

研究报告

一种改进的新型桥式固态限流器的研究

李洪凤, 贾贵玺, 齐 炜, 徐 伟

(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

[摘要] 随着电网容量的不断扩大, 短路电流限制技术已成为故障保护的一个研究热点。提出的新型桥式电路是在原有桥式拓扑结构上进行了改进, 并提出了新的控制策略。详细介绍了新型桥式限流器的基本工作原理及特点, 给出了基于 Matlab/Simulink 软件的仿真分析和基于天津大学动模实验室的实验结果。仿真与实验结果证明了所提出新型拓扑与控制策略的正确性。

[关键词] 短路限流器; 新型桥式电路; Matlab/Simulink 仿真; 动模实验

[中图分类号] TM762 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)08-0075-05

1 引言

随着电力系统容量的逐年增长, 电网短路容量和短路电流值也不断增长。短路电流会直接影响电气设备的选择和电网的安全稳定运行。因此研究限制短路电流的设备已成为一个迫切的问题。目前, 故障电流限制器 (FCL, fault current limiter) 已经成为研究的热点。经过 20 多年的发展, 故障电流限制器已经有多种类型^[1], 主要有超导限流器、磁组件限流器、PTC 电阻限流器以及固态限流器。固态限流器具有动作速度快、允许动作次数多、控制简便等优点, 克服了超导故障限流器、PTC 电阻限流器的缺点, 在短路故障清除后, 可以立即恢复稳态运行, 几乎没有任何时间延迟, 而且限制短路电流的性能不会因为多次动作而变差, 满足多次重合闸的要求, 但是目前多数固态限流器不具有超导故障限流器^[2]、PTC 电阻限流器的自动检测和自动限制短路电流的功能。

笔者所研究的新型桥式固态限流器 (FCL, fault current limiter) 对原有的桥式固态限流器^[3, 4]的一种改进, 除能够自动检测短路故障、自动限制短路电流, 限流时没有过电压和大的环流,

控制电路简单, 可以做到正常情况下负载电流无谐波, 而且在短路故障发生后不会对负载线路附加直流电压分量。

2 新型桥式固态限流器的拓扑及工作原理

新型桥式固态限流器的单相原理图如图 1 所示。它由晶闸管 VS1, VS3 与二极管 VD2, VD4 桥路、限流电感 L_1 、及虚线框内的充磁回路组成。充磁回路保证流过电感 L_1 的电流 $i_{L1} = I_0$, 而 I_0 恒大于负载电流 i_{ac} 的峰值。根据文献 [2] 得:

$$i_{VS1} = i_{VD2} = (i_{L1} + i_{ac})/2 > 0 \quad (1)$$

$$i_{VS3} = i_{VD4} = (i_{L1} - i_{ac})/2 > 0 \quad (2)$$

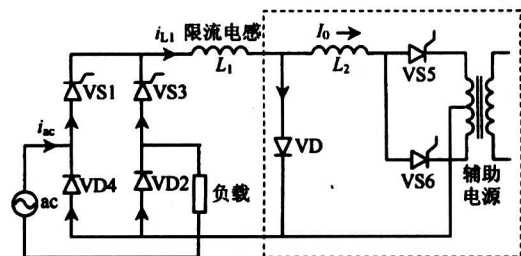


图 1 新型桥式固态限流器的单相原理图

Fig.1 Topological configuration of bridge FCL

控制晶闸管 VS1, VS3, 使其常加触发信号, 由于流过电感 L_1 的电流恒大于负载电流峰值, 于是桥路的 4 个管子始终导通, 据此给出 4 个管子、电感 L_1 及负载线路流过的电流曲线, 如图 2 所示。

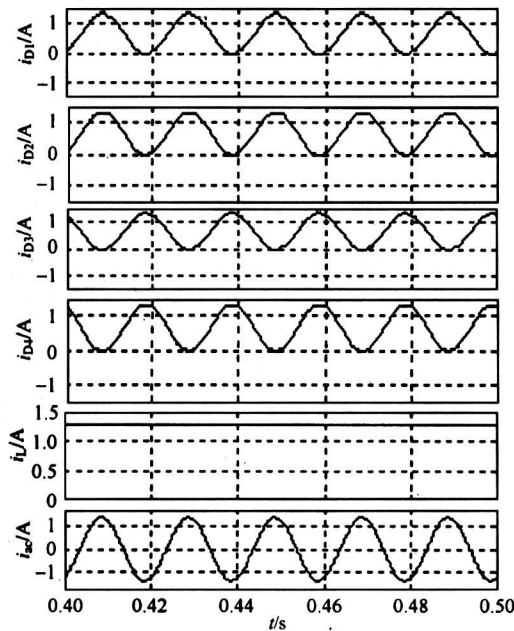


图 2 线路正常情况流过开关、限流电感及负载线路电流

Fig.2 Current flowing through switches, reactor and load

除桥路上有较小的正向电压降外, FCL 对负载电流不表现出任何阻抗。若在电源电压正半波负载侧发生短路故障, 充磁回路退出, 负载电流开始增加, 当负载电流 i_{ac} 增加到电感电流 I_0 时, 根据式 (2), 流过晶闸管 VS3 与二极管 VD4 的电流为零, 于是两个管子过零自然关断, 此时电感 L_2 通过 VS1 和 VD2 串联到线路中, 由于电感电流不能突变, 负载电流得到限制。

可控充磁回路如图 3 所示, 在线路正常运行时, 充磁回路通过 VS1, VD2, VS3, VD4 给电感 L_1 充电, 保证流过电感的电流恒大于负载电流峰值; 在检测到短路故障时, 撤除 VS5 与 VS6 的触发信号, 使充磁回路退出电路, 电感 L_1 通过二极管 VD 串接到负载线路中。限流电感的选取可以从两方面考虑: 电感越大, 在同样的电压下, 充磁电流增长越慢, 电路达到稳定的时间越长; 另一方面电感越大, 在线路发生短路故障时, 所能限制的短

路电流值越大, 而且限流时间更长。所以在选取限流电感值的时候要考虑到以上 2 个因素。

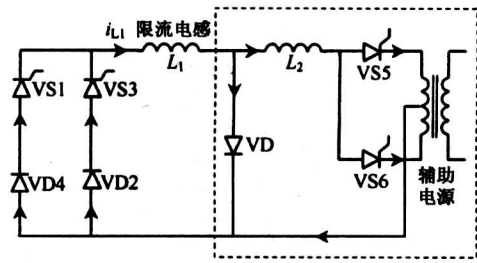


图 3 可控充磁回路拓扑

Fig.3 Topological configuration of accessory source

采用这种拓扑的优点:

1) 新型桥式限流器采用半控桥式电路, 能够自动检测故障电流, 自动限制短路电流, 而且具有重合闸的功能。与全控桥式电路相比更经济, 只需要一套触发电路, 而且触发电路简单, 没有上下桥臂触发脉冲同步问题; 与不可控桥式电路相比, 不需要额外的断路设备, 而且使管子电流过零关断, 没有过电流与过电压问题, 而且可以快速重合闸。

2) 新型桥式限流器装有可控辅助充磁回路, 通过调节辅助电源来保证流过限流电感 L_1 的电流恒大于负载电流, 以消除限流器带来的电流谐波。

3) 可控辅助充磁回路与电感 L_1 串联一个直流源相比, 最显著的优点是, 在负载线路发生短路故障时, 会自动退出充磁回路, 不会给线路附加一个直流源。

4) 该电路的可控辅助充磁回路采用单相全波可控整流电路, 变压器的一次侧的电流波形不会有谐波, 而且采用带中心抽头的变压器, 变压器的二次绕组在电源的正负半周流过相反方向的电流, 变压器不存在直流磁化的问题。

笔者采用 Matlab/Simulink 仿真软件对上述拓扑进行单相短路仿真。仿真电路图如图 4 所示:

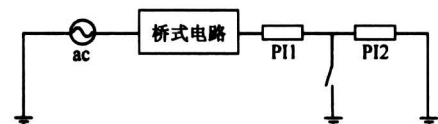


图 4 仿真电路图

Fig.4 Circuit diagram of simulation

电路由电压源频率 50 Hz、峰值 400 V 的正弦

交流电、桥式电路（电感 $L_1 = 1\text{ H}$, $L_2 = 0.1\text{ H}$, 辅助电源 = 10 V）及 2 个 II 型输电线路的分布参数 PI1, PI2 组成。在 $t = 0.5\text{ s}$ 时发生 PI2 短路故障, 线路在无 FCL 和安装 FCL 的情况下, 负载短路电流波形见图 5。

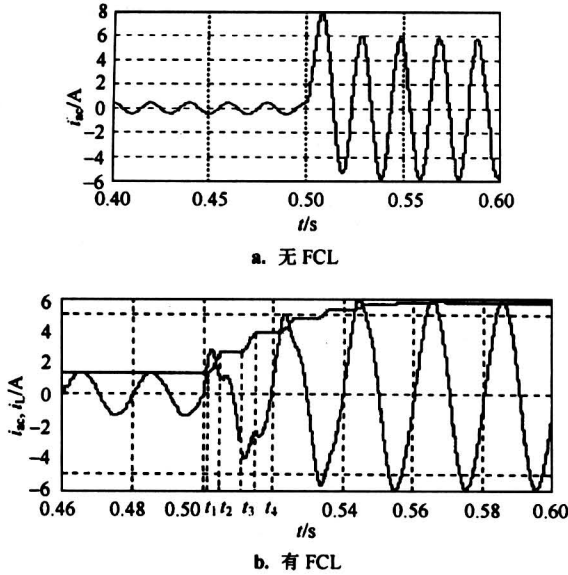


图 5 电流仿真

Fig.5 Simulation of fault current

由图 5 可以分析得:

1) 在 0.5 s 时刻, 负载在正半周发生短路故障, $[0.5, t_1]$ 时间内, 负载电流增加, 此阶段各路电流的流向不变。在 $t = t_1$ 时刻, 负载短路电流等于电感电流, 晶闸管 VS3 与二极管 VD4 过零关断。

2) $[t_1, t_2]$, 这时的等效电路图如图 6 所示, 由图 5 可知负载电流峰值由 8 A 降到了 2.5 A, 短路电流在第一个正半周得到了限制。此后电感 L_1 被充电, 在 $t = t_2$ 时刻, 由于负载电流越过峰值开始减少, 电感电流增加到此阶段的最大值。

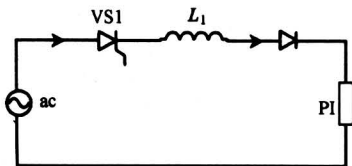


图 6 $[t_1, t_2]$ 等效电路图

Fig.6 $[t_1, t_2]$ circuit diagram

3) 在 $t = t_2$ 时刻, 流过电感的电流已经大于负载短路电流, 若没有采取其他断路措施, 4 个管

子作为续流通路又开始全部导通; 若与继电保护电路配合工作, 断路器可以在不增加其开断能力的情况下采取相应的动作将短路电流断开。 $[t_2, t_3]$ 时间段的等效电路图与负载线路正常运行时一样 (只是此时充磁回路退出)。

4) 在 $t = t_3$ 时刻, 负载短路电流负半周电流的绝对值等于流过电感 L_1 的电流值, 此时晶闸管 VS1 与二极管 VD2 过零关断, $[t_3, t_4]$ 时间段的等效电路图如图 7 所示。电感 L_1 被进一步充电, 在 $t = t_4$ 时刻电感电流达到最大值。此时完成了一个周期的限流与换流过程。

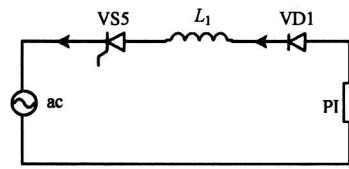


图 7 $[t_3, t_4]$ 等效电路图

Fig.7 $[t_3, t_4]$ circuit diagram

此后再经过几个周期, 电感电流达到负载短路电流终值, 这是所不希望的。正确的方案一是在检测到确实是发生短路故障后, 可以在 30 s 内在断路器的开断能力范围内启动断路器, 切断短路故障; 方案二是检测 4 个管子过零情况, 因为在正常运行时, 通过充磁回路保证流过 4 个管子的电流恒大于零, 因此在检测到有管子过零情况, 可以认为发生短路故障, 切断电流过零的管子, 再经过半个周期切断另外 2 个管子, 以达到切断短流电流的目的, 若发生了误操作, 没有发生短路故障, 可以重新再给 4 个管子加触发信号, 使其导通。由于方案二与方案一相比, 不存在过电流与过电压, 又可以在很短的时间内重合闸, 是一种可行的控制方案。

由以上单相桥式固态限流器的原理扩充得到三相桥式固态限流器拓扑, 图 8 给出三相接地系统桥式固态限流器的拓扑。正常情况下, 通过充磁回路保证流过限流电感的电流值大于负载电流峰值, 8 个管子始终保持导通, 3 个桥臂分别与 VS7, VD8 两管构成单相桥, 分析过程与单相桥式固态限流器类似, 只是此时限流电感的续流通路由 4 个桥臂构成。

由基尔霍夫电流定律可得:

$$i_{VS1} + i_{VS3} + i_{VS5} + i_{VS7} = i_{L1},$$

$$\begin{aligned}
 i_{VD2} + i_{VD4} + i_{VD6} + i_{VD8} &= i_{L1}, \\
 i_{VS1} - i_{VD4} &= i_a, \\
 i_{VS3} - i_{VD6} &= i_b, \\
 i_{VS5} - i_{VD2} &= i_c.
 \end{aligned}$$

再由对称性可得：

$$\begin{aligned}
 i_{VS1} &= i_{L1}/4 + i_{a/2}, \\
 i_{VD2} &= i_{L1}/4 - i_{c/2}, \\
 i_{VS3} &= i_{L1}/4 + i_{b/2}, \\
 i_{VD4} &= i_{L1}/4 - i_{a/2}, \\
 i_{VS5} &= i_{L1}/4 + i_{c/2}, \\
 i_{VD6} &= i_{L1}/4 - i_{b/2}, \\
 i_{VS7} &= i_{L1}/4 - (i_a + i_b + i_c)/2, \\
 i_{VD8} &= i_{L1}/4 + (i_a + i_b + i_c)/2.
 \end{aligned}$$

在线路正常运行时，由对称三相负载得

$$i_a + i_b + i_c = 0。$$

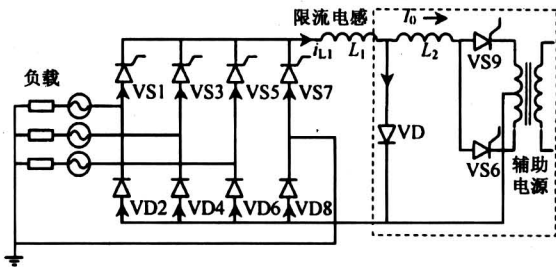


图8 三相接地系统桥式固态限流器拓扑

Fig.8 Topology of the circuit of grounded three-phase bridge solid state current limiter

对线路分别进行单相、两相、三相短路仿真试验，三相桥式限流器工作原理与单相类似，当发生单相短路故障时（以A相负半周为例），A相负载电流迅速增加，当检测到故障电流后，立即封锁晶闸管VS7的触发脉冲，VS7过零自然关断，VD4过零后承受反压而关断。限流电感串接到A相电路中，若再配合A相电路的继电保护开关将故障线路断开。发生两相、三相故障，三相桥式限流器工作原理相似。图9给出A相在 $t = 0.5\text{ s}$ 发生短路时的仿真波形。

由图9可知在发生单相接地故障时，短路电流得到了有效的限制，若配合继电保护装置工作，可在故障发生20ms以后，启动断路器，将短路电流切断。

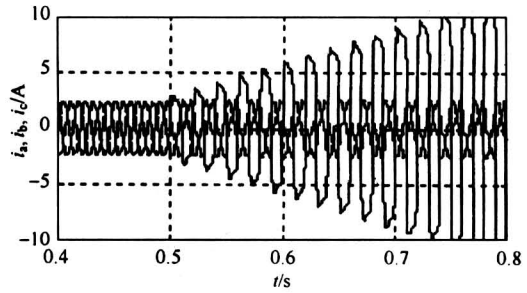


图9 单相接地故障情况下三相电流波形

Fig.9 Three-phase current Simulation waveforms of grounded one-phase short circuit fault

3 新型桥式固态限流器的短路试验

按照方案二的控制策略，由于桥式电路本身就具有自动限流的功能，因此对系统的控制器放松了要求。系统的硬件实现采用以80C196KC为核心的单片机系统。系统实现交流采样、人机界面、控制算法、系统监控等功能，其中的主体部分为交流采样、控制算法和脉冲触发。在系统的整体设计中，软件定时的分配是程序的核心部分，利用软件定时器以不同的周期刷新执行显示监控、保护监控和控制量的计算，软件定时中断0用来显示监控，软件定时中断1用来保护监控，软件定时中断2用来控制脉冲信号的发生，而采样部分在AD采样结束中断中实现。交流采样采用80C196KC的PTS技术，提高了系统的处理能力和运算精度。采样算法采用半周积分算法，此种算法需要的数据窗长度为10ms，本身具有一定的滤除高频分量的能力，而且这种算法运算量很小，可以用非常简单的硬件实现。采样量包括电网交流电压与电流信号、流过上桥臂2个管子的脉动直流量。系统试验电路图如图10所示。实验电路是一个单机对无穷大双回路系统，正常运行时发电机经过变压器和双回线路向无穷大系统供电。第一回线路不安装桥式电路，第二回线路安装桥式电路。每条线路由3个相同的II型电路组成，线路分布参数为 $R = 0.2568\ \Omega/\text{km}$, $L = 2 \times 10^{-3}\ \text{H}/\text{km}$, $C = 8.6 \times 10^{-9}\ \text{F}/\text{km}$, $\text{Length} = 100\ \text{km}$ 。限流电感值的确定是设计的关键，要考虑到上面分析的2个因素，这里取 $L_1 = 1\ \text{H}$ 。电路启动0.5s后在P、Q两点同时发生短路，实验结果如图11所示。由实验结果可知，短路电流得到了有效的控制。

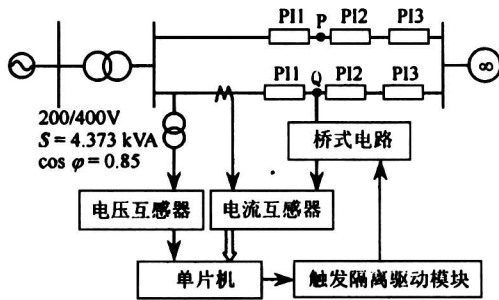


图 10 实验电路

Fig.10 Configuration of experiment

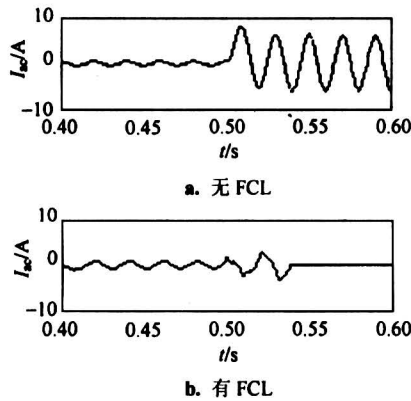


图 11 短路电流实验

Fig.11 Test of fault current

4 结语

所提出的桥式故障限流器 (FCL) 是在文献 [2] 的基础上对拓扑结构及控制策略进行了改进, 由仿真波形及实验波形可以看出该装置的有效性。

其主要特点有:

- 1) 无操作过电压与大的环流。
- 2) 损耗更低。该限流器采用 2 个二极管代替 2 个晶闸管可以做到更小的损耗。
- 3) 负载电流无谐波。安装可控辅助电源, 使流过限流电感的电流总大于负载电流峰值的绝对值, 真正做到正常情况下桥式电路对负载线路无影响。
- 4) 在设计可控辅助充磁回路时, 考虑到了辅助充磁回路会给电网带来谐波, 采用了带中心抽头的变压器单相全波可控整流电路, 同时也避免了变压器的直流磁化问题。
- 5) 控制策略更简单。所提出的控制方案经济、简单又能有效限制电流, 是一种可取的控制方案。
- 6) 可以实现重合闸。通过给 2 个晶闸管加触发脉冲来实现自动重合闸。

该课题组正在开发 15 kV 样机, 相信这种新型短路故障限流器具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 谭凌云, 吴兆麟. 桥式固态短路限流器在电网中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(18): 41~44
- [2] 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
- [3] 章剑峰, 江道灼. 新型桥式固态限流器原理及试验研究 [J]. 继电器, 2003, 31(10): 1~4
- [4] 谭凌云, 吴兆麟. 无谐波失真桥式限流器的研究 [J]. 电力电子技术, 2000, 5: 20~22, 32

Research of an Improved Bridge Type Solid-state Current Limiter

Li Hongfeng, Jia Guixi, Qi Wei, Xu Wei

(School of Electrical & Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] As the expanding of power system capacity, the technologies of short circuit current limiting in power systems have been concerned greatly. This paper introduces a novel bridge type solid state current limiter and a new control strategy is proposed. The characters and operating principle of a novel bridge solid-state current limiter has been developed in detail. Simulation based on Matlab/Simulink is analysed and a laboratory set-up in which the thyristor is controlled by a single chip computer is tested. The results show that the FCL mode is successful in both computer simulation and laboratory test in limiting the fault currents.

[Key words] short circuit current limiter; novel bridge type circuit; simulation based on Matlab/Simulink; dynamic-mode experiment