

带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器的控制策略研究

蔡永华, 江道灼, 吴兆麟

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 围绕新型变压器耦合三相桥式固态限流器试验样机工程化过程中的几个问题, 提出该限流器的改进拓扑——带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器。给出了一种符合带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器特点的控制策略, 并作了仿真研究分析。

关键词: 固态限流器; 控制策略; 仿真研究; 桥式电路; 短路故障

中图分类号: TM 76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)10-0009-04

1 引言

随着电力系统的不断发展壮大, 其短路容量与故障电流问题日益成为系统安全运行的隐患, 如何采取切实可行的有效措施解决这一问题, 已越来越受到业界的高度重视。与此同时有关短路限流技术的研究也越来越吸引广大电力科技工作者的关注。

近年来, 限流器的研究已有了显著进展^[1,2]。文献[2]中提出的新型固态限流器取得了很好的限流效果, 但要进入工程应用阶段还有一些问题需要解决, 归纳为以下几点: (1) 限流器在电力系统故障状态运行中, 桥电路通过系统全部的故障电流, 因而晶闸管的容量须按照故障容量设计, 成本高。(2) 系统故障后, 故障电流由桥电路抑制, 谐波丰富, 对系统不利。(3) 限流器对系统故障电流控制通过 PD 闭环调节, 控制器计算量大, 故障判断及控制较复杂。本文针对文献[2]中新型固态限流器主电路拓扑结构存在的缺陷, 提出改进方案——带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器的拓扑结构, 用电力电子专用仿真软件 PSM 原理仿真计算, 分析改进的固态限流器拓扑结构的限流机理, 提出符合该固态限流器特点的控制策略, 克服了原固态限流器拓扑的缺陷。

2 带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器的拓扑结构^[3]

带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器的拓扑结构如图 1 所示, 该拓扑结构固态限流器的思路: 限流器在系统正常运行时, 由晶闸管 $T_1 \sim T_6$ 组成的三相可控整流桥工作在全导通状态, T_7 、 T_8 常导通给限流电感 L_D 提供续流回路。稳态运行时, 电感电流在理想条件下达到负载电流峰值, 并经 T_7 、 T_8 续流短接, 因

此耦合变压器副边近似于短接状态, 原边压降几乎为“零”, 旁路电感近似被短接。系统短路故障发生时, 系统电压加在耦合变压器原边以及旁路电感上, 因此旁路电感和直流限流电感通过耦合变压器并联后立即自动串入系统^[2], 限制故障电流上升。在系统短路后约一个周波时间内故障电流包含两部分: 旁路电感电流和由变压器副边限流电感决定的变压器原边流过的电流。在限流器的运行控制中, 若在系统短路故障后能迅速隔离桥电路, 变压器副边等效于开路, 系统的短路电流完全由旁路电感决定。

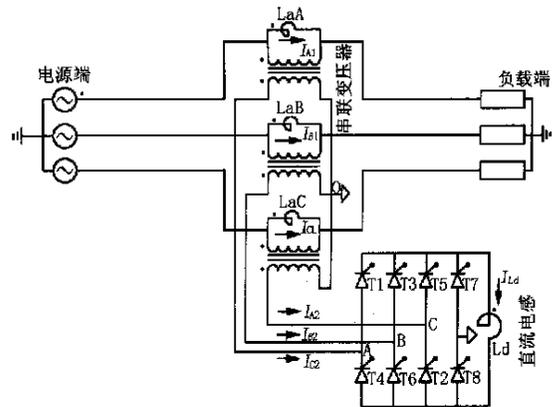


图 1 带旁路电感的变压器耦合三相桥式限流器拓扑
Fig 1 Topology of three phase solid state fault current limiter with parallel connected inductance

3 带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器的控制策略分析

根据以上分析的带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器的工作思路, 提出续流隔离式控制方案: 系统发生短路故障后, 封锁固态限流器所有晶闸管的触发脉冲 ($T_1 \sim T_8$), 在适当时刻触通晶闸管

T_7 、 T_8 给直流限流电感提供续流回路, 从而关断 $T_1 \sim T_6$ 桥臂, 使直流限流电感及桥电路与系统隔离, 相当于变压器副边开路。固态限流器桥电路退出系统, 系统故障电流仅由旁路电感限制。

下面分析系统发生不同短路故障时带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器在该策略控制下的桥电路工作过程。

系统发生三相短路故障时, 采用上述控制策略, 控制过程如图 2 所示, 假设在 A 相正过零点 t_d 时刻发生三相短路。由于三相短路后耦合变压器原边承受全电压, 致使电网电压通过耦合变压器加到限流器的桥路上, 此时有 $U_c > U_a > 0, U_b < 0$, 因此 T_5 、 T_6 导通, 而 T_1 被迫截止, 限流电感上的电压从零电位突变为 U_{cb} , 迫使电感上的电流从相电流峰值开始上升。假设限流器控制响应时间需要略小于 60° 电角度 (约 3.33 ms), 由于 T_1 脉冲的继续作用, 在短路开始 30° 后, 当 $U_a > U_c > 0$ 时, T_5 将换流到 T_1 导通, C 相桥路退出, 限流电感上的电压也由 U_{cb} 、 U_{ab} (见图 2), 电流也将继续上升。当限流器控制系统判断出故障, 在 t_f 封锁系统所有的触发脉冲, 由于 T_6 、 T_1 已经导通, 限流电感电流继续上升直至 t_p 时刻, 而后开始下降 (见图 2), 从 t_p 开始延时 120° 电角度 (t_x 时) 直流限流电感上的电压为 $U_{ab} < 0$, T_7 、 T_8 管触发, $T_1 \sim T_6$ 将自动关断, 使电感电流经 T_7 、 T_8 续流。系统短路由旁路电感限流。

系统发生两相接地短路故障时 (设系统的 A 相正向过零点时发生 B C 两相接地短路故障), 此刻, T_5 、 T_6 继续导通, T_1 被关断, A 相桥路退出, 旁路电感 L_A 串入 A 相负载。检测出故障后, 所有晶闸管触发信号被封锁, 固态限流器限流电感被迫通过 T_5 、 T_6 承受了系统线电压 U_{cb} , 电感电流开始上升, 直流限流电感电流在 U_{cb} 线电压负向过零点达到峰值, 从该点开始计时, 延时 120° 电角度时触通 T_7 、 T_8 使电感电流经 T_7 、 T_8 续流, 同时 T_5 、 T_6 自动关断。限流器桥电路完全退出, 旁路电感 L_B 、 L_C 分别串入各相故障点实现限流目的 (该过程可参看仿真结果图 4(b)), 非故障相 A 相仍有负载电流通。

系统发生两相不接地短路故障时, 采用该控制策略后, 桥电路的工作过程与系统发生两相接地短路的桥电路工作过程基本一致, 不再赘述 (该过程可参看仿真结果图 4(c))。

系统发生单相接地短路故障时 (设系统的 A 相正向过零点时发生 A 相单相接地短路故障), 采用上述的控制策略, 故障时刻 T_5 、 T_6 继续导通, T_4 被关断而

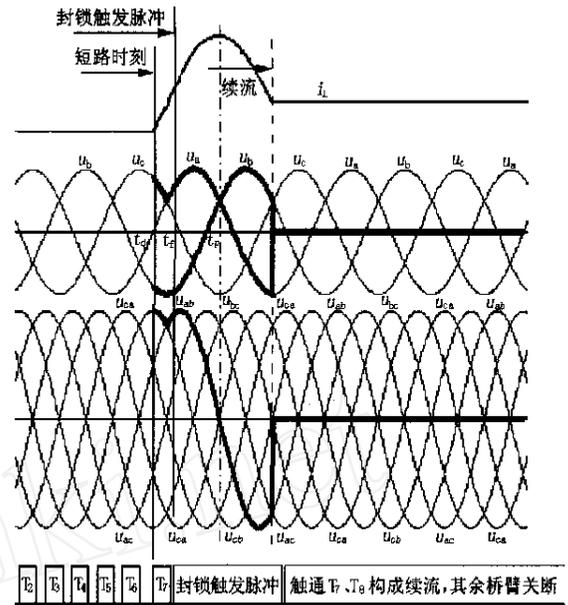


图 2 三相短路前后限流器中的电感电流波形

Fig. 2 Limiting reactor current waveforms of FCL when three-phase short to ground fault occurs

T_1 触发导通, T_7 、 T_8 常导通, 短路发生后, T_7 承受反压被关断, 固态限流器限流电感通过 T_1 、 T_8 承受了 A 相电压, 检测出故障后, 所有晶闸管触发信号被封锁, T_1 、 T_8 将继续导通, A 相电流开始迅速上升, 同时 C 相变压器副边电流 I_{c2} 迅速下降为 0 (T_5 关断) 后, C 相桥路退出, 旁路电感 L_C 串入 C 相负载。由于在 A 相正半波发生接地短路, 则 T_8 将一直导通, 限流器下桥臂直流侧的电位为零, T_6 在 B 相电压为负值的条件下, 能够一直导通, 直至 U_b 过零时刻, T_6 受反压关断, B 相桥路退出, 旁路电感 L_B 串入 B 相负载。在 U_a 负向过零时刻开始延时 120° 电角度时再次给 T_7 、 T_8 加触发信号。此时固态限流器直流限流电感承受负压, 因此, T_7 满足开通条件 (T_8 一直导通), 完成 T_1 向 T_7 的换流, 直流限流电感电流通过 T_7 、 T_8 续流, T_1 关断后, A 相桥路退出, 旁路电感 L_A 串入故障点。固态限流器桥电路完全退出, 旁路电感全部串入系统。 (该过程可参看仿真结果图 4(d))。在高压系统中, 发生单相短路后, 一般系统只要求跳开故障相, 非故障相继续工作一段时间, 为提高供电的质量, 消除非故障相由于串入旁路电感引起的电压降落, 以 A 相故障为例, 可以封锁 T_1 、 T_4 的触发脉冲, 隔离故障相, T_3 、 T_6 、 T_5 、 T_2 按照原先正常控制, T_7 、 T_8 常导通, 正常相的限流器桥电路继续投入运行, 短接非故障相的旁路电感, 从而消除正常相电压降落。

从上面的分析可以看出, 限流电感在故障发生后

自动插入, 同时固态限流器从正常控制模式向故障控制模式的切换也是平稳的, 不会引起附加的震荡。

4 带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器在系统各种故障下的仿真分析

三相接地系统的短路故障包括: 单相接地故障; 两相不接地短路; 两相接地短路; 三相接地故障。采用上述所提控制策略, 对于系统的各类短路故障, 应用加拿大 POWERSM 技术公司的专用电力电子系统仿真软件 PSM 4.1, 对 10 kV/500 A 的配电系统固态限流器进行仿真, 假设系统允许的短路电流为 2500 A, 为简化分析不妨设定系统负荷为阻性, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab 1 Simulation parameters	
系统额定电压	10 kV
系统额定电流	500 A
负荷等效电阻	11.54 Ω
耦合变压器变比	2
限流器直流电感值	31.8 mH
旁路交流电感值	7.35 mH

固态限流器的启动仿真: 由于旁路电感的存在, 在启动时, 负载侧电压的建立要比无旁路电感的固态限流器快, 在限流器直流限流电感还未完成充磁过程时, 系统电压通过旁路电感建立负载侧电压, 当固态限流器直流限流电感完成充磁后, 旁路电感被固态限流器的桥电路近似短接, 旁路电感退出工作, 系统进入正常稳态运行, 该过程如图 3 所示。在半个周波内基本上建立了负载侧电压(在以下的仿真结果中, V_{ZA} 、 V_{ZB} 、 V_{ZC} 为系统负载侧三相相电压, I_{LA} 、 I_{LB} 、 I_{LC} 为系统负载侧相电流, I_{A2} 、 I_{B2} 、 I_{C2} 为耦合变压器副边相电流, I_{LD} 为直流限流电感电流)。

系统发生各类短路故障后, 固态限流器采用续流隔离式控制策略, 其仿真结果如图 4 所示, 系统在 $t=0.2$ s 时发生短路故障, 短路发生后 2 ms, 控制策略起作用, 封锁所有晶闸管的触发脉冲, 直流限流电感达到峰值后延时 120 电角度触通晶闸管 T_7 、 T_8 , 隔离桥电路。

从仿真结果可以看出, 本文所采用的控制策略能够快速有效地退出、隔离桥电路, 从而使旁路电感能够串入系统, 限定系统短路故障电流, 不会在电网中激发附加振荡, 限流性能理想。

- 1) 正常运行时, 等效阻抗几乎为零;
- 2) 短路时限流阻抗立即自动插入;

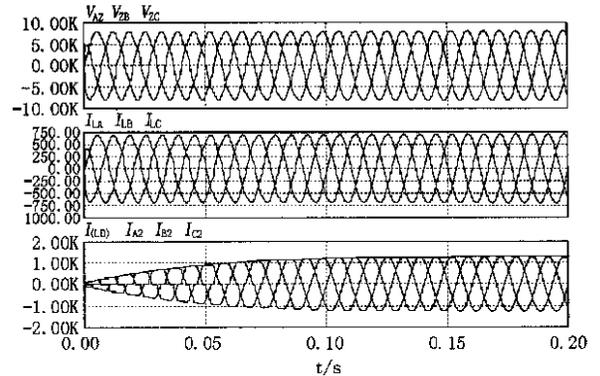


图 3 固态限流器的启动过程仿真结果

Fig 3 Waveforms of the FCL from start to steady state

5 结论

以上的电路拓扑、控制策略分析及仿真结果表明, 该拓扑结构固态限流器是合理的, 该控制策略能够实现预期的控制目的。

该拓扑结构的限流器有以下特点:

- 3) 直流限流电感仅由短路限流峰值确定, 不受其他因素制约;
- 4) 旁路电感值由系统稳态故障电流值确定;
- 5) 晶闸管桥电路容量按正常额定容量设计即可;
- 6) 在系统故障情况下, 固态限流器在桥电路退出后不产生谐波;
- 7) 控制策略简单可靠。

带旁路电感的固态限流器克服了变压器耦合三相桥式固态限流器的几个缺点, 短路后一个周期左右桥电路隔离退出, 短路电流主要由旁路电感限制, 因此晶闸管的容量只需按照系统额定容量设计即可, 降低了固态限流器的成本; 旁路电感限流不产生谐波, 该固态限流器控制简单可靠, 有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈刚, 江道灼, 吴兆麟 固态短路限流器的研究与发展[J] 电力系统自动化, 2003, 27(10): 89- 94
- [2] 费万民, 吕征宇, 吴兆麟, 等 三相接地系统短路故障限流器及其控制策略[J] 电力系统自动化, 2002, 26(8): 33- 37
- [3] 吕征宇, 江道灼, 吴兆麟 具有旁路电感的短路故障限流器[P] 中国专利, ZL 02265208 6
- [4] 吴兆麟 短路限流式三相变压器[P] 中国专利: ZL 00206596 7
- [5] 吴兆麟 一种短路保护电路[P] 中国专利: ZL 96123001 0
- [6] 谌平平, 谭凌云, 吴兆麟 桥式固态限流器的分析和设计[J] 电力电子技术 2000, 34(1): 7- 9

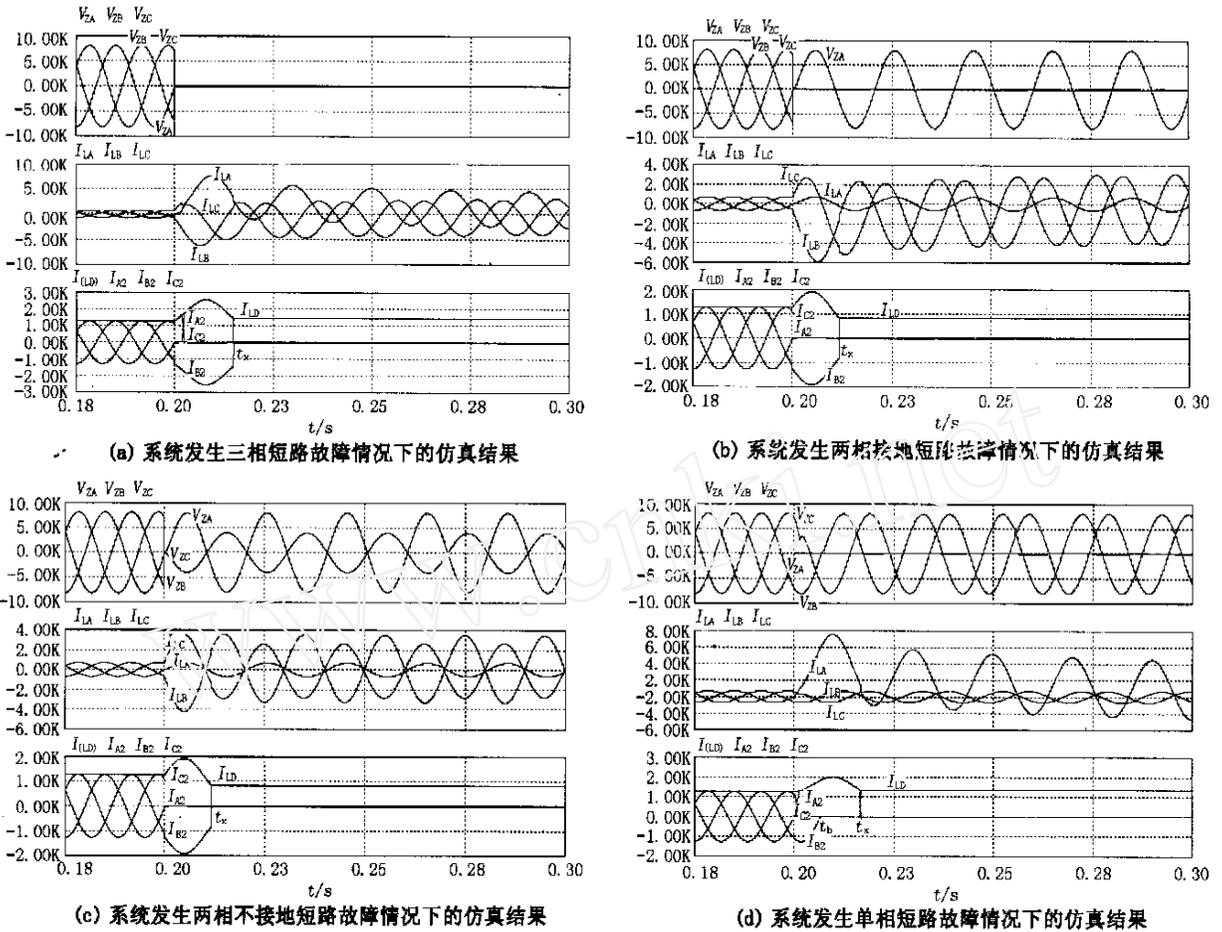


图4 固态限流器在不同短路故障情况下三相电压电流及桥电路相关波形的仿真结果

Fig 4 Simulation waveforms of SSFCL when short circuit faults occur in power system

[7] 谌平平. 新型固态故障限流器技术及其在电力系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2000
 [8] 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, 34(5): 20- 22

作者简介:

蔡永华(1978-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术
 技术在电力系统中的应用;

江道灼(1962-), 男, 教授, 长期从事交直流电力系统运行与控制, 电力电子技术及其在电力系统中应用等方面的教学与科研工作;

吴兆麟(1937-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力电子技术研究

收稿日期: 2003-07-25

Study on control strategy of the three phase solid state fault current limiter with parallel connected inductance

CAI Yong-hua, JIANG Dao-zhuo, WU Zhao-lin

(Zhejiang University, College of Electrical Engineering, Hangzhou 310027, China)

Abstract With the discussion on several problems about realization and application of three phase solid state fault current limiter(SSFCL), an improved topology three phase SSFCL with parallel connected inductance and its control strategy are presented. A series of simulations to verify their feasibility are also given in this paper.

Key words: solid state fault current limiter (SSFCL); control strategy; simulation; bridge type circuit; short circuit fault