

基于有限通信的配电系统频率协同获取方法

杨洪明¹, 刘保平², 易德鑫³, 杨洪朝⁴, 吴俊明¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院 智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;

2. 国网丽水供电公司, 浙江 丽水 323000; 3. 晋江电力有限责任公司, 福建 晋江 362200;

4. 湖南中天工程监理有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 面对智能配电网中大量分布式小容量可控负荷参与电网调频的问题, 所有可控负荷的配电系统频率信号获取是前提和基础。为此, 提出了基于一致性滤波的配电系统频率协同获取方法。该方法仅依靠安装在配电变电站中的频率测量装置, 借助相邻可控负荷/配电变电站之间有限的频率信息交互和通信, 实现了所有可控负荷频率信号的准确、鲁棒和一致获取, 同时具有滤除高频噪声, 减少频率测量投资成本的性能。通过理论分析, 验证了在通信传输无时滞和带时滞两种情形下配电系统频率协同获取方法的收敛性和鲁棒性。最后, 通过 Simulink 仿真验证了所提出方法的有效性和可行性。

关键词: 可控负荷; 有限通信; 一致性滤波; 协同获取; 配电系统频率

Collaborative acquisition method of distribution system frequency via limited communication

YANG Hong-ming¹, LIU Bao-ping², YI De-xin³, YANG Hong-zhao⁴, WU Jun-ming¹

(1. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China; 2. Lishui Power Supply Company of State Grid, Lishui 323000, China; 3. Jinjiang Electric Power Co., Ltd., Jinjiang 362200, China; 4. Hunan Zhongtian Engineering Supervision Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: In order to achieve the application of a large number of distributed controllable loads with small capacity to system frequency regulation, the acquisition of distribution system frequency for all controllable loads is a prerequisite and basis. A collaborative acquisition method of distribution system frequency based on consensus filtering is proposed, where only frequency-measuring devices at distribution substations are utilized. Limited communication between neighboring controllable loads/distribution substations can facilitate consistent, robust and accurate acquisition for system frequency signal for all controllable loads. Also this method can eliminate noise and reduce device costs. Convergence and robustness of collaborative acquisition method are proved by the theoretical analysis under the two situations with and without communication time delays. Simulation results based on Simulink demonstrate both effectiveness and feasibility of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71331001 and No. 71071025).

Key words: controllable loads; limited communication; consensus filtering; collaborative acquisition; distribution system frequency

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)06-0069-08

0 引言

随着经济发展与能源供给、环境污染之间矛盾的日益激化, 节能降耗, 减少对化石燃料的依赖, 已成为我国经济持续发展迫切需要解决的问题。风能和太阳能等可再生能源的高效利用, 是解决能源和环境问题的重要手段。然而, 可再生能源的随机性将导致大量风力发电和光伏发电接入电网后的频

率波动^[1]、电压波动^[2]、电压闪变^[3]等一系列问题。为此, 有效利用配电系统中数目庞大、地域分散的小容量可控负荷参与电力系统的调频^[4]、备用^[5]等辅助服务具有潜在的重要价值。

配电系统包含着大量的可控负荷, 如电动汽车、智能空调、冰箱和电热水器等。电动汽车一方面, 在充电状态下可以作为负荷使用电能; 另一方面, 它可以作为储能装置向电网反馈电能^[6-7]。据统计, 当电动汽车在世界各国普及后, 按照现有汽车保有量的 1/4 具有 V2G 功能, 并且 1/2 的电动汽车接入

基金项目: 国家自然科学基金(71331001, 71071025)

插座进行放电, 美国电动汽车总的放电功率高达 2 865 GW, 约为全国总负荷水平的 6.8 倍; 在德国、英国、意大利等国家, 电动汽车的放电功率甚至超过了全国总负荷水平的 10 倍^[8]。如此巨大的潜力显示出电动汽车作为储能设备参与电网频率调节的重要前景。智能空调、冰箱、电热水器等由于自身的热惯性, 在不影响用户正常使用的前提下允许临时减少或增加用电功率。在美国, 智能热水器、空调等可控负荷产生总负荷 20% 的功率来参与系统的调频^[9]; 在日本, 热水器总的功率消耗为 10 GW^[10], 同样存在参与电网频率调节的巨大潜力。目前, 利用可控负荷, 丹麦和日本北海道电力系统已实现了调频控制^[11-12]。

在配电系统中, 由于可控负荷数量庞大, 一般不采用由控制中心测量频率, 再统一发给每个可控负荷的集中式获取方法^[13-14]。主要原因在于: 现有配电系统控制中心与可控负荷的数据通信系统薄弱。这种控制方式需要控制中心和每个可控负荷之间都存在通信通道, 即全局通信, 这将造成通信带宽和性能的高要求, 从而导致巨大的投资成本。此外, 如果控制中心的测量装置发生故障, 则所有的可控负荷均会丢失频率信号, 从而无法参与系统的调频。为此, 当前智能配电系统中可控负荷参与系统调频, 主要采用分散式控制方法, 即根据每个可控负荷的频率特性和由各自配备的频率测量装置所获取的频率信号(即分散式频率获取)来实现可控负荷的功率控制, 从而实现系统的频率恢复^[11]。在分散式频率获取中, 由于频率测量存在误差和噪声, 每个频率测量装置所获取的频率信号各不相同, 这将影响可控负荷参与电网调频的控制效果。同时, 当频率测量装置故障时, 可控负荷将丢失频率信号, 导致其无法参与电网的调频。这种在数以万计的可控负荷上安装频率测量装置的分散式频率获取方式将造成巨大的设备投资成本, 从而失去可控负荷参与电网调频的现实意义, 不具可操作性。

目前, 频率测量装置一般借助过零检测法, 通过测量频率信号波形相继过零点的时间宽度来计算频率^[15]。为了提高频率测量精度, 采用最小二乘法来拟合频率曲线^[16-17]; 采用卡尔曼滤波法滤除频率信号的噪声^[18]; 为了进一步减少频率信号的暂态过程对测量精度的影响以及缩短频率测量的响应时间, 提出了自适应陷波法^[19-20]; 为了避免波形畸变所带来的影响, 提出了基于离散傅里叶变换的测频法^[21-24]等来跟踪电力系统的瞬时频率; 考虑噪声的影响, 提出了自适应跟踪算法来反映系统频率的动态特性^[25-27]。现有研究主要针对分散式频率获取方

法, 以提高频率测量装置的测量精度为目的, 而缺乏一种仅仅依靠安装少量的频率测量装置, 借助智能电网公用的通信平台来实现大量可控负荷频率信号准确获取的方法。

因而, 需要建立一种准确, 可靠和实用的配电系统频率获取方法, 以实现大量分散的可控负荷的频率获取, 从而为可控负荷参与调频提供重要的基础。为此, 本文提出了基于一致性滤波的配电系统频率协同获取方法。它仅仅依靠安装在配电变电站中的频率测量装置, 借助智能电网公用的通信平台, 通过相邻可控负荷/配电变电站之间有限的频率信息交互来实现大量可控负荷频率信号的一致、准确、鲁棒获取, 同时达到滤除噪声, 减少频率测量和通信投资成本的目的。

1 不考虑通信时滞的配电系统频率协同获取方法

近年来, 一致性问题(Consensus problem)已成为网络控制系统(Networked control system)中合作理论的重要基础。R. Olfati 等人提出了基于数据融合的一致性滤波方法, 以实现传感器网络中所有节点自动跟踪到传感器所有测量信号的平均值^[28-29]。为了克服分散式频率获取方法的缺点, 借助一致性滤波, 提出了配电系统频率协同获取方法, 即通过相邻可控负荷/配电变电站之间信息的有限通信, 融合它们各自对系统频率的估计信息, 从而对系统频率估计达成一致, 协同实现所有可控负荷/配电变电站(节点)准确、一致、鲁棒地获取系统频率。

含有配电变电站和可控负荷(电动汽车、智能空调和电热水器)的配电系统如图 1 所示。频率测量装置仅安装在配电变电站中, 每个可控负荷上不安装各自的频率测量装置。假设配电变电站中频率信号的测量值为

$$u_i(t) = \omega(t) + \sigma_i(t) d\xi_i/dt \quad (i=1, \dots, l) \quad (1)$$

式中: ω 为系统频率; u_i 为配电变电站的频率测量值; l 为配电变电站的数目; ξ_i 为一个独立的布朗运动; $d\xi_i$ 为方差为 1 的高频白噪声; σ_i 为噪声强度, 并令 $\beta = \max\{\sigma_i^2\}$ 代表噪声方差的上界。

配电系统中配电变电站和可控负荷之间的通信借助先进、专用的智能电网通信平台来实现。美国、澳大利亚、加拿大、中国、韩国和欧共体等国家均已开始建立智能电网所需的通信基础设施。作为继 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA 之后的第四个全球 3G 标准, WiMAX 技术具有传输速度快(75 Mbps)、覆盖范围广(10~50 km)、兼容性强等优点,

完全满足相邻可控负荷和配电变电站之间的有限通信要求^[30]。美国公用事业公司和澳大利亚配电公司都正在建设基于 WiMAX 技术的专用无线通信网络。我国北京、上海、武汉等六座城市已采用 WiMAX 技术, 实现无线通信网络建设。基于 WiMAX 技术的智能配电通信系统已进入试点阶段, 有望成为“十二五”期间智能电网建设的核心通信技术之一^[31]。

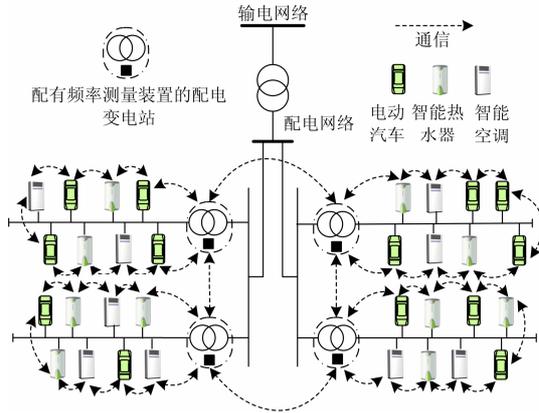


图1 含有变电站和可控负荷的配电系统
Fig. 1 Distribution system with substations and controllable loads

假设 $G=(V, E)$ 代表一个带有非负邻接矩阵的图, $A=\{a_{ij}\}$ 表征通信网络的连接拓扑。如果节点 i 和节点 j 之间存在通信链路, 则 $a_{ij}=a_{ji}=1$ ($i \neq j$); 反之, $a_{ij}=a_{ji}=0$ 。 $V=\{1, \dots, N\}$ 表示通信网络的节点集合, 其中 $i=1, \dots, l$ 表示配有频率测量装置的配电变电站, $i=l+1, \dots, N$ 表示可控负荷节点。 $V_i=\{j \in V: a_{ij}=1\}$ 表示与节点 i 存在通信链路的相邻节点集合。

为了融合配电变电站的频率测量值 u_i , 以及实现所有可控负荷的频率获取, 提出了基于一致性滤波的频率协同获取方法。该方法通过相邻节点之间通信和交互频率测量信号和频率估计信号, 实现所有节点获取准确、一致、鲁棒地跟踪系统频率。一般来说, 当借助专用无线通信网络进行信息传输时, 可以不考虑通信时滞的影响。因此, 在不考虑通信时滞的情况下, 配电系统频率协同获取方法的动态方程为

$$\dot{x}_i(t) = \frac{1}{T_x} \left[\sum_{j \in V_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) + \sum_{j \in V_i} a_{ij} k_j (u_j(t) - x_i(t)) + k_i (u_i(t) - x_i(t)) \right] \quad (i=1, \dots, N) \quad (2)$$

公式(2)给出了不同节点对系统频率估计达成一致的数学表述, 它通过采用自身测量值的本地状态估计偏差((2)中的第三项), 并综合相邻估计值和

测量值的局部状态估计偏差(分别对应(2)中的第一项和第二项), 来修正各自的频率估计值。式中: x_i 为节点 i 的频率估计值; u_j 为节点 j 的频率测量值; k_j 表示频率测量信号的反馈增益; 对于装有频率测量装置的配电变电站而言, $k_j=1$ ($j=1, \dots, l$), 这表示在频率估计中考虑了频率测量值的影响; 对未装有频率测量装置的可控负荷而言, $u_j=0, k_j=0$ ($j=l+1, \dots, N$); T_x 为频率协同获取系统的时间常数, 表征了系统对于频率测量和估计信号的响应时间, 它主要包括信号发射、传输和接收的时间。根据 California ISO 开展的电动汽车示范项目, 在没有通信时滞的情况下时间常数一般为几十或几百毫秒^[32]。

为了便于分析, 将式(2)写成如下的矩阵向量形式

$$\dot{\mathbf{x}} = -\frac{1}{T_x} (\Xi + \Lambda + K) \mathbf{x} + \frac{1}{T_x} (A + I_N) \mathbf{K} \mathbf{u} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_N)^T$, $\mathbf{u}=(u_1, \dots, u_N)^T$; I_N 为 $N \times N$ 阶的单位矩阵; Ξ 为图 G 的 Laplacian 矩阵的连接度, 即

$$d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad \text{for } i=1, \dots, N$$

令 $\mathbf{Q} = \frac{1}{T_x} (\Xi + \Lambda + K)$, 其中: $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, \dots, k_N)$ 和 $\Lambda = \text{diag}(AK\mathbf{1}_N) = \text{diag}(\Lambda_{11}, \dots, \Lambda_{NN})$ 表示测量节点的连接度; $\mathbf{1}_N$ 为 $N \times 1$ 阶的单位向量; $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ 为矩阵 \mathbf{Q} 按非递减顺序排列的特征值。

根据盖氏定理(Gerschgorin theorem)^[33], 对于强连通通信网络(即网络中的任意两个节点之间至少存在一条路径相连), \mathbf{Q} 是正定矩阵, 并且所有的特征值落在有界的范围内, 即

$$\frac{1}{T_x} \min\{\Lambda_{ii} + k_i\} < \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_N \leq \frac{1}{T_x} \max\{2d_i + \Lambda_{ii} + k_i\} \quad (4)$$

式(4)表明, \mathbf{Q} 的特征值与测量节点的连接度 Λ_{ii} 、通信网络的连接度 d_i 成正比, 与时间常数 T_x 成反比。

定义误差向量 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \omega \mathbf{1}_N$, 式(3)的动态形式变为

$$\mathbf{de} = -\mathbf{Qed}t + \frac{1}{T_x} (\Lambda + K) \sigma d \xi \quad (5)$$

定义Lyapunov函数 $V = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{e}$, 根据伊藤公式(Ito

formula)^[34], 可以推得

$$\begin{aligned}
\ell V &= -\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + \frac{1}{2T_x^2} (\Lambda + K) \sigma (\Lambda + K) \sigma \mathbf{1}_N \leq \\
& -\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + \frac{\beta}{2T_x^2} \mathbf{1}_N^T (\Lambda + K) (\Lambda + K) \mathbf{1}_N \leq \\
& -\lambda_1 \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \frac{\beta}{2T_x^2} \mathbf{1}_N^T (\Lambda + K) (\Lambda + K) \mathbf{1}_N \leq \\
& -\lambda_1 \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \frac{\beta l}{2T_x^2} \left[\max \{ \Lambda_{ii} + 1 \} \right]^2 = \\
& -\lambda_1 \left\{ \mathbf{e}^T \mathbf{e} - \frac{\beta l}{2T_x^2 \lambda_1} \left[\max \{ \Lambda_{ii} + 1 \} \right]^2 \right\}
\end{aligned} \quad (6)$$

其中: ℓ 表示微分算子; $\|\cdot\|$ 表示 2 范数。

当 $\varepsilon = \|\mathbf{e}\| \geq \frac{1}{T_x} \sqrt{\frac{\beta l}{2\lambda_1}} \max \{ \Lambda_{ii} + 1 \}$, 则有 $\ell V < 0$ 。

因而, 对于中心为 $x = \omega$, 半径为 ε 的闭球域外的任何一个点 $x \in R^N$, 它是全局渐进稳定的^[33]。

基于上述理论证明, 可以得出频率协同获取动态方程(3)是 ε 全局渐进稳定的, 即所有节点都一致收敛到中心为 $x = \omega$ 的闭球域, 其半径为

$$\varepsilon = \frac{1}{T_x} \sqrt{\frac{\beta l}{2\lambda_1}} \max \{ \Lambda_{ii} + 1 \} \quad (7)$$

当忽略测量信号中的噪声, 即 $\beta = 0$ 时, 可以得出 $\varepsilon = 0$ 。在此情况下, 所在通信网络拓扑中的所有节点都一致收敛到 $\omega(t)$, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = \omega(t) \quad (8)$$

当频率测量信号中存在噪声时, 所在通信网络拓扑中的所有节点将趋于 $\omega(t)$ 的小球域范围内, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i(t) - \omega(t))^2} \leq \varepsilon = \frac{1}{T_x} \sqrt{\frac{\beta l}{2\lambda_1}} \max \{ \Lambda_{ii} + 1 \} \quad (9)$$

由式(9)可知, 当测量信号存在噪声时, 频率信号的估计误差与噪声强度、频率测量装置数目和测量节点的连接度成正比, 与频率获取的时间常数成反比。

考虑测量噪声对配电系统频率协同获取的影响, 式(3)的传递函数为

$$F(s) = \frac{(A + I_N)K}{T_x(sI_n + Q)} \quad (10)$$

根据式(10)可知 $\lim_{s \rightarrow \infty} F(s) = 0$, 这显示出频率获取方法可以滤除高频噪声。图 2 给出第三节数值仿真中 250 个可控负荷组成的频率协同获取系统的波特图。

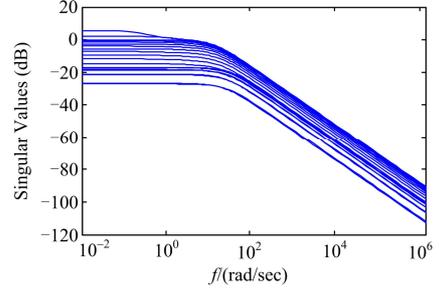


图 2 频率协同获取系统的波特图

Fig. 2 Bode diagram for the frequency acquisition system

2 考虑通信时滞的配电系统频率协同获取方法

当专用的通信平台未建成之前, 智能电网会借助现有的商业通信网络来实现设备之间的通信。此时, 可控负荷和配电变电站之间的频率信号传输会存在通信时滞的问题^[35]。为此, 在考虑通信时滞的情况下, 配电系统频率协同获取的动态方程为

$$\begin{aligned}
\dot{x}(t) &= -\frac{1}{T_x} (\Xi + \Lambda + K)x(t - \tau) + \\
& \frac{1}{T_x} (A + I_N)Ku(t - \tau)
\end{aligned} \quad (11)$$

式中, τ 为平均通信延迟时间。

式(11)转化为

$$\dot{x}(t) = -\mathbf{Q}x(t - \tau) + \mathbf{r} \quad (12)$$

式中: \mathbf{r} 为一个恒定的输入向量。经过 Laplace 变换, 式(12)为

$$X(s) = \frac{sx(0) + \mathbf{r}}{s(sI_N + \mathbf{Q}e^{-\tau s})} \quad (13)$$

如果 $\tau \in (0, \pi/2\lambda_N)$, 则 $X(s)$ 所有的极点均在左半平面或者 $s = 0$, 它是全局渐进稳定的^[36]。

对称矩阵 \mathbf{Q} 的特征值可分解为

$$\mathbf{Q} = \mathbf{U} \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N) \mathbf{U}^T \quad (14)$$

式中, \mathbf{U} 为正交矩阵。由此, 可以得出

$$\begin{aligned}
\mathbf{X}(s) &\approx \mathbf{U} \text{diag} \left(\frac{1}{s + \lambda_i e^{-\tau s}} \right) \mathbf{U}^T x(0) + \\
& \mathbf{U} \text{diag} \left(\frac{1}{s(s + \lambda_i e^{-\tau s})} \right) \mathbf{U}^T \mathbf{r}
\end{aligned} \quad (15)$$

通过 Laplace 逆变换, 可以推得

$$\begin{aligned} \|x(t) - x(\infty)\| &\leq \left\| L^{-1} \left\{ \text{diag} \left(\frac{1}{s + \lambda_i e^{-\tau s}} \right) \right\} \right\| \\ &\|x(0) + U \text{diag}(\mathcal{G}_2^i(\lambda_i, \tau)) U^T r\| \leq \\ &C(\lambda_1, \dots, \lambda_N, \tau) e^{\max\{\text{Re}(s)\}t} \|x(0) + U \text{diag}(\mathcal{G}_2^i(\lambda_i, \tau)) U^T r\| \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $x(\infty) = Q^{-1}r$; $\text{Re}(s)$ 为 $s + \lambda_i e^{-\tau s} = 0$ ($i=1, \dots, N$) 根的最大值; $\mathcal{G}_2^i(\lambda_i, \tau)$ 为 λ_i, τ 的函数; $C(\cdot)$ 为 $\lambda_1, \dots, \lambda_N, \tau$ 的函数。当 $\tau=0$ 时, 可以推得

$$\|x(t) - x(\infty)\| \leq e^{-\lambda_1 t} \|x(0) - Q^{-1}r\| \quad (17)$$

基于上述的理论证明, 如果 $\tau \in (0, \pi/2\lambda_N)$, 则动态方程(11)是全局渐进稳定的。并且, 随着通信网络连接度的降低和时间常数的不断增加, 所允许的通信时滞越大。频率协同获取系统全局指数收敛, 其收敛率与 $s + \lambda_i e^{-\tau s} = 0$ ($i=1, \dots, N$) 根的最大值成正比。当不存在通信时滞, 即 $\tau=0$ 时, 频率协同获取系统全局指数收敛, 其收敛速度率为 $-\lambda_1$ 。

从上面的分析可以看出, 频率协同获取系统的性能受到通信网络结构和频率测量装置数目的影响。一方面, 频率协同获取系统的收敛速度与测量节点、通信网络的连接度成正比, 与系统的时间常数成反比。另一方面, 较高的连接度和较小的时间常数会导致频率协同获取系统无法容忍较长的通信时滞和无法有效抑制测量噪声。因此, 在实际的频率协同获取系统设计时, 需要权衡系统通信时滞和测量噪声的鲁棒性, 获取速度和投资成本之间的关系。根据实际频率协同获取的情况, 合理安排频率测量设备的数目和位置, 以及通信网络结构。

3 数值仿真

假设在某一配电系统中有 250 个可控负荷参与系统的调频控制, 四个强连通的通信网络结构如图 3 所示, 其中配电变电站上安装的频率测量装置数目分别为 $l=5, 10, 15, 25$ 。

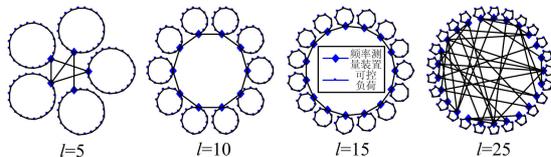


图 3 频率协同获取系统的通信网络结构

Fig. 3 Structure of collaborative frequency acquisition system

这里考虑了两种类型的通信方式, 一种是无通信时滞的 75 Mbps WiMAX 专用无线网络; 另一种是带有通信时滞的 1.5 Mbps 商用无线网络

网络。根据美国无线商用宽带服务的评估报告, 无线宽带为 1.5 Mbps 的 AT&T 无线通信网络的单向音频数据传输延迟时间小于 50 ms^[37]。

配电系统的频率曲线由参考文献[38]中的系统频率动态模型仿真获得, 为系统在阶跃响应作用下的频率曲线。为了更好地体现本文的数值仿真结果, 所需修改的数据为: 系统的角动量 $M=6$; 高压涡轮产生的涡轮功率系数 $F_{RH}=10$; 负载的功率变化量 $\Delta P_L=0.06 \text{ pu}$ 。

3.1 无频率测量噪声的情形

当配电变电站中的频率测量信号没有噪声时, 针对四种通信网络结构 $l=5, 10, 15, 25$, 图 4(a)~图 4(d)分别给出了频率协同获取系统的动态频率曲线。由于文章的版面限制, 仅给出随机选取的四个可控负荷的频率获取曲线, 其他可控负荷的频率获取曲线与之类似。在 $l=5, 10, 15, 25$ 四种通信网络结构下, 可控负荷的频率获取曲线最终都能跟踪到系统的频率。四种通信网络结构下频率协同获取系统的性能情况如表 1 所示, 其中频率一致跟踪时间为可控负荷所获取的频率与系统频率的相对偏差小于 0.01%所需的时间; 允许的通信时滞是频率协同获取系统在该通信时滞下可控负荷所获取的频率仍然可以跟踪到系统频率, 最终两者的相对偏差小于 0.01%。

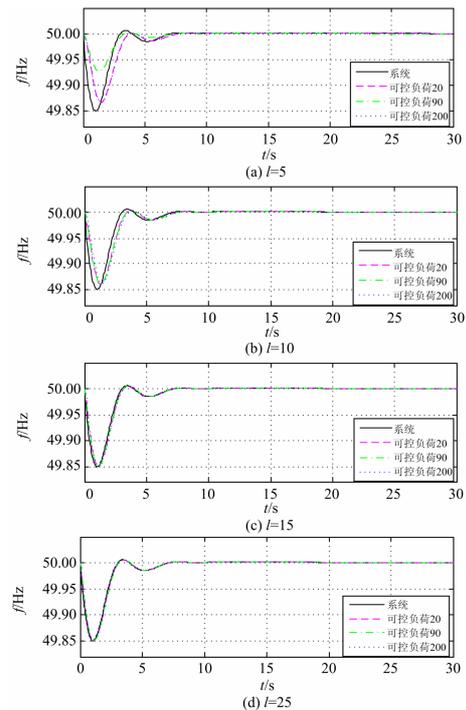


图 4 无测量噪声频率获取曲线

Fig. 4 Dynamic system frequency under collaborative acquisition without measurement noise

表 1 无测量噪声时不同通信结构下系统性能比较

Table 1 Performance comparison of different structures without measurement noise

模式	l	频率的一致跟踪	
		时间/s	允许的通信时滞/s
频率协同获取	5	12.90	0.211
	10	9.65	0.203
	15	3.21	0.202
	25	1.95	0.129

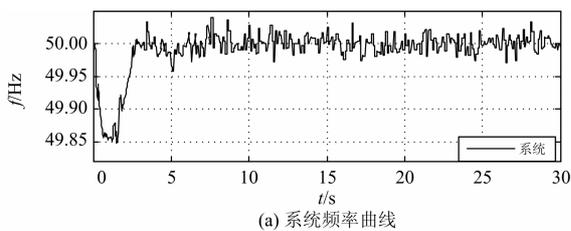
3.2 考虑频率测量噪声的情形

当配电变电站中实际测量的频率信号存在噪声时, $l=5, 10, 15, 25$ 四种通信网络结构下频率协同获取系统的动态频率性能比较如表 2 所示, 其中频率测量信号的噪声为强度 $\sigma_i = 0.05$ 的白噪声; 频率获取的噪声强度定义为所获取的频率信号噪声序列的标准差。图 5(a)、5(b)给出了系统频率和 $l=15$ 时可控负荷所获取的频率曲线。

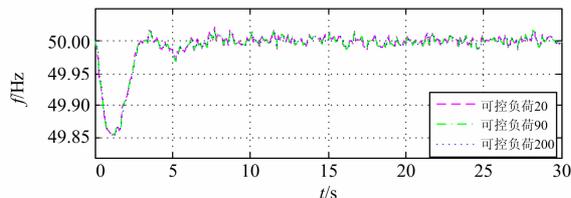
表 2 带测量噪声时不同通信结构下系统性能比较

Table 2 Performance comparison of different structures with measurement noise

模式	l	频率获取的噪声	
		强度	允许的通信时滞/s
频率协同获取	5	0.007 6	0.211
	10	0.005 4	0.203
	15	0.004 5	0.202
	25	0.008 1	0.129
分散式频率获取	250	0.05	-



(a) 系统频率曲线



(b) 可控负荷获取的频率曲线

图 5 带测量噪声时配电系统频率获取曲线

Fig. 5 Dynamic system frequency under collaborative acquisition with measurement noise

由图 5 可知, 虽然存在测量噪声, 所有可控负荷均可在小幅波动范围内跟踪到系统频率。由表 1、

表 2 可以看出, 与分散式频率获取相比, 当频率协同获取采用 $l=15$ 的通信网络时, 噪声抑制能力(即频率获取的噪声强度)提高了 91%。另外, 频率协同获取方法所需的硬件设备主要由无线通信模块和数字信号处理器(DSP: Digital Signal Processor)组成, 而分散式频率获取方法所需的硬件设备主要由电压/电流传感器和数字信号处理器组成。由于电压/电流传感器价格较高, 一般是无线通信模块的 10 倍左右, 是数字信号处理器的 3 倍左右。因此, 频率协同获取方法的设备投资成本比分散式频率获取方法降低 70%左右。

无论是规则网络(如 $l=10, 15$)还是不规则网络(如 $l=5, 25$), 只要通信网络强连通, 所有可控负荷都可以一致性跟踪系统频率信号。通过增加频率测量装置和通信网络的连接度, 频率的一致跟踪时间减少, 但是, 频率测量噪声的抑制能力(即频率获取的噪声强度)和鲁棒性(即允许的通信时滞)将降低。根据表 1 和表 2 中四种通信结构性能指标比较可以看出, 通信结构 $l=15$ 的频率协同获取系统的整体性能相对较好。

在实际的频率协同获取系统架构中, 配电系统调度员将确定频率测量设备的数目和通信网络结构, 从而实现设备投资成本、获取速度、噪声抑制和鲁棒性四个方面的综合优化。当设计通信网络时, 拓扑结构(即规则或不规则拓扑)根据配电变电站和可控负荷的地理位置, 考虑频率系统获取的整体性能来决定。

4 结论

本文针对数目庞大、地域分散的小容量可控负荷参与电网频率调节的频率信号获取, 提出了一种基于一致性滤波的频率协同获取方法。该方法仅依靠在配电变电站中安装的频率测量装置, 借助通信网络, 通过相邻可控负荷/配电变电站之间有限的频率信息交互和通信, 来实现所有的可控负荷频率信号一致、准确、鲁棒获取。与分散式频率获取相比, 所提出的频率协同获取方法能够很好地抑制测量噪声, 提高系统的鲁棒性能, 以及大幅降低频率测量投资成本。

参考文献

[1] BEVRANI H, GHOSH A, LEDWICH G. Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 438-457.

[2] BOULAXIS N G, PAPATHAMTSSIOU S A, PAPANOULOS M P. Wind turbine effect on the voltage profile

- of distribution networks[J]. *Renewable Energy*, 2002, 25(3): 401-415.
- [3] THINNGER T, PETRU T, LUNDBERG S. Flicker contribution from wind turbine installations[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2004, 19(1): 157-163.
- [4] LAWRENCE E O, HEFFNER G, GOLDMAN C, et al. Loads providing ancillary services: review of international experience[R]. US: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.
- [5] LEE F N, BREIPOHL A M. Operational cost savings of direct load control[J]. *IEEE Trans on PAS*, 1984, 103(5): 988-993.
- [6] KEMPTON W, LETENDRE S. Electric vehicles as a new power source for electric utilities[J]. *Transportation Research (Part D)*, 1997, 2(3): 157-175.
- [7] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(2): 121-127.
- LIU Xiao-fei, ZHANG Qian-fan, CUI Shu-mei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(2): 121-127.
- [8] KEMPTON W, DHANJU A. Electric vehicles with V2G: storage for large-scale wind power[J]. *Windtech International*, 2006, 2(5): 18-21.
- [9] PRATT R. Transforming the US electricity system[C] // *IEEE Power Systems Conference and Exposition*, New York, US, 2004.
- [10] KONDOH J, ISHII I, MURATA A, et al. Availability of thermal load adjustment for load frequency control[C] // *Eleventh Annual Conference of Power & Energy Society*, Japan, 2000.
- [11] KONDOH J. Autonomous frequency regulation by controllable loads to increase acceptable wind power generation[J]. *Wind Energy*, 2010, 13(6): 529-541.
- [12] PILLAI J R, BAK-JENSEN B. Integration of vehicle-to-grid in the Western Danish power system[J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 2011, 2(1):12-19.
- [13] OTA Y, TANIGUECHI H, NAKAJIMA T, et al. An autonomous distributed vehicle-to-grid control of grid-connected electric vehicle[C] // *International Conference on Industrial and Information Systems*, Tokyo, Japan, 2009.
- [14] OTA Y, TANIGUCI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging[J]. *IEEE Trans on Smart Grid*, 2012, 3(1): 559-564.
- [15] VAINIO O, OVASKA S. Digital filtering for robust 50/60 Hz zero-crossing detectors[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(2): 426-430.
- [16] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 基于权函数的电力系统状态估计算法[J]. *电力系统自动化*, 1999, 23(8): 32-34.
- LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, GU Jin-wen, et al. Weight function based power system state estimation algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(8): 32-34.
- [17] 曹健, 林涛, 徐遐龄, 等. 基于最小二乘法和时频原子变换的谐波/间谐波测量算法[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(10): 1-7.
- CAO Jian, LIN Tao, XU Xia-ling, et al. Monitoring of power system harmonic/inter-harmonics based on least squares algorithm and time frequency transform[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(10): 1-7.
- [18] AGHAZADEH R, LESANI H, SANAYE-PASAND M, et al. New technique for frequency and amplitude estimation of power system signals[J]. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 2005, 152(3): 435-440.
- [19] MOJIRI M, KARIMI-GHARTEMANI M, BAKHSHAI A. Estimation of power system frequency using an adaptive notch filter[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(6): 2470-2477.
- [20] 张世平, 赵永平, 张绍卿, 等. 一种基于自适应陷波器的电网频率测量新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(7): 81-83.
- ZHANG Shi-ping, ZHAO Yong-ping, ZHANG Shao-qing, et al. A novel approach to measurement of power system frequency using adaptive notch filter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(7): 81-83.
- [21] 王拔群, 周孟然. 一种基于傅式变换算法的系统频率变化求取方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(23): 54-57.
- WANG Ba-qun, ZHOU Meng-ran. An algorithm for striking method of system frequency changes based on Fourier transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(23): 54-57.
- [22] 朱捷, 张君, 秦虹, 等. 一种基于实时数据误差补偿的傅里叶测频算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(22): 44-48.
- ZHU Jie, ZHANG Jun, QIN Hong, et al. An algorithm for striking method of system frequency changes based

- on Fourier transform[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 44-48.
- [23] 叶芳, 焦彦君, 周丹, 等. 一种基于傅里叶算法的高精度测频算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 44-48.
YE Fang, JIAO Yan-jun, ZHOU Dan, et al. A high-accuracy algorithm of frequency measurement based on Fourier algorithm data model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 44-48.
- [24] 徐岩, 张晓明, 王瑜, 等. 基于离散傅里叶变换的频谱分析新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 38-43.
XU Yan, ZHANG Xiao-ming, WANG Yu, et al. A new method of spectrum analysis based on DFT[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 38-43.
- [25] 麦瑞坤, 何正友, 何文, 等. 电力系统频率的自适应跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 73-78.
MAI Rui-kun, HE Zheng-you, HE Wen, et al. Adaptive frequency tracking algorithm for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 73-78.
- [26] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.
ZHANG Heng-xu, LI Chang-gang, LIU Yu-tian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [27] 刘亚栋, 杨洪耕, 马超, 等. 一种频率信号的自适应测量法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 263-270.
LIU Ya-dong, YANG Hong-geng, MA Chao, et al. An adaptive measuring method for frequency signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 263-270.
- [28] OLFAIT-SABER R, SHAMMA J S. Consensus filters for sensor networks and distributed sensor fusion[C] // 44th IEEE Conference on Decision and Control/European Control Conference, Spain, 2005.
- [29] YU Wen-wu, CHEN Guan-rong, WANG Zi-dong, et al. Distributed consensus filtering in sensor networks[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 2009, 39(6): 1568-1577.
- [30] GUNGOR V C, SAHIN D, KOCAK T, et al. Smart grid technologies: communication technologies and standards[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2011, 7(4): 529-539.
- [31] 李廷华, 黄铭, 施继红, 等. 基于 WiMax 的城市配网通信方案及其集抄应用[J]. 电力系统通信, 2010, 31(214): 58-60.
LI Ting-hua, HUANG Ming, SHI Ji-hong, et al. Communication scheme for urban power distribution network and its application on meter reading based on WiMax[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(214): 58-60.
- [32] BROOKS A N. Vehicle-to-grid demonstration project: grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle[R]. California: California ISO, 2002.
- [33] VARGA R S. Gersgorin and his circles[M]. New York: Springer, 2004: 48-132.
- [34] FRIEDMAN A. Stochastic differential equations and applications[M]. New York: Academic Press, 1975: 75-148.
- [35] RUA D, MOURA PEREIRA L F, GIL N, et al. Impact of multi-microgrid communication systems in islanded operation[C] // 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), Manchester, UK, 2011.
- [36] OLFAIT-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [37] HAMILTON B A. Route diversity project (RDP): AT&T wireless broadband service evaluation results report[R]. Atlanta: National Communications System, 2007.
- [38] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 581-600.

收稿日期: 2013-06-11; 修回日期: 2013-09-09

作者简介:

杨洪明(1972-), 女, 博士, 教授, 从事电力系统运行与控制研究; E-mail: yhm5218@163.com

刘保平(1987-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制研究;

易德鑫(1987-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制研究。