

ÇOK DARBELİ DOĞRULTUCULARDA ÇOK SEVİYELİ AKIM ENJEKSİYONU İLE HARMONİK ELİMİNASYONU

A.Faruk Bakan (*), Halit Zengince (**), Özgün Girgin

* Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Müh. Bölümü 34349 Beşiktaş, fbakan@yildiz.edu.tr

** Esis Enerji ve Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş., zengince@esis.com.tr

ÖZET

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan altı darbeli doğrultucular, özellikle yüksek güçlerde şebekede bozucu etkiler oluşturmaktadır. IEEE-519 ve IEC-61000-3-2 gibi uluslararası standartlarda şebekeden çekilen akımın toplam harmonik distorsiyonu (THDi) için tanımlanan limitleri sağlamamaktadır. Endüstriyel uygulamalarda enerji kalitesi yüksek doğrultucular her geçen gün daha önemli hale gelmektedir. Altı darbeli doğrultucuda THDi değeri %30 civarındadır. Tristörlü doğrultuculara THDi değerini azaltmak için darbe yani faz sayısı dolayısıyla transformatör ve tristör sayısının artırılması gerekmektedir. Altı darbeli doğrultucuların paralel veya seri bağlanması ile 12, 18, 24, 30, v.b. darbeli doğrultucular elde edilerek hem çıkış gerilimindeki dalgalanma hem de THDi değeri azaltılmaktadır. THDi değerinin düşürülmesi ve çıkış gerilimindeki dalgalanmanın azaltılması amacıyla kullanılan 12 darbeli doğrultucuda THDi değeri %15 civarındadır. Çok fazlı transformatör üretimindeki zorluklar ve tristör sayısındaki artışın sistem maliyet ve karmaşıklığını artırması nedeniyle faz sayısının daha fazla artırılması az tercih edilen bir yöntemdir. THDi değerinin azaltılması için 6 ve 12 darbeli doğrultuculara pasif filtre kullanılmaktadır. Bu filtrelerin maliyetleri sistem içinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada çok seviyeli akım enjeksiyon yöntemini (MLCR) kullanan çok darbeli dönüştürücülerin şebekeden çektiği akımlar ve THDi değerleri incelenmiştir. 6 ve 12 darbeli doğrultucular ile karşılaştırıldığında MLCR yöntemi ile gerçekleştirilen çok darbeli doğrultucuların düşük THDi değeri ve filtre maliyetlerini düşürmesi açısından oldukça avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Kalitesi, THDi, Çok Darbeli Kontrollü Doğrultucular, Çok Seviyeli Akım Enjeksiyonu (MLCR).

1. Giriş

Güç elektroniği dönüştürücüleri arasında en çok kullanılan dönüştürücü türü olan üç fazlı kontrollü doğrultucular, DC gerilim regülatörü, akümülatör şarjı, motor kontrolü, elektrolizle kaplama, kimyasal prosesler, dc ark fırınları v.b. gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal komütasyonlu dönüştürücüler grubuna giren kontrollü doğrultuculara genellikle güç elemanı olarak tristörler kullanılmaktadır. Güç elemanları arasında gerilim ve akım dayanımı açısından en yüksek değerlere sahip olan tristörler, doğal komütasyonlu

dönüştürücülerde ve özellikle yüksek güçlerde ekonomik ve dayanıklı olması nedeniyle diğer güç elemanları yerine tercih edilmektedir. Düşük güçlerde, klasik doğrultucular yerine IGBT güç elemanları ve yüksek frekans transformatörü içeren modern AC/DC dönüştürücüler kullanılmaktadır. Güç yoğunluğu, verim ve enerji kalitesi açısından çok iyi özelliklere sahip olan bu dönüştürücüler, klasik dönüştürücülere göre oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Modern doğrultucu sistemlerinde arıza oluşma riski tristörlü doğrultuculara göre daha yüksektir. Ayrıca modern doğrultucu sistemlerinde belirli bir güce kadar çıkılabilmektedir. Bunun ilk nedeni IGBT güç elemanlarındaki sınırlamalar, ikinci nedeni ise ferit malzemeden oluşan yüksek frekans güç transformatörünün yüksek güçlerde gerçekleştirilme zorluğudur. Bu nedenlerden dolayı genellikle endüstrideki doğrultucu ihtiyacı modern doğrultucu sistemleri yerine klasik doğrultucu sistemleri ile karşılanmaktadır.

Bir kontrollü doğrultucuda kullanılan tristör sayısına göre çıkış gerilimindeki darbe sayısı değişmektedir. 6 adet tristör kullanılarak gerçekleştirilen 6 darbeli kontrollü doğrultucu, basit yapısı ve dayanıklı olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu doğrultucuda izolasyon gerekli olduğunda ve gerilim uyumu açısından üç fazlı bir transformatör kullanılmaktadır. Doğrultuculara şebekeden çekilen harmonik güç ciddi problemlere yol açmaktadır. Ayrıca faz kontrol açısının artması ile şebekeden çekilen reaktif güç artmaktadır. Tristörlü doğrultuculara THDi değerinin azaltılması IEEE-519, IEC-61000-3-2 gibi uluslararası standartlara uygunluk ve enerji kalitesi açısından son derece önemlidir [2]. 6 darbeli doğrultucuda THDi değeri %30 civarındadır. THDi değerinin düşürülmesi ve çıkış gerilimindeki dalgalanmanın azaltılması amacıyla 12 darbeli doğrultucular kullanılmaktadır. Bu doğrultuculara, aralarında 30° faz farkı olan iki adet üç fazlı gerilim kaynağı ve 12 adet tristör mevcuttur. 12 darbeli doğrultucuda THDi değeri %15 civarındadır. Tristörlü doğrultuculara THDi değerini daha da azaltmak için darbe yani faz sayısını dolayısıyla transformatör ve tristör sayısı arttırmak gerekir. Çok fazlı transformatör üretimindeki zorluklar ve tristör sayısındaki artışın sistem maliyet ve karmaşıklığını artırması nedeniyle THDi değerinin azaltılması için faz sayısının artırılması genellikle tercih edilmemektedir. Bunun yerine pasif filtreler kullanılmaktadır. Pasif filtre elemanlarının doğal bir parçası olan kondansatörler ayrıca reaktif güç

kompanzasyonuna da katkı sağlamaktadır. Üç fazlı doğrultucularda THDi değerini düşürmek için literatürde bir çok yöntem geliştirilmiştir [3-19]. Son yıllarda yüksek akımlı redresörlerde çok fazlı DC kıyıcı kullanımı da dikkat çekmektedir. DC kıyıcı kullanıldığında reaktif güç kompanzasyonu ihtiyacı ortadan kalkmaktadır [7],[9].

Harmoniklerin bastırılması için aktif filtre de kullanılabilir [4]. Aktif filtreler yüksek maliyet ve karmaşık yapıları nedeniyle eleştirilmektedir [12]. Doğrultucularda ilave aktif ve pasif elemanlar kullanılarak harmonikler azaltılabilmektedir [3],[11],[17]. Fakat bu yöntemler yüksek güçlerde kullanım açısından oldukça karmaşıktır.

Literatürdeki çalışmalar arasında 12 darbeleri bir doğrultucuya m adet tristör ve kuplajlı bir bobin ilave edilerek gerçekleştirilen 12xm darbeleri dönüştürücü oldukça ilgi çekicidir [13]. Bu yöntem çok seviyeli akım enjeksiyon yöntemi (MLCR) olarak da bilinmektedir. Bu dönüştürücünün THDi değerinin son derece düşük olması filtre maliyetlerinin düşürülmesi açısından oldukça avantajlı görülmektedir.

2. Çok Darbeleri Doğrultucular ve Harmonik Standartları

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan diyotlu ve tristörlü doğrultucuların şebekeden çektiği akımlar IEEE-519 harmonik standartlarını sağlamamaktadır [1,2]. IEEE-519 standardında güç elektroniği dönüştürücüleri ve lineer olmayan yüklerin şebekeye verebilecekleri harmonik akım limitleri yüzdesel olarak Tablo 1'de gösterilmiştir.

Çok darbeleri doğrultucular $n \times m \pm 1$ nolu harmonik akımlar üretmektedir. Burada n tamsayı ve m doğrultucudaki darbe sayısıdır. Örneğin 6 darbeleri bir doğrultucuda 5, 7, 11, 13, 17, 19... nolu harmonikler bulunmaktadır. 6 darbeleri bir doğrultucuda 5. harmoniği filtre etmek için 250 Hz'e ayarlanmış L ve C elemanları kullanılır. Her bir harmonik için ayrı ayrı filtre kullanılabilir. Filtre elemanlarının sayısını azaltmak için özellikle yüksek değerli harmoniklerde örneğin 17 ve 19 nolu harmoniklerin bastırılması için filtrenin merkez frekansı 18. harmoniğe denk getirilerek, 17 ve 19 için tek bir filtre kullanılır. Filtrenin toplam C değerine göre şebekeden çekilen toplam kapasitif güç değişir. Uygulamalarda doğrultucuların şebekeden çektiği reaktif gücün kompanzasyonu için genellikle ayrı bir kompanzasyon panosu kullanılmaktadır. Özellikle geniş bir aralıkta

faz kontrol açısının ayarlandığı kaplama amacıyla kullanılan doğrultucularda şebekeden çekilen çok yüksek reaktif güçler için kompanzasyon yapılması zorunlu hale gelmektedir.

Doğrultucuların THDi değeri ve çıkış gerilimindeki dalgalanma miktarı darbe sayısının artması ile azalmaktadır. 6 darbeleri doğrultucuların paralel veya seri bağlanması ile 12, 18, 24, 30, v.b. darbeleri doğrultucular elde edilerek çıkış gerilimindeki dalgalanma ve THDi değeri azaltılmaktadır. 6 darbeleri iki doğrultucu kullanılarak gerçekleştirilen 12 darbeleri doğrultucuda iki transformatör veya iki çıkışlı tek transformatör kullanılır. Transformatör faz gerilimleri arasında 30° faz farkı mevcuttur. Bu doğrultucunun akımı 6 darbeleri doğrultucuya göre sinüsoidal daha yakındır. Ayrıca 12 darbeleri doğrultucuda çıkış gerilimi 6 darbeleri doğrultucuya göre daha düzdür. Yüksek güçlerde yaygın olarak kullanılan bu doğrultucuda, 11 ve 13. harmonikler için genellikle ayrı ayrı pasif güç filtreleri kullanılmakta, kalan harmonikler yüksek geçiren filtre ile bastırılmaktadır.

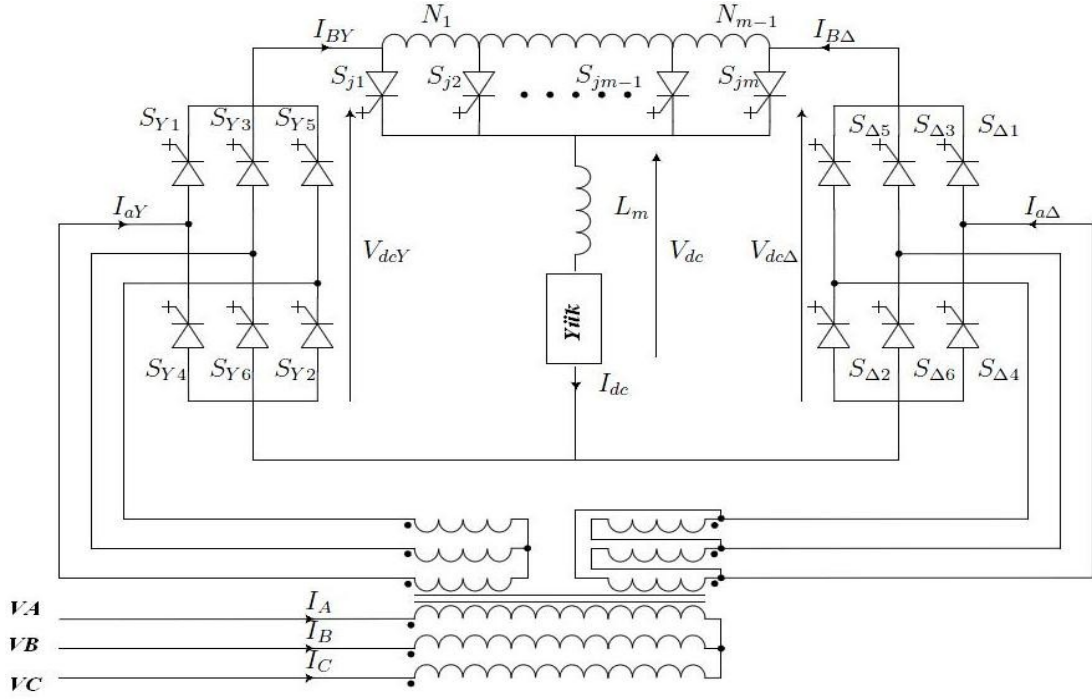
24 darbeleri doğrultucu birbirinden 15° faz farkı olan 4 faz gerilimi, 48 darbeleri doğrultucu birbirinden 7.5° faz farkı olan 8 faz gerilimi kullanır. Darbe sayısının 48'den fazla olması da mümkündür. Darbe sayısının artırılması ile tristör sayısı artmakta ve doğrultucu karmaşık hale gelmektedir. Ayrıca şebeke geriliminin THDi değerinin yüksek olması durumunda, akımın THDi değeri de artmaktadır. Bu durumda darbe sayısının artırılmasının THDi değerini azaltmaya bir katkısı olmamaktadır.

12 darbeleri bir doğrultucuda kuplajlı endüktans ve m adet ilave tristör kullanılarak 12xm darbeleri doğrultucu gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem çok seviyeli akım enjeksiyon yöntemi (MLCR-Multi Level Current Reinjection) olarak adlandırılır. MLCR doğrultucunun genel şeması Şekil 1'de ve MLCR doğrultucuda tristör tetikleme sinyallerinin üretilmesi Şekil 2'de gösterilmiştir. MLCR yöntemi ile 24, 36 ve 48 darbeleri doğrultucuların gerçekleştirilmesi için sırasıyla 2,3 ve 4 adet ilave tristör gereklidir. Bu doğrultuculardaki THDi değeri darbe sayısının artması ile düşmektedir. Tristörlerin hızları darbe sayısının artırılmasında sınırlama oluşturmaktadır.

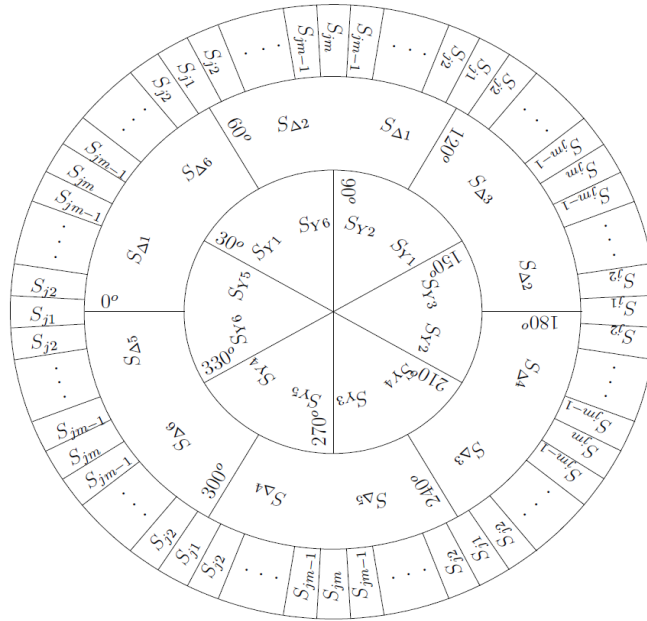
6 ve 12 darbeleri doğrultucularda filtre elemanları kullanılarak $THDi < 5\%$ şartının sağlanması mümkündür. MLCR yönteminde ise filtre elemanlarına gerek duymadan veya çok az filtre elemanı ile bu şart sağlanabilmektedir.

Tablo 1. IEEE 519 harmonik limitleri

I_{sc}/I_1	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	THDi (%)
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0



Şekil 1. MLCR yöntemi kullanılan doğrultucu [13].

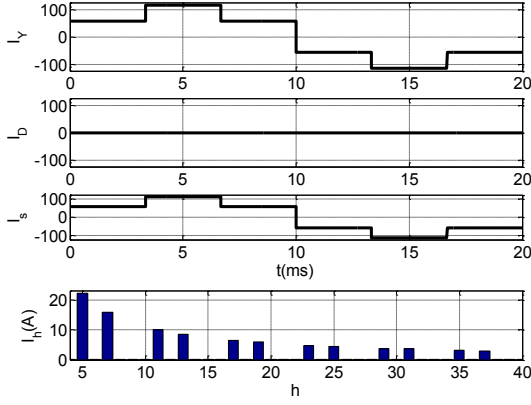


Şekil 2. MLCR yönteminde tetikleme sinyallerinin üretilmesi [13].

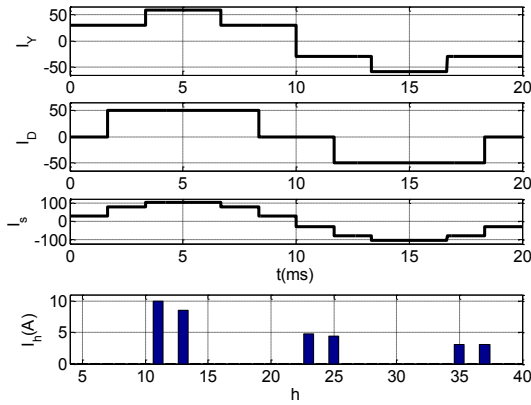
3. Çok Darbeli Doğrultucuların Şebeke Harmonikleri Açısından Karşılaştırılması

MLCR yöntemi kullanılan çok darbeli doğrultucular ile 6 ve 12 darbeli doğrultucuları karşılaştırmak üzere MATLAB programı ile simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlarda giriş gerilimi 220V, frekans 50Hz, çıkış gerilimi 110V ve çıkış akımı 100A seçilmiştir. Transformör dönüştürme oranı $220V \pm \%10$ giriş geriliminde çalışacak şekilde belirlenmiştir. 6 darbeli doğrultucuda Y/Y transformör kullanılmıştır.

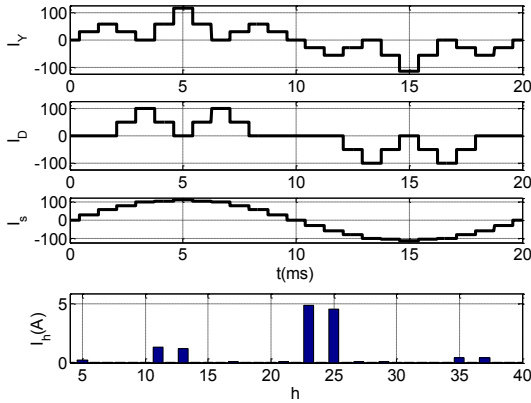
12 darbeli doğrultucuda Δ/Y ve Y/Y transformörler ile beslenen iki adet 6 darbeli doğrultucu ve akım dengeleme endüktansı bulunmaktadır. Doğrultucuları besleyen Y ve Δ transformör akımları (I_Y , I_D) ile şebekeden çekilen akım (I_S) değişimleri, şebekeden çekilen akımın harmonik spektrumu (I_h) ve THDi değerleri simülasyon ile elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları Şekil 3-7'de ve bu sonuçların özeti Tablo 2'de verilmiştir.



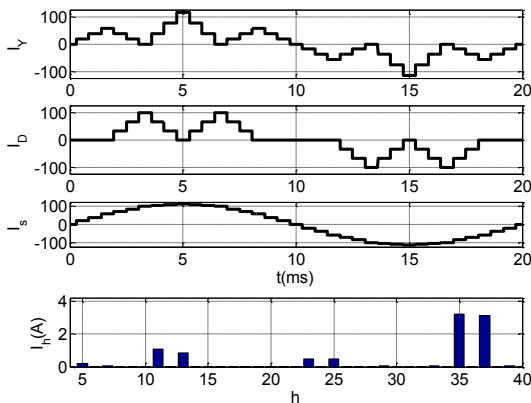
Şekil 3. 6 darbeleri doğrultucunun şebekeden çektiği akımlar ve harmonikler.



Şekil 4. 12 darbeleri doğrultucuda trafo akımları, şebekeden çekilen akımlar ve harmonikler.

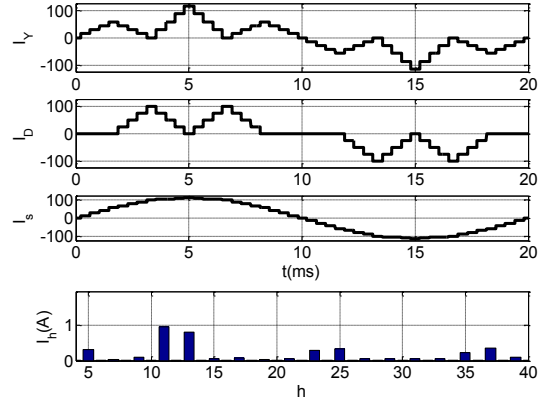


Şekil 5. 24 darbeleri MLCR doğrultucuda trafo akımları, şebekeden çekilen akımlar ve harmonikler.



Şekil 6. 36 darbeleri MLCR doğrultucuda trafo akımları,

şebekeden çekilen akımlar ve harmonikler.



Şekil 7. 48 darbeleri MLCR doğrultucuda trafo akımları, şebekeden çekilen akımlar ve harmonikler.

Tablo 2’de görüldüğü gibi 6 darbeleri bir doğrultucuda çok yüksek değerlere sahip 5,7,11,13.. nolu düşük harmonikler bulunmaktadır. Bu harmoniklerin bastırılması için gereken pasif filtrenin reaktif gücü oldukça yüksektir. Şekil 3’te görüldüğü gibi 6 darbeleri doğrultucuda bir tristörden geçen akım diğer doğrultuculardaki tristörlere göre iki kat fazladır. 12 darbeleri doğrultucuda 11 ve 13 nolu harmoniklerin değeri oldukça yüksektir. MLCR yöntemi kullanılan 24 ve 36 darbeleri doğrultucularda az miktarda filtreleme yapılarak THD<5% şartı sağlanabilir. 48 darbeleri doğrultucuda ise harmonik filtre kullanmaya gerek olmadığı görülmektedir.

Tablo 2. Simülasyonu yapılan çok darbeleri doğrultucularda THDi ve harmonik akım değerleri

Darbe Sayısı (m)	6	12	24	36	48
THDi (%)	31.078	15.213	7.764	5.249	4.005
I ₅ (A)	22.127	0	0.196	0.189	0.302
I ₇ (A)	15.851	0	0	0	0
I ₁₁ (A)	10.043	10.007	1.340	1.080	0.964
I ₁₃ (A)	8.547	8.541	1.167	0.851	0.803
I ₁₇ (A)	6.489	0	0	0	0
I ₁₉ (A)	5.856	0	0	0	0
I ₂₃ (A)	4.789	4.764	4.885	0.461	0.287
I ₂₅ (A)	4.457	4.460	4.582	0.497	0.332
I ₂₉ (A)	3.792	0	0	0	0
I ₃₁ (A)	3.599	0	0	0	0
I ₃₅ (A)	3.137	3.116	0.409	3.189	0.235
I ₃₇ (A)	3.020	3.026	0.422	3.105	0.359

Çok darbeleri doğrultucu seçiminde filtre elemanları ile birlikte toplam maliyet ve karmaşıklık kriterleri ön plana çıkmaktadır. Filtre elemanları aynı zamanda doğrultucu sistemin bir parçası olarak düşünülmelidir. Şebeke ile filtre elemanları arasında rezonans oluşması önlenmeli ve tüm çalışma aralığında reaktif güç kompanzasyonu sağlanmalıdır. Çok darbeleri doğrultucunun gerçekleştirme zorluğu (tristör sayısı ve tetikleme devresi sayısı, hacim, kontrol devresi karmaşıklığı v.b.) aynı zamanda güvenilirlik açısından da değerlendirilmelidir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, şebekeden çekilen akım harmonikleri açısından çok darbeli doğrultucular karşılaştırılmıştır. Özellikle çok seviyeli akım enjeksiyon (MLCR) yöntemi kullanılan 48 darbeli doğrultucu, çok darbeli diğer doğrultucular ile karşılaştırıldığında oldukça avantajlı bulunmuştur. Klasik 48 darbeli doğrultucuda 48 adet faz gerilimi ve 48 adet tristör gereklidir. MLCR yönteminde ise 16 tristör ve iki transformatör kullanılarak aynı darbe sayısı ve harmonik standartlar sağlanabilmektedir.

6 ve 12 darbeli doğrultucularda filtre kullanılarak harmonik standartlarının sağlanması mümkündür. Filtre kullanımı sistemin hacim ve maliyetini artırması ve kayıp oluşturması açısından dezavantaj olarak görülmektedir. Ayrıca filtre elemanlarının güç sisteminde rezonans oluşturma ihtimali de bulunmaktadır.

Yapılan incelemeler sonucunda özellikle yüksek enerji kalitesi istenen uygulamalarda çok seviyeli akım enjeksiyon yöntemi kullanılan 48 darbeli MLCR doğrultucunun diğer yöntemler içinde tercih edilebileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] D. E. Rice, "A detailed analysis of six-pulse converter harmonic currents," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 2, pp. 294–304, Mar./Apr. 1994.
- [2] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard 519, 1992.
- [3] Kim S., Enjeti P.N., Packbush P., Pitel I.J.: 'A new approach to improve power factor and reduce harmonics in a three phase diode rectifier type utility interface', IEEE Trans. Ind. Appl., 1994, 30, (6), pp. 1557–1564
- [4] Raju N.R., Venkata S.S., Kagalwala R.A., Sastry V.V.: 'An active power quality conditioner for reactive power, harmonics compensation'. Proc. IEEE PESC'95, 1995, pp. 209–214.
- [5] 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.
- [6] Choi S., Enjeti P.N., Lee H.H., Pitel I.J.: 'A new active interphase reactor for 12-pulse rectifiers provides clean power utility interface', IEEE Trans. Power Electron., 1996, 32, pp. 1304–1311
- [7] P. S. Maniscalco, V. Scaini, and W. E. Veerkamp, "Specifying DC chopper systems for electrochemical applications," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 3, pp. 941–948, May/June 2001.
- [8] M. Mazaheri, V. Scaini, and W. E. Veerkamp, "Cause, effects and mitigation of ripple from rectifiers," in Proc. IEEE PCIC, 2002, pp. 85–91.
- [9] V. Scaini and T. Ma, "High current DC choppers in the metals industry," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 8, no. 2, pp. 26–33, Mar./Apr. 2002.
- [10] 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.
- [11] S. Fukuda and M. Ohta, "An auxiliary-supply-assisted twelve-pulse diode rectifier with reduced input current harmonics," in Proc. IEEE Inst. Aeronaut. Sci. Annu. Meet., Oct. 2004, vol. 1, p. 452.
- [12] J. R. Rodriguez, J. Pontt, C. Silva, E. P. Wiechmann, P. W. Hammond, F. W. Santucci, R. Alvarez, R. Musalem, S. Kouro, and P. Lezana, "Large current rectifiers: State of the art and future trends," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 3, pp. 738–746, Jun. 2005.
- [13] Lasantha Bernard Perera, "Multi Level Reinjection AC/DC Converters for HVDC", thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. February 2006.
- [14] Peterson M., Singh B.N.: 'Modeling and analysis of multipulse uncontrolled/controlled ac -dc converters'. Proc. IEEE ISIE'06, 2006, pp. 1400–1407
- [15] Gomes de Freitas, L.C. Simoes, M.G. Canesin, C.A. de Freitas, L.C., "Performance Evaluation of a Novel Hybrid Multipulse Rectifier for Utility Interface of Power Electronic Converters" Industrial Electronics, IEEE Transactions on, pp 3030 - 3041 , Volume: 54 Issue: 6, Dec. 2007.
- [16] Eltamaly, A.M., "A Modified Harmonics Reduction Technique for a Three-Phase Controlled Converter", Industrial Electronics, IEEE Transactions on pp 1190-1197, Volume: 55 Issue: 3, March 2008.
- [17] Fukuda, S. Ohta, M. Iwaji, Y., "An Auxiliary-Supply-Assisted Harmonic Reduction Scheme for 12-Pulse Diode Rectifiers", Power Electronics, IEEE Transactions on pp 1270 - 1277 , Volume: 23 Issue: 3, May 2008.
- [18] Harmonics, Fukuda, S. Hiei, I., "Auxiliary Supply-Assisted 12-Pulse Phase-Controlled Rectifiers With Reduced Input Current", Industry Applications, IEEE Transactions on pp 205 - 212 , Volume: 44 Issue: 1, Jan.-Feb. 2008.
- [19] Shiyan Yang Fangang Meng Wei Yang, "Optimum Design of Interphase Reactor With Double-Tap Changer Applied to Multipulse Diode Rectifier", Industrial Electronics, IEEE Transactions on pp 3022 - 3029 , Volume: 57 Issue: 9, Sept. 2010.