

# SVG 的电压定向控制算法仿真<sup>①</sup>

汪玉凤<sup>1</sup>, 刘 振<sup>1</sup>, 马立洲<sup>2</sup>, 赵 鹏<sup>1</sup>, 马静波<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

<sup>2</sup>(开滦集团公司 多经事业部电力管理部, 唐山 063000)

**摘 要:** 针对电流控制方法在静止无功发生器 SVG 无功补偿上的缺陷, 提出了一种先进的电压定向控制算法 (VOC). 首先介绍了 VOC 的基本原理, 然后详细论述了电压定向控制的拓扑结构及无功电流与有功电流解耦过程, 最后在 MATLAB/Simulink 的环境下进行了系统建模和仿真. 仿真结果表明, 运行基于电压定向控制方法的 SVG 装置, 系统将得到良好的动态特性, 功率因数大大提高, 弥补了传统电流控制的缺点, 对于 SVG 的无功补偿效果提高具有重要的现实意义.

**关键词:** 静止无功发生器; 电压定向控制; 电流解耦; 仿真

## Voltage Oriented Control Method and Simulation Research of Static Var Generator

WANG Yu-Feng<sup>1</sup>, Liu Zhen<sup>1</sup>, MA Li-Zhou<sup>2</sup>, ZHAO Peng<sup>1</sup>, MA Jing-Bo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

<sup>2</sup> (Kai Luan Group, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** In view of the current control method on static reactive power generator SVG reactive compensation defects, put forward a kind of advanced methods of voltage oriented control (VOC). This paper firstly analyzes the principle of work of static var generator SVG voltage type main electric circuit, and then introduces the structure of the control system, and this essay discusses the voltage directional control topology and the process of reactive current and active current decoupling, at last a system simulation is carried out in the MATLAB/Simulink environment. Through the experiment waveform, it is known that the voltage oriented control method was applied to SVG, the system can get good dynamic and static characteristics, the effect of reactive power compensation is very good.

**Keywords:** SVG; voltage directional control; current decoupling; simulation

随着电力电子技术的全面兴起以及大功率电力电子器件的广泛应用, 电网受到日益严重的谐波污染, 有些电力电子器件的功率因数很低, 这又给电网带来了无功功率补偿的电能质量问题. 无功补偿装置由来已久, 发展至今, 经历了从机械投切电容器、同步调相机、静止同步补偿器(SVC)到今天的静止无功发生器(Static Var Generator, 简称 SVG)<sup>[1]</sup>. SVG 是柔性交流输电系统 FACTS 家族中的一个重要成员, 属于新一代技术的无功功率补偿装置. 由于 SVG 具有运行范围广、响应速度快、损耗小、谐波量小以及维持系统

电压稳定等诸多优点, 一度引起国内外研究和工程领域的广泛关注, 其中 SVG 的控制方法是相关技术的一项重点研究课题. 目前 SVG 的控制方法仍是以电流控制为主, 比如常用的滞环电流控制、三角波比较控制和空间电压矢量控制等, 但这些控制策略都存在不足之处, 如滞环电流控制的开关频率不固定造成较为严重的噪音, 且输出电流中所含的谐波较多; 三角波比较控制的电流响应慢; 空间电压矢量控制未引入转矩的调节, 系统性能没有得到根本性的改善<sup>[2]</sup>.

针对上述问题, 本文将电压定向控制方法应用于

①基金项目:国家自然科学基金(51307076)

收稿时间:2013-10-23;收到修改稿时间:2013-11-21

SVG 的无功补偿系统中, 电压定向控制方法 VOC 是一种新方法, 它将矢量控制的基本思想应用于电网电压控制当中, 稳态特性好, 易于实现数字控制和实时控制. 本文从 SVG 装置的工作原理入手, 重点论述基于 d-p 变换的 VOC 控制算法, 最后通过仿真和现场实验验证, 本文所采用的拓扑结构和控制策略, 在应用到该装置中时可以取得良好的效果.

### 1 SVG的工作原理

SVG 的基本原理是将三相桥式逆变电路通过电抗器或者直接并联在电网上, 只需适当调节桥式电路交流侧输出电压的幅值和相位, 或者直接控制其交流侧的电流分量, 就可以使该补偿装置发出或者吸收满足要求的无功电流, 从而实现动态无功补偿的目的. SVG 的主电路结构分为电压型桥式电路和电流型桥式电路, 由于实际运行效率悬殊, 投产应用的 SVG 大多采用电压型桥式电路, 其拓扑结构如图 1 所示<sup>[3]</sup>.

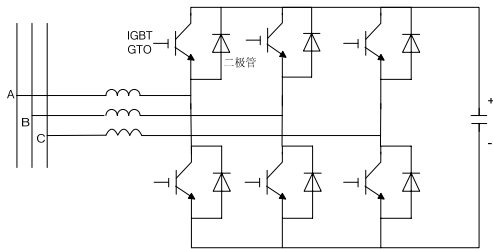


图 1 SVG 的主电路结构图

SVG 工作时, 通过变换开关器件的通断, 输出幅值和相位可控制, 频率与电网频率一致的电压, 从而改变从电网吸收无功功率的类型, 单相等效电路图以图 2 说明.

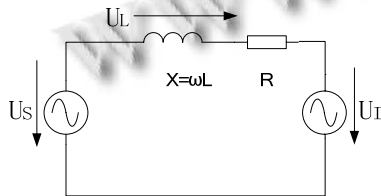


图 2 单相等效电路图

图 3 中  $U_S$  为供电网的系统电压,  $U_I$  是 SVG 输出的电压,  $U_L$  为电抗器与电阻压降,  $X$  为连接电抗器,  $R$  为 SVG 装置本身的损耗. SVG 工作的向量图如图 3 所示<sup>[4]</sup>.

可见, SVG 运行范围广, 可以工作在容性区, 即吸收容性无功功率; 也可以工作在感性区, 即吸收感性无功功率. 因此, SVG 的补偿效果比补偿电容器、静止无功补偿器 SVC 等常规的无功补偿装置要优越得多<sup>[5]</sup>.

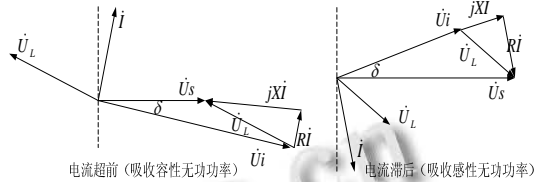


图 3 SVG 工作向量图

### 2 电压定向控制(VOC)

近年来在提高电能质量方面, 直接电流控制方式, 尤其是 SVPWM 控制, 得到了广泛应用. 但是, 为了满足 SVPWM 的高性能要求, 常常需要将控制周期缩短到几十微秒, 甚至几微秒之内, 空间矢量的首要任务是判断扇区, 并且在确定了输出矢量和开关次序后, 还需要进一步知道每个输出矢量的作用时间, 处理过程相当复杂. 因此, 在理论推导和实践的基础上, 需要寻求更有效的方法<sup>[6]</sup>.

VOC 是一种比较先进的控制方式, 它以电流环作为控制内环, 可获得良好的动、静态特性. 其原理如下: 若同步旋转坐标系与电网电压矢量重合, 则称该同步旋转坐标系为基于电网电压矢量定向控制的同步旋转坐标系. 而基于电网电压定向的 SVG 输出电流矢量图如图 4 所示.

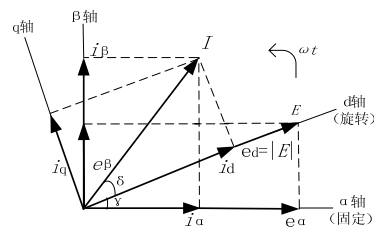


图 4 基于电网的 VOC 系统矢量图

由图 4 知, 在电网电压定向的同步旋转坐标系中, 有  $e_d = |E|$ ,  $e_q = 0$ . 根据瞬时无功功率理论, 系统的瞬时有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  分别为:

$$\begin{cases} p = 3/2 * (e_d i_d + e_q i_q) \\ q = 3/2 * (e_d i_q - e_q i_d) \end{cases} \quad (1)$$

由于基于电网电压定向时,  $e_q = 0$ , 则式(1)可简化为:

$$\begin{cases} p = 3/2 * e_d i_d \\ q = 3/2 * e_d i_q \end{cases} \quad (2)$$

若不考虑电网电压的波动, 即  $e_d$  为一定值, 因此由式(2)表示的 SVG 瞬时有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  仅与 SVG 输出电流的 d、q 轴分量  $i_d$ 、 $i_q$  成正比。这表明, 如果电网电压不变, 则通过  $i_d$ 、 $i_q$  的控制就可以分别控制 SVG 的有、无功功率<sup>[7]</sup>。

同时, SVG 的各个状态方程都可以在电压定向坐标系中表示出来, 尤其是在电网电压定向控制坐标系中, 电流与功率呈线性关系。其结构图如图 4 所示, 图中  $\theta$  为电网电角度,  $S_k (k=a,b,c)$  为开关信号<sup>[8]</sup>。

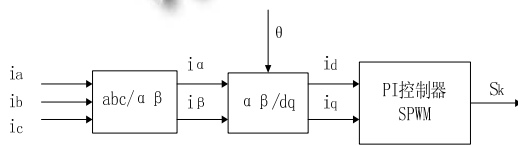


图 5 VOC 控制结构框图

VOC 的基本原理: 如图 5 所示, 第一步是通过  $abc/\alpha\beta$  变换, 把三相静止坐标系下的电网交流电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  转换成两相静止坐标系下的交流电流  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 。第二步是通过电网电压定向的旋转变换  $\alpha\beta/dq$ , 把两相静止坐标系下的交流电流  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  转换成两相旋转坐标系下的直流电流  $i_d$ 、 $i_q$ , 其中  $i_d$  是有功电流,  $i_q$  是无功电流, 即最终实现将交流控制转换为直流控制, 使有功电流与无功电流进行解耦控制。下面详细分析一下 VOC 控制算法<sup>[9]</sup>。

如图 1 所示, 设 SVG 交流侧电路归算的总电阻为  $R$ , 则在三相静止坐标系中有如下公式:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_a - v_{sa} \\ v_b - v_{sb} \\ v_c - v_{sc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

将(3)式的电流方程变换到两相同步旋转坐标系中, 则有:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ \omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_d - v_{sd} \\ v_q - v_{sq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将同步旋转  $dp$  坐标系的  $d$  轴在电网电压合成矢量  $\vec{v}_s$  方向上定向, 则  $\theta = \omega t$  为  $\vec{v}_s$  的相角。于是可得:

$$\begin{cases} v_{sd} = v_s \\ v_{sq} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

再将式(5)代入式(4), 可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ \omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_d - v_s \\ v_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

从式(6)可得出:

$$\begin{cases} (s + R/L)i_d = v_d/L - v_s/L + \omega i_q \\ (s + R/L)i_q = v_q/L - \omega i_d \end{cases} \quad (7)$$

从而可得 SVG 控制结构如图 6 所示。电流  $i_d$ 、 $i_q$  闭环 PI 调节器后得到  $x_1$  和  $x_2$ 。

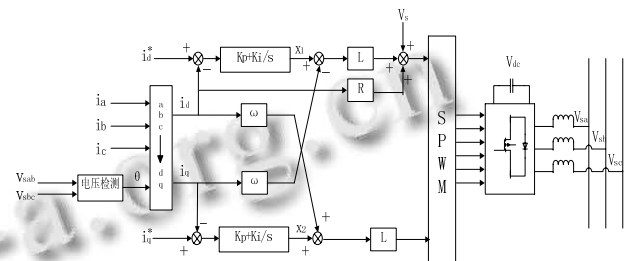


图 6 SVG 电压定向控制原理图

$$\begin{cases} x_1 = (K_p + K_i/s)(i_d^* - i_d) \\ x_2 = (K_p + K_i/s)(i_q^* - i_q) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $i_d$ 、 $i_q$  为给定电流  $d$ 、 $q$  分量,  $K_p$ 、 $K_i$  为比例、积分系数:

$$\begin{cases} v_d = L(x_1 - \omega i_q) + v_s \\ v_q = L(x_2 + \omega i_d) \end{cases} \quad (9)$$

由此, 便可对  $d$ 、 $q$  电流分别进行控制, 而有功功率由  $i_d$  控制, 无功功率由  $i_q$  控制, 即最终实现了有功和无功的解耦控制<sup>[10]</sup>。

### 3 实验仿真

实验以河南省义马煤业集团千秋一矿的某 2100KW 交流提升机为例, 主变压器由 6KV 电压供电, 容量为 3200KVA, 变比为 6KV/0.78KV. 实际参数见表 1.

表 1 矿井提升机各阶段功率

	初加速	主加速	等速	减速	停车抱闸
无功功率 (kvar)	3325	6970	1987	1023	1850
有功功率 (kW)	875	2817	2330	431	535
视在功率 (kVA)	3650	7465	3015	1231	2155

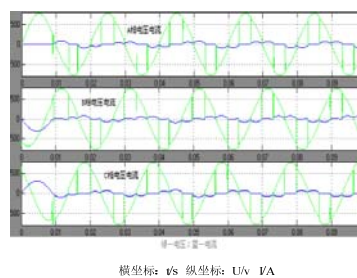
在 MATLAB 工具箱中的 Simulink 环境下, 对基于电压定向控制策略的 SVG 装置进行系统仿真. 其中主电路采用 IGBT 电力电子器件, PWM 的生成采用三角载波控制.

仿真结果如图 7 所示. 根据仿真图形以及计算结果可以看出补偿前后提升机负荷对电网的影响. 投入补偿前电网电压和电流存在一定相位差, 同时电流波形有一定的谐波成分; 投入补偿后不到半个周期, 电网电压和电流同相位, 且输出电流畸变量大大降低, 无功情况得到了很好的补偿.

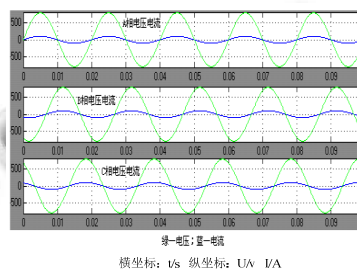
本装置在千秋一矿 6KV/0.78KV 矿井电网中运行, 补偿效果良好, 功率因数提高到 0.95 以上, 相应的负荷电流明显下降, 现场测试电压波形见图 8.

### 4 结 语

本文针对无功补偿装置 SVG, 将电压定向控制方法 VOC 应用其中. 通过分析可知, VOC 控制能将交流控制转换为直流控制, 实现无功电流与有功电流的解耦, 从而达到控制无功功率的目的. 实验仿真结果表明, 该系统具有良好的动、静态性能, 能有效提高功率因数, 而且输出电流畸变量小, 弥补了传统电流控制的缺点, 具有很高的实用价值和广阔的应用前景.

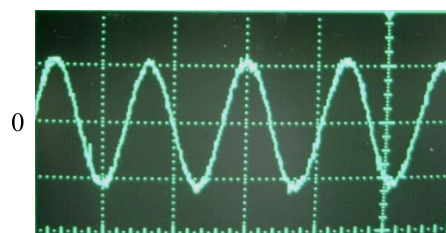


(a) 补偿前



(b) 补偿后

图 7 基于 VOC 控制的 SVG 装置投入系统前后的电网电压和电流波形



横坐标: t/ ms 15ms/格  
纵坐标: U/ v 500v/格

图 8 现场测试电压波形

### 参考文献

- 1 荣飞, 罗安, 范卿. 应用于不平衡系统的 STATCOM 电压控制新方法. 电工技术学报, 2010, 28(3): 127-130.
- 2 孙晓颖, 宋建成, 许春雨. 基于直接电流控制的矿用无功发生器的研究. 电力电子技术, 2012, 46(9): 52-54.
- 3 潘文婷, 孙运全, 盛吉. 基于粒子群的自抗扰静止同步补偿器仿真研究. 计算机仿真, 2011, 28(8): 298-301.
- 4 陈波, 卓放, 王兆安. 100kVA 三相四线系统用增强型 SVG 的研制. 电工电能新技术, 2007, 31(1): 45-47.
- 5 Lee TL, Hu SH, Chan YH. D-STATCOM with positive-sequence admittance and negative-sequence conductance to mitigate voltage fluctuations in high-level penetration of distributed-generation systems. IEEE, 2013.

- (3): 1417–1428.
- 6 Madhusudan R, Ramamohan RG. Advances in modeling and simulation of a distribution STATCOM (DSTATCOM) for power quality problems-voltage sag and swell based on Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM). *Engineering, Science and Management (ICAESM)*, 2012, (7): 436–441.
- 7 Hou XD, Zhang LQ. Saliency detection: A spectral residual approach. *CVPR*, 2007: 1–8.
- 8 范梅花,乌日图,林平,陈宇.基于 DSP 的静止无功补偿装置控制方法研究. *电力电子技术*,2008,42(11):10–12.
- 9 彭思敏.静止无功发生器直接功率控制的研究.南宁:广西大学, 2008.
- 10 Murthy SS, Gupta S. Analysis and design of STATCOM-based voltage regulator for self-excited induction generators. *IEEE*, 2011, 16(2): 22–30.

[www.c-s-a.org.cn](http://www.c-s-a.org.cn)

[www.c-s-a.org.cn](http://www.c-s-a.org.cn)