

主动式饱和铁心型超导限流器对超高压 输电线路零序电流保护的影响

何健

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 随着短路电流水平不断增加, 传统的限流措施已经很难满足现代电力系统发展的需要。超导限流器是解决电网短路电流的有效措施之一。目前, 天津 220 kV 超导限流器和昆明普吉 35 kV 超导限流器已经投入运行, 500 kV 高温超导限流器技术也进入样机研发阶段。500 kV 超导限流器研制和挂网示范运行后, 将取得在超高压等级超导限流技术的世界领先地位。本文对主动式饱和铁心型超导限流器的工作原理及其技术优点进行了详细介绍, 针对其接入 500kV 超高压输电线路后对零序电流保护的影响进行了详细的分析论证, 并在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建相应的仿真模型, 仿真结果良好的论证了理论分析。

关键词: 饱和铁心型超导限流器; 直流励磁; 零序电流保护

中图分类号: TM77

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0030-05

Coordination of the Active Saturated Iron-core Superconductive Fault Current Limiters with Zero-sequence Current Protection of Transmission Lines

HE Jian

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: A 500 kV Saturated Iron-core Superconductive Fault Current Limiter (SISFCL) has been designed to be installed in an EHV transmission system in southern China. We carried out studies on compatibility and coordination problems in the application of this kind of device in an EHV network. In this paper, the operational principle of an SISFCL and the protection configuration of transmission lines are briefly introduced. The influence of an SISFCL on the zero-sequence current protection of the grid, taking into consideration both the fault of SISFCL itself and fault of the power lines, is discussed. In order to coordinate the SISFCL and the grid protection scheme, requirements and recommendations are proposed. A model of a 500 kV double-circuit transmission system with SISFCLs is built using Electromagnetic Transient Program including DC (EMTDC) software package. The simulation results are in good agreement with the theoretical analyses.

Key words: superconductive fault current limiter; saturated iron core; dc excitation, zero-sequence current protection

新中国成立以来, 中国的电力工业以平均每年超过 10% 速度在不断增长, 电力行业也取得了重大的发展。2007 年, 我国电力装机容量达到 7.13 亿 kW, 已经跃居世界第二位。截至 2012 年 2 月, 全国发电机装机规模为 10.25 亿 kW。预计到 2020 年, 中国电力装机容量将突破 12 亿 kW。根据国家电网特高压骨干网架总体规划, 到 2020 年, 我国

将形成覆盖大电源基地和负荷中心的特高压电网^[1]。

随着电网联络愈发紧密, 即使采取分区供电等措施, 电网短路电流仍然保持在较高水平, 造成变电站现有或改造后设备容量均难以适应系统发展需要, 电网限制短路电流水平的压力依然很大^[2-3]。高水平的电流所产生的热和力的作用会使电气设备遭到破坏, 同时短路电流水平的迅速提高也使得现有的断路器往往难以满足断路容量的要求。为保证电力系统的安全可靠运行只能被迫更换那些不满足切断容量要求的断路器^[4-5]。然而, 解决这一问题

收稿日期: 2015-11-01

作者简介: 何健(1982), 男, 云南昭通人, 工程师, 硕士, 主要从事电网输变电工程设计管理及市场开发等工作(e-mail)1581888897@139.com。

更为经济可行的方法是设法限制电力系统的短路电流，以避免更换新断路器设备所需要的昂贵费用和复杂的设计测试工作，使电网的互联以及新发电厂和电网的连接不受系统短路容量增加的限制。因此，鉴于电力系统运行安全性、可靠性以及变电站改造困难等因素，有必要结合电网实际情况，研究限制短路电流的新措施，减轻断路器等各种电气设备负担，提高电力系统安全稳定性。

超导限流器(saturated iron-core superconductive fault current limiter)是利用新兴的超导技术而研制出的快速有效的限流装置。传统被动式饱和铁心型超导限流器^[6]如图1所示，其由一对铁心组成，每个铁心有铜的交流限制绕组以及直流超导绕组。两

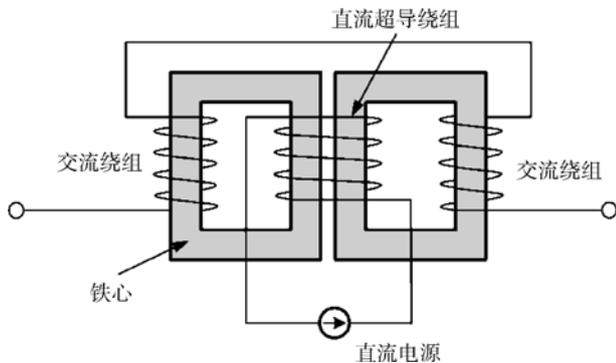


图1 被动式饱和铁心型超导限流器结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Passive SISFCL

个交流限制绕组极性相反地串联，直流超导绕组串联并加直流偏压源。正常运行时，调节直流偏压源使两个铁心饱和，呈现低阻抗。当线路故障时，短路电流使两个铁心在一个周期内交替去饱和，从而产生很大的电抗以限制短路电流。由于饱和铁心型超导限流器的超导线圈始终维持在不失超的状态，因此其不存在失超恢复时间，可以在故障发生后迅速响应，并且饱和铁心型超导限流器具备多次自动启动功能，从目前的技术水平看，适于自动重合闸运行。且饱和铁心型超导限流器在正常运行向故障状态转变是渐进的，产生的过电压小^[7-8]。被动式饱和铁心型超导限流器在拥有众多优点的同时也存在很多问题：电抗器的单边效应(处于增磁状态的电抗器不参与限流)使得铁心和绕组材料用量要按两倍故障功率设计；是超导限流器中体积最大、重量最重、损耗最大的一种限流装置；故障后在直流绕组上会出现的“单边”感应高电压，使限流前提一

稳定直流磁势难以落实；正常运行期间铁心处于饱和状态，有显著的漏磁场，限流期间铁心反复饱和、去饱和，将在电路中产生大量电压谐波^[9]。

1 主动式饱和铁心型超导限流器

为解决被动式超导限流器的性能缺陷，北京云电英纳公司一改被动式饱和铁心型超导限流器恒定直流励磁的做法，而代之以速断直流回路的方法^[10-11]，在传统的被动式饱和铁心型超导限流器中加入了直流控制回路，变被动式限流为主动式限流，即首先通过监控系统判断短路电流的发生，然后控制限流器进行限流。在短路发生的瞬间(由监控装置完成对短路电流的判断并发出动作指令)，直流控制回路在故障发生5 ms内切断直流励磁回路，使两个铁心同时退饱和并进入限流态。尽管这增加了电力电子的控制回路，但大大提高了限流的效率，避免了短路限流时感应高压对直流回路器件的冲击，大大增强了饱和铁心型超导故障限流器的实用性。主动式饱和铁心型超导限流器的结构示意图如图2所示^[12]。

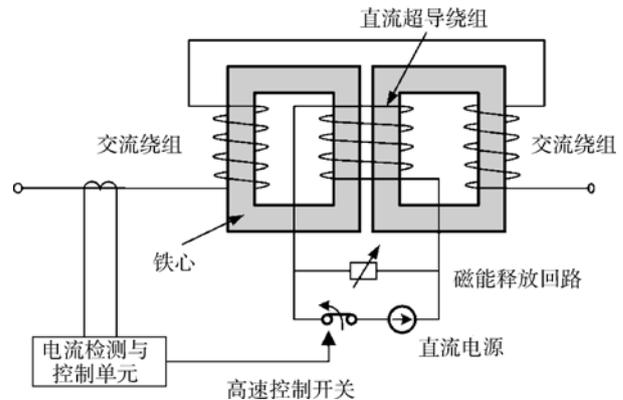


图2 主动式饱和铁心型超导限流器结构示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of the Active SISFCL

正常运行时，直流电源为超导绕组提供励磁电流，产生一个偏置磁场，使铁心处于深度饱和状态，铁心工作于工作点 H_{DC} 。此时，额定的交流电流通过交流绕组线圈所产生的交流磁场不足以使铁心脱离饱和区，铁心内的磁通量几乎不变，根据法拉第电磁感应定律，交流绕组的感应电动势为零，即超导限流器两端电压为零。此时铁心磁导率处于较低水平，即铁心等效电感较低，说明此时超导限流器对系统基本无影响。如图3(a)所示。当故障发生时，超导限流器通过电流检测单元监测到故

障短路电流，并发出指令，使得直流励磁开关迅速断开，超导限流器两铁心均退出饱和区和运行于非饱和区，如图3(b)所示。由于磁导率急剧增大，超导限流器限流阻抗迅速增大从而限制短路电流。与被动式不同的是，主动式超导限流器在故障发生之后两个铁心均进入限流态，这就大大增加了超导限流器的限流效率，克服了被动式的单边效应。同时主动式超导限流器在限流动作完成后能够快速复位，短时间内可恢复到低阻抗的状态，满足线路重合闸的要求。

由上述分析可知，改进后主动式饱和铁心型超导限流器存在两个工作状态：

1) 稳态运行：在电网正常运行状态，直流电源为超导绕组提供强大的直流励磁，直流磁势使得铁心深度饱和，串入输电线路的交流绕组呈现低感抗，压降较小，对于正常输电无不利影响。

2) 限流态运行：在电网短路故障发生后，电流因而剧增，超导限流器通过电流检测单元立即感知故障并借助于直流控制电路中的快速开关(由IGBT或IGCT组成)在几个毫秒之内切断直流励磁电流，从而保护超导绕组不受感应电压影响。短路电流在两个交流绕组上都产生大的限流感应电势，从而实现限流。

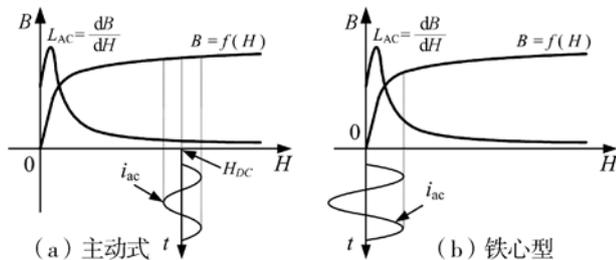


图3 主动式饱和铁心型超导限流器工作原理

Fig. 3 Working Principle of the Active SISFCL

超导限流器在电网中有两个运行状态：稳态及限流态。饱和铁心型超导限流器在稳态工作及限流态工作时的典型阻抗特性如图4所示。从图4可以看出，在稳态时，在超导绕组直流励磁作用下，交流绕组阻抗随着交流绕组电流的增大，先水平缓慢增加，后急剧增大。稳态阻抗大小与铁心结构、铁心尺寸、直流励磁大小、交流绕组匝数等参数有关。对于确定的超导限流器，直流励磁越大，稳态阻抗越小。超导限流器在限流态时，直流励磁已经切断，铁心退出饱和，交流绕组所呈现的阻抗很

大，且交流绕组阻抗随着短路电流的增大而减少。需要注意的是，超导限流器在限流态下的限流阻抗值是始终高于交流绕组的空心阻抗。

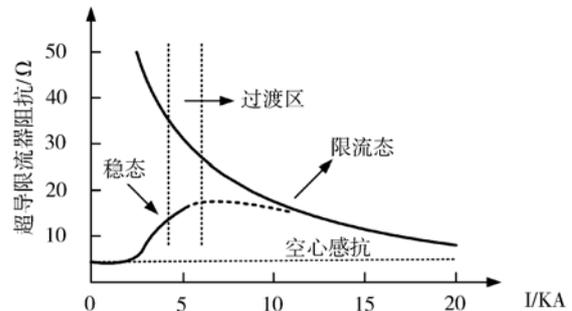


图4 主动式饱和铁心型超导限流器阻抗特性曲线

Fig. 4 Impedance Characteristic Curve of the Active SISFCL

2 超导限流器对零序电流保护的影响

2.1 重合于永久性故障时超导限流器对零序电流保护的影响

对于安装有超导限流器的双回线而言，若其中一回线发生永久性单相故障且重合时，如图5所示。虽然故障线路的保护可以正确动作并再次切除故障线路。然而，超导限流器的接入可能引起非故障线路零序电流保护的误动。下面将对此种情况进行详细分析。

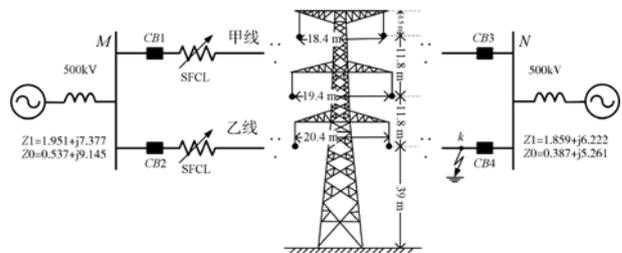


图5 超导限流器接入500 kV双回输电线路示意图

Fig. 5 Simulation Model of 500 kV Double-circuit

Transmission Lines

如图5所示双回输电线路，超导限流器接入超高压输电线路，且甲乙线均采用单相重合闸。本文以乙线发生单相接地故障时甲线零序电流保护的动作为例进行详细分析研究。图6为超高压输电线路发生故障后重合闸示意图。

当乙线线路末端k点发生A相接地故障。由超导限流器的阻抗特性曲线可知，如图4，此时通过甲乙线的A相短路电流很大，安装于甲乙线的A相超导限流器都将进入“限流态”限流。

如图 6(b) 所示，乙线保护动作于切除乙线故障相 A。若 M、N 侧的 A 相断路器同时跳闸，则如图 6(c) 所示。若 N 侧的 A 相断路器先于 M 侧动作，则甲线的零序电流大小也将发生变化，此时甲线 A 相超导限流器未必从限流态回归到稳态。

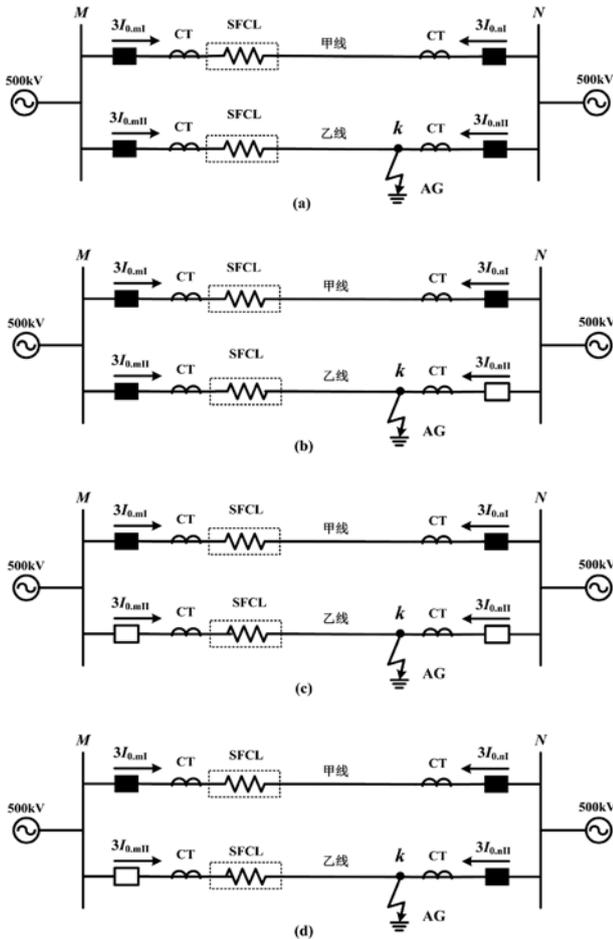


图 6 超高压输电线路发生故障后重合闸示意图

Fig. 6 Diagram of Reclosing in the EHV Transmission Lines

如图 6(c) 所示，乙线两侧的 A 相断路器跳闸。此时甲线的 A 相电流明显大于甲线 B、C 相电流，三相电流大小不同。而且，由于 A 相超导限流器仍可能工作于限流态，即三相限流阻抗大小不同。因此，在重合闸间歇时间段内，甲线存在零序不平衡电流。但由于甲线超导限流器的限流作用，此时甲线上的零序不平衡电流比无超导限流器情况下的零序不平衡电流要小。

如图 6(d) 所示，当乙线 N 侧单相重合闸时，甲线 M 侧的 A 相超导限流器必然工作于“限流态”，导致三相限流阻抗不相等。而且，在乙线因重合于永久性故障而三相跳闸后，甲线的传输功率可能很

大，由于限流阻抗不对称而导致的零序电流可能很大，从而造成零序电流保护误动。

2.2 仿真实验

针对以上分析，我们进行了仿真实验。仿真设置图 5 所示系统投入超导限流器，且系统两侧摆开角为 13° ，功率方向由 M 侧流向 N 侧，传输功率为 1 742 MVA。0.3 s 乙线 A 相末端(N 侧)发生永久性单相接地故障，0.36 s 跳开乙线 A 相，0.9 s 乙线 A 相重合闸，由于重合在故障上，0.96 s 乙线三相断开，此时甲线上的传输功率为 2 501 MVA。

图 7 为仿真全过程甲乙线 A 相电流变化曲线，可以看出在故障发生断开乙线 A 相后，甲线 A 相电流增大，而此时甲线 B、C 两相电流几乎不变，所以造成在乙线非全相运行期间甲线产生零序不平衡电流。但由于甲线超导限流器的限流作用，此时甲线上的零序不平衡电流比无超导限流器情况下的零序不平衡电流要小。

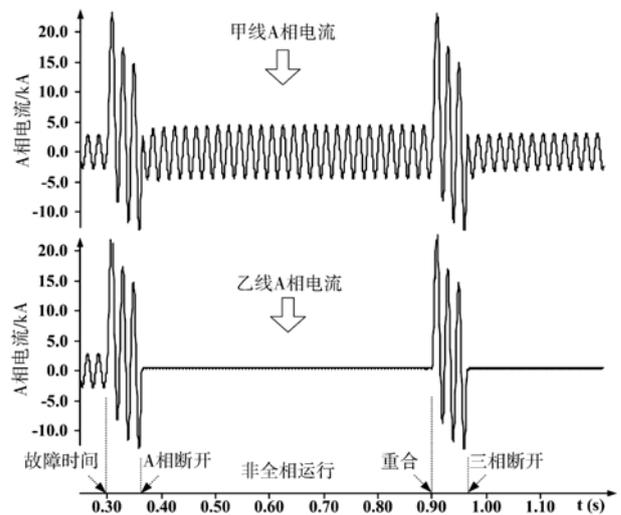


图 7 甲乙线 A 相电流变化

Fig. 7 Phase-A Fault Currents and Protection Performance

图 8 为甲乙线零序电流变化示意图。可以看出由于 0.36 s 断开乙线 A 相后甲线 A 相超导限流器仍工作于限流态，所以在其恢复到稳态之前对甲线 A 相的电流有较大的限制作用，这也就降低了由于断开乙线 A 相而产生的零序电流的大小，在甲线 A 相超导限流器恢复到稳态之前，甲线零序电流为 344 A。0.9 s 重合在故障上后甲线 A 相电流增大到短路电流，所以甲线 A 相超导限流器再次工作于限流态，而 B、C 两相超导限流器工作在稳态，所以在 0.96 s 乙线三相断开后，甲线相当于重载情况下的

A 相超导限流器突然失磁。因此由于甲线 A 相限流器阻抗显著增大导致甲线 A 相电流下降, 从而产生零序电流, 此时零序电流有效值为 695 A。这可能导致甲线零序电流保护误动从而切除甲线线路。

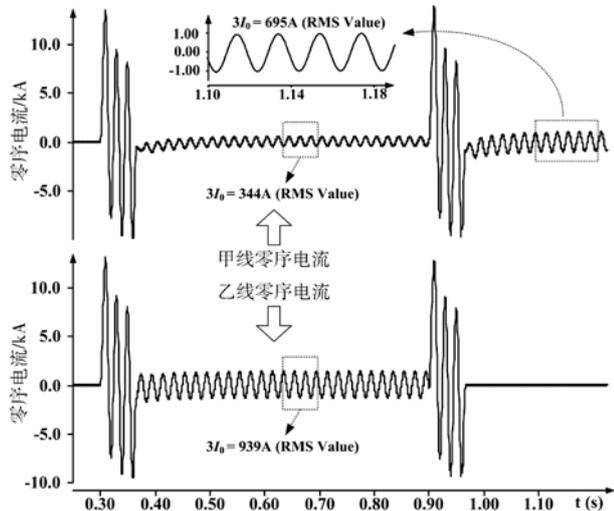


图8 甲乙线零序电流变

Fig. 8 Zero-sequence Current of Line I and Line II

综上所述, 当其中一回线重合于永久性故障时, 故障线路将再次断开。然而, 非故障线路的超导限流器也会因为重合闸重合于永久性故障而再次进入限流态, 限流阻抗增大, 且当前运行工况使得无故障线路的传输功率很大, 这就造成非故障线路的三相限流阻抗明显不对称, 可能会引起零序保护误动。

2.3 控制策略

因此, 从超导限流器设备的自身特性来说, 故障后应该尽快从限流态运行恢复到稳态运行。从零序电流保护的角度来说, 重合于永久性故障时的零序电流保护加速段应比无超导限流器接入线路时的延时要长, 以躲过重合于永久性故障时非故障线路零序电流。

3 结论

本文对主动式饱和铁心型超导限流器的原理进行了详细分析, 并针对超导限流器接入 500 kV 超高压双回输电线路时对零序电流保护的影响进行了分析论证。但当一回线重合于永久性故障时, 故障线路将再次断开, 非故障线路的超导限流器也会因为重合闸重合于永久性故障而再次进入限流态, 限流阻抗增大, 且当前运行工况使得无故障线路的传输

功率很大, 这就造成非故障线路的三相限流阻抗明显不对称, 可能会引起零序保护误动。因此当饱和铁心型超导限流器接入超高压输电线路时, 建议增加零序电流保护的动作延时时间, 以躲过非故障相上超导限流器由限流态恢复到稳态时产生的零序电流及重合于永久性故障时非故障线路零序电流。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] HUANG Daochun, SHU Yinbiao, RUAN Jiangjun, et al. Ultra High Voltage Transmission in China: Development, Current Status and Future Prospects [J]. Proceedings of IEEE, 2009, 97(3): 555-583.
- [3] LEONARD Kovalsky, XING Yuan, KASEGN Tekletsadik, et al. Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems [J]. IEEE Trans. IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2005, 15(2): 2130-2133.
- [4] NOE M, STEURER M. High Temperature Fault Current Limiters: Concepts, Applications and Development Status [J]. Superconductor Science and Technology, 2007, 20(3): 15-27.
- [5] JIN J X, DOU S X, LIU H K, et al. Electrical Application of High Tc Superconducting Saturable Magnetic Core Fault Current Limiter. IEEE Trans [J]. IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 1997, 7(2): 1009-1012.
- [6] ROZENSHTEIN V, FRIEDMAN A, WOLFUS Y, et al. Saturated Cores FCL-A New Approach [J]. IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2007, 17(2): 1756-1759.
- [7] LI Bin, LI Chao, GUO Fengrui, et al. Overcurrent Protection Coordination in A Power Distribution Network with The Active Superconductive Fault Current Limiter [J]. IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2014, 24(5): 18-22.
- [8] LI Bin, LI Chao, GUO Fengrui, et al. Coordination of Superconductive Fault Current Limiters with Zero-Sequence Current Protection of Transmission Lines [J]. IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2014, 24(5): 60-65.
- [9] XIN Y, GONG W Z, CAO Z J. Development of Saturated Iron Core HTS Fault Current Limiters [J]. IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2007, 17(2): 1760-1763.
- [10] HONG H, CAO Zhengjian, ZHANG Jingyin, et al. DC Magnetization System for 35 kV/90 MVA Super-conducting Saturated Iron-core Fault Current Limiter [J]. IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2009, 19(3): 1851-1854.
- [11] 刘宾, 梅军, 郑建勇, 等. SFCL 接入电网对接地短路阻抗继电器接线的影响 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 108-112.
- [12] 王付胜, 刘小宁. 饱和铁心型高温超导故障限流器数学模型的分析与参数设计 [J]. 电气工程学报, 2003, 23(8): 135-139.

(责任编辑 林希平)