

# 一种新型故障限流器在电力系统中的应用研究

姚守学<sup>1</sup>,程健雄<sup>2</sup>,蔡盛舟<sup>3</sup>,李建明<sup>4</sup>

(1. 广元电业局,四川 广元 628000; 2. 四川省电力公司资阳公司,四川 成都 610039;  
3. 攀枝花电业局,四川 攀枝花 617067; 4. 四川电力科学研究院,四川 成都 610072)

**摘要:**提出了一种基于集成门极换流晶闸管 IGCT 和固态电力电子开关的故障限流器,它由电感和 IGCT 等组成。正常时,串在电路中,基本无能量损耗,故障时控制短路电流大小。通过 PSCAD 的仿真分析和现场试验,证明了其有良好的限流性能,可以作为电力系统中有用的保护设备。

**关键词:** 短路电流; FCL; PSCAD

**Abstract:** A fault current limiter based on integrated gate commutated thyristors (IGCT) and solid-state power electronic switches is proposed, which consists of components such as inductors and IGCT. It is in series with the circuit without energy loss on the whole in the normal state, while in the fault state, it controls the amplitude of short-circuit current. By PSCAD simulation analysis and field test, its good performance of current limiting is proved, which can be used as the effective protection equipment in power system.

**Key words:** short-circuit current; fault current limiter (FCL); PSCAD

中图分类号: TM771 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0061-03

## 0 引言

随着电力系统规模的扩大,系统电网功率不断增大,短路电流水平也相应增加,电力系统安全稳定性问题越来越重要。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,为了保证变压器等电力设备不会在系统故障电流冲击下损坏。通常限制短路电流的措施可从电力网结构、系统运行方式和设备性能三方面考虑。改造电力网结构昂贵,改变系统运行方式容易造成电力系统运行的不稳定性。在设备端加装电抗器、高阻抗变压器则会导致网络损耗增加,并降低系统的稳定性。因此,研制应用于超高压电网的故障限流装置成为比较理想经济的选择<sup>[1-4]</sup>。

研究了一种基于集成门集换流晶闸管(integrated gate commutated thyristors,IGCT)和固态电力电子开关的快速、可关断特性的短路电流限制器(fault current limiter,FCL)。

## 1 FCL 简介

### 1.1 新型 FCL 拓扑结构

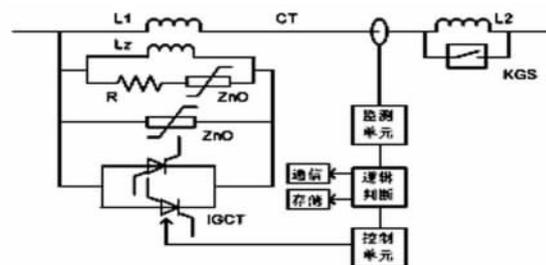


图 1 FCL 的拓扑结构

FCL 由以下几部分组成:限流电抗  $L_1$ 、 $L_2$ , 阻尼回路(采用电抗 + ZnO 串电阻型),快速隔离器 KGS,门集可关断开关 IGCT 和保护用 ZnO 避雷器组成。

### 1.2 工作原理和特点

系统正常工作时,门集可控开关 IGCT 和快速隔离器 KGS 都处于导通态,限流电感被旁路,不影响系统的正常运行。当系统发生短路故障时,通过监测单元对来自 CT 的电流信号进行取样,由逻辑控制单元对电流分析,然后给控制单元提供动作信

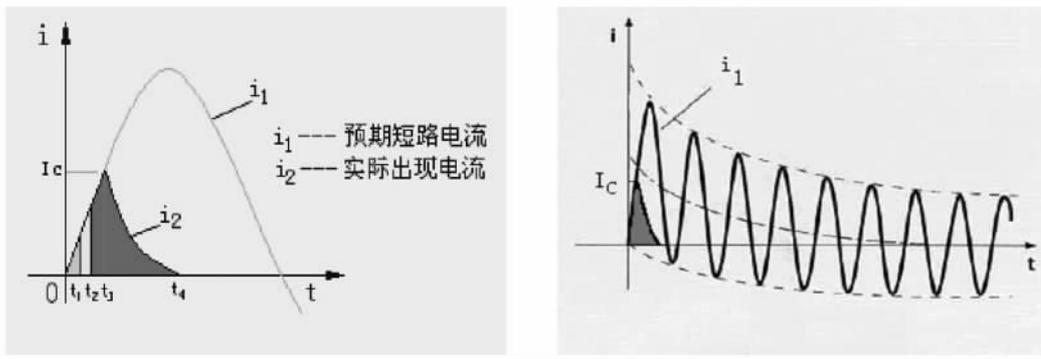


图2 动作电流波形

号,触发IGCT开断,将限流电抗 $L_1$ 串入电路,然后等待来自监测单元和逻辑判断单元的信号。若仍未达到要求,则由控制单元发出KGS动作信号,将限流电抗 $L_2$ 投入电路完成最后的限流。当故障排除后,先将KGS合闸,然后导通IGCT,使系统恢复正常运行。

该FCL具有以下的特点。

(1) 具有超高速(100~200  $\mu\text{s}$ )开断短路电流特性。

(2) 具有较高的短路电流开断能力(6~10 kA)。其开断短路电流波形如图2所示。图中 $i_1$ 为预期短路电流波形, $i_2$ (阴影部分)为IGCT动作后的短路电流波形。

由图2可见,因其高速开断性能,实际出现的短路电流的峰值 $I_c$ 在短路电流第一个半波的上升过程中被限制到预期短路电流峰值的15~50%, $i_2$ 的持续时间仅为100  $\mu\text{s}$ ,开断速度比常规断路器快约100倍。

### 1.3 该FCL与传统的限流器电抗器相比具有以下优点

(1) 节能降耗。接入FCL之后避免了传统电抗器串联在电路中每年产生的大量有功和无功损耗,造成的经济损失,同时又能发挥正常的限流作用。不但节省了企业的投资,也符合建设节约型社会的国策。

(2) 改善电能质量。电抗器对母线电压质量有影响,会使母线电压波动6~10%,致使很多给大型钢铁化工厂矿企业供电的变电站的电压质量指标达不到国网公司的要求。装备FCL后上述电压波动消除了,电压质量提高,得以满足国网公司供电指标的要求。

(3) 减少并补装置的投资和事故率。用IGCT限流器旁路电抗器后,变电站可以不装或少装并联补偿电容器,可节约大量基建投资;在原来已经装设了并联补偿电容器的变电站,则可以不投或少投运并联补偿电容器,延长其使用寿命,减少运行和维修费用,并减少因并补电容器和与之串联的小电抗等的自身故障所引起的供电事故。

(4) 可连续供电。在IGCT动作后,断路器按继电保护正常动作程序跳闸或重合闸,重合成功后继续运行,可连续供电。

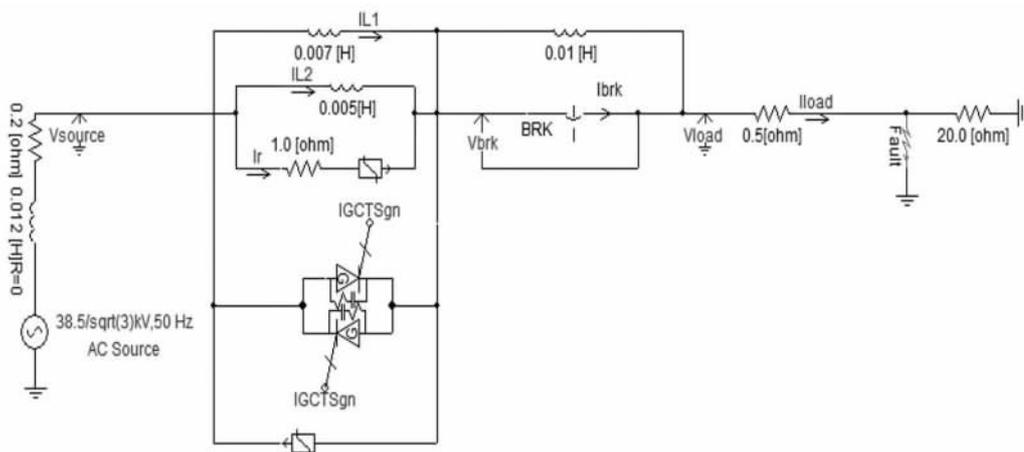


图3 仿真系统示意图

(5) 消除电磁干扰。消除了电抗器磁场及噪声对运行人员和周围电子设备的干扰,消除由其引起的附属设备的涡流发热和二次设备放电打火等异常现象,满足国家有关电磁场干扰的强制标准。

(6) 配置简单易行。电抗器投入后的继电保护和旁路前相同,故用(IGCT)旁路电抗器时无需改变原先的继电保护的配合和整定值。在新变电站装配简单,在老变电站改造也变得很容易。

## 2 FCL 仿真分析

以实际系统参数为例,利用PSCAD仿真变压器出口短路的情况。仿真系统示意图如图3所示<sup>[5-6]</sup>。

单相线路参数如下。

$$U_l = 38.5 \text{ kV}, U_s = 22.23 \text{ kV}, U_m = \sqrt{2}U_s = 31.43 \text{ kV}, U_s = U_m \cos(\omega t + \varphi), L_s = 12 \text{ } \Omega, R_s = 0.2 \text{ } \Omega$$

$$\text{FCL 参数为 } L_1 = 7 \text{ mH}, L_2 = 10 \text{ mH}, L_3 = 5 \text{ mH}, R = 1 \text{ } \Omega$$

阻尼回路 ZnO 避雷器额定电压为 10 kV(非线性电阻);保护用 ZnO 额定电压为 4 kV。其中,  $U_s$ 、 $U_m$ 、 $\omega$ 、 $\varphi$  分别为电源相电压的有效值、峰值、工频角频率与初相位;  $U_s$  为电源电压瞬时值;  $L_s$ 、 $R_s$  为变压器出口短路时,折算到 38.5 kV 侧的短路阻抗;  $L_1$ 、 $L_2$  为故障限流器中电抗值;  $L_3$  为阻尼电感,  $R$  为阻尼电阻; 短路电流的衰减时间常数  $\tau = 17 \text{ ms}$ 。

假设系统在 0.2 s 发生短路故障,短路发生 5 ms 时完全投入 FCL。

短路时,没有加入 FCL 的故障电流波形如图 4 所示。

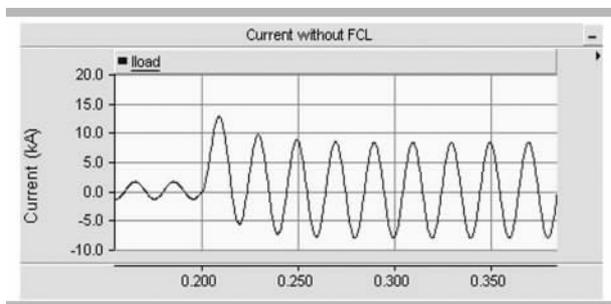


图 4 无 FCL 时短路电流波形

短路时,加入 FCL 的故障电流波形如图 5 所示。

由仿真电流波形可以看出,故障时短路电流第一峰值为 12.50 kA,稳态峰值电流为 8.18 kA;投入 FCL

后,电流第一峰值为 10.67 kA,稳态峰值电流为 3.98 kA。可见,FCL 的投入对短路电流的第一峰值和稳态电流峰值都有明显的抑制作用,有效地降低了短路电流对电气设备的冲击。

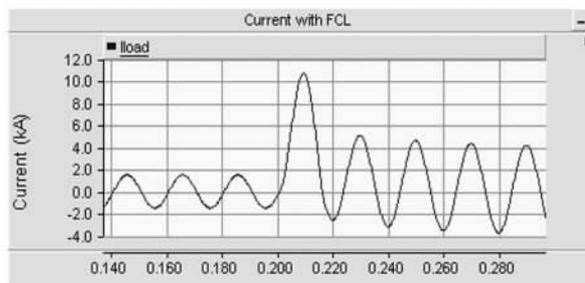


图 5 有 FCL 时短路电流波形

短路时,无 FCL 系统电压波形如图 6 所示。

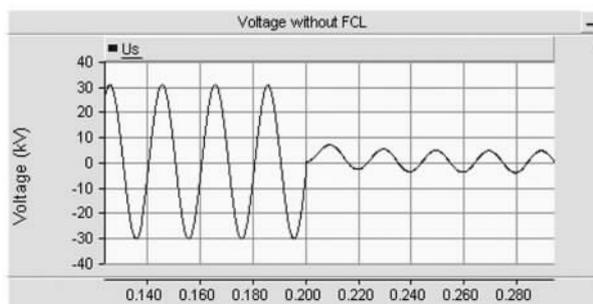


图 6 无 FCL 系统电压波形

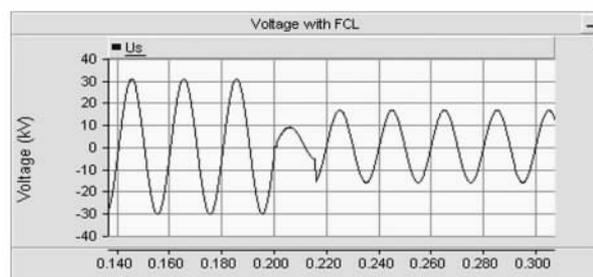


图 7 有 FCL 系统电压波形

由仿真电压波形可以看出,故障时系统电压跌落严重,对用户设备的安全造成严重影响,投入 FCL 后,系统电压降落明显减小,从而降低了对用户设备的影响。可见,FCL 的投入对改善系统电压有积极的作用。

## 3 试验

为了验证该 FCL 的可行性,制作了试验样机进行了试验,试验结果如图 8~9 所示。

从以上试验结果可以看出,该故障限流器明显抑制了变压器出口的短路电流的峰值和稳态值,限流效

(下转第 72 页)

(3) 对与设备相关的成本费用支出进行全面的控制分析。科学控制成本的思想应该贯穿在整个寿命周期中,从最初的可研阶段,就应该拿出各种方案的预计后续支出和状态报告。在设备运行的各个阶段都进行收入成本的配比分析,对设备的使用效率进行评价。

(4) 提高人员素质。针对目前变电设备更新换代快、高科技含量高的特点,加大岗位培训和操作技能培训。认真组织好对有关反措和规程、规范的学习,深刻领会内涵;有针对性的开展各种专业技术、技能比武,以赛促练,促进职工工技术、练技能的积极性,使职工的专业技术水平有显著的提高。

### 4 结 语

提出了固定资产全寿命周期理论,并将 LCC 全

寿命周期理论应用于供电企业固定资产管理环节。通过回归分析,确定了影响固定资产运行的重要因素,确立了状态检修在固定资产维护过程中的主导地位。

本系统只考虑了影响固定资产正常运行的主要因素,由于数据问题没能将其影响因素再作细分。对于一些辅助因素考虑的也不够全面。例如:由于计量问题,忽略了惩罚成本因素。为了方便计算,对固定资产的报废成本取了一个固定值。这都对模型的精确性产生了影响。固定资产全寿命周期的管理方法,比较适用于供电企业中资产净值较大、对企业的生产经营活动有着比较重要的影响和技术含量高的设备。从成本效益原则和精细化管理的初衷考虑,对于资产价值较小,重要性较低的资产不适用于此方法。

(收稿日期:2012-08-20)

(上接第 63 页)

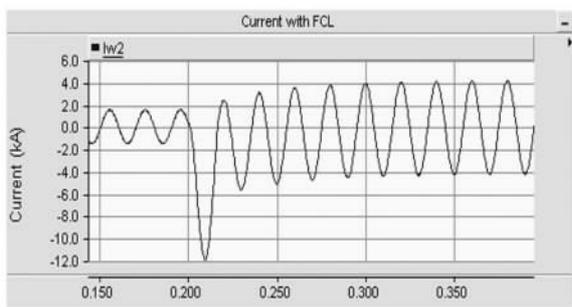


图 8 加入 FCL 时变压器出口短路电流波形

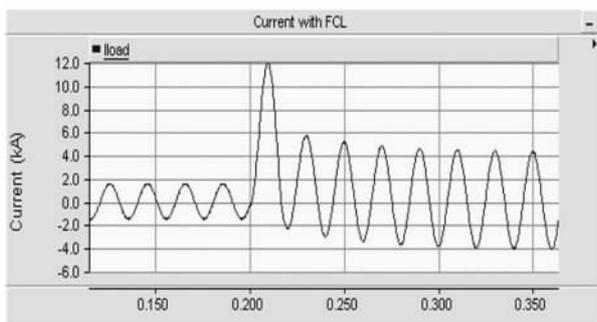


图 9 加入 FCL 时线路短路电流波形

果良好,电流波形良好,能够在实际中得到应用。

### 4 结 语

研究了一种新型的基于可控门极晶闸管(IGCT)的故障电流限制器,正常运行时串在电路中,功耗很小;短路时,投入限流电抗限流。通过实际试验,证明

该故障限流器不仅能够限制短路电流还能够抑制电压跌落,提高系统的暂态稳定性,具有良好的技术和经济性能,在电力系统中具有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] 何仰赞,温增银. 电力系统分析(第三版) [M]. 武汉:华中科技大学出版社,1996.
- [2] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [3] 江道灼,敖志香,卢旭日,等. 短路故障限流技术的研究与发展 [J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(3): 8-19.
- [4] 王华昕,习贺勋,汤广福,等. 面向超高压电网的故障限流器的应用研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 99-102.
- [5] 曾琦,李兴源,蔡鑫贵,等. 带串联补偿故障限流器的仿真和实验 [J]. 电力系统自动化,2003,27(14): 54-56.
- [6] 郑敏,李兴源,刘俊勇,等. 具有串联补偿作用的新型故障限流器的拓扑结构和仿真 [J]. 中国电机工程学报, 1999,19(6): 52-55.

(收稿日期:2012-07-18)