

基于软件优化的 D-STATCOM 新型控制策略

常鲜戎¹, 王辉云¹, 郭一杰², 杨永华³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 河北 保定 071003;
2. 新疆电力公司乌鲁木齐电业局, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 佛山市发电厂, 广东 佛山 528000)

摘要: 控制延时会导致配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)对谐波抑制和无功补偿的精度降低。为改善传统控制策略滞后时间长、补偿效果差的缺点,提出了一种基于软件优化的新型控制策略。通过对D-STATCOM补偿指令电流的特性进行分析,对软件流程进行相应调整,缩短了谐波和无功补偿指令电流的计算延时,使补偿滞后大大减少,谐波抑制和无功补偿的精度得到明显提高。该策略无需复杂算法,实现简单、有效。在Matlab/Simulink环境中进行了仿真分析,并且研制了一台容量为10 kVA的三相四线制D-STATCOM实验样机进行验证,结果证明了新型控制策略的正确性和可行性。

关键词: 配电网静止同步补偿器; 软件优化; 补偿滞后; 谐波抑制; 无功补偿

A novel control strategy based on software optimization for D-STATCOM

CHANG Xian-rong¹, WANG Hui-yun¹, GUO Yi-jie², YANG Yong-hua³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Urumqi Electric Power Bureau, Xinjiang Electric Power Corporation, Urumqi 830011, China; 3. Foshan Thermal Power Plant, Foshan 528000, China)

Abstract: Control delay significantly affects the performance of distribution static synchronous compensator (D-STATCOM) in harmonic suppression and reactive power compensation. To overcome the drawback of the conventional control method, which has long compensation delay and low compensation accuracy, a novel control strategy based on software optimization is proposed. Software flow is adjusted based on the analysis of the reference compensation currents. It shortens the calculation delay of harmonics and reactive power compensation reference current, so compensation delay occurs less and compensation accuracy of harmonic suppression and reactive power compensation is improved. Results obtained by D-STATCOM simulations system built in Matlab/Simulink and prototype experiment of a 10 kVA three-phase four-wire D-STATCOM show the validity and feasibility of the proposed strategy.

Key words: D-STATCOM; software optimization; compensation delay; harmonic suppression; reactive power compensation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0117-05

0 引言

配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)是一种用于动态补偿无功,抑制谐波和三相不平衡的新型电力电子装置,是目前电能质量控制领域的研究热点^[1-4]。D-SATATCOM 普遍采用数字控制方式,数控方式具有抗干扰能力强、控制方法改变灵活等优点。但是数字控制需要使用软件对信号进行计算、处理,这导致了控制滞后^[5-7]。在 D-STATCOM 的控制过程中,滞后时间约为一个采样周期,该滞后来自 A/D 采样、补偿计算和 D/A 输出等环节^[8]。滞后时间导致本次采样周期形成的控制指令要到下一采样周期才起作用。滞后时间长不仅导致 D-STATCOM 无功补偿不彻底,严重时还会对高次谐

波的补偿产生正反馈。因此,减少补偿滞后是提高 D-STATCOM 补偿性能的关键问题。

一些学者针对这个问题提出了相应的处理策略,文献[9]提出了一种利用上一采样周期的采样数据来预测本次周期补偿指令的方法。这种方法在稳态情况下能较好地减少滞后,但当负载电流变化较快时会导致较大误差。文献[10-11]指出基于理想系统模型的开环电流观测器无法使电流观测误差收敛到零,提出了采用闭环电流观测器减小滞后的影响,但其计算量大,算法复杂。文献[12]是在滞后产生后,在紧随其后的时间间隔对补偿指令进行修正,但修正后的指令从产生到作用之间的滞后时间仍然较大。

本文基于瞬时无功功率理论^[13-14]的 i_p - i_q 法,通

过分析传统控制方法的软件流程，提出一种基于软件优化的控制策略，使补偿滞后大大减少，谐波和无功补偿的精度得到提高。给出了三相四线制 D-STATCOM 的仿真分析和容量为 10 kVA 的样机实验结果，证明了该策略的正确性和可行性。

1 传统 D-STATCOM 软件处理流程

传统基于瞬时无功功率理论 i_p-i_q 法的 D-STATCOM 控制原理如图 1 所示。

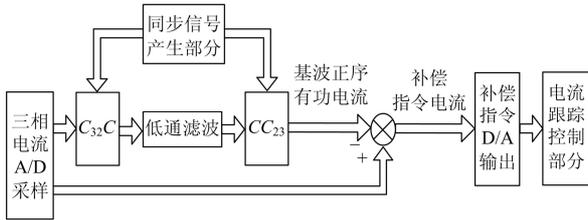


图 1 基于 i_p-i_q 法的 D-STATCOM 控制原理图

Fig. 1 Control schematic of D-STATCOM based on

i_p-i_q method

图中：
$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}, C_{23} = C_{32}^T \quad (1)$$

$$C = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， ω 为电网基波角频率。

传统控制策略的基本思想是在本次采样周期采样负荷电流后，计算出基波正序有功电流，之后用负荷电流减去基波正序有功电流得到补偿指令电流，最后将补偿指令 D/A 输出至电流跟踪控制部分产生驱动脉冲进行控制。

以研制的容量 10 kVA 的 D-STATCOM 样机为例，采样周期 78 μs ，给出传统控制策略的软件流程和时间分布图如图 2 所示。可以看出，基波正序有功电流的计算占用了绝大部分时间，导致补偿指令的产生时刻滞后于 A/D 采样时刻 74 μs ，补偿滞后较大，由文献[15]可知，补偿滞后导致补偿后的电网电流产生畸变和相位滞后，补偿滞后时间越长，谐波抑制和无功补偿的效果越差。

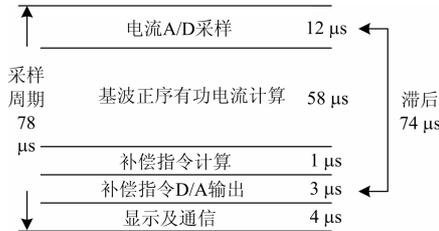


图 2 传统控制策略的软件流程

Fig. 2 Software flow of traditional control strategy

2 基于软件优化的新型控制策略

补偿指令电流是通过负载电流减去基波正序有功电流得到，所以，减少基波正序有功电流的计算时间是减少补偿滞后的关键。显然，采用高运算速度的处理器可以减少计算时间，但带来了高成本的缺点。

如果在上一采样周期能确定本次采样周期的基波正序有功电流，那么在本次采样周期到来时就能快速地得到补偿指令电流，从而减少补偿滞后。由于相邻采样周期的基波正序有功电流的幅值变化很小，因此为提前得到基波正序有功电流，只需对反映其相位信息的矩阵 C 进行相应修改。

上一采样周期的电流 A/D 采样至本次采样周期的补偿指令 D/A 输出之间的时间由采样周期、A/D 采样时间、补偿指令计算和 D/A 转换时间组成，定义为 ΔT 。对矩阵 C 进行相位补偿得

$$C = \begin{bmatrix} \sin\omega(t + \Delta T) & -\cos\omega(t + \Delta T) \\ -\cos\omega(t + \Delta T) & -\sin\omega(t + \Delta T) \end{bmatrix} \quad (3)$$

这样就可以利用上一采样周期的数据计算出本次采样周期的基波正序有功电流。当本次采样周期到来时，采样得到负载电流，直接减去基波正序有功电流便可快速得到补偿指令，之后补偿指令经 D/A 输出进行控制。新型控制策略的软件流程如图 3 所示，其基本思想是将补偿指令计算和 DA 输出提前至基波正序有功电流计算之前。通过软件优化后，新型控制策略的滞后时间缩短为电流采样、补偿指令计算和 D/A 转换时间之和，补偿滞后时间仅为 16 μs ，明显小于传统策略。



图 3 新型控制策略的软件流程

Fig. 3 Software flow of novel control strategy

3 仿真与实验结果

本文在 Matlab/Simulink 仿真环境中搭建 D-STATCOM 模型，对传统策略和新型策略进行仿真对比，仿真原理图如图 4 所示。

仿真参数：电网三相电压有效值 220 V，频率 50 Hz，非线性负载为桥式整流负载并联感性负载，负载功率 50 kVA，其中无功功率 15 kvar。

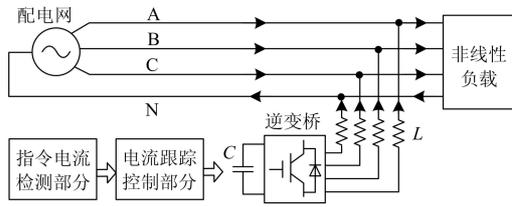


图 4 D-STATCOM 仿真原理图

Fig. 4 Simulation schematic of D-STATCOM

为便于分析,以 A 相为例对仿真结果进行说明, u_a 为 A 相系统电压, i_L 为 A 相负载电流, i_s 为 A 相系统电流。图 5 是负载电流及其频谱, 负载电流与系统电压相位差和畸变程度很大, 含量最大的谐波为 5 次和 7 次, 幅值分别为基波幅值的 18.87% 和 12.25%。图 6 为按照传统控制方法的 D-STATCOM 补偿结果, 可以看出, 补偿后系统电流与系统电压相位接近一致, 畸变程度明显降低, 含量最大的 5 次和 7 次谐波, 分别为基波幅值的 1.22% 和 1.94%。图 7 为按照新型控制策略的补偿结果, 补偿后系统电流接近于正弦波, 畸变程度较传统策略进一步降低, 5 次和 7 次谐波的幅值分别为基波幅值的 0.71% 和 0.84%。

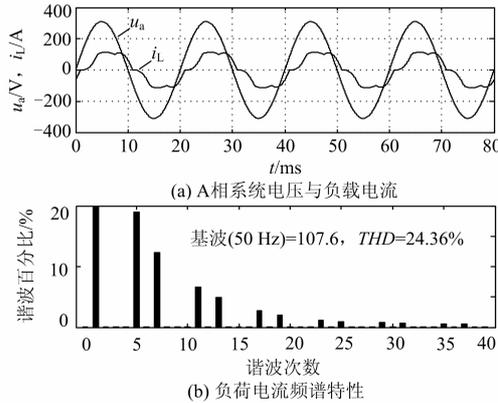


图 5 A 相负载电流波形及其频谱

Fig. 5 Load current and its spectrum of phase A

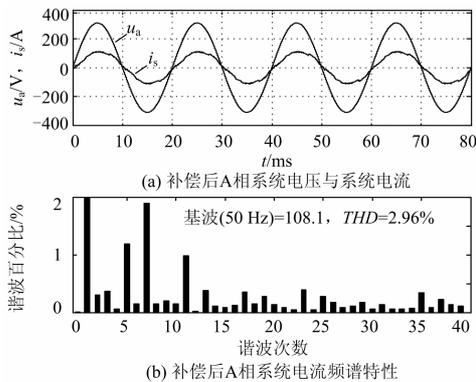


图 6 传统控制方法补偿后 A 相电流波形及频谱

Fig. 6 Compensated current and its spectrum of phase A using traditional control strategy

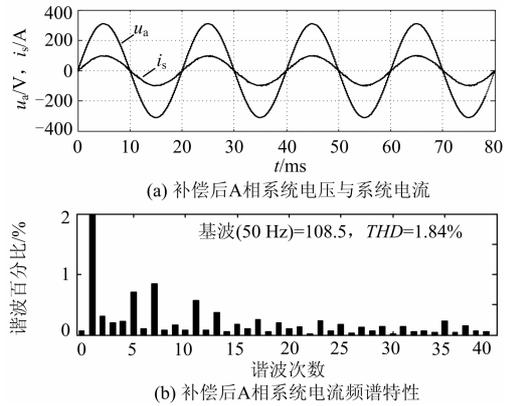


图 7 新型控制方法补偿后 A 相电压和电流波形及频谱

Fig. 7 Compensated current and its spectrum of phase A using novel control strategy

对两种策略的补偿效果进行计算, 结果如表 1 所示。可以看出, 新型控制策略的补偿滞后时间仅为 16 μ s, 远小于传统控制策略的 74 μ s; 谐波抑制方面, 传统控制策略补偿后电流总谐波畸变率(THD)为 2.96%, 而新型控制策略的 THD 仅为 1.84%; 无功补偿方面, 经理论分析可知无功残留与补偿滞后时间在小范围内成线性关系, 补偿滞后时间越长, 补偿后电流和电压的相位差越大, 无功残留也越大。仿真计算出的传统控制策略的无功残留为 1 400 var, 而新型控制策略的无功残留为 290 var, 近似与补偿滞后时间成线性关系, 仿真计算与理论分析一致。所以, 新型控制策略明显地减少了补偿滞后时间, 谐波和无功补偿精度得到了提高, 证明了该策略的正确性和可行性。

表 1 两种控制方法的分析结果表

Table 1 Experimental results of the two control methods

工作方式	THD/%	5 次谐波含量/%	7 次谐波含量/%	补偿滞后时间/ μ s	无功功率/var
补偿之前	24.36	18.87	12.25	-	15 000
传统方法	2.96	1.22	1.94	74	1 400
新型方法	1.84	0.71	0.84	16	290

为进一步验证所提控制策略, 研制了一台容量为 10 kVA 的 D-STATCOM 样机。样机的拓扑结构与仿真模型相同。实验条件为: 电网电压有效值 220 V, 频率 50 Hz, 负载为三相桥式整流负载并联三相感性负载, 功率为 10 kVA。D-STATCOM 样机参数为: 连接电感 5 mH, 直流电容 5 000 μ F, 直流电容电压 750 V, 开关元件采用绝缘栅双极晶体管 (Insulated gate bipolar transistor, IGBT), 主控 DSP 芯片为 TMS320F2812, A/D 转换芯片采用 AD7656,

采样频率 12.8 kHz, D/A 输出芯片采用 DAC7744, 控制方式为滞环控制^[16], 滞环宽度 0.02 A, 采用 TDS2014 示波器捕获实验波形。

图 8 给出了实验结果。图 8(b)为采用传统控制策略的 D-STATCOM 实验结果, 可见相较于图 8(a)补偿前的波形有了很大程度的改善, 但是补偿后的电流波形有“毛刺”现象, 特别是在负荷电流变化较大的情况下尤为明显, 这是由于本次采样周期的补偿指令要到下一次采样周期才会起作用, 即采样时刻与补偿时刻之间滞后时间过大所致。图 8(c)是新型控制策略的实验结果, 可见, 补偿后电流波形与系统电压波形的相位相同, 而且“毛刺”现象得到了改善。实验结果进一步证明了所提控制策略的正确性和有效性。

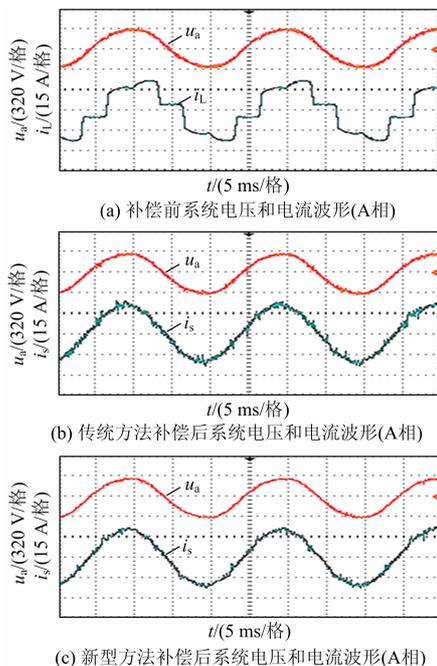


图 8 实验结果波形

Fig. 8 Experiment result waveforms

4 结论

考虑到传统 D-STATCOM 控制策略补偿滞后时间长、补偿效果差的缺点, 本文提出了一种基于软件优化的新型控制策略, 通过分析滞后时间的分布, 调整软件流程, 并对反映基波正序有功电流相位信息的矩阵进行相位补偿, 利用上一采样周期的数据获得本次采样周期的基波正序有功电流, 缩短了补偿指令的滞后时间。仿真和样机实验结果表明, 新型控制策略使补偿滞后时间大大减少, 谐波抑制和无功补偿的精度得到提高, 本文提出的新型控制策略实现简单、有效, 对于提高 D-STATCOM 补偿

精度具有积极意义。

参考文献

- [1] 范瑞祥, 吴素农, 孙旻. 用于变电站电能质量调控的 D-STATCOM 及其系统调试[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 149-154.
FAN Rui-xiang, WU Su-nong, SUN Min. Distribution static synchronous compensator for power quality control in substation and its system test[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 149-154.
- [2] 朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117.
ZHU Jing-song, LI Lei. Analysis and control of STATCOM based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 113-117.
- [3] 刘亮, 邓名高, 欧阳红林. D-STATCOM 自适应检测算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 115-119.
LIU Liang, DENG Ming-gao, OUYANG Hong-lin. A research of adaptive detection algorithm for D-STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 115-119.
- [4] 薛畅, 王建赟, 纪延超, 等. 结合蓄电池储能系统的 STATCOM 的电流解耦控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 43-48.
XUE Chang, WANG Jian-ze, JI Yan-chao, et al. Current decoupling control of STATCOM combined with battery energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 43-48.
- [5] 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 Xiao-feng, FAN Wen-bao, WANG Xiao-peng, 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.
- [6] 熊卿, 张哲, 尹项根, 等. 新型配电变压器一体化 STATCOM 技术研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 262-269.
XIONG Qing, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. A novel integration technology of distribution transformer

- and static var compensation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 262-269.
- [7] 许胜, 杨振宇. 一种基于电流分离补偿的级联型 DSTATCOM 及其建模与控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 25-33.
XU Sheng, YANG Zhen-yu. Modeling and control of cascaded H-bridge DSTATCOM based on current separation compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 25-33.
- [8] 荣飞, 罗安, 范卿. 应用于不平衡系统的 STATCOM 电压控制新方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 138-143.
RONG Fei, LUO An, FAN Qing. A novel voltage control method applied in STATCOM under unbalanced system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 138-143.
- [9] Mariethoz S, Rufer A C. Open loop and closed loop spectral frequency active filtering[J]. IEEE Trans on Industrial Application, 2002, 17(4): 564-573.
- [10] 李春龙, 沈颂华, 卢家林, 等. 具有延时补偿的数字控制在 PWM 整流器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 94-97.
LI Chun-long, SHEN Song-hua, LU Jia-lin, et al. Digital control with compensation of delay for PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 94-97.
- [11] GAO Ji-lei, LIU Jian-qiang, LIN Fei, et al. Improved predictive current controller for four-quadrant converters[C] // Power Electronics and Motion Control Conference. Wuhan, China: IEEE, 2009: 1719-1722.
- [12] 王成, 肖先勇. 基于控制延迟补偿的混合有源滤波器的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 59-64.
WANG Cheng, XIAO Xian-yong. A hybrid active power filter with control delay compensation[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 59-64.
- [13] 武小梅, 栗颂东, 文福拴. 瞬时无功功率理论在配电网电能质量控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 79-82.
WU Xiao-mei, LI Song-dong, WEN Fu-shuan. Application of instantaneous reactive power theory in power quality control of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 79-82.
- [14] 张俊敏, 田微. 基于瞬时无功功率理论谐波检测方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 33-36.
ZHANG Jun-min, TIAN Wei. Study on harmonic detection methods based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 33-36.
- [15] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [16] 徐永海, 刘晓博. 考虑指令电流的变环宽准恒频电流滞环控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 90-95.
XU Yong-hai, LIU Xiao-bo. A variable hysteresis-band and quasi-constant current controller with reference current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 90-95.

收稿日期: 2013-06-03; 修回日期: 2013-09-05

作者简介:

常鲜戎(1956-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制;

王辉云(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: hywanglz@163.com

郭一杰(1963-), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。