

基于 Simulink 的 STATCOM 的控制仿真研究

肖 坤¹ 赵彩虹¹ 肖 露² 张 迈¹ 郑 舒¹

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院 江苏 南京 210042)

(2. 邯郸市水利水电勘探设计院 河南 邯郸 056000)

[摘要] 从静止同步补偿器(STATCOM)的基本结构和工作原理出发,对参考电流检测方法进行了介绍,利用虚拟对称三相系统的合成电压矢量形成旋转坐标系的基本思想,在瞬时无功功率理论上对 $id-iq$ 检测方法进行了改进,STATCOM 系统的控制策略为电流间接控制,采用双环控制,外环控制为直流侧电容电压控制,内环控制采用电流控制,调制方法采用 PWM 调制。运用 MATLAB/Simulink 仿真工具建立了 STATCOM 的仿真模型,仿真了在恒定感性负载、在恒定容性负载和负载由感性到容性变化的情况。仿真结果表明,设计的 STATCOM 控制系统在恒定负载下具有良好的补偿效果,并且在负载性质发生变化以及突加负载和突甩负载情况下具有较快的动态响应速度和良好的跟踪能力,验证了所述控制方法的正确性和有效性。

[关键词] 无功补偿,电流间接控制,瞬时无功功率理论,MATLAB 仿真,静止同步补偿器

[中图分类号] TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011)04-0006-06

Study on Control System About STATCOM Based on Simulink

Xiao Kun¹ Zhao Caihong¹ Xiao Lu² Zhang Mai¹ Zheng Shu¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Exploration and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Handan 056000, China)

Abstract: In the present thesis, special attention is firstly paid to basic structure and working principles of STATCOM operation, introducing the detected method of reference current, using composite voltage vector of virtual symmetric three-phase system to form rotating coordinate system. The $id-iq$ test method was improved based on the Instantaneous reactive power theory, and the control strategy of STATCOM system is current indirect control. It adopts double loop control. Outer loop control is capacitance of DC voltage control. Inner loop control is current control. The thesis creates the simulation model of STATCOM using MATLAB/Simulink simulation tool. It simulates the situations in constant inductive load, inductive load changes, the constant capacitive load and the load changing from the inductive to capacitive. Simulation results show that the control system of STATCOM has good compensative effect in constant load, and has excellent transient stability in changing load and sudden adding or sudden rejecting load. Control method described in this article demonstrates the correctness and The simulation results prove the correctness and effectiveness of the control strategy.

Key words: reactive power compensation, current indirect control, instantaneous reactive power theory, MATLAB simulation, static synchronous compensator

近年来,电力系统中非线性用电设备,特别是电力电子装置得到了广泛应用。然而大多数电力电子装置功率因数较低,工作时基波电流滞后于电网电压,要消耗大量的无功功率,也给电网带来了额外的负担,并影响供电质量。因此提高功率因数已成为电力电子技术和电力系统研究领域所面临的一个重大课题,正在受到越来越多的关注。为构建节能社会、改善供电质量,研究新型无功补偿装置已成为国内外电力系统的重点课题之一^[1-4]。

无功补偿电容器、并联电容器、同步调相机、饱和电抗器(简称 SR),都是早期的无功补偿装置,静止同步补偿器 STATCOM(Static Synchronous Compensator)和传统的补偿装置相比具有运行范围大、响应速度快、储能元件容量小、控制灵活,能对系统无功功率进行双向动态补偿,而成为现代静止无功补偿技术研究

收稿日期: 2011-09-25.

通讯联系人: 赵彩虹,博士,教授,研究方向:智能电网和电力系统无功补偿. E-mail: 61081@njnu.edu.cn

— 6 —

的热点^[1]. 国内外文献对 STATCOM 的控制方法的研究主要有电流间接控制、电流直接控制、滑膜变结构控制、差拍控制等. 对 STATCOM 电流检测技术的研究主要有傅立叶和 FFT 算法自适应预测技术、神经网络法、小波变换法、瞬时无功功率法^[5-6]. 本文采用在瞬时无功功率理论上改进的 $id-iq$ 法并验证其优越性. 采用电流间接控制的双环控制方法. 外环控制为直流侧电容电压控制, 内环控制采用电流控制, 调制方法采用 PWM 调制. 在此基础上搭建 STATCOM 的仿真模型并仿真在感性容性和变化负载时的补偿效果图.

1 STATCOM 电路基本结构和工作原理

1.1 STATCOM 电路基本结构

STATCOM 的主电路一般分为两类: 电压型桥式电路和电流型桥式电路^[2-3]. 在本文中的 STATCOM 是指采用运行效率高的电压型桥式电路作为其动态无功补偿的装置.

STATCOM 的结构由 3 部分组成: 连接电抗器, 其作用是滤除逆变器输出电压中可能存在的高次谐波, 另外还起到将变流器侧和电网侧这两个交流电压源连接起来的作用; 电压型逆变器, 其交流侧输出接入电网. 它由三对桥臂并联组成, 每对桥臂串联两只 IGBT 功率开关管, 每只 IGBT 管反并联一个快速恢复二极管, 起到续流的作用. 开关器件的通断通过脉宽调制技术来控制, 使得电容器上的直流电压变换为具有一定幅值和频率的交流电压; 直流侧电容, 其主要作用是给装置提供一个电压支撑^[6-7].

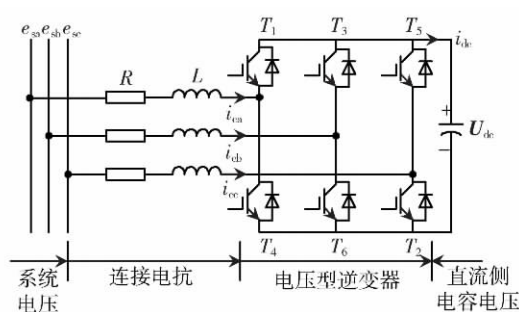


图 1 DSTATCAOM 基本结构

Fig.1 Basic structure of STATCOM

1.2 STATCOM 工作原理

STATCOM 的工作原理是将自换相桥式电路通过连接电抗器或者直接并联接在电网上, 适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值, 或者直接控制其交流侧的电流, 就可以使该电路发出或者吸收满足要求的无功电流, 从而实现动态无功补偿的目的^[3]. STATCOM 的工作原理可以用如图 2 所示的单相等效电路图来表示.

电网电压用向量 \dot{U}_s 表示, STATCOM 输出的交流电压用 \dot{U}_1 表示, 电抗器 X 上的电压 \dot{U}_L 就是 \dot{U}_s 和 \dot{U}_1 的向量差. STATCOM 从电网吸收的电流用 \dot{i} 表示. 如图 2 所示, 当 \dot{U}_1 大于 \dot{U}_s 时, 电流超前于电网电压 90° , STATCOM 向系统提供无功功率; 当 \dot{U}_1 小于 \dot{U}_s 时, 电流滞后于电网电压 90° , STATCOM 从系统吸收无功功率.

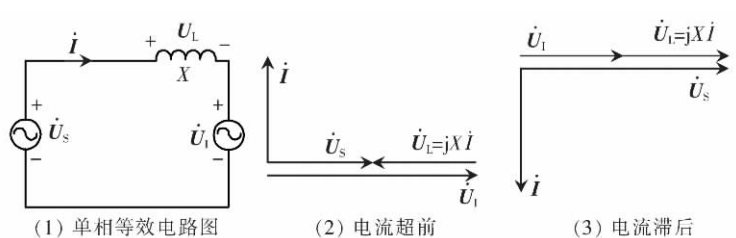


图 2 STATCOM 单相等效电路图和工作相量图

Fig.2 Single-phase equivalent circuit and work vector diagram

2 STATCOM 补偿电流的检测与控制方法

STATCOM 的控制系统主要由参考电流检测、控制方法、脉冲触发 3 部分构成. STATCOM 的工作性能很大程度上取决于对参考电流的实时而准确的检测. 控制方法是对检测值和给定参考值进行处理, 从而得到控制信号来控制 STATCOM 装置的动态和稳态性能. 脉冲触发电路是根据控制算法部分输出的控制信号产生相应的触发脉冲以驱动功率器件工作.

2.1 参考电流检测法的确定

瞬时无功功率理论, 是以瞬时实功率 p 和瞬时虚功率 q 的定义为基础来计算得到瞬时有功电流和无功电流^[1]. 基于瞬时无功功率理论的补偿电流检测方法与其他方法相比, 在实现的难易程度和检测性能上具有优越性. 在三相电路的谐波和无功电流实时检测中得到了广泛应用. 瞬时无功功率理论不但适用于正弦波情况下, 也适用于非正弦波的瞬时有功和无功功率.

传统的检测方法如图 3 所示,需要用到与 a 相电网电压 e_a 同相位的正弦信号 $\sin\omega t$ 和对应的余弦信号 $-\cos\omega t$,它们由一个锁相环(PLL) 和一个正、余弦信号发生电路得到.从系统获得负荷侧的三相电压和电流值,并分别对其进行 abc 三相坐标变换到 $\alpha\beta$ 两相坐标后,求出在 dq 坐标下的电流值,经低通滤波器得到的直流分量值,由 $\alpha\beta$ 反变换即可计算出被检测电流 i_a 、 i_b 、 i_c 的基波分量 i_{af} 、 i_{bf} 、 i_{cf} ,再与被检测电流相减即可以得到谐波和无功电流 i_{ah} 、 i_{bh} 、 i_{ch} .传统的检测算法的推导前提是电网电压平衡且为正弦,电网电压不平衡时,检测负载电流中的基波有功电流和基波无功电流时有检测误差^[6-8].本文在传统的检测法基础上,提出了一种新的检测方法如图 4 所示,其基本思想就是利用虚拟对称三相系统的合成电压矢量来形成旋转坐标系这一思路,该方法不需要锁相环,消除了 PLL 产生的不利影响,且在电网电压不平衡条件下能够实现同步旋转角实时跟踪电网电压基波正序频率的变化.如下图所示谐波和无功电流检测法.

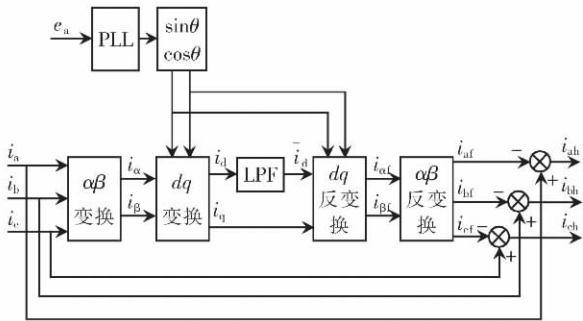


图 3 传统 i_d-i_q 法检测电路原理图
Fig.3 Schematic circuit of current detection based on i_d-i_q operation mode

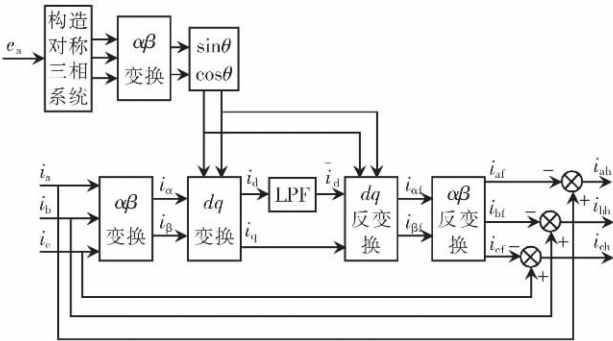
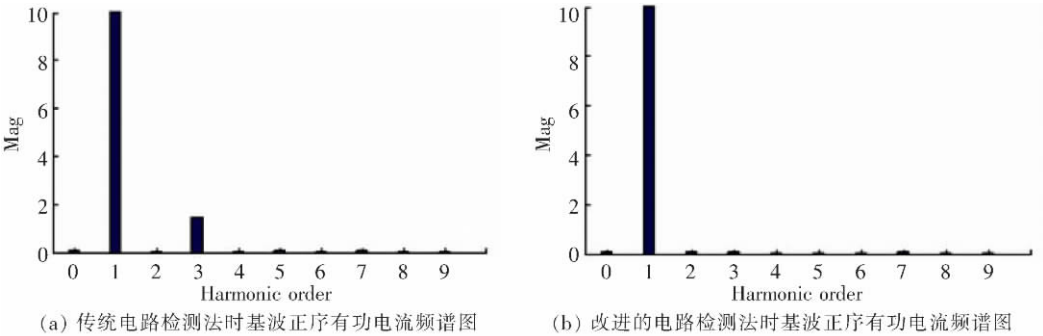


图 4 改进的 i_d-i_q 法检测电路原理图
Fig.4 Schematic circuit of current detection based on improved i_d-i_q operation mode

为了验证本章所提出检测方法的正确性和有效性,在 Matlab/simulink 仿真环境下,在电网电压不平衡条件下采用改进的 $id-iq$ 检测方法对电流的检测做了仿真分析,仿真结果如图 5 所示.



(a) 传统电路检测法时基波正序有功电流频谱图 (b) 改进的电路检测法时基波正序有功电流频谱图

图 5 STATCOM 的仿真模型

Fig.5 The detecting results of fundamental positive sequence active current spectrum

通过图 5 对比可以看出,当电网电压不平衡时,无虚拟对称三相系统构造电路检测法检测出的基波正序有功电流中仍含有负序和谐波分量,其值要大于采用传统检测方法所得到的基波正序有功电流.这表明当电网电压不平衡时,无虚拟对称三相系统构造电路检测法不能精确地检测负载电流中的谐波、无功和负序电流.而采用本文所改进的检测方法,检测效果有明显改善,证明了本文所提出的改进的检测方法的正确性和有效性.

2.2 控制方法分析

电流间接控制,就是将 STATCOM 当作交流电源来看待,通过控制 STATCOM 装置中逆变器所产生的交流电压基波的相位和幅值,来间接控制 STATCOM 交流侧电流.本文采用 δ 角和 θ 角配合控制,即控制 δ 角(即控制 STATCOM 交流侧输出电压相对于系统电压的相角差)的同时,配合控制开关器件的导通角,从而调节 STATCOM 交流侧输出电压的幅值^[7-9].这种控制方法的优点是直流侧电容电压稳定,对装置的运行有利,而且动态性能更好.在间接控制方法中为了提高控制精度和响应速度 δ 与 θ 配合控制方法引入了 STATCOM 吸收的无功和有功电流的反馈控制,其控制框图如图 6 所示.

3 STATCOM 仿真与分析

3.1 仿真模型的建立

整个系统分为3部分: 主电路、测量电路和控制部分. 主电路主要由三相电压源、连接电抗器、三相桥式电压源型逆变器、直流侧电容以及三相负载组成, 其中交流侧的三相负载可以通过断路器投切来模拟其动态变化情况.

电网相电压峰值: $U_s = 925 \text{ V}$; 频率均为 50 Hz ; 相位根据三相对称依次设为 0° 、 -120° 、 120° ; 直流侧电容电压给定值 $U_{dc} = 2350 \text{ V}$; 直流侧电容值 $C = 1350 \mu\text{F}$; 交流侧连接电感值 $L = 4.10 \text{ mH}$; 装置额定无功功率为 400 kVar .

3.2 仿真结果分析

3.2.1 恒定感性负载时仿真结果

图 7(a) 为补偿前电网侧电压和电流的波形, 图 7(b) 为补偿后电网侧电压和电流的波形, 通过比较可以看出, 投入装置前, 由于系统所带的三相负载为感性负载, 需要从电网侧吸收感性无功, 致使系统电流滞后于系统电压, 功率因数很低; 在投入 STATCOM 装置之后, 装置输出滞后于系统电压 90° 的无功电流, 提供了负载所需要的感性无功电流, STATCOM 装置投入运行后, 负载所需要的无功电流不必由电源提供而由 STATCOM 装置提供. 大约在半个周期后, 系统电流和电压同相位, 系统电流变为纯有功电流.

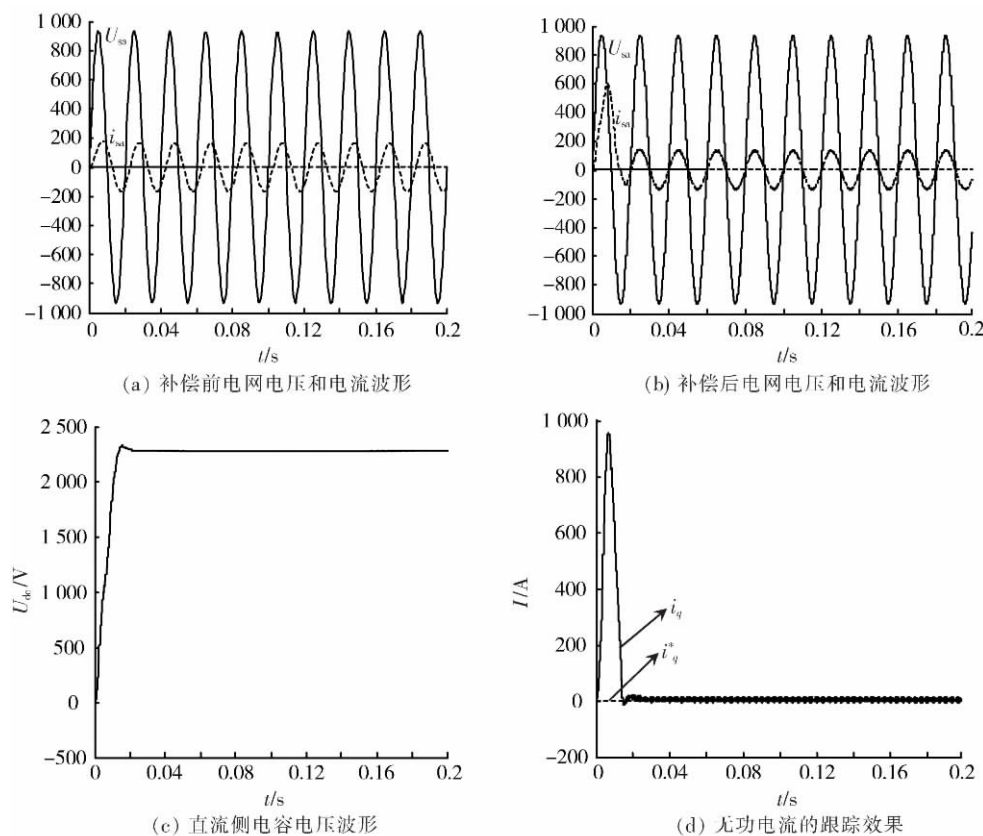


图 7 恒定感性负载时仿真结果图

Fig.7 Simulation waveforms with inductive load

图 7(c) 为直流侧电容电压波形图, 可以看出 0.02 s 后, 电压幅值稳定在给定值 2350 V 附近, 说明了电容电压调节模块对直流电压的稳定作用; 图 7(d) 为无功电流的跟踪效果图, 无功电流给定值为 0 , 补偿效果说明电压和电流环的跟踪效果都是良好的.

3.2.2 恒定容性负载时仿真结果

图 8(a) 为补偿前电网侧电压和电流的波形, 图 8(c) 为补偿后电网侧电压和电流的波形. 通过比较可以看出, 由于三相负载为容性负载, 在投入 STATCOM 装置前, 需要系统提供容性无功来满足运行要求, 致使系统电流超前于电网侧电压, 功率因数很低, 仅为 0.60. 图 8(b) 为投入装置后, 装置输出超前于系统电压 90° 的无功电流, 提供了负载所需要的容性无功电流. 大约在半周期后, 功率因数为 1, 如图 8(d) 所示. 系统电流和电网侧的电压同相位, 也就是说系统电流变为纯有功电流, 并且电流幅值也明显减小. 图 8(e) 为直流侧电容电压波形图, 可以看出, 电压幅值稳定在给定值 2 350 V 附近, 说明了电容电压调节模块对直流电压的稳定作用; 图 8(f) 为无功电流的跟踪效果图, 无功电流给定值为 0, 补偿效果说明两个控制环的跟踪效果良好.

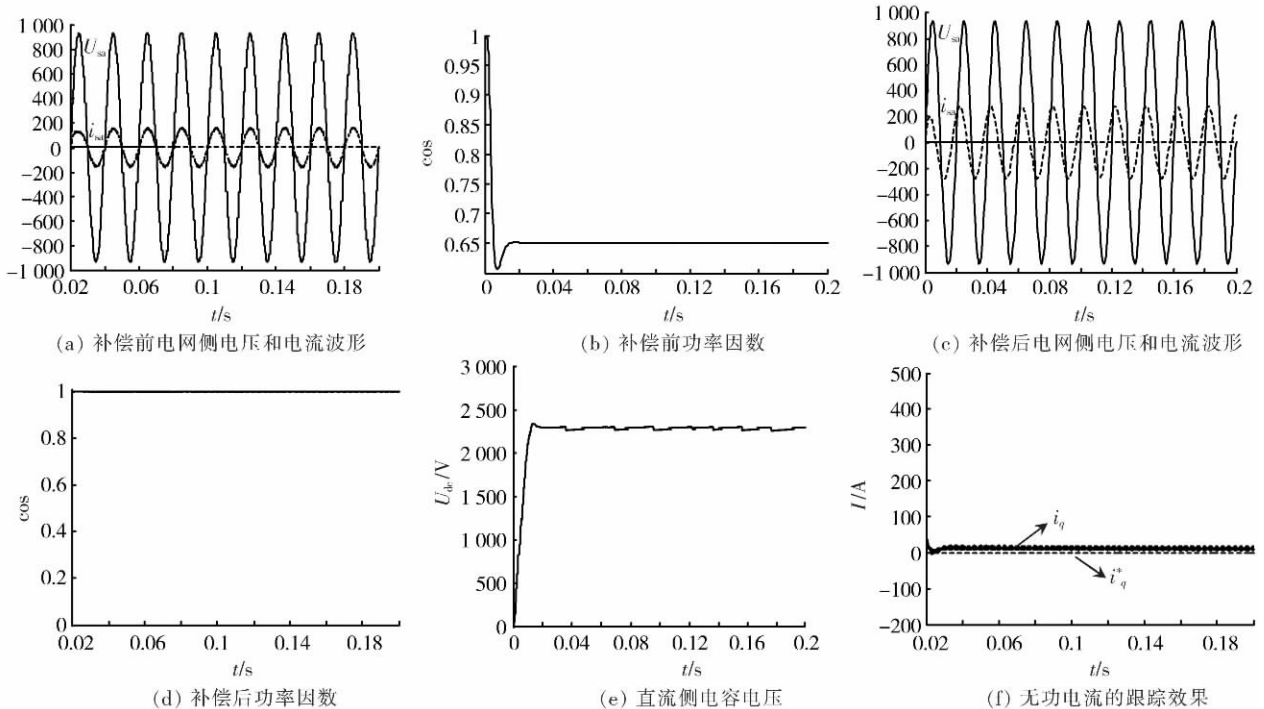


图 8 恒定容性负载时的仿真结果图

Fig.8 Simulation waveforms with capacitive load

3.2.3 负载性质变化时仿真

图 9(a) 为补偿前电网侧电压和电流的波形, 图 9(b) 为补偿后电网侧电压和电流的波形, 图 9(c) 为电网侧电压和 DSTATCOM 产生的电流的波形. 通过比较可以看出, 在 0.1 s 时刻前, 由于负载为感性, 需要系统提供感性无功, 装置输出滞后于系统电压 90° 的无功电流, 系统电流和电网侧电压同相位, 其变为纯有功电流, 而且可以看出, 电流的幅值明显减小了. 在 0.1 s 时刻, 将负载由感性状态切换到容性状态, 可以看出, 装置输出的电流也很快由感性电流变为容性电流. 经过不到一个周期的过渡时间, 系统的电流依然是纯有功电流. 图(d) 为直流侧电容电压波形图, 在 $t = 0.1$ s 时, 由于负载的性质发生了变化, 直流侧电压有一个小扰动, 但是经过短暂的过渡过程后, 其电压稳定在给定值 2 350 V 附近. 图(e) 和(f) 为有功电流和无功电流的跟踪效果图. 在 0.1 s 前, STATCOM 投入运行, 负载为感性; 在 0.1 s 时刻, 装置仍旧运行, 只是将负载由原来的感性变为容性负载.

4 结论

本文在 $id - iq$ 检测方法的基础上对其进行了改进, 该方法利用单相电网电压构造虚拟的对称三相系统, 进而构造匀速旋转的同步旋转坐标系, 仿真结果表明, 在电网电压不平衡条件下, 本文所提出的检测方法仍能准确检测负载电流中的谐波、无功和负序分量. 运用 MATLAB 仿真软件, 搭建 STATCOM 的仿真模型, 仿真了在恒定感性负载以及在恒定的容性负载和负载由感性到容性变化的情况. STATCOM 的性能, 仿真结果表明, STATCOM 不但具有较高的动态无功补偿性能, 而且对负载性质的突变也具有较快的响应速度以及较好的暂态稳定性.

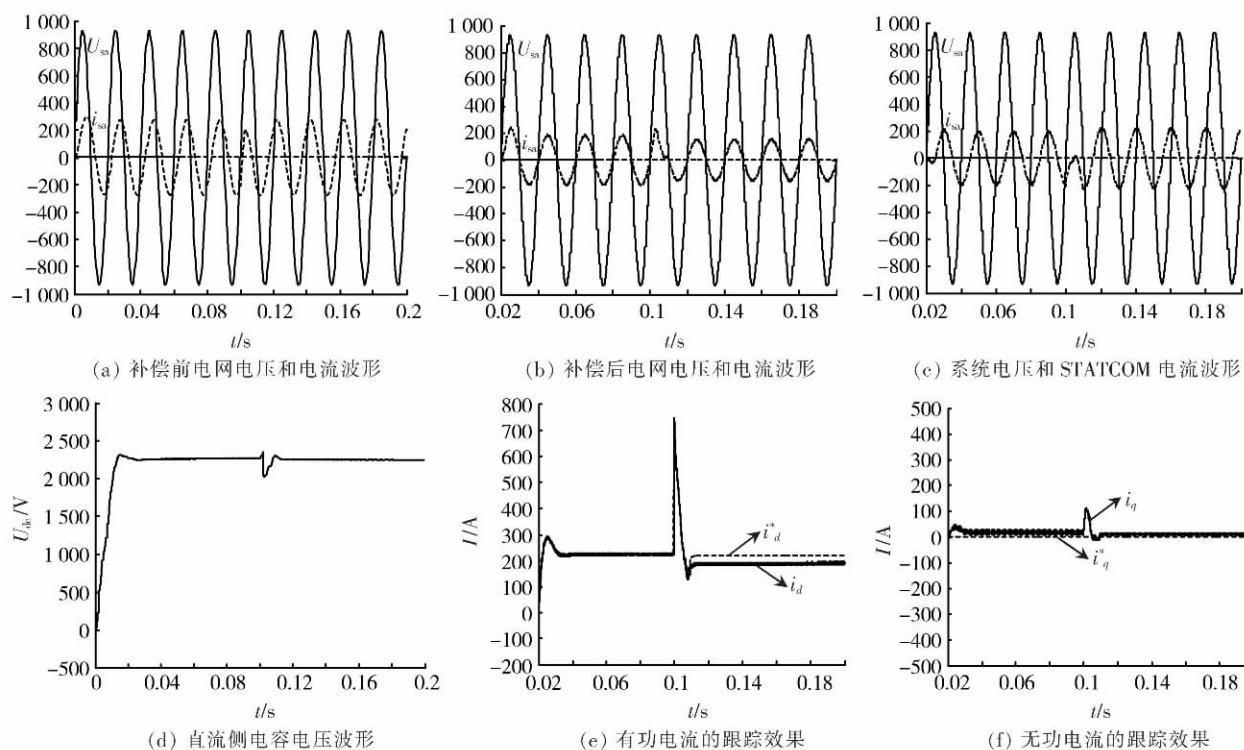


图 9 负载性质变化时仿真波形

Fig.9 Simulation waveforms when load is charged

[参考文献] (References)

- [1] 王兆安, 杨君. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
Wang Zhaoan, Yang Jun. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation [M]. Beijing: China Machine Press, 1998. (in Chinese)
- [2] Mihalic R, Zunko P, Povh D. Improvement of transient stability using unified power flow controller [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 485-492.
- [3] Zhang Bo, Yi Songwen, He Xiaoming. A novel harmonic current detection technique based on a generalized dq coordinate transform for active power filter and fault protection of power system [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM 2000, Hong Kong: 2000.
- [4] Sebastien Mariethoz, Alfred C. Rufer. Open loop and closed loop spectral frequency active filtering [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(4): 564-573.
- [5] 赵彩虹, 丁晓群, 马春生, 等. 地区电网无功电压分布式控制策略 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2008, 8(2): 1-5.
Zhao Caihong, Ding Xiaoqun, Ma Chunsheng, et al. Reactive power and voltage distributed control strategy in regional grid [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2008, 8(2): 1-5. (in Chinese)
- [6] 孙晓娟, 靳红梅. 基于 MATLAB 的静止无功发生器系统仿真 [J]. 电子工业专用设备, 2005, 123: 60-64.
Sun Xiaojuan, Jin Hongmei. System simulation of STATCOM based on MATLAB [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2005, 123: 60-64. (in Chinese)
- [7] Vasco Soares, Pedro Verdelho, Gil Marques. Active power filter control circuit based on the instantaneous active and reactive current $id-iq$ method [J]. IEEE Annual Power Electronics Specialist Conference, 1997, 28(2): 1096-1101.
- [8] Vasco Soares, Pedro Verdelho, Gil D Marques. An instantaneous active and reactive current component method for active filters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4): 660-669.
- [9] 陈东华, 谢少军, 周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 62-67.
Chen Donghua, Xie Shaojun, Zhou Bo. An improved synchronous references frame method for harmonics and reactive currents detection of active power filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 62-67. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]