

新型高效固态故障限流器的探究

探究了一种经济型固态故障限流器（Solid-State Fault Current Limiter, SSFCL），不仅研究了该SSFCL的拓扑结构，而且设计了其控制结构模型。在正常情况下，该SSFCL内部串联谐振，此时对外表现为非常低的阻抗值；在故障条件下，该SSFCL的控制结构通过自动触发使得晶体管达到饱和态从而将电容短路，此时限流电感迅速接入电路，对外表现为非常高的阻抗值。该SSFCL除了能够自动控制外，还可以通过故障检测算法由外部控制命令来控制。最后在Matlab仿真平台上搭建和测试了该SSFCL，结果表明，该SSFCL可以在短时间内有力地限制住故障电流，提高了电网的稳定性且保证了电网的经济运行。

何 奇 陶维青/合肥工业大学电气与自动化工程学院

0 引言

随着电网的发展，短路电流的大小都不应该超过设备的最大短路容量，但是由于电力系统负荷的迅速增长以及大容量分布式电源（Distributed Generation, DG）的不断投入运行，随之而来不断增长的短路电流已经严重影响电网的稳定运行^[1-4]。因此，需要一个有效的解决方案让电网设备在故障时免于电动力或温度升高等其他的破坏。目前，国内外学者已经提出了几种解决方案来减少瞬态故障电流^[5-6]，如改变系统运行方式、调整电网结构和加装限流设备等，其中，最常见和实用的是故障限流。一般来说，故障限流器（Fault Current Limiter, FCL）旨在达到以下目标：①电网正常运行时，限流器呈低阻抗或零阻抗状态，系统的有功功率和无功功率损耗小；②故障发生时，限流器应迅速从低阻抗状态切换到高阻抗状

态，在故障电流到达第一个峰值前有效限制短路电流，并最终能够限制故障稳态的电流；③故障切除后，限流器不会引起过电压和系统暂态振荡，且能较快地从限流时的高阻抗状态回到低阻抗状态而不影响电力系统的正常运行；④能够自动预防故障，但对正常过载电流（如电容器放电、电动机起动电流等）不敏感；⑤能够抑制暂态过电压以及提高电能质量；⑥可靠性高，能够多次使用，寿命长而且经济合理^[5-10]。

故障限流熔断器能够在故障电流达到第一个高峰时中断故障电流，但熔断器的动作可能会导致过电压，而且它们不可重复使用^[12]。超导限流器^[7-12]

（Superconducting Fault Current Limiter, SFCL）是另一种选择，但其造价昂贵而且需要复杂设备支撑。谐振型FCL作为最常用的一种技术，通过将电感或者谐振电路插在负载电流回路中来限制故障电流，其中经济型固态故障限流器（Solid-State Fault Current Limiter, SSFCL）是其中最为常见的可选方案^[13-14]。

FCL的控制可以分为内部自动控制、外部控制和混合控制。内部自控的FCL不光结构简单而且能够高速响应，外部控制通过故障检测算法能够保证其动作的准确无误，混合控制的FCL包含了两者的优点^[15-17]。但在某些高阻抗故障或重载变化时，FCL可能不会准确地工作。

本文中提出了一种新型的混合控制型FCL，其不光结构简单而且能够通过外部控制来限制故障电流，极大地增加



何 奇/硕士研究生

关键词/Keywords

故障限流器 ·
短路电流 ·
电路拓扑 ·

限流器的可靠性。并在Matlab仿真平台上搭建和测试了该SSFCL，通过搭建实例电网模型仿真分析的结果表明，该SSFCL可以在短时间内有力地限制住故障电流，提高了电网的稳定性和保证了电网的经济运行。

1 FCL的分类和基本原理

1.1 FCL的基本原理

FCL由最初的限流电抗器而来，图1为现代技术和FCL之间的关系，而经济型故障限流器包括ZnO避雷器式故障限流器、快速开关故障限流器、永磁饱和型故障限流器^[18]。图2为该SSFCL的基本原理图，简单而言，在正常情况下开关S关断，电感L和电容C达到串联谐振，此时对外基本没有阻抗；在电网故障时，开关S快速导通，导致电容被短路，电感被直接接入电网，此时表现为高阻抗状态，可以快速地将故障电流限制在较低水平。

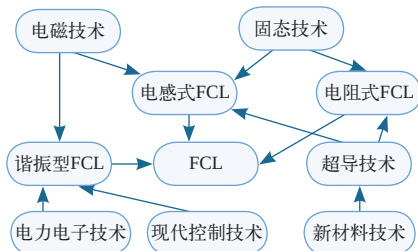


图1 现代技术和FCL之间的关系

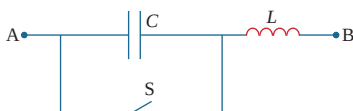


图2 FCL的基本原理

1.2 FCL的相关分类

由于实现限流方式的千差万别，而且故障限流技术属于多学科交叉研究领域，因而很难对其进行准确的分类，以下仅按照近期主要的发展来区分，按照近期主要的发展来看可以分为电力电子型FCL和新型材料FCL。其中对于电力电子型FCL，按实现其方案可分为固态短路限流器、采用功率电子器件的可控FCL和具有可控串联补偿的FCL；新型材料型FCL目前主要有SSFCL和热敏电

阻型 FCL (PTC) 等。

2 SSFCL的结构和运行方式

本文的SSFCL的设计如图3所示，触发变压器 T_1 含有小小磁心，可以通过主侧的插头来调整二次电压， T_1 的二次侧连接到一个全波整流器，整流电路的输出通过电阻 R_1 和电容 C_1 之间的配合最终将稳定的电压输入到由比较器 C_0 、电阻 R_2 、电阻 R_3 以及双向稳压管 VS_0 组成的迟滞比较器中进行电压比较，并最终可以实现快速控制晶体管 VT_0 ，通过晶体管 VT_0 在截止态和饱和态之间的切换最终可以控制与变压器 T_2 相连的电容 C 的接入与否。通过调节可变电阻 R_5 来调节晶体管 VT_0 基极电压。同时也应限制晶体管的电流变化率 (di/dt) 以避免晶体管被破坏。

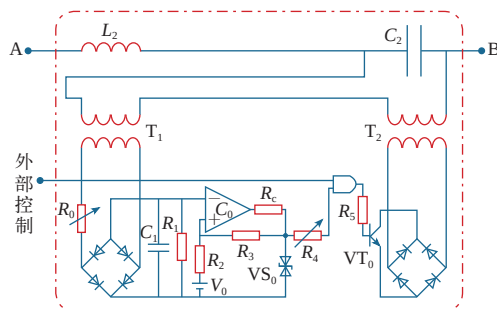


图3 SSFCL的拓扑结构

由比较器 C_0 、电阻 R_2 和 R_3 、直流电源 V_0 以及稳压管 VS_0 组成的迟滞比较器^[18]，其门限电压 V_{T+} 和 V_{T-} 分别为

$$V_{T+} = \frac{R_3 V_0}{R_2 + R_3} + \frac{R_3 V_{OH}}{R_2 + R_3} \quad (1)$$

$$V_{T-} = \frac{R_3 V_0}{R_2 + R_3} - \frac{R_3 V_{OL}}{R_2 + R_3} \quad (2)$$

式中， V_{OH} 和 V_{OL} 分别为比较器 C_0 的不同输出电压，通过合理地选择 V_0 和 R_2 、 R_3 的参数可以让迟滞比较器的门限电压比较合适。

正常情况下，电容器 C 的压降较小，通过整流以及滤波后输入到比较器的电压低于比较器的上门限电压，此时比较器的输出电压很小，不足以在晶体管 VT_0 的基极形成足够大的电压，导致晶体管依旧工作在截止态，即 VT_0 未导通，此时 T_2 二次

侧相当于开路, 变压器 T_2 的阻抗与电容 C 相比无限大, 可以认为 T_2 被电容器 C 短路。在这种情况下, 通过合理的参数选择能够使得电感 L 和电容器 C 发生串联谐振, 对电网基本不产生影响。

故障时, T_1 的二次电压增加, 最终会在晶体管 VT_0 的基极形成足够大的电压, 导致晶体管工作在饱和态, 即 VT_0 导通, 此时变压器 T_2 的阻抗将迅速减小至其漏抗。此时 T_1 、 T_2 的阻抗与电容器 C 相比很小, 可以认为电容器 C 被短路, 即电感 L 被接入电网达到故障限流的作用。

当故障清除后, VT_0 的基极电压下降使其难以维持在饱和态, 导致晶体管的关断。注意考虑 T_1 的电压比以及 R_0 和 R_4 之间的配合, 使得不光在正常情况下 T_1 的二次电压经过转换以后到晶体管基极的电压不足以触发晶体管, 但在故障时能及时触发晶体管, 而且 VT_0 在故障清除以后能自动地关闭。同时也应该注意到 VT_0 在暂态状态下电压的变化率(dv/dt)也会使 VT_{h0} 导通, 但这对原先的控制策略不会造成影响。

同时也应该知道的是本设计有着无法避免的弊端, 首先电网的频率很难严格稳定在50 Hz以及正常情况下变压器 T_1 、 T_2 阻抗的存在都会影响到谐振的稳定, 这将不可避免地带来影响; 最后由于晶体管的导通以及谐振前后的恢复, 这些都会造成一个固有的延迟, 且这种延迟会随着 T_1 、 T_2 变压器阻抗的增加而增加。

当SSFCL启动后其等效电路图如图4所示, 其中 R_e 和 L_e 的等效值小到基本可以忽略, 控制模块的元件能够控制开关 S 的导通。

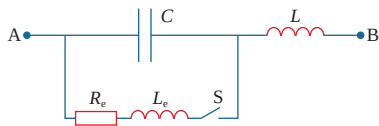


图4 限流状态下SSFCL的等效电路

SSFCL的阻抗计算公式为

$$Z_{SSFCL} = jX_L + \left(\frac{1}{jX_C} // (R_e + jX_{Le}) \right) \quad (3)$$

式中, R_e 和 X_{Le} 分别为控制元件总共的等效电阻和等效电抗, 所有谐振元件的角频率都为电网的角

频率。

分离实部和虚部以后得到

$$Z_{SSFCL} = \frac{R_e}{(1 - X_C X_{Le})^2 + R_e^2 X_C^2} + j \frac{X_{Le} - X_C X_{Le}^2 - R_e^2 X_C + X_L (1 - X_C X_{Le})^2 + R_e^2 X_C^2 X_L}{(1 - X_C X_{Le})^2 + R_e^2 X_C^2} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 如文献[19]所介绍, 也可以通过参数改变 X_{Le} 和 R_e 的值, 使其在故障情况下让 C 和 X_{Le} 达到谐振^[20], 即

$$X_{Le} - X_C X_{Le}^2 - R_e^2 X_C + X_L (1 - X_C X_{Le})^2 + R_e^2 X_C^2 X_L = 0 \quad (5)$$

此时会达到并联谐振。

在正常状况下, L 和 C 理想状况下满足谐振条件, 即

$$jX_L + \frac{1}{jX_C} = 0 \quad (6)$$

由式(6)可以得到

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7)$$

对本设计的理想状况而言, 正常时, L 和 C 能够保持串联谐振; 故障时, 电容 C 基本被短路, 只有电感 L 接入电路起到故障限流的作用。

SSFCL对故障电流的限制能力主要与电感值有关, 即电感值越大时其对故障电流的限制能力越强, 同时由式(7)可知, 电感的值越大则电容的值越小, 这样会导致电容两端出现较大的过电压以及随之而来的循环电流, 这不可避免地增加在实际使用中的负担。

3 SSFCL的控制方式

该SSFCL是通过一个混合控制方案所控制。通过使用自触发技术实现自控。此外, 该SSFCL也能由一个外部的准确故障检测算法的命令所控制。在故障期间, SSFCL是由自触发电路所启动。因此, 故障电流在故障发生的初期就被限制住。同时, 在故障情况下, 故障检测算法也会检测故障电流, 晶体管 VT_0 会接收到自触发命令而被触发或者被截止。如果自触发技术在故障条件下

失败，外部命令将起动SSFCL。因此，故障电流能在最短的时间被可靠地限制。拥有外部的控制后，不光故障电流的限制过程将更加灵活，而且限流的持续时间也能够根据所需要的范围比较容易地调节。

一般来说，配电网是一个辐射状的网络结构，并且网络中会同时存在一些敏感或不敏感负载，在故障情况下应保护敏感负载免于电压骤降的影响，此时可将SSFCL应用于微网的合适位置，在故障情况下通过SSFCL将DG单元及敏感负载隔离。由于DG单元只是被隔离而不是断开连接，重新连接时将不会出现同步的相关问题。所以在微电网中加装SSFCL将会提高电能质量，此外还能防止熔断器动作，减少电压的骤降，而且还能减少非故障馈线关断的数量。

4 仿真结果

为了评估所提出的SSFCL的性能，搭建了一个如图5所示的简单测试系统，其具体参数如下表所示。通过对开关S的控制模拟短路故障情况。分别在有无SSFCL的两种情况下，通过测量线路上的电流以及R两端的电压得到不同状态下的故障电流和故障电压。虽然该SSFCL只是在220 V的线路上进行测试，但是该SSFCL的原理同样适用于高电压等级。

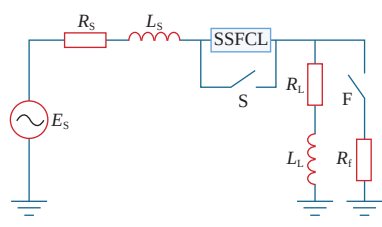


图5 简单测试系统

表 系统和SSFCL的主要参数

符号	值
E_s/V	220
R_s/Ω	1
L_s/mH	5
R_L/Ω	20
L_L/mH	100
R_f/Ω	5

(续)

符号	值
L/mH	46
$C/\mu F$	220
T_1 的电压比 n_1	1/10
T_2 的电压比 n_2	20/40
V_0/V	12
C_1/mF	1
R_1/Ω	10
R_2/Ω	10
R_3/Ω	10

图6为分别在含有FCL和不含有FCL的情况下，在0.1~0.25 s之间发生接地故障的情况，正常情况时，线路电流的峰值为5.6 A，分别在使用和不适用FCL后，故障电流的峰值分别为12.5 A和37 A，可以观察到，在使用FCL后故障电流值显著下降；同时也应该注意到，在加入FCL后基本会造成相角的偏移；最后也可以发现，无论是否加入FCL，由于测试系统过于简单，储能元件的充放电会造成在故障清除以后，可能需要一个周波的时间系统才能完全地恢复正常。

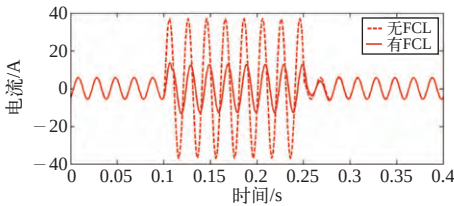


图6 有无FCL时的馈线电流

图7为有无FCL情况下FCL和负载的电压情况，可以观察到，在电网正常情况下时FCL上的压降完全可以忽略，这表明在正常情况时FCL基本不会对电网带来任何影响；但是当出现故障时，随着FCL的接入电网，电压绝大部分被FCL所承受，可有效地防止电压的跌落。同时也应该注意到，在故障被清除的一瞬间，由于储能元件的储能，极容易出现冲击电压，如果不能将冲击电压所吸收，将会给电网带来很大的影响。

图8为比较器 C_0 的输入端电压和晶体管的导通状态。 T_1 变压器的二次电压经过整流以及通过 C_1 和 R_1 组成的滤波回路以后，能够输入理想的波形，再经过迟滞比较回路的滞回比较以后就能够较为准

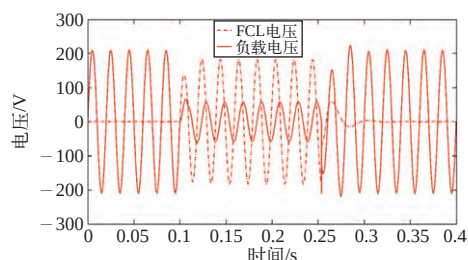


图7 有无FCL时的电压分布情况

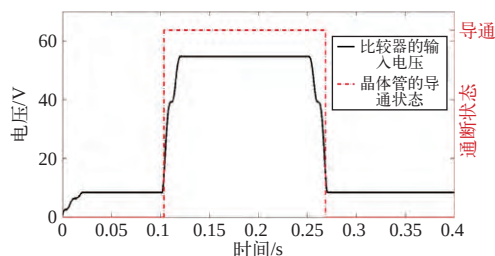


图8 比较器的输入电压和晶体管的导通状态

确地控制晶体管 VT_0 的导通状态。不可否认的是，由于系统本身不可避免的设计缺陷，会造成一定的响应延迟，但如果在较高电压等级的系统中，这种延迟会较小。

5 结束语

本文探究了一个经济型SSFCL，通过分析SSFCL的仿真和实验结果可以得出以下结论。

1) 该SSFCL虽然结构简单，但其能在不改变电网主网架构的情况下有效抑制故障电流，可以降低由于短路电流超标而引起的电力设备更换或其他成本。由于SSFCL可以在自控制模式或外部控制模式的混合控制模式下运行，因此，它不光可靠性高而且能够高速响应。

2) 加入SSFCL后将会提高电能质量，而且如果做一些细微的改变，它还可以用作软起动器。

3) 该限流器为在更高等级系统中设计大功率器件提供了有益的经验。这主要是因为在大功率的应用中，制约本设计的一些因数（如电阻器阻值的限制）对SSFCL性能的影响较小。

参考文献

[1] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 配电网模式化故障处理方法研究[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 97-102.

[2] Kreutz R, Bock J, Breuer F, et al. System technology and test of CURL 10 A, 10 kV, 10 MV·A resistive high-tech superconducting fault current limiter [J]. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1961-1964.

[3] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.

[4] 冯希科, 邵能灵, 宋凯, 等. DG容量对配电网电流保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 156-160.

[5] 孙树敏, 刘洪顺, 李庆民, 等. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术, 2008(21): 75-79.

[6] 刘凯, 陈红坤, 林军, 等. 故障限流器在电力系统中应用研究现状[J]. 电力系统保护与控制, 2010(7): 147-151.

[7] Liu Kai, Chen Hongkun, Lin Jun, et al. Study situation of applications of fault current limiter in power system [J]. Power System Protection and Control, 2010(7): 147-151.

[8] Sokolovsky V, Meerovich V, Vajda I, et al. Superconducting FCL: design and application [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(3): 1990-2000.

[9] Noe M, Steurer M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status [J]. Superconductor Science & Technology, 2007, 20(3): R15-R29.

[10] Slade P G, Wu J L, Stacey E J, et al. The utility requirements for a distribution fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 507-515.

[11] Karady G G. Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit [J]. IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution, 1992, 139(1): 1-6.

(下转第60页)

4 结束语

本文详细分析了三相三开关三电平单周期控制的工作原理并推导出其控制方程, 针对模拟单周期PFC技术的缺点, 提出了一种单周期PFC数字控制方案。该数字控制算法简单, 易于修改, 大大简化了硬件电路的设计, 而且响应速度快。最后通过仿真及实验验证, 证明了控制策略应用于三相三开关三电平高功率因数整流器的可行性。

参考文献

- [1] Guanghai G, Heldwein M L, Drofenik U, et al. Comparative evaluation of three-phase high-power-factor AC-DC converter concepts for application in future More Electric Aircraft [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52 (3) : 727-737.
 - [2] Zheren Lai, Keyue Ma Smedley. A family of continuous-conduction-mode power-factor-correction controllers based on the general pulse-width modulator [J]. IEEE Transactions on Power Electron, 1998, 13 (3) : 501-510.
 - [3] Smedley K M, Cuk S. One-cycle control of switching converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10 (6) : 625-633.
 - [4] 陈延明, 杨兴龙, 万宗东, 等. 基于单周控制的有源功率因数校正电路设计 [J]. 电力电子技术, 2006, 40 (4) : 89-90.
 - [5] Ghodke D V, Chatterjee K, Fernandes B G. Modified one-cycle controlled bidirectional high-power-factor AC-to-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (6) : 2459-2472.
- (收稿日期: 2015-12-25) EA
-
- (上接第35页)
- [12] Kojovic L, Hassler S. Application of current limiting fuses in distribution systems for improved power quality and protection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12 (2) : 791-800.
 - [13] Moriconi F, Francisco D L R, Singh A, et al. An innovative compact saturable-core HTS fault current limiter—development, testing and application to transmission class networks [C]. IEEE PES General Meeting, 2010: 1-8.
 - [14] Meyer C, Schroder S, De Doncker R W. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (5) : 1333-1340.
 - [15] Smith R K, Slade P G, Sarkozi M, et al. Solid-state distribution current limiter and circuit breaker: application requirements and control strategies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (3) : 1155-1164.
 - [16] Steurer M, Frohlich K, Halaus W, et al. A novel hybrid current-limiting circuit breaker for medium voltage: principle and test results [J]. IEEE Power Engineering Review, 2003, 18 (2) : 62-62.
 - [17] Perez E, Barros J. A proposal for on-line detection and classification of voltage events in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (4) : 2132 - 2138.
 - [18] Zhang X, Ming L. Using the fault current limiter with spark gap to reduce short-circuit currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (1) : 506-507.
 - [19] 李庆民. 电力系统经济型故障限流技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
 - [20] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分) [M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- (收稿日期: 2016-03-07) EA