

基于 TMS320F2812 的同步发电机励磁控制器

翁情安¹, 张炳达², 郝爽³

(1. 广东省电力工业局试验研究所, 广东 广州 510600; 2. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072;
3. 青海电力科学试验研究院, 青海 西宁 810008)

摘要: 文中介绍的同步发电机励磁控制器, 硬件上充分利用了 TMS320F2812 芯片丰富的外设资源, 并把同步信号捕获模块、交流信号采样模块、开关量输入输出模块和移相触发脉冲产生模块有机地整合为一体, 同时文中还给出了各个模块的软件编制方法。实践表明: 所设计的励磁控制器软硬件配合良好, 性能指标满足相关国标要求。

关键词: TMS320F2812; 励磁控制器; 同步交流采样; 移相触发

Excitation controller of synchro generator based on TMS320F2812

WENG Qing-an¹, ZHANG Bing-da², HAO Shuang³

(1. Guangdong Power Test & Research Institute, Guangzhou 510600, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Qinghai Power Scientific Test & Research Institute, Xining 810008, China)

Abstract: The excitation controller of synchro generator is given in this paper. The plenty peripherals of chip TMS320F2812 are used fully in the hardware designing, and the sync signal capture module, the AC signal sampling module, the switching value in-out module and the phase shift trigger pulse generator module are organically combined, besides, the software methods of each module are given in detail. It has been proved that the designed hardware and software of this excitation controller can cooperate well, and the performance index meets the relevant requirements.

Key words: TMS320F2812; excitation controller; synchronized AC sampling; phase shift trigger

中图分类号: TM75 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0092-05

0 引言

励磁控制器是同步发电机励磁系统的重要组成部分, 对于电力系统的安全稳定运行起着十分重要的作用。传统的模拟式励磁控制器虽然能满足电力系统的要求, 但其调节速度慢、硬件结构过于复杂, 而且可扩展性差。随着电子技术的发展, 性能优越的微处理器不断涌现, 为实现励磁控制的数字化奠定了坚实的基础。随着 CPU 功能越来越强大, 数字式励磁控制器采用的微处理器也从 INTEL 公司的 8080 和 8086、普洛公司的 STD 工业控制微机、8098 单片机, 发展到目前 TI 公司的 DSP。基于 DSP 的励磁控制器具有硬件结构简单、运算速度快, 且运算精度高等优点, 目前已经被广泛应用。

TMS320F2812 是美国 TI 公司于 2001 年推出的主频可达 150 MHz 的 32 位定点 DSP, 数据处理能力强, 能胜任较复杂的数据处理任务, 而且价格便

宜, 能够很好地完成励磁控制器的控制功能。本文利用 TMS320F2812 设计了一种硬件集成度高、软件运算速度快、整体功能强大的基于新型 DSP 的励磁控制器。

1 TMS320F2812 芯片介绍

TMS320F2812^[1]是基于 TMS320C2xx 内核的定点数字信号处理器。其内部结构框图如图 1 所示。

在 TMS320F2812 芯片中, 集成了 128 K 的 Flash 存储器、4 K 的引导 ROM、数学运算表以及 2 K 的 OTP ROM、串行外设接口模块(SPI)、串行通信接口模块(SCI)、CAN 控制器模块(eCAN)等。另外, 16 通道的高性能 12-bit 模数转换模块(ADC)^[2]有效地保证控制采样信号的同步; 两个事件管理器模块(EV)为电机及功率变换控制提供了良好的控制功能。

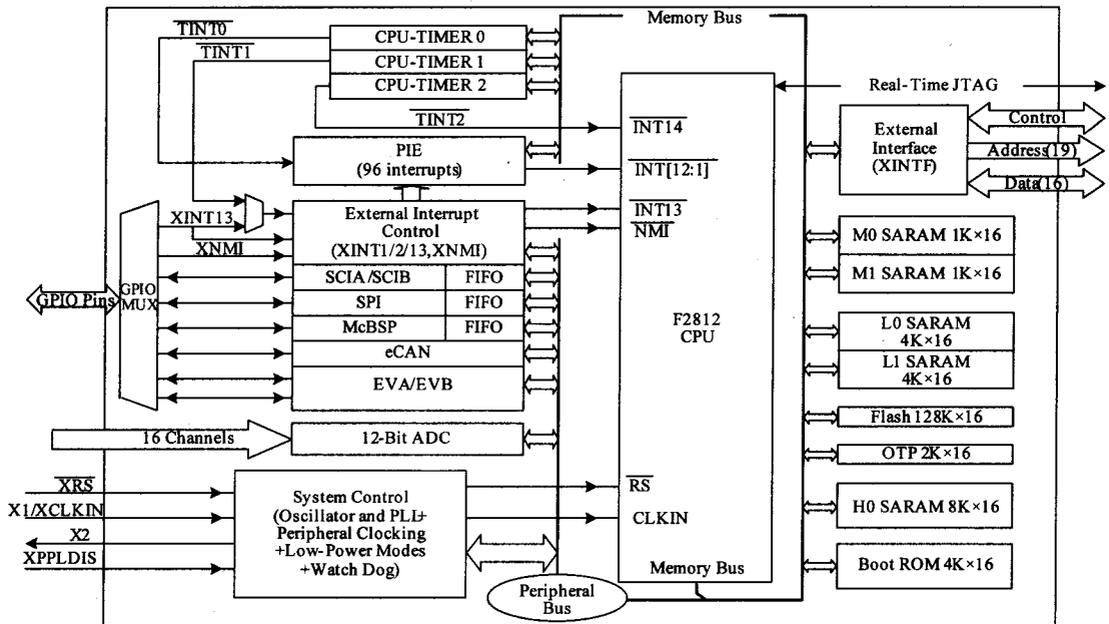


图 1 TMS320F2812 内部结构框图

Fig.1 Internal structure diagram of TMS320F2812

2 励磁控制器的硬件设计

本文提出的励磁控制器主要由同步信号捕获单元、多通道交流信号采集单元、开关量输入输出单元和移相脉冲触发单元四部分组成。其硬件结构如图2所示。

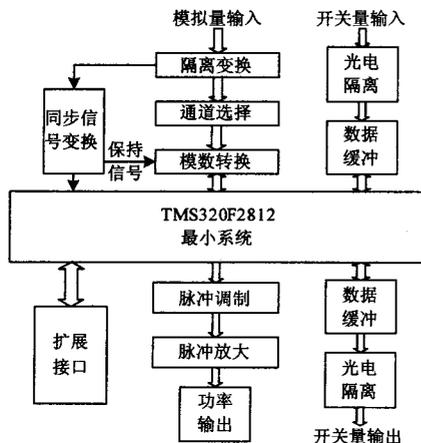


图2 励磁控制器硬件结构示意图

Fig.2 Hardware structure diagram of excitation controller

图中 TMS320F2812 最小系统由 TPS75733 和 TPS76801Q 分别提供 3.3 V 和 1.8 V 工作电源, 并利用 TPS3823 对 3.3 V 电源进行监控, 提高 DSP 系统的稳

定性和抗干扰能力。另外系统用 IS61LV51216 扩展随机存储空间, 用 74LV138 产生外部 I/O 地址译码选通信号, 用 74LVTH16245 使外部地址总线、数据总线 and I/O 口兼容 3.3 V、5 V 电平。

2.1 同步信号捕获单元

发电机同步信号是指能够反映被测交流电量频率变化的系列方波或脉冲信号。同步跟踪发电机机端电压的频率, 能使得交流采样更加精确。另外, 在控制可控硅的触发脉冲时, 需要根据同步信号进行脉冲移相, 以及确定脉冲间的时间间隔。

同步信号捕获单元主要由整形电路、锁相环和捕获模块组成。其硬件原理如图 3 所示。

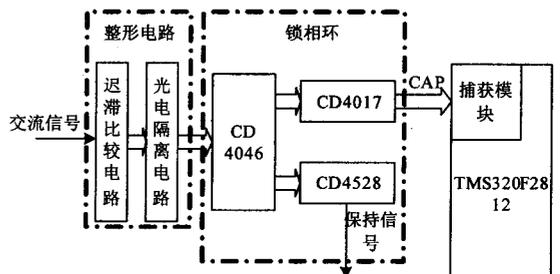


图 3 同步信号捕获单元硬件原理图

Fig.3 Hardware schematic diagram of sync signal capture module

由高速比较器 LM339 和三极管 9012 组成的迟

滞比较电路对正弦波输入信号进行过零点检测，同时把输入信号整形为只有正半波的同频率方波信号；高速光耦 6N137 则把模拟部分和数字部分电路隔离开。

锁相倍频电路由锁相环集成电路 CD4046 和十进制分频电路 CD4017 组成，CD4017 输出的同步信号经电阻分压后，送入 TMS320F2812 的捕获模块 CAP1，用于频率的测量，以满足励磁控制中后续的电力系统稳定器(PSS)和 V/F 限制的需要；同时 CD4046 输出的同步倍频信号经 CD4528 脉宽整形后得到合适的脉冲信号，作为 AD 采样保持的触发信号。通过硬件锁相同步，避免了软件同步中的中断响应时间不确定性，以获得更高的同步精度。

TMS320F2812 片上有两个事件管理器(EV)^[3]，每个事件管理器中有 3 个捕获模块，每个捕获模块都有一个相应的外部捕获引脚和一个专用的两级 FIFO 堆栈。当检测到输入引脚上出现一个指定的跳变时(该跳变可以通过程序设定：上升沿、下降沿或两者兼有)，捕获模块就将定时器的计数值捕获，并存储在相应的两级 FIFO 堆栈中。两次捕获值的差值表征了同步信号的周期值 T ，即可求得输入引脚上的信号频率 $f=1/T$ 。

2.2 交流信号采集单元

微机励磁控制系统需要采集的交流信号通常包括：发电机机端电压 U_g 和机端电流 I_g ；发电机出口开关电网侧电压 U_s ；发电机励磁电压 U_f 和励磁电流 I_f ；发电机有功功率 P 和无功功率 Q ；发电机频率 f 。

交流信号采集单元主要包括隔离变换电路、限幅电路和模数转换及控制电路。其硬件原理如图 4 所示。

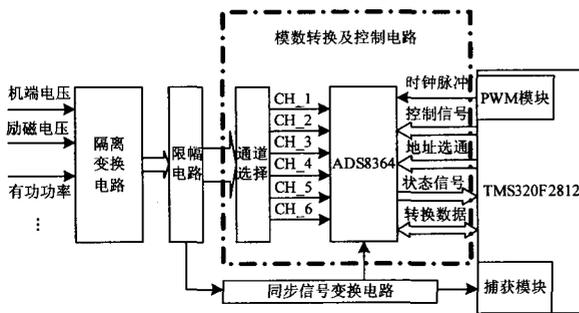


图 4 交流信号采集单元硬件原理图

Fig.4 Hardware schematic diagram of AC signal sampling module

系统电压和发电机机端的电压、电流经电压、电流互感器后，变为有效值为 0~100 V、0~5 A 的交流电量，而励磁电压在暂态过程中的反电势可达上

千伏。这些量是不能直接采样的，必须经过隔离后调整成适合采样的信号。这里，对于交流电量是采用小型精密电压、电流互感器对其进行隔离和变换，使其调整为 0~5 V 的脉动直流电压信号；对于直流信号则用霍尔传感器。由于励磁电流一般较大，通常使用霍尔传感器和分流器相配合。

模数转换中，如果 A/D 采用通道损坏，检测和控制在功能就不能实现。出于安全考虑，在 A/D 通道前应采用限幅电路，以保障系统的 A/D 通道的安全。本文的限幅电路采用了运算放大器 LM324，根据 ADS8364 的量程范围，限幅电路设定电压上限 $U_{R+}=5\text{ V}$ ，下限 $U_{R-}=0\text{ V}$ 。

模数转换选用 TI 公司推出的 6 通道 16 位模数转换器 ADS8364^[4]，芯片内部包含 6 个高速采样/保持放大器、6 个高速 ADC、1 个参考电压源(+2.5 V) 及 3 个参考电压缓冲器，可以提供 250 kSPS 同步采样率，且具有超低功耗特点。其时钟信号由 TMS320F2812 的 T4PWM 提供；控制信号主要包括中断请求信号、片选信号、读写信号和复位信号等，分别由 TMS320F2812 相应提供。当每对通道转换完毕后由 ADS8364 向 TMS320F2812 发出一个外部中断请求，TMS320F2812 响应中断请求后，通过地址线选通对应通道后将转换所得数据由数据线读入^[5]。

2.3 开关量输入输出单元

开关量输入输出通道的主要任务是：让 TMS320F2812 能够获取现场的各种开关状态，并能输出开关量信号去控制指示灯、继电器或发出报警信号等。

开关量输入输出通道由光电隔离和数据缓冲两部分电路组成。其硬件原理如图 5 所示。

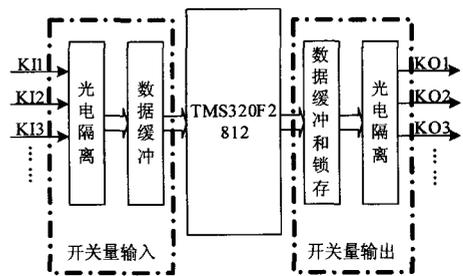


图 5 开关量输入输出单元硬件原理图

Fig.5 Hardware schematic diagram of switching value in-out module

光电隔离部分主要器件采用 TLP521-4。为了保证光耦器件 TLP521-4 的输入电流在 4 mA 左右，因此需要加适当的限流电阻。

数据缓冲部分采用的是总线收发器 74LV245, 74LV245 具有双向传送数据的功能, 其传送方向可控。当 CPU 发出读数据命令时, TMS320F2812 以访问外部 I/O 的方式从分配的地址单元读取相关的开关量状态; 当 CPU 发出写数据命令时, TMS320F2812 数据总线上的数据通过总线收发器被送到 74AHC373 锁存器锁存, 由锁存器的输出驱动相应的指示灯或继电器。

2.4 脉冲触发单元

脉冲触发单元的作用是产生触发脉冲, 用来触发整流桥中的晶闸管, 并控制触发脉冲的相位随控制电压的大小而改变, 从而达到调节励磁的目的。

脉冲触发单元主要由三部分组成, 分别是触发脉冲形成电路、触发脉冲调制放大电路和触发脉冲故障检测电路。其硬件原理如图 6 所示。

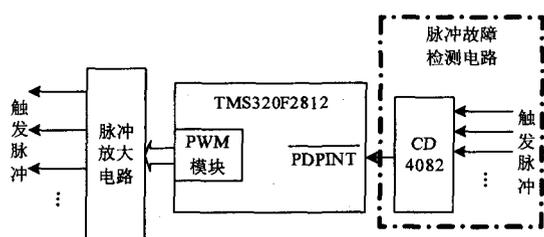


图 6 脉冲触发单元硬件原理图

Fig.6 Hardware schematic diagram of pulse trigger module

本文是利用 TMS320F2812 中的脉宽调制电路 (PWM) 来形成移相脉冲的。在 TMS320F2812 的每个事件管理器^[3]中, 有 3 个全比较单元。如果全比较单元处于 PWM 模式, 则其中的比较寄存器就不断地与时基计数器的值进行比较, 当两个值匹配时, 相关的输出电路就根据设定的输出逻辑发生相应跳变, 从而在相关输出引脚上就产生了 PWM 信号。

PWM 电路输出的脉冲功率小, 不能够直接驱动可控硅导通, 必须通过功率放大。本文中的脉冲放大主要通过一个功率管 Q5 和一个脉冲变压器来实现。TMS320F2812 产生的可控硅触发脉冲经过光电隔离后加到功率管 Q5 的基极, 使 Q5 导通, 然后由脉冲变压器 T 输出功率放大后的触发脉冲。脉冲的宽度和脉冲之间的间隔时间则可通过改变相应的电容值来调整。

为了保证可控硅触发脉冲的正常发出, 采用脉冲故障检测模块来检测可控硅触发脉冲的丢失情况。我们利用 TMS320F2812 上的功率驱动保护引脚 (PDPINT) 来响应脉冲故障的中断请求。由于 TMS320F2812 只有一个功率驱动保护引脚, 因此这里用两块四输入与门 CD4082 把六路信号汇总起

来。当六路信号任意一个触发脉冲电路不正常时, CD4082 输出低电平, 使 TMS320F2812 进入相应的中断服务程序。

3 励磁控制器的软件设计

TMS320F2812 上电复位后自举加载程序, 跳转到主程序入口。在主程序中, 对 TMS320F2812 最小系统和外围扩展电路进行初始化, 然后进行系统自检, 确保系统运行前无软硬件故障, 主程序内部循环执行, 等待响应不同的中断。

3.1 频率捕获中断

当 TMS320F2812 上的 CAP1 检测到输入引脚上出现一个跳变时, 捕获单元将相应的作为其时基 GPT 的当前计数值捕获, 并存储在相应的两级 FIFO 堆栈中的顶层寄存器; 在 TMS320F2812 第二次捕获时, 新捕获的计数值送至 FIFO 堆栈的底层寄存器, 同时将寄存器相应的捕获中断标志置 1, 如果中断允许, 则会产生一个中断请求; 当 TMS320F2812 第三次捕获时, 如果 FIFO 堆栈中已有两个捕获到的计数值, 则位于堆栈顶层寄存器中的计数值将被丢弃, 而堆栈底层寄存器的计数值被弹入到顶层寄存器, 新捕获的计数值将被写入底层寄存器, 同样, 第三次捕获也将寄存器相应的捕获中断标志置 1, 如果中断允许, 则也会产生一个中断请求。

当同步方波信号相邻的两个相同跳变被捕获后, 引起捕获中断 CAP1INT, 在中断处理子程序中读出所捕获的定时器的两次计数值, 两次计数值之差就代表定时器的计数周期为时间基准单位的同步方波的周期, 也即是基波正弦信号的周期, 因此频率也随之可以求出。频率捕获中断服务子程序的程序流程图如图 7 所示。

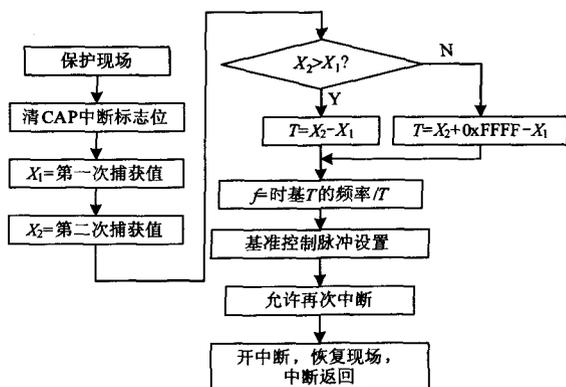


图 7 频率捕获中断服务子程序流程图

Fig.7 Subprogram flow chart of frequency capture interrupt

3.2 数据采集中断

ADS8364 的三个启动信号同时与同步信号捕获单元的同步倍频信号 HOLD 相连。当 HOLD 变为低电平时, ADS8364 开始采样转换, 转换需要 16 个时钟周期。当每对通道转换完毕后, ADS8364 的 EOC 发出低脉冲, TMS320F2812 的外部扩展中断 XINT1 提出中断请求, 中断响应程序将各自数据缓冲器中的内容读入到 TMS320F2812 指定位置的数据存储区。图 8 为数据采集中断服务子程序的程序流程。

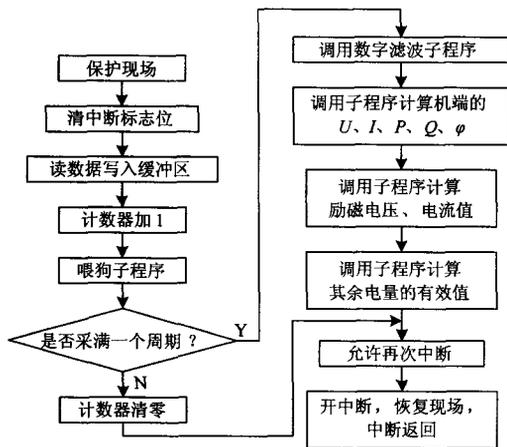


图 8 数据采集中断服务子程序流程图

Fig.8 Subprogram flow chart of data sampling interrupt

交流采样得到的是信号的瞬时值, 而励磁控制装置需要的是电压有效值、电流有效值、有功功率、无功功率和功率因数。本文交流采样的算法采用均方根算法。

3.3 移相触发脉冲

本文中利用计数器延时的方式来形成移相触发脉冲。励磁控制器根据交流采样所得到的机端电压和无功功率以及各种保护限制计算得到移相触发角度 α , 根据机端电压频率 f , 计算出触发角度 α 的计数器脉冲个数 N , 计算公式如下。

$$N = \frac{\alpha}{360 \times f} \times f_c$$

式中: f 为机端电压频率, f_c 为计数脉冲频率。

当 CAP1 捕获到同步信号上升沿时, 将启动时刻 (N) 装入全比较单元的比较寄存器 CMPR, 同时将结束时刻 $(N+\text{脉宽})$ 装入定时器 T1 的周期寄存器。当定时器 T1 发生比较匹配事件时, PWM1 引脚输出高电平; 当定时器 T1 发生周期匹配事件时, PWM1 输出低电平, 同时复位定时器 T1, 准备下一次触发脉冲, 并设定好下一个定时器的比较寄存器

和周期寄存器的值, 这样便形成了第一个晶闸管的移相脉冲, 后五个脉冲依此类推。

3.4 PID 控制算法

本文的电压调节采用对发电机机端电压和参考电压的差值进行 PID 控制方式, 经 PID 计算的输出控制电压转换成移相触发脉冲来控制励磁电流的大小, 使发电机的空载电势改变, 从而保持机端电压恒定。

按偏差的比例(Proportional)、积分(Integral)、微分(Differential)进行控制的调节器, 是控制系统中应用最广泛的调节器。它结构简单, 参数易于调整, 程序设计简单。图 9 给出了位置式 PID 控制系统的示意图。

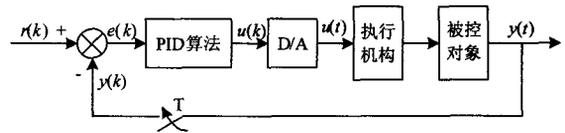


图 9 位置式 PID 控制系统框图

Fig.9 Position-type PID control system diagram

位置式 PID 控制^[6]是对模拟 PID 控制进行离散化, 当采样时间 T 很小时, 用一阶差分代替一阶微分, 用累加代替积分, 可以将模拟 PID 控制方程直接离散化, 这时可用矩形或者梯形积分来求连续积分的近似值。

4 结论

本文基于 TI 公司的 TMS320F2812 芯片, 充分利用其强大的数据处理能力、高速的实时控制能力以及丰富的片内外设资源, 用单片系统结构实现了同步发电机励磁控制器的交流采用、频率测量、移相触发以及励磁控制算法等功能, 简化了励磁控制器的硬件结构, 提高了系统可靠性。试验结果表明: 软硬件配合良好, 能够完成预期的励磁控制调节的基本功能, 但需要进一步完善其更高级的功能。

参考文献

- [1] Texas Instruments Incorporated. TMS320F2812 Digital Signal Processors Data Manual (Literature Number: SPRS174O)[Z]. 2007.
- [2] Texas Instruments Incorporated. TMS320x281x DSP Analog-to-Digital Converter (ADC) Reference Guide (Literature Number: SPRU060D)[Z]. 2005.
- [3] Texas Instruments Incorporated. TMS320x281x DSP Event Manager (EV) Reference Guide (Literature Number: SPRU065E)[Z].2007.

(下转第 118 页 continued on page 118)

式的充电保护来实现灵敏性和快速性的平衡。设置长延时段，其定值按常规充电保护定值进行整定，用以保证在变压器低压侧有故障时能够可靠跳闸；设置短延时段，其定值可以按躲过大多数情况下合闸后 3~4 个周波的较大涌流值来整定，以较短的时限保证能迅速切除严重故障。在充电保护具有此种功能时可以方便地按此进行操作，但多数变电站配置的充电保护一般只有一个过流段，一个短时开放段，这种情况可以通过短接手合触点将短时开放方式更改为长投方式来实现；在不能更改的情况下或老式变电站只配置一段电流保护的情况下可以采用两个变电站“串联”的方式来实现。即一方面将试运变电站母线充电保护更改为小电流长延时投入，从而保证低压侧故障时的灵敏度；同时将供电线路对侧运行变电站的充电保护更改为大电流短延时方式，保证包括线路在内的大故障发生时能迅速切除，从而客观上实现了两段式电流保护的“串联”投入。在特殊情况下只能使用一套过流保护时，充电保护也可适当调整动作时间到 250 ms 以上，但一般应低于 300 ms。

除此之外采取减少涌流大小的方法可能更为简便。涌流的大小和合闸角、剩磁有关，针对这两项所采取的限制涌流方法一般难以实现，但是根据现场条件我们也可以考虑采取可能的方式减少涌流的产生，如在低压侧有其他供电电源的情况下，可调整试运行顺序，先对低压侧电容器试运成功，然后在变压器投运时可带低压侧电容器投运将会大大减少励磁涌流的幅值。

3 总结

综上所述，变压器充电时应注意以下几点：

1) 确保瓦斯保护的正确

瓦斯保护不须进行带负荷检查，因此可作为投运时唯一可靠的变压器本体主保护，要高度重视对

变压器瓦斯保护的投运前的传动试验工作。

2) 适当调整主变差动保护制动系数

以适当减小差动保护谐波制动系数的方法减少主变差动保误动的几率。

3) 尽量采用两段式充电保护

新变电站尽量配置两段式母线充电保护。

无两段式充电保护时，可采用调整短时开放段或两站充电保护“串连”配合使用的方式，实现两段式充电保护。电源端为限时速断，设以较大定值较短的时间保证在较严重故障时能以较短的时间切除故障；负荷端设以较小的定值较长的时间以保证在变压器低压侧故障时有灵敏度。

4) 其他措施

采用可能减少涌流的方法。如在变压器低压侧并联电容器投运的方法较易实现。

最后还要求现场继电保护技术人员要对涌流特征有充分的认识，在采取以上方法仍出现保护跳闸情况时，能迅速由相关的故障录波图判断故障与否，如仍是由涌流造成，则可视为极小概率事件，从而保证现场工作的迅速继续进行。

参考文献

[1] 霍现军. 变压器合闸时励磁涌流分析及对策[J]. 江苏电器, 2007, 6: 38-41.
HUO Xian-jun. Analysis and Countermeasures for Excitation Inrush at Making of Transformer[J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2007,6:38-41.

收稿日期：2008-10-20； 修回日期：2008-12-01

作者简介：

程 旭 (1971-)，男，高级工程师，长期从事电力系统继电保护安装、调试及技术管理工作；E-mail: jidianbaohu@gmail.com

张浩然 (1969-)，男，工程师，长期从事电力系统电气设备安装、调试及管理工作。

(上接第 96 页 continued from page 96)

[4] Texas Instruments Incorporated. 250kHz, 16-Bit, 6-Channel Simultaneous Sampling Analog-to-Digital Converters (ADS8364) (Literature Number: SBAS219B)[Z]. 2004.
[5] Texas Instruments Incorporated. Application Report of Interfacing the ADS8364 to the TMS320F2812 DSP (Literature Number: SLAA163)[Z]. 2002.
[6] 陆继明, 毛承雄, 范澍, 等. 同步发电机微机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

收稿日期：2008-11-07； 修回日期：2008-11-28

作者简介：

翁情安 (1981-)，男，助理工程师，从事发电机励磁相关工作；E-mail: whenqingan@163.com

张炳达 (1959-)，男，教授，从事电力系统仿真与故障诊断的研究；

郝 爽 (1982-)，女，助理工程师，从事高电压技术开关类的试验和研究。