

# 三相电流源型 STATCOM 的无锁相环控制策略

王 焱, 牟宪民, 齐 琛

(大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 为了解决传统锁相环控制只能获取电网电压角频率, 而没有考虑电网电压的相位, 锁相不精确, 影响整个系统的控制性能等问题, 提出一种适用于电流源型 STATCOM 的无锁相环控制策略。该策略对三相电网电压进行坐标变换, 并根据各坐标系之间的关系得到与电网相电压同步旋转的相角, 能够实时、精确地检测到电网电压的频率和相位角。详细论述了该控制策略, 并在 Matlab/Simulink 中搭建系统仿真模型。仿真结果验证了该控制策略的有效性, 同时表明该控制策略具有提高系统的检测精度, 加快系统的动态响应速度等优势。

**关键词:** 电流源型 STATCOM; 无锁相环; 坐标变换; 动态响应; Simulink

## A control strategy of three-phase current source converter based STATCOM without PLL

WANG Ye, MU Xianmin, QI Chen

(College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** In order to deal with the problem of the traditional phase-locked loop (PLL), such as it can only get the frequency and does not consider the phase of grid voltage, the PLL control is inaccurate, leading to poor control performance of the whole system and so on. This paper proposes a control strategy without PLL which is applicable to CSC-STATCOM, transforms the coordinates in three-phase grid voltage, and gets the synchronous rotation angle according to the relationship of the coordinate systems. This control strategy can get the precise frequency and phase of grid voltage in time. The control strategy of this system is introduced in detail, and a model of the system is built in Matlab/Simulink. The effectiveness of this control strategy is verified by simulations performed in Simulink, and the simulation results indicate that this control strategy can improve detection accuracy of the system, and can speed up the dynamic response of the system.

**Key words:** current source converter based STATCOM (CSC-STATCOM); no phase-locked loop (PLL); coordinate transformation; dynamic response; Simulink

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)14-0131-06

## 0 引言

静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)具有连续、快速、精确的动态补偿性能, 在电力系统无功功率补偿领域得到了日益广泛的研究和应用<sup>[1]</sup>。根据其采用变流器拓扑结构的不同, 可以分为电压源型 STATCOM 和电流源型 STATCOM<sup>[2-3]</sup>。与电压源型 STATCOM 相比, 电流源型 STATCOM 具有自带短路保护功能、可以直接对电流进行控制、可靠性高等优点<sup>[4]</sup>, 引起了学者们的关注。

决定电流源型 STATCOM 补偿性能的关键是能

否实时、快速、准确地检测出谐波和无功电流。目前, 常用的补偿指令电流检测方法主要有: 基于瞬时无功功率理论法及其改进法、同步  $dq$  旋转坐标变换法<sup>[5]</sup>、基于快速傅里叶变换法<sup>[6-7]</sup>、基于神经网络自适应法<sup>[8]</sup>等。其中, 同步  $dq$  旋转坐标变换法由于其物理意义清晰、实现简单、计算量小、实时性好等优点<sup>[9]</sup>获得了广泛的研究与应用, 但是该方法在应用上大多使用锁相环 PLL 来获得与电网电压同步旋转的相位。锁相环的引入不可避免地带来误差, 特别是当电网电压相位发生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, 直接影响控制的精确性<sup>[10-11]</sup>。

为了解决锁相环带来的问题, 有学者提出了一些无锁相环控制技术。文献[12]提出了一种无锁相环 SVPWM 直接功率控制策略, 分析了相角频率给定和电网实际频率出现偏差时出现的问题, 并通过增加无功功率闭环调节, 对给定频率进行实时调整, 解决了频率给定和电网实际频率不同时导致的控制误差。但是其控制过程较为复杂, 且忽略了电网电压相位偏移引起的误差。文献[13]提出了一种适用于电压源型 STATCOM 的无锁相控制方法, 该方法利用了电压源型 STATCOM 输出电压与电网电压同相位的特点, 通过对电网电压频率和直流侧电压 PID 控制器的输出进行误差调整, 实现对直流侧电压的大小和相位的有效控制。但是这种控制方法不适用于电流源型 STATCOM。

为了能够更好地实现三相电流源型 STATCOM 的无功补偿性能, 本文提出一种适用于电流源型变流器的无锁相环控制技术。该方法通过对三相电网电压进行坐标变换, 并根据各坐标系之间的关系得到与电网电压同步旋转的相角  $\theta$ , 从而得到三相并网电流从 abc 三相静止坐标变换到 dq 旋转坐标的变换矩阵所需的正余弦信号。与现有的无锁相环方法相比, 本文提出的无锁相环控制技术能够很好地解决电网电压相位发生偏移导致的控制误差, 确保控制过程的实时性和精确性, 从而使得三相电流源型 STATCOM 系统延时误差小, 具有更好的动态性能。

### 1 数学建模

三相电流源型 STATCOM 的整个系统可以等效为一个可控的电流源并联在电网上, 这个可控的电流源向系统产生超前或滞后电网电压  $90^\circ$  的三相正弦交流电流, 从而实现补偿感性或容性无功的功能。单相等效电路如图 1 所示, 其中  $m$  是三相功率开关桥输出电流基波幅值与直流电流幅值比,  $\delta$  是电流源型 STATCOM 的输出电流与电网电压的相位差。

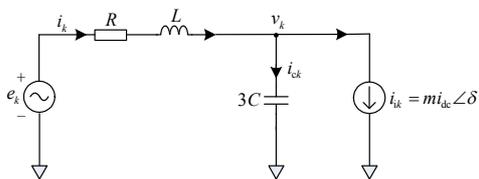


图 1 单相电流源型 STATCOM 等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of one phase current source converter based STATCOM

根据基尔霍夫电压、电流定律(KVL、KCL), 可以得到三相电流源型 STATCOM 的状态方程:

$$\begin{cases} L \frac{di_k}{dt} = e_k - Ri_k - v_k \\ C \frac{dv_k}{dt} = i_k - i_{ik} \\ L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} = v_k - R_{dc} i_{dc} \end{cases} \quad (k = a, b, c) \quad (1)$$

式(1)为三相电流源型 STATCOM 基于状态空间平均意义上的低频数学模型。但是, 该低频数学模型没有涉及到三相电流源型 STATCOM 开关函数的特性, 不能完整反映出三相电流源型 STATCOM 功率开关桥的开关过程。所以, 有必要对三相电流源型 STATCOM 进行基于开关函数的高频数学模型分析<sup>[14]</sup>。

本文采用基于电流矢量的 SVPWM 策略对三相功率开关桥进行控制, 考虑到电流源型变流器开关约束条件, 引入三值逻辑开关函数  $S_k$ , 且定义<sup>[15]</sup>

$$S_k = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂通, 下桥臂断} \\ 0 & \text{同一相桥臂全通或全断} \\ -1 & \text{下桥臂通, 上桥臂断} \end{cases} \quad (k = a, b, c) \quad (2)$$

因此, 三相功率开关桥交流侧输出电流为

$$i_k = i_{dc} S_k \quad (k = a, b, c) \quad (3)$$

三相功率开关桥直流侧电压为

$$L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} + Ri_{dc} = \sum v_k S_k \quad (k = a, b, c) \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(1)并整理成矩阵形式得三相电流源型 STATCOM 的高频数学模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ v_a \\ v_b \\ v_c \\ i_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{3C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{S_a}{3C} \\ 0 & \frac{1}{3C} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{S_b}{3C} \\ 0 & 0 & \frac{1}{3C} & 0 & 0 & 0 & -\frac{S_c}{3C} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{S_a}{L_{dc}} & \frac{S_b}{L_{dc}} & \frac{S_c}{L_{dc}} & -\frac{R_{dc}}{L_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ v_a \\ v_b \\ v_c \\ i_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{e_a}{L} \\ \frac{e_b}{L} \\ \frac{e_c}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)是三相电流源型 STATCOM 的高频数学模型, 精确描述了三相功率开关桥的瞬态过程。但从式(5)中可以发现该数学模型是一个七阶动态数学模型, 为了简化系统的特性分析, 通常将系统的数学模型从 abc 三相静止坐标系转换成 dq 两相同步旋转坐标系下实现系统的降阶。系统的数学模型要经历两次变换, 即 Clark 变换和 Park 变换。

经两次坐标变换后, 系统的数学模型简化成如式(6)所示。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_d \\ v_q \\ i_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\omega_0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \omega_0 & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{3C} & 0 & 0 & -\omega_0 & -\frac{S_d}{3C} \\ 0 & \frac{1}{3C} & \omega_0 & 0 & \frac{S_q}{3C} \\ 0 & 0 & -\frac{S_d}{L_{dc}} & \frac{S_q}{L_{dc}} & -\frac{R_{dc}}{L_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_d \\ v_q \\ i_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{e_d}{L} \\ \frac{e_q}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

对照式(5)和式(6)可以发现, 经过 abc 三相静止坐标系到 dq 两相同步旋转坐标系的变换, 系统的数学模型实现了从 7 阶降为 5 阶, 将时变微分方程变为常数系数微分方程, 且将三相交流变量变换成两相直流量, 这样更有利于控制系统的研究和设计。上式(5)中  $S_d$  和  $S_q$  是三相功率开关桥的控制信号, 其表达式为

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} \sin \delta \\ -\cos \delta \end{bmatrix} \quad (7)$$

从上述坐标变换过程中发现 Clark 变换涉及常数计算, 而 Park 变换涉及到正、余弦量的计算, 所以进行坐标变换的关键是得到与电网电压同步旋转的相位角  $\theta$ , 这也是本文的研究重点。

## 2 无锁相环控制策略

三相电流源型 STATCOM 的无锁相环控制框图如图 2 所示, 由图 2 可知采用 SVPWM 调制策略首先要实现三相并网电流与电网电压的同步变化, 所以要检测电网电压基波分量的相位和频率, 也就是提取电网电压同步信号<sup>[16]</sup>。

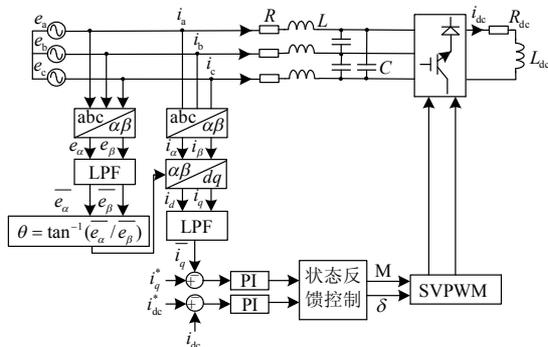


图 2 三相电流源型 STATCOM 的控制框图

Fig. 2 Control block diagram of three phase current source converter based STATCOM

采用传统的 PLL 在电网电压畸变情况下, 同步旋转角  $\theta$  并不满足  $d\theta/dt$  恒定, 不能在坐标变换中体现三相电网电压的信息, 导致锁相不准确。本文提出一种通过对三相电网电压进行坐标变换, 并根据各坐标系之间的关系得到与电网相电压同步旋转的相角  $\theta$  的无锁相环控制技术。首先对三相电网电压进行 Clark 变换, 然后对 Clark 变换得到  $\alpha\beta$  坐标系下的电压  $e_\alpha$ 、 $e_\beta$  进行滤波得到电网电压的基波分量  $\overline{e_\alpha}$ 、 $\overline{e_\beta}$ , 对  $\overline{e_\alpha}$ 、 $\overline{e_\beta}$  进行数学计算得到与电网电压同步旋转的精确相角  $\theta$ 。

为了简化分析, 假设  $d$  轴与电网电压空间矢量同向, 即电网电压只有  $d$  轴分量, 而  $q$  轴分量为零。电压、电流空间矢量在两相静止坐标系和同步旋转坐标系下的关系如图 3 所示, 图中  $\theta$  表示的是 dq 坐标旋转过程中  $d$  轴与  $\alpha$  轴的相角差, 且其变化率等于电网电压的角频率  $\omega_0$ ,  $\varphi$  是合成电流  $\overline{i_{dq}}$  与  $d$  轴的相角差。

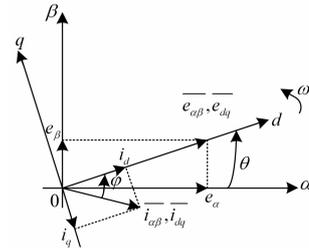


图 3 电压、电流空间矢量在两相静止坐标系和同步旋转坐标系下的关系

Fig. 3 Voltage and current space vectors in the stationary and synchronous reference frames

根据图 3 中各向量之间的关系可得到如下电网电压的 dq 分量及同步正、余弦信号:

$$e_d = |\overline{e_{dq}}| = |\overline{e_{\alpha\beta}}| = \sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}, e_q = 0 \quad (8)$$

$$\cos \theta = \frac{\overline{e_\alpha}}{\sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}}, \sin \theta = \frac{\overline{e_\beta}}{\sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}} \quad (9)$$

对三相并网电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  进行 Clark 变换得到两相静止坐标系下的电流  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ , 再运用上述计算得到的正、余弦信号构成的变换矩阵对电流进行 Park 变换得到瞬时有功电流  $i_d$  和瞬时无功电流  $i_q$ :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}} \begin{bmatrix} \overline{e_\alpha} & \overline{e_\beta} \\ -\overline{e_\beta} & \overline{e_\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

本文只考虑电流源型 STATCOM 对负载无功的基波分量进行补偿, 所以对瞬时无功电流  $i_q$  进行低

通滤波就可以得到无功补偿指令电流。因此本文所提出的无锁相环控制方法能够准确、快速地检测出无功补偿指令电流,有利于提高整个控制系统的性能,保证了三相电流源型 STATCOM 补偿无功的准确性及系统的动态响应速度。

### 3 仿真结果

在 Matlab/Simulink 环境下搭建三相电流源型 STATCOM 的仿真模型,对无锁相环控制策略的有效性进行验证。设置仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

仿真参数	数值
电网相电压峰值 $e$	50 V
滤波电感 $L$	0.1 mH
滤波电容 $C$	16 $\mu$ F
线路等效电阻 $R$	0.01 $\Omega$
直流电感 $L_{dc}$	10 mH
直流侧等效电阻 $R_{dc}$	0.1 $\Omega$
补偿前系统有功功率	50 W
补偿前系统无功功率	250 var
开关频率	10 kHz

当 A 相电网电压的初始相位从  $0^\circ$  变为  $5^\circ$ , 传统锁相控制和本文提出的无锁相环控制方法检测到的与 A 相电网电压同步旋转的正、余弦信号分别如图 4(a)和图 4(b)所示。从图 4(a)和图 4(b)中可以发现当电网电压相位发生偏移时,传统锁相控制方法检测到的正、余弦波形发生严重畸变,这说明传统锁相控制法不能在电网电压相位发生变化后准确锁相。而本文提出的无锁相环控制方法能够实时、准确地检测到正、余弦波形,如图 4(b)所示,在 0.02 s 时余弦信号的相位不再是  $0^\circ$  而是变为  $5^\circ$ 。仿真结果表明了无锁相环控制方法能够快速跟踪电网电压的相位偏移,为后面的控制过程提供准确的电网电压同步信号,从而实现并网电流与电网电压的同步变换。仿真结果同时也验证了理论分析的准确性。

图 5 为两种控制策略下无功功率补偿的仿真结果,  $Q$  为补偿后系统的无功功率。对比图 5(a)和图 5(b)可以发现采用传统锁相环和无锁相环技术对系统进行无功功率补偿,补偿后系统无功功率都能达到 0。但是由于传统锁相控制方法检测到的正、余弦信号发生严重偏差,导致补偿后无功功率出现振荡。而采用无锁相环技术补偿后系统的无功功率能在更短的时间内达到 0 并保持稳定,加快了系统的动态响应速度。这表明采用无锁相环控制策略后,三相电流源型 STATCOM 系统能更快速、稳定地达到理想补偿效果。

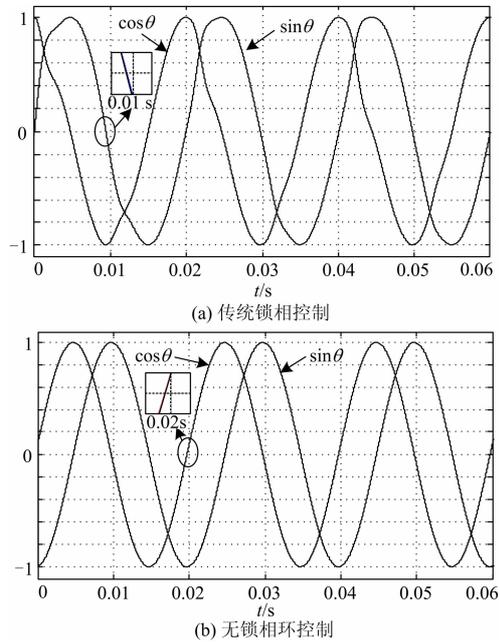


图 4 正、余弦信号波形图

Fig. 4 Signal waveform of sine and cosine

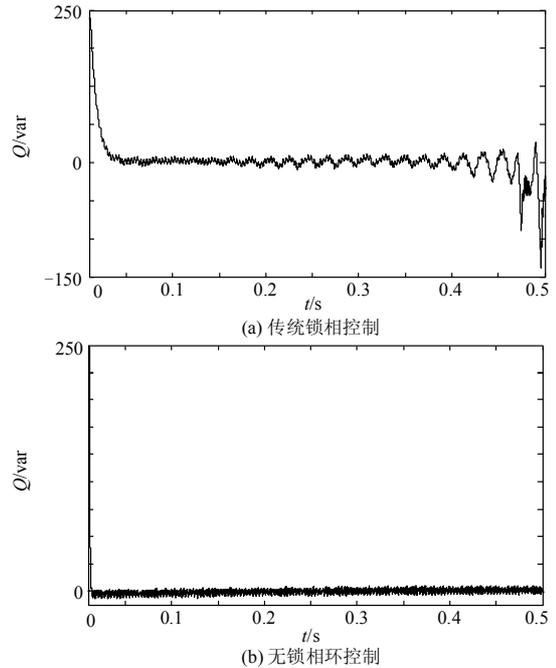


图 5 无功功率补偿仿真结果

Fig. 5 Simulation of reactive power compensation

图 6 为两种控制策略下三相电流源型 STATCOM 系统直流侧电流波形图。将图 6(a)和图 6(b)比较后发现采用传统锁相控制方法因为受电网电压相位发生偏移的影响,三相电流源型 STATCOM 系统直流侧电流波形发生振荡,且振幅随时间的增加而增大。采用无锁相环控制方法的情况下三相电流源型

STATCOM 系统直流侧电流能快速地跟踪参考电流, 减少了系统的动态响应时间, 而且直流侧电流始终稳定在参考值, 波动率为 0.67%, 保证了整个系统的稳定性。

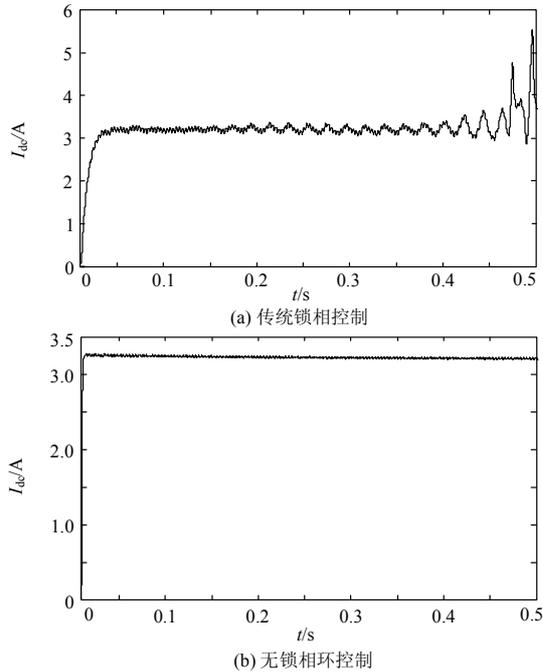


图 6 直流侧电流波形图

Fig. 6 Waveform of direct current

#### 4 结论

本文针对三相电流源型 STATCOM 系统, 提出了一种无锁相环控制策略, 并对该控制策略进行了详细论述, 最后在 Matlab/Simulink 环境下进行了验证。仿真结果表明无锁相环控制策略不受电网电压相位发生偏移的影响, 能够实时、快速、精确地检测到电网电压的频率和相位角, 得到电网电压同步信号, 实现三相并网电流与电网电压的同步变化, 而且这种无锁相环控制方法实现简单, 能够提高系统的检测精度, 加快系统的动态响应速度, 改善系统的无功补偿性能。

#### 参考文献

[1] 孙毅超, 赵剑锋, 季振东, 等. 基于 d-q 坐标系的单相链式 STATCOM 直流电压平衡控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2500-2506.  
SUN Yichao, ZHAO Jianfeng, JI Zhendong, et al. A balance control strategy of dc-link voltages for single phase cascaded STATCOM based on d-q coordinates[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2500-2506.

[2] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 126-129.  
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 126-129.

[3] CASTRO L M, ACHA E, FUERTE-ESQUIVEL C R. A novel STATCOM model for dynamic power system simulations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3145-3154.

[4] BILGIN H F, ERMIS M. Design and implementation of a current-source converter for use in industry applications of D-STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(8): 1943-1957.

[5] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.

[6] 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 Guozhi, 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.

[7] 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 Boyong, HUANG Wenqing. Hybrid wavelet-energy operator method for voltage sag detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 171-177.

[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 Shangqing, CAI Jinding. An advanced detection method for three-phase voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 91-97.

[9] 常鲜戎, 王辉云, 张海生. DSTATCOM 补偿指令电流的新型检测方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10):

2819-2824.  
 CHANG Xianrong, WANG Huiyun, ZHANG Haisheng. A novel method to detect reference compensation current for DSTATCOM[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2819-2824.

[10] KARIMI G M, ALI K S, PIRAVEEN K J, et al. Problems of startup and phase jumps in PLL systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1830-1838.

[11] 苏刘军, 鲁宝春, 李昌超, 等. 一种改进的无锁相环三相电压波动检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 121-126.  
 SU Liujun, LU Baochun, LI Changchao, et al. An improved detection method without phase-locked loop for three-phase voltage fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 121-126.

[12] 郑昕昕, 肖岚, 田洋天, 等. 双向三相 AC/DC 变流器的无锁相环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 79-87.  
 ZHENG Xinxin, XIAO Lan, TIAN Yangtian, et al. A control strategy of bidirectional three-phase AC/DC converters without PLL[J]. Power System Technology, 2013, 33(36): 79-87.

[13] NGUYEN P L, ZHONG Qingchang, BLAABJERG F, et al. Synchronverter-based operation of STATCOM to mimic synchronous condensers[C] // IEEE Industrial Electronics and Applications Conference, Singapore, 2012: 942-947.

[14] 白志红. 电流型多电平变流器的一些相关理论以及应用技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
 BAI Zhihong. Research on some theories and application techniques of multilevel current source converters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[15] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[16] 李珊瑚, 杜雄, 王莉萍, 等. 解耦多同步参考坐标系电网电压同步信号检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 183-189.  
 LI Shanhu, DU Xiong, WANG Liping, et al. A grid voltage synchronization method based on decoupled multiple synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 183-189.

收稿日期: 2014-10-20; 修回日期: 2014-12-23

作者简介:

王 焯(1989-), 女, 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; E-mail: yew1989@126.com  
 牟宪民(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电网无功补偿、电力电子技术; E-mail: Muxm@dlut.edu.cn  
 齐 琛(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为矩阵变换器及其扩频技术。

(编辑 姜新丽)