

Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör için Uygulanan Kontrol Yöntemlerini Literatür İncelemesi

Review of The Control Strategies Applied to Magnetically Controlled Shunt Reactor

Mehmet TUMAY¹, Tuğçe DEMİRDELEN², Selva BAL³, Rahmi İlker KAYAALP⁴, Burcu DOĞRU⁵, Mahmut Aksoy⁶

^{1,2,4,5}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Çukurova Üniversitesi

Adana, Turkey

mtumay@cu.edu.tr, tdemirdelen@cu.edu.tr, ikayaalp@cu.edu.tr, burcu_dogru@windowslive.com

³Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İskenderun Teknik Üniversitesi Hatay, Turkey
selva.bal@iste.edu.tr,

⁶Best Transformer, Turkey
mahmut.aksoy@besttransformer.com

Özet

Günümüzde, manyetik kontrollü şönt reaktörler(MCSR) güç kalitesi problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. MCSR, sistem reaktif gücünün azaltılması, yüksek süper/özel yüksek voltajlı elektrik şebekesi gerilim kontrolü, güç frekansının bastırılması, aşırı gerilimi düzenleme, jeneratörün uyarımını elimine etme, iletim hattının güç şarjını dinamik olarak kompanze etme, ikinci derece ark akımını bastırma, sistem rezonansını engelleme ve bunlar gibi sistemin güç kalitesi problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, MCSR için uygulanan kontrol yöntemlerin literatür incelenmesi ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Bu çalışmada, MCSR teknolojisinin durumu ve güç kalitesi sorunları ile ilgili uygulama mühendisleri, araştırmacıları üzerinde geniş bir perspektif sunmayı amaçlamıştır. Konuyla ilgili 50'den fazla araştırma yayınlarının bir listesi de bir hızlı başvuru için eklenmiştir.

Abstract

Nowadays, magnetically controlled shunt reactors (MCSRs) have been widely used to solve the problems of the power quality. MCSR can simplify the system reactive power and voltage control in the super / special high-voltage power grid, suppress power frequency and operation over voltage, eliminating generator self excitation, dynamically compensate charging the power in a transmission line, suppress the secondary arc current, damping system resonance and so on. This paper presents a comprehensive review of MCSR control strategies. It is aimed at providing a broad perspective on the status of MCSR technology to the researchers and the application engineers dealing with power quality issues. A list of more than 50 research publications on the subject is also appended for a quick reference.

1. Giriş

Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ile birlikte kullanımı giderek yaygınlaşan doğrusal olmayan yükler sebebi ile güç kalitesi problemleri artmıştır. Harmonikler, gerilim dalgalanmaları, gerilim çökmeleri, gerilim sıçramaları, anlık gerilim kesintileri gibi güç sistemlerinde meydana gelebilecek akım veya gerilim bozulmaları, elektrik enerjinin düşük kaliteli olmasına, neden olmaktadır. Bu güç kalitesi bozulmaları; tüketicinin kullandığı cihazların arızalanması, endüstride kullanılan akım veya gerilim dengesizliğine duyarlı mikroişlemciler gibi bazı cihazların zarar görmesi gibi sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir.

Enerji iletim/dağıtım sistemlerinde reaktif güç kayıplarının minimuma indirmek için reaktörler kullanılır. Doyumlu reaktörler; manyetik kontrollü şönt reaktör (MCSR) ve ortogonal-akı kontrollü reaktör olarak iki sınıfa ayrılabilir [1]. Bununla birlikte, ayarlı şönt reaktörlerin önemli bir türü olarak, MCSR' ler sürekli ayarlanabilir kapasitesi, düşük harmonik ve yüksek kontrol özellikleriyle ekstra yüksek gerilim (EHV)/aşırı yüksek gerilim (UHV) şebekelerinde reaktif güç kontrolü için yaygın olarak kullanılırlar. MCSR, sabit reaktör ve tristör kontrollü reaktörlere (TCR) göre, aktif güç kayıplarını azaltması, yük altında kademeli transformatörlerdeki anahtarlama sayısını azaltarak işletme güvenliğini artırması, sistem dalgalanmasını düzeltmesi, esnek olması gibi avantajlara da sahiptir [2-5].

MCSR' ler literatürde güç kalitesi cihazı olarak yer alırlar [1-51]. MCSR genellikle EHV/UHV iletim hatlarında aşırı gerilimi bastırmak [6-20], sekonder ark akımını azaltmak [3, 8, 21, 22], gerilim kararlılığını [1, 4, 6, 7, 20, 23-26] ve reaktif güç kompanzasyonunu [1, 4-5, 7, 10-11, 13-14, 17, 20, 23-37] sağlamak, gerilim/akım harmoniklerini azaltmak [8, 11, 18, 24, 30, 38] için kullanılır. Dolayısıyla, MCSR' nin güç

kalitesini artırmak için çok-fonksiyonlu bir cihaz olduğu görülmektedir [4].

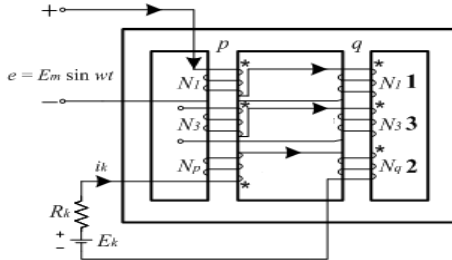
Bu çalışmada, MCSR için uygulanan kontrol yöntemlerin literatür incelenmesi ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Bu çalışmada, MCSR teknolojisinin durumu ve güç kalitesi sorunları ile ilgili uygulama mühendisleri, araştırmacıları üzerinde geniş bir perspektif sunmayı amaçlamıştır. Konuyla ilgili 50'den fazla araştırma yayınlarının bir listesi de bir hızlı başvuru için eklenmiştir.

2. MCSR'nin Çalışma Prensibi

MCSR' nin çalışma prensibi transformatörlerdeki manyetik akı prensibine benzemektedir. MCSR, manyetik yükseltici olarak, manyetik doyumun kontrolü kavramına göre çalışır [2, 5, 36]. MCSR manyetik valflerin (kademelerin) olduğu demir nüveden, AA kontrollü çalışma sargılarından ve DC kontrollü sargılardan oluşur [36, 39].

MCSR' nin temel yapısı Şekil-1'de gösterilmiştir. Demir nüve, iki paralel bacak ve iki boyunduruktan oluşur. [40]. AA ve DA sargılar sayesinde, demir nüvede AA ve DA akı oluşur [1]. Çalışma sargıları ve kontrol sargıları nüvenin iki bacağına yer alır [40]. MCSR nominal akımda çalıştığında, reaktörün bacaklarındaki manyetik valfler (ya da kademeler) aşırı doyuma gider [36].

MCSR' de manyetik doyumun kontrolü için, hem sargı bağlantıları hem de mıknatıslanma karakteristikleri önemlidir. MCSR' nin mıknatıslanmasında DA ve AA akımın kontrolü söz konusudur [2]. DA kontrol akımı arttığında, çalışma akımı da artar. Kontrol (uyartım) akımı değiştiğinde, nüvenin manyetik doyum seviyesi (β) de değişir. Dolayısıyla, nüvenin manyetik geçirgenliği değişir ve MCSR' nin empedansı ayarlanır [36, 41].



Şekil 1: Tek fazlı MCSR'nin nüve yapısı ve sargı düzeni (1) çalışma sargıları, (2) kompanzasyon sargıları, (3) kontrol sargıları

3. Kontrol Yöntemine Göre Sınıflandırma

MCSR'nin kapasite kontrolü, DA kontrol sargılarından elde edilen DA kontrol akımı ile sağlanır. DA kontrol akımı, tristör tetikleme açısının değişimi ile sağlanır. DA kontrol akımının değişimi ile manyetik devrenin doyum derecesi değişir. Böylece MCSR çıkış kapasitesi sistem ihtiyacına göre ayarlanabilir.

3.1. Açık Çevrim Kontrol

Açık çevrim kontrolde, sistem çıkışından bir geri besleme alınmaz. Bu tip sistemlerde bozucu etkiler kontrol mekanizması tarafından dikkate alınmaz. Bu nedenle, bu kontrol yöntemi yapısı ve değişkenleri çok iyi bilinen, hassas olmayan sistemlerde tercih edilir. Güç sistemi gibi çok değişkenli sistemlerde sıklıkla tercih edilmez.

Dağıtım sistemlerinde MCSR ve APC'den oluşan EHPC tabanlı bir nötr topraklama yöntemi kullanılır. Bu yöntemde iki aşamalı kompanzasyon yapılır. İlk aşamada arıza anında daha önceden belirlenen parametrelere göre EHPC açık çevrim kompanzasyonu yapar. Bu şekilde arızalı fider çıkışı belirlenir [46].

3.2. Kapalı Çevrim Kontrol

Kapalı çevrim kontrol sistemi, geri beslemeli denetim sistemi olarak da adlandırılır. Bu tip sistemlerde bozucu etkiler kontrol mekanizmasında dikkate alınır. Böylece gerçek zamanlı ve yüksek hassasiyetli bir kontrol sağlanır.

EPHC tabanlı nötr topraklama yönteminin ikinci aşaması kapalı çevrim kompanzasyondur. Açık çevrim kontrol ile arızalı fider çıkışı belirlendikten sonra EPHC kapalı çevrim kompanzasyon aşamasına geçer. Bu aşamada nötr noktası deplasman gerilimi ve nötr toprak empedansı kontrol edilir [46].

MCSR kontrolünde kapalı çevrim sıklıkla kullanılır. Kapalı çevrim kontrol modeli ölçme devresi, karşılaştırma devresi, PID devresi, senkronizasyon cihazı, sinyal devresi, faz kaydırma devresi ve sürücü devresinden oluşur [12].

Bazı kapalı çevrim uygulamalarında indüktör kontrolü için PI kontrolör kullanılır [45].

MCSR'nin bir çeşidi olan SS-MCSR'lerde dış bacak sargılarında IGBT tabanlı DA-DA dönüştürücü ve PID kontrolörden oluşan bir kontrol sistemi kullanılır. PID kontrolör geri besleme için faz açısını kullanan bir kapalı çevrim kontrol yapısına sahiptir [47].

Yumuşak yol vericilerde kullanılan akım kontrol stratejisi de kapalı çevrim kontrol olarak değerlendirilebilir. Bu anlamda, tristör tetikleme motor nominal akımının 1,1 katının altına düşene kadar devam eder [43].

MCSR kontrolü, çekirdeğin değişken manyetik geçirgenliği ile sağlanır. Tetikleme açısı değişimi ile MCSR'nin kontrol sargılarının gerilimi değişir. MCSR, TCR ile aynı kontrol çevrimini kullanabilir. Böyle bir uygulamada kullanılan kapalı çevrimde doyum derecesi üzerinden geri besleme alınır. Böylece çıkış gerilimi ve reaktif güç ayarlanabilir [4].

Elektromotor yumuşak yol vericilerde kullanılan algoritmada kapalı çevrim kontrol sistemi kullanılır. Burada referans akımla kontrollü akım kıyaslanır. Kontrollü akım referans akımdan büyükse tetikleme açısı azalır ve MCSR'nin reaktansı küçülür. Kontrollü akım referans akımdan küçükse tetikleme açısı artar ve MCSR'nin reaktansı büyür. MCSR kontrolü PLC ve FPGA ile sağlanır. İlk tetikleme açısı PLC tarafından üretilir. FPGA ise 60°'lik zaman gecikmesi ile diğer 5 tetikleme sinyalini üretir. MCSR altı tetikleme sinyali ile sürülür [48].

3.3. Optimizasyon Teknikleri

Optimizasyon, mevcut süreci en az kayıp ve en fazla verimle yönetmektir. Birçok alanda olduğu gibi, güç sistemlerinde verimi artırmak için optimizasyon teknikleri kullanılmıştır.

Çok katlı doyumlu manyetik kontrollü reaktörlerde, reaktörün harmonik performansını iyileştirmek için PSO algoritması kullanılabilir. Bu algoritma, akım harmoniğini minimize etmek için değiştirilmiştir [39].

MCSR'nin etkin bir biçimde işlevini yerine getirebilmesi için kurulum yapılacağı nokta çok önemlidir.

EA'nın bir çeşidi olan Invasive Weed Optimization (IWO) 'ın çıkışı en uygun Pareto çözümleridir. Seçilen çözüm tamamen karar vericinin beklentilerine bağlıdır. Her hedef AHP'de nümerik olarak kıyaslanır. AHP sadece hedefleri verir. TOPSIS yöntemi ile çözüm sıralaması belirlenir. TOPSIS çıkışı kapasite ve yerleşimin en iyi cevabıdır [6].

Yeni geliştirilen veya değiştirilen kontrol algoritmaları ile yapılan optimizasyon çalışmaları da literatürde yer almaktadır.

FCMCSR tabanlı güncel bir kompanzatörün dizaynında, dayanıklı FC-MCSR tabanlı sönümleme kontrolörünün tasarımında bazı optimizasyon problemleriyle karşılaşılır. Bu problemin çözümü için Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyon (Honey Bee Mating Optimization) Algoritması kullanılır [42].

SS-MCSR'nin kontrolünde IGBT tabanlı DC-DC ve PID kontrolörden oluşan bir kontrol sistemi kullanılabilir. Bu kapalı çevrim sistemde PID Self Tuning Algoritması kullanılır. Böylece SS-MCSR'nin tepki süresi iyileştirilir ve yumuşak bir kontrol sağlanır. Aşırı salınım bu algoritma ile sıfır olabilir [47].

MCSR'nin tepki hızını süresini azaltmak ve aşırı kompanzasyonu önlemek için yeni bir algoritma önerilmiştir. Ani reaktif güç teorisine ve Steinmetz Algoritmasına dayalı bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Hat geriliminin pozitif dizi bileşeni Clark dönüşümü kullanılarak iki fazlı statik koordinat sistemine dönüştürülür. Clark ve Park dönüşümleri kullanılarak yük akımının pozitif dizi bileşeni DC bileşene, negatif dizi bileşeni AC bileşene dönüştürülür [36].

MCSR'nin EHV ve UHV uygulamalarında, kontrol için bir uyarlanabilir izleme algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ile iletim kaybı azaltılır, aşırı gerilim sönümlenir, hızlı tepki sağlanır ve harmonikler düşürülür. Kontrol sistemi için dinamik tanımlama algoritması kullanılmıştır. Faz ölçüm yönteminde Fourier dönüşümünden yararlanılmıştır. Son olarak, parametre izleme formülünü oluşturmak için en küçük kareler teorisi kullanılmıştır. Bilgisayar simülasyonu için PSASP'ın elektromanyetik transient modülü kullanılmıştır.

MCSR'de kontrol yöntemine dayalı optimizasyon yaklaşımlarının yanı sıra, ikaz sistemleri ve MCSR topolojisinde değişiklik yapılarak da performans iyileştirmesi yapılmıştır. İkaz sistemi ve cihaz topolojisini optimize etmeye yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur.

Değişik AC çalışma şartlarında üretilen harmoniği azaltmak için MCSR topolojisinde değişiklik yapılabilir. Kontrol tarafına eklenen harmonik sönümleme sargısı, harmonik azaltımını sağlar ve tepki süresini kısaltır [29].

MCSR'nin kendi kontrol devresinde değişiklik yapılarak hızlı tepki süresi elde edilebilir. Bunun için MCSR'nin kontrol devresi IGBT tabanlı tasarlandığında hızlı ikaz ve hızlı demanyetizasyon sağlanır [31].

Tek faz arızalarında tekrar kapamadan kaynaklı sekonder akımın kompanze edilmesi için primer sargıları Y bağlanır. Sıfır dizi harmoniklerinin akış yolu sebebi ile oluşan harmonik eliminasyonu için sekonder kontrol sargıları üçgen bağlanır. MCSR'nin kapasitesini regüle etmek için kullanılan DA kontrol akımı demir çekirdeğin doyum derecesini kontrol eder. Bu temele dayalı bir kontrol stratejisi ile MCSR kapasitesi ayarlanabilir [21].

DCCR tipi MCSR'lerde harmonikleri elimine etmek için, her primer sargısına harmonik kompanzasyon sargısı eklenir. Sekonder kontrol sargıları, bir buck devresi ile gerilim kaynaklı inverterin DA tarafındaki kapasitörlere bağlanır.

Ayrıca, bu kontrol metodunda ani reaktif güç teorisinden faydalanılmıştır [45].

Aşırı gerilimi ve harmonikleri önlemek, ayrıca koruma sağlamak amacı ile MCSR'de bir ön ikaz sistemi kullanılabilir [18].

Kontrol devresi ve tetikleme devresi basitleştirilerek yeni bir ikaz topolojisi elde edilebilir. Böylece yüksek hızlı ikaz ve kısa tepki süresi elde edilir [49].

Gerilim tipi PWM dönüştürücü kullanarak MCSR'de hızlı bir tepki elde edilebilir. Her iki modda çalışabilen bir PWM kontrol devresine eklenir. PWM de kullanılan DA kontrol stratejisi ile hızlı tepki elde edilir [24].

Bununla beraber MCSR kontrolü için çeşitli kontrol stratejileri de geliştirilmiştir.

Birleşik esnek bir kontrol stratejisi kullanarak aşırı gerilim sönümlenebilir. Bu stratejiye göre, kesici çalıştıktan sonra MCSR'ye kontrol sinyali gönderilir. MCSR ve kesici eş zamanlı işletilir [17].

Dinamik reaktif güç kompanzasyonu için reaktif güç ve gerilim kontrolüne dayalı bir kontrol stratejisi kullanılabilir. Gerilim alt zaman, ters gerilim ve spesifik kontrol modlarına sahip bu stratejide MCSR kontrolü için look-up-table metodu ve PI kontrolör kullanılır [20].

İndüksiyon motorlarında kullanılan yumuşak yol vericiler için bir akım kontrol stratejisi önerilebilir. Bu stratejiye göre kontrolör tristör tetikleme için altı darbeleri bir sinyal üretir. Reaktör kapasitesi, tristörün iletim açılarının kontrolü ile ayarlanır [43].

4. Sonuçlar

MCSR' ler literatürde güç kalitesi cihazı olarak yer alırlar. Bu çalışmada sayesinde MCSR için uygulanan kontrol yöntemlerin literatür incelenmesi ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Bu çalışma ile MCSR teknolojisinin durumu ve güç kalitesi sorunları ile ilgili uygulama mühendisleri, araştırmacıları üzerinde geniş bir perspektif sunmayı sağlamıştır.

5. Teşekkür

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi BAP tarafından FBA-2016-7666 nolu proje ile desteklenmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] X. Yang, C. Yue, "Orthogonal Flux Controllable Reactor for Transmission Lines", *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666118.
- [2] C. Ma, B. Bai, Z. An, Y. Dong, "Study on Main Magnetic Field of Ultra-High Voltage Magnetically Controlled Saturated Reactor", *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014, pp. 3615-3619, doi: 10.1109/ICEMS.2014.7014118.
- [3] X. Chen, B. Chen, C. Tian, J. Yuan, Y. Liu, "Modeling and Harmonic Optimization of a Two-Stage Saturable Magnetically Controlled Reactor for an Arc Suppression Coil", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, (7), pp. 2824-2831, doi: 10.1109/TIE.2011.2173090.

- [4] R. R. Karymov, M. Ebadian, "Comparison of Magnetically Controlled Reactor (MCR) and Thyristor Controlled Reactor (TCR) from Harmonics Point of View", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2007, vol. 29, (3), pp. 191-198, doi:10.1016/j.ijepes.2006.07.002.
- [5] M. Tian, Q. Li, Q. Li, "A Controllable Reactor of Transformer Type", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, vol. 19, (4), pp.1718-1726, doi: 10.1109/TPWRD.2004.832352.
- [6] M. Ebrahimi, R. Zeinali, H. Siahkali, "A Multi-Objective Model for Allocation of Magnetically Controlled Shunt Reactors", *8th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCCCE)*, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEEGCC.2015.7060078.
- [7] L. Yan-ping, Z. Fang, Z. Hai-ting, A. Zhen, "Leakage Inductance Calculation and Simulation Research of Extra-High Voltage Magnetically Controlled Shunt Reactor", *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 2010, pp. 4025-4028, doi: 10.1109/MACE.2010.5535891.
- [8] Z. Wei-jie, Z. Xiao-xin, L. Ya-lou, Z. Xing, X. De-chao, "Inverse-Hyperbolic Dynamic Model for Extra and Ultra Voltage Magnetically Controlled Shunt Reactor", *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2010, pp. 2820-2823, doi: 10.1109/iCECE.2010.689.
- [9] G. Feng, J. Shao, B. Zhang, Y. Zhao, "Study on a Novel Controllable Reactor Using in Ultra-High Voltage System", *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference (POWERCON)*, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICPST.2008.4745301.
- [10] Z. Q. Wang, Z. D. Yin, L. X. Zhou, Z. J. Wang, L. R. Ma, "Study on Controllable Reactor Magnetic Structure and Loss Based on ANSYS", *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2009, pp. 201-205, doi: 10.1109/ICIEA.2009.5138196.
- [11] X. Xu, "The Status and Development of Magnetically Controlled Reactor", *International Conference on Test and Measurement*, 2009, pp. 375-377, doi: 10.1109/ICTM.2009.5413026.
- [12] H. Liu, Z. Yin, W. Chen, "Research on Voltage Regulation of Magnetic Valve Controlled Reactor Based on Thyristor", *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 1998, vol. 1, pp. 664-667, doi: 10.1109/ICPST.1998.729048.
- [13] A. N. Belyaev, S. V. Smolovik, "Steady-State and Transient Stability of 500 kV Long-Distance AC Transmission Lines with Magnetically Controlled Shunt Reactors", *IEEE RussiaPower Tech*, 2005, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2005.4524464.
- [14] Y. Zhang, X. Cheng, X. Zong, "Research on Turn Ratio of Magnetic Valve Type Controlled Reactor Based on Bifurcation Theory", *Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS '09)*, 2009, pp. 154-157, doi: 10.1109/HIS.2009.143.
- [15] S. Bernard, G. Trudel, G. Scott, "A 735 kV Shunt Reactors Automatic Switching System for Hydro-Quebec Network", *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, vol. 11, (4), pp. 2024-2030, doi: 10.1109/59.544680.
- [16] X. Gu, Y. Wu, T. Qu, W. Xu, D. Liu, "The Simulation of The Controllable Reactor and Its Application in Ultra High Voltage Transmission Lines", *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, 2011, pp. 1833-1837, doi: 10.1109/APAP.2011.6180664.
- [17] W. Zheng, "Compound Flexible Control Strategy for Magnetically Controlled Shunt Reactor Suppressing Overvoltage", *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/CICED.2014.6991962.
- [18] T. Zheng, Y. Zhao, "Analysis on the Effects of Energization Mode for Magnetically Controlled Shunt Reactor", *IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2014.6939054.
- [19] W. Zheng, "The Dynamic Harmonics Characteristics Research of Extra/Ultra High Voltage Magnetically Controlled Shunt Reactor", *CIGRE*, 2012, A2-302.
- [20] J. Dai, J. Wang, L. Wan, D. Chen, X. Huang, W. Zeng, "Reactive Power-Voltage Integrated Control Method Based on MCR", *11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, 2010, pp. 727-731, doi: 10.1109/ICARCV.2010.5707356.
- [21] Y. Yao, B. Chen, C. Tian, "Modeling and Characteristics Research on EHV Magnetically Controlled Reactor", *International Power Engineering Conference (IPEC)*, 2007, pp. 425-430.
- [22] E. W. Kimbark, "Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole-Switched EHV Lines by Shunt Reactors", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1964, vol. 83, (3), pp. 285-290, doi: 10.1109/TPAS.1964.4766000.
- [23] B. Bazilev, V. Bepalov, S. Dyagileva, P. Makarov, M. Makarova, B. Oleksyuk, "Dual Scheme Based Mathematical Modeling of Magnetically Controlled Shunt Reactors 6-500 kV", *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/PQ.2012.6256197.
- [24] X. Xu, "Research on Fast Response Characteristic of Magnetic Control Reactor", *Open Automation and Control Systems Journal*, 2014, vol. 6, pp. 966-974.
- [25] Z. Liang, D. He, "The Application and Research of MCR in Substation Reactive Power Compensation", *International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, 2015, pp. 112-115, doi: 10.1109/ICSGCE.2015.7454279.
- [26] A. Bryantsev, M. Bryantsev, B. Bazylev, S. Dyagileva, A. Negryshev, R. Karymov, E. Makletsova, S. Smolovik, "Power Compensators Based on Magnetically Controlled Shunt Reactors in Electric Networks with a Voltage Between 110 kV and 500 kV", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*, 2010, pp. 239-244, doi: 10.1109/TDC-LA.2010.5762888.
- [27] M. Tian, Q. Li, Q. Li, "An Equivalent Circuit and Simulation Analysis of Magnetically-Saturated Controllable Reactors", *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2003, vol. 1, pp. 314-316.
- [28] Y. Wang, S. Zhang, G. Chen, "A Novel Continuously Adjustable Magnetic-Valve Controllable Reactor and Its Modeling", *7th International Power Electronics and*

- Motion Control Conference (IPEMC)*, 2012, pp. 77-80. doi: 10.1109/IPEMC.2012.6258853.
- [29] K. Bao-quan, T. Hong-jiang, L. Liyi, "Research on DC Magnetic Flux Controllable Reactor", *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2008, pp. 4444-4447.
- [30] X. Xu, "Research on Magnetic Valve Structure Optimization of Magnetic Controlled Reactor", *Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, vol. 8, pp. 655-661.
- [31] F. Chen, J. Wang, H. Zheng, W. Lu, C. Tian, J. Yuan, B. Chen, J. Yuan, "Fast Response Research of Magnetically Controlled Reactor", *International Journal of Smart Home*, 2015, vol. 9, (10), pp. 97-106, doi:10.14257/ijsh.2015.9.10.11.
- [32] J. Wei, Q. Huang, L. Liu, P. Wang, P. Zhou, "MSVC Based Multi-Side Coordinated Reactive Compensation Capacity Configuration and Voltage/Var Control in Substation", *9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2014, pp. 596-602, doi: 10.1109/ICIEA.2014.6931234.
- [33] G. Feng, F. Wang, J. Wang, "Design Principles of Magnetically Controlled Reactor", *Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2001, vol.1, pp. 212-214, doi: 10.1109/ICEMS.2001.970648.
- [34] Z. Zhu, R. Tian, "The Application of MSVC Reactive Power Compensation Device to the High Voltage Power Supply of Coal Mine", *Modern Applied Science*, 2008, vol. 2, (4), pp. 126, doi: 10.5539/mas.v2n4p126.
- [35] B. Chen, C. Zhang, W. Zeng, C. Tian, J. Yuan, "An Electrical-Magnetic Hybrid Power Quality Compensation Strategy for V/V Traction Power Supply System", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, pp. 3774-3779, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953914.
- [36] Y. Wang, C. Sun, G. Chen, "A Novel Control Algorithm for Magnetically Controlled Reactor", *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2014, pp. 360-365, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864639.
- [37] H. Shi, M. Sun, W. Li, "Research of Reactive Power and Voltage Integrated Control in Substation Based on New Type SVC", *IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/PEAM.2012.6612446.
- [38] T. Zheng, Y. J. Zhao, "Microprocessor-Based Protection Scheme for High-Voltage Magnetically Controlled Shunt Reactors", *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2014.0147.
- [39] X. Chen, B. Chen, C. Tian, J. Yuan, "Modeling and Simulation of the Multi-Stage Saturable Magnetically Controlled Reactor with Very Low Harmonics", *International Conference on Power Systems Transients*, 2013, pp.
- [40] G. Feng, F. Wang, B. Zhang, "Modeling and Characteristics of a Novel Magnet Saturation Controllable Reactor", *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2003, vol. 1, pp. 313-315, doi: 10.1109/PEDS.2003.1282811.
- [41] S. S. Zhao, Z. D. Yin, L. Peng, "Research of Magnetically Controlled Reactor Simulation Model and Its Experiments", *7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, 2012, pp. 476-479, doi: 10.1109/IPEMC.2012.6258776.
- [42] R. Ghanizadeh, A. J. Shendi, M. Ebadian, M. Golkar, A. Ajami, "A Multi-Objective HBMO-Based New FC-MCR Compensator for Damping of Power System Oscillations", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, 2007, vol. 1,(2), pp. 110-123.
- [43] M. Yu, C. Tian, B. Chen, "A Novel Induction Motor Soft Starter Based on Magnetically Controlled Reactor", *1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2006, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIEA.2006.257361.
- [44] W. J. Zheng, X. X. Zhou, "Adaptive Tracking Algorithm for Magnetically Controlled Shunt Reactor Control", *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666636.
- [45] M. Xianmin, W. Jianze, J. Yanchao, W. Xiaoxia, F. Xiangyun, "Novel Harmonic Free Single Phase Variable Inductor Based on Active Power Filter Strategy", *CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, 2006, pp. 1-4, doi: 10.1109/IPEMC.2006.4778289.
- [46] P. Wang, B. Chen, C. Tian, B. Sun, M. Zhou, J. Yuan, "A Novel Neutral Electromagnetic Hybrid Flexible Grounding Method in Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PP, (99), pp. 1-9, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2526054.
- [47] X. Jin, G. Zhang, R. Guo, "Simulation Analysis of Control System in an Innovative Magnetically-Saturated Controllable Reactor", *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, vol. 2, pp. 403-410, doi:10.4236/jpee.2014.24054.
- [48] X. Chen, B. Chen, C. Tian, "A Novel Control Method for Magnetic-Valve Controllable Reactor", *First International Workshop on Database Technology and Applications*, 2009, pp. 72-75, doi: 10.1109/DBTA.2009.137.
- [49] T. Ma, H. Wang, C. D. Li, S. S. Guan, P. Yang, "A Simple and Practical Double Fast Excitation Circuit of Magnetic Control Reactor", *International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering (AMCCE)*, 2015, pp. 1103-1108.
- [50] B. Chen, C. Zhang, W. Zeng, G. Xue, C. Tian, J. Yuan, "Electrical Magnetic Hybrid Power Quality Compensation System for V/V Traction Power Supply System", *IET Power Electronics*, 2016, vol. 9, (1), pp. 62-70, doi: 10.1049/iet-pel.2014.0830.
- [51] L. Yan-ping, Z. Yue, Z. Hai-ting, A. Zhen, "The 500 kV MCSR Modeling and Steady-State Characteristics Analysis", *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011, pp. 1-6.