

三相偏磁桥路型限流器控制系统研制

窦会明,蔡旭,金之俭

(上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要:设计的三相限流器控制系统由 3 个单相偏磁桥路型限流器、3 个限流电抗器、励磁电源系统及电网运行状态监测系统组成,采用以 2 个数字信号处理器(DSP)为核心处理器的控制器,一个主要负责为偏磁桥路型限流器提供励磁电流;另一个主要负责监测电网电流、电压,实时采集电流、电压数据,当发生短路故障时及时作出判断,并通过 CAN 总线将控制参数发送给励磁控制器。分析了系统的工作原理,给出了三相控制系统的硬件、软件设计方案,并为控制系统的偏磁桥路型限流器设计了可以克服偶倍频反电势的基于 DSP 和现场可编程门阵列(FPGA)的数字励磁控制器。在所研制的 380 V/150 A、最大故障限流 1000 A 的偏磁桥路型限流器试验样机上进行了各种短路试验,试验结果表明所设计的控制系统软、硬件方案可行有效。

关键词: 偏磁桥路型限流器; 励磁电流; 短路故障

中图分类号: TM 471; TP 273

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)05-0091-05

随着电力系统容量和规模不断扩大,输配电系统的短路电流不断提高,短路故障对电力系统及其相连的电气设备的破坏性也越来越大,故障限流器(FCL)不仅能限制电力系统发生故障时所产生的短路电流,还能提高电力系统暂态稳定。现阶段限流器的研究主要分为固态限流器和超导限流器^[1]。上海交通大学电气工程新技术研究室按照结构简单、性能可靠的原则,提出了偏磁桥路型限流器方案。偏磁设备由于其固有的优良特性而得到推广应用^[2-3]。

偏磁桥路型限流器吸收桥路型限流器的优点,用偏磁桥路取代二极管桥路,并且偏磁电源处于电网二次侧,该方案不受现有材料和元器件的限制,是一种经济实用的限流器。如何为其提供实时、可靠、稳定的励磁电流是一个难点,控制系统的抗干扰能

力和稳定运行是保障偏磁桥路型限流器可靠限制电网故障电流的基础。

在分析偏磁桥路型限流器结构特点及其在不同运行模式下的工作原理的基础上,提出切实可行的三相偏磁桥路型限流器控制系统软件、硬件实现方案,所研制的控制系统在 380 V/150 A 的偏磁桥路型限流器试验样机上进行了试验验证,取得满意效果。

1 三相偏磁桥路型限流器结构及工作原理

三相偏磁桥路型限流器系统由 3 个单相偏磁桥路型限流器、3 个限流电抗器 L 、励磁电源系统及电网运行状态监测系统组成。3 个单相偏磁桥路型限流器分别串联在电网的 A、B、C 三相中。

励磁电源系统由 3 个三相全控整流桥和励磁控制器构成。励磁控制系统为 3 个单相偏磁桥路型限流器的偏磁线圈提供励磁电流。电网运行状态监测

收稿日期:2006-11-14;修回日期:2006-12-11

Circuit design of IPM and its application in APF

YUAN Tao,ZHENG Jian-yong,ZENG Wei,KANG Jing

(Department of Electric Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: IPM(Intelligent Power Module) has perfect functions,high reliability,high density and small cubage. The application of IPM in APF(Active Power Filter) equipment may simplify its main circuit and increase its overall reliability. The circuit design of IPM includes drive circuit,absorb circuit and protective circuit. The drive circuit is composed of drive power supply and optical interface circuit. According to the design demand of IPM,a typical external drive circuit of IPM with high reliability is introduced. The shutoff surge voltage and fly-wheel diode recovery surge voltage may cause IPM overvoltage,for which the buffer and absorb circuit is designed to reduce the switching loss and make full use of power device. Three normal buffer and absorb circuits and their application scopes are given. The protective circuit is composed of both internal and external protective circuits,and the latter is based on the processing of IPM fault signal. The application of IPM in APF equipment as inversion circuit is analyzed.

Key words: IPM; circuit design; APF

系统由主控制器、电压传感器(TV)、电流传感器(TA)等组成。主控制器经过对电网运行时的电压、电流值进行实时采集和分析比较,实现电网正常运行状态下的电压、电流采集、故障运行状态下的故障类型分析,并将电网运行状态控制参数实时传送给励磁控制系统,由励磁控制系统为限流器提供偏磁实现限流器的限流作用,最终由主控制器和励磁电源控制器紧密配合排除短路故障,并恢复电网正常运行。串联在 A、B、C 三相的限流器的励磁电流大小由电网运行状态决定,即电网故障类型不同,每相限流器的偏磁电流值不同,也即使电网尽快恢复正常运行主控制器所采取的控制也不同。

图 1 为单相偏磁桥路型限流器在电网中应用结构,即闭环控制结构。励磁电源控制系统由电源变压器 T_B 、三相全控整流桥^[4-5](6 个晶闸管 V_{TH-6})、霍尔电流传感器、同步变压器、触发电路、滤波器组成。

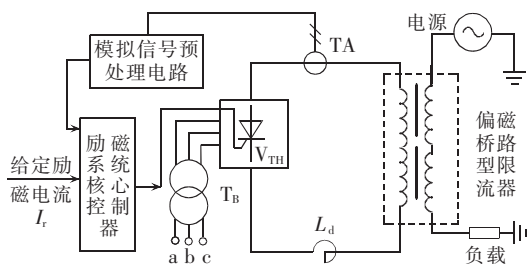


图 1 单相偏磁桥路型限流器闭环系统组成框图

Fig.1 Close loop control system of single-phase bridge type FCL with magnetic bias

励磁电流采用闭环模糊 PI 控制,由于偏磁桥路型限流器在实际应用中存在一个问题,即偏磁桥路型限流器承受高压时(电网短路时,限流电抗器自动串入故障相,限流器电压迅速增大到接近 100 % 电网电压),其控制绕组加励磁电流后会产生偶倍工频谐波^[6-7],且偶倍频谐波幅值随着励磁电流的增大先增大,当励磁电流增大到一定值后其幅值开始减小,即此时的励磁电流不再是单纯的直流量,而是直流量叠加有偶倍工频谐波分量。偏磁桥路型限流器的励磁电流主要由三相全控整流桥提供,偶倍频反电势负载给三相晶闸管整流桥的精确触发控制带来了影响,从而使偏磁桥路型限流器的精确控制不易实现。而能否实时、快速地给偏磁桥路型限流器建立给定的励磁电流是能否快速限流、减小电网短路故障危害的关键。励磁电流控制采用模糊 PI 控制,试验结果令人满意。实测结果表明励磁电流从 0 上升到设定值,时间小于 5 ms,满足控制要求。图 2 为由示波器实录的励磁电流从 0 值上升到设定值。

2 三相偏磁桥路型限流器控制系统设计

为了使控制系统能够稳定可靠的长期运行,研制的控制系统采用 2 个数字信号处理器(DSP)^{[8]①}为核心处理器的控制器。其中,一个控制器主要负责为偏磁桥路型限流器提供励磁电流;另一个主要负责监测电网电流、电压,实时采集电流、电压数据,当发生短路故障时及时作出判断,并通过 CAN 总线②

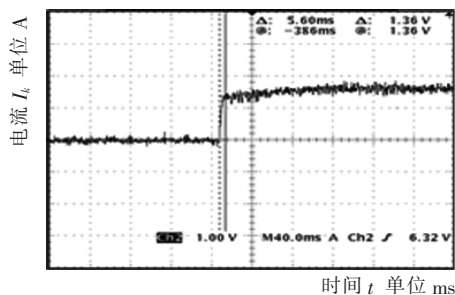


图 2 励磁电流响应曲线

Fig.2 Response curve of excitation current

将控制参数发送给励磁控制器。另外,为了确保控制系统发生故障时能够及时恢复并增强工作人员的可视效果(观测电网实时运行情况,保存控制信息和电网运行数据),还增加了人机交互系统(上位机电脑及其监测控制软件)。

2.1 硬件设计

如图 3 所示,励磁控制主系统由 3 个部分组成。一是以三相整流桥为主的一次电路部分;二是以 DSP 和现场可编程阵列(FPGA)为主要芯片构成的数字触发控制部分;另外,监测电网电压、电流 DSP 控制系统主要由电流、电压隔离传感器、模拟信号预处理电路和 DSP 控制器构成。

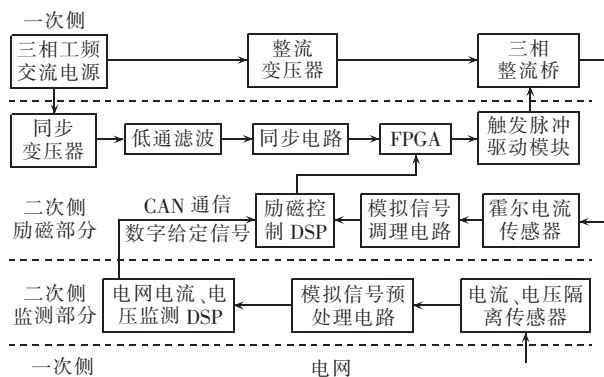


图 3 限流器控制系统硬件结构

Fig.3 Hardware structure of FCL control system

下面简述励磁系统的相控数字触发电路的组成与设计。晶闸管触发系统由同步、移相、脉冲形成、脉冲放大等环节构成,如图 4 所示。其同步电路、采样通道调制电路和脉冲放大电路由模拟器件构成,移相和脉冲生成由 FPGA 及软件实现。DSP 控制器和 FPGA 模块之间采用 SPI 总线通信,同时传输 3 个限流器励磁电流的触发角。为实现 DSP 和 FPGA 之间的 SPI 总线通信,系统在 FPGA^③内采用硬件描述语言 VHDL^[9-10]实现了 SPI 总线通信协议,并用 VHDL 语言实现三相全控所需 6 路双窄脉冲。

脉冲功率放大单元输出双窄脉冲,对于全控桥,在向某一桥臂晶闸管发送一窄脉冲时,即同时向前一桥臂晶闸管补发一个窄脉冲,分别触发共阳极组

① TM S320LF2407 A (DataSheet) - SPRS145G - July - 2000 - Revised February 2002.

② CAN Specification Version 2.0,1991,Robert Bosch GmbH,Postfach 30 02 40,D-70442 Stuttgart.

③ ALTERA,Cyclone FPGA Family Data Sheet,2003.

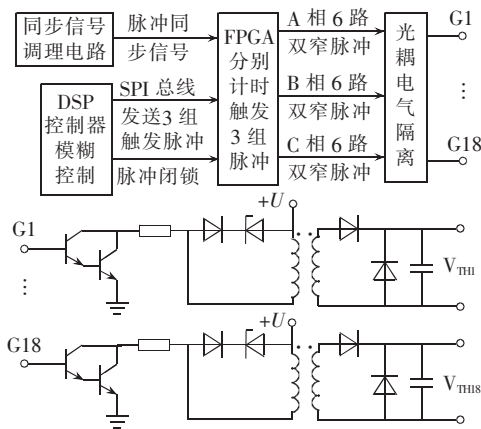


图 4 脉冲形成与放大结构图

Fig.4 Firing pulse generation and amplification

和共阴极组的晶闸管,以此防止脉冲变压器饱和,降低触发电路的输出功率。该励磁控制系统可同时为串在电网 A、B、C 三相传输线上的 3 个偏磁桥路型限流器提供相同值或不同值励磁电流,也可分别为某 1 个、2 个或 3 个限流器独立提供励磁电流。具体情况视电网运行故障的类型而定,总之该控制系统在控制上非常灵活,且经试验证明是可靠、稳定的。

2.2 软件设计

基于硬件控制系统的双控制器体系结构,软件设计也分为 2 个部分,即励磁控制器的软件设计和故障检测器的软件设计,2 个控制器的数据交换通过 CAN 总线实现。这种系统结构的设计可减少单一控制器系统中由控制器跑飞而造成整个系统瘫痪的几率,因 2 个控制器间可相互唤醒;另外,可减少每个控制器(DSP 数据处理器)所要处理的信息

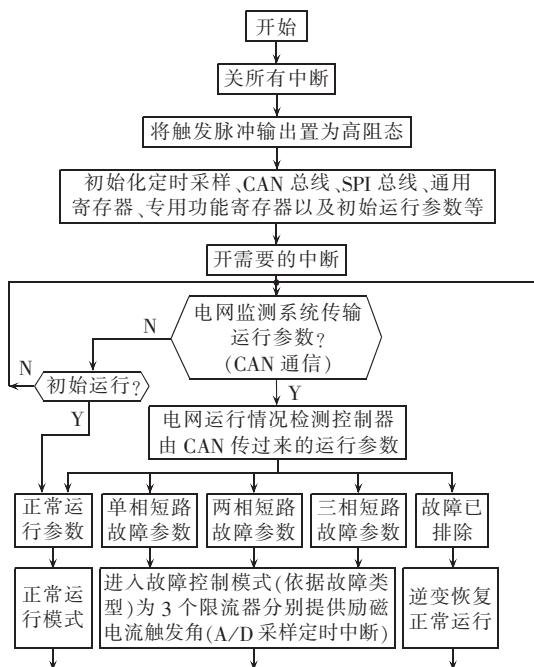
量,以及降低程序结构的复杂程度,因此提高了系统的可靠性和稳定性。

2.2.1 励磁控制器软件设计

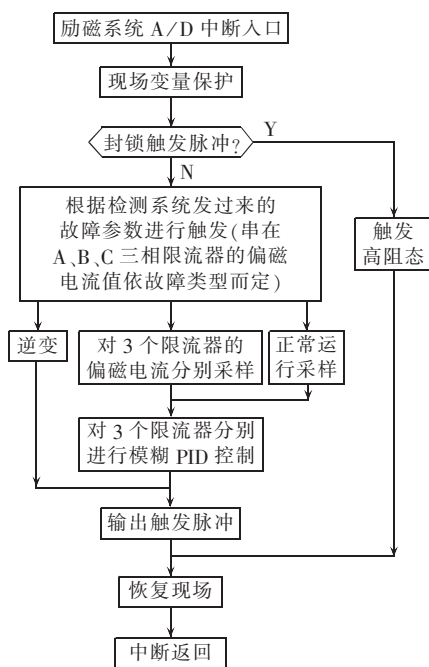
励磁控制器的软件主要由 3 部分组成:A/D 中断、CAN 通信、DSP 模糊 PI 控制以及 FPGA 之间的通信。励磁控制器软件结构如图 5(a)(b)所示。系统先上电自检并初始化各项参数,然后判断检测控制器是否传过来控制参数,如没有则投入正常运行,之后等待控制参数;如有电网故障参数到时转入故障运行。当励磁系统投入运行后,即为限流器提供偏磁电流,A/D 中断程序便开始实时采集串在电网 A、B、C 三相上三相限流器的 3 个偏磁电流值,分别实现模糊 PID 控制^[11-12](程序框图见图 6),计算触发角,并将 3 个触发角经 SPI 总线同时传送给 FPGA 芯片,其在同步电压过零点处计时触发,输出 3 组触发脉冲序列,控制全控整流桥得到三相偏磁限流器所需励磁电流,实现电网故障限流或常态控制。

2.2.2 电网运行故障监测控制器软件设计

监测控制器软件实现主要由 3 部分组成:系统初始化和 CAN 总线通信、电网电压和电流采样中断、电网故障类型判断,监测控制器软件结构如图 7 所示。系统上电自检并初始化各项参数,并与励磁控制器进行 CAN 通信确认后,A/D 采样中断程序开始实时采集、分析电网在运行状态下的电流、电压数据,并根据电网不同运行状态下的动态特性,如单相短路、两相短路、三相短路和常态的电压和电流不同变化规律确定电网的实时运行状态。然后,将固化在可擦除存储芯片中的短路故障类型控制参数通过查表方式取出,并由 CAN 总线传送给励磁控制器。



(a) 励磁控制器主程序框图



(b) 励磁 A/D 中断子程序

图 5 励磁控制器的软件结构框图

Fig.5 Flowchart of excitation current controller

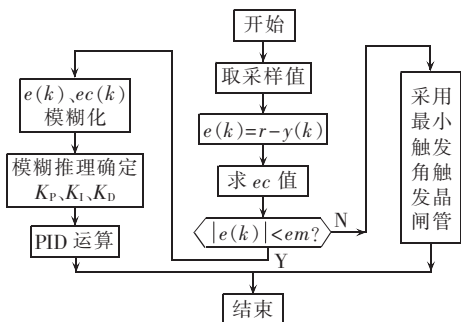
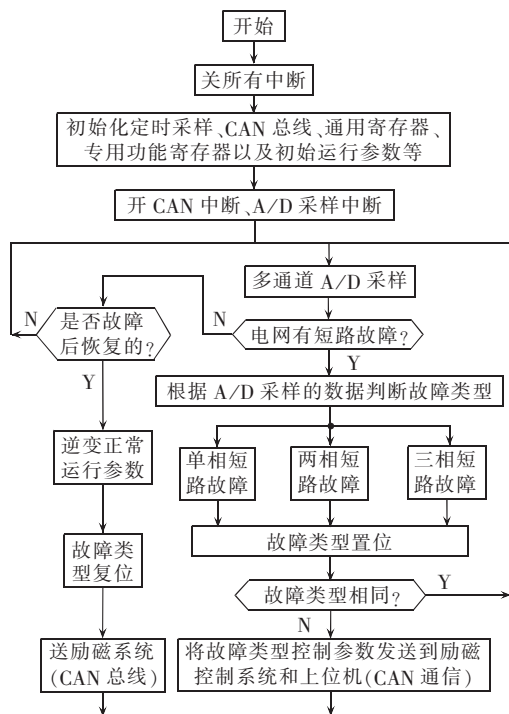
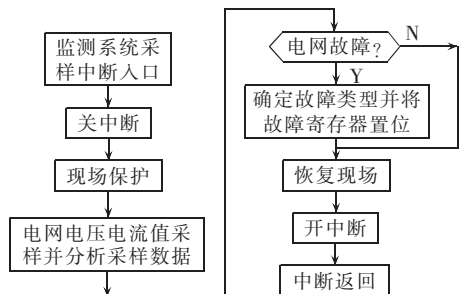


图 6 励磁模糊 PID 控制器框图

Fig.6 Block diagram of excitation current fuzzy-PID controller



(a) 监测控制器主程序框图



(b) 监测中断子程序

图 7 监测控制器的软件结构框图

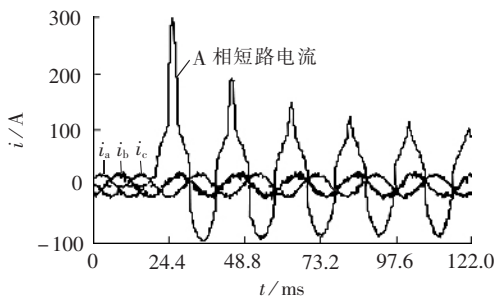
Fig.7 Flowchart of monitoring controller

3 试验结果

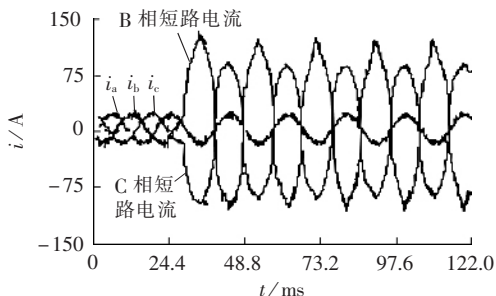
根据偏磁桥路型限流器的三相电路的拓扑结构,限流器励磁控制系统软、硬件和电网检测系统的软、硬件结构以及偏磁桥路型限流器原理,研制了 380 V/150 A、最大故障限流 1 000 A 的偏磁桥路型限流器试验样机,在不同电网短路故障情况下(A 相对地短路、BC 相间短路)均进行了限流试验。

图 8(a)(b)分别是电网 A 相对地短路、BC 相间短路情况下电网三相电流实测波形,即偏磁桥路型限流器串入电网后的实际限流效果。从图可以看出,电网短路后限流器能迅速将短路电流限制在 150 A 以内,没有限流器时最大短路电流 1 600 A,限流效果明显,完全符合低压情况下断路器实际工作要求,起到有效限流作用。

图 9 是 A 相对地短路时电网电压 u 、电流 i 和偏



(a) A 相对地短路



(b) B 相、C 相相间短路

图 8 偏磁桥路型限流器不同短路故障下三相电流试验波形

Fig.8 Current waveforms of FCL for different short circuit tests

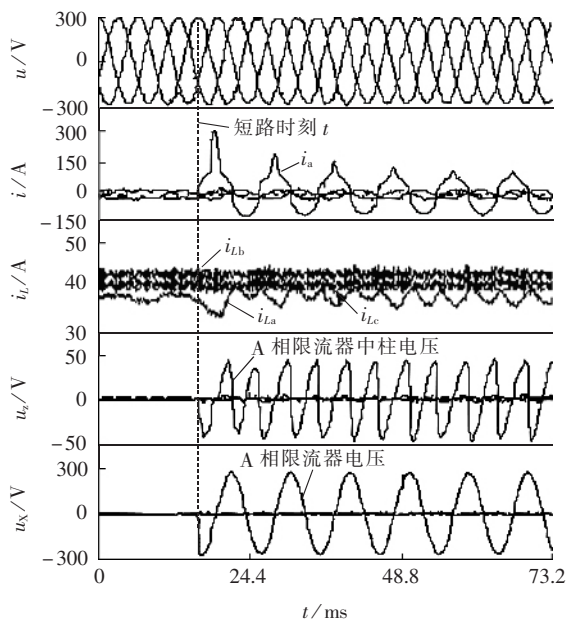


图 9 A 相对地短路电网电压和电流、限流器偏磁电流、限流器中柱电压和限流器电压时序波形图

Fig.9 Waveforms of grid voltage, grid current, FCL magnetic bias, FCL mid-post voltage and FCL voltage for phase A grounding fault

磁桥路型限流器的偏磁电流 i_L 、限流器中柱电压 u_z (限流器偏磁端口)、限流器电压 u_x 在时间上的对应关系图。

从图中偏磁电流的波形可看出,由于 A 相偏磁桥路型限流器在电网短路时,A 相限流电抗器 L 自动串入电网(偏磁桥路型限流器原理),短路故障相 A 相的限流器电压会迅速增大,接近电网额定电压的 100%,因此 A 相限流器偏磁端产生较强的反电势;而 BC 相非故障相限流器电压小于额定电网电压的 3%,因此 BC 相限流器偏磁端反电势(限流器偏磁端口中柱电压)很小。短路时因 A 相限流器偏磁端产生的偶倍频反电势对励磁电流的影响,A 相限流器偏磁电流 I_{La} 波形有波动,但波动很小,说明励磁电源控制器对偏磁电流的控制是比较稳定的,没有产生过大的电流冲击,满足系统工作要求;BC 相限流器偏磁端产生的偶倍频反电势很小,所以 BC 相偏磁电流 I_{Lb} 、 I_{Lc} 波形比较平滑,控制效果更理想。

4 结论

偏磁桥路型限流器 380 V/150 A 试验样机的三相试验数据和结果表明,研制的三相偏磁桥路型限流器控制系统的软、硬件设计均能实现预期的控制目的,且稳定、可靠;励磁控制系统对限流器偏磁端由于短路故障时限流器承载高电压所产生的反电势对励磁系统负面影响的克服也是成功的。控制系统的抗干扰能力和稳定运行是保障偏磁桥路型限流器可靠限制电网故障电流的基础。

参考文献:

- [1] KREUTZ R,BOCK J,BREUER F,et al. System technology and test of CURL 10,a 10 kV,10 MV·A resistive high- t_c superconducting fault current limiter [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity,2005,15(2):1961-1964.
- [2] 蔡旭,刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J]. 电力系统自动化,2002,26(15):53-56,69.

-suppression coil with magnetic bias[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(15):53-56,69.

- [3] 蔡旭. 新型偏磁式消弧线圈及其控制[J]. 电力系统自动化,2002,26(10):32-35.
- CAI Xu. A new arc-suppression coil with magnetic bias and its control[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(10):32-35.
- [4] 孙树朴,肖亮,王旭光,等. 半导体变流技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994.
- [5] 黄俊,王兆安. 电力电子变流技术[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,1997.
- [6] 蔡旭,谢桂林. 偏磁式消弧线圈工作机理研究(二)[J]. 华北电力大学学报,2001,28(1):10-14.
- CAI Xu,XIE Gui-lin. Study on arc-suppression coil with magnetic bias[J]. Journal of North China Electric Power University,2001,28(1):10-14.
- [7] 蔡旭,谢桂林. 偏磁式消弧线圈工作机理研究(一)[J]. 华北电力大学学报,2000,27(4):7-12.
- CAI Xu,XIE Gui-lin. Study on arc-suppression coil with magnetic bias[J]. Journal of North China Electric Power University,2000,27(4):7-12.
- [8] 王维俊,江渝,邓力. TMS320LF240x DSP C语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [9] 陈云洽,保延翔. CPLD 应用技术与数字系统设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [10] 侯伯亨,顾新. VHDL 硬件描述语言与数字逻辑电路设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1997.
- [11] PADIYAR K R,RAO K U. Discrete control of series compensation for stability improvement in power systems[J]. Electrical Power & Energy Systems,1997,19(5):311-319.
- [12] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

宴会明(1978-),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为偏磁桥路型限流器三相控制系统(E-mail:hmdou@sjtu.edu.cn);蔡旭(1964-),男,江苏徐州人,教授,长期从事配网安全与电力电子、电能质量控制与用户电力、配电自动化与保护等方面的研究开发工作;

金之俭(1965-),男,上海人,副教授,主要研究方向为电力系统设备的在线监测、电力系统试验设备、高电压测试技术、电力系统网络应用、医疗仪器设备等。

Study on control system of three-phase bridge type current limiter with magnetic bias

DOU Hui-ming,CAI Xu,JIN Zhi-jian

(Shanghai Jiaotong University,Shanghai 200240,China)

Abstract: The designed control system of three-phase FCL(Fault Current Limiter) consists of three single-phase bridge type FCLs with magnetic bias,three current-limiting reactors,excitation power supply system and power grid monitoring system. It adopts two DSPs as its core;one is to provide excitation current for the limiter;the other is to monitor the three-phase currents and voltages of power grid real-time and sends control parameters in time to excitation controller through CAN bus when short circuit fault is detected. Its control principle is analyzed and its software and hardware design presented. The designed digital excitation controller based on DSP and FPGA may overcome the even frequency reverse electromotive force. Various short circuit experiments are carried out on the prototype with rated voltage of 380 V, rated current of 150 A and maximal fault current of 1 000 A. Results show that the designed control system is feasible and effective.

Key words: current limiter with magnetic bias; excitation current; short circuit fault