

一种新型直接电流控制的链式STATCOM研究

传统STATCOM控制方法一般采用基于 dq 旋转坐标变换的技术,实现有功功率、无功功率解耦控制,但该方法需要复杂的计算,且对单相不能进行单独控制。提出一种直接基于三相静止坐标系下的准比例谐振控制器,实现STATCOM输出电流无静差跟踪给定参考电流。准比例谐振控制器在指定电流频率处具有无穷大的增益,在非指定频率处具有较大的衰减,无穷大增益保证了跟踪准确度非常高,无须进行复杂的坐标旋转变换及解耦运算,可实现三相之间独立控制,节约了控制芯片资源。并通过仿真及工程实例验证了该控制方法的正确性。

封书贞/中铁电气化局集团城铁公司

张 皎 卢敬伟/北京科锐博润电力电子有限公司

0 引言

大量的电力电子与冲击性负荷使电力系统面临谐波污染与电压闪变的问题;同时风电场的大规模接入造成了电能质量和低电压穿越问题^[1-2];智能电网与小容量电力系统的发展,使电能质量问题日益严重。作为电能质量治理的有效手段,静止同步补偿器(STATCOM)成为了研究的热点,其能够以毫秒级的速度调节输出类似于电容器或电抗器的电流补偿系统无功,在电网发生故障时紧急支撑电网电压,加快电网故障后的电压恢复,提高电网安全稳定性。对电力系统的智能化、绿色化起着核心推动作用。

传统的STATCOM控制将三相静止坐标系下的电压、电流正弦量转化为同步旋转坐标系下的直流量,这是因为PI控制器无法实现对交流信号的无静差跟踪。然而坐标变换使电流分量互相耦合,造成内环结构复杂,设计困难。本

文提出一种直接在三相静止坐标系下基于准比例谐振控制算法的控制方法,且该方法能够使STATCOM实现滤波功能,并通过仿真及实验装置验证了该方法的正确性及可行性。本文对STATCOM的基本原理、主电路、拓扑结构及控制策略进行了系统介绍。

1 STATCOM拓扑结构

STATCOM通常接入小于35 kV的中高压系统,级联H桥型STATCOM具有无多重变压器接入、效率高、模块化设计、控制简单以及成本低等优点^[3]。级联H桥型STATCOM的主电路拓扑如图1所示,子模块采用双极倍频调制,等效开关频率为载波频率的两倍,换流链由 N 个H桥子模块串联而成,子模块之间采用载波移相调制CPS-SPWM,从而提高换流链的等效开关频率。

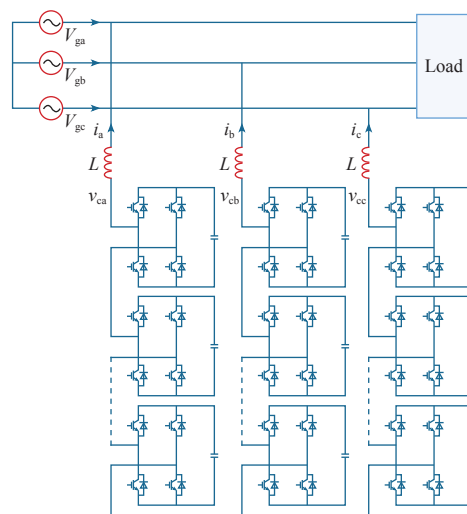


图1 STATCOM的主电路拓扑

在三相静止坐标系下,STATCOM的数学模型为



封书贞/高级工程师

关键词/Keywords

静止同步补偿器 ·
准比例谐振控制 ·
电流跟踪 ·
谐振频率 ·

$$L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, i_a 、 i_b 和 i_c 为装置输出电流; v_{ga} 、 v_{gb} 和 v_{gc} 为电网电压; v_{ca} 、 v_{cb} 和 v_{cc} 为STATCOM输出电压。

当STATCOM稳态运行时, 输出的有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} P = \frac{V_g V_c}{\omega L} \sin \delta \\ Q = \frac{V_g (V_c \cos \delta - V_g)}{\omega L} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 通过控制STATCOM输出交流电压的相位角 δ 来控制其吸收或发出的有功功率, 进而控制直流侧电容电压的稳定; 同时通过控制STATCOM输出交流电压的幅值来控制其输出的无功功率。

2 准比例谐振控制

比例谐振(PR)控制器可以实现对交流输入量的无静差控制^[4]。将PR控制器用于STATCOM的控制系统中, 可直接在三相静止坐标系下对电流进行调节, 同时可以简化控制过程中的坐标变换。PR控制器易受模拟系统元器件参数准确度和数字系统准确度的限制, 提出了一种易于实现的准PR控制器, 既可以保持PR控制器的高增益, 同时还可以有效地减小电网频率偏移对系统的扰动作用。

准PR控制器由比例环节和谐振环节组成, 后者又称广义积分器。准PR算法的传递函数表达式为

$$G_R(s) = K_p + \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} \quad (3)$$

式中, K_p 为比例控制增益; K_r 为谐振积分控制增益; ω 为谐振角频率; ω_c 为谐振角频率偏移。

准PR电流控制是调节STATCOM输出电流与给定参考电流的差值, 在一个设定的带宽内对该差值进行控制, 通过调节频率宽度可以调节跟随准确度。基波角频率对应的准PR控制器波特图如图2所示。

链式STATCOM的控制包括直流侧电容电压控制和目标电流跟踪控制, 后者包括基波无功电流控制(无功补偿功能)和谐波电流控制(滤波功

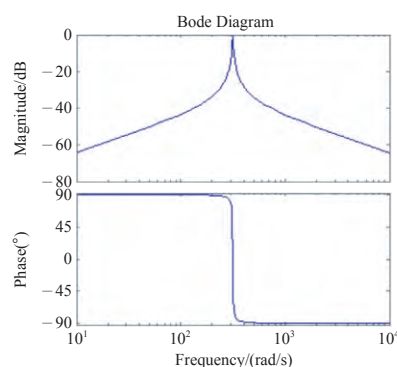


图2 基波角频率处准PR控制器波特图

能)。每相单独控制^[5], 控制框图如图3所示。每相直流母线电压参考值 v_{ref}^* 与实际值 v_{dc} 经过PI控制器后再经电网相位同步, 得到每相的有功参考电流 i_{pref}^* 。无功参考电流 i_{qref}^* 与输出电流 i_{abc} 经过基波或谐波PR控制器, 实现无功电流或谐波电流的补偿跟踪效果。

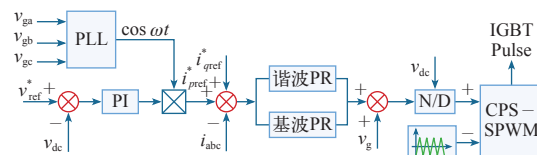


图3 STATCOM控制环框图

3 准PR控制器参数设计

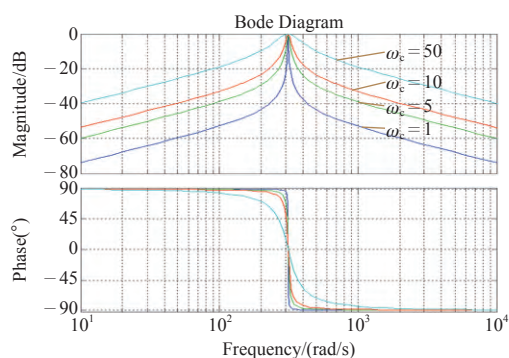
由式(3)可见, 准PR控制器需要对3个参数 K_p 、 K_r 和 ω_c 进行优化设计, 以提高系统的控制性能。

参数 K_p 影响系统的稳态性能和抗干扰能力, 因此取值不能太大或太小。太大会提升所有频率范围的增益, 降低系统的幅值裕度; 太小则系统的抗干扰能力变差, 一般选择 $K_p=1 \sim 10$ 。参数 ω_c 影响控制器的增益和带宽, 设频率波动范围为 ± 0.5 Hz, 则 $G_{q-PR}(\omega \pm \pi h) = 0.707 K_r$, 因此

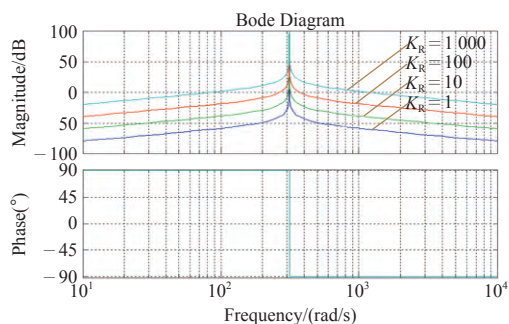
$$\omega_c = \frac{1}{2} h \left(\frac{\pi + 2\omega_0}{\pi + \omega_0} \right) \quad (4)$$

式中, ω_0 为基波角频率; h 为谐波次数。

以基波为例, 选定 K_p 、 K_r 后, 让 ω_c 的值变化, 观察系统的性能, 选择合适的 ω_c 参数, 不同 ω_c 值的波特图如图4所示。图4中, 从下到上 ω_c 依次为1、5、10和50。


 图4 不同 ω_c 值的波特图

参数 K_R 只影响控制器的增益,取值不宜太大,否则会减小系统的稳定性。以基波为例,在选定 K_p 和 ω_c 后,让 K_R 的值变化,观察系统的性能,不同 K_R 值的波特图如图5所示。图5中,从下到上 K_R 依次为1、10、100和1 000。


 图5 不同 K_R 值的波特图

4 准PR控制器数字化实现

准PR控制器的数字实现方法采用 z 算符对其进行离散化,即

$$G(s) = \frac{2K_R\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} = \frac{A}{s + \omega_c - \sqrt{\omega_c^2 - \omega_0^2}} + \frac{B}{s + \omega_c + \sqrt{\omega_c^2 - \omega_0^2}} \quad (5)$$

其中

$$A = K_R\omega_c \left(1 - \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 - \omega_0^2}} \right) \quad (6)$$

$$B = K_R\omega_c \left(1 + \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 - \omega_0^2}} \right)$$

将式(6)通过脉冲响应不变法转化成 z 变换,得

$$G(z) = \frac{Az}{z - e^{-(\omega_c - \sqrt{\omega_c^2 - \omega_0^2})T}} + \frac{Bz}{z - e^{-(\omega_c + \sqrt{\omega_c^2 - \omega_0^2})T}} \quad (7)$$

$$\text{设 } C = \begin{pmatrix} e^{-(\omega_c - \sqrt{\omega_c^2 - \omega_0^2})T} \end{pmatrix}; D = \begin{pmatrix} e^{-(\omega_c + \sqrt{\omega_c^2 - \omega_0^2})T} \end{pmatrix}.$$

则

$$G(z) = \frac{A}{1 - z^{-1}C} + \frac{B}{1 - z^{-1}D} = \frac{(A+B) - (AD-BC)z^{-1}}{1 - (C+D)z^{-1} + CDz^{-2}} \quad (8)$$

设 $Y = GX$,则转化成差分函数后,可表示为

$$y(n) = (C+D)y(n-1) - CDy(n-2) + (A+B)x(n) - (AD-BC)x(n-1) \quad (9)$$

该离散化计算过程采用Matlab中对应函数实现,之后转化为差分方程形式在硬件中实现,最重要的一步是系数量化,需要结合数据准确度及硬件资源双重考虑。

5 仿真与工程实例

5.1 仿真结果

应用PSCAD仿真工具,建立了基于准PR控制器的STATCOM系统模型^[7-9]。电路参数为:三相电源电压10 kV/50 Hz,换流器桥链中级联H桥串联个数为12,每个H桥直流侧电容为6 300 μ F、电容电压稳定在850 V,交流侧输出电感为5 mH,载波频率为500 Hz,死区时间为6 μ s。

STATCOM在给定参考电流突变时,输出电流波形如图6所示,在0.5 s处给定电流由容性100 A变为容性200 A,再在0.54 s处变为感性100 A。在电流突变过程中,该跟踪控制算法响应时间短,跟踪准确度高。

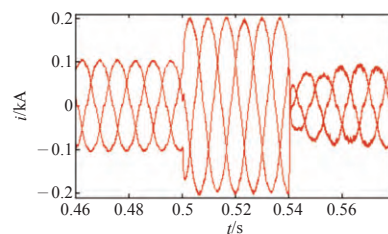


图6 三相输出电流动态波形

5.2 工程实例

华润新能源辽宁阜蒙驿马池风电项目35 kV无功补偿设备^[10],STATCOM的额定容量为 ± 5 Mvar,额定电压5.3 kV,采用连接变压器接入电网。STATCOM输出容量+3.5 Mvar时,三相输出电流及直流侧电容电压的实验波形如图7所示。由图中

可知, 输出电流良好地跟踪给定无功参考电流, 直流侧电容电压基本稳定在设定值0.82 kV处, 且波动范围在允许的 $\pm 10\%$ 以内。

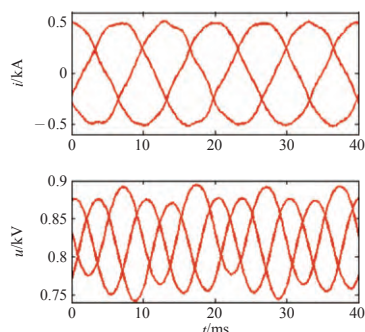


图7 三相输出电流及直流侧电容电压波形

6 结束语

本文提出了在三相静止坐标系下的准比例谐振控制方法。该方法无须进行复杂的坐标旋转变换, 实现了STATCOM无功补偿及滤波功能。仿真结果和工程实例都验证了该方法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 郑重, 杨耕, 耿华. 配置STATCOM的DFIG风电场在不对称电网故障下的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013(19): 27-38, 22.
- [2] 田桂珍, 王生铁, 刘广忱, 等. 采用STATCOM改善笼型风电场性能的机理分析与实验研究[J].

(上接第29页)

用, 如何对多源异构的电动汽车数据进行挖掘分析, 寻找其中的潜在价值引人深思。大数据技术在电动汽车数据领域的运用将势在必行。

电动汽车产业进入大数据移动互联网时代, 应该用大数据的思维观念来处理数据, 挖掘数据的潜在价值。电动汽车作为通信、计算机、电力电子、动力控制和驱动技术以及新材料技术等交通运输领域集成应用的产物, 也为云计算、大数据和智能终端等新技术提供了率先应用的环境。大数据的开发应用以及互联网思维的充分运用, 将会推动电动汽车产业更加快速发展, 创造美好的环境以及美好的生活。

电网技术, 2013(7): 1971-1977.

- [3] 许湘莲. 基于级联多电平逆变器的STATCOM及其控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [4] 张数全. 基于分频控制的并联型APF关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [5] 刘钊, 刘邦银. 系统电压不平衡下链式静止同步补偿器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 1-7.
- [6] 杭丽君, 李宾, 黄龙, 等. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振PR电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 51-58.
- [7] 赵国生, 路向东, 刘楷. 链式SVG直流侧电压分层控制策略的研究[J]. 电测与仪表, 2014(9): 45-49.
- [8] 盛占石, 蒋栗彦, 虞礼贵. 直接电流控制的静止无功发生器的研究[J]. 电测与仪表, 2009(9): 53-56.
- [9] 黄知超, 杨升振, 延红艳, 等. 基于dq坐标系有功无功电流解耦空间电压矢量的STATCOM控制方法[J]. 电测与仪表, 2012(12).
- [10] 陶礼学, 姚钢, 周荔丹, 等. 基于IGBT的 ± 10 kvar STATCOM装置设计[J]. 电气自动化设备, 2006(5): 61-65.

(收稿日期: 2015-11-25) **EA**

参考文献

- [1] 金澈清, 钱卫宁, 周傲英. 流数据分析与管理综述[J]. 软件学报, 2004, 5(8): 1172-1181.
- [2] Stonebraker M, Abadi D J, Madden S, et al. MapReduce and parallel DBMSS: friends or foes[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(1): 64-71.
- [3] Wong P C, Shen H W, Chen C, et al. Top ten interaction challenges in extreme-scale visual analytics[J]. Computer Graphics and Applications, 2012, 32(4): 63-67.

(收稿日期: 2015-08-26) **EA**