

DOI: 10.7667/PSPC162005

## 基于 RTDS 的高压直流控制系统锁相环仿真研究

关红兵<sup>1</sup>, 黄立滨<sup>1</sup>, 周鹏鹏<sup>2</sup>, 张彦兵<sup>2</sup>

(1. 南方电网科学研究院, 南方电网仿真重点实验室, 广东 广州 510080;

2. 许昌开普检测技术有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 在基于实时数字仿真器(Real-time digital simulator, RTDS)所建立的特高压直流输电系统实时仿真平台中, 常规锁相环技术无法实现换流阀触发脉冲的精确控制, 不利于实际直流工程的故障重现。基于系统正序分量的瞬时锁相环控制原理, 提出了一种高精度锁相环的建模方法, 实现了电网系统频率的高精确跟踪测量。在 RTDS 仿真平台上搭建完整的云广特高压直流工程的控制系统仿真模型, 并结合实际工程的运行工况设计仿真试验算例。试验结果表明, 仿真波形与实际工程的录波取得了高度一致性, 该仿真建模方法是有效可行的。

**关键词:** 频率跟踪; 正序锁相; RTDS; 高压直流控制系统

### Application of improved PLL for HVDC transmission system based on RTDS

GUAN Hongbing<sup>1</sup>, HUANG Libin<sup>1</sup>, ZHOU Pengpeng<sup>2</sup>, ZHANG Yanbing<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute, Key Laboratory of Power System Simulation, CSG, Guangzhou 510080, China;

2. Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** For the HVDC transmission system built in the real time simulation platform based on RTDS, the conventional PLL technology can not realize the precise control of the trigger pulse of the converter valve, which is not conducive to the fault reconstruction of the actual HVDC project. Based on the principle of the instantaneous PLL control system, a high precision PLL modeling method is proposed, and high precision tracking measurement of power system frequency is realized. According to the actual operating conditions, the complete simulation model of the control system for Yun-Guang UHVDC Project is built based on the RTDS simulation platform and the simulation test example is designed. The experimental results show that the simulation waveform is highly consistent with the actual engineering records, and the simulation modeling method is effective and feasible.

**Key words:** frequency tracking; positive-sequence PLL; RTDS; HVDC

## 0 引言

近年来随着直流输电的发展和输电容量的逐步扩大, 直流系统对交流系统的影响也越来越大, 在交直流混联大电网稳定分析研究中, 直流控制保护的真正模拟越来越成为关键影响因素。在直流输电的发展过程中, RTDS 一直作为主要的工程验证和系统研究工具在直流控制保护系统和交直流混联系统模拟分析中大量应用。

锁相环(PLL)是直流输电控制系统中一个关键的逻辑控制环节<sup>[1-7]</sup>。目前在 RTDS 上进行的高压直流控制系统仿真算例中普遍采用常规锁相元件(RTDS

自带元件), 该元件在电网发生不平衡故障或频率偏移时的频率跟踪效果较差, 会影响控制系统的稳定性能, 导致 RTDS 高压直流系统仿真暂态特性与实际情况出现偏差。

为此, 本文对实际直流控制系统中采用的改进型锁相环算法进行结构化分解, 提出了在 RTDS 仿真平台上的实现方法, 并经过一系列试验验证, 证明了基于此算法的高压直流 RTDS 仿真系统与实际工程的一致性。

## 1 改进型锁相环算法控制概述

为了提升锁相环在电网发生频率偏移、不平衡故障工况下的频率跟踪性能, 在常规锁相环的基础上提出改进型锁相环控制。改进型锁相环算法控制

结构图如图 1 所示。虚线框①为系统电压采样、滤波、变换环节：三相电压经低通滤波器后进行差值采样，经 3S/2S 变换环节后，由 FIR 数字滤波器提取电压采样值的正序分量。虚线框②为瞬时频率采样及采样间隔动态调整环节。

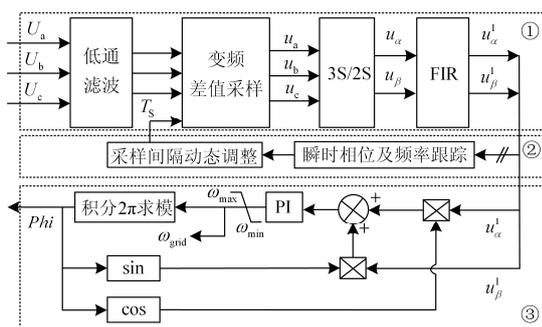


图 1 改进型锁相环结构图  
Fig. 1 Structure of improved PLL

虚线框③所示为 PLL 锁相环节，在常规算法基础上，输入参量修改为正序分量  $u'_\alpha$ 、 $u'_\beta$ 。

相较于常规锁相环控制算法，改进型控制算法增设了正序分量提取滤波、采样间隔动态调整等环节，在电网频率发生偏移以及不平衡故障等异常工况下，系统频率跟踪性能得以提升。

## 2 改进型锁相环 RTDS 仿真实现

### 2.1 FIR 正序提取滤波器

在电网发生不对称故障的时候，电网存在谐波和负序分量，会严重影响锁相环的频率跟踪测量<sup>[8-11]</sup>。为此，结合实际工程方案在 RTDS 仿真中引入 FIR 数字滤波器，采用 2 个正交化的有限冲激响应数字滤波器，实部和虚部分别是余弦正交化滤波器和正弦正交化滤波器，以实现信号的 90° 相移，每个周期计算 128 次，有效地抑制了谐波和负序分量<sup>[12-15]</sup>。

滤波器计算公式及其 Z 变换后的函数  $H(z)$  为

$$\begin{cases} Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X(k-j) \cdot [\cos(\frac{2\pi j}{N}) + i \cdot \sin(\frac{2\pi j}{N})] \\ H(z) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} [\cos(\frac{2\pi j}{N}) + i \cdot \sin(\frac{2\pi j}{N})] \cdot z^{-j} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $i = \sqrt{-1}$ ；对于采样点的个数，本设计实现了每个周波  $N = 32$  点采样； $X(k-j)$  为最新输入的  $j$  点数据； $\cos(\frac{2\pi j}{N}) + i \cdot \sin(\frac{2\pi j}{N})$  为滤波器系数。

### 2.2 采样间隔动态调整

电网电压采样过程中，如按照固定时间间隔进行差值采样，当电网频率发生偏移的时候，将会引

入一定的误差。为尽可能地降低采样误差，需采用频率跟踪动态调整采样间隔，即实时监测电网电压的瞬时频率，并根据实时频率计算值，动态调整数据采样模块的采样间隔，消除因频率偏移而引入的误差，确保锁相环的精确度，提高直流输电控制系统的动态性能。采样间隔的通态调整分为瞬时频率采样及采样间隔调整两个环节，对应控制结构图如图 2 所示。

图 2 所示，通过计算两个采样点的增量  $\Delta P_{hi}$ ，推算出 1/4 周波的瞬时相位差值；经过 20 ms 平滑滤波、PI 积分环节，计算出瞬时频率值并进一步计算出实时的采样间隔，实时调整系统采样模块的采样频率，消除因系统频率偏移和采样频率不一致所造成的计算误差。

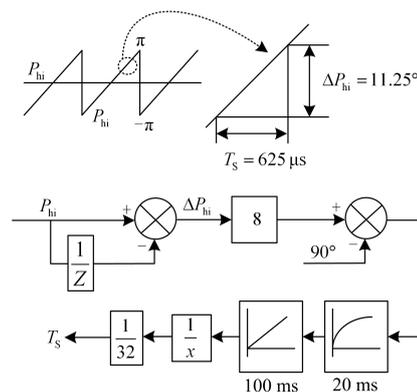


图 2 采样频率动态调整结构图  
Fig. 2 Structure of sampling frequency dynamic adjustment

### 2.3 程序计算周期控制

对于实际工程来说，该控制结构图是基于 32 点采样进行设计的，即每 1/4 周期采样 8 个点，而 RTDS 的仿真步长为 50~100  $\mu s$ ，即每 1/4 周期 50~100 个点，为保证仿真与应用的一致性，需要在 RTDS 上模拟其计算环境，利用分频技术，即 RTDS 不连续计算仿真程序，而是间隔相应周期计算一次。当 RTDS 的仿真步长并不是实际工程控制保护程序计算周期的整数倍时，进行插值处理。为此设计了 RTDS 采样元件，如图 3 所示。

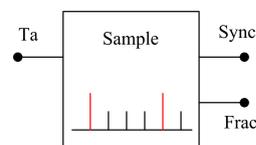


图 3 RTDS 采样元件  
Fig. 3 RTDS sample component

图中， $T_a$  为实际工程控制保护程序的计算周期， $Sync$  为 RTDS 采样分频的触发脉冲， $Frac$  为用

于插值的采样补偿比例。

在经过上述改进后，高压直流输电 RTDS 控制保护仿真系统具有较强的稳定性，无论在系统发生频率偏移或发生不平衡故障的时候，仍然可以较为精确、稳定地实现系统频率的跟踪，与实际工程保持一致性。

### 3 仿真算例

为了验证改进型锁相环的动态性能，在 RTDS 仿真平台上设计两个仿真算例，分别验证该 PLL 算法的采样频率动态调整性能以及正序 PLL 频率跟踪性能。

#### 3.1 算例 1

为了验证改进型 PLL 系统的采样频率动态频率调整性能，在 RTDS 平台上设计仿真算例 1，模拟电网系统的频率由 50 Hz 偏移到 48 Hz，0.6 s 后，频率恢复 50 Hz。分别观测投入采样频率动态调整模块，以及不投入采样频率动态调整模块的 PLL 跟踪效果，仿真结果如图 4 所示。其中  $U_a, U_b, U_c$  分别为交流系统的三相电压值； $U_{a10}$  和  $U_{b10}$  分别为对应图 1 中的  $u_\alpha, u_\beta$ ； $T_{s\_us}$  是图 1 所示的  $T_s$ ，即采样周期，工频 50 Hz 下采用 32 点采样时，采样周期即为  $625.0 \mu s$ 。由图 4(e)和图 4(f)可知，当系统频率发生变化时，由于采样频率固定，因此  $T_{s\_us}$  值并未发生变化，这将会造成跟踪系统相位产生误差，不利于高压直流控制系统中点火脉冲的精确控制。

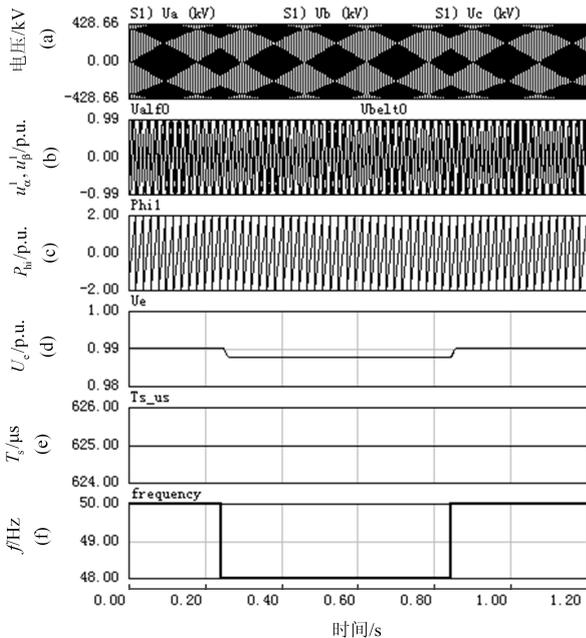


图 4 固定采样频率

Fig. 4 Fixed sampling frequency

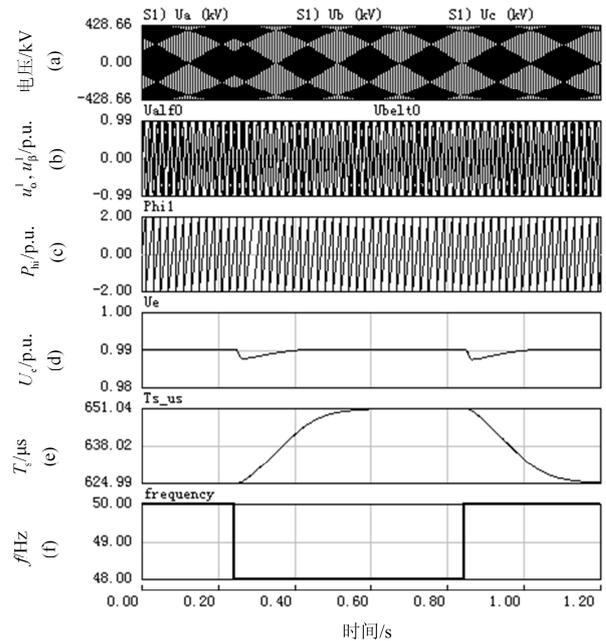


图 5 可变采样频率

Fig. 5 Variable sampling frequency

当采用图 1 所示的改进型动态采样控制方案时，由图 5(e)和图 5(f)可知，系统频率变化后，改进控制策略可以跟随系统频率动态调整采样时间，确保了以较高的精度进行系统相位的跟踪。仿真结果显示，当系统频率发生偏移的时候，投入采样频率动态调整模块，PLL 频率跟踪系统会自动跟随电网频率，实时调整 AD 采样模块的采样频率，确保 32 点采样的准确性，有利于高压直流阀控系统的精确点火控制。

#### 3.2 算例 2

为了验证改进型 PLL 系统的正序 PLL 频率跟踪性能，在 RTDS 平台上设计仿真算例 2，模拟电网系统发生 AN 单相故障，0.14 s 后，不平衡故障消失。分别观测投入 FIR 正序提取模块，以及不投入 FIR 正序提取模块的 PLL 跟踪效果，仿真结果如图 6 所示。图 6(a)和图 6(b)分别为投入 FIR 的正序 PLL 频率跟踪时候的系统电压波形和相位跟踪波形图。由直线  $m_1$  和直线  $n_1$  对比可知，在系统发生不平衡故障前后，相位跟踪输出  $P_{hi}$  可以很好地跟随系统电压相位。图 6(c)和图 6(d)分别为未投入 FIR 的正序 PLL 频率跟踪时候的系统电压波形和相位跟踪波形图。由直线  $m_2$  和直线  $n_2$  对比可知，在系统发生故障前，相位跟踪输出  $P_{hi}$  可以很好地跟随系统电压相位；当系统发生不平衡故障后，相位跟踪输出值  $P_{hi}$  产生较大的跟踪偏差。

仿真结果显示, 电网发生不平衡故障时候, 不投入 FIR 正序提取模块, PLL 频率跟踪发生频率偏移及波动, 频率测量效果较差; 而投入 FIR 正序提取模块, PLL 频率跟踪性能良好。

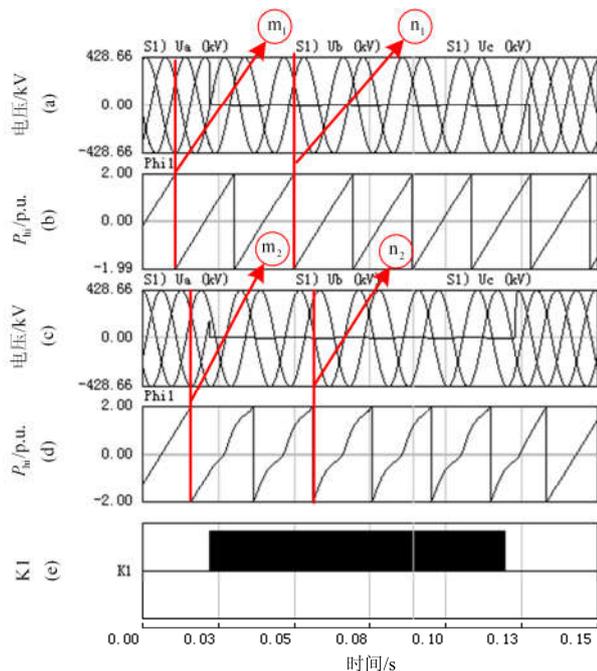


图 6 算例 2 仿真波形

Fig. 6 Waveform of simulation No.2

#### 4 工程比对验证

为了验证采用该改进型锁相环算法的高压直流 RTDS 仿真控制系统与实际工程的一致性, 以云广特高压直流工程为例, 在 RTDS 上搭建了完整的云广特高压直流工程控制系统仿真模型, 其中的锁相环部分采用图 1 所示的改进型锁相环控制结构。

在相同的交流系统条件、相同的直流系统设置、相同的故障点触发时刻下, 相同的测试项目, 统一以 COMTRADE 格式记录并保存实际控制保护装置、RTDS 仿真控制系统响应的波形数据, 然后把两者波形放在同一时标轴下进行比对。

以两侧交流系统为大方式, 直流双极最大功率 (5000 MW) 运行, 整流侧发生 A 相接地故障, 故障持续时间 100 ms 为例, 比对波形如图 7 所示。图 7 中, 蓝色为采用高压直流控制系统 RTDS 仿真的仿真波形 (HVDCSIM 开头), 棕色为实际直流控制系统进行厂内试验的波形 (HVDCACT 开头)。其中,  $U_A$  为交流系统 A 相电压,  $UDH$  为整流侧直流电压,  $IDH$  为直流电流,  $I_{Ref}$  为直流电流参考值,  $\alpha$  为整流侧触发角。

仿真结果显示, 采用该改进型锁相环的高压直

流控制系统 RTDS 仿真在故障前、中、后的动态特性 (电压、电流、触发角、参考值等) 均与实际工程高度一致。

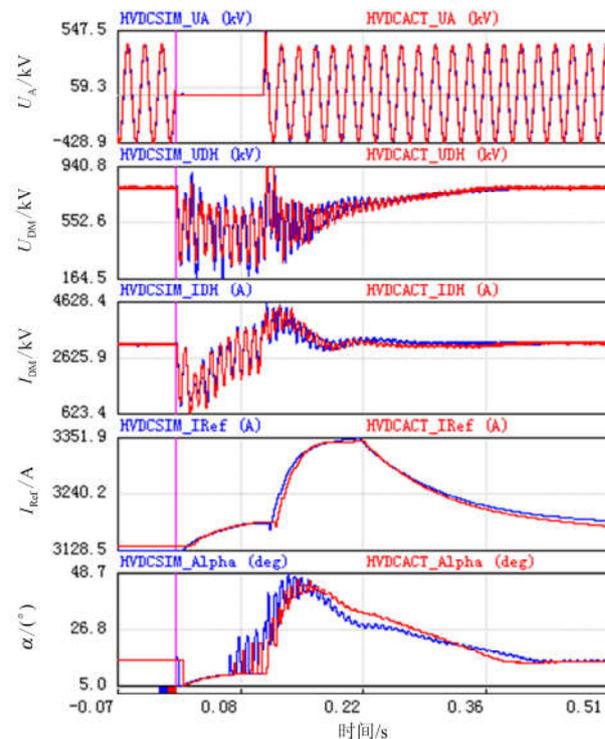


图 7 仿真波形对比图

Fig. 7 Comparison of simulation waveforms

#### 5 总结

在电网系统发生频率偏移和不平衡故障的时候, 采用常规锁相环控制技术的 PLL 频率跟踪性能与实际工程应用存在偏差, 为此提出了一种在 RTDS 建立实际改进型锁相环算法的方法, 并验证了采用该算法的控制保护性能。

1) 改进型 PLL 控制算法加入了采样频率动态调整模块, 实时监测系统频率, 并动态调整采样间隔。当电网发生频率偏移的情况下, PLL 频率跟踪性能良好。

2) 经 FIR 滤波器提取采样值正序分量, 并进行 PLL 频率跟踪。当电网发生不平衡故障的时候, 改进型 PLL 算法频率跟踪性能良好。

3) 针对该改进型 PLL 算法, 在 RTDS 仿真平台上设计仿真算例进行试验研究, 验证了设计方案的可行性及有效性。

4) 在交直流系统发生大扰动的情况下, 采用该改进型锁相环算法的高压直流控制系统 RTDS 仿真与实际工程的动态特性保持高度一致, 可应用于交直流系统各种仿真研究和工程验证。

## 参考文献

- [1] 郝正航, 肖忠云, 张宏俊, 等. 风电场孤岛直流外送系统的稳定控制[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2193-2198.  
HAO Zhenghang, XIAO Zhongyunn, ZHANG Hongjun, et al. Stability control of HVDC transmission system for islanded wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2193-2198.
- [2] 李少华, 王秀丽, 张望, 等. 特高压直流分层接入交流电网方式下直流控制系统设计[J]. 中国电机工程学报 2015, 35(10): 2409-2416.  
LI Shaohua, WANG Xiuli, ZHANG Wang, et al. Control system design for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2409-2416.
- [3] 张彦兵, 郝正航, 宁媛, 等. 双馈风机孤岛模式下恒压恒频运行控制策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(8): 57-61.  
ZHANG Yanbing, HAO Zhenghang, NING Yuan, et al. The CVCF control strategy for stand-alone doubly fed induction generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(8): 57-61.
- [4] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62.
- [5] 庄良文, 张彦兵, 荆雪记, 等. 基于 RTDS 仿真的 MMC\_UPFC 串联侧间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 56-62.  
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC\_UPFC indirect current strategy based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 56-62.
- [6] 张宏俊, 吴越文, 陈卓, 等. 交直流配电网接纳分布式电源的实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 79-85.  
ZHANG Hongjun, WU Yuewen, CHEN Zhuo, et al. Real-time simulation of AC and DC distribution network to receive distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 79-85.
- [7] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 125-130.  
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.
- [8] 张斌, 张东来. 电力系统自适应基波提取与频率跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 81-89.  
ZHANG Bin, ZHANG Donglai. Adaptive fundamental component extraction and frequency tracking algorithm for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 81-89.
- [9] 陈东明, 陈明亮, 谢栋, 等. 一种基于阈值开关与双环控制的新型锁相环[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 41-48.  
CHEN Dongming, CHEN Mingliang, XIE Zhen, et al. A novel PLL based on threshold switch and dual-loop control technology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 41-48.
- [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 Zhijun, LI Hui, ZHANG Xu, 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] 洪小圆, 吕征宇. 基于同步参考坐标系的三相数字锁相环[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 203-210.  
HONG Xiaoyuan, LÜ Zhengyu. Three-phase digital phase-locked loop based on synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 203-210.
- [12] 陈琦, 熊良根, 刘述军, 等. 基于双 dq 变换软件锁相的动态电压恢复器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 87-93.  
CHEN Qi, XIONG Lianggen, LIU Shujun, et al. Research of dynamic voltage restorer based on double dq synchronous software phase-locked loop[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 87-93.
- [13] 陈明亮, 肖飞, 刘勇, 等. 一种正负序分离锁相环及其在并网型风力发电系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 181-186.  
CHEN Mingliang, XIAO Fei, LIU Yong, et al. A positive and negative-sequence detection PLL and its application in wind power generation system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 181-186.
- [14] 沈开奎, 李延龙, 赵媛, 等. 电网瞬时频率跟踪算法设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 75-80.  
SHEN Kaikui, LI Yanlong, ZHAO Yuan, et al. Design of the grid instantaneous frequency tracking algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 75-80.
- [15] 陈平, 李庆民, 张黎. 电网瞬时频率的一种跟踪算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 80-84.  
CHEN Ping, LI Qingmin, ZHANG Li. An algorithm for tracing instantaneous frequency of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 80-84.

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-04-22

作者简介:

关红兵(1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事直流运行与控制技术的仿真研究;

黄立滨(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统动模仿真及继电保护装置自动化检测技术研究;

周鹏鹏(1982—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统动模仿真及继电保护装置自动化检测技术研究。

(编辑 葛艳娜)