

# 一种软硬件协同控制的短路限流保护方法

朱俊杰, 聂子玲, 张银峰, 韩一

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 针对三相四线制静止式中频电源负载短路时功率器件极易损坏, 传统的短路保护方法不能抑制短路瞬间快速上升的短路电流, 且会造成负载供电断续等问题, 在对传统短路限流保护加以改进的基础上, 提出了一种软硬件协同控制的短路限流保护方法。为了抑制短路电流的快速上升, 该方法运用固态断路器过零点瞬时关断的能力, 采用短路限流值及短路电流瞬态变化率双重判断条件。结合短路时切换为恒流源控制的手段, 克服了电力电子设备瞬时过载能力弱的缺点。实验结果证明了该方法可以保证短路故障的迅速切除及负载的持续供电。

**关键词:** 三相四线制静止式中频电源; 短路电流; 短路保护; 协同控制; 固态断路器

## A method of short-circuit current-limiting with software-hardware coordination control

ZHU Junjie, NIE Ziling, ZHANG Yinfeng, HAN Yi

(National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The power cells can be damaged when short-circuit occurred in the three-phase four-wire 400 Hz solid-state power supply. The traditional methods can not ensure the rapid removal of short-circuit fault. In allusion to their limitation, a method of short-circuit protection based on software-hardware coordination control is presented. The method determines the conditions by using the current limit and the rate of transient short-circuit change. The method can overcome the instantaneous weak overload of power electronic devices and ensure the rapid removal of short-circuit fault and the continuous power supply by the quick turnoff of solid-state switch at the zero crossing and the constant-current source. The experiment results show that the method is useful and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407189).

**Key words:** three-phase four-wire 400 Hz solid-state power supply; short-circuit; short-circuit protection; coordination control; solid-state switch

中图分类号: TM452

文章编号: 1674-3415(2015)19-0049-05

## 0 引言

三相四线制静止式中频电源通常情况下都挂接多负载运行, 其中某些负载对电力中断和电能质量非常敏感, 一般在工作时不允许断电或断电允许时间较短, 因此, 当静止式中频电源发生短路故障时, 要尽可能小范围切除故障点, 保证尽快恢复供电<sup>[1-3]</sup>。另外, 三相四线制静止式中频电源主电路主要由电力电子器件组成, 电力电子器件在过流时极易损坏<sup>[4-5]</sup>。因此, 负载发生短路故障时, 必须限制

开关器件的电流在允许范围内。

在中频供电系统发生短路故障时, 为实现上述功能, 静止式中频电源需要解决两个问题: (1)短路瞬态: 尽可能快地切断短路支路, 短路瞬间, 抑制快速上升的短路电流, 不超过 IGBT 过流保护值; (2)短路稳态: 在短路故障期内, 维持规定的短路电流值。

现有逆变器短路保护主要有两种方法<sup>[6-9]</sup>: (1)开关器件保护电路检测到短路故障, 关闭驱动信号, 设备停机; (2)程序检测到瞬时过流, 关闭驱动信号, 设备停机。上述两种方法不能抑制短路瞬间快速上升的短路电流, 且会造成负载供电断续。文

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51407189)

献[10]提出了一种串联型短路限流控制器，该控制器是将逆变器与短路限流电抗器串联在一起，当发生短路时，将逆变器切出，使短路限流电抗器工作。该方法实际上已经改变了电路结构，这对于需要组网运行的静止式中频电源显然不适合<sup>[11-13]</sup>。

本文在对传统短路限流保护加以改进的基础上，深入研究了一种软硬件协同控制的短路限流保护方法。该方法运用固态断路器过零点瞬时关断的能力，并结合短路时切换为恒流源控制的手段，克

服了电力电子设备瞬时过载能力弱的缺点，实验结果证明该方法的正确性和有效性。

### 1 三相四线制静止式中频电源拓扑

图 1 为三相四线制静止式中频电源主电路拓扑结构。图中虚线部分为整流环节，对于不同的应用场合，整流环节可以采用不控整流、PWM 高频整流或者省去(直流区域配电)，对于输出来讲，只要直流电压  $U_1$  确定，该环节不影响输出控制，可以忽略。

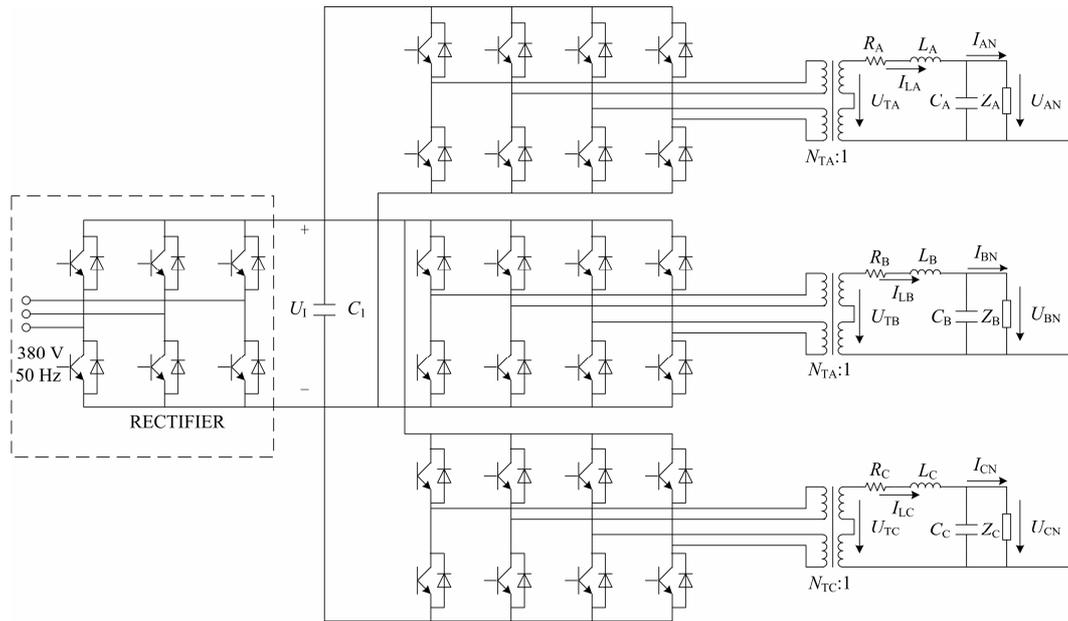


图 1 三相四线制静止式中频电源主电路拓扑结构

Fig. 1 Main circuit topology of three-phase four-wire 400 Hz solid-state power supply

图 1 中： $R_A$ 、 $R_B$  和  $R_C$  为各相变压器等效电阻； $L_A$ 、 $L_B$  和  $L_C$  为各相变压器等效漏电感； $C_A$ 、 $C_B$  和  $C_C$  为滤波电容； $I_{LA}$ 、 $I_{LB}$  和  $I_{LC}$  为三相电感电流； $I_{AN}$ 、 $I_{BN}$  和  $I_{CN}$  为三相输出电流； $U_{AN}$ 、 $U_{BN}$  和  $U_{CN}$  为三相输出电压； $U_{TA}$ 、 $U_{TB}$  和  $U_{TC}$  为三相 PWM 输出电压。

如图 2 所示，静止式中频电源在某一负载发生短路时，必须仍保证其他负载的供电连续性。由于静止式中频电源为三相四线制，其相间阻抗为相地阻抗的两倍，而线电压  $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$  不到相电压  $U_{AN}$ 、 $U_{BN}$ 、 $U_{CN}$  的两倍，则相地短路较为严酷，因此，以下研究均以相地短路展开。

## 2 软硬件协同控制的短路限流保护分析

### 2.1 硬件短路限流保护

本文研究了一种基于固态断路器的短路限流保护控制方法。晶闸管型固态开关即固态断路器，其

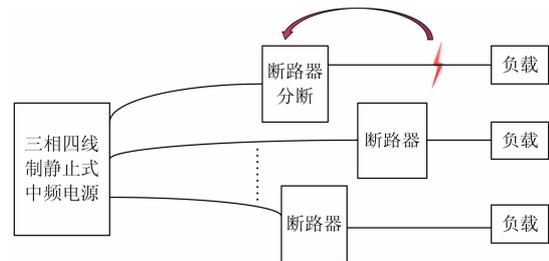


图 2 静止式中频电源某一路负载发生短路

Fig. 2 Sketch diagram of 400 Hz solid-state power supply when a circuit shorted

控制方式采用 TTL 触发电平，触发电平由专门的 DSP 控制器来控制。当支路发生过流或短路情况时，控制器中的比较器将保护信号通知 DSP，由 DSP 给出低电平指令使固态断路器分断。固态断路器中的晶闸管采用过零点分断，理论分断时间为零，较机械断路器分断时间大为提高。

图3为固态断路器实物及过流保护波形。图中断路器支路电流为600 A,  $I_Y$ 设定值亦为600 A, 实验中设定延时等待500 ms, 固态断路器在过零点处有效分断。

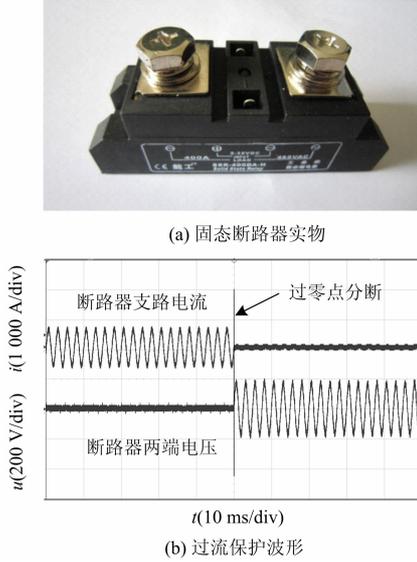


图3 固态断路器实物及过零点分断实验波形

Fig. 3 Solid-state switch and experiment results by turning off in zero-crossing

## 2.2 软件短路限流保护

软件限流保护实际上是将电流反馈值  $I_O$  与过流保护值进行比较, 将过流保护值分为器件最大允许过流值  $I_M$  及稳态短路限流值  $I_H$ , 其中  $I_M > I_H$ 。当  $I_O > I_M$  时, 关闭驱动脉冲信号, 输出停止。为了抑制短路电流的快速上升, 采用短路限流值及短路电流瞬态变化率双重判断条件, 只要短路电流满足任何一个判断条件, 电源迅速进入恒流源输出模式。假设系统的采样频率为  $f_s$ , 输出电流额定值为  $I_A \sin 2\pi f_0 t$ , 频率为  $f_0$ , 则输出电流一个周期内的采样点数为

$$PP = \frac{f_s}{f_0} \quad (1)$$

一个周期内输出电流在离散域的瞬态变化量  $\Delta I I$  可表示为

$$\Delta I I = I[k] - I[k-1] \quad (2)$$

式中,  $k = 0 \sim PP$ 。

若采用三角函数表示, 则

$$\Delta I I = I_A \sin 2\pi \frac{k}{PP} - I_A \sin 2\pi \frac{k-1}{PP} \quad (3)$$

电流瞬态变化的最大值可表示为

$$\Delta I I_{\max} = \max[I_A \sin 2\pi \frac{k}{PP} - I_A \sin 2\pi \frac{k-1}{PP}] \quad (4)$$

当发生短路情况时, 输出电流瞬态变化的最大值为

$$\Delta I I_{\max} = \max[I_H \sin 2\pi \frac{k}{PP} - I_H \sin 2\pi \frac{k-1}{PP}] \quad (5)$$

对于静止式中频电源系统而言  $f_s = 10$  kHz,  $f_0 = 400$  Hz, 则  $PP = 25$ , 因此

$$\Delta I I_{\max} = I_H \sin 2\pi \frac{1}{PP} \quad (6)$$

当  $I_H < I_O < I_M$  或  $\Delta I I > \Delta I I_{\max}$  时, 电流环参考保持  $I_{\text{ref}} = I_H$ , 进入恒流源输出模式; 当短路故障切除后,  $I_{\text{ref}}$  恢复为实际计算值。图4为基于限流保护的软件控制框图, 图中限流控制环节加在电压控制环之后, 即将电压环计算出的电流参考值进行有条件的屏蔽, 当电流反馈值大于最大允许过流值, 则由限流控制器直接给 SPWM 下达封锁脉冲指令。其中  $G_{\text{PRV}}$  为电压环控制器,  $G_{\text{PRI}}$  为电流环控制器<sup>[14]</sup>。

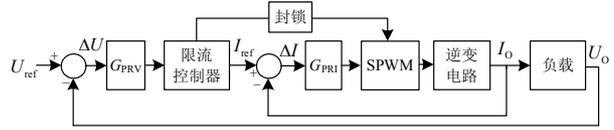


图4 基于限流保护的软件控制框图

Fig. 4 Control of software with short-circuit protection

根据文献[15]要求, 静止式中频电源单机过载能力必须满足带200%额定负载运行10 s, 假设此时电流值为  $I_Y$ , 且  $I_Y < I_H$ 。在此基础上可得基于固态断路器的软硬件协同控制的短路限流保护功能流程如图5所示。与前述软件限流保护的主要区别为: 当  $I_H < I_O < I_M$  或  $\Delta I I > \Delta I I_{\max}$  时, 控制方式切换为恒流源模式的同时, DSP 给固态断路器下达低电平分断指令; 当  $I_Y \leq I_O < I_H$ , 延时等待10 s, 分断固态断路器。

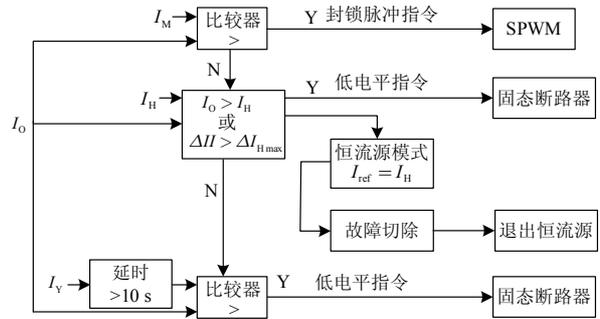


图5 软硬件协同控制的短路限流保护功能流程图

Fig. 5 Flow diagram of short-circuit protection based on solid-state switch

## 3 实验结果

为了验证软硬件协同控制的短路限流保护方法

的正确性, 在 100 kVA 三相四线制静止式中频电源样机上进行了实验。图 6 为三相四线制静止式中频电源带三路负载运行, 其中一路发生短路故障, 除断路器外无过流保护时, 短路支路电流及电源输出电压、电流波形。从图中可以看出, 短路发生后, 短路电流上升较快, 最大峰值电流将近 1 800 A, 输出电压由 115 V 跌落至 50 V, 电源输出电流迅速上升, 短路支路断路器经 12 ms 分断。由于短路发生的暂态过程中电流环控制器出现饱和状态, 导致故障切除后控制器调节失败, 输出电压出现持续性的畸变, 最终在软件过压保护下停机, 造成其余负载的供电中断。

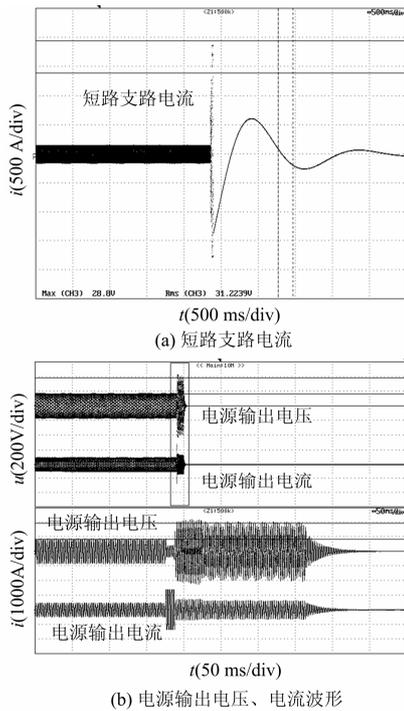


图 6 静止式中频电源某一路负载发生短路 (无过流保护措施)

Fig. 6 Process of short circuit without any protection

图 7 为三相四线制静止式中频电源运行时 A 相负载突然对地短路保护过程, 程序设定  $I_H$  为 1 200 A。图 7(a)中采用基于机械断路器的短路限流保护控制, 图中上半部分分别为断路器支路电流  $I_S$ 、电源输出电压  $U_O$  及电流  $I_O$  的包络, 下半部分为其短路保护过程区域的放大波形。从图中可以看出, 当短路故障发生后,  $I_S$  达 1 500 A,  $I_O$  以参考电流 1 200 A 进入恒流源控制模式直到断路器分断。在此过程中输出电压  $U_O$  跌落至 55 V, 当断路器经 12 ms 分断后,  $U_O$  和  $I_O$  经约 30 ms 的调节时间进入正常的稳态运行模式, 电压恢复至 115 V。图 7(b)中采用

基于固态断路器的短路限流保护控制, 从图中可以看出短路故障期间恒流源模式极短,  $U_O$  跌落至 60 V, 固态断路器经 1 ms 左右分断(主要由于采样及比较器计算延时造成),  $U_O$  经约 28 ms 的调节时间进入稳态运行模式, 电压恢复至 115 V。对比图 7(a)和 7(b)可以看出, 由于固态断路器分断时间大大缩短,  $U_O$  跌落时间较短, 减少了对于其他负载的影响, 同时从短路支路电流波形可以看出, 固态断路器为即时分断, 而机械断路器分断具有拉弧现象。

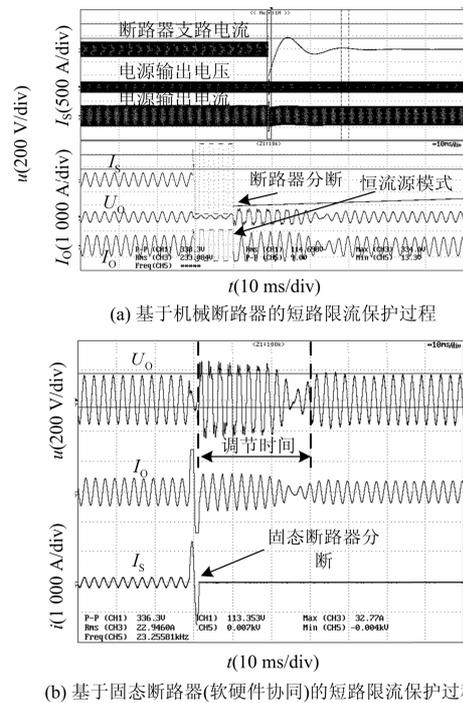


图 7 基于不同断路器(软硬件协同)的短路限流保护过程对比

Fig. 7 Comparison of short-circuit protection based on different breakers

#### 4 结论

本文在对传统短路限流保护加以改进的基础上, 提出了一种软硬件协同控制的短路限流保护方法。该方法为了抑制短路电流的快速上升, 运用固态断路器过零点瞬时关断的能力, 采用短路限流值及短路电流瞬态变化率双重判断条件, 并结合短路时切换为恒流源控制的手段, 克服了电力电子设备瞬时过载能力弱的缺点, 实验结果证明该方法可以保证短路故障的迅速切除及负载的持续供电。

#### 参考文献

[1] TANG Xisheng, DENG Wei, QI Zhiping. Investigation of the dynamic stability of microgrid[J]. IEEE Transactions

- on Power Electronics, 2014, 29(2): 698-706.
- [2] 朱俊杰. 三相四线制静止式中频电源组网及其组网技术研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2013.  
ZHU Junjie. Research on integration of three-phase four-wire 400 Hz solid-state power supply[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2013.
- [3] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.  
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [4] 刘春喜, 马伟明, 孙驰, 等. 大功率400 Hz逆变电源数字控制设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 100-107.  
LIU Chunxi, MA Weiming, SUN Chi, et al. Digital control design of high power 400 Hz inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 100-107.
- [5] ZHU Junjie, NIE Ziling, WU Yanhao. Harmonic analysis and sectional suppression of 400 Hz solid-state power supply[C] // The 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, 2013: 802-807.
- [6] 王林兵, 何湘宁, 张超. 逆变器输出限流技术研究[J]. 电力电子技术, 2006, 40(4): 65-67.  
WANG Linbing, HE Xiangning, ZHANG Chao. Research on inverter over-current-limiting methods[J]. Power Electronics, 2006, 40(4): 65-67.
- [7] 藏玉清. 具有短路限流功能的统一潮流控制器的研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
ZANG Yuqing. Research and develop on unified power flow controller with solid-state fault current limiter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [8] 赵强, 张丽. 故障电流限制器现状及应用前景[J]. 电力建设, 2010, 29(1): 44-48.  
ZHAO Qiang, ZHANG Li. Current status and prospects of fault current limiter[J]. Electric Power Construction, 2010, 29(1): 44-48.
- [9] 熊小伏, 王嫄, 陈星田. 一种基于电流比变化量的变压器匝间短路保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 112-115.  
XIONG Xiaofu, WANG Qiang, CHEN Xingtian. A protection method of transformer inter-turn short circuit based on the variation of current ratio[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 112-115.
- [10] 高洋, 尹忠东, 赵士硕, 等. 一种新型多目标串联型短路限流控制器的研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(3): 15-17.  
GAO Yang, YIN Zhongdong, ZHAO Shishuo, et al. Research on a new type of the series fault current-limiting controller with multiple objective[J]. Power Electronics, 2012, 46(3): 15-17.
- [11] 任碧莹, 同向前, 孙向东. 具有限定功率运行的永磁直驱风力发电并网控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 87-92.  
REN Biying, TONG Xiangqian, SUN Xiangdong. Grid-connected control design for directly-driven PM wind generation with limited power operation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 87-92.
- [12] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于PSCAD/EMTDC的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [13] 黄挚雄, 徐保友, 沈玲菲, 等. LCL并网逆变器新型电流双闭环控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 1-5.  
HUANG Zhixiong, XU Baoyou, SHEN Lingfei, et al. New current double closed loop control strategy of LCL grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 1-5.
- [14] 朱俊杰, 马伟明, 聂子玲, 等. 一种用于静止式中频电源的比例谐振控制策略[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(10): 79-85.  
ZHU Junjie, MA Weiming, NIE Ziling, et al. A proportional-resonant strategy for static medium frequency[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(10): 79-85.
- [15] GJB 572A-2006 飞机外部电源供电特性及一般要求[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2007.  
GJB 572A-2006 electrical power characteristics and general requirements for external electrical power source of aircraft[S]. Beijing: State Commission of Science and Technology for National Defense Industry, 2007.

收稿日期: 2014-12-25; 修回日期: 2015-03-09

#### 作者简介:

朱俊杰(1984-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: zjj202\_2000@163.com

聂子玲(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动;

张银峰(1983-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力电子与电力传动。

(编辑 葛艳娜)