

YÜKSEK GERİLİM KABLolarında GİRDAP AKIMI KAYIPLARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Duygu BAYRAM¹, Özcan KALENDERLİ²

^{1,2}İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, Maslak - İstanbul
bayramd@itu.edu.tr, kalenderli@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, damar kesitleri aynı, siper yapıları farklı olan üç kabloda, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile girdap akımı ve girdap akımının kablo iletkeninde, yalıtkanında ve siperinde yarattığı elektriksel güç kayıpları incelenmiştir. İnceleme tek damarlı ve toprak içinde tek başına yerleşik bir yüksek gerilim kablosu üzerinde yapılmıştır. Girdap akımı kaybı baskın olarak kablo siperinde görülmesi nedeniyle herbirinin siper yapısı diğerinden farklı, diğer özellikleri olan aynı üç kablo üzerinde yapılarak kayıpların siper yapısına bağlı olarak değişimi araştırılmıştır. Bir kablonun siper yapısının girdap akımının ve kaybının büyüklüğünü doğrudan etkilediği, analitik hesap bağlantılarıyla ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile yapılan hesaplarla ortaya konmuştur. Kablo siperinin tek parça ve tek katman yerine, birbirinden yalıtılmış çok sayıda ince katmandan ve çok parçalı olarak yapılması girdap akımı kayıplarını azaltmaktadır.

1. GİRİŞ

Güç kabloları, elektrik güç sistemlerinin yaşam damarlarını oluşturan bağlantı elemanlarıdır. Güç sistemlerinin her elemanında olduğu gibi, kullanılan kablolarda da güç kaybı olmaması veya olacağı da az güç kaybı olması beklenir. Elektriksel güç kayıpları kendini ısıya dönüştürerek belli eder. Kayıpların azlığı, kabloda ısınma ve ısınmaya bağlı direnç artışının ve malzemelerinin yapısal bozulmasının az olması ve kablodan daha fazla verimle ve daha uzun süre yararlanılması demektir.

Kablolarda ortaya çıkabilecek güç kayıpları, kablonun yapısına bağlı olarak, kabaca üç kısımda incelenmektedir. Bunlar; kablo iletkenindeki dirençsel kayıplar, yalıtkanındaki (dielektrikteki) kayıplar ve siperde endüklenen girdap akımlarına bağlı olarak oluşan kayıplardır. Yalıtkanındaki dielektrik kayıpları anma gerilimi 110 kV'tan düşük olan kablolarda, çok küçük olmaları nedeniyle ihmal edilebilir. Bu durumda, düşük anma gerilimine sahip kablolarda güç

kaybı ve dolayısıyla ısınmayı yaratan sadece iletkendeki dirençsel kayıplar ve siperde endüklenen girdap akımı kayıplarıdır [1-4].

Bu çalışmada, anma gerilimleri ve damar kesitleri aynı olan, fakat siperlerinin yapısı, düzen olarak farklı olan üç kabloda, girdap akımları ve bunlara bağlı kayıplar Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile incelenmiştir. İncelemeler, Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne göre elektrik ve manyetik alan çözümlenmesi yapılabilen FEMM 4.2 programı ile yapılmıştır.

2. KABLODA GİRDAP AKIMI VE GİRDAP AKIMI KAYBI

Bir kablonun fiziksel yapısı basitçe; en içte akım taşıyan bir iletken, iletken üstünde gerilimi tutan bir yalıtkan tabaka ve en dışta da siper iletkeni olmak üzere özetlenebilir.

Kabloya gerilim uygulandığında, gerilim elektrik alanı oluşmasına sebep olurken, damardan akan akım, kabloda ve çevresinde bir manyetik alan oluşmasına sebep olur. Sinüzoidal alternatif akım taşıyan bir

kabloda, bu manyetik alan, zamanla değişen bir alan olduğundan, Faraday Yasası gereği

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

denklemleri ile verilen, kablo içinde gerilim endüklenmesine ve girdap akımları oluşmasına sebep olmaktadır.

Kablonun manyetik alan analizinde, akım taşıyan iletken, manyetik alanın kaynağı olarak kabul edilmektedir. Yalıtkan malzemede ise manyetik alandan dolayı bir gerilim endüklenirse de yalıtkan malzemenin öz direnci sonsuz kabul edilecek kadar büyük olduğundan, girdap akımları ihmal edilebilmektedir. Ancak, siper öz direnci ihmal edilemeyecek kadar küçük olduğundan, siperde manyetik alan sebebi ile endüklenen gerilim, girdap akımlarının akmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı kabloda girdap akımları ve girdap akımlarının sebep olduğu kayıp, en çok siperde görülmektedir.

Siperde oluşan girdap akımı ve girdap akımı kaybı basitçe aşağıdaki gibi açıklanabilir. Amper Yasası gereği damardan akan akımdan dolayı kabloda, H_{max} maksimum manyetik alan şiddeti, ω açısal frekans olmak üzere

$$H = H_{max} \sin(\omega t) \quad (2)$$

manyetik alan şiddeti (H) oluşur. Bu manyetik alan şiddetinin oluşturduğu gerilim

$$\sum H \cdot L = \sum I \quad (3)$$

olur. Bu ifadede L , manyetik alan şiddetinin etkin olduğu bölgedeki ortalama yol uzunluğu, I ise manyetik alanı yaratan toplam akımdır.

Kablodan akan akım ve oluşturduğu manyetik alan nedeniyle siperde endüklenen gerilim (U_{end});

$$U_{end} = \int dE = \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3a)$$

$$U_{end} = \mu \pi (r_{is})^2 \omega H_{max} \cos(\omega t) \quad (3b)$$

olur. Burada, r_{is} siper iç yarıçapıdır. Siperde endüklenen akımın maksimum değeri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\text{maks } I = \frac{\max U_{end}}{R_e} \quad (4)$$

Bu ifadede, $\max U_{end}$ siperde endüklenen maksimum gerilim, R_e ise silindrsel koordinatlarda z ekseninde girdap akımı akarken siper malzemesinin bu akıma karşı gösterdiği siper direncidir.

Siper malzemesinin öz direnci ρ , siperin enine kesit alanı A ve siper kalınlığı T iken R_e siper direnci;

$$R_e = \frac{\rho 2\pi(r_{is})}{A} = \frac{\rho 2\pi(r_{is})}{l \cdot T} \quad (5)$$

şeklinde. Bu denklemde siper kalınlığı T 'nin siper iç yarıçapı r_{is} 'den küçük olduğu göz önüne alınmıştır. (5) denklemi (4) denklemine yerine yazılırsa;

$$\text{maks } I = \frac{\mu(r_{is})\omega T l}{2\rho} H \quad (6)$$

elde edilir. Bu denklemde l siper uzunluğudur. Bu durumda siperden akan girdap akımlarının R_e siper direncinde yarattığı kayıp güç $P = R I^2$ bağıntısına göre;

$$P_{girdap} = \left(\frac{\mu(r_{is})\omega T l}{2\rho} H \right)^2 R_e \quad (7)$$

olarak elde edilir. Bu denklemde siper direncinin bağıntısı yerine yazılırsa

$$P_{\text{girdap}} = \frac{2\mu^2 \pi^2 (r_{\text{is}})^3 f^2 T}{\rho} H^2 \quad (8)$$

elde edilir. Bu eşitlik sayesinde girdap akımları hakkında aşağıdaki yorumları yapmak mümkündür:

- Siperde girdap akımı kayıpları, kullanılan malzemenin öz direnci büyüdükçe küçülür.
- Siperde girdap akımı kayıpları, siper malzemesinin manyetik geçirgenliğinin karesiyle doğru orantılıdır.
- Siperde girdap akımı kayıpları, siper yarıçapının küpüyle doğru orantılıdır.
- Siperde girdap akımı kayıpları, işletme frekansının karesiyle doğru orantılıdır.
- Siperde girdap akımı kayıpları, siper kalınlığı ile doğru orantılıdır.

Özetle, siperin yapısal düzenindeki herhangi bir değişikliğin, girdap akımı kayıplarını değiştirdiği söylenebilir [5-7].

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi ile bir manyetik alan probleminin çözümü manyetik Laplace denklemi olarak bilinen

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (9)$$

ikinci mertebeden bir homojen kısmi diferansiyel denklemin çözümünü gerektirir. Sonlu elemanlar yöntemi bu denklemin çözümü ile çözüm bölgesi içinde

$$W = \iint_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \nu |\nabla A|^2 - J \cdot A \right] dx dy \quad (10)$$

manyetik enerji denklemini en küçük değere indirgeyen çözümün aynı olması ilkesi ile

çözer. Bu bağıntıda, $A(x,y)$ manyetik vektör potansiyel yaklaşım işlevini, J manyetik alan içindeki kaynakları ve ν ise manyetik relüktiviteyi (manyetik direnci) belirtmektedir. (10) bağıntısında

$(1/2)\nu |\nabla A|^2 - J \cdot A$ terimi ise $\Omega = dx \cdot dy$ yüzeyindeki enerji yoğunluğunu göstermektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile inceleme yapmak için incelenecek alan bölgesi sonlu elemanlara bölünür. Buna bölgenin sonlu elemanlara ayrıştırılması denir. İki boyutlu bölmelemede yani problemi sonlu elemanlara ayırmada genellikle üçgen sonlu elemanlar kullanılır. Sonra sınır koşulları, bilinen akımlar ve malzeme özellikleri kullanılarak her bir eleman içinde geçerli olduğu kabul edilen birinci dereceden polinomsal yaklaşım işlevleri ile eleman denklemleri ve problemin birleşik (genel) denklemi elde edilir. Bu denklemi çözmek için sayısal hesaplama yöntemleri kullanan bir araca gereksinim duyulur [2].

Bu amaçla, söz konusu çalışmada FEMM 4.2 adlı bir bilgisayar paket programı kullanılmıştır. Bu yazılım, elektrik, manyetik ve ısı alan problemlerini iki boyutlu olarak veya eksenel simetriden yararlanarak üç boyutlu olarak çözebilmektedir.

4. PROBLEMİN KURULMASI

Deri etkisi frekansın artışı ile akımın sadece iletkenin yüzeyin alanını kullanması anlamına gelmektedir. Alternatif manyetik alan problemlerinde deri etkisinin hesaba katılması, çözüm doğruluğunu arttırmaktadır. Bundan dolayı akım yoğunluğu gözlemleri yapılan bölgelerde sonlu eleman boyutunun yeteri kadar küçük seçilmesi önemlidir.

Bu çalışmadaki incelemelerde, tek damarlı, 1000 mm² damar kesitli ve XLPE yalıtkanlı, 2 mm kalınlığında siperi olan 154/89 kV anma gerilimli bir kablo göz önüne alınmıştır. Kablonun anma akımı 1104 A ve

çalışma frekansı 50 Hz'dir. Çizelge 1'de kablo parametreleri verilmiştir. Bu kablunun toprak yüzeyinden yeraltına gömülme derinliği ise 1 metre alınmıştır.

Çizelge 1: Kablo katmanlarının özellikleri

Katman	Yarıçap	Malzeme
İletken	18 mm	Bakır
Yalıtkan	51 mm	XLPE
Siper	53 mm	Çelik

Kabloda kullanılan malzemelerin bağlı manyetik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2: Kablodaki malzemelerin elektriksel özellikleri

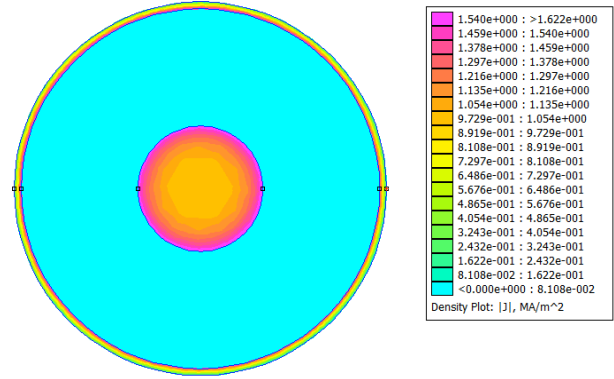
	İletken	Yalıtkan	Siper
Bağlı manyetik geçirgenlik	1	1	470
Elektriksel iletkenlik [MS/m]	58	0	1,67

İncelemelerde kablo, tek başına toprak içine gömülü olduğu, yanında, çevresinde başka bir kablo veya damar olmadığı göz önüne alınmıştır. Bu nedenle kayıp hesaplarında yakınlık etkisine bağlı kayıplar söz konusu değildir.

5. BENZETİM SONUÇLARI

5.1. Tek Parça Siperli Kablo

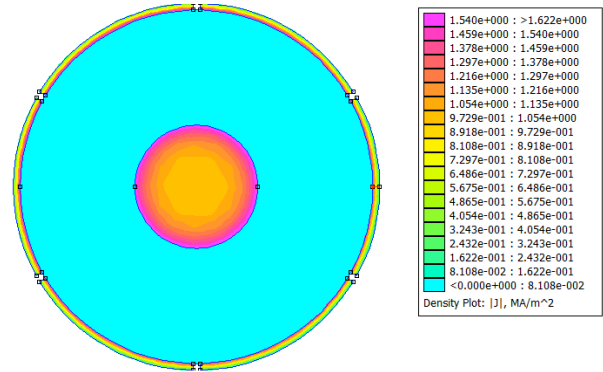
İlk benzetimde siper tek parça halindedir. Kablo siperine parçalara ve tabakalara ayırma yani laminasyon uygulanmamıştır. Benzetimden elde edilen akım yoğunluğu dağılımı, Şekil 1'de verilmiştir. Girdap akımlarının yarattığı akım yoğunluğu siperde açıkça görülmektedir.



Şekil 1: Tek parça siperli kablunun akım yoğunluğu dağılımı.

5.2. Çok Parça Siperli Kablo

İkinci benzetimde siper, altı parçaya bölünmüş haldedir ve yine bu parçalarda birbirinden yalıtılarak tabakalara ayırma işlemi (laminasyon) uygulanmamıştır. Benzetimden elde edilen akım yoğunluğu dağılımı, siperde girdap akımlarının yarattığı akım yoğunluğu Şekil 2'de görülmektedir.



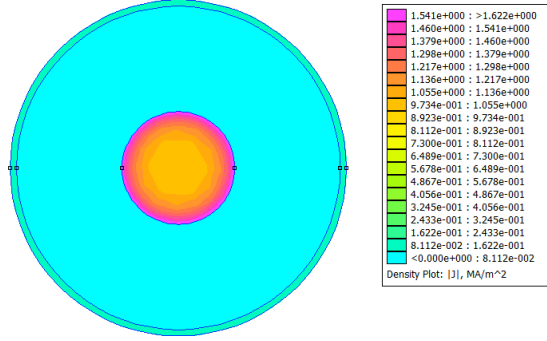
Şekil 2: Çok parçalı siperli kablunun akım yoğunluğu dağılımı.

5.3. Tabakalı Siperli Kablo

Üçüncü benzetimde siper, tek parça haldedir ancak, siperde transformatör veya elektrik motoru gibi elektrik makinaları çekirdeklerinde (nüvelerinde) olduğu gibi birbirinden yalıtılmış çok tabakadan oluşturma işlemi yani laminasyon uygulanmıştır. Laminasyon işlemi sırasında, 1 mm'lik iletken siper tabakalarının arasına

0,1 mm kalınlığında yalıtkan malzeme yerleştirilmiştir. Bu şekilde tabakalar art arda dizilerek çok tabakalı siper oluşturmuştur.

Benzetimden elde edilen akım yoğunluğu dağılımı, Şekil 3’de verilmiştir. Siperde girdap akımlarının yarattığı akım yoğunluğunun ve kayıpların çok azaldığı görülmektedir.



Şekil 3: Tabakalı kablunun akım yoğunluğu dağılımı.

5.4. Kablolarda Girdap Akımı Kayıpları

İncelenen üç kablo için Sonlu Elemanlar çözümü yapan program tarafından hesaplanan girdap akımı kayıpları Çizelge 3’de görülmektedir.

Çizelge 3: Kablolarda girdap akımı kayıpları

	İletkende kayıp [W]	Yalıtkanda kayıp [W]	Siperdeki kayıp [W]
Tek parça siperli	1,65025 ×10 ⁻¹⁷	2,55925 ×10 ⁻²⁰	93,7211
Parçalı siperli	2,20601 ×10 ⁻¹⁷	2,13156 ×10 ⁻²⁰	80,7474
Tabakalı siperli	2,33816 ×10 ⁻¹⁷	4,22985 ×10 ⁻²⁰	16,0623

Çizelge 3’den de görüldüğü gibi kablolarda girdap akımı kayıpları en çok siperde gözlenmektedir. İletkende ve yalıtkanda oluşan girdap akımı kayıpları siperdekinin yanında ihmal edilecek kadar küçüktür.

Farklı siper yapılarına sahip kablolardan en yüksek girdap akımı kaybı, tek parça ve tabakalı olmayan siperi olan kabloda gözlemlenmiştir. Siperi çok parçalı veya tabakalı tasarlamak girdap akımı kaybını azaltmıştır. Siperi tek parça tasarlayıp tabakalı olarak oluşturmak ise girdap akımı kaybını oldukça azaltmıştır.

Çizelge 3’ten yapıya göre siperdeki girdap akımına bağlı kayıplar azalırken iletkendeki ve yalıtkandaki kayıplar az da olsa artış göstermiştir. Ayrıca siperi tabakalardan oluşturmak, kabloda, siperi toprak iletkeni olarak kullanma şansını ortadan kaldırmaktadır. Bu sebeple, bu tekniği elektriksel bir görevi olmayan zırha uygulamak daha uygun olur.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, damar kesitleri aynı, siperleri farklı yapısal düzende yapılmış üç kabloda girdap akımı kayıpları incelenmiştir. Kabloda en yüksek girdap akımı kaybının, kablo siperinde olduğu gösterilmiştir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile farklı siper yapıları ile yapılan uygulamalarda siperde oluşan girdap akımı kayıplarının farklılık gösterdiği ortaya konmuştur. En az girdap akımı kaybı, siperi birbirinden yalıtılmış iletken tabakalarda ve parçalı siperlerde ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma, birden fazla damarın veya kablunun bir arada olmaları durumları için de yapılabilir. Bu durumda kayıp hesaplarına yakınlık etkisi de katılmalıdır. Ayrıca üç fazlı durumda incelemeler ve girdap akımı kayıplarının azaltılması çalışmaları yapılmaya devam edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] L. Yanmu, ve diğeri, “Coupled Electromagnetic-Thermal Modeling the Temperature Distribution of XLPE Cable”, APPEEC 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf., pp. 1-4, 27-31 March, 2009.
- [2] Szymanski, G., Patecki, A., Eddy-current losses in three-phase power cable and pipe-sheathing systems, IEE Proceedings A, Vol. 131, No. 3, pp. 125 – 128, May 1984.
- [3] Ferkal, K., Poloujadoff, M., Dorison, E., Proximity effect and eddy current losses in insulated cables, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1171 – 1178, July 1996.
- [4] Yongchun Liang, Zhongjie Wang, Jianye Liu, Xiaoyun Sun; Reduction of Eddy Current Losses in Power Cable Systems Based on Phase Optimization, APPEEC 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf., Chengdu, pp. 1 – 3, 28-31 March 2010.
- [5] Labridis, D., Dokopoulos, P., Finite element computation of eddy current losses in nonlinear ferromagnetic sheaths of three-phase power cables, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1060 – 1067, July 1992.
- [6] Cirino, A. W., de Paula, H., Mesquita, R. C., Saraiva, E., "Cable parameter variation due to skin and proximity effects: Determination by means of Finite Element Analysis", *IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics*, pp. 4073 - 4079, 3-5 Nov. 2009.
- [7] A. A. Turan, “Kablolarda girdap akımı ve kayıplarının hesabı”, Şubat 1996.