

SF₆ Gaz Yalıtımlı Dağıtım Transformatörünün Elektrostatik Alan Analizi

Electrostatic Analysis of SF₆ Gas Insulated Distribution Transformer

Okan Ozgonenel¹, Aytuğ Font², Suat İlhan²

¹Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
okanoz@omu.edu.tr

²Elektrik Müh. Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
font@itu.edu.tr , ilhansu@itu.edu.tr

Özet

Çevresel farkındalık son yıllarda öne çıkan, hükümetleri bile çoğu zaman baskı altına alabilecek, önemli konulardan birisi haline gelmiştir. Mineral yağlar, toprağa karışmaları durumunda en zararlı kirlilik çeşitlerinden birisi haline gelebilirler. Dağıtım ve güç transformatörleri için iyi bir yalıtım malzemesi olarak görülseler de, mineral yağların düşük alev alma sıcaklığı, ek yalıtım maliyetleri ve söndürme ekipmanlarına olan gereksinimleri gibi dezavantajları vardır. Bunların yanında patlama riski yağ yalıtımlı transformatörlerde her zaman bulunmaktadır. Bu yüzden günümüzde gaz izoleli transformatörler (GİT) geliştirilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Gaz izoleli transformatörler, SF₆ gazının yanmaz ve patlamaz özelliği nedeniyle güvenilir bir yalıtım sağlar. Bu yüzden bu tür transformatörler özellikle denizaltılar, madenler ve nükleer santraller gibi yüksek risk altında bulunan yerlerde kullanılmaktadır. Bu avantajlarının yanında yağ yalıtımlı transformatörlerden daha hafiftirler ve kompakt yapıları nedeniyle daha az yer kaplarlar. Bu çalışmada, 3 fazlı, 50 kVA gücünde, hermetik tipte, 34.5/0.4 kV geriliminde, 50 Hz frekanslı, SF₆ gaz yalıtımı bir dağıtım transformatörünün sonlu elemanlar yöntemi ile elektrostatik analizi yapılmıştır.

Abstract

In recent years, environmental awareness has been a great concern, and even governments have sometimes been under pressure to comply with bilateral agreements. Mineral oil is one of the most harmful pollutants if it infiltrates the soil. Of course, it provides a good insulation material in (distribution/power) transformers, but it presents some disadvantages such as low firing value, additional insulation costs, requirement for an extinguishing apparatus, long clearance distance, being non-edible, and extensive soil spill cleanup, among others. Explosion is another danger for oil-insulated transformers. For this reason, gas-insulated transformers have nowadays been put into specifications. SF₆ GITs present more reliable working conditions due to the inherited specs of SF₆ because it has non-flammable insulation and explosion-proof design. Therefore, the proposed transformer design is mostly suitable for security

risk environments such as submarines, mines and nuclear power plants. Apart from these advantages, the new SF₆ GIT design is compact in design and lighter than the oil-type one. In this study, electrostatic analysis of a three phase SF₆ gas-insulated transformer (GIT) with 50 kVA rating, 34.5/0.4 kV, 50 Hz was conducted by using finite element method. Electric potential and electric field distributions inside the transformer were investigated.

1. Giriş

Güç ve dağıtım transformatörlerinin tasarlanırken, çevreye olan etkileri, bakım gereksiniminin azalması ve yanma riski dikkat edilmesi gereken konulardan bazılarıdır. Ekonomik ve teknik nedenlerden dolayı transformatörlerin tüketici yüklerine yakın yerleştirilmelerinin istenmesi nedeniyle transformatörlerin boyutlarının küçük olması önemlidir. Günümüz şartlarında, artan talebi karşılamak için anma gücünde çalışan genellikle kuru tip ve/veya yağ yalıtımlı transformatörler kullanılmaktadır. Fakat bu transformatörler tüm talebi karşılamaya uygun değildirler. Bunun yanında bu transformatörlerin iç sıcaklıkları aşırı yüklenmeleri nedeniyle yükselmekte ve bu kullanılan yağ yalıtımının erken yaşlanmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bu tür transformatörler risk taşımaktadırlar. Gaz izoleli transformatörler burada dağıtım sistemleri için daha güvenilir bir çözüm sunmaktadır [1-5].

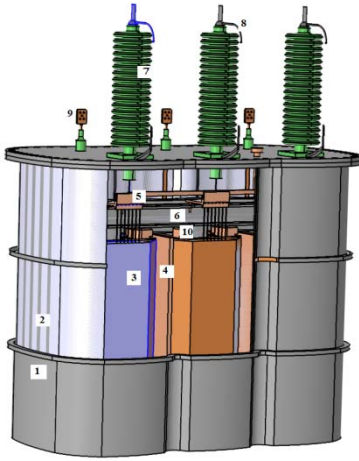
Elektrik tüketimi, her geçen gün talebin sürekli artmasıyla hızlı bir artış göstermektedir. Bu durum daha fazla indirici merkezin yapılmasını gerektirmektedir. Özellikle büyük şehirlerde bu yapıların sayısının artışı gerek çevresel ve gerekse ekonomik nedenlerden dolayı yavaş yavaş yeraltına alınması gerekliliğini ortaya çıkartmıştır. Bu nedenle bu çalışmada transformatör yağına alternatif bir yalıtım malzemesi olan SF₆ gazı incelenmiştir [6-10].

Bu çalışma SF₆ gaz yalıtımına sahip bir transformatörün elektrostatik analizini içermektedir. Bunun için işletmede yaygın olarak kullanılan 50 kVA gücündeki bir dağıtım transformatörü dikkate alınmıştır. Normal çalışma koşullarında sargılardaki ve yalıtım üzerindeki gerilim dağılımları sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile elde edilmiştir.

Çalışmada, transformatör içerisindeki yüksek elektrik alan dağılımına sahip bölgeler belirlenmiş ve alan değişimleri elde edilmiştir.

2. SF6 İzoleli Transformatörün Modellemesi

Şekilde 1’de analizi yapılan üç fazlı 50 kVA gücünde 34.5/0.4 kV’luk gaz yalıtımlı transformatörün çizilmiş geometrisi görülmektedir. Tasarım yüksek basınca dayanabilmesi ve gazın homojen bir biçimde dağılmasına olanak verebilmesi için silindrisel yapıda yapılmıştır. Transformatör çekirdeği ve sargılar SF₆ gazı ile hem yalıtılmakta hem de soğutulmaktadır. Transformatör tankının ve soğutma elemanlarının tasarımı yağlı transformatörlerde olduğu gibidir. Yüksek gerilim çıkışları geçit izolatörleri üzerinden yapılmıştır.



Şekil 1: Üç fazlı gaz izoleli transformatör geometrisi(1: Transformatör kazanı, 2: SF₆ gazı, 3 YG sargısı, 4: Yalıtkan ekran, 5: Kademe değiştirici 6: Boyunduruk, 7: Geçit izolatörü, 8: Ark boynuzu, 9: AG girişi, 10: Tahta takoz)

Analizlere ilk önce transformatörün geometrisinin teknik resimlere göre çizimi yapılarak başlanılmıştır. Tüm detayların modellenmesi için üç boyutlu transformatör modeli kullanılmıştır. Modele sargılar dışında, transformatörün tankı, demir çekirdeği, boyundurukları, geçit izolatörleri, ark boynuzu ve yalıtkan destek gibi detaylar eklenmiştir.

3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektrostatik Analiz

Elektrostatik analizler için sonlu elemanlar tabanlı COMSOL Multiphysics programı kullanılmıştır. 3 boyutlu transformatör geometrisi oluşturulduktan sonra, transformatör malzemeleri ve sınır koşulları tanımlanmıştır. Ana yalıtkan olarak SF₆ gazı ($\epsilon_r=1.0204$) ve yalıtkan destek olarak da $\epsilon_r=3$ olan bir yalıtkan tanımlanmıştır. Transformatörün gerilimi 34.5/0.4 kV olduğu için faz gerilimleri sırasıyla formül (1) verilen şekilde tanımlanmıştır.

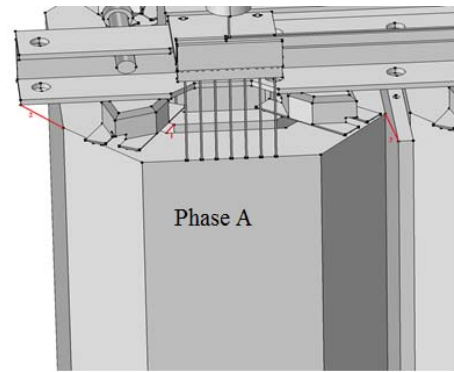
$$L_1 \text{ fazı için } U_1 = \frac{34.5 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t) \quad 1.a$$

$$L_2 \text{ fazı için } U_2 = \frac{34.5 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad 1.b$$

$$L_3 \text{ fazı için } U_3 = \frac{34.5 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad 1.c$$

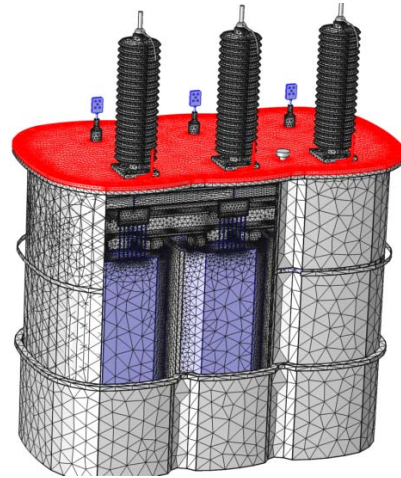
Formüle göre sınır koşulu olarak yüksek gerilim sargısına, faz-toprak geriliminin tepe değeri, 28.169 kV, ve alçak gerilim sargısına ise yine faz-toprak gerilimini tepe değeri, 326.59 V gerilim uygulanmıştır. Diğer iki faza ise sırasıyla -14.084 kV ve -14.084 kV yüksek gerilim tarafı için, 163.29V ve 163.29V ise alçak gerilim tarafları için tanımlanmıştır. Transformatörün tankı ve boyunduruk kısımları ise toprak potansiyelinde oldukları için toprak sınır koşulu seçilmiştir.

Özellikle yüksek gerilim sargıları ile topraklanmış bölümler arasındaki en kısa mesafeler atlama açısından kritik oldukları için bu bölümlerdeki potansiyel dağılımları ve elektriksel zorlanma değerleri analizler yapılarak elde edilmiştir. Şekil 2’de bu kritik bölümler kırmızı olarak görülmektedir. Mesafelerin en kısa olduğu bölümlerden biri alçak gerilim sargısının dış köşesi ile yüksek gerilim sargısının iç köşesidir. Ayrıca yüksek gerilim sargısı ile boyunduruğun arasındaki bölge de atlama açısından kritik olabilir.



Şekil 2: Transformatör sargılarındaki kritik alan bölgeleri

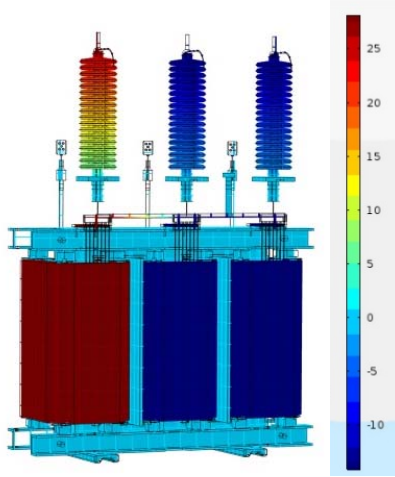
Alan analizlerinin doğru ve hassas bir biçimde yapılabilmesi için geometrinin yeterli sayıda sonlu elemanlar yardımı ile ayrıştırılması gerekmektedir. Şekil 3’de analizi yapılacak olan geometrinin üçgen ağı bölünmüş hali görülmektedir. Transformatörün yapısı simetrik olmadığı için ağ yapısı istenildiği kadar düzgün verilememiştir. Ayrıca hesap süresini azaltabilmek adına, alan bakımından çok kritik olmayan bölümlerin ağı daha seyrek, sargılar ve gaz yalıtım kısımları gibi kritik olan yerler ise çok daha sık bir ağı bölünmüştür.



Şekil 3: Transformatörün sonlu elemanlar ile ayrıştırılması

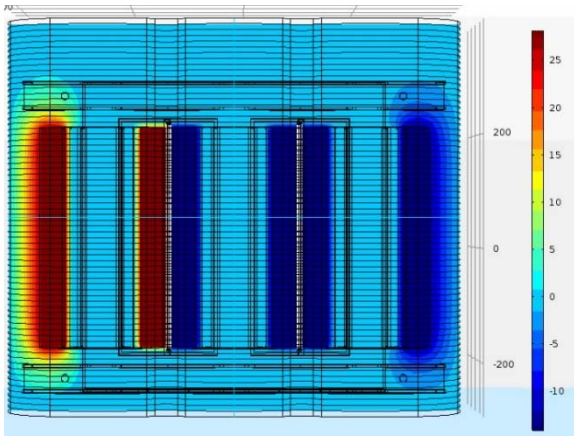
4. Analiz Sonuçları

Analizler sonucunda potansiyel ve elektrik alan dağılımları elde edilmiştir. Şekil 4’de gaz yalıtımlı transformatördeki elektrikselpotansiyel dağılımı verilmiştir. Analiz sonucu, anlık olarak, gerilimin tepe değeri olan 5 ms değeri için verilmiştir. Üç fazlı transformatörde bu durumda diğer iki fazdaki gerilimler negatiftir.



Şekil 4: Transformatörde elde edilen potansiyel dağılımı

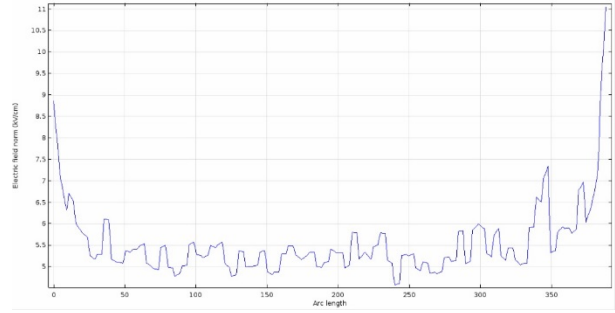
Şekil 5’de ise sargılarla yalıtkan gaz ortamı arasındaki potansiyel dağılımı verilmiştir. Gerilim değerleri zamana bağlı olarak değişmekle birlikte birinci faz için 5 ms değerinde tepe değere ulaştığı için bu zaman aralığında birinci sargı etrafında gerilim diğer fazlara göre daha yüksek olmaktadır. Bu potansiyel dağılımı, alan dağılımını da etkilemektedir.



Şekil 5: Transformatör sargılarındaki potansiyel dağılımı

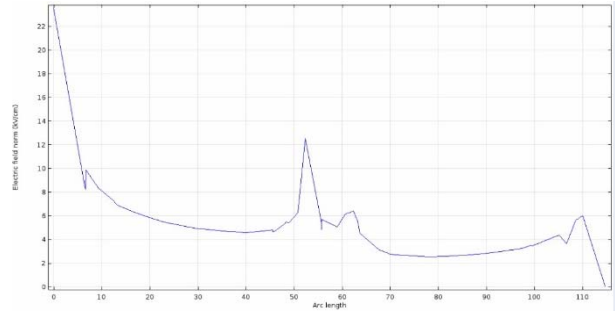
İlgili transformatördeki alan dağılımı incelendiğinde, yüksek gerilim sargıları arasında, yüksek gerilim ile alçak gerilim sargıları arasında ve yüksek gerilim sargısı ile boyunduruk arasında yüksek elektrik alan şiddetlerinin meydana geldiği görülmüştür. Birincil sargı yüzeyinde oluşan elektrik alan dağılımı şekil 6’da görülmektedir. Alan değerleri sargı uçlarında daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Şekil 6’dan görüleceği gibi, yüksek gerilim sargısı boyunca elektrik alan

dağılımı düzgün değildir. Özellikle toprak bölgesine yakın sargı uçlarında yüksek alan dağılımları meydana gelmektedir.



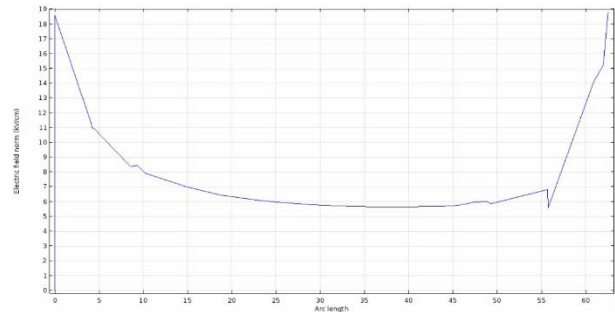
Şekil 6: Yüksek gerilim sargısı boyunca alan şiddetinin değişimi

Şekil 6’dan görüleceği gibi, ilgili transformatörün yüksek gerilim sargısı üzerinde meydana gelen alan şiddeti 11 kV/cm olarak elde edilmiştir. Alan dağılımındaki bir diğer kritik yer olan yüksek gerilim sargısı ile fazlar arasındaki katı yalıtkan bariyer ve ikinci faz arasında alan dağılımı şekil 7’de görülmektedir. Burada görünen en yüksek alan değeri 23 kV/cm’dir. Yalıtkan paravana üzerinde ise yaklaşık 12 kV/cm’lik bir alan şiddeti oluşmaktadır.



Şekil 7: Faz sargıları arasındaki elektrik alan şiddetinin değişimi

Şekil 8’de ise yüksek gerilim fazı ile toprak potansiyelindeki manyetik devre (boyunduruk) arasındaki alan dağılımı görülmektedir. Alan dağılımı için boyunduruk ile faz sargısı arasındaki en kısa mesafe dikkate alınmıştır. Sargı etrafında ve boyunduruk çevresinde alanın daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 8: Faz sargısı ile boyunduruk arasındaki elektrik alan şiddetinin değişimi

5. Sonuçlar

Bu alışmada SF₆ gaz yalıtımına sahip, üç fazlı bir transformatörün potansiyel ve elektrik alan dağılımı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Zamana bağlı olarak yapılan analizlerde, ilk olarak üç fazlı gaz yalıtımlı transformatör gerçek boyutlarında üç boyutlu olarak modellenmiş, transformatör malzemeleri ve sınır koşulları tanımlanmıştır. Analizlerde, elektrik potansiyel ve elektrik alan dağılmaları incelenmiştir. İncelemelerde, yüksek gerilim sargıları ile toprak potansiyelde bulunan bölgeler ile yüksek gerilim sargıları arasındaki alan dağılımları elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre oluşturulan modelde elde edilen elektrik alan değerleri, bu transformatörün çalışma geriliminde transformatör üzerinde aşırı bir zorlanma oluşturmayacak seviyelerde oldukları görülmüştür.

6. Kaynaklar

- [1] Qiu Y., (1986), Simple Expression of Field Nonuniformity Factor for Hemispherically Capped Rod-Plane Gaps, IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-21 No:4, 673 - 675.
- [2] Azer A.A., Comsa A.P., (1973), Influence of Field Nonuniformity on the Breakdown Characteristic of SF₆, IEEE Trans., EI.8.,136 - 142.
- [3] Nagata M., Yokoi Y., Miyachi I., (1977), Electrical Breakdown Characteristics in High Temperature Gases, Elect. Eng. Japan, Vol.97, 1 - 6.
- [4] Nema R.S., Kulkarni S.V., Husain E., (1982), Calculation of Sparking Potentials of SF₆ and SF₆ – Gas Mixtures in Uniform and Non-uniform Electric Fields, IEEE, Trans., EI-17, 70-75.
- [5] (Electra, 1990). A survey of facts and opinions on the maximum safe operating temperature of power transformers under emergency conditions.CIGR WG 12– 09.1990; 129.
- [6] Blume LF, Boyajian A, Camilli G, Lennox TC, Minneci S, Montsinger VM. Transformer Engineering.2nd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1951.
- [7] (IEEE, 1995). IEEE Std C57.91-1995 IEEE guide for loading mineral-oil immersed transformers.
- [8] IEEE, 1999. IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. IEEE Std C57.12.90. 1999.
- [9] Chu D, Lux A. On-line monitoring of power transformers and components: a review of key parameters. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference. 1999: 669 – 675.
- [10] Mackenzie EA, Crossey J, De Pablo A, Ferguson W. Online monitoring and diagnostics for power transformers. Electrical insulation (ISET) conference record of the 2010 IEEE international symposium. 2010: 1-5.