

考虑通信时滞和噪声的 LED 灯参与微电网调频的研究

吴俊明, 杨洪明, 杨鑫, 罗捷, 张俊

(智能电网运行与控制湖南省重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114)

摘要: 由于可再生能源的随机性和间歇性特点, 大量可再生能源接入分布式发电系统造成微电网发电与用电功率之间的不平衡。借助 LED(Light-Emitting Diode)灯功率调节速度快、潜在容量大的特点, 研究了大量 LED 灯参与微电网调频的问题。为了确保大量 LED 灯准确获取微电网控制信号, 在带时滞和噪声的不可靠局部通信条件下, 提出了分布式信号获取方法。仅通过安装在配电变电站的信号测量装置, 借助相邻对象之间的局部通信和交互, 实现所有 LED 灯对系统信号一致性、精确获取。进一步考虑光通量和用电功率之间的非线性关系, 设计了 LED 灯用电功率随微电网频率变化的动态模型, 并耦合分布式信号获取动态方程, 提出了考虑 LED 灯的多区域微电网频率控制方法。仿真结果表明: LED 灯参与微电网调频后, 明显降低了频率波动范围, 提高了频率恢复速度。

关键词: LED 灯; 分布式信号获取; 局部通信; 调频

A survey on LED lamps participating in frequency regulation of microgrid considering communication delay and noise

WU Junming, YANG Hongming, YANG Xin, LUO Jie, ZHANG Jun

(Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China)

Abstract: Due to the randomness and intermittent characteristics of renewable energy, a lot of renewable energy generation plugs into the microgrid and creates the imbalance between generation and load. Based on the advantages of huge potential capacity and fast power adjustment, this paper investigates frequency regulation of microgrid for application of a large number of light-emitting diode (LED) lamps. In order to acquire the signal accurately, a distributed signal acquisition approach is proposed based on unreliable communication with communication delay and noise. Signal measuring devices are performed only at distribution substations, and local communication between neighbors can facilitate consistent and accurate acquisition of signals for all LED lamps. Taking into consideration of the non-linear relationship between flux and power, a dynamic model of power adjusting with frequency is designed. Integrated with distributed acquisition approach, a multi-regional microgrid frequency control method is further proposed with consideration of LED lamps. Simulation results demonstrate that LED lamps participating in frequency significantly reduces the frequency fluctuation and increases the speed of recovery.

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

Key words: LED lamp; distributed signal acquisition; local communication; frequency regulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0049-09

0 引言

微电网频率反映了发电功率与用电功率之间的瞬间平衡。随着大量随机、间歇风能、太阳能等可再生能源的接入, 微电网有功发电功率出现频繁波动^[1-4], 造成频率控制困难。长期以来, 微电网通过

调节发电机组的汽门(或导水叶)开度^[5]改变蒸汽压力, 依靠自动调速系统调整发电机组有功出力, 从而实现微电网频率的恢复和控制。这种控制受机械惯性的影响, 机组出力响应具有较长的延时, 一般处于 10~80 s^[6]。显然, 传统发电机组参与的频率控制无法迅速响应不断变化的风能和太阳能所造成的微电网频率波动。

随着智能电网技术的发展, 借助先进测量设施

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71331001)

(Advanced Metering Infrastructure, AMI), 用电设备如电动汽车、空调、热水器等, 由传统被动的不可控负荷逐渐变成可控负荷^[7-9], 考虑电动汽车、空调、热水器等可控负荷参与的微电网频率控制受到了关注。为了利用可控负荷补偿可再生能源接入下微电网发电功率和用电功率之间的瞬时不平衡, 文献[10-11]研究了电动汽车参与调频的负荷频率控制。这些研究直接聚合可控负荷而忽略了对单个可控负荷的控制。为了实现对单个可控负荷的控制, 一般不采用集中式控制方法, 由控制中心统一发送控制信号给所有可控负荷^[12-13], 而是主要采用分散式控制方法获取信号, 即每个可控负荷配备信号测量装置, 以测量到的信号为控制信号, 利用可控负荷自身频率特性调节用电功率, 从而实现频率的恢复^[14]。然而, 因每个可控负荷均需安装信号测量装置, 使用这种控制方法会产生巨大的设备投资成本, 从而失去经济上的可行性; 由于测量存在噪声和误差, 每个可控负荷获取的信号也会各不相同, 影响调频效果; 由于采用全局通信方式, 当测量设备发生故障时, 测量信号丢失, 从而导致调频故障。为此, 作者在文献[15]中研究了通过相邻对象之间局部通信, 实现所有可控负荷对信号的一致性、鲁棒获取。但该文仅考虑了通信噪声, 没有考虑通信时滞对信号获取的影响。

当前, 照明用电量占全球总用电量的 20%^[16], 据美国能源信息局估计, 美国 2011 年照明用电量达 461 亿 kWh^[17]。LED 灯由于比白炽灯、荧光灯、金属卤化灯等照明设备具有更高的发光光效和使用寿命, 成为未来照明系统的重要设备, 具有巨大的潜在负荷容量。现有的 LED 灯一般采用脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 控制技术, 通过调节开关器件的占空比来改变 LED 灯的用电功率, 并根据光、电、热三者的特性实现调光和节能^[18-19]。由于开关器件的开断周期处于微秒级^[20], LED 灯功率的调节速度快。并且 LED 灯具有独特的光电特性, 其光通量与用电功率之间呈非线性关系。当用电功率改变较大时(如减少 35%), 光通量的变幅较少(如下降 15%), 而人体视觉感受到的光通量则下降更少(7%)^[21]。这些特性都为 LED 灯参与微电网调频控制提供了技术可能。然而, 现有研究基本没有针对 LED 灯, 开展响应微电网频率的用电功率调节, 也忽视了作为可控负荷去参与微电网的频率控制研究。

为此, 本文考虑通信噪声和时滞的影响, 提出一种基于不可靠局部通信的分布式信号获取方法; 考虑光通量和用电功率之间的非线性关系, 设计了

智能 LED 灯用电功率随微电网频率变化的动态调整模型, 并耦合分布式信号获取动态方程, 提出了考虑 LED 灯的多区域微电网频率控制方法, 使 LED 灯具有参与微电网调频服务的功能和作用。

1 考虑通信时滞和噪声的分布式信号获取

为了克服分散式信号获取方法投资成本大、测量精度低的弊端, 针对 LED 灯地域分散、数目庞大的特性, 提出了不可靠局部通信下的分布式信号获取方法。含 LED 灯的微电网如图 1 所示, 信号测量装置安装在配电变电站上, LED 灯通过相邻对象之间的局部通信和交互, 实现所有 LED 灯对系统信号的一致性、鲁棒获取。

假设 $G = (V, E)$ 表示 LED 灯与配电变电站之间的通信拓扑图, V 和 E 分别表示 G 的节点集合和边集合。 $V = \{1, \dots, N\}$, 其中 $i = 1, \dots, l$ 表示配有信号测量装置的配电变电站, $i = l + 1, \dots, N$ 表示 LED 灯节点。 $A = \{a_{ij}\}$ 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 $a_{ij} = a_{ji} = 1$ ($i \neq j$); 否则, $a_{ij} = a_{ji} = 0$ 。 $V_i = \{j \in V : a_{ij} = 1\}$ 表示与节点 i 存在通信链路的相邻节点集合。

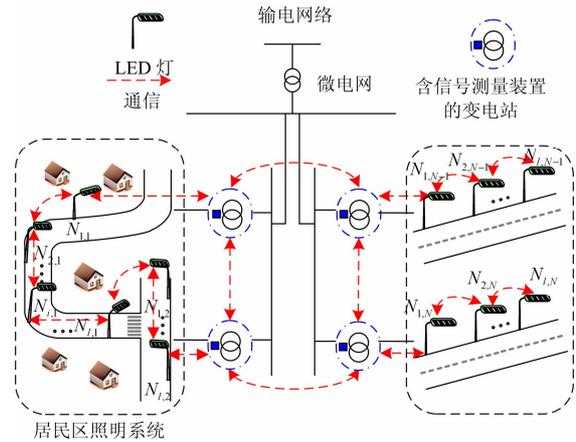


图 1 含 LED 灯的微电网

Fig. 1 Microgrid with LED lamps

通过相邻对象之间的估计值偏差(式(1-a)中第一项)和自身测量值估计偏差(式(1-a)中第二项)来修正信号估计值。分布式信号获取方法的动态方程为

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in V_i} a_{ij} (x_j(t - \tau_{ij}) - x_i(t - \tau_{ij})) + (u_i(t - \tau_{ij}) - x_i(t - \tau_{ij})) \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (1-a)$$

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in V_i} a_{ij} (x_j(t - \tau_{ij}) - x_i(t - \tau_{ij})) \quad (i = l + 1, \dots, N) \quad (1-b)$$

其中: x_i 表示节点 i 的信号估计值; τ_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的通信时滞; u_i 表示节点 i 的信号测量值。

假设所有相邻对象之间通信时滞相同, 均等于平均通信时滞 τ , 则式(1-a)和式(1-b)合写成矩阵的形式为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = -(L + I_N)\mathbf{x}(t - \tau) + K\mathbf{u}(t - \tau) \quad (2)$$

其中: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$; I_N 为 $N \times N$ 的单位矩阵; $L \in R^{N \times N}$ 为通信网络拓扑的拉普拉斯矩阵, 所有特征根均有非负实部^[22], 其元素具体为

$$l_{ij} = \begin{cases} -a_{ij} & i \neq j \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} & i = j \end{cases}$$

$K = (I_l, 0_{l \times (N-l)})^T$, $0_{l \times (N-l)}$ 表示元素均为 0 的 l 行 $(n-1)$ 列矩阵。 $\mathbf{u}(t - \tau) = (u_1(t - \tau), u_2(t - \tau), \dots, u_l(t - \tau))^T$ 。

式(2)的 Laplace 变换形式为

$$s\mathbf{x}(s) - \mathbf{x}(0) = -(L + I_N)e^{-\tau s}\mathbf{x}(s) + e^{-\tau s}K\mathbf{u}(s) \quad (3)$$

即

$$\left[sI_N + (L + I_N)e^{-\tau s} \right] \mathbf{x}(s) = \mathbf{x}(0) + e^{-\tau s}K\mathbf{u}(s) \quad (4)$$

因为 $\lim_{s \rightarrow +\infty} \left[sI_N + (L + I_N)e^{-\tau s} \right]^{-1} e^{-\tau s}K = 0$, 故分布式信号获取方法可以有效滤除高频噪声。信号获取值的幅值随测量信号频率变化曲线如图 2 所示, 由图 2 可知, 当 u 的频率小于 100 Hz 时, 信号获取值的幅值不衰减; 当 u 的频率大于 100 Hz 时, 随着其频率的增大, 信号获取值的幅值不断减小, 减小的速度近似为 -20 dB/十倍频, 从而验证了方程(2)无衰减获取系统低频信号, 同时可滤除高频噪声。

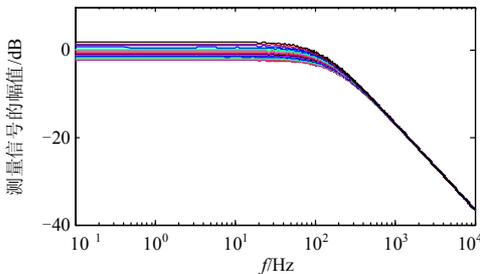


图 2 信号获取值的幅值随测量信号频率变化

Fig. 2 Amplitude of signal acquisition changes with measuring signal frequency

信号测量值 $u_i(t)$ 由电网发送的信号 $\omega(t)$ 和通信噪声叠加而成, 即

$$u_i(t) = \omega(t) + \sigma_i(t)d\xi_i / dt \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (5)$$

其中: $d\xi_i$ 为均值为 0, 方差为 1 的高频白噪声; σ_i 为噪声强度。

由以上分析可知, 分布式信号获取方法可以滤除高频通信噪声, 故式(4)可表示为

$$\mathbf{x}(s) = \left[sI_N + (L + I_N)e^{-\tau s} \right]^{-1} \left[\mathbf{x}(0) + e^{-\tau s}K \frac{\omega}{s} \mathbf{1}_{N \times 1} \right] \quad (6)$$

其中: $\mathbf{1}_{N \times 1}$ 表示元素均为 1 的 $N \times 1$ 的列向量。

式(6)的特征方程为

$$\det \left[sI_N + (L + I_N)e^{-\tau s} \right] = 0 \quad (7)$$

式(7)等价于

$$\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i e^{-\tau s}) = 0 \quad (8)$$

其中, λ_i 为 $-(L + I_N)$ 的特征值, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

因 L 的所有特征根均有非负实部, 故 $-(L + I_N)$ 的所有特征根均具有负实部, $-(L + I_N)$ 特征根的相角 $\theta_i = \pi$ 。即 $s = 0$ 不是式(8)的根, 式(8)的特征根具有如下方程形式。

$$1 - \frac{\lambda_i e^{-\tau s}}{s} = 0 \quad (9)$$

根据奈奎斯特稳定判据, 当且仅当奈奎斯特曲线 $-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}$ 不环绕点 $(-1, j0)$ 时, 式(9)的根存在于左半复平面, 方程(2)稳定。

在复平面上, $-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}$ 到原点的距离为

$$\left| -\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega} \right| = \frac{|\lambda_i|}{\omega} \quad (10)$$

由式(10)可知, $-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}$ 到原点的距离随 ω 的增加单调递减, 因此, 若 $-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}$ 第一次穿越负实轴时, 到原点的距离小于 1, 则 $-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}$ 一定不环绕点 $(-1, j0)$ 。

$-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}$ 的相角为

$$\arg\left(-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}\right) = \theta_i - \omega\tau + \frac{\pi}{2} = \frac{3\pi}{2} - \omega\tau \quad (11)$$

$-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}$ 第一次穿越负实轴时, $-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}$ 的相

角 $\frac{3\pi}{2} - \omega\tau = \pi$ 。即 $\omega = \frac{\pi}{2\tau}$ 。

当 $-\frac{\lambda_i e^{-j\omega\tau}}{j\omega}$ 到原点的距离 $\frac{|\lambda_i|}{\omega} \leq 1$ ，即

$\tau < \frac{\pi}{2 \max_i |\lambda_i|}$ 时，方程(2)稳定，所有 LED 灯可实现

对系统信号的一致性、鲁棒获取。

采用分布式信号获取方法，得到信号获取动态偏差如图 3 所示。其中图 3(a)~图 3(d)分别表示延时

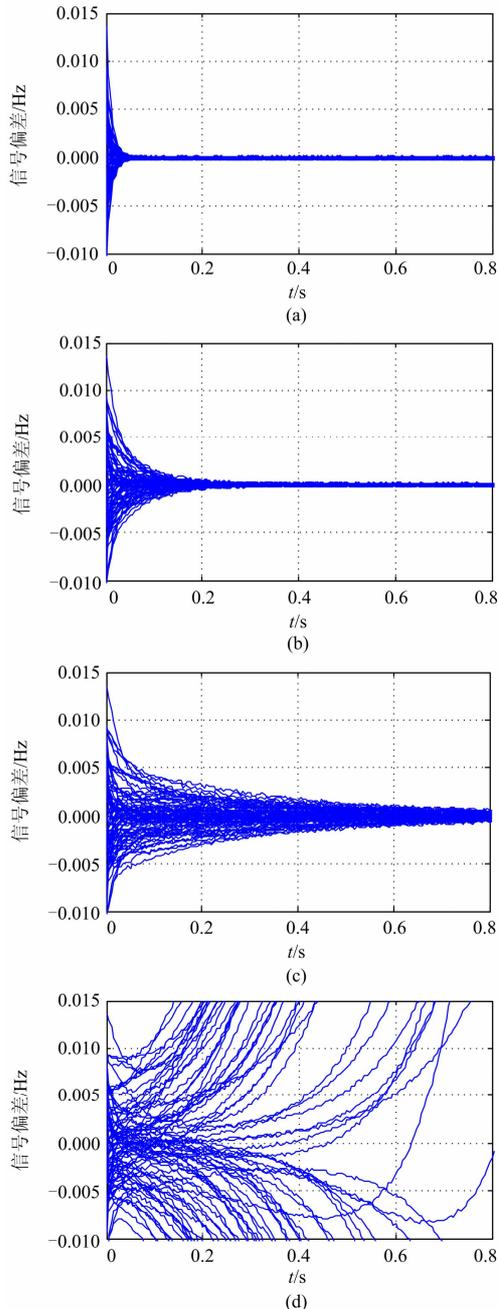


图 3 信号获取动态偏差

Fig. 3 Dynamic deviation of signal acquisition

0 s、0.3 s、0.35 s、0.4 s，比较图 3 (a)~图 3(d)可以看出，随着通信时滞的增大，分布式信号获取方法取得一致性的时间逐近增大，当通信时滞为 0.4 s 时，不能取得一致性。从而证明了在通信时滞小于一定值时所有 LED 灯可实现系统信号的一致性、鲁棒获取。

通信噪声对信号获取的影响如图 4 所示，图 4(a)、图 4(b)分别为节点 3 和节点 12 的信号偏差，对比图 4 中有无通信噪声的信号获取值可以看出，有通信噪声时信号获取值与无通信噪声的信号获取值之间偏差较小，从而证明，通信噪声对分布式信号获取的影响较小，即分布式信号获取方法可以滤除高频噪声。

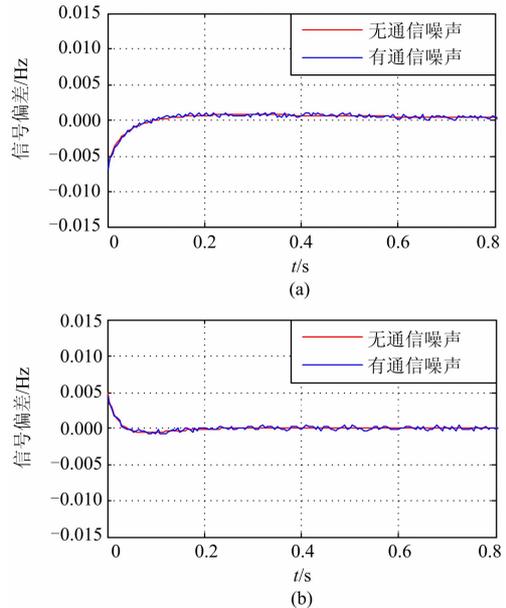


图 4 通信噪声对信号获取的影响

Fig. 4 Influence of measurement noise on signal acquisition

2 智能 LED 照明系统的功率控制

LED 灯通过驱动电路接入电力系统，驱动电路如图 5 所示，电力系统的交流电压经过二极管整流电路将交流电转换为直流电，然后经过削峰填谷电路进行无源功率因素校正，再经电流控制回路调节流过 LED 灯的电流，从而实现 LED 灯用电功率的改变。

忽略二极管整流电路、削峰填谷电路和电流控制电路的功率损耗，从配电网获得的 LED 灯用电功率 $P_{LED,i}$ 为

$$P_{LED,i} = V_{DC,i} I_{DC,i} = V_{LED,i} I_{DC,i} \quad (12)$$

利用傅里叶变换^[23]可得

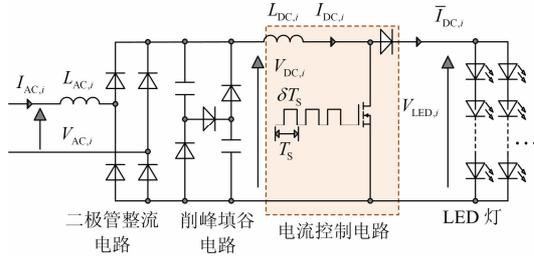


图 5 LED 灯驱动电路

Fig. 5 Drive circuit of LED lamp

$$I_{DC,i} = \frac{\sqrt{V_{AC,i}^2 - 1.024V_{LED,i}^2}}{0.98\omega L_{AC,i}} \quad (13)$$

其中： ω 为系统频率； $L_{AC,i}$ 为输入电感。

流过 LED 灯的电流采用 PWM 控制，通过电流控制电路的开关器件开断控制流过 LED 灯的电流，其电流幅值为

$$\bar{I}_{DC,i} = (1 - \delta_{LED,i}) \cdot I_{DC,i} \quad (14)$$

其中， $\delta_{LED,i}$ 为 PWM 的占空比。

LED 灯用电功率为

$$P_{LED,i} = V_{LED,i} \bar{I}_{DC,i} = (1 - \delta_{LED,i}) V_{LED,i} \frac{\sqrt{V_{AC,i}^2 - 1.024V_{LED,i}^2}}{0.98\omega L_{AC,i}} = a_{LED,i} (1 - \delta_{LED,i}) \quad (15)$$

其中， $a_{LED,i} = V_{LED,i} \frac{\sqrt{V_{AC,i}^2 - 1.024V_{LED,i}^2}}{0.98\omega L_{AC,i}}$ 。

在 LED 灯参与微电网调频控制中，占空比 $\delta_{LED,i}$ 随频率偏差信号 Δf_i 而调整的公式为

$$\Delta \dot{\delta}_{LED,i} = \frac{1}{T_{LED,i}} \left(-\Delta \delta_{LED,i} - \frac{1}{a_{LED,i}} \Delta f_i \right) \quad (16)$$

其中， $T_{LED,i}$ 为占空比调节时间常数。

由式(15)、式(16)可得

$$\Delta \dot{P}_{LED,i} = \frac{1}{T_{LED,i}} (-\Delta P_{LED,i} + \Delta f_i) \quad (17)$$

3 考虑 LED 灯的微电网频率控制

单盏 LED 灯可调节的用电功率对微电网调频的效果不明显，LED 灯参与微电网调频是通过集中控制大量 LED 灯功率实现的。

在两区域微电网联合系统频率控制中，每个区域所有参与调频的发电机组等效为一个发电机组，微电网联合系统频率控制框图如图 6 所示。

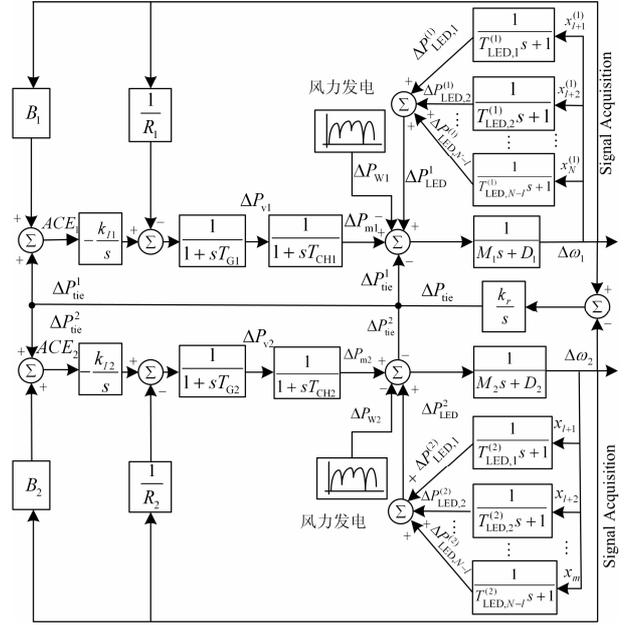


图 6 微电网联合系统频率控制框图

Fig. 6 Block diagram of frequency regulation for joint microgrid

控制区域 i 中，发电机组通过区域控制偏差 ACE_i (Area Control Error) 调节有功出力，控制模式采用联络线频率偏差控制模式 TBC (Tie-line Frequency Bias Control)， ACE_i 的计算公式为

$$ACE_i = \Delta P_{tie}^i + B_i \Delta \omega_i \quad (18)$$

其中， ΔP_{tie}^i 、 B_i 、 $\Delta \omega_i$ 分别为控制区域 i 联络线净交换功率、频率偏差系数和频率偏差。

不考虑风力发电机组的动态性能，在风力发电机组有功出力改变 ΔP_{Wi} 时，控制区域 i 的频率控制模型为

$$\Delta \dot{P}_{vi} = \frac{1}{T_{Gi}} (-\Delta P_{vi} - k_{vi} \int ACE_i - \frac{1}{R_i} \Delta \omega_i) \quad (19)$$

$$\Delta \dot{P}_{mi} = \frac{1}{T_{Chi}} (-\Delta P_{mi} + \Delta P_{vi}) \quad (20)$$

$$\Delta \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} (-D_i \Delta \omega_i + \Delta P_{mi} + \Delta P_{LED}^i - \Delta P_{Wi} - \Delta P_{tie}^i) \quad (21)$$

其中： ΔP_{vi} 和 ΔP_{mi} 分别为发电机机械功率输出偏差和控制阀位置偏差； T_{Gi} 为汽轮机调速器时间常数； T_{Chi} 为汽轮机主进汽容积和汽室时间常数； k_{vi} 为积分增益系数； R_i 为汽轮机速度跌落系数； M_i 和 D_i 为发电机转动惯量和阻尼系数； ΔP_{Wi} 为可再生能源的

波动功率； ΔP_{LED}^i 为区域 i 中所有 LED 灯的聚合功率，即

$$\Delta P_{LED}^i = \sum_{z=1}^{N-l} P_{LED,z}^{(i)} \quad (22)$$

由第 1 部分可知，分布式信号获取方法可滤除高频噪声，故可忽略通信噪声对分布式信号获取的影响，即区域 i 中含有信号测量装置配电变电站的信号测量值 $u(t) = \omega_i(t) \times 1_{l \times 1}$ 。因此，区域 i 的分布式信号获取值为

$$\dot{x}(t) = -(L_i + I_N)x(t - \tau_i) + \omega_i(t - \tau_i)K \times 1_{l \times 1} \quad (23)$$

其中： L_i 为区域 i 通信拓扑图的拉普拉斯矩阵； τ_i 为区域 i 的通信时滞。

将区域 i 的频率控制模型写成矩阵的形式为

$$\begin{cases} \dot{y}_i(t) = C_i y_i(t) + C_{di} y_i(t - \tau_i) + C_u & t > 0 \\ y_i(t) = \phi(t) & t \in [-\sigma_i, 0] \end{cases} \quad (24)$$

其中， $\phi(t)$ 为 $y_i(t)$ 的初始值；

$$y_i(t) = [x_1, \dots, x_N, \Delta\omega_i, \Delta P_{LED,1}^{(i)}, \dots, \Delta P_{LED,N-l}^{(i)}, \Delta P_{wi}, \Delta P_{mi}, \Delta P_{ie}^i, ACE_i]^T$$

$$C_i = \begin{bmatrix} 0_{N \times (2N-l+5)} \\ 0_{1 \times N} \frac{B_i - D_i}{M_i} 1_{1 \times (N-l)} 0 1 0_{1 \times 2} \\ 0_{(N-l) \times l} T_i 0_{(N-l) \times 1} -T_i 0_{(N-l) \times 4} \\ 0_{1 \times N} -\frac{1}{R_i T_{Gi}} 0_{1 \times (N-l)} -\frac{1}{T_{Gi}} 0_{1 \times 2} -\frac{k_{li}}{T_{Gi}} \\ 0_{1 \times (2N-l+1)} \frac{1}{T_{CHi}} -\frac{1}{T_{CHi}} 0_{1 \times 2} \\ 0_{1 \times N} k_r 0_{1 \times (N-l+4)} \\ 0_{1 \times N} B_i 0_{1 \times (N-l+2)} 1 0 \end{bmatrix}$$

$$T_i = \text{diag} \left[\frac{1}{T_{LED,1}^{(i)}}, \dots, \frac{1}{T_{LED,N-l}^{(i)}} \right]$$

$$C_{di} = \begin{bmatrix} -(L_i + I_N) K \times 1_{l \times 1} 0_{N \times (N-l+4)} \\ 0_{(N-l+5) \times (2N-l+5)} \end{bmatrix}$$

$$C_u = \begin{bmatrix} 0_{1 \times N} -\frac{\Delta P_{wi}}{M_i} 0_{1 \times (N-l+4)} \end{bmatrix}^T$$

由文献[24-25]可知，方程(24)渐进稳定，如果满足 $0 \leq \tau_i \leq \sigma_i$ ，并且存在 $0 < \mu_i < 1$ ，对称半正定矩

阵 P_i 、 Q_i 、 Z_i 和 $X_i = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{12}^T & X_{22} \end{bmatrix}$ ，以及任何相应尺寸的矩阵 H_i 、 K_i ，使得下式成立。

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \sigma_i C_i^T Z_i \\ \Phi_{12}^T & \Phi_{22} & \sigma_i C_{di}^T Z_i \\ \sigma_i Z_i C_i & \sigma_i Z_i C_{di} & \sigma_i Z_i \end{bmatrix}^T < 0 \quad (25)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & H_i \\ X_{12}^T & X_{22} & K_i \\ H_i^T & K_i^T & Z_i \end{bmatrix} \geq 0 \quad (26)$$

其中： $\Phi_{11} = P_i C_i + C_i^T P_i + H_i + H_i^T + Q_i + \sigma_i X_{11}$ ； $\Phi_{12} = P_i C_{di} - H_i + K_i^T + \sigma_i X_{12}$ ； $\Phi_{22} = -K_i - K_i^T - (1 - \mu_i) Q_i + \sigma_i X_{22}$ 。

4 数值仿真

含 LED 灯的两区域微电网联合系统参数分别如表 1、表 2 所示，区域 1 含有 3 万盏 LED 灯，区域 2 含有 2 万盏 LED 灯，LED 灯的时间常数 $T_{LED,i}$ 均为 $5 \mu s$ 。LED 灯对微电网调频的影响如图 7 所示，图 7(a)和图 7(b)分别表示在区域 1 和区域 2 的系统频率，对比图 7 有无 LED 灯时系统频率可知，LED 灯参与电力系统调频明显降低了电力系统频率波动的范围，缩短了频率恢复的时间。

表 1 区域 1 参数

Table 1 Parameters of Region 1

参数	数值	参数	数值
系统容量/MW	10	τ_1 / s	0.1
$k_{l1}/(MW/Hz/s)$	0.6	T_{G1} / s	0.25
T_{CH1} / s	0.6	$M_1/(MW/Hz/s)$	0.2
$D_1/(MW/Hz)$	0.17	$B_1/(MW/Hz)$	1
$R_1/(MW/Hz)$	1/3	$\Delta P_{w1} / MW$	0.25

表 2 区域 2 参数

Table 2 Parameters of Region 2

参数	数值	参数	数值
系统容量/MW	8	τ_2 / s	0.15
$k_{l2}/(MW/Hz/s)$	0.8	T_{G2} / s	0.2
T_{CH2} / s	0.45	$M_2/(MW/Hz/s)$	0.2
$D_2/(MW/Hz)$	0.15	$B_2/(MW/Hz)$	1
$R_2/(MW/Hz)$	1/4	$\Delta P_{w2} / MW$	0.24

通信噪声对两区域微电网联合系统调频的影响如图 8 所示。对比图 8 (a)与 8(b)、8 (c)与 8 (d)可看出, 8 (a)与 8 (b)以及 8 (c)与 8 (d)的频率变化曲线均很接近, 区别仅在于: 8 (a)与 8 (c)的频率变化曲线中含有微弱的谐波分量, 8 (b)与 8 (d)相对较平滑。从而证明, 耦合了 LED 灯后, 相邻 LED 灯以及 LED 灯与相邻变电站之间局部通信的噪声对微电网调频影响较小。

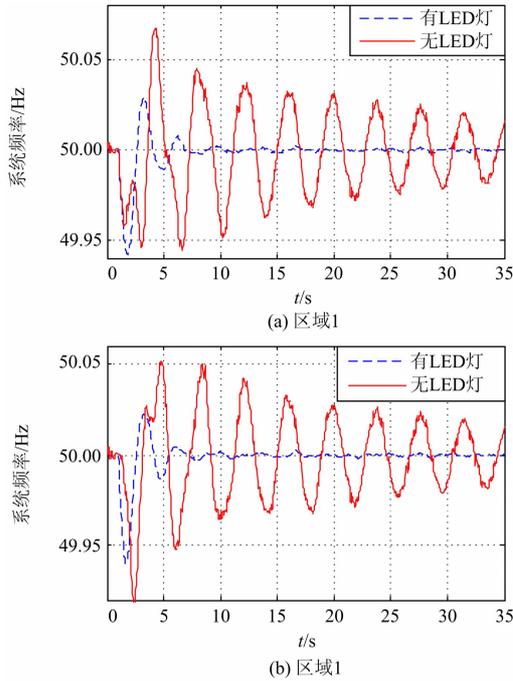


图 7 LED 灯对系统调频的影响

Fig. 7 Influence of LED lamps on frequency regulation

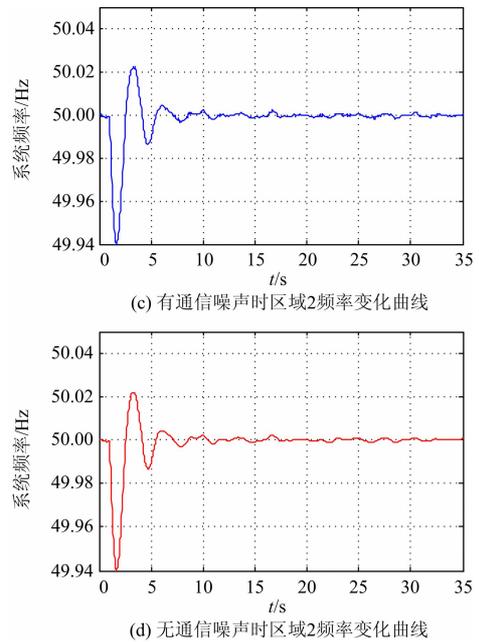
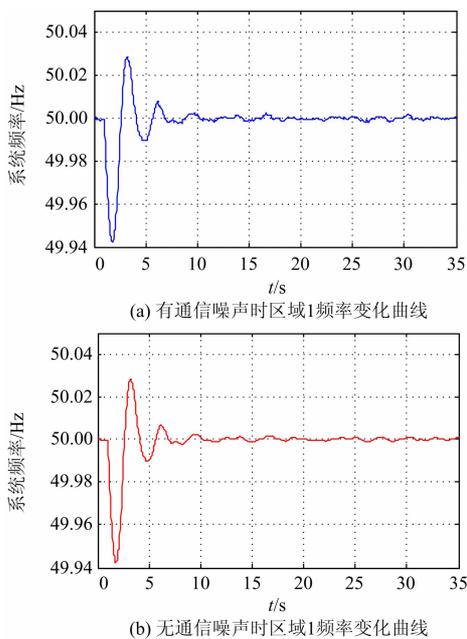


图 8 通信噪声对系统调频的影响

Fig. 8 Influence of communication noise on frequency regulation

通信时滞对微电网调频的影响如图 9 所示, 由图 9 可知, 耦合了 LED 灯后, 相邻 LED 灯以及 LED 灯与相邻变电站之间局部通信的时滞增大频率波动的范围。

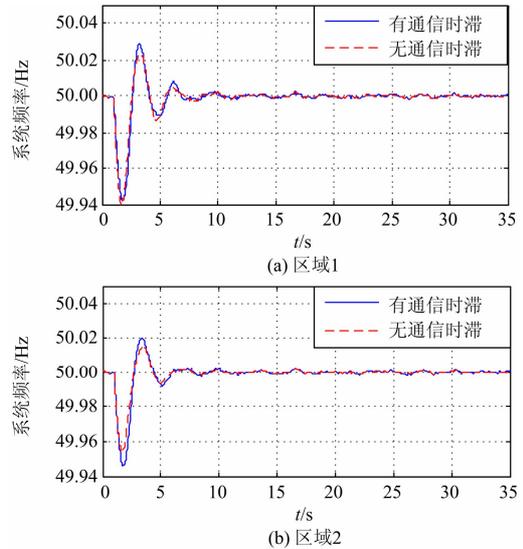


图 9 通信时滞对微电网调频的影响

Fig. 9 Influence of communication delay on frequency regulation of microgrid

5 结论

本文提出的基于分布式信号获取方法, 可实现庞大 LED 灯对系统信号的精确获取, 提高微电网

调频的控制精度,有效降低信号测量的投资成本;设计了智能 LED 灯用电功率随微电网频率变化的动态调整模型,使 LED 灯具备参与微电网调频的动态性能;LED 灯参与两区域微电网联合系统调频的成功应用,证明利用 LED 灯参与微电网调频在平抑可再生能源间歇性方面的潜力。

参考文献

- [1] 肖湘宁,陈征,刘念. 可再生能源与电动汽车充放电设施在微电网中的集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 1-14.
XIAO Xiangning, CHEN Zheng, LIU Nian. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 1-14.
- [2] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [3] 张明锐,林承鑫,王少波,等. 一种并网型风光互补发电系统的建模与仿真[J]. 电网与清洁能源, 2014, 31(1): 68-75.
ZHANG Mingrui, LIN Chengxin, WANG Shaobo, et al. Modeling and simulation of grid-connected wind/PV hybrid generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 31(1): 68-75.
- [4] 孙红霞,赵彩波. 光伏/风电并网测试装置的设计和开发[J]. 高电压器, 2014, 50(5): 103-109.
SUN Hongxia, ZHAO Caibo. Design and development of testing devices for photovoltaic/wind power grid connection[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 103-109.
- [5] CHEN C S, LEE Y D, HSU C T, et al. Transient response of an incinerator plant by considering boiler model with dynamic steam variation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 92-99.
- [6] INOUE T, AMANO H. A thermal power plant model for dynamic simulation of load frequency control[C] // IEEE PES 2006 Power System Conference and Exposition, 2006: 1442-1447.
- [7] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等. 电动汽车提供辅助服务的经济型分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 43-58.
LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Economic analysis of ancillary service provision by plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 43-58.
- [8] 杨洪明,刘保平,易德鑫,等. 基于有限通信的配电系统频率协同获取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 69-76.
YANG Hongming, LIU Baoping, YI Dexin, et al. Collaborative acquisition method of distribution system frequency via limited communication[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 69-76.
- [9] 刘文霞,赵天阳,邱威,等. 规模化EV充电与风力/火电发电系统协调运行[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 49-57.
LIU Wenxia, ZHAO Tianyang, QIU Wei, et al. Coordinated operation of large scale electric vehicles charging with wind-thermal power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 49-57.
- [10] VACHIRASRICIRIKUL S, NGAMROO I. Robust LFC in a smart grid with wind power penetration by coordinated V2G control and frequency controller[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 371-380
- [11] 黄媛,刘俊勇,陈井锐,等. 计及电动汽车入网的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 24-28.
HUANG Yuan, LIU Junyong, CHEN Jingrui, et al. Load frequency control considering vehicle to grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 24-28.
- [12] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. An autonomous distributed vehicle-to-grid control of grid-connected electric vehicle[C] // Fourth International Conference on Industrial and Information Systems, 2009: 414-418.
- [13] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 559-564.
- [14] KONDOH J. Autonomous frequency regulation by controllable loads to increase acceptable wind power generation[J]. Wind Energy, 2010, 13(6): 529-541.
- [15] YANG Hongming, CHUNG C Y, ZHAO Junhua. Application of plug-in electric vehicles to frequency regulation based on distributed signal acquisition via limited communication[J]. IEEE Transactions on Power

- Systems, 2013, 28(2): 1017-1026.
- [16] 张帆, 杨明皓. 中国农村分布式供能模式供需分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 38(23): 121-125.
ZHANG Fan, YANG Minghao. Supply and demand analysis of rural distributed energy supplying mode[J]. Power System Protection and Control, 2014, 38(23): 121-125.
- [17] U.S. Energy Information Administration. How much electricity is used for lighting in the United States[EB/OL]. [2013]. <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=99&t=3>.
- [18] CHIU H J, LO Y K, CHEN J T, et al. A high-efficiency dimmable LED driver for low-power lighting applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 735-743.
- [19] 屈振江, 周贵德. 照明用无桥LED驱动电路及其输入电流谐波分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 137-143.
QU Zhenjiang, ZHOU Guide. Illumination bridgeless LED drive circuit and analysis of input current harmonic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 137-143.
- [20] KHOMICH V Y, MALASHIN M V, MOSHKUNOV S I, et al. High voltage IGBT switch with capability of pulse width control[C] // International Symposium on Power Electronics, 2012: 1512-1514.
- [21] LEE C K, LI S, HUI S Y. A design methodology for smart LED lighting systems powered by weakly regulated renewable power grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 548-554.
- [22] OLFATI R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [23] HUI S Y, LI Sinan, TAO Xuehui, et al. A novel passive offline LED driver with long lifetime[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(10): 2665-2672.
- [24] 姚伟. 时滞电力系统稳定性分析与网络预测控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
YAO Wei. Stability analysis and its predictive control of power systems with time-delay[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [25] HE Y, WU M, SHE J H. Delay-dependent stability criteria for linear systems with multiple time delays[J]. IEE Proc-Control Theory Application, 2006, 153(4): 447-452.
-
- 收稿日期: 2014-06-30; 修回日期: 2014-09-01
- 作者简介:
- 吴俊明(1986-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 744832909@qq.com
- 杨洪明(1972-), 女, 博士, 教授, 从事电力系统运行与控制研究;
- 杨鑫(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。
- (编辑 葛艳娜)