

基于铁芯控制的串联补偿型故障限流器

姚磊,钱滢锋,梅军,郑建勇,王佳成

(东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要: 基于饱和铁芯型故障限流器的结构,提出控制直流偏置电流改变限流器输出电抗,从而当故障限流器与电容串联时,可以调节电容补偿系数。设计了限流器直流控制系统,利用氧化锌电阻的非线性特性和双滞环比较控制技术对直流偏置电流进行快速控制。对研制的限流器试验样机进行试验,试验结果表明,应用所提方法及直流控制系统后,串联补偿型故障限流器在系统正常运行时可以实现输出电抗的调节,在系统发生故障时可有效限制短路电流,并在重合闸之前恢复低阻抗状态。

关键词: 串联补偿; 故障限流器; 双滞环比较控制; 重合闸; 控制; 短路电流

中图分类号: TM 47

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.028

0 引言

随着电力需求的不断增长,电力系统的规模不断扩大,电网的短路电流水平也不断提高。短路电流水平已经逼近断路器的遮断容量,给电力系统的稳定安全运行带来了严重的隐患。因此采取有效的短路限流措施越来越有必要。

为了限制不断增长的短路电流,出现了多种短路限流措施,但是传统的限流措施都存在一定的局限性^[1-2],电网分层分区运行影响电网的运行灵活和可靠性,串联电抗器增加系统的电压损耗。故障限流器在系统故障时投入限流阻抗限制短路电流,而在系统正常运行时对系统几乎没有影响,在近年来取得了较大进展^[3-8],其中饱和铁芯型故障限流器通过控制直流偏置电流改变铁芯磁导率,从而限制短路电流。但是各种故障限流器一般只在线路发生故障时才动作限制短路电流,而大部分时间并不工作,设备利用率太低。

目前,国内配电网主要使用并联电容在负荷侧进行无功补偿,但是在负荷波动时容易造成负荷侧电压越限^[9],而串联电容补偿法通过补偿线路中的电抗来减小线路上的电压损耗,其具有更高的性价比及较强的电压调节能力^[10-11],并提高了电网的传输功率^[12]。然而固定电容串联补偿不能调节电容补偿系数,传统的晶闸管控制串联电容补偿虽然在高压电网上有较多应用,但相控方式会导致电流畸变给电网引入了谐波,并且存在控制滞后的问题,影响补偿响应速度^[13]。

针对以上问题,本文提出一种基于铁芯控制的串联补偿型故障限流器,该装置可以与固定电容串联,也可以单独运行。单独运行时,该装置在夜间电网电压过高时通过调节输出电抗可以起到降低受端电压的作用;与固定电容串联运行时,该装置在电网正常运行情况下通过调节直流偏置电流实现输出电抗的平滑调节,从而调节串联电容的补偿系数;当电网发生故障时,该装置可以迅速减小直流偏置电流,投入大电抗实现故障限流,从而兼具串联补偿和故障限流的功能。

1 串联补偿型故障限流器基本原理

1982 年 Raju 等人提出了饱和铁芯型故障限流器(SCFCL)的工作原理^[14],它主要由日字型铁芯、2 个交流线圈和 1 个直流线圈组成(见图 1),其中,交流线圈为铁芯提供直流偏磁,交流线圈串联至电网中。

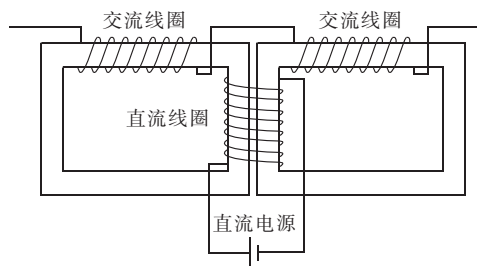


图 1 饱和铁芯型故障限流器铁芯结构

Fig.1 Structure of core of saturated core FCL

从铁芯磁化角度分析,饱和铁芯型故障限流器主要工作在 2 个区域^[15],如图 2 所示。电网正常运行时,直流偏置电流使铁芯深度饱和,交流线圈电抗较小,两端压降很小,不影响电网正常运行,铁芯工作在 A_1A_2 段。当电网发生故障时,铁芯退出饱和,交流线圈电抗增大,限制短路电流,铁芯工作在 OA_1 段。

由于铁芯的磁导率随着直流偏置电流的变化而变化,因此可以通过控制直流偏置电流调节交流线

收稿日期:2014-05-16;修回日期:2014-09-01

基金项目:江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY201115);东南大学重大科学研究引导基金资助项目(2011seuzd09)

Project supported by the Production and Research Prospective Joint Research Project of Jiangsu Province(BY201115) and Guiding Foundation for Key Science Research of Southeast University(2011seuzd09)

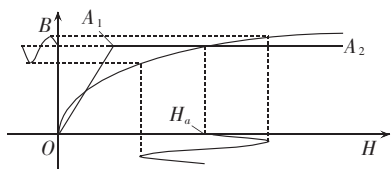


图 2 饱和铁芯型故障限流器原理

Fig.2 Principle of saturated core FCL

圈的输出电抗。图 3 说明了铁芯型故障限流器调节的基本原理,当直流偏置电流 I_{dc} 使铁芯处于工作点 H_a 时,磁化曲线的斜率为 K_a ;当铁芯处于工作点 H_b 时,磁化曲线的斜率为 K_b 。因此可以通过改变直流偏置电流 I_{dc} ,实现铁芯工作点的改变,从而调节电抗输出。当串联补偿型故障限流器与固定电容串联时,调节铁芯的输出电抗就可以改变电容的补偿系数。

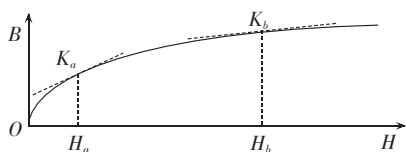


图 3 输出电抗的调节原理

Fig.3 Principle of output reactance adjustment

目前在电网中进行并联无功补偿的可控电抗器主要为磁阀式可控电抗器^[16-17],也有新型的低谐波直流助磁式可控电抗器提出^[18],但是传统的磁控电抗器在铁芯上没有气隙。为了减小交流电流对铁芯饱和深度的影响,以及改变铁芯磁导率 μ 的变化速率,实现良好的电抗输出特性,在串联补偿型故障限流器的铁芯增开气隙,如图 4 所示。下面以简单的铁芯磁路开气隙分析气隙对铁芯的影响。

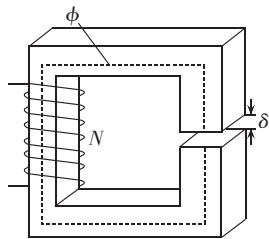


图 4 开气隙的铁芯

Fig.4 Core with gap

根据磁路定理有:

$$NI = H_l l + H_\delta \delta \quad (1)$$

其中, l 为磁路长度; δ 为气隙长度; N 为线圈绕制匝数; H_l 为磁芯的场强; H_δ 为气隙的场强。因为气隙很小,不考虑流过气隙外部的磁通,则铁芯磁通为:

$$\phi = B_l A = B_\delta A \quad (2)$$

其中, A 为截面积; B_l 为铁芯磁感应强度; B_δ 为气隙磁感应强度。

根据式(1)、(2)推导如下:

$$NI = \frac{B_l}{\mu_0 \mu_r} l + \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta = \frac{B_l l}{\mu_0 \mu_r} \left(1 + \frac{\mu_r \delta}{l} \right) = \frac{B_l l}{\mu_0 \mu_e} \quad (3)$$

$$\mu_e = \frac{1}{1 + \mu_r \delta / l} \mu_r \quad (4)$$

其中, μ_r 为相对磁导率; μ_0 为真空磁导率; μ_e 为等效相对磁导率。

铁芯带有气隙后,等效相对磁导率变为原来的 $(1 + \mu_r \delta / l) \times 100\%$ 。对于高磁导率硅钢片而言,通过开气隙,虽然增大了使铁芯进入饱和状态的直流励磁电流,但是由于磁导率变化更加平缓,交流电流对铁芯工作点的影响减小,电抗器的谐波减小。

2 直流控制系统设计

直流控制系统由 1 个单相可调变压器、AC-DC 整流电路、DC-DC 斩波调压电路、直流线圈和氧化锌电阻组成,如图 5 所示。正常运行时, V_{T2} 闭合,通过滞环比较技术对 V_{T1} 进行控制,从而使电流跟踪给定值;当直流线圈需要快速放电时,打开 V_{T1} 和 V_{T2} ,放电氧化锌电阻被串接入直流线圈回路,此时氧化锌电阻工作在限压状态,从而可以快速地减小直流线圈电流。

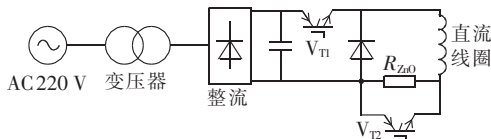


图 5 直流控制系统

Fig.5 Schematic diagram of DC control system

为了获得更快速的电抗调节效果,直流控制系统采用直流电流双滞环比较控制技术。

双滞环比较控制技术如图 6 所示。图 6 中, i_r 为参考输入电流指令; i_t 为直流线圈电流反馈; h 为小滞环误差; h_1 为大滞环误差。当 $i_t - i_r > h$ 时, V_{T1} 打开,直流线圈电流下降;当 $i_t - i_r < -h$ 时, V_{T1} 闭合,直流线圈电流上升。依此反复,实现对直流线圈电流的跟踪控制,使其跟随指令电流 i_r 。如果指令电流 i_r 发生突变, i_t 与 i_r 偏离过大,此时按照原来的控制策略打开 V_{T1} ,则直流线圈依靠自身的压降及二极管压降来减小电流,电流减小缓慢。当 $i_t - i_r > h_1$ 时,打开 V_{T1} 和 V_{T2} ,将氧化锌电阻串入直流线圈回路,使直流线圈电流迅速减小;当电流 $|i_t - i_r| < h$ 时,继续使用原来的滞环比较控制策略,可以有效地跟踪指令电流。

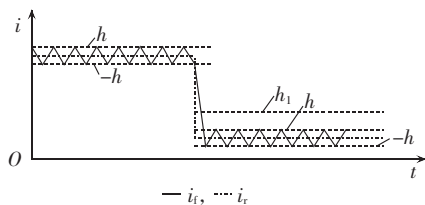


图 6 直流线圈电流控制策略

Fig.6 Control strategy of DC coil current

3 试验结果及分析

3.1 试验样机及平台

为了验证串联补偿型故障限流器的限流补偿效果和双滞环比较跟踪控制技术性能,研制了限流器样机,样机选用武钢非取向硅钢片 50WW470 制作,日字型铁芯选用 E 叠片和 I 叠片进行叠加,中间柱和两边柱上均保留了 1.25 mm 的气隙,从而获得更理想的电抗器输出效果,限流器的参数如表 1 所示。

表 1 故障限流器参数
Table 1 Parameters of FCL

参数	数值
边柱截面积/cm ²	36
中柱截面积/cm ²	72
交流线圈匝数	194
直流线圈匝数	600
限流电感/mH	70
交流线圈额定电流/A	20
直流线圈额定电流/A	1.63
气隙/mm	1.25

同时按图 7 设计的短路试验平台对小型限流器试验样机进行测试,模拟限流器工作于正常线路和短路线路时的状态。其中,负载电阻 R_{load} 为 192 Ω ;系统电阻 R_s 为 20 Ω ;系统电感为 L_s ;固态继电器 SSR1 为短路模拟开关,固态继电器 SSR2 为交流工作电路开关。

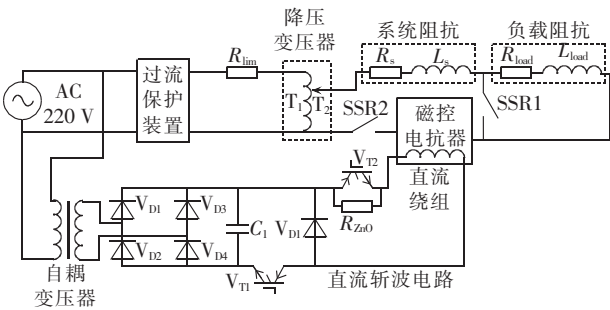


图 7 测试系统原理图
Fig.7 Schematic diagram of test system

3.2 电流跟踪效果分析

图 8 为指令电流由 5 A 变为 1 A 时直流线圈电流及氧化锌电阻上的电压(即电抗器直流电压 u_{dk})。当指令电流由 5 A 变为 1 A 时, $i_l - i_c > h_1$, 根据双滞环比较跟踪控制策略,将氧化锌电阻串入线圈回路吸收能量。由于氧化锌电阻的作用,直流电流迅速下降。当直流线圈电流降到 1 A 左右时,氧化锌电阻退出直流线圈回路,直流控制系统继续用常规滞环控制方式控制线圈电流。通过双滞环比较跟踪控制技术,直流线圈电流值从 5 A 减小为 1 A 的时间大约只用了 1 ms,并呈直线下降。直流线圈电流从 5 A 降至 1 A 的过程中,氧化锌电阻上的压降从 900 V 降到 850 V,电流下降了 80%,而电压只下降了 6%。

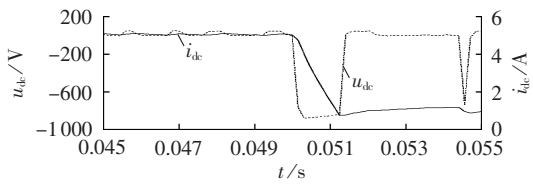


图 8 氧化锌电阻电压及直流线圈电流
Fig.8 Voltage of ZnO resistor and DC coil current

如果使用常规电阻,将大幅增加直流线圈的放电时间。

3.3 短路限流效果分析

为了对串联补偿型故障限流器的限流效果进行分析,进行短路限流试验,试验过程中限流器电压、电流如图 9 所示。当故障发生时,直流控制系统立即对限流器直流线圈放电。虽然直流线圈电流在 1 ms 内降到 0 A,然而由于实验所用限流器的 2 个交流线圈为并联结构,因此,当直流线圈快速放电时,引起 2 个交流线圈产生环流,铁芯并未立即退出饱和。随着铁芯慢慢退出饱和,交流线圈电抗增大,交流线圈上的电压也逐渐增大,短路电流逐渐减小。

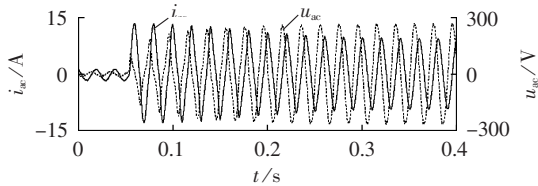


图 9 故障限流器电压和电流试验波形
Fig.9 Experimental waveforms of FCL voltage and current

为了对比分析限流器的限流效果,进行了不投入限流器直接短路的试验,图 10 为未投入限流器和投入限流器时短路电流波形。由图可见,限流器有效地减小了短路电流值。

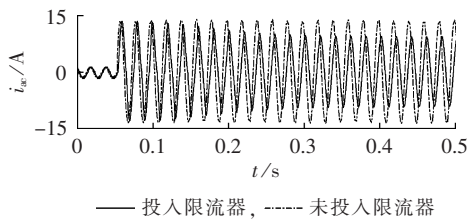


图 10 投入和不投入限流器时的短路电流
Fig.10 Short circuit current with and without FCL

3.4 电抗调节性能分析

图 11 所示为串联补偿型故障限流器电抗调节性能的曲线图。通过改变直流线圈的指令电流,使限

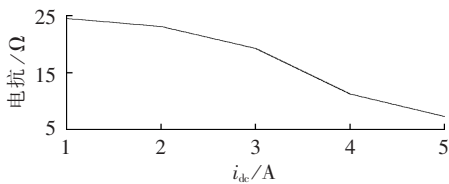


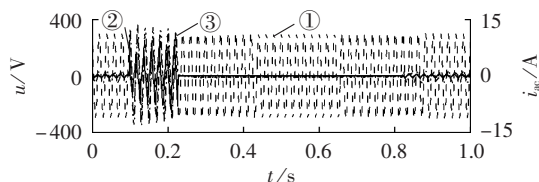
图 11 输出电抗控制特性
Fig.11 Control characteristics of output reactance

流器工作在磁化曲线的不同工作点,有效地改变了限流器的交流输出电抗。如果将本文限流器与固定电容串联,则能实现串联补偿系数的调节。

3.5 重合闸分析

当故障发生并持续一定的时间之后,断路器断开故障线路,此时故障限流器应立即对直流线圈进行快速充磁,使交流绕组在断路器重合闸之前恢复至低阻抗状态^[20]。配电网中常见的重合闸时间为 1 s 或更短^[21],如果直流电流不能在重合闸之前恢复,则重合闸之后交流绕组的压降较大,可能影响电网的正常运行。

故障限流器在重合闸试验时的电压、电流如图 12 所示,其中重合闸时间为 0.6 s。在此期间,直流控制系统对直流线圈充电,使铁芯尽快恢复饱和状态,0.83 s 时重新合上线路,限流器已经恢复正常状态,对电网没有影响。



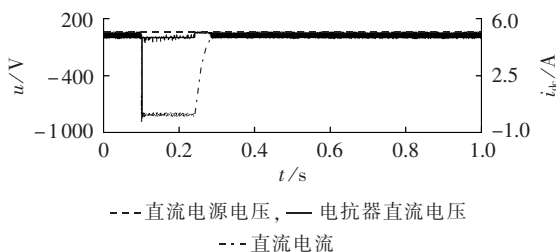
①—交流电源电压,②—电抗器交流电压

③—交流电流

图 12 故障限流器电压、电流波形

Fig.12 Waveforms of FCL voltage and current

重合闸期间直流线圈的充电过程如图 13 所示。当断路器断开线路后,直流线圈开始充电。直流线圈电流从 0 A 升至 5 A 只用了 0.05 s,小于重合闸时间。由于直流线圈电流的增大,AC-DC 整流电路的电压输出有所下降。



---直流电源电压, —电抗器直流电压

---直流电流

图 13 直流线圈充电过程电流、电压波形

Fig.13 Waveforms of current and voltage during DC coil charging

4 结论

本文提出在固定电容串联补偿的基础上,使用串联补偿型故障限流器实现补偿系数的调节,并在故障时限制短路电流。串联补偿型故障限流器的直流控制系统利用氧化锌电阻的非线性特性并结合双滞环比较控制策略对直流电流进行快速调节。由试验结果可以看出,通过双滞环比较控制策略对直流

电流进行控制,直流电流有效地跟踪了指令电流,限流器快速输出不同的交流电抗,实现了对串联补偿系数的调节。故障限流器在系统发生短路故障时有效地减小了短路电流,并在重合闸时间内完成对直流线圈的充电,配合重合闸完成。

参考文献:

- [1] 武守远,荆平,戴朝波,等. 故障电流限制技术及其新进展[J]. 电网技术,2008,32(24):23-32.
WU Shouyuan, JING Ping, DAI Chaobo, et al. Fault current limiting measures and their recent progress[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 23-32.
- [2] 吴获. 限制大电网短路电流水平的措施的研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
WU Di. The study on the measures to limit large power grid short-circuit current level[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [3] 张鹏飞,江道灼,刘华蕾. 带旁路限流电感的新型固态限流器试验研究[J]. 电力系统自动化,2005,29(4):67-71.
ZHANG Pengfei, JIANG Daozhuo, LIU Hualei. Experimental study on the solid-state fault current limiter with bypass inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 67-71.
- [4] 邹亮,李庆民,许家响,等. 考虑漏磁效应的永磁饱和型故障限流器磁路建模与实验研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(21):137-145.
ZOU Liang, LI Qiangmin, XU Jiaxiang, et al. Topology modeling and experimental study of permanent-magnet-biased saturation based fault current limiter with leakage flux effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21): 137-145.
- [5] 潘艳霞,凌志斌,蔡旭,等. 新型磁控开关型故障限流器拓扑及试验研究[J]. 电网技术,2008,32(15):16-21.
PAN Yanxia, LING Zhibin, CAI Xu, et al. Topology and experimental study on a novel magnetic-controlled switcher type fault current limiter[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 16-21.
- [6] 叶林,林良真. 桥式超导故障限流器的短路试验研究[J]. 电力系统自动化,1999,23(18):9-11.
YE Lin, LIN Liangzhen. Short circuit test of super conducting fault current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 9-11.
- [7] 张晚英,周有庆,赵伟明,等. 偏流切换桥路型高温超导故障限流器的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(6):116-122.
ZHANG Wanying, ZHOU Youqing, ZHAO Weiming, et al. Experimental research on a novel rectifier type high temperature superconducting fault current limiter based on bias DC voltage source change over[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 116-122.
- [8] 李晓明,梁军,王葵,等. 新型磁控式故障限流器[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):42-46.
LI Xiaoming, LIANG Jun, WANG Kui, et al. Magnetic-control-type fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 42-46.
- [9] 崔驰. 低压配网无功补偿浅析[J]. 电网技术,2000,24(7):71-72.
CUI Chi. Preliminary analysis of reactive power compensation in low voltage distribution network[J]. Power System Technology,

- 2000,24(7):71-72.
- [10] 赵文忠,王东平. 串联无功补偿技术在配电网中的应用分析[J]. 低压电器,2010(5):37-39.
- ZHAO Wenzhong,WANG Dongping. Application analysis of series reactive power compensation in distribution network[J]. Low Voltage Apparatus,2010(5):37-39.
- [11] 张先泰,蔡金锭,丁智华,等. 电容补偿在配电网电压调节中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):116-118.
- ZHANG Xiantai,CAI Jinding,DING Zhihua,et al. Application of capacitance compensation in voltage adjustment of distribution power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):116-118.
- [12] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社,1995:200-203.
- [13] 姚磊,梅军,王佳成,等. 基于新型铁芯控制的配电系统串联补偿故障限流装置的仿真分析[J]. 电网技术,2013,37(9):2507-2514.
- YAO Lei,MEI Jun,WANG Jiacheng,et al. Simulation study of a new core controlled series compensating and fault current limiting device for distribution system[J]. Power System Technology,2013,37(9):2507-2514.
- [14] RAJU B P,PARTON K C,BARTRAM T C. A current limiting device using superconducting D.C. bias applications and prospects[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1982,101(9):3173-3177.
- [15] XIN Y,GONG W,NIU X,et al. Development of saturated iron core HTS fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2007,17(2):1760-1763.
- [16] 钱建华,陈柏超. 基于磁阀式可控电抗器的无功补偿系统[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(2):66-70.
- QIAN Jianhua,CHEN Baichao. The application of reactive power compensator on magnetic-valve controllable reactor in electric railway[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2003,15(2):66-70.
- [17] 陈振虎,梁继勇,黄祥伟. 基于磁控电抗器的电力系统动态无功补偿装置的设计及应用[J]. 电网技术,2005,29(7):82-84.
- CHEN Zhenhu,LIANG Jiyong,HUANG Xiangwei. The design and application of a power system dynamic reactive power compensation device based on magnetically controlled reactor[J]. Power System Technology,2005,29(7):82-84.
- [18] 牟宪民,王建斌,胡泰,等. 新型单相低谐波饱和式可控电抗器[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):17-21.
- MU Xianmin,WANG Jianze,HU Tai,et al. Single-phase low harmonics saturated controllable reactor[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(7):17-21.
- [19] 张南法,王茂华,束静. 氧化锌非线性电阻的特性方程[J]. 电子元件与材料,2012,31(5):1-7.
- ZHANG Nanfa,WANG Maohua,SHU Jing. Characteristic equations of zinc oxide non-linear resistor[J]. Components & Materials,2012,31(5):1-7.
- [20] 孙燊伟,龚伟志,张敬因,等. 饱和铁芯型超导限流器满足电网重合闸条件分析[J]. 电网技术,2012,36(5):156-160.
- SUN Yuwei,GONG Weizhi,ZHANG Jingyin,et al. Analysis on conditions for saturated iron-core fault current limiter to match with reclosure of circuit breakers[J]. Power System Technology,2012,36(5):156-160.
- [21] 何妍,陈轩恕,唐跃进,等. 超导故障限流器对自动重合闸和继保的影响[J]. 高电压技术,2008,34(10):2190-2194.
- HE Yan,CHEN Xuanshu,TANG Yuejin,et al. Influence of SFCL on auto-reclosing relay and system protection[J]. High Voltage Engineering,2008,34(10):2190-2194.

作者简介:



姚磊

姚磊(1983—),男,山东成人,博士研究生,研究方向为超导故障限流器;

钱滢锋(1990—),男,浙江杭州人,硕士研究生,研究方向为超导故障限流器;

梅军(1971—),男,江苏淮安人,副教授,博士,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail:mei_jun_seu@163.com);

郑建勇(1966—),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

王佳成(1988—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为超导故障限流器。

Series-compensation-type FCL based on core control

YAO Lei,QIAN Yingfeng,MEI Jun,ZHENG Jianyong,WANG Jiacheng

(School of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: Based on the structure of saturated core FCL(Fault Current Limiter),it is proposed to adjust its output reactance by controlling its DC bias current to modify the compensation coefficient of the capacitors,which are connecting with the FCL in series. A system adopting the nonlinear characteristics of ZnO resistor and dual hysteresis control technology is designed for the rapid control of DC bias current. A prototype of FCL is developed and the test results show that,the series-compensation-type FCL under the control of proposed system adjusts its output reactance during normal operation while limits the short circuit current during system fault,and it recovers the low-impedance state before the reclosing.

Key words: series compensation; fault current limiter; dual hysteresis control; reclosing; control; short circuit current