

文章编号: 1006-4710(2013)04-0392-08

用于不平衡负荷补偿的链式 STATCOM 控制系统

杨波, 钟彦儒, 曾光

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 提出一种适用于不平衡负荷补偿的链式 STATCOM 控制系统方案。针对串联等效电阻的非线性特性, 采用输出线性化方法将非线性系统转化为线性系统。采用结合 ip-iq 法和对称分量法的分相导纳检测算法, 使基波检测延迟时间固定, 进而使控制系统设计转化为二阶最佳阻尼比系统设计问题。将负载导纳前馈方法和母线导纳反馈方法结合, 提高控制系统的响应速度和稳态精度, 进而将控制系统设计转化为无超调二阶临界阻尼比系统设计问题。仿真和实验结果表明控制方案有效且可行。

关键词: 链式 STATCOM; 不平衡负荷补偿; ip-iq 法; 对称分量法; 线性化 PID

中图分类号: TM714.3 **文献标志码:** A

Control System of Cascaded STATCOM for Unbalanced Load Compensation

YANG Bo, ZHONG Yanru, ZENG Guang

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper propose a control system scheme suit for unbalanced load compensation of cascaded STATCOM. Against the nonlinear characteristics of equivalent series resistance, the nonlinear system is converted into a linear system by output linearization method. Split-phase admittance detection algorithm in combination with method of ip-iq and symmetrical components fixes the delay time of the fundamental wave detection; thereby the control system design is converted into second-order optimal damping ratio system design issue. Combination of the load admittance feed-forward method with bus admittance feed-forward method can improve the control system response speed and steady precision, and further convert a control system design into a second-order without overshoot critical damping ratio system design issue. Simulation and experiment results show the effectiveness and feasibility of this control system scheme.

Key words: cascaded STATCOM; unbalanced load compensation; ip-iq method; symmetrical components; linear PID

对于电弧炉、提升机等不平衡负荷引起的电能质量问题, 目前最有效的措施是采用 SVC、STATCOM 等动态补偿设备。SVC 由于存在占地面积大、产生低次谐波等问题, 目前仅在高电压超大容量场合具有一定优势。文献[1]和文献[2]分别讨论了低压三相整流桥型和高压变压器隔离型 STATCOM 的不平衡补偿问题, 这两种结构的 STATCOM 应用于高压场合时均需要隔离变压器, 实际应用受到限制。文献[3]提出的链式 STATCOM 结构简单, 易于冗余且可直连高压, 文献[4]研究了该结构在实际

工程中的相关关键问题。文献[5]建立了链式 STATCOM 的小信号交流模型, 分别实现了 $a-b-c$ 和 $d-q-0$ 坐标系下的解耦控制, 文献[6]指出链式 STATCOM 存在串联等效电阻的非线性问题, 解耦控制在远离静态工作点时性能变差。文献[7]将无源性控制和重复控制结合, 实现了在全局范围内的渐进跟踪控制, 但文中未考虑链式 STATCOM 的不平衡补偿问题。文献[8]采用两种改进的分相瞬时电流控制方法进行不平衡补偿, 但基于频域分析的比例控制器设计方法仅确保了系统稳定性, 不能保证

收稿日期: 2013-09-08

基金项目: 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(105-00X901)。

作者简介: 杨波, 男, 博士生, 研究方向为新型电力电子变换器及其控制。E-mail: yangbo-xut@163.com。

钟彦儒, 男, 教授, 博导, 研究方向为新型电力电子装置。E-mail: zhongyir@xaut.edu.cn。

快速性。文献[9]提出了基于逆系统方法的有功-无功解耦控制,文中构建原系统的逆系统模型,将该模型作为原系统的前馈控制,构建一阶积分解耦伪线性系统,并进行反馈控制,但文中未考虑直流电压的平衡控制问题和不平衡补偿问题。

本文提出一种考虑了等效串联电阻非线性的链式 STATCOM 不平衡补偿方案。该方案中, ip-iq 法和对称分量法用于分相检测负载导纳,改进的 ip-iq 法具有固定的基波检测延迟,改进的对称分量法在实现正负序有功无功分离的同时,其单相功率检测的延迟时间可设置为采样周期的任意倍数,最小延迟为一个采样周期。提出负载导纳前馈+母线导纳反馈的不平衡补偿方法,其中,负载导纳前馈调节速度快,母线导纳反馈稳态精度高。采用直接开环测量的方法获得串联等效电阻的非线性曲线,并进行线性补偿,从而使系统性能在整个运行区间内保持一致。实验结果表明该控制系统方案有效且可行。

1 主电路和负荷不平衡控制系统

用于不平衡负荷补偿的链式 STATCOM 系统框图如图 1 所示。其中, u_{sab} 、 u_{sbc} 、 u_{sca} 为母线线电压,对应 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 为母线相电压, i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为母线电流, i_{la} 、 i_{lb} 、 i_{lc} 为负载电流, i_{gab} 、 i_{gbc} 、 i_{gca} 为 STATCOM 输出环内电流。 L_{ab} 、 L_{bc} 、 L_{ca} 为连接电感, C 为直流电容。主电路的基本单元为 H 桥,每个 H 桥由四个 IGBT 和一个电容构成,多个 H 桥串联与连接电感一起构成单相链式 STATCOM,H 桥数量与母线电压成正比,与单个 H 桥电压成反比。三个单相 STATCOM 采用三角形连接方式构成三相 STATCOM。由于采用三角形连接方式,三个单相 STATCOM 互相独立,采用分相控制策略,即可实现负荷不平衡补偿。

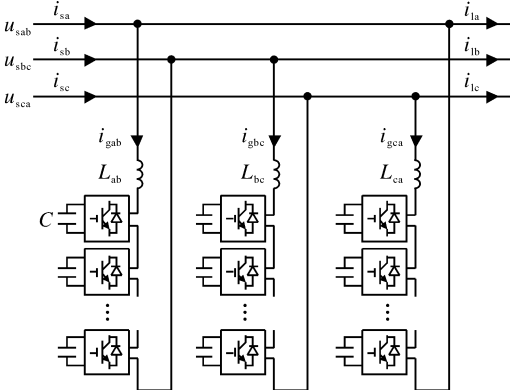


图 1 不平衡负荷补偿 STATCOM 系统框图
Fig.1 The STATCOM system block diagram on the unbalanced load compensation

链式 STATCOM 装置主要由 STATCOM 三相 H 桥主电路、STATCOM 控制器、电压电流采集回路、开关柜等构成。STATCOM 控制器采集母线电压、母线电流和 STATCOM 环内电流,不平衡负荷补偿控制策略如图 2 所示。

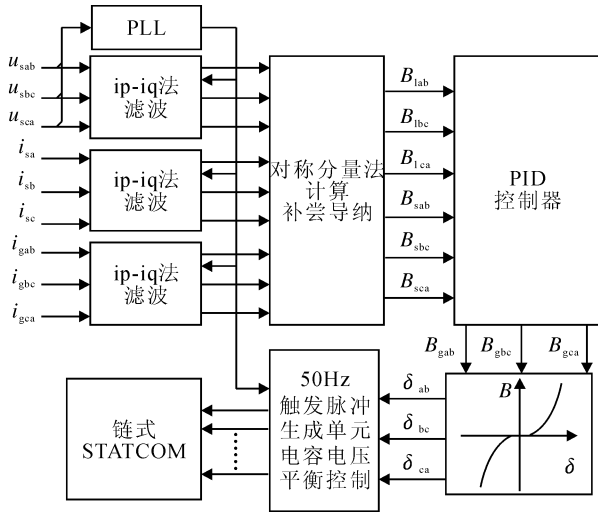


图 2 不平衡负荷补偿 STATCOM 控制策略框图
Fig.2 The STATCOM control strategy diagram for unbalanced load compensation

图 2 的控制策略主要由锁相环、ip-iq 滤波器、补偿导纳计算单元、PID 控制器、输出线性化单元、50 Hz 脉冲发生器这六部分构成。

1) 锁相环。STATCOM 的控制角度通常很小,文献[10]的分析表明当锁相环的响应速度大于 STATCOM 装置的响应速度时,锁相环相位误差的很小抖动都可能引起装置的过电流,反之,则锁相环误差对装置的影响可以忽略。采用文献[11]的 PLL 方法,设置锁相环响应时间在 STATCOM 开环响应时间(30 ms 左右)和电压最小谐波周期(5 次谐波,4 ms)之间,这里取为 6 ms,PLL 的参数为: $T = 1/5\,000\text{ s}$, $P = 500$, $I = 400\,000$ 。锁相环系统控制策略如图 3 所示。

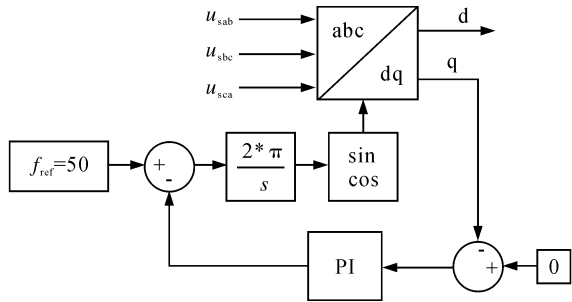


图 3 PLL 控制策略框图
Fig.3 The PLL system control strategy diagram

2) ip-iq 滤波器。在计算补偿导纳时,首先需

要滤除系统电压和电流中的谐波和次谐波分量,文献[12]针对不平衡系统介绍了五种 ip-iq 检测方法,检测的目标分别为无功电流、无功电流 + 谐波电流、无功电流 + 谐波电流 + 负序电流、无功电流 + 特定次谐波电流 + 负序电流、不平衡电压。对文献[12]的检测方法进行改进,对正序电流和负序电流分别采用谐波滤波方法,然后相加得到基波全电流,即可在滤除谐波的基础上保留系统的负序分量,其原理如图 4 所示。其中,低通滤波采用滑动均值滤波(Sliding mean filter, SMF),其具有固定的检测延时,记为 T_1 (通常选取为 10 ms 或 20 ms),并且响应过程平滑,无超调。

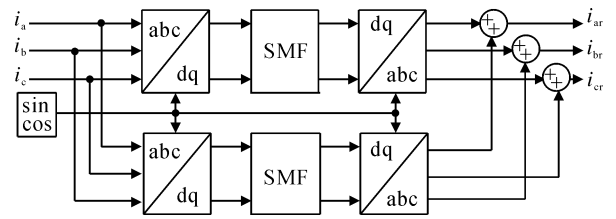


图 4 ip-iq 滤波改进方法
Fig. 4 The improved filter method of ip-iq

3) 补偿导纳计算单元。对于三相任意大小的不平衡负荷,采用对称分量法,用文献[13]的电纳检测算法。

$$\begin{cases} B_{ab} = \frac{1}{U_{sab}^2}(q_{a.1} + q_{b.1} - q_{c.1}) \\ B_{bc} = \frac{1}{U_{sbc}^2}(q_{b.1} + q_{c.1} - q_{a.1}) \\ B_{ca} = \frac{1}{U_{sca}^2}(q_{c.1} + q_{a.1} - q_{b.1}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_{sab} 、 U_{sbc} 、 U_{sca} 分别为母线电压 u_{sab} 、 u_{sbc} 、 u_{sca} 的有效值。文献[13]的单相无功功率计算方法存在 90° 的延迟,这将增加系统的调节时间。采用单相无功功率改进算法,可将延迟时间设置为采样周期的整数倍,最小延迟为一个采样周期,记为 T_2 ,对应的延迟角度为 $\Delta\alpha$,计算公式见式(2)。

$$\begin{cases} q_{a.1} = \frac{1}{2\sin(\Delta\alpha)}[u_{sa}(-\Delta\alpha) \cdot i_{la} - u_{sa} \cdot i_{la}(-\Delta\alpha)] \\ q_{b.1} = \frac{1}{2\sin(\Delta\alpha)}[u_{sb}(-\Delta\alpha) \cdot i_{lb} - u_{sb} \cdot i_{lb}(-\Delta\alpha)] \\ q_{c.1} = \frac{1}{2\sin(\Delta\alpha)}[u_{sc}(-\Delta\alpha) \cdot i_{lc} - u_{sc} \cdot i_{lc}(-\Delta\alpha)] \end{cases} \quad (2)$$

为便于描述,做如下定义:

- $B_{ab}^l, B_{bc}^l, B_{ca}^l$: 负载电纳。
- $B_{ab}^g, B_{bc}^g, B_{ca}^g$: STATCOM 电纳。
- $B_{ab}^s, B_{bc}^s, B_{ca}^s$: 系统总电纳。

不平衡补偿的基本原理为:使用一定的控制方法使 STATCOM 每相输出电纳与对应负载电纳相反,即使系统各相总电纳为零,从而实现不平衡负载平衡补偿。

式(1)的电纳计算公式存在 10 ms 的延迟,如果电压和电流存在正序基波分量,可采用式(3)的电纳计算公式。

$$B^* = \frac{u_{ab}i_c + u_{bc}i_a + u_{ca}i_b}{3\sqrt{3}U_s^2} \quad (3)$$

由于式(3)中不含延迟单元,因此检测的电纳无延迟,称为瞬时电纳。需要说明的是,瞬时电纳仅适用于三相系统,不存在单相瞬时电纳,因此仅限于三相对称系统。

4) PID 控制器。采用 PID 控制器,对三相补偿导纳进行反馈控制,实现不平衡补偿,详细的控制器设计见第三节。STATCOM 的开环响应时间 T_3 与串联电感 X_L 、并联电容 X_C 和串联等效电阻 R 的关系为:

$$T_3 = (1 + \frac{X_L}{X_C}) \cdot \frac{X_L}{\omega R} \quad (4)$$

5) 输出线性化单元。STATCOM 为非线性系统,通常采用的非线性控制策略在系统参数偏移时控制效果变差,解决这一问题的鲁棒非线性控制方法的参数较多,整定困难^[14-15]。文献[6]指出,在 STATCOM 所有非线性因素中,等效串联电阻 R 影响最大,且是输出电流的函数。本文使用了一种简单易用的线性化方法,即在 PI 调节器的后级,设置输出线性化单元,用以补偿等效电阻 R 的非线性,线性化补偿单元由实际系统开环测试获取。

6) 50 Hz 脉冲发生器。脉冲发生器单元接收控制器的三相控制角,生成 50 Hz 控制脉冲。同时,检测各 H 桥单元电容电压,采用脉冲轮换方法抑制电容电压偏移,并监测 H 桥各桥臂的工作状态。

采用文献[16]的面积等效法可得到能量平衡条件下的触发脉冲角度。以 5 个 H 桥串联为例,输出阶梯波见图 5。各个 H 桥的开通角度如表 1 所示。

表 1 5H 桥链式 STATCOM 开通角度					
Tab. 1 The angle of 5 H-Bridges cascade statcom					
位置	1	2	3	4	5
角度/(°)	5.79	17.49	30.07	44.61	69.59

考虑到 H 桥并联损耗和混合损耗的差异对直流电容电压的影响,采用文献[3]的脉冲轮换方法对电容电压偏差加以抑制。

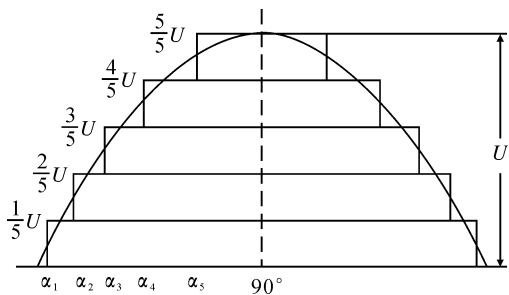


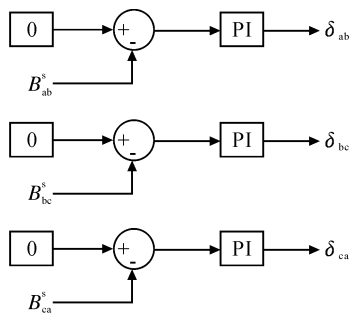
图5 50 Hz 面积等效电压波形叠加策略

Fig. 5 The voltage waveform superposition strategy of the area equivalent of 50 Hz

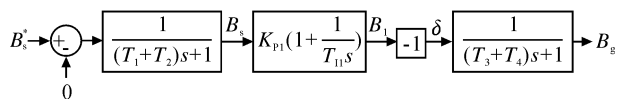
2 输出线性化和控制器设计

三角型连接方式时,三相链节无耦合,可直接分相控制。

当采用间接电流幅相控制时,STATCOM 在任意的调制比 M 和移相角度 δ 时均保持稳定,因此如图6所示,直接对系统无功功率进行反馈控制,即构成直接反馈控制(记为:控制方法1),即可保证系统稳定性和稳态补偿精度,但由于 STATCOM 输出功率与 δ 为非线性关系,因此,直接反馈控制不能保证全局范围内的快速性,这种非线性可引起的最大延迟时间为 T_4 。



(a) 控制示意图



(b) 控制框图

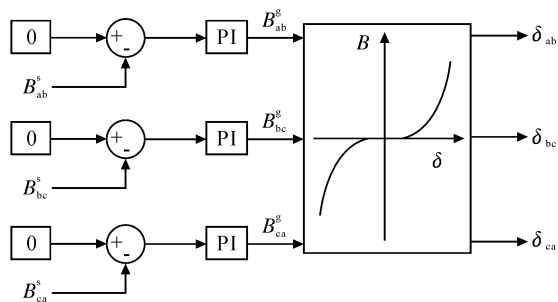
图6 直接反馈控制(控制方法1)

Fig. 6 Direct feedback control (control method 1)

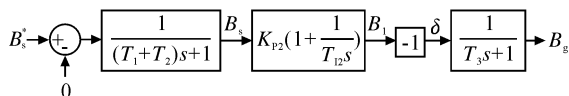
等效串联电阻是影响控制系统快速性的最主要非线性因素,其构成主要有两部分:连接电抗器的铜损耗和 IGBT 的开关损耗。开关损耗与 STATCOM 输出电流有关,因此考虑等效串联电阻,基于系统模型的非线性控制器设计复杂,不易实现。

为简化控制器的设计,将影响直接反馈控制快速性的非线性部分分离出来,得到图7的反馈+线性化控制方法(记为:控制方法2)。其中,STAT-

COM 输出导纳与移相角度 δ 之间为非线性部分,其非线性关系由开环实验直接获取,并经离线拟合,生成查询表。



(a) 控制示意图



(b) 控制框图

图7 反馈+线性化控制(控制方法2)

Fig. 7 Feedback plus linearization control (control method 2)

对非线性进行线性化后,对线性系统进行反馈设计,可使系统在全局范围内性能一致。但由于存在 PI 控制环节的延迟,限制了系统快速性。图8为加入 PI 校正后的控制系统结构图。

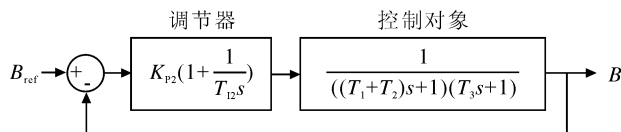


图8 控制系统结构(控制方法2)

Fig. 8 Control system structure (control method 2)

使 PI 调节器的零点 $s = -1/T_{12}$ 与控制对象的极点 $s = -1/T_3$ 对消,即令 $T_{12} = T_3$,将系统转化为典型二阶系统,开环传递函数为:

$$W(s) = \frac{K_{p2}}{T_{12}(T_1 + T_2)} \cdot \frac{1}{s \left(s + \frac{1}{T_1 + T_2} \right)} \quad (5)$$

则:

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{K_{p2}}{T_{12}(T_1 + T_2)} \\ 2\zeta\omega_n = \frac{1}{T_1 + T_2} \end{cases} \quad (6)$$

将系统设计为二阶典型系统,综合各方面的动态性能指标,阻尼系数取为 0.707,将 $T_1 = 10$ ms、 $T_2 = 2$ ms、 $T_3 = 24$ ms 代入式(6)有:

$$\begin{cases} K_{p2} = 83.3 \\ T_{12} = 24 \text{ ms} \end{cases} \quad (7)$$

为抑制积分环节引起的超调量并提高系统调节速度,在控制方法 2 基础上引入前馈控制,得到如图 9 的前馈 + 反馈 + 线性化控制(记为:控制方法 3)。采用负载电纳前馈控制,可保证系统快速性,采用系统总电纳反馈控制,可保证系统稳态时的控制精度。前馈控制系统为二阶临界阻尼系统,此时系统具有一阶系统无超调的特征,并且具有最小的惯性时间常数。

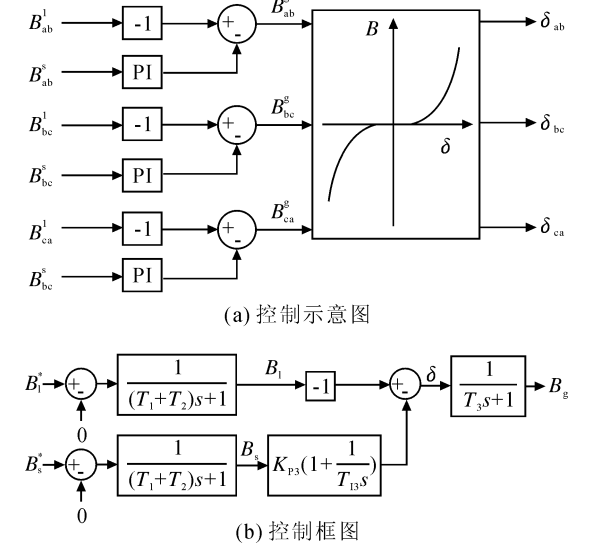


图 9 前馈 + 反馈 + 线性化控制(控制方法 3)
Fig. 9 Feed-forward plus feedback and linearization control(control method 3)

设计 STATCOM 系统,并进行三种控制方法的对比分析,系统参数如表 2 所示。

表 2 STATCOM 系统参数	
Tab. 2 STATCOM experiment system parameters	
电压/V	400
容量/kVA	12
电流/A	10
单相 H 桥数量	5
直流电容/ μF	3 300
连接电抗/mH	18
理想等效阻抗/ Ω	3.47
基波检测方法	ip-iq 法
补偿导纳计算方法	对称分量法
电容电压控制方式	直接脉冲轮换法
载波方式	50 Hz 阶梯波
δ 稳态控制范围	$-5^\circ \sim +5^\circ$
采样时间/ μs	200
采样延迟次数/次	10
控制方式 1	直接反馈
控制方式 2	反馈 + 线性化
控制方式 3	前馈 + 反馈 + 线性化

根据系统参数计算得到各部分延迟时间分别为: $T_1 = 10\text{ ms}$ 、 $T_2 = 2\text{ ms}$ 、 $T_3 = 24\text{ ms}$ 、 $T_5 = 20\text{ ms}$ 、 T_4 在 $0 \sim 24\text{ ms}$ 之间变化。图 10 比较了三种控制方法的调节速度。

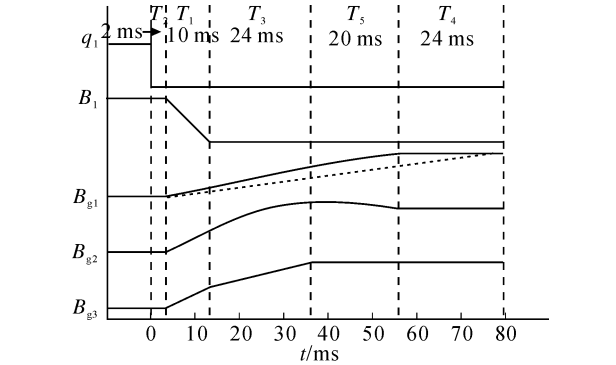


图 10 控制方法调节速度比较
Fig. 10 The comparison of control theory regulating speed

图 10 中, q_1 为负载无功, B_1 为检测到的负载电纳, B_{g1} 、 B_{g2} 、 B_{g3} 分别为采用控制方法 1、控制方法 2、控制方法 3 时 STATCOM 的输出电纳。采用直接反馈方式时,调节时间由 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 这五部分构成,其中 T_4 是跟随运行状态变化的,因此总调节时间在 $56 \sim 80\text{ ms}$ 之间变化。采用反馈 + 线性化方式时,线性化部分消除了 T_4 ,此时调节时间由 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_5 这四部分构成,因此调节时间固定为 56 ms ,由于存在积分环节,存在一定的超调量。采用前馈 + 反馈 + 线性化方式时,前馈控制的加入,消除了 PI 延迟时间 T_5 ,此时调节时间由 T_1 、 T_2 、 T_3 这三部分构成,因此调节时间固定为 36 ms ,基本无超调量。

3 仿真与实验结果分析

3.1 仿真结果分析

搭建基于 Matlab/Simulink 的 STATCOM 仿真系统,系统参数如表 2 所示。图 11 为滤波器检测延迟和三种控制方法的调节过程。其中, B_1^* 为负载瞬时电纳, B_1 为检测到的负载电纳, B_{g1}^* 、 B_{g2}^* 、 B_{g3}^* 分别为控制方法 1、控制方法 2、控制方法 3 的瞬时电纳。在 100 ms 之前,系统空载运行。在图 11(a) 的 100 ms 时刻投入阻感负载,功率因数为 0.995 ,无功功率为 12 kvar 。负载瞬时电纳表明,负载电纳在 1 ms 时间内上升到正额定值(感性),延迟 T_2 (2 ms) 时间后 B_1 开始上升,平滑上升 T_1 (10 ms) 时间后稳定到 0.25 S 。由空载切换到额定感性时,三种控制方法的输出功率均由 0 kvar 切换到 -12 kvar ,调节时间分别为: 60 ms 、 56 ms 、 36 ms ,控制方法 1 和 3 无

超调,控制方法 2 超调量为 25%。

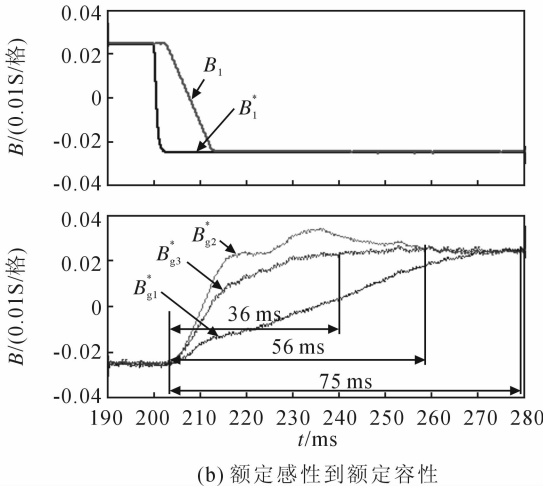
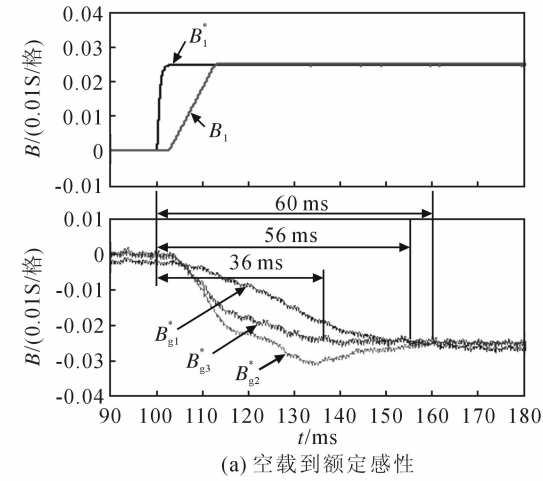


图 11 三种控制方法调节过程
Fig. 11 Regulation process of three control theories

在图 11(b)的 200 ms 时刻,在阻感负载基础上投入阻容负载,阻容负载功率因数为 -0.0995 ,无功功率为 -24 kvar 。负载瞬时电纳表明,负载电纳在 1 ms 时间内由正额定值(感性)下降到负额定值(容性),延迟 $T_2(2\text{ ms})$ 时间后 B_1 开始下降,平滑下降 $T_1(10\text{ ms})$ 时间后稳定到 -0.25 S 。由额定感性切换到额定容性时,三种控制方法的输出功率均由 -12 kvar 切换到 $+12\text{ kvar}$,调节时间分别为:75 ms、56 ms、36 ms,控制方法 1 和 3 无超调,控制方法 2 超调量为 30%。

两种工作状态时,控制方法 3 的调节时间和超调量均基本固定不变,控制方法 1 由于非线性特性使调节时间不固定,控制方法 2 由于引入了 PI 积分环节,因此存在一定超调量。

需要说明的是,由于瞬时电纳 B^* 仅适用于三相对称系统,因此图 11 的实验中投入的负载均为三相对称负载,这样可以确保 STATCOM 输出电流也为

三相对称,从而可采用式(3)计算瞬时电纳,进而确定系统调节时间。图 11 中三种控制方式 STATCOM 输出瞬时电纳均存在一定的纹波,这是阶梯波调制法输出电流高次谐波所导致。下面的硬件实验中将重点验证不平衡负载的平衡补偿能力。

3.2 实验结果分析

搭建基于 DSP/FPGA/CPLD 的 STATCOM 实验系统,系统参数如表 2 所示。

进行开环实验,测量得到移相角度 δ 与 STATCOM 输出电纳 B_g 的关系如图 12 所示。实验中,系统电压为 400 V,调制比为 1,额定容量时 B_g 为 0.025 S 。

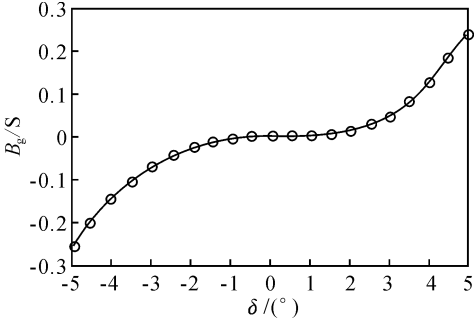


图 12 输出电纳 B_g 与移相角度 δ 的关系
Fig. 12 The relation between output susceptance B_g and phase-shifting angle δ

对图 12 的关系曲线进行拟合,可得到以 B_g 为输入,以 δ 为输出的查询表,进而将 STATCOM 线性化。

设置如图 13 所示的单相负荷系统,其中,单相负载 R_1 通过开关 K 接入到电网,电阻功率为 2 kW 。

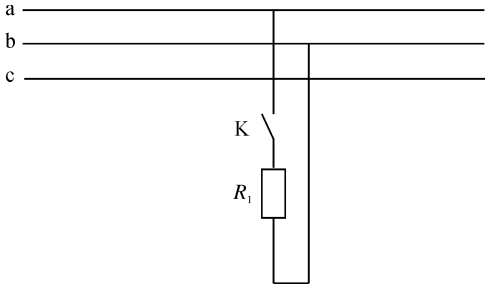


图 13 单相负荷系统
Fig. 13 Single phase load system

投入负载前后负载电流、STATCOM 和母线电流的波形如图 14 所示。

图 14(a)为单相负荷的电压和电流波形,其中,由于 a 相电流与 b 相电流大小相等,方向相反,均为 4.87 A ,c 相电流为零,呈现三相不平衡状态。

图 14(b)为母线电压和 STATCOM 输出电流波形,其中,a 相电流为零,b 相输出容性电流,c 相输

出感性电流, b 相和 c 相电流大小相等, 均为 2.82 A。

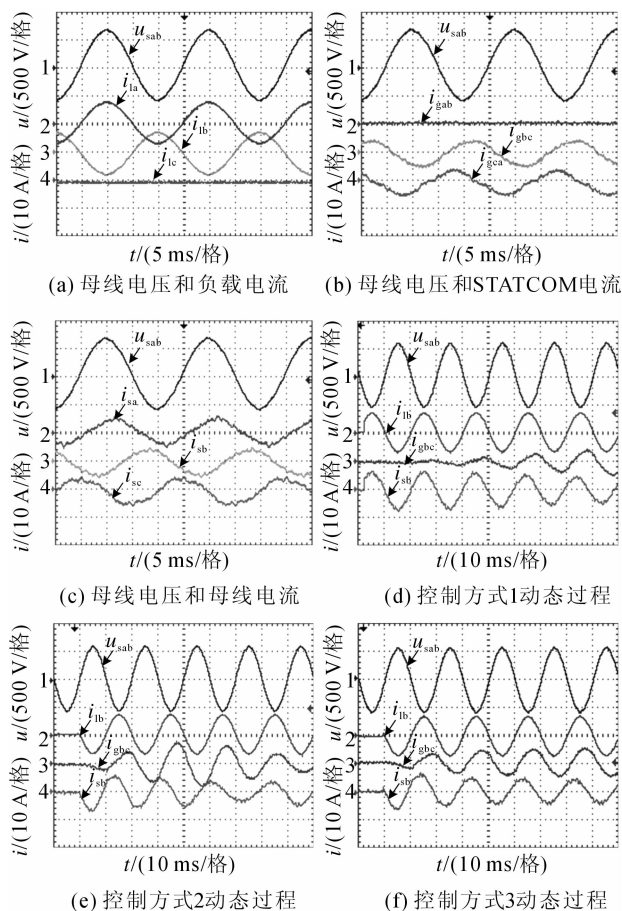


图 14 母线电压和负载、STATCOM、母线电流

Fig. 14 Line-voltage of grid bus and current of load, STATCOM, grid bus

图 14(c) 为 STATCOM 补偿后的母线电压和三相母线电流波形, 三相母线电流大小相等, 均为 2.86 A, 表明 STATCOM 已将单相负荷平衡为三相对称负荷。

图 14(d)、(e)、(f) 分别为突加单相负荷时控制方法 1、2、3 的负载电流、STATCOM 电流和母线电流的动态调节过程。突加单相负荷后, STATCOM 在 5 ms 之内开始输出电流, 表明系统响应时间为 5 ms, 在两个电网周期(40 ms)之后, 系统母线电流基本稳定, STATCOM 的调节时间与理论计算和仿真分析结果(36 ms)接近。

4 结 语

本文介绍了一种用于不平衡负荷补偿的链式 STATCOM 控制系统。该控制系统方案对非线性特性(主要为等效电阻的非线性特性)进行线性化处理, 采用 ip-iq 法、对称分量法进行延迟时间固定的基波检测, 从而将控制系统设计转化为二阶系统设计

问题。采用负荷导纳前馈和母线导纳反馈结合的方法, 响应速度快, 稳态精度高, 并将调节系统设计问题由二阶系统设计转化为一阶系统设计。搭建了仿真和实验系统, 实验结果验证了本文设计控制系统的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] 罗安, 欧剑波, 唐杰, 等. 补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 55-60.
- [2] Luo An, Ou Jianbo, Tang Jie, et al. Research on control method of STATCOM for grid voltage unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 55-60.
- [3] 许树楷, 宋强, 朱永强, 等. 用于不平衡补偿的变压器隔离型链式 D-STATCOM 的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 137-143.
- [4] Xu Shukai, Song Qiang, Zhu Yongqiang, et al. Research on the transformer-isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 137-143.
- [5] Peng F Z, Lai J S. Dynamic performance and control of a Static Var Generator using cascade multilevel inverters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1997, 33(3): 748-754.
- [6] 欧阳旭东, 彭程, 胡广振, 等. 高压大容量静止同步补偿器功率开关器件选用分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 113-118.
- [7] Ouyang Xudong, Peng Cheng, Hu Guangzhen, et al. Power device characterization and selection of high voltage and high power STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 113-118.
- [8] 王轩, 林嘉扬, 腾乐天, 等. d-q-0 坐标系下链式 STATCOM 电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 48-54.
- [9] Wang Xuan, Lin Jiayang, Teng Letian, et al. Current control strategy of chain circuit STATCOM in d-q-0 coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 48-54.
- [10] 姜齐荣, 蒋霞, 梁旭, 等. 大容量 STATCOM 装置的非线性特性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(3): 326-328.
- [11] Jiang Qirong, Jiang Xia, Liang Xu, et al. Nonlinear characteristics of a large capacity STATCOM[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(3): 326-328.
- [12] 张茂松, 李尚盛, 查晓明, 等. 链式 D-STATCOM 的鲁棒 L2 性能准则设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 71-79.
- [13] Zhang Maosong, Li Shangsheng, Zha Xiaoming, et al. Robust L2 performance criteria design for cascade D-STAT-

- COM[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 71-79.
- [8] 刘钊,刘邦银,段善旭,等. 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.
- Liu Zhao, Liu Bangyin, Duan Shanxu, et al. Research on cascade multilevel STATCOM under unbalanced System voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 1-7.
- [9] 魏文辉,刘文华,宋强,等. 基于逆系统方法有功-无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):23-28.
- Wei Wenhui, Liu Wenhua, Song Qiang, et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 23-28.
- [10] 刘钊. 风力发电系统中链式 STATCOM 关键技术[D]. 武汉:华中科技大学,2010:36-38.
- Liu Zhao. Research on key techniques in cascade multilevel STATCOM for wind power generation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010: 36-38.
- [11] Se-Kyo Chung. A phase tracking system for three phase utility interface inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(3): 431-438.
- [12] Li Kuang, Liu Jinjun, Wang Zhaoan, et al. Static var generator control strategy for unbalanced systems in medium voltage applications[C]//35th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004:4257-4262.
- [13] 曾光,康兰,杨波,等. 基于瞬时无功理论的无功电流检测方法研究[J]. 电力电子技术,2009,43(6):9-11.
- Zeng Guang, Kang Lan, Yang Bo, et al. Research on reactive current detection methods based on instantaneous reactive power theory[J]. Power Electronics, 2009, 43(6): 9-11.
- [14] Diego S, Ruben P. Nonlinear control strategies for cascaded multilevel STATCOMs[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1919-1927.
- [15] 张靠社,杨宝杰,腾夏晨. SVC 与发电机励磁鲁棒非线性协调控制[J]. 西安理工大学学报,2009,25(2): 193-196.
- Zhang Kaoshe, Yang Baojie, Teng Xiachen. Robust nonlinear coordinated control for SVC and generator excitation [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(2): 193-196.
- [16] Kang D W, Kim H C, Kim T J, et al. A simple method for acquiring the conducting angle in a multilevel cascaded inverter using step pulse waves[J]. IEE Proc Electric Power Applications, 2005, 152(1): 103-111.

(责任编辑 王卫勋)