

直流超导故障限流器方案设计及限流效果仿真分析

王晨, 陈磊, 唐跃进, 李敬东, 程时杰

(华中科技大学超导电力科学技术研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为满足直流电力系统故障保护的需要, 提出了一种新型直流超导故障限流器 (SCDCFCL) 的结构, 介绍了其工作原理, 建立了数学模型, 进行了两种不同直流源的 Matlab 仿真。仿真结果证明系统正常运行时, 该型直流超导限流器对系统无影响; 系统发生故障时, 限流器的限流效果明显。

关键词: 超导; 限流器; 直流; 短路

中图分类号: TM725; TM471 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)06-0006-03

0 引言

直流电力系统因其位置布置灵活、维护费用低, 调速性能好而受到人们的青睐。舰船、飞机、移动通信、石油钻井平台等独立电力系统中都存在着大功率直流电源。在这些独立系统中, 直流系统的故障保护问题是影响整个系统安全运行的突出问题。为了解决舰船等系统运行所要求的高稳定性和可靠性, 必须发展直流系统保护装置。

目前, 人们主要采用直流断路器来对直流电力系统进行故障保护, 如一种带转换电路的交流断路器保护装置^[1], 该装置可开断高压直流, 但存在过电压和结构复杂的缺点, 并且断路器还存在高损耗、体积大等缺点。超导限流技术的发展成功克服了断路器和普通限流器的缺点。超导限流器的反应速度快、结构简单、体积小特点已经引起世界范围的广泛关注, 直流超导限流器将成为未来直流电力系统保护装置的发展方向。日本 Seikei 大学在 1990 年开发出可用于直流输电故障保护的超导限流器样机^[2], 实验证明直流超导限流器可有效限制短路电流。本文提出一种新型直流超导故障限流器结构, 通过建立其数学模型, 进行数字仿真, 证明该直流超导故障限流器具有明显的限流效果, 并且正常状态下对电力系统无影响。

1 新型限流器结构和原理

新型直流超导限流器 (SCDCFCL) 电路如图 1 所示, E_1 为直流电源, R_1 为负载回路电阻, 直流超导故障限流器由绕在一个铁芯上的两个超导耦合线圈组成。两线圈自感均为 L , 它们的互感为 M , 其中

一个超导线圈接入负载线路中, 另一个超导线圈上加与负载电流大小相等的偏置电流。

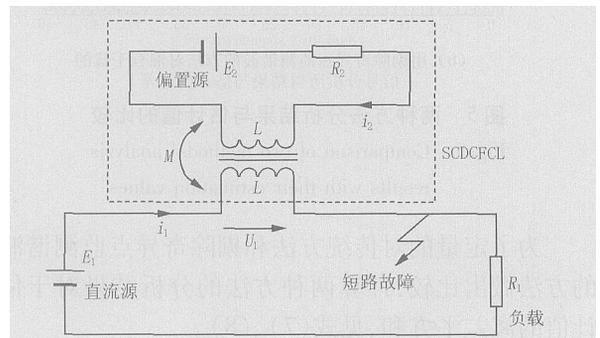


图 1 新型直流超导限流器电路

Fig 1 New SCDCFCL circuit

正常运行时两个超导线圈通过方向相反、大小相等的电流, 两个线圈产生的磁通相互抵消, 铁芯中磁通为零, 限流器对系统无影响; 发生短路故障时, 负载回路的电流增大, 短路电流将被超导线圈电感限制。

该型限流器的等效电路如图 2 所示, 超导线圈电阻为零。由图 2 可知, 系统正常运行时, 控制偏置源 E_2 , 使得 $i_2 = i_1$, 则 $i_m = i_1 - i_2 = 0$ 。超导限流器对负载电路呈现低阻抗, 阻抗值很小, 限流器对系统运行无影响。而且, 系统正常运行时, 超导线圈储存能量很小, 故障保护后不会产生过电压。

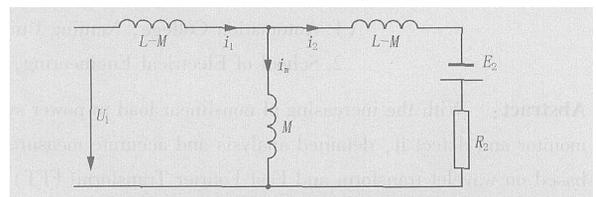


图 2 直流超导限流器等效电路

Fig 2 SCDCFCL equivalent circuit

基金项目: 863 计划资助项目 (2002AA306331)

当系统发生如图 1 所示短路故障时,如果忽略线路上的电阻和电感,且不考虑铁芯饱和和影响,可以得到下面一组电路方程式:

$$L \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} = E_1 \quad (1)$$

$$L \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} = E_2 - R_2 i_2 \quad (2)$$

解得:

$$i_1 = \frac{R_2 L^2 + R_1 M^2}{R_1 R_2 L^2} E_1 + \frac{E_1}{L} t - \frac{E_1 M^2}{R_2 L^2} e^{-(t/T)} \quad (3)$$

$$i_2 = -\frac{E_1 M}{R_2 L} e^{-(t/T)} + \frac{E_1 M + E_2 L}{R_2 L} \quad (4)$$

其中: $T = \frac{L^2 - M^2}{R_2 L}$

L 为超导线圈自感; M 为超导线圈互感;
 E_1 为直流电源电压; E_2 为偏置电源电压;
 R_1 为直流回路负载; R_2 为偏置回路电阻;
 i_1 为负载回路电流; i_2 为偏置回路电流;
 当超导线圈耦合较好时, M 与 L 近似相等 ($M \approx L$), 则 $T \rightarrow 0$, 由式 (3) 得:

$$i_1 = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2} E_1 + \frac{E_1}{L} t \quad (5)$$

根据式 (5) 可知, 短路后的负载电流 i_1 与超导线圈自感 L 成反比, 即超导线圈自感越大, 则限流效果越好。

2 理想直流源系统中的限流效果

为验证该直流超导限流器的限流效果, 采用图 3 所示的电路图进行 Matlab 仿真, 负载回路电源设为理想直流源。仿真参数: $E_1 = 340 \text{ V}$, $E_2 = 300 \text{ V}$, $R_1 = 8.6 \text{ } \Omega$, $R_2 = 8.4 \text{ } \Omega$ 。线路阻抗 Z_L 电阻为 $1 \text{ } \Omega$, 电感为 1 mH 。线圈电感 $L = 1 \text{ H}$, 耦合系数 $k = 0.98$; 故障发生时刻 $t_f = 5 \text{ s}$ 。

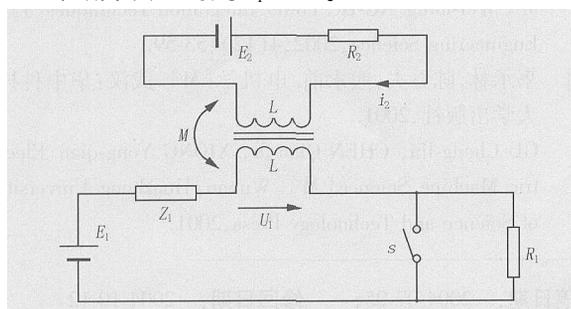


图 3 理想直流源仿真电路原理图

Fig 3 Simulating circuit of ideal DC source

图 4 为发生短路故障后, 系统安装限流器和不

安装限流器的负载回路电流仿真结果。如图所示, 短路前, 负载电流为 35.4 A ; 短路后, 限流器立即发挥限流作用, 到短路后 0.1 s 时, 短路电流为 90 A ; 而未装限流器的系统, 由于线路阻抗很小, 短路电流迅速上升, 在短路后 0.1 s 时达到稳态值 336 A ; 可见, 限流器的限流效果明显。

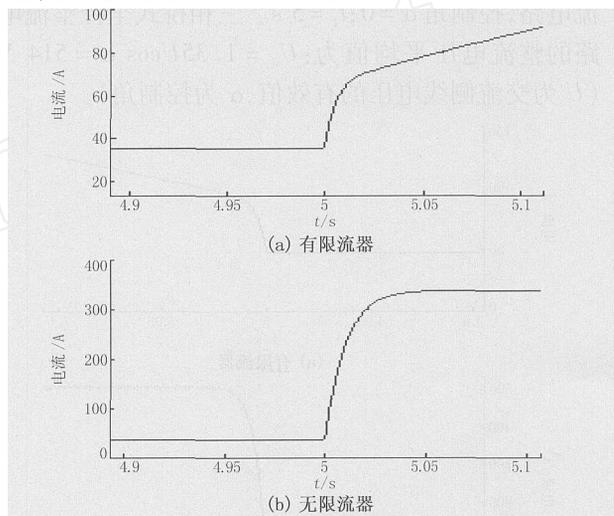


图 4 负载电流的仿真图 ($t_f = 5 \text{ s}$)

Fig 4 Load current simulation ($t_f = 5 \text{ s}$)

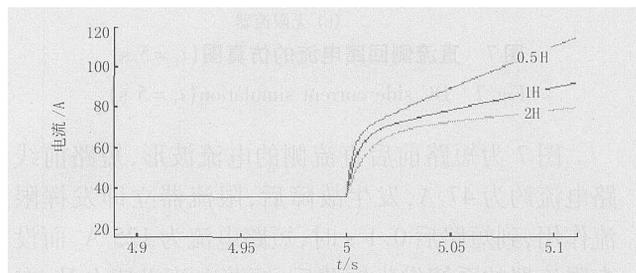


图 5 自感 L 取不同值时的短路电流

Fig 5 Fault current of different self-inductances

图 5 为限流器自感 L 取不同值时的限流效果图。从图中可以看出, 自感 L 取值越大时, 限流效果越明显。这一仿真结果与前面的原理分析也是吻合的。

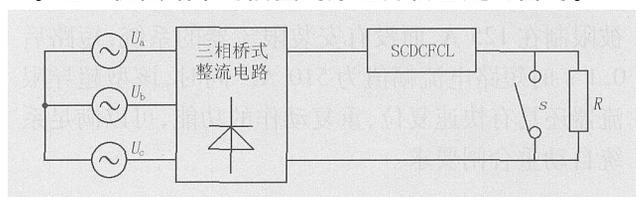


图 6 整流直流源仿真电路原理图

Fig 6 Commutated DC source simulating circuit

3 整流直流源系统中的限流效果

考虑到舰船等直流电力系统的电源是由三相交

流电经整流后得到的,本文进行了如图6电路的仿真研究。电源用三相理想交流电源,整流桥采用三相桥式全控整流电路,直流侧接限流器和负载。

仿真电路参数: $U_a = 311 \sin(\omega t)$, $U_b = 311 \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$, $U_c = 311 \sin(\omega t + 120^\circ)$;限流器 $L = 1 \text{ H}$,耦合系数 $k = 0.98$;负载电阻 10Ω ;三相桥式整流电路,控制角 $\alpha = 0^\circ$; $t_f = 5 \text{ s}$ 。三相桥式全控整流电路的整流电压平均值为: $U_d = 1.35U \cos \alpha = 514 \text{ V}$ (U 为交流侧线电压的有效值, α 为控制角)。

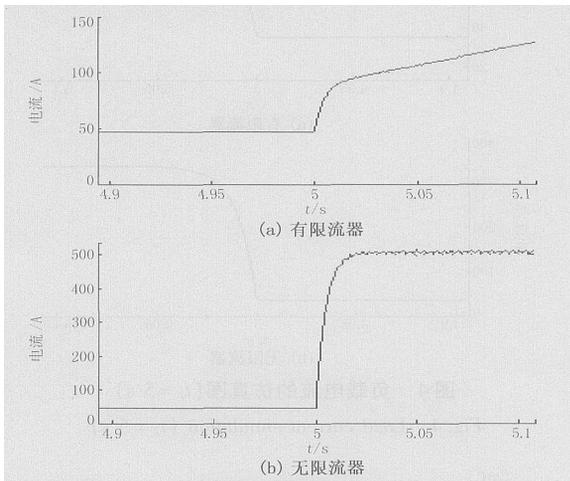


图7 直流侧回路电流的仿真图 ($t_f = 5 \text{ s}$)

Fig 7 DC side current simulation ($t_f = 5 \text{ s}$)

图7为短路前后直流侧的电流波形,短路前线路电流约为 47 A ,发生故障后,限流器立即发挥限流作用,到短路后 0.1 s 时,短路电流为 125 A ,而没有限流器的系统发生短路后,短路电流迅速上升,在 0.1 s 时达到稳态值 510 A 。可见,限流器限流效果明显。同时,在限流过程中,限流器两端电压最大值为 440 V ,没有过电压产生。

图8给出了交流侧a相的电流波形。短路前,线电流幅值为 47 A ,短路后 0.1 s 时,短路电流幅值被限制在 125 A ,而没有安装限流器的系统,短路后 0.1 s 时短路电流幅值为 510 A 。同时,该型超导限流器还具有快速复位,重复动作的功能,可以满足系统自动重合闸要求。

4 结论

本文提出的这种新型直流限流器由于采用了超导技术,在系统正常运行时,限流器对直流系统没有任何影响,超导线圈流过直流电,限流器的能量损耗很小,而且超导体具有载流密度高的优点,装置体积可大大缩小。当系统发生故障时,限流器能在短路

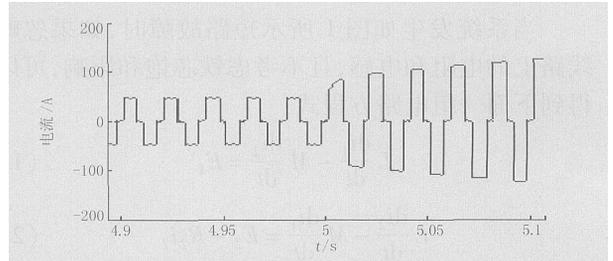


图8 交流侧a相电流的仿真图 ($t_f = 5 \text{ s}$)

Fig 8 A phase current simulation of AC side ($t_f = 5 \text{ s}$)

后 0.1 s 时将故障电流限制在正常值的 $2 \sim 3$ 倍,具有良好的限流效果,且不会产生过电压,其限流效果还可以通过提高超导线圈电感值得到进一步改善。限流器还可以在短时间内重复动作,满足系统重合闸要求。

参考文献:

- [1] 王章启,何俊佳,邹积岩,等. 电力开关技术 [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2003.
WANG Zhang-qi, HE Jun-jia, ZOU Ji-yan, et al. Electric Power Switch Technology [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003.
- [2] Ishigohka T, Sasaki N. Fundamental Test of New DC Superconducting Fault Current Limiter [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1991, 27 (2): 2341-2344.
- [3] 唐跃进,李敬东,段献忠,等. 21世纪电力工业的一个重要发展方向——超导电力技术 [J]. 中国工程科学, 2000, 2 (4): 1-7.
TANG Yue-jin, LI Jing-dong, DUAN Xian-zhong, et al. A Promising Topic in the Development of Electrical Engineering in the 21st Century [J]. Engineering Science, 2000, 2 (4): 1-7.
- [4] 马伟明. 交直流电力集成技术 [J]. 中国工程科学, 2002, 4 (12): 53-59.
MA Weiming. AC-DC Power Integration Techniques [J]. Engineering Science, 2002, 4 (12): 53-59.
- [5] 辜承林,陈乔夫,熊永前. 电机学 [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.
GU Cheng-lin, CHEN Qiao-fu, XIONG Yong-qian. Electric Machine Science [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.

收稿日期: 2004-07-05; 修回日期: 2004-10-12

作者简介:

王晨 (1981 -),男,硕士研究生,主要从事超导限流装置的研究与开发工作; E-mail: delubinavyl@263.net

(下转第19页 continued on page 19)

- Norway, 1996
- [13] 张志勇. 精通 MATLAB6.5 版 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.
ZHANG Zhi-yong Master MATLAB6.5 Version [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.
- [14] Sim Power Systems for Use with Simulink User's Guide [Z]. The Math Works, Inc., 2003.
- [15] 程正兴. 小波分析算法与应用 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998.
CHENG Zheng-xing Application and Algorithm of Wavelet [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [16] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994.
QIN Qian-qing, YANG Zong-kai Utility of Wavelet Analysis [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994.
- [17] Sedaaghi M H, Wu Q H. Real-time Implementation of Greyscale Morphological Operators [J]. IEE Electronics Letters, 1997, 33 (21): 1761-1763.
- [18] 何正友, 钱清泉. EHV 输电线路单端量电流暂态保护探讨 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22 (2): 16-19.
HE Zheng-you, QIAN Qing-quan A Study of Non-unit Current Transient Protection for EHV Transmission Line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22 (2): 16-19.
- [19] John S A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved Techniques for Modeling Fault Areas on Faulted EHV Transmission Systems [J]. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141 (2): 148-154.

收稿日期: 2004-07-01; 修回日期: 2004-08-03

作者简介:

胡 巨 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统中暂态保护。E-mail: hufreedom@163.com

Discussion on several problems of digital simulation in the transient protection for transmission line

HU JU, YANG Ming-yu, TAN Jian-she

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Based on the basic principle of transient protection, this paper discusses several problems of digital simulation in the transient protection, such as the selection of transmission lines model, comparison of digital simulation tools, application of signal processing technologies and several influencing factors in the research of transient protection simulation. Then, FD (Frequency-Dependent) line model with distribution parameters is selected, ATP and Matlab are compared, wavelet analysis and morphology algorithm are analysed, and several uncertain factors are discussed. Finally, the thought of digital simulation for transient protection is proposed.

Key words: transient protection; wavelet analysis; morphology algorithm; ATP; Matlab

(上接第 8 页 continued from page 8)

陈 磊 (1981 -), 男, 硕士研究生, 主要从事超导限流器的仿真研究;

唐跃进 (1964 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超导电力、电力系统和高电压应用技术研究。

Scheme design and simulation analysis of limiting effect on DC superconducting fault current limiter

WANG Chen, CHEN Lei, TANG Yue-jin, LI Jing-dong, CHENG Shi-jie

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to meet the requirements of protection, this paper proposes a new DC superconducting fault current limiter (SCDCFCL) and introduces the principle of SCDCFCL. The mathematic model is established, and the MATLAB simulations of two different DC sources are carried out. The simulation results confirm that the new SCDCFCL has no influence on power system in normal state. However, when the fault happens, it can limit the fault current perfectly.

Key words: superconducting; limiter; DC; short circuit