

一种改进的STATCOM补偿指令电流检测方法

静止无功补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)的补偿效果很大程度上取决于其补偿指令电流的检测方法。当STATCOM补偿指令电流检测点与补偿点不在同一位置而产生电压相位差时,检测过程中将会有较大误差。针对上述问题,在传统 i_p-i_q 检测方法的基础上引入相位调节模块,详细分析该模块对于STATCOM补偿指令电流检测点与补偿点不在同一位置时对电压相位的调节性能,使其检测点和补偿点的输出相位相同。解决了STATCOM补偿指令电流检测点和补偿点的相位差异引起的补偿指令电流检测问题,提高检测准确度。理论分析和仿真结果验证了所提方法的有效性。

李圣清 袁 黎 白建祥 唐 琪/湖南工业大学电气与信息工程学院

0 引言

随着电力电子装置的广泛应用,给电网电能质量带来污染,不仅会严重影响供用电质量,也给生产带来很大的危害和安全隐患^[1-2]。因此必须采用具有快速调节性能的STATCOM对电网进行动态无功补偿,改善系统稳定性。其中补偿指令电流实时、准确的检测是STATCOM的核心环节,直接影响到STATCOM的补偿性能^[3]。

当前STATCOM补偿指令电流的检测方法通常分为基于频域和基于时域的检测方法两大类^[4-5]。基于频域的检测方法主要有快速傅里叶变换法、基于小波变换法的检测方法等。快速傅里叶变换法减少了计算量,提高了谐波运算速度,但其存在着频谱泄漏和栅栏现象,从而

使检测出谐波的幅值、相角和频率存在较大误差,不能够满足检测准确度的要求^[6-7]。基于小波变换法的检测方法检测准确度高,适合突变信号的分析与处理,但运算量大,用于STATCOM补偿指令电流的检测时,实时性不够^[8]。基于时域的检测方法是目前的研究热点,主要有基于Least Mean Square (LMS)算法的自适应对消法、基于Fryze Buchholz Dpenbrock (FBD)功率理论的检测方法和基于瞬时无功功率理论的检测方法等。基于LMS算法的自适应对消法具有自学习和自适应功能,使检测系统始终工作在最优状态,但是其动态响应速度慢^[9-11]。基于FBD功率理论的检测方法可应用于单相、两相及三相电路,实时性较好,但目前仅限于理论分析的研究,并没有广泛应用于实际^[12]。基于瞬时无功功率理论的检测方法可分为 $p-q$ 法和 i_p-i_q 法^[13-14]。在电网电压畸变的情况下, $p-q$ 法受电网电压畸变影响,检测结果有误差^[15];而 i_p-i_q 法实时性好,检测结果不受电网电压畸变的影响,在检测STATCOM补偿指令电流中得到广泛运用^[16]。然而,传统 i_p-i_q 法对STATCOM补偿指令电流检测点与补偿点不在同一位置进行检测时,会因为电压相位差而无法准确检测,具有一定的限制性。

本文提出一种基于瞬时无功功率理论的改进STATCOM补偿指令电流检测方法,在传统 i_p-i_q 检测方法的基础上引入相位调节模块,详细分析了该模块对于STATCOM补偿指令电流检测点与补偿点不在同一位置时对电压相位的调节性



李圣清/教授

关键词/Keywords

静止无功补偿器·
补偿指令电流·
检测方法·
相位调节模块·

湖南省自然科学基金项目(2015JJ5009),湖南省教育厅开放基金项目(15k036),湖南省高校科技创新团队(2014207),湖南省高校重点实验室(2014249)。

能,并运用Matlab/Simulink进行仿真研究。仿真与实验结果表明该算法在补偿指令电流检测点与补偿点不在同一位置的情况下仍具有良好的检测效果。

1 传统STATCOM补偿指令电流检测方法的局限性

目前常用的传统检测方法主要有基于瞬时无功率理论的 $p-q$ 检测法和 i_p-i_q 检测法,在检测STATCOM补偿指令电流中, i_p-i_q 检测法的误差更小,运用更加广泛。其原理图如图1所示。

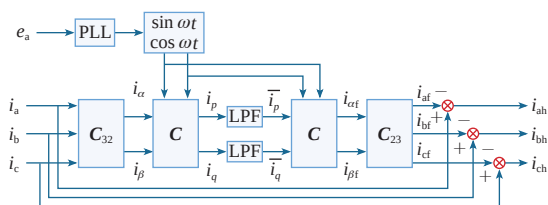


图1 i_p-i_q 检测方法原理图

系统a相电源电压 e_a 同相位的正弦信号 $\sin \omega t$ 和对应的余弦信号 $\cos \omega t$ 是由锁相环(PLL)和一个正、余弦信号发生电路得到。先将检测到的三相电流 i_a 、 i_b 和 i_c 进行坐标变换,得到旋转坐标系下电流的有功分量 i_p 和无功分量 i_q

$$\begin{pmatrix} i_p \\ i_q \end{pmatrix} = C \cdot C_{32} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$C = \begin{pmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{pmatrix} \quad (3)$$

经低通滤波器(LPF)进行滤波,得到对应的有功直流分量 $\bar{i}_p$ 和无功直流分量 $\bar{i}_q$,然后对其进行反变换就能得出三相基波电流为

$$\begin{pmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{pmatrix} = C_{23} C \begin{pmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, $C_{23} = C_{32}^T$, i_{af} 、 i_{bf} 和 i_{cf} 分别为被检测信号 i_a 、 i_b 及 i_c 的基波分量。

通过对传统 i_p-i_q 检测法的原理分析,不难看出,传统 i_p-i_q 检测法在检测过程中的相位信号来自同一相位信号,即补偿指令电流检测点的相位信号。当补偿指令电流的检测点与补偿点不在同一位置时,其相位之间会存在一定差异,如果仍用传统 i_p-i_q 检测法进行检测,必然会产生检测误差,从而影响STATCOM的补偿性能。因此,传统 i_p-i_q 检测法对于STATCOM补偿指令电流检测点与补偿点不在同一位置的情况下存在一定的局限性。

2 改进的STATCOM补偿指令电流检测方法

基于传统 i_p-i_q 检测方法的上述局限性,本文提出一种基于瞬时无功率理论的改进STATCOM补偿指令电流检测方法,在传统 i_p-i_q 检测方法的基础上引入相位调节模块,其模块结构如图2所示。

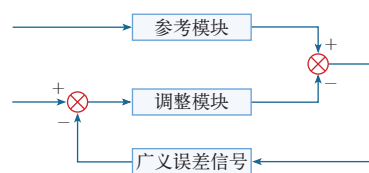


图2 相位调节模块

相位调节模块主要采用一个参考模块和一个调整模块进行调节。参考模块的输入设定为规定的或者期望的目标量,调整模块的输入设定为期望调节的初始量。得到参考模块的输出方程

$$\begin{cases} \dot{x}_r = A_r x_r + B_r u_r \\ y_r = C_r x_r \end{cases} \quad (5)$$

调整模块的输出方程

$$\begin{cases} \dot{x} = A x + B u \\ y = C x \end{cases} \quad (6)$$

为了对比初始量与期望的目标量之间的差异,通过减法器直接将参考模块的输出减去调整模块的输出,可以得到一个广义信号误差 e

$$e = y_r - y \quad (7)$$

将期望调节的初始量用减法器减去广义误差信号 e 来调节调整模块的输出,使广义误差信号 e 的指标逐渐变小,此时参考模块与调整模块的输出渐渐逼近,当广义误差信号 e 趋于极小甚至下降为

零时, 调节过程结束。

当STATCOM补偿指令电流检测点与补偿点不在同一位置时, 两点电压之间存在相位差, 将相位调节模型引入传统 $i_p - i_q$ 检测方法, 其实现原理如图3所示。

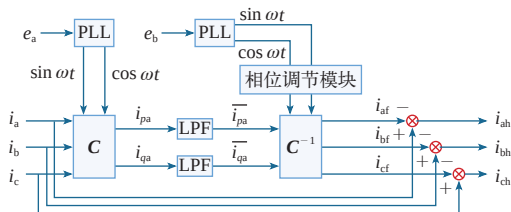


图3 改进的STATCOM补偿指令电流检测方法原理图

从STATCOM补偿指令电流检测点和补偿点处分别引入电压信息 e_a 、 e_b , 变换矩阵 C 是通过PLL和一个与 e_a 同相位的正余弦信号发生电路得到的, 变换矩阵 C^{-1} 是通过PLL和一个与 e_b 同相位的正余弦信号发生电路得到的, 由于STATCOM补偿指令电流检测点 e_a 与补偿点电压 e_b 相位不同, 使得变换矩阵 C 和逆变换矩阵 C^{-1} 不再是恒等矩阵。变换矩阵 C 为

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\cos(\omega t) & -\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

将检测点处电压 e_a 的相位 φ_a 作为参考模块的输入, 即设定的期望目标量。补偿点处电压 e_b 的相位 φ_b 作为调整模块的输入, 即设定的期望调节的初始量。通过减法器直接将参考模块的输出减去调整模块的输出, 可以得到一个广义信号误差 e

$$e = \varphi_a - \varphi_b \quad (9)$$

调整模块的输入 φ_b 通过减法器减去广义误差信号 e 来调节调整模块的输出

$$\varphi_{b1} = \varphi_b - e \quad (10)$$

此时参考模块的输出 φ_a 与调整模块的输出 φ_{b1} 的值相当接近, 广义误差信号 e 趋于极小甚至下降为零时, 相位调节过程结束。此时将调整模块的输出作为补偿点的相位信息, 使得其与检测点处相位差趋近于零, 逆变换矩阵 C^{-1} 可以直接通过

PLL和一个经相位调节后的调整模块输出相位信息得到

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (11)$$

经相位调节后, 可继续按照传统 $i_p - i_q$ 检测方法的原理对STATCOM补偿指令电流进行检测, 用负载电流减去其基波电流可得到谐波、负序分量和基波无功电流的总和, 既补偿指令电流 i_{ah} 、 i_{bh} 及 i_{ch}

$$\begin{cases} i_{ah} = i_a - i_{af} \\ i_{bh} = i_b - i_{bf} \\ i_{ch} = i_c - i_{cf} \end{cases} \quad (12)$$

此时检测出的STATCOM补偿指令电流不会因检测点与补偿点的电压相位差而产生检测误差, 能够有效地动态跟踪补偿指令电流, 大大提高了检测准确度。

3 仿真与实验结果分析

为了验证本文所提改进的STATCOM补偿指令电流检测方法的正确性与有效性, 根据上述检测原理, 在Matlab/Simulink的仿真平台上搭建STATCOM仿真模型进行了仿真与实验分析。分析了改进的STATCOM补偿指令电流检测方法检测出的电流波形, 更加直观地体现了改进的STATCOM补偿指令电流检测方法的良好检测效果。其仿真模型系统参数如下表所示。

表 仿真系统参数

电网频率/Hz	50
电源线电压/V	2 800
电源线电流/A	280
负载电阻/ Ω	10
负载电感/mH	10
线路电阻/ Ω	2
线路电感/mH	10

非线性负载的投入会使得电网中的电流被污染, 发生畸变。此时检测到的负载电流波形如图4所示, 可以明显看出, 负载电流波形出现了明显

的畸变, 电流中含有较多谐波, 补偿前的负载电流中总谐波失真 $\text{THD} = 10.23\%$, 大大降低电网中的电能质量。

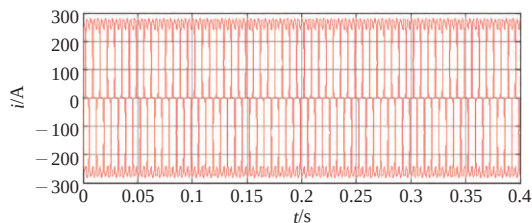


图4 负载电流波形

图5为本文改进后的STATCOM补偿指令电流检测方法检测到的补偿指令电流波形, 比较发现, 改进的STATCOM补偿指令电流检测方法检测到的补偿指令电流实时性好, 波形没有明显畸变的情况。因而, 本文所提改进型STATCOM补偿指令电流检测方法能够很好地解决检测误差的问题。

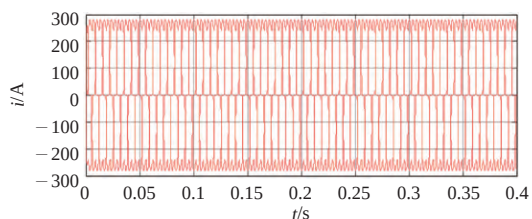


图5 检测到的STATCOM补偿指令电流

将本文所提改进的STATCOM补偿指令电流检测方法应用于STATCOM系统中进行实验, 从0.04 s开始, 将STATCOM投入, 对负载电流进行补偿。补偿后的电网电流波形如图6所示, 其谐波含量明显减少, 波形更加平滑, 没有明显畸变, 总谐波失真 THD 减小到1.85%。图7a为补偿前的电网电压波形, 其波形存在畸变与不平衡。图7b为利用本文所提改进的STATCOM补偿指令电流检测方法检测后进行补偿的电网电压波形, 可以明显看出, 补偿后的电网电压波形与补偿前相比更加平滑,

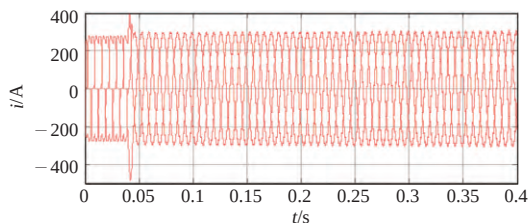
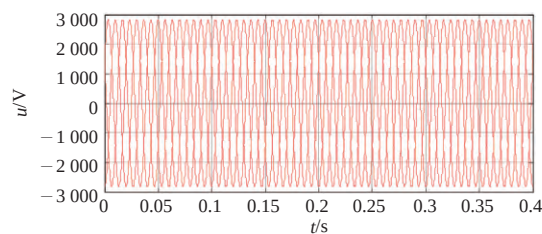
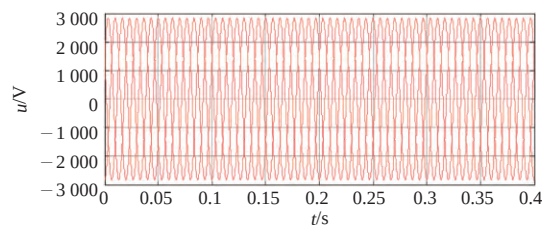


图6 补偿后的电网电流波形



(a) 补偿前的电网电压波形



(b) 补偿后的电网电压波形

图7 电网电压波形

更加趋于正弦波。结果验证了本文所提改进的STATCOM补偿指令电流检测方法具有良好的检测效果, 能够使STATCOM更加有效地对电网电流进行补偿。

4 结束语

本文深入分析了基于瞬时无功功率理论的 $i_p - i_q$ 算法的基本原理, 指出该方法在检测STATCOM补偿指令电流的局限性, 并在传统 $i_p - i_q$ 检测方法的基础上引入相位调节模块, 详细分析该调节模块对于STATCOM补偿指令电流检测点与补偿点不在同一位置时对电压相位的调节性能, 解决了STATCOM补偿指令电流检测点和补偿点的相位差异引起的检测问题。通过理论分析和仿真研究, 验证了本文所提相位调节模块适用于传统STATCOM补偿指令电流检测方法, 在此基础上搭建了实验系统, 通过实验再次验证了经改进的检测方法得到补偿指令电流后, STATCOM的良好补偿效果。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进君. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 李圣清. 电能质量治理技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

- [3] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [4] 常鲜戎, 王辉云, 张海生. DSTATCOM补偿指令电流的新型检测方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2819-2824.
- [5] 唐杰, 罗安, 涂春鸣, 等. 配电静止同步补偿器的补偿电流检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 108-112.
- [6] 向东阳, 王公宝, 马伟明, 等. 基于FFT和神经网络的非整数次谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 35-39.
- [7] 房国志, 杨超, 赵洪. 基于FFT和小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 75-79.
- [8] 周林, 夏雪, 万蕴杰, 等. 小波变换在三相不对称系统谐波检测中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 109-112.
- [9] 夏向阳, 罗安. 自适应频率跟踪的谐波电流检测方法[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1715-1719.
- [10] 曾令全, 白志亮, 曾德俊, 等. 基于自适应神经网络
- 网络的有源电力滤波器谐波电流提取方法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 33-37.
- [11] 刘传林, 刘开培. 基于新型变步长算法的自适应三相电路谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 123-128.
- [12] 陈仲. 并联有源电力滤波器实用关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [13] 周林, 孟婧, 刘强, 等. 基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 385-392.
- [14] 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.
- [15] 常伟, 史丽萍, 杜坤坤. 改进的 $p-q$ 检测法及其在STATCOM中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 95-99.
- [16] 周林, 张凤, 栗秋华, 等. 无锁相环 i_p-i_q 检测任意次谐波电流的新方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 129-133.

(收稿日期: 2015-09-06) EA

(上接第40页)

- [17] 宋文胜, 冯晓云, 谢望玉. 单相三电平整流器d-q坐标系下的控制欲SVPWM方法[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(4): 56-63.
- [18] Zhang R, Cardiml M, Szczesny P. A grid simulator with control of single_phase power conveners in d-q rotating franle [C]. Cairns, Australia, 2002: 1431-1437.
- [19] Salaet J, Busquets S, Bordomu J. A new strategy for decoupling direct and quadrature currents in a rotating frame current regulator [C]. Jeju, South Korea, 2006.
- [20] Salaet J I, A1epuz S, Gilaben A. Comparison between two methods of DQ transformation for single phase converters control [C]. Aachen, Germany, 2004: 214-220.
- [21] Mranda U A, Aredes M, RoliInL G B. A DQ synchronounous reference frame current control for single-phase converter [C]. Piscataway, NJ, USA: 2005: 1377-1381.
- [22] Jirawut Benjanarasut, Bunlung Neammanee. The d-, q- axis control technique of single phase grid connected converter for wind turbines with MPPT and anti-islanding protection – electrical power systems energy conversion paper ID 1436 [C]. The 8th Electrical Engineering, Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference 2011: 649-652.

(收稿日期: 2015-08-29) EA