

# 基于双 dq 坐标变换的三相电压锁相环的研究

辛业春<sup>1</sup>, 李国庆<sup>2</sup>, 王尧<sup>2</sup>, 王振浩<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 提出了一种三相电压不平衡情况下, 三相电压基波频率、正序电压分量和负序电压分量相位锁定方法。正序dq坐标变换时, 负序电压分量将在dq轴电压分量上产生交流分量, 导致基于dq坐标变换的三相电压锁相环存在误差; 通过提取负序dq坐标变换中dq轴的直流电压分量, 对正序dq坐标变换q轴电压分量进行补偿, 从而准确快速锁定正序基波电压相位。通过负序dq坐标中d轴和q轴的直流电压分量检测负序电压初相角, 锁定负序电压相位。仿真结果表明, 该方法能够快速准确地锁定三相电源在不对称情况下的基波频率、正序电压相位和负序电压相位。

**关键词:** 双dq坐标变换; 三相电压不对称; 锁相环

## Study of three-phase voltage phase locked loop based on double dq transformation synchronous reference frame

XIN Ye-chun<sup>1</sup>, LI Guo-qing<sup>2</sup>, WANG Yao<sup>2</sup>, WANG Zhen-hao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. College of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** This paper proposes a kind of method of three-phase voltage phase locked loop under three-phase unbalanced voltage. When the positive dq synchronous reference frame transforms, the dq axis voltage component will contain AC component caused by negative sequence voltage component which leads to the error of the three-phase voltage phase locked loop (PLL) based on the dq synchronous reference frame transformation. After the dq axis DC voltage component extracted from negative sequence dq synchronous reference frame transformation compensates positive sequence dq transformation synchronous reference frame q axis voltage component, the positive sequence voltage phase can be locked accurately and quickly. By the way of the negative sequence dq synchronous reference frame d axis and q axis DC voltage component detecting negative sequence voltage initial phase angle, the negative sequence voltage phase can be locked. The simulation results show that, this method can achieve the purpose that three-phase power supply frequency, positive sequence voltage phase and the negative sequence voltage phase can be fast and accurately locked in case of unbalanced three-phase voltage.

This work is supported by Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team (PCSIRT) (No. IRT1114).

**Key words:** double dq synchronous reference frame transformation; three-phase voltage unbalanced; phase locked loop

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0114-05

## 0 引言

各种电力电子装置在电力系统中得到了广泛的应用, 如静止无功功率发生器、统一电能质量调节器和并网逆变器等。准确获得电网电压相位信号, 是保证这些装置检测单元检测结果准确性和装置逆变单元稳定工作的重要条件<sup>[1-5]</sup>。

**基金项目:** 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT1114)

目前, 对电网电压相位信号获取主要采用过零比较和锁相环 (Phase Locked Loop, PLL) 两大类方法<sup>[1-3]</sup>。采用过零比较的方法由于在过零点易受电压干扰导致误差<sup>[1]</sup>。基于锁相环的电网电压相位信号检测方法在并网电力电子装置中应用广泛<sup>[6-9]</sup>。文献[1]提出了一种基于瞬时无功功率理论的软件锁相环; 文献[6]对三相数字锁相环的原理及性能进行了分析, 研究表明, 在三相电压存在畸变时, 锁相环输出存在误差。文献[7]对三相电压不平衡情况下的锁相环进行了研究, 提出了采用增加超前/

滞后环节的锁相环设计方法; 文献[8-9]研究了双 dq 变换软件锁相环的数学模型研究, 文献[10]研究了基于单/双同步坐标 (Synchronous Reference Frame, SRF) 系的软件锁相环建模和仿真; 这些方法主要采用低通滤波器滤除负序分量在 dq 轴电压分量上产生的二倍频交流分量。

本文对三相电压不平衡情况下锁相环方法进行研究, 首先分析了引起锁相环误差的原因; 通过提取负序同步旋转 dq<sup>-</sup> 坐标中 d 轴和 q 轴的直流电压分量, 对正序同步旋转 dq<sup>+</sup> 坐标变换中 q 轴电压分量进行补偿, 从而准确快速锁定基波电压正序相位。通过负序同步旋转 dq<sup>-</sup> 坐标中 d 轴和 q 轴的直流电压分量检测负序电压初相角, 然后锁定负序电压分量相位。

## 1 基于 dq 坐标变换的锁相环分析

对于三相电压信号  $\mathbf{u}_s = [u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc}]^T$ , 首先利用 Clarke 变换<sup>[11-15]</sup>将三相电压变换到两相  $\alpha\beta$  静止坐标系下得到电压分量  $\mathbf{u}_{s\alpha\beta} = [u_{s\alpha} \ u_{s\beta}]^T$ , 再经过派克变换<sup>[12-15]</sup>, 可以得到直轴电压分量和交轴电压分量  $\mathbf{u}_{sdq} = [u_{sd} \ u_{sq}]^T$ , 变换关系如式 (1)、式 (2) 所示。

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{32} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{dq+} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{C}_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{C}_{dq+} = \begin{bmatrix} \cos\hat{\theta} & \sin\hat{\theta} \\ -\sin\hat{\theta} & \cos\hat{\theta} \end{bmatrix}$ ;  $\hat{\theta}$

为电压相位期望值。

如果三相电压为三相对称电压, 即

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \cos(\omega t) \\ U_{m1} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ U_{m1} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

经过式 (1)、式 (2) 变换后可得

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \cos(\omega t) \\ U_{m1} \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \cos(\omega t - \hat{\theta}) \\ U_{m1} \sin(\omega t - \hat{\theta}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

基于同步坐标变换的三相电压锁相环结构图<sup>[4]</sup>如图 1 所示。

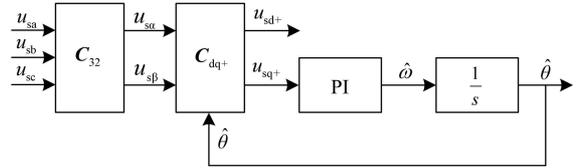


图 1 基于同步参考坐标变换的锁相环结构图

Fig. 1 Configuration of PLL based on SRF

当锁相环精确锁相后, 即  $\omega t = \hat{\theta}$ , 则  $u_{sq} = 0$ 。当三相电压为理想电压时, 此方法能够有效锁定 A 相电压相位。

然而, 对于低压配电网, 由于用电负荷的不平衡性, 导致三相电压不对称所占比例很高; 当电网发生故障时, 也会导致三相电压不对称<sup>[16]</sup>。利用对称分量法<sup>[17-18]</sup>, 可以将任意一组三相不对称的分量分解为三组对称的正序、负序和零序分量。三相不对称电压表示如式 (6) 所示。

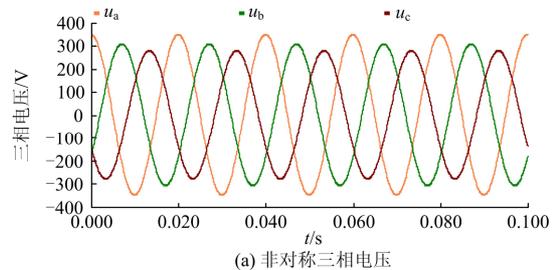
$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \cos(\omega t) + U_{m2} \cos(-\omega t + \psi^{-1}) + U_{m0} \cos(\omega t + \psi^0) \\ U_{m1} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + U_{m2} \cos(-\omega t - \frac{2}{3}\pi + \psi^{-1}) + U_{m0} \cos(\omega t + \psi^0) \\ U_{m1} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) + U_{m2} \cos(-\omega t + \frac{2}{3}\pi + \psi^{-1}) + U_{m0} \cos(\omega t + \psi^0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用式(1)、式(2)、式(4)、式(5)进行变换, 可以得到

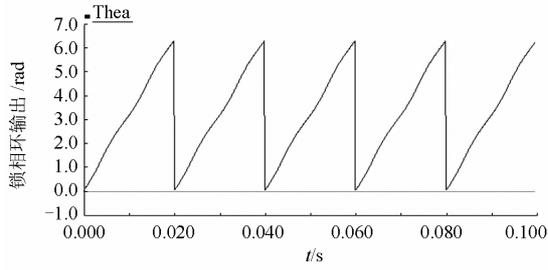
$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \cos(\omega t) + U_{m2} \cos(-\omega t + \psi^{-1}) \\ U_{m1} \sin(\omega t) + U_{m2} \sin(-\omega t + \psi^{-1}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \cos(\omega t - \hat{\theta}) + U_{m2} \cos(-\omega t - \hat{\theta} + \psi^{-1}) \\ U_{m1} \sin(\omega t - \hat{\theta}) + U_{m2} \sin(-\omega t - \hat{\theta} + \psi^{-1}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式 (8) 可以看出, 由于负序分量的存在, 导致 dq 轴电压分量存在交流分量。当三相电压不对称, 利用图 1 所示结构的锁相环, 仿真结果如图 2 所示。



(a) 非对称三相电压



(b) 非对称三相电压下基于同步参考坐标变换的锁相环输出

图 2 三相电压不平衡时基于 dq 坐标变换的锁相结果

Fig. 2 PLL response of unbalanced three-phase voltage

由图 2 可以看出，当三相电压不平衡时，锁相环输出结果和实际相位存在误差。三相电压不对称越严重，锁相环产生的误差越大。误差产生的原因是  $u_{sq}$  分量存在交流量。如果将  $u_{sq}$  分量的交流量消除，则能够得到理想的锁相环输出结果。

## 2 基于双 dq 坐标变换<sup>[19-20]</sup>的锁相环研究

### 2.1 基于双 dq 坐标变换的锁相环分析

对公式 (8) 中  $u_{sq}$  进行展开，可以得到

$$u_{sq} = U_{m1} \sin(\omega t - \hat{\theta}) + U_{m2} \sin(-\omega t - \hat{\theta}) \cos \psi^{-1} + U_{m2} \cos(-\omega t - \hat{\theta}) \sin \psi^{-1} \quad (9)$$

第 1 节所阐述的 dq 坐标变换是在正序旋转 dq 参考坐标下推导的，即旋转参考坐标的旋转角度为  $\hat{\theta}$ 。对于负序旋转 dq 参考坐标下，即旋转参考坐标的旋转角度为  $-\hat{\theta}$ ，进行 dq 坐标变换，得到

$$\begin{bmatrix} u_{sd-} \\ u_{sq-} \end{bmatrix} = C_{dq-} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} u_{sd-} \\ u_{sq-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \cos(\omega t + \hat{\theta}) + U_{m2} \cos(-\omega t + \hat{\theta} + \psi^{-1}) \\ U_{m1} \sin(\omega t + \hat{\theta}) + U_{m2} \sin(-\omega t + \hat{\theta} + \psi^{-1}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中， $C_{dq-} = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & -\sin \hat{\theta} \\ \sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix}$ 。

双同步参考坐标变换矢量图如图 3 所示。

$$\text{设 } \begin{bmatrix} u_{sd-} \\ u_{sq-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{sd-} \\ \tilde{u}_{sq-} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{u}_{sd-} \\ \bar{u}_{sq-} \end{bmatrix}。$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{sd-} \\ \tilde{u}_{sq-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \cos(\omega t + \hat{\theta}) \\ U_{m1} \sin(\omega t + \hat{\theta}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_{sd-} \\ \bar{u}_{sq-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m2} \cos(-\omega t + \hat{\theta} + \psi^{-1}) \\ U_{m2} \sin(-\omega t + \hat{\theta} + \psi^{-1}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

当锁相环精确锁相后，即  $\omega t = \hat{\theta}$ ；

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_{sd-} \\ \bar{u}_{sq-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m2} \cos(\psi^{-1}) \\ U_{m2} \sin(\psi^{-1}) \end{bmatrix}。式 (9) 可变为$$

$$u_{sq} = 0 + \bar{u}_{sd-} \sin(-2\hat{\theta}) + \bar{u}_{sq-} \cos(-2\hat{\theta}) \quad (14)$$

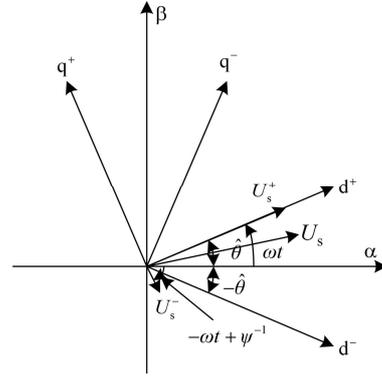


图 3 双同步参考坐标变换的电压矢量图

Fig. 3 Voltage vectors and axes of the DSRF

### 2.2 基于双 dq 坐标变换的锁相环结构

针对式 (14)，可以利用负序旋转 dq 坐标变换下直流分量对正序旋转 dq 坐标变换下交轴分量进行补偿。双 dq 坐标变换的锁相环结构图如图 4 所示。

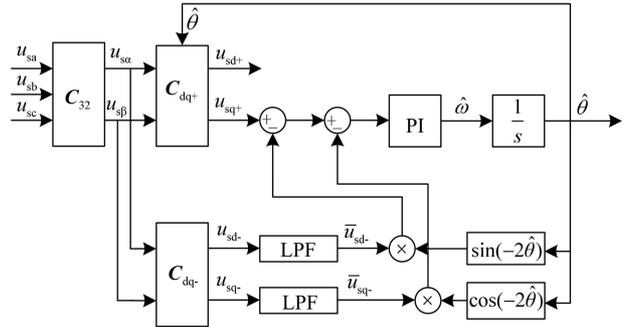


图 4 基于双 dq 坐标变换的锁相环结构图

Fig. 4 Configuration of PLL based on DSRF

## 3 负序电压分量相位检测

在各种应用于电力系统的电力电子补偿装置中，对负序电压分量准确检测一直存在一定的困难。本文通过检测负序电压相位和幅值，然后得到三相电压负序分量。

当锁相环精确锁相后，式(13)所对应的量  $\bar{u}_{sd-}$ 、 $\bar{u}_{sq-}$  为恒定值，对其进行运算可以得到负序电压分量初相角；加上锁相环输出的相位，即可计算出负序电压分量的相位。负序电压相位检测结构图如图 5 所示。

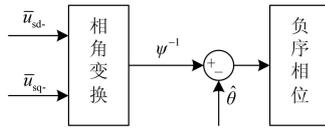


图5 负序相位检测环结构图

Fig. 5 Configuration of negative sequence voltage component phase detection

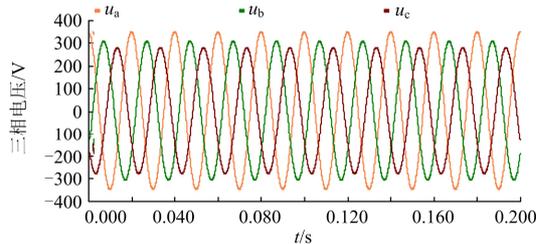
## 4 仿真研究

本文采用PSCAD/EMTDC仿真软件对图5和图6所示结构的锁相环进行了仿真。仿真系统中, 电网侧电源设定为三相不对称电压, 参数如表1所示。仿真结果如图6所示。

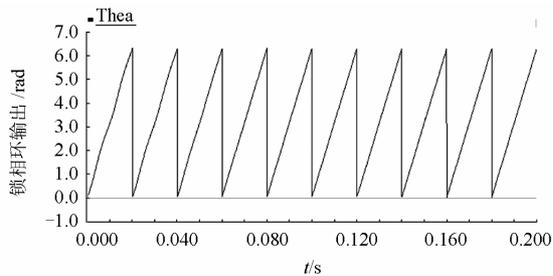
表1 仿真系统三相电源参数

Table 1 Parameter of source voltage

	线电压有效值/V	初相角/( $^{\circ}$ )	频率/Hz
正序电压	380	0	50
负序电压	40	30	50
零序电压	10	20	50



(a) 非对称三相电压



(b) 锁相环输出相位

图6 基于双dq坐标变换的锁相环仿真结果

Fig. 6 PLL response based on double synchronous reference frame

由图6可以看出, 利用基于双dq坐标变换的锁相环控制方法, 能够得到很好的锁相效果。

利用本方法进行负序电压检测, 仿真结果如图7所示。

由图7可以看出, 利用双dq坐标变换锁相环进行正负序电压检测, 能够准确有效检测出三相不平

衡电压下负序电压分量。能够用于电力系统中静止无功功率发生器、统一电能质量调节器和并网逆变器 etc 电力电子装置。

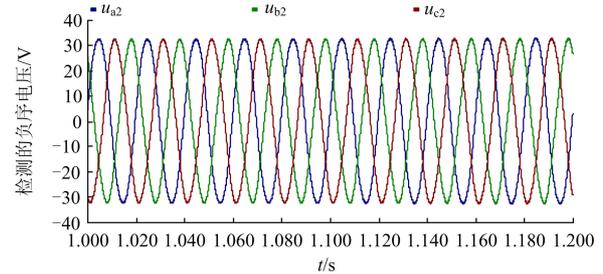


图7 负序电压检测仿真结果

Fig. 7 Result of negative sequence voltage detection

## 5 结论

因负序电压分量的存在, 导致基于同步参考旋转坐标变换的锁相计算结果有误差; 通过提取负序dq坐标变换中d轴和q轴电压分量的直流分量, 对正序dq坐标变换中q轴电压分量进行补偿, 可以准确快速锁定基波正序电压相位。通过负序dq坐标中d轴和q轴的电压分量的直流分量检测负序电压初相角, 然后锁定负序电压相位。仿真结果表明, 该方法能够快速准确地锁定三相电源在三相不对称情况下的基波频率、正序电压分量和负序电压分量相位。

## 参考文献

- [1] 张志霞, 朴在林, 郭丹, 等. 一种应用于电力系统的锁相环[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 250-255.  
ZHANG Zhi-xia, PIAO Zai-lin, GUO Dan, et al. A kind of phase-locked loop for power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 250-255.
- [2] KARIMI-GHARTEMANI M, IRAVANI R M. A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1263-1270.
- [3] 肖帅, 孙建波, 耿华, 等. 基于FPGA实现的可变模全数字锁相环[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 153-158.  
XIAO Shuai, SUN Jian-bo, GENG Hua, et al. FPGA based ratio changeable all digital phase-locked-loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 153-158.
- [4] 熊卿, 张哲, 尹项根, 等. 新型配电变一体化静止无功补偿技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 59-64.  
XIONG Qing, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. Research on novel technology of distribution transformer and static VAR compensator integration system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 59-64.

- [5] 蔡阳, 韦钢, 雷振. 新型不对称负荷补偿装置控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 110-115.  
CAI Yang, WEI Gang, LEI Zhen. Research on new type of asymmetric load compensator control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 110-115.
- [6] 龚锦霞, 解大, 张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 94-100.  
GONG Jin-xia, XIE Da, ZHANG Yan-chi. Principle and performance of the three-phase digital phase-locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 94-100.
- [7] 袁志昌, 宋强, 刘文华. 改善动态相位跟踪和不平衡电压检测性能的改进软锁相环算法[J]. 电网技术, 2012, 34(1): 31-35.  
YUAN Zhi-chang, SONG Qiang, LIU Wen-hua. A modified soft phase lock loop algorithm improving the performance in dynamic phase tracking and detection of unbalanced voltage[J]. Power System Technology, 2012, 34(1): 31-35.
- [8] 王颢雄, 马伟明, 肖飞, 等. 双 dq 变换软件锁相环的数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 238-242.  
WANG Hao-xiong, MA Wei-ming, XIAO Fei, et al. Study of model of software phase locked-loop based on dual-dq synchronous transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 238-242.
- [9] RODRÍGUEZ P, POU J, BERGAS J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.
- [10] 张治俊, 李辉, 张煦, 等. 基于单/双同步坐标系的软件锁相环建模和仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 138-144.  
ZHANG Zhi-jun, LI Hui, ZHANG Xun, et al. Simulation and modelling of software phase-locked loop based on single/double synchronous coordinate system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 138-144.
- [11] AKAGI H, WATANABE E H, AREDES M. 瞬时功率理论及其在电力调节中的应用[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [12] CHUNG S K. A phase tracking system for three phase utility interface inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(3): 431-438.
- [13] ZHAN Chang-jiang, FITZER C, RAMACHANDARA-MURTHY V K, et al. Software phase-locked loop applied to dynamic voltage restorer[C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, 3: 1033-1038.
- [14] 吉正华, 韦芬卿, 杨海英. 基于 dq 变换的三相软件锁相环设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 104-107.  
JI Zheng-hua, WEI Fen-qing, YANG Hai-ying. Three-phase software phase-locked loop based on dq reference frame[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 104-107.
- [15] 周鹏, 贺益康, 胡家兵. 电网不平衡状态下风电机组运行控制中电压同步信号的检测[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 108-113.  
ZHOU Peng, HE Yi-kang, HU Jia-bing. Detection of voltage synchronization signals for a wind energy generation system unbalanced grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 108-113.
- [16] 林海雪. 电力系统的三相不平衡[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
LIN Hai-xue. Three phase asymmetry in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [17] JOUANNE A, BANERJEE B. Assessment of voltage unbalance[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 782-790.
- [18] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 56-59.  
YUAN Xu-feng, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu. An improved method of instantaneous symmetrical components and its detection for positive and negative sequence current[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 56-59.
- [19] 田桂珍, 王生铁, 林百娟, 等. 电压不平衡时风电系统中基于双同步变换的锁相环设计[J]. 电气传动, 2010, 40(7): 53-57.  
TIAN Gui-zhen, WANG Sheng-tie, LIN Bai-juan, et al. Design of phase locked loop based on double synchronous reference frame under unbalance grid voltage in wind power systems[J]. Electric Drive, 2010, 40(7): 53-57.
- [20] 田桂珍, 王生铁, 林百娟, 等. 风力发电系统中基于双同步参考坐标变换的锁相环设计与实现[J]. 太阳能学报, 2011, 32(2): 204-209.  
TIAN Gui-zhen, WANG Sheng-tie, LIN Bai-juan, et al. Design and realization of phase locked loop based on double synchronous reference frame in wind power systems[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(2): 204-209.

收稿日期: 2012-09-20; 修回日期: 2013-01-09

作者简介:

辛业春(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术  
在电力系统中的应用; E-mail: xinyechun@163.com

李国庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为  
电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和配电系统  
自动化等领域的理论与应用;

王尧(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电  
子技术在电力系统中的应用。