

文章编号:1672-3961(2008)01-0018-06

磁饱和型故障限流器的研究与发展

刘洪顺, 王伟, 邹亮, 李庆民

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:分析了传统故障限流技术的优势和存在的问题,指出研制性能优良、经济合理的新型故障限流器对电网发展具有重要的现实意义和应用价值.在给出饱和电抗器的一般工作原理的基础上,详细介绍了超导磁饱和型故障限流器的拓扑结构及其工程实用化遇到的难题.比较了永磁饱和型故障限流器的各种拓扑结构及其发展演变过程,提出了三相永磁饱和型故障限流器的三种物理拓扑结构.最后结合永磁饱和型故障限流器的结构设计,阐述了四个关键技术难题.

关键词:故障限流器;饱和电抗器;磁饱和型;超导;永磁

中图分类号:TM471 **文献标志码:**A

Advances of saturated iron core fault current limiters

LIU Hong-shun, WANG Wei, ZOU Liang, LI Qing-min

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Both the advantages and disadvantages of traditional fault current limiting technology were analyzed. The analysis indicates that development of a new fault current limiter with economical and technological excellence was significant and urgent for present day power grids. With reference to the general operation principle of the saturated reactor, different topologies, and key obstacles encountered in engineering applications of the super conducting saturable magnetic core fault current limiter (SMFCL) were elucidated. Permanent magnet-biased saturated iron core fault current limiters (PMFCL) of various topologies were compared during their evolution process. Further, three novel topologies for three-phase PMFCL were presented. Finally, four principal technological issues were raised with relative elucidation with regards of the optimal structure design of PMFCL.

Key words: fault current limiter; saturated reactor; saturated iron core; superconducting; permanent magnet

0 引言

随着电力系统容量的迅速增长,系统的短路电流水平也逐步上升,对电力设备(如断路器、变压器、互感器等)提出了更为苛刻的要求,有效限制短路电流已成为电力系统发展中迫切需要解决的问题.传统的限流措施包括:提升电网电压等级、下一级电网分层分区运行、母线分段运行;变压器中性点经小电抗接地;更换断路器;采用熔断器、串联电抗器、高阻

抗变压器和发电机等.尽管这些措施可在某种程度上解决电网短路电流的抑制问题,但无一例外地将对电网运行的灵活性、可靠性和经济性带来不同程度的负面影响^[1-2].理想的故障限流器(fault current limiter, FCL)在电网正常运行时应表现为零阻抗或微小阻抗,功耗接近于零,最大不超过输送功率的0.25%;在电网发生短路故障时,应迅速呈现高阻抗以限制故障电流.作为一种有效的技术措施, FCL能够限制电网的短路容量,从而极大地减轻断路器等各种高压电气设备的动、热稳定负担,提高其动作可

收稿日期:2007-12-12

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(Q2004F03);山东省中青年科学家基金资助项目(2005BS01011)

作者简介:刘洪顺(1981-),男,山东青岛人,博士研究生,主要从事电力系统经济型故障限流器的研究工作.

E-mail: hongshun1981@mail.sdu.edu.cn

靠性和使用寿命,保证电网的安全与稳定运行.再者,还可显著降低对各种电气设备以及电网结构的设计容量要求,大大节省投资.因而,研究性能优良、经济合理的新型 FCL 是大势所趋.

具体分析表明,只有安装在高压或超高压电网内,FCL 才具有实际应用价值,凸现其技术和经济上的优越性.从技术上的可能性(包括运行经验及相关可靠性)与经济性(包括造价、运行费用)等各方面考虑,超导型和电力电子型故障限流器在近期内尚难以在电网中付诸实用.随着磁饱和技术,特别是磁性材料和磁路拓扑设计的不断发展和完善,基于饱和电抗器的磁饱和型故障限流器具有明显的技术和经济优势,在高压电力系统中的应用前景广阔,近来愈加引起了研究者的重点关注.

磁饱和型 FCL 利用铁芯材料磁导率的非线性变化来限制短路电流.在额定状态时,铁芯深度饱和,此时磁导率较低,限流绕组电感也就较小;故障状态时,铁芯退出饱和,磁导率变大,限流绕组感抗增加,将短路电流限制下来.磁饱和型故障限流器具有损耗低、自动投入与复位、可多次启动等特点,且适合线路重合闸的运行要求,是目前最为理想的限流装置之一.磁饱和型故障限流器目前还处于研制阶段,但已经出现了多种有应用价值的拓扑结构,根据偏置磁场的获取方式不同,可大致分为永磁型和超导型.本文在介绍饱和电抗器工作原理和发展应用的基础上,将重点针对不同拓扑结构的磁饱和型故障限流器进行比较研究,并就永磁饱和型故障限流器的拓扑设计,提出有待深入研究的关键技术问题.

1 饱和电抗器的应用与发展

饱和电抗器基于软磁材料磁化曲线的非线性饱和特性而工作.饱和电抗器属于交、直流同时磁化的非线性电抗器,其显著特点是铁芯同时受到直流和交流激磁作用,具有交、直流混合磁路.

饱和电抗器的结构原理如图 1 所示.组成饱和电抗器的两个绕组,一个通以直流电流,称为直流(或控制)绕组,另一个接交流电源(一般是工频)及负载,称为交流(或工作)绕组.直流控制电流的大小可以改变交流电流的大小.铁芯磁导率随深度饱和而减小,而铁芯的饱和程度可通过改变直流绕组的励磁电流来实现.励磁电流增大,则铁芯的磁感应强度增大,铁芯接近饱和,磁导率减小,等效电抗值减小,交流侧电流随之增大.

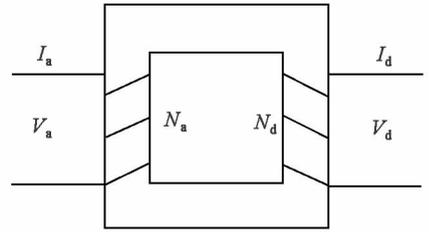


图 1 饱和电抗器结构原理
Fig.1 Principle of saturated reactor

饱和电抗器交、直流绕组缠在同一铁芯上,交流绕组在铁芯上产生的交变磁通也会在直流绕组上产生感应电动势.为减小功率损耗,饱和电抗器常采用图 2 所示的结构.它由 2 个相同的铁芯组成,1 和 2 是交流输入端,3 和 4 是直流输入端.直流绕组采用反向串联接法,使得感应交流电动势相互抵消,降低功耗.

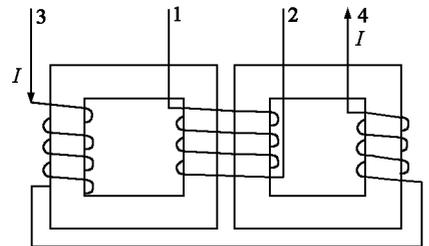
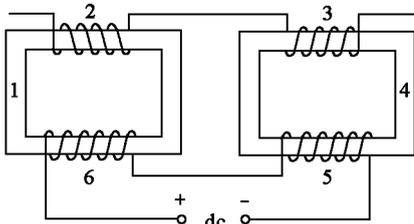


图 2 双铁芯饱和电抗器结构原理
Fig.2 Principle of saturated reactor with two iron cores

随着相关技术的发展,目前还出现了多种可控饱和电抗器.饱和电抗器以其独特的物理特性,在高频开关电源的开关噪声抑制、大电流输出辅路稳压、移相全桥变换器、谐振变换器及逆变电源、稳流技术和直流比较仪等方面得到了广泛应用^[3-4].同时,饱和电抗器在高压电力系统中的应用潜力巨大,前景广阔,例如:可在高压与超高压电网中用作调相调压设备和无功补偿装置等,能有效限制系统过电压,抑制功率振荡,提高系统稳定性,改善功率因数.另外,还可作为核心限流元件,研制新型的故障限流器.

2 超导磁饱和型故障限流器

超导磁饱和型 FCL 的结构原理如图 3 所示^[5-11].超导磁饱和型故障限流器主要由铁芯、交流绕组(铜绕组)、超导直流偏置绕组和直流恒流电源组成.两个交流绕组反向串联在电网中,其在超导直流偏置绕组中产生的磁场方向相反.系统正常运行时,超导绕组产生的直流偏置场,使铁心处于深度饱和状态,交流绕组在电网中表现为低阻抗状态.当电网发生短路故障时,短路电流使两个铁芯在一个周期内交替饱和,交流绕组的阻抗迅速增大,从而自动限制短路电流的增加.



注: 1,4—铁心; 2,3—交流限流绕组;
5,6—超导直流偏置绕组

图 3 超导磁饱和型 FCL 结构原理
Fig.3 Principle of SMFCL

超导磁饱和型 FCL 的技术关键,是使用超导绕组代替直流励磁绕组,可大大降低直流恒流电源的功率.另外,超导材料比普通铜导体的允许电流密度大,可在绕组参数相同时提供更大的直流磁化场.直流绕组在故障时无超导态到失超态的转化过程,其反应和恢复时间都非常短.因而,超导磁饱和型 FCL 特别适合于线路多次自动重合闸的要求.

尽管这种磁饱和型 FCL 在理论上可行,但在工程应用中也会遇到技术与经济问题.例如,交流磁通在直流绕组中感生的交变电压,会增加限流器的正常工作压降和功耗.发生短路故障时,额定电压的大部分降落在 FCL 的交流绕组上,电网交流高压会通过交流绕组和 FCL 铁芯耦合到直流绕组中,对直流电源具有破坏作用.这使得超导磁饱和型 FCL 的额定运行参数受到限制.故障时的“高压”问题是限制超导磁饱和型 FCL 在高压以及超高压电网应用的关键性难题.

为充分发挥限流作用并解决前述的“高压”问题,文献【12-13】提出在直流回路串入可控开关 IGBT,其结构原理如图 4 所示.

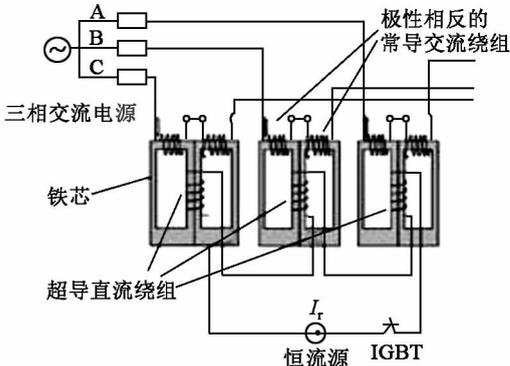


图 4 超导磁饱和型 FCL(含可控开关)结构原理
Fig.4 Principle of SMFCL with IGBT

当检测到短路电流时,由 IGBT 快速切断直流励磁,使交流绕组都处于非饱和态,等效于两个大电感,可获得更显著的限流作用.但采用 IGBT 不仅造价昂贵,且同步触发和保护技术要求高,稳态功耗和发热厉害,需要加设强迫水冷却系统,其技术经济性

差,在近期内的实用性受到一定限制.

再者,同其它超导 FCL 一样,超导磁饱和型 FCL 的工程实用化也受到超导技术自身的制约.超导技术在电工领域,特别是在高电压、大功率场合的应用技术尚不成熟,运行可靠性难以保证,造价也极其昂贵.超导技术目前的实用化程度,尚不能满足超导磁饱和型 FCL 作为高压大容量限流器新产品的开发要求.

3 永磁饱和型故障限流器

永磁饱和型 FCL 的结构如图 5 所示^[14-17],其原理与超导磁饱和型 FCL 基本相似,只是采用永磁体代替了超导直流绕组来产生偏置磁场,使铁芯深度饱和.当故障电流通过限流器时,两个铁芯在正负半周交替退出饱和,整体呈现高阻抗,可有效限制短路电流.

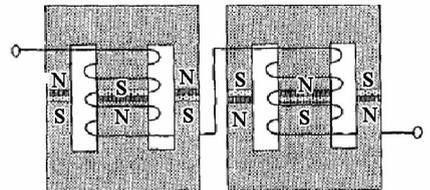


图 5 永磁饱和型 FCL 的结构原理
Fig.5 Principle of PMFCL

相对于超导磁饱和型 FCL,永磁饱和型 FCL 不需要额外的直流绕组和电源,提高了运行可靠性.其拓扑结构和制造工艺类似于油浸变压器,可借鉴已较为成熟的设计加工工艺.永磁饱和型 FCL 具有运行可靠性高、无需外加控制而实现自动投切、价格低廉和经济性能好等明显优点,能克服现有限流技术的不足.

图 5 所示的永磁式 FCL 也面临一些亟待解决的问题.交流线圈套在永磁体上,合成磁通作用可能导致永磁体去磁,特别是在短路大电流时,永磁体去磁的情况会更严重.为解决此问题,有人提出了一种“日”字形的磁路结构^[18],如图 6(a)所示,该种 FCL 采用了永磁并联偏置方式.这种 FCL 采用一个铁芯、一块永磁体与两个交流绕组.绕在两侧铁芯分支上的交流绕组产生相反的磁场,短路故障时可在正负半波交替退出饱和以实现限流.该设计方案可节约铁芯材料,降低制造成本.英国 AREVA T&D 中心还提出了一种“口”字形永磁饱和型 FCL(见图 6(b))^[23-24],在设计上较“日”字形更为经济,其永磁体分成上下两部分与铁芯串联,不仅减小了漏磁,还使结构设计更加简洁.

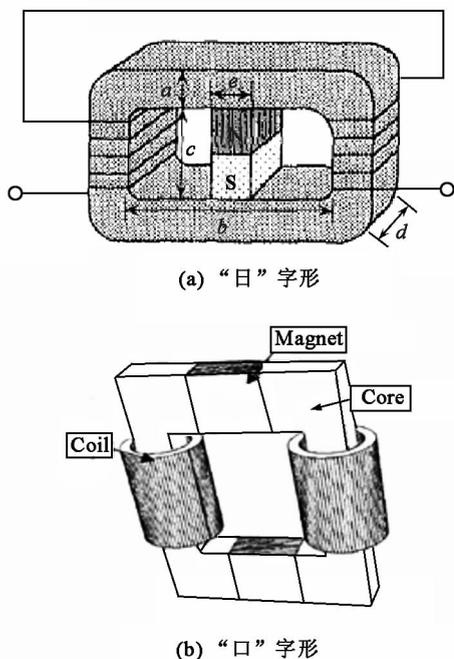


图6 改进的永磁饱和型 FCL 结构原理
Fig.6 Principle of improved PMFCL

由以上分析可知,在保证永磁饱和型 FCL 限流特性的前提下,通过优化磁路结构可大大提高其技术经济性.基于可靠性和经济性俱佳的设计目标,本文提出了三相永磁饱和型 FCL 的三种不同拓扑结构,如图7所示,分别称为“日”字形、“口”字形和直线形.通过三相集成,能最大限度地降低 FCL 的制造成本,为其工程实用化奠定基础.其中,三相“日”字形和“口”字形的工作原理与单相永磁饱和型 FCL 原理一致,此处不作赘述.直线形三相永磁饱和型 FCL 的工作原理如下:电网正常运行时,每相两侧的软磁铁心都处于深度饱和状态(饱和方向相反),对电网影响(电压降落与无功损耗)很小;当出现短路电流时,因每相两侧的铁磁材料饱和方向相反,其工作点会交替脱离饱和,磁导率大幅度增加,电感值剧增,从而实现限流.因每相绕组都是同时套在两侧的铁磁体上,一个绕组会等效于两个绕组,在正、负半波均起作用.此设计方案可有效避免永磁体的祛磁问题,同时可大大节约铁磁材料,经济性明显优于其它永磁饱和型限流拓扑,实用性较强.

4 磁饱和型 FCL 研制历程和发展前景

1982年,英国提出设想并试制了3 kV/556 A 超导磁饱和型 FCL 样机^[5].1994年,由华裔科学家宾士学领衔组织,澳大利亚 Wollongong 大学的超导与电子材料中心联合 NSW 大学电机工程系,完成了20 V/2 A 的超导磁饱和型 FCL 的概念设计,并于

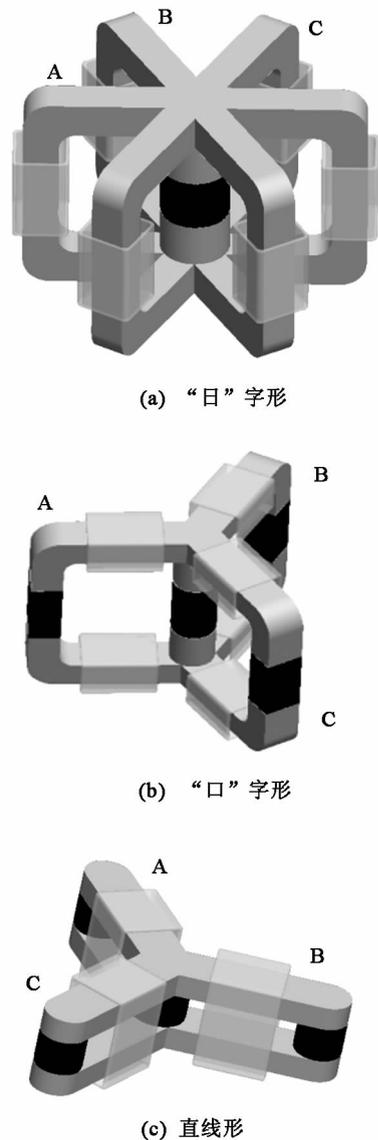


图7 三相永磁饱和型 FCL 结构原理
Fig.7 Principle of three-phase PMFCL

1997年研制出套银陶瓷 HTc 线材,在77 K液氮温度及零外场条件下,临界电流密度 J_c 达到6.9 kA/cm²;进而研制出超导磁饱和型 FCL 样机,在6.9 kV 电网上进行故障限流实验^[6].在国内,中科院电工所、东北大学、湖南大学等科研单位也相继开展研究并获得了一定成果,有些单位已经研制出低压样机^[7-13].天津机电工业控股集团公司和北京云电英纳超导电缆有限公司联合研制的35 kV 超导磁饱和型 FCL,于2007年8月9日在云南省普吉变电站进行并网试运行,是目前世界上挂网试运行的电压等级最高、容量最大的超导限流器.但迄今为止,上述研究成果还仅仅限于中、低电压等级的实验型样机,至于高压获超高压等级的超导磁饱和型 FCL 的研制,还有待于超导及其相关技术的进一步发展.

与超导磁饱和型 FCL 相比,永磁饱和型 FCL 具

有结构简单、经济可靠、易于实现高压大容量化等优点,在高压电力系统具有广阔的应用前景.加拿大 Toronto 大学、日本 Kanazawa 大学、英国 AREVA T&D 技术中心以及国内清华大学、山东大学等科研机构相继开展了前期仿真与实验研究,还试制了一些低压样机,取得了非常有价值的基础性研究成果^[14-24],为后续研究打下了坚实基础.

5 关键技术问题

高压大容量永磁饱和型 FCL 的研制,目前还有许多关键技术问题需要开展基础性的研究工作来逐步解决.针对永磁饱和型 FCL 的物理拓扑结构的优化设计,在确保限流特性的基础上,笔者认为应从四个方面进行研究,具体包括:永磁体偏置方式,饱和铁芯的材料选型,FCL 的空间体积,永磁体和软磁铁芯在工作点上的优化配合.

永磁体可设计为串联或并联偏置结构.若永磁体采用串联偏置方式,交流绕组的合成磁通通过永磁体,会产生涡流损耗,同时也存在永磁祛磁的潜在危险.采用并联偏置方式,可降低涡流损耗并利于解决去磁问题.

铁芯材料的选择对 FCL 的限流特性影响很大.理想的软磁材料要求具有磁感应强度高、磁导率高、铁损小、塑性好、表面光滑、绝缘性能好、填充系数高等特点,即需要综合考虑其磁性能、机械性能和经济性等,来选择较理想的软磁铁心材料.系统正常时,要求软磁铁芯工作在磁滞回线的深度饱和区域,这可通过选择合适磁通密度的材料或者减小铁芯体积来实现;系统故障时,FCL 必须迅速呈现高阻抗来限制短路电流,因此,铁芯材料还要求具有明显的饱和与去饱和转换特性,即较高的磁导率变化比值.

若系统每相均安装 FCL,其经济投入比较大,因而,可通过优化设计拓扑结构,使三相共享永磁体产生的磁场,从而有效降低 FCL 的制造成本并减小 FCL 设备的体积.

永磁体和软磁铁芯在工作点上的优化配合问题,是实现限流特性的关键.系统正常时,要求软磁铁芯材料的工作磁场强度 H 应远大于其饱和和磁场强度 $H_m \approx 10^3/4 \pi (A/m)$,而两者之差 $\Delta H = H_m - H$ 决定了 FCL 初始限制电流的大小,这就需要永磁体具备合适的矫顽力和剩磁.当 FCL 开始限流时,软磁铁芯的磁感应强度不应下降太快,以保证永磁体仍可保持原来的回复磁导率和表观剩磁,这就需要严格控制软磁铁芯和永磁体的磁通量变化情况,以

便确定合适的工作点.在确定铁芯回路有效长度和限流工作点 (B_f 或 H_f) 这两个重要参数时,同样存在着矛盾.目前设计中限流工作点 H_f 的取值一般较大,因为铁心的有效长度不可能取得太长.这种设计存在一些不足,即限流前后的阻抗值变化不是很大,限流时磁路饱和程度仍然较高,故将导致漏磁严重.

在设计高电压、大容量的永磁饱和型 FCL 时,上述几个问题将变得更为突出,迫切需要在仿真建模和实验研究的基础上,开展基础性研究工作,最终实现永磁饱和型 FCL 拓扑结构和工作特性的综合优化.

参考文献:

- [1] 石晶, 邹积岩, 何俊佳, 等. 故障电流限制技术及研究进展[J]. 电网技术, 1999, 23(12):63-66.
SHI Jing, ZOU Ji-yan, HE Jun-jia, et al. Development of fault current limiting technique and its progress[J]. Power System Technology, 1999, 23(12):63-66.
- [2] 江道灼, 敖志香, 卢旭日, 等. 短路限流技术的研究与发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3):8-20.
JIANG Dao-zhuo, AO Zhi-xiang, LU Xu-ri, et al. Research and development of short-circuit current limiting technology [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2007, 19(3):8-20.
- [3] 蔡宣三. 饱和电抗器的应用与发展[J]. 电气应用, 1988, 2(5):7-9.
CAI Xuan-san. Application and development of saturated reactor[J]. Electrotechnical Application, 1988, 2(5):7-9.
- [4] 李维波, 毛承雄, 陆继明. 基于饱和电抗器结构下的新型直流比较仪原理. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 77-81.
LI Wei-bo, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming. Principle of a novel DC comparator centered on the structure of saturable reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4):77-81.
- [5] RAJU B P, PARTON P C, BARTAM T C. A current limiting device using superconducting DC bias applications and prospects[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(9):3173-3177.
- [6] JIN J X, DOU S X, LIU H K, et al. Electrical application of high Tc superconducting saturable magnetic core fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, 7(2):1009-1012.
- [7] KCILIN V, KOVALCV I, KMGLOV S, et al. Model of HTS three-phase saturated core fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2000, 10(1):836-839.
- [8] ROZENSHTEIN V, FRIEDMAN A, WOLFUS Y, et al. Satu-

- rated cores FCL-A new approach[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2):1756-1759.
- [9] ZHANG Xu-hong, ZHOU you-qian, ZHANG Zhi-feng. Design of saturated iron core superconducting fault current limiter based on numerical calculation [C]// IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition. Asia and Pacific Dalian, China: [s. n.], 2005: 1-5.
- [10] ZHAO Cui-xia, WANG Shu-hong, QIU Jie, et al. Transient simulation and analysis for saturated core high temperature superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4):1813-1816.
- [11] 李景会, 王金星, 何砚发, 等. 饱和铁心型高温超导限流器的计算[J]. 低温与超导, 1999, 27(2):32-35.
LI Jing-hui, WANG Jin-xing, HE Yan-fa, et al. The calculation of HTS current limiter with saturated iron core[J]. Cryogenics and Superconductivity, 1999, 27(2):32-35.
- [12] XIN Ying, GONG Wei-zhi, NIU Xiao-ye, et al. Development of saturated iron core HTS fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2):1760-1763.
- [13] 何熠, 李长滨, 吴爱国, 等. 饱和铁心型超导限流器压敏电阻的实验[J]. 高电压技术, 2007, 33(9):154-158.
HE Yi, LI Chang-bin, WU Ai-guo, et al. Experimental of over-voltage suppression in a HTS three-phase saturated core fault current limiter by a ZnO varistor[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9):154-158.
- [14] MUKHOPADHYAY S C, DAWSON F P, IWAHARA M, et al. A novel compact magnetic current limiter for three phase applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5):3568-3570.
- [15] MUKUERJEE A, MUKHOPADHYAY S C, IWAHARA M, et al. A numerical method for analyzing a passive fault current limiter considering hysteresis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(4):2048-2050.
- [16] IWAHARA M, YAMADA S, DAWSON F P, et al. A passive current limiter for power semiconductor protection[C]// Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference. [S.1]: IEEE Press, 1996: 1298-1301.
- [17] MUKHOPADHYAY S C, DAWSON F P, M IWAHARA, et al. Analysis, design and experimental results for a passive current limiting device[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1999, 146(3):309-316.
- [18] IWDIARA M, MUKHOPADHYAY S C, YANIADA S, et al. Development of passive fault current limiter in parallel biasing mode[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3):3523-3525.
- [19] DAWSON F P, YAMADA S, IWAHARA M, et al. Experimental result for a two-material passive DI/DT limiter[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(3):3734-3736.
- [20] MUKHOPADHYAY S C, IWAHARA M, YANIADA S, et al. Investigation of the performances of a permanent magnet biased fault current limiting reactor with a steel core[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(4):2150-2152.
- [21] MUKHOPADHYAY S C, DAWSON F P, IWAHARA M, et al. Investigation on the topological configuration of magnetic current limiter for the protection of power semiconductor devices[C]// Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. [S.1]: IEEE Press, 2000: 2463-2470.
- [22] YOUNG S J, DAWSON F P, YAMADA S, et al. Material and design requirement for a magnetic passive current limiter [C]// IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Louisiana, New Orleans: IEEE Press, 1997: 1159-1165.
- [23] CHONG E, RASOLONJANAHARY J-L, STURGESS J, et al. A novel concept for a fault current limiter[C]// The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission. [S.1]: IEEE Press, 2006: 251-255.
- [24] RASOLONJANAHARY J-L, STURGESS J P, CHONG E F H, et al. Design and construction of a magnetic fault current limiter[C]// The 3rd IEE International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. [S.1]: IEEE Press, 2006: 681-685.

(编辑:许力琴)

论文排列说明

本刊发表材料、机械、能源、动力、电力、电子、信息、自动化、计算机、化工、建筑、水利等工业学科的论文以及交通(陆面、水面、空中等)、环境、管理、工程基础科学(数学、力学、物理、化学、晶体、天文、地球、生物等)等方面的论文.确定发表的论文按专业集中在一起.排列各专业论文时,参照了中国图书馆图书分类法的规则.