

# K-faktörünün Transformatördeki Önemi

Hacer Şekerci

hacer.sekerci@yasar.edu.tr

Bülent Uzunkuyu

bulent.uzunkuyu@eltaelektrik.com

## 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 belirlemiştir. 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.

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.

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

## TRAFÖ KAYIPLARI

Trafolarda kayıplar genelde, eşitlik -1'de tanımlandığı gibi yüksüz durumda ve yük altında olmak üzere iki kısımda tanımlanır. Yüksüz kayıplar, nüvede yani çekirdekteki manyetik kayıplardır ve eşdeğer devrede nüve kaybı direnci modelleridir. Yüklü koşulda ortaya çıkan kayıplar ise I<sup>2</sup>R ile verilen rezistif kayıplar ile stray loss olarak bilinen kayıplardır.

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

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

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

Sargı iletkeninden akan kaçak akının zamana göre değişimi girdap akımını oluşturur.

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;

PEC temel frekanstaki girdap akım kaybını,  
PEC-h h derecesindeki harmonik akıma ait girdap akım kaybını,

I<sub>h-pu</sub> h derecesindeki per unit olarak harmonik akım değerini göstermektedir.

Toplam girdap akım kaybı (PEC-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.

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.

Genellikle Avrupa'da kullanılan ikinci yöntem, standart trafonun ne kadar düşük kapasitede çalıştırılacağı hesaplanarak, harmonik akımları kayıplarının ana tasarımda hesaplanan kayıpları aşmaması sağlanır. Bu yöntemde 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 etmek isteği şey aynı kavram da olsa, kullanılan şekillerindeki fark nedeniyle dikkat edilmelidir.

## K-FAKTÖR

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

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

K-faktör bugün piyasada bulunan cihazlarda doğrudan ölçülerek belirlenebilir. K-faktör dikkate alınarak imal edilen trafolarda 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.

## FAKTÖR -K

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

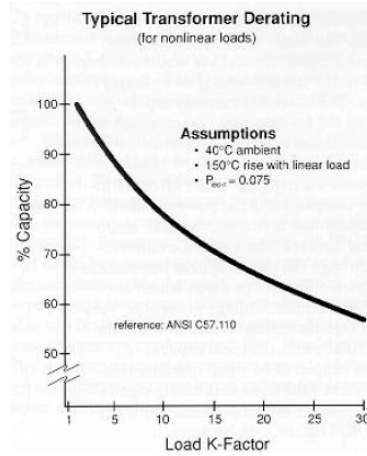
$$K = \left[ 1 + \frac{\epsilon}{1+\epsilon} \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{h=2}^{h=N} \left(h^q \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2\right) \right]^{0,5} \quad (6)$$

Burada;

ε temel frekanstaki girdap akım kaybının, sinüzoidal akımın rms değerine sahip dc akımın yarattığı kayba oranını,  
h harmonik derecesini,  
I<sub>h</sub> h derecesindeki harmonik akım değerini,  
I<sub>1</sub> 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



Şekil-2: K-faktörüne bağlı olarak trafo kapasitesi

Eşitlik-6'da tüm harmonik akım değerlerini de içeren sinüzoidal akımın RMS değerini gösteren 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.

K-faktör

Harmonik	rms ( $I_h$ )	$(I_h/I_1)$	$(I_h/I_{rms})$	$(I_h/I_{rms})^2$	$(I_h/I_{rms})^2 \cdot h^2$
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 ( $I_h$ )	$(I_h/I_1)$	$(I_h/I_1)^2$	$h^2$	$h^2 (I_h/I_1)^2$
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.

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

### 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 korumda set edilen aşırı akım değeri sekonderi korumada yüksek kalabilir. Koruma seviyesi düşürülürse bu kez trafo indükleme 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.

### EŞ KULLANIM

Her non-lineer 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.

Kullanılan yüklerin gücü ve cosΦ 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-faktörün sistemi sağladığı veya standart trafo kullanılıyorsa hangi kapasitede kullanılması gerektiği hesaplanmalıdır.