

ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRLERİN FARKLI BAĞLANTI ŞEKİLLERİNDE HARMONİKLERİN ANALİZİ VE ÖNLENMESİ

Mehmet ZİLE
mehmetzile@yahoo.com

Mersin Üniversitesi, Çiftlikköy Kampüsü, Mersin

ÖZET

Üç faz transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinde harmonik analizi yapılmıştır. Transformatör bağlantı şekilleri tek faz, açık üçgen, yıldız-üçgen, skot, blank ve değişik-köprü bağlantılardan oluşmuştur. Harmoniklerin önlenmesi için öneriler sunulmuştur. Farklı üç faz yapıları ve farklı sargı bağlantı içeren üç fazlı trafolar farklı işletme şartları, göz önüne alınarak incelenmiştir. Yükler ve güç faktörleri artırarak ana harmoniklerin önlenilebileceği sonucu çıkarılmıştır.

Anahtar kelimeler: Harmonikler, Üç Faz Transformatör, Doyma.

GİRİŞ

Elektrik üretimi 13,2 kV'ta veya daha yüksek gerilimlerde üç fazlı olarak yapılır. Enerji iletimi 110, 132, 275, 400 ve 750 kV' luk yüksek gerilimlerde gerçekleşir. Bu nedenle, üretilen gerilimi iletim hattına vermek için gerilim yükselten transformatörlere ihtiyaç duyulur. Bu iletim gerilimleri 6600, 4600 ve 2300 voltluk dağıtım gerilimlerine ve daha sonra 440, 220 veya 120 voltluk kullanma gerilimlerine düşürülür. Üç fazlı transformatör yerine uygun birbirine bağlanmış tek fazlı üç transformatörde kullanılabilir. Fakat günümüzde üç fazlı transformatörler teknolojik gelişmelerden, özellikle üç fazlı iletimde kazanılan tecrübelerden dolayı önem kazanmaktadır. Üç fazlı transformatörler, bir fazlı transformatörler bankı ile karşılaştırıldığında avantajı, eşit sınıfa karşın daha az yer, daha az maliyet-taşıma ve bağlantı kolaylığı olmasıdır.

Enerjinin oldukça büyük bir miktarını kullanmak için, üç faz gerilimi daha düşük veya daha yüksek gerilime dönüştürmenin birçok yöntemi vardır. Bunlar transformatörün primer ve sekonder sargıları yıldız-yıldız, üçgen-üçgen, yıldız-üçgen,

üçgen-yıldız, açık üçgen veya V-V bağlanarak gerçekleştirilir. Alçak ve yüksek gerilimli transformatörler için en ekonomik olanı yıldız-yıldız bağlantıdır. Gerilim düşürülmesi gereken iletim hattının sonundaki tali istasyonlarda yıldız-üçgen bağlantı şekli, gerilim yükseltilmesi istenen yerlerde de üçgen-yıldız bağlantı şekli kullanılır. Yıldız-yıldız bağlantılı transformatörlerden biri kaldırılıp, primerler üç fazlı kaynağa bağlandığında sekonder uçlar boşa iken üç eşit üç faz gerilimi oluşturulur. Üç fazlı güç dönüşümünün bu tarzına, açık yıldız veya V-V bağlantısı denir. Bu bağlantı şekli üç faz yükü çok küçük olduğunda, üç faz transformatör bankının tam yüklenmesini garanti etmek ve Δ - Δ bağlı transformatörlerden birinin bankı devre dışı olduğunda, yeni birisiyle değiştirilmesi veya arızalı olanın arızasının giderilmesine kadar düşük kapasitede de olsa çalışmanın devamı için gerçekleştirilir. Skot bağlantı, iki transformatör ile üç faz-üç faz dönüşümünün gerçekleştirildiği bir bağlantı şeklidir. Skot transformatörde ki akım gerilimle aynı fazdadır. Ana transformatörün bir yarısında akım, gerilimden 30^0 önde, fakat diğer yarısında 30^0 geridedir.

HARMONİKLER

Arızası olmayan işletmelerde harmonikler çeşitli sebeplerle ortaya çıkarlar. Bunların başında doğrusal olmayan manyetik ve elektrik devreleri gelir. Genaratör, transformatör ve bobin gibi demir nüvenin doğrusal olmayan manyetik devreye dönüşmesi anlamına gelir. Eğer doğrusal olmayan devre jeneratörün manyetik devresi ise jeneratörün ürettiği gerilim sinüzoidal olması nedeni ile harmonikli olacaktır. Eğer doğrusal olmayan devre transformatöre ait ise bunun sekonder tarafına bağlanan kullanıcı gerilimi de harmonikli olacaktır. Eğer kullanıcının manyetik yada elektrik devresi doğrusal, fakat bu kullanıcıyı besleyen gerilim sinüzoidal değil ise, bu kullanıcının çektiği akım da harmonikli olacaktır. Harmonik ya kaynak tarafındaki harmonikli gerilim etkisinden yada kullanıcı doğrusal olmayan bir devreye sahip olmasından dolayı meydana gelir. Kullanıcıyı besleyen gerilim sinüzoidal ve kullanıcı yükünün karakteristiği doğrusal değilse, kullanıcının şebekeden çektiği harmonikli akımın, iç empedansı çok büyük olan bir akım kaynağından üretildiği kabul edilir.

Güç faktörünü düzeltmek amacı ile yerleştirilen kapasiteler, seri yada paralel rezonans olayları dolayısıyla yüksek akımlara maruz kalarak zarar görebilirler. Paralel rezonans durumunda, rezonans frekansında harmonik üreten kaynak yüksek değerlerde bir empedansla karşılaşır. Harmonik kaynakları çoğunlukla akım kaynağı olarak modellendiğinde, paralel kollardan akan harmonik akımlarında ve paralel kol gerilimlerinde de yükselme olur. Paralel rezonans değişik şekillerde meydana gelir. İlk akla gelen şekli, bir kapasitenin harmonik üreten kaynakla aynı baraya bağlanması ile ortaya çıkar. Bu durumda harmonik kaynağı ile kapasite arasında bir paralel rezonans meydana gelir. Seri rezonans etkisi, yüke paralel olarak bağlanan kapasitenin empedansı yüksek frekanslarda çok düşeceğinden

dolayı omik yük göz önüne alınmayabilir. Transformatörün endüktansı ile güç faktörünü düzeltmek amacı ile yerleştirilen kapasite arasında seri rezonans meydana gelebilir. Seri rezonans devresinde yüksek değerlerde kapasite akımları fakat düşük harmonik gerilimleri gözlenir.

Harmonik akımları yüzünden makineler ve transformatörler ısınır. Ayrıca jeneratörlerin amortisman sargıları, bir fazlı veya iki fazlı kısa devrelerde meydana gelen harmonikleri azaltacak ve ortadan kaldıracak şekilde etki ederken kendileri de çok ısınırlar ve jeneratörlerde ilave kayıplar meydana gelmesine yol açarlar. Harmonik akımları çeşitli devre empedansları üzerinde ilave gerilim düşümlerine neden olurlar. Harmonik akımlarının frekansları, normal şebeke frekansı 50 Hz'in katlarına eşit olduğundan, bu akımlar karşısında jeneratör, transformatör ve hat reaktansları üzerinde meydana gelen gerilim düşümleri de harmonik frekansları ile orantılı olarak artar ve sonuç olarak gerilimin dalga şekli bozulur. Mesela, ark ocakları gibi olayların hızlı değiştiği yerlerde, harmonik akımlarının yol açtıkları gerilim düşümleri de zamana bağlı olarak hızlı değiştiğinden, şebeke geriliminde 2-15 Hz mertebesinde titreşimler baş gösterir. Bu olay yakında bulunan tesislerdeki cihazlara ve aydınlatma cihazı kullanan tüketicilerine olumsuz şekilde etki yapar. Hata noktasından bakıldığında yüksek empedanslı, dolayısıyla düşük hata akımlı sistemlerde harmonik akımlarının oluşturacağı gerilim düzensizlikleri, düşük empedanslı yüksek akımlı sistemlere oranla daha çok olacaktır. Kablo ile yapılan iletim sistemlerinde ise harmonik gerilimleri, tepe değerlerine bağlı olarak, kabloda dielektrik zorlanmayı artırıcı etki yaparlar. Bu yüzden kablunun ömrü azalır. Hata sayısı arttıkça onarım masrafları da artar. Sinüs şeklindeki gerilim eğrisine eklenen gerilim harmoniklerinin meydana getirdiği iğne ucu şeklinde sivri, çok kısa süreli ani gerilim yükselmeleri, mesela

gerilim rezonansı gibi hallerde, makina ve transformatör sargılarının izolasyonu ve kondansatörlerin di-elektrik maddesi için büyük bir tehlike teşkil eder ve hatta izolasyonda delinmeye yol açabilirler. Buna karşılık mesnet, askı ve geçiş izolatörleri için bu gibi aşırı gerilimler hemen hemen hiç bir tehlike yaratmazlar. Normal frekanslı gerilim üzerine bindirilmiş olan harmonik gerilimlerinin kısa süreli iğne şeklinde ani yükselen uçları izolatörlerde olduğu gibi yarı iletkenlerin de delinmesine sebep olurlar.

ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERDE HARMONİK ANALİZİ

Üç faz transformatörlerde harmoniklerin oluşması aşağıda verilen durumlara bağlıdır;

- Transformatör sargı bağlantı tipine; transformatör sargısının yıldız-üçgen veya yıldız-yıldız bağlanıp bağlanmadığına
 - Üç fazın manyetik devreleri ayrı veya birbirine bağlanıp bağlanmadığına
- Üç faz uygulama gerilimler 120° karşılıklı yer değiştirmiş temel frekans gerilimler ile simetriktir. Eğer sadece gerilim de tek harmonikler mevcut olursa, üç faz için gerilim eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$v_A = V_{m1} \cdot \sin \omega t + V_{m3} \cdot \sin 3\omega t + V_{m5} \cdot \sin 5\omega t + \dots$$

$$v_B = V_{m1} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) + V_{m3} \cdot \sin 3(\omega t - 120^\circ) + V_{m5} \cdot \sin 5(\omega t - 120^\circ) + \dots$$

$$v_C = V_{m1} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) + V_{m3} \cdot \sin 3(\omega t - 240^\circ) + V_{m5} \cdot \sin 5(\omega t - 240^\circ) + \dots$$

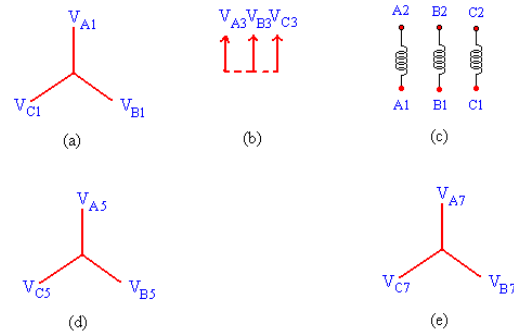
Burada V_{m1} , V_{m3} ... uygulama geriliminin temel ve üçüncü harmonik bileşeninin maksimum değerleridir. Bu eşitliklerden görülür ki, şekil 1' de gösterildiği gibi, ABC faz sıralılar üç faz dengeli bir sistem olarak tanımlanır. Üçüncü harmonik gerilimleri,

$$v_A = V_{m3} \cdot \sin 3\omega t$$

$$v_{B3} = V_{m3} \cdot \sin(3\omega t - 360^\circ) = V_{m3} \cdot \sin 3\omega t$$

$$v_{C3} = V_{m3} \cdot \sin(3\omega t - 720^\circ) = V_{m3} \cdot \sin 3\omega t$$

dır. Bu eşitliklerden görülür ki, V_{A3} , V_{B3} , V_{C3} üçüncü harmonik gerilimleri şekil 1b de gösterildiği gibi zaman fazındadır. Bir başka ifadeyle, üçlü harmonik gerilimleri şekil 1c de görülen üç sargıda aynı anlık zamanda, hem A_1 , B_1 , C_1 den A_2 , B_2 , C_2 ye hem de A_2, B_2, C_2 den A_1, B_1, C_1 e hareket eder. Beşinci harmonik gerilimleri A, B ve C fazı için,



Şekil 1 Temel, üçüncü, beşinci ve yedinci harmonik gerilimler için fazör diyagramları.

$$v_A = V_{m5} \cdot \sin 5\omega t$$

$$v_{B5} = V_{m5} \cdot \sin(5\omega t - 600^\circ) = V_{m5} \cdot \sin(5\omega t - 240^\circ)$$

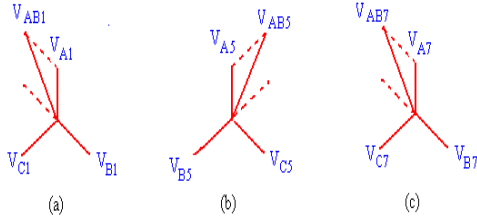
$$v_{C5} = V_{m5} \cdot \sin(5\omega t - 1200^\circ) = V_{m5} \cdot \sin(5\omega t - 120^\circ)$$

dir. Beşinci harmonik gerilimleri 120° yer değiştirir. Şekil 1 de görüldüğü gibi, ACB faz sırasına sahiptir ve ABC temel faz sırasına zıttır. Yedinci harmonik gerilimlerinin ABC faz sırasında olduğu görülür (şekil 1e). Şimdi, yıldız ve üçgende bir transformatörün üç faz sargılarının bağlantı etkisi incelenecektir.

Yıldız Bağlantı

Yıldız bağlantı elde etmek için aynı polariteli uçlar birlikte bağlanır. V_{AB} hat gerilimi aşağıdaki bağlantıdan elde edilir.

$$\bar{V}_{AB} = \bar{V}_A - \bar{V}_B$$



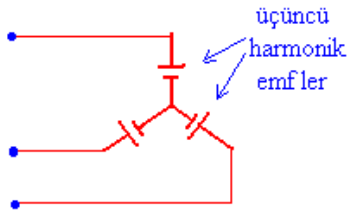
Şekil 2. Gerilimlerin temel, beşinci ve yedinci harmonik fazör diyagramları.

Temel, beşinci ve yedinci harmonikler için hat gerilimleri $V_{AB1}, V_{AB5}, V_{AB7}$ şekil 2' de gösterildiği gibidir. Üçüncü harmonik hat gerilimi,

$$v_{AB_3} = v_{A_3} - v_{B_3}$$

$$= Vm_3 \cdot \sin 3\omega t - Vm_3 \cdot \sin 3\omega t = 0$$

dır. Bu sebeple yıldız bağlantı durumunda, eğer üç faz gerilimleri harmonik içerse bile, hat gerilimleri üçlü harmoniklerden bağımsızdır. Her bir anı zamanda, yıldız bağlantıda üçüncü harmonik fazı şekil 3 de gösterildiği gibi verilir. Hat ile yıldız nokta arasında bir gerilim düşümü vardır. Yıldız noktasından hatta doğru bir gerilim yükselmesi bulunur. Bu sebeple, her iki hat uçlarındaki üçlü harmonik gerilimleri sıfırdır. Bunun elde edilen sonuçlarla aynı olduğu görülmüştür.



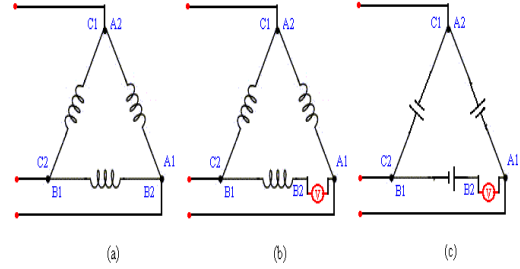
Şekil 3. Her anı zamanda yıldız bağlantı için üçüncü harmonik emf'lerin gösterilmesi.

Üçgen Bağlantı

Bir üçgen bağlantı elde etmek için, farklı polarite uçları şekil 4' de gösterildiği gibi bağlanır. Üçgende üç sargı bir noktada açık ve voltmetre şekil Şekil 4 de gösterildiği gibi bağlanmış ise ve eğer üç fazda sadece temel, beşinci ve yedinci harmonik bulunuyor ise, voltmetreden sıfır değeri okunacaktır. A_1, B_1, C_1 den A_2, B_2, C_2 ye veya $A_2B_2C_2$ den $A_1B_1C_1$ e eş zamanlı üçlü

harmonikler bulunur. Her anı zamanda bu üçlü emf ler, şekil 4(c) de gösterildiği gibi basit bir tarzda gösterilir. Her bir fazda üçlü emf büyüklükleri E_3, E_9, \dots ile gösterildiğinde şekil 4(b) de voltmetreden okunan değer,

$$V_3 = 3\sqrt{E_3^2 + E_9^2 + \dots}$$



Şekil 4. Üçgen bağlantıda üçüncü harmoniklerin ilgisi

eşit olacaktır. Voltmetre alınıp aynı yere ampermetre yerleştirildiğinde, o zaman I_3 üçüncü harmonik akımı ölçülür. Üçüncü harmonik akımı, üçgen bağlı transformatörün hatlarında bulunmadığı görülür. Bir üçgen bağlı transformatörün üç fazında üçüncü harmonik akımları aşağıda verildiği gibi olsun.

$$i_{A_3} = Im_3 \cdot \sin 3\omega t$$

$$I_{B_3} = Im_3 \cdot \sin 3(\omega t - 120^\circ) = Im_3 \cdot \sin 3\omega t$$

$$I_{C_3} = Im_3 \cdot \sin 3(\omega t - 240^\circ) = Im_3 \cdot \sin 3\omega t$$

Üçgen bağlantı için, hat akımı aşağıdaki ilişkiden bulunur.

$$i_{AB_3} = i_{A_3} - i_{B_3} = Im_3 \cdot \sin 3\omega t -$$

$$Im_3 \cdot \sin 3\omega t = 0$$

Yukarıdan üçüncü harmoniklerin kapalı üçgende akdığı, hatlarda akmadığı sonucu çıkartılmıştır. Aynı zamanda dikkat edilmelidir ki, üçlü harmonik emf ler hatlar arasında ve üçgen bağlantılı sargılarda gözükmez. Bunun sebebi, üçlü emf harmonikler, üçlü akımlardan dolayı karşılık gelen empedans düşmeleri ile tam olarak dengelenir. Örneğin eğer, her faz üçüncü harmonik olarak E_3 e ve üçüncü

harmonik empedansı olarak Z_3 olursa, o zaman kapalı üçgende akan I_3 üçüncü harmonik akımı aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$I_3 = \frac{3E_3}{3Z_3} = \frac{E_3}{Z_3} \text{ or } E_3 = I_3 \cdot Z_3$$

Bu her bir fazda E_3 üçüncü harmonik empedansında düşen I_3 Z_3 gerilim düşümü ile tam olarak dengelendiğini gösterir. Aynıısı diğer üçlü harmonikler içinde geçerlidir. Bir üç faz devresindeki transformatör üç faz çekirdek tipi, üç faz kabuk tipi veya üç adet tek faz transformatör gurubundan oluşur. Manyetik devre açısından, üç faz transformatörler aşağıda isimlendirilen iki kısımda sınıflandırılır. Bunlar;

- Bağımsız manyetik devrelere sahip olanlar.
- Bağlantılı veya kublajlı manyetik devrelere sahip olanlar.
- Detaylı bir şekilde, farklı üç faz bağlantıları aşağıda incelenmiştir.

Bağımsız Manyetik Sistemli Transformatörler

Üç faz kabuk tipi transformatör ve üçlü tek faz transformatör grubu bağımsız manyetik devrelere sahiptir. Yıldız bağlı transformatörlerde üçlü harmonik gerilimleri fazlarda bulunmasına rağmen, hatlarda gözükmez. Üç fazda üçlü harmonik akımları aşağıdaki gibi yazılır.

$$i_{A_3} = I_{m_3} \cdot \sin 3\omega t$$

$$i_{B_3} = I_{m_3} \cdot \sin 3\omega t$$

$$i_{C_3} = I_{m_3} \cdot \sin 3\omega t$$

Bu akımlar, hem yıldız noktasına doğru hem de ondan daha uzağa akar. Bu yüzden, nötersüz yıldız bağlı transformatörlerde ve uçlarına bağlı hatlarda üçlü harmonik akımı akmaz. Bu durum şu şekilde açıklanır; Eğer yıldız bağlantıda nötr akımı oluşturulursa, o zaman nötrdeki akım,

$$i_n = i_{A_3} + i_{B_3} + i_{C_3} = 3 I_{m_3} \cdot \sin 3\omega t$$

dır. Eğer nötr akımı oluşturulmazsa, o zaman I_n sıfır olması gerekir.

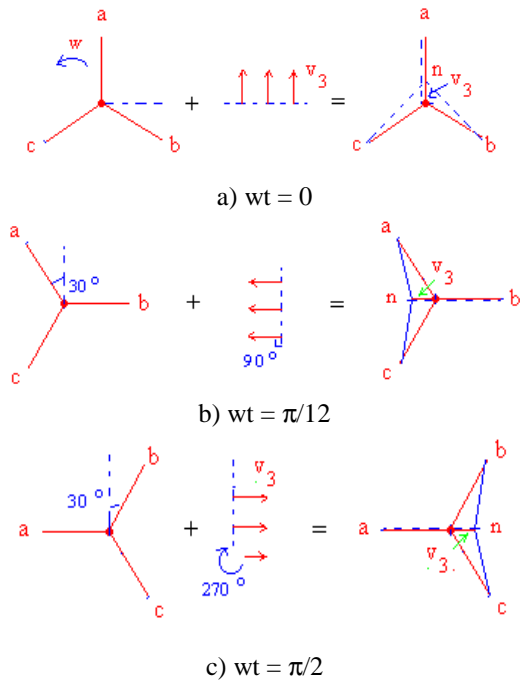
$$i_n = 3 I_{m_3} \cdot \sin 3\omega t = 0$$

veya

$$I_{m_3} = 0$$

dır. Eğer nötersüz yıldız-yıldız bağlantılı bir transformatör ele alırsak, üçlü harmonik akımları hatlarda ve yıldız bağlı transformatörün fazlarında akamaz. Dolayısıyla, beslemede alınan boştaki mıknatıs akımı üçüncü harmonik akımından bağımsızdır. Fakat daha yüksek harmonikler bulunabilir. Böylece, yıldız bağlantı için yüksek dereceli harmonikler ihmal edildiğinde, mıknatıslanma akımı hemen hemen sinüs dalgası şeklindedir. Baskın üçüncü harmonik akısı Φ_3 ü oluşturan tepesi düz olması için akı dalgasına ihtiyaç duyar. Eğer göz önünde tutulan transformatörler ayrı manyetik devreye sahip ise, Φ_3 ü oluşturan relüktans çok düşüktür. Φ_3 ün büyüklüğü tam akı Φ_1 in en büyük yüzdesidir. Dolayısıyla, akı dalga şekli sinüs dalgasından çok farklıdır. Bazı durumlarda Φ_3 , Φ_1 in %20 civarında veya daha fazla olabilir. Üçüncü harmonik frekansında Φ_3 ün %20 si temel emf nin %60 eşit olan endüklenen üçlü emf lerdeki artışı verir. Bunun bir sonucu olarak, primer ve sekonder sargılarda endüklenen faz emf ler temel emf büyüklüğünün %60 a eşit olan büyüklükte (maksimum değerlere) tepe değerine ulaşır. Bu tepe değerler yalıtıma zararlı olabilir. Buradan, bağımsız mağnetik devreli yıldız-yıldız transformatör bağlantısı yüksek gerilim sistemlerinde kullanılmamalıdır. Bu hat gerilimleri, eğer üçüncü harmonik gerilimlerinden bağımsız olursa sinüzoidal kalır. Aynı zamanda dikkat edilmelidir ki, faz geriliminin rms değeri Φ_3 , Φ_1 in %20 si olduğunda faz geriliminin temel

bileşeninden $\sqrt{1^2 + 0,6^2} = 1,17$ kat olan değere eşittir. Bu yüzden, hat gerilimi= $\sqrt{3}$ faz gerilimi ilişkisi nőtürsüz yıldız-yıldız bağılı transformatörler için iyi bir sonuç oluşturmaz. Üçüncü harmonik emf nin diğer bir etkisi şekil 5' de gösterildiği gibi, 3f de nötürü kaydırmasıdır. Böylece, üç farklı ani değer temel ve üçüncü harmonik emf ler birleştirilir. Bu şeklin fazör diyagramlarında, V_3 üçüncü harmonik gerilimi bütün üç faz gerilimlerine zıt fazdır. Temel ve üçüncü harmonik gerilimlerinin sonucu $\omega t=0$, $\omega t=\pi/12$ ve $\omega t=\pi/2$ de şekil 5' in sağ tarafında noktalı çizgilerle gösterilmiştir. Dikkat edilmelidir ki, V_3 fazörü 3ω rad/sn de döner. Halbuki temel fazörler ω rad/sn de döner. Bundan şu anlaşılır ki, eğer temel fazörler 30° içinde dönerse, V_3 fazörü şekil 5b de görüldüğü gibi $3 \times 30^\circ = 90^\circ$ içinde döner. Eğer transformatör geniş üç faz güç şebekesine bağlanırsa, temel fazörlerin a, b, c uçları pozisyonlarını değiştiremez. Bu şekil 5 de görüldüğü gibi, üçüncü harmonik gerilimleri nötür noktasını kaydırır.



Şekil 5. Nötür noktasının kayması.

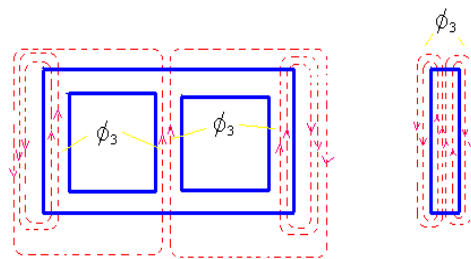
Nötürün kayması yıldız noktası gerilimleri hattında düzensiz değişimlere sebep

olmaktadır. Şekil 5 incelendiğinde aşağıdaki sonuçları elde ederiz.

- Birinci fazdaki maksimum gerilim $V_{m1}+V_{m3}$ eşittir ve V_1 ve V_3 ün bağıl pozisyonlarına bağlıdır. Örneğin şekil 5b de, maksimum gerilim B faz sargı uçlarında oluşur. Şekil 5c de, diğer bazı ani değerlerde maksimum gerilim A faz sargısı uçlarında gözükür. Buradan faz sargılarının yalıtıma zarar verebilen ek bozulmalara maruz kalabileceği anlaşılır.
- Hat gerilimleri etkilenmemiştir. Fakat hat nötür gerilimi $\sqrt{V_1^2 + V_3^2}$ dir. Nőtürsüz bağımsız manyetik devreli bir yıldız-yıldız transformatör için hat gerilimi faz geriliminin $\sqrt{3}$ katına eşit değildir.

Bağlantılı veya Kuplajlı Manyetik Sistemli Transformatörler

Genelde, çok kullanılan üç faz nüve tipi transformatör üç bacaklı transformatördür ve üç fazın manyetik devresi ile bağlantılıdır. Başka bir ifadeyle, bir bacak üzerinde bir fazın manyetik akısı, diğer iki bacaklar ve çatal üzerinden manyetik yolunu tamamlar. Üçlü emf veya akımları ve benzer üçlü harmonik akılar, üç bacakta hem yukarı doğru hem de aşağı doğru akar. Her bir anda, üçlü akıların büyüklükleri eşittir. Bir bacakta üçlü akı diğer iki bacak içinden dönemez. Çünkü, üçlü akılar ile zıt yönlüdür. Dolayısıyla, üçlü akı için sadece dönüş yolu şekil 6 da gösterildiği gibi, nüve çevresinde hava veya yağ içerisindedir.



Şekil 6. Üç faz nüve tipi transformatörde üçüncül veya üçlü harmonik akı yolları.

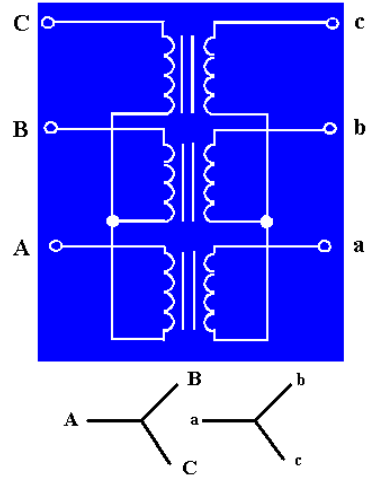
Eğer hava yüksek relüktansa sahip ise, üçlü akılar ve bu yüzden üçlü faz emf ler

küçüktür. Faz gerilimleri, sadece üçüncü harmonik emf lerin küçük bir kısmını içerir. Bu görüş açısından, eğer yüksek dereceli harmonikler bulunmaz ise faz gerilimleri sinüs dalgasına benzeyebilir.

Üçlü akılar, çelik tank kanallar ile verilen en az relüktans yolu içinden dönmeye meyilli olacaktır. Üçlü frekans akısı bu sebepten dolayı, bu kısımlarda geniş fuko akım kayıplarında artışa neden olacaktır. Böylece, transformatör verimliliği oldukça düşer. Her bir çaba üçlü harmonik akılarını önlemek olmalıdır. Bu yöntemlerin birisi, bütün transformatör çevresinde iletim ağı kullanmaktır. Bu ağda, üçlü frekansda endüklenen akımlar geniş bir açılıma yönelik üçüncü harmonik akılarına zıt olur. Eğer tank çelik yerine alüminyumdan yapılmış ise, o zaman alüminyum tank ile üçlü akıları veren relüktans, çelik tankından daha fazladır. Sonuçta, üçlü akılar küçüktür ve alüminyum tankta endüklenen üçlü frekans akımları çok daha azdır. Alüminyum tankta üçlü frekans akımları, çelik tankta bir iletim ağından çok daha etkili olan üçüncü harmonik akısına zıt olacaktır. Alüminyum tanklı bir transformatör, çelik tankta bir iletim ağı bir transformatör ile karşılaştırıldığında, çok verimli ve dolayısıyla daha az sıcaklık yükselmesine sahip olacaktır. Üç faz nüve tipi transformatörler için alüminyum tanklar tercih edilir.

Nörlü Yıldız–Yıldız Bağlantı

Eğer alternatör ve yıldız–yıldız bağlı transformatörün primeri topraklı nötrleri bulunursa, o zaman üçüncü harmonik akımları toprak içinden dönüş yapabilir. Bu yüzden, üçüncü harmonik mıknatis akımı transformatörün faz sargılarında olduğu kadar hatlarda da mevcut olabilir. Böylece akı ve faz gerilimleri sinüs dalgası şeklindedir. Hat gerilimi faz geriliminin $\sqrt{3}$ katına eşittir ve nötr kararlıdır.



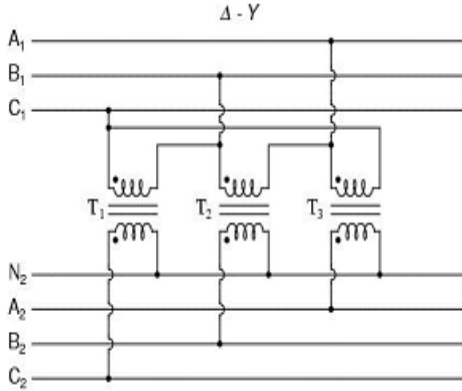
Şekil 7. Primer ve sekonder tarafları üçgen bağlı üç faz transformatör

Toprağa doğru akan üçüncü harmonik akımı hatlarda veya faz sargılarında mıknatis akımının üç katına eşittir. Hatlarda akan üçüncü harmonik akımlarının başlıca sakıncaları, iletim hatlarına paralel olan haberleşme devrelerinde girişime sebep olmasıdır.

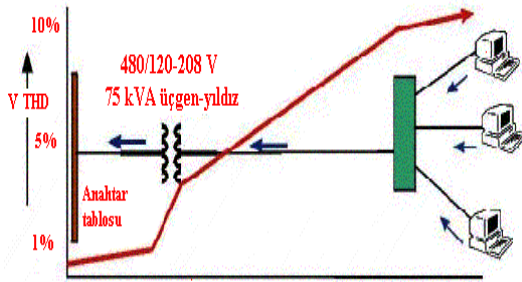
Üçgen-Yıldız Bağlantı

Sinüzoidal besleme gerilimi uygulanan üçgen yıldız bağlı transformatör, hatlarda bir sinüzoidal mıknatis akımı meydana getirir. Aynı zamanda, bu sinüzoidal mıknatis akımı belirgin üçüncü harmonik akısı içeren düz tepe akı dalga yükselmesi veren transformatör sargılarından akar. Bu üçlü frekans akısı üçgen sargının bütün üç fazında aynı yerde dolaşan üçlü frekans emf lerini endükler. Bu emf lerin bileşkesi, kapalı üçgende üçüncü harmonik akımını meydana getirir. Buradan, transformatör sargı akımı, sinüzoidal mıknatis akımı ve ayrıca bir üçüncü harmonik mıknatis akımından oluşur. Fakat mıknatis akımında üçüncü harmonik bulunması sinüs akı dalgası gerektirir. Bu yüzden, primer ve sekonder sargıların her ikisinde endüklenen emf lerin hemen hemen hepsi sinüzoidal dır. Yüksek dereceli harmonikler temel bileşene benzer şekilde iş görür. Böylece, üçgen–yıldız bağlantı ile hatlardaki mıknatis akımı temel bileşeni içerir (eğer mevcut ise 5.ve 7. harmonikler

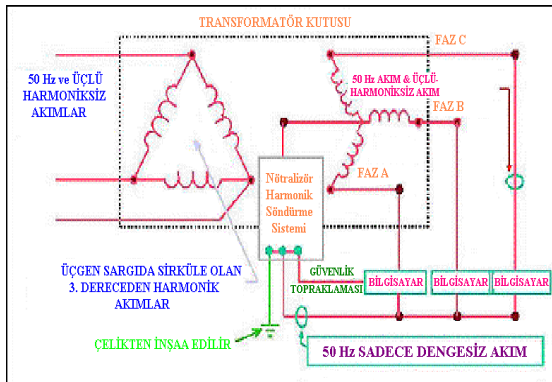
de dahil). Fakat kapalı üçgende mıknatis akımı, ayrıca üçüncü harmonik bileşenleri içerir.



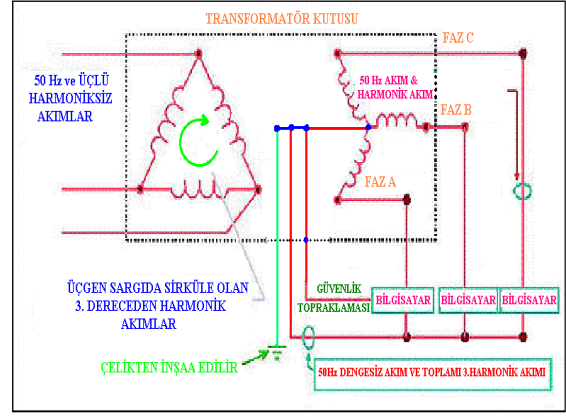
Şekil 8. Primeri üçgen, sekonder tarafı yıldız bağlı üç faz transformatör



Şekil 9. Üçgen-yıldız bağlı transformatörün harmonik analizi



(a)



(b)

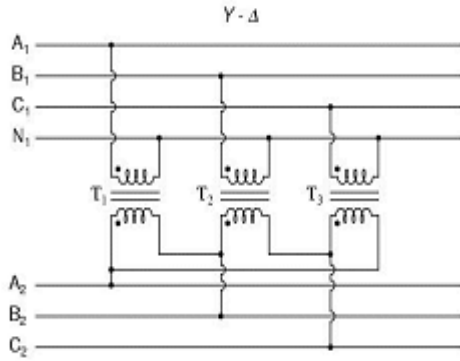
Şekil 10. Üçgen-yıldız bağlı transformatörde harmonik analiz yapılması

Dikkat edilmelidir ki, kapalı üçgende üçüncü harmonik mıknatis akım sadece üçüncü harmonik emf nedeniyle akabilir. Bu yüzden, üçüncü harmonik akısı Φ_3 ün bulunması esastır. Bu Φ_3 akısı aynı zamanda sekonder sargısını da bağlar. Dolayısıyla, üçüncü harmonik emf nin çok küçük bir bölümü sekonder fazlarında endüklenir (nominal faz geriliminin %1 veya daha azı). Çıkış hat gerilimleri üçüncü harmonik emf lerden bağımsızdır. Bu yüzden, sekonder taraftaki hat gerilimi, hemen hemen faz geriliminin $\sqrt{3}$ katına eşittir ve sekonder yıldız noktası kararlıdır.

Yıldız-Üçgen Bağlantı

Eğer üçüncü harmonik akımı, yıldız-üçgen transformatörün yıldız bağlı sargılarında akamaz ise, beslemeden çıkartılan mıknatis akımı bir sinüs dalgası olması gerekir. Fakat bir sinüzoidal mıknatis akımı belirgin bir üçüncü harmonik akısına sahip düz tepeli akıya ihtiyaç duyar. Bu üçüncü harmonik akısı, primer ve sekonder sargıların her ikisinde üçüncü harmonik emf si endükler. Eğer sekonder üçgen bağlı ise, üçüncü harmonik emf leri üçüncü akım artışı verir. Böylece, sekonderi üçgen bağlantıda mıknatis akımı sadece üçüncü harmonik akımından meydana gelir. Primerdeki temel frekans akımı ve sekonderi kapalı üçgende üçüncü harmonik

akımının bileşimi, nüvedeki birleşke akıyı oluşturur.

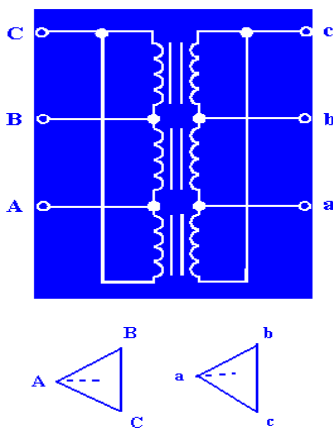


Şekil 11. Primeri yıldız, sekonder tarafı üçgen bağlı üç faz transformatör

Eğer mıknatıs akısı temel ve üçüncü harmonik akımlardan oluşursa, o zaman akı bir sinüs dalgası olması gerekir. Böylece yıldız-üçgen bağlantıda, primer ve sekonder sargılarında mağnetik akı çizgisi bir sinüs dalgası şeklindedir. Primer ve sekonder faz emf'leri üçüncü harmonik emf'lerinden bağımsızdır ve dalga şekilleri hemen hemen sinüs dalgası şeklindedir.

Üçgen-yıldız bağlantıda olduğu gibi, yıldız-üçgen bağlantıdaki primer faz gerilimi nominal faz geriliminin %1 veya daha azı üçüncü harmonik emf'yi içerir. Primer ve sekonder hat gerilimleri üçüncü harmonik gerilimlerden bağımsızdır.

Üçgen-Üçgen Bağlantı



Şekil 12. Primer ve sekonder tarafları üçgen bağlı üç trafo bankı ve gerilim üçgeni.

Üçgen-üçgen bağlı transformatör için hat akımı sinüzoidaldir. Üçüncü harmonik mıknatıs akımları yıldız-üçgen, üçgen-yıldız bağlantılar için yukarıda belirtildiği gibi primer ve sekonder üçgenlerin her ikisinde akabilir. Dikkat edilmelidir ki, gerekli üçüncü harmonik akısı, primer ve sekonder üçgenlerin her ikisinde akan akımların etkileri ile meydana gelir. Bu yüzden, üçgen-üçgen bağlantının primer üçgende üçüncü harmonik mıknatıs akımı, üçgen-yıldız bağlantının primeri üçgende üçüncü harmonik mıknatıs akımından daha küçük olması gerekir. Gerçekten, üçüncü harmonik mıknatıs akımları, üçlü frekans kaçak empedanslarına ters orantısal bir tarzda primer ve sekonder üçgenleri arasında paylaşılır. Üçüncü harmonik akımı ve empedansları aynı taraftadır. Eğer üçüncü harmonik akısı çok küçük ise, üçgen-üçgen birleşke akı bir sinüs dalgasına çok yakın olur.

HARMONİKLERİN ÖNLENMESİ

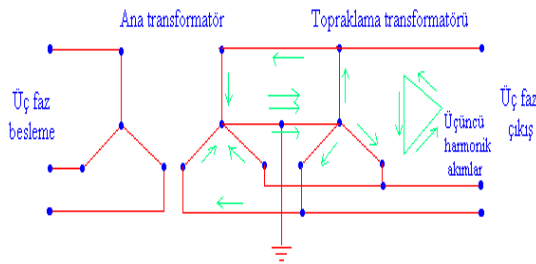
Transformatörlerdeki harmonikler aşağıda belirtildiği gibi önlenir. Bunlar;

- Düşük nüve akı yoğunluğu kullanılarak azaltılır. Bu nüve bölgesinde daha fazla iletken malzeme ve bu yüzden daha fazla maliyet ortaya çıkarır. Daha düşük akı yoğunluğunda transformatörü tasarlamak ve işletmek ekonomik değildir.
- Bağlantıların tipi; Hatlardaki üçlü harmonik akımları ve gerilimleri transformatörün yıldız veya üçgen bağlantılarını kullanarak önlenir.
- Üçgende primer ve sekonder sargı; Harmonik gerilimleri harmonik akımlarından daha fazla olumsuz değerlere sahiptir. Bu yüzden, her bir çalışma üçüncü harmonik gerilimlerini önlemek için yapılmalıdır. Transformatör sargılarının biri üçgen bağlandığında, üçlü harmonik gerilimler oldukça önlenir. Bu sebeple, üçlü harmonik gerilimlerini önlemek için transformatör sargılarından birinin üçgen bağlanması gerekir.
- Üçüncül sargı kullanmak; Eğer primer veya sekonderin üçgen bağlanması

mümkün değil ise, o zaman üç faz transformatöre üçüncü ek sargı tasarlanması gerekir. Üçüncü sargı genel olarak üçüncül sargı olarak isimlendirilir ve üçgen bağlanır. Üçüncül sargı olarak biçimlendirilen kapalı üçgen, üçüncü harmonik akımları için bir yol sağlar. Bu yüzden akı ve emf'ler hemen hemen sinüs dalgası şeklindedir. Dikkat edilmelidir ki, üçüncül sargı gerilimin temel bileşimi üzerinde hiçbir etkiye sahip değildir. Çünkü, 120° karşılıklı yer değiştirmiş üç emf'nin fazör toplamı kapalı üçüncül üçgende sıfır olur.

Yıldız-Üçgen Topraklı Transformatör

Yıldız-yıldız transformatörün iki sargısındaki üçüncü harmonik gerilimler şekil 13'de gösterildiği gibi yıldız-üçgen topraklı transformatör kullanılarak önlenir. Kapalı üçgen, üçüncü harmonik akımları için bir yol sağlar. Bu yüzden, akı ve emf dalgaları sinüs dalgası şeklinde kalır. Yıldız noktasının potansiyeli karardır ve nötürün kaymasından sakınılır.



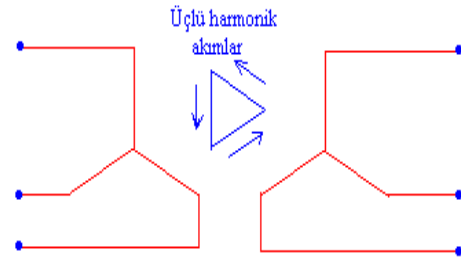
Şekil 13. Üçlü harmonik emf leri önlemek için yıldız-üçgen topraklı transformatör.

Yıldız-yıldız transformatör için üçüncü harmonik gerilimleri aynı zamanda dört iletkenli besleme (eğer generatör nötürü topraklanmış ise transformatör nötürünü topraklamak) kullanılarak önenebilir. Nötür teli üçüncü harmonik akım için bir yol sağlar. Bu yüzden, akı ve emf'ler sinüs dalgasıdır. Haberleşme devresine yakın

olan üçlü harmoniklerin sebep olduğu girişimin dikkatlice incelenmesi gerekir.

Üçüncül veya Dengeyi Sağlayan Sargılar

Primer ve sekonder sargılara ek olarak transformatörlere üçüncü bir sargı bağlanır. Bu sargıya üçüncül veya stabil sargı adı verilir. Bu yüzden üçüncül sargılar ile donatılan transformatörler üç sargılı transformatör olarak adlandırılır. Üçüncül sargı genellikle üçgen bağlanır ve bir çok kez uçları tankın dışına çıkarılmaz. Benzer bir durumda yıldız-yıldız transformatörlerdeki farklı işlevleri aşağıda belirtildiği gibidir.



Şekil 14. Üçüncül sargı

- Üçüncü harmonik mıknatıs akımı, şekil 14'de gösterildiği gibi üçgen bağlanan üçüncül sargıda akar. Bunun bir sonucu olarak, nüve akısı ve emf'ler hemen hemen sinüs dalgası şeklindedir.
- Hat ve nötür arasında tek faz yük üçüncül sargı bulunan yıldız-yıldız transformatörün bir grubu ile beslenir.
- Hat toprak arızası için, koruyucu cihazların çalışmasında üçüncül sargı yeterli hata akımının akışına izin verir.
- Üçüncül sargı uçları, tankın dışına getirildiğinde, güç faktörünü düzeltme elemanları gibi her bir elemanın beslenmesi için kullanılır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Akım ve gerilim harmonikler; paralel ve seri rezonans dolayısıyla harmonik seviyelerinin yükselmesine, elektrik üretim, iletim ve tüketiminde verimin azalmasına, elektrik tesislerinde yalıtımı zayıflattığı için tesis elemanlarının ömürlerinin azalmasına, elemanlarda arızalar meydana gelmesine neden olur. Transformatörlerde harmonik gerilimleri histerizis ve girdap akımlarını artırarak kayıpları büyütür ve yalıtımı zorlar. Transformatörlerdeki harmonikler düşük nüve akı yoğunluğu kullanılarak, hatlardaki üçlü harmonik akımları ve gerilimleri transformatörün yıldız veya üçgen bağlantıları kullanılarak, transformatör sargılarından birinin üçgen bağlanması ile, üçüncül sargı kullanarak ve yıldız-üçgen topraklı transformatör kullanarak önlenilebilir sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Allan G., (1991), Electrical Transients in Power Systems, *John Wiley & Sons Inc* , New York.
- [2] Alan, J., (1991), Harmonic Load Losses in HVDC Converter Transformers, *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol:6, No:1, 153-157.
- [3] Aly, A. Mahmoud, (1984), Power System Harmonics–An Assessment, *IEEE Tutorial Course on Power System Harmonics*”, 1-8.
- [4] Badawy, E. H. ve Youssef, R. D., (1983), Representation of Transformer Saturation, *Electric Power Systems Research*, Vol. 6, No. 4, 301-304.
- [5] Cigre, W. G., (1993), Harmonic, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network, *Elektra* No.77, 35-54.
- [6] Lin, C. E., Cheng, C. L., Huang, C. L. ve Yeh, J. C., (1992), A Simple Model for Transformer Inrush Electric Calculation and Harmonic Analysis, *Electric Power System Research*, Vol. 24, No. 2, 153-163.