

桥式超导故障限流器的数字仿真研究

马幼捷, 刘富永, 周雪松, 弓晋霞

(天津理工大学, 天津 300191)

摘要: 桥式超导故障限流器, 它由超导磁体、二极管桥路和直流偏压源组成。超导故障限流器与常规限流电抗器不同之处是: 将其接入电网, 当电力系统正常运行时, 超导体电阻几乎为零, 对电力系统运行无影响; 当电网发生短路故障时, 超导线圈可以无时延地被自动串入线路, 从而限制了短路故障电流, 使得轻型断路器可以正常动作。通过 PSCAD 软件对超导故障限流器的运行特性进行仿真分析, 证明超导故障限流器在电力系统中应用的意义与前景。

关键词: 电力系统; 超导故障限流器; 超导线圈; 短路故障; 断路器

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)23-0024-05

0 引言

随着我国国民经济的发展, 电力系统容量快速增长, 导致电网短路功率及故障短路电流迅速增大, 电力系统安全稳定性问题越来越重要^[1]。为了保证稳定地输送大容量、高质量的电能, 继电保护装置等必须满足高值短路电流带来的更严格的要求。超导故障限流器(SFCL)能在亚毫秒级内有效限制故障电流, 显著降低高压断路器的开断容量, 它集检测、转换和限流于一身, 是一种有效的电力系统故障保护装置。

超导故障限流器(SFCL)是近年来新兴交叉学科——超导电力技术的一个重要研究课题, 是现代电力系统中新兴的重要元件, 属于灵活交流输电技术 FACTS(Flexible AC Transmission System)的研究范畴, 根据是否利用超导体的失超特性限流, 分为失超型和不失超型。其中不失超型超导故障限流器与现代电力电子技术相结合, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)和西屋电气公司(Westinghouse Electric Corporation)于 1982 年首先提出了桥路型 SFCL 的概念, 并成功研制了一台桥路型 SFCL, 该限流器属于不失超型超导故障限流器的一种^[2,3]。

1 桥路型 SFCL 拓扑及仿真分析

桥路型 SFCL 充分利用了超导材料在直流状态下的无阻载流特性, 主要由二极管桥路 $D_1 \sim D_4$ 、超导线圈 L (超导电感) 和直流偏压源 DC 组成, 与其

串联的断路器 CB 用于开断被降低的故障电流, DC 用于向超导线圈提供偏流 i_c 。正常运行期间调节 DC 使 $i_c = I_0$ (I_0 是偏压源 DC 提供给超导线圈偏流的初始值), 使 I_0 大于线路电流 i_{ac} 的峰值, 于是二极管桥路始终导通, 除桥路上有较小的正向电压降以外, SFCL 对 i_{ac} 不表现出任何阻抗。故障状态下 i_{ac} 的幅值增大到 I_0 时, 在 i_{ac} 正半周内二极管 D_3 和 D_4 不导通, 而在负半周内 D_1 和 D_2 不导通, 超导线圈就被自动地串接入线路, 故障电流就被大电感 L 所限制。由于超导线圈是自动投入或退出限流状态, 限流器反应时间、恢复时间几乎为零^[4]。

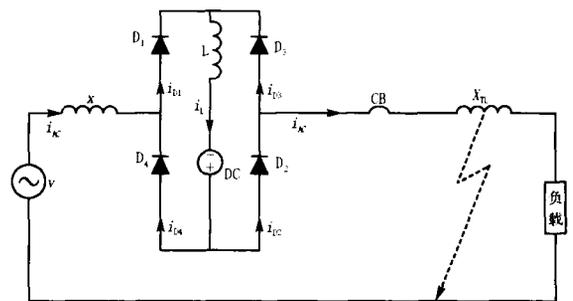


图 1 桥式超导故障限流器

Fig 1 Schematic diagram of SFCL with a diode bridge

设 4 个二极管 $D_1 \sim D_4$ 的电流分别为 i_{b1} 、 i_{b2} 、 i_{b3} 和 i_{b4} (参考方向如图 1 所示), 线路电流为:

$$i_{ac} = I_{max} \sin(\omega t + \phi)$$

对二极管桥路由基尔霍夫电流定律(KCL)得到如下方程组:

$$i_{ac} + i_{b4} = i_{b1}$$

$$i_{b1} + i_{b3} = i_c$$

$$i_{b2} + i_{b4} = i_c$$

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目(96-A19-05-02)

$$\dot{i}_3 + i_{ac} = \dot{i}_2$$

由桥式电路对称性得:

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_2$$

$$\dot{i}_3 = \dot{i}_4$$

求解以上方程可得:

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_2 = \frac{1}{2} (\dot{i} + i_{ac})$$

$$\dot{i}_3 = \dot{i}_4 = \frac{1}{2} (\dot{i} - i_{ac})$$

我们可以看出只要超导线圈偏流的初始值 i 大于线路电流 i_{ac} 的峰值,二极管桥路就是始终导通的。

据此给出桥式超导故障限流器的线路、超导线圈及各个二极管的稳态电流曲线如图 2 所示。

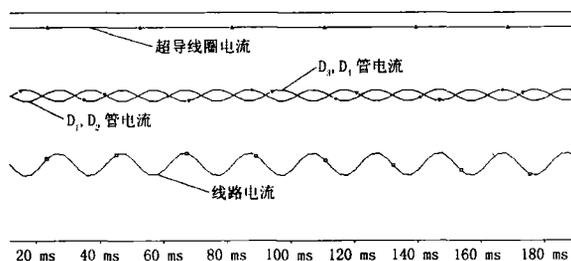


图 2 桥式超导故障限流器的稳态电流曲线

Fig 2 Steady state currents of SFCL with a diode bridge

当线路发生短路故障时,超导线圈就自动串入线路,短路电流的上升速率就被大电感 L 所限制。为简化起见,假定短路故障发生在电源电压过零瞬间(初相角 $= 0$),由基尔霍夫电压定律 (KVL) 得到:

$$V_{max} \sin t + V_b = L \frac{di}{dt}$$

即:

$$di = \frac{1}{L} (V_{max} \sin t + V_b) dt$$

两边积分得:

$$i(t) = \int_0^t di = \int_0^t \frac{1}{L} (V_{max} \sin t + V_b) dt = \left. \frac{1}{L} \left[-\frac{V_{max}}{\omega} \cos t + \frac{V_{max}}{\omega} + V_b t + A \right] \right|_0^t$$

因为 $i(0) = I_0$, 所以 $A = LI_0$, 则

$$i(t) = I_0 + \frac{V_{max}}{\omega L} (1 - \cos t) + \frac{V_b}{L} t$$

式中: V_{max} 是相电压的峰值。

图 3 给出了短路故障发生后桥式超导故障限流器中二极管、超导线圈电流及线路电流波形。

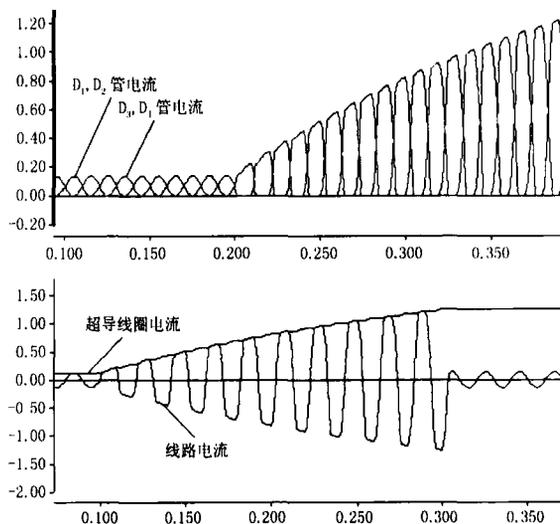


图 3 桥式超导故障限流器在故障期间的电流

Fig 3 Currents in SFCL with a diode bridge during fault conditions

从以上仿真波形我们可以看出,当短路故障发生后,短路电流被大电感 L 限制而缓慢增加,即桥式超导故障限流器可以不失超地限制短路故障电流。由于超导电感的引入,会增加放电时间常数 ($= L/R$),一定程度上会影响快速重合闸及发生二次故障快速投入。因此,在原拓扑结构的基础上,增加了并联偏压源支路、限流电阻 R 及门极可关断晶闸管 (GTO) 开关,提出了串阻型桥路 SFCL 的概念^[5],如图 4 所示。

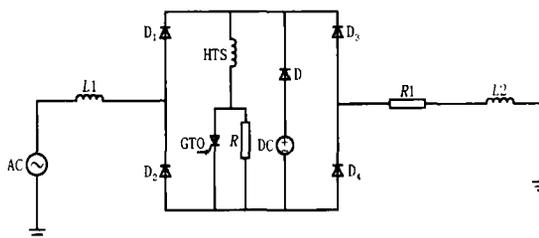


图 4 串阻型桥路故障限流器

Fig 4 Bridge-type SFCL with resistor in series

偏压源支路用来给 HTS 单方向充电,使线圈电流高于线路电流峰值,以保证限流器在负荷波动时不会发生误动作。限流电阻 R 与 GTO 开关并联,再与 HTS 串联。在短路故障发生后,HTS 串入限流,当电流超过某一定值时触发 GTO 导通,将电阻串入,与 HTS 一起抑制短路电流。有了限流电阻后,增加了限流器的限流能力,另一方面,还可以在故障结束后帮助 HTS 迅速放电,以备快速重合闸及发生二次故障快速投入,故障期间仿真波形如图 5 所示。

串阻型桥路 SFCL 较桥路 SFCL 具有更好的动

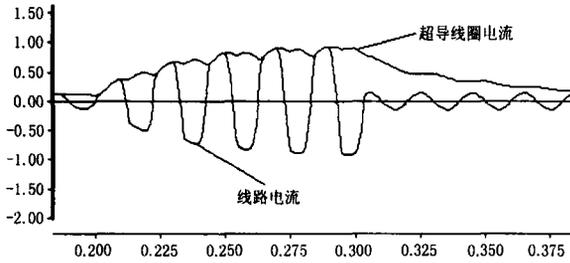


图 5 串阻型桥路故障限流器在故障期间的电流

Fig 5 Currents in bridge-type SFCL with resistor in series during fault conditions

作特性,不仅能够抑制故障电流峰值,而且能抑制故障电流的稳态值;另外,限流电阻的存在使得 HTS 电感不必设计得很大,节省了昂贵的超导材料。接入电网的方式可以采用 3 个单相串阻型桥路 SFCL, 或者通过 3 个连接变压器接入 (如图 6 所示) [6]。

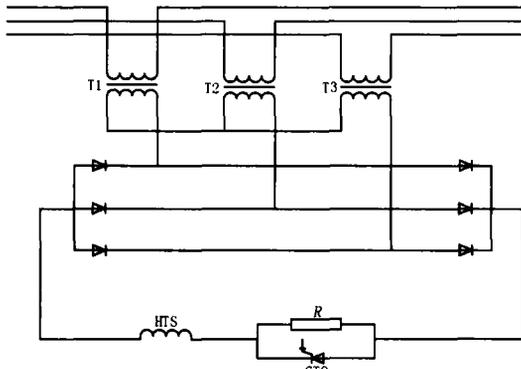


图 6 串阻型桥路故障限流器的三相接线方式

Fig 6 Three-phase topology of bridge-type SFCL with resistor in series

根据上述理论与仿真分析,现将桥路型 SFCL 与天津大无缝公司的配电网相结合,解决该公司的“中性点接地系统发生三相短路故障时母线残压低”的技术难题,由于大无缝配电系统 10 kV 母线采用的是双母线分段运行方式,所有负荷以并联的方式挂在母线上,该配电系统的简化的单相等值电路如图 7 所示。

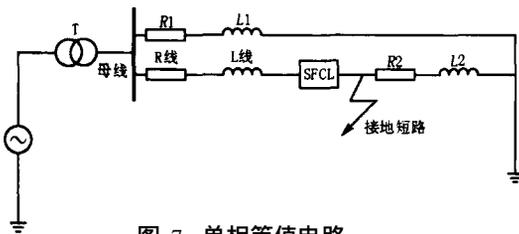


图 7 单相等值电路

Fig 7 Single-phase equivalent circuit

用 PSCAD 软件对该等值电路进行仿真研究,其

仿真模型如图 8 所示。

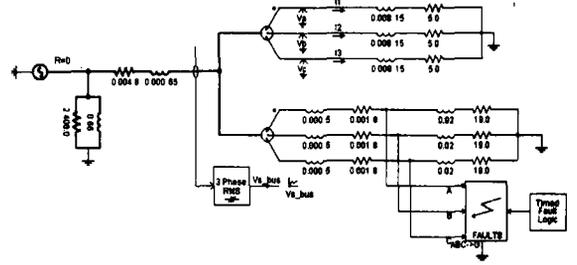


图 8 仿真模型

Fig 8 Simulation model

未加限流器时的仿真结果如图 9 所示。

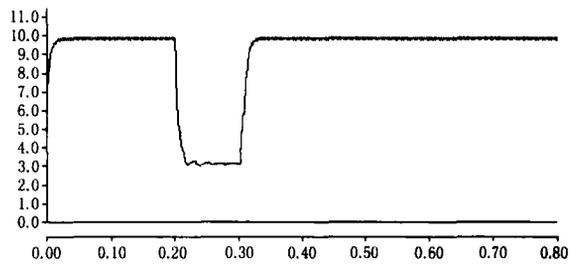


图 9 未加限流器时的母线电压

Fig 9 Bus voltage without SFCL

虽然三相短路故障发生的概率最小,但它对电力系统的影响最严重。当三相短路故障发生时 (0.2 s 发生短路), 母线电压瞬间跌落到了 3 kV 左右, 严重影响了负荷的正常运行。

为了解决这一困难,我们可以在配电网中安装超导故障限流器,安装位置如图 7 所示,此时仿真结果如图 10 所示。

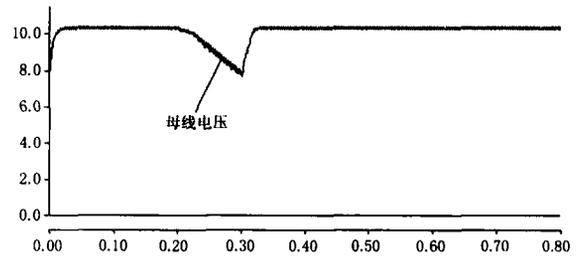
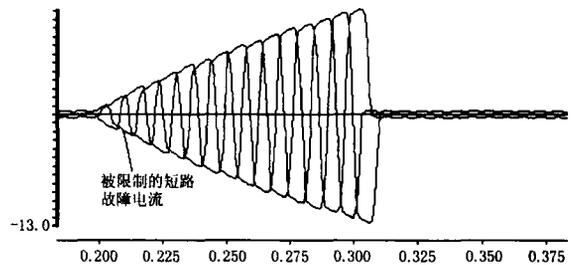


图 10 有 SFCL 时的故障情况

Fig 10 Fault condition with SFCL

可见,加装超导故障限流器后,不仅能有效地限

制故障发生后的冲击电流,而且能维持母线电压在 8 kV 左右,使负荷能正常运行,对系统几乎不会造成影响。

面对电力系统中发生概率最高的单相接地短路,桥路型 SFCL 较之熔断器、常规限流器优势更加突出。熔断器虽能切断故障线路,但需要频繁更换;常规限流器会导致电压降和网络损耗的增加,并降低系统的稳定性。为此将桥路型 SFCL 应用于上述配电系统中,仿真结果如图 11 所示。

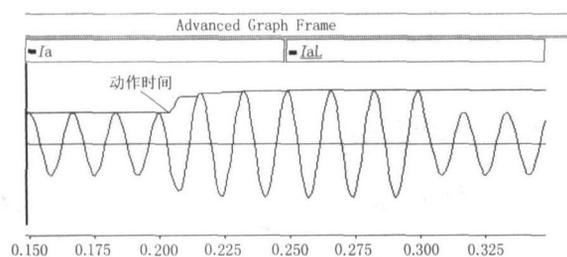


图 11 单相仿真

Fig 11 Single-phase simulation

从上述仿真结果可以看出,超导故障限流器的动作时间为 0.003 s,而一般常规限流器动作时间为 5 个周波左右;由于采用超导材料,较之常规限流器,超导故障限流器具有体积小、重量轻的特点,正常情况下无损耗,投入使用时也不会引起附加震荡,满足了电力系统中限流技术的要求,是电力系统中的有效保护设备。

通过计算机仿真我们可以看到当发生短路故障时,由于桥路型 SFCL 的快速投入,抑制了短路故障电流,提高了母线电压,保证了供电质量,不至于因发生短路故障后母线电压大幅度跌落,同时又可以采用轻型断路器而不用更换现有的开关设备,具有一定的经济效益^[7]。

2 限流效果分析

在电力系统中采用超导故障限流器的主要目的之一就是能限制故障电流,使之不超过断路器的瞬时开断能力。故障电流缩减率 $D\%$ 是表示桥式超导故障限流器限流效果的重要参数。 D 的取值范围为 $0 < D < 1$,其表达式为:

$$D\% = \frac{i_p - i_{im}}{i_p} \times 100\%$$

i_p 为无 SFCL 发生三相短路时的冲击电流,与系统的等值短路比 X/R 有关,计算式为: $i_p = [1 + \exp(-0.01/T_a)] I_p = K_m I_p$ 。其中 $K_m = [1 + \exp(-0.01/T_a)]$ 称为冲击系数,它表示冲击电流为短路

电流周期分量幅值的倍数。 T_a 为时间常数, $T_a = X/R$ 。短路冲击电流与短路比 X/R 有关,当时间常数 T_a 的数值由零变到无穷大时,冲击系数的变化范围为 $1 \sim K_m$ 。

i_{im} 为装设 SFCL 后,被限制的短路电流的峰值,由式

$$i(t) = I_0 + \frac{V_{max}}{L} (1 - \cos t) + \frac{V_b}{L} t$$

因为故障电流是在短路发生后的半个周波达到最大值,因此,在分析问题取 $t = 0.01$ s,又因偏压源 V_b 的数值远远小于系统电压,可以忽略。所以, $i_{im} = I_0 + 2V_{max}/L$, I_0 是桥式 SFCL 正常运行期间偏压源输出的直流偏流,其值要大于线路电流的峰值。短路发生后约半个周波时, SFCL 的故障电流缩减率 $D\%$ 表达式为:

$$D\% = \left(1 - \frac{I_0 + \frac{2V_{max}}{L}}{K_m I_p}\right) \times 100\%$$

式中: I_p 为短路电流周期分量的幅值。根据图 8 仿真模型提供的参数计算得此时的短路故障电流缩减率约为 90% 左右。可见,限流效果是非常好的。

3 结论

通过仿真分析,本文使用的桥式超导故障限流器可以不失超地限制短路故障电流。在系统正常运行时,由于直流偏置的作用,既无暂态过程,桥路电感也不产生无功压降;系统故障时桥路限流电感的突然插入,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还较小时就切断线路,不用更换现有的开关设备,节省了电网的投资,在电力系统中具有广阔的应用前景和研究价值,为超导故障限流器在电网中的实用化作了有意义的探索。专家们预言,超导故障限流器最有望在配电网中应用,而且,近些年来,面向配电系统的 SFCL 已经接近实用化水平。因此,在某公司配电网中应用超导故障限流器,解决该公司的“中性点接地系统发生三相短路时母线残压低”这一技术难题还是具有一定的可行性。一旦顺利完成并成功实施预交方案,即可推广应用于各同类行业,减小企业因短路故障带来的巨额经济损失,具有较大的经济效益和科技效益。

参考文献:

- [1] 马幼捷,刘富永,周雪松,等. 超导故障限流器的基本原理及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2005,

- 29(增刊): 232-235.
 MA You-jie, LU Fu-yong, ZHOU Xue-song, et al The Basic Principle of the Superconducting Fault Current Limiter and Its Application in Power System [J]. Power System Technology, 2005, 29(S): 232-235.
- [2] Boenig H J. Fault Current Limiter Using a Superconducting Coil [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1982, 19(3): 1051-1053.
- [3] Leung EM W, Albert GW, Dew M, et al High Temperature Superconducting Fault Current Limiter for Utility Applications [J]. Proceedings of International Workshop on Fault Current Limiters, 1995.
- [4] 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 Liang-zhen Short Circuit Test of Superconducting Fault Current Limiter with a Diode Bridge [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 9-11.
- [5] 叶莺, 肖立业. 超导故障限流器的应用研究新进展 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 92-96.
 YE Ying, XIAO Li-ye New Development of High Temperature Superconducting Fault Current Limiter System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 92-96.
- [6] Aho M C, Kang H, Kweon D, et al The Short-Circuit Characteristics of a DC Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter with Fault Detection and Signal Control of the Power Converter [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2005, 11(2): 2102-2105.
- [7] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 1-4.
 YE Lin, LIN Liang-zhen Superconducting Fault Current Limiter Applications in Electric Power Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 1-4.

收稿日期: 2006-06-02; 修回日期: 2006-07-24

作者简介:

马幼捷(1964-),女,博士,教授,从事电力系统分析与控制方面的研究工作;

刘富永(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: sjteam@eyou.com

周雪松(1964-),男,博士,教授,从事电力电子和电机控制应用方面的研究工作。

Digital simulation study of superconducting fault current limiter with a diode bridge

MA You-jie, LU Fu-yong, ZHOU Xue-song, GONG Jin-xia
 (Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

Abstract: The limiter consists of a superconducting coil, a diode bridge and a bias voltage supply. The device presents no impedance to the current flowing through the power system during normal operation. Under short circuit conditions, the superconducting coil will be automatically inserted into the system and thereby limits the fault current, so that the underrated switchgears can be operated safely. To evaluate the performance of the superconducting fault current limiter (SFCL), the PSCAD analysis has been executed on a power system. Results shows that the SFCL could be used as a practical device in electric power systems.

Key words: power systems; superconducting fault current limiter (SFCL); superconducting coil; short-circuit fault; circuit breaker

(上接第 23 页 continued from page 23)

Abstract: The simple genetic algorithm is constrained by its poor converging performance and readily leads to local optimization. In terms of characteristics of the control variables used in reactive power optimization, the paper presents an improved genetic approach, which is based on hybrid-coding of integer and real numbers. In the modified algorithm, different reproduction patterns are employed at different stages. The operations of arithmetic crossover and mutation are determined according to the types of their variables, and their probabilities vary with the evolution time. The penalty coefficient, applied to the objective function, meets the exponential variation law. Results of calculation and simulation for IEEE14-and IEEE118 bus systems show that, in the aspects of convergence speed and global solution, the improved genetic algorithm is better than the simple one.

Key words: reactive power optimization; genetic algorithm; active power loss; hybrid code; penalty coefficient