

2. TRANSFORMATÖRLER

2.1 Temel Bilgiler

Transformatörlerde hareket olmadığından dolayı sürtünme ve rüzgar kayıpları mevcut değildir. Dolayısıyla transformatörler, verimi en yüksek (%99 - %99.5) olan elektrik makineleridir.

Transformatörler, demir çekirdek (nüve) üzerine sarılmış, birbirlerine ve toprağa göre izole edilmiş iki sargı grubundan oluşurlar. Bu sargılardan uyarılan sargıya *primer sargı*, diğer sargıya da *sekonder sargı* denmektedir. Çekirdeğin sargıları üzerinde taşıyan kısmına *bacak* ve bunları alt ve üst kısımda birleştiren parçalara *alt ve üst boyunduruk* denilmektedir. Ayrıca gerilimlerine göre gerilimi küçük olan sargı *alçak (alt) gerilim sargısı*, gerilimi büyük olan sargı ise *yüksek (üst) gerilim sargısı* olarak isimlendirilmektedir. Primer gerilimi sekonder gerilimden büyükse bu çeşit transformatör *düşürücü veya alçaltıcı transformatör*, primer gerilimi sekonder geriliminden küçükse bu çeşit transformatörler de *yükseltici transformatör* olarak isimlendirilirler.

Transformatörlerde çekirdek iyice sıkıştırılmış ince, silisyumlu veya hipersil ismi verilen %3 ila 3,5 silisyum içeren, çelik saçlardan yapılarak histerezis kayıpları azaltılır. Soğutma amacıyla sargılar ile bacaklar arasında kanallar bırakılır.

2.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması

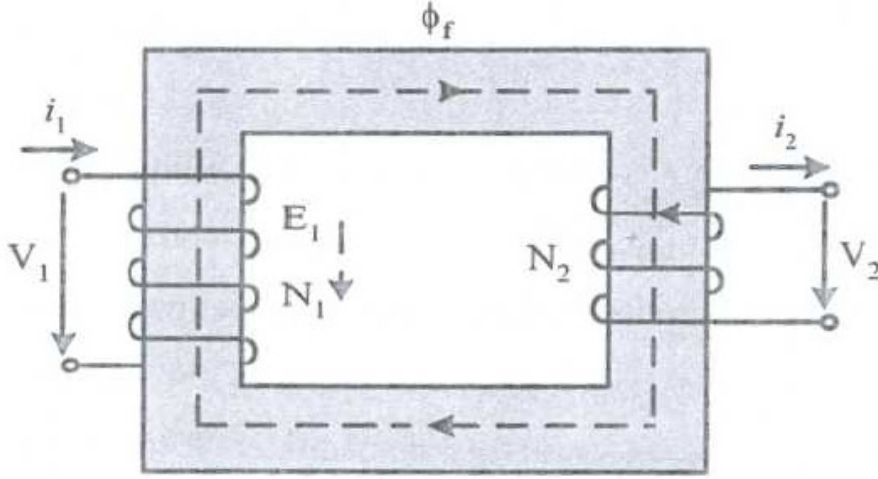
Transformatörler faz sayısına göre tek, üç veya çok fazlı transformatörler olarak sınıflandırılabilir gibi, nüvenin yapısına göre de çekirdek tipi, mantel tipi ve spiral çekirdek tipi olarak sınıflandırılabilirler. Çekirdek tipi transformatörlerde sargılar manyetik devreyi çevreleyecek şekilde, primer ve sekonder sargıların yarısı farklı iki bacak üzerine sarılır. Mantel tipi transformatörlerde ise alt ve üst gerilim sargılarının tamamı orta bacağına sarılmakta ve sağ sol bacaklar boş bırakılmaktadır.

Transformatörler ister bir, ister üç fazlı olsun izolasyon nedeniyle alçak gerilim sargısı çekirdek üzerine, yüksek gerilim sargısı ise alçak gerilim sargısının üstüne yerleştirilirler. Her iki sargı arasında bırakılan boşluk soğutma amacı içindir. Üç Fazlı transformatörlerde üzerinde aralarında 120^0 'lik faz farkı olan sargılar bulunur. Bazen üç fazlı transformatör yerine üç adet bir fazlı transformatör de kullanılır. Bir fazlı üç adet transformatör kullanımının en büyük avantajı faz sargılarından birinde bir arıza olduğunda yalnız o transformatörün onarılacak için devre dışı bırakılması diğer ikisinin çalışmasına devam etmesidir. Ancak bu avantajlara rağmen pahalıya mal olması ve fazla materyal gerektirmesi bu yöntemin dezavantajlarıdır. Gerek sargı şeklinin gerekse nüve yapısının seçiminde önemli konulardan birisi de transformatördeki demir ve bakır kayıplarının azaltılmasıdır.

Transformatörlerde soğutma amacıyla hava, su veya yağ kullanılır. Dolayısıyla soğutma malzemelerine göre de transformatörler üç grupta toplanabilir. Küçük transformatörlerde soğutma aracı olarak hava kullanılır. Büyük güçlü trafolar ise genellikle yağ kullanılır ve bu yağın izolasyonunu koruması kısa devrelerin oluşmaması açısından son derece önemlidir.

2.3 Bir Fazlı Transformatorün Kayıplarının Dikkate Alınmadan İncelenmesi

Bir iletkende e.m.k endüklenebilmesi için o iletkenin değişen bir manyetik alan içinde bulundurulması gerekliliği transformatorlerin çalışma prensibini oluşturmaktadır. Şekil 2.2 'deki transformatorde değişen manyetik alan içerisinde endüklenen e.m.k'ı Lenz kanununa göre,



Şekil 2.2 Çekirdek Tipi Bir Fazlı Transformator

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad 2.1$$

olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.2 'den de görüldüğü gibi teorik incelemede primer ve sekonder sargılar ayrı bacaklar üzerine yerleştirilmiş olup böylece iki devre oluşturulmuştur. Ancak bu iki devre arasında elektriksel bir bağlantı olmayıp, endüksiyon yolu ile oluşan manyetik bir bağlantı vardır. Transformatorün çalışması için primer sargıya $v_1(t)$ alternatif gerilimi uygulandığında, bu gerilim primer sargıdan $i_1(t)$ akımının geçmesine neden olacaktır. Geçen bu $i_1(t)$ akımı çekirdek üzerinden devresini tamamlayan Φ akısını oluşturur ki bu akı sekonder sargıda $e_2(t)$ gerilimini endüklemektedir. Sekonder tarafta bir yük olduğu takdirde endüklenen $e_2(t)$ geriliminin oluşturacağı $i_2(t)$ akımı, dolayısı ile $v_2(t)$ gerilimi sekonder sargıya ve yüke uygulanmış olunur.

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \quad 2.2$$

Ayrıca sinüzoidal olarak değişen akım ve gerilimlerin efektif değerleri dikkate alındığında;

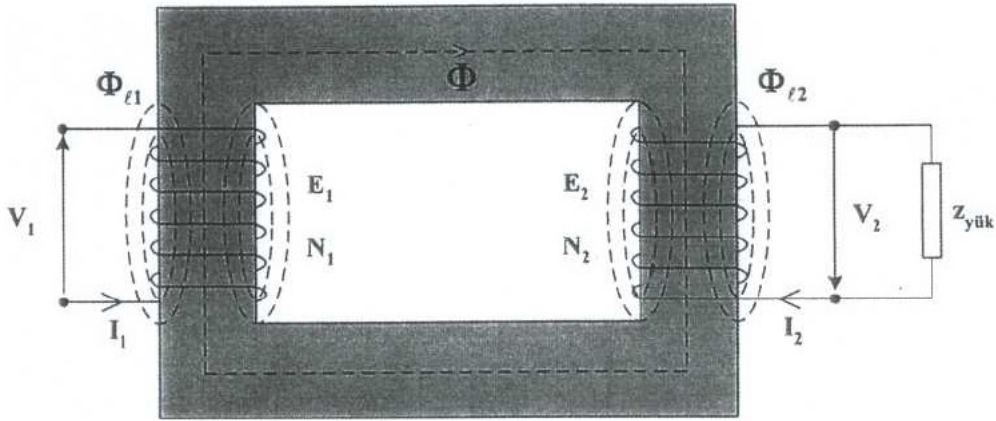
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad 2.3$$

ifadesi ile transformatorlerin 'a' ile ifade edilen dönüştürme oranı bulunmuş olunur. Sonuç olarak; transformatorde uçlardaki gerilimlerin oranı, endüklenen gerilimlerin ve sarım

sayılarının oranlarıyla doğru, akımların oranlarıyla ters orantılıdır ki bu da dönüştürme (transformasyon) oranı olarak tanımlanır.

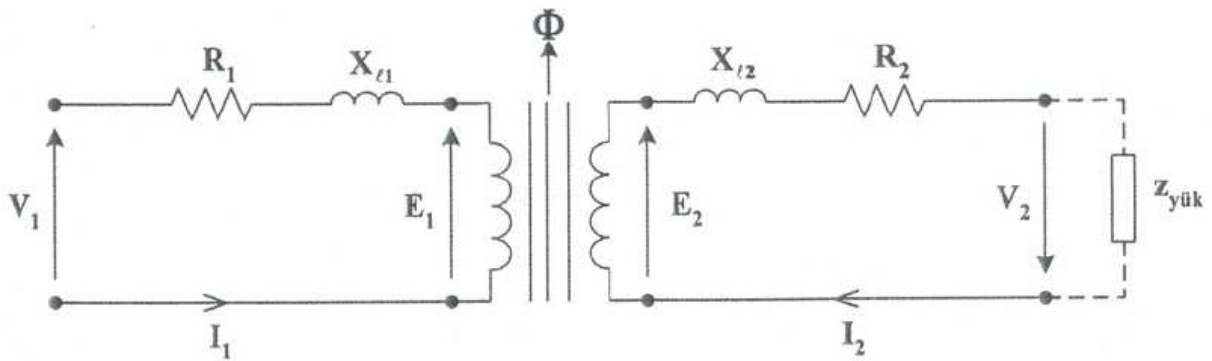
2.4 Bir Fazlı Transformatörlerin Kayıplarının Dikkate Alınarak İncelenmesi

Manyetik bir devrede meydana gelen manyetik akının tamamının devreden geçmesi istenir. Ancak manyetik kuvvet çizgileri, manyetik devrenin relüktansı büyürse (yükli çalışma halinde) veya daha kısa bir yol bulursa, manyetik devreden ayrılarak daha kısa yoldan devrelerini tamamlarlar. Manyetik yoldan ayrılarak, devrelerini bacakların iç ve dış kısmından tamamlayan bu akılara kaçak manyetik akılar denir. Şekil 2.3 tüm akı çizgilerini gösteren bir fazlı transformatör devresini göstermektedir.



Şekil 2.3 Transformatörde Akı Çizgileri

Şekil 2.4 'de ise transformatörün yüklü çalışması halinde devre şeması çizilmiştir. Buradaki iç gerilim düşümleri; ideal bir transformatörün primer ve sekonder devrelerindeki omik dirençler ile bunlara seri bağlı kaçak reaktanslar üzerinde oluşur.



Şekil 2.4 Transformatörün Yüklü Çalışmasında Eşdeğer Devre

Transformatörlerde endüklenen e.m.k'ler denklem 2.4 ve 2.5 'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$E_1 = 4.44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi \cdot 10^{-8} \quad 2.4$$

$$E_2 = 4.44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \phi \cdot 10^{-8} \quad 2.5$$

2.5 Transformatörde Eşdeğer Devrenin İndirgenmesi

Bilindiği üzere transformatörlerde sekonder ve primer devreler arasında fiziksel bir bağlantı mevcut değildir. Transformatörler ile ilgili analizler yapılırken hesap ve gösterim kolaylığı açısından sekonder ve primerdeki büyüklüklerin bir tarafta toplanması sıkça uygulanan bir yöntemdir. Bu durum transformatörlerde indirgenme işlemi olarak isimlendirilir ve dönüştürme oranı 'a' kullanılarak gerçekleştirilir. Her iki taraftaki büyüklüklerin dönüştürülmesi mümkünse de uygulamada genellikle sekonder sargı, primer sargıya indirgenir ve indirgenmiş değerler (') işaretiyle gösterilirler. Aşağıda sekonder büyüklüklerin primere indirgenmesi için kullanılan ifadeler yer almaktadır.

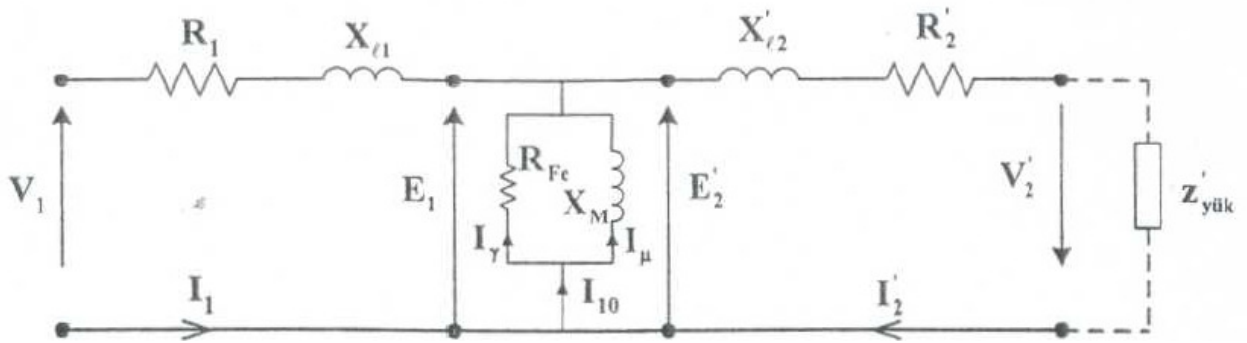
$$E_2' = aE_2 \quad V_2' = aV_2$$

$$N_2' = aN_2 \quad R_2' = a^2 \cdot R_2$$

$$X_{l2}' = a^2 X_{l2} \quad I_2' = I_2 / a$$

2.6 Transformatörün Tam Eşdeğer Devresi ve Analizi

Şekil 2.4 'de bu transformatöre ait iki bobinin (primer ve sekonder) iç direnç ve kaçak reaktanslarını temsil eden fakat arada elektriksel bağlantısı olmayan devresi verilmişti. Gerilimleri ve parametreleri birbirinden farklı olan bu iki devrede çözüme ulaşabilmek için, iki devre için ayrı ayrı hesap yapmak gerekir. Halbuki eğer devreler endüklenen emk'ların uçlarında birleştirilebilirlerse, meydana gelecek tek devre ile istenilen çözüme ulaşmak mümkün olur. Şekil 2.5 'te böyle bir eşdeğer devre görülmektedir. Tam eşdeğer devre olarak isimlendirilen bu eşdeğer devrede, sekonder büyüklükler primere indirgenerek indisli (') olarak gösterilmiş ve demir kayıpları da temsil edilmiştir.



Şekil 2.5 Sekonderin Primere İndirgenildiği Tam Eşdeğer Devre

Demir kayıplarını temsil etmek için kullanılacak direncin iki ucunda var olacak potansiyel farkı, endüklenen emk'ya eşit olmalıdır. Bu nedenle demir kaybını temsil edecek R_{fe}

direncinin, eşdeğer devrede ortada olması gerekir. Diğer taraftan transformatörde mıknatıslanmayı sağlayan manyetik akının endüktansla temsil edilmesi mümkündür. Ayrıca endüktans açısız frekansla çarpılarak “mıknatıslanma reaktansı” adını alır ve tam eşdeğer devrede X_M indisi ile gösterilirler. Bunun dışında akımların tanımları aşağıdaki gibidir:

I_1 :Şebekeden çekilen akım

I_2 :Yüke giden veya yükün çektiği akım

I_{10} :Boşta çalışma akımı

I_γ :Boşta çalışma akımı demir kayıplarını karşılayan bileşeni

I_μ :Boşta çalışma akımı mıknatıslanma bileşeni

Boşta çalışması kayıpları anma kayıplarının %25-30’u mertebesindedir. Demir kayıpları boşta çalışma kayıpları arasında en büyük yeri tutar. $\varphi_0 = \delta + \psi_0$ ifadesinde, uygulanan V_1 gerilimi ile endüklenen E_1 gerilimi arasındaki δ açısının çok küçük olmasından dolayı ihmal edilmesi halinde $\varphi_0 \cong \psi_0$ olur. Yani boşta çalışma güç faktörünün açısı, sonuca kolay ulaşabilmek için demir açısına eşit alınabilir.

Boşta çalışmada yapılan ölçümler yardımıyla eşdeğer devre parametrelerinden R_{fe} , X_M , I_μ ve I_γ değerleri hesaplanır. Transformatörlerin boşta çalışmasında $P_0=P_{fe}$ olduğundan, aşağıda verilen denklemler yardımıyla yukarıda bahsedilen parametreler hesaplanabilir.

$$R_{fe} = \frac{P_0}{I_\mu^2} \quad 2.6$$

$$I_\mu = I_{10} \sin\varphi_0 \quad 2.7$$

$$I_\gamma = I_{10} \cos\varphi_0 \quad 2.8$$

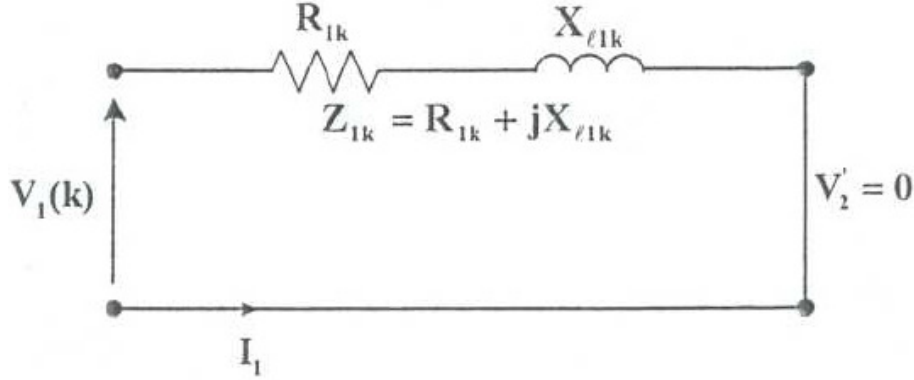
$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{V_1 \cdot I_{10}} \quad 2.9$$

$$\sin\varphi_0 = \frac{Q_0}{V_1 \cdot I_{10}} \quad 2.10$$

$$X_M = \frac{Q_0}{I_\mu^2} \quad 2.11$$

$$I_{10} = \sqrt{I_\mu^2 + I_\gamma^2} \quad 2.12$$

Transformatörün T eşdeğer devresinde sekondere bağlı olduğu varsayılan yük empedansının sıfır olması ($Z_y = 0$), transformatörün kısa devre edilmesi demektir. $Z_y = 0$ ise, çıkış gerilimi, yani yük uçlarında primere indirgenmiş gerilim $V_2' = 0$ olur. Şekil 2.6 'da kısa devre edilen bir transformatörün eşdeğer devresi gösterilmektedir. Kısa devre çalışmada nominal gerilim ve nominal akım uygulanması şeklinde iki farklı çalışma mevcuttur. İlkinde primere V_1 gerilimi uygulandığında akan akıma "kısa devre akımı" denir ve denklem 2.13 ile gösterilir.



Şekil 2.6 Transformatör Kısa Devre Eşdeğer Devresi

$$I_k = \frac{V_1}{Z_{1k}} \quad 2.13$$

Kısa devre akımı olarak tanımlanan bu akımın genliği anma akımından çok büyüktür ve sargılarda meydana getireceği aşırı joule kaybından dolayı çok fazla ısınmaya ve neticede çok kısa sürede sargının kavrularak yanmasına neden olur.

Bu nedenle kısa devre deneyini transformatöre zarar vermeden yapmak için ikinci uygulama daha yaygındır. Bu uygulamada kısa devre akımı, sargıların zarar görmeyeceği nominal akım değeri ile sınırlandırılmaktadır. Bu sebeple kısa devre çalışmada transformatörün primerine uygulanana gerilim ayarlanarak, akan akımın anma akımından büyük olmamasına dikkat edilir. Bu ayarlanan gerilim V_k ile gösterilir kısa devre akımı ise I_1 'dir.

$$V_k = I_1 \cdot Z_{1k} \quad 2.14$$

Kısa devre esnasında primer tarafta bağlı bir wattmetre ile ölçülen güce kısa devre gücü denilir ve pratikte transformatörün çalışma akımındaki toplam bakır kayıplarını gösterir. sekonder empedanslarının toplamı olan Z_{1k} 'ya "kısa devre empedansı", R_{1k} kısa devre direnci ve X_{l1k} denir ve aşağıda verildiği gibi hesaplanırlar.

$$R_{1k} = \frac{P_{cu}}{I_1^2} \quad 2.15$$

$$Z_{1k} = R_{1k} + jX_{l1k} \quad 2.16$$

$$X_{l1k} = \sqrt{Z_{1k}^2 - R_{1k}^2} \quad 2.17$$

2.7 Transformatörlerde Güç ve Verim

Elektrik makinelerinde güç ve verim konusu incelenirken, makinelerde meydana gelen kayıplar göz ardı edilemez bir gerçektir. Transformatörlerde hareket eden parçanın olmayışı kayıpları azaltan, verimi ise yükselten bir husustur. Kayıplar bakır ve demir kayıplarından oluşmaktadır.

Bakır kayıpları transformatörün primer ve sekonder sargı dirençlerinde ortaya çıkan ısı kayıplardır. Demir kayıpları ise Histerisiz ve Fukolt (Girdap) kayıpları olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Histerisiz kayıpları daha öncede açıklandığı gibi alternatif akımın her bir periyotundaki değişim nedeni ile çekirdekdeki parçacıkların tekrar dizilişi ile ilgilidir. Fukolt kayıpları ise değişken manyetik alanda çekirdek üzerinde akımlar oluşması ve bu akımların ısı kayıplar oluşturması neticesinde meydana gelirler. Yukarıda da bahsedildiği üzere transformatörün boşa çalışması ile demir kayıpları, kısa devre çalışması ile de bakır kayıpları belirlenebilmektedir.

İş yapan gücün ve enerji dönüşümünü sağlayan gücün aktif güç olmasından dolayı transformatöre giren ve transformatörden çıkan aktif güçler arasındaki orana “verim” denir. “ η ” ile gösterilir ve yüzde olarak ifade edilir.

$$\eta = \frac{P_{\phi}}{P_g} \cdot 100 \quad 2.18$$

P_g : Transformatörün şebekeden çektiği giriş gücü

P_{ϕ} : Transformatörün şebekeye verdiği çıkış (etiket) gücü

P_k : Kayıp güç

$$P_g = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1 \quad 2.19$$

$$P_{\phi} = V_2' \cdot I_2' \cdot \cos \phi_2 \quad 2.20$$

$$\eta = \frac{V_2' I_2' \cos \phi_2}{V_2' I_2' \cos \phi_2 + P_k} \quad 2.21$$

$$\eta = \frac{S \cos \phi_2}{S \cos \phi_2 + P_k} \quad 2.22$$

Verim ifadeleri denklem 2.21 ve 2.22 ‘de verildiği gibi de yazılabilir. Plakada verilen görünür güç değeri (S), sadece transformatörden çekilebilecek gücü gösterir.

2.8 Çözümlü Örnekler

1) 2300/230 V bir fazlı 500 kVA gücünde bir transformatörün sekonder reaktansı $X_{\ell_2} = 0.006 \Omega$ direnci $R_2 = 0.002 \Omega$ 'dur.

a) E_2 elektromotor kuvvetini

b) Nominal akımda $\cos \varphi_2 = 0.8$ endüktif yük için E_2 elektromotor kuvvetini bulunuz.

ÇÖZÜM:

$$\begin{aligned} \text{a) } \vec{E}_2 &= U_2 + I_2 \cdot R_2 + jI_2 \cdot X_{\ell_2} & I_2 &= 500 / U_2 \\ &= 230 + I_2 \cdot 0,002 + j I_2 \cdot 0,006 & I_2 &= 500.000 / 230 \\ & & I_2 &= 2174 \text{ A.} \\ E_2 &= 230 + 2174 \cdot 0,002 + j 2174 \cdot 0,006 \\ &= 234.7 \text{ Volt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } E_2 &= U_2 \cdot \cos \varphi + R_2 \cdot I_2 + j (U_2 \cdot \sin \varphi + I_2 \cdot X_{\ell_2}) \\ &= 230 \cdot 0,8 + 2174 \cdot 0,002 + j (230 \cdot 0,6 + I_2 \cdot 0,006) \\ &= 241.43 \text{ Volt} \end{aligned}$$

2) 10 kVA gücünde 4800/240 V'luk bir fazlı transformatörün sekonder tarafı kısa devre edilerek nominal akımda kısa devre deneyine tabi tutulduğunda $U_k = 180V$, $P_k = 180W$ değerleri elde ediliyor. Miknatıslanma akımının ihmal edilmesi durumunda transformatörün

a) Kısa devre direnci ve reaktansını

b) Başta çalışmadaki kayıp $P_60 W$ $\cos \varphi = 0.9$ iken kayıplarını ve verimini hesaplayınız.

ÇÖZÜM:

$$\begin{aligned} \text{a) } I_k &= I_1 = \frac{10000}{4800} = 2.083 \text{ A} \\ R_k &= \frac{P_k}{I_k^2} = 41.47 \Omega \\ Z_k &= R_k + jX_k \Rightarrow Z_k = \frac{U_k}{I_k} = 86.41 \Omega \\ \cos \varphi_k &= \frac{R_k}{Z_k} \Rightarrow \varphi_k = 61.32^\circ \end{aligned}$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin 61.32 = 75.8 \Omega$$

$$\text{b) } P_{fe} = 60W \quad P_{cu} = 180W \quad I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{10000}{240}$$

$$I_2 = 41.66A$$

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi}{U_2 \cdot I_2 \cos \varphi + P_{fe} + P_{cu}}$$

$$\eta = \frac{240 \cdot 41,66 \cdot 0,9}{240 \cdot 41,66 \cdot 0,9 + 60 + 180} = \%97.4$$

- 3) 30 kVA gücünde 10/0.525 kV'luk bir transformatörde $R_1=43,2$, $R_2 = 0,12\Omega$
 $X_{\ell 1} = 46.9\Omega$ ve $X_{\ell 2} = 0,125\Omega$ 'dur.

a) Mıknatıslanma akımının ihmal edilmesi ve sekonderin primere indirgenmesi halinde eşdeğer devreyi çizerek parametreleri hesaplayınız.

b) Sekonderine $Z_{yük} = 8,85 \Omega$ ve $\cos \varphi = 0,8$ olan bir yük bağlandığında sekonder akımını hesaplayınız.

ÇÖZÜM:

$$\text{a) } a = \frac{10000}{525} = 19,05 \quad a^2 = 19,05^2 = 362,8$$

$$R_2' = R_2 \cdot a = 0,12 \cdot 362,8 = 43,5 \Omega$$

$$X_{\ell 2}' = X_{\ell 2} \cdot a^2 = 0,125 \cdot 362,8 = 45,4 \Omega$$

$$\text{b) } R_{yük} = Z_{yük} \cdot \cos \varphi = 8,85 \cdot 0,8 = 7,07$$

$$X_{yük} = Z_{yük} \cdot \sin \varphi = 8,85 \cdot 0,6 = 5,31 \Omega$$

$$I_1 = I_2' = \frac{10000}{R_1 + R_2' + R_{yük} + j(X_{\ell 1} + X_{\ell 2}' + X_{yük})}$$

$$R_{yük}' = R_{yük} \cdot a^2 = 7,07 \cdot 362,8 = 2565 \Omega$$

$$X'_{y\ddot{u}k} = X_{y\ddot{u}k} \cdot a^2 = 8,85 \cdot 362,8 = 1925 \Omega$$

$$I_1 = I_2' = \frac{10000}{43,2 + 45,5 + 2565 + j(1925 + 45,4 + 46,9)}$$

$$= 1,73 \text{ A}$$

$$I_2 = I_2' \cdot a = 1,73 \cdot 19,05 = 33,05 \text{ A}$$