

# 电网瞬时频率跟踪算法设计

沈开奎, 李延龙, 赵媛, 李少华

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 在高压直流输电工程中, 采用高精度锁相环跟踪电网相位, 并在设定角度产生点火脉冲触发换流阀, 瞬时电网频率跟踪速度和精度对锁相环至关重要, 传统的频率测量方法无法同时满足速度和精度的要求。提出了一种电网瞬时频率跟踪算法。该算法将三相电压瞬时值进行 Clarke 变换, 经有限冲激相应滤波器(FIR)滤除谐波和负序分量后, 计算电网实时相位, 采用相差法实现了对电网瞬时频率的跟踪。通过仿真和实验验证, 该算法可准确、快速地跟踪各种电力信号的瞬时频率, 有效地滤除谐波和噪声, 电网瞬时频率的测量精度高达 $\pm 0.005$  Hz。

**关键词:** 瞬时频率测量; Clarke 变换; FIR 滤波器; 频率跟踪算法; 锁相环

## Design of the grid instantaneous frequency tracking algorithm

SHEN Kaikui, LI Yanlong, ZHAO Yuan, LI Shaohua

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** In HVDC transmission project, the high-precision phase-locked loop is used to trace the real-time grid phase, when the simulated phase is equal to the trigger angle, the trigger pulses are generated and the converter valves are triggered, so the instantaneous frequency tracing should be fast and accurate, but the traditional frequency measurement algorithms could not meet both the speed and the accuracy requirements simultaneously. This paper designs a new grid instantaneous frequency tracking algorithm. This algorithm transforms the three-phase voltages of grid by Clarke transformation; after filtering the harmonics and negative sequence components by using the FIR, it calculates the grid instantaneous frequency, and tracks grid synchronous frequency with phase-difference method. According to the simulations and experiments, the algorithm can precisely and quickly trace the grid instantaneous frequency, and the accuracy is up to  $\pm 0.005$  Hz.

**Key words:** instantaneous frequency measurement; Clarke transformation; FIR filter; frequency tracing algorithm; PLL

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0075-06

## 0 引言

电力系统频率是衡量电能质量的一项重要指标, 也是稳定控制状态的反馈量, 需要实时进行测量。同时, 电力系统频率作为继电保护装置 FFT 变换的基准, 对精确测量电压、电流等电量起着关键性作用。因此, 电网频率作为一个重要的电网参数需要实时精确测量<sup>[1]</sup>。

在高压直流输电工程中, 控制保护系统采用高精度内部锁相环(PLL)技术精确地模拟实时电网相位, 当内部锁相环的模拟相位达到设定的触发角度时, 触发逻辑将依次发出点火脉冲信号, 换流阀导通, 从而完成整流或逆变功能<sup>[2-5]</sup>。在工程应用中要求点火脉冲的不平衡度小于 0.02 度, 因此, 对内部

锁相环模拟相位的精度要求极高, 能否快速精确地对电网瞬时频率跟踪, 对于保证内部锁相环的模拟相位的精度至关重要。

高压直流输电控制保护系统要求瞬时频率测量误差小于 $\pm 0.01$  Hz<sup>[6-10]</sup>。而传统的频率测量方法, 如周期法、离散傅里叶变换法、最小二乘法(LMS)、递推最小二乘法(RLS)、卡尔曼滤波法、牛顿迭代法、小波分析法、自适应陷波器法等<sup>[11]</sup>, 无法满足高压直流输电工程应用对频率跟踪算法的精度和快速性的要求。本文提出了一种频率跟踪算法, 该算法将三相电压瞬时值进行 Clarke 变换, 计算出  $\alpha$  和  $\beta$  分量, 再由 FIR 正序滤波器滤除其谐波和负序分量, 由滤波后的  $\alpha$  和  $\beta$  分量计算出当前电网相位, 最后采用相差法计算出电网瞬时频率, 并对瞬时频率进

行滤波, 滤除干扰和噪声, 提高频率跟踪的精度和稳定性。通过仿真和实验验证, 该瞬时频率跟踪算法具有跟踪速度快和测量精度高等特点, 其测频精度高达 $\pm 0.005$  Hz, 可适用于高压直流输电等对测频速度和精度要求较高的应用场合。

## 1 瞬时频率测量算法

### 1.1 算法简介

该瞬时电网频率测量算法工作原理框图如图 1 所示。

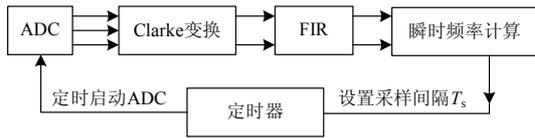


图 1 电网瞬时频率跟踪算法工作原理框图

Fig. 1 Block diagram of grid instantaneous frequency tracing algorithm

系统上电时, 定时器被设置默认初始采样间隔时间, 如若系统频率为 50.0 Hz, 每个周期进行 128 点采样, 则模数转换器(ADC)的采样频率为 6 400 Hz, 设置定时器定时间隔  $T_s$  为 0.156 25 ms。当定时器计时到, 启动模数转换器对电网三相电压( $u_a, u_b, u_c$ )进行采样, 并将采样值转换成标么值, 单位为 p.u.。三相电压( $u_a, u_b, u_c$ )标么值进行 Clarke 变换后, 得到  $V_\alpha$  和  $V_\beta$ , 经过 FIR 正序滤波器滤波后, 得到正序分量  $V_\alpha^+$  和  $V_\beta^+$ , 瞬时频率计算模块计算出当前电网实时频率, 然后根据频率值计算出采样间隔  $T_s$ , 并设置到定时器中。当定时器计时到新设置的采样间隔时间时, 再次启动 ADC 采样, 依次循环执行, 从而实现了电网瞬时频率的实时跟踪功能。

### 1.2 Clarke 变换

当系统采集完三相电压值后, 首先对三相瞬时电压进行 Clarke 变换<sup>[12]</sup>。

$\alpha\beta 0$  坐标系是一个两相坐标系, 其中  $\alpha$  轴与 a 相轴线重合,  $\beta$  轴超前  $\alpha$  轴  $90^\circ$ , 零序是一个孤立的系统。

假设三相交流系统各相电压为

$$\begin{cases} u_a = U_m \sin(\omega t) \\ u_b = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_c = U_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_a, u_b, u_c$  是指 ABC 三相电压的瞬时值;  $U_m$  为电压峰值;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为电网频率。

如图 2, 在  $\alpha\beta$  坐标系中, 把  $\alpha$  和  $\beta$  轴上的电压

分量  $V_\alpha, V_\beta$  分别投影到 a、b、c 三相轴线上, 再加上孤立的零序量  $V_0$ , 可得三相电压  $u_a, u_b, u_c$  如下。

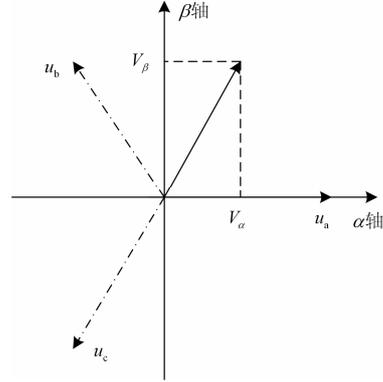


图 2  $\alpha\beta$  坐标系与 ABC 三相对应关系图

Fig. 2 Relationship between  $\alpha\beta$  and phases ABC

$$\begin{cases} u_a = V_\alpha + V_0 \\ u_b = -\frac{1}{2}V_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta + V_0 \\ u_c = -\frac{1}{2}V_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta + V_0 \end{cases} \quad (2)$$

由此可推算得

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (3)$$

电网三相电压瞬时值  $u_a, u_b, u_c$ , 经过 Clarke 变换后, 可得到  $V_\alpha, V_\beta, V_0$ 。由于  $u_a + u_b + u_c = 0$ , 故而得

$$V_\alpha = \frac{2}{3}u_a - \frac{1}{3}u_b - \frac{1}{3}u_c = U_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

$$V_\beta = \frac{u_b}{\sqrt{3}} - \frac{u_c}{\sqrt{3}} = U_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(u_a + u_b + u_c) = 0 \quad (6)$$

### 1.3 FIR 正序滤波器

由于电网中谐波和负序分量等因素的干扰, 会严重影响瞬时频率计算精度, 故本设计中引入了 FIR 滤波器, 该滤波器采用了 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  $90^\circ$  相移, 每个周期计算 128 次, 能有效地抑制谐波和负

序分量<sup>[13]</sup>。

### 1.3.1 滤波器的响应函数

本设计滤波器是 128 阶有限冲激响应滤波器 (FIR), 其计算公式是

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X(k-j) \cdot [\cos(\frac{2\pi j}{N}) + i \cdot \sin(\frac{2\pi j}{N})] \quad (7)$$

式中:  $i = \sqrt{-1}$ ; 对于采样点的个数, 本设计实现了每周波 128 点采样, 故  $N=128$ ; 对于滤波器系数, 其值为  $\cos(\frac{2\pi j}{N}) + i \cdot \sin(\frac{2\pi j}{N})$ ;  $X(k-j)$  表示最新输入的  $j$  点数据。

由式(7)可进行 Z 变换, 得到 MF128 滤波器的系统函数  $H(z)$ 。

$$H(z) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} [\cos(\frac{2\pi j}{N}) + i \cdot \sin(\frac{2\pi j}{N})] \cdot z^{-j} \quad (8)$$

### 1.3.2 滤波器频响特性

根据 FIR 滤波器的系统函数  $H(z)$ , 利用 Matlab 的分析工具, 可得到该滤波器的幅频特性曲线如图 3 所示, 相频特性曲线如图 4 所示。

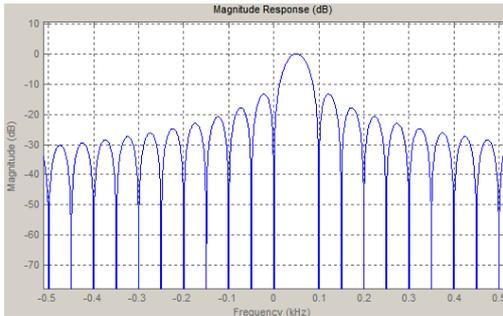


图 3 滤波器的幅频特性曲线

Fig. 3 Magnitude-frequency response of filter

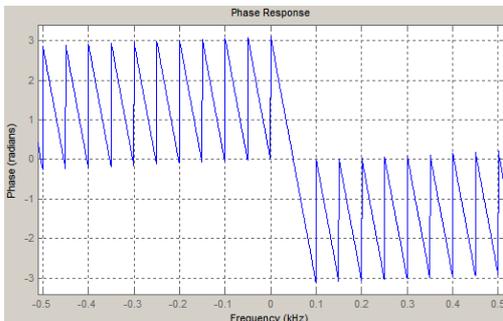


图 4 滤波器的相频特性曲线

Fig. 4 Phase-frequency response of filter

由图可见, 当频率为 50 Hz 时, 幅度衰减为 0 dB, 相移为 0, 而谐波分量得到了有效的抑制。

## 1.4 频率测量

### 1.4.1 计算瞬时相位和幅值

经过滤波器之后的正交分量  $V_\alpha^1$  和  $V_\beta^1$ , 由式(4)和式(5), 可得到计算瞬时相位的公式如式(9)。

$$\varphi(n) = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{V_\beta^1(n)}{V_\alpha^1(n)}\right) \quad (9)$$

通过式(10)可得到瞬时幅值为

$$U_m(n) = \sqrt{V_\alpha^1(n)^2 + V_\beta^1(n)^2} \quad (10)$$

### 1.4.2 瞬时频率计算

本次瞬时相位值与上次相位值的差值除以采样周期  $T_s$ , 可以得到当前点瞬时角频率, 由此推得电网瞬时频率计算式如式(11)。

$$f(n) = \frac{[\varphi(n) - \varphi(n-1)]}{2\pi} \times \frac{1}{T_s} \quad (11)$$

式中:  $\varphi(n)$  为本次瞬时相位值;  $\varphi(n-1)$  为上次瞬时相位值;  $f(n)$  为本次电网瞬时频率值。

### 1.4.3 滤波处理

本文中对计算的瞬时频率值数据采用平滑和积分相结合的方法, 可有效地滤除噪声干扰, 大大提升了电网频率跟踪的准确性和稳定性<sup>[14-15]</sup>。

瞬时频率滤波处理信号框图如图 5 所示。

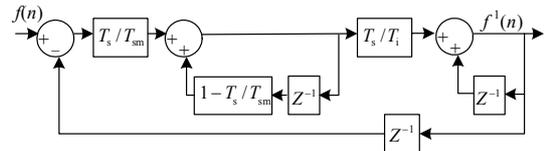


图 5 瞬时频率滤波处理信号框图

Fig. 5 Diagram of instantaneous frequency filter

如图 5, 经 Z 变换后, 可得到其系统函数为式(12)。

$$H(z) = \frac{\frac{T_s^2}{T_{sm} T_i}}{1 + \left(\frac{T_s}{T_{sm}} + \frac{T_s^2}{T_{sm} T_i} - 2\right) z^{-1} + \left(1 - \frac{T_s}{T_{sm}}\right) z^{-2}} \quad (12)$$

其中:  $T_s$  为采样周期;  $T_{sm}$  为平滑时间参数;  $T_i$  为积分时间参数;  $f(n)$  为本次计算的电网瞬时频率值;  $f^1(n)$  为滤波后电网瞬时频率值。

### 1.4.4 计算采样时间 $T_s$

将经过滤波处理后的瞬时频率值乘以每个周期固定的采样点数, 可计算得到定时间新的定时触发阈值的计算公式如式(13)。

$$T_s = \frac{1}{f(n)N} \quad (13)$$

式中:  $N$  为每个周波固定采样点数, 如 128 点;  $f(n)$  为本次计算的电网瞬时频率值, 如 50.5 Hz;  $T_s$  为定时器触发条件阈值。

## 2 实验仿真

本文通过仿真和实际测试验证了频率跟踪算法的性能。

### 2.1 实验一

如图 6, 当输入为标准三相电力信号源时, 系统在启动时, 在约 0.008 s 内, 该算法跟踪频率迅速地从 0 Hz 升至约为 50 Hz, 误差精度为  $\pm 0.005$  Hz。由此可见, 该频率跟踪算法具有跟踪速度快、精度高的特点。在计算中采用了标么值(p.u.), 频率为 1 p.u.(即为 50 Hz)。

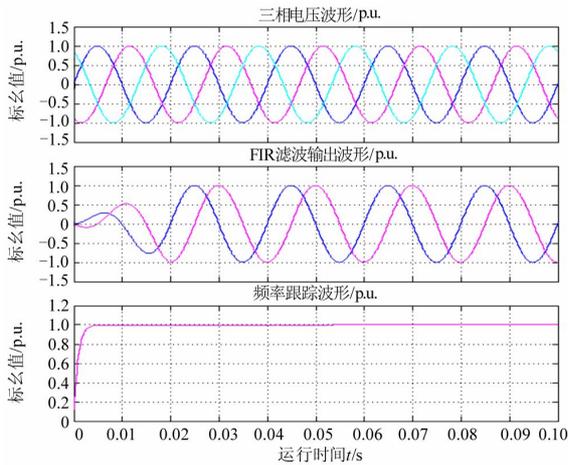


图 6 启动时频率跟踪波形图

Fig. 6 Diagram of frequency tracing on initialization phase

### 2.2 实验二

如图 7, 假设当输入三相电力信号受到 5 次和 7 次谐波干扰, 其模型如式(14)。

$$\begin{cases} u_a = U_m \sin(\omega t) + \frac{1}{5}U_m \sin(5\omega t) + \frac{1}{7}U_m \sin(7\omega t) \\ u_b = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3) + \frac{1}{5}U_m \sin(5\omega t + 2\pi/3) + \frac{1}{7}U_m \sin(7\omega t - 2\pi/3) \\ u_c = U_m \sin(\omega t + 2\pi/3) + \frac{1}{5}U_m \sin(5\omega t - 2\pi/3) + \frac{1}{7}U_m \sin(7\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (14)$$

系统在启动阶段, 由于谐波和负序分量的影响, 该算法在约 0.021 s 后使频率稳定在 1 p.u.(即为 50 Hz)左右, 误差精度为  $\pm 0.005$  Hz。由此可见, FIR 正序滤波器能有效地滤除电网中谐波和负序分量, 对准正确计算电网频率至关重要。

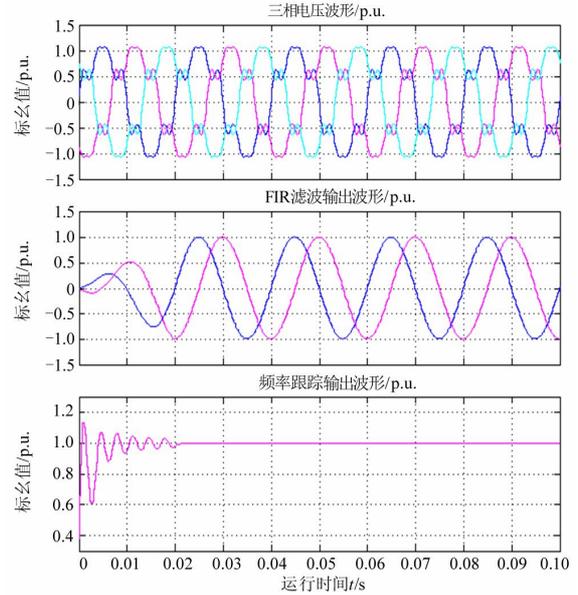


图 7 谐波干扰时频率跟踪波形图

Fig. 7 Diagram of frequency tracing on harmonic interference

### 2.3 实验三

如图 8 所示, 在实验二的基础上, 当系统运行正常后, 在 0.04 s 时起, 模拟  $u_a$  电压缺失情况。三相电压经过 Clarke 变换和 FIR 正序滤波后, 正序分量的幅度减小, 经过 0.021 s 的动态调节后, 频率的

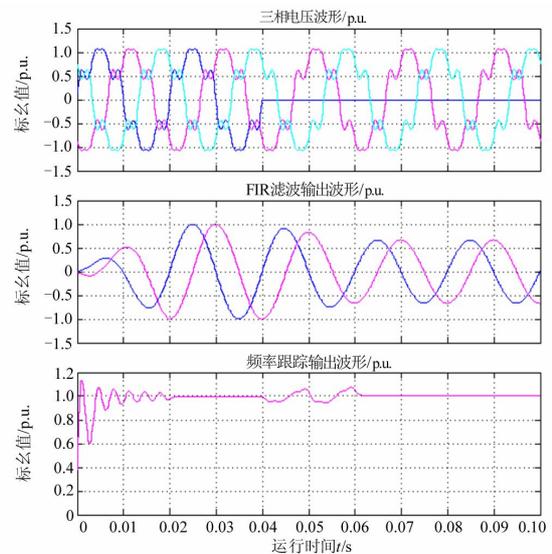


图 8 缺失  $u_a$  时频率跟踪波形图

Fig. 8 Diagram of frequency tracing when  $u_a$  disabled

测量值约为标么值 1 p.u.(即为 50 Hz)。由此可见, 该频率跟踪算法在三相电压故障时, 能精确地对电网频率进行实时跟踪, 该算法的稳定性高。

## 2.4 实验四

在直流输电实际工程试验中, 使用高精度信号源输入不同频率的三相电信号, 记录该算法跟踪频率值, 经统计, 该跟踪算法的测量精度高达 $\pm 0.005$  Hz。在模拟不同的系统频率时, 实际频率测量误差如图 9 所示。

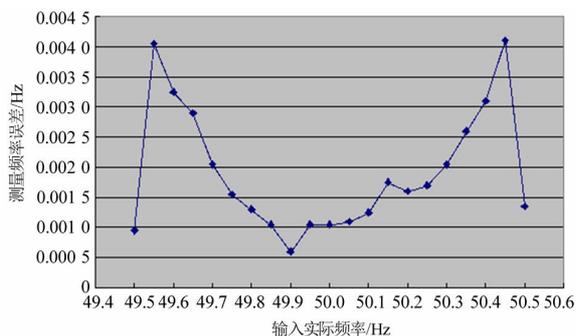


图 9 输入频率与测量频率误差分布图

Fig. 9 Diagram of measurement error between input and tracing frequency

## 3 结论

基于直流输电工程应用中对瞬时电网频率测量的快速性和精度的要求, 本文设计了一种电网瞬时频率跟踪算法。该算法将采集的三相电网电压值进行 Clarke 变换, 经过 FIR 正序滤波器滤波后, 计算出瞬时相位, 采用相位差法实现了对瞬时电网频率的跟踪, 最后对跟踪的频率进行了滤波, 有效地滤除噪声和干扰, 大大提升了电网频率跟踪的准确性和稳定性。经过工程试验验证, 该算法能快速地跟踪电网瞬时频率, 测频精度高达 $\pm 0.005$  Hz。目前该频率跟踪算法已在直流输电工程中应用, 除了直流输电外, 该算法亦可在微电网等其他领域中应用。

## 参考文献

[1] 印海文, 牟龙华. 一种基于 d-q-0 坐标变换的频率测量算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 79-83.  
YIN Haiwen, MU Longhua. A frequency measuring algorithm based on d-q-0 transformation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 79-83.

[2] 杨敏, 孙志军, 李楠, 等. 直流输电换流阀点火脉冲的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 126-129.

YANG Min, SUN Zhijun, LI Nan, et al. Design of firing pulse used for valves control in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 126-129.

[3] 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): 237-241.  
WANG Haoxiong, MA Weiming, 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): 237-241.

[4] 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 Jianbo, GENG Hua, et al. FPGA based ratio changeable all digital phase-locked-loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 153-158.

[5] 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): 94-99.  
GONG Jinxia, XIE Da, ZHANG Yanchi. Principle and performance of the three-phase digital phase-locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 94-99.

[6] 王瑶. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 53-58.  
WANG Yao. Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 53-58.

[7] 张望, 段立诚, 陈刚, 等. HVDC 微机阀控系统的研制[J]. 继电器, 1991, 19(3): 29-34.  
ZHANG Wang, DUAN Licheng, CHEN Gang, et al. Study of HVDC valve control system[J]. Relay, 1991, 19(3): 29-34.

[8] 张爱玲. 溪洛渡送电广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.  
ZHANG Ailing. Study of control and protection strategies for Xiluodu-Guangdong double HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 72-76.

[9] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.  
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC

- transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [10] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [11] 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.
- [12] 石燕宏, 金元浩, 闫士杰. Clarke 和 Park 变换在 DSP 上的实现[J]. 基础自动化, 2000, 7(2): 14-16.  
SHI Yanhong, JIN Yuanhao, YAN Shijie. Implementation of Clarke and park transforms on DSP[J]. Basic Automation, 2000, 7(2): 14-16.
- [13] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [14] 罗军辉, 罗勇江, 白义臣, 等. Matlab7.0 在数字信号处理中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [15] 吴天明, 谢小竹, 彭彬. MATLAB 电力系统设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

---

收稿日期: 2014-05-07; 修回日期: 2014-06-17

作者简介:

沈开奎(1981-), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流输电控制保护系统研发; E-mail: skk-ty@163.com

李延龙(1969-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电控制保护技术等;

赵媛(1986-), 女, 本科, 从事电网技术工程应用相关方向工作。

(编辑 魏小丽)