

一种 SVG 主从控制方法的研究

张奇伟¹, 叶世锋², 梁钰¹, 刘广业³, 王志鹏³, 魏明洋³

(1. 海南电力技术研究院, 海南省海口市, 570125

2. 海南电网有限责任公司三沙供电局, 海南省海口市, 570122

3. 上海科梁信息工程股份有限公司, 上海, 200030)

Research on a SVG master slave control method

ZHANG Qiwei¹, YE Shifeng², LIANG Yu¹, LIU Guang-ye³, WANG Zhi-peng³, WEI Ming-yang³

(1. Hainan Electric Power Research Institute, Haikou 570125

2. Sansha Power Supply Company of Hainan Power Grid Co., Ltd.; Haikou 570125

3. Shanghai Keliang Information Tech. & Eng. Co., Ltd., Shanghai, 200030)

ABSTRACT: In the power system, In order to guarantee the reliability and stability of the power supply, generally adopts the circuit breaker segregated bus bar power supply. Two bus bars are usually used to configure a SVG scheme to compensate the reactive power of the bus. When the bus tie switch is closed, two sets of SVG running at the same time, there will be complementary concussion problems and lead to system instability. In view of the above operating conditions, The proposed control scheme of double SVG master-slave control common bus reactive power compensation, namely two sets of SVG from the main one, sets of SVG controller through the parallel fiber direct way of compensation on the same bus. The operation principle of master-slave control is analyzed in detail in this paper, and have a detailed analysis of the response speed and compensation effect. The correctness and feasibility of the control strategy are analyzed through the pure digital model and the RTLAB hardware in the loop simulation platform. The results show that the controller two sets of master-slave parallel operation mode, can increase the compensation capacity of SVG, but also can ensure the response speed of the control within 30ms, can be a good solution to a single set of SVG capacity shortage and complementary shocks, has strong use value.

KEYWORDS: SVG Master-slave control RTLAB Hardware in the loop

摘要: 在电力系统中, 为保证供电的可靠性及稳定性, 一般会采用经断路器隔离的分段母线供电方式, 通常采用两条母线各配置一套 SVG 的结构方案来补偿母线无功。当母联合闸时, 两套 SVG 同时运行会出现互补震荡的问题, 导致系统不稳定。针对上述运行工况, 提出双 SVG 主从控制共同补偿母线无功的控制方案, 即两套 SVG 控制器通过光纤直连的方式并联对同一母线进行补偿。文章详细分析了主从控制的运行原理, 对 SVG 的响应速度和补偿效果进行了详细的分析, 通

过纯数字模型及 RTLAB 硬件在环仿真平台, 分析控制策略的正确性及可行性。结果表明: 两套控制器主从并列运行的方式, 既可以增大 SVG 的补偿容量, 又能保证其响应速度在控制在 30ms 以内, 能够很好的解决单套 SVG 容量不足及同时互补震荡的问题, 具有较强的使用价值。

关键词: SVG 主从控制 RTLAB 硬件在环

0 引言

非线性负载和电力电子设备的大量使用, 向电网注入大量无功, 对电力系统安全稳定运行构成威胁, 目前治理无功主要措施是 SVC 和 SVG, SVG 相对 SVC 来说, 响应速度快, 补偿范围大, 补偿精度高, 电网谐波少, 无需附加滤波设备, 具有 SVC 不可比拟的优点, 但是, SVG 容量相对 SVC 比较小, 在高压母线上补偿能力不足是制约 SVG 发展的一大缺陷, 为了弥补这种缺点, 本文提出了 SVG 主从并联运行控制方式, 用多套 SVG 并联协调运行的方式补偿高压母线, 这样既保持 SVG 补偿的快速性与稳定性的优点, 又可以解决容量不足的缺点。

以两套 SVG 并列补偿为例, 两套 SVG 共同补偿母线电压, 当两套 SVG 同时自动运行时, 因硬件差异^[1,2]会导致两套 SVG 在检测电路存在差异, 进而导致二者补偿电流存在时间差, 这样会造成两套 SVG 互补震荡的情况, 为了避免上述两种情况的发生, 本文提出两套 SVG 并列运行的控制方式, 即一套设备为主设备, 处于自动运行模式, 根据母线无功情况计算总的无功及从设备出力指令, 另一套设备为从设备, 处于手动运行方式, 通过光纤接收主设备电流指令手动向电网发出无功。这样即可避免因两套 SVG 之间因检测差异而导致的过补甚至系统

震荡。

1 链式 SVG 系统分析

链式 SVG 系统结构图如图 1 所示^[3]，主电路主要由连接电抗器和功率单元构成，其中，功率单元拓扑为 H 桥，系统由功率单元串联而成，然后通过连接电抗器直接与电网相连。控制系统主要通过对功率单元输出电压的控制间接控制输出电流的幅值和相位，从而实现对电网无功补偿。

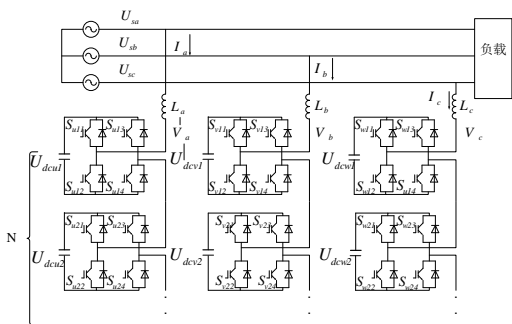


图 1 链式 SVG 系统结构图

Fig.1 Chain SVG system structure

假设链式 SVG 接入点电网电压分别为 U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} ，SVG 运行时交流桥臂输出电压分别为 V_a, V_b, V_c ，运行时，三相输出电流为 I_a, I_b, I_c ，忽略系统损耗和连接电抗器等电阻，可得到 SVG 在三相旋转坐标系下数学模型^[4-6]：

$$U_{sa} - V_a = L_a \frac{di_a}{dt} \quad (1)$$

$$U_{sb} - V_b = L_b \frac{di_b}{dt} \quad (2)$$

$$U_{sc} - V_c = L_c \frac{di_c}{dt} \quad (3)$$

从上述数学模型可以看出，通过调节 SVG 的输出电压 V_a, V_b, V_c ，可以间接控制 SVG 输出电流大小，实现电流补偿。以三相电网平衡系统为对象研究 SVG 控制系统，故在正序同步坐标系下对控制系统进行设计。

电压外环以直流电压参考值为目标，与直流侧电压平均值比较，经过 PI 后得到有功指令 I_d ，其调节器如式 (4) 所示，有功指令参与电流内环调节最终达到维持直流侧电压稳定的功能。

$$I_d = \left(K_{pu} + \frac{K_{iu}}{s} \right) (\Delta U_{dc} - U_{dc_ref}) \quad (4)$$

式中， K_{pu}, K_{iu} 为电压外环调节器的比例积分系数， ΔU_{dc} 为直流侧电压平均值， U_{dc_ref} 为直流侧单元电压指令值。

内环控制器的功能是接收外环控制器的指令 I_d

经 PI 调节器与前馈控制量叠加后产生系统参考控制输入量实现 SVG 输出电压的控制。根据外环指令，需要控制式 (5) 两个方程中的 U_d, U_q 可实现对直流电压的稳定和无功电流的跟踪^[7,8]。

$$\begin{cases} U_d = U_{gd} + \left(K_{pd1} + \frac{K_{id1}}{s} \right) (I_d - I_{d_svg}) \\ U_q = \left(K_{pd2} + \frac{K_{id2}}{s} \right) (I_{q_grid} - I_{q_svg}) \end{cases} \quad (5)$$

式中， K_{pd1}, K_{id1} 为电流内环有功环调节器的比例积分系数， K_{pd2}, K_{id2} 为电流内环无功环调节器的比例积分系数， U_{gd} 为电网电压前馈分量， I_{d_svg} 为 SVG 有功电流， I_{q_svg} 为 SVG 无功电流， I_{q_grid} 为综合无功电流指令。

综合上述电压外环及电流内环传递函数的设计，单套 SVG 的控制框图如图 3 所示，运行模式可根据需求进行自动补偿和手动补偿， I_{Q_GRID} 为自动补偿计算的无功指令， I_{Q_SET} 为手动给定无功指令。

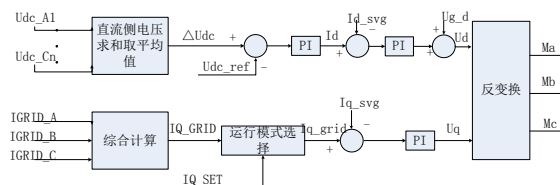


图 2 单套 SVG 系统控制图

Fig.2 One set of SVG system control diagram

2 并联 SVG 综合补偿控制方案

一主一从两套 SVG 并联运行控制原理与单套 SVG 基本相同，区别是 Q 轴无功指令计算方法差异，主设备直接根据母线电流，计算出母线所需无功指令，然后根据两套 SVG 容量进行分配，通过控制模式选择，主机选择自动运行，从机选择定无功运行，具体控制过程如图 3 所示。

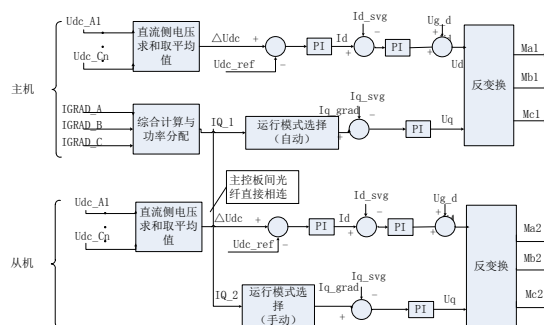


图 3 两套 SVG 并列运行系统控制图

Fig.3 Two sets of SVG system control diagram

主机 SVG 通过 CT 采集电网电流，综合计算后求出母线所需无功，然后根据主从 SVG 容量进行功率分配，主机处于自动运行状态正常运行，分配到从机的无功通过光纤直接在主从主控板之间光纤通

信，将主机分配指令传送到从机。从机不需要检测电网电流，直接根据主机主控板通过光纤传来的指令直接手动运行，实现两套 SVG 共同无差补偿母线无功。

主从设备主控板之间直接通过光纤连接，SVG1 容量为 $S1$ ，SVG2 容量为 $S2$ ，母线无功为 Q ，一般选取容量大的 SVG 作为主机，处于自动运行状态，SVG 容量小的为从机，处于手动运行模式。当 $S1 + S2 \geq Q$ 时，主机以等比例原则进行无功分配，即 SVG1 发出的无功 $Q1 = S1/(S1 + S2) * Q$ ，SVG 2 发出的无功为 $Q2 = S2/(S1 + S2) * Q$ ，可以对母线电网进行全补偿，当 $S1 + S2 < Q$ ，SVG1 与 SVG2 将全部投入满发出力，最大能力补偿母线无功。

3 RTLAB 仿真验证及结果分析

RT-LAB 是加拿大 OPAL-RT 公司开发的实时电磁暂态电力系统仿真装置，采用 CPU+FPGA 的硬件架构，拥有先进的多核并行处理和快速仿真技术，且 FPGA 的仿真步长最短可达到 150ns，能够进行全数字仿真、快速原型仿真以及硬件在环仿真。本章首先利用 RTLAB 搭建纯数字仿真，验证控制策略的正确性，然后利用 SVG 控制器与 RTLAB 搭建 SVG 主从控制实时仿真平台，验证其主从控制策略的可行性。

以图 1 所示 SVG 系统为例，采用 RTLAB 搭建主从控制 SVG 纯数字仿真，仿真步长为 20us，系统及控制参数如表 1 所示。

表 1 系统及控制参数表

Tab 1 System and control parameter table

参数量	参数值
电网电压	6KV
连接电抗器	2.8mH
单元电容	5640uF
主从 SVG 容量	6+4MVar
电流有功环 Kp	0.19
电流有功环 Ki	118
电流无功环 Kp	0.19
电流无功环 Ki	118
电压环 Kp	27
电压环 Ki	84

以 6MVar 的 SVG 为主机 SVG，处于自动补偿模式，4MVar 的 SVG 为从机 SVG，处于定功率模式，接收主 SVG 的无功电流直流指令，两套 SVG 按照容量比分配指令进行补偿，验证两套 SVG 稳态及暂态特性。

3.1 稳态仿真分析

稳态时，投入 5M 感性无功，此时两套 SVG 输出电流如图 4 所示，从图可以看出，两套 SVG 根据其容量比，按照 3:2 的比例发出补偿电流，符合主从控制策略的等比例分配原则。

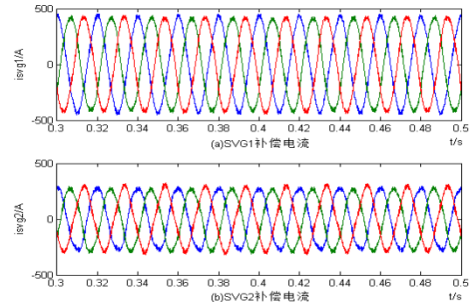


图 4 稳态时主从两套 SVG 的补偿电流

Fig.4 Compensation current of SVG in steady state

对主 SVG 补偿后电网电流进行 FFT 分析，其分析 FFT 结果如图 5 所示，补偿电流畸变率为 4.15%，低于 5%，符合并网条件^[9]。

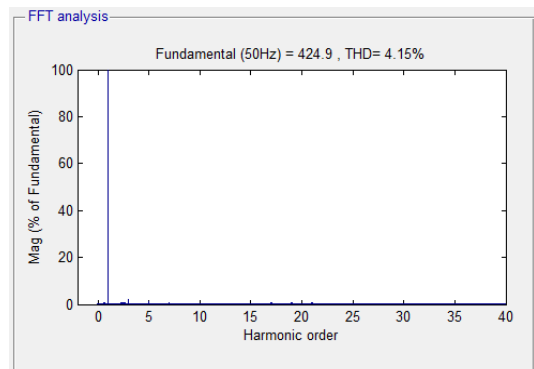


图 5 主 SVG 输出电流 THD

Fig.5 master SVG output current THD

补偿后电网 A 相电压及电流如图 6 所示，从图中可以看出，补偿后电网电压及电流相位基本一致，可以证明稳态状态下并联补偿可以很好实现对负载无功的补偿能力。

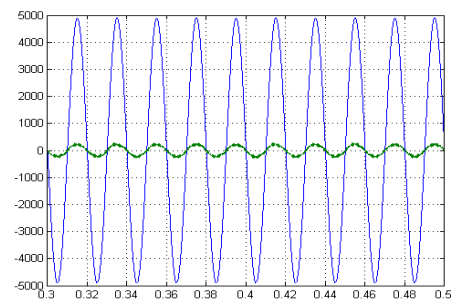


图 6 补偿后电网 A 相电压及电流

Fig.6 A phase voltage and current of power grid after compensation

3.2 暂态仿真分析

投入 5M 无功稳定后, 继续投入 5M 无功, 两套 SVG 接收的无功指令如图 7 所示, 从图可以看出, 在投入负载后, 两套 SVG 的无功指令均能够在在一个周期内达到稳态值的 90%, 指令相应小于一个周期, 说明该控制算法在响应速度方面可以达到并网需求, 能够快速跟踪系统动态相应进行补偿。

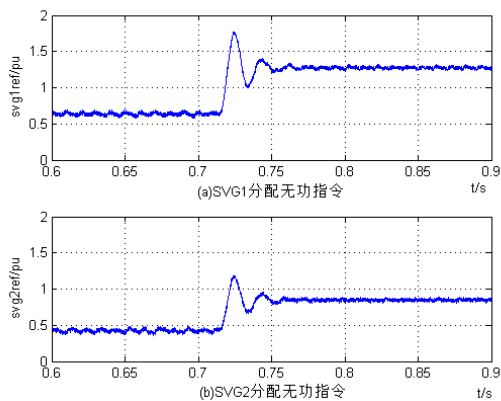


图 7 两套 SVG 接收的无功指令
Fig.7 Reactive command of SVG

3.3 RTLAB 动模验证及分析

将上述控制策略应用在 SVG 控制器中, 采用 RTLAB 与两套 SVG 控制器搭建动模仿真平台, 实验环境及参数与纯数字仿真相同, 首先投入 5M 感性负载, 稳定后再次投入 5M, 图 8 为两套 SVG 的出力情况, 从图可以看出, 负载无功突变前后两套 SVG 按照等比例分配原则发出无功, 符合控制策略, 突变时, 两套 SVG 均能够在在一个周期内达到稳态值的 90%, 主从 SVG 响应速度均小于 30ms, 说明并联补偿控制策略不会对两套 SVG 的响应速度产生影响, 符合并网相应的要求, 证明该控制策略在实际控制器上具有可行性。

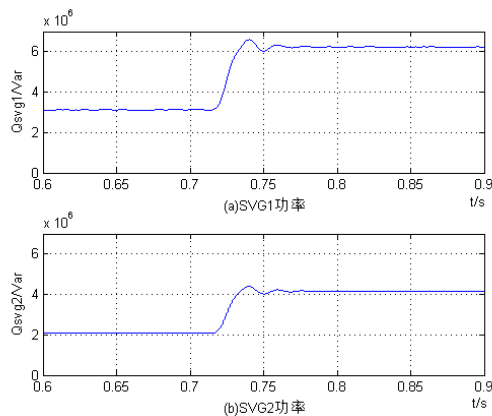


图 8 投入负载后两套 SVG 无功

Fig.8 Two sets of SVG reactive power after input load

4 结论

在母线带有两套 SVG 情况下, 双套 SVG 容易发生互补震荡的问题, 本文提出的 SVG 并联补偿的控制策略可以很好的弥补这种问题。首先分析了单套 SVG 原理, 并根据单套 SVG 原理提出的并联 SVG 控制策略。本文首先通过 RTLAB 搭建纯数字并列运行 SVG 仿真, 来验证其控制策略的可行性及正确性, 然后采用 RTLAB 与 SVG 控制器搭建 SVG 硬件在环仿真平台, 实验平台仿真结果表明, 该控制策略能够完全满足双套 SVG 的响应速度及并网要求, 可以很好解决 SVG 互补震荡的缺陷。本文提出的并联补偿控制策略具有可行性, 正确性和实用性。在实际电网改造中具有指导意义。

参考文献

- [1] 章涤峰,熊炜,曾令美,程汉湘. D—STATCOM 的硬件实现及控制[J]. 计算机与数字工程. 2007(05):191-194
- [2] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M],北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 许树凯, 陈名, 傅闯, 等.南方电网±200Mvar 静止同步补偿装置系统调试 [J]. 南方电网技术, 2012, ,21(2):21-25
- [4] 杨明,林成,盛晓东,陈炜. 电网谐波对级联 STATCOM 运行影响分析及抑制[J]. 电力电子技术. 2016(08):31-34
- [5] 吴洪洋,何湘宁. 级联型多电平变换器 PWM 控制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报. 2001(08)
- [6] 朱永强,宋强,刘文华,李建国,许树楷. 用于不平衡负荷补偿的大容量 D-STATCOM 主电路选择[J]. 电力系统自动化. 2005(07)
- [7] 张振华,江道灼. 基于模块化多电平变流器的 STATCOM 研究[J]. 电力自动化设备. 2012(02)
- [8] Nitus Voraphonpiput,Somchai Chatratana."STATCOM Analysis and Controller Design for Power System Voltage Regulation". 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition:Asia and Pacific .
- [9] 王兆安等编著.谐波抑制和无功功率补偿[M]. 机械工业出版社, 1998

作者简介:

张奇伟(1990-), 男, 助理工程师, 工学学士, 主要从事电力系统仿真方向的研究。Email:zhangqw@hn.csg.cn