

Kesintisiz Güç Kaynakları için 18 Darbeli Bir Doğrultucu

İbrahim SEFA, Necmi ALTIN
Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü
06500 Teknikokullar, ANKARA

ÖZET

Üç fazlı AA/DA dönüştürücüler, kesintisiz güç kaynakları (KGK), değişken hızlı motor sürücüler (DHS) ve yüksek gerilimli DA (YGDA) iletimi gibi yüksek güçlü uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Bu cihazlar yapılarına bağlı olarak şebekeden farklı miktarlarda harmonik içeren akım çekerler. Yaygın olarak kullanılan 6 ve 12 darbeli doğrultucular, IEEE-519, IEC-1000-3-2 gibi uluslararası standartları aktif veya pasif harmonik filtreler kullanmaksızın karşılayamazlar. Ayrıca, bu filtreler sistem maliyetini artırmasının yanında, harmonik problemlerine her şartta çözüm sağlayamazlar. Bu çalışmada, çatal yıldız bağlı oto transformatörle oluşturulan 18 darbeli bir doğrultucu KGK girişinde kullanılmış ve böylelikle dengesiz şebeke koşullarında dahi şebekeden çekilen akım harmoniklerinin uluslararası standartlara uygun olduğu, güç faktörünün 0.98 değerine kadar yükseldiği ve kaliteli bir DA gerilim elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çok darbeli doğrultucu, üç fazlı doğrultucu, 18 darbeli doğrultucu, doğrultucu harmonikleri

An 18 Pulse Rectifier for Uninterruptible Power Supplies

ABSTRACT

Three phase AC-DC converters are widely employed in uninterruptible power supplies (UPS), variable speed drives (VSD) and high voltage DC (HVDC) systems. These devices draw currents, involving different level harmonics, from the grid. The commonly-used 6 or 12 pulse rectifiers cannot meet the international standards of IEEE-519, IEC-1000-3-2 without active or passive filters. Furthermore, despite creating some additional cost, these filters cannot provide a solution for the harmonic problems under all conditions. In this study, an 18 pulse rectifier using star fork connected autotransformer has been proposed for UPS applications. The results obtained from the experiment show that the line current harmonics are decreased, meeting the standards, power factor is increased up to 0.98 and that a high quality DC output is obtained.

Key Words: Multi pulse rectifier, three phase rectifier, 18 pulse rectifier, rectifier harmonics

1. GİRİŞ

Tristör kontrollü doğrultucular DA ve AA motor hız kontrol sistemlerinde, çift çevrimli kesintisiz güç kaynaklarının doğrultucu ve şarj ünitelerinde kullanılmaktadır. Bu doğrultucular, yüksek güçlerde kullanılabilirliği, maliyetlerinin düşük olması ve kontrollerinin kolaylığı nedeniyle tercih edilmişlerdir. Ancak harmonik akımlarının yüksek olması sebebiyle, şebeke üzerinde bozucu etkiler oluşturmaktadırlar. Toplam harmonik bozulma (THD) oranının IEEE-519 ve IEC-1000-3-2 gibi uluslararası standartlarda belirtilen şartlara uyma zorunluluğu, bu doğrultucu uygulamalarına sınırlar getirmekte ve harmonik filtrelerinin kullanımını gerektirmektedir. Günümüzde kullanılan modern AA motor hız kontrol sistemleri ile bağımsız şarj ünitesi olan kesintisiz güç kaynaklarında, eviricinin PWM oranının değiştirilmesi ile DA değişim tolere edilebilmektedir. Kontrollü doğru gerilimin gerekli olmadığı uygulamalarda, kontrolsüz doğrultucu kullanılarak, sıfır geçiş ve tristör ateşleme devrelerine gerek duyulmayacağı için sistem basitleştirilmekte ve harmonik seviyesinde önemli miktarda azalma sağlanmaktadır (1).

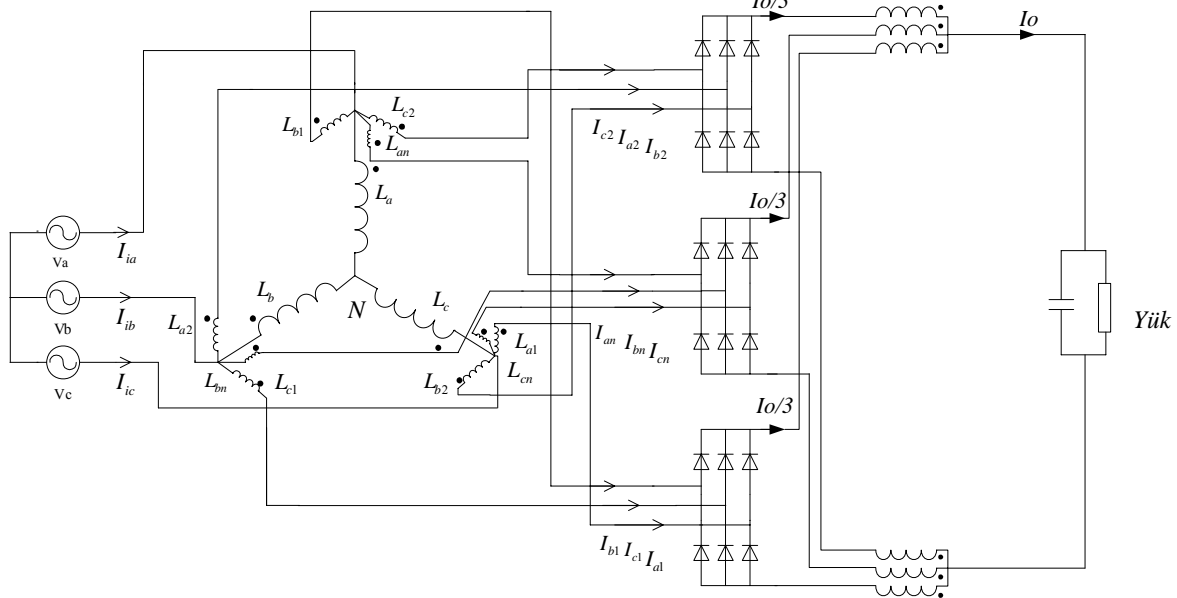
Doğrultucunun şebeke akımına enjekte ettiği harmonikleri azaltmak ve güç faktörünü yükseltmek amacıyla, aktif ve pasif filtreleme yöntemleri geliştirilmiştir. Şebeke tarafına LC filtreler eklenerek harmonik akımları önemli miktarda azaltılabilmektedir. Ancak pasif filtreler, rezonans problemleri, 5. ve 7. veya 11. ve 13. gibi sadece belirli harmonikler için kullanılabilirliği ve ancak belirli bir yük oranında etkili olabilmelelerinden dolayı tercih edilmemektedirler. Aktif filtreler ise çok yüksek maliyetlerinden dolayı her zaman kullanılmazlar (2, 3).

Aktif güç faktörü düzeltme (active PFC) yapabilen doğrultucular, manyetik devre elemanları ile güç anahtarlarının sınırları gibi sebeplerle, genellikle bir fazlı ve bir kaç kW değerlerinde üretilmektedirler. Üç fazlı olanlarda ise, DA seviye şebeke geriliminin yaklaşık iki katı değerine ulaşmaktadır. Yüksek değerdeki bu DA gerilim ile çalışmak zorlaşmakta, ayrıca sistem maliyeti artmaktadır. Üç fazlı aktif doğrultucu kullanılan sistemlerin günümüzdeki ulaşılan güç, en fazla 200 kW'tır (4). Ayrıca şebeke akımı harmoniklerini azaltmak için tasarlanan yüksek frekanslı doğrultucuların

oluşturduğu elektro magnetik etkileşim (EMI) ve radyo frekansı etkileşiminin (RFI) bastırılması gerekli olup, özel tedbirler alınmalıdır (5). Doğrultucunun şebekeden çektiği harmonikleri ek devreler tasarlayarak yok etmek yerine, doğrultucuyu şebekeden harmonik içermeyen akım çekecek şekilde tasarlamak daha doğru bir çözümdür. Özellikle büyük güçlü ve değişken yüklerde ek devreler kurmanın ekonomik olmaması nedeniyle, çok darbeli doğrultucuların kullanılması daha uygun bir çözüm olmaktadır. Darbe sayısı arttıkça doğrultucuların şebekeden çektiği akımın harmonik bileşenleri azalmaktadır (3, 6).

Darbe sayısı ile şebeke akımı harmoniklerinin ilişkisi Eş. 1'de verilmiştir.

$$h = P \cdot n \mp 1 \quad n=1,2,3... \quad (1)$$



Şekil 1. Çatal yıldız bağlı oto transformatörlü 18 darbeli doğrultucu

Bu ifadede P doğrultucunun darbe sayısını, h ise bu doğrultucunun şebekeye enjekte ettiği harmonik derecelerini verir. Böylece 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucuların geliştirilmesi mümkündür. Burada önemli olan standartları karşılayan optimum bir seçimin yapılmasıdır. 18 darbeli doğrultucu ek filtre devrelerine gerek kalmadan IEEE-519 standardına uyabilen en düşük maliyetli çok darbeli doğrultucudur (7, 8).

18 darbeli doğrultucu 20° faz farklı gerilimler ile beslenen üç adet üç fazlı doğrultucunun akım dengelenme bobinleri (IPT) üzerinden bağlanmasıyla oluşur. Şebeke ile doğrultucu arasında izolasyonun gerekmediği uygulamalarda, geliştirilen çok darbeli oto transformatörler ile transformatörün güç oranı, dolayısıyla maliyeti ve boyutları azalmaktadır (7, 9, 10).

Çok darbeli doğrultucuların şebeke gerilim dengesizliği ve gerilim harmoniklerine karşı hassas olduğu, bu durumlarda karakteristik olmayan harmonikler üret-

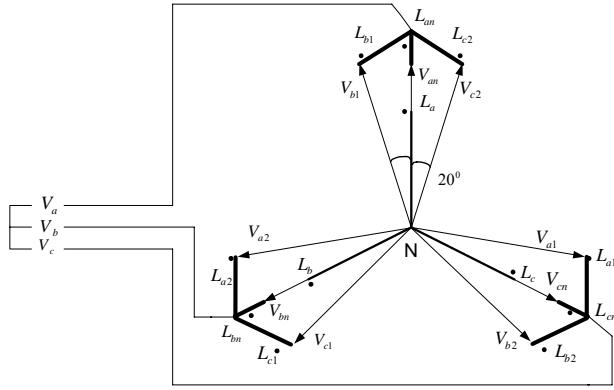
tikleri ve dolayısıyla THD'nin arttığı bilinmektedir. Gerilim dengesizliği akım THD'sini %3-7 civarında artırmaktadır (11, 12). Bu çalışmada oto transformatörlü 18 darbeli doğrultucu tasarlanmış ve %1 gerilim dengesizliği ile %2,5 gerilim THD'si olan şebeke şartlarında test edilmiştir. 18 Darbeli doğrultucunun şebeke akım harmonikleri, güç faktörü, DA gerilim kalitesi incelenmiş, 6 ve 12 darbeli doğrultucu ile karşılaştırılmış ve uluslararası standartlara uygunluğu analiz edilmiştir.

2. 18 DARBELİ OTO TRANSFORMATÖRÜN ANALİZİ

Şekil 1'de DA uçlarında iki adet akım paylaşım bobininin kullanıldığı, 18 darbeli doğrultucunun temel bağlantı şekli görülmektedir.

Burada çatal yıldız bağlı oto transformatör kullanılmıştır. Oto transformatör altı darbeli köprü doğrultucuları 20° 'şer derece faz farkı ile besleyecek şekilde tasarlanmıştır (13). Primer ve sekonder sargıları arasındaki dönüştürme oranları kullanılarak biri şebeke ile aynı fazda (V_{an}), diğerleri $+20^\circ$ (V_{b1}) ve -20° (V_{c2}) faz farklı üç adet üç fazlı gerilim elde edilmektedir. Şebeke ve doğrultucuların besleme gerilimlerinin vektör diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Oto transformatörün L_a , L_b ve L_c primer sargıları yıldız bağlanarak V_a , V_b ve V_c şebeke gerilimleri ile beslenmiştir. L_a , L_{an} , L_{a1} ve L_{a2} sargılarının tamamı nüvenin aynı bacağına ve birbirine kuplajlıdır. Buradan V_{La} , V_{Lan} , V_{La1} ve V_{La2} gerilimlerinin aynı fazda olduğu görülür. Bu durum diğer sargılar içinde geçerlidir. Sekonder sargıların gerilimleri aşağıdaki gibi elde edilmektedir.



Şekil 2. Oto transformatörün vektör diyagramı

$$V_{Lb1} = V_{Lc2} = V_a \cdot \frac{\sin(20)}{\sin(100)} = 0,3473V_a \quad (2)$$

20° faz kaymasını sağlayan sargı dönüştürme oranı, (n_2) ise Eş. 3 ile bulunur.

$$n_2 = \frac{V_a}{V_{Lb1}} = \frac{V_a}{0,3473 \cdot V_a} = 2,88 \quad (3)$$

Bu sonuç, sekonder sipir sayısının primer sipir sayısından 2,88 oranında daha az olduğunu gösterir. Sanal nötr noktası N'e göre sekonder gerilimleri Eş. 4 ile tanımlanır.

$$V_{b1} = V_{c2} = V_a \cdot \frac{\sin(60)}{\sin(100)} = 0,8794 \cdot V_a \quad (4)$$

Eş. 4'den görüldüğü gibi çıkış gerilimleri şebeke geriliminin yaklaşık %88 oranına düşmektedir. Şebeke ile aynı fazda olan çıkış geriliminin değeri de diğer sekonder gerilim değerlerine eşit olmalıdır. Bu nedenle Eş. 5 sağlanmalıdır.

$$V_{Lan} = V_a - 0,8794 \cdot V_a = 0,1206 \cdot V_a \quad (5)$$

Buradan dönüştürme oranı (n_1)'in değeri Eş. 6 ile bulunabilir.

$$n_1 = \frac{V_a}{V_{Lan}} = \frac{V_b}{V_{Lbn}} = \frac{V_c}{V_{Lcn}} = \frac{1}{0,1206} = 8,29 \quad (6)$$

Sekonder terminalleri ile sanal nötr noktası arasındaki gerilim değeri de, Eş. 7 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{an} = 0,8794 \cdot V_a \quad (7)$$

2.1. Oto Transformatör Gücü

Oto transformatöründe tüm sekonder akımlarının şekilleri ve genlikleri aynı olup, Eş. 8 ile hesaplanabilir.

$$I_{an} = I_o \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{I_{an}(t)^2}{I_o} \cdot d\omega t} = 0,272I_o \quad (8)$$

Primer akımlarının etkin değerleri de birbirine eşit olup, Eş. 9 ile tanımlanır.

$$I_a = I_o \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{I_a(t)^2}{I_o} \cdot d\omega t} = 0,078I_o \quad (9)$$

$I_{an}(t)$ ve $I_a(t)$ sırasıyla sekonder ve primer sargı akımlarıdır. Diğer akımlarda aynı yolla hesaplanabilir. Primer akımı yük akımının sadece %7,8'i iken, sekonder akımı yük akımının %27,2'sidir (13). Primer sargıları ile aynı fazda olan sekonder sargıları L_{an} , L_{bn} ve L_{cn} üzerinde düşen gerilim dönüştürme oranı n_1 ile azaltılır. Eş. 6 kullanılarak, Eş. 10 elde edilebilir.

$$V_{Lan} = \frac{V_a}{n_1}, \quad V_{Lan} = 0,121V_a \quad (10)$$

Primer sargılarına göre 20° faz kaydırılmış olan sekonder sargıları L_{a1} , L_{a2} , L_{b1} , L_{b2} , L_{c1} ve L_{c2} üzerinde düşen gerilimler, dönüştürme oranı n_2 ile azaltılır. Eş. 3'den Eş. 11 elde edilebilir.

$$V_{La1} = \frac{V_a}{n_2}, \quad V_{La1} = 0,347V_a \quad (11)$$

Eş. 12 doğrultucu çıkışından alınan gerilimin ortalama değerini vermektedir:

$$V_o = \frac{6}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\sqrt{2}\sqrt{3} \cdot 0,879V_a \cdot \sin(\alpha)) d\alpha t = 2,057V_a \quad (12)$$

Sekonder güç oranı, her sargının akım ve gerilim değerlerinin çarpımlarının toplamı ve Eş. 13 yardımıyla elde edilir.

$$S_2 = 0,323P_o \quad (13)$$

Primer güç oranı Eş. 9 ve Eş. 12'den Eş.14'deki gibi hesaplanabilir.

$$P_o = V_o \cdot I_o \quad S_1 = 0,114P_o \quad (14)$$

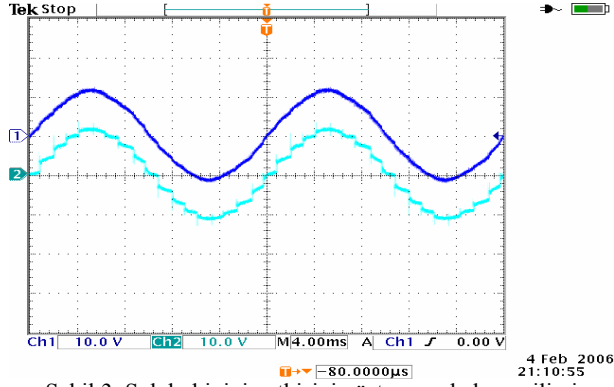
Oto transformatörün güç oranı S_1 ve S_2 'in ortalaması olup, Eş. 15 ile bulunabilir.

$$S = 0,218P_o \quad (15)$$

3. DENEYLERDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Tasarlanan 18 darbeli doğrultucu 30kW gücündeki 10 kademeli yük ile yüklenmiş ve alınan değerler kaydedilmiştir. Deneylerde IXYS VUO 160-16 NO7 tipi 1600 V, 175 A değerlerinde olan diyot modülleri ve 9900 μ F değerinde filtre kondansatörü kullanılmıştır. AA şok bobininin endüktansı 735 μ H olup %5'lik bir değere karşılık gelmektedir. Deneyler esnasında şebeke gerilim THD'si %2,6'dır.

Kullanılan AA şok bobini, şebeke geriliminde çentikler oluşmasını ve bunların olumsuz etkilerini önler. Şekil 3'de şok bobininin öncesi ve sonrasında yapılan ölçümlerde şebeke gerilimleri görülmektedir



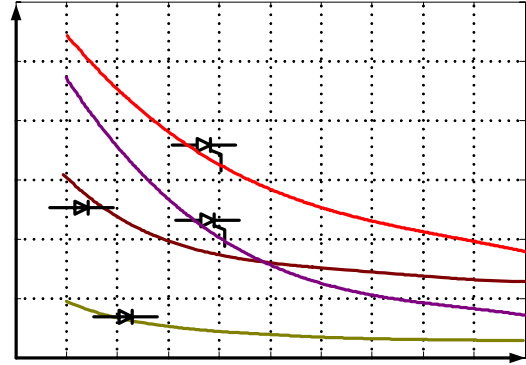
Şekil 3. Şok bobininin etkisini gösteren şebeke gerilimi

Şekil 4'de %50 ve %100 yük koşulları için şebeke gerilimi, şebeke akımı, çıkış DA gerilimi ve DA gerilimi üzerindeki AA bileşen görülmektedir. Çıkış DA gerilimi tam yük durumu için 442 Volt'dur. Bu durumda çıkış doğru gerilimi üzerinde 4,36 Volt AA bileşen ölçülmüştür. Çıkış doğru gerilimdeki AA bileşen oranı %1'den daha düşük olup KGK ve motor kontrol uygulamaları için 6 ve 12 darbeli doğrultuculara göre çok daha iyi bir değerdir.

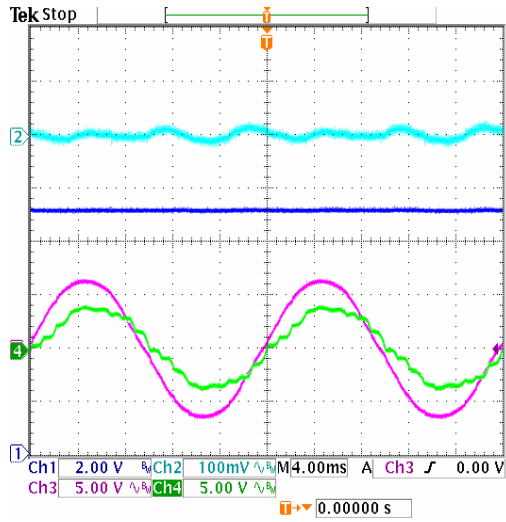
Deneysel olarak gerçekleştirilen, 18 darbeli doğrultucu ile kontrollü ve kontrolsüz 6-12 darbeli

yük şartlarında dahi toplam harmonik bozulum uluslararası sınırlar içerisinde. Harmonik bileşenlerin toplam değeri temel bileşene göre çok düşük olduğundan, çekilen akım dalga şekli yaklaşık sinüsoidaldir.

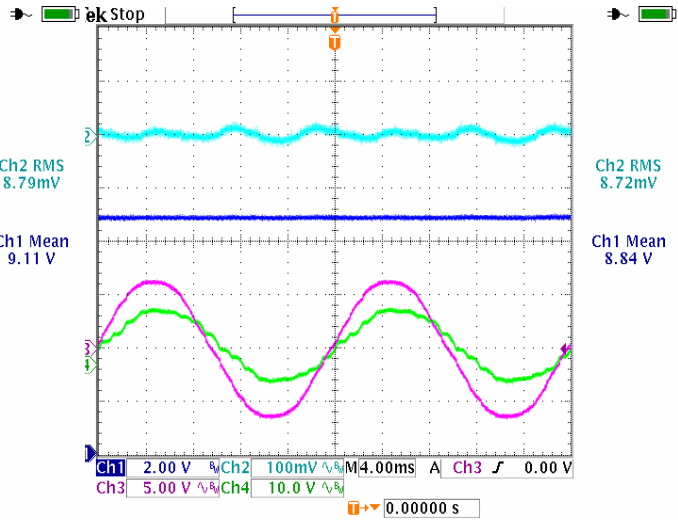
Ayrıca bu eğrilerden, doğrultucunun kontrolsüz olması halinde harmoniklerin %100 yükte %30 oranında, anma gücünden düşük olan değerlerde ise çok daha büyük oranlarda azaldığı görülmektedir.



Şekil 5. Doğrultucuların yük miktarına bağlı olarak şebeke akım harmoniklerinin değişimi



(a)

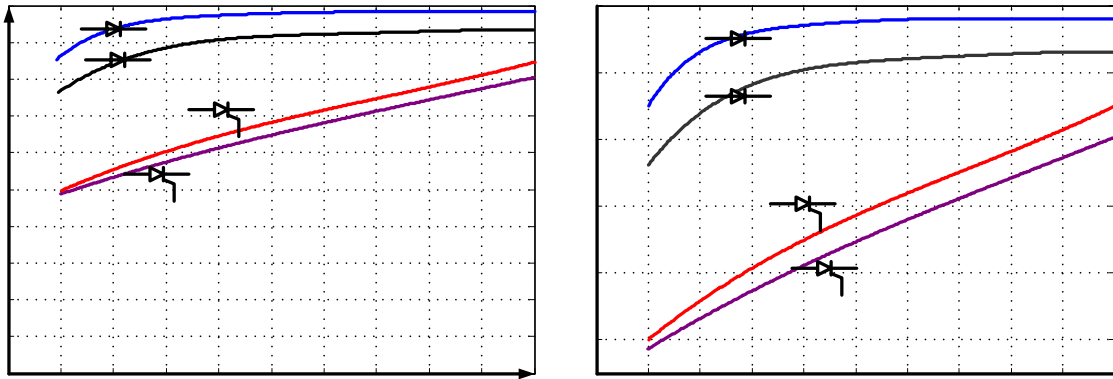


(b)

Şekil 4. (a) %50, (b) %100 yük için, doğrultucu çıkış DA gerilimi (1), DA gerilim üzerindeki AA bileşen (2) şebeke gerilimi (3), şebeke akımı (4),

doğrultucuların yük miktarına göre şebeke akımı THD'si Şekil 5'te, yüke göre güç katsayısı değişimi ise Şekil 6'da verilmiştir. Yük oranı arttıkça şebeke akımındaki harmonikler bütün doğrultucularda azalmakta ancak, sadece 18 darbeli doğrultucuda düşük

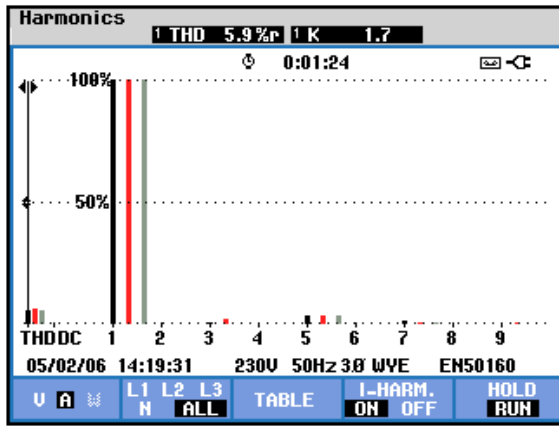
Doğrultucuların kontrollü olması halinde kontrolsüz doğrultucuya göre güç faktörü daha düşük olmaktadır. 6 darbeli için kontrollü doğrultucu güç faktörü 0,8 iken kontrolsüz doğrultucuda 0,92'ye yükselmektedir (Şekil 6).



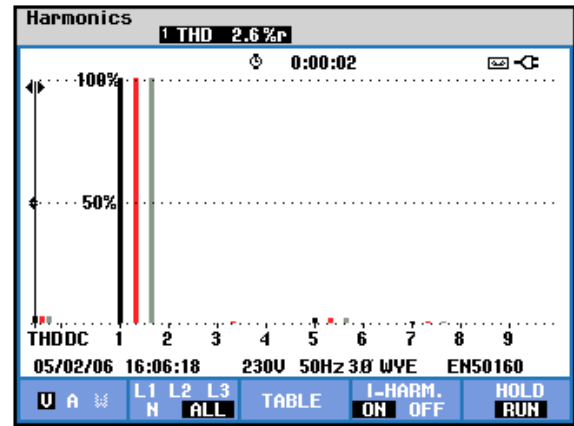
Şekil 6. Doğrultucuların yük miktarına bağlı olarak güç faktörlerinin değişimi

Şekil 7'de tam yük durumunda 18 darbeli doğrultucunun şebeke akım harmoniği ve durumda şebekede bulunan gerilim harmoniği görülmektedir. Denei sırasında şebekede %2,6 gerilim harmoniği bulunduğu ve bunun 5. harmonikten kaynaklandığı görülmektedir. Ancak bu durumda dahi şebeke akım THD'sinin %5,9 olduğu görülmektedir. 18 Darbeli doğrultucu verimi, 88 darbeli transformatör, doğrultucular, AA şok bobini, IPT ve kondansatörler dahil olmak üzere %95,9 olarak gerçekleşmiştir.

%1 dengesiz ve %2,6 harmonik içeren mevcut şebeke koşullarında dahi THD değerinin %5,9 olarak gerçekleştiği Şekil 7 de gösterilmiştir. Bu değer, $I_{s5}/I_L < 20$ şartlarındaki IEEE519 standardının en kötü değeri olan %5'e çok yakındır. Buna ilaveten, şebekenin dengeli ve gerilim harmoniklerinin bulunmadığı durumda ise, standartların her şartta sağlanabileceği anlaşılmaktadır. Şebekeden harmonik içeren akım çekildikten sonra, ek filtre devreleri kullanarak harmonikleri azaltmaya çalışmak yerine, baştan



(a)



(b)

Şekil 7. %100 yük için (a) Üç faz şebeke akımı harmonikleri ve (b) Üç faz şebeke gerilimi harmonikleri

4. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada 18 darbeli çatal bağanlı oto transformatörlü bir doğrultucunun kesintisiz güç kaynaklarına uygulaması incelenmiştir. 18 darbeli doğrultucudaki akım dengeleme bobinlerinin iyileştirilmesi sonucunda, büyük değerli kondansatör gruplarına bağlı olduğu KGK ve DHS gibi kapasitif yüklerde dahi, şebekeden uluslararası standartlara uygun bir akım çektiği görülmüştür. Şebeke tarafında LC pasif filtre gibi başka bir harmonik azaltıcı veya güç faktörü düzeltme devresi kullanılmamıştır.

harmoniklerin oluşmasını engellemek daha doğru bir yöntemdir. Tasarlanan 18 darbeli doğrultucu ile deneylerden elde edilen sonuçlar VSD ve KGK gibi cihazlara uygulanabileceğini göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Tanaka, T., Koshio, N., Akagi, H., Nabae, A., "A Novel Method of Reducing the Supply Current Harmonics of a 12-Pulse Thyristor Rectifier with an Interphase Reactor", Industry Applications Conference, 1996, Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96, Conference Record of the 1996 IEEE, Volume 2, 6-10 Oct. 1996, Page(s):1256-1262, 1996.

2. Chi-Jui, W., Jung-Chen, C., Shih-Song, Y., Ching-Jung, L., Jin-Shyr, Y., Tzong-Yih, G., "Investigation and Mitigation of Harmonic Amplification Problems Caused by Single-Tuned Filters", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Volume 13, Issue 3, July 1998, Page(s):800–806, 1998.
3. Alexa, D., Sirbu, A., Dobrea, D. M., "An Analysis of Three-Phase Rectifiers with Near-Sinusoidal Input Currents", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Volume 51, Issue 4, Aug. 2004, Page(s):884–891, 2004.
4. Chern-Lin, C., Guo-Kiang, H., "A New Passive 28-Step Current Shaper for Three-Phase Rectification", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Volume 47, Issue 6, Dec. 2000, Page(s):1212–1219, 2000.
5. Oguchi, K., Maeda, G., Hoshi, N., Kubata, T, "Coupling Rectifier Systems with Harmonic Cancelling Reactors", *Industry Applications Magazine, IEEE*, Volume 7, Issue 4, July-Aug. 2001, Page(s):53–63, 2001.
6. Sapin, A., Allenbach, P. and Simond J. J., "Modelling of Multi-Winding Phase Shifting Transformers Applications to DC and Multi-Level VSI Supplies", *ICEM 2000 International Conference on Electrical Machines*, Espoo, Finland, 2000, Page(s):465–469, 2000.
7. Skibinski, G., Guskov, N., Zhou, D., "Cost Effective Multi-Pulse Transformer Solutions for Harmonic Mitigation in AC Drives", *Industry Applications Conference, 2003, 38th IAS Annual Meeting*, Conference Record of the Volume 3, 12-16 Page(s):1488–1497, 2003.
8. Kamath, G. R., Benson, D. and Wood, R., "A Novel Autotransformer based 18 Pulse Rectifier Circuit", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 10(5): Page(s):325-337, 2002.
9. Kamath, G. R., Runyan, B. and Wood, R., "A Compact Autotransformer Based 12 Pulse Rectifier Circuit", *IECON'01, The 27th Annual Conference of The IEEE Industrial Electronics Society*, Colorado, Page(s):1344-1349, 2001.
10. Kang, M., Woo, B. O., Enjeti, P. and Pitel, I. J., "Autoconnected–Electronic–Transformer–Based Multipulse Rectifier for Utility Interface of Power Electronic Systems", *IEEE Transaction on Industry Applications*, 35(3): Page(s): 646-656, 1999.
11. Asiminoaei, L., Hansen, S., Blaabjerg F., "Development of Calculation Toolbox for Harmonic Estimation on Multi-Pulse Drives", *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting*, Conference Record of the 2004 IEEE, Volume 2, Page(s):878 - 885, 2004.
12. Hink, K. M., "18 Pulse Drives and Voltage Unbalance", *MTE Corporation Report*, www.mtecorp.com
13. De Seixas, F.J.M., Barbi, I., "A 12 Kw Three-Phase Low THD Rectifier with High Frequency Isolation and regulated DC Output", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Volume 19, Issue 2, Page(s):371-377, 2004