

新型桥式高温超导故障限流器的设计

褚建峰¹, 王曙鸿¹, 邱捷¹, 樊凯²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 北京电力亦庄供电公司, 100176, 北京)

摘要: 针对电力系统的短路电流限制问题, 研究了一种新型桥式高温超导故障限流器. 该限流器主要由两个超导带材绕制的线圈反向并联而成, 线路正常工作时, 并联线圈的感抗很小, 因此对电路无影响, 短路故障发生时, 其中一个线圈失超使电流降低, 对另一线圈影响减弱, 限流器表现为一个大阻抗, 从而限制短路电流的快速增加. 在给定交流电力系统参数的条件下, 结合电磁仿真软件, 给出了两个超导线圈的具体尺寸. 使用 PSpice 电路仿真软件对限流器的限流性能进行仿真分析, 与无限流器时的仿真数据相比, 该限流器反应速度快, 限流效果明显, 尤其第 1 个短路电流的峰值可限制到无限流器电流值的 35.36%, 有效减缓了电流的上升速度. 最后, 讨论了系统电流和线圈参数对限流器限流性能的影响.

关键词: 电力系统; 短路; 桥式; 超导故障限流器

中图分类号: TM725 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)10-0099-06

Design for New Bridge High Temperature Superconducting Fault Current Limiter

CHU Jianfeng¹, WANG Shuhong¹, QIU Jie¹, FAN Kai²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Beijing Electric Power Corp., Beijing 100176, China)

Abstract: A new bridge type high temperature superconducting (HTS) fault current limiter (FCL) applied to AC power system is presented, where two coils, made of HTS tapes, serve as the main parts, and they are paralleled and both dotted terminals are unconnected. The FCL exerts no influence on power system in normal operation due to the small HTS resistance and induced voltage of each coil. When short-circuit fault occurs, one of the coils quenches and the current flowing through this coil is reduced to decrease the influence on the induced voltage of the other coil. The design parameters of the FCL for a given AC power system are determined, and the simulation and analysis by PSpice are completed to verify the FCL design. A comparison with the power system without FCL shows the rapid response of the bridge HTS FCL and desired limiting effect. The first peak value of short-circuit current is reduced to 35.36%. The influences of current parameters and coils parameters on current limiting performance are discussed.

Keywords: power system; short circuit; bridge type; superconducting fault current limiter

电力系统一旦发生短路故障, 巨大的短路电流可能导致现有的断路器无法正常开断, 这就对电力系统的保护设备提出了更高的要求, 使限流设备逐渐成为电力保护装置研究的热点. 20 世纪 80 年代后期, 随着高温超导体的发现, 高温超导故障限流器

应运而生. 超导故障限流器(SFCL)主要是利用超导体在一定条件下发生的超导态/正常态转变, 快速而有效地限制电力系统中短路故障电流的一种电力设备. 超导限流器在系统正常运行时阻抗非常低, 在系统发生故障时, 迅速表现为高阻抗, 将故障电流限制

到较低的水平. 因此, 超导故障限流器被认为是当前一种有效的短路故障限流装置.

目前, 国内外不少研究机构都在开展对超导限流器的研究, 并且研制出了各种类型的超导限流器. 根据电气原理和技术特点, 可将 SFCL 分成电阻型、电感型、感应屏蔽型、饱和铁心型和桥路型等. 其中, 在桥路型超导限流器的研究方面, 1995 年美国研发了一台 2.4 kV/2.2 kA 的样机, 并在加州通过了试运行; 2000 年日本研制了一台 6.6 kV 电压等级的样机; 2005 年中科院电工研究所自行研制的 10.5 kV/1.5 kA 样机现已在湖南早元变电站挂网试运行^[1]. 目前研究的桥路型超导故障限流器常见的有两种类型: 一种是超导线圈串联直流偏置电源, 桥臂使用二极管, 在正常工作情况下, 超导限流器两端的电压被钳制在很小的状态, 限流器件因此不串入电路系统而对系统几乎无影响, 发生短路故障时, 限流器件串入电路发挥限流作用^[2-3]; 另一种是超导线圈不串联直流电源, 桥臂采用晶闸管等可控器件, 通过对这些电力电子器件的控制来实现限流器的限流功能^[4-6]. 还有学者尝试将 IGBT 元件与超导材料的电阻并联后再与超导线圈串联, 应用在桥式电路上, 在正常情况下, 超导材料的电阻不起任何作用, 短路时电阻失超, 与串联的电感同时限制短路电流的增加^[7]. 文献[8]提出了使用两个超导线圈并联的桥式限流电路, 文献[9]提出可以使用带变压器的桥式限流器以提高其限流能力. 还有学者对桥式限流器中耦合变压器的特性做了深入研究^[10], 并且提出了桥路型结合饱和铁心型的限流器, 即在桥路型限流器的桥上使用带超导偏置的铁心型限流线圈来增强限流性能^[11].

本文采用两个超导线圈并联结合桥臂使用二极管的无直流偏置桥式限流器, 在给定交流系统参数的条件下, 设计了超导线圈的结构, 结合 Ansoft 软件计算了具体尺寸, 并使用 PSpice 软件仿真分析了该限流器的限流情况, 讨论了系统电流和线圈参数对限流器限流性能的影响.

1 系统模型

1.1 工作原理

桥式超导限流器工作原理如图 1 所示. 限流器主要由两个超导材料制成的线圈组成, 两个线圈异侧并联, 电感值相等且全耦合, 因此互感值与电感值近似相等. 在正常情况下, 流过两个线圈的电流相等, 它们产生的磁通相互抵消, 总磁通几乎为 0, 所

以并联线圈两端电压很小. 两个线圈的超导临界电流值不一样, 发生短路故障时, 其中线圈 2 立即失超, 线圈 1 不失超, 线圈 2 因失超电阻增大, 流过它的电流随之变小, 两个线圈中的电流不再相等, 产生的磁通不再相互抵消, 线圈 2 实现电阻限流, 而线圈 1 为电感限流, 从而限制短路电流的增大. 图 1 中, 发电机用理想电压源 u_s 等效, 负载用电阻 R_{load} 等效.

线圈 2 发生失超后, 会产生大量的热量使冷却用的液氮气化, 可通过增加阀门使氮气流流出, 这时还需补充液氮到冷却循环系统中, 从而保证超导线圈的正常工作.

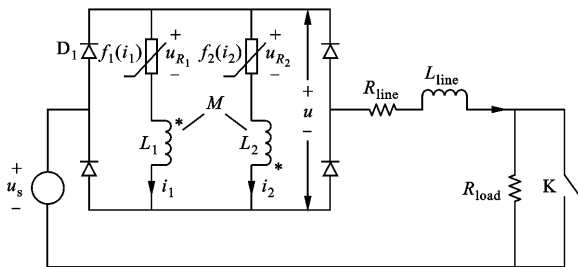


图 1 桥式超导限流器原理图

1.2 电路分析

在正常工作情况下, 电路处于稳态, 因为两个线圈的耦合系数 $K \approx 1$, 流过两个线圈的电流产生的磁通几乎可以完全抵消, 所以限流器对电路电流影响很小, 限流器两端电压很小. 主线路电流波形在正半周时, 二极管 D_1 和 D_3 导通, 电路方程为

$$u_s = 2U_D + u + (R_{line} + R_{load})i_{line} + L_{line} \frac{di}{dt} \quad (1)$$

式中: u_s 为交流电源的电压; u 为限流器两端电压降; R_{line} 为线路上电阻; R_{load} 为负载电阻; L_{line} 为线路上电感; i_{line} 为流经主线路电流; U_D 为一个二极管上压降.

由于两个超导线圈的电感值完全相等, 在未失超时电阻可忽略, 所以流过两个超导线圈的电流 i_{1+} 和 i_{2+} 分别为主线路电流值的一半, 即 $i_{1+} = i_{2+} = 0.5i_{line}$.

当 u_s 波形为负半周时, 二极管 D_2 和 D_4 导通, 流过限流器两个线圈中的电流 i_{1-} 和 i_{2-} 与正半周时的电流大小相等, 方向相同, 即 $i_{1-} = i_{2-} = 0.5i_{line}$. 因为 i_{1+} 、 i_{2+} 、 i_{1-} 、 i_{2-} 都是直流, 所以超导绕组的损耗很小.

当发生短路故障时, 由于线路电阻 R_{line} 、电感 L_{line} 和二极管的压降 U_D 都很小, 所以主线路电流 i_{line} 急剧增大, 线圈 2 失超, 电阻增大, 此时为电阻限

流,使电流大部分流过线圈 1,此时线圈 1 为电感限流。

限流器电压方程为

$$u = u_{R_1} + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$u = u_{R_2} + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \quad (3)$$

$$u_{R_1} = f(i_1) \quad (4)$$

$$u_{R_2} = f(i_2) \quad (5)$$

式中: L_1 、 L_2 为线圈的电感; i_1 、 i_2 分别为流经线圈的电流; u_{R_1} 、 u_{R_2} 分别是线圈的超导电阻上的电压降; M 为两线圈之间的互感; $f(i_1)$ 、 $f(i_2)$ 为超导线圈的电压-电流伏安特性。

线圈 2 失超后,电阻变大,短路电流大部分流经未失超的线圈 1, i_1 不再等于 i_2 。如果忽略流经 2 的电流,电路可看作是线圈 1 和线路阻抗的串联,即 $i_1 \approx i_{\text{line}}$,因为线圈 1 未失超, u_{R_1} 的值很小,也忽略不计,同时不考虑二极管压降,短路后整个电路回路方程简化为

$$(L_1 + L_{\text{line}}) \frac{di_1}{dt} + R_{\text{line}} i_1 = u_s \quad (6)$$

从式(6)可以看出,发生短路故障后,电路可以近似看成是一阶 RL 电路, i_1 波形外包络线从短路时刻起以指数形式上升,超导线圈的 L 值越大, i_1 上升的趋势越缓,限流效果越好。

2 实际算例

2.1 电路参数

假设交流电源为理想正弦电源,电压有效值为 5 kV,正常工作电流有效值为 800 A,短路电流稳态时的有效值为 10 kA。图 1 电路参数为: $u_s = 5$ kV, $R_{\text{line}} = 0.5 \Omega$, $L_{\text{line}} = 10 \mu\text{H}$, $R_{\text{load}} = 5.75 \Omega$,超导线圈的电感值为 10 mH。

2.2 超导线圈设计

目前,单根高温超导带材的临界电流最高可达 150 A 左右,考虑多根带材并联后,临界电流在磁场下衰减,每根超导带材临界电流设为 50 A。超导带材选用宽度为 5 mm、厚度为小于 0.4 mm 的 Bi-2223 带材。超导带材电阻 r_i 共包含两个部分,一部分是导电层中带材两端的接头电阻 $r_{j,i}$,另一部分是超导带材的电阻 $r_{e,i}$ 。导电层接头电阻的大小主要由接头的焊接材料和焊接工艺所决定,与带材的长度无关,是一个定值。导电层等效电阻值会随电流值的变化而呈非线性的变化,其计算公式如下^[12]

$$r_{e,i}(I_i) = \text{cons } t |I_i|^{n-1} / I_{c,i}^n l \quad (7)$$

式中: l 表示超导带材的长度; $I_{c,i}$ 为导电层的临界电流;参数 n 用来标定带材的电阻-电流特性。图 2 为 8 根并绕超导带材的等效电阻曲线。式(7)中 $\text{cons } t = 10^{-4} \text{ V/m}$, $l = 50 \text{ m}$, $I_{c,i} = 400 \text{ A}$, $n = 10.5$ ^[13]。图中标记出了电流为 400 A 的临界电流点,可以算出此时对应的电阻值为 $12.5 \mu\Omega$,失超后,电阻快速增大,电流为 500 A 时对应的电阻值为 $104 \mu\Omega$ 。可见,在电流较小的时候,其等效电阻基本为 0,但是当电流逐渐接近临界电流并超过临界电流时,所表现出来的等效电阻不再为 0,且呈非线性快速增大趋势。

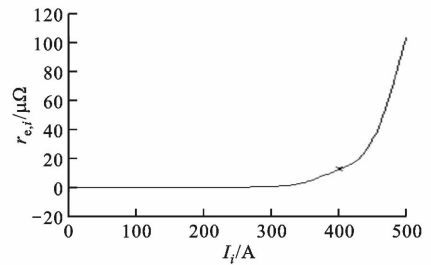


图 2 8 根并绕超导带材的等效电阻曲线

图 3 为超导线圈绕制尺寸示意图。线圈 1 和线圈 2 的绕制方法相同,采用多根带材并联作为一匝绕组,线圈辐向绕一匝绕组,总匝数基本相同。超导带材并绕根数的多少决定超导线圈失超临界电流值的大小,线圈 1 的并绕带材根数较多,超导状态下能通过较大的电流,所以失超临界电流值大,而线圈 2 因并联带材根数较少,失超临界电流值小。

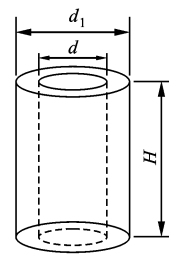


图 3 超导线圈绕制尺寸示意图

线圈内径 d 设计为 1 m,系统正常情况下,流过每个线圈每匝的电流有效值为 400 A,考虑交流电流的峰值,线圈 2 使用 12 根带材并联。在短路故障情况下,绝大部分电流流经线圈 1,因此线圈 1 使用 300 根带材并联,线圈高度主要取决于绕组的轴向匝数,另外考虑绝缘和绕制工艺,需留有足够余量。电感值设计为 10 mH,参照聂以曼公式计算普通绕组线圈的自感

$$L = \frac{N^2 \mu_0}{4\pi} \oint_{l_2} \oint_{l_1} \frac{dl_1 dl_2}{R} \tag{8}$$

式中： L 是线圈的电感； l_1 、 l_2 分别为导线中心线回路和导线内侧边线回路； R 为两回路之间的距离， N 为线圈的匝数。设计中 l_1 、 l_2 和 R 保持不变，则

$\frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_2} \oint_{l_1} \frac{dl_1 dl_2}{R}$ 是定值，可以看作是线圈的自感系数，电感值与线圈匝数的平方成正比。

设计给定电感值的线圈时，先给定一种线圈的尺寸和匝数，使用 Ansoft 电磁仿真软件计算出 $N=1$ 时的自感系数，线圈尺寸保持不变，按比例可计算出绕制给定电感值线圈时所需要的匝数。图 4 是给定电感线圈的电磁设计流程图，线圈绕制的详细尺寸见表 1。

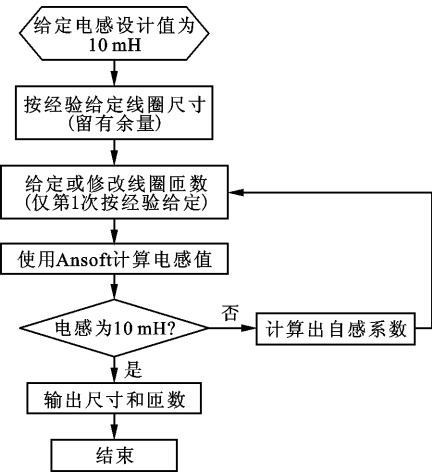


图 4 超导线圈电磁设计流程

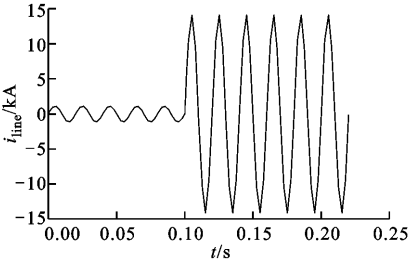
表 1 超导线圈绕制的尺寸

线圈	并绕圈数	d/m	d_1/m	H/m	L/mH	N
1	300	1	1.24	0.8	10.07	109
2	12	1	1.009 6	0.8	10.06	113

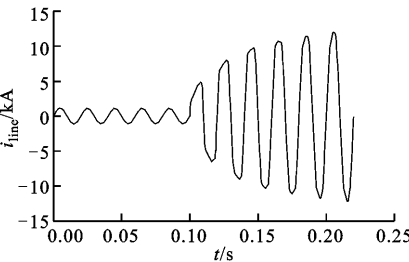
3 仿真结果

设交流系统电路的短路时刻为 0.1 s，仿真时间为 0.22 s，使用 PSpice 电路仿真软件进行计算。图 5 为交流系统电路中流经主线路的电流发生短路前、后的波形，可以看到如果不加限流器，因线路中的电感非常小，电流很快达到稳态，短路电流在短路后迅速上升，第 1 个峰值就到达稳定时的 14.14 kA。使用限流器后，短路电流第 1 个峰值大约为 5 kA，为不加限流器时峰值的 35.36%，随后短路电流逐渐

增大，在 0.255 s 时电流峰值达到 13 kA 左右，为不加限流器时电流峰值的 91.94%，显示限流器的反应速度很快，限流效果非常明显。电路发生短路故障稳定后，线圈电感对直流的限流作用非常小，但电感仍会对电流中存在的少量谐波成分起到限流作用。另外，因两线圈异侧并联，线圈 2 产生的磁通始终会对线圈 1 产生的磁通存在影响，所以电流不会达到不加限流器时的短路电流值。



(a) 未加 FCL

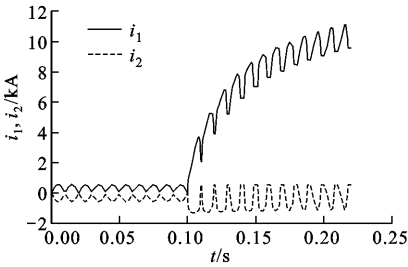


(b) 加 FCL 后

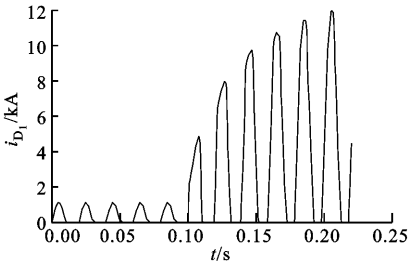
图 5 流经主线路电流短路前、后的电流波形

图 6 为流过系统电路其他元件中的电流，图 6a 是流过两个电感线圈的电流，为便于研究，两个电流的参考方向取相反方向。两个超导线圈从超导态到正常态的电流临界点不一样，线圈 2 在短路后立即失超，电阻增大，流经该线圈的电流变小，线圈 1 在短路后并未失超，所以为电感限流，大部分电流都流经未失超线圈的电流迅速增大，电流波形外包络线从短路时刻起以指数形式上升。图 6b 为流过二极管 D_1 的电流波形，可以看出 D_1 中只流过电流的正半周，仿真结果同原理分析是完全吻合的。

当短路时刻为 0.1 s 时，正是交流系统电流过零点，此时电流波形的初相角 $\theta=0^\circ$ 。考虑短路时刻初相角不同，对短路电流尤其是短路电流的第 1 个峰值会产生影响，短路时刻分别改为 0.085 s 和 0.095 s。取这两个时刻初相角的极端情况，比较短路初相角 θ 分别为 90° 和 -90° 时的短路电流，结果如图 7 所示。从图中可以看出，两种情况下短路电流



(a)线圈 1、线圈 2 的电流波形



(b) D_i 的电流

图 6 流过系统电路其他元件中的电流波形

第 1 峰值绝对值都约为 3.5 kA,为不加限流器时峰值的 24.75%,在 0.255 s 时刻电流峰值达到 13 kA 左右,为峰值的 91.94%。可见,当短路时刻不同,即短路初相角不同时,对限流电路中短路电流的第 1 峰值有较大影响,但随着时间的延续对短路电流限流情况没有影响。

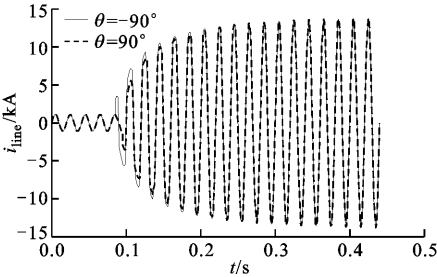


图 7 初相角在两种极端情况时的电流波形

短路时刻仍取 0.1 s,仿真时间取 0.44 s,超导线圈电感值增大至 50 mH,对电路短路情况进行仿真,结果如图 8 所示。短路电流的第 1 个峰值大约在 4.5 kA 左右,约为不加限流器时峰值的 31.82%,短路电流随仿真时间延续其增加速度减慢,在 0.255 s 只能达到 9 kA 左右,为不加限流器时电流峰值的 63.65%。将其与线圈电感值为 10 mH 时的限流情况进行比较,可以看出增大线圈电感值后,短路电流的上升趋势,限流器的限流能力提高。

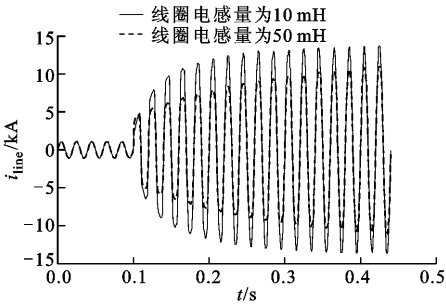


图 8 50 mH 和 10 mH 电感线圈的限流效果

4 结 语

本文研究的无直流偏置桥式超导故障限流器使用二极管结合两个超导线圈,保证了正常工作系统电流的顺利通过,省去了直流偏置电源装置,减少了限流器的损耗。当电路正常工作时,两个超导线圈紧耦合,分压很小,短路后两个线圈同时限流,反应速度快,效果明显。通过仿真可以看出,这种限流器在电网正常运行时对电路几乎不产生任何影响,发生短路故障时,对短路电流有很好的限流作用,可有效延迟故障电流到达峰值的时间,使断路器在故障电流较小时就能安全分断电路。

随着超导技术的发展,超导故障限流器将成为今后限流技术发展的方向。桥式超导故障限流器不使用铁芯,可以节省大量硅钢材料,装置较轻而且体积较小,在电力系统中具有广阔的应用前景和研究价值。

目前,桥式超导故障限流器应用还需要解决一些关键性的问题:①超导带材的性能需要提高,尤其是多层超导带材并绕使用时带材的载流能力,因为此时带材临界电流值会下降很多,而且每根带材的载流也会不均匀;②超导限流器设计参数的优化、带材失超发热的冷却恢复以及短路时的电动力等问题;③超导故障限流器与现有电力系统保护装置的配合和经济性分析等问题。

参考文献:

[1] 马幼捷,王辉,周雪松,等. 超导故障限流器的研究现状及其应用[J]. 低温与超导,2007,35(4):304-307, 311. MA Youjie, WANG Hui, ZHOU Xuesong, et al. The research situation and application of superconducting fault current limiters [J]. Cryo and Supercond, 2007, 35(4):304-307, 311.

[2] NOMURA T, YAMAGUCHI M, FUKUI S, et al. Study of single dc device type FCL for three-phase

- power system [J]. Cryogenics, 2001, 41:125-130.
- [3] 马幼捷,刘富永,周雪松,等. 桥路型超导故障限流器的数字仿真研究[J]. 天津理工大学学报, 2007, 23(4): 71-73.
MA Youjie, LIU Fuyong, ZHOU Xuesong, et al. Digital simulation study of superconducting [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2007, 23(4): 71-73.
- [4] HOSHINO T, SALIM K M, NISHIKAWA M, et al. Proposal of saturated DC reactor type superconducting fault current limiter (SFCL) [J]. Cryogenics, 2001, 41:469-474.
- [5] MUTA I, HOSHINO T, SALIM K M, et al. Proposal of DC shield reactor type superconducting fault current limiter [J]. Cryogenics, 2004, 44:177-182.
- [6] LIM S H, KANG H G, HAN B S, et al. Analysis of new bridge-type superconducting fault current limiter applying modified magnetic shielding model [J]. Materials Science and Engineering, 2003, B102:348-351.
- [7] GONG L H, FANG Z C, XU X D, et al. The cryogenic system of the 10.5 kV/1.5 kA high T_c superconducting fault current limiter [J]. Cryogenics, 2007, 47:450-454.
- [8] SALIM K M, MUTA I, HOSHINO T, et al. Proposal of rectifier type superconducting fault current limiter with non-inductive reactor (SFCL) [J]. Cryogenics, 2004, 44:171-176.
- [9] 张晚英, 周有庆, 赵伟明, 等. 一种新型直流混合型 HTSCFCL 的研究[J]. 低温物理学报, 2009, 31(1): 50-53.
ZHANG Wanying, ZHOU Youqing, ZHAO Weiming, et al. The research on novel DC S/N transition hybrid type of HTSCFCL [J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2009, 31(1): 50-53.
- [10] 王栋, 姚缨英, 江道灼, 等. 新型桥式固态限流器中耦合变压器特性的研究[J]. 机电工程, 2007, 24(8): 80-83.
WANG Dong, YAO Yingying, JIANG Daozhuo, et al. Research of the coupling transformer in the new bridge-type solid state fault current limiter system [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(8): 80-83.
- [11] LEE S, LEE C, AHN M C, et al. Design and test of modified bridge type superconducting fault current limiter with reverse magnetized core[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, 13(2): 2016-2019.
- [12] DAUMLING M. Electromagnetic behavior of a superconducting power cable [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(10): 2146-2149.
- [13] 林玉宝, 林良真, 高智远, 等. 2000 安高温超导输电电缆的研制[J]. 高技术通讯, 2001, 11(10): 95-99.
LIN Yubao, LIN Liangzhen, GAO Zhiyuan, et al. Development of a 2000A HTS transmission power cable [J]. High Technology Letters, 2001, 11 (10): 95-99.

[本刊相关文献链接]

- 交直流混联系统对距离保护暂态超越的影响及解决措施. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 57-61.
- 故障全量的分相复合阻抗输电线路纵联保护原理. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 92-97.
- 基于模型识别的平行线路零序方向元件. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 102-107.
- 双端带并联电抗器的输电线路纵联保护. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 99-103.
- 继电保护装置信号端口电磁干扰传播通道的建模与仿真. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 104-108.
- 基于模型识别的并联电容器保护. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1506-1509.
- 带可控串补和可调电抗器输电线路纵联保护新原理. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1259-1263.
- 输电线路超高速保护中小波算法的研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 194-198.
- 变压器漏电感参数在线辨识方法研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 199-203.
- 基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法. 西安交通大学学报, 2007, 41(12): 1214-1218.
- 一种新的高压线路振荡选相元件. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 945-953.
- 一种新型的分布式隐私保护计算模型及其应用. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 954-958.
- 基于形态梯度的输电线电流行波比较式超高速保护. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 484-488.

(编辑 杜秀杰)