

不平衡负载下SVG分序控制策略研究

贾永博

(陕西铁路工程职业技术学院 轨道工程系, 陕西 渭南 714000)

摘要:不平衡负载接入电网会导致系统电能质量降低,通常采用静止无功发生器(SVG)实现无功补偿。针对三相四桥臂SVG拓扑结构,首先通过理论分析,提出了一种新型的分序控制策略。该策略通过信号延迟抵消(DSC)分离出电网电流和负载电流的正、负序分量,在两相静止坐标系下分别补偿电网的正序和负序电流,采用快速重复控制和PI控制相结合的方法补偿零序电流。然后在Matlab/Simulink平台进行系统仿真,最后搭建了样机进行实验验证。仿真及实验结果表明,新型分序控制策略对平衡电网电流,补偿系统无功功率有很好的效果。

关键词:三相四桥臂;不平衡负载;分序;重复PI控制

中图分类号:TM761.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20644

Research on Sequential Control Strategy of SVG Under Unbalanced Load

JIA Yongbo

(Department of Track Engineering, Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, Shaanxi, China)

Abstract: Unbalanced load connected to power grid will lead to the reduction of power quality, and static var generator (SVG) is usually used to realize reactive power compensation. Aiming at the three-phase four-bridge SVG topology, a new sequential control strategy was proposed through theoretical analysis. The strategy separated the positive and negative sequence components of grid current and load current by delayed signal cancellation (DSC), compensated the positive and negative sequence currents of grid respectively in two-phase static coordinate system, and compensated the zero sequence current by combining fast repetitive control and PI control. Then the system was simulated on the platform of Matlab/Simulink. Finally, a prototype was built for experimental verification. The simulation and experimental results show that the new sequential control strategy has a good effect on balancing grid current and compensating reactive power of the system.

Key words: three-phase four-bridge arm; unbalanced loads; sequence; repetitive PI control

在地铁修建过程中,经常会遇到卵石和大漂石等地质状况。这些复杂工况会导致盾构机供电电压波动较大、三相负载不平衡等问题,而造成电网三相电流不平衡。三相不平衡电流会增加变压器及线路的损耗,降低电能质量,严重影响盾构机的使用,所以必须进行无功补偿。目前,盾构机普遍采用固定电容投切进行补偿,但因固定电容补偿有阶梯性,所以补偿效果并不理想。静止无功发生器(static var generator, SVG)因其既能抑制谐波又能实现动态无功功率补偿等优良特性,逐渐发展成为盾构机补偿领域的主

流产品^[1-2]。

许多文献都对SVG补偿不平衡电流进行了深入研究。文献[3-4]提出了分相控制策略,其中文献[3]对每一相负载的导纳分别补偿,但指令电流提取复杂,运算量大;文献[4]提出的基于瞬时电流进行分相控制,过分依赖于主电路拓扑。文献[5-7]提出的预测控制策略,其缺点是补偿精度受到一定限制。文献[8-10]提出了将重复控制和PI控制相结合,其缺点是重复控制以电流整个周期来叠加误差信号,响应速度慢。

针对上述不足,本文提出一种新型分序控制

基金项目:陕西铁路工程职业技术学院2016年第二批科研基金(KY2016-32)

作者简介:贾永博(1989—),男,硕士,讲师,Email:867923848@qq.com

策略。该策略采用了信号延迟抵消法(delayed signal cancellation, DSC)进行负载电流正、负序分离,采用瞬时功率理论下的坐标变换进行电网电压和SVG输出电流的正、负序分离。考虑到三相四桥臂SVG分序后可以等效为3个独立系统,且d-q坐标系下正序和负序分量为直流、零序为交流,故对于正、负序电流采用PI控制,零序电流采用快速重复PI控制。快速重复PI控制中对于重复控制以1/4个周期叠加误差信号进行修正,加快了响应速度。为了减少解耦过程中带来的信号误差,本文在解耦过程中采用负载电流代替了SVG输出电流参与运算。

1 三相四桥臂SVG数学模型

简单来说,SVG就是构造一个电压源,其相位和幅值均可以控制,通过改变装置输出的无功电流可以动态调节系统的无功功率。当负载的接入使电网功率因数较低时,SVG可以进行动态无功电流调节,使电网的功率因数接近于1。三相四线制SVG拓扑结构主要有分裂电容式和三相四桥臂式2种。相对于分裂电容式结构,三相四桥臂SVG电压利用率高且不需要考虑直流侧均压问题^[11-13]。所以,本文对三相四桥臂结构进行研究。图1为三相四桥臂SVG拓扑图。

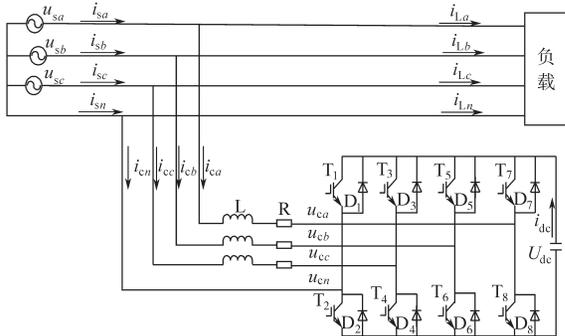


图1 三相四桥臂SVG拓扑图

Fig.1 Three-phase four-bridge SVG topology

图1中, u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 为SVG交流侧三相电压; U_{dc}, i_{dc} 分别为SVG直流侧电压和电流; u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 为电网的三相电压; $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, i_{sn}$ 为电网输出的电流; $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}, i_{cn}$ 为SVG输出的电流; $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}, i_{Ln}$ 为负载电流; L, R 为SVG和电网之间连接的电抗器等效模型。

在图1中,建立电压回路方程:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于电网的不平衡状态,经常使用对称分量法进行分析。由对称分量法可知,电网的电压和电流在不平衡状态下可以分解为正序、负序以及零序分量,每一相电流或电压由三者叠加而成^[14-15]。

式(1)为静止坐标系下建立的回路方程,将式(1)经过正序 abc/dq 变换,转换为正序 $d-q$ 旋转坐标系下的方程, ω 为 $d-q$ 坐标系的旋转角频率,转换后的方程如下式所示:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd}^+ \\ i_{cq}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{cd}^+ \\ i_{cq}^+ \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sd}^+ - u_{cd}^+ \\ u_{sq}^+ - u_{cq}^+ \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,正序 abc/dq 的变换矩阵为

$$C_{3s/2r} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

对式(2)进一步推导可得:

$$\begin{cases} u_{cd}^+ = -(L \frac{di_{cd}^+}{dt} + Ri_{cd}^+) + \omega Li_{cq}^+ + u_{sd}^+ \\ u_{cq}^+ = -(L \frac{di_{cq}^+}{dt} + Ri_{cq}^+) - \omega Li_{cd}^+ + u_{sq}^+ \end{cases} \quad (4)$$

类比式(4),对式(1)进行负序 abc/dq 变换可得:

$$\begin{cases} u_{cd}^- = -(L \frac{di_{cd}^-}{dt} + Ri_{cd}^-) + \omega Li_{cq}^- + u_{sd}^- \\ u_{cq}^- = -(L \frac{di_{cq}^-}{dt} + Ri_{cq}^-) - \omega Li_{cd}^- + u_{sq}^- \end{cases} \quad (5)$$

其中,负序 abc/dq 的变换矩阵为

$$C_{3s/2r,n} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

零序分量和 d, q 轴完全解耦,它只存在于零轴,其模型为

$$u_{c0} = \frac{1}{Ls + R} i_{c0} \quad (7)$$

式中: u_{c0}, i_{c0} 分别为SVG输出零序电压和电流。

2 电流分离策略

传统的负载无功电流分离是在瞬时无功功率理论基础上的 $i_p - i_q$ 分离法,这种方法要通过低通滤波器提取负载电流的基波正序有功分量,然后和负载电流做差得到补偿电流。由于运算过程中低通滤波器会产生一定的信号延时,所以

会影响SVG的补偿精度。基于此,本文采用DSC来提取负载指令电流的有功和无功分量,具体原理如图2所示。

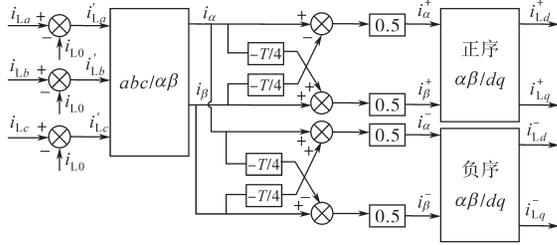


图2 信号延迟分离算法框图

Fig.2 Block diagram of algorithms

图2中, i_{L0} 为负载零序电流,因三相零序电流大小相等、方向相同,因此可得:

$$i_{L0} = -\frac{1}{3} (i_{La} + i_{Lb} + i_{Lc}) \quad (8)$$

负载电流 i_{La} , i_{Lb} 和 i_{Lc} 减去零序分量 i_{L0} , 然后经 $abc/\alpha\beta$ 坐标变换到两相静止坐标系下的 i_α 和 i_β , 此时 i_α 和 i_β 只包含有正序和负序分量。将正序和负序分离后如下式所示:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha^+(t) \\ i_\beta^+(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_\alpha^-(t) \\ i_\beta^-(t) \end{bmatrix} = I_L^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_1) \\ \sin(\omega t + \varphi_1) \end{bmatrix} + I_L^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi_2) \\ \sin(-\omega t + \varphi_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: I_L^+ , φ_1 分别为负载电流的正序幅值和初相; I_L^- , φ_2 分别为负载电流的负序幅值和初相。

式(9)的信号延迟 1/4 个基波周期, 经过化简得到:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t - T/4) \\ i_\beta(t - T/4) \end{bmatrix} = I_L^+ \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi_1) \\ -\cos(\omega t + \varphi_1) \end{bmatrix} + I_L^- \begin{bmatrix} -\sin(-\omega t + \varphi_2) \\ \cos(-\omega t + \varphi_2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10)可推导出负载电流在 $\alpha - \beta$ 坐标系下分量为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^+(t) \\ i_\beta^+(t) \\ i_\alpha^-(t) \\ i_\beta^-(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_L^+ \cos(\omega t + \varphi_1) \\ I_L^+ \sin(\omega t + \varphi_1) \\ I_L^- \cos(-\omega t + \varphi_2) \\ I_L^- \sin(-\omega t + \varphi_2) \end{bmatrix} = 0.5 \begin{bmatrix} i_\alpha(t) - i_\beta(t - T/4) \\ i_\beta(t) + i_\alpha(t - T/4) \\ i_\alpha(t) + i_\beta(t - T/4) \\ i_\beta(t) - i_\alpha(t - T/4) \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(11)中的变量 i_α^+ , i_β^+ , i_α^- , i_β^- 转换到 $d-q$ 坐标系下变为 i_{Ld}^+ , i_{Lq}^+ , i_{Ld}^- , i_{Lq}^- , 则将负载电流的正、负序在两相旋转坐标系下完全分离。

图3为SVG补偿系统电网电压、负载电流的有功和无功以及正、负序分离原理, 其中负载电流按照信号延迟法进行分离, 电网电压、SVG输出电流按照 abc/dq 坐标变化进行分离。

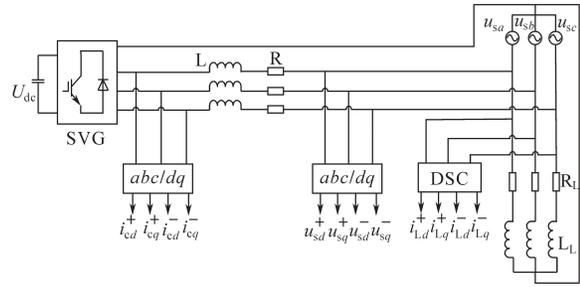


图3 SVG补偿系统控制量分离原理图

Fig.3 Control separation principle diagram of SVG compensation system

3 解耦控制方法

由式(4)和式(5), 在 $d-q$ 坐标系下 SVG 的正、负序电流存在耦合, 如果要单独对无功电流进行控制, 就需要对其进行解耦。

对于式(5), 当系统采用 PI 控制器, 其控制算法方程可变换为

$$\begin{cases} u_{cd}^- = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_{Ld}^- - i_{cd}^-) - \omega L i_{cq}^- + u_{sd}^- \\ u_{cq}^- = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_{Lq}^- - i_{cq}^-) + \omega L i_{cd}^- + u_{sq}^- \end{cases} \quad (12)$$

传统的和改进的解耦方法对比框图如图4所示。

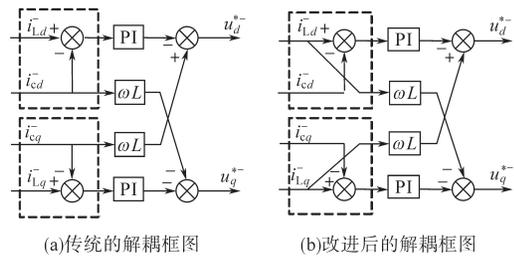


图4 传统的和改进的解耦方法对比框图

Fig.4 Comparison of traditional and improved decoupling methods

在式(12)的基础上, 搭建不平衡负载下双序解耦方法框图如图4a所示。图4a中, 以 d 轴为例, 作如下假设: 若 $(k_p + k_i/s)(i_{Ld}^- - i_{cd}^-) = \Delta u_d^-$, $i_{Ld}^- - i_{cd}^- = \Delta i$, 则式(4)可以改为

$$\begin{cases} u_d^{*-} = \Delta u_d^- - \omega L (i_{Lq}^- - \Delta i) + u_{sd}^- \\ u_q^{*-} = \Delta u_q^- + \omega L (i_{Ld}^- - \Delta i) + u_{sq}^- \end{cases} \quad (13)$$

对比式(12)和式(13)可知, 负载电流 i_{Lq}^- 和 SVG 输出电流 i_{cq}^- 下所计算出的电压 u_d^{*-} 存在误差 $\Delta i \cdot \omega L$ 。系统存在谐波或者干扰的情况越严重, 误差 $\Delta i \cdot \omega L$ 越大, 补偿效果越差。另外, 由于 $\omega L i_{cq}^-$ 不能直接反映指令电流的变化, 导致系统动态响应速度慢。为了提高补偿精度, 在图4a的基础上进行了方法改进, 提出了图4b所示的解耦

方法。

在图4b中用 i_{Lq}^- 直接代替 i_{cq}^- , 使 u_d^* 消除了电流误差 $\Delta i \cdot \omega L$, 从而使 SVG 补偿精度提高, 系统误差大大减少, 提高了电网电流波形质量。另外, 由于直接取指令电流参与运算, 减少了系统进行动态调整的时间, 并且使系统参数调试复杂度降低许多。在图4a中, 由于有滤波电感 L 的存在, 所以突加负载时, SVG 输出电流 i_{cd}^- 和 i_{cq}^- 不会突变, 从而保持解耦过程系统的稳定。对于图4b, 由于盾构现场多为阻感负载, 所以突加负载时, 负载电流 i_{Ld}^- 和 i_{Lq}^- 也不会突变, 所以用负载电流代替 SVG 输出电流进行解耦控制, 系统稳定性并不受影响。

4 电流控制策略

4.1 零序电流的快速重复PI控制

考虑到零序电流为交流信号, 单纯的PI控制在交流信号调节过程中存在稳态误差, 单纯的重复控制虽然补偿精度高, 但其延迟环节的存在导致很大的控制滞后, 所以本文采用了一种快速重复控制和PI控制方法相结合的方法^[16-18]。传统的重复控制在内模中需要对误差累积1个周期后然后进行修正, 而快速重复控制只需要采样1/4周期便进行误差修正, 故减少了基波周期延时时间, 提高了补偿精度。快速重复PI控制框图如图5所示。

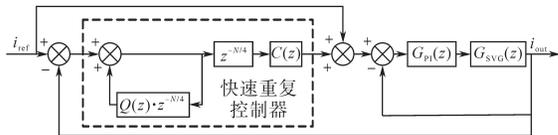


图5 快速重复PI控制框图

Fig.5 Rapid repeat PI control block diagram

图5中, i_{ref} 为指令电流; i_{out} 为实际电流; $G_{PI}(z)$ 为PI控制器; $G_{SVG}(z)$ 为SVG的传递函数; $C(z)$ 为补偿环节, 主要补偿 $G_{SVG}(z)$ 的幅频和相位。虚线框内为快速重复控制器, 为削弱积分环节, 增加了变量 $Q(z)$, $Q(z)$ 一般为低通滤波器; $z^{-N/4}$ 为延迟环节, 表示延迟了1/4个周期; N 为1个周期的采样次数。根据图5可以得到系统的闭环传递函数为

$$\frac{i_{out}(z)}{i_{ref}(z)} = \frac{1 - z^{-N/4} [Q(z) - C(z)]}{1 - z^{-N/4} [Q(z) - C(z)] F(z)} \cdot F(z) \quad (14)$$

其中
$$F(z) = \frac{G_{PI}(z)G_{SVG}(z)}{1 + G_{PI}(z)G_{SVG}(z)}$$

式中: $F(z)$ 为PI控制下SVG的闭环传递函数。

由系统的特征方程可得使其稳定的充分条件为

$$|Q(z) - C(z)F(z)| < 1 \quad (15)$$

其中
$$z = e^{j\omega T_s}, \quad \omega \in [0, \pi/T_s]$$

根据工程经验, Q 一般取 0.95, 补偿器 $C(z)$ 一般由 $k_r z^k$ 和 $P(z)$ 3 部分构成, 三者关系式为

$$C(z) = k_r z^k P(z) \quad (16)$$

其中, $P(z)$ 为二阶低通滤波器, k_r 用来调节系统稳定裕度和误差收敛速度, 其取值与系统稳态误差成反比, 与系统的稳态裕度成正比^[19]。因为重复控制器中存在 $z^{-N/4}$ 这一延迟环节, 所以需要 z^k 进行超前补偿。

4.2 整体控制策略

综合以上分析, 本文设计了一种分序控制策略如图6所示。图6中, 系统的正序和负序电流采用PI解耦控制, 零序电流采用快速重复PI控制。

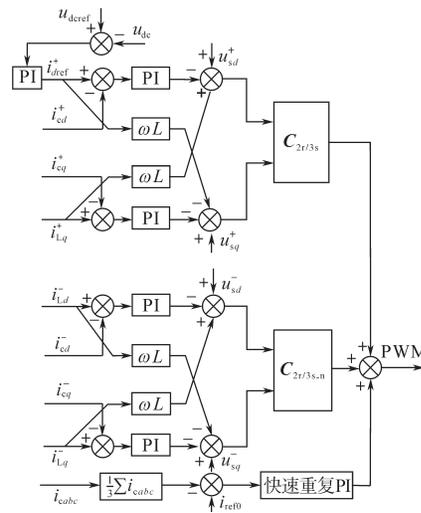


图6 SVG控制策略框图

Fig.6 Control strategy block diagram of SVG

由图6可知, SVG 整体控制策略为电压外环、电流内环的双闭环控制。电压环中, 对直流侧电压控制的目的是为了维持 SVG 直流侧电容的电压稳定, 确保直流侧有足够的能量输入。具体而言, SVG 直流侧实际电压 u_{dc} 和指令电压 u_{dcref} 的差值经PI调节后作为正序有功电流的指令值 i_{dref}^+ 。在电流内环中, 负载电流的正序分量 i_{cd}^+ , SVG 输出电流的正序分量 i_{cd}^+ 和 i_{cq}^+ 、电网电压的正序分量 u_{sd}^+ 和 u_{sq}^+ , 经过解耦运算、坐标变换后组成正序信号波; 负载电流的负序分量 i_{cd}^- 和 i_{cq}^- , SVG 输出电流的负序分量 i_{cd}^- 和 i_{cq}^- 、电网电压的负序分量 u_{sd}^- 和 u_{sq}^- 经过解耦运算、坐标变换后组

成负序信号波;SVG输出电流的零序分量和零序指令电流做差后,经快速重复PI控制后组成零序信号波。正序、负序和零序信号波相加共同组成SPWM的调制波。

5 仿真与实验

5.1 仿真分析

为了对所提控制策略进行验证,本文在Matlab/Simulink平台下搭建SVG补偿系统仿真模型。设置SVG容量为200 kvar,具体参数为:电网电压(相电压)220 V/50 Hz,直流侧电容50 000 μF,滤波电感1.1 mH,滤波电感寄生电阻0.02 Ω,A相负载(有功/感性无功)100 kW/50 kvar,B相负载(有功/感性无功)100 kW/50 kvar,C相负载(有功/感性无功)120 kW/50 kvar。

将仿真模型中电感和电阻参数代入式(7)可得:

$$G_{\text{SVG}}(s) = \frac{1}{L_S + R} = \frac{1}{0.0011s + 0.02} \quad (17)$$

对式(17)进行z变换(采用零阶保持器法),采样频率设为10 kHz,此时SVG在z域下的传递函数为

$$G_{\text{SVG}}(z) = \frac{0.09083}{z - 0.9982} \quad (18)$$

根据SVG控制器需求并经过实验调整得出零序电流PI控制器的参数 $k_p=5, k_i=200$,所以可得:

$$G_{\text{PI}}(z) = \frac{5z - 4.98}{z - 1} \quad (19)$$

根据式(18)和式(19)可得:

$$F(z) = \frac{0.4541z^3 - 1.36z^2 + 1.357z - 0.4515}{z^4 - 3.542z^3 + 4.629z^2 - 2.632z + 0.5449} \quad (20)$$

在补偿器 $C(z)$ 中根据经验 k_f 取0.95, k 取整数9。对于二阶低通滤波器 $P(z)$,本文选择截止角频率为5 000 rad/s,阻尼系数为0.707,则

$$P(s) = \frac{5000^2}{s^2 + 7070s + 5000^2} \quad (21)$$

将式(21)代入式(16)可得:

$$C(z) = 0.95 \cdot \frac{0.09812z + 0.07744}{z^2 - 1.318z + 0.4931} \cdot z^9 \quad (22)$$

图7a为PI控制下SVG闭环传递函数 $F(z)$ 的波特图;图7b为加入补偿环节 $C(z)$ 后 $F(z)$ 的波特图。从图7可知,PI控制加入幅频和相频特性补偿后,系统在低频段增益为0 dB,在高频段增

益快速下降,对高频信号抑制明显。

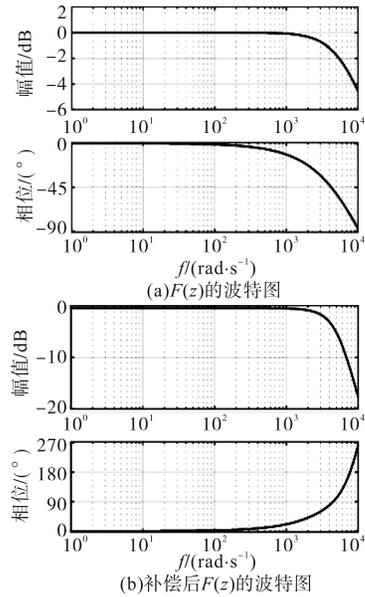


图7 PI控制下闭环传递函数补偿前后波特图

Fig.7 Bode diagram before and after closed-loop transfer function compensation under PI control

在理论分析的基础上,通过Matlab/Simulink平台搭建模型,分别对SVG补偿系统各种状态进行仿真。仿真中设置在0.1 s时投切SVG进行无功功率补偿,补偿波形如图8~图10所示。

图8中,以A相为例,对电网电压和电流在补偿前、补偿后进行波形比较,通过对比可知,补偿前,A相电流滞后于电压一定角度,补偿后两者相位基本相同。

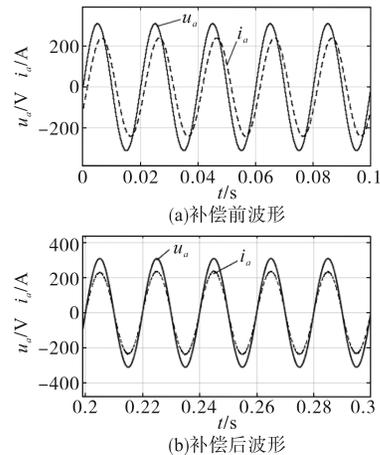


图8 A相电压和电流补偿前后波形

Fig.8 Waveforms of A-phase voltage and current compensation

图9中,对三相电网电流补偿前、补偿后波形进行比较,通过对比可知,补偿前C相电流明显大于A相、B相电流,补偿后三相电流基本平衡。

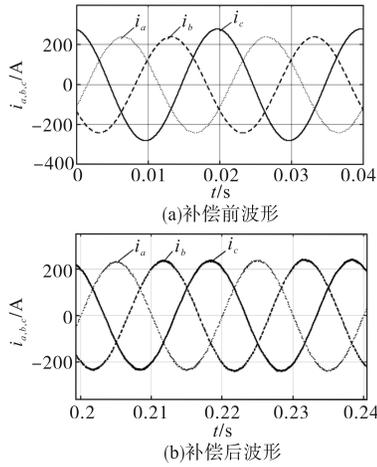


图9 电网三相电流补偿前后波形
Fig.9 Waveforms before and after three-phase current compensation in power grid

图10为系统补偿过程一些动态波形。从图10a可以看出,经过补偿,直流侧电压稳定在设定的850 V左右;从图10b可以看出,补偿前电网有功功率和无功功率分别为100 kW和50 kvar,补偿后,电网无功功率几乎为0;从图10c可以看出,采用快速重复PI控制时,补偿后系统的零序电流在0 A上下浮动,控制效果理想。

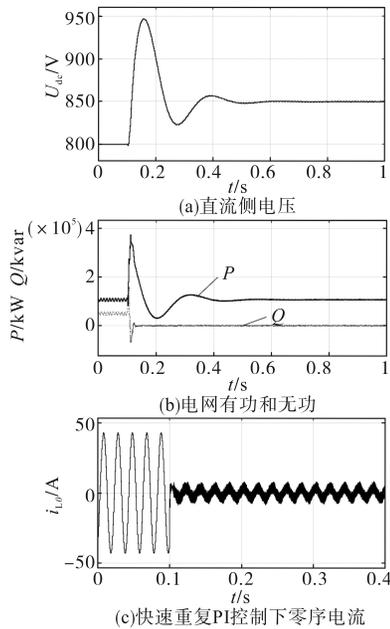


图10 系统补偿过程动态波形
Fig.10 Dynamic waveforms of system compensation process

5.2 实验研究

基于以上理论及仿真分析,根据盾构机三相四线制配电系统搭建了三相四桥臂SVG实验样机。样机以DSP28335为核心控制器,设定条件与仿真一致,采用上述SVG分序控制策略后补偿效果如图11所示。

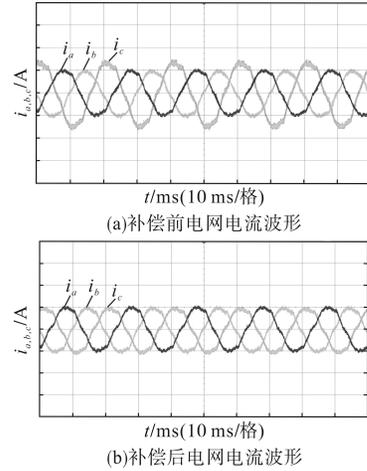


图11 SVG补偿前后电网电流波形
Fig.11 Experimental waveforms after SVG compensation

从图11可知,实验样机采用本文所述控制策略进行补偿后,电网三相电流基本平衡,为了进一步量化电流平衡效果,对电流不平衡度进行了定义,如下式:

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (23)$$

式中: ΔI 为电流不平衡度; I_{\max} , I_{\min} 分别为三相电流最大有效值和最小有效值。

对三相电流补偿前后的不平衡度进行测定,测定结果分析如表1所示。

表1 电网三相电流补偿前后平衡效果对比表

Tab.1 Comparison table of balance effect before and after three-phase current compensation in power grid

补偿状态	三相电流	有效值/A	不平衡度/%
补偿前	i_{sa}	139.5	21.4
	i_{sb}	140.2	
	i_{sc}	177.5	
补偿后	i_{sa}	139.8	0.71
	i_{sb}	140.4	
	i_{sc}	140.8	

表1对电网三相电流补偿前后平衡效果进行了对比。通过比较可以发现,三相电网电流的不平衡度在补偿前为21.4%,经过无功补偿后,下降到0.71%。所以,对于不平衡负载,采用本文所设计的控制方法,补偿后能够使电网电流满足国标(不平衡度<5%)。从图11还可以看出,虽然补偿后电网电流波形质量有很大改善,但是仍存在一定的畸变,这是由于电力电子器件的引入及电路之间相互干扰造成的。经测定,补偿后电网电流波形总谐波畸变率THD<5%,满足国家标准。

6 结论

本文以地铁隧道建设为背景,以盾构机供电系统为对象,对不平衡负载下三相四桥臂SVG的补偿电流提取和控制策略进行了深入研究。该策略对于正序和负序电流经过PI解耦后分别进行控制;对于零序电流,把快速重复和PI结合起来进行综合控制。通过仿真及实验验证,补偿效果良好。

参考文献

- [1] 薛光丽. 基于DSP的低压静止无功发生器的设计与实现[D]. 大连:大连海事大学, 2013.
- [2] Guo Weifeng, Xu Dianguo, Wu Jian, *et al.* United System of TSC and SVG for Reactive Power Compensation[C]//The 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China, 2010:507-511.
- [3] 马晓军, 姜齐荣, 王仲鸿. 静止同步补偿器的分相不对称控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1):52-56.
- [4] 赵香花, 陈远华, 刘文华. 一种星接链式STAT-COM不平衡补偿的新拓扑[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2):108-113.
- [5] 贾利虎. 三相四桥臂D-STATCOM电流预测控制方法研究[J]. 现代电力, 2015, 32(6):68-73.
- [6] 庄淑瑾, 孙玉坤, 任明炜, 等. 静止无功发生器的预测电流控制方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11):53-56.
- [7] 段春明, 郭昊, 赵思远. 三相四桥臂并网逆变器模型电流预测控制方法[J]. 智能电网, 2017, 345(2):153-158.
- [8] 赵涛, 王吉虎, 黄家才. 三相四桥基于PI和重复控制三相并网逆变器的设计[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1):20-22.
- [9] 李桂丹. 矿用静止无功发生器的重复PI控制策略研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(12):275-277.
- [10] 覃发梧. LCL型并网逆变器中PI+重复控制方法研究[J]. 电气开关, 2018(5):77-80.
- [11] 刘冰. 三相四桥臂静止无功发生器SVG的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2013.
- [12] 王思南. SVG在低压配电网三相不平衡治理中的应用研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [13] 汤云骏. 基于DSP的三相四线制不平衡负载下STATCOM补偿研究[D]. 广西:广西大学, 2016.
- [14] 刘俊杰. 静止无功发生器(SVG)的研究与设计[D]. 天津:天津理工大学, 2012.
- [15] 殷雄. 基于IGBT的静止无功发生器的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2010.
- [16] 王思然, 吕征宇. LCL型并网逆变器中重复控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27):69-75.
- [17] Rashed M, Klumpner C, Asher G. Repetitive and Resonant Control for a Single-phase Grid-connected Hybrid Cascaded Multilevel Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5):2224-2234.
- [18] Zeng Zheng, Yang Jiaqiang, Yu Nianchang. Research on PI and Repetitive Control Strategy for Shunt Active Power Filter with LCL-filter[C]//International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012, 4:2833-2837.
- [19] 刘鹏飞. 基于重复和PR复合控制的单相PWM整流器的研究[J]. 计算机技术及其应用, 2017, 39(2):22-25.

收稿日期:2019-07-31

修改稿日期:2019-09-19