

Transformatörlerde Nüve Kayıpları

Özet

Transformatörlerin çalışması esnasında meydana gelen güç kayıpları boşa çalışma kayıpları ile yükte çalışma kayıplarının toplamı olarak ifade edilmektedir. Yük akımının karesi ile doğru orantılı olarak değişen yükte çalışma kayıplarının aksine boşa çalışma kayıpları yükten bağımsız olarak ve transformatörün enerjili olduğu süre boyunca meydana gelmektedir. Bu durum boşa çalışma kayıplarının azaltılması yönündeki çalışmaların önemini ortaya koymaktadır.



Transformatörler enerji şebekesinde önemli görev üstlenen bileşenlerden biridir. Anma yükünde %98-99 düzeyinde verim değeri ile çalışmasına karşın yüz binlerle ifade edilen sayıları sebebiyle transformatörler şebekede meydana gelen güç kayıplarının üçte birini oluşturmaktadır. Bu oran transformatörleri kayıplara neden olan ikinci büyük bileşen haline getirmektedir.

Transformatörlerin çalışması esnasında meydana gelen güç kayıpları boşa çalışma kayıpları ile yükte çalışma kayıplarının toplamı olarak ifade edilmektedir. Yük akımının karesi ile doğru orantılı olarak değişen yükte çalışma kayıplarının aksine boşa çalışma kayıpları yükten bağımsız olarak ve transformatörün enerjili olduğu süre boyunca meydana gelmektedir. Bu durum boşa çalışma kayıplarının azaltılması yönündeki çalışmaların önemini ortaya koymaktadır.

Bir transformatörün temel tasarım parametreleri arasındaki ilişki,

$$E = 4.44 N B_m f A \quad (1)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikte; B_m maksimum akı yoğunluğu, N sarım sayısı, f frekans ve A nüve kesit alanını tanımlamaktadır. Buna göre, sarım sayısının sabit olması durumunda nüve kesit alanı ile akı yoğunluğu ters orantılı olarak değişmektedir.

Sinüs formunda uyarma durumunda nüve kayıpları,

$$P_{toplam} = P_h + P_e + P_i \quad (2)$$

biçiminde yazılmaktadır. Eşitliğin sağ tarafındaki üç parametre sırasıyla histeresis kaybı, eddy akımı kaybı ve ilave kayıpları temsil etmektedir. Bu parametrelerin her biri nüve indüksiyonu ve frekansa bağlı bir fonksiyon şeklinde ifade edilmektedir.

$$P_h = k_h f B^n \quad (3)$$

$$P_e = k_e f^2 B^2 \quad (4)$$

$$P_i = k_i f^{1.5} B^{1.5} \quad (5)$$

Bu eşitliklerde k_h histeresis kaybı katsayısı, k_e eddy kaybı katsayısı ve k_i ilave kayıp katsayısıdır. Burada n Steinmetz katsayısı olarak adlandırılmakta olup literatürde 1,6 ile 2 arasında kabul edilmektedir. Literatürde yer alan araştırmalar nüve indüksiyonunda meydana gelen %1 oranında artışın güç kayıplarının yaklaşık %2 oranında artmasına sebep olduğunu ortaya koymaktadır.

Histeresis kaybı, eddy kaybı ve ilave kayıp katsayıları sırasıyla

$$k_h = \frac{\pi H_{irr}}{\rho B_p} \quad (6)$$

$$k_e = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6\rho} \quad (7)$$

$$k_i = 7.87 \sqrt{\sigma G V_0 S} \quad (8)$$

olarak yazılmaktadır. Bu eşitliklerde H_{irr} malzemenin histeresis eğrisinde $B=0$ noktasına karşılık gelen pozitif alan şiddeti değeri, σ is elektriksel iletkenlik, d is laminasyon kalınlığı, ρ malzemenin kütle yoğunluğu, S laminasyon kesit alanı, G bir sabit değer ve V_0 malzemenin mikro yapısına bağlı olarak yazılan bir başka sabit değerdir.

Eşitlik (3)-(8)'de gösterildiği üzere, nüve kayıpları nüve üretiminde kullanılan malzemenin fiziksel ve elektromanyetik özelliklerinin yanı sıra frekans ve indüksiyon değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple, transformatörlerde nüve kayıplarını azaltmak için nüve üretiminde kullanılan malzemenin özelliklerinin yanı sıra transformatörün tasarım büyüklükleri de önem taşımaktadır.

Güç ve dağıtım transformatörlerinin nüve imalatında en yaygın şekilde kullanılan malzemeler M grubu olarak adlandırılan yönlendirilmiş nüve malzemeleridir. AISI (American Iron and Steel Institute)'e göre M2, M3, M4, M5 ve M6 olarak sınıflandırılan bu malzemelerde yer alan sayısal ifade kayıp düzeyini göstermektedir. H grubu malzemeler (H0, H1, H2) ise M grubu malzemelere göre daha yüksek permeabilite değerine sahiptir ve daha düşük kayıp değerleri sunar. H grubu malzeme kullanımı ile M grubuna kıyasla %10'a kadar daha düşük kayıp değerleri elde etmek mümkündür. H-DR grubu malzemeler (H0-DR, H1-DR, H2-DR) ise H grubu malzemelere lazer işlemleri uygulanarak hücresel yapılarının iyileştirilmesi ile üretilir. Bu sayede eddy kayıplarının azaltılması sağlanır. Aşağıdaki tablolarda 50Hz frekansta ve 1,5T indüksiyon değeri için M, H ve H0 grubu malzemelerin kayıp yoğunlukları gösterilmektedir. Literatürdeki araştırmalar daha ince laminasyon kullanımı ve lazer uygulamasıyla beraber elektromanyetik özellikleri iyileştirilmiş malzeme kullanımının nüve kayıplarını %35'e varan oranda azaltılabildiğini göstermektedir.

Tablo 1.
M grubu nüve malzemeleri için laminasyon kalınlığı ve kayıp yoğunluğu değerleri

Malzeme tipi	M2	M3	M4	M5	M6
Laminasyon kalınlığı (mm)	0,18	0,23	0,27	0,30	0,35
Kayıp yoğunluğu (W/kg)	0,64816	0,67021	0,77383	0,86201	0,96783

Tablo 2.
H grubu nüve malzemeleri için laminasyon kalınlığı ve kayıp yoğunluğu değerleri

Malzeme tipi	H0	H1	H2
Laminasyon kalınlığı (mm)	0,23	0,27	0,30
Kayıp yoğunluğu (W/kg)	0,60400	0,69800	0,73700

Tablo 3.
H-DR grubu nüve malzemeleri için laminasyon kalınlığı ve kayıp yoğunluğu değerleri

Malzeme tipi	H0-DR	H1-DR	H2-DR
Laminasyon kalınlığı (mm)	0,23	0,27	0,30
Kayıp yoğunluğu (W/kg)	0,56500	0,64900	0,70200

Bunun yanı sıra, nüve tasarımının iyileştirilmesi, özellikle nüveyi oluşturan laminasyonların uygun boyutlarda kesimi ve bir araya getirilmesinde daha gelişmiş nüve üretim yöntemlerinin kullanımı da nüve kayıplarının azalmasını sağlamaktadır.

Geleneksel yöntem ile transformatör nüve yapısı yönlendirme doğrultusunda kesimi yapılan laminasyonların step-lap olarak adlandırılan yöntem ile dizilerek bir araya getirilmesi ile üretilmektedir. Bu yöntem ile nüve üzerindeki akı yolu bir fazlı çekirdek tip transformatörlerde dört kez, üç fazlı transformatör nüve yapısında ise sekiz kez kesintiye uğramaktadır. Bu birleşim bölgelerinde manyetik akı en yakın komşu laminasyon üzerine yönelerek bu kısımlarda manyetik akı yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Bu durum da eşitlik (3)-(8)'e göre kayıp değerlerinin artmasına neden olmaktadır.

Sarılı nüve yapısı bu noktada dizili nüve yapısına göre üstünlük göstermektedir. Şekil 1(a)'da gösterilen sarıli nüve yapısında nüve malzemesi kesintisiz bir şekilde sarılarak nüve oluşturulmaktadır. Bu yapıda laminasyon birleşim bölgeleri olmadığından dolayı lokal akı yığılmaları ve buna bağlı kayıp artışları en düşük seviyededir. Buna karşın, nüve boyutunun artması ile birlikte bu yapının üretimi zor hale gelmektedir. Bu sebeple laminasyon birleşim bölgelerinin daha az sayıda olduğu sarıli nüvelerin üretimi gerçekleştirilmektedir. Şekil 1(b)'de nüvenin sadece sol bacağına, Şekil 1(c)'de ise her iki bacağına birleşim bölgelerinin olduğu tasarımlar görülmektedir.

Şekil 2'de ise bu üç nüve yapısı için nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları verilmektedir. Burada laminasyon birleşim bölgelerinde lokal olarak akı yoğunluğu değerinin yükseldiği görülmektedir. Bu artış, birleşim bölgelerinin sayısına, nüve üzerindeki yerleşimine ve akı yoğunluğu değerine bağlı olarak nüve kayıplarının önemli düzeyde artışı ile sonuçlanmaktadır.

Tüm bu sebeplerle, EN 50708 başta olmak üzere ilgili uluslararası standart ve ulusal düzenlemelerde belirtilen kriterlere uygun transformatör üretimi için tasarım aşamasında tasarım parametreleri ve nüve malzemesi seçiminin dikkatle gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



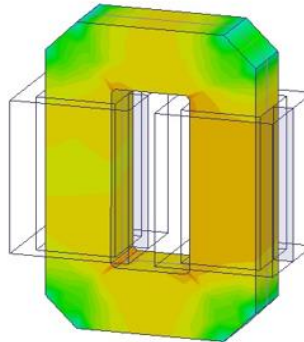
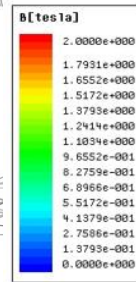
(a)



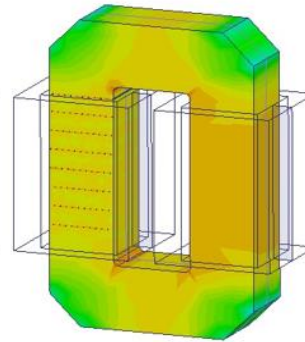
(b)



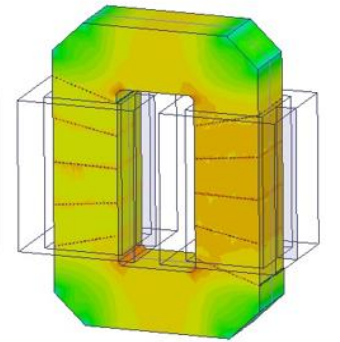
(c)



(a)



(b)



(c)