

提高 DSTATCOM 工作稳定性的研究

鄂 飞,程汉湘

(广东工业大学 自动化学院,广东 广州 510090)

摘要:分析了影响配电用静止无功补偿器(DSTATCOM)工作稳定性的若干干扰因素。提出了硬件和软件 2 方面的抗干扰措施。硬件措施包含匹配缓冲电路参数、合理处理地线、对重要信号进行隔离等。软件措施包括数字滤波、设置看门狗定时时钟及程序陷阱等。给出了样机采用抗干扰技术前后的大量实验波形,并分析了各种抗干扰技术的作用和效果。实验证明,所采用的抗干扰技术增强了 DSTATCOM 的抗干扰能力,提高了其工作稳定性。

关键词:DSTATCOM; 抗干扰; 工作稳定性

中图分类号:TN 973.3; TM 714.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-6047(2006)01-0041-04

0 引言

配电用静止无功补偿器 DSTATCOM (Distribution STATic var COMpensator)是柔性交流输电系统“用户电力”的重要组成部分。它对系统振荡具有一定的阻尼作用,能支撑接入点的电压及补偿负载所需的无功功率,还能消除负载所产生的谐波^[1]。此外,DSTATCOM 还可以补偿炼钢厂碾碎机的电压闪烁及风力发电中存在的电压扰动等^[2]。因此,DSTATCOM 在配电网中发挥越来越重要的作用,其能否稳定可靠地运行,直接影响着配电网的电能质量。

配电网中的各种非线性负载的存在,给 DSTATCOM 的稳定运行带来了挑战。一方面 DSTATCOM 工作环境恶劣,电力系统中的各种强电设备产生的强磁场,大容量感性负载突变,或电器开关合闸产生的火花,都是一种很强的电磁干扰,通过空间辐射或线路串绕的形式影响着 DSTATCOM 控制电路的稳定运行。另一方面,DSTATCOM 装置中使用的大功率半导体开关元件的高频动作和合闸开关的动作,也直接对控制电路产生很强的电磁干扰。当控制板的抗干扰措施不当时,随时会受到上述 2 种干扰的影响而不能稳定工作,从而影响配电网的安全运行,甚至造成电力事故。因此,提高装置的可靠性和抗干扰能力显得尤为重要。

有不少论文探讨了微机控制电路抗干扰问题^[3-5],但多是针对单片机电路在工业控制中的应用。也有文章提及了电力系统中监控程序软件抗干扰问题,但没有涉及 DSTATCOM 这种强电磁设备的抗干扰问题。尤其是 DSP 在电力电子技术领域应用的抗干扰问题,相关的文章很少。本文在开发 DSTATCOM 装置中,结合研制过程的经验,总结了关于 DSP 电路在电力电子产品应用中的抗干扰问题。

1 干扰源及干扰传输途径

按照噪声产生的原因分类,干扰一般包括放电噪声、高频振荡噪声和浪涌噪声。放电噪声主要是由雷电、静电、电动机的电刷跳动、大功率开关触电断开等放电而产生;高频振荡主要是中频电弧炉、感应电炉、开关电源、直流-交流变换器等设备产生高频振荡时形成的噪声;浪涌主要是交流系统中电动机启动电流、电炉合闸电流、开关调节器的导通电流以及功率变流器等设备产生涌流而引起的噪声。这些干扰对微机测控系统都有严重影响,轻则导致设备运行异常,重则造成重大电力事故,必须认真对待。而其中尤以各类开关分断电感性负载所产生的干扰难以抑制或消除。

噪声主要通过 3 种途径传输:导线、空间和大地。导线主要通过电源线、信号线或控制线路侵入;空间传递主要以电磁辐射或感应的方式传递;大地上的干扰主要通过地线耦合或地电流的形式产生。

DSTATCOM 主要就近安装在供电变压器或轧钢厂等消耗大量无功功率的用户入口处,以起到提高供电线路功率因数、稳定系统电压的作用。

DSTATCOM 工作环境往往相当恶劣,受到变压器浪涌电流噪声以及大功率感性负载突加、突减造成的放电噪声影响。而 DSTATCOM 装置本身也是通过功率开关管的通断控制起到调节控制作用的。大功率开关管通断过程本身就是一个很强的电磁干扰源。这些强干扰源给 DSTATCOM 的控制电路造成很大的影响,不采取相应的措施,很难保证装置正常或稳定工作。尤其是有些干扰不可避免或很难抑制,必须采取一定的措施加以防范或进行必要的事故处理。

2 解决方法

针对工业现场的运行环境,有很多传统的抗干

扰措施。有大量的文献总结了保障微机稳定运行的一些抗干扰措施^[4,6-7]。如硬件上的滤波、去耦、屏蔽、隔离及接地等技术;软件上的数字滤波、信息传递过程的自动检验、系统运行状态监视与发生故障时的自动恢复等技术。这些文献都以单片微机的应用为基础进行总结,而基于 DSP 技术的电力电子装置的相关抗干扰应用报道却很少。但电力电子装置

的强干扰性使得抗干扰措施更难应付。下面以基于 DSP 控制的 DSTATCOM 的研制为例,详细阐述在研制过程中所采用的各种抗干扰措施。

2.1 硬件方法

DSTATCOM 装置的原理如图 1 所示,主电路由智能功率模块(IPM)和连接电感组成,控制电路为 ADMC401 和 80C196KC 组成的双 CPU 系统。

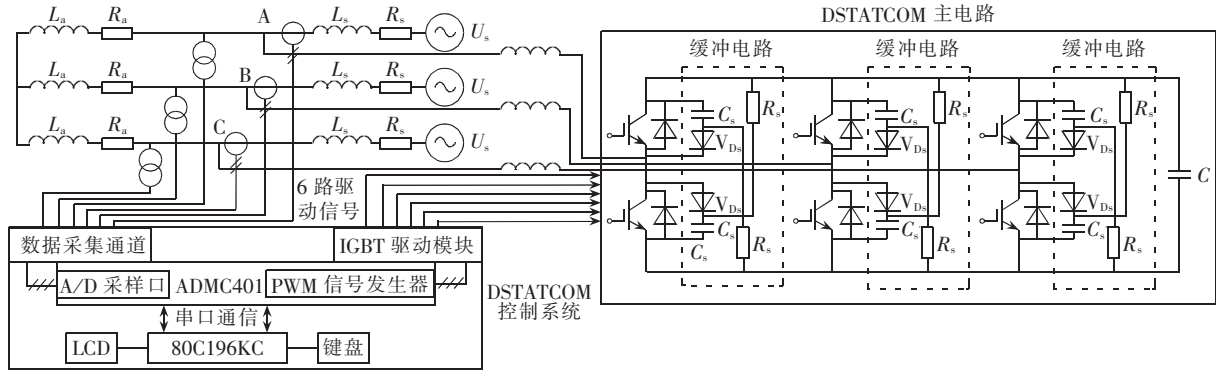


图 1 DSTATCOM 装置原理框图

Fig.1 Principle diagram of DSTATCOM

2.1.1 主电路处理

DSTATCOM 的主电路是采用集成 6 只 IGBT 模块组成的逆变电路。因为 IGBT 的交换速度很快(16 kHz),IGBT 关断时,或高速二极管(FWD)反向恢复时会产生很高的 di/dt ,由模块周边的配线电感引发 $L(di/dt)$ 电压(称为关断浪涌电压)。这种浪涌电压不光会危及模块的安全,还会产生高频噪声影响控制电路的正常工作,因此必须加以抑制。通常根据电路的应用领域的特点,采用合适的吸收电路。吸收电路分为个别吸收电路和集中缓冲电路 2 类。对于高频电路多采用放电阻止型 RCD 缓冲电路或集中补偿 RCD 缓冲电路。这种电路对于关断浪涌电压有很好的抑制效果。反向二极管的选择相当重要,当选择错误时,会发生高的尖峰电压,或者出现反向恢复时电压振荡。另外,为了抑制器件开通时的电流过冲,还必须采用开通缓冲电路。一般根据能量消耗的形式可以分为耗能式和馈能式缓冲电路。

2.1.2 采样端口设计

电力系统线路中,由于负载的千变万化,使得线路中含有大量的谐波或高频噪声。因此,对系统电压和电流进行采样时,必须设计相应的滤波电路,得到计算需要的基波分量。另外,由于 DSTATCOM 为了与系统电压同步,采用了锁相环电路,外部电压的过零触发脉冲用作输出交流电的参考。该信号的稳定度直接影响到装置的控制精度和运行稳定性,因此必须保证不能丢失或者出现错误。为此采用了隔离变压器,首先将系统电压进行降幅,然后通过传感器得到交流小信号,再通过滤波环节将检测回来的信号送入到 DSP 的采样入口。这样既保证了信号的真实性,又避免了强电信号对弱电电路的干扰。

2.1.3 地线连接方法

在电子装置中,地的处理非常重要。当不同的

地处理不当时,可能导致产生一些意外故障,而且故障分析相当困难,严重时会出现过大的地电流导致系统控制失常的现象。在系统设计中,必须将控制板的数字地和模拟地通过单点相连,而数字地和模拟地分别布置紧凑。另外,如果控制电路和主逆变电路需要共地时,也必须通过单点相连。这样可以大大减小强、弱电之间由于地电流的冲击而造成的相互影响。此外,在调试过程中,还必须注意 PC 机与用户板之间串口线所引入的干扰。实验发现,当主电路在较高电压下工作时,该串口线很容易将交流系统的电磁干扰信号引入控制板中,从而导致用户板程序跑飞。另外,DSP 的时钟电路设计也非常关键。图 2 给出了 DSP 时钟电路的 2 种合理布线方式。为了防止时钟信号中的高次谐波引起大电流,通常在回线上串接 1 个阻值为 $500\sim 1\,000\,\Omega$ 的电阻,如图 2 中 R_{s1} 所示。为防止产生高频噪声,应尽可能缩小时钟信号的包围区域,避免时钟信号双面走线。

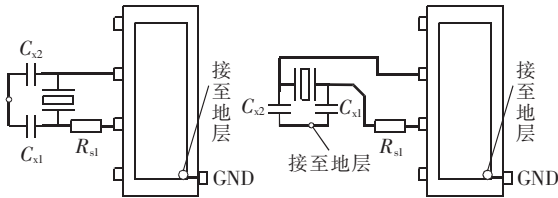


图 2 DSP 时钟信号的合理布局图

Fig.2 Correct distribution of DSP timing signals

2.2 软件方法

为了加强设备的抗干扰能力,仅通过硬件措施还不够,必须辅以一定的软件方法。通常使用的软件抗干扰措施有数字滤波、指令冗余、程序陷阱等。

基于 DSP 控制的 DSTATCOM 装置可以充分利用 DSP 的高速数字信号处理的能力实现有限冲击

响应(FIR)或无限冲击响应(IIR)滤波,从而减小线路干扰信号对程序计算的误差影响。DSP 只需很小的指令开支完成数字滤波任务,既高效又方便。此外,为了避免程序运行过程中受到较强干扰而导致程序跑飞,必须在程序中使用软件看门狗,即在程序开始运行时,打开定时器;在程序运行期间,定期向 DSP 的定时寄存器写入数值,一旦程序跑飞进入死循环或陷阱,定时器时间到便进入定时陷阱,复位系统,避免故障扩大。

3 试验效果

在 DSTATCOM 样机的研制过程中,大量实验表明上述抗干扰措施实用有效。下面针对各种试验做对比分析。

3.1 不同吸收电路时的 CE 间电压波形对比

主电路其他实验条件不变(直流侧电压 110 V),仅改变吸收电路的参数,可得到不同效果的 IGBT 开通、关断时 CE 间电压波形,分别如图 3(a)(b)所示。

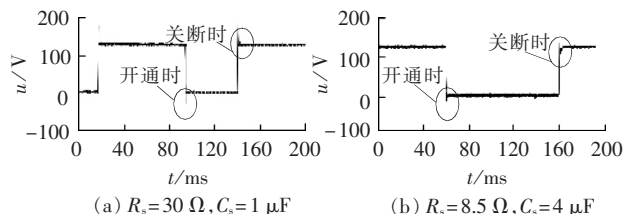


图 3 不同吸收电路下 IGBT 的 CE 间电压波形

Fig.3 C-E voltage waveforms of IGBT in different snubber circuits

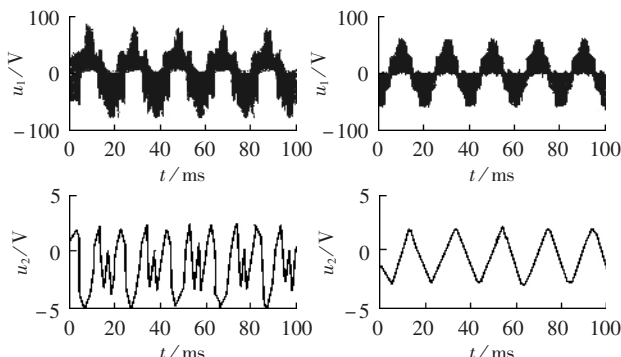
对比(a)(b)2图,可以看出,在开通和关断时,图(a)CE间的电压出现较大的过冲和较长时间的振荡,而图(b)则有很明显的改善。大量实验发现,缓冲电路的吸收效果除了跟结构有关,跟参数也有很密切的关系。为了使放电阻止型 RCD 缓冲电路有效工作要注意以下事项:

- IGBT 关断时必须控制在安全操作区域内^[8];
- 在进行装配时,要尽量降低主电路和缓冲电路的分布电感,接线越短越粗越好;
- 缓冲电容 C_s 应采用低感高频性能良好的电容(如薄膜电容器等),它的引线应尽量短,最好直接接在 IGBT 的端子上;
- 缓冲二极管 V_{Ds} 应选用快开通和快恢复二极管,以免产生开通过电压和反向恢复引起较大的振荡过电压;
- 缓冲电阻 R_s 的选择应能满足 IGBT 在下一次动作前将存储在缓冲电容 C_s 中的电荷放完。

3.2 过零同步信号对比

在实验过程中,为了获取输出电压的参考相位,必须通过系统电压过零点得到每个周期的同步脉冲。由于此过零同步脉冲信号直接输送到 DSP 的中断输入口作为中断源,当直流侧上升到一定高度时,逆变器高频工作所产生的干扰会窜入到该脉冲信号中,从而引起误触发。图 4(a)所示即为过零同步脉

冲受干扰时逆变器输出的电压波形。当将该信号经过一次低速光电隔离后,可以避免干扰所带来的误触发,且效果明显,实验波形如图 4(b)所示。图 4 中,上方的波形(u_1)为逆变器输出电压波形,下方的波形(u_2)是对应产生该波形所需 PWM 波经滤波和相位补偿后的波形。



(a) 外同步脉冲受干扰时 (b) 外同步脉冲经光隔处理后

图 4 外同步脉冲信号抗干扰措施前后效果比较

Fig.4 Voltage waveforms under external synchronous timing signals with or without anti-interference measures

显然,图 4(a)中的 PWM 等效波形不是规则的正弦波,说明在 1 个周期中出现了多次过零中断,从而使得计算产生 PWM 波出现错误,对应的等效波形也就出现畸变。图 4(b)中 PWM 波的等效波形是规则的正弦波,所以逆变器的输出电压不会畸变。

3.3 不同调试方式下逆变器启动过程对比

如 2.1.3 所述,当 DSP 控制板通过 PC 机的串口下载程序调试时,若处理不当,启动逆变器瞬间会导致严重的事故。图 5 中, U 为系统某相电压, I 为对应该相的系统电流。图 5(a)是在程序下载至 DSP 控制板后串口线仍然相连的情况下开启逆变器的电压、电流波形。由图可知,启动后系统电流出现了较大的过冲电流从而导致功率模块报警。在研制 DSTATCOM 的过程中,多次因此原因而损坏功率模块。经大量实验和分析发现,该现象是由于 PC 机与控制板之间的串口线耦合了高频电磁干扰信号,从而导致错误的监控对话,最终使得控制板中的程序跑飞而造成的。当下载完控制程序后,拔掉该串口线,启动逆变器,系统电流过渡平稳,不再出现很大的过冲电流,实验波形如图 5(b)所示。此外,还应在程序中启动片内看门狗,这样可以保证即使程序跑飞也可及时闭锁 PWM 信号,从而避免损坏功率模块。

3.4 滤波前后电路波形对比

软件滤波也是抗干扰措施的重要环节之一。对于 DSP 控制芯片而言,实现软件滤波既简单又高效。DSP 包含有乘累加的高效指令,只需用几行简单的语句便可实现滤波器的设计。图 6 给出了某一交流采样信号滤波前后波形图。图 6(a)为基波信号中叠加了较高频率的谐波时的波形图,从图中可以看出,该正弦波含有较多的毛刺,若直接采样计算,会给计

算带来较大的误差。将该信号采样,然后通过一阶低通 IIR 滤波后,再从 D/A 转换电路输出,得到如图 6 (b)所示波形。对该波形进行傅里叶变换分析可知,该信号只剩下基波,其他次谐波含量几乎为零,这说明软件滤波达到了极佳的效果。

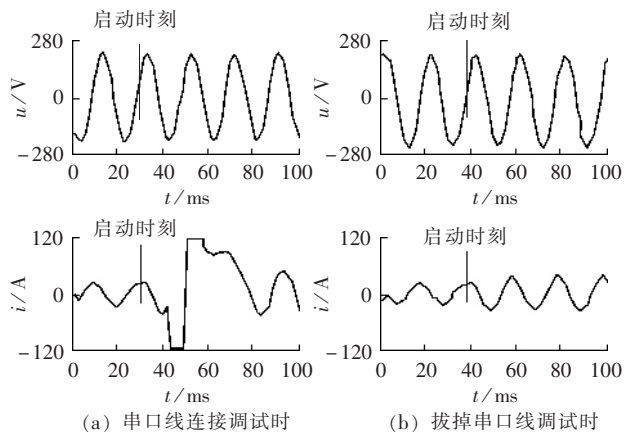


图5 不同调试方式下逆变器启动过程对比

Fig.5 Comparison of converter's starting under different commissioning modes

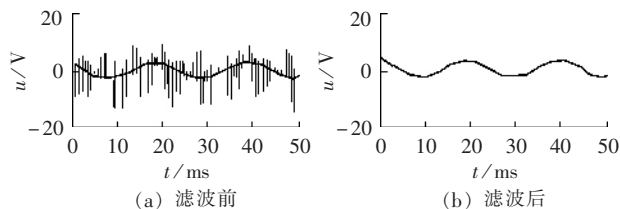


图6 采样信号滤波前后波形对比

Fig.6 Sampling signals before and after filtering

4 结语

本文在研制 DSTATCOM 的基础上,分析了 DSP 控制电路受干扰的主要原因,并提出了一些抗干扰措施。通过实际样机调试和试验,验证了各项抗干扰措施的有效性。这些试验结论对于提高 DSTATCOM 的工作稳定性具有很重要的指导意义,对于其他同类强电设备控制电路的设计也具有借鉴意义。

参考文献:

[1] WOO Sung-min, KANG Dae-wook, LEE Woo-chol. The dis-

tribution STATCOM for reducing the effect of voltage sag and swell [C]// **Proceedings of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Colorado, US; IEEE Industrial Electronics Society MIT, 2001: 1132-1137.

[2] ZHANG Z, FAHMI N R, NORRIS W T. Flicker analysis and methods for electric arc furnace flicker (EAF) mitigation (a survey) [C/D]// **Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Conference**. Porto, Portugal: 2001 IEEE Porto Power Tech, 2001.

[3] 吴维宁, 张文亮. 提高电力监控系统软件可靠性措施的研究 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(3): 53-54.

WU Wei-ning, ZHANG Wen-liang. Measures to enhance electric monitoring software reliability [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2003, 23(3): 53-54.

[4] 钟和清, 邹云屏, 徐至新, 等. DSP 数字控制系统的电磁兼容设计 [J]. 通信电源技术, 2004, 21(4): 13-15.

ZHONG He-qing, ZOU Yun-ping, XU Zhi-xin, et al. EMC design of digital control system based on DSP [J]. **Telecom Power Technologies**, 2004, 21(4): 13-15.

[5] 吴钟飞. 变电站监控系统程序失控防护措施 [J]. 广东电力, 2000, 13(2): 61-62.

WU Zhong-fei. Precautions against program out-of-control substation monitoring system [J]. **Guangdong Electric Power**, 2000, 13(2): 61-62.

[6] 鄂飞, 程汉湘, 吴春芳, 等. 抗干扰技术在高精度测温仪中的应用 [J]. 自动化仪表, 2004, 25(11): 65-68.

E Fei, CHENG Han-xiang, WU Chun-fang, et al. Application of anti-interference techniques in high precise temperature measuring instrument [J]. **Process Automation Instrumentation**, 2004, 25(11): 65-68.

[7] 王幸之, 王雷, 翟成, 等. 单片机应用系统抗干扰技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.

[8] Fuji Electric. IGBT user's manual [EB/OL]. [2005-06-13]. <http://www2.scut.edu.cn/scutco/maindoc/techtrade/fuji/techsupport.htm>.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

鄂飞 (1978-), 男, 湖北罗田人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统自动化中的应用 (E-mail: efei_ma@tom.com);

程汉湘 (1957-), 男, 湖北武汉人, 教授, 主要从事电力电子技术在电力系统自动化应用方面的教学和研究工作。

Research on improvement of DSTATCOM stability

E Fei, CHENG Han-xiang

(Faculty of Automation, Guangdong Univ. of Technology, Guangzhou 510090)

Abstract: Some interference factors affecting the stability of DSTATCOM (Distribution STATic var COMPensator) are analyzed. The corresponding anti-interference techniques are provided in both hardware and software. The hardware anti-interference techniques include the matching of snubber circuit parameters, correct earthing and insulation of some important signals. The software techniques include digital filtering, watchdog timer and program trap setting. By comparing the waveforms with or without anti-interference measures, the effect of each anti-interference technique is analyzed. The experimental result shows that, the methods applied enhance the anti-interference ability of DSTATCOM and improves its working stability.

Key words: DSTATCOM; anti-interference; working stability