

一种改进的无锁相环三相电压波动检测方法

苏刘军, 鲁宝春, 李昌超, 李兴进, 刘飞

(辽宁工业大学电子与信息科学工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 在检测三相电压波动时, 针对UPQC检测单元中带锁相环的dq0旋转坐标变换法存在的误差, 提出了一种改进的无锁相环三相电压波动检测方法。该方法给出了abc坐标系到静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的简化变换矩阵, 通过计算 $\alpha\beta$ 坐标系到dq0坐标系变换矩阵中的旋转量来代替锁相环获取的旋转量, 从而减少了带锁相环检测时存在的误差。在Matlab/simulink软件平台上进行了仿真分析, 仿真结果表明, 该方法与传统带锁相环的dq0旋转坐标变化法相比, 动态响应快速, 提高了检测精度。

关键词: 锁相环; dq0旋转坐标变换; UPQC; 三相电压波动; Matlab/Simulink仿真

An improved detection method without phase-locked loop for three-phase voltage fluctuation

SU Liu-jun, LU Bao-chun, LI Chang-chao, LI Xing-jin, LIU Fei

(College of Electronic & Information Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: Aiming at deviation of the traditional dq0 rotating coordinate transformation method with phase-locked loop of UPQC in the detection of three-phase voltage fluctuation, an improved detection method without phase-locked loop for compensation signal of three-phase and three-line is proposed. The method gives the simplified transformation matrix from abc coordinates system to static $\alpha\beta$ coordinates system, by calculating the rotation of transformation matrix from $\alpha\beta$ coordinates system to dq0 coordinates system instead of acquisition by the PLL, thereby reducing deviation of detection with the PLL. The proposed method is verified by simulation on the platform of Matlab/Simulink software, and the simulation results compared with traditional method show that the dynamic response is improved and performance in terms of detection accuracy is also good.

Key words: phase-locked loop; dq0 rotating coordinate transformation; UPQC; three-phase voltage fluctuation; Matlab/Simulink

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0121-06

0 引言

随着国民经济的快速发展, 电力用户对电能质量的要求越来越高, 因此, 对电能质量的改善和调节具有十分重要意义。在电能质量问题中, 电压波动(电压跌落/电压暂升)是比较突出电压质量问题^[1-2], 目前, 解决电压质量问题, 通常采用统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)、动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorer, DVR)和串联有源滤波器(Active Power Filter, APF)等电力电子装置, 而串联有源滤波器(UPQC的串联部分)成为电力网电压故障问题的最有前景的控制手段^[2-3]。无论采用哪一种的电压补

偿装置, 必须保证在电网电压出现波动时, 能够实时快速、准确的检测, 所以, 采用的电压波动检测方法是决定该装置性能的关键之一。

目前, 常用的电压波动的检测方法有瞬时无功功率理论法、dq0旋转坐标变换法、傅里叶变换及小波变换等方法^[4-8]。dq0旋转坐标变换法研究与应用最广泛, 该方法在应用上大多使用锁相环PLL(Phase-Locked Loop), 锁相环的引入不可避免地带来误差, 有时检测出的信号会严重偏离实际故障信号, 特别是当电网电压出现相位偏移或者频率发生波动时, 采用锁相环获得正弦或者余弦信号就会产生较大的误差, 影响了检测的精准性。为克服该方法存在的误差, 文献[9]提出将单相电压通过一个微分器得到与该相电压正交的微分量, 然后利用二者的正交关系直接通过数学关系求解出同步旋转角, 获得变换矩阵旋转量。文献[10]中为了去掉锁

基金项目: 辽宁省高等学校优秀科技人才支持计划(LR2013028); 辽宁省教育厅资助项目(L2012218)

相环, 通过与电网标准额定基波频率的正余弦信号计算获得基波正序电压信号, 同样, 再获得基波正序电流信号, 对这两个信号进行计算提取出基波有功电流, 从而获得补偿信号, 但是, 这种方法需要信号发生器。文献[11]提出一种单相电压暂降的新方法, 单相电压移相一个大小可调的角度构造相互垂直且正交的两相电压, 再经过变换计算电压幅值、相角。文献[12]中预设一个任意频率、任意相位的正弦参考信号代替锁相环的无锁相环单相检测方法, 通过电网电压与这个预设正余弦信号进行变换运算, 从而获得电网电压或者电流基波信息。文献[13]依据锁相环产生变换矩阵的旋转量, 变换后的量经过低通滤波器, 获得基波电压对应的直流量, 再经过计算获得基波电压的初相角, 再经过正余弦函数计算, 获得基波正序额定电压下的直流量, 再经过dq0反变换获得额定基波正序电压, 以此作为控制变流器工作的指令信号。文献[14]在瞬时无功功率理论的基础上, 设计负反馈的软件锁相环代替传统的锁相环, 通过不断地校正, 把变换矩阵旋转量的角频率 ω 逼近电网电压的角频率, 获得检测信号的准确性, 但是没有考虑电网电压相位变化带来的误差。文献[15]通过预设同步坐标旋转角速度, 查找软件中存储的正余弦函数表来获得, 以此来代替锁相环, 实际上, 是一种数字锁相环, 同样有时相位发生变化时也会带来检测误差。

上述检测法中, 大多采用预设变换矩阵中的旋转量或者软件方式代替锁相环来克服检测误差, 但是, 实际上仍然没有消除电网电压相位发生变化时存在的误差。

本文提出了一种无锁相环的三相电压跌落/暂升的检测方法, 该方法通过对三相电压信号的计算获得了与相电压同步旋转的正弦或者余弦信号, 作为旋转坐标变换的变换矩阵正余弦元素, 把待补偿的三相电压经与计算所得的变换矩阵相乘, 再经过低通滤波器, 获取基波电压经过旋转坐标变换后的直流分量, 再经过反变换就获得电网电压当中的基波正序量信号, 再与标准的基波电压额定值信号作差就获得三相电压跌落/暂升的量信号。与现有的无锁相环方法相比, 不再通过锁相或者查正弦和余弦表来获得旋转量信号, 确保了检测的实时性和准确性。

1 传统dq0旋转坐标检测原理

dq0旋转坐标检测法^[6,16], 它是目前谐波检测和无功检测应用最为广泛的方法, 利用它可以检测出

电网当中的电压谐波、电压波动、电压畸变、负序和零序电压。

1.1 信号变换

定义三相abc含畸变电网电压为

$$\begin{cases} u_a = \sum_{n=1}^{\infty} [u_{n1} \sin(n\omega t + \theta_{n1}) + u_{n2} \sin(n\omega t + \theta_{n2}) + u_{n0} \sin(n\omega t + \theta_{n0})] \\ u_b = \sum_{n=1}^{\infty} [u_{n1} \sin(n\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_{n1}) + u_{n2} \sin(n\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_{n2}) + u_{n0} \sin(n\omega t + \theta_{n0})] \\ u_c = \sum_{n=1}^{\infty} [u_{n1} \sin(n\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_{n1}) + u_{n2} \sin(n\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_{n2}) + u_{n0} \sin(n\omega t + \theta_{n0})] \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_n 为电压幅值; ω 为角频率; θ 为初相角; n 表示谐波次数; 1, 2, 0表示正序、负序和零序。

将三相电压转换到dq0坐标系下的表达式为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = C_{3s-2r} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,

$$C_{3s-2r} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

对三相三线平衡系统, 由于无零序电压分量, 可以将变换矩阵 C_{3s-2r} 简化为

$$C_{3s-2r} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

式(1)经过dq0变换, 表达式为

$$\begin{cases} u_d = \sum_{n=1}^{\infty} [u_{n1} \sin(n\omega t - \omega t + \theta_{n1}) + u_{n2} \sin(n\omega t + \omega t + \theta_{n2})] \\ u_q = \sum_{n=1}^{\infty} [u_{n1} \cos(n\omega t - \omega t + \theta_{n1}) + u_{n2} \cos(n\omega t + \omega t + \theta_{n2})] \\ u_0 = \sum_{n=1}^{\infty} [u_{n0} \sin(n\omega t + \theta_{n0})] \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, 三相含畸变电压经过变换后, 只有基波正序电压变成直流分量, n 次正序谐波电压变为 $n-1$ 次的交流分量, n 次负序谐波电压变为 $n+1$ 次交流分量。通过低通滤波器LPF提取直流分量, 再经过反变换得到基波正序电压。

由dq0坐标系到三相abc坐标系转换的表达式为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{3s-2r}^{-1} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{C}_{3s-2r}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t & 1 \\ \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \\ \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix}$$

对三相三线平衡系统, 由于无零序电压分量, 可以将反变换矩阵 \mathbf{C}_{3s-2r}^{-1} 简化为

$$\mathbf{C}_{3s-2r}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix}$$

经过dq0反变换后得到的电网三相基波正序电压。

1.2 传统dq0旋转坐标检测方法

UPQC电压检测原理图如图1所示。对A相电压进行锁相, 得到变换矩阵 \mathbf{C}_{3s-2r} 及反变换矩阵 \mathbf{C}_{3s-2r}^{-1} 中的 $\sin \omega t, \cos \omega t$; 对三相电压进行dq0变换得到 u_d, u_q , 通过低通滤波器, 滤除变换后的交流分量获取直流量 \bar{u}_d, \bar{u}_q ; 经过反变换, 即可得到基波电压正序分量 u_{an}, u_{bn} 和 u_{cn} 。再与标准额定基波正序电压 u_{ar}, u_{br} 和 u_{cr} 比较获得补偿信号 u_a^*, u_b^* 和 u_c^* 。

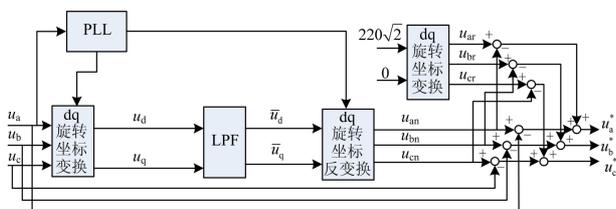


图1 UPQC电压检测原理图

Fig. 1 UPQC principle diagram of voltage detection

在传统dq0电压检测法中, 采用PLL锁相只获取电网A相电压的角频率 ω , 而非A相电压相位, 当电压初相角不为零时, 容易产生误差。

2 改进的dq0旋转坐标变换检测方法

为了提高检测信号的精准性, 必须解决电压初

相角检测问题, 使得变换矩阵 \mathbf{C}_{3s-2r} 和 \mathbf{C}_{3s-2r}^{-1} 中的同步旋转量实时跟踪电网电压的相位。本文采用计算方法来代替锁相环, 改进后UPQC电压检测原理图如图2所示。

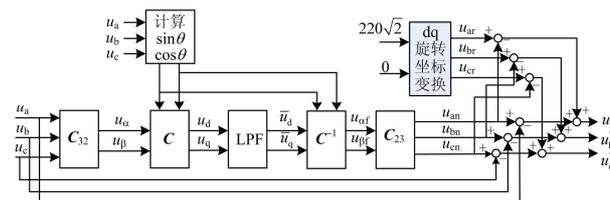


图2 改进后的电压检测原理图

Fig. 2 Principle diagram of improved voltage detection

针对三相三线制系统, 将待检测的三相电压, 变换到两相静止坐标系下的 u_α 和 u_β , 通过对这两个变量进行计算, 计算出两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系到dq0坐标系变换矩阵中的旋转量 $\sin(\omega t + \varphi)$ 和 $\cos(\omega t + \varphi)$, 然后, 由静止坐标变换到两相旋转坐标系dq0之中, 得到反映基波正序电压信息的直流量, 其变换过程为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{32} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,

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

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) & -\cos(\omega t + \varphi) \\ -\cos(\omega t + \varphi) & -\sin(\omega t + \varphi) \end{bmatrix}$$

$$\sin(\omega t + \varphi) = \frac{u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}}, \quad \cos(\omega t + \varphi) = \frac{u_\alpha}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}}$$

在三相三线制系统中, 由于其基波正序分量平衡, 为了提高检测的速度, 简化后的 \mathbf{C}_{32} 矩阵为

$$\mathbf{C}_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix}$$

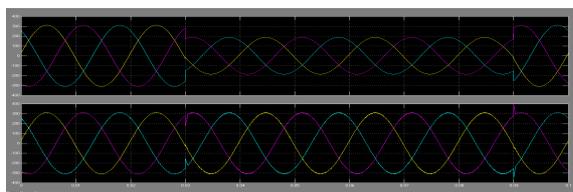


图7 无锁相环的检测补偿电压波形
Fig. 7 Compensation voltage waveform of the detection without PLL

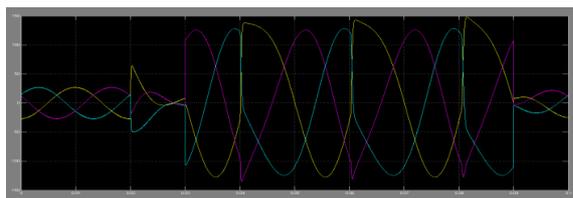


图8 带锁相环检测信号波形图
Fig. 8 Signal waveform of detection with PLL

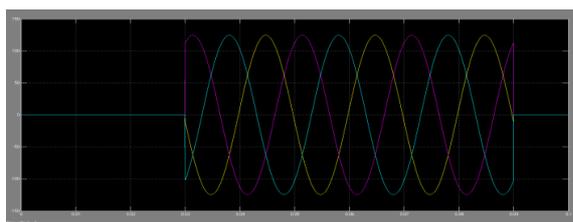


图9 无锁相环检测信号波形图
Fig. 9 Signal waveform of detection without PLL

由图6和图7两种检测方法补偿后的波形对比发现, 当电网电压相位发生变化, 采用带锁相环检测方法补偿, 补偿后的电压波形发生了明显的畸变, 说明锁相环不能对相位变化的电网电压进行准确的相位锁取, 不带锁相环检测方法补偿后的电压波形依然很好, 说明不带锁相环的检测方法在电网电压的相位发生变化时, 依然具有良好的跟踪性。通过图8和图9的检测信号波形图对比可知, 电网相位变化时, 带锁相环的检测波形误差比不带锁相环的大。当电网电压发生暂升时, 仿真结果一致。

4 结论

通过对仿真结果分析可知, 本文所提出的检测算法对于电网侧电压波动(电压暂升和电压跌落), 具有快速准确的检测性能, 克服了带锁相环 $dq0$ 旋转变换检测算法在检测电网电压发生相位变化时存在的误差, 提高了检测精度, 获得了良好的补偿性能。

参考文献

[1] 吕广强, 赵剑锋, 程明, 等. 配电网动态电能质量问题

及其解决方案[J]. 高压电技术, 2007, 33(1): 53-56.

Lü Guang-qiang, ZHAO Jian-feng, CHENG Ming, et al. Dynamic power quality problems and their solutions of distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 53-56.

[2] 许海文, 李庚银, 彭咏龙. 用户电力技术与暂态电能质量的改善[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(4): 30-35.

XU Hai-wen, LI Geng-yin, PENG Yong-long. Custom power technology and improvement of transient power quality[J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(4): 30-35.

[3] 李国勇, 刘汉奎, 徐殿国, 等. 统一电能质量调节器的研究[J]. 电力电子技术, 2003, 37(1): 74-78.

LI Guo-yong, LIU Han-kui, XU Dian-guo, et al. Research on unified power quality conditioner[J]. Power Electronics, 2003, 37(1): 74-78.

[4] 曾瑞江, 杨震斌, 柳慧超. 基于小波变换的电力系统谐波检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 35-39.

ZENG Rui-jiang, YANG Zhen-bin, LIU Hui-chao. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35-39.

[5] 房国志, 杨超, 赵洪. 基于 FFT 和小波包变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 75-79.

FANG Guo-zhi, YANG Chao, ZHAO Hong. Detection of harmonic in power system based on FFT and wavelet packet[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 75-79.

[6] 鲁波涌, 黄文清. 结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 171-177.

LU Bo-yong, HUANG Wen-qing. Hybrid wavelet-energy operator method for voltage sag detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 171-177.

[7] 李庚银, 陈志业, 丁巧林. $dq0$ 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 176-179.

LI Geng-yin, CHEN Zhi-ye, DING Qiao-lin. $dq0$ generalized instantaneous reactive power theory

- definition of the dq0 and compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 176-179.
- [8] 薛尚青, 蔡金锭. 三相电压跌落检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 91-97.
XUE Shang-qing, CAI Jin-ding. An advanced detection method for three-phase voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 91-97.
- [9] 宋飞, 罗安, 盘宏斌, 等. 改进 dq 变换法及在 STATCOM 中应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 36-39.
SONG Fei, LUO An, PAN Hong-bin, et al. The improved dq transformation method and its application in STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 36-39.
- [10] 丁菊霞, 张华俊, 张秀峰. 一种改进的无锁相环三相电路谐波电流检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 41-45.
DING Ju-xia, ZHANG Hua-jun, ZHANG Xiu-feng. An improved method without PLL on harmonics detection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 41-45.
- [11] 瞿硕, 黄纯, 江亚群, 等. DVR 电压暂降检测新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 234-239.
QU Shuo, HUANG Chun, JIANG Ya-qun, et al. A new detection method of voltage sag applied in DVR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 234-239.
- [12] 周福林, 李群湛, 解绍峰, 等. 无锁相环单相无功谐波电流实时检测方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 178-181.
ZHOU Fu-lin, LI Qun-zhan, XIE Shao-feng, et al. Real time method for single-phase reactive and harmonics currents detection without PLL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 178-181.
- [13] 伏松平, 高沁翔, 于伟伟. 基于改进 d-q-0 变换的 UPQC 串联变流器研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 31-33.
FU Song-ping, GAO Qin-xiang, YU Wei-wei. Research on series convertor of unified power quality conditioner based on improved d-q-0 transformation[J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 31-33.
- [14] WU Fu-zhuan, PEI Su-ping. Analysis and research of control strategy and signal detection based on UPQC[C] // 2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, ISA, 2010: 1-4.
- [15] 杨欢, 赵荣祥, 程方斌. 无锁相环同步坐标变换检测法的硬件延时补偿[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 78-83.
YANG Huan, ZHAO Rong-xiang, CHENG Fang-bin. Delay compensation for harmonics detection based on synchronous reference frame without phase lock loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 78-83.
- [16] PALANISAMY K, MISHRA J S, RAGLEND I. Instantaneous power theory based unified power quality conditioner (UPQC)[C] // 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) 2010, 11: 1-5.

收稿日期: 2013-07-24; 修回日期: 2013-09-15

作者简介:

苏刘军(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代电力电子应用技术; E-mail: s951747720@163.com

鲁宝春(1964-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电网络理论及电力系统稳定分析与控制。