GENETEKKAMPUS

Teknik Not

Transformatörlerde Yükte Çalışma Kayıpları

Özet

Transformatörlerin çalışması esnasında meydana gelen güç kayıpları boşta çalışma kayıpları ile yükte çalışma kayıplarının toplamı olarak ifade edilmektedir. Yükte çalışma kayıpları yük akımının karesi ile doğru orantılı olarak değişmekte olup transformatörde meydana gelen güç kayıplarının büyük kısmını oluşturmaktadır. Bu sebeple, transformatörlerde yükte çalışma kayıplarını etkileyen faktörlerin tasarım aşamasında göz önünde tutulması ve bu kayıpların en aza indirilmesi önem taşımaktadır.

GENETEKEM

02/2021

Transformatörler enerji dağıtım şebekesinde büyük rol üstlenen fakat önemli ölçüde kayıplara neden olan şebeke bileşenleridir.

2020 yılında yayınlanarak yürürlüğe giren ve EN 50588 serisi standartların yerini alan EN 50708 serisi standartlar ile orta ve büyük güçlü transformatörlerin temel gereklilikleri ile transformatörlerde izin verilen güç kayıplarının sınır değerleri yeniden düzenlenmiştir. Güç kayıplarını bu standardın gerektirdiği düzeye indirebilmek için, transformatörde kayıplara neden olan tüm faktörlerin dikkatle göz önünde tutularak iyileştirilmesi gerekmektedir.

Transformatörlerde meydana gelen toplam güç kayıpları, boşta çalışma ve yüklü çalışma kayıplarının toplamı biçiminde ifade edilmektedir. Boşta çalışma kayıplarının aksine yüklü çalışma kayıpları, transformatörün sargılarından akan yük akımının karesi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu kayıplar; sargı iletkenlerinde meydana gelen sargının DC direnci kaynaklı kayıplar (P_{dc}), sargı iletkenlerinde eddy akımları nedeniyle oluşan kayıplar (P_{eddy}), deri etkisi sebebiyle iletkenlerde meydana gelen güç kayıpları (P_{skin}) ve transformatörlerin devre tutucuları ve kazan duvarları gibi metal yapısal bileşenlerinde oluşan güç kayıplarından (P_{stray}) meydana gelmektedir.

$$P_{yük} = P_{dc} + P_{eddy} + P_{skin} + P_{stray} \tag{1}$$

Transformatör sargısını oluşturan iletkenin DC direnç değeri;

$$R_{dc} = \frac{l}{\sigma S} \tag{2}$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada; l sargı iletkeninin toplam uzunluğunu, σ sargı iletkenini oluşturan malzemenin elektriksel iletkenliğini, S ise iletkenin kesit alanını ifade etmektedir.

DC direnç değeri kullanılarak sargıda meydana gelen güç kaybı ise;

$$P_{dc} = I^2 R_{dc} \tag{3}$$

biçiminde hesaplanır. Burada I iletkenden akan akımın etkin değeridir.

Transformatörde sargıyı oluşturan iletkenden alternatif akım akması sonucunda meydana gelen deri etkisi (skin effect) sebebiyle akım iletken kesitinin iletkenin yüzeyine yakın kısımlarında yoğunlaşır. İletkenin dış yüzeyindeki deri kalınlığı,

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu}} \sqrt{\sqrt{1 + (\rho 2\pi f \varepsilon)^2} + \rho 2\pi f \epsilon} \tag{4}$$

olarak yazılır. Burada; ρ iletkenin özdirencini, f iletkenin maruz kaldığı frekans değerini , μ iletkenin manyetik geçirgenlik değerini, ε iletkenin elektriksel geçirgenlik değerini ifade etmektedir.

Transformatörün yüklü çalışması durumunda meydana gelen kaçak akı ile ilişkili manyetik alanlar sargı iletkenlerine de nüfuz ederek eddy akımlarının ve buna bağlı olarak iletkende eddy kayıplarının oluşmasını sağlar. Bu eddy kayıpları da iletkenin etkin direnç değerinin artmasına sebep olur.

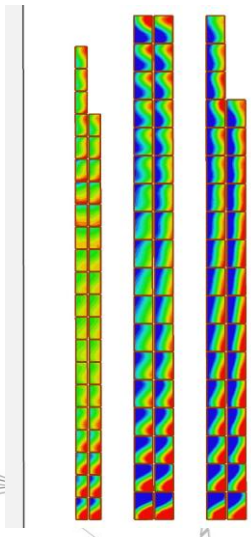
Yukarıda sayılan tüm bu faktörler sebebiyle, transformatör sargılarını oluşturan iletkenlerden akan alternatif akımın neticesinde sargının AC direnç değeri,

$$R_{ac} = R_{dc} + R_{skin} + R_{eddy} \tag{5}$$

olarak yazılır. Bunun sonucunda;

$$P_{dc} + P_{skin} + P_{eddy} = I^2 R_{ac} \tag{6}$$

eşitliği ifade edilir.



Şekil 1.
Transformatör sargısının iletkenlerinde benzetim yoluyla elde edilen akım yoğunluklarının gösterimi

Şekil 1'de örnek bir sargı yapısı için sargı iletkenleri üzerinde oluşan akım dağılımları gösterilmektedir. Burada akım yoğunluğu değerinin aynı iletken üzerinde bulunan farklı noktalarda dahi değiştiği görülmektedir. Buna bağlı olarak bölgesel güç kayıpları yükselmektedir. Bu kapsamda; nüvede oluşan kaçak akının miktarı, yüklenme durumu, akımın harmonik içeriği ve güç kalitesi parametreleri, iletkenlerin en/boy oranları ve sargının paralel iletkenlerden oluşması durumunda bu iletkenler arasında transpozisyon uygulanması durumu gibi gibi faktörler iletkenlerde meydana gelen akım dağılımını ve güç kayıplarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Transformatörün yüklü çalışması durumunda meydana gelen kaçak akı ile ilişkili manyetik alanlar sadece sargı iletkenlerini etkilemekle kalmayıp aynı zamanda transformatörün yapısındaki diğer metalik bileşenleri de etkiler. Bunun sonucunda, bu metalik bileşenlerde ortaya çıkan güç kayıpları stray kayıpları olarak ifade edilir.

Kaçak akının metalik bileşenler üzerinde etki edeceği yüzey derinliği,

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}} \tag{7}$$

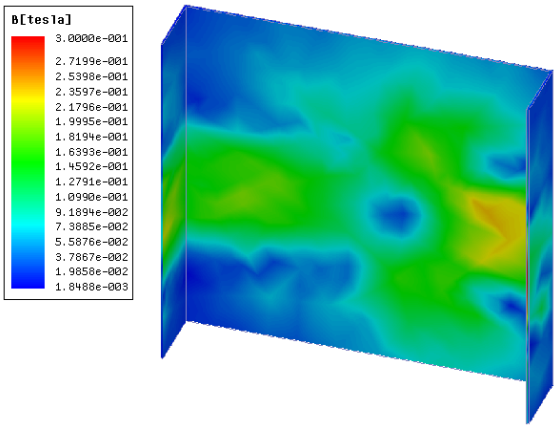
eşitliği ile hesaplanır. Burada; μ_r metalik bileşenin imalatında kullanılan malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, σ elektriksel iletkenlik ve ω açısal frekanstır.

Meydana gelen güç kayıpları ise,

$$P = \int\int_S \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}\frac{{\mu_0}^2}{2}ds \tag{8}$$

olarak elde edilir.

Transformatörü oluşturan metalik bileşenler arasında güç kayıplarının en fazla meydana geldiği bileşen kazan duvarlarıdır. Şekil 2'te, bir transformatörün kazan duvarlarında meydana gelen ve sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla gerçekleştirilen analiz çalışması yardımıyla elde edilmiş olan akı yoğunluğu dağılımı verilmektedir.



Şekil 2. Transformatörün kazan duvarları üzerinde meydana gelen akı yoğunluğunun dağılımı

Metal bileşenlerin elektromanyetik özellikleri göz önünde tutulduğunda meydana gelen güç kayıplarının sayısal olarak hesaplanmasının kolay olmadığı görülmektedir. Bu sebeple, oluşturulan üç boyutlu modeller ve sonlu elemanlar analizi gibi matematiksel yöntemler bu kayıpların hesaplanabilmesinde kolaylıklar sağlamaktadır.

Bu kayıpların büyüklüğü sargı yapısı, yapısal bileşenler ile sargılar arasındaki uzaklık, yapısal bileşenlerin imal edildiği metal malzemenin elektromanyetik özellikleri gibi birçok parametreye bağlıdır. Uygulamada kazan kayıplarının azaltılması amacıyla manyetik şönt eleman uygulaması başta olmak üzere uygulanan yöntemler büyük önem kazanmaktadır.