

单电流检测配网静止同步补偿器的改进控制策略

刘 骥¹,徐在德¹,高岩涛²,黄 玲¹

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院,黑龙江 哈尔滨 150080;2. 大庆电业局,黑龙江 大庆 163464)

摘要: 主要阐述了应用于配网静止同步补偿器(DSTATCOM)单电流控制方案及其改进策略,并对直流侧稳压问题进行了详细的分析,给出了控制直流侧电容电压稳定的PI参数整定方法,并引入了自适应模糊PI控制器,直流侧电容电压采用PI和自适应模糊PI 2种控制方式进行了对比。对采用所提电流控制策略的DSTATCOM进行了仿真研究,并制作了实验样机。仿真和实验验证了该控制策略应用于DSTATCOM的有效性和可行性,实验结果同时证明采用自适应模糊PI控制的DSTATCOM系统响应速度更快,而且没有超调和振荡,具有较强的鲁棒性。

关键词: 配网静止同步补偿器;PI参数;模糊控制;不平衡负载;电能质量;无功功率;补偿

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.011

0 引言

静止同步补偿器(STATCOM)是一种并联型无功补偿的柔性交流输电系统(FACTS)装置,它能够发出或吸收无功功率,用于配电网的STATCOM通常又称为配电网静止同步补偿器(DSTATCOM),其可以对电网谐波以及无功进行补偿,实现对电网的净化,因而DSTATCOM已经成为解决电力系统电能质量问题的重要装置。

国内的配电网静止同步补偿器的电流检测算法主要是采用 i_p-i_q 法^[1-2]、 $d-q$ 矢量变换^[3-5]等控制策略,但都要检测负载和补偿电流,精确计算补偿量。近年来,国内也开始研究电源电流的直接控制策略,虽然给出了这种控制方法的基本原理,但都没有给出该方法的详细理论分析^[6-7],尤其是在PI参数选择的方法原则以及理论依据方面尚无文献报道。

目前大多DSTATCOM都要进行谐波和无功的检测,并以此作为补偿的依据进行实时补偿,直流侧电容电压稳定性的控制目前大多采用PI控制方式^[8-10],传统PI控制的动态性能差,响应速度较慢,超调量较大,暂态过程中容易击穿电容。

针对上述情况,本文提出更实用的控制方式,不需要对谐波和无功进行检测,采用直接控制电源电流的方式,硬件简单化,提高实时性,降低成本。同时为了克服传统PI的缺点,本文采用了自适应模糊控制器来控制直流侧电容电压,具有较强的鲁棒性和适应性。自适应模糊PI控制器实现了PI参数的最优调整,进一步加强系统对不确定因素的适应性,它

不依赖于系统精确的数学模型,具有很强的适应性。本文通过仿真和实验证明采用无谐波和无功检测单元的直接控制电源电流的方式,同样能达到理想的补偿效果。对PI控制和自适应模糊PI控制的直流侧电容电压进行了动态的对比,结果表明采用自适应模糊PI控制器,系统的超调更小,响应速度更快。

1 直接控制电流的DSTATCOM原理

与传统的DSTATCOM系统相比,本文提出的DSTATCOM控制方案省去了复杂的谐波和无功的检测单元以及相应的硬件电路。其主回路原理图如图1所示。

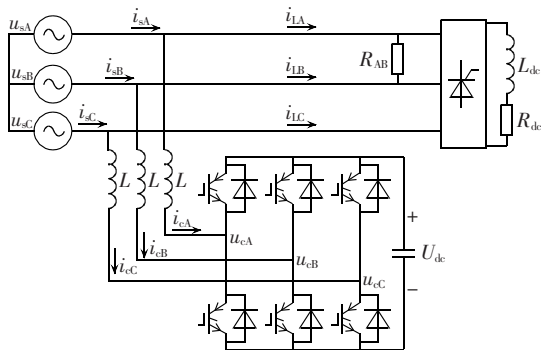


图1 DSTATCOM主回路原理图

Fig.1 Main circuit of DSTATCOM

由图1可以知道,DSTATCOM的主回路主要是由逆变桥、直流侧电容、耦合电感组成。目前大多数DSTATCOM都需要检测谐波和无功电流,将检测的结果作为补偿的依据,然后通过DSTATCOM提供补偿电流 i_c ,消除流入电网的无功和谐波电流^[11-13]。

DSTATCOM控制系统结构图如图2所示。其中,采用直接控制电源电流的DSTATCOM,补偿电流设定值 i_s^* 的幅值 I_m 是由直流侧电容电压设定值与实际值之差 ΔU_c 通过自适应模糊PI控制器调节后

收稿日期:2012-01-21;修回日期:2013-01-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2012-CB723308);黑龙江省自然科学基金资助项目(E1023)
Project supported by the State Key Basic Research Development Program of China(973 Program)(2012CB723308) and the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province(E1023)

$10\ \Omega, L_{dc}=10\ \text{mH}, R_{ab}=5\ \Omega$ 。

系统在 $t=0.05\ \text{s}$ 时投入 DSTATCOM, 图 5(a) 为投入前 A 相的电压、电流曲线, 图 5(b) 为投入后 A 相的电压、电流波形。通过对比可知, 采用直接控制电源电流方式, 谐波和无功补偿效果非常理想。

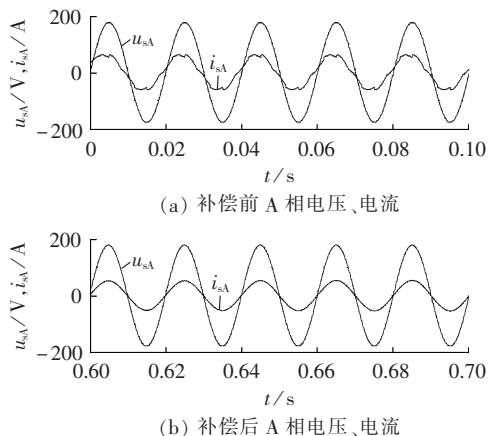


图 5 电源电流控制的 DSTATCOM 的 A 相补偿效果

Fig.5 Compensation waveforms of DSTATCOM based on source current control for phase A

图 6(a) 为采用普通 PI 控制的 DSTATCOM A 相电流的过渡曲线, 图 6(b) 为采用自适应模糊 PI 控制的 DSTATCOM A 相电流的过渡曲线。由曲线对比可知, 采用自适应模糊 PI 控制电流大概需要 4 个工频周期可以达到稳定, 采用 PI 控制电流大概需要 8 个工频周期才可以达到稳定。

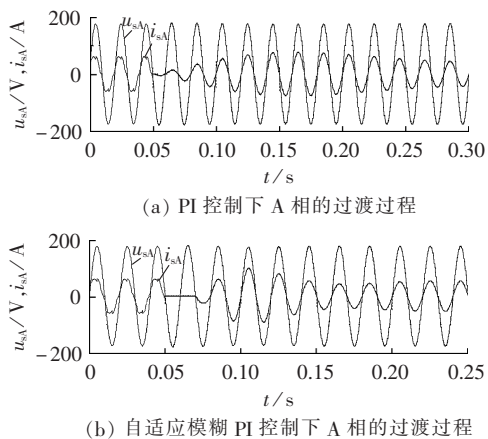


图 6 电源电流控制的 DSTATCOM 的 A 相过渡过程

Fig.6 Transient waveforms of DSTATCOM based on source current control for phase A

图 7(a) 为投入 DSTATCOM 前的三相电流曲线, 可明显地看出, 三相存在严重的不平衡现象且含有大量谐波; 图 7(b) 为投入 DSTATCOM 后的波形, 通过对比可知, 采用直接控制电源电流方式的 DSTATCOM 可以使三相系统电流实现平衡, 并且可以补偿无功, 滤除谐波; 图 7(c) 为 DSTATCOM 提供的补偿电流。

图 8(a)、(b) 为投入 DSTATCOM 后 2 种控制方

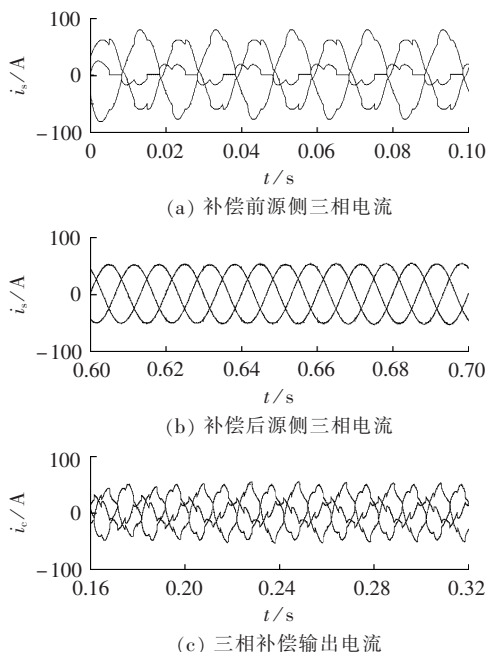


图 7 电源电流控制的 DSTATCOM 三相补偿效果

Fig.7 Three-phase compensation waveforms of DSTATCOM based on source current control

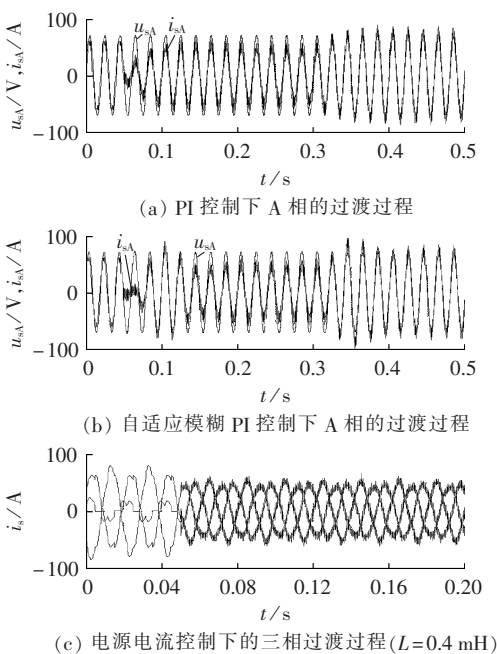


图 8 电源电流控制的 DSTATCOM 的过渡过程

Fig.8 Three-phase transient waveforms of DSTATCOM based on source current control

式下的 A 相电流过渡过程曲线, 图 8(c) 为将 $1.0\ \text{mH}$ 耦合电感减小为 $0.4\ \text{mH}$ 后的三相过渡过程波形, 可见暂态响应时间明显缩短, 可以控制在 1 个周期内。

由图 2 的 DSTATCOM 控制系统结构图可知, 投入的一瞬间, 电容电压设定值和实际值之间的差值 ΔU_c 为 0, 所以经过 PI 调节后的电流 I_m 也为 0, 此时系统电流的设定值 i_s^* 也就为 0, 由式 (6) 可以明显看出, 此时滞环比较的输入为系统实际电流 i_s 自身作

差,所以造成系统电流瞬间为 0 的现象,如图 8(b) 0.05 s 投入起始时刻的波形所示;但是伴随着电容的放电,PI 调节后的电流 I_m 逐渐增加,此时 i_s^* 也逐渐增加,从而使系统电流逐渐增加,最后趋于稳定。

图 9 为直流侧电容电压的波动曲线。可知,采用普通 PI 调节,系统稳定到额定电压值 750 V 大概需要 0.2 s;采用自适应模糊 PI 调节,系统稳定到额定电压值 750 V 大概需要 0.1 s,并且基本上没有超调,电压波动不大,对比可知采用自适应模糊 PI 控制,系统的响应速度加快。

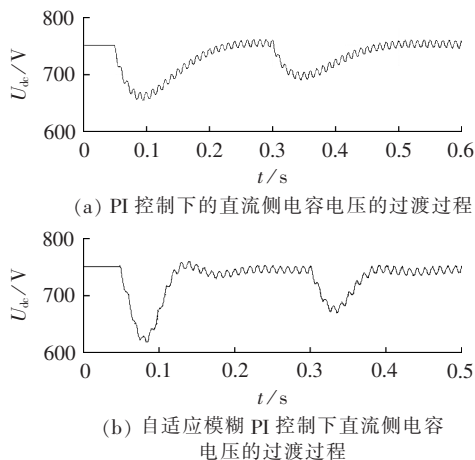


图 9 2 种控制方式下初始时刻电容电压的过渡过程
Fig.9 Transition process of initial capacitor voltage under two control modes

为了验证所提控制方案的可行性,按图 1 结构原理开发了一套针对此种控制方案的 DSTATCOM 实验样机,对其无功补偿效果进行验证。实验装置:系统直流侧电容 $C=3300\mu\text{F}$,电容电压的设定值为 $U_{\text{Cref}}=120\text{V}$,负载 $L=13.8\text{mH}$, $R=5.6\Omega$,PI 设定参数为 $k_p=0.2$, $k_i=5.0$,分别采用 FLUKE 434 电能质量分析仪和 TDS3014B 示波器进行电压、电流测量,结果如图 10、图 11 所示。

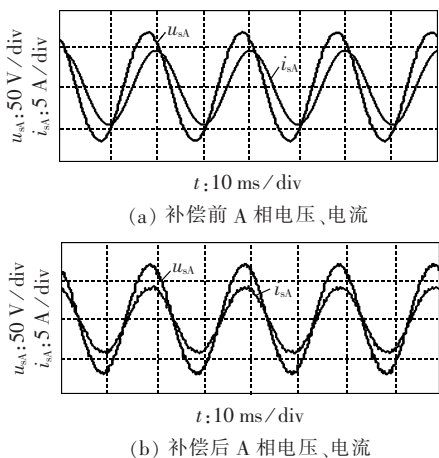


图 10 电源电流控制的 DSTATCOM 的 A 相补偿试验结果

Fig.10 Test results of DSTATCOM with source current control for phase A

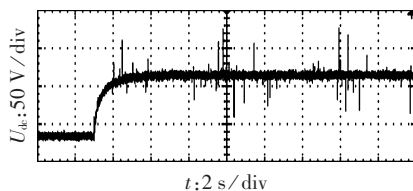


图 11 直流侧电容电压测试曲线
Fig.11 Test curve of DC side capacitor voltage

由图 10(a)和(b)的对比可知该方法在实际应用中也是可行的,完全满足要求。通过功率因数补偿前后的对比可知,补偿前功率因数为 0.8,含有较多的无功,补偿后功率因数为 0.99,补偿了无功,并且基本没有谐波产生。

图 11 为投入 DSTATCOM 后直流侧电容电压的过渡过程。可知,系统经过约 0.8 s 达到稳态,之后电容电压一直比较稳定。

5 结语

针对传统 DSTATCOM 复杂的谐波和无功检测单元,本文采用了结构简单的直接控制电源电流的 DSTATCOM,通过仿真与实验验证表明采用不检测无功和谐波电流、单独控制电源侧电流的控制模式同样能达到滤除谐波、补偿无功的目的,而且控制软件硬件实现更简单;通过对传统 PI 控制和自适应模糊 PI 控制的直流侧电容电压进行了动态对比,结果表明采用自适应模糊 PI 控制器,系统响应速度加快,鲁棒性强,特别是在三相不平衡的条件下,可以较准确地对三相进行补偿,使三相达到平衡状态,并且使系统迅速达到稳定状态。

通过实验样机实验验证和仿真分析,同时证明采用该控制策略后,DSTATCOM 具有较好的动态和稳态性能。

参考文献:

[1] 连建阳,谢川,陈国柱. 三相四线级联 DSTATCOM 高性能控制新策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):55-59.
LIAN Jianyang,XIE Chuan,CHEN Guozhu. High performance control strategy based on three-phase four-wire cascaded DSTATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):55-59.
[2] CHANG G W,SHEE T C. A novel reference compensation current strategy for shunt active power filter control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1751-1758.
[3] 涂春鸣,李慧,唐杰,等. 基于直接电流控制的 DSTATCOM 装置研制[J]. 高电压技术,2008,34(6):1173-1178.
TU Chunming,LI Hui,TANG Jie,et al. Development of DSTATCOM based on direct current controller[J]. High Voltage Engineering,2008,34(6):1173-1178.
[4] 荣飞,罗安,盘宏斌,等. 改进 dq 变换法及在 STATCOM 中应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(9):36-39.
RONG Fei,LUO An,PAN Hongbin,et al. Improved dq transfor-

- mation method and its application in STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 36-39.
- [5] 刘钊,肖白露,康勇,等. 基于 D-STATCOM 的串联解耦控制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 78-81.
LIU Zhao, XIAO Bailu, KANG Yong, et al. Series decoupling control based on D-STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 78-81.
- [6] 王广柱. 有源电力滤波器谐波和无功检测的不必要性讨论(一)——理论分析和比较[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 137-141.
WANG Guangzhu. An investigation on the unnecessary of harmonic and reactive current detection for active power filter (part I)—theoretical analysis and comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 137-141.
- [7] 何娜,武健,徐殿国. 有源电力滤波器直流电压的模糊控制[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 45-48.
HE Na, WU Jian, XU Dianguo. Fuzzy control of DC voltage in active power filter[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 45-48.
- [8] 鄂飞,程汉湘. 提高 DSTATCOM 工作稳定性的研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 41-44.
E Fei, CHENG Hanxiang. Research on improvement of DSTATCOM stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(1): 41-44.
- [9] 谭甜源,姜齐荣,李刚,等. 基于电流跟踪控制的三电平 DSTATCOM 装置的控制方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 61-64.
TAN Tianyuan, JIANG Qirong, LI Gang, et al. Industry application of three-level DSTATCOM based on direct current control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 61-64.
- [10] 汤赐. 配电网静止同步补偿器的非线性控制方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 18-23.
TANG Ci. Nonlinear control method of DSTATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 18-23.
- [11] 王群,姚为正,王兆安. 低通滤波器对谐波检测电路的影响[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 5-8.
WANG Qun, YAO Weizheng, WANG Zhaoan. Effect of low pass filter on harmonics detection circuit[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(4): 5-8.
- [12] 吴振兴,邹旭东,黄清军,等. 三相电力电子负载并网变换器研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(24): 1-7.
WU Zhenxing, ZOU Xudong, HUANG Qingjun, et al. Research on grid connection converter of three-phase power electronic load[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(24): 1-7.
- [13] 杨晓峰,范文宝,王晓鹏,等. 基于模块组合多电平变换器的 STATCOM 及其控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 7-13.
YANG Xiaofeng, FAN Wenbao, WANG Xiaopeng, et al. Static synchronous compensator based on modular multilevel converter based STATCOM and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 7-13.
- [14] DIXON J, CONTARDO J, MORAN L. DC link fuzzy control for an active power filter, sensing the line current only[C]//28th Proc Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. St. Louis, USA: IEEE, 1997: 1109-1114.
- [15] JAIN S K, AGRAWAL P, GUPTA H O. Fuzzy logic controlled shunt active power filter for power quality improvement[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 149(5): 317-328.
- [16] VISWANATHAN K, SRINIVASAN D, ORUGANTI R. Design and analysis of SISO fuzzy logic controller for power electronic converters[C]//Proc IEEE International Conference Fuzzy System. [S.l.]: IEEE, 2004: 1293-1398.

作者简介:

刘 骥(1972-),男,辽宁丹东人,教授,研究方向为谐波抑制与无功补偿、电力电子技术电网中的应用(E-mail:liuji@hrbust.edu.cn);

徐在德(1984-),男,山东寿光人,助理工程师,研究方向为电网柔性交流输电技术;

高岩涛(1972-),男,黑龙江肇东人,高级工程师,研究方向为电能质量分析与控制;

黄 玲(1975-),女,河南信阳人,博士,研究方向为模糊控制在电网技术中的应用。

Improved compensation scheme of DSTATCOM based on single current control

LIU Ji¹, XU Zaide¹, GAO Yantao², HUANG Ling¹

(1. Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Daqing Electric Power Bureau, Daqing 163464, China)

Abstract: The improved compensation control of DSTATCOM(Distribution STATic synchronous COMPensator) based on independent source current control is presented and the voltage stability of DC side is analyzed in detail. The adaptive fuzzy PI controller is adopted for DC voltage stabilization and the setting of PI parameters is introduced. Comparison is carried out between general PI controller and adaptive fuzzy controller for stabilizing DC voltage. The simulative investigation of DSTATCOM with the proposed control strategy and the test of prototype prove its validity and feasibility, and show that, without overshoot and oscillation, the DSTATCOM system with adaptive fuzzy controller has faster response and strong robustness.

Key words: DSTATCOM; PI parameters; fuzzy control; unbalanced load; power quality; reactive power; compensation