

DOI: 10.7667/PSPC160771

微电网的新型无差调频控制方法研究

颜湘武¹, 王星海², 王月茹²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;
2. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 为了提高微网孤岛模式下的频率质量, 提出了一种基于一致性算法的分布式无差调频控制方法。每台逆变器利用其本地及相邻逆变器的有功功率信息, 结合带权值的平均一致迭代算法实现有功-频率的控制, 其中权值矩阵根据局部度分配权值法确定。该方案可以实现频率的无差调节, 同时保证各逆变器输出的有功功率按照其额定容量成比例分配。利用 Matlab/Simulink 搭建了包含五台逆变器的微网仿真模型, 并对该方案进行了仿真验证, 仿真结果表明了该方案的正确性与有效性。

关键词: 微网; 孤岛模式; 一致性; 无差调频; 局部度分配权值法; 有功功率分配

Research on novel zero-error frequency regulation control method for microgrid

YAN Xiangwu¹, WANG Xinghai², WANG Yueru²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China)

Abstract: A distributed zero-error frequency regulation control method based on consensus algorithm is proposed in order to improve the microgrids' frequency quality when operated in islanded mode. Each inverter utilizes its local and neighbors' active power information and combines with the weighted average consensus iterative algorithm to realize active power and frequency control. The weight matrix is determined by the local-degree weights method. This strategy could realize zero-error frequency regulation and also guarantee proportional active power sharing among inverters according to the rated power capacities. A microgrid simulation model which includes five inverters is built using Matlab/Simulink. The proposed strategy is used and the simulation results show its correctness and effectiveness.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050603), National Natural Science Foundation of China (No. 51507158), and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. PD71-16-024).

Key words: microgrid; islanded mode; consensus; zero-error frequency regulation; local-degree weights; active power sharing

0 引言

能源是人类赖以生存和发展的基础, 能源问题始终是世界各国关注的焦点^[1]。伴随着能源的日益枯竭, 分布式发电(Distributed Generation, DG)技术凭借其污染少、电能质量高、能源利用率高、安装位置灵活等优点^[2]而得到了大力推广。微网作为一种重要的 DG 并网方式, 其具有联网与孤岛两种模

式^[3], 且往往包含多台并联运行的逆变器, 孤岛模式下, 分布式电源与储能单元配合可以具备调频能力, 从而为负荷提供更加优质的电能。

下垂控制^[4-6]是目前应用最广泛的多逆变器并联控制策略, 但其为有差调节, 必须结合二次调频方法才能实现频率的无差控制。分散式二次调频^[7]成本低, 简单易行, 但各逆变器动态响应的不一致会使功率分配效果变差; 集中式二次调频^[8-9]借助于中央控制器(Microgrid Central Controller, MGCC)实现频率的无差调节, 其调频效果完全依赖于 MGCC, 可靠性差; 分布式二次调频^[10]利用本地信息和相邻逆变器的信息实现了多逆变器的协调控

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2015AA050603); 国家自然科学基金项目(51507158); 国家电网公司科技项目(PD71-16-024)

制,该方法可靠性高,有功—频率协调控制效果好,是未来微网多逆变器并联控制的发展方向。

针对上述问题,本文提出了一种基于一致性算法的分布式无差调频控制方法,该方法适用于微网孤岛模式下的多逆变器并联控制,其有功—频率控制不再采用下垂控制方法,而是直接利用一致性算法来实现,该方法在保证各并联逆变器之间有功功率合理分配的前提下,实现了微网频率的无差控制。

1 基于下垂控制的二次调频控制方法

1.1 下垂控制原理

图1给出了单台逆变器的潮流传输示意图,其中 E 和 V 分别为逆变器的输出电压和公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)电压, δ 为功角, Z 为逆变器的等效输出阻抗, P 、 Q 为其输出的有功和无功功率。

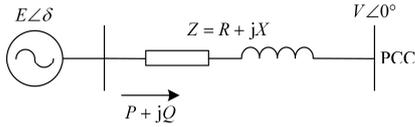


图1 单台逆变器的潮流传输示意图

Fig. 1 Power flow transmission scheme of single inverter

通常功角 δ 可以近似处理: $\sin \delta \approx \delta$ 、 $\cos \delta \approx 1$,如果逆变器的等效输出阻抗呈感性,即电阻 R 可以忽略,则输出功率表达式为

$$\begin{cases} P \approx \frac{EV\delta}{X} \\ Q \approx \frac{E(E-V)}{X} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,逆变器的有功和无功功率的调整可以分别通过调节功角 δ 和电压差 $E-V$ 来实现,故下垂控制方程式为

$$\begin{cases} f_{\text{set}} = f_0 - mP \\ E_{\text{set}} = E_0 - nQ \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_0 、 E_0 分别为空载频率与电压; f_{set} 、 E_{set} 分别为逆变器的频率与电压给定值; m 、 n 为下垂系数。

1.2 二次调频控制方法

由1.1节中式(2)可知,下垂控制是一种有差调节,如图2中直线1所示,因此必须通过二次调频方法实现频率的无差控制,二次调频往往利用积分方式平移下垂特性曲线或者调节下垂系数来实现,分别对应图2中的直线2和直线3。

以平移下垂特性曲线为例,其二次调频可以由式(3)表示。

$$\begin{cases} f_{\text{set}i} = f_{0i}' - m_i P_i \\ f_{0i}' = f_0 + \frac{k_i}{s} (f_{\text{ref}} - f_i) \end{cases} \quad (3)$$

假设微网中共有 n 台逆变器具有调频能力,对于逆变器 i 而言,积分器的输入为频率期望值 f_{ref} 与实际值 f_i 之差,输出用于调节空载频率 f_{0i}' 的大小,其实现框图如图3所示。

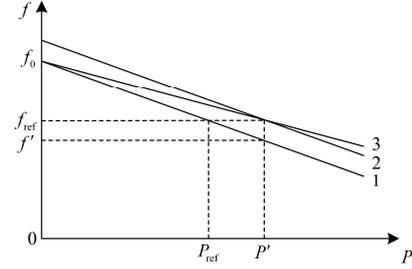


图2 频率调节示意图

Fig. 2 Frequency regulation scheme

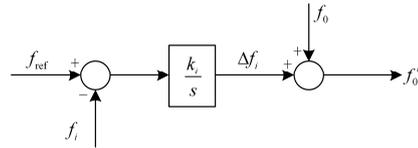


图3 二次调频控制框图

Fig. 3 Secondary frequency control diagram

然而,根据微网控制方式的不同,上述二次调频方法可以通过集中式与分散式两种控制方式实现。

集中式二次控制主要依赖于MGCC来弥补下垂控制产生的频率偏差,图3的实现由MGCC来完成,并利用通信将频率调节量 Δf 或空载频率 f_0' 下发给各台逆变器。对各台逆变器而言,其空载频率均由MGCC获取,因而是相同的,即 $f_{01}' = f_{02}' = \dots = f_{0n}'$ 成立,故集中式二次控制不会影响并联逆变器间有功功率的分配关系;但该二次调频方法完全依赖于MGCC,当MGCC发生故障时,微网的二次频率控制将失效,因而集中式二次调频方法可靠性较低。

相比于集中式控制方式,分散式二次控制仅依靠逆变器的本地信息完成,不需要通信,因此更为简单易行。分散式二次控制方法中,每台逆变器都含有一个积分器,利用其本地测量的频率信息进行调节。该方法虽然易于实现,但由于动态过程中各逆变器的频率测量值之间可能存在差异,且各积分器的特性难以做到完全相同,故各逆变器的空载频

率会出现差异, 因此难以保证有功功率在各并联逆变器间的比例分配关系。

针对集中式与分散式二次调频方法存在的问题, 部分文献提出了改进方案。文献[11]提出微网中所有逆变器之间进行通信, 每台逆变器利用通信获取其他逆变器测得的频率信息, 求出均值后再利用各自的积分器进行调节, 该方法可以解决分散式二次控制的有功功率分配问题, 但当微网规模较大时, 通信成本太高; 文献[12]通过暂态过程中的功率值与其延时 t_0 时刻的值构造了下垂系数, 使得逆变器的输出特性在暂态过程中呈现下垂特性, 而稳态时表现为恒定频率, 但该方法并不能保证有功功率的合理分配关系。

2 新型无差调频控制方法

集中式与分散式控制方式各有利弊, 相比之下, 分布式控制方式结合了两者的优点, 微网中的每台逆变器通过通信可以获取与其相邻的部分逆变器的信息, 结合相应的分布式控制算法, 即可达到较为理想的控制效果。

微网中并联逆变器的无差调频控制目标有两个, 即控制逆变器的输出频率为期望值的情况下, 保证有功功率在并联逆变器之间的比例分配。本文提出了一种基于分布式一致性算法的无差调频控制方法, 可以同时实现以上两个目标。

2.1 分布式一致性算法

一致性是指在一个多智能体系统中, 随着时间的推移, 系统中所有智能体的状态最终能够趋于一个相同的值, 一致性算法(协议)则是指复杂系统中智能体之间相互作用的规则^[13], 一致性理论可以结合图论知识加以描述。

有向图可以用 $G(\mathbf{v}, \mathcal{E}, \mathbf{A})$ 来表示, 其中 $\mathbf{v} = \{1, 2, \dots, n\}$ 为节点集, $\mathcal{E} \subseteq \mathbf{v} \times \mathbf{v}$ 为有向边集, $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$ 为邻接矩阵, 如果节点 j 可以直接向节点 i 传递信息, 记作 $(j, i) \in \mathcal{E}$ 且 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。节点 i 的邻居集合为 $N_i = \{j | (j, i) \in \mathcal{E}\}$, 指向该节点的边的数量称为其入度, 从该节点出发的边的数量称为其出度, 其可以表示为入度矩阵 $\mathbf{D}^{\text{in}} = \text{diag}\{d_i^{\text{in}}\}$ 、出度矩阵 $\mathbf{D}^{\text{out}} = \text{diag}\{d_i^{\text{out}}\}$, 其中 $d_i^{\text{in}} = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$ 、 $d_i^{\text{out}} = \sum_{i \in N_j} a_{ji}$ 。定义拉普拉斯矩阵满

足 $\mathbf{L} = \mathbf{D}^{\text{in}} - \mathbf{A}$, 如果满足 $\mathbf{D}^{\text{in}} = \mathbf{D}^{\text{out}}$, 则称该有向图平衡。当有向图中的任意两个节点都能通过边集中的有向路径连接起来时, 称该有向图为强连通图。

文献[14-15]给出了最常用的一致性算法, 如式(4)所述, 并证明了当有向图为平衡的强连通图时, 该算法一定收敛。

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \quad (4)$$

式中, x_i 、 x_j 分别为节点 i 、 j 的状态量。

一致性算法的收敛速度直接与多智能体网络的代数连通度相关, 文献[16]提出了一种带权值的平均一致迭代算法, 该方法提高了网络的代数连通度, 因而提高了一致性算法的收敛速度。迭代算法具体为

$$x_i(t+1) = W_{ii}x_i(t) + \sum_{j \in N_i} W_{ij}x_j(t) \quad (5)$$

式中, W_{ii} 、 W_{ij} 分别为 x_i 、 x_j 在节点 i 上的权值, 当 $j \notin N_i$ 时, 规定 $W_{ij} = 0$ 。

文献[16]提出了两种权值构造方法: 固定边权值法和局部度分配权值法, 本文仅讨论第二种方法。局部度分配权值法根据邻居节点的最大出度来设定边的权值:

$$W_{ij} = \frac{1}{\max\{d_i^{\text{out}}, d_j^{\text{out}}\}}, (j, i) \in \mathcal{E} \quad (6)$$

然后确定 W_{ii} 使得矩阵 \mathbf{W} 满足行和为 1。

2.2 基于一致性算法的无差调频控制方法

本文提出了一种基于分布式一致性算法的无差调频控制方法, 如式(7)所示。

$$f_{\text{set}i}(t) = f_{\text{ref}} + b \left[W_{ii}P_i^*(t) + \sum_{j \in N_i} W_{ij}P_j^*(t) - P_i^*(t) \right] \quad (7)$$

式中: b 为调节系数; P_i^* 、 P_j^* 分别为逆变器 i 、 j 的有功功率的标么值, 设逆变器 i 、 j 的额定容量分别为 S_{Ni} 、 S_{Nj} , 则 P_i^* 、 P_j^* 满足: $P_i^* = P_i/S_{Ni}$ 、 $P_j^* = P_j/S_{Nj}$ 。

由 2.1 节可知, 式(7)中 $W_{ii}P_i^*(t) + \sum_{j \in N_i} W_{ij}P_j^*(t)$ 会使得所有并联逆变器的有功功率标么值收敛于其均值, 即式(8)稳态时成立。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_i^*(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_j^*(t), i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

因此, 式(7)中 $W_{ii}P_i^*(t) + \sum_{j \in N_i} W_{ij}P_j^*(t) - P_i^*(t)$ 仅在暂态过程中起作用, 其稳态值为 0, 故频率的给定值即为期望值 f_{ref} , 即实现了无差调频; 同时, 因为各逆变器的有功功率标么值稳态时均相等, 故该方法也可以保证有功功率的合理分配。

3 仿真分析

以图 4 所示的 380 V/50 Hz 孤岛运行的微网为例, 利用 Matlab/Simulink 搭建了仿真模型, 来验证本文所提控制方法的正确性。

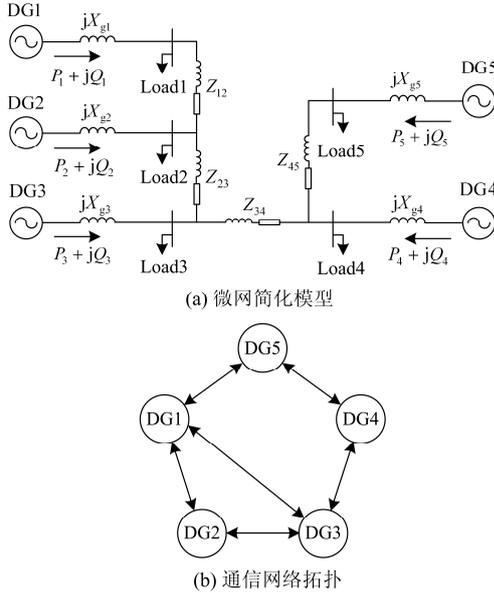


图 4 微网仿真系统结构

Fig. 4 Structure of microgrid simulation system

图 4(a)为微网系统的简化模型, 其包含五台并联逆变器, 图 4(b)则给出了微网的通信拓扑, 逆变器之间采用双向通信方式, 则根据文献[16]的局部度分配权值法可得相应的权值矩阵为

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 \\ 1/3 & 1/3 & 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/6 & 1/2 \\ 1/3 & 0 & 0 & 1/2 & 1/6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

各逆变器的额定视在功率分别为: $S_{N1}=S_{N2}=10 \text{ kVA}$ 、 $S_{N3}=S_{N4}=S_{N5}=5 \text{ kVA}$, 等效输出感抗均为 2 mH , 线路阻抗分别为: $Z_{12}=(0.6+j0.8)\Omega$ 、 $Z_{23}=(0.3+j0.5)\Omega$ 、 $Z_{34}=(0.7+j0.5)\Omega$ 、 $Z_{45}=(0.6+j0.6)\Omega$, 逆变器 1~5 的本地有功负荷依次为: 5 kW 、 4 kW 、 4 kW 、 2 kW 、 3 kW , 无功负荷依次为: 2 kvar 、 1 kvar 、 1.5 kvar 、 0.5 kvar 、 1 kvar 。

3.1 集中式与分散式二次调频仿真分析

图 5 给出了采用传统下垂控制结合积分方式实现二次调频的仿真结果。仿真参数的设置为: 空载频率和电压分别为 $f_0=50.2 \text{ Hz}$ 、 $E_0=230 \text{ V}$, 有功—频率下垂系数为 $m_1=m_2=5 \times 10^{-5}$ 、 $m_3=m_4=m_5=$

1×10^{-4} , 无功—电压下垂系数为 $n_1=n_2=2.2 \times 10^{-3}$ 、 $n_3=n_4=n_5=4.4 \times 10^{-3}$, 积分系数 k 均为 10, 频率期望值为 50 Hz 。仿真条件设置为: $0 \sim 1 \text{ s}$ 采用集中式二次调频, $1 \sim 2 \text{ s}$ 模拟 MGCC 故障, 即切除二次调频单元, 2 s 后投入分散式二次调频控制, 3 s 时逆变器 2 处的本地负荷突增 4 kW 、 1 kvar 。

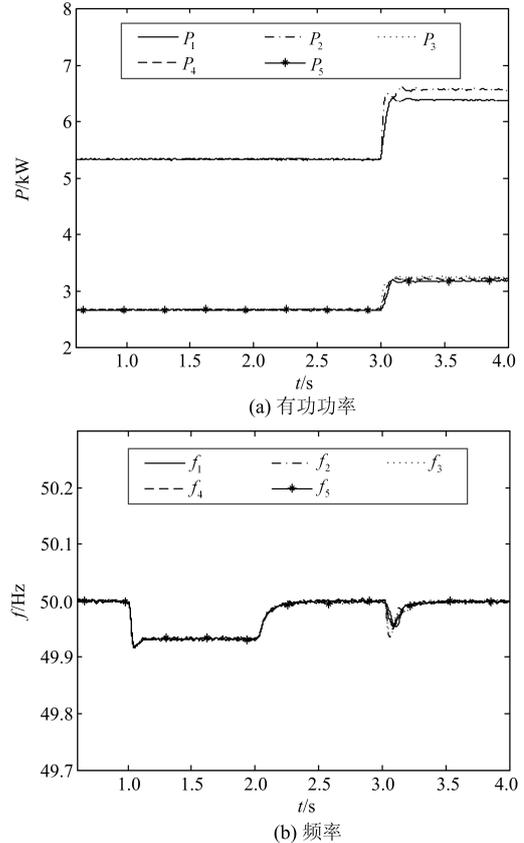


图 5 集中式与分散式二次调频仿真结果

Fig. 5 Simulation results of secondary frequency regulation based on centralized and decentralized control

由图 5 可以看出, $1 \sim 2 \text{ s}$ 时 MGCC 故障, 系统不具备二次调频能力, 系统频率明显低于期望值 50 Hz ; 2 s 后投入分散式二次调频, 系统频率重新恢复为 50 Hz , 3 s 时微网负荷突增, 由于各逆变器的频率动态响应过程不完全一致, 分散式二次调频导致有功功率不再按逆变器的额定容量成比例分配。

3.2 新型无差调频仿真分析

图 6 给出了本文所提出的新型无差调频方法的仿真结果。其中, 无功—电压控制部分参数与 3.1 节相同, 频率期望值仍为 50 Hz , 有功—频率部分的调节系数为 $b=12$ 。仿真条件设置为: 仿真时长 2 s , 其中 1 s 时逆变器 2 处的本地负荷突增 4 kW 、 1 kvar 。

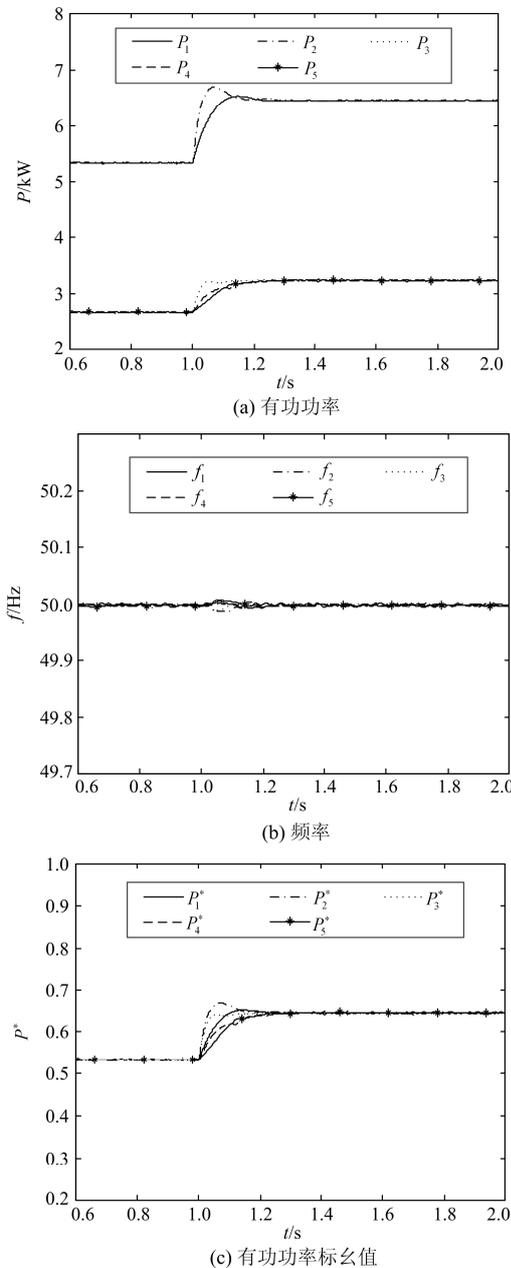


图 6 新型无差调频仿真结果

Fig. 6 Simulation results of novel zero-error frequency regulation

由图 6 可以看出, 系统处于稳态时, 各逆变器的有功功率标么值相等, 即有功功率是按照各逆变器的额定容量成比例分配的; 系统频率稳定在期望值 50 Hz, 1 s 时微网负荷突增, 频率只出现了短暂的微小波动, 并迅速恢复到 50 Hz。与图 5 相比可知: 本文所提出的无差调频方法频率调节速度快, 并且能实现有功功率的合理分配。

4 结论

本文提出了一种基于一致性算法的分布式无差

调频控制方法, 每台逆变器利用其本地信息及相邻逆变器的信息, 结合带权值的平均一致迭代算法实现了各逆变器有功功率标么值的快速一致收敛, 进而实现了有功功率在各逆变器间的比例分配, 同时保证了微网频率的无差调节。

参考文献

- [1] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [2] 黄宜平, 马晓轩. 微电网技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 320-328.
HUANG Yiping, MA Xiaoxuan. Research on microgrid technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 320-328.
- [3] 陈娜, 王劲松. 微电网模式控制器研制与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 115-120.
CHEN Na, WANG Jinsong. Development and application of microgrid's connect & off-grid device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 115-120.
- [4] 荆龙, 黄杏, 吴学智. 改进型微源下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 145-152.
JING Long, HUANG Xing, WU Xuezhi. Research on improved microsource droop control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 145-152.
- [5] 徐玉琴, 马焕均. 基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 103-107.
XU Yuqin, MA Huanjun. Parallel operation technology of inverters based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 103-107.
- [6] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 16-21.
CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research of operation control of micro-grid based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.
- [7] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [8] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.

- YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168.
- [9] 吴蓓蓓, 苏建徽, 张军军, 等. 用于微电网孤岛运行的逆变电源控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 1-5.
WU Beibei, SU Jianhui, ZHANG Junjun, et al. Control strategies of inverter in microgrid island operation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(1): 1-5.
- [10] SIMPSON-PORCO J W, SHAFIEE Q, DORFLER F, et al. Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7025-7038.
- [11] SHAFIEE Q, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Distributed secondary control for islanded microgrids—a novel approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 1018-1031.
- [12] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 6-11.
ZHENG Yongwei, CHEN Minyou, LI Chuang, et al. A microgrid control strategy based on adaptive drooping coefficient adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 6-11.
- [13] 纪良浩, 王慧维, 李华青. 分布式多智能体网络一致性协调控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [14] OLFATI-SABER 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.
- [15] REN W, BEARD R W, ATKINS E M. Information consensus in multivehicle cooperative control[J]. IEEE Control Systems, 2007, 27(2): 71-82.
- [16] XIAO L, BOYD S. Fast linear iterations for distributed averaging[C] // Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Hawaii, 2003: 4997-5002.

收稿日期: 2016-05-28; 修回日期: 2016-07-20

作者简介:

颜湘武(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统与微网技术、现代电力变换、新型储能与节能; E-mail: xiangwuy@ncepu.edu.cn

王星海(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统与微网技术; E-mail: xinghai_neptune@126.com

王月茹(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统与微网技术。E-mail: wyr_ncepu@126.com

(编辑 姜新丽)