

三相三线制统一电能质量调节器检测和控制方法^①

杨冬梅

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

摘要: 介绍了三相三线制统一电能质量调节器(UPQC)的拓扑结构, 并结合 UPQC 的补偿思想, 利用基于瞬时无功理论的 dq0 变换法进行电压和电流补偿信号的检测, 并对其进行仿真, 验证了该检测方法的优越性, 最后对其控制策略进行研究, 通过对 UPQC 系统的仿真实验验证了检测和控制方法的正确性。

关键词: 统一电能质量调节器; 瞬时无功理论; dq0; 控制策略; 检测方法

Detect and Control Method of Three-phase Three-Wire Unified Power Quality Conditioner

YANG Dong-Mei

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao125105, China)

Abstract: This paper describes the three-phase three-wire system of unified power quality conditioner (UPQC) topology, and combines UPQC compensation thought, using dq0 transformation method based on instantaneous reactive power theory to detect voltage and current compensation signal. The paper simulates it, validates the superiority of the detection method. At last, it studies its control strategy, through the UPQC system simulation validating the correctness of detect and control method.

Key words: unified power quality conditioner; instantaneous reactive power theory; dq0; control strategy; detection method

随着电力电子装置的广泛应用, 谐波及三相不平衡因素对电网的电能质量造成了严重的影响。当前, 对电能质量进行经济、有效的补偿成为很多领域关心和亟待解决的问题, 统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner 简称 UPQC)能够补偿电能质量的多种问题, 是一种较为理想的补偿装置, 而检测和控制是电能质量研究的关键技术, 本文针对三相三线拓扑结构的 UPQC 进行检测和控制策略的研究, 并对相关方法进行仿真, 验证了方法的正确性。

1 UPQC拓扑结构

传统的电能质量调节器由于结构单一而不能进行很好的补偿, 而 UPQC 结合了串联和并联两个有源电力滤波器, 补偿效果理想, 三相三线制和三相四线制拓扑结构是目前采用较多的, 本文对三相三线的拓扑结构进行研究, 其拓扑结构图如图 1 所示。

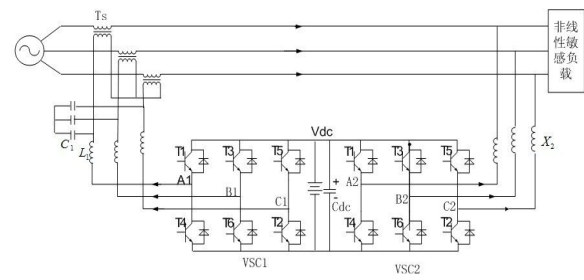


图 1 三相三线制 UPQC 拓扑结构图

工作原理^[1]为: 若配电网母线电压由于线路故障偏离正常值时, 串联变流器 VSC1 将直流电容进行 PWM 调制变换为交流补偿电压, 经串联变压器 Ts 注入到系统馈线中, 以补偿非正常电压与正常电压之差, 确保线路设备可靠工作; 若用电负荷向电网注入负序或谐波电流时, 并联变流器 VSC2 将对直流电容进行 PWM 调制而改变换流桥的输出电压, 进而调节 UPQC

① 收稿时间:2012-06-08;收到修改稿时间:2012-07-11

并联单元与电网连接处之间的联系阻抗中的电流，从而确保电力负荷不会污染电网。

2 电压、电流信号的检测

2.1 基于 dq0 的电流检测法

UPQC 作为综合电能质量补偿装置，需同时解决多重电压和电流的质量问题，这就要求能够快速检测出电压、电流补偿信号，通过查阅相关文献得知，基于瞬时无功理论的 dq0 变换法^[2]是一种简捷、快速的实时检测方法，原理为：瞬时电压和电流经下列变换到 dq0 旋转坐标系上：

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中，

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其逆变换为：

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于三相三线制，故 $i_0 = 0$

检测原理图如图 2 所示：

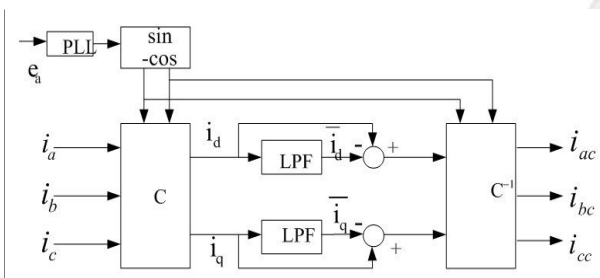


图 2 dq0 变换法检测畸变电流原理图

2.2 改进的 dq0 电压检测法

正常的 dq0 检测法可精确的检测出电流谐波和电压谐波，但当电压信号中同时含有衰减的直流分量和交流分量时，dq0 检测法只能把衰减的交流分量在短时窗内作为谐波分量处理，从而会造成一定的误差。由

于 UPQC 除了解决谐波和三相不平衡因素外，还需解决电压跌落和电压突变等问题，故需对此方法进行改进，从而有效的检测电压信号。

设三相系统表示为：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = u \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3 + \varphi) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3 + \varphi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

用 park 变换，将三相电压变换到 dq0 旋转坐标下。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = u \begin{bmatrix} \sqrt{3/2} \sin(\omega - \omega_1)t + \varphi \\ -\sqrt{3/2} \cos(\omega - \omega_1)t + \varphi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

改进后的原理图如图 3 所示：

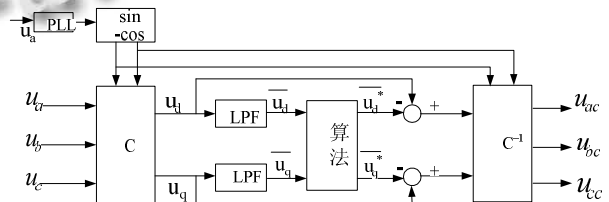


图 3 改进的 dq0 变换法检测畸变电压原理图

由图 3 可知，改进的 dq0 变换法就是在 dq0 变换法上加了个算法，由 3.1 节的方法可得：

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_d \\ \bar{u}_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} U^+ \begin{bmatrix} \cos(\varphi^+) \\ \sin(\varphi^+) \end{bmatrix} \quad (6)$$

令 $U' = \sqrt{\frac{3}{2}} U^+$ ，则有：

$$U' = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (7)$$

从而可求出：

$$\sin \varphi^+ = \frac{\bar{u}_d}{U'}, \quad \cos \varphi^+ = \frac{\bar{u}_q}{U'} \quad (8)$$

为补偿电压突变、闪变问题，引入电压幅值为 220V，则有：

$$\bar{u}_d^* = \sqrt{3} u \sin \varphi^+ \quad (9)$$

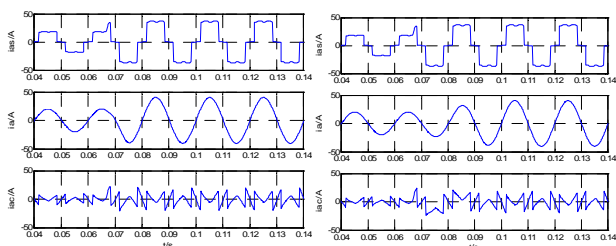
$$\bar{u}_q^* = \sqrt{3} u \cos \varphi^+ \quad (10)$$

d、q 轴的标准直流分量分别与 u_d 、 u_q 相差之后，再经 Park 反变换即可得到电压补偿分量。

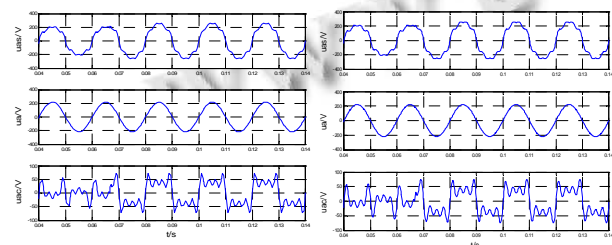
2.3 仿真分析

通过 MATLAB/Simulink 对电流补偿信号 dq0 检测

法和改进的 dq0 电压信号检测法进行仿真, 模拟被检测电压信号的基波幅值为 220V, 加入 3、5、7 次谐波, 并设置一定程度的不对称, 图 4 为 a 相电流补偿信号检测仿真结果, 在 0.067 秒时负载突变. 图 5 为电压突升为 122% 时 a 相电压补偿信号检测仿真结果, 在 0.067 秒时电压突变.



(a)dq0 检测法 (b)其他方法
图 4 电流补偿信号检测结果



(a)dq0 检测法 (b)其他方法
图 5 电压突变时电压补偿信号检测结果

从仿真结果可以看出, 负载发生突变时, dq0 变换法能够快速跟踪信号, 由于煤矿电网信号属于负载突变情况, 故本文选用的 dq0 变换法在煤矿电网信号检测上具有一定的应用价值.

3 UPQC的控制策略

UPQC 装置要求能准确补偿电网的谐波、畸变等问题, 而它的补偿策略直接影响其对电能质量的补偿能力, 通过查阅资料, 定时控制的瞬时值比较方式和空间电压矢量控制方式比其他方法更为优越, 故本文并联侧采用定时控制的瞬时值比较方式, 串联侧采用空间电压矢量控制方式.

3.1 定时控制的瞬时值比较方式

定时控制的瞬时值比较方式以固定采样周期对指令信号和被控制变量进行采样, 并根据二者偏差的极性来控制逆变电路开关器件的通断, 使被控量跟踪指令信号^[3]. 原理图如图 6 所示.

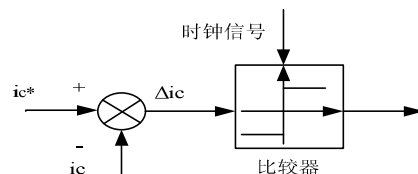


图 6 定时控制的瞬时值比较方式的原理

该方式用固定的频率采样电流信号, 每个开关管的通断时间是一个或多个电流采样周期, 开关管的最大开关频率为电流采样频率, 其电流跟踪示意图如图 7 所示. 图中 Δt 为信号采样间隔, i_c^* 为补偿电流的指令信号 i_c 为实际的补偿电流信号.

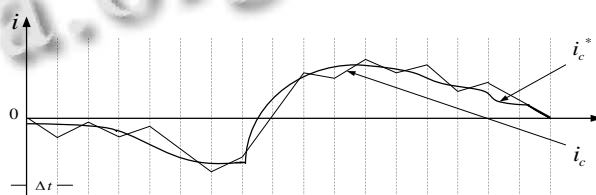


图 7 定时控制法电流跟踪的示意图

由图可知, 最大的电流跟踪误差和采样周期成正比, 提高采样频率便可提高跟踪精度.

3.2 电压空间矢量控制

电压空间矢量脉宽调制技术(SVPWM)由于其很好的性能而被广泛应用, 本文将该技术应用到 UPQC 中, 典型的电压型变流器结构图如图 8 所示.

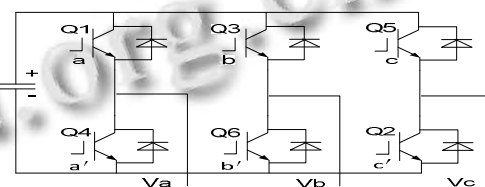


图 8 三相电压源逆变器结构

图中相电压和线电压与直流电压的关系由式(11)(12)所示.

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (12)$$

三相三线制的变流器可产生 8 个输出电压矢量, 其中 6 个可构成正六边形的顶点, 其余 2 个为 0, 基本空间矢量图^[4]如图 9 所示.

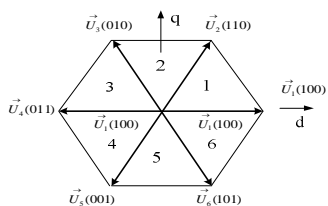


图 9 基本电压空间矢量图

将三相电压映射到 dq 坐标系下。

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$X = \sqrt{3}V_q T / V_{dc} \quad (14)$$

$$Y = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}V_q + \frac{3}{2}V_d \right) T / V_{dc}$$

$$Z = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}V_q - \frac{3}{2}V_d \right) T / V_{dc}$$

根据 V_d 、 V_q 的关系判断参考电压矢量所在的扇区 N，根据所在的扇区 N 及 X、Y、Z 来确定相邻两个基本电压矢量的作用时间 T_1 、 T_2 ，如表 1 所示。

表 1 N 与扇区及 T_1 、 T_2 关系表

N	3	1	5	4	6	2
扇区	1	2	3	4	5	6
T_1	-Z	Z	X	-X	-Y	Y
T_2	X	Y	-Y	Z	-Z	-X

开关切换点距离零点时间为 T_u, T_v, T_w

$$\begin{aligned} T_u &= (T - T_1 - T_2) / 4 \\ T_v &= T_u + T_1 / 2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$T_w = T_v + T_1 / 2$$

最后根据所在扇区确定三相调制波 $T_{cm1}, T_{cm2}, T_{cm3}$ ，经调制便可得触发脉冲波形。

4 UPQC系统仿真

设基波正弦电压幅值为 220v, a 相初相角为 0，注入 3,5,7 次谐波，幅值为 22v, a,b,c 三相存在一定不对称，谐波源为阻感负载的三相不控整流电路，负载参数为： $R=20\Omega, L=10mH$ ，模型如图 10 所示。

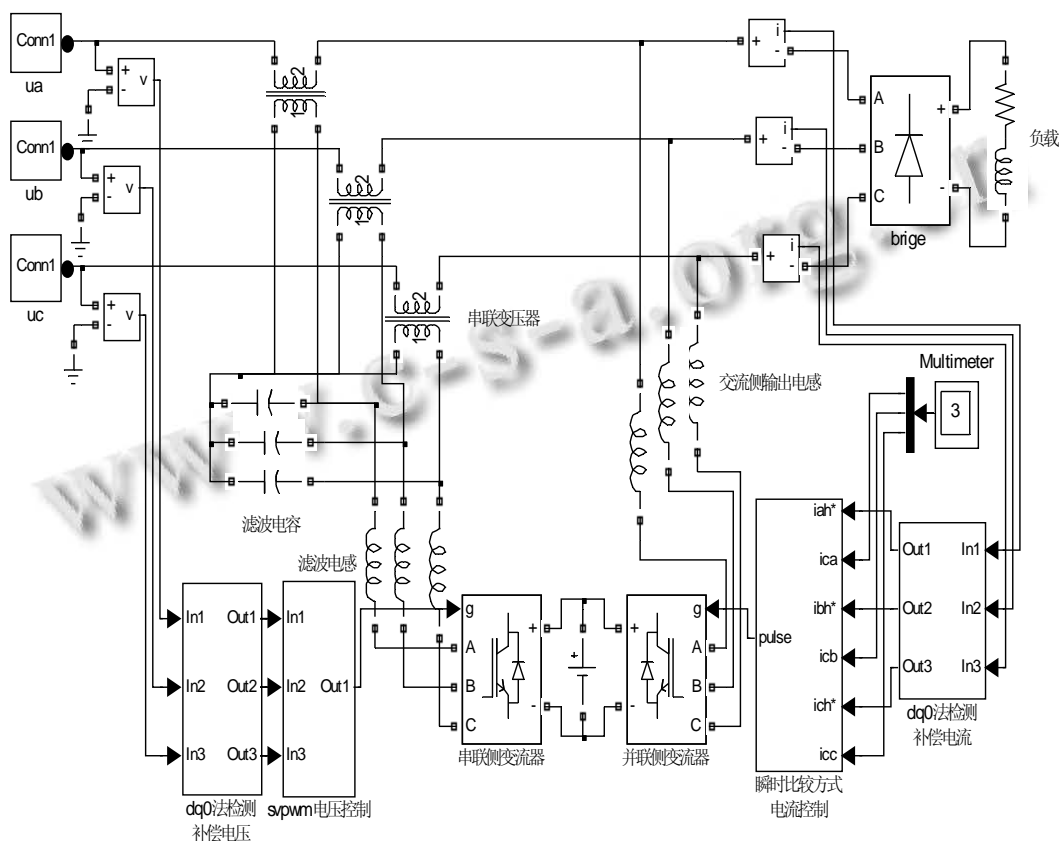


图 10 UPQC 系统模型

以 a 相为例, UPQC 补偿前后的电流波形如图 11 所示。

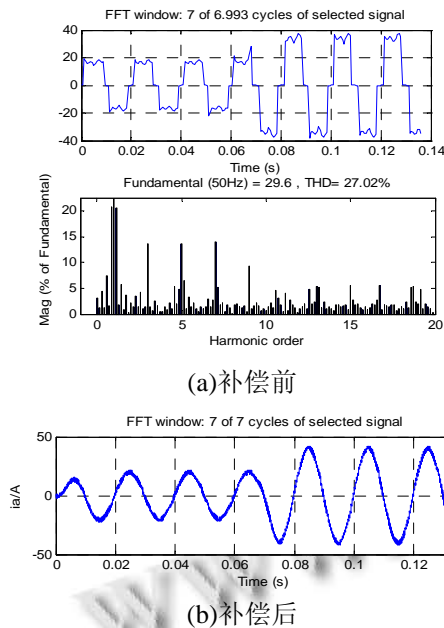


图 11 UPQC 补偿前后 a 相电流的波形和频谱

由仿真结构可看出, 补偿前电源电流含大量奇次谐波, 补偿后电流基本接近正弦波, 补偿效果较好。下面对 a 相电压进行仿真。设定电源在 0.04 秒至 0.10 秒之间时发生电压跌落, 电压峰值由 220V 降为 180V, 跌落后的电压波形和补偿后的波形如图 12 所示。

仿真结果显示, 当电源电压发生畸变时, UPQC 能够进行很好的补偿。

5 结论

本文对统一电能质量调节器的检测和控制策略进行了研究, 并对检测算法进行仿真, 最后对 UPQC 系统进行仿真, 通过补偿前和补偿后的电流电压波形对比, 验证了本文所选的检测方法和控制策略的正确性和有效性, 有一定的应用价值。

(上接第 172 页)

- 4 查晓明, 徐遐龄. 分布式发电在电力系统的应用研究现状. 变频器世界, 2007, 28(6): 40-52.
- 5 姚骏, 夏先锋, 廖勇. 交流励磁发电机励磁控制系统实验研究. 微特电机, 2010, 11(5): 65-69.
- 6 孙小虎, 杨润生, 党若雯. 基于双 PWM 励磁电源的新型交流

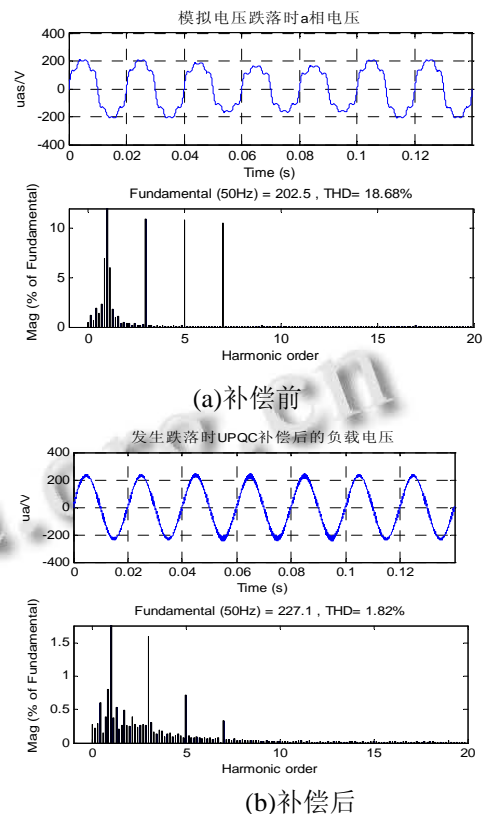


图 12 电压跌落 a 相电压补偿前后波形和频谱

参考文献

- 1 Kolhatkar YY. Experimental Investigation of a Single-Phase UPQC with Minimum VA Loading. IEEE Trans. Power Del., 2007, 22(1): 373-380.
- 2 王振浩, 吴杰, 王晓冲, 曾得俊, 孙清泉, 李国庆. 有源电力滤波器任意指定次谐波电流检测和控制策略. 电气传动, 2008, 38(11): 77-80.
- 3 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿. 北京: 机械工业出版社, 2002. 164-311.
- 4 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器. 北京: 北京科学出版社, 2005. 1-173.
- 系统. 研究与开发, 2012, 31(1): 60-62.
- 7 Krzeminski Z. Sensorless Multiscalar Control of Double Fed Machine for Wind Power Generators. Proc. of Power Conversion Conference. 2002, 1(1): 334-339.