

[SVG]

低压静止无功发生器的启动策略控制方法的研究

文/河北工业大学电气工程学院 吕聪敏 谢阳 韩晔

目前的SVG在启动时冲击电流较大,严重影响补偿装置的使用寿命,并在电网中产生谐波污染。为此通过构建AC 380 V±120 kvar三相结构SVG装置并对其进行应用研究,根据仿真参数选取硬件设备的规格型号,并结合DSP与PFGA等控制芯片形成嵌入式系统,对SVG一次侧主电路元件参数选取及二次侧系统结构进行研究,提出了一种综合启动策略控制方法,最终通过实际运行结果证实了该综合启动策略控制方法能够很好地解决SVG启动时冲击电流过大的问题。

电力系统是由发电、输电、配电和供电系统构成,是一个多种能量交换的复杂系统,有功功率和无功功率是维持电力系统正常运行的两种能量的重要表达形式。在最初的小规模交流电网中,一般是通过调节发电机的励磁电流来实现无功的调节。随着电网规模的不断扩大,逐步发展到现在的无功补偿装置。电力系统中的无功补偿装置从最早的电容器开始发展到今天的SVG,其中经历了同步调相机、现代静止无功补偿装置等几个阶段。电压型SVG一次侧主电路元件包括由IGBT组成的三相变流器,直流侧电容,以及连接电抗器、电操机构等部分。二次侧主要电路(功率单元)包括:主控制器、驱动电路、电源电路等。SVG将电力电子技术、智能控制技术及微电子技术的优点集于一身,反应速度快,无功调节也很平滑。但是SVG启动时冲击电流过大将严重影响到补偿装置元件的使用寿命甚至会给电网带来谐波污染。冲击电流的大小是由SVG启动时直流侧电压是否稳定直接决定的,传统的PI调节控制法只是在一定的时间内能稳住直流电压,但不能在启动时控制直流电压的超调。本文提出了一种综合启动策略。该策略分别在电压外环通过软启动方式、直流侧电压阶梯抬升和PI调节控制抑制直流侧电压超调,电流内环运用改进解耦控制法分离内环电流的有功分量(d)和无功分量(q),采

用综合启动策略能够解决SVG启动时冲击电流过大问题。

SVG一次侧系统

1. 三相变流器电路

三相变流器是SVG的核心部件,它可以由GTO、MOSFET、IGBT、IGCT等半导体开关组成。GTO可以做到容量很大且通态压降低,但是存在关断时间长、开关频率低,伴有较大的开关损耗;MOSFET开关频率高、驱动功率小,而其通态压降较大,耐压水平有限,仅适合于几千瓦小功率应用场合;IGBT的电压电流等级和电力晶体管的水平已经很接近,并且已经做到多个IGBT集成在一起,实现模块化了。

IGBT选取方法如下:

- 1) 确定直流侧电压 U_{DC} 为700 V。
- 2) 变流器输出的最大交流电压为

$$U_{i\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{DC} = 0.866 \times 600 = 519.6 \text{ V} \quad (1)$$

- 3) 变流器输出交流电压的有效值

$$U_i = \frac{U_{i\max}}{\sqrt{2}} \alpha \beta = \frac{519.6}{\sqrt{2}} \times 0.9 \times 0.95 = 314 \text{ V} \quad (2)$$

式中, α 为调制度, β 为死区比例系数。

- 4) 在120 kvar额定容量下变流器流过的电流有效值为

$$I_N = \frac{120\,000}{U_i \sqrt{3}} = \frac{120\,000}{314 \sqrt{3}} = 220\text{ A} \quad (3)$$

5) 额定容量下通态峰值电流

$$I_m = \sqrt{2} I_N = \sqrt{2} \times 220 = 312\text{ A} \quad (4)$$

工程实际一般还要留有1.5~2的安全裕量,所以额定电流 I_N 设计为450 A。

6) IGBT正反相峰值电压

$$U_m = \sqrt{2} U_{AC} = \sqrt{2} \times 220 \sqrt{3} = 538.9\text{ V} \quad (5)$$

同样考虑1.5~2的安全裕量,取额定耐压值 U_N 为1 200 V。

根据计算的结果,本装置选英飞凌公司产的IGBT模块,型号为FF450R-ME4,其额定电压900 V,额定电流450 A,恰好符合设计要求。最后将3个IGBT模块安装在铝板散热器上,并且与直流母排进行连接,组成并网IGBT变流器。

7) IGBT损耗计算方法

IGBT损耗主要包含导通损耗和开关损耗两种损耗。下面分别叙述其计算方法。

$$P_{\text{总}} = P_{\text{导通}} + P_{\text{开关}} \quad (6)$$

IGBT的导通损耗计算

$$P = V_{ce} I_c \quad (7)$$

式中, V_{ce} 为IGBT导通时候的饱和压降; I_c 为通过IGBT的电流有效值。

参考图1,可以看出在不同温度与不同电流情

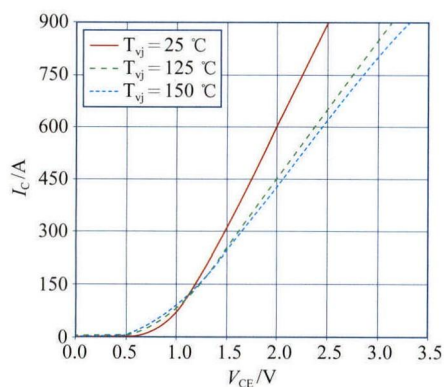
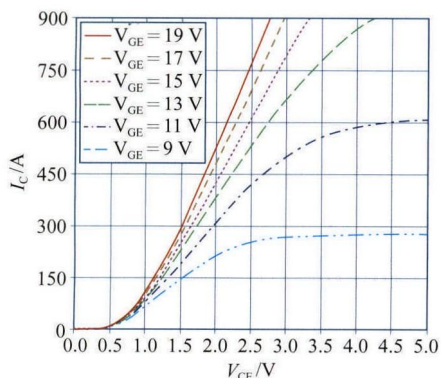


图1 英飞凌IGBT在不同电流下的损耗

况下IGBT的导通压降 V_{ce} 。考虑到工程裕量,查表可知, $I_c = 225$ 时, V_{ce} 约为1.5。但是从工程裕量角度出发,这里选取为2.0。

$$P_{\text{导通}} = V_{ce} I_c = 180 \times 2 = 360(\text{W}) \quad (8)$$

IGBT的开关损耗计算

$$P_{\text{开关}} = f_{\text{pwm}} (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \quad (9)$$

上面计算的是平均开关损耗。

这里 E_{on} 和 E_{off} 分别为IGBT由开通到关断和由关断到开通过程中的损耗。RG为焊接在CONCEPT板上面的贴片电阻,查资料。

参看图2,粗略选择 $E_{\text{on}} = 40\text{ mJ}$, $E_{\text{off}} = 60\text{ mJ}$ 。

当 $f_{\text{pwm}} = 12.8\text{ kHz}$ 时,

$$P_{\text{开关}} = f_{\text{pwm}} (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) = 12.8 \times 100 = 1280\text{ W} \quad (10)$$

当 $f_{\text{pwm}} = 6.4\text{ kHz}$ 时,

$$P_{\text{开关}} = f_{\text{pwm}} (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) = 6.4 \times 100 = 640\text{ W} \quad (11)$$

由上可以知道:当 $f_{\text{pwm}} = 12.8\text{ kHz}$ 时,

$$P_{\text{总}} = P_{\text{导通}} + P_{\text{开关}} = 450 + 1280 = 1730\text{ W} \quad (12)$$

则三只总损耗为5 190 W。

当 $f_{\text{pwm}} = 6.4\text{ kHz}$ 时,

$$P_{\text{总}} = P_{\text{导通}} + P_{\text{开关}} = 360 + 640 = 1000\text{ W} \quad (13)$$

则三只总损耗为3 000 W。

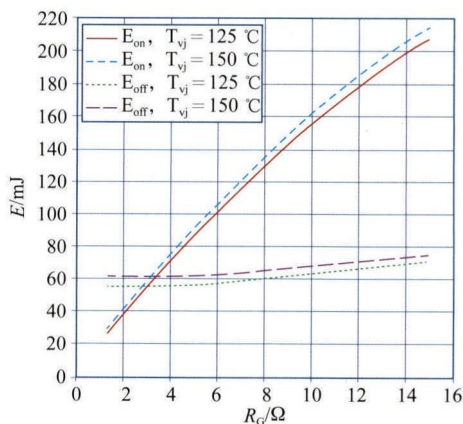


图2 英飞凌IGBT导通损耗图

2. 元器件的选取

元器件的选取是试验以及结果成功的关键,本文所需要选取的有:直流侧电容、连接电感、电动操作机构、冷却系统。

直流侧电容主要作用是给变流器提供一个稳定的直流电压支撑媒介;连接电感的作用一方面是将SVG耦合到电网保护电容器,防止谐波过大;另一方面与电容器形成LC滤波电路,抑制功率开关产生的高频谐波。连接电感的选择是否得当直接影响SVG的补偿性能,所以连接电感的选取也十分关键;电动操作机构的选取一般根据

SVG装置的容量来选择,它的作用主要是主电路的合闸、分闸、脱扣保护等功能;功率单元的通态损耗、开关损耗、截止损耗等所产生的温升需要由散热器来降低。散热器的作用是增加功率模块的传热和辐射面积、扩张热流以及缓冲传热过渡过程。冷却系统一般分为:自然空气冷却(自然对流)、强制空气冷却(风冷)以及仅含一种冷却介质的水冷系统。还有一些更为复杂的冷却方式,如热管或者蒸发冷却等。

由于水冷以及热管等散热方式的价格因数,选择风冷的性价比较高,所以选择风扇,通过风道带走散热器的热量,达到降温的目的。散热器的实物图如图3所示。



图3 风冷散热器

主程序控制系统

SVG的主控制程序由三部分组成:主函数、PWM中断、通信中断。其中主函数负责:

1) 硬件自检功能,测试控制板的电源以及端口是否正常。

2) 初始化,如:变量内存地址、各类寄存器、GPIO端口、标志位、中断入口等。

3) 检测电网电压、电流是否有异样,出现问题不起动SVG或断开SVG。

4) 计算系统电压、电流以及补偿电流的有效值,通过通信方式送到人机界面中去。

5) 判断标志位,如果标志位CNT_SVG=2,则说明检测没有问题。然后主程序继续运行主循环,等待PWM中断的发生。

PWM中断程序主要负责控制IGBT的开关,也就是PWM信号的产生,这是SVG程序中的核心算法,由于IGBT器件的开关频率是12.8 kHz,因此PWM的中断周期计算为

$$T_{\text{周}} = \frac{1}{12.8 \text{ kHz}} = 78.125 \mu\text{s} \quad (14)$$

PWM中断的流程为:

1) 对看门狗信号及故障信号检测,不合格则封锁PWM信号,保护SVG。

2) 读取FPGA芯片的采集数据,然后选择A相电压信号进行软件锁相环计算。

3) 根据标志位的数值,如CNT_SVG=0,SVG启动软启动,对直流侧电容预充电;CNT_SVG=1,电操开关合闸,SVG并网后软启动开关断开,预充电完成;若CNT_SVG=2,进入PWM信号产生程序,包括指令电流检测、PWM信号生成等。

4) 中断完成,返回主函数。

SVG主控制程序的流程图如图4所示。

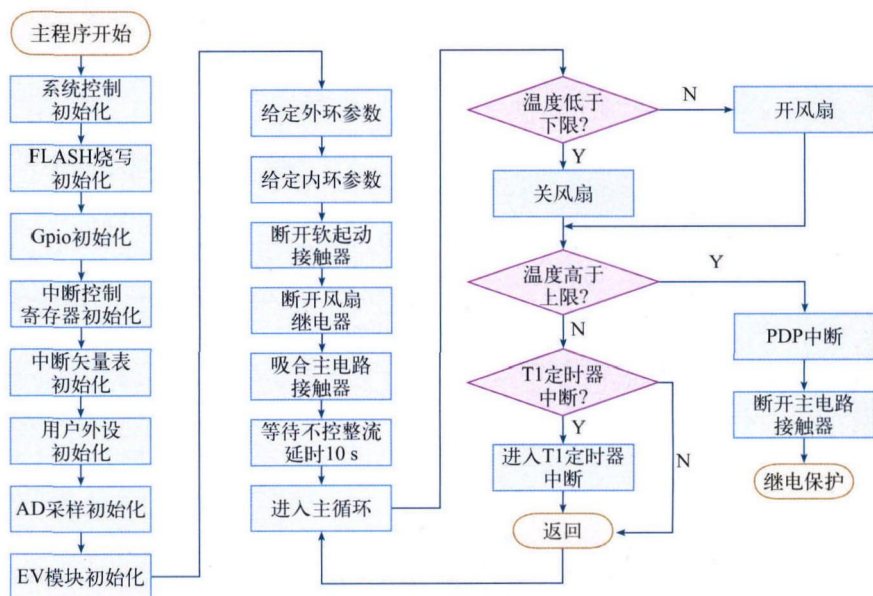
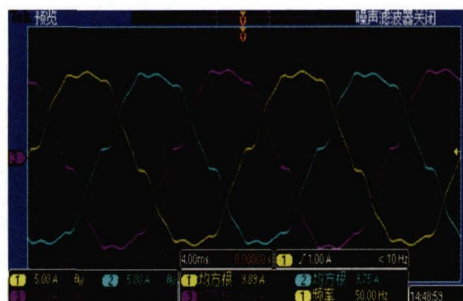


图4 主程序流程图

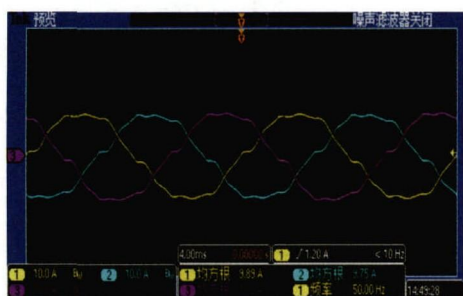
SVG的调试过程

1. 电流跟踪调试

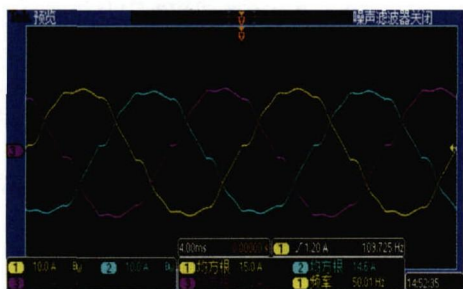
电流跟踪试验的目的是检测电流传感器是否正常, 电流跟踪指令是否一致。断路器和熔断器调到合闸状态, 确保主控制器和驱动转换板正常工作; 烧写电流跟踪程序 (输出电流给定在 10 A、15 A)。将直流侧电压加到 60 V 左右, 运行程序, 用示波器及电流探头在图 5 所示位置观察 A、B、C



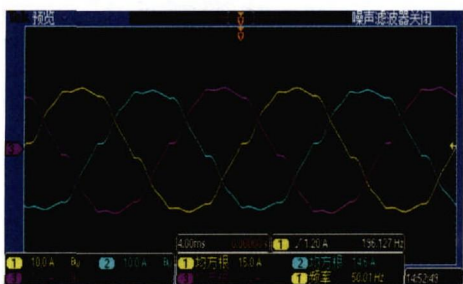
(a) 10 A的无功电流图a



(b) 10 A的无功电流图b



(c) 15 A的无功电流图a



(d) 15 A的无功电流图b

图5 电流跟踪试验结果图

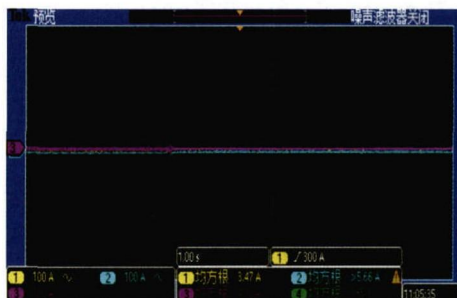
电流波形是否为正弦波且相位差 120° ；检测电流的幅值是否与程序里给定的值是否一致。

试验数据说明电流跟踪指令能够准确地跟踪到SVG发出电流,但是由于样机设计的是AC 380 V $\pm$ 120 kvar,SVG发出的小电流波形图含了畸变谐波,随着无功电流的增大,谐波将会越来越少。

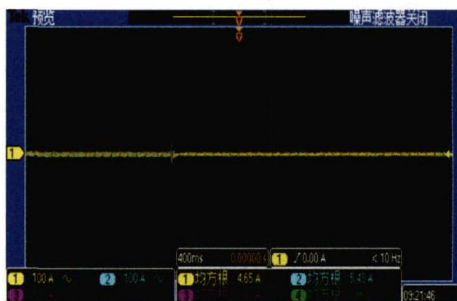
2. SVG启动实验

SVG启动时如果冲击电流过大将严重影响补偿装置元件的使用寿命并给电网带来谐波污染。其直流侧电压的稳定直接影响启动时冲击电流的大小,传统的PI调节控制法在一定时间能稳住直流电压,但不能在启动时控制直流电压的超调。文献提出了改进解耦控制方法,该方法具有电网电流波形质量高、功率脉动小、动态响应速度快等优点,但没考虑冲击电流问题。文献分析和比较了直流电压控制算法和无功电流反馈控制算法,但只分析了对补偿电流的影响。

为此,本文提出了综合启动策略。该策略分别在电压外环通过软启动方式、直流侧电压阶梯抬升和PI调节控制抑直流侧电压超调,电流内环运用改进解耦控制法分离内环电流的有功分量(d)和无功分量(q)。采用综合启动策略能够解决SVG起启时冲击电流过大问题。对综合启动策略进行试验分析,其试验结果波形图如图6所示。



(a) 未加启动策略SVG启动电流图



(b) 启动策略SVG启动电流图

(下转第72页)

操作走廊的设计宽度一般为1 000 mm。

预装式变电站的展望

1) 关于模块化定义问题。如上文中所说的那样,目前预装式变电站是以五个典型化功能模块为基础进行划分的,在以后的规划和设计中,可以依靠变电站建设规模来进行不同的设备选择,从而达到组合灵活的目的。具体做法是,可以把单台主变及其各侧设备模块拼接成一个小型变电站,并且通过10 kV电缆将各小型变电站之间联络起来,在土地资源日益紧张的形势下,能够很好地适应不同的站址环境。

2) 与数字化变电站的建设相结合。进一步提高预装配式变电站的模块化装配的条件逐渐在成熟, 是因为数字化变电站的逐渐普及为该想法的实现提供了保障。在不久的将来, 为了将施工效率提高到更大, 可以在各小型变电站之间采用将继电器室和配电装置二次接线做成航空插头的形式。

3) 拓展箱体的发展空间。现在我国的预装式变电站的箱体设计还是存在一些限制, 比如说设备的布置、防火、性能等方面。箱体的设计并

没有在空间发展上延伸，仅仅是基于上一层的设计，这样会造成变电站的土地的高效利用上存在很大的问题，所以在拓展箱体的发展空间上还有很多的工作可以做。

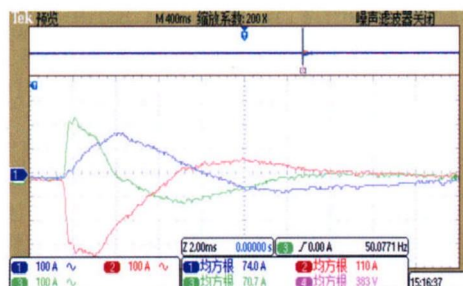
结束语

通过全文的分析可以知道,在我国预装式变电站发展速度很快,无论是从生产还是在应用上。因地制宜采用不同的类型和不同的布置方式,有的情况下只需要采用价廉的空气绝缘预装式变电站。有些要求较高的条件下,比如重污秽地区等场合,采用六氟化硫环网供电单元预装式变电站就有更大的优势。从长远的角度来看,采用六氟化硫环网供电单元预装式变电站是现在发展的方向。本文进一步分重点析了预装式变电站高压开关、低压开关和主变压器这三个重要的模块。预装式变电站的发展以后也可以从模块化定义、与数字化变电站的建设相结合和拓展箱体的发展空间这三个方面进行挖掘。

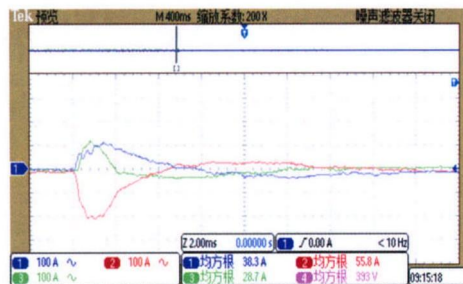
(收稿日期: 2016.07.04)

(编辑：白文亭)

(上接第67页)



(c) 未加启动策略SVG启动电流放大图



(d) 启动策略SVG启动电流放大图

图6c示出未加启动策略启动冲击电流波形,可见,冲击电流已经达到将近400 A,这对IGBT有冲击损伤;图6d示出加入启动策略后SVG启动时

冲击电流波形图,冲击电流只有200多A。因此,本文提出的综合启动策略对抑制SVG启动时冲击电流具有良好的实际运用价值。

结束语

本文通过对AC 380 V $\pm$ 120 kvarSVG装置的硬件平台的构建,详细介绍了SVG一次侧主接线电路参数的计算以及选取,还有二次侧主控制系统的硬件设计和软件设计。其中包括基于浮点型DSP (TMS320 F28335) 主控制程序,并通过大量试验与应用表明了SVG具有良好的动态补偿性能。

在SVG装置样机设计完成后,对装置样机进行了现场试验,并对试验结果进行分析。试验首先调试了SVG的性能,如电流跟踪、数据采集功能,试验结果表明各模块运行良好,证明了设计的电路以及软件是合理有效的。最后对SVG启动策略进行验证,发现提出的综合启动策略有效地降低了合闸时SVG的冲击电流,证实了该综合启动策略控制方法能够很好地解决SVG启动时冲击电流过大的问题。**EA**

(收稿日期: 2016.07.04)

(編輯：白文亭)