

DOI: 10.7667/PSPC151200

静止无功发生器启动冲击电流的抑制

艾永乐, 王伟

(电气工程与自动化学院(河南理工大学), 河南 焦作 454003)

摘要: 静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)多采用双闭环 PI 控制。这种控制方式下, SVG 启动瞬间会产生过大的冲击电流。分析了冲击电流产生的原因, 在此基础上, 设计直流电压逐步升高和电容能量外环控制相结合的方法, 以降低冲击电流。通过 Matlab/Simulink 仿真对此方法进行仿真研究。最后, 通过研制的 SVG 实验平台, 对设计的方法进行实验验证。仿真和实验结果表明, 该方法能够有效抑制启动冲击电流, SVG 装置能够精确地补偿负载所产生的无功功率。

关键词: 启动; 冲击电流; 直流电压; 电容能量; 静止无功发生器(SVG)

Inhibition of start-up inrush current of static var generator

AI Yongle, WANG Wei

(College of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Dual closed-loop PI control is always used for SVG. On this occasion, SVG is easy to generate inrush current during start-up period. This paper analyzes the cause of inrush current's generating. Therefore, a method that combines with the DC voltage increasing through step by step and capacitor energy outer loop control is designed to reduce magnitude of the inrush current. The simulation model of SVG is established in Matlab/Simulink to verify the proposed method. Finally, an experimental prototype of parallel SVG is developed to verify the method. The results from the simulation and experiment show that this method can effectively restrain the start-up inrush current and the SVG device can accurately compensate the reactive power generated by loads.

Key words: start-up; inrush current; DC voltage; capacitance energy; static var generator (SVG)

0 引言

随着大功率感性负荷的大幅增加, 感性无功也随之大幅增加, 就需要利用无功补偿装置来平衡电网中的感性无功^[1]。无功补偿装置对系统中的感性负荷进行就地补偿, 能够有效地减少电网向感性负荷传输的无功功率, 进而提高电网的供电效益和改善电网的电能质量。在无功补偿装置中, SVG 凭借其体积小, 动态响应快, 以及从感性到容性无功的宽范围连续补偿等优点, 已经在电力系统无功补偿中得到了广泛的认可^[2-3]。

为了实现无功补偿的快速跟踪功能, SVG 多采用电压、电流双闭环 PI 控制。但是在启动瞬间, SVG 的交流侧易产生较大的冲击电流。较大的冲击电流增加了功率器件的选型裕度, 从而增加了设备的成

本。另外, 过大的冲击电流会引起设备的过流保护动作, 导致设备不能正常启动。

针对启动冲击电流过大问题, 文献[4]中比较了三种电压外环软启动控制方法, 即直流侧给定电压逐步升高法、恒定电流充电法、变 PI 参数调节法。这三种软启动方法虽然在一定程度上能降低冲击电流, 减小直流电压超调, 但是, 直流侧给定电压逐步升高法还是存在的冲击问题; 恒定电流充电法^[5]存在二次冲击的问题; 变 PI 参数调节法^[6]存在参数检测困难与 PI 参数难整定的问题。因此, 为了进一步抑制 SVG 启动冲击电流, 改善 SVG 装置的整体性能, 本文设计了一种改进型的外环控制方法, 即直流侧给定电压逐步升高和电容能量外环控制相结合的方法。

1 SVG 数学模型和控制方法

1.1 数学模型

静止无功发生器主电路拓扑如图 1 所示, 图中, e_a, e_b, e_c 为三相对称电网相电压, i_a, i_b, i_c 为相电流;

基金项目: 河南省控制工程重点学科开放实验室资助项目 (KG2011-06)

L 为交流侧电感; R 为电路损耗等效电阻; C 为直流侧电容; u_{dc} 、 i_{dc} 分别为直流侧电压、直流侧电流。

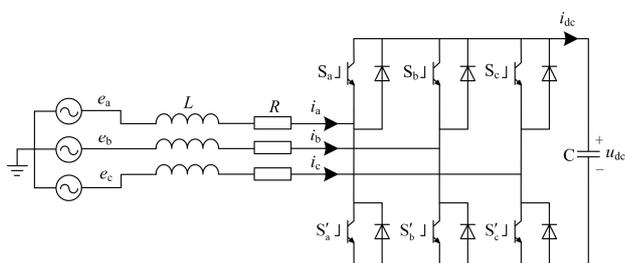


图1 静止无功发生器主电路拓扑

Fig. 1 Main circuit topology of static var generator

定义开关函数 $s_k = 1$ 表示 k 相上功率器件 S_k 导通、 S'_k 关断; $s_k = 0$ 表示 k 相上功率器件 S_k 关断、 S'_k 开通, 其中 $k = a, b, c$ 。根据基尔霍夫定律可得^[7]

$$\begin{cases} L \frac{di_k}{dt} + Ri_k = e_k - u_{dc} (s_k - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} s_j) \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \sum_{k=a,b,c} i_k s_k \\ \sum_{k=a,b,c} e_k = 0 \\ \sum_{k=a,b,c} i_k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

通过 dq 坐标变换, 转换为两相同步旋转坐标系下的数学模型^[8-9]:

$$\begin{cases} C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (i_d s_d + i_q s_q) \\ L \frac{di_d}{dt} = e_d - \omega Li_q - Ri_d - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q + \omega Li_d - Ri_q - u_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_d = u_{dc} s_d$; $u_q = u_{dc} s_q$; e_d, e_q 为三相电网电压在 dq 坐标系下的分量; i_d, i_q 为三相电流在两相旋转坐标系下的分量; ω 为旋转角速度; s_d, s_q 为 s_a, s_b, s_c 在两相旋转坐标系下的分量。

1.2 控制方法

SVG的控制框图如图2所示, 由图可知SVG采用的是基于PI控制器双闭环控制方法。其中, 电压外环主要用于稳定直流侧电压, 电流内环主要用于跟踪指令电流^[10-11]。当感性负载运行时, SVG通过电流互感器对负载电流进行检测, 将所测的负载电流进行 dq 变换, 分离出无功电流分量, 并以此分量作为无功电流环的指令电流信号 i_q^* , 控制三相桥式电路发出无功电流^[12]。最后, SVG所发出的无功电流与感性负载所产生的无功电流相抵消, 使得电网中的无

功电流大大减小, 电网的功率因数得到提高。

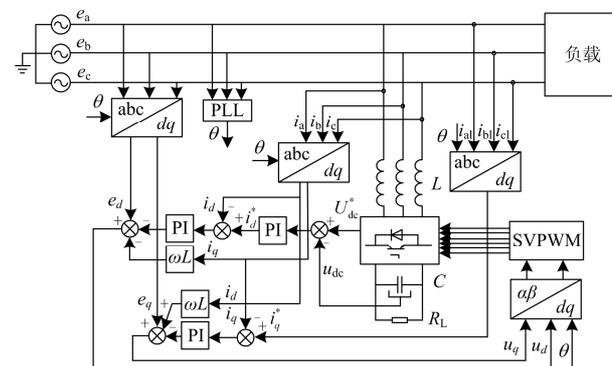


图2 SVG控制框图

Fig. 2 Control block diagram of the SVG

2 启动过程分析

SVG的启动过程分为两个阶段, 第一个阶段是预充电阶段, 第二个阶段是电容升压阶段。

2.1 预充电阶段

在预充电阶段, 系统封锁IGBT, 利用IGBT的反并联二极管对直流侧电容进行预充电。由于直流侧电压为零, 直接对电容充电, 会产生很大的冲击电流。因此, 在预充电过程中, 需要选用大功率电阻进行限流。待直流侧电压达到一定值后, 再将电阻短路。预充电阶段内, 直流侧电容电压能达到的值 U_{dc} 为

$$U_{dc} = \sqrt{6}E \quad (3)$$

式中, E 为电网相电压有效值。

对于采用SVPWM调制方式的SVG, 其直流侧电压设定值 U_{dc}^* 和交流侧输出的相电压有效值 U_1 满足如下关系式:

$$U_{dc}^* \geq \sqrt{6}U_1 = 2.45U_1 \quad (4)$$

理想状态下, SVG的单相等效电路如图3所示。根据SVG工作原理, SVG工作于容性状态时, 电流超前于电压, 此时, $U_1 > E$ 。因此, 由式(3)、式(4)可知, U_{dc}^* 远大于 U_{dc} , 需要对直流侧电容进一步升压。

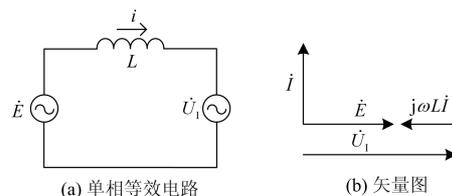


图3 SVG工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of SVG

2.2 电容升压阶段

在电容升压阶段, 系统将IGBT解锁, 利用三

相全桥和交流侧电感组成的升压电路, 进一步提升直流侧电容电压。在 SVG 的电容升压过程中, 通常不发无功电流, 此时设置 $i_q^* = 0$ 。电网电压在 dq 坐标系下的分量 $e_d = E_m$, $e_q = 0$, 其中 E_m 为相电压的峰值。若忽略交流侧等效损耗电阻 R , 式(1)可简化为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = E_m - u_d \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} i_d \frac{u_d}{u_{dc}} \end{cases} \quad (5)$$

简化后的电压外环离散 PI 控制器和电流内环离散 PI 控制器的数学模型为

$$i_d^* = K_{up} e_u + K_{ui} \sum e_u T_s \quad (6)$$

$$u_d = -(K_{ip} e_i + K_{ii} \sum e_i T_s) + E_m \quad (7)$$

式中: $e_u = u_{dc}^* - u_{dc}$; $e_i = i_d^* - i_d$; K_{up}, K_{ui} 为电压环 PI 控制器的比例和积分常数; K_{ip}, K_{ii} 为电流环 PI 控制器的比例和积分常数; T_s 为采样时间。

由式(5)、式(7), 可得

$$L \frac{di_d}{dt} = K_{ip} e_i + K_{ii} \sum e_i T_s \quad (8)$$

鉴于电流内环响应速度远远大于电压外环响应速度, 在极短的时间内, i_d^* 值不变, 可以认为其为常数。解式(8)的微分方程可得

$$i_d = i_d^* - (c_1 e^{-s_1 t} + c_2 e^{-s_2 t}) \quad (9)$$

式中: c_1, c_2 为常数; $s_1 = \frac{-K_{ip} + \sqrt{K_{ip}^2 - 4LK_{ii}}}{2L}$;

$$s_2 = \frac{-K_{ip} - \sqrt{K_{ip}^2 - 4LK_{ii}}}{2L}。$$

为使 SVG 能正常工作, 直流侧额定电压需达到 U_{dc}^* , 且 $U_{dc}^* \gg U_{dc}$ 。当 SVG 启动时, 由式(6)可知, e_u 恒为正值且较大, 电压环 PI 控制器输出迅速达到饱和, 使有功电流基准值 i_d^* 达到了限幅值。然而 i_d 值很小, 此时 e_i 为正值且较大, 由式(8)、式(9)可知, i_d 以较大的速度增加, 进而产生很大的冲击电流。

由以上分析可知, 交流侧产生过大冲击电流的原因是: 在电容升压阶段, 直流侧电压设定值远大于反馈电压值, 使电压外环 PI 控制器输出饱和, 进而导致电流参考值 i_d^* 达到最大幅限值, 电流 i_d 迅速升高。

3 启动冲击的抑制方法

线电压为 380 V 的 SVG 启动过程仿真图如图 4 所示, 直流电压从 0 V 分两个阶段升压到 700 V, t_1

表示为电容预充电阶段, t_2 表示为电容升压阶段。可见, 在电容升压阶段, 冲击电流达到了 256 A。工程上, 通常采用直流电压逐步升高法来减小冲击电流。为了进一步减小冲击电流, 本文提出了直流电压逐步升高和电容能量外环控制相结合的方法。

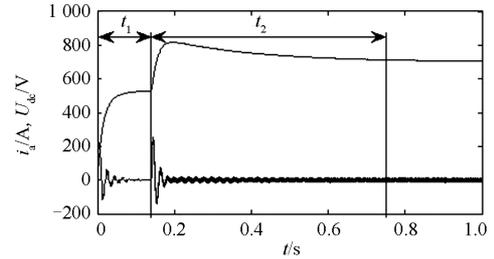


图 4 SVG 启动过程仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of SVG during the start-up process

3.1 直流侧电压逐步升高法

直流侧电压逐步升高的方法是, 设定直流侧电压达到 $0.99U_{dc}^*$ 时, 系统由预充电阶段切换到电容升压阶段, 在电容升压阶段, 直流侧电压给定值 u_{dc}^* 按 Δu 逐步提升到 U_{dc}^* , 其表达式为

当 $u_{dc(k)}^* < U_{dc}^*$ 时

$$\begin{cases} u_{dc(0)}^* = 0.99U_{dc}^* \\ u_{dc(k)}^* = u_{dc(k-1)}^* + \Delta u \end{cases} \quad (10)$$

当 $u_{dc(k)}^* \geq U_{dc}^*$ 时

$$u_{dc(k)}^* = U_{dc}^* \quad (11)$$

式中: $0 < \Delta u \leq U_{dc}^* - U_{dc}$; k 为整数且 $k \geq 1$ 。

采用这种方法, 相当于在启动初始时刻, 给电压环施加了一个较小的阶跃信号。在直流侧电压升高 Δu 的时间段内, 假设反馈电压能够跟踪上, 那么式(6)可以表示为

$$i_d^* = K_{up} \Delta u + K_{ui} \sum \Delta u T_s \quad (12)$$

由式(9)、式(12)可知, Δu 越小, 冲击电流会越小, 但是 Δu 取值过小, 会增加系统的启动时间。因此, Δu 的取值需要综合考虑冲击电流的幅值和设备的启动时间。

3.2 电容能量外环 PI 控制方法

根据瞬时有功功率平衡可得

$$E_m i_d = u_{dc} \cdot C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{d(\frac{1}{2} C u_{dc}^2)}{dt} \quad (13)$$

将 $w_c = \frac{1}{2} C u_{dc}^2$ 代入式(13)得

$$E_m i_d = \frac{dw_c}{dt} \quad (14)$$

可得直流侧电容容量与有功电流的频域关系式

$$\frac{w_{c(s)}}{I_{d(s)}} = \frac{E_m}{s} \quad (15)$$

由此可见, 电容能量与有功电流成线性关系, 因此, 采用电容能量外环控制方法与电压外环控制相比, 前者更接近 SVG 的数学模型。

采用新的外环控制方法, 其控制方程为

$$\begin{aligned} i_d^* &= (K_{wP} + \frac{K_{wI}}{s})(w_c^* - w_c) = \\ &\frac{C}{2}(K_{wP} + \frac{K_{wI}}{s})(u_{dc}^{*2} - u_{dc}^2) = \\ &\frac{C}{2}(K_{wP} + \frac{K_{wI}}{s})(u_{dc}^* + u_{dc})(u_{dc}^* - u_{dc}) \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)可以写成

$$i_d^* = (K_p + \frac{K_I}{s})(u_{dc}^* - u_{dc}) \quad (17)$$

其中,

$$K_p = \frac{C}{2}(u_{dc}^* + u_{dc})K_{wP} \quad (18)$$

$$K_I = \frac{C}{2}(u_{dc}^* + u_{dc})K_{wI} \quad (19)$$

由式(17)~式(19)可知, 采用电容能量外环控制, 与电压外环控制相比, 其 PI 参数相当于随直流电压的变化而变化。在启动初期, 由于直流电压的给定值和反馈值都比较小, 对应的比例、积分系数也相对较小, 可以有效地防止电流突增, 从而避免过大的冲击电流。当启动过程结束后, 其比例、积分系数与电压外环控制时的系数一致。

根据以上方法, 重新设计 SVG 启动时的外环控制框图如图 5 所示。

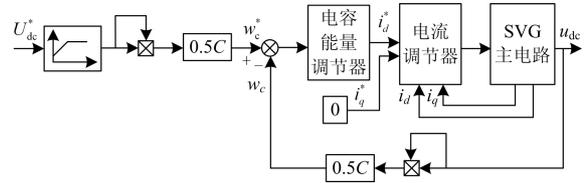


图 5 改进后的外环控制框图

Fig. 5 Improved outer loop control block diagram

4 仿真和实验验证

4.1 仿真验证

根据以上的分析, 应用 Matlab/Simulink 仿真平台, 搭建了 150 kvar 的静止无功发生器仿真模型, 其仿真图模型如图 6 所示。其中: 交流侧电网线电压为 380 V, 频率 50 Hz, 交流侧电感为 0.45 mH, 限流电阻为 1 Ω, 直流侧电容为 8 000 μF, 直流侧电压设定为 700 V, 开关频率为 10 kHz。

电容升压阶段, 采用直流电压逐步升高法的仿真波形和采用直流电压逐步升高结合电容能量外环控制方法的仿真波形如图 7 所示。

图 7(a)示出的是电容升压阶段的直流电压波形图, 图 7(b)和图 7(c)示出的是电容升压阶段的 A 相电流波形图。采用直流电压逐步升高法时, 直流电压的超调为 2.3%, A 相瞬时电流的最大值为 55.5 A; 采用直流电压逐步升高和电容能量外环控制相结合的方法时, 直流电压的超调为 0.8%, A 相瞬时电流的最大值为 37.5 A。

根据仿真可以看出, 直流电压逐步升高和电容能量外环控制相结合的方法能够有效地降低冲击电流, 而且直流电压超调量极小。

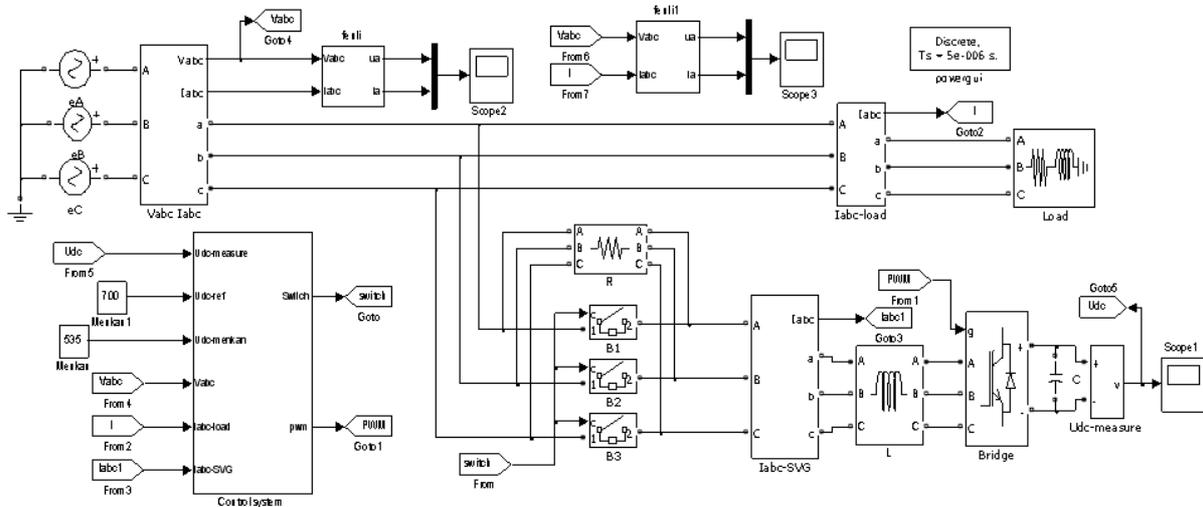


图 6 SVG 仿真模型

Fig. 6 Simulation model of SVG

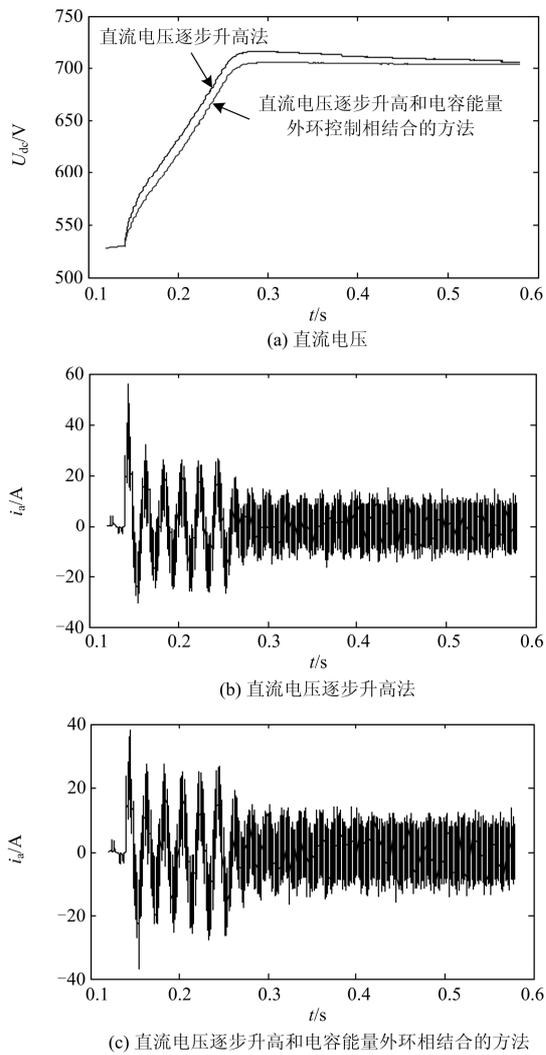


图 7 直流电压和冲击电流的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of DC voltage and the inrush current

4.2 实验验证

应用图 8 所示实验平台对文中所提方法进行验证。此实验平台由两台并联的 SVG 组成，其中一台作为被补偿对象，产生无功功率，由另外一台对其进行补偿。

SVG 的容量均为 150 kvar，直流侧电容选用容量为 2 700 μF 、耐压为 450 V 的电解电容，采用“六并两串”的方式进行连接，开关管选用英飞凌 FF450R12ME4，电抗器参数为 0.45 mH，限流电阻选用 100 Ω 的水泥电阻。

当第一台 SVG 运行时，控制其向电网输送不同大小的容性和感性无功电流。第二台运行后，对第一台所产生的无功进行补偿。所测 PCC 处的电流和功率变化如图 9 所示。

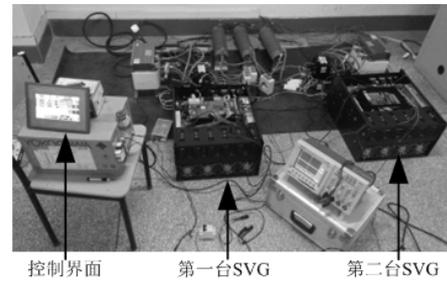


图 8 SVG 实验平台

Fig. 8 Experimental platform of SVG

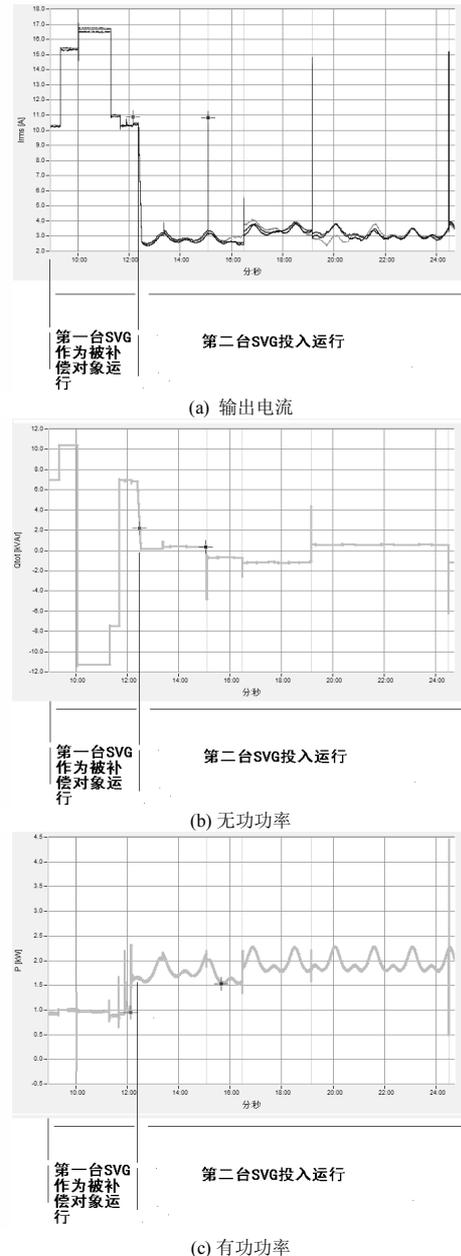
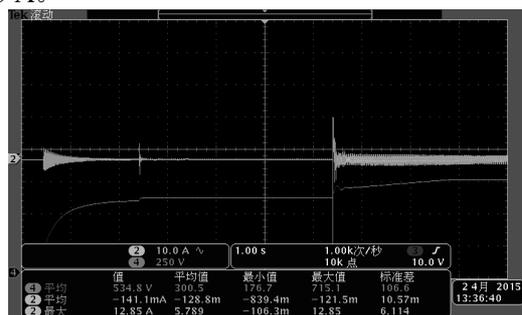


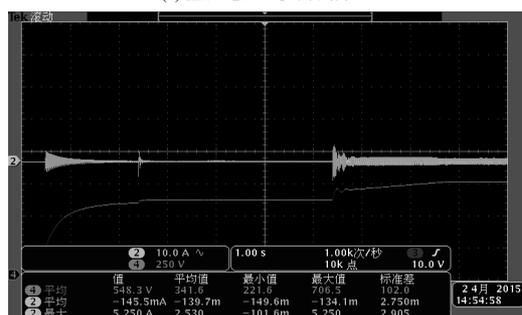
图 9 PCC 处电流和功率变化

Fig. 9 Variation of current and power at PCC

启动实验时, 直流侧电压和 A 相电流的波形如图 10 所示。图 10(a)示出的是采用直流电压逐步升高法时的直流电压和 A 相电流波形, 其直流电压超调为 2.1%, A 相瞬时电流的最大值为 12.85 A; 图 10(b)示出的是采用直流电压逐步升高和电容能量外环相结合方法时的直流电压和 A 相电流波形, 其直流电压超调为 0.9%, A 相瞬时电流的最大值为 5.25 A。



(a) 直流电压逐步升高方法



(b) 直流电压逐步升高和电容能量外环相结合的方法

图 10 直流电压和 A 相电流的启动波形

Fig. 10 Experimental waveforms of A phase current and DC voltage during the start-up process

根据以上仿真和实验验证可以得出, 直流电压逐步升高和电容能量外环相结合的方法能够有效地抑制启动冲击电流, SVG 设备也能够很好的补偿负载无功功率。

5 结论

本文主要研究了 SVG 启动冲击电流过大的问题及其抑制方法。应用 SVG 的数学模型, 分析了 SVG 装置在双闭环 PI 控制方式下, 启动冲击电流过大的原因。在此基础上, 采用了直流侧电压逐步升高和电容容量外环 PI 控制相结合的控制方法, 并通过 Matlab/Simulink 仿真对此方法进行仿真研究。最后, 通过研制的 SVG 装置和搭建的实验平台进行实验研究。仿真和实验结果表明, 所提方法具有良好的启动性能, SVG 装置也能精确地补偿负载无功功率。

参考文献

- [1] 李勇刚, 王晓梅, 李鹏, 等. 基于逆变调压型双向动态无功补偿装置研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 17-21.
LI Yonggang, WANG Xiaomei, LI Peng, et al. Research on bi-directional reactive power dynamic compensation based on inverter voltage regulation[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 17-21.
- [2] 李付亮, 周有庆, 吴涛. 基于瞬时无功理论的先进静止无功发生器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 75-78.
LI Fuliang, ZHOU Youqing, WU Tao. Design of advanced static var generator based on the instantaneous reactive-power theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 38(1): 75-78.
- [3] ANO K, TAKASAKI M. A transformerless D-STATCOM based on a multivoltage cascade converter requiring No DC sources[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6): 2783-2795.
- [4] 耿攀, 戴珂, 方昕, 等. 大容量并联型有源电力滤波器的软启动技术[J]. 通信电源技术, 2006, 23(1): 13-14.
GENG Pan, DAI Ke, FANG Xin, et al. Soft start-up technique for large power shunt active power filter[J]. Telecom Power Technologies, 2006, 23(1): 13-14.
- [5] 邓文浪, 胡毕毕, 郭有贵. 三相电压型整流器的分段启动控制[J]. 电力电子技术, 2014, 48(1): 30-32.
DENG Wenlang, HU Bibi, GUO Yougui. Grading startup control for three-phase voltage-source PWM rectifier[J]. Power Electronics, 2014, 48(1): 30-32.
- [6] 杨剑锋, 王帅, 谢延凯. 有源电力滤波器直流侧电压专家PI控制研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(9): 71-73.
YANG Jianfeng, WANG Shuai, XIE Yankai. Research on expert PI control of active power filter DC voltage[J]. Power Electronics, 2014, 48(9): 71-73.
- [7] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126-130.
JIAN Zhiqiang, SITU Qin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.
- [8] 李平, 武建文, 张之昊, 等. 基于双DSP结构的配电网静止同步补偿器设计[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 28-33.

- LI Ping, WU Jianwen, ZHANG Zhihao, et al. Design of the distribution static synchronous compensator based on Dual-DSP[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 28-33.
- [9] 鲍禄山, 王毅非, 黎燕. 基于矢量解耦与预测电流控制相结合的APF的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 88-92.
- BAO Lushan, WANG Yifei, LI Yan. Research on APF based on vector decoupling control and predictive current control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 88-92.
- [10] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [11] 江全才, 马骁旭, 李红刚. 新型三相三线制模糊滑模控制并联有源滤波器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 128-133.
- JIANG Quancai, MA Xiaoxu, LI Honggang. Novel fuzzy sliding mode control method for three-phase three-wire shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 128-133.
- [12] 陈丽兵, 史丽萍, 夏正龙, 等. 基于同步旋转变换及DFT的SVG指令电流检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 21-27.
- CHEN Libing, SHI Liping, XIA Zhenglong, et al. A reference current detection method based on synchronous reference frame transformation and DFT for SVG[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 21-27.

收稿日期: 2015-07-12; 修回日期: 2015-08-11

作者简介:

艾永乐(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事交流多相电机新颖控制策略研究和电能质量检测与提高; E-mail: aiyongle@hpu.edu.cn

王伟(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功补偿。

(编辑 姜新丽)