

1-2-2019

## Passivity-based Control for Three-phase Four-bridge D-STATCOM in Low-voltage Distribution Network

Zheng Hong

*Jiangsu Key Laboratory of Drive and Intelligent Control for Electric Vehicle, School of electrical and information engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;*

Wencheng Xu

*Jiangsu Key Laboratory of Drive and Intelligent Control for Electric Vehicle, School of electrical and information engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;*

Jiawei Zhang

*Jiangsu Key Laboratory of Drive and Intelligent Control for Electric Vehicle, School of electrical and information engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Passivity-based Control for Three-phase Four-bridge D-STATCOM in Low-voltage Distribution Network

## Abstract

**Abstract:** Three-phase four-bridge distribution static synchronous compensator (D-STATCOM) has the obvious superiority in solving the problems that brought by the three-phase unbalanced loads in the three-phase four-wire low-voltage power supply system. *The Euler-Lagrange (EL) cycle average model is established based on the synchronous rotation  $d-q-0$  coordinates. In the light of the nonlinear and strong coupling characteristics, the passivity-based control (PBC) and inverse cross coupling control strategy using the  $d-q$  axis nonlinear decoupling control. PBC controller is designed by energy shaping and damping injection (ESDI) based on the passivity of the system. The closed-loop system is demonstrating asymptotically stable according to the Lyapunov stability theory. Simulation results verify to the control strategy deal with three-phase unbalance and other problems effectively.*

## Keywords

four-bridge D-STATCOM, EL average cycle model, energy shaping and damping injection, passivity-based control

## Recommended Citation

Zheng Hong, Xu Wencheng, Zhang Jiawei. Passivity-based Control for Three-phase Four-bridge D-STATCOM in Low-voltage Distribution Network[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1082-1089.

# 低压配电网三相四桥臂 D-STATCOM 的无源控制

郑宏, 徐文成, 张佳伟

(江苏省电动车辆驱动与智能控制重点实验室, 江苏大学电气信息工程学院 镇江 212013)

**摘要:** 三相四桥臂配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)在解决三相四线制的低压供电系统中由三相不平衡负载所带来的问题上有着明显的优越性。在同步旋转 $d-q-0$ 坐标系下建立了系统的欧拉-拉格朗日(EL)周期平均模型, 针对其非线性强耦合的特点, 采用了无源控制(PBC)叠加反交叉耦合项的控制策略实现 $d, q$ 轴分量非线性解耦控制, 根据系统的无源性采用了能量成形和阻尼注入(ESDI)的方法设计了PBC控制器, 并从Lyapunov稳定性理论上论证了闭环系统的渐进稳定, 通过仿真实验验证采用的控制策略实现了三相不平衡等问题的有效处理。

**关键词:** 四桥臂 D-STATCOM; EL 周期平均模型; 无源控制; 能量成形和阻尼注入

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1082-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803039

## Passivity-based Control for Three-phase Four-bridge D-STATCOM in Low-voltage Distribution Network

Zheng Hong, Xu Wencheng, Zhang Jiawei

(Jiangsu Key Laboratory of Drive and Intelligent Control for Electric Vehicle,  
School of electrical and information engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Three-phase four-bridge distribution static synchronous compensator (D-STATCOM) has the obvious superiority in solving the problems that brought by the three-phase unbalanced loads in the three-phase four-wire low-voltage power supply system. The Euler-Lagrange (EL) cycle average model is established based on the synchronous rotation  $d-q-0$  coordinates. In the light of the nonlinear and strong coupling characteristics, the passivity-based control (PBC) and inverse cross coupling control strategy using the  $d-q$  axis nonlinear decoupling control. PBC controller is designed by energy shaping and damping injection (ESDI) based on the passivity of the system. The closed-loop system is demonstrating asymptotically stable according to the Lyapunov stability theory. Simulation results verify to the control strategy deal with three-phase unbalance and other problems effectively.

**Keywords:** four-bridge D-STATCOM; EL average cycle model; energy shaping and damping injection; passivity-based control

## 引言

在我国配电网中主要采用三相四线制的供



收稿日期: 2016-02-29 修回日期: 2016-04-25;  
基金项目: 江苏高校优势学科建设工程(61074019);  
作者简介: 郑宏(1965-), 男, 福建武夷山, 博士, 教授, 研究方向为大功率电力电子变换器等; 徐文成(1990-), 男, 江苏扬州, 硕士生, 研究方向为电能质量控制, 电力电子变换器。

电方式, 配电变压器多为 Y/YN0 接线方式。理想情况下, 三相负荷为平衡配置, 变压器对称运行。可实际上, 用户端存在着大量的冲击性负荷及大容量单相负载, 例如电力机车、轧钢机、交流电弧炉以及大量半导体变流器等电力电子装置引起的电流不平衡、畸变和三相供电电压不平衡、闪变、波动。与三相三线制系统不同的是当三相负载不平衡

时零线往往会流过较大电流, 面对供配电系统中上述问题日趋严重的状况, 传统的谐波抑制及无功补偿方法已难以满足现在所提出的智能电网的发展需求。为了弥补传统补偿装置的不足, 现在多采用静止同步补偿器, 该电力电子装置为自换相桥式电路, 并联在电网中, 可实时调整输出不平衡、无功及谐波电流, 以对消配电网中的不平衡、无功、谐波电流分量, 调节 PCC 三相供电电压。本文研究的对象是三相四桥臂电压源型 D-STATCOM, 前三个桥臂可实现三相谐波及无功补偿, 调节 PCC 电压; 第四个桥臂独立用于控制零线电流, 控制方法较为灵活, 本文主要研究三相四桥臂 D-STATCOM 基于无源性理论的电流跟踪反馈控制算法。

目前无源控制算法已经在文献[1]中三相电压型 PWM 逆变器和文献[2]三相电压型 PWM 整流器方面得到成功应用, 并具有更好的动静性能, 保持功率快速响应; 文献[3]已将无源控制运用于“T”型三电平并网逆变器, 可使系统运行于单位功率因数下, 逆变器输出较低的谐波电流; 文献[4]已经将其成功运用于模块化多电平变换器, 改善了 MMC 的动静性能、直流电压稳定性更好; 文献[5-6]在 DC-DC 开关变换器中使用了无源控制都得到了所期待的控制效果。目前以三相四桥臂为主电路拓扑的研究多集中于有源电力滤波器及离网型和并网型逆变器, 并且为消除三相不平衡负载产生的问题都运用了复杂的控制算法, 如文献[7]提出基于内环空间矢量电流调节器和外环同步坐标 PI 控制器级联的控制方案应用于逆变器, 但是双环级联控制增加了控制系统的复杂性不利于参数整定; 文献[8]提出重复控制和 PI 双闭环控制的三相四桥臂逆变器; 文献[9]提出了 ABC 坐标系下将重复控制和 PI 控制结合运用于分列式三相四线制有源电力滤波器; 文献[10]采用了改进比例谐振控制器实现了三相四线制光伏发电和有源滤波器系统, 但是比例谐振控制需要设置的参数较多给控制器的设计带来困难; 文献[11]研究了两电平三桥臂 D-STATCOM 在电网电压不平衡时采用正负序双闭环控制; 文献

[12]对三相四桥臂 SVG 研究采用了 PI 控制器对其进行控制, 并没有进行在三相电网不平衡时候的仿真研究, PI 控制器为线性控制器运用于非线性系统补偿效果并不理想。

本文主要对三相四桥臂 D-STATCOM 用于实现三相四线制供电系统中由带三相不平衡、非线性负载时所产生的三相电流问题补偿处理时的电流跟踪反馈控制算法进行了研究。为此根据系统主电路结构图建立了 a-b-c 静止坐标系下的状态方程, 为便于控制器的设计对状态方程作坐标变换得到 d-q-0 坐标系下的 EL 周期平均模型。从能量成形和阻尼注入(energy shaping and damping injection, ESDI)的角度对 PBC 控制器进行设计。并针对 PBC 控制无法消除 d、q 轴间耦合项的缺陷, 在 PBC 的基础上叠加了反相的交叉耦合项用于对消 PBC 控制器中的耦合项最终实现电流跟踪反馈控制器输出侧 d、q 轴之间无耦合项。从理论分析和仿真实验得出的补偿前后的电压电流变化结果分析证明所用控制算法可以有效地处理三相不平衡和谐波电流等问题。

## 1 D-STATCOM 的 EL 模型

### 1.1 三相四线制下的主电路

本文研究的三相四线制供电系统中 D-STATCOM 的主电路原理图如图 1 所示。图中所示  $i_{lx}(x=a, b, c, n)$  为输出反馈电流;  $C$  和  $U_{dc}$  为直流侧电容和电压;  $U_{sx}$  为 PCC 三相电网供电电压; D-STATCOM 整个系统由: 基于瞬时无功功率理论的 id-iq-i0 检测算法、基于无源性理论的电流跟踪反馈控制器和 3D-SVPWM 调制算法<sup>[12]</sup>构成。由检测所得的参考指令电流输入电流跟踪反馈控制器, 控制器输出得到参考电压矢量, 3D-SVPWM 环节输出 PWM 脉冲信号实现 D-STATCOM 的功率管的开关, 可以调整 D-STATCOM 四象限运行工作状态, 最终实现输出的反馈电流  $i_{lx}$  有效跟踪测量计算所得的参考指令电流, 即可实现对电网系统中电

流的补偿。最终达到三相电网 PCC 电压的平衡化及电网三相负载有功电流的平衡化,使功率因数接近于 1, 并且  $i_n$  零线电流明显减小。

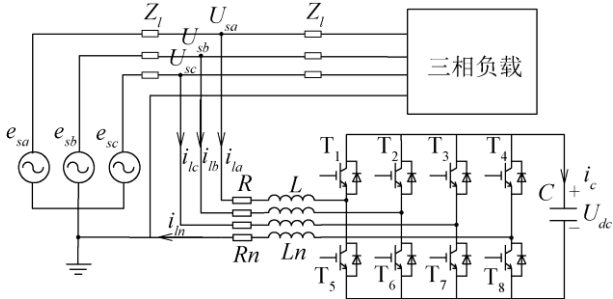


图 1 并联式 D-STATCOM 主电路拓扑图  
Fig. 1 Shunt D-STATCOM main circuit topology

### 1.2 D-STATCOM 的数学模型

由图 1 所示根据基尔霍夫电压电流定律得到 D-STATCOM 在 a-b-c 静止坐标系下的电压和电流状态方程:

$$\begin{cases} L \frac{di_{la}}{dt} + L_n \frac{di_{ln}}{dt} = U_{sa} - (S_a - S_n) \cdot U_{dc} - R \cdot i_{la} - R_n \cdot i_{ln} \\ L \frac{di_{lb}}{dt} + L_n \frac{di_{ln}}{dt} = U_{sb} - (S_b - S_n) \cdot U_{dc} - R \cdot i_{lb} - R_n \cdot i_{ln} \\ L \frac{di_{lc}}{dt} + L_n \frac{di_{ln}}{dt} = U_{sc} - (S_c - S_n) \cdot U_{dc} - R \cdot i_{lc} - R_n \cdot i_{ln} \end{cases} \quad (1)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = (S_a - S_n) \cdot i_{la} + (S_b - S_n) \cdot i_{lb} + (S_c - S_n) \cdot i_{lc} \quad (2)$$

式中:  $S_a, S_b, S_c, S_n$  为 4 个桥臂的开关函数。

考虑到三相四线制供电系统中由三相不平衡负载引起的零线电流,对上述公式(1)、(2)进行进行等功率 PARK 矩阵变换得到在同步旋转 d-q-0 坐标系下的方程为:

$$\begin{cases} L_0 \frac{di_{ld}}{dt} - \omega L i_{lq} + G_d \cdot U_{dc} + R_0 \cdot i_{ld} = U_{sd} \\ L_0 \frac{di_{lq}}{dt} + \omega L i_{ld} + G_q \cdot U_{dc} + R_0 \cdot i_{lq} = U_{sq} \\ L_0 \frac{di_{l0}}{dt} + G_0 \cdot U_{dc} + R_0 \cdot i_{l0} = U_{s0} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} - G_d \cdot i_{ld} - G_q \cdot i_{lq} - G_0 \cdot i_{l0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $L_0 = L + 3 \cdot L_n, R_0 = R + 3 \cdot R_n$ 。

### 1.3 欧拉-拉格朗日(EL)模型

定义系统的输出状态变量及输入控制变量分别为:  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [i_{ld} \ i_{lq} \ i_{l0} \ U_{dc}]^T$ ,  $u = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T = [G_d \ G_q \ G_0]^T$  进而可以将系统的 d-q-0 坐标系下非线性数学模型表示为欧拉-拉格朗日周期平均模型的形式, 即

$$M \dot{x} + Jx + Zx = \varepsilon \quad (4)$$

其中:  $M$  为正定对角矩阵, 反映主电路内部的元件参数;  $J = -J^T$  为反对称矩阵, 反映了主电路内部的互联特性;  $Z$  为对称正定矩阵, 反映系统的自身耗散特性; 列向量  $\varepsilon$  反映系统与外部的能量交换情况。模型中各矩阵的具体表达式为:

$$M = \text{diag}\{L + 3L_n, L + 3L_n, L + 3L_n, C\};$$

$$Z = \text{diag}\{R + 3R_n, R + 3R_n, R + 3R_n, 0\};$$

$$\varepsilon = [U_{sd} \ U_{sq} \ U_{s0} \ 0];$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L & 0 & G_d \\ \omega L & 0 & 0 & G_q \\ 0 & 0 & 0 & G_0 \\ -G_d & -G_q & -G_0 & 0 \end{bmatrix}.$$

### 1.4 系统无源性的证明

无源系统的定义如下: 对  $n$  输入、 $m$  输出系统:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $x \in R^m, u \in R^n, f(x), g(x), h(x)$  是分别为关于  $x$  的适维矩阵<sup>[20]</sup>。

对式(5)所示系统, 若存在半正定能量存储函数  $V(x)$  及正定函数  $Q(x)$ , 对  $\forall T > 0$  使得耗散不等式:

$$V(x(T)) - V(x(0)) \leq \int_0^T y^T u d\tau - \int_0^T Q(x) d\tau \quad (6)$$

$$\text{或 } \dot{V} \leq y^T u - Q(x) \quad (7)$$

其中:  $V(x(t))$  为系统在  $t$  时刻所具有的能量总和; 对系统输入  $u$ 、输出  $y$  及外部能量供给率  $y^T u$  成立, 即系统的能量总是小于或等于初始时刻系统所具有的能量与外部提供的能量之和, 那么这类系统就称为无源的<sup>[20]</sup>。

对于严格无源的系统, 如果存在光滑可微且正定的存储函数, 那么  $x=0$  就是该系统渐进稳定的平衡点, 而存储函数就可以成为 Lyapunov 函数。

对于四桥臂 D-STATCOM, 定义系统的能量存储函数为

$$E = \frac{1}{2} x^T M x \quad (8)$$

这里取系统输出方程为:  $y=x$ 。将能量存储函数对时间求导, 可以得到如下等式成立:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} x^T \dot{M} x + \frac{1}{2} x^T M \dot{x} = x^T M \dot{x} = x^T (\varepsilon - Jx - Zx) = x^T \varepsilon - x^T Jx - x^T Zx \quad (9)$$

由于  $J$  为反对称矩阵, 所以有  $x^T Jx=0$ , 并得到如式 (10) 成立:

$$\frac{dE}{dt} = y^T \varepsilon - x^T Zx \quad (10)$$

由于  $Z$  为半正定矩阵, 可知系统能量增长率总是小于外部注入到系统能量的供给率  $y^T \varepsilon$ , 即系统运行总是伴随着能量的损失。根据无源性系统的定义可知四桥臂 D-STATCOM 系统是无源的。

## 2 PBC 控制器的设计

### 2.1 参考指令电流的确定

D-STATCOM 的控制目标是要消除由三相不平衡及非线性负载对三相四线制供电系统所产生的负序电流、零序电流、谐波及三相供电电压不平衡等问题。为了能使直流侧电容电压的稳定采用了经典的比例积分(PID)控制器来维持电容稳定在指定电压值。参考指令电流:

$$i_{lxh}^* = -(i_x - i_{x1p} - \Delta I) \quad (11)$$

$i_x$  为电网电流,  $i_{x1p}$  为基波有功电流,  $\Delta I$  即直流电压 PI 控制器输出值生成部分有功指令电流, 用于稳定直流母线电压并补偿部分有功功率损耗,  $i_{lxh}^*$  即为参考指令电流。

### 2.2 PBC 控制器的设计及系统渐进稳定的证明

针对四桥臂 D-STATCOM 的 EL 周期平均模

型, 采用了能量成形和阻尼注入(ESDI)的方法设计系统 PBC 控制器。设闭环系统输出变量期望的稳态值为  $x^* = [x_1^* \quad x_2^* \quad x_3^* \quad x_4^*]$ , 很显然,  $x_1^* = i_{ld}^*$ ,  $x_2^* = i_{lq}^*$ ,  $x_3^* = i_{l0}^*$ ,  $x_4^* = U_{dc}^*$ 。

令  $x_e = x - x^*$ , 由式(4)可以得到系统的误差 EL 模型为:

$$M \dot{x}_e + Jx_e + Zx_e = \varepsilon - [M \dot{x}^* + Jx^* + Zx^*] \quad (12)$$

通过对比可知, 式(4)和式(12)具有相同的结构, 表明系统的误差 EL 模型仍然具有无源性, 选取系统误差 EL 模型的能量存储函数为:

$$E_e = \frac{1}{2} x_e^T M x_e \quad (13)$$

为了改善闭环系统的动态响应速度, 使误差能量函数能够快速收敛到原点, 采用了阻尼注入法。 $R_z = \text{diag}\{R_{z1} \quad R_{z2} \quad R_{z3} \quad R_{z4}\}$  为阻尼注入矩阵, 其中  $R_{z4} = 0$ , 则期望的闭环系统耗散矩阵为  $R_d = Z + R_z$ 。

由式(4), 可知阻尼注入后的系统误差 EL 模型表示为:

$$M \dot{x}_e + Jx_e + R_d x_e = \zeta \quad (14)$$

可知  $\zeta = \varepsilon - [M \dot{x}^* + Jx^* + Zx^* - R_z x_e]$ , 显然若令  $\zeta = 0$

$$\text{则: } \dot{E}_e = -x_e^T R_d x_e \leq -\alpha E_e \quad (15)$$

其中,  $\alpha$  为一严格正实数。由 Lyapunov 稳定性理论<sup>[15,20]</sup>可知, 电流闭环系统是严格渐进稳定的, 误差变量  $x_e$  渐进收敛到 0, 即实现了  $x \rightarrow x^*$ , 并且收敛速度决定于阻尼注入矩阵  $R_z$  的设置。

由式(14)可知有如下等式成立, 也即:

$$M \dot{x}^* + Jx^* + Zx^* - R_z x_e = \varepsilon \quad (16)$$

将等式展开为:

$$(L + 3L_n) \dot{i}_{ld}^* + (R + 3R_n) i_{ld}^* - \omega L i_{lq}^* + G_d U_{dc}^* - R_{z1} (i_{ld}^* - i_{ld}^*) = U_{sd} \quad (17)$$

$$(L + 3L_n) \dot{i}_{lq}^* + (R + 3R_n) i_{lq}^* + \omega L i_{ld}^* + G_q U_{dc}^* - R_{z2} (i_{lq}^* - i_{lq}^*) = U_{sq} \quad (18)$$

$$(L + 3L_n)\dot{i}_{l0}^* + (R + 3R_n)i_{l0}^* + G_0U_{dc}^* - R_{z3}(i_{l0} - i_{l0}^*) = U_{s0} \quad (19)$$

由式(17)~(19)可以得到系统的无源控制律。采用 ESDI 方法设计的 PBC 控制器是一个非线性控制器,主要基于系统自身结构参数,性能好坏主要取决于阻尼注入矩阵  $R_c$ 。

由公式(17)(18)可知 PBC 控制器无法消除 d、q 轴输出侧存在参考指令电流  $i_{ld}^*$ 、 $i_{lq}^*$  分量的耦合项,为了去除 d、q 轴参考指令电流分量的强耦合而产生的相互干扰,本文在 PBC 控制器的基础上叠加了反交叉参考指令电流耦合项来实现 D-STATCOM 的电流跟踪反馈控制器输出的 d、q 轴无耦合项,控制框图如图 2 所示。

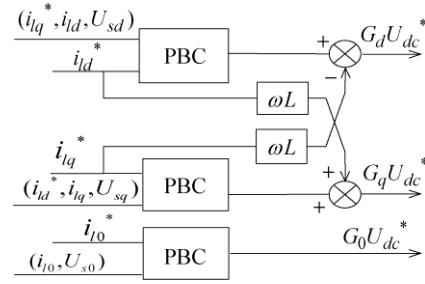


图 2 D-STATCOM 控制框图  
Fig. 2 D-STATCOM control block

### 3 仿真实验研究

#### 3.1 仿真结果分析

为验证本文用于三相四桥臂 D-STATCOM 的无源控制策略的正确性和有效性,根据上述过程的理论论证,在 MATLAB/SIMULINK 中搭建仿真实验平台如图 3 所示。

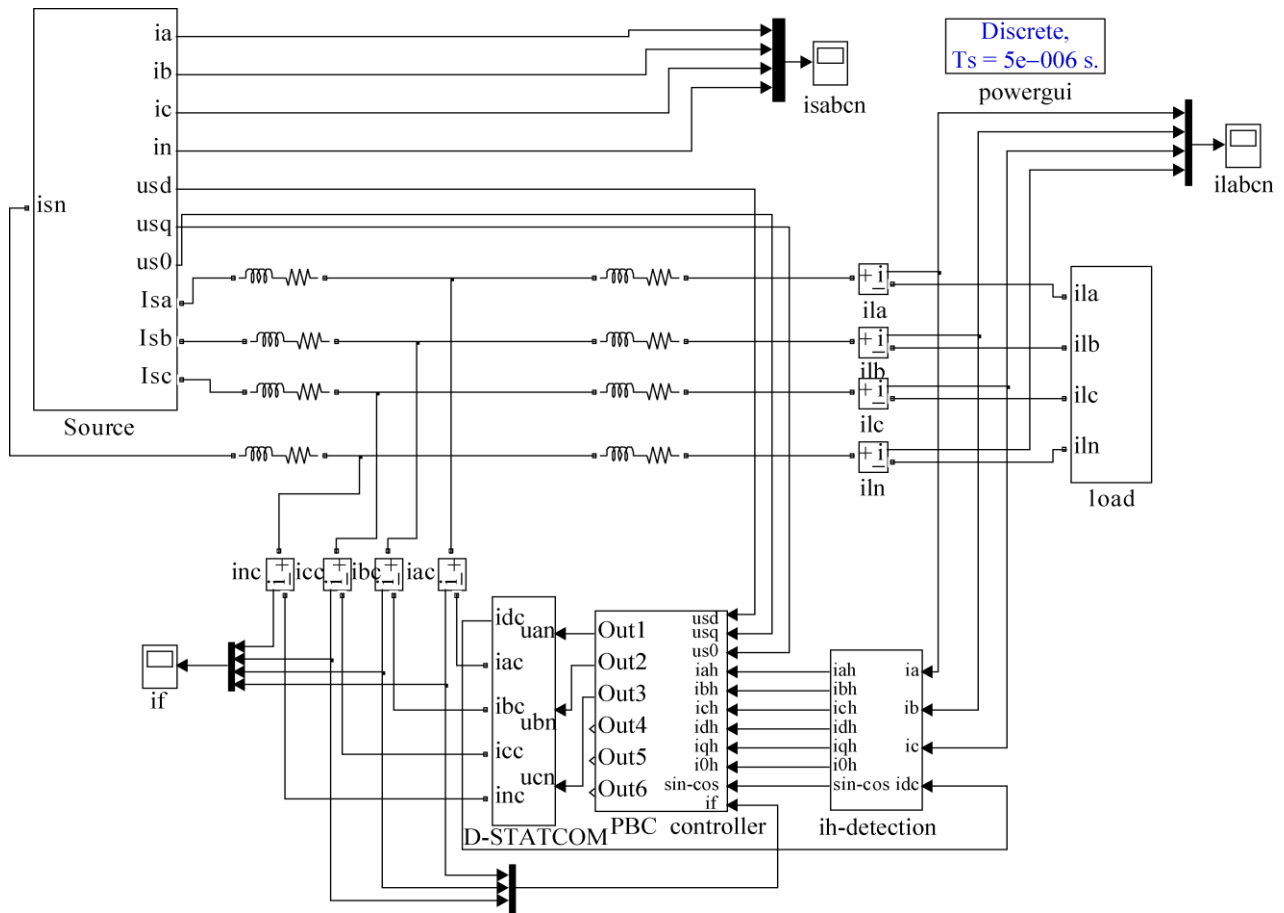


图 3 三相四桥臂 D-STATCOM 系统仿真平台  
Fig. 3 Three-phase four bridge D-STATCOM system simulation platform

仿真参数设计: 输出滤波电抗器为  $0.2 \Omega$ ,  $3\text{mH}$ , 直流侧电容为  $2\ 200 \mu\text{F}$ , 开关频率为  $5 \text{kHz}$ , 阻尼注入矩阵  $R_c = \text{diag}\{800, 800, 800, 0\}$ 。三相负载设置:  $5 \Omega, 15 \text{mH}, 8 \Omega, 17 \text{mH}, 9 \Omega, 14 \text{mH}$  的阻感负载, 以此来验证三相四桥臂 D-STATCOM 在补偿三相不平衡方面的优越性及控制算法的有效性。

仿真结果分析如下: 图 4 所示为三相补偿反馈电流与参考指令电流, 由图可以看出约在  $0.01 \text{s}$  时采用无源控制非线性反馈算法可以准确、较快地跟踪参考指令电流。

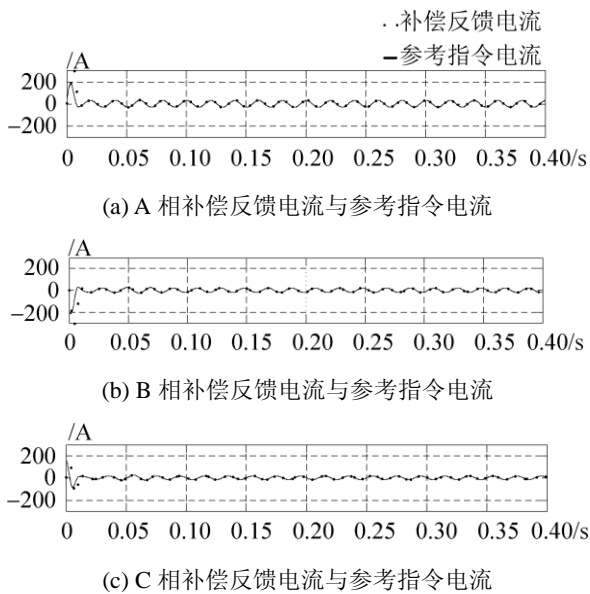


图 4 三相补偿反馈电流与参考指令电流

Fig. 4 Three-phase compensation feedback current and reference current

由图 5 所示补偿前的三相电流可以看出三相不平衡负载使得三相电流出现不平衡, 补偿后三相电流趋于平衡, 由此可见在所采用的控制电流跟踪反馈算法能够有效解决三相不平衡负载所带来的问题, 且响应速度快、补偿效果好。

为充分说明无源控制算法运用于四桥臂 D-STATCOM 在三相四线制系统中对三相不平衡问题处理的优越性, 这里给出了图 6 所示的补偿前后的零线电流的对比图, 补偿前由于三相不平衡负载引起的零线电流较大, 补偿达到稳定后的零线电流幅值约为  $1.5 \text{A}$ , 电流幅值变化明显减小, 可见三

相电流得到较好平衡化。

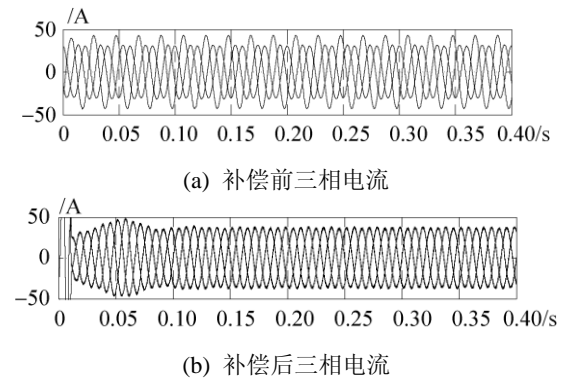


图 5 三相电流补偿前后的对比图

Fig. 5 Comparison before and after three-phase current compensation

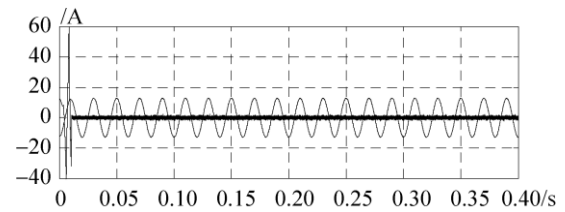


图 6 补偿前后的零线电流

Fig. 6 Neutral wire current before and after compensation

图 7 所示为补偿后的三相电压与电流, 由此可见 D-STATCOM 能够很好的实现三相四线制供电系统的无功补偿, 可以看出电流可以较快地与电压达到同相位, 即可实现三相四线制供电系统单位功率因数运行。

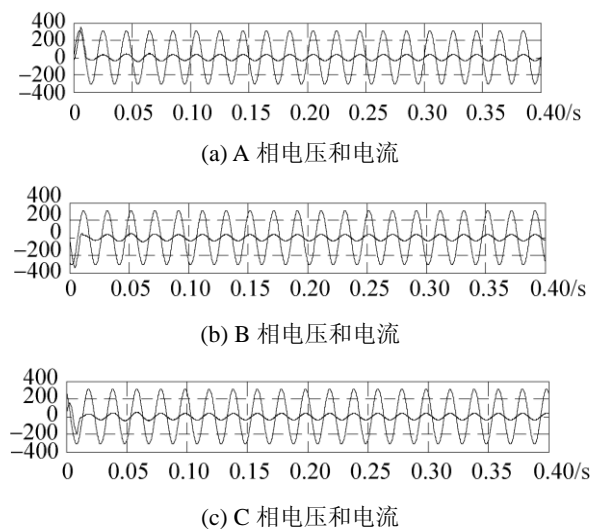


图 7 补偿后三相电压与电流

Fig. 7 Three-phase voltage and current after compensation



为验证三相四桥臂 D-STATCOM 对三相电流谐波的抑制作用,将三相负载设置为一个三相全桥不可控整流器给  $10\ \Omega$ ,  $4\ \text{mH}$  的阻感性负载供电,另外 A、B、C 三相分别接  $500\ \Omega$  的纯电阻性负载。并对补偿前后三相电流进行频谱对比分析,得到补偿前 A、B、C 相电流 THD 值分别为: 24.29%, 24.28%, 24.28%, 补偿后的三相电流 THD 分别为: 1.54%, 1.52%, 1.56%, 由此可知 D-STATCOM 对三相电流谐波有较好的抑制作用。

### 3.2 PBC 控制与 PI 控制的比较

为了说明本文所采用的控制策略的优越性,在仿真过程中在带同样的三相不平衡负载下与 a-b-c 坐标系下比例积分(PI)控制方法进行对比。PI 控制属于经典的线性控制算法只能有效跟踪直流信号,无法准确跟踪交流信号与无静差控制,必定存在稳态误差和相位偏移,PI 控制下系统响应稳定较快,但补偿后三相电流的毛刺现象严重并且零线电流补偿效果不佳如图 8 所示,且 PI 控制器参数整定困难。而无源控制器需要设置的参数只有阻尼注入矩阵  $R_z$ ,其它为系统本身的结构参数。由两种电流控制器的仿真实验效果图比较可以看出本文采用的控制策略运用于三相四桥臂 D-STATCOM 具有良好的补偿效果,说明了该控制算法的优越性。

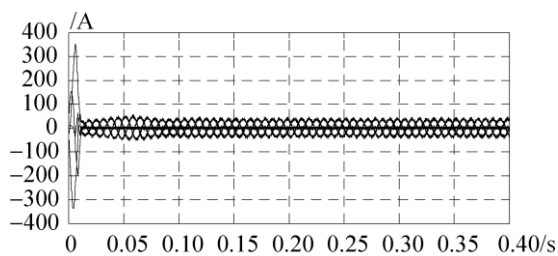


图 8 基于 PI 控制器补偿后的三相电流

Fig. 8 Three-phase current based on the compensation of PI controller.

## 4 结论

由于四桥臂 D-STATCOM 具有复杂的非线性及 dq 轴之间分量的强耦合,不易于设计其控制器

达到理想的补偿效果。本文依据主电路结构,在同步旋转 d-q-0 坐标系下建立了 EL 模型,并采用了无源控制(PBC)叠加反交叉耦合项用于对消控制器中的耦合项,并根据 Lyapunov 函数及其导函数,按稳定性理论论证了该控制算法下系统渐进稳定,由无源控制器得到无源控制律。并与经典 PI 控制器相比较可知 PBC 控制算法简洁便于理解,参数易于整定便于软件编程实现,该控制器的性能取决于采用的阻尼注入矩阵,具有一定的优越性。由仿真结果可以看出该控制算法应用于四桥臂 D-STATCOM 在三相四线制的低压供电系统中起到了很好的补偿作用,使得三相电流得到平衡化,无功电流得到补偿,三相谐波电流可以得到有效抑制。由于条件限制暂未能进行硬件平台的搭建,硬件平台的实验验证有待后续实现。

### 参考文献:

- [1] 朱凌志, 赵大伟, 张罗马, 等. 三相电压型 PWM 逆变器的拉格朗日建模与无源控制[J]. 华东电力, 2013, 41(9):1830-1834.  
Zhu Ling zhi, Zhao Dawei, Zhang Luoma, et al. Lagrange modeling and passive control of three-phase voltage PWM inverter [J]. East China power, 2013, 41(9): 1830-1834.
- [2] 王久和, 黄立培, 杨秀媛. 三相电压型 PWM 整流器的无源性功率控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 20-25.  
Wang Jiuhe, Huang Lipai, Yang Xiuyuan. Passive power control of three-phase voltage type PWM rectifier [J]. Journal of Chinese electrical engineering, 2008, 28(21): 20-25.
- [3] 张百乐, 王久和, 慕小斌. EL 模型三电平并网逆变器无源控制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 87-92.  
Zhang Baile, Wang Jiuhe, Mu Xiaobin. EL model three level grid-connected inverter without source control [J]. Journal of liaoning university of engineering technology (natural science edition), 2015, 34(1): 87-92.
- [4] 蔡新红, 赵成勇. 基于欧拉-拉格朗日模型的模块化多电平换流器的无源控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 225-233.  
Cai Xinhong, Zhao Chengyong. Passive control of modularized multi-level inverter based on euler-

- lagrangian model [J]. Journal of electrical technology, 2013, 28(10): 225-233.
- [5] 吴磊涛, 杨兆华, 胥布工. DC/DC 开关变换器的无源控制方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 66-69.  
Wu Leitao, Yang Zhaohua, Xu Bugong. The passive control method of DC/DC switching converter [J]. Journal of electrical engineering, 2004, 19(4): 66-69.
- [6] 李鑫, 李乃文, 杨桢, 等. 零电流开关准谐振 Boost 变换器的无源控制[J]. 电力电子技术, 2012, 46(2): 15-17.  
Li Xin, Li Nai wen, Yang Zhen, et al. Passive control of the zero-current switching quasi-resonance Boost converter [J]. Power electronics technology, 2012, 46(2): 15-17.
- [7] 孙驰, 毕增军, 魏光辉. 一种新颖的三相四桥臂逆变器解耦控制的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 124-130.  
Sun Chi, Bi Zengjun, Wei Guanghui. Modeling and simulation of decoupling control of a novel three-phase four-bridge arm inverter [J]. Journal of Chinese electrical engineering, 2004, 24(1): 124-130.
- [8] 张晋颖. 基于重复控制和 PI 双闭环控制的三相四桥臂逆变器[D]. 燕山: 燕山大学, 2006.  
Zhang Jinying. Three-phase four-bridge arm inverter based on repetitive control and PI double closed-loop control [D]. Yanshan: yanshan university, 2006.
- [9] 钟晓剑, 冯霞, 徐群伟, 等. 基于 ABC 坐标系的三相四线并联型 APF 控制策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(5): 889-895.  
Zhong xiaojian, Feng xia, Xu qunwei, et al. APF control strategy based on three-phase four-line parallel in ABC system [J]. Journal of zhejiang university (engineering edition), 2014, 48(5): 889-895.
- [10] 耿乙文, 伍小杰, 周德佳, 等. 基于改进型比例谐振控制器的三相四线制光伏发电和有源滤波器系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 142-148.  
Geng Yiwen, Wu Xiaojie, Zhou Dejia, et al. Three-phase four-wire photovoltaic power generation and active filter system based on improved proportional resonance controller [J]. Journal of electrical technology, 2013, 28(8): 142-148.
- [11] 唐杰. 配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)的理论与技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.  
Tang Jie. Theory and technology research of static synchronous compensator (d-statcom) in distribution network [D]. Changsha: hu'nan university, 2007.
- [12] 刘冰. 三相四桥臂静止无功发生器 SVG 的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.  
Liu Bing. Study on the SVG of the static reactive power generator of three-phase four-bridge arm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [13] 代彬. SVG 无功补偿技术及在低压配电网的应用研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2013.  
Dai Bing. SVG reactive power compensation technology and its application in low voltage distribution network. Zibo: shandong university of technology, 2013.
- [14] 金晓明. 基于李雅普诺夫稳定性的自适应模糊控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(4): 629-632.  
Jin Xiao-ming. Design of adaptive fuzzy controller based on liapunov stability [J]. Control theory and application, 2000, 17(4): 629-632.
- [15] 闻立飞. 多电平静止无功发生器(SVG)的研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2014.  
Wen Lifei. Research on multi-level static reactive generator (SVG) [D]. Jinzhou: liaoning university of technology, 2014.
- [16] 苏健. 级联 H 桥型 SVG 功率单元设计及控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
Su Jian. Research on the design and control strategy of the power unit of the cascade H bridge of the cascade [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [17] 石宗林. 静止无功发生器(SVG)无功电流检测及控制策略研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2012.  
Shi Zonglin. Study on reactive power current detection and control strategy of static reactive power generator (SVG) [D]. Jinzhou: liaoning university of technology, 2012.
- [18] Hilaiet M, Béthoux O, Ghanes M, et al. Experimental Validation of a Sampled-Data Passivity-Based Controller for Coordination of Converters in a Fuel Cell System[J]. Control Engineering Practice, 2015, 62(8): 5187-5194.
- [19] Patel D C, Sawant R R, Chandorkar M C. Three-Dimensional Flux Vector Modulation of Four-Leg Sine-Wave Output Inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1261-1269.
- [20] 曾蓉. 基于无源性理论的状态反馈控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.  
Zeng Rong. State feedback control based on passive theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.