

基于瞬时无功理论的先进静止无功发生器的研究

李付亮¹, 周有庆², 吴涛², 王晓芳³

(1. 湖南水利水电职业技术学院, 湖南 长沙 410131; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;
3. 邵阳学院电气工程系, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 提出了一种基于瞬时无功功率理论的先进静止无功发生器 (ASVG) 的控制方案。首先详细地对瞬时无功功率理论检测控制信号进行了分析, 在此基础上, 介绍了无功电流闭环间接控制方案, 应用基于瞬时无功功率理论的无功电流检测法实时检测无功电流, 提高了系统响应速度。然后简单介绍了 ASVG 的电路结构; 控制器选用 TMS320LF2407 来实现数据采样、计算和实时控制, 满足 ASVG 实时快速控制的要求, 提高了 PWM 脉冲精度。最后通过 Matlab 对控制方案做了系统仿真。通过理论论证和仿真分析表明本设计方案是可行的。

关键词: 瞬时无功理论; 电流间接控制; 先进静止无功发生器

Design of advanced static var generator based on the instantaneous reactive-power theory

LI Fu-liang^{1, 2}, ZHOU You-qing², WU Tao², WANG Xiao-fang³

(1. Hunan Technical College of Water Resources and Hydropower, Changsha 410131, China;
2. Department of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Department of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China)

Abstract: A control scheme of the advanced static var generator (ASVG) is determined. First, the instantaneous reactive-power theory is analyzed, Then, the closed-loop indirect current control strategy is introduced. Based on the instantaneous reactive-power theory, the reactive current is detected in time, and this method increases the speed of systematic response. On configuration of system, the converter's power module based on IGBT is adopted in main circuit; and a TMS320LF2407 is adopted as the main controller to deal with sampling, calculating and controlling on-line, its performance satisfies the request of the speedy on-line control and heightens the precision of PWM-pulse. Finally, a simulation is done through the software of MATLAB. The ASVG is tested as the most promising technique for the current control.

Key words: instantaneous reactive-power theory; indirect current control strategy; advanced static var generator

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0075-04

0 引言

电力电子技术的发展及其在电力系统中的应用, 将使用晶闸管的静止无功补偿装置推上了电力系统无功功率控制的舞台。由于使用晶闸管的静止无功补偿装置具有优良的性能, 所以, 近 10 多年来, 在世界范围内其市场一直在迅速而稳定地增长, 已占据了静止无功补偿装置的主导地位。因此静止无功补偿装置 (SVC) 这个词往往是专指使用晶闸管的静止无功补偿装置, 包括晶闸管控制电抗器 (TCR) 和晶闸管投切电容器 (TSC) 以及这两者的混合装置 (TCR+TSC) 等。其快速的响应, 适中的价格, 使其在电力系统中得以迅速的推广。不足

之处在于谐波成分大, 需要大电感、大电容等元件, 而且只有在感性工况下才连续可调。

随着时代的发展, 电力系统对无功补偿、电压稳定提出了更高的要求, 20 世纪 80 年代以来, 一种更为先进的静止型无功补偿装置出现了, 这就是采用自换相变流电路的静止无功补偿装置, 称之为先进静止无功发生器 (ASVG)。它在提高电力系统的暂态稳定性、阻尼振荡方面大大优于静止无功补偿器^[1-2]。

本文首先详细地分析了无功电流的检测在 ASVG 中的应用, 然后介绍了 ASVG 的电流间接控制方案, 并给出了 ASVG 主电路和控制系统的硬件设计方案, 最后用 Matlab 对 ASVG 进行了系统仿

真分析。

1 瞬时无功功率理论

ASVG 起到良好补偿效果的首要条件是根据其具体功能的需要, 准确、实时地检测计算出相关的控制信号, 并由此得到无功指令信号产生相应的脉冲信号去控制主电路的开关器件^[3]。

因此, 以下着重分析基于瞬时无功功率理论的控制信号检测。

假设三相电网电压对称无畸变, 三相电压的瞬时值分别为 e_a 、 e_b 、 e_c , 三相电流的瞬时值分别为 i_a 、 i_b 、 i_c , 由瞬时无功功率理论可知, 瞬时无功电流 i_q 和有功率电流 i_p 为:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = CC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ -\cos \omega t & -\cos(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$,

$C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$, ω 为电网基波电压的角频率。

仔细考察式(1), 可以发现, 如果 i_a 、 i_b 、 i_c 与 e_a 、 e_b 、 e_c 有相同相位角, 则 i_q 将为零, 而 i_p 将准确地反映三相线电流的有效值。再进一步推广, 如果 e_a 、 e_b 、 e_c 代换式(1)中的 i_a 、 i_b 、 i_c , 则计算结果中的 i_p 必将反映三相线电压的有效值 E_{line} , 可以得到:

$$E_{line} = \sqrt{\frac{2}{3}} [e_a \sin \omega t + e_b \sin(\omega t - 2\pi/3) + e_c \sin(\omega t + 2\pi/3)] \quad (2)$$

如果 e_a 、 e_b 、 e_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 为正弦波, 所得到的 i_p 、 E_{line} 为不含任何谐波的直流信号, 也就是说, 在这种情况下, 不需要滤波, 使得输出信号没有任何时延而能立即跟随输入交流信号的变化, 如果输入交流信号中含有谐波成分, 则计算所得的 i_p 、 E_{line} 也将含有谐波成分, 滤掉这些谐波即得到基波的无功电流 i_q 和线电压有效值 E_{line} 信号。因此, 不论交流输入信号中是否含有谐波成分, 用此法计算

所得的 i_p 、 E_{line} 信号的直流分量都将准确地反映 ASVG 控制所需的相应交流信号的基波有效值^[4]。

2 先进静止无功发生器的控制方案

ASVG 的基本原理就是将自换相桥式电路通过电抗器或者直接并联在电网上, 适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值, 或者直接控制其交流侧电流, 就可以使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流, 实现动态无功补偿的目的。具体控制方法一般可分为电流直接控制和间接控制两大类^[4]。

电流的直接控制采用跟踪型 PWM 控制技术对 ASVG 输出的电流波形的瞬时值进行反馈控制。ASVG 采用电流直接控制方法后, 其响应速度和控制精度比间接控制法有很大的提高。但要求主电路电力半导体器件有很高的开关频率, 这对于较大容量的 ASVG 目前是难以做到的。所以, 本文采用电流间接控制方法。

所谓间接控制, 是将 ASVG 当作交流电压源来看待, 通过对 ASVG 所产生交流电压基波的相位和幅值的控制, 来间接控制 ASVG 的交流侧电流。为使系统提高响应速度, 采用基于瞬时无功功率理论的无功电流检测法实时检测无功电流。如图 1 所示, 给出了电流间接控制的一种闭环控制方法。

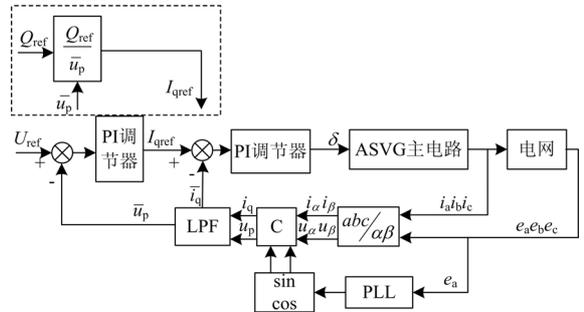


图 1 一种电流闭环控制方法

Fig.1 A closed-loop current control method

该法以三相系统电压和 ASVG 输出电流作为反馈量, 形成双闭环反馈控制系统。其控制过程为: 由外环电压反馈输出无功电流的参考值 I_{qref} , 其外环的电压反馈控制也可以无功参考值 Q_{ref} 与线电压有效值经运算得到无功电流的参考值 I_{qref} (如图 1 虚框中所示), 内环电流反馈从 ASVG 输出电流中检测出无功电流, 与参考值 I_{qref} 比较, 输出为 ASVG 输出电压基波分量与系统电压的相角差 δ , 控制 δ 就可以控制 ASVG 吸收的无功电流。

电压反馈作为控制外环, 能起到稳定电压的作

用。当电压较小的波动时, 如系统无功不足, 导致电压稍微降低, 参考无功电流将增大, 使 ASVG 向系统吸收的无功电流减少, 从而补偿无功, 升高电压; 而当电压增加时, ASVG 从系统吸收无功电流增加, 减小系统无功, 维持无功平衡, 稳定电压。ASVG 吸收的无功电流反馈作为控制内环, 提高了对无功电流的控制精度和响应速度, 采用有积分作用的调节器, 则电流偏差就可以忽略, 甚至基本为零。

3 先进静止无功发生器硬件设计

为了实现上述控制方案, 采用了具有快速运算能力和强大片内外设功能的 DSP 作为主处理器。整个控制系统硬件结构如图 2 所示。

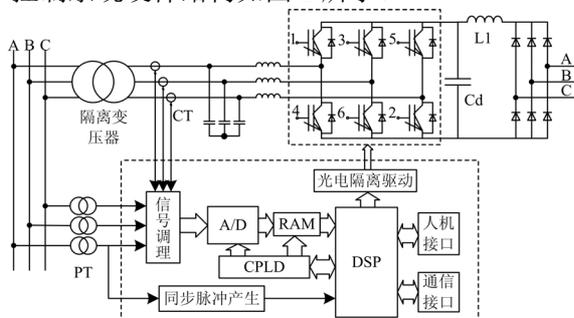


图 2 ASVG 装置电路结构图

Fig.2 Circuit diagram of the ASVG

3.1 ASVG 装置主电路结构

如图 2 所示, 作为逆变器直流电容器直流电压的来源, 一组三相交流整流桥经过一个平波电抗器之后, 给直流电容器充电。逆变器由一组三相桥两电平结构构成, 采用 PWM 调制技术对逆变电路进行控制。逆变器输出的正弦电压经过一组低通滤波器 (主要是滤去 PWM 波中的高次谐波) 和一个三相隔离变压器叠加到电网上^[5]。

逆变器开关管选用 IGBT, 其优点是: 开关速度较快、驱动功率小而饱和压降低。IGBT 的电压、电流等级已接近电力晶体管的水平, 也已实现了模块化, 并且已占领了电力晶体管的很大一部分市场, 在许多领域已经取代了 GTO, 成为功率器件的新选择。ASVG 装置中逆变器可采用日本三菱公司的基于 IGBT 的智能功率模块 (IPM)。如 PM600HSA120 模块, 其工作频率可以达到 20 kHz, 规格是 1 200 V, 600 A, 而且模块内部集成有过流、过压、过热等保护电路。

3.2 DSP 处理器

控制系统采用 TMS320LF2407, 该 DSP 采用高性能静态 CMOS 技术, 供电电压降为 3.3 V, 减小

了控制器的功耗; 30 MIPS 的执行速度使得指令周期缩短到 33 ns, 从而提高了控制器的实时控制能力。

DSP 处理器主要完成以下功能:

(1) 产生触发脉冲

产生一定规律的触发脉冲, 经门极驱动电路放大后去控制 IGBT 的导通和关断, 使 ASVG 能产生正确的 PWM 波。

(2) 同步脉冲发出功能

根据从电网取回的同步电压信号, 产生出与电网电压同步的脉冲信号, 使 ASVG 产生的 PWM 波与电网电压保持同步, 从而使 ASVG 能正确地并网运行。

(3) 控制 ASVG 行为

包括控制 ASVG 的 PWM 波与电网电压的相角 δ , 从而能准确地控制 ASVG 的无功功率输出。

(4) 高层保护功能

由于一般情况下 ASVG 控制器可以完全控制 ASVG 的电流, 因此必须要有保护功能。ASVG 控制器的保护功能是一种高层次的保护, 当 ASVG 运行在过载或其他不正常状态下, 而电流又没有超过保护动作的整定值, 控制器应通过保护功能使 ASVG 回到正常工作状态, 避免 ASVG 低层保护动作, 从而使 ASVG 能连续地正常工作。

(5) 控制器自我容错功能

一旦控制器自身有些元件出现错误, 控制器应能立即发现并报警, 同时不能使装置退出运行, 故障修复后, 可很容易地恢复。

4 仿真分析

仿真系统接线如图 3 所示, 对 ASVG 进行了简化, 隔离变压器用连接电抗器代替。系统仿真参数如下: 电源线电压有效值为 380 V, ASVG 连接电感设为 0.2 mH, 装置等效电阻为 1.5 Ω , 滤波电抗值为 2 mH, 滤波电容值为 20 μ F, 载波频率为 6 400 Hz。

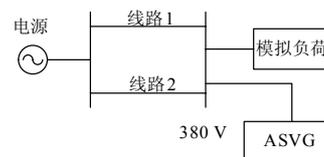


图 3 仿真系统接线图

Fig.3 Connection diagram of simulation system

当负荷为感性负载时, 给定负荷感性无功为 15 kVar, 有功为 50 kW。系统电流滞后于系统电压, 如图 4 所示。投入 ASVG 装置后, 使其吸收系统容

性无功功率（即发出感性无功），则系统电流滞后系统电压的相角将减小，当设定装置吸收 15 kVar 容性无功时，实现完全补偿负荷的无功功率，如图 5 所示，经过约 0.02 s 实现系统电压和电流同相位。可见装置的响应速度是比较快的。

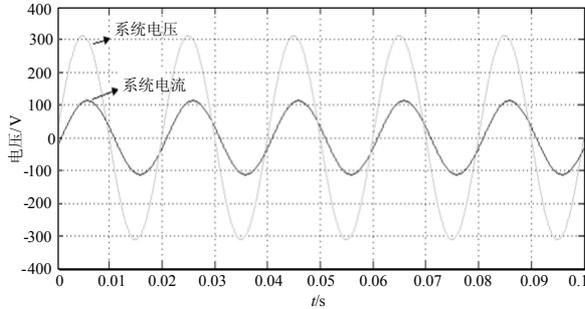


图 4 未补偿感性无功的系统电压与电流

Fig.4 System voltage and current when no compensation for inductance reactive power

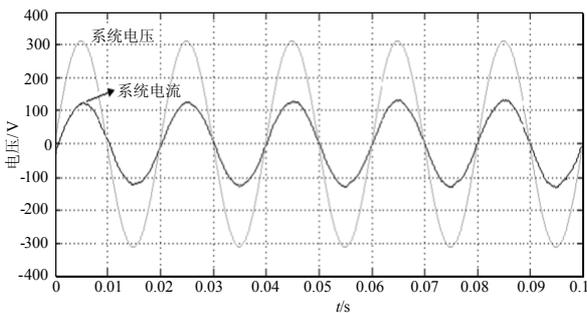


图 5 补偿感性无功后的系统电压与电流

Fig.5 System voltage and current when having compensation for inductance reactive power

当负荷为容性负载时，也给定容性无功为 15 kVar，有功功率为 50 kW，系统电流超前于系统电压，如图 6 所示，投入 ASVG 装置后，吸收系统感性无功功率（即发出容性无功），则系统电流超前系统电压的相角将减小，当设定装置吸收 15 kVar 感性无功时，完全补偿负荷的无功，实现系统电压和电流同相位，如图 7。

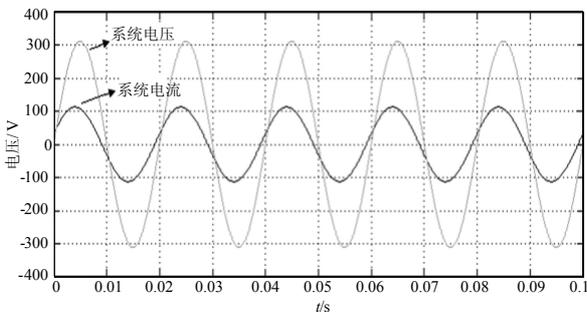


图 6 未补偿容性无功的系统电压与电流

Fig.6 System voltage and current when no compensation for capacitive reactive power

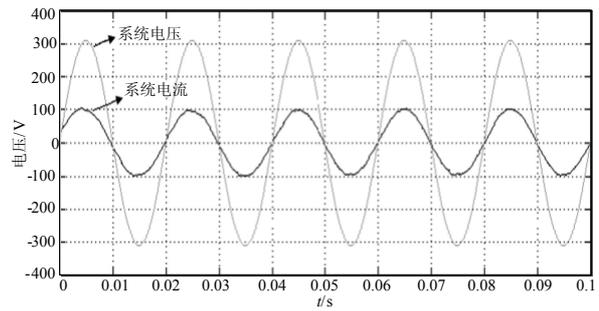


图 7 补偿容性无功后的系统电压与电流

Fig.7 System voltage and current when having compensation for capacitive reactive power

上述结果可证明该控制器能够实现从感性无功到容性无功的连续补偿，补偿范围大，且满足实时性要求，响应时间在一个基波周期内。该控制方案是可行的。

5 结语

ASVG 具有容量大，响应快，输出电压谐波含量小，控制手段先进等优点，成为无功静止补偿装置的首选。采用基于瞬时无功功率理论的无功功率检测法能实时检测控制信号，提高了装置对系统波动的响应速度，实现实时控制；IGBT 具有响应快、损耗小、开关频率高的特性，使 ASVG 容量比传统静止补偿器大；处理器采用 TMS320F2407 控制芯片，运算速度快，实时性高。

另外，ASVG 对电力网络的稳定性影响的分析，比如改变无功潮流的分布，减小电压的偏差，安装地点的选择等问题，值得进一步的研究。

参考文献

[1] 唐杰, 罗安, 周柯. 静止同步补偿器电压控制器的设计与实现[J]. 电工技术学报, 2006, 21 (8): 103-106. TANG Jie, LUO An, ZHOU Ke. Design and Realization Voltage Control for Static Synchronous Compensator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21 (8): 103-106.

[2] Singh B N, Chandra A, Al-Haddad K. DSP-based indirect-current-controlled STATCOM[J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2000, 147 (2): 107-112.

[3] 李国正, 王华昕, 罗安, 等. 基于 IGBT 并采用自校正算法的 ASVG 装置的研制[J]. 中南工业大学学报, 2002, 33 (5): 538-542. LI Guo-zheng, WANG Hua-xin, LUO An, et al. Study on the Equipment of ASVG based on IGBT and Adopting Self-regulating PID Arithmetic[J]. J Cent South Univ Technol, 2002, 33 (5): 538-542.

(下转第 124 页 continued on page 124)

参考文献

[1] BP-2A 微机母线保护装置技术说明书[Z]. 深圳:深圳南京自动化研究院, 1997.
Technique Instruction Manual of BP-2A Serial Busbar Protective Devices[Z]. Shenzhen: Shenzhen Nanjing Automation Research Institute, 1997.

[2] PSL 603 (G) 数字式线路保护装置技术说明书[Z]. 国电南京自动化股份有限公司, 2004.
Technique Instruction Manual of PSL 603 (G) Serial Digital Line Protective Devices[Z]. Guodian Nanjing Automation co.Ltd, 2004.

[3] 变电站综自系统保护信号分类及传输原则[Z]. 福州:福州电业局, 2004.
Protective Signal Classification and Transmission Standard of Integrated Substation Automation System[Z]. Fuzhou: Fuzhou Power Supply Bureau, 2004.

[4] 变电站综合自动化系统信号分类和传输规范[Z]. 福建:福建省电力有限公司, 2006.
Signal Classification and Transmission Standard of Integrated Substation Automation System[Z]. Fujian: Fujian Electric Power Company Limited, 2006.

收稿日期: 2009-01-09

作者简介:

张国平 (1979-), 男, 工程师, 工学硕士, 主要从事电力系统继电保护和变电站综合自动化工作; E-mail: zh_guoping@126.com

黄巍 (1969-), 男, 高级工程师, 工学硕士, 长期从事电力系统整定计算和继电保护管理工作;

华建卫 (1966-), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统继电保护管理工作。

(上接第 78 页 continued from page 78)

[4] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonics Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[5] 李海鹏, 牛培峰. 基于DSP的新型静止无功发生器控制器的研制[J]. 继电器, 2005, 33 (10): 57-61.
LI Hai-peng, NIU Pei-feng. Design of a Static VAR Generator Controller based on Digital Signal Processor[J]. Relay, 2005, 33 (10): 57-61.

[6] 洪乃刚, 等. 电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

HONG Nai-gang, et al. MATLAB Simulation of Power Electronics and Electric Drive Control System[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

收稿日期: 2009-01-05; 修回日期: 2009-02-28

作者简介:

李付亮 (1974-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事教学与电气信息、电力系统微机保护及水电站自动化方面的研究; E-mail: lfliang_@163.com

周有庆 (1944-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电气信息、电力系统微机保护及变电站自动化方面的研究;

吴涛 (1984-), 男, 硕士, 研究方向为电气信息、电力系统微机保护及变电站自动化。

(上接第 119 页 continued from page 119)

[10] LIU Hong-tai, LIN Rui. Analysis of On-Load Tap Changer Operation and Harmonic Condition of Shenzhen Converter Station's Y/Y Converter Transformer Substitute Zhaoqing Converter Station's Converter Transformer[A]. in: The 17th Conference of Electric Power Supply Industry[C]. 2008.

[11] Rudervall R, Charpentier J P, Sharma R. High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems[R]. in:

Technology Review Paper Presented at Energy Week[C]. Washington DC (USA) [s.n.]: 2000.

收稿日期: 2009-02-02; 修回日期: 2009-03-23

作者简介:

汲广 (1976-), 男, 工程师, 目前从事直流输电管理工作;

朱韬析 (1980-), 男, 工程师, 目前从事直流输电维护工作。E-mail: taoxi_zhu@hotmail.com