 q^{|i-j|}$$

dir. L_1 , bir elemanın öz endüktansı ve q , ortak endüktans kuplajının cinsini karakterize eden bir katsayıdır. Demir nüveli sargılar için $q = 0,97 - 0,99$ arasındadır.

Pratikte (5.49) denkleminde direkt olarak bulduğumuz tüm sargının öz endüktansıdır. Gerilim hesabı yapmak için sargı n eşit elemanlı bobin bölümlerine ayrılırsa bu tip bir elemanın öz endüktansı; tüm sargının toplam endüktansını bütün elemanların öz endüktanslarının ve ortak endüktanslarının tek tek toplamına eşit alınarak belirlenir. Böylece bir elemanın endüktansı L_1 , eleman sayısı n , her bir sargı elemanının arasındaki ortak endüktif kuplajı karakterize eden katsayı q ve tüm sargı eşdeğer endüktansı L olmak üzere, (5.51) bağıntısına göre tüm sargı endüktansı için

$$L = nL_1 \left[1 + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{n-k}{n} q^k \right] \quad (5.52)$$

bağıntısı doğru olmalıdır.

Endüktansları L_r ve L_s olan iki eş eksenli sargı arasındaki ortak endüktans şu bağıntıdan hesaplanabilir

$$M_{rs} = q_{rs} \sqrt{L_r L_s} \quad (5.53)$$

q_{rs} katsayısı sargılar arasındaki kuplajın gevşek yada sıkı olduğunu gösterir. Bu endüktif kuplaj aynı nüve üzerindeki iki sargı arasında çok sıkıdır. Bu tür durumlarda $q_{rs} = 0,97 - 0,99$ dir. Şayet biri veya sargıların her ikisi birden birkaç elemana ayrılmışsa, başka sargıların sargı elemanlarıyla bu sargı elemanları arasındaki ortak endüktif kuplaj da belirlenmelidir. Bu hesapları yaparken aşağıdaki prensipler akılda tutulmalıdır: Sargılarda yapılan bölmeler iki sargının arasındaki (5.53) denklemiyle belirlenen kuplajı azaltmamalıdır. Bu tip bir hesap aşağıda bir örnekle gösteriliyor,

L_r endüktanslı bir sargı iki parçaya ayrılınsın, birinciye eş eksenli olarak düzenlenmiş olan L_s endüktanslı diğer sargı parçalanmadan bırakılsın. (74) formülüne göre L_r endüktanslı sargının bir elemanının endüktansı, ($n = 2$ alarak)

$$L_{r1} = \frac{L_r}{2(1+q)} \quad (5.54)$$

dır. 2 parçaya ayrılmış olan sargının bir elemanı ile hiç ayrılmamış olan sargı arasındaki ortak endüktif kuplaj q^* ile karakterize edilirse iki sargı arasındaki ortak endüktans şu bağıntıyla verilecektir.

$$M_{rs} = 2q^* \sqrt{L_{r1} L_s} \quad (5.55)$$

(5.53) ve (5.55) denklemlerini kullanarak ve L_r 'yi (5.54) denkleminde alarak

$$q^* = q_{rs} \sqrt{\frac{1}{2}(1+q)} \quad (5.56)$$

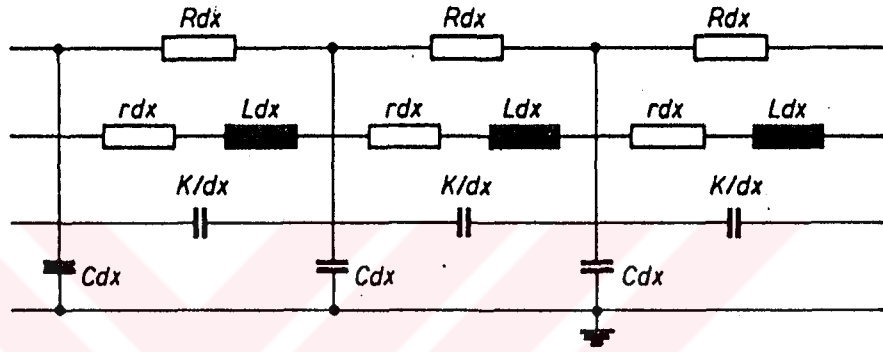
denklemini bulunur. Böylece bir sargının veya her iki sargının birden birkaç parçaya ayrılması durumunda ortak endüktif kuplaj katsayısının (q^*) nasıl bulunacağı belirlenmiş oldu.

(5.49) formülünde paydadaki sayı ve ortak endüktif kuplajı karakterize eden q katsayısı transformatörün konstrüksiyel tasarımına ve kullanılan nüve malzemesine bağlıdır. Bu katsayıların belirlenmesinde genel geçerli bir kural yoktur. Somut hesaplar yaparken sonuçları birimlerle açıklamak uygundur.

Bir sargıda meydana gelen gerilim salınımları sargı direnci ve demir kayıpları tarafından söndürülür. Şayet sönüm durumu da hesapta göz önüne alınacaksa şekil 2-2'deki modele dirençler eklenmelidir. Sargı direnci endüktanslara seri bağlanarak demir kayıplarını gösteren direnç onlara paralel bağlanarak hesaba katılır. Bu şekilde tamamlanmış sonsuz küçük modelin bir bölümü şekil 5-16'de görülüyor. Burada r , sargının birim uzunluğundaki bir bölümün direnci ve R , demirin birim uzunluktaki bölümündeki demir kayıplarına karşılık gelen dirençlerdir. Bu modele uygulanabilen diferansiyel denklem takımı gerilim dağılımının sadece kendisini

çıkartmak amacı için çok karmaşık fakat sönüm faktörünü hesaplamak için uygundur. Uzun domeninde harmonik salınım frekansının, $\beta_m = m \cdot \pi / l$, sönüm faktörü

$$\delta = \frac{r_1}{2L_1} + \frac{m^2 \pi^2}{2R_1 (C_1 + K_1 m^2 \pi^2)} \quad (5.57)$$



Şekil 5-16- Söndürüm dirençli transformator sargısının matematik modeli

dir. Bu bağıntıda $r_1 = r \cdot l$, $L_1 = L \cdot l$, $R_1 = R \cdot l$, $C_1 = C \cdot l$ ve $K_1 = K / l$ tüm sargıya ait değerlerdir. l sarım uzunluğu ve $m = 1, 2, 3, \dots$ dir. Sönüm faktörünün ilk terimi sargı direncinin sebep olduğu sönüm ikincisi demir kayıplarının sebep olduğu sönümdür. Büyük transformatorlerde ikinci terim birinciden çok büyüktür.

Pratikte sönüm faktörü genellikle deneysel bilgilere dayalı olarak belirlenir. Sönümün karakteristiği, benzer polaritede ard arda gelen 2 yarı dalganın A_1 ve A_2 genliklerinin oranıdır. Büyük transformatorlerde yapılan ölçümlere göre, bu oranlar ele alınan transformatorün salınım paterninde meydana gelen bütün harmonikler için sabit kalır diğer bir deyişle oranın değeri frekanstan bağımsızdır. k . harmoniğin sönüm faktörü tatmin edici bir yaklaşıklıkla şu bağıntıdan hesaplanabilir.

$$\delta_k = \frac{\omega_k}{2\pi} \ln \frac{A_1}{A_2}$$

A_1 / A_2 oranının değeri, transformatör tasarımına bağlı olarak 1,2 - 1,4 arasındadır oysa frekansa bağlı olarak sönüm faktörünün çoğunlukla değeri birkaç $1\ 000\ s^{-1}$ ile $20\ 000\ s^{-1}$ arasındadır. Sönüm etkisi hesaba salınım elemanlarını

$$f_k(t) = e^{-\delta_k t}$$

fonksiyonuyla çarparak katılır.

Gerilim salınımlarının başında, söndürüm etkisi fark edilmez ve bu yüzden söndürümün genellikle yalıtım dizaynına etki eden maksimum gerilim üzerine bir etkisi yoktur.

6.BÖLÜM - BİR TRANSFORMATÖRÜN DAĞILMIŞ SABİTELİ EŞDEĞER DEVRESİNDE ELEMAN SAYISININ BELİRLENMESİ: [2]

Gerilim dağılışı hesaplamak amacıyla model oluştururken, birkaç tane kısmen de olsa birbirine zıt durumlar gözönüne alınmalıdır. Modele dayalı olarak hesaplanan gerilim salınımları gerçek sargı veya sargı sisteminde meydana gelen salınımlara mümkün olabildiğince yaklaşması birincil öneme sahiptir. Bu durum şöyle ifade edilir; hesaplanarak bulunan gerilimlerde gerçek sargının salınımlarında önemli rol oynayan bütün harmonik salınımları bulunmalıdır. Sonlu sayıda elemandan oluşan modelin gerilim harmonik salınımlarının sayısı bağımsız düğüm noktaları sayısına eşittir. (gerilimi sınır koşullarıyla belirlenemeyen düğüm noktaları bağımsız olarak kabul edilir. n elemandan oluşan ve bir ucuna darbe gerilimi uygulanan diğer ucundan topraklanan bir sargı modelinde bağımsız düğüm sayısı $(n-1)$ dir.) Bir sargı yada sargı sistemi salınıma ne kadar yatkınsa (diğer bir deyişle homojen bir sargının α faktörü ne kadar yüksekse) modelde o kadar çok elemanter sargı bulunmalıdır. Pratikte, elemanter sargıların sayısını herbir elemanter sargının içinde yaklaşık üniform gerilim dağılışı olacak şekilde seçmek uygundur, diğer bir deyişle herbir elemanter sargının α faktörünün değeri 2 - 3'den büyük olmamalıdır. Homojen bir sargı, n elemanter parçalara bölündüğünde (3.3) formülü kullanılarak bu tip bir elemanın α faktörü şu bağıntıdan elde edilir. Burada α , tüm sargıya ait bir katsayıdır.

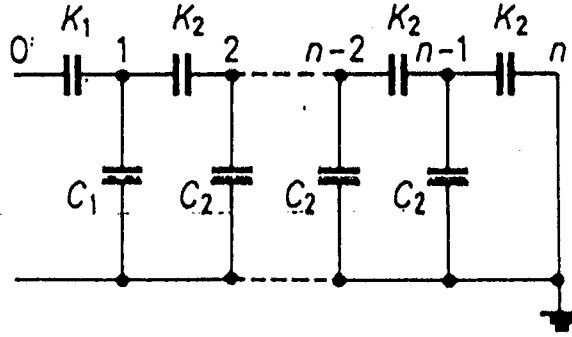
$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{C_r/n}{K_r n}} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{C_r}{K_r}} = \frac{1}{n} \alpha_r$$

Sargı veya sargı sistemi elemanter parçalara bölündüğünde; bütün bölüm noktaları (modeldeki tüm düğümler) gerilimi bulunmak istenen düğüm noktaları olmalıdır. Sargı sistemlerinde ve birbirinden farklı karakteristikleri olan homojen olmayan sargı parçalarında veya sargılarda, homojen bölge uçları ayırma noktaları olarak seçilmelidir. Uçlar çıkarılmış ayar sargılarında, çıkarılan uç noktalarını, en azından gerilimin dağılışıda önemli rol oynaması beklenen noktaları kesim noktaları yapmak tercih edilir. Modeldeki eleman sayısı belirli bir sınırı aşmamalıdır. Ortak ve öz endüktans katsayılarının hesabındaki belirsizliklere yukarda işaret edildi. Tüm sargının endüksiyon katsayısı o sargıya ait herbir sargı bölümlerinin katsayısından elde edildiği de gösterildi. Sonuç olarak sargı bölümleri sayısı ne kadar çoksa tek tek herbir elemanın karakteristiklerini belirlerken hata yapma olasılığı o kadar yüksektir. Öz ve ortak endüktans katsayılarının sayısı eleman sayısının karesiyle doğru orantılı olarak artar ve hesaptaki yanlışlıklar da eleman sayısı ile artabilir. Tecrübeler göstermiştir ki gerilim dağılışı hesaplarında yalnızca başlangıç gerilim dağılışı değil aynı zamanda gerilim salınımları da belirleneceği zaman 10 - 12 elemandan fazlasını içeren modeller kullanmak uygun değildir. Bahsedilen eleman sayısı yüksek seri kapasiteli sargıları olan büyük transformatörlerin hesaplarında yeterlidir. Bu tip bir modelden teknik ve ekonomik ihtiyaçları karşılayan gerilim dağılışı $\pm \%20$ doğrulukla hesaplanabilir.

7.BÖLÜM - HOMOJEN OLMAYAN SARGILARDAKİ GERİLİM DAĞILIŞI : [2]

Disk tipi transformatörlerin hat terminallerinin yanındaki diskler sargı içindeki disklerden çoğunlukla farklıdır. Genellikle en dıştaki disklerin sargı sonu yalıtımı için yer sağlamak ve burada oluşan diğerlerinden büyük değerdeki mekanik zorlanmalara dayanmak amacıyla yalıtımı kuvvetlendirmek gerekir. Bu yüzden sargı sonundaki sarımların sayısı azaltılmalıdır. Ancak çoğunlukla küçük seri kapasiteli disk sargılı eski tasarımlarda görülen : Sondaki disklerin artması beklenen aşırı gerilim zorlanmalarına dayanması için, sarımın yalıtımı artırılmış şekilde üretildiği veya zorlanmaları azaltmak için, bu diskler sargıların diğer parçalarının seri kapasitesinden büyük seri kapasiteye sahip olacak şekilde yapıldığıdır. Eleman sayısı çok olan sargılarda (yüksek E değerli sargı) gerekli sarım sayısı, çoğunlukla sargı sonlarının birinde eleman sayısı diğerlerinden farklı olan sargı bölümü kullanılarak elde edilebilir. Sargıları böyle homojen olmayan bir şekilde tasarlamak gerilim dağılışı çok büyük bir şekilde etkileyebilir. Genellikle bu düzensizliği kapasite devresinde yerine koyup başlangıç gerilim dağılışı bulunur ve bu dağılışa göre düzensizliğin kötü etkileri gözlenir. Çok kötü durumlarda kapasitelerin değerlerini ve yerlerini ayarlayan bu metoda daha düzgün gerilim dağılışı elde etmek için başvurulmalıdır.

Sargının izolasyon kuvvetlendirmesi uygulanan giriş bölümünde oluşan düzensizliğin başlangıç gerilim dağılışı etkisi şekil 7-1 de görülen bir ucuna u_0 genliğinde basamak gerilimi uygulandığı kabul edilen n sayıdaki kapasiteli devreye göre hesaplanır. Devrede, C_1 paralel kapasitesi ve K_1 seri kapasitesi olan ilk eleman



Şekil 7-1- Başlangıç bölümünde düzgünlük olan sargının matematik modeli

hariç diğer bütün elemanlar birbirine eşittir.

$C_2 = C_3 = \dots = C_n$ paralel kapasiteler

$K_2 = K_3 = \dots = K_n$ seri kapasiteler

$C_1 = a_1 \cdot K_1$ ve $C_2 = a_2 \cdot K_2$ eşitliklerini göstererek ve $t=0$ için elektrostatik yükler sıfır olması gerektiğini hesaba katarak aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$-K_1 (u_0 - u_1) + K_1 a_1 u_1 + K_2 (u_1 - u_2) = 0,$$

$$-K_2 (u_1 - u_2) + K_2 a_2 u_2 + K_2 (u_2 - u_3) = 0$$

.

.

.

$$-K_2 (u_{k-1} - u_k) + K_2 a_2 u_k + K_2 (u_k - u_{k+1}) = 0,$$

.

.

$$-K_2 (u_{n-3} - u_{n-2}) + K_2 a_2 u_{n-2} + K_2 (u_{n-2} - u_{n-1}) = 0,$$

$$-K_2 (u_{n-2} - u_{n-1}) + K_2 a_2 u_{n-1} + K_2 u_{n-1} = 0$$

Bu denklem setini çözerek k. düğüm gerilimi

$$u_k = u_o \xi r_k$$

olarak bulunur. Burada

$$\xi = \frac{K_1}{K_2} \left(1 - \frac{x r_1}{1 + x r_1} \right)$$

$$x = \frac{K_1}{K_2} (1 + a_1) - (1 + a_2) ,$$

$$r_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{a_2 + 4 \sin^2 \frac{i\pi}{2n}} \sin \frac{i\pi}{n} \sin k \frac{i\pi}{n} \quad (7.1)$$

Düzensüzlük ξ faktörüyle karakterize edilir. Homojen sargılar için değeri $\xi = 1$ dir. Homojen sargıdaki başlangıç gerilim dağılımı (7.1) denklemi yerine (3.2) denklemini kullanarak yaklaşık olarak bulunabilir. Buradaki notasyonları (3.2) denkleminde kullanarak

$$r_k = \frac{\sinh(n-k) \sqrt{a_2}}{\sinh n \sqrt{a_2}} \quad (7.2)$$

Düzensüzlüğü son bölümünde bir sargı boyunca gerilim dağılışı benzer bir yolla bulunabilir. Bu sefer de diğerlerinden farklı olan ve hesabın temeli olan n elemanlı modelin son elemanıdır. Elektrostatik yük dengesini ifade eden denklem setini öncekine benzer yolla yazarak ve çözerek k . düğüm gerilimi şu bağıntısından elde edilir.

$$u_k = u_o \left[r_{k1} - \frac{x r_{n-1}}{1 + x r_{n-1, n-1}} r_{k, n-1} \right] ,$$

Burada

$$r_{v\mu} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{a_1 + 4 \sin^2 \frac{i\pi}{2n}} \sin v \frac{i\pi}{n} \sin \frac{\mu i\pi}{n}, \quad (7.3)$$

$$x = \frac{K_n}{K_1} (1 + a_2) - (1 + a_1),$$

$$a_1 = \frac{C_1}{K_1},$$

$$a_2 = \frac{C_n}{K_n}$$

dir.

Örnek.7.1 - 68 diskten oluşan ve bir ucundan topraklanmış bir transformatör sargısı boyunca başlangıç gerilim dağılışı bulunacaktır. Sargı içi yalıtım kuvvetlendirmesi sebebiyle ilk 4 disk diğerlerinden farklıdır. Sargı her bir elemanı 4 diskten oluşan 17 elemanlı modelle modelleniyor. Sargı kapasiteleri

$$K_1 = 3705 \cdot 10^{-12} \text{ F}, K_2 = 5900 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$C_1 = 76,7 \cdot 10^{-12} \text{ F}, C_2 = 87,2 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

Bu verilerle

$$a_1 = C_1 / K_1 = 0,0206 \text{ ve}$$

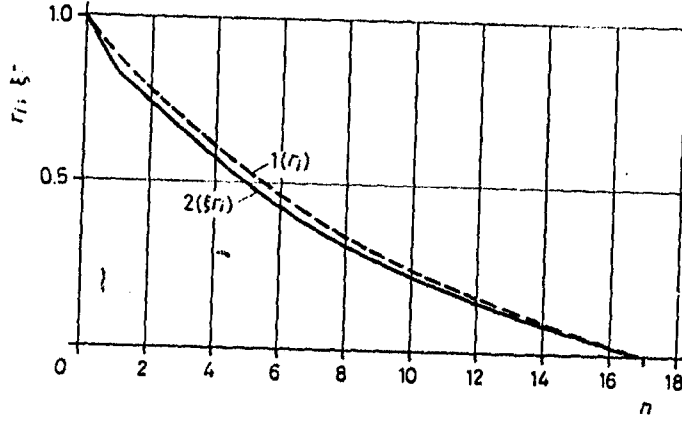
$$a_2 = C_2 / K_2 = 0,0147$$

$$r_1 = \frac{\sinh(n-1)\sqrt{a_2}}{\sinh n\sqrt{a_2}} = \frac{\sinh 16\sqrt{0,0147}}{\sinh 17\sqrt{0,0147}} = 0,885$$

$$\frac{K_1}{K_2} = 0,629$$

$$x = \frac{K_1}{K_2} (1 + a_1) - (1 + a_2) = -0,372$$

yukarda bulunanlardan



Şekil 7-2- Başlangıç bölümünde sargı boyunca başlangıç ger. dağı. 1-hom. sar. 2-hom. olmayan sar.

$$\xi = \frac{K_1}{K_2} \left(1 - \frac{x r_1}{1 + x r_1} \right) = 0,629 \left(1 - \frac{-0,372 \cdot 0,885}{1 - 0,372 \cdot 0,885} \right) = 0,983$$

Bulunan değerler $r_1, r_2, \dots, r_{16}$ ve $\xi r_1, \xi r_2, \dots, \xi r_{16}$, sargı bölüm noktalarının fonksiyonu olarak şekil 7-2'de görülmektedir. Gerilim dağılışı başlangıç bölümü düzgün olan durumda "1" eğrisini izleyecek (r_1 v.b.için) oysa başlangıç bölümünde düzgünsüzlük olan durumda "2" eğrisini (ξr_1 v.b.için) izleyecektir. Düzgünsüzlük etkisi altında, başlangıç bölgesinde düzgünsüzlük olan eğrideki "2" başlangıç gerilimi dağılışı üniform dağılışa karşılık gelen doğrudan daha çok ayrılarak "1" eğrisindekinden daha az değerde olacaktır. Ek olarak gerilim dağılışı eğrisinde başlangıç bölgesinden sonra bir kırılma noktası görülecektir. Bütün bunlara rağmen ilk 4 disk üzerinde düşen başlangıç geriliminin artışı tehlikeli değildir ve yalıtım kuvvetlenmesi bu zorlanmaya kolaylıkla dayanabilecek kapasitede olacaktır.

Örnek.7.2 - 40 diskten oluşan ve bir ucundan topraklanmış bir sargı incelensin. İlk 8 diskin seri kapasitesi artırılmıştır. Bu durumda sargı 5 bölüme ayrılıyor ($n=5$). Kapasiteler şu değerdedir.

$$K_1 = 4975 \cdot 10^{-12} \text{ F}, \quad C_1 = 276 \cdot 10^{-12} \text{ F},$$

$$K_2 = 45 \cdot 10^{-12} \text{ F}, \quad C_2 = 276 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

Bu değerlerden

$$a_1 = \frac{C_1}{K_1} = 0,0554$$

$$a_2 = \frac{C_2}{K_2} = 6,12$$

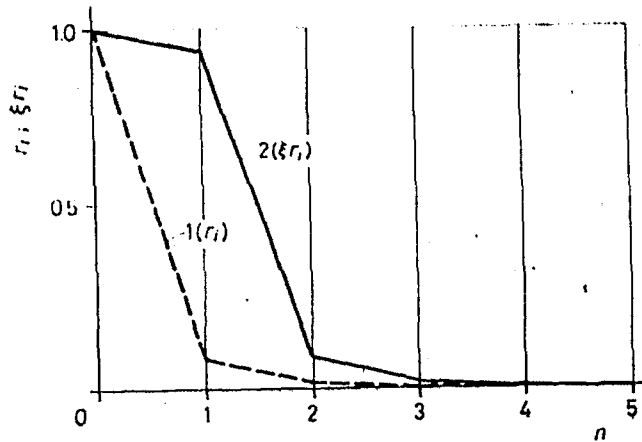
$$r_1 = \frac{\sinh(n-1)\sqrt{a_2}}{\sinh n\sqrt{a_2}} = \frac{\sinh 4\sqrt{6,12}}{\sinh 5\sqrt{6,12}} = 0,0845,$$

$$\frac{K_1}{K_2} = 110,4$$

$$x = \frac{K_1}{K_2} (1+a_1) - (1+a_2) = 109,4$$

yukardaki değerlerle

$$\xi = \frac{K_1}{K_2} \left(1 - \frac{x r_1}{1+x r_1}\right) = 110,4 \left(1 - \frac{109,4 \cdot 0,0845}{1+109,4 \cdot 0,0845}\right) = 11,04.$$



Şekil 7-3- Başlangıç bölgesinde artırılmış seri kapasiteli diskleri olan sargı boyunca gerilim dağılımı 1- Hom. sar. 2- Hom. olmayan sar.

Şekil 7-3'de homojen sargının $(r_1, r_2, \dots, r_5)$ ve homojen olmayan sargının $(\xi r_1, \xi r_2, \dots, \xi r_5)$ başlangıç gerilim dağılımı görülüyor. Başlangıç bölgesinde seri kapasiteyi artırmanın bir sonucu olarak bu bölgede düşen gerilim azaldı ancak bitişik bölgede düşen gerilim aynı derecede arttı. Ve sargı sonunda kalan diğer bölümlerin geriliminden de alarak başlangıç bölgesi homojen olan durumdaki ikinci bölge bitiş geriliminin daha altına düştü. Maksimum zorlanmanın yalnızca sargı boyunca yeri değişmiştir. Sonuç olarak başlangıç bölgesindeki seri kapasitedeki bu dereceye varan artışın zararlı olduğu ortaya çıkıyor.

Şekil 7-2 ve şekil 7-3'deki eğrilerden sargının başlangıç bölümündeki bir düzgünlük birincil olarak sargının başlangıç bölümünde egemen olan gerilim dağılışına etki eder ve kalan bölgede çok az etki yapar. Benzer olarak sargı sonu düzgünlük orada oluşacak zorlanmaları çok etkin olarak düşürecek ve çok az bir şekilde sargı başlangıç bölgelerinin gerilim dağılışı etkileyecektir.

8.BÖLÜM - TRANSFER EDİLEN AŞIRI GERİLİMLERİN HESABI : [2]

Genellikle iki veya daha fazla sargı bir transformatör bacağına yerleştirilir. Kapasitif ve endüktif kuplaj sebebiyle sargıların birine direkt olarak etki eden aşırı gerilim diğer sargılardaki aşırı gerilimleri de yükseltecektir. Bu suretle dolaylı olarak diğerlerini de tehlikeye atar. Bazı durumlarda transfer edilen aşırı gerilimler, generatör transformatörlerindeki alçak gerilim sargılarında olduğu gibi, hiçbir zaman aşırı gerilimin direkt etkisine maruz kalmamış sargılarda görülür. Diğer durumlarda bir transformatör sargısı direkt olarak aşırı gerilimin etkisinde kalabilir fakat diğer sargıdan transfer edilen aşırı gerilimlerin direkt oluşan aşırı gerilimden de büyük olması beklenir. Sözü edilen duruma her iki ucundan havai hatlara bağlı yüksek çevirme oranlı şebeke transformatörlerinde rastlanabilir. Transfer edilen aşırı gerilimlerin genlikleri transformatör çıkış uçlarına bağlı olan yıldırım tutucular tarafından sınırlanmalıdır. Yada ele alınan transformatör sargılarının yalıtımı beklenen zorlanmalara dayanacak şekilde dizayn edilmelidir.

Burada açıklanan ve esas olarak olayın doğasını göstermek amacı güdülen araştırmalar 2 eş eksenli homojen sargısı olan tek fazlı transformatörlerle ilişkilidir. Şimdiye kadar gerilim transferinin hesaplamasında kapasitif olarak transfer edilen gerilimlerin bulunması konusu çevirme oranıyla orantılı olan endüktif transfer geriliminin bulunmasından daha çok incelendi. Bu yüzden yalnızca kapasitif kuplaj ile transfer edilen gerilimlerin hesabı, bu gerilimleri içeren birkaç genel sonuç çıkararak yapılacaktır. Kapasitif gerilim dağılışımdan aynı zamanda salınımlarla birlikte olan gerilimleri de içeren transfer edilen gerilimlerin üst sınırı belirlenebilir.

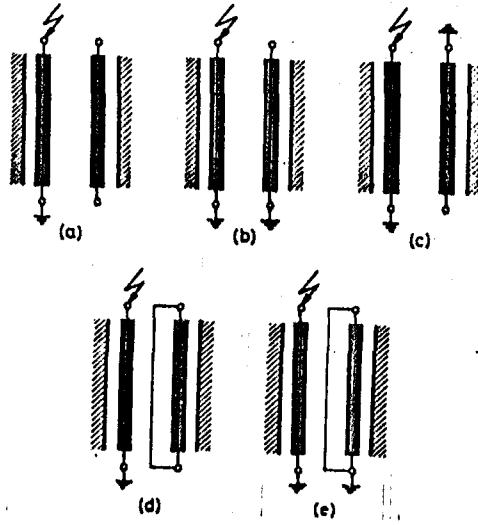
Ele alınan transformatörün bir sargısı aşırı gerilime direkt maruz kalan sargı olsun (aşağıda darbe gerilimiyle uyarılmış sargı şeklinde geçecektir), diğer sargı direkt etkilenmeyen sargı (darbe gerilimiyle uyarılmamış sargı) olsun. Uyarılmış (primer) sargının üst ucuna aşırı gerilim uygulanacak diğer ucu ise topraklanmış olsun. Uyarılmamış sargının (sekonder) bir ucunun topraklanmış olup olmamasına bağlı olarak 5 değişik durum meydana çıkar.(şekil 8-1'de görülüyor) Bunlar:

- a-) Uyarılmamış sargının hiçbir ucunun topraklanmaması,
- b-) Uyarılmamış sargının alt ucu topraklanması uyarılmış sargının uyarıldığı ucuna yakın olan üst ucunun açık bırakılması,
- c-) Uyarılmamış sargının üst ucu topraklanması uyarılmış sargının topraklanan ucuna yakın olan alt ucunun açık bırakılması,
- d-) Uyarılmamış sargının uçları kısa devre edilmesi fakat topraklanmaması,
- e-) Uyarılmamış sargının her iki ucunun da topraklanması, durumları.

Uyarılmamış sargı uyarılmış sargının sarımlarına ya benzer şekilde yada ters bir şekilde sarılmış olabileceği için bağlantılar yukardaki kadar çeşitli oluyor.

Açık uçlu sargı durumu sargıyı yüksek değerli bir dirençle veya küçük değerli bir kapasiteyle örneğin gerilim bölücüyle sonlandırmaktan çok farklı değildir. Sargıyı kısa devre etmekle de uyarılmamış sargıların uçları arasında transfer geriliminin oluşmasını önlemek amacı güdülmüştür. Transfer gerilimleri hesaba katıldığında açık ve topraklanmış uçlar 2 ekstrem durumu sembolize etmektedir. Çünkü sargı uçları sonlu empedansla sonlandırıldığında sargılar içinde meydana gelen zorlanmalar 2 ekstrem durum zorlanmaları arasında kalır.

Uyarılmış ve uyarılmamış sargıların içindeki başlangıç gerilim dağılışı şekil 8-2'de görülen kapasite devresinden belirlenir. Her iki sargı n elemanter bölüme bölünsün. Uyarılmış sargının eşdeğer seri kapasitesi K_{1r} , uyarılmamış sargının K_{2r} , uyarılmış sargının toprağa karşı eşdeğer kapasitesi C_{1r} , uyarılmamış sargının C_{2r} , iki sargı arasındaki eşdeğer kapasite C_{12r} ile gösterilsin. Bu notasyonlarla şekil 8-2'de görülen elemanter kapasitelerin değeri aşağıdaki gibidir.



Şekil 8-1-Temel bağlantı şekilleri

$$K_1 = K_{1r} n,$$

$$K_2 = K_{2r} n$$

$$C_1 = C_{1r} / n ,$$

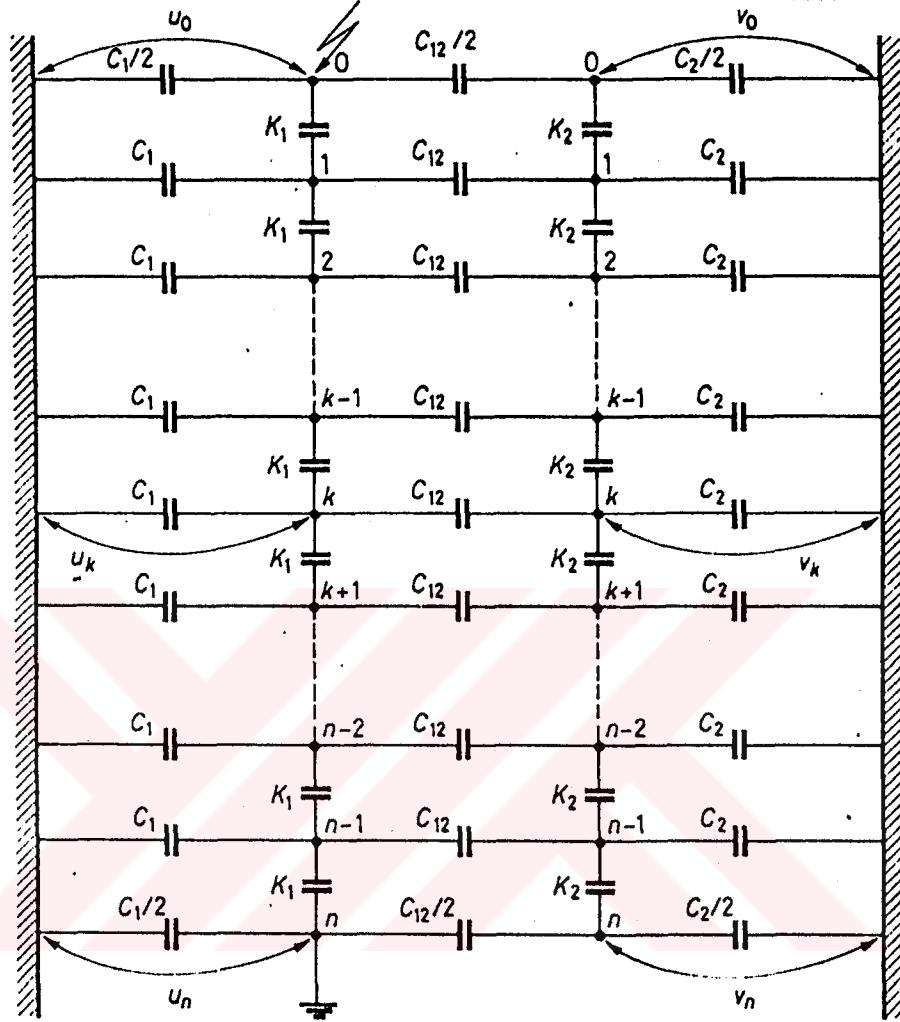
$$C_2 = C_{2r} / n$$

$$C_{12} = C_{12r} / n$$

Uyarılmış ve uyarılmamış sargıların her ikisininin düğümleri 0'dan başlayarak ve en son düğümleri n ile numaralandırılacaktır. Uyarılmış sargıdaki 0 düğümüne birim basamak fonksiyonu ($u_o=1$) şeklinde olan bir gerilim uygulandığı ve n. düğümün topraklandığı ($u_n=0$) kabul edilir. Uyarılmamış sargıların sınır koşulları aşağıdaki 5 temel durumdadır.

- a-) Durumundaki bağlantı için $v_o \neq 0$ ve $v_n \neq 0$,
- b-) Durumundaki bağlantı için $v_o \neq 0$ ve $v_n = 0$,
- c-) Durumundaki bağlantı için $v_o = 0$ ve $v_n \neq 0$,
- d-) Durumundaki bağlantı için $v_o = v_n \neq 0$,
- e-) Durumundaki bağlantı için $v_o = v_n = 0$.

Başlangıç gerilim dağılışı için (a) durumu pratik olarak (b) durumuyla, (c) durumu ise (e) durumuyla aynıdır. Bu yüzden yalnızca (b), (d) ve (e) durumları



Şekil 8-2 - Uyarılmış ve uyarılmamış sargının kapasite eşdeğer devresi

aşağıdaki gibi incelenecektir. Bu 3 temel durumun herbirinin kendine göre sınır koşullarını da düşünerek 3 değişik denklem seti yazılabilir. 3 durumun hepsini ortak bir işlem olan matris hesabında kullanmak ve sonucu da matris formunda ifade etmek uygundur.

Kapasitelerden oluşan devrenin düğümleri için elektrostatik yüklerin dengesine dayalı olarak yazılabilen denklem setini her 3 duruma da uygulayarak aşağıdaki 2 matris denklemi şekline dönüştürülebilir.

$$K_u u - T^* v = \beta u_o e_u \quad (8.1)$$

$$K_v v - T u = u_o e_v \quad (8.2)$$

Burada matrislerin açık ifadeleri

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ . \\ . \\ . \\ u_{n-1} \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \text{ eleman}$$

$$e_u = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ . \\ . \\ . \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \text{ eleman}$$

$$K_u = \begin{bmatrix} 2\beta + \gamma + 1 & -\beta & 0 & . & . & 0 & 0 & 0 \\ -\beta & 2\beta + \gamma + 1 & -\beta & . & . & 0 & 0 & 0 \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & . & . & -\beta & 2\beta + \gamma + 1 & -\beta \\ 0 & 0 & 0 & . & . & 0 & -\beta & 2\beta + \gamma + 1 \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \times (n-1) \text{ ele}$$

$$\beta = K_1 / C_{12},$$

$$\gamma = C_1 / C_{12},$$

$$\delta = K_2 / C_{12},$$

$$\varepsilon = C_2 / C_{12}$$

Bütün durumlarda v , e_v , K_v ve T bağlantı şekline bağlıdır.

(b) bağlantısı için :

$$v = \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ v_{n-1} \end{bmatrix} \rightarrow n\text{-eleman}$$

$$e_v = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow n\text{-eleman}$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 1 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow nx(n-1) \text{ eleman}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} \delta + \frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{2} & -\delta & \dots & \dots & 0 & 0 \\ -\delta & 2\delta + \varepsilon + 1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 2\delta + \varepsilon + 1 & -\delta \\ 0 & 0 & \dots & \dots & -\delta & 2\delta + \varepsilon + 1 \end{bmatrix} \rightarrow nxn\text{-eleman}$$

(d) bağlantısı için :

$$v = \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ v_{n-1} \end{bmatrix} \rightarrow n\text{-eleman}$$

$$e_v = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow n\text{-eleman}$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \rightarrow nx(n-1) \text{ eleman}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 2\delta + \varepsilon + 1 & -\delta & \dots & \dots & 0 & -\delta \\ -\delta & 2\delta + \varepsilon + 1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 2\delta + \varepsilon + 1 & -\delta \\ -\delta & 0 & \dots & \dots & -\delta & 2\delta + \varepsilon + 1 \end{bmatrix} \rightarrow nxn\text{-eleman}$$

(e) bağlantısı için :

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ v_{n-1} \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \text{ -eleman}$$

$$e_v = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \text{ -eleman}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \times (n-1) \text{ -eleman}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 2\delta + \epsilon + 1 & -\delta & \dots & \dots & 0 & 0 \\ -\delta & 2\delta + \epsilon + 1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 2\delta + \epsilon + 1 & -\delta \\ 0 & 0 & \dots & \dots & -\delta & 2\delta + \epsilon + 1 \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \times (n-1) \text{ -eleman}$$

T^* , T matrisinin transpozesidir.

Basit bir hesapla düğüm gerilimlerini içeren sütun matrisleri için aşağıdaki bağıntılar basit hesapla (8.1) ve (8.2) bağıntılarından elde edilir.

$$u = u_o [K_u^{-1} T^* (K_v - T K_u^{-1} T^*)^{-1} \cdot (\beta T K_u^{-1} e_u + e_v) + \beta K_u^{-1} e_u] , \quad (8.3)$$

$$v = u_o (K_v - T K_u^{-1} T^*)^{-1} (\beta T K_u^{-1} e_u + e_v) \quad (8.4)$$

(8.3) ve (8.4) bağıntılarından ve kapasitelerden, yukarda incelenen bütün durumlar için uyarılmış ve uyarılmamış sargılar boyunca gelişen gerilim dağılışı bilgisayarla belirlenebilir.

Aşağıda transfer edilen gerilimlerin sargı boyunca değişimlerine göre birkaç genel ifade çıkarılacak. Yalnız başına duran bir sargıda başlangıç gerilim dağılışı sargının α katsayısıyla belirlenir. Burada yapılan incelemede α 'nın değerleri uyarılmış ve uyarılmamış sargılar durumunda farklılık gösterir. Bu yüzden herbir durum ayrı olarak verilmelidir. (3.3) denklemindeki tanımı kullanarak, uyarılmış sargının α katsayısı şu şekilde bulunur.

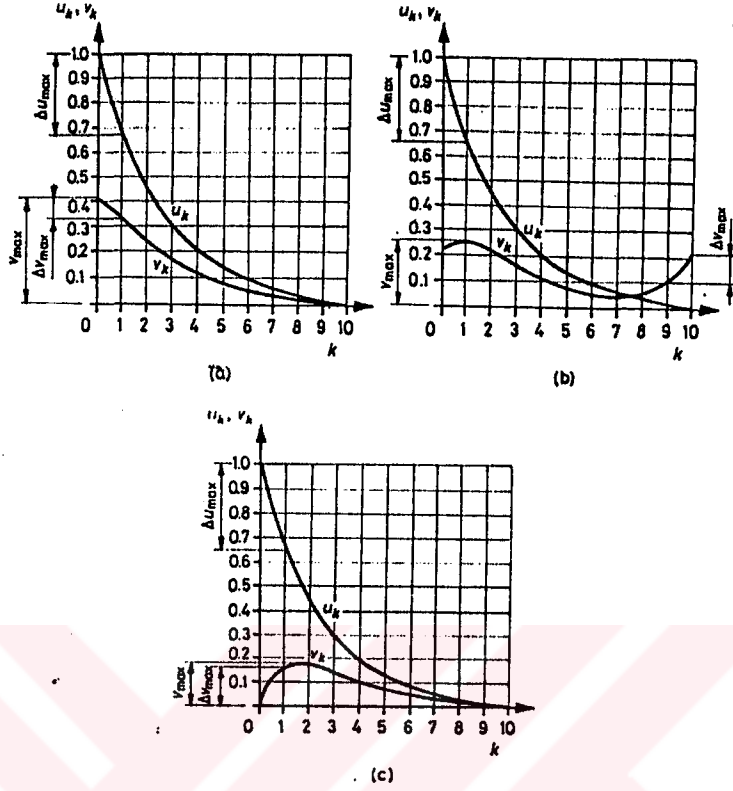
$$\alpha_1 \equiv \sqrt{\frac{C_{1r} + C_{12r}}{K_{1r}}} = n \sqrt{\frac{\gamma + 1}{\beta}}$$

Uyarılmamış sargı için

$$\alpha_2 \equiv \sqrt{\frac{C_{2r} + C_{12r}}{K_{2r}}} = n \sqrt{\frac{\varepsilon + 1}{\delta}}$$

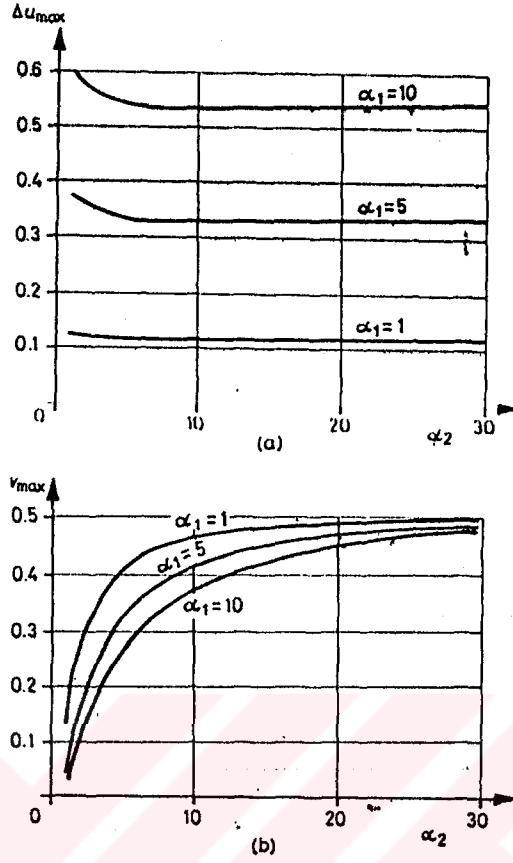
Yukarıda incelenen 2 sargı sisteminde gerilim dağılışı α_1 ve α_2 katsayılarına bağlı olacaktır.

Sargıların temel bağlantı çeşitlerinde oluşan başlangıç gerilimleri şekil 8-3'deki grafiklerle gösteriliyor. Grafiklerde gösterilen başlangıç gerilimleri (8.3) ve (8.4) denklemleriyle ($n = 10$, $\alpha_1 = 5$, $\alpha_2 = 10$, $\gamma = 0,5$ ve $\varepsilon = 1$) değerleri kullanılarak hesaplandı. Gerilim dağılışının karakteriyle ilgili genel bir sonuç şemalardan çıkarılabilir. (b) bağlantısında, uyarılmış ve uyarılmamış sargıların her ikisindeki başlangıç gerilim dağılışı yalnız başına duran bir sargıda ölçülen gerilim dağılışına benzerdir. En yüksek değerli transfer gerilimi



Şekil 8-3- Şekil 8-1'deki (b),(d),(e) durumlarına ait başlangıç gerilim dağılımı

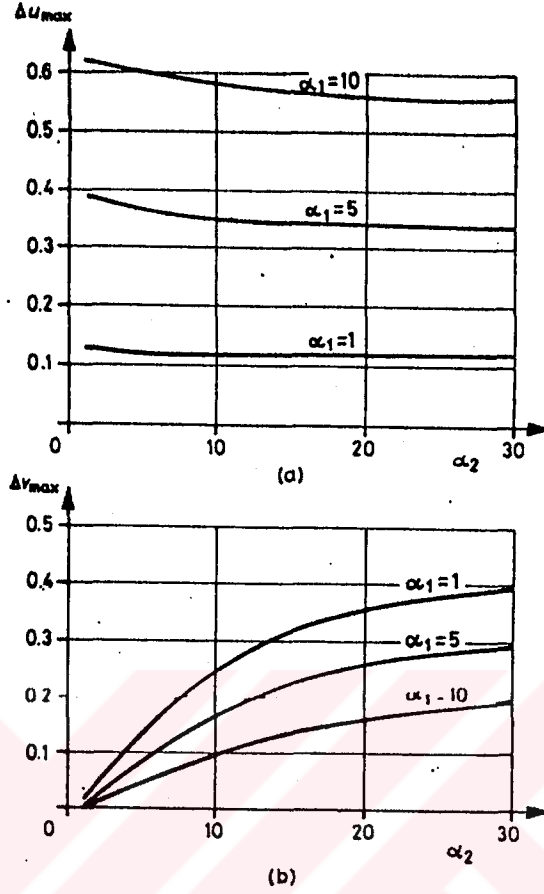
uyarılmamış sargının ucunda meydana çıkar. Hesaplara göre (b) bağlantısındaki gerilim dağılışı daha önce de söylendiği gibi (a) bağlantısındakine de benzer olacaktır. (b) bağlantısındaki gerilim dağılışı (e) bağlantısındakinden ise tamamen farklı karakterde olacaktır. Burada uyarılmamış sargının her 2 ucu da topraklıdır. Bu sebepten başlangıç gerilim değerinin bu noktalarda sıfır olacağı çok açıktır. Ancak bu sefer yüksek transfer gerilimi sargı içinde ortaya çıkar. Gerilim yükseliş hızı gerilim dağılım eğrisinin özellikle ilk bölümünde yüksektir. Bu da sargının ilk elemanına düşen zorlanmanın büyük olacağını gösterir. Benzer bir eğriye (c) durumu için yapılan hesaplar sonucu da ulaşılır. (a) durumunda hesaplanan gerilim dağılışı eğrisinin (b) durumuyla ve (c) durumunda hesaplanan eğrinin (e) durumuyla uygunluğu, kapasitif olarak hiç bir gerilimin uyarılmış sargının topraklanmış olan ucuna yakın olan uyarılmamış sargı ucuna, hatta uyarılmış sargının ucu direkt olarak topraklanmasa da, transfer edilemeyeceğini gösterir. (d) durumunda, gerilim dağılışı diğerlerinden farklıdır. Burada sargının her iki ucu sonlu bir potansiyelde olduğu



Şekil 8-4-(d) bağlantısı için α_1 ve α_2 nin fonksiyonu olarak maksimum gerilim dağılımı kabul edilir.

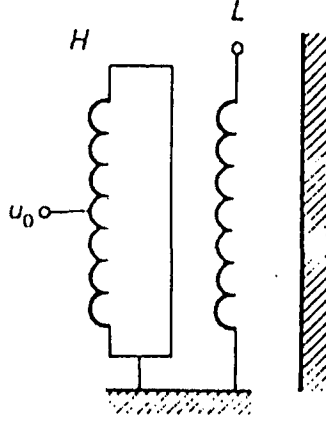
Gerilim dağılım eğrisinin karşılaştırılmasından toprağa göre transfer edilen gerilimin (v_{max}) (b) durumunda ve bir sargı elemanına yüklenen transfer edilen gerilimin (Δv_{max}) (e) durumunda maximum olduğu görülecektir. Bu maksimum gerilimler ve uyarılmış sargının ilk elemanında düşen gerilim (Δu_{max}) şekil 8-4 ve 8-5'de görüldüğü gibi α_1 ve α_2 katsayılarına bağlıdır. Bu grafiklerden α katsayılarını seçerek transfer edilen gerilim geniş sınırlar içinde ayarlanabildiği ve uyarılmamış sargının mevcudiyeti uyarılmış sargının içindeki gerilim dağılışı üzerine az da olsa bir etkisi olduğu görülebilir.

Benzer bir metod genellikle büyük transformatörlerde bulunan sargı ortalarındaki Y.G. noktalarıyla sargılardan komşu sargılara transfer edilen başlangıç



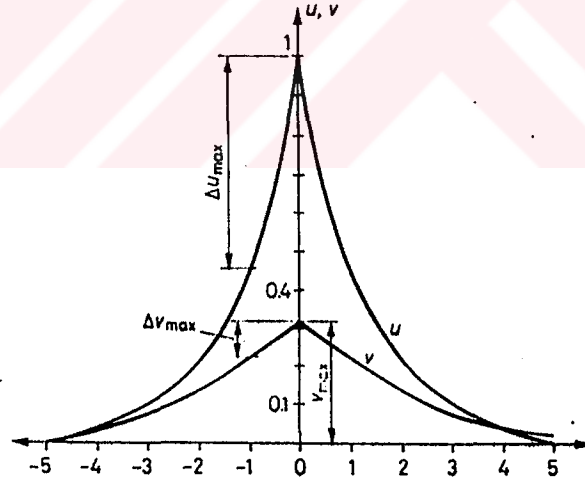
Şekil 8-5- (e) bağlantısı için α_1 ve α_2 'nin fonksiyonu olarak max. ger.

gerilimini hesaplamak için kullanılır (Şekil 8-6). Bu olayda da hesabın temeli Şekil 8-2'de görülen bir kapasite devresidir. Fakat şimdi birim basamak fonksiyonu sargının ortasına uygulanıyor. Bu sebeple eleman sayısı olarak $2n$ 'i seçmek uygundur. Burada da (8.1) ve (8.2)'a benzer matris denklemler elde edilir. Fakat onlarda oluşan matrisler uçlarından uyarılmış sargılar için geçerli olan matrislerden farklıdır. Detaylı açıklamaları bir kenara bırakarak, olayın doğasını iyi bir şekilde gösteren gerilim dağılışı eğrileri ($n = 5$, $\alpha_1 = 10$, $\alpha_2 = 10$, $\gamma = 0,5$ ve $\varepsilon = 1$) gibi değerler için şekil 8-7 'de görülmektedir. Uyarılmamış sargıya transfer edilen, sargının ortasında en yüksek değeri alan toprağa karşı gerilim (v_{max}) ve bir sargı elemanı uçları arasında görülen gerilimlerin (Δu_{max}) her ikisi ortadan bölmelendirilmiş sargının uyarım ucuna karşı zıt etki yaparlar. Maximum gerilimin $\gamma = 0,5$ ve $\varepsilon = 1$ durumu için α_1 ve α_2 katsayılarına olan bağımlılığı şekil 8-8'da gösteriliyor. Uyarılmış sargının α katsayısının (α_1) Δv_{max} 'a olan etkisinden farklı



Şekil 8-6- Y.G. noktası sargı ortasında olan sargıdan ger. trans.

olarak $v_{\max}$ üzerine de bir etkisi vardır. α_1 artarken ($\alpha_2 > 10$ için) $\Delta v_{\max}$ da artar oysa $v_{\max}$ azalır.



Şekil 8-7- Şekil 8-6 'deki sargıya ait başlangıç gerilim dağılımı

Gerilim transferi sırasında gerilim salınımları da transfer edileceğinden bu salınımlar uyarılmamış sargı boyunca da oluşur. Uyarılmamış sargının bütün noktalarındaki gerilim, şimdiye kadar sözü edilenlerden bulunan bir başlangıç değerinden başlayarak çevirme oranıyla belirlenen kararlı hal değerine karşılık gelen

gerilim etrafında salınacaktır. Gerilim salınımlarının maximum değeri şu bağıntıdan bulunabilir.

$$|v_{\max}| = |v_1| + |v_1 - v_c| \quad (8.5)$$

Burada v_1 lineer gerilim dağılışına karşılık gelen gerilim yani çevirme oranından bulunan değer ve v_c kapasiteler tarafından belirlenen başlangıç gerilimidir. (yukardaki yaklaşık bağıntıda birim basamak fonksiyonu uygulandığı kabul ediliyor ve yalnızca salınımların ilk harmoniği hesaba katılıyor. Tecrübeler bu şekilde hesap edilen değerlerin gerçekte transfer edilen gerilimden her zaman büyük olduğunu gösterdi.) Çevirme oranına göre gerilim belirlendiğinde uyarılmamış sargının sarım şekli uyarılmış sargının sarım şeklinin aynısı veya tersi olup olamadığı da düşünülmelidir.

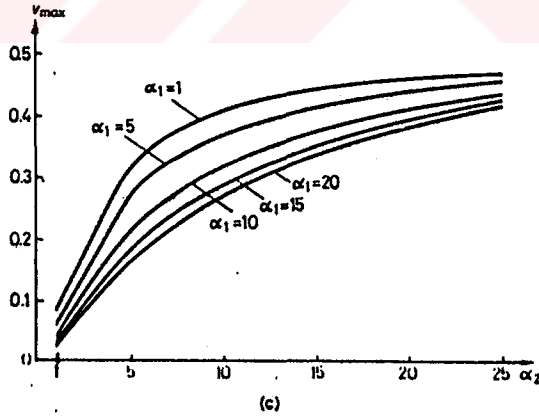
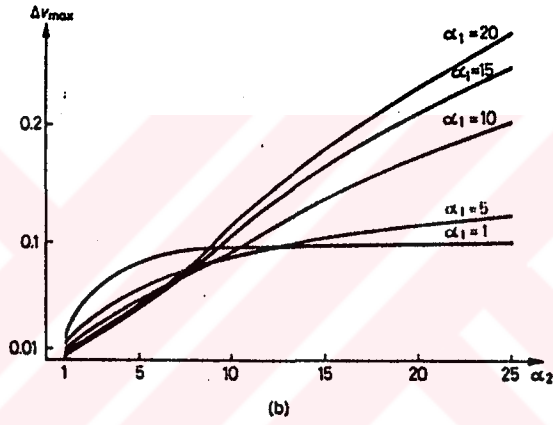
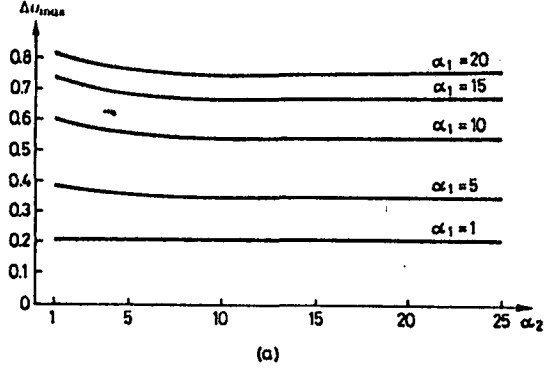
Yaklaşık bir hesap örnek.8.1'de sunuluyor.

Örnek.8.1 - Şekil 8-1'deki (b) grafiğine göre bağlanmış olan çevirme oranı 3/1, $\alpha_1 = 5$, $\alpha_2 = 20$ olan bir transformatör için Y.G. sargısından A.G. sargısına transfer edilen gerilim belirlenecektir. Bir durumda uyarılmamış sargı uyarılmış sargıyla aynı yönde sarılmış oysa diğer durumda sarımlar birbirine zıt sarılmıştır. Başlangıç gerilim dağılışı (u_c ve v_c) şekil 8-9'de veriliyor. Grafikte salınımların eksenini tanımlayan düzgün gerilim dağılışı da gösteriliyor. Kesiksiz olan çizgi tamamıyla aynı yönde olan sargıyı kesikli çizgi birbirine zıt sarımları ifade etmektedir. Maksimum gerilim sargı sonunda oluşacaktır. Birbiriyle aynı yönde olan sargılar için sargı sonunda $v_c = 0,47$ ve $v_1 = 0,33$ dır. Böylece (5.14) denkleminde göre

$$|v_{\max}| = |v_1| + |v_1 - v_c| = |0,33| + |0,33 - 0,47| = 0,47$$

Yani maximum gerilim başlangıç gerilimiyle çakışıyor. Diğer taraftan birbirine zıt sarımlı sargılarda $v_c = 0,47$ ve $v = -0,33$ değerlerini koyarak

$$|V_{\max}| = |-0,33| + |-0,33 - 0,47| = 1,13$$



Şekil 8-8- Y.G. Noktası sargı ortasında olan sargılarda α_1 ve α_2 'nin fonksiyonu olarak max. gerilimler

- a-) Uyarılan sargının ilk elemanındaki gerilim dağılımı,
- b-) Uyarılmayan sargının ortadaki elemanındaki gerilim dağılımı
- c-) Uyarılmayan sargının ortasındaki elemanların toprağa göre dağılımı

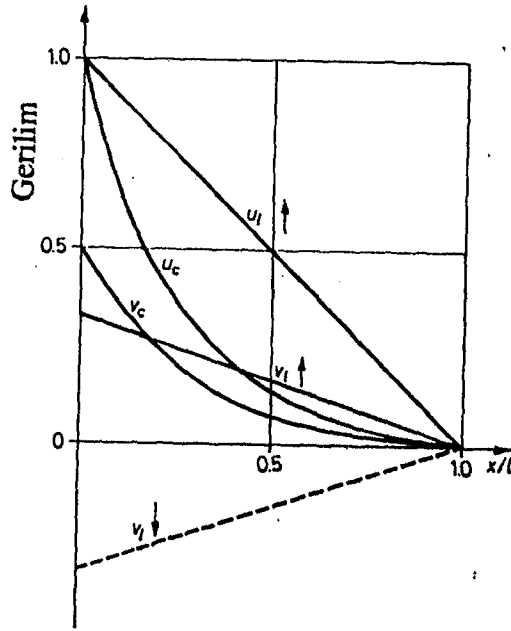
İkinci durumda transfer edilen gerilim salınımlarının maximum değeri uyarılmış sargının uçlarına uygulanan gerilimin tepe değerini bile aşacaktır. Bu maximum değerin polaritesi uca uygulanan gerilimin polaritesine zıt olur.

Daha önceden bahsedildiği gibi yüksek çevirme oranlı transformatörlerin transfer edilen gerilimleri özel bir dikkat gerektirmektedir. Gerilim transferi Y.G. sargısından A.G. sargısına doğru olduğunda, bir tehlike oluşturanlar kapasitif olarak transfer olanlardır. Özellikle transfer edilen başlangıç geriliminin değeri uyarılmış sargının ucunda görülen başlangıç gerilime ulaşabilir. Bu sebepten kapasitif transfer gerilimi çevirme oranıyla belirlenen gerilimin birkaç katı olabilir.

Ancak bu gerilim sargı kapasitesini uygun seçerek sarım oranıyla belirlenen değerine kadar düşürülebilir. Bu sayede salınımlardan da tamamıyla kurtulabilinir (8.5) bağıntısında $v_1 = v_e$). Gerilim A.G. sargısından Y.G. sargısına transfer olurken durum yukardakinden daha farklı olacaktır. Bu durumda transfer edilen gerilim oldukça büyük değere ulaşabilir. Çünkü başlangıç ve son gerilimleri arasında büyük bir fark vardır. Değer olarak Y.G. sargısına transfer edilen başlangıç maximum gerilim A.G uçlarında görülen aşırı gerilimin tepe değeri kadar olabilir. Kapasitif transfer gerilimi sarım oranıyla belirlenen transfer edilen gerilimden genellikle çok daha alçak olur.

Bu durumda salınımlar kapasiteleri düzenleyerek yok edilebilir. Özellikle tehlikeli transfer gerilimleri oto transformatörlerinin Y.G. uçlarında ortaya çıkabilir. Bu gerilimlerin sebebi yıldırım boşalmalarının sebep olduğu sıçramalar ve açma kapama darbeleridir.

Yukarıdaki metodla gösterildiği gibi yalnızca gerilim transfer olayını açıklamak için değil aynı zamanda bir sürü elemanter bölümlere ayrılmış ve 2 homojen sargıdan oluşmuş sargı sisteminin transfer gerilimi de hesaplanabilir.



Şekil 8-9- Şekil 8-1'deki bağlantıdaki sargıda baş. ve son ger. dağı. ($\alpha = 5$ $\alpha = 20$ sarım oranı = 3/1) x = uyarılmış sargıdan itibaren mesafe l = top. sargı uzunluğu

2'den çok sargı içeren sistemlerde veya elemanter sargıların sayısı çok fazla olduğunda matris denklemlerini direkt olarak yukarıda açıklanan şekilde çözmek yerine, bilgisayar kapasitesini daha ekonomik olarak kullanan bazı metodlar kullanmak daha pratiktir. Örneğin bazı iterasyon metodları veya Gaus eliminasyon metodu gibi.

9.BÖLÜM - TRANSFORMATÖRLERDE AŞIRI GERİLİME KARŞI KORUMA [6]

Transformatörlerde aşırı gerilime karşı koruma dışardan ve içerden olmak üzere 2 şekilde yapılır. Dışardan yapılan korumada, dalğanın genliği azaltıldıktan ve düzleştirildikten sonra yeterince zararsız hale gelmiş olan dalgaların transformatöre ulaşmasına izin verilir. Bu korumada; uygun enerji iletim hattı güzergahı seçimi, topraklama kablolarını düzenleme, çeşitli deşarj yolları ve aynı zamanda koordinatörler denilen ark aralıkları sayesinde tüm sistemin yalıtım koordinasyonunu ayarlama gibi yollar vardır. Yalıtım koordinasyonunda ark aralığı öyle bir ayarlanır ki tüm sistem içinde sargının yalıtımı en kuvvetli yalıtım olacaktır.

Eskiden kullanılan endüktif ve kapasitif elemanlar yeterince etkin olmaması sebebiyle günümüzde kullanılmamaktadır.

İçerden yapılan korumada; sargı giriş ve çıkış bobininde yalıtım kuvvetlendirmesi ve kapasitif koruma gibi yollar vardır.

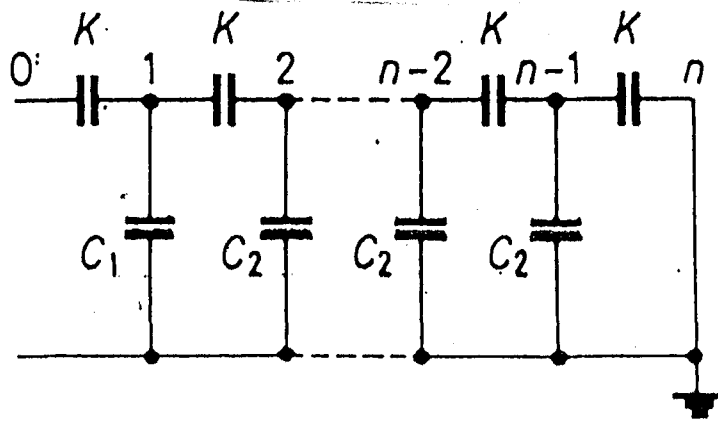
38.5 kV'a kadar yağlı transformatörlerde sargı uçlarında yalıtım güçlendirmesiyle koruma yapılır. Bu tip transformatörlerde artırılmış yalıtım 1.4 mm diğer bobinlerde 0.5 mm kalınlığındadır. Yalıtkan kalınlığı artması sebebiyle ısı yayılımı azalacağından bu bobinlerde akım yoğunluğu normal bir bobindeki %20 - 30 kadar daha azdır. Yalıtımı kuvvetlendirilmiş bobin sayısı tüm sargı bobin sayısının % 5 - 7 si kadardır.

110 kV ve daha yukarısı gerilimlerdeki transformatörlerdeki sargı yalıtım kuvvetlendirmesine ek olarak kapasitif koruma da kullanılır. Kapasitif korumada esas aşırı gerilimin sargıya, yaklaşık olarak, sürekli haldeki gibi düzgün dağılmasını sağlamaktır. Bu tip bir sargıda zararlı salınımlar meydana gelmez ve sargı elemanları arasında aşırı potansiyel farkları meydana gelmez. Bu tip korumaya sahip transformatörler rezonanssız veya yıldırım korumalı transformatörler olarak anılırlar.

Bir transformatör sargıları aşağıdaki gibi kapasitelerle modellensin ve seri kapasitelerin değişmediği, paralel kapasitelerin ise kapasitif korumadan dolayı birbirinden farklı olduğunu kabul edelim. Esas amacımız olan gerilimin sargıya lineer olarak dağılması için yani

$$U_k = U_0 \left(1 - \frac{k}{n}\right)$$

olması için paralel kapasite ne olmalıdır? Bu sorunun cevabını vermek için devrenin düğüm gerilimlerini bulmak gerekiyor.



Şekil 9-1- Sargının kapasitif eşdeğeri

1. düğüm için

$$-K(u_0 - u_1) + C_1 u_1 + K(u_1 - u_2) = 0$$

2. düğüm için

$$-K(u_1 - u_2) + C_2 u_2 + K(u_2 - u_3) = 0$$

.....

.....

..

(n-1). düğüm için

$$-K(u_{n-2} - u_{n-1}) + C_{n-1} u_{n-1} + K u_{n-1} = 0$$

denklemleri yazılabilir. Bu denklemleri düzenleyerek

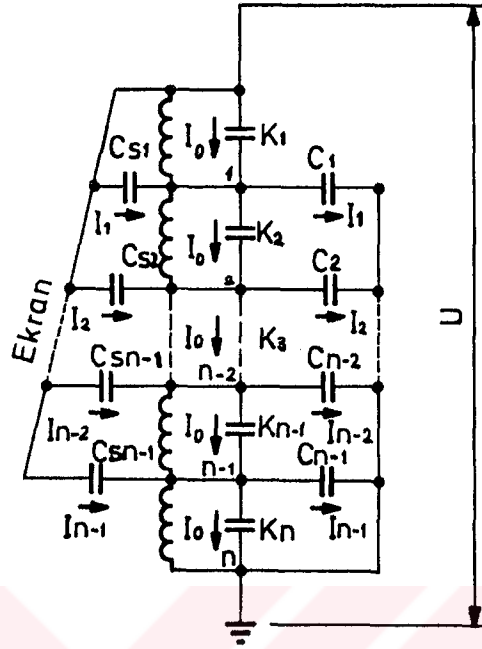
$$C_1 = K \left(\frac{u_0}{u_1} - 1 \right) - K \left(1 - \frac{u_2}{u_1} \right) = K \left(\frac{u_0 + u_2}{u_1} - 2 \right)$$

$$C_2 = K \left(\frac{u_1 + u_3}{u_2} - 2 \right)$$

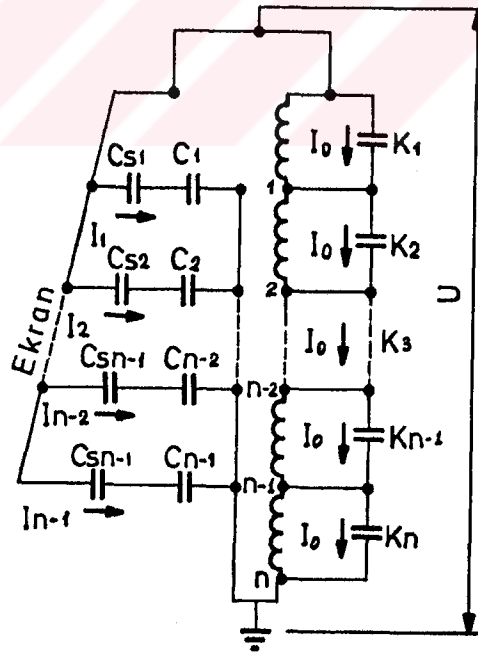
bu sonuçları genelleştirirsek ve gerilim ifadelerini yerine koyarsak

$$C_k = K \left(\frac{u_{k-1} + u_{k+1}}{u_k} - 2 \right) \quad (9.1)$$

$$C_k = K \left[\frac{u_0 \left(1 - \frac{k-1}{n} \right) + u_0 \left(1 - \frac{k+1}{n} \right)}{u_0 \left(1 - \frac{k}{n} \right)} - 2 \right]$$



(a)



(b)

Şekil 9-2 - Rezonanssız bir transformatörün eşdeğer devresi

sadeleştirmelerle

$$C_k=0 \quad (9.2)$$

bulunur. Zaten bu da beklenen bir sonuçtu çünkü daha önceki paragraflarda lineer bir dağılım için

$$\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}} = 0$$

olduğu belirtilmişti. Fakat fiziksel olarak toprak kapasitelerinin yok edilmesi mümkün değildir. Yalnız bu kapasitelerin şarj akımları hattan, ekran koruma kapasitelerinin C_s üzerinden, sağlanabilir.

Bu kapasitelerin çeşitli türde tasarımı vardır. Şekil 9-2(a)'da koruma kapasiteli topraklanmış bir sargı vardır. Koruma kapasitesinin ekran metalinin yüzeyi yalıtkanla kaplı olup sargının hat ucuna bağlıdır. Koruyucu kapasiteleri uygun seçerek toprak kapasiteleri için gerekli olan şarj akımı, K seri kapasiteleri by-pass ederek C_s ekran kapasiteleri yoluyla verilebilir. Bu sayede şekil.9-2(a)'daki devre şekil.9-2(b) ile aynı olur. Şekil 9-2(b)'deki devrenin sol tarafı sadece kapasitelerden oluşur ve rezonanssız bir sistemdir. Sağ tarafta bir seri endüktans ve seri kapasiteden oluşur. Her koldaki dallar tam anlamıyla birbirine benzerdir ve aynı gerilime sahiptir. Seri kapasite akımları da birbirine eşittir. bb' , cc' ,... gibi kollarda hiç akım yoktur, herşey her iki dal birbirinden elektriksel olarak bağımsız gibidir. Böylece sağ taraftaki devre sol taraftaki gibi rezonanssızdır.

9.1- Sargıya Hat Potansiyelindeki Ekran Eklenmesi Durumunda Gerilim Dağılımı:

Yukarıda da anlatıldığı gibi sargıda lineer bir gerilim dağılışı sağlamak için toprak kapasitelerinin yok edilmesi gerekir. Fiziksel olarak toprak kapasitelerini yok etmek imkansızdır. Onun yerine sargıya hat potansiyelinde ekran sararak paralel

kapasitelerin etkisi yok edilmeye çalışılır.

n dilimli bir sargının ve ekran kapasitelerinin eşdeğer devresi şekil 9-2(a)'da görüldüğü gibidir. Bu devrenin denklemlerini yazalım.

$$I_0 = K(u_0 - u_1) = K(u_1 - u_2) = K(u_2 - u_3) = \dots = K(u_{n-1}) \quad (9.3)$$

1.düğ.

$$K \cdot (u_0 - u_1) + CS_1 \cdot (u_0 - u_1) - C \cdot u_1 - K(u_1 - u_2) = 0$$

2. düğ.

$$K \cdot (u_1 - u_2) + CS_2 \cdot (u_0 - u_2) - C \cdot u_2 - K(u_2 - u_3) = 0$$

...

...

..

(n-1).düg.

$$K(u_{n-2} - u_{n-1}) + CS_{n-1}(u_0 - u_{n-1}) - Cu_{n-1} - Ku_{n-1} = 0 \quad (9.4)$$

seri kapasite akımlarının eşitliğini de kullanarak denklemleri sadeleştirelim

$$CS_1 = C \cdot \frac{u_1}{u_0 - u_1} = C \cdot \frac{1}{\frac{u_0}{u_1} - 1}$$

$$CS_2 = C \cdot \frac{u_2}{u_0 - u_2} = C \cdot \frac{1}{\frac{u_0}{u_2} - 1}$$

.....

....

...

$$CS_k = C \cdot \frac{u_k}{u_0 - u_k} = C \cdot \frac{1}{\frac{u_0}{u_k} - 1} \quad (9.5)$$

..

..

.....

$$CS_{n-1} = C \cdot \frac{u_{n-1}}{u_0 - u_{n-1}} = C \cdot \frac{1}{\frac{u_0}{u_{n-1}} - 1}$$

lineer bir gerilim dağılımı için düğüm gerilimlerinin

$$u_k = u_0 \left(1 - \frac{k}{n}\right)$$

olması gerekir. Genel ifade olan (9.5) de yerine koyarak

$$CS_k = C \cdot \frac{1}{\left(\frac{u_0}{u_0 \left(1 - \frac{k}{n}\right)}\right) - 1} = C \left(\frac{n-k}{k}\right) = C \left(\frac{n}{k} - 1\right) \quad (9.6)$$

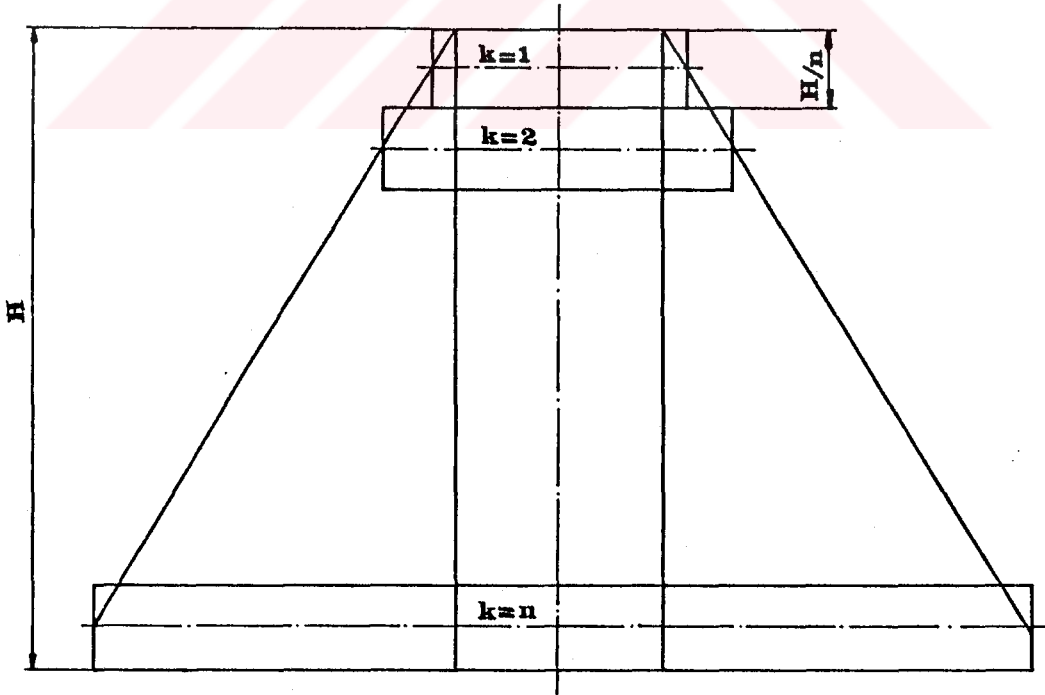
$$k=1...n-1$$

Bilindiği gibi 2 iletken arasındaki kapasite aradaki mesafe arttıkça azalır. Sarılacak olan ekran da belirli bir açıyla yerleştirileceği için sargı sonuna doğru ekran kapasitesi azalacaktır. İşte çıkarılan formül de buna işaret ettiği için gerçeğe ters düşmüyor.

9.2- Lineer Gerilim Dağılışı Oluşturmak İçin Gerekli Ekran Kapasitelerini Sağlayacak Olan Ekranın Sargıyla Arasındaki Açının Hesabı:

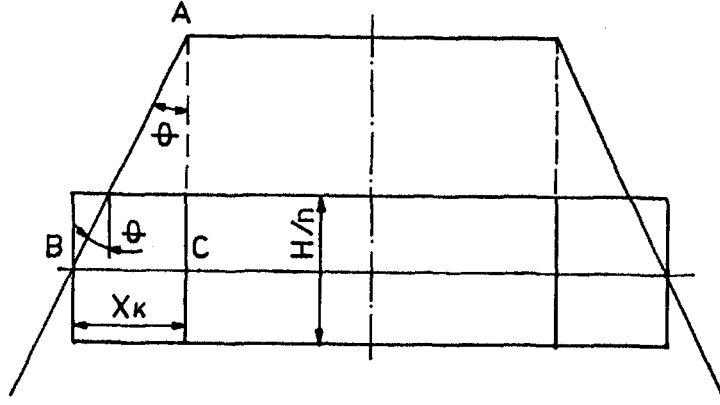
Gerekli olan ekran kapasitelerini oluşturmak için ekranın sargıya göre belirli bir açıda yerleştirilmesi gerekir. Açı hesabından önce koni silindir sisteminin kapasitesini hesaplamak gerekir. Hesabı ve sonucu basitleştirmek amacıyla ilk yaklaşıklıkla koni silindir yerine silindir – silindir sisteminin kapasitesini hesaplayalım.

Sargı n dilime ayrılmış olsun, ekran sargı arasındaki kapasiteyi hesaplamak amacıyla ekran da n parçaya bölünmüştür. Daha sonra dilimlerin ortasından geçen eksenin ekranı kestiği yer dışardaki silindirin geçtiği yer olarak kabul edelim. Bu hayali silindir ile içeride kalan sargı arasındaki kapasite silindirsel sistemin kapasitesinden hesaplanabilir. Fakat şunu unutmamak gerekir ki; ekran kapasitesini bu şekilde hesabında belirli bir hatayı baştan kabul ediyoruz. Bu hatayı azaltmak için n bölme sayısının olabildiğince büyük tutmak gerekir.



Şekil 9-3- n dilimli bir sargı ve ekranın silindirik eşdeğeri

Yukardaki şekilde k. dilimi gözönüne alalım



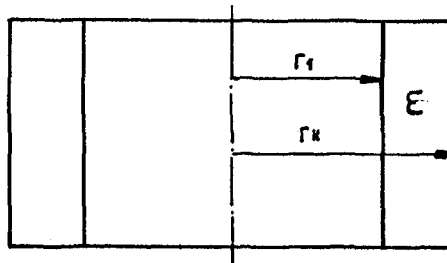
Şekil 9-4- Sargının bir diliminin ekranla arasındaki açının bulunması için kullanılan parametreler

ABC üçgeni gözönüne alınırsa,

$$\tan\theta = \frac{[BC]}{[AC]} = \frac{x_k}{(k-1) \frac{H}{n} + \frac{H}{2n}} \quad (9.7)$$

$$r_k - r_1 = x_k = \left[(k-1) \frac{H}{n} + \frac{H}{2n} \right] \tan\theta \quad (9.8)$$

k. dilimin silindirik sistem kapasitesi;



Şekil 9-5- Sargı silindirik sistem eşdeğeri

$$C_k = \frac{2\pi\epsilon \left(\frac{H}{n}\right)}{\ln \frac{r_k}{r_1}} \quad (9.9)$$

logaritmanın özelliğini kullanarak

$$\ln \frac{r_k}{r_1} = \ln \left(\frac{r_1 + x_k}{r_1} \right) = \ln \left(1 + \frac{x_k}{r_1} \right) = \frac{x_k}{r_1} \quad (9.10)$$

öyleyse yaklaşık olarak kapasite,

$$C_k = \frac{2\pi\epsilon \left(\frac{H}{n}\right)}{\frac{x_k}{r_1}} \quad (9.11)$$

iki disk arasındaki mesafe,

$$x_k = \frac{2\pi\epsilon \left(\frac{H}{n}\right) r_1}{C_k} \quad (9.12)$$

x_k için önceden bulunan (9.8) ifadesi (9.12)'da yerine konarak

$$\left[(k-1) \frac{H}{n} + \frac{H}{2n} \right] \tan \theta = \frac{2\pi\epsilon \frac{H}{n} r_1}{C_k} \quad (9.13)$$

açı ise

$$\theta = \text{Arctan} \left(\frac{2\pi\epsilon \left(\frac{H}{n}\right) r_1}{C_k \left[(k-1) \frac{H}{n} + \frac{H}{2n} \right]} \right) = \text{Arctan} \left(\frac{2\pi\epsilon r_1}{C_k \left(k - \frac{1}{2}\right)} \right) \quad (9.14)$$

Örnek - 9.1 : Örnek olarak aşağıda verileri sunulan transformatörü [7] aşırı gerilime karşı korumak için konulması gereken ekran açısını bulalım

$$C=38.43 \text{ pF},$$

$$\varepsilon_r = 3,$$

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} ,$$

$$H=0.5376 \text{ m}$$

$$r_1= 0.15\text{m}$$

13 bobinden oluşan sargının ilk bobinini ele alalım. İlk bobine ait ekran kapasitesi $k=1$ için,

$$C_1=C\left(\frac{n}{k}-1\right)=38.43\left(\frac{13}{1}-1\right)=461.16 \cdot \text{pF}$$

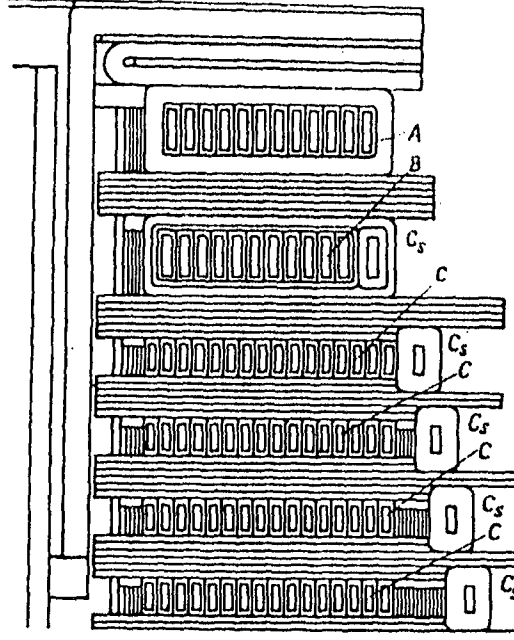
olur. Buradan açıya geçelim

$$\theta=\text{Arctan}\left(\frac{2\pi \cdot 3.8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,15}{461,16 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1}{2}}\right)=6,19^\circ$$

sonuçtan da görüldüğü gibi açı küçük çıkmaktadır. Bu gerçekte de böyle uygulanmaktadır. Ve hemen hemen sıfır kabul edilerek ekran sargıya paralel olarak sarılmaktadır.

Fakat ekranlama şeklindeki kapasitif koruma transformatör tasarımını kompleks bir hale getiriyor. Şekil 9-6'de değişik bir kapasitif koruma görülüyor. Bu tip kapasitif koruma sisteminde; 3.5-5 mm'lik kuvvetlendirilmiş yalıtımlı A bobini, A gibi yalıtımı kuvvetlendirilmiş B bobini ve bobine bağlanmış kapasitif ekran C_s , normal yalıtılmış C kapasiteli 4 bobin C_s kapasitif ekranla korunmuştur.

Yalıtımı artırılmış bobinlerden daha az akım yoğunluğu olan diğer bobinlere geçiş bölgesinde yalıtımı artırılmış bobin iletkeni diğerinden 1.5 kat daha geniştir.



Şekil 9-6- Kapasitif ekranlarla aşırı gerilim koruma

Kapasitif ekranlar kondukları bobinlerin geçiş bölgesi bobinlerinin genişliğinde bakır iletkenden yapılmış ve hat ucuna bağlıdır. Yani hat potansiyelindedir. Ekran iletkeni her iki taraftan 5 mm'lik yalıtkanla güvenilir bir şekilde yalıtılır. Bobin ve ekran arasındaki boşluk gereken koruyucu kapasite değerini belirler. Kapasitif ekran kendi üzerinde bir sipir oluşturmaması için açık devre edilmelidir ve bobin çevresinin 2/3'ünü kaplamalıdır.

Gerilim eğimi giriş bobininde maksimum olduğu için bu bobindeki gerilim dağılışı olabildiğince düzgün olması istenir. Bu amaçla modern yüksek güçlü transformatörlerde kapasitif ekranlara ek olarak bir kapasitif halka kullanılır. Bu presbanttan yapılabilen ve 8 - 10 mm kalınlığındaki bakır şeritden yapılmış ucu kıvrılmış bir rondeladır. Halka dışarıya karşı yalıtılmıştır. Bakır bant sargının nötr ucuna ve hat ucuna özel bir kablo vasıtasıyla bağlanır. Kapasitif halka da ekran gibi açık devre olmalıdır.

Tecrübeler göstermiştir ki bu şekilde korunmuş transformatörler en tehlikeli atmosferik aşırı gerilimlere karşı kararlıdır. Bu yüzden yıldırım korumalı transformatörler olarak anılır.

Aynı koruma tipi çok tabakalı silindirik sargıda da kullanılır. Bu tasarımda tabakalar arasındaki seri kapasite "K" toprak kapasitesinden oldukça büyüktür. Sonuç olarak α faktörü küçük ve başlangıç gerilimi sürekli hal gerilim dağılımından çok az farklı olur. Tabakalar arasındaki kapasiteleri eşitlemek için ve çekirdeğe karşı kapasiteyi yok etmek için her bacakta 1 veya 2 ekran kullanılır.



SONUÇ:

Enerji iletim hatlarında hertürlü elektriksel iç ve dış etkilere açık olan transformatörlerin sargılarında zaman zaman aşırı gerilimler oluşur. Sargıda bu şekilde tehlikeli gerilim dağılışlarına meydan vermemek için transformatöre ait α faktörünün mümkün olabildiğince küçük olması gerekir. Bunun için sargı seri kapasitesi olabildiğince büyük olmalıdır. Seri kapasite ayırık sargı kullanarak artırılabilir. Bu tipte birbirine geometrik olarak komşu olan olan sargıların elektriksel olarak birbirinden ayrılır. Bu yolla seri kapasite oldukça artırılır. Diğer bir yol da paralel kapasite fiziksel olarak yok edilemeyeceğinden devreye olan etkisi yok edilme yoluna gidilir. Parelel kapasitenin etkisi ekranlama yöntemiyle yok edilir. Bu ekranlama yöntemlerinden birisi de sargıya hat potansiyelinde iletken tabakalar sarmaktır. Bu tabakalar tezde sunulan açı

$$\Theta = \text{Arctan}\left(\frac{2\pi\epsilon r_1}{C_k\left(k - \frac{1}{2}\right)}\right)$$

ve ekran kapasitesi

$$C_k = C\left(\frac{n}{k} - 1\right)$$

ifadelerine göre sarılırlar. Burada C sargı paralel kapasitesi[F], ϵ yalıtkanın dielektrik sabiti[F/m], r_1 sargı yarıçapı[m], n elementer sargı bölme sayısı ve k ekran kapasitesi bulunacak sargı elemanı numarasıdır. Pratikte de bu açı yaklaşık sıfır olarak kabul edilip sargıya paralel sarılır.

KAYNAKLAR:

- [1] GÜZELBEYOĞLU, Nurdan: Elektrik Makinalarında Aşırı Zorlanmalar, İTÜ Kütüphanesi Sayı:1400, syf:1, (1989)
- [2] KARSAI,K. , KERENYİ, D. , KISS, L. : Large Power Transformers, Elsevier Amsterdam - Oxford - New York - Tokyo, pg:196-234, (1987)
- [3] WAGNER, K.W.: Das Eindringen einer elektromagnetischen Welle in eine Spule mit Windungskapazität. Elektrotechnik und Maschinenbau, 33, 89, 105, (1915)
- [4] ÖZKAYA, Muzaffer: Yüksek Gerilim Tekniği 1, Statik Elektrik Alan ve Boşalma Olayları, İTÜ Kütüphanesi sayı:1359, syf:28-30, (1988)
- [5] KARSAI,K. , KERENYİ, D. , UJHAZY,G. : Einige Fragen des Stossspannungsschutzes von Transformatoren mit Scheibenwicklungen. Periodica Polytechnica, 15, 1.21-42.
- [6] KOSTENKO, M. , PIOTROVSKY, L. : Electrical Machines. English Translation Mir Publishers, pg:523-526, (1977)
- [7] GÜZELBEYOĞLU, Nurdan: Transformatör Sargılarında Aşırı Gerilim Dağılımı Sorununa Katkılar. İTÜ Elektrik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi,syf:70, (1976)

ÖZGEÇMİŞ

Sadık Şenol 1967 yılında Bolu'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1981 yılında Bakırköy Endüstri Meslek Lisesi için açılan sınavı kazanarak bu lisede öğrenimine devam etme hakkını elde etti. İlk sene başarı göstererek Maçka Teknik Lisesi'ne geçti. Liseden 1985 yılında mezun oldu. Daha sonra girdiği İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünden 1989 yılında birincilikle mezun oldu. Bu sebeple Ord. Prof. Bedri KARAFAKİOĞLU anısına konulan ödülü ve özel bir kuruluşun ödülleri almaya hak kazandı. Aynı sene İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisansa başladı. Ayrıca lise ve lisans öğrenimi sırasında İSO bursunu almıştır. Son 2.5 sene zarfı içerisinde özel bir kuruluşta araştırma geliştirme mühendisi olarak da çalışmaktadır.