

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.022

# 基于卡尔曼滤波的微电网同步并网研究\*

王建平<sup>1</sup> 郑成强<sup>1</sup> 徐晓冰<sup>1</sup> 穆道明<sup>1</sup> 秦晓佳<sup>2</sup> 李冰<sup>1</sup> 孙伟<sup>1</sup> 王钦<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009; 2. 国网安徽省电力公司培训中心 合肥 230022;  
3. 江苏通灵电器股份有限公司 镇江 212200)

**摘要:**提出了一种基于卡尔曼滤波的同步并网控制策略,以解决微电网与大电网同步并网过程的各分布式电源间协调控制及平滑、快速并网的问题。通过计算微电网前一次状态和本次状态的差值,利用卡尔曼滤波算法预测下一状态是否达到并网要求,使微电网实现平滑、快速并网。仿真结果验证了该方案的有效性。

**关键词:**卡尔曼滤波;微电网;同步并网

**中图分类号:** TM74; TN91      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:**

## Research on synchronous grid-connecting of micro-grid based on Kalman filter

Wang Jianping<sup>1</sup> Zheng Chengqiang<sup>1</sup> Xu Xiaobing<sup>1</sup> Mu Daoming<sup>1</sup>  
Qin Xiaojia<sup>2</sup> Li Bing<sup>1</sup> Sun Wei<sup>1</sup> Wang Qin<sup>3</sup>

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Training Center of State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China; 3. Jiangsu Tonglin Electric Co. Ltd., Zhenjiang 212200, China)

**Abstract:** A synchronized control strategy based on Kalman filter is proposed to solve the problem of coordination control of distributed power and grid connection between micro-grid and big grid smoothly and quickly. Kalman filter algorithm is used to predict whether the next state meets the requirements of the grid connection by calculating the difference value between the previous state and the current state of the micro-grid. It realizes that micro-grid is connected to the grid quickly and smoothly. The simulation results show the effectiveness of the proposed scheme.

**Keywords:** Kalman filter; micro-grid; synchronous grid-connecting

## 1 引言

能源危机和环境污染等问题日益突出,微电网的发展与应用成为了绿色能源研究的热点<sup>[1-3]</sup>。其中,微电网与大电网同步并网过程中协调控制各分布式电源平滑并网控制策略是值得研究的要点之一。

近年来,国内外相关文献资料报道了有关微电网控制方式及同步并网策略的成果。文献[4]给出了一种主从控制的微电网安全转换策略,但是算法较复杂,实现难度较大。文献[5]采用了无联络线的下垂控制方式,实现了微电网的平滑转换,但是实际应用中并网时间难以

实现高准确度同步。文献[6]研究了微电网中分布式电源逆变器的多环控制策略,但对负荷变化状况没有充分考虑。文献[7]提出了下垂控制特性和倒下垂特性对低压微电网进行控制的方法,避免了转换时控制策略的切换过程,但并网时间较长。文献[8]提出了基于储能的新型综合控制策略,可保证微电网并网的平滑切换。文献[9]提出一种一阶差分预测微电网状态的控制策略,以实现微电网的并网控制,但由于一阶差分预测误差较大,并网时间同步准确性不高。文献[10-11]提出了一种自适应下垂控制技术,有效实现并网/离网模式的无缝切换。

本文针对含多种分布式电源微电网的快速同步并网

平滑切换进行了研究。1) 构建典型的微电网结构, 并由此构建同步控制器; 2) 在同步控制器中对两侧电网采集的三相电压信号进行预处理, 并计算出电压的幅值差、相位差、频率差; 3) 采用卡尔曼滤波算法预测同步并网平滑切换参数值。通过与采用电压误差的差分估计法进行对比性仿真验证实验, 结果表明, 本文的方法是可行有效的。

## 2 微电网结构及控制方法

针对微电网的特征, 构建的典型微电网结构如图 1 所示。其中, 含有柴油发电机组、光伏、风电等分布式电源以及一些本地负荷, 以及与大电网的连接。

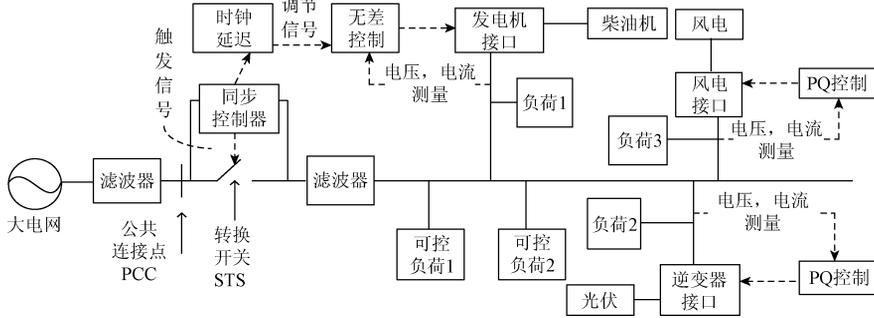


图 1 典型的微电网结构模型  
Fig. 1 Typical micro-grid model

该微电网结构模型系统中, 柴油机采用无差控制, 维持微电网的频率和电压稳定, 光伏阵列和风力发电机均采用 PQ 控制, 并配有最大功率点跟踪模块。构建的同步控制器模型结构如图 2 所示。

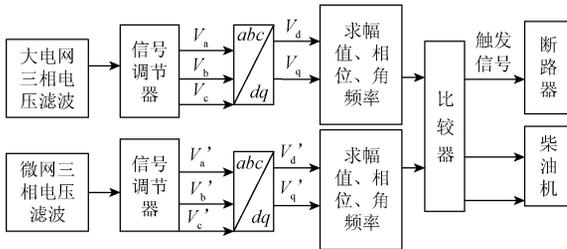


图 2 同步控制器模型结构

Fig. 2 The structure of synchronous controller model

首先检测到的大电网和微电网两侧三相电压经过滤波、信号调节之后, 其次通过锁相环求出幅值、频率和相位, 然后在比较器中求出两侧的两个差值, 最后判断所求差值是否达到并网条件, 若达到标准, 则给断路器发送触发信号, 断路器闭合, 微电网与大电网并网运行; 否则, 则将这些差值以补偿信号的形式发送给柴油机, 柴油机调节频率和电压, 协调控制微电网运行状态, 使其尽快达到并网标准<sup>[12-15]</sup>。

表 1 所示为比较器中准同步检定要求的参数限制, 是按照 IEEE Std 1547-2003 准同期参数限制设计的。

表 1 准同步参数限制

Table 1 Plesiochronous parameter limitation

频率偏差/Hz	电压偏差/%	相位偏差/(°)
±0.1	±5	±1

## 3 同步信号检测及预处理

由于光伏、风电接入电网的随机性和间歇性, 以及电力电子器件逆变器和非线性负荷的接入, 微电网中的高次谐波、三相电压不对称现象将影响信号测量的准确性, 因此, 需对被测的信号进行滤波, 虚拟对称三相电压相序调整等预处理。

### 3.1 电压滤波及参数选择

在大电网和微电网两侧三相电压进入同步控制器之前分别添加 LC 滤波器:

电感 L 可按下式选取:

$$\frac{(2U_m - 3E_m)E_m T_s}{2U_m \Delta i_{\max}} \leq L \leq \frac{2U_m}{3I_m \omega} \quad (1)$$

式中:  $U_m$  为直流母线电压 (V),  $E_m$  为交流电压幅值 (V),  $T_s$  为开关周期 (s), 为滤波电感电流的最大纹波脉动量。

电容 C 可根据该系统的基波频率和载波频率选取:

$$\begin{cases} 10f_n \leq f_0 \leq \frac{f_s}{10} \\ f_0 = \frac{1}{(2\pi \sqrt{LC})} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f_n$  为基波频率,  $f_0$  为滤波器谐振频率,  $f_s$  为载波频率。

### 3.2 虚拟对称三相电压的相序调节

由于负载的不对称以及分布式电源的存在, 会出现三相电压的不对称, 对电压的幅值、相位和频率的测量存在影响。因此采用信号调节器, 利用正序相量创造出和

原始三相电压相同幅值的虚拟三相对称电压,利用此虚拟三相对称电压就可以准确计算出原始电压的幅值与相位<sup>[10-12,16]</sup>。

如图3(a)所示是三相电压不对称情况,其中正序分量  $V_1$  由下式计算得出:

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3)$$

式中:  $a = 1 \angle 120^\circ = e^{j(2/3)\pi}$ 。

根据  $V_1$  的幅值和相位,并按照式(4)创造出如b图中的对称的虚拟三相电压代替原三相电压。

$$[\tilde{v}_a \quad \tilde{v}_b \quad \tilde{v}_c] = [1 \quad a^2 \quad a]^T \cdot V_1 \quad (4)$$

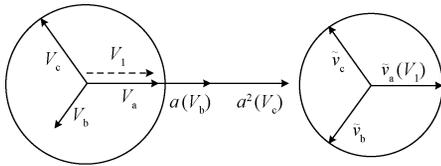


图3 虚拟对称电压变化

Fig.3 Virtual symmetric voltage change

图4所示为含多种谐波的三相电压、经信号调节器之后的波形及既滤波又经过信号调节后的波形对比。

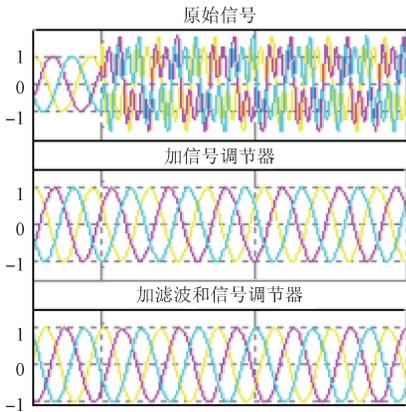


图4 波形对比

Fig.4 The comparison of waveform

由图4可知,信号经过改进的滤波器和信号调节器之后的波形比仅仅通过信号调节后的波形更平滑,有利于维持系统稳定和平滑并网。

### 4 基于卡尔曼滤波估计的预同步控制方法

对同步信号进行预处理后,微电网同步并网达到准同步并网要求,还需计算两侧电网的幅值差、相位差和频率差。由于微电网与大电网之间的断路器闭合有一定时间延迟,所以估计差值时还需要考虑断路器闭合延迟时间<sup>[17-19]</sup>。分布式电源的随机性使得差值的预测较困难,传统的预测算法将无法准确的对并网瞬间电压差、频率

差和相位差进行预测,而卡尔曼滤波算法适用于存在随机性因素的线性系统预测。

#### 4.1 三相电压幅值差、频率差和相位差计算

本文应用坐标变换先将大电网和微电网两侧三相电压变换到  $d-q$  坐标轴参考系,然后计算三相电压的幅值及相对于参考轴的相位,根据矢量关系可得两侧三相电压的相位差<sup>[10]</sup>。

三相电压到  $d-q$  两相变化如下式所示:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \mathbf{T}(\theta_r) \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中变换矩阵:

$$\mathbf{T}(\theta_r) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(5)中,  $i_d, i_q$  轴以角速度  $w_r$  旋转,所以在旋转的  $i_d$  和静止的  $i_a$  之间的角度按照如下公式定义:

$$\theta_r = \int_0^t w_r(\tau) d\tau + \theta_r(0) \quad (7)$$

由于仅需要测量大电网和微电网两侧三相电压幅值差和相位差,因此可以利用式(7)用额定参考角速度(50 Hz时  $100\pi$  [rad/s]) 计算  $\theta_r$ , 并且执行变换,再利用虚拟锁相环提供 50 Hz 额定频率。原始信号的幅值和相位分别通过式(8)和(9)来计算,计算出三相电压和旋转参考坐标系之间的幅值差和相位差。

$$V = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (8)$$

$$\theta = \tan^{-1} i_q / i_d \quad (9)$$

设电力系统的三相电压为  $(V_A, V_B, V_C)$ , 同步发电机的三相电压为  $(V_a, V_b, V_c)$ 。通过 park 变换,可以求出  $(V_{ABC}^d, V_{ABC}^q)$  和  $(V_{abc}^d, V_{abc}^q)$ , 电压差  $(V_{diff} [V])$  可以按下式计算:

$$V_{diff} = \sqrt{V_{ABC}^d{}^2 + V_{ABC}^q{}^2} - \sqrt{V_{abc}^d{}^2 + V_{abc}^q{}^2} \quad (10)$$

$V_A$  和  $V_a$  的相位差  $\theta_s$  (rad) 按下式测出:

$$\theta_s = \left( \frac{\pi}{4} - \theta_1 \right) - \left( \frac{\pi}{4} - \theta_2 \right) = \tan^{-1} \frac{V_{abc}^q}{V_{abc}^d} - \tan^{-1} \frac{V_{ABC}^q}{V_{ABC}^d} \quad (11)$$

最后,两电压之间的转差频率  $f_s$ , 单位为 Hz, 可以按下式计算:

$$f_s = \frac{\omega s}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} \quad (12)$$

#### 4.2 传统的基于电压误差的差分估计

以相位差为例,将发送给断路器闭合信号的瞬间(设为  $k$  时刻)到断路器实际闭合的瞬间相位差信号变化近

似为一条直线,其斜率等于  $k$  时刻与前一采样时刻  $k-1$  时刻之间差值变化的斜率<sup>[12,16]</sup>。计算公式如下:

$$\hat{\theta} = \theta_k + T_d(\theta_k - \theta_{k-1})/\Delta t \quad (13)$$

式中:  $\hat{\theta}$  是预测的相位差,  $\theta_k$ 、 $\theta_{k-1}$  是第  $k$ 、 $k-1$  采样时刻的相位差,  $T_d$  是断路器闭合延迟时间,  $\Delta t$  是采样周期。

### 4.3 基于卡尔曼滤波估计的预测算法

以上述的相位差为例,建立卡尔曼滤波器:

1) 设二维状态向量  $\mathbf{x}_k = [\Delta\theta_k \quad \Delta\dot{\theta}_k]^T$ ,

其中  $\Delta\theta_k$  为  $k$  时刻的相位差,  $\Delta\dot{\theta}_k$  为其一阶导数,即转差角频率。

2) 系统的状态方程:系统的相位角的变化过程可用式(14)的时间线性状态方程描述。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{\Gamma}\boldsymbol{\lambda}_k \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{\Gamma}$  均为已知的常值矩阵,  $\boldsymbol{\lambda}_k$  为系统噪声,是一个零均值的高斯白噪声序列。

3) 系统的测量方程:

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\mu}_k \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{C}$  为 1,  $\mathbf{v}_k$  为一维测量向量,  $\boldsymbol{\mu}_k$  为测量误差,为零均值高斯噪声。

4) 系统初始状态的确定:初始的相位差  $\hat{\mathbf{x}}_{0,0} = E(\mathbf{x}_0)$ , 估计误差协方差矩阵  $\mathbf{P}_{0,0} = \text{Var}(\mathbf{x}_0)$ ; 测量方程中的噪声协方差矩阵  $\mathbf{R}_k : E\{\boldsymbol{\mu}_k^2\}$  系统噪声的协方差矩阵  $\mathbf{Q}_k : E\{\boldsymbol{\lambda}_k^2\}$ 。

5) 一步预测推导:根据卡尔曼滤波理论的预测模型递推公式,进行一步预测估计推导如式(16)~(18)。

$$\mathbf{P}_{1,0} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{0,0}\mathbf{A}^T + \mathbf{\Gamma}\mathbf{Q}_k\mathbf{\Gamma}^T \quad (16)$$

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{P}_{1,0}\mathbf{C}^T(\mathbf{C}\mathbf{P}_{1,0}\mathbf{C}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{1,1} = (\mathbf{I} - \mathbf{G}_1\mathbf{C})\mathbf{P}_{1,0} \quad (18)$$

由此可以得到下一步的状态预测值:

$$\hat{\mathbf{x}}_{11,1} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{01,0} + \mathbf{G}_1(\mathbf{v}_k - \mathbf{C}\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{01,0}) \quad (19)$$

由式(14)~(19),可依次类推得  $\hat{\mathbf{x}}_{21,2}, \hat{\mathbf{x}}_{31,3}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{k1,k}, \hat{\mathbf{x}}_{k+11,k+1}, \dots$ 。其中  $\mathbf{G}_k$  是第  $k$  时刻卡尔曼增益,是第  $k$  时刻状态估计值。

由上式迭代过程可以看出,相位差的状态估计跟本次的输入和前一次的相位差状态估计值有关,所以只需保存前一次相位差状态值即可实现实时处理。对于随机性动态系统,根据前一次的状态可较快估计下一次的状态,满足本文对微电网同步并网的要求。

## 5 仿真与结果分析

在 MATLAB Simulink 仿真平台上构建如图 5 的微电网仿真模型,仿真对比卡尔曼滤波预测算法与差分法估计算法。图中包括柴油机,光伏发电系统、风力发电系统、断路器、同步控制器、大电网、负载。该模型中包含的同步控制器模块的内部结构如图 6 所示。

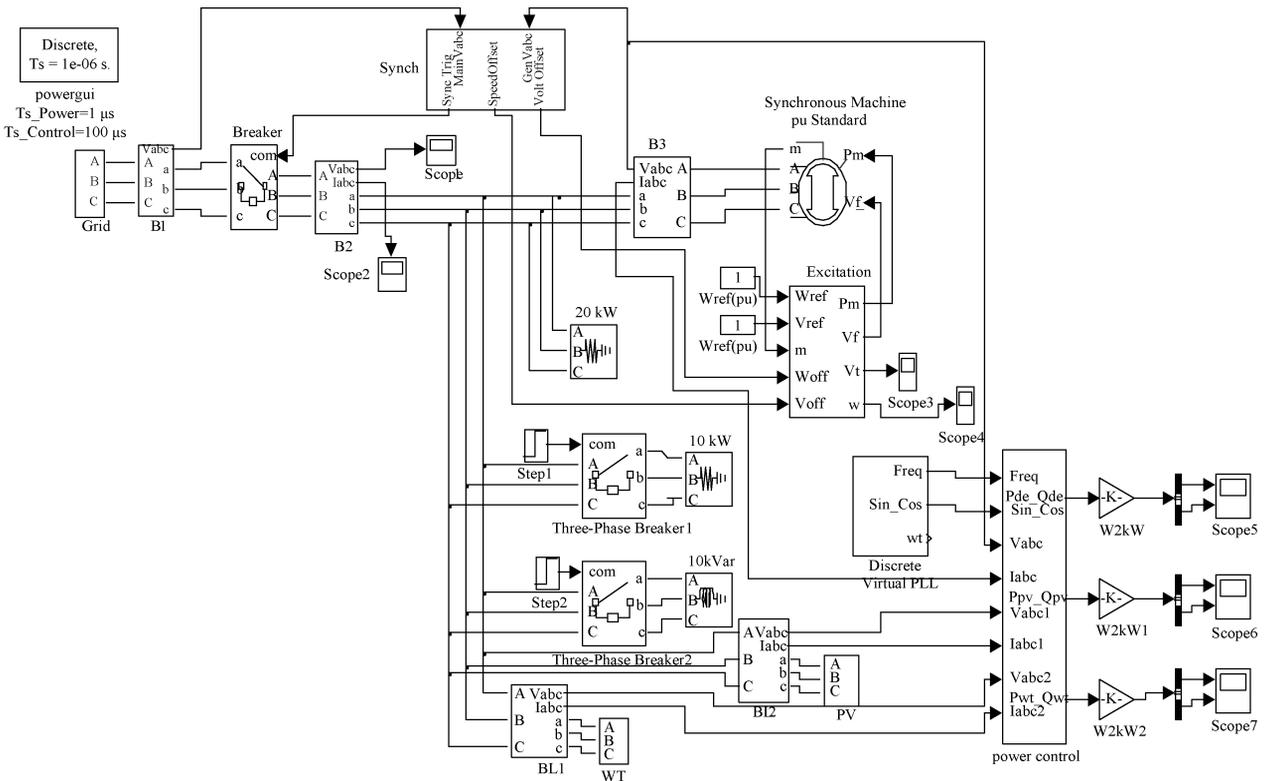


图 5 微电网仿真模型

Fig. 5 Simulation model of micro-grid

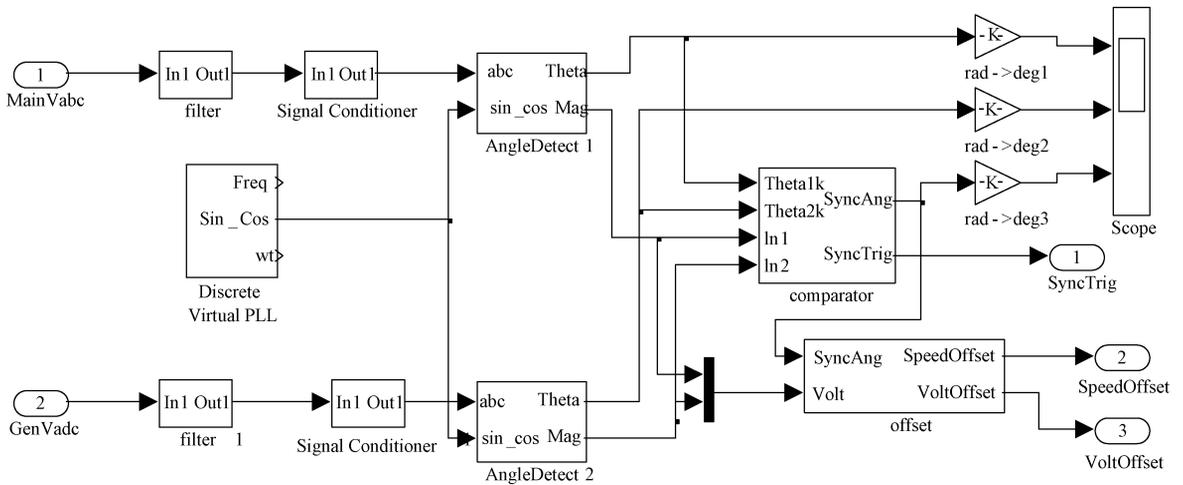


图6 同步控制器仿真模型

Fig. 6 Simulation model of synchronous controller

卡尔曼滤波算法预测与差分法预测仿真对比实验的初始参数设置如下。

电网:母线电压为 380 V;光伏发电系统:工作在最大功率点处,额定容量为 10 kVA;风力发电机保持恒功率运行;柴油机:额定容量为 50 kVA;负荷 1:有功功率为 20 kW;负荷 2:有功功率为 100 W,无功为 1 kVar;可控负荷 1:功率为 5 kW;可控负荷 2:功率为 3 kVar。

由柴油机、光伏电池和负荷组成的微电网系统通过断路器、变压器与 22.9 kV, 50 Hz 的无穷大电网相连,分别采用相位差分法和卡尔曼滤波算法对相位差进行预测,并就对与大电网同步切换情况进行仿真分析。

微电网开始处于孤岛运行状态,此时微电网内各设备状态为柴油发电机接入,光伏发电接入,风力发电接入,负荷 1、2 接入,可控负荷 1、2 接入;在 A 点处,切除可控负荷 1;在 B 点处,切除可控负荷 2;在 C 点处,微电网与大电网达到并网条件,转为并网运行,断路器闭合时间延迟设为 30 ms。

图 7 和 8 所示为采用卡尔曼滤波算法的微电网频率

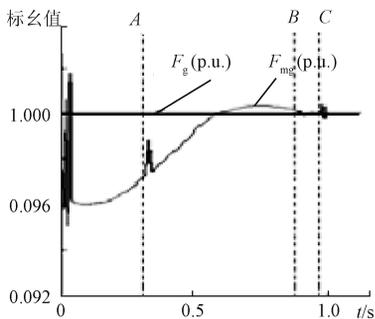


图7 微电网与大电网频率

Fig. 7 Frequency of micro-grid and grid

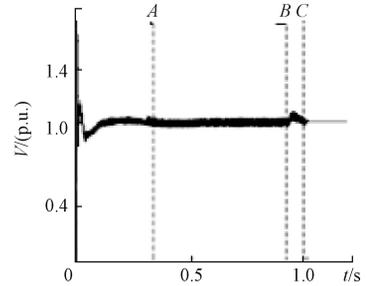


图8 微电网的母线电压

Fig. 8 Bus voltage of micro-grid

和母线电压变化情况。由仿真结果可知微电网频率和电压随负荷相应变化,在 0 ~ C 阶段微电网频率和电压经过不断的调整和预测,并最终在 C 点达到并网条件,实现并网。此阶段微电网频率和电压的波动很小,较平滑,调整时间大约为 0.7 s,表明系统在该控制策略下能够平滑并网,且达到快速并网的要求。

图 9 所示为采用卡尔曼滤波算法与差分算法的相位差比较图。由图 9 可看出,虽然相位差分法和卡尔曼滤波算法均能预测相位差,但对于在 A 点和 B 点的负荷变

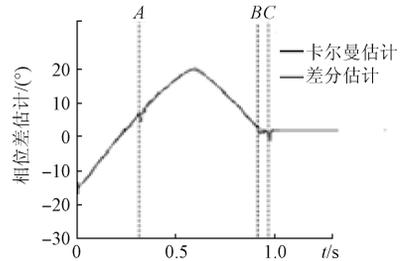


图9 相位差估计

Fig. 9 Phase difference estimation

化时,相位差分算法的相位差有明显的震荡,存在 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 的偏差,不能很好满足并网条件,并可能导致延迟并网;而卡尔曼滤波算法能较准确预测相位差的变化,在负荷变化点无明显的相位差震荡,能够很好的满足并网条件及达到平滑、快速并网。

## 6 结 论

本文针对含有多种分布式电源的微电网系统,提出了一种基于卡尔曼滤波法预测相位差的同步并网控制策略,实现了微电网快速、平滑同步并网。

仿真结果验证,基于卡尔曼滤波法预测相位差的可行性和有效性,相较于相位差分预测,提高了预测的准确性和快速性。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 马艺玮,杨苹,王月武,等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):168-175.  
MA Y W, YANG P, WANG Y W, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid [J]. Automation of Electronic Power Systems, 2015, 39(8): 168-175.
- [ 2 ] 沈沉,吴翔宇,王志文,等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(5):1-11.  
SHEN CH, WU X Y, WANG ZH W, et al. Practice and rethinking of microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2014,42(5):1-11.
- [ 3 ] 王成山,肖朝霞,王守相. 微电网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):98-103.  
WANG CH SH, XIAO ZH X, WANG SH X. Synthetical control and analysis of microgrid [J]. Automation of Electronic Power Systems, 2008,32(7):98-103.
- [ 4 ] 徐少华,李建林. 光储微电网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):25-33.  
XU SH H, LI J L. Grid-connected/island operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid [C]. Proceedings of the CSEE, 2013:25-33.
- [ 5 ] 张丽,徐玉琴,王增平,等. 包含同步发电机及电压源逆变器接口的微电网控制策略[J]. 电网技术,2011,35(3):170-176.  
ZHANG L, XU Y Q, WANG Z P, et al. Control scheme of microgrid fed by synchronous generator and voltage source inverter [J]. Power System Technology, 2011, 35(3):170-176.
- [ 6 ] 王成山,肖朝霞,王守相. 微电网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报,2009,24(2):100-107.  
WANG CH SH, XIAO ZH X, WANG SH X. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009,24(2):100-107.
- [ 7 ] 纪明伟,张兴,杨淑英. 基于电压源逆变器的微电网控制策略[J]. 合肥工业大学学报,2009,32(11):1678-1682.  
JI M W, ZHANG X, YANG SH Y. Study on the control strategies of voltage source inverter in micro-grid [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2009, 32(11):1678-1682.
- [ 8 ] 赵冬梅,张楠,刘燕华,等. 基于储能的微电网并网和孤岛运行模式平滑切换综合控制策略[J]. 电网技术,2013,37(2):301-306.  
ZHAO D M, ZHANG N, LIU Y H, et al. Synthetical control strategy for smooth switching between grid-connected and islanded operation modes of microgrid based on energy storage system [J]. Power System Technology, 2013,37(2):301-306.
- [ 9 ] CHO C, KIM S K, JEON J H, et al. New ideas for a soft synchronizer applied to CHP cogeneration [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011,26(1):11-21.
- [ 10 ] VASQUEZ J C, GUERRERO J M, LUNA A, et al. Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10):4088-4096.
- [ 11 ] LEE C T, JIANG R P, CHENG P T. A grid synchronization method for droop-controlled distributed energy resource converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 49(2):954-962.
- [ 12 ] ARBOLEYA P, DIAZ D, GUERRERO J M, et al. An improved control scheme based in droop characteristic for microgrid converters [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(10):1215-1221.
- [ 13 ] 秦臻,张海燕,徐强,等. 微电网中电压型逆变器滤波器研究[J]. 电力学报,2015,30(3):243-246.  
QIN ZH, ZHANG H Y, XU Q, et al. Research on filter of voltage inverter in microgrid [J]. Journal of Electric Power, 2015,30(3):243-246.
- [ 14 ] 于会群,钟永,张浩,等. 微电网混合储能系统控制策略研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(5):730-738.  
YU H Q, ZHONG Y, ZHANG H, et al. Research on control strategy of hybrid energy storage system in micro grid [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015,29(5):730-738.
- [ 15 ] 党克,郑玉浩,严干贵,等. 电网电压不平衡下光伏并网逆变器的同步技术[J]. 仪器仪表学报,2015,

36(1):87-94.

DANG K, ZHENG Y J, YAN G G, et al. Synchronization technique of grid-connected PV inverter under unbalanced grid voltage [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1):87-94.

- [16] 唐芬, Josep M. GUERRERO, 周啸, 等. VASQUEZ. 一种可实现微电网系统快速平滑并网的主动同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8):15-22.

TANG F, GUERRERO J M, ZHOU X, et al. An active synchronization control strategy for fast and smooth integration of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8):15-22.

- [17] 杨海柱, 徐锦举. 微电网并网逆变器的改进下垂控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5):36-40.

YANG H ZH, XU J J, et al. Research of improved droop control strategy for grid-connected inverters in microgrids [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(5):36-40.

- [18] 侯立健, 朱长青, 陈雅, 等. 并网发电系统中孤岛检测方法的综述[J]. 国外电子测量技术, 2015(8):34-39.

HOU L J, ZHU CH Q, CHEN Y, et al. Review of islanding detection methods for generation grid-connected system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015(8):34-39.

- [19] 陈凯, 张杰. 重复控制逆变器并网电流控制技术研

究[J]. 中国测试, 2015, 41(3):91-95.

CHEN K, ZHANG J. Research on the current control for grid-connected inverter using repetitive control method [J]. China Measurement & Test, 2015, 41(3):91-95.

## 作者简介



**Wang Jianping** received B. Sc. from Hefei University of Technology in 1978, M. Sc. from Jilin University of Technology in 1987, and Ph. D. from Hefei University of Technology in 2007, respectively. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Hefei University of Technology. His main research interest includes intelligent control.



**Zheng Chengqiang** received B. Sc. from Hefei University of Technology in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. His main research interest includes intelligent control.

**王建平**, 1978年于合肥工业大学获得学士学位, 1987年于吉林工业大学获得硕士学位, 2007年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能控制。

E-mail: wjphfut@126.com

**郑成强**, 2015年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为智能控制。

E-mail: zhenghfut@163.com

**Zheng Chengqiang** received B. Sc. from Hefei University of Technology in 2015. Now

## 罗德与施瓦茨提供快速而简便的 DVB-S2 和 DVB-S2X 卫星传输测试解决方案

罗德与施瓦茨扩展了其 R&S SMW200A 矢量信号发生器的功能, 以支持 DVB-S2 卫星标准及其扩展 DVB-S2X。配备有新选件的 R&S SMW200A 为支持这些标准的组件、设备和卫星提供了一个简单的测试解决方案。这是目前市场上首个单设备解决方案, 其不仅可以产生 6 GHz 以下的 DVB-S2/DVB-S2X 中频信号, 也可以产生传输频率在 Ku 波段, 甚至高达 40 GHz 微波波段的信号。

DVB-S2 卫星标准为数以百万计的用户提供卫星数字电视业务。DVB-S2X 扩展已经启用, 它具有更高的传输速率以支持 UHD / 4K 超高清分辨率。该标准定义了卫星和地球之间传输数字数据的调制和物理特性。这使得 DVB-S2 和 DVB-S2X 成为通过商业和政府卫星系统进行电视信号和数据传输的最佳方案。这些传输不仅使用 Ku 波段, 也会用到 Ka 波段。

R&S SMW200A 矢量信号发生器配备了 SMW-K116 软件选件后, 可以提供符号率高达 600 Msymbol/s 的

DVB-S2/DVB-S2X 信号。该选件支持 ETSI EN 302 307-1 V1.4.1 和 ETSI EN 302 307-2 V1.1.1 中定义的所有 MODCOD 配置, 用户可以据此测试放大器 and 滤波器, 完整的模块以及集成在终端设备内的接收机。

由于具备频率高达 40 GHz 的输出能力, R&S SMW200A 是首个支持测试工作在目标频率的射频前端及其组件的单设备解决方案。R&S SMW200A 为这些测试提供正确的物理信号, 无需那些涉及多台仪器和外部 PC 进行信号发生的复杂设置。