

K-FAKTÖRÜNÜN TRANSFORMATÖRDEKİ ÖNEMİ

Hacer ŞEKERCİ¹, Bülent UZUNKUYU²

¹Yaşar Üniversitesi, hacer.sekerci@yasar.edu.tr
²Elta Elektrik, bulent.uzunkuyu@eltaelektrik.com

ÖZET

Lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımları kabloların ve motorların aşırı ısınmasına, motorların titreşmesine neden olurlar. Benzer etkiler güç trafolarında da görülür; kayıpların artması, aşırı ısınma ve prematüre hatalar harmonik kaynaklıdır. Söz konusu etkiler sonucu trafoların öncelikle izolasyon ve dolayısıyla kullanım ömürleri de azalmaktadır. Ayrıca güç faktörü iyileştirme amacıyla kondansatör grupları devreye alındığında, kondansatörlere zarar verdikleri gibi kritik değerlerde sistemin rezonansa girmesine sebep olurlar. Harmonik akımların etkilerini düzenlemek ve harmonik kaynaklı aşırı ısınmaya karşı koruma sağlamak amacıyla K-faktör trafolar dizayn edilmiştir. Bu çalışmada K-faktör ayrıntılı olarak tartışılacak ve örnekler ile bir kez daha önemi ortaya konacaktır.

1. GİRİŞ

Güç transformatörleri enerji sisteminin ana parçalarıdır ve yatırımın en pahalı kısımlarından birisidir. İletim ve dağıtımda kullanılan trafoların çalışması sırasında oluşabilecek sorunlar veya hatalar, hem enerjiyi sağlayan hem de kullanan cephesinden çok büyük maddi kayıplara neden olduğu gibi, sistemin güvenilirliğini de azaltmaktadır.

Araştırmacılar trafo üreticilerinin daha güvenilir ve efektif ürünler imal edebilmeleri için trafonun elektriksel modelini detaylandırıp, yeni kavramları ortaya çıkardılar. Özellikle trafo yaşlanması ve yalıtkanlığın azalmasının aşırı ısınma ile ilişkisini belirledi ve Top Oil Temperature (TOT) ve Hot Spot Temperature (HST) tanımları oluştu. İzolasyon yaşı, HST'nin exponansiyel fonksiyonu olarak ve kullanılan yalıtkan materyalin malzeme özelliklerine bağlı olarak verilmektedir [1-3].

Aslında harmonik akımlar güç sistemindeki tüm elemanları ek di-elektrikler oluşturarak, termal ve/veya mekanik stresler yaratarak olumsuz olarak etkilemektedirler. Bu harmonik akımlar güç sisteminin eşdeğer devre elemanlarının üzerinden aktıklarında voltaj bozulması şeklinde gözlenen harmonikli voltaj düşümleri oluşur. İndüktif ve kapasitif reaktansların bu harmonik frekanslarında

(genellikle 5, 7, 11 veya 13) rezonans yaratabildiği bilinmektedir [4,5].

Rezonanslar olmasa bile harmonikli akımlar güç sistemi elemanları ve özellikle de trafolarda sargılarda gözlenen girdap (eddy) akımları kayıpları olarak tanımlanan I^2R kayıplarına ilave kayıplara ve dolayısıyla ek ısınmalara yol açmaktadırlar [4-7]. IEEE C57.110, harmonikli yük akımları olduğu durumda trafolarda derating olarak bilinen yöntemleri ayrıntılı olarak tanımlamakta ve çözüm önerileri sunmaktadır [6].

Bu çalışmada harmoniklerin trafolara etkisini ve bu etkilerin hesaplanması ve azaltılması ile ilgili yöntemler tartışılacaktır.

2. TRAFÖ KAYIPLARI

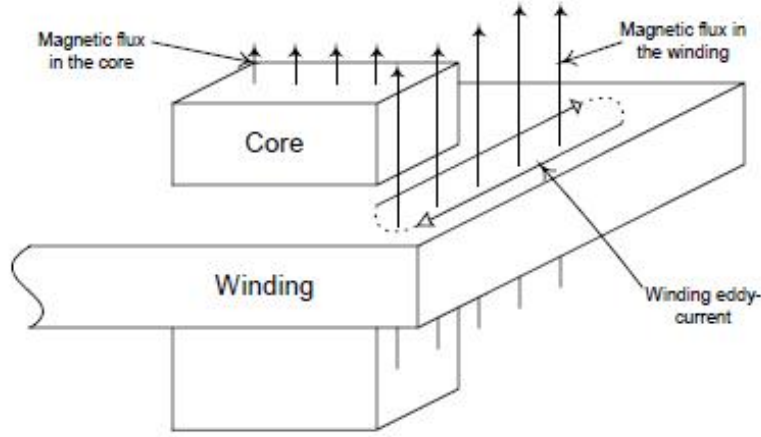
Trafolarda kayıplar genelde, eşitlik -1'de tanımlandığı gibi yüksüz durumda ve yük altında olmak üzere iki kısımda tanımlanır. Yüksüz kayıplar, nüvede yani çekirdekdeki manyetik kayıplardır ve eşdeğer devrede nüve kaybı direnci modellenirler. Yüklü koşulda ortaya çıkan kayıplar ise I^2R ile verilen rezistif kayıplar ile stray loss olarak bilinen kayıplardır. [7,8].

$$P_{toplam} = P_{yüksüz} + P_{yüklü} = P_{nüve} + (I^2 \cdot R + P_{stray}) \quad (1)$$

Söz konusu bu kayıplar sargılarda, nüvede, nüve kısıkaçlarında, manyetik ekranlarda ve tank duvarlarında elektromanyetik akılar tarafından yaratılırlar. Eşitlik -2'den görüleceği gibi sargılardaki girdap akımları kayıpları ile diğer elemanlardaki stray kayıplarının (P_{OSL}) toplamı olarak verilirler.

$$P_{stray} = P_{EC} + P_{OSL} \quad (2)$$

Sarılarda oluşan girdap akımları şekil-1'de şematik olarak gösterilmiştir. Sargı iletkeninden akan kaçak akının zamana göre değişimi bu girdap akımını oluşturur [7].



Şekil-1: Trafo sargılarında görülen girdap akımları

Ait oldukları harmonik frekansının karesi oranında artış gösterdikleri için, harmonik kaynaklı girdap akımlarının neden olduğu kayıplar en çok dikkat edilmesi gereken kayıplardır. Her harmonik akım değerindeki girdap akım kayıpları eşitlik-3'de görüldüğü şekilde ifade edilir.

$$P_{EC-h} = P_{EC} \cdot I_{h-pu}^2 \cdot h^2 \quad (3)$$

Bu eşitlikte;

P_{EC} temel frekanstaki girdap akım kaybını,

P_{EC-h} h derecesindeki harmonik akıma ait girdap akım kaybını,

I_{h-pu} h derecesindeki per unit olarak harmonik akım değerini göstermektedir.

Toplam girdap akım kaybı (P_{EC-T}), eşitlik-4'de verildiği gibi tüm harmonik derecesindeki kayıpların toplanmasıyla bulunur [6-9].

$$P_{EC-T} = P_{CE} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h-pu}^2 \cdot h^2 \quad (4)$$

Trafoda oldukça önemli bir konu olan girdap akımları kaybının hesaplanması sırasında kullanılan iki farklı yaklaşım

vardır. Her iki yöntemi de aynı anda inceleyen karşılaştırmalı çalışmalara literatürde rastlanmaktadır [10,11].

Amerika'da Underwrites Laboratories (UL)'de geliştirilen ve trafo üreticileri tarafından uygulanan ilk yöntem K-faktörü olarak bilinir. K-faktör harmonik yük akımlarının akımların trafo ısınması üzerindeki etkilerini veren bir ağırlıktır [4, 6].

Genellikle Avrupa'da kullanılan İkinci yöntem, standart trafonun ne kadar düşük kapasitede çalıştırılacağı hesaplanarak, harmonik akımları kayıplarının ana tasarımda hesaplanan kayıpları aşmaması sağlanır. Bu yönteme de faktör-K adı verilir.

Her iki yöntemde de 'K' tanımı kullanılsa da, sayısal değer olarak çok farklıdır. Faktör K bir orandır ve genellikle % ile verilir, fakat K-faktör bir çarpandır, yani tamsayı olan bir katsayıdır. Belirtmek istediği şey aynı kavram da olsa, kullanım şekillerindeki fark nedeniyle dikkat edilmelidir.

3. K-FAKTÖR

K-faktörü eşitlik-5’de verildiği gibi, harmoniklerin etkisi varken hesaplanan toplam girdap akım kayıplarının, temel bileşende hesaplanan girdap akımı kayna oranına eşittir.

$$K = \frac{P_{EC-T}}{P_{CE}} = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h-pu}^2 \cdot h^2 = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 \cdot h^2 \quad (5)$$

K-faktör bugün piyasada bulunan cihazlarda doğrudan ölçülerek belirlenebilir. K-faktör dikkate alınarak imal edilen trafolarla K-faktör katsayıları 1, 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50 olarak belirlenmiştir. K-faktörünün bir olması lineer yükü yani harmonik akımlarının olmaması durumunu işaret eder. Hangi tür yüklere, hangi k-faktörlerinin uygun olduğu ise Tablo 1’de görülmektedir [4].

4. FAKTÖR –K

Avrupa’da standart bir trafonun düşük kapasitede çalıştırma miktarı eşitlik-6’da verilen formüle göre hesaplanır.

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h=N} \left(h^q \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{0,5} \quad (6)$$

Burada;

- e temel frekanstaki girdap akım kaybının, sinüzoidal akımın rms değerine sahip dc akımın yarattığı kayba oranını,
- h harmonik derecesini,
- I_h h derecesindeki harmonik akım değerini,
- I_1 temel frekanstaki akım değerini,
- q sarım şekline ve frekansa bağlı bir sabiti (genelde 1,5~1,7 gibi vermektedir).

Tablo 1: Yüklere göre K-faktör trafo dereceleri

Load	K-factor
Incandescent lighting (with no solid state dimmers)	K-1
Electric resistance heating (with no solid state heat controls)	K-1
Motors (without solid state drives)	K-1
Control transformers/electromagnetic control devices	K-1
Motor-generators (without solid state drives)	K-1
Electric-discharge lighting	K-4
UPS w/optional input filtering	K-4
Induction heating equipment	K-4
Welders	K-4
PLC’s and solid state controls (other than variable speed drives)	K-4
Telecommunications equipment	K-13
UPS without input filtering	K-13
Multi-wire receptacle circuits in general care areas of health care, facilities and classrooms of schools, etc.	K-13
Multi-wire receptacle circuits supplying inspection or testing equipment on an assembly or production line	K-13
Mainframe computer loads	K-20
Solid state motor drives (variable speed drives)	K-20
Multi-wire receptacle circuits in critical care areas and operating/recovery rooms of hospitals	K-20
Multi-wire receptacle circuits in industrial, medical, and educational laboratories.	K-30
Multi-wire receptacle circuits in commercial office spaces	K-30
Small mainframes (mini and micro)	K-30
Other loads identified as producing very high amounts of harmonics (especially in higher orders)	K-40

Eşitlik-6'da tüm harmonik akım değerlerini de içeren sinüzoidal akımın RMS değerini gösteren I eşitlik-7'de olduğu gibi verilebilir.

$$I = \left(\sum_{h=1}^{h=N} I_h^2 \right)^{0,5} = I_1 \left[\sum_{h=1}^{h=N} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (7)$$

K-faktör veya faktör-K farkını net olarak anlayabilmek için toplam rms akım değeri 1,479 pu olan ve 11'e kadar sadece tek sayılı harmonik akımları olan örnek için yapılan hesaplamalar aşağıda sırasıyla verilmiştir [10].

K-faktör

Harmonik	rms (I_h)	(I_h/I_1)	(I_h/I_{rms})	$(I_h/I_{rms})^2$	$(I_h/I_{rms})^2 h^2$
1	1	1	0,6761	0,4571	0,4571
3	0,82	0,82	0,5544	0,3073	2,7663
5	0,58	0,58	0,3921	0,1538	3,8444
7	0,38	0,38	0,2569	0,0660	3,2344
9	0,18	0,18	0,1217	0,0148	1,2000
11	0,045	0,045	0,0304	0,0009	0,1120

$$\Sigma=11,6138$$

K-faktör: 11,6138

Faktör-K (Bu hesaplama için $q=1,7$ ve $e=0,1$ olarak alınmıştır.)

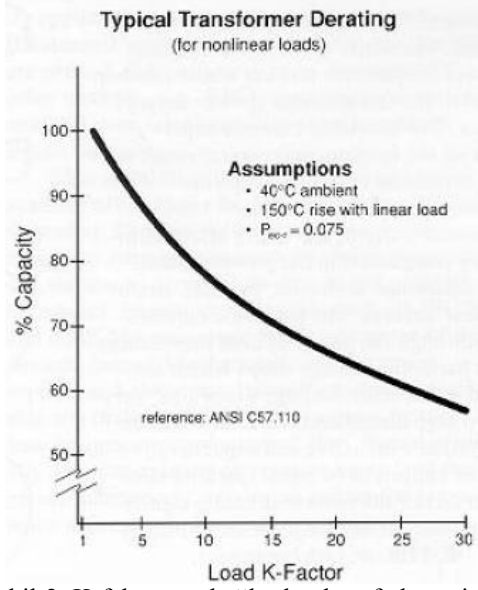
Harmonik	rms (I_h)	(I_h/I_1)	$(I_h/I_1)^2$	h^q	$h^q (I_h/I_1)^2$
1	1	1	1	1	1
3	0,82	0,82	0,6724	6,473	4,3525
5	0,58	0,58	0,3364	15,426	5,1893
7	0,38	0,38	0,1444	27,332	3,9467
9	0,18	0,18	0,0324	41,900	1,3576
11	0,045	0,045	0,0020	58,934	0,1193

$$\Sigma= 14,9653$$

$$K = \sqrt{\left(1 + \frac{0,1}{1 + 0,1} \left(\frac{1}{1,479}\right)^2\right) 14,9653} = \sqrt{1,622} = 1,273$$

Faktör-K: 1,273 & De-rate: 1/1,273=0,7855 → %78,55

IEEE/ANSI C57-110 Standardına göre lineer olmayan yüklerin bulunduğu trafolarla K-faktörün derecesine bağlı olarak beklenen trafonun düşük kapasite kullanım oranları Şekil-2'de verilmiştir [11-13].



Şekil-2: K-faktörüne bağlı olarak trafo kapasitesi Örnek sonuçları şekil-2'den incelendiğinde K-faktör veya faktör-K'dan aynı sonuca ulaşılacağı görülmektedir. Örnekte K-faktörü 11,6138 bulunmuştu. Şekil-2'den bu değere karşı gelen trafonun düşük kapasite ile çalışma oranı gene %78 civarında bulunmaktadır.

5. K-FAKTÖR DERECELİ veya FAKTÖR-K

K-faktör dereceli trafoların büyük avantajı, harmonik yükler dikkate alınarak imal edilmeleri ve kayıpları düşük değerde tutacak olmalarıdır. Örneğin, sarımda çok telli iletkenler kullanılarak girdap akım kayıpları ve düşük kayıplı çelik saçlar kullanılarak manyetik kayıplar azaltılır. Diğer taraftan, standart trafoların düşük kapasitede kullanılmasının birçok dezavantajı vardır. Büyük hacimli trafolar kullanmak gerekir. Primer korumada set edilen aşırı akım değeri sekonderi korumada yüksek kalabilir. Koruma seviyesi düşürülürse bu kez trafo indüklenme akımı (inrush current) açtırma yapabilir. Trafo, etkin değerinin altında çalışmaktadır ve aşırı kayıplar hala vardır. Her zaman bakım sorunu vardır. Trafoya ilave yük bağlandığında ve başlangıçtaki düşük kapasitede kullanma değeri aşılmışsa buna bağlı hatalar meydana gelecektir.

6. EŞ KULLANIM

Her non-linear yük, kendi devrelerine ve sürekli yüklerine bağlı olarak farklı faz açılarında ve büyüklüklerde harmonik üretir. Değişik yükler paralel bağlandığında, örneğin bir ofis katında çok sayıda bilgisayar devrede olduğunda, toplam harmonik değeri bireysel harmonik değerlerin toplamından az olabilir. Bir başka deyişle, toplam yükün K-faktör, bireysel yüklerin toplamının beklenen değerinden küçük olabilir. Benzer biçimde, sistemde lineer yüklerin fazla olması K-faktör katsayısını düşürecektir. Çünkü harmonik yükün toplam yüke oranı azalacaktır.

K-faktörü önceden belirlemek çok zordur. En kötü hal şekli, her yükün harmonik spektrumu alınarak ve toplanarak ve buna bütün temel yükler eklenerek bulunabilir. Uygulamada K-faktör katsayısı daha küçük olacaktır.

7. SONUÇ

Kullanılan yüklerin gücü ve $\cos\Phi$ değerleri etiketlerde yazılmaktadır. Üretici firmaların harmonik değerlerini de etiketlere eklemeleri, proje tasarımında veya trafo gücü hesaplamasında mühendislerin çok yüksek yakınsama ile sonuca ulaşmalarına yardımcı olacaktır. Harmonik değerlerinin başlangıçta bilinmesi trafo hesaplarında ve seçiminde (K-faktörlü veya standart büyük hacimli) daha gerçekçi olmasını sağlayacaktır.

Mevcut trafolarla yeni yükler ilave edilirken mutlaka harmonik ölçümü yapılmalı ve faktör-K hesaplanarak yeni durum incelenmelidir. Ayrıca trafolarla her yıl düzenli olarak harmonik ölçümü yaptırılmalı ve harmonik kaynağı olan yüklerin önüne filtre takılabileceği de göz ardı edilmemelidir.

Sonuç olarak, düzenli bir şekilde harmonik ölçümler yapılarak mevcut K-faktör'ün sistemi sağladığı veya standart trafo

kullanılıyorsa hangi kapasitede kullanılması gerektiği hesaplanmalıdır.

KAYNAKÇA

[1] IEEE Standard, C57.91-2011, *IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformer*, 2012

[2] Haldun KARACA “*Prediction of Hot-Spot and Top-Oil Temperatures of Power Transformers According to IEEE Standards C57.110-1998 and C57.91-1995*” McS Thesis, 2007 ODTU

[3] M. SRINIVASAN, A.KRISHNAN “*Effects of Environmental Factors in Transformer’s Insulation Life*”, *Wseas Transactions on Power Systems*, Issue 1, Volume 8, January 201, pg: 35-44

[4] O. E. GOUDA, G. M. AMER & W. A. A. SALEM “*A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation*”, *ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol: 1, No: 5, 2011, pg:114-120

[5] R. N. JAYASINGHE, “*Power system harmonic effects on distribution transformers and new design considerations for K-factor transformers*” IEE Sri Lanka Annual Sessions, September 2003

[6] IEEE Standard, C57.110-1998, *IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*

[7] Jian ZHENG “*Transformer ac Windng Resistance and Derating When Supplying Harmonic-Rich Current*”, McS Thesis, 2000 Michigan Technological University

[8] Linden W. PIERCE, “*Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents*”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol: 32, No: 3, pp:633- 645, May-June 1996

[9] Tao SHUN & Xiao XIANGNING, “*Comparing Transformer Derating Computed Using the Harmonic Loss*

Factor F_{HL} and K-Factor”, DRPT2008, pp:1631-1634, 6-9 April 2008 Nanjing China

[10] “*Harmonics, Transformers and K-facots*”, <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/downloads/pub-144-harmonics-transformers-k-factors.pdf>, CDA Publication 144, September 2000, 16.06.2013

[11] “*K-Factor Transformers*”, http://www.chauvinarnoux.fr/fiches/pdf/uk/factor_K_UK.pdf, 16.06.2013

[12] “*K-Factor Transformers and Nonlinear Loads*” <http://www.emersonnetworkpower.co.in/KnowledgeCenter/Whitepapers/K-FactorTransformer.pdf>, 16.06.2013

[13] Kiran DESHPANDE, Rajesh HOLMUKHE, & Yogesh ANGAL, “*K-Factor Transformers and Non-linear Loads*”, [http://www.bvucoepune.edu.in/pdfs/Research%20and%20Publication/Research%20Publications%202010-11/National Conference 2010-11/K-factor%20transformers.pdf](http://www.bvucoepune.edu.in/pdfs/Research%20and%20Publication/Research%20Publications%202010-11/National%20Conference%202010-11/K-factor%20transformers.pdf), 16.06.2013