

文章编号:1671-251X(2010)03-0053-05

## 改进的 $p-q$ 检测法在 D-STATCOM 电流检测中的应用

史丽萍, 樊丽丽, 卜令臣, 张建伟, 王太续

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**分析了传统的  $p-q$  检测法检测负载电流中的谐波、无功和负序电流量时产生误差的原因,提出了一种改进的  $p-q$  检测法。改进的  $p-q$  检测法利用电网中的一相电压构造虚拟的对称三相系统以代替实际电网的三相电压,可在电网电压不对称时仍能准确地检测出负载电流中的谐波、无功和负序电流,从而消除不对称因素造成的补偿电流检测的误差。仿真结果证实了该检测法的正确性。

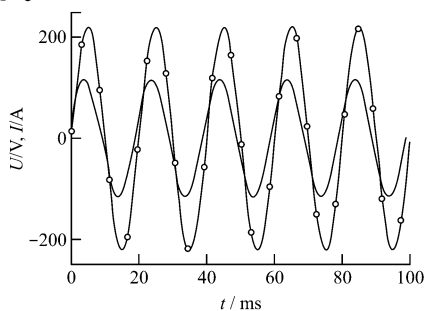
**关键词:**电网;三相电压;电流补偿;不对称; $p-q$ 检测法;D-STATCOM;Matlab 仿真

**中图分类号:**TD611;TM71 **文献标识码:**A

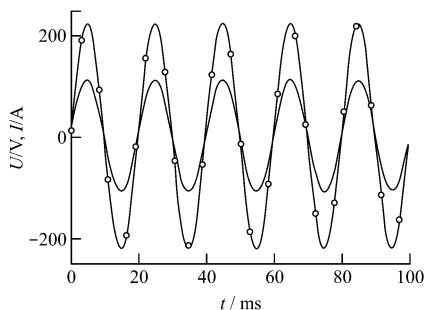
收稿日期:2009-11-15

**作者简介:**史丽萍(1964-),女,江苏溧阳人,教授,主要研究方向为电力系统自动化。E-mail:slpbbb@263.net

行仿真验证,仿真参数:输入电压为 220 V,升压电感为 0.8 mH,输出滤波电容为 680  $\mu$ F,仿真结果如图 4 所示。



(a) 未加功率因数校正电路的输入电压和电流波形



(b) 加入基于单周期控制的 Boost 变换器功率因数校正电路的输入电压和电流波形

图 4 仿真波形

从图 4 可看出,没有引入功率因数校正电路时,输入电流产生畸变,造成电路功率因数下降;而引入

基于单周期控制的 Boost 变换器功率因数校正电路后,输入电流能够很好地跟踪输入电压,大大提高了电路的功率因数。

### 4 结语

文章详细介绍了基于单周期控制的单相 Boost 变换器功率因数校正电路的设计和具体实现方法。仿真结果表明,单周期控制适用于 Boost 变换器的功率因数校正,取得了良好的控制效果,大大提高了电路的功率因数。

### 参考文献:

- [1] 万蕴杰,周林,张海,等.单周控制的发展及其应用[J].高压电技术,2007(4):163-169.
- [2] 刘凤君.现代高频开关电源技术及应用[M].北京:电子工业出版社,2008:465-466.
- [3] 朱锋,龚春英.单周期控制 Boost PFC 变换器分析与设计[J].电力电子技术,2007(1):100-102.
- [4] 武志贤,蔡丽娟,王素飞.电力电子笔唤起的单周控制方法的探讨[J].电气传动,2005(1):22-24.
- [5] 胡宗波,张波,胡少甫,等.Boost 功率因数校正变换器单周期控制适用性的理论分析和实验验证[J].中国电机工程学报,2005,25(21):19-23.
- [6] 张厚生.单周期控制的单相高功率因数整流器研究[J].电力电子技术,2007(2):43-44.

Application of Improved  $p-q$  Detection Method in D-STATCOM Current Detection

SHI Li-ping, FAN Li-li, BU Ling-chen, ZHANG Jian-wei, WANG Tai-xu  
(School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The paper analyzed error cause by use of traditional  $p-q$  detection method to detect harmonic current, reactive current and negative current of load current, and proposed an improved  $p-q$  detection method. The improved  $p-q$  method makes use of one-phase voltage to construct virtual and symmetrical three-phase voltage to replace real three-phase voltage, it can detect harmonic current, reactive current and negative current when voltages of power network is asymmetric, so as to eliminate error of compensation current detection caused by asymmetric cause. The simulation result validated the detection method.

**Key words:** power network, three-phase voltage, current compensation, asymmetry,  $p-q$  detection method, D-STATCOM, Matlab simulation

## 0 引言

补偿电流检测技术是 D-STATCOM (配电网静止同步补偿器) 的重要核心技术之一, 是 D-STATCOM 能否有效解决配电网中诸多电能质量问题的关键因素, 尤其是在电网电压不平衡条件下补偿电流的准确检测显得至关重要。因此, 开展对补偿电流检测技术的研究具有重要的意义。补偿电流检测要完成的任务就是根据 D-STATCOM 的补偿目的把要补偿的电流从负载电流中分离出来。根据 D-STATCOM 在配电网中补偿目的的不同, 所检测的对象也有所区别。笔者主要研究 D-STATCOM 被用来实现负荷的综合补偿时补偿电流的检测, 补偿电流检测包括谐波、无功和负序电流的检测。

文章针对传统的  $p-q$  检测法产生误差的原因, 提出了一种改进的  $p-q$  检测法。该检测法利用一相电压构造虚拟的对称三相电压, 避免了因电压不对称而带来的检测误差。仿真结果证明了该方法的实时性和准确性。

1 传统的  $p-q$  检测法产生误差的原因

假设三相电网电压对称无畸变, 三相电路各相电压的瞬时值分别为  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ , 各相电流的瞬时值分别为  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ , 通过三相至两相的坐标变换 (见图 1), 把它们变换到两相正交的坐标系中:

$$\begin{bmatrix} u \\ u \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$$C_{32} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

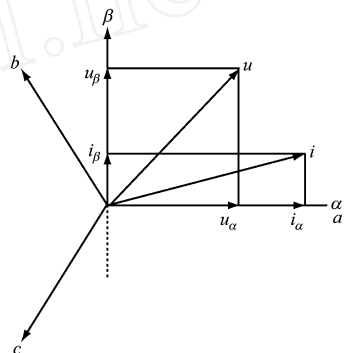


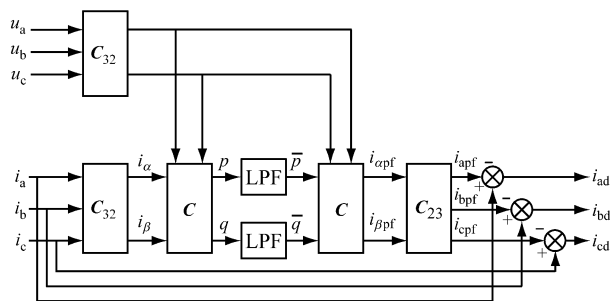
图 1 坐标轴和  $a$ 、 $b$ 、 $c$  坐标轴的位置关系

瞬时功率  $p$ 、 $q$  定义为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & u \\ u & -u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = C_{pq} \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $p = \bar{p} + \tilde{p}$ ,  $q = \bar{q} + \tilde{q}$ ,  $\bar{p}$ 、 $\bar{q}$  为瞬时功率的直流部分,  $\tilde{p}$ 、 $\tilde{q}$  为瞬时功率的交流部分。

当三相电压对称即不含有负序时,  $\bar{p}$  对应基波有功功率,  $\bar{q}$  对应基波无功功率,  $\tilde{p} + \tilde{q}$  对应负序和谐波部分。对  $\bar{p}$  进行反变换, 则可得三相电压的基波有功电流。用负载电流减基波有功电流即得需要补偿的谐波、无功和负序电流。但当电压不对称时,  $\bar{p}$  将由正序有功功率、负序有功功率构成, 由其反变换得到的有功电流将是与电压具有相同频率、相位和波形的畸变波, 检测结果不准确。可见, 当电网电压不对称时, 传统的  $p-q$  检测法在检测负载电流中的谐波、无功和负序电流时会有检测误差。传统的  $p-q$  检测法的原理如图 2 所示, 其中 LPF 为低通滤波器。

图 2 传统的  $p-q$  检测法的原理

## 2 改进的 $p-q$ 检测法

针对上面的分析,对传统的  $p-q$  检测法作出了以下的改进:

首先利用电网电压中的一相电压构造虚拟的对称三相系统。任选一相电压,以 a 相电压为例,将 a 相电压延时  $60^\circ$  并反相构成 c 相电压,由 a、c 相电压便可得到 b 相电压。

设 a 相电压为

$$u_a = U_{am} \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

式中:  $U_{am}$  为 a 相电压的幅值;  $\theta$  为初相角。

a 相电压延时  $60^\circ$  后并反相得到的 c 相电压为

$$\begin{aligned} u_c &= -U_{am} \sin(\omega t + \theta - 60^\circ) \\ &= U_{am} \sin(\omega t + \theta + 120^\circ) \end{aligned} \quad (5)$$

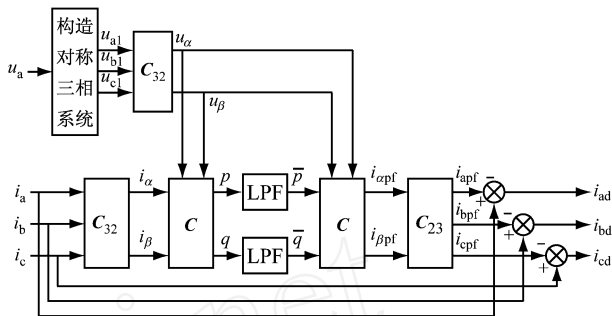
于是可得 b 相电压为

$$u_b = -u_a - u_c = U_{am} \sin(\omega t + \theta - 120^\circ) \quad (6)$$

由式(4)~(6)构成的三相系统为对称的三相系统,本文称之为虚拟对称三相系统。

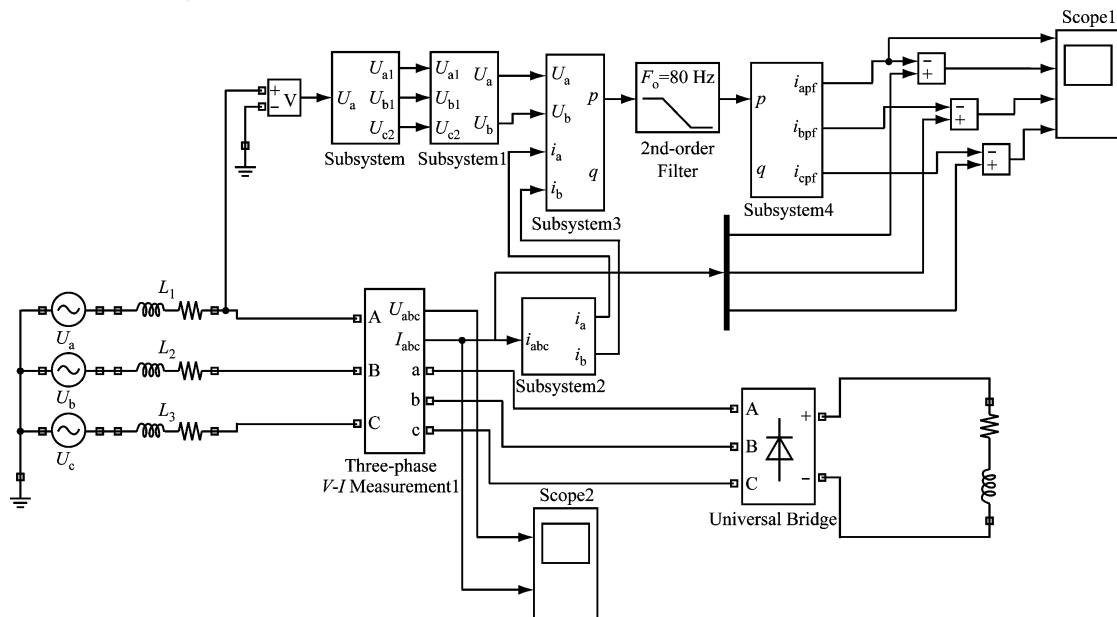
同理,可以选择 b 相电压或 c 相电压构造对称三相系统。

改进的  $p-q$  检测法的原理如图 3 所示。图 3 中的“构造对称三相系统”部分采用的就是基于 a 相电压延时的虚拟对称三相系统构造方法。

图 3 改进的  $p-q$  检测法的原理

## 3 Matlab 仿真研究

笔者利用 Matlab 软件中的 Simulink 及其提供的 PSB 模型库对谐波和无功电流的检测进行建模和动态仿真,仿真模型如图 4 所示。

图 4 改进的  $p-q$  检测法仿真模型

该模型主要由电源模块、三相/两相变换模块  $C_{32}$ 、运算模块  $pq$ 、逆运算模块  $pq^{-1}$ 、两相/三相变换模块  $C_{23}$  及 LPF 构成。

主要仿真参数:电源等效为三相相位差均为  $120^\circ$  且频率均为 50 Hz 的 220 V 交流电压源;负载

为直流侧带感性负载的二极管整流桥,  $R = 100 \Omega$ ,  $L = 1 \text{ mH}$ ;线路阻抗为  $R_L = 10 \Omega$ 、 $L_L = 1 \text{ mH}$ 。

LPF 的选择:在同阶 LPF 情况下,截止频率越高,则动态响应速度越快,精度越差;反之,截止频率越低,精度会有所提高,但动态响应速度会慢。考虑

到非线性负载电流可能含有3次谐波电流,它经三相/两相变换后成为2次谐波电流,因此截止频率必须小于100 Hz,为进一步避免系统中其它参数的影响,此处选为80 Hz。此外,LPF的阶数不同,也会影响检测效果。如果LPF的阶数较高,则滤波效果好,但动态响应速度慢;阶数太低,则动态响应速度快,而滤波精度较差。综合考虑,此处LPF的阶数选为二阶。

电网电压对称时仿真波形如图5所示,电网电压不对称时仿真波形如图6所示。

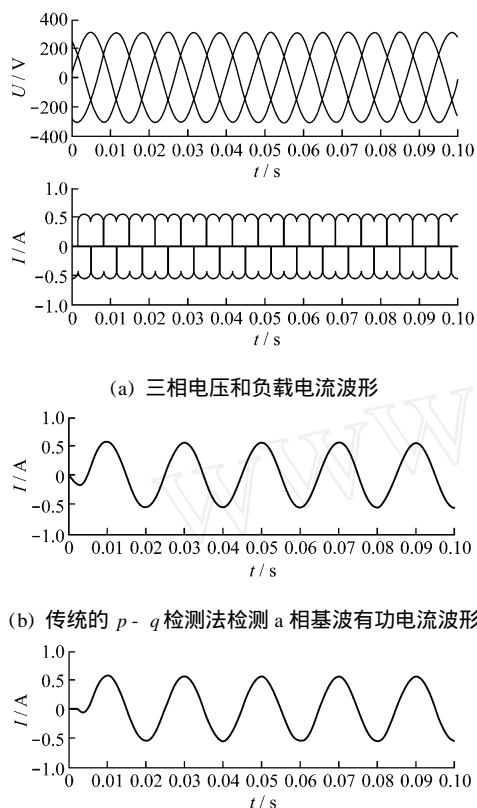


图5 电网电压对称时仿真波形

从图5可看出,当电网电压对称时,传统的 $p-q$ 检测法和改进的 $p-q$ 检测法都能准确检测出基波有功电流(等于基波正序有功电流),从而准确检测出谐波和无功电流值。

当电网电压不对称时,比较图6(b)和图6(c)可看出:(1)传统的 $p-q$ 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,而改进的 $p-q$ 检测法中波形和正弦波相当,比较理想。图6只给出了2种方法的a相仿真比较图,其实b相、c相仿真结果一致,都较传统方法的波形有很大的改善;(2)传统的 $p-q$ 检测法测得的基波正序有功电流峰值比准确值偏大,参考文献[5]中也得以验证,而

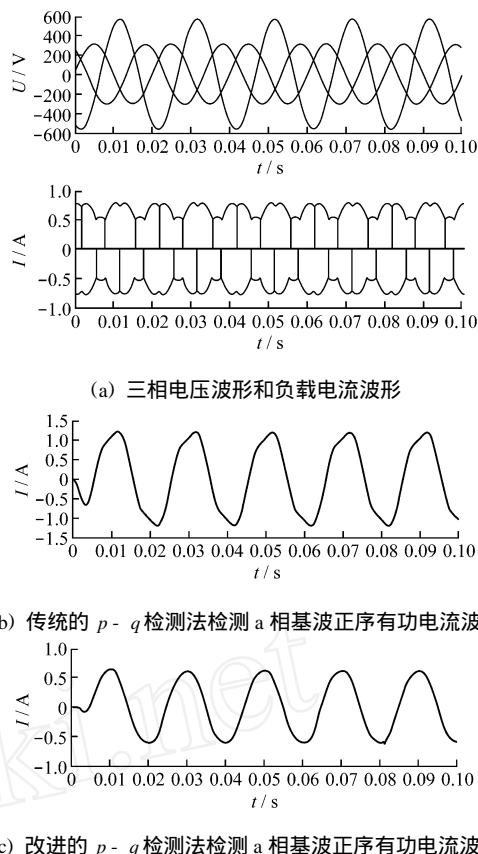


图6 电网电压不对称时仿真波形

改进的 $p-q$ 检测法测得的基波正序有功电流峰值与准确值相当。这表明当电网电压不对称时,传统的 $p-q$ 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;而采用本文所提的虚拟对称三相系统构造电路检测法,检测效果有明显改善。

#### 4 结语

本文提出的改进的 $p-q$ 检测法采用电网电压中任意一相电压构造出对称的三相电压,在电网三相电压不对称的情况下,仍然能精确地检测谐波、无功和负序电流,消除了不对称因素造成的对补偿电流检测产生的误差。仿真结果证实了该检测法的正确性。

#### 参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 孙树勤.无功补偿的矢量控制[M].北京:中国电力出版社,1998.
- [3] 卢恩贵.电网电流实时检测电路的设计与分析[J].工矿自动化,2007(2):60-63.
- [4] 廖志凌,梅从立.一种基波无功电流检测方法的讨论[J].电气传动,2004(4):39-41.

文章编号:1671 - 251X(2010)03 - 0057 - 04

# 直流双闭环调速系统及其模糊控制的仿真

欧卫斌

(宝鸡文理学院电子电气工程系,陕西 宝鸡 721007)

**摘要:**给出了常规直流双闭环调速系统的仿真模型,采用 Matlab 对该模型进行了仿真,得出结论:常规直流双闭环调速系统具有较好的动态与静态特性,可以很好地抑制扰动量对电动机转速的影响,但该系统依赖精确数学模型,在增加解决环节的同时,系统模型趋于复杂,可能还会影响系统的可靠性。在该分析结果的基础上,提出了一种基于模糊控制+PI 转速调节器的直流双闭环调速系统的设计方案,该方案中电流环仍采用常规 PI 调节,转速环改为模糊控制器与常规 PI 调节分时作用方式。仿真结果表明,引入模糊控制器的新系统响应速度快、过渡稳定、系统超调得到改善。

**关键词:**直流电动机;直流调速;双闭环;电流环;转速环;模糊控制;PID 控制

**中图分类号:**TD614;TP273.4

**文献标识码:**A

## Simulation of DC Double Closed-loop Speed-regulation System and Its Fuzzy Control

OU Wei-bin

(Dept. of Electronic and Electrical Engineering of Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721007, China)

**Abstract:** The paper gave a simulation model of common DC double closed-loop speed-regulation system and used Matlab to simulate the model, and made a conclusion: the common DC double closed-loop speed-regulation system has a better dynamic and static characteristics and can restrain influence of disturbance on rotation speed of motor. But the system depends on accurate mathematical model, which not only increases solution links but also makes system's model more complex and may affect reliability of the system. On the basis of the analysis result, the paper proposed a design scheme of DC double closed-loop speed-regulation system based on fuzzy control + PI rotation speed regulator. In the scheme, the current loop still uses common PI regulation and rotation speed loop uses time-sharing action mode of fuzzy controller and common PI regulation. The simulation result showed that the new system introduced in

收稿日期:2009 - 10 - 27

基金项目:宝鸡文理学院 2008 年重点项目(ZK08132),宝鸡文理学院 07 年科研项目(YK0711)

作者简介:欧卫斌(1977 - ),男,陕西宝鸡人,讲师,研究方向为电力电子及传动智能控制。E-mail:oywb2006@163.com

- [5] 袁川,杨洪耕.三相电压畸变且不对称时电流基波正序有功分量的改进瞬时检测方法研究[J].继电器,2005(14):57-60.
- [6] CUTRI R, LOURENO M J. A New Instantaneous Method for Harmonics, Positive and Negative Sequence Detection for Compensation of Distorted Currents with Static Converters Using Pulse width

Modulation [C]//11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2004:374-378.

- [7] 马大铭,朱东起,高景德.三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测[J].清华大学学报:自然科学版,1997,37(4):1-10.
- [8] 李红雨,吴隆辉,卓放,等.一种新型的快速电流检测方法的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(13).