

Transformatör Enerjilendirme Akımının Etkilerini Azaltıcı Yöntemlerin İncelenmesi

Review on Elimination Methods of Transformer Inrush Current

Kerem YALÇIN¹, Ayşen BASA ARSOY²

¹Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği A.B.D.
Kocaeli Üniversitesi
keremyalcin1@gmail.com

²Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi
aba@kocaeli.edu.tr

Özet

Transformatörler, ilk devreye alınma esnasında çok yüksek akım çekerler. Bu enerjilendirme (inrush) akımının değeri bazı koşullarda öngörülen kısa devre akımı değerini bile aşabilir. Bu durum, koruma rölelerinde hatalı algılamaya ve sistemdeki diğer ekipmanların zarar görmesi gibi durumlara neden olabilir. Dolayısıyla transformatör enerjilendirme akımları, dikkatle incelenmesi ve mutlaka önlem alınması gereken bir konudur. Bu çalışmada önce transformatör enerjilendirme akımını etkileyen faktörler belirlenmiş, sonra da bu akımları azaltıcı yöntemler incelenerek, performans ve uygulanabilirlik açısından karşılaştırılması yapılmıştır.

Abstract

A Transformer has high start-up current while energizing. This inrush current can be higher than short circuit current, causing disoperation of protection relays and damage to other system components. That's why inrush current should be studied attentively and there must be precautions for inrush current. In this study, factors affecting transformer inrush current are explored first and then some of the elimination methods of inrush currents are examined and compared in terms of performance and application.

1. Giriş

Transformatör, elektrik güç sisteminin en önemli elemanlarından biridir. Gerilim – akım büyüklüklerini dönüştürerek gücün iletim ve dağıtım sistemlerinde minimum kayıp ile iletilmesindeki payı büyüktür. Bu gerilim – akım dönüşümünü uygun sargı sarımları ile ve manyetik devresi sayesinde sağlar.

Transformatörün manyetik devre içermesi, işletmede bazı sorunlara yol açabilir. Manyetik malzemelerin mıknatıslanma (B – H) grafiğinin belli bir noktadan sonra lineerliğini kaybetmektedir. Çalışma noktasının bu lineer olmayan bölgeye doğru kayması transformatörden istenen çevirme

oranı ve diğer elektriksel parametrelerin sağlanamaması anlama gelir. Bu olaya manyetik nüvenin doyması denir. Doyma olayı, transformatörün tasarımı sırasında göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerden birisidir.

Transformatörün enerjilendirilmesi esnasında nüvenin doyuma gitmesiyle, şebekeden yüksek genlikli ve dalga şekli sinüzoidal formdan uzak bir akım çekilir [1]. Sinüzoidal olmayan ve transformatör anma akımının çok üzerinde olan bu enerjilendirme (inrush) akımı istenmeyen bir akımdır. Transformatörlerin çok sık devreye alınıp devreden çıkarıldığı bazı uygulamalarda, enerjilendirme akımı hem transformatör, hem de güç sistemi açısından bazı sakıncalara neden olabilmektedir. Örneğin bir kojenerasyon santalinde generatör yükseltici transformatörünün alçak gerilim tarafı sürekli enerjiliyken yüksek gerilim tarafı, ada modundan şebekeyle paralel çalışmaya geçiş anında enerjilendirilmekte ve bu manevra bu tip santrallerde sıkça gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle, enerjilendirme akımını azaltıcı yöntemlerin belirlenip doğru uygulanması, oluşabilecek hasar/zararların önlenmesi açısından önem taşımaktadır.

Çalışmanın ilk bölümünde transformatör enerjilendirme akımının tanımı, özellikleri ve hesaplanması konularına değinilmiştir. Bu akımların azaltılması için literatürde geliştirilen yöntemlerin incelenmesi ve detaylı karşılaştırması çalışmanın diğer bölümünü oluşturmuştur.

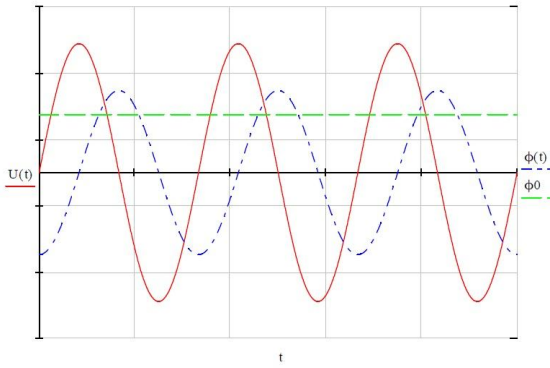
2. Transformatör Enerjilendirme Akımı

Transformatörler devreden çıkarıldığında manyetik nüvenin karakteristiğinden dolayı nüvede sargılar enerjili olmamasına rağmen bir miktar akı kalır. Buna artık akı denir. Transformatörün tekrar devreye alınmasında (enerjilendirilmesinde) nüve üzerindeki artık akıdan dolayı transformatör nüvesi doyuma gider. Bu olaydan dolayı transformatörün enerjilendirilen sargısı, şebekeden yüksek genlikli ve bol harmonik içeren bir akım çeker. Çekilen bu akıma transformatör enerjilendirme (inrush) akımı denir.

Transformatörlerin sargıları, genellikle bir nüve üzerine sarılmış silindirik sarımlar şeklindedir ve endüktans özelliği gösterir. Endüktans özelliği gösteren bir elemana gerilim uygulanırsa, bu gerilime bağlı olarak bir manyetik akı endüklenir. Bu gerilim ile akı arasındaki ilişki (1) numaralı denklem ile ifade edilmiştir.

$$v = n \times \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Bu denklemde n sargının sarım sayısını, Φ manyetik akıyı ve v de gerilimi simgelemektedir. Alternatif gerilim sinus fonksiyonu olduğundan manyetik akı da türev ilişkisinden dolayı yine bir sinus fonksiyonu olacak, ancak gerilim ile arasında 90° faz farkı olacaktır. Transformatörün enerjilendirilmesi anında sargıların maruz kalacağı gerilimin endükleyeceği bir manyetik akı olacaktır. Bu akıya sürekli hal akısı denir ve şebeke geriliminden dolayı oluşan akıdır. Artık akı (ϕ_0), sürekli hal akısı (Φ) ve şebeke geriliminin (V) grafiği Şekil 1'de verilmiştir.



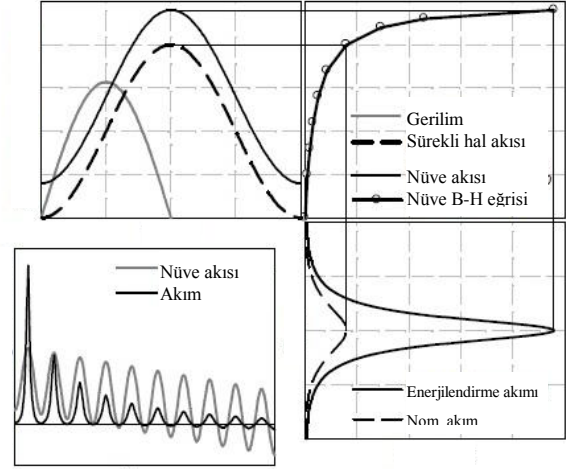
Şekil 1: Akı - Gerilim Grafikleri

Artık akı, genellikle sürekli hal akısının %50 - 87'i arasında bir değerde olur [1]. Nüvedeki artık akı miktarını belirleyen faktörler şunlardır:

- Nüve karakteristiği
- Sargı endüktansı
- Nüve geometrisi
- Transformatöre bağlı elemanların kapasitif etkisi
- Transformatör kesicisinin açma (devreden çıkarma anı)

Normal işletme koşullarında gerilim ile manyetik akı arasındaki faz farkı 90° iken bu fark enerjilendirme anında 0 olur [2]. Aynı zamanda artık akı içeren bir nüvede sürekli hal akısı da akmaya çalışır. Bu durumda manyetik nüve üzerinden akan toplam akı çok büyük bir değer alır ve nüvenin doyuma gitmesine sebep olur. Bu sebepten dolayı transformatörün enerjilendirilen sargısı, şebekeden dengesiz, yüksek genlikli, bol harmonik içeren ve geç sönmülenen (5-10 periyot) bir akım, yani enerjilendirme akımı çeker. Akım - akı ilişkisini gösteren grafikler Şekil 2'de verilmiştir. Bu grafikten enerjilendirme anındaki manyetik akının transformatörün çalışma noktasını doyum bölgesine götürdüğü ve bu yüzden çekilen akımın yükseldiği görülmektedir. Sol alttaki grafikte

de yukarıda özellikleri tanımlanan enerjilendirme akımının dalga şekli görülmektedir.



Şekil 2: Akı - Akım Grafikleri

Bu akım, aşağıdaki problemlere sebebiyet verebilmektedir:

- Elektriksel yalıtımın bozulması
- Transformatör sargılarında mekanik hasar
- Transformatörün ömrünün azalması
- Bağlı olduğu güç sistemi ile rezonansa girme
- Koruma rölelerinde hatalı algılama

Literatürde transformatör enerjilendirme akımını hesaplayan birçok matematiksel ifade vardır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı Holcomb eşitliğidir [3]. Hem akımın dalga şeklini karakterize ettiği, hem de doğru sonuç verdiği için tercih edilmektedir. Holcomb eşitliği (2) numaralı denklem ile ifade edilmiştir. Holcomb eşitliğinde kullanılacak büyüklüklere ilişkin denklemler ise (3) ve (4) numaralı denklemler ile ifade edilmiştir. Denklemlerde kullanılan indislerin tanımları da Çizelge 1'de verilmiştir.

$$i(t) = k \times \frac{\sqrt{2}V}{\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L_{hava}^2}} \left[\sin(\omega t - \psi) - e^{-\frac{R_s}{L_{hava}}(t - t_0)} \sin(\theta_s - \psi) \right] \quad (2)$$

$$\theta_s = \arccos\left(\frac{B_m + B_r - B_s}{B_m}\right) \quad (3)$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{\omega L_{hava}}{R_s}\right) \quad (4)$$

Çizelge 1: Denklemlerde Kullanılan İndislerin Tanımı

İndis	Tanımı	İndis	Tanımı
R_s	Sargı direnci	B_m	Nüvenin anma akısı
L_{hava}	Sargının havaya göre endüktansı	B_s	Doyumun başladığı akı
		B_r	Nüvedeki artık akı

Bu formülde nüvedeki artık mıknatıslık için; maksimum akım değerini hesap etmek adına nüvede kalabilecek en fazla artık akı bulunduğu kabul edilir. B_m ve B_s değerleri de nüve sacının

malzemesine ve tasarım parametrelerine bağlı olarak belirlenen değerlerdir.

3. Azaltıcı Yöntemler

3.1. Transformatöre Seri Empedans Bağlamak

Uygulamadaki en yaygın yöntemlerden birisidir. Bu yöntem, elektrik devre teorisinde seri empedansın eşdeğer empedansı sınırlayıp akım sınırlama özelliği temeline dayanmaktadır. Sistemin eşdeğer empedansı, transformatöre seri bir empedans bağlanmasıyla artar ve çekilen akım azalır. Aynı zamanda bu seri empedans, transformatör terminalindeki gerilimi düşüreceğinden oluşacak sürekli hal akısı azalır. Bu akımın azalması da transformatörün daha düşük enerjilendirme akımı çekmesine katkı sağlar.

Seri empedans olarak akım sınırlama direnci (saf rezistif) veya akım sınırlama reaktörü (saf endüktif) kullanılabilir. Direnç uygulaması reaktöre göre daha yaygın bir uygulamadır. Akım sınırlama dirençleri, transformatör sürekli işletme koşuluna geçtikten sonra genellikle kısa devre edilerek devreden çıkarılmaktadır. Eğer akım sınırlama reaktörü kullanılıyorsa sürekli işletmede de devrede kalabilmekte, ancak çok büyük güçlü transformatörlerde kısa devre edilerek devreden çıkarılmaktadır. Akım sınırlama reaktörünün kullanımındaki sakıncalardan birisi de endüktif karakterli bir eleman olduğundan sistem ile rezonansa girme olasılığıdır.

3.2. Kontrollü Anahtarlama

Kontrollü anahtarlama prensibinin başlangıcı 1990'lı yılların ortalarına dayanmaktadır. Transformatörün her bir fazının ayrı ayrı veya tüm fazlarının aynı anda uygun bir anda anahtarlama ve nüve geometrisinden dolayı faz akıları arasındaki ilişkinin kullanılması prensibine dayanır. Üçgen bağlı sargılarda ve/veya 3 bacaklı nüvelerde dengeli gerilim altındaki her bir fazın akılarının toplamı sıfırdır. Uygun zamanda anahtarlama; artık akı ve sürekli hal akısının değerlerinin birbirlerine göre en uygun zamanda anahtarlama anlamındadır.

Endüktif devrelerde oluşan manyetik akının, akı endükleyen unsurun birden değişmesi ile aynı oranda değişmeyeceği bilinmektedir [4]. Buna göre akılar açısından en uygun anahtarlama anı, artık akı ile o anki gerilim değerinden dolayı endüklenecek sürekli hal akısının birbirine eşit olduğu andır. Bu durum bir periyotta iki kez meydana gelmektedir. Böylece transformatör nüvesi daha az doycak ve çekilen enerjilendirme akımı azalacaktır.

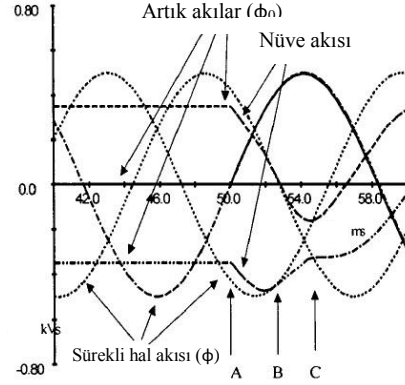
Kontrollü anahtarlama prensibinin performansını doğrudan etkileyen etkenler aşağıda sıralanmıştır. Eğer bu yöntem kullanılacaksa bu etkenler göz önünde bulundurulmalıdır [5].

- Kesicinin kapaması esnasında kontaklar tam kapanmadan başlayan ark
- Kesicinin kapama süresi
- Akı ölçümündeki hatalar

Kontrollü anahtarlama prensibinde 3 çeşit strateji öngörülmektedir.

3.2.1. Seri Anahtarlama

Fazların sıra ile ve çeyrek periyot içerisinde devreye alınması stratejisidir. Yukarıda da bahsedildiği gibi artık akımın o anki gerilim değerinin endükleyeceği sürekli hal akısına eşit olduğu anda kesicinin kapanması durumudur. Seri anahtarlama manetik akıların zamana göre değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Grafikteki A, B ve C anahtarlama anlarını göstermektedir.



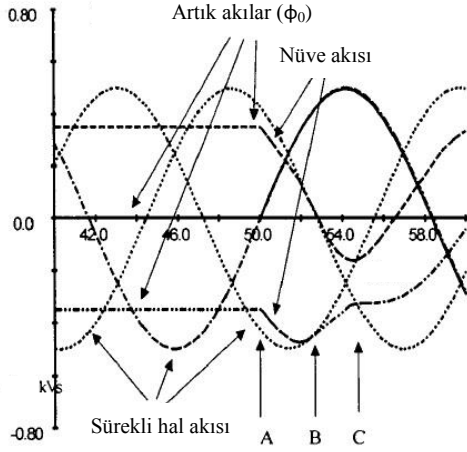
Şekil 3: Seri Anahtarlama Akı - Zaman Grafiği

Bu stratejinin uygulanabilmesi için 3 fazı birbirinden bağımsız kontrol edilebilen bir kesici ve 3 fazın sürekli hal akı bilgisine ihtiyaç vardır.

3.2.2. Eş Zamanlı Anahtarlama

Şekil 3'te anahtarlama anlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. A anahtarlama anında fazın birisinin sürekli hal akısı artık akıya eşitken diğer fazların sürekli hal akısı ile artık akı arasında çok büyük bir fark yoktur. Buna göre 3 faz aynı anda A anında enerjilendirilebilir. Seri anahtarlama göre çekilen enerjilendirme akımı bir miktar fazla olacaktır. Bu strateji alçak gerilim sistemleri için çok kullanışlıdır. Çünkü alçak gerilimde 3 fazı birbirinden bağımsız kontrol edilebilen kesiciler pek yaygın değildir.

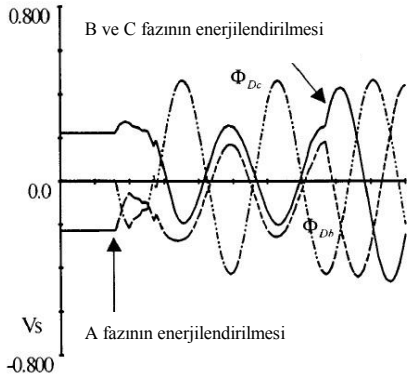
Eş zamanlı anahtarlama akıların zamana göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Ayrıca bu stratejinin uygulanabilmesi için her fazı senkron kontrol edilen bir kesici ve 3 fazın sürekli hal akı bilgisine ihtiyaç vardır.



Şekil 4: Eş Zamanlı Anahtarlama Akı - Zaman Grafiği

3.2.3. Gecikmeli Anahtarlama

Diğer iki stratejideki yaklaşımlar ile transformatörün ilk fazı enerjilendiğinde, diğer 2 fazdaki artık akı miktarı elimine edilip ihmal edilebilecek bir seviyeye düşebilir. Bu eliminasyon birçok standart transformatör nüve geometrisinde olabilmektedir. Buna göre ilk faz enerjilendirildiğinden birkaç periyot sonra diğer iki faz enerjilendirildiğinde şebekeden çekilen enerjilendirme akımının daha düşük olması beklenir. Gecikmeli anahtarlama akı - zaman grafiği Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5: Gecikmeli Anahtarlama Akı - Zaman Grafiği

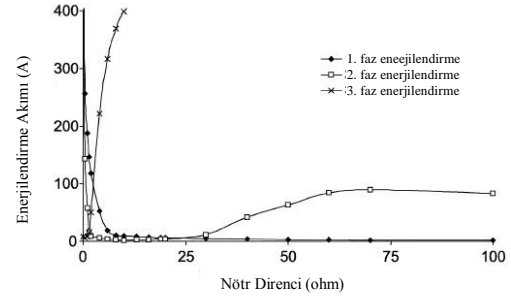
Bu stratejinin uygulanabilmesi için 3 fazı birbirinden bağımsız kontrol edilebilen bir kesici ve yalnızca ilk fazın sürekli hal akı bilgisine ihtiyaç vardır.

3.3. Nötr Noktasına Direnç Bağlamak

Bölüm 3.2'de anlatılan kontrollü anahtarlama prensibi, her bir fazın akılarının üçgen bağlı sargılarda veya 3 bacaklı nüvelerde toplamının sıfır olmasıdır. Bu yüzden yıldız bağlı sargılarda kontrollü anahtarlama yöntemi verimli olarak kullanılamamaktadır. Ancak enerjilendirme akımının dengesiz bir akım olması, transformatör sargısının nötrünün toprağa bağlı olması durumunda enerjilendirme akımının nötrden toprağa doğru da akması demektir. Bölüm 3.1'de anlatılan seri empedans bağlama prensibinden faydalanılarak nötr ile toprak arasına direnç bağlanması benzer bir etki yaratacak ve çekilen enerjilendirme akımını azaltacaktır. Yöntemin performansı

kontrollü anahtarlama yaparak artırılabilir. Ancak uygun bir direnç değeri seçilmesi durumunda kontrollü anahtarlama yapmaya gerek kalmaz [6]. Nötr noktasındaki direncin sürekli işletmede devrede kalmasında herhangi bir sakınca yoktur. Transformatörün faz gerilimleri dengeli olduğu sürece nötrdeki direnç üzerinden bir akım akmayacaktır. Yine de istenirse bu direnç kısa devre edilerek devre dışı bırakılabilir.

Yönteme ilişkin nötrdeki direnç değeri - akım grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



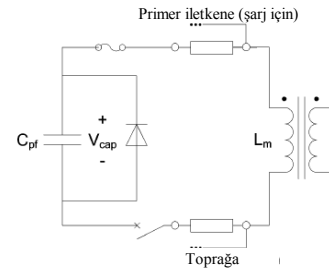
Şekil 6: Enerjilendirme Akımı - Nötr Direnci Grafiği

3.4. Enerjilendirmeden Önce Artık Akı Ayarı Yapmak

Şebeke geriliminden kaynaklı sürekli hal akısını ve transformatörün artık akısını ölçmek ve izlemek pratikte uygulanması zor bir işlemdir. Transformatörün artık akısı, enerjilendirme öncesinde bilinen bir seviyeye çekilirse, kontrollü anahtarlama ile beraber transformatör düşük enerjilendirme akımı çekerek devreye alınabilir [7]. Böylece herhangi bir akı ölçümüne gerek kalmaz. Burada tek gerekli olan transformatör nüvesinin artık akısını arttıracak bir düzenek ile kontrollü bir kesicidir.

Transformatör nüvelerinin üzerinde tutabileceği artık akı miktarı manyetik malzemesinin karakteristiğine göre değişmektedir. Bu değer sık kullanılan nüve malzemeleri için 0,80 - 0,87 p.u. arasındadır. Eğer transformatörün artık akı seviyesi; transformatör enerji altında değilken bilinen bir polarite için (pozitif veya negatif) maksimum seviyesine yükseltilebilirse, transformatörü devreye alacak kesicinin anahtarlama anı otomatik olarak belirlenmiş olur ve bunun için yalnızca şebeke gerilim bilgisi yeterlidir.

Transformatörün artık akısını maksimum değere yükseltebilecek devre Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: Artık Akı Ayar Düzenegi [7]

Şekil 7'de verilen cihaz, transformatör enerji altında değilken transformatörün enerjilendirilecek sargısına bağlanarak transformatör nüvesindeki artık akı miktarını istenen polaritede maksimum değerine getirir. Bu işlemden önce cihaz kondansatör içerdiği için şarj edilmesi gerekir. Transformatör devreye alınmadan önce cihaz sistemden ayrılır ve transformatör devredeyken sistemde bulunmasına gerek yoktur. Transformatör kesicisi, Bölüm 3.2'de de anlatıldığı gibi artık akının şebeke geriliminden dolayı endüklenecek sürekli hal akısına eşit olduğu an kapanacak şekilde anahtarlanır. Yalnız bu yöntem ile 3.2'deki yöntem arasındaki fark burada artık akı ve şebeke sürekli hal akısı bilgisine ihtiyaç duyulmamasıdır. Gerilim – akı arasındaki matematiksel ilişki bilindiğinden ve transformatörün nüvesindeki artık akı bilinen bir polarite için maksimum değerdedir olduğundan anahtarlama anı bulunabilir. Örneğin bir transformatörün nüvesinin tutabileceği maksimum artık akı miktarı 0,87 p.u. ise Şekil 7'deki cihazla artık akı pozitif olarak ayarlandıysa kesici 210°'de; negatif olarak ayarlandıysa 330°'de kapanmalıdır.

Yöntemin performansını incelemek istenirse Bölüm 3.2'deki grafikler bu yöntem için de geçerli olacaktır.

4. Yöntemlerin Karşılaştırılması

Transformatöre seri empedans bağlamak, en yaygın yöntemlerden birisidir. Uygulaması basittir ve uygulama için karmaşık kontrol düzenekleri gerektirmez. Ancak akım sınırlama dirençleri ve reaktörleri pahalı ekipmanlardır. Özellikle bu ekipmanlar sürekli devrede kalacak biçimde dizayn ve imal edilirse fiyatları çok daha fazla artmaktadır.

Kontrollü anahtarlama, son zamanlarda yaygınlaşan bir yöntemdir ve doğru uygulandığında performansı yüksektir. Aynı zamanda ek bir ekipmana ihtiyaç duymaz. Bunun yanında her sisteme kolayca uygulanamaması, hatasız akı ölçümü yapılması gerekliliği ve karmaşık kontrol sistemi gereksinimi uygulanmasını zorlaştıran unsurlardır. Öte yandan yaygın olarak kullanılan AG kesicilerinin 3 fazı ayrı ayrı kontrol edilememesi; yöntemin AG transformatör sargılarında uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum OG için genelde söz konusu olmadığından yöntem OG sistemler için daha kullanışlıdır. Öte yandan bu yöntemin uygulanabilirliği transformatör nüve geometrisi ve sargı bağlantı grubuna bağlı olduğundan kısıtlanmıştır.

Nötr noktasına direnç bağlamak, nüve geometrisi ve/veya bağlantı grubundan dolayı kontrollü anahtarlamının tek başına uygulanamadığı yıldız bağlı transformatörlerde kolayca uygulanabilecek bir yöntemdir. Ek bir önleme gerek kalmayacak kadar enerjilendirme akımını azaltabilmektedir, ancak kontrollü anahtarlama ile beraber kullanılırsa çok daha efektif bir sonuç verebilmektedir. Optimum direnç değerinin seçiminin, anahtarlama stratejisinin, yöntemle ilgili hesaplamaların ve simülasyonların daha detaylı incelenip üzerinde durulması gerekmektedir.

Enerjilendirmeden önce artık akı ayarı yapmak, kontrollü anahtarlama ile aynı temele dayanmaktadır. Bu yöntemin en büyük avantajı akı ölçümü ve izlenmesine gerek duymamasıdır. Bu yöntemde ihtiyaç duyulan cihazda kullanılan ekipmanlar transformatörün mknatslanma akımını

karşılayabilecek özellikte olması gerekir. Bu yüzden bu yöntemin de özellikle güç transformatörlerinde maliyet olarak uygulanabilirliği dikkatli incelenmelidir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada transformatör enerjilendirme akımının tanımı, özellikleri, hesaplanması ve azaltıcı yöntemler hakkında bilgi verilmiş ve yöntemler karşılaştırılmıştır.

Bölüm 3.1'de verilen yöntem en yaygın kullanılan yöntemdir ancak getirdiği fazla maliyet en büyük dezavantajdır. Bölüm 3.2'de verilen yöntem; ek bir ekipmana ihtiyaç duymadığından uygulaması basitmiş gibi görünse de detaylarındaki uygulama zorluklarının da göz önünde bulundurulması gerekir. Bölüm 3.3'te verilen yöntem basit bir efektif bir yöntemdir ancak performansı ve sonuçları ile ilgili detaylı çalışmalar gerektirmektedir. Bölüm 3.4'te verilen yöntem, efektif sonuçlar verebilen basit bir yöntemdir ancak transformatör gücü büyüdükçe kullanılması gereken cihazın imal edilebilirliği ve maliyeti mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

6. Kaynaklar

- [1] Brunke, J. H., & Fröhlich, K. J. (2001). Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching - Part I: Theoretical Considerations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 276-280.
- [2] Jamali, M., Mirzaie, M., & Gholamian, S. A. (2011). Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 17-20.
- [3] Chiesa, N. (2010). *Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation (Doktora Tezi)*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- [4] Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. (2004). *Transformer Engineering (Design and Practice)*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [5] Brunke, J. H., & Fröhlich, K. J. (2001). Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching - Part II: Application and Performance Considerations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 281-284.
- [6] Cui, Y., Abdulsalam, S. G., Chen, S., & Xu, W. (2005). A Sequential Phase Energization Technique for Transformer Inrush Current Reduction - Part I: Simulation and Experimental Results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 943-949.
- [7] Taylor, D. I., Law, J. D., Johnson, B. K., & Fischer, N. (2012). Single-Phase Transformer Inrush Current Reduction Using Prefluxing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 245-252.