

基于SVG无功电流检测的仿真分析

通过对静止无功发生器（SVG）的工作原理和基于瞬时无功功率理论的两种无功电流检测方法的理论分析，建立了SVG的Matlab仿真模型。仿真结果表明， $i_p - i_q$ 法可以准确地检测系统的无功电流且实时性较好；SVG可以有效地补偿系统的无功功率，提高系统的功率因数。

贺虎成 高攀 王永宾/西安科技大学电气与控制工程学院



贺虎成/副教授

近年来，随着电力电子技术的迅速发展，电力电子设备的广泛使用造成了电网谐波和无功功率消耗的大量增加，给电网的稳定性、安全性带来了极大的影响，所以无功功率的补偿成为当前讨论的热点。静止无功发生器（SVG）因其补偿效果更好、调节速度更快且使用寿命更长等因素得到了广泛的应用。无功电流检测作为无功补偿中的重要环节，其实时性和准确性直接影响着补偿装置的性能。目前常用的无功电流检测方法主要有：①基于频域分析的快速傅里叶变换（FFT）检测法；②基于瞬时无功功率理论的检测法；③基于Fryze功率定义检测法；④基于自适应理论的电流检测；⑤基于神经网络的检测法等^[1-2]。文中主要对基于瞬时无功功率理论的两种检测方法作具体分析，该理论由赤木泰文在1983年提出。文中利用Matlab仿真软件建立了无功电流检测以及SVG的仿真模型，成功检测出无功电流并且验证了SVG的补偿性能。

关键词/Keywords

静止无功发生器 ·
瞬时无功功率理论 ·
无功电流检测 ·
Matlab仿真 ·

系统工作原理

SVG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的电流，来产生或吸收满足要求的无功功率，从而实现动态无功补偿的目的^[3]。

SVG系统结构框图如图1所示。利用无功电流检测法获得由于非线性负载产生的无功电流指令信号，以电流解耦控制作为系统的控制方法产生SVPWM的给定信号，通过SVPWM控制SVG主电路中的全控型器件IGBT的导通与关断，使SVG产生一个与无功电流指令信号幅值相同相位相反的电流实现对系统的补偿。

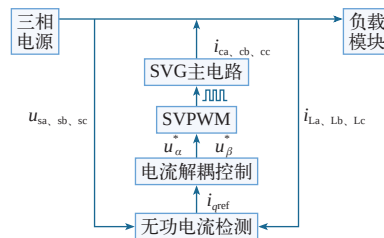


图1 SVG系统结构框图

无功电流检测

无功电流检测作为SVG中的重要环节，如果检测电路无法对系统的无功电流进行准确地检测，就会导致控制电路不能准确地控制SVG对系统进行补偿，造成SVG的补偿性能较差，甚至无法实现补偿功能。本文的无功电流检测均是以瞬时无功功率理论^[4]为基础的。瞬时无功功率理论将三相电网的电压、电流经过坐标变换后进行计算，其中电压、电流的矢量点积值定义为瞬时有功功率，电压、电流的矢量叉积值定义为瞬时无功功率，通过对这些功率指令值进行逆变换，得到三相瞬时无功电流和谐波电

陕西省教育厅科研计划项目资助（15JK1459）。

流^[2,5]。基于该理论的无功电流检测方法主要有两种,分别为 $p-q$ 检测法和 i_p-i_q 检测法,两种方法都是通过对负载电流进行坐标变换,使有功分量和无功分量分离,当SVG只用于补偿无功时,仅对无功分量作逆变换,就可得到三相瞬时无功电流。

1. $p-q$ 无功电流检测法

三相电网电压 u_s 和负载电流 i_L 通过三相静止坐标到两相静止坐标变换($abc \rightarrow \alpha\beta$),得到 $\alpha-\beta$ 坐标轴上的电压和电流,然后根据定义得到有功功率和无功功率,仅对无功功率作逆变换就可以得到各相瞬时无功电流。

假设三相电网电压对称无畸变,分别为 u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} ,三相对称负载电流为 i_{La} 、 i_{Lb} 和 i_{Lc} ,则经过 $abc \rightarrow \alpha\beta$ 坐标变换可以得到两相瞬时电压 u_α 、 u_β 和瞬时电流 i_α 、 i_β 。 u 与 i 分别为 $\alpha-\beta$ 坐标系下的三相电压和三相电流合成旋转矢量,如图2所示。

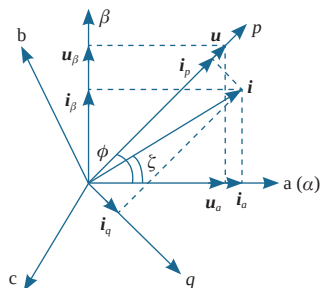


图2 三相静止坐标系到两相正交坐标系间的变换

对 $abc \rightarrow \alpha\beta$ 坐标系的矢量关系分析可得

$$\begin{aligned} u_\alpha &= k(u_a - u_b \cos 60^\circ - u_c \cos 60^\circ) \\ &= k(u_a - \frac{1}{2}u_b - \frac{1}{2}u_c) \end{aligned} \quad (1)$$

$$u_\beta = k(u_b \cos 30^\circ - u_c \cos 30^\circ) = k(\frac{\sqrt{3}}{2}u_b - \frac{\sqrt{3}}{2}u_c) \quad (2)$$

则

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = C_{3s/2s} \begin{pmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{pmatrix} \quad (3)$$

同理

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = C_{3s/2s} \begin{pmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中

$$C_{3s/2s} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

根据变换前后功率相等的原则,得 $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$,

由此可得

$$C_{2s/3s} = C_{2s/3s}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

图2中, p 轴作为有功轴,其方向与电压矢量 u 同方向, q 轴作为无功轴。 φ 为电压矢量 u 与 α 轴的夹角, ζ 为电流矢量 i 与 α 轴的夹角。通过对 $\alpha\beta-pq$ 坐标系的矢量关系分析,可以得到有功电流 i_p 与无功电流 i_q 分别为

$$i_p = i \cos(\varphi - \zeta) = i_\alpha \cos \varphi + i_\beta \sin \varphi \quad (7)$$

$$i_q = i \sin(\varphi - \zeta) = i_\alpha \sin \varphi - i_\beta \cos \varphi \quad (8)$$

即

$$\begin{pmatrix} i_p \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (9)$$

根据定义和式(9)得三相瞬时有功功率 p 和无功功率 q 分别为

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = u \begin{pmatrix} i_p \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = C_{pq} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中

$$C_{pq} = \begin{pmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{pmatrix} \quad (11)$$

则

$$C_{pq}^{-1} = \begin{pmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{pmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{pmatrix} \quad (12)$$

要得到无功电流,只需对 q 作逆变换,即令 $p=0$,由式(10)和式(12)可以得到 $\alpha-\beta$ 坐标系下的无功电流 $i_{\alpha q}$ 和 $i_{\beta q}$

$$\begin{pmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{pmatrix} = C_{pq}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ q \end{pmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{pmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ q \end{pmatrix} \quad (13)$$

对式(13)作三相静止坐标到两相静止坐标

的逆变换 ($\alpha\beta \rightarrow abc$), 可得到三相瞬时无功电流 i_{aq} 、 i_{bq} 、 i_{cq} , 即

$$\begin{pmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = C_{2s/3s} \begin{pmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{pmatrix} \quad (14)$$

综上所述, 得出 $p-q$ 无功电流检测法的结构框图如图3所示。

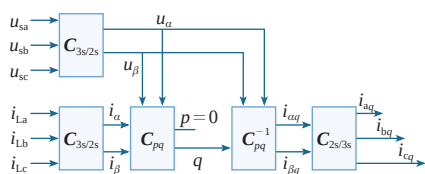


图3 无功电流检测法结构框图

2. i_p-i_q 无功电流检测法

由于 $p-q$ 检测法在计算过程中需要对系统电压进行坐标变换, 所以当系统电压发生畸变的情况下, 利用 $p-q$ 无功电流检测法, 检测结果有一定的误差, 而 i_p-i_q 检测法由于只需要A相电压 u_{sa} 的相位信号, 所以电压信号的畸变对检测结果没有影响, 检测结果比较准确。

i_p-i_q 无功电流检测法的结构框图如图4所示。首先利用锁相环获得A相电压 u_{sa} 的相位信号 φ , 利用信号发生电路得到与A相电压同相位的正弦信号 $\sin \varphi$ 和余弦信号 $\cos \varphi$ 。由式 (4) 可以得到 i_α 、 i_β , 再由式 (9) 得到有功电流 i_p 与无功电流 i_q , 仅对 i_q 作逆变换可以得到三相瞬时无功电流 i_{aq} 、 i_{bq} 和 i_{cq} 。

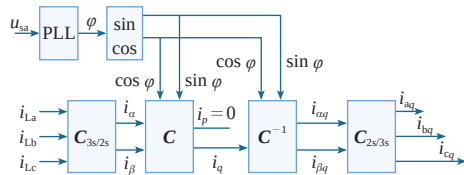


图4 i_p-i_q 检测法结构框图

由式 (9) 可知图4中变换矩阵 C

$$C = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \end{pmatrix} \quad (15)$$

则

$$C^{-1} = C = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \end{pmatrix} \quad (16)$$

由图4可知, i_p-i_q 法对负载电流连续进行了两次坐标变换, 计算过程较为复杂, 为了使算法更加简便, 可以将两次变换改为一次变换。

令

$$C_{3s/2r} = CC_{3s/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \varphi & \cos (\varphi - 120^\circ) & \cos (\varphi + 120^\circ) \\ \sin \varphi & \sin (\varphi - 120^\circ) & \sin (\varphi + 120^\circ) \end{pmatrix} \quad (17)$$

则

$$C_{2r/3s} = C_{3s/2r}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ \cos (\varphi - 120^\circ) & \sin (\varphi - 120^\circ) \\ \cos (\varphi + 120^\circ) & \sin (\varphi + 120^\circ) \end{pmatrix} \quad (18)$$

故可以得到 i_p-i_q 检测法简化结构框图如图5所示。

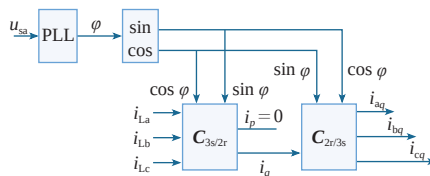


图5 i_p-i_q 检测法简化结构框图

i_p-i_q 简化检测法直接由负载电流 i_{La} 、 i_{Lb} 和 i_{Lc} , 得到了有功电流 i_p 和无功电流 i_q , 令 $i_p=0$, 只对 i_q 进行坐标逆变换, 可得到相应的三相瞬时无功电流。

Matlab仿真分析

由于 i_p-i_q 无功电流检测法比 $p-q$ 法准确度更高、应用范围更广, 所以本文在Matlab仿真平台上搭建了 i_p-i_q 和SVG仿真模型, 验证了 i_p-i_q 法的准确性、实时性以及SVG补偿功能的有效性。图6为SVG系统仿真图, 主要包括电源模块、负载模块、SVG主电路、无功电流采集模块、控制电路以及SVPWM脉冲驱动模块等部分。相关参数: ①电网线电压有效值为380 V, 频率为50 Hz。②装置补偿容量为 $Q=10$ kvar, 逆变器直流侧电压设定值为

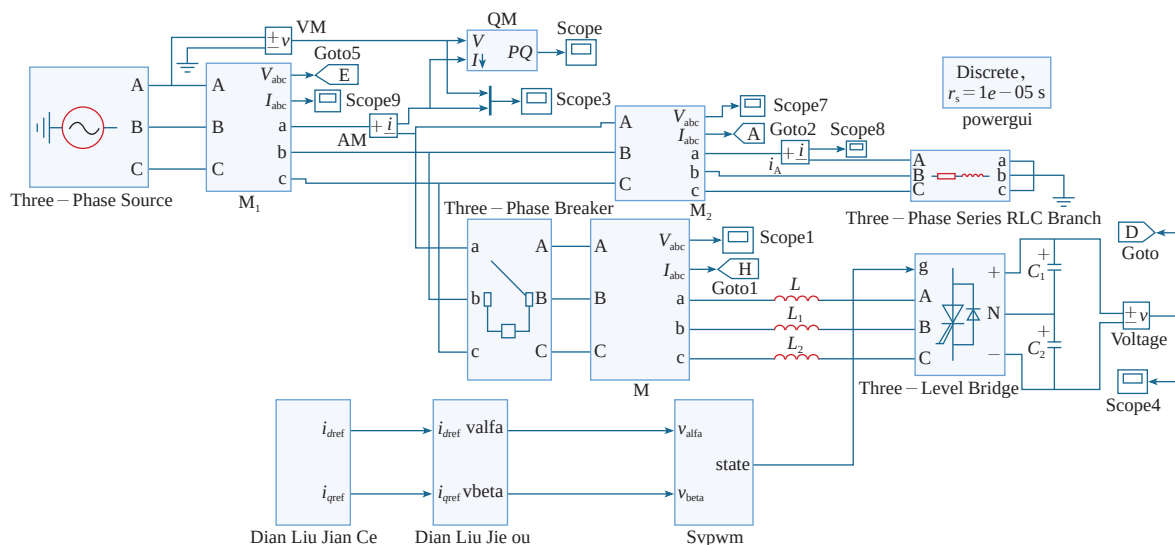


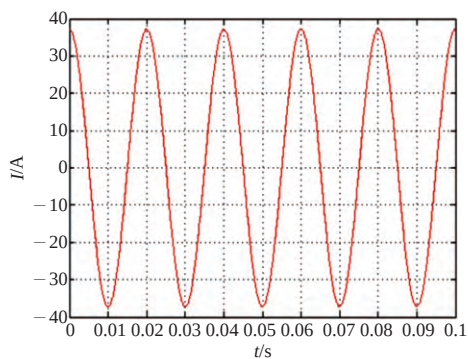
图6 SVG系统仿真图

540 V，电容为2 500 μF ，逆变侧电感 $L=0.01\text{ H}$ 。
③感性负载为 $P=10\text{ kW}$ ， $Q_L=10\text{ kvar}$ ；容性负载为 $P=10\text{ kW}$ ， $Q_C=10\text{ kvar}$ 。

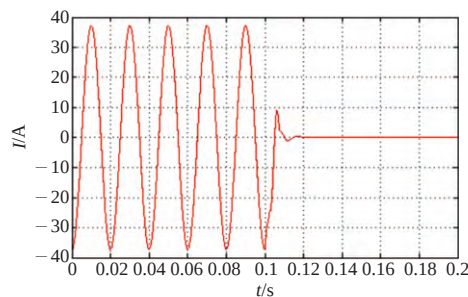
纯阻性负载时，系统只有有功分量存在，无功电流为0。仿真过程通过检测感性、容性两种性质不同负载的无功电流，验证了 i_p-i_q 法的准确性；利用SIMULINK中的三相断路器模型（Three-Phase Breaker）实现两个负载之间的切换，验证了 i_p-i_q 法的实时跟踪性能。 i_p-i_q 法检测的无功电流波形如图7所示。

图7a为感性负载时无功电流波形，图7b为容性负载时的无功电流波形，二者幅值相等为37.2 A，相位相差 180° ，与理论计算完全相同。由此可知， i_p-i_q 检测法可以对不同的负载进行准确的检测。

感性负载接入电路，0.1 s时将容性负载投入电路，使感性负载和容性负载共同作用，无功电流波



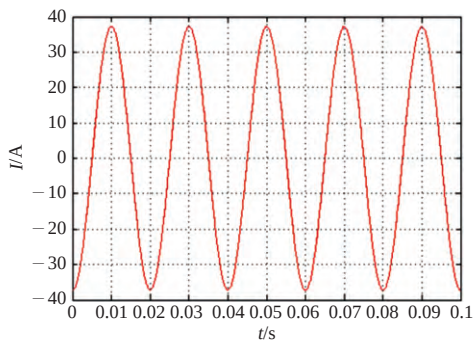
(b) 投入容性负载



(c) 0.1 s投入容性负载

图7 A相无功电流波形

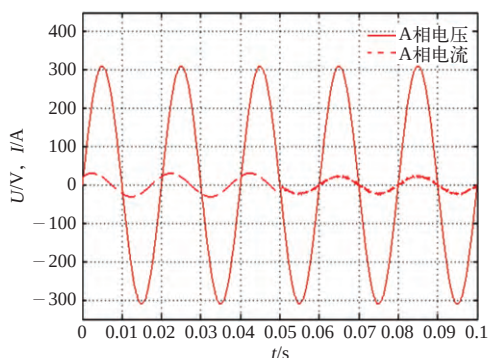
形如图7c所示。从理论分析，由于感性负载的感性无功为10 kvar，容性负载的容性无功为10 kvar，所以在0.1 s后，容性无功和感性无功相互抵消，无功电流为0。从仿真波形可以看出0.1 s时进行投切，0.11 s后系统的无功电流稳定并趋于0。验证了无功电流检测电路能够很好地跟踪系统的变化，且基



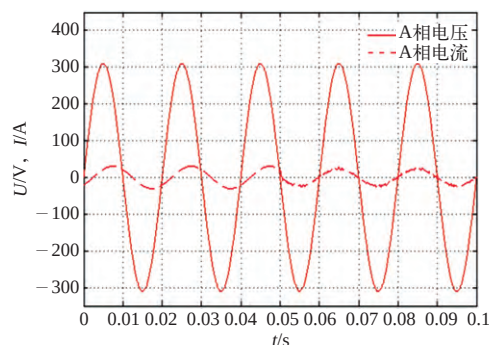
(a) 投入感性负载

本能够实现实时跟踪。

SVG投入系统的主要功能是提高功率因数，实现无功补偿。在SVG补偿前，容性负载和感性负载使系统电压和电流产生相位差；在SVG补偿后，相位差接近于0，即功率因数提高到1，实现SVG的补偿功能。为了更加清晰地看到补偿过程，在0.05 s投入SVG，如图8所示。



(a) 容性负载



(b) 感性负载

图8 0.05 s投入SVG补偿前、后的A相电压电流波形

由图8a可知，容性负载补偿前，电流超前电压 45° ，由图8b可知，感性负载补偿前电压超前电流 45° 。0.05 s投入装置后，SVG立即对系统进行了补偿，使网侧电压和电流迅速达到相位同步，电流跟随性能较好，补偿响应速度较快。综上所述，SVG既可以对容性负载，也可以对感性负载进行补偿。

仿真结果表明， $i_p - i_q$ 无功电流检测法能够准确地对无功电流进行检测，并且可以对系统实时变化进行跟踪，准确度较高，同时SVG具有良好的补偿性能。

结束语

本文分析了SVG的工作原理，详述了基于瞬时无功功率理论的两种无功电流检测法的实现过程。通过Matlab仿真平台对 $i_p - i_q$ 无功电流检测以及SVG进行了仿真，仿真结果很好地验证了 $i_p - i_q$ 法在检测无功电流时的准确性和实时性，以及SVG补偿功能的有效性。

参考文献

- [1] 曾光，康兰，杨波，等．基于瞬时无功理论的无功电流检测方法[J]．电力电子技术，2009，43(6)：1-1.
- [2] Dae-wook Kang, Yo-Han Lee, Bum-Seok Suh, et al. An Improved carrier-based SVPWM method using leg voltage redundancies in generalized cascaded multilevel inverter topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1)：180-187.
- [3] 王兆安，杨君，刘进军，等．谐波抑制和无功功率补偿[M]．2版．北京：机械工业出版社，2005.
- [4] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits [C]. IEEE & JIEE Proceedings IPEC, Tokyo, 1983, 103(7)：483-490.
- [5] 石宗林．静止无功发生器(SVG)无功电流检测及控制策略研究[D]．辽宁：辽宁工业大学，2014.

(收稿日期：2015-02-02) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告