

桥式超导限流器与电力系统距离保护配合问题研究及算法改进

高强^{1,2}, 叶莺^{1,2}, 张志峰¹, 惠东¹, 肖立业¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

摘要: 随着对超导限流技术研究的不断深入, 与电网匹配运行的问题被提上日程。针对桥式超导限流器与继电保护的配合问题进行研究, 从理论上分析了桥式超导故障限流器对距离保护的影响; 同时结合微机保护的特点, 提出了一种从微机保护的算法中剔除投入超导限流器后所带来的影响的新算法。并通过 EMTDC/PSCAD 仿真, 验证了该算法的有效性, 从实际应用的角度提出了一种解决超导限流器与微机距离保护相配合的新思路。

关键词: 距离保护; 微机保护; 高温超导限流器

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)14-0007-04

0 引言

随着近些年电网容量的不断增加, 短路电流等级的提高, 为了解决高等级的短路电流与容量有限的断路器之间的矛盾, 国内外不少研究单位都开展了对限流器的研究, 并且研制出了各种类型的限流器。

中国科学院电工研究所自主研制的新型高温超导限流器, 采用桥式拓扑结构, 它既限制故障电流峰值, 又限制故障电流的稳态值; 同时, 限流过程中, 故障电流主要消耗在限流电阻上, 而不是消耗在超导电感上, 从而大大降低了低温系统的功率级别和运行费用, 并且具有快速的恢复能力^[1]。

在此基础上, 如何能更好地将限流器应用到电网中运行, 成为现在急需解决的一个问题^[2,3]。而在与系统中的各设备的匹配运行中, 限流器与继电保护装置的关系最为密切。

当系统中安装限流器后, 必然会对继电保护产生影响, 尤其会对距离保护产生很大的影响。目前针对限流器与距离保护相匹配问题的解决办法主要有两方面^[4]: 一是为了保证距离保护的灵敏度, 要求限流电感和电阻必须低于某一个值, 使其对灵敏度的影响不会太大, 满足可以正常工作的条件; 二是调整距离保护的整定值。

针对桥式超导限流器, 第一种解决方式是以牺牲限流器的限流能力来满足距离保护的灵敏度要求; 而由于限流器在限流过程中阻抗具有时变性, 因

此第二种通过调整距离保护的整定值的办法来消除对 SFCL (Superconducting Fault Current Limiter) 带来的影响也不可行。

因此, 本文主要针对基于桥式的高温超导限流器, 结合当前广泛应用的微机保护^[5], 在不会影响到 SFCL 的限流能力的前提下, 提出了一种通过对距离保护算法的改进, 来消除 SFCL 对距离保护影响的办法。

1 SFCL 对距离保护的影响的分析

1.1 新型桥式超导限流器限流原理简介

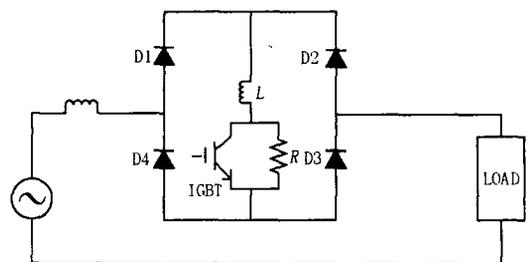


图 1 SFCL 拓扑结构

Fig 1 Topology of SFCL

图 1 所示为电工研究所采用的桥式拓扑的超导限流器的电路图。D1 ~ D4 是 4 个二极管组成的桥路, 桥路直流侧的 R 为限流电阻, 与其并联的是 IGBT, L 为超导电感。其工作原理简介如下:

设线路电流为 i_l , 桥路的直流侧电流为 i_{dc} 。

在正常工作稳态时, 桥式电路的直流侧的 IGBT 处于导通状态, 因此此时直流侧串入超导电感, 由于电感的储能作用, 直流侧的电流始终处于线路电流的峰值, 使 D1、D2、D3、D4 四个二极管始终导通。

因此在这个状态下超导限流器对外阻抗为零,即对线路没有任何影响。

当发生故障后,随着线路电流的增大,使 D1、D3和 D2、D4 轮流导通,当超过故障电流门限时,IGBT关断,将 R 串入到直流侧。因此直流侧的超导电感 L 和限流电阻 R 分别起到限制故障暂态电流和稳态电流的作用。由于 L 和 R 的限流作用,使得在每个周期内,均有直流侧电流大于线路电流和直流侧电流小于线路电流两种状态的存在,所以在故障状态下超导限流器对外阻抗具有时变的特性。

由于故障时,当 SFCL 串入线路中后,其两端会因 L 和 R 的限流作用而产生压降。因此,可以通过采集 SFCL 两端的电压差 U_{sfcl} 来判断限流器当前的状态,如图 2 所示。

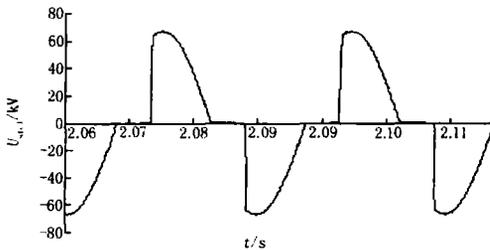


图 2 SFCL 两端电压
Fig 2 Double-end voltage of SFCL

因此,根据上面的分析,桥式限流器在运行中可能有两种状态:

In: $U_{sfcl} > U_{th}$ (即线路电流等于直流侧电流),对外表现为限流器中的电阻和电感串入到线路中。

Out: $U_{sfcl} < U_{th}$ (即线路电流小于直流侧电流),对外表现为限流器中的电阻和电感没有串入到线路,即限流器阻抗为 0。

1.2 投入 SFCL 后对距离保护影响的分析

从方向阻抗继电器的特性(如图 3 所示)可知,圆内为动作区,圆外为不动作区。

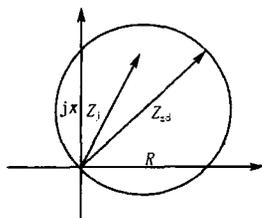


图 3 方向阻抗继电器动作圆
Fig 3 Operation circle of distance impedance relay

而由上文对限流器的原理分析可知,在故障状态,由于限流器直流侧的 L 和 R 的投入,测量阻抗有可能超过方向阻抗继电器的动作圆的范围,导致

距离保护拒动。因此加入限流器会降低距离保护的灵敏度。

从测量阻抗可能超出阻抗继电器的动作圆的角度考虑,一般的解决方案有两种:

1)根据 SFCL 的 R 和 L 的值,调整继保的整定值。

2)调整 SFCL 的 R 和 L 的值,使其不会对距离保护的灵敏度产生较大的影响。

但由上文对桥式 SFCL 原理的分析可知, SFCL 故障时阻抗具有时变特性,因此仅仅通过改变整定值无法消除安装 SFCL 带来的影响,方法 a 不可行;而方法 b 又对限流器提出了附加的要求,通过降低限流器的限流效果来达到满足距离保护的正确动作的目的。

综上,针对桥式限流器,传统的两种从阻抗继电器特性出发的解决方案均不可行。

1.3 针对微机距离保护的解决方法

目前广泛应用的微机保护方式,通过实时采集电压、电流等电气参数,根据不同的保护原理设计算法来实现各种保护。因此,只要能够通过采集到的电气量实时地判断出当前时刻系统的状态,就可以对不同的状态采用不同的算法,从而消除线路中某些具有时变性的电气参数对计算的影响。

由上文 1.1 对新型桥路 SFCL 原理的论述可知,通过将 SFCL 两端的电压 U_{sfcl} 与一定的门限值比较可以确定 SFCL 当前时刻的状态。

综上,微机保护实时采集电气参数的工作方式以及可通过 U_{sfcl} 确定 SFCL 当前的状态,使我们可以改进距离保护计算阻抗的算法来消除装入 SFCL 对距离保护带来的影响。

下面就发生对地短路和相间短路故障时,对距离保护算法的修正进行详细的分析说明。

1.3.1 相间短路线路阻抗阻值算法的修正

相间短路由于无零序电流,因此算法简单,在实际的微机保护当中,可以由求解基本电路关系推导出来的微分方程的办法。

具体公式如下:

$$U_{\phi\phi} = L_{\phi\phi} \frac{di_{\phi\phi}}{dt} + R i_{\phi\phi},$$

$$= AB; BC; CA \quad (1)$$

在不加入限流器的情况下,由于故障后阻抗即为线路阻抗,而在输电线路阻抗呈均匀分布,因此存在关系:

$$L = K \cdot R \quad (2)$$

(K 为单位距离上电阻与电感数值上的比值)

将(2)代入(1)化简得:

$$U_{\phi\phi} = KR_{\phi\phi} \frac{di_{\phi\phi}}{dt} + R i_{\phi\phi} \quad (3)$$

当限流器处在状态 Out 时,此时的情况与没有加入限流器的情况相同,即对外显示阻抗为 0,则整定值算法的结果为公式(3)。

当限流器处于 In 状态时,将 SFCL 中的限流电感 L 和限流电阻 R 考虑进来,于是公式(1)修正为:

$$U = (L_{\phi\phi} + L_{im}) \frac{di_{\phi\phi}}{dt} + (R + R_{im}) i_{\phi\phi} \quad (4)$$

$\phi\phi = AB; BC; CA$

将 $L = K \cdot R$ 代入化简得:

$$U = (KR_{\phi\phi} + L_{im}) \frac{di_{\phi\phi}}{dt} + (R + R_{im}) i_{\phi\phi} \quad (5)$$

$\phi\phi = AB; BC; CA$

由公式(5)可以消除在限流器串入线路后对测量阻抗的影响,可以测得真实的线路阻抗。

1.3.2 接地短路线路阻抗阻值算法的修正

对于接地短路的情况,大体上与相间短路的情况类似,只是在计算的时候要将零序电流考虑进来。具体到算法中,只需将 i 换为 $(i + K_X 3 i_0)$, 别的其它参量由原来的相间参量换为单相的参量即可。

因此对接地短路的处理算法如下所示。

$U_{sfcl} > U_{th}$ 时:

$$U = KR \frac{d(i_{\phi} + K_X 3 i_0)}{dt} + R(i_{\phi} + K_X 3 i_0) + L_{im} \cdot \frac{d(i_{\phi} + K_X 3 i_0)}{dt} + R_{im}(i_{\phi} + K_X 3 i_0) = A; B; C \quad (6)$$

上式中: $K_X = \frac{R_0 - R_1}{3R_1}$

$U_{sfcl} < U_{th}$ 时:

$$U = RK \frac{d(i_{\phi} + K_X 3 i_0)}{dt} + R(i_{\phi} + K_X 3 i_0) = A; B; C \quad (7)$$

综上,针对不同的故障类型,均可采用将 SFCL 的参数计入继保算法中来消除对线路阻抗计算的影响。

因此,对于消除限流器对于距离保护的影响,应对继保算法做以下几个方面的改进:

1)采集限流器两端电压,考虑到实际情况,稳态时不可能完全为零,因此有一个门限值 U_{th} 。通过对比 U_{sfcl} 和 U_{th} 之间的大小来实现对 SFCL 状态的判断。

2)当 $U_{sfcl} > U_{th}$ 时,限流器的电感和电阻均串入到了线路中的情况,采用上文提出的新的算法式(5)(相间故障)或式(6)(对地故障)来进行计算阻抗值。

结合微机保护中求解微分方程的思路与上面所述的改进的计算算法,得出改进后对线路阻抗的计算算法实现的流程图如图 4 所示。

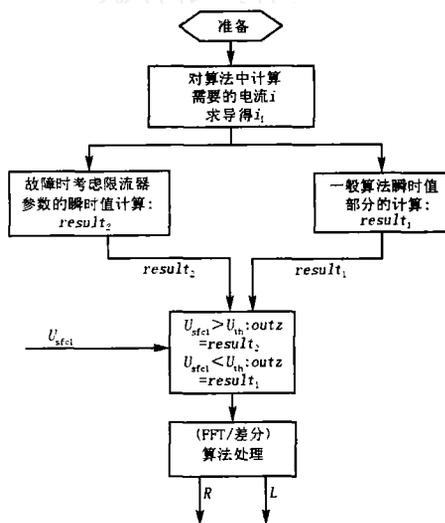


图 4 新算法流程图

Fig 4 New algorithm flow chart

图 4 中: i 为实时采集的线路电流; $result_1$ 为没考虑 SFCL 计算的瞬时值; $result_2$ 为考虑 SFCL 计算的瞬时值; $outz$ 为通过对输入的 U_{sfcl} 的判断选择输出 $result_1$ 或 $result_2$ 得到的改进算法的分子瞬时计算结果; R 为经过 FFT 或差分算法对 $outz$ 处理得出的线路阻抗中的电阻分量; L 为经过 FFT 或差分算法对 $outz$ 处理得出的线路阻抗中的电感分量。

表 1 系统仿真参数表

Tab 1 Parameter of power system for simulation		
	系统电压	110 kV
三相系统参数	故障前系统	5.445 + j39.4
	单相总阻抗	
	故障后单相	0.495 + j3.58
	线路阻抗	
	限流电阻	3
SFCL 参数	限流电感	25 mH
	IGBT 开关动作	5.8 kA
	电流量限值	
故障参数	故障发生时刻	2 s
	故障持续时间	0.5 s

2 距离保护改进算法的仿真分析

根据上面所述的算法改进思路,本文采用 EMT-

DC/PSCAD进行仿真。仿真模型是一个发生相间短路和接地短路故障的三相系统。分别对系统中含有SFCL采用改进后的算法和未改进的算法的仿真结果,与未装入SFCL时的仿真结果进行比较。

2.1 发生A相对地短路

1)根据不同算法得出的线路电阻和电感值曲线如图5、6所示。

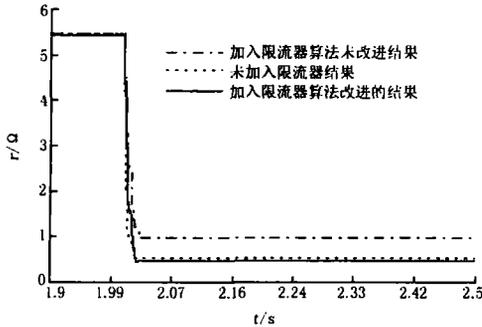


图5 对地短路线路电阻值变化曲线

Fig 5 Curves of value of resistance to ground

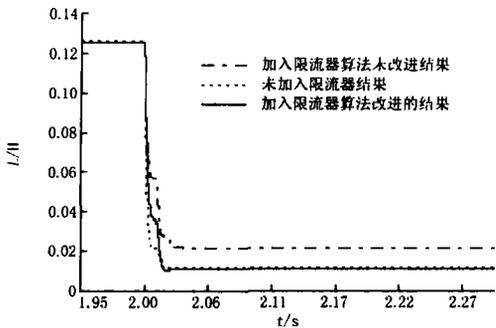


图6 对地短路线路电感值变化曲线

Fig 6 Curves of values of inductance grounded

从图中可以看出：

采用没有改进的算法,由于未考虑SFCL的参数,所得的结果要高于没有加入限流器时的值(即实际线路的电阻、电感值),这样就可能超过距离保护的整定值,造成继保拒动。

对于改进后算法得出的结果,与没有加入限流器时所得的结果基本一致,曲线的形状也十分接近,且它的值也基本维持在实际值0.495、0.0112附近。因此完全消除了SFCL对距离保护带来的影响。

2.2 发生AB相间短路

如图7、8所示,与对地短路时的情况相同,相间短路采用改进的算法后,所计算出的线路电阻、电感值和实际值基本相同,大大地消除了在线路中加入限流器所带来的影响。

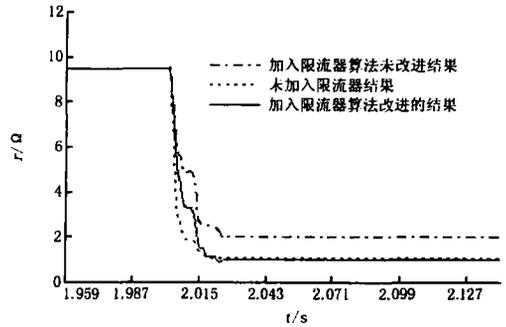


图7 相间短路线路电阻值变化曲线

Fig 7 Curves of resistance value of inter phase short line

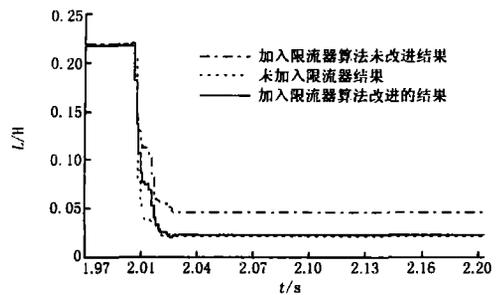


图8 相间短路线路电感值变化曲线

Fig 8 Curve of inductances value of inter phase short line

3 结论

因为基于新型桥式的限流器对外阻抗的时变性,所以通过分析限流器的阻抗特性,进而分析对继保影响会非常的复杂,而且脱离了实际中继保的实现方式。通过本文的分析可以看出,结合微机保护的特点,将限流器瞬态的参数加入到继保运算的电力系统模型中,通过改变继保算法中的一些参数及运算方式,可以成功地消除限流器对距离保护动作的影响。

此算法对目前广泛使用微机嵌入式系统实现的继电保护装置的硬件几乎没有改动,只需在软件算法实现上进行修改即可实现,因此简单易行。

参考文献:

[1] 刘尚,张志丰,刘昕,等.一种新型桥式高温超导限流器的研究[J].电气应用,2005,24(11):28-31.
 LU Shang, ZHANG Zhi-feng, LU Xin, et al Research of a New Type B bridge-HSFCL[J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(11): 28-31.

(下转第14页 continued on page 14)

SHEN Lu-yu, WANG Zhong, SONG Bing, et al Introduction of a New Type Integrated Protection Equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(3): 46-48

作者简介:

黄海悦(1975-),女,硕士,工程师,主要从事电力系统继电保护的研究工作;E-mail: huanghaiyue@dongfang-china.com

缪欣(1972-),男,硕士,工程师,主要从事电力系统自动化的研究工作。

收稿日期: 2006-02-23

Relay protection platform based on elemental and programmable logic

HUANG Hai-yue, MAO Xin, QUAN Xian-jun, XU Guang-teng, ZHANG Qing-shan, ZHANG Ma-long, YANG Ze-ping
(Yantai Dongfang Electronic Information Industry Co., Ltd, Yantai 264000, China)

Abstract: This paper proposes a new platform of microcomputer-based relay protection, which can make system constructed by the programmable logic, and the relay protection functions are packed to elements. This platform of the protection relay can improve the reliability, the flexibility, the expandability and the portability of the relay protection device, and reduce the time of the research and development. The application method of packing the element and the application method of programmable logic are discussed in detail.

Key words: elemental; programmable logic; microcomputer-based relay protection; platform

(上接第 10 页 continued from page 10)

[2] Hassenzahl W V, Hazelton D W, Johnson B K, et al Electric Power Applications of Superconductivity[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(10): 1655-1674.

[3] Steurer M, Noe M, Breuer F. Power Engineering Society General Meeting[A]. IEEE 2004. 1423-1425.

[4] 叶林. 超导限流器在电力系统中的应用研究(博士学位论文)[D]. 北京:中国科学院, 2000.

YE Lin. Application of Superconducting Fault Current Limiter in Electric Power System, Doctoral Dissertation [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2000.

[5] 李刚,王翠霞,温渤婴. 一种新型微机继电保护实验装置的研制[J]. 继电器, 2005, 33(22): 16-20.

LI Gang, WANG Cui-xia, WEN Bo-ying. Research and Development of a New Experimental Device for Digital Relay Protection [J]. Relay, 2005, 33(22): 16-20.

收稿日期: 2006-02-10; 修回日期: 2006-02-27

作者简介:

高强(1981-),男,硕士研究生,研究方向为超导限流器与继电保护的匹配问题;E-mail: gaoqiang@mail.iee.ac.cn

惠东(1968-),男,副研究员,从事超导电力应用的科研工作。

Research of relationship between SFCL and distance relay of power system and the improvement of the algorithm of distance protection

GAO Qiang^{1,2}, YE Ying^{1,2}, ZHANG Zhi-feng¹, HU IDong¹, XIAO Li-ye¹

(1. Institute of Electrical Engineer of Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Graduate University, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: With deep research of SFCL, the matching problem between SFCL and relay protection in power system is to be solved. This paper theoretically analyzes the influence that bridge-type SFCL brings to the distance relay. And considering the characteristics of microcomputer-based protection, a new algorithm is proposed to eliminate the influence. EMTDC/PSCAD simulation shows that the algorithm is valid. It is a new idea to solve the matching problem between SFCL and distance relay protection.

Key words: distance relay; microcomputer-based protection; HSFCL