

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.020

基于分散-分布式控制理念的微网等微增率 加速算法研究*

吴莹¹, 陈彬², 范元亮², 辛焕海^{1*}

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 福建电力科学研究院, 福建 福州 350003)

摘要:针对全分散控制收敛速度慢的问题, 基于分散-分布式控制理念, 提出了一种加速实现微网分布式电源等成本微增率的控制策略。该策略采用一致性算法, 在稀疏通信网络约束下加速实现了微网的经济调度。在该策略下, 分布式电源可以在分散、分布式控制两种模式下运行。同时分析了通信延时和通信故障对控制策略的影响。研究表明, 该策略有效加速了等微增率收敛过程, 该策略受通信延时和通信故障的影响很小。

关键词:微网; 分布式控制; 一致性算法; 通信延时

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)05-0608-06

Research of incremental cost consensus acceleration algorithm for microgrid based on decentralized-distributed control concept

WU Ying¹, CHEN Bing², FAN Yuan-liang², XIN Huan-hai¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 311027, China,

2. Fujian Electrical Power Research Institute, Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Aiming at the slow convergence rate of decentralized control, a distributed control strategy of microgrid was proposed based on the decentralized - distributed control concept. The optimal operation point of microgrid was realized in a fast convergence speed under communication constraints using consensus algorithm. Distributed generators can be operated in fully decentralized mode or decentralized-distributed mode. Simulation results indicate that the proposed distributed consensus algorithm is effect and that communication delay and communication failure only have a small impact on this control strategy.

Key words: microgrid; distributed control; consensus algorithm; communication delay

0 引言

在全球能源短缺和环境问题的推动下, 大量分布式新能源接入电网, 对电力系统结构、管理和控制方式都产生了影响^[1-2]。微网可对分布式电源进行统一控制管理, 从而加强分布式电源的可控性^[3-4], 近年来受到广泛关注。

分布式电源具有数量多、分散、灵活、随机等特点, 传统的集中控制模式越来越难以适应这种变化。此外, 集中控制对通信系统、中央处理器要求高^[5], 同时受延时、丢包影响大^[6], 而分散控制和分布式控制在这些方面存在优势, 更适合分布式发电控制系统。

分散控制不需要中央控制器, 也不借助任何通信线路, 仅仅通过各分布式电源本地控制单元实现控制。

收稿日期: 2015-12-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2015AA050202); 浙江省电力公司项目“多场景下主动配电网规划模型与方法研究”资助项目(SGTYHT/14-JS-190)

作者简介: 吴莹(1990-), 女, 浙江杭州人, 硕士研究生, 主要从事微网分布式协同控制方面的研究. E-mail: wuying1990@zju.edu.cn

通信联系人: 辛焕海, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: xinhh@zju.edu.cn

分散控制系统具有一定的自适应能力,各个本地控制单元可独立完成控制,各个单元之间也能够实现协调运行^[7]。但是分散控制一般难以达到经济最优点,或者需要很长时间才能过度到经济最优点。

分布式控制通过分布式的通信网络和各分布式电源的本地控制单元实现系统协调运行^[8]。分布式控制结合了集中式控制和分散控制的优点,既不需要复杂的中央处理器和包含复杂通信线路的通信网络,也能够较快实现分布式电源间的协调运行和经济最优^[9-10]。分布式控制将信息系统与电力系统融合,有效提高了微网系统的可控性与灵活性^[11-12]。文献[13]通过一种分布式的二次控制策略实现了微网中频率、电压的控制和系统无功功率的分配。文献[14]通过一致性算法实现了微网的经济分配,并进一步分析了发电机机组数量对算法收敛速度的影响。然而,上述分布式控制均对通信网络存在一个最低要求,即通信网络必须是强连通的,导致通信网络设计复杂。同时通信会产生信息传递的延时和传递信息量的丢包现象^[15]。延时、丢包的程度则和网络带宽、通信协议和通信组织的形式等因素有关。

结合分散控制和分布式控制系统的特点,本研究提出一种基于分散-分布式控制理念的等微增率加速算法。即在分散控制系统的基础上,添加稀疏通信网络,使相互之间存在通信线路的分布式电源,通过微增率信息的实时发送与接收,进行微增率一致性算法,实现等微增率的加速。各台分布式电源都可在有无通信两种模式下运行。

本研究首先提出一种基于微网分散-分布式控制理念的加速实现等微增率的控制策略;其次分析通信延时和通信线路故障对控制策略的影响;最后,通过仿真验证策略的有效性。

1 微网分散分层控制

孤立微网采用分散的三次分层控制策略,控制框图如图1所示^[16]。

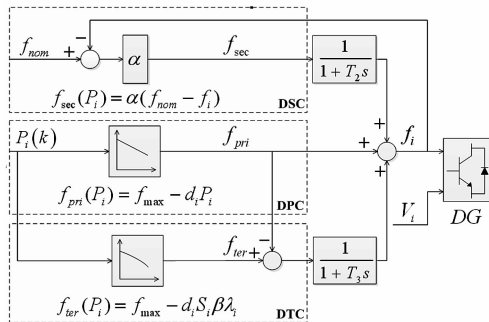


图1 微网的三次分层控制结构

其中一次控制策略采用传统的线性下垂控制,其表达式如下:

$$f_{pri}(P_i) = f_{max} - d_i P_i \quad (1)$$

式中: f_{max} —微网频率上限, d_i —线性下垂系数, P_i —分布式电源输出的有功功率。

二次控制仅借助各分布式电源的本地信息实现频率调节,二次控制表达式如下:

$$f_{sec}(\alpha, f_i) = \alpha(f_{nom} - f_i) \quad (2)$$

式中: α —增益系数, f_{nom} —微网系统额定频率, f_i —分布式电源输出端频率。

经济调度是电力系统的一个基本问题,是指在满足用电需求、电力系统约束和能量平衡,保持电力系统安全稳定运行的条件下,使系统运行于最经济运行点的优化问题。由拉格朗日乘子算法可知,当各台分布式电源的成本微增率一致时,系统的总成本最小,即电力系统运行于最经济的运行点。为了实现微网的经济调度,需要引入三次控制。

三次控制采用考虑成本微增率的非线性下垂控制实现微网的经济优化。然而,如果仅仅根据发电机自身的信息,即通过分散控制实现经济最优,会存在收敛速度慢的问题。所以在三次控制中引入通信网络,通过传递微增率信息和一致性算法实现等微增率的加速。

三次控制的表达式为:

$$f_{ter} = f_{max} - d_i S_i \beta \lambda_i^{[k+1]} \quad (3)$$

式中: f_{max} —微网频率上限, S_i —分布式电源的视在功率容量, d_i —下垂系数, $\lambda_i^{[k+1]}$ —各台分布式电源经过一致性算法后的成本微增率,一致性算法将在下文中详细说明, β —常数。

综合一次控制、二次控制和三次控制可以得到分布式电源频率控制量,如下式所示:

$$f_i = f_{pri} + f_{sec} / (1 + T_2 s) + (f_{ter} - f_{pri}) / (1 + T_3 s) \quad (4)$$

式中: T_2, T_3 —两个滤波器的时间常数。

2 等微增率加速算法

采用第一章中的微网分散分层控制结构,虽然可以达到微增率一致的经济最优运行点,但是由于三次控制采用的是全分散的控制方式,每台电源仅根据本地信息调节其出力,会存在收敛速度慢的问题。为了解决这个问题,考虑增加少量通信,使部分分布式电源之间相互传递成本微增率信息,加快各分布式电源达到微增率一致的收敛速度,算法具体介绍如下。

2.1 一致性算法

电力系统拓扑可用图 G 表示。 $G = (V, E)$ 表示一

个包含 $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 个节点和一系列 $E \subseteq V \times V$ 的边。节点 i 的邻接节点用 $N_i = \{j \in V \mid (i, j) \in E\}$ 表示。

每台分布式电源都表示为一个节点 V_i , 一致性算法如下式所示:

$$x_i^{(k+1)} = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j^{(k)} \quad (5)$$

式中: $x_j^{(k)}$ —第 k 次迭代时节点 j 的本地信息, $x_i^{(k+1)}$ —节点 i 在第 $k+1$ 次迭代时对 $x_i^{(k)}$ 的更新, d_{ij} —节点 i 和节点 j 之间的通信系数, n —分布式电源的节点数。

通信系数 d_{ij} 构成的系统通信矩阵为 $\mathbf{D}$ 矩阵, 则整个系统的一致性算法可以写成以下矩阵形式。

$$\mathbf{X}^{[k+1]} = \mathbf{D}\mathbf{X}^{[k]} \quad (6)$$

根据网络控制理论可知, 当 $\mathbf{D}$ 矩阵为一个行随机矩阵时, 最终迭代变量收敛至一致。 $\mathbf{D}$ 的选取方式有多种^[17-18], 根据文献[19], 可按式(7)对 $\mathbf{D}$ 矩阵进行选取:

$$d_{ij} = \begin{cases} 2/(n_i + n_j + 1), j \in N_i \\ 1 - \sum_{j \in N_i} 2/(n_i + n_j + 1), j \in N_i, i = j \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 当节点 i, j 之间不存在通信线路时, $\mathbf{D}$ 矩阵所对应的 d_{ij} 取值为 0, 则这两个节点不需要知道相互的微增率信息, 每个节点仅需知道通信网络中的相邻节点信息即可计算通信系数, 进行式(7)的算法, 因此算法是分布式的。

2.2 等微增率加速算法

全分散的控制方式会导致收敛速度非常慢, 所以引入通信网络和一致性算法, 通过微增率信息的迭代实现加速。

各台分布式发电机的成本微增率 λ_i 为一致性变量, 在三次控制中通过信息网络传递微增率信息, 进行一致性算法, 促使信息系统中相邻的分布式发电机更快达到等微增率点, 从而促进整个系统等微增率的加速。等微增率加速算法如下式所示:

$$\lambda_i^{[k+1]} = \sum_{j=1}^n d_{ij} \lambda_j^{[k]} \quad (8)$$

式中: $\lambda_i^{[k+1]}$ —分布式电源 i 在第 $k+1$ 次迭代时的成本微增率值; d_{ij} —系统通信矩阵 $\mathbf{D}$ 中的元素, 按式(7)进行选取。

在第 1 章所述的三次控制策略中, 如果仅仅通过非线性下垂控制, 即根据分布式电源稳态频率的一致性达到等微增率点, 会存在收敛速度慢的问题。而通过一致性算法, 使存在通信的分布式电源更快达到等微增率点, 可以有效加快三次控制中成本微增率的收敛

速度, 加速到达等微增率点。

一般情况下, 一致性算法最终能收敛存在通信网络必须强连通这个前提。为了满足强连通性的要求, 系统中不可以存在孤立的节点, 任何一个节点和其他节点之间都必须至少有一条通信, 导致通信网络设计较为复杂。

然而, 本研究采用的一致性加速算法对构建的通信网络拓扑没有特别的要求。这是因为, 在一致性加速算法中, 除了通过通信网络传递微增率, 还存在一个全局的频率信息, 即分布式电源不仅仅通过通信网络直接得到其他节点的成本微增率, 还通过系统频率间接得到了其他分布式电源的成本微增率。因此大大减少了算法对通信网络的依赖, 也避免了通信网络强连通的约束。

3 通信延时和通信故障的影响

3.1 通信延时

为了实现微网系统各分布式电源的协同控制和经济运行, 可以在各分布式电源的本地控制器之间进行有限的信息交换, 即利用少量的通信成本来换取更高的灵活性与可靠性。

然而通信过程中发生的丢包、延时、故障可能会对电力系统的安全稳定运行产生影响, 严重时甚至可能导致电力系统不稳定。一般为提高通信可靠性, 确保整个控制系统可靠工作, 可以从以下方面考虑: 设计高可靠性的通信网络, 包括编码方式、通道的选择, 采用多信道并存互为备用; 在通信失效或不稳定时所设计的系统应保证具有可用性。

考虑通信延时的等微增率加速算法如下式所示:

$$\lambda_i^{[k+1]}(t + \tau) = \sum_{j=1}^n d_{ij} \lambda_j^{[k]}(t) \quad (9)$$

式中: τ —延时时间, 包括计算延时和通信延时, 其值与处理器性能、通信传输介质、带宽等因素有关。

本研究提出的三次控制可以达到微网系统的最优运行点, 除了通过一致性算法强迫相邻机组达到等微增率, 还通过考虑成本微增率的下垂控制, 即通过系统频率这一全局量使分布式发电机收敛至等微增率点。而当通信系统发生延时, 各控制器检测到的系统频率信息并不受到影响, 因此三次控制应受延时影响较小。

3.2 通信故障和通信网拓扑变化

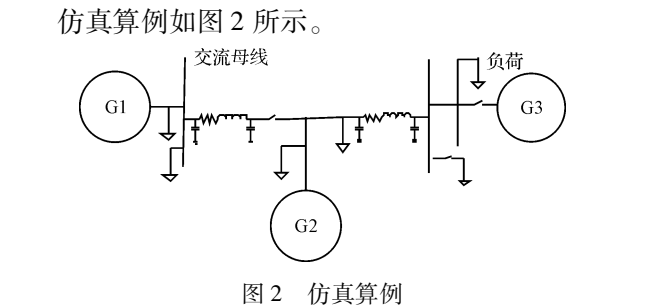
当部分通信网络故障, 通信断开, 导致通信拓扑发生变化, 也会对算法产生一些影响。当发生通信故障, 信号丢失等情况, 故障通信线路相连接的机组退出通信, 即与它相连的机组不再接受该机组的信息, 则会导

致系统收敛速度变化,变化程度取决于故障通信线路条数和故障通信线路所连接的机组特性。具体情况将在第4章中通过仿真说明。

4 仿真结果分析

4.1 负荷投切仿真

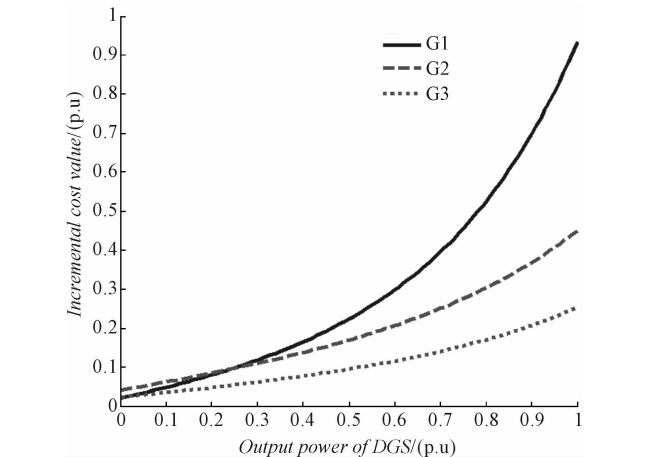
本研究选取的算例是一个三机的微网系统,算例首先对比了有无通信网络对微增率收敛速度的影响,验证提出的等微增率加速算法的有效性。然后进一步分析了通信延时和通信故障对算法的影响。



微网系统的初始负荷为1.8 MW,机组容量各为1 MW。系统的参数如下: $T=2\text{ s}$, $T_3=2.5\text{ s}$, $d_i=2$, $\alpha=20$, $\beta=1/3$, $f_{\max}=51\text{ Hz}$, $f_{\min}=49\text{ Hz}$ 。在20 s时投入0.3 MW负荷,在30 s时切出0.3 MW负荷。分别在分布式电源1、2和1、3之间加通信。发电机的成本微增率曲线如图3所示。

负荷投切的仿真结果如图4所示,全分散控制和存在通信网络的分布式控制下的各台分布式电源的成

本微增率变化曲线和系统频率变化曲线分别如图4(a)、4(b)所示。可见,两种控制都可以在系统负荷波动时维持微网频率稳定与经济运行。对比收敛速度,借助于通信网络的分布式控制在15 s之前已达到各台分布式电源的等微增率点,收敛速度显然快于分散控制,故通过等微增率加速算法确实有效加快了成本微增率的收敛速度。



为了验证算法对容量不相等的发电机组的适用性,本研究将机组1、2、3的容量分别设置为1 MW、0.8 MW、1.2 MW,其他参数不变,仍然在原通信网络下进行仿真验证,分散和有通信时的成本微增率曲线分别如图5(a)、5(b)所示。可见,存在通信时的成本微增率收敛速度显然快于分散控制的收敛速度,因此,本研究提出的算法对于不同容量的发电机同样适用。

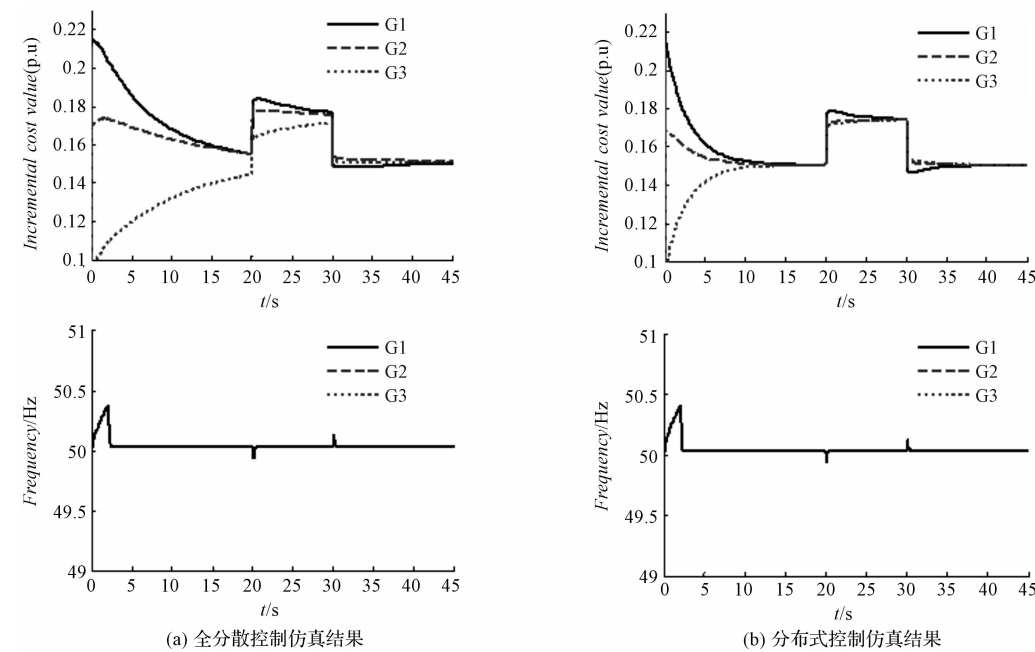


图4 仿真结果分析

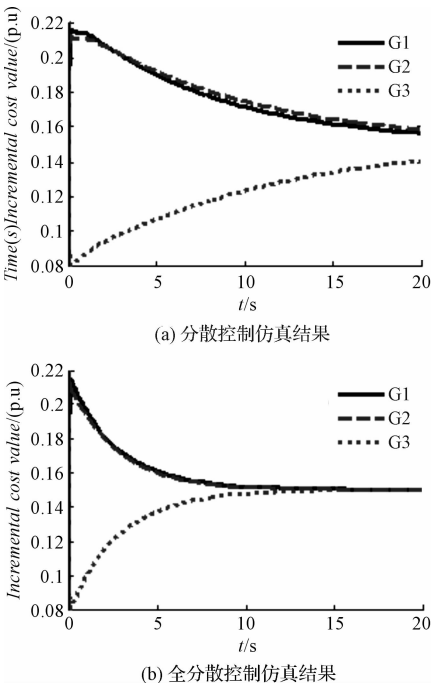


图 5 不同机组容量时的仿真对比图

4.2 延时影响仿真

上一节通过对比全分散控制和存在通信的分布式控制两种方式时成本微增率的收敛速度,证明了在微网分散控制中引入通信网络,通过等微增率加速算法可以有效减少微网到达经济最优运行点的时间。然而,由于添加了通信网络,算法可能会受到通信延时的影响,本节分析不同通信延时下的收敛情况。

在不同延时情况下,各台分布式电源最终都可以到达等微增率点,实现微网的经济最优,然而延时时间越短收敛速度越快。即延时对基于微网分层控制的分布式算法收敛性影响不大,对收敛时间会产生影响。三次控制中不同通信延时下的收敛时间如表 1 所示。

表 1 不同延时下的收敛时间

延时时间/s	收敛时间/s
无延时	13. 208
0. 002	13. 216
0. 011	13. 245
0. 020	13. 282
0. 110	13. 655
0. 200	14. 799

4.3 通信故障仿真

当通信网络发生通信故障,导致信号丢失等情况,将与故障通信线路连接的机组退出通信网络,即该线路所连接的机组不再接收相互的信号。

仿真首先在 4.1 节的通信网络下进行,当 2 s 时,分布式电源 1 和 3 之间的通信线路发生故障,分布式

电源 1、3 间的通信断开,而分布式电源 1 和 2 仍然通信。通信网络拓扑发生变化。同时各本地控制器立即重新计算各个通信元素 d_{ij} 的值,然后进行分布式的等微增率加速算法。对于机组 3,它不再进行等微增率加速算法,仅仅通过系统考虑成本微增率的下垂控制,根据系统频率量来调节机组的成本微增率。通信故障时的仿真结果如图 6 所示。

根据图 6 可知,当 2 s 时机组 3 退出通信,机组成本微增率曲线斜率发生变化,各台分布式电源的成本微增率变化率变小,即收敛速度变慢。当 5 s 时,通信故障恢复,收敛速度重新加快。

值得一提的是,若此时机组 1、2 之间的通信线路也发生了故障,则机组 1、2 相互之间也不能传递信息。微网中不存在可以传递信息的通信线路,各台机组本地控制器接收不到其他机组的信息,则机组本地控制器不再进行微增率一致性算法,微网运行于全分散模式。

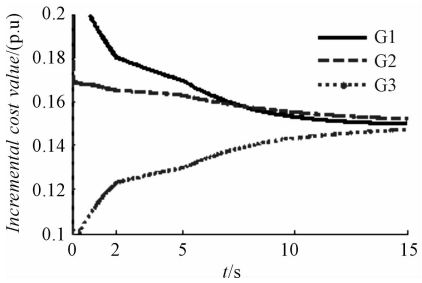


图 6 通信故障下的仿真结果

5 结束语

基于分散-分布式控制理念,本研究提出了一种加速实现微网分布式电源等成本微增率的控制策略。该策略仅借助稀疏通信网络,通过微增率一致性加速算法加速实现电力系统的经济运行。在该控制策略下,分布式电源可以在全分散和分散—分布式两种控制模式下运行。结果表明,提出的控制策略有效加快了分布式电源等微增率收敛速度。仿真验证说明了此种控制策略受通信延时和通信故障的影响比较小。该策略在分布式电源的控制中具有优势。

参考文献 (References) :

[1] 张 忠,王建学,曹晓宇. 基于负荷分类调度的孤岛型微网能量管理方法[J]. 电力系统自动化,2015,15(3):23-29.

[2] 康龙云,郭红霞,吴 捷,等. 分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J]. 电网技术,2011,34(12):43-47.

- [3] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):110-117.
- [4] 赵宏伟,吴涛涛. 基于分布式电源的微网技术[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(1):131-138.
- [5] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化,2009,33(24):78-82.
- [6] LOPES J, MOREIRAA C, MADUREIRA. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006,21(2):916-924.
- [7] 顾博川,黄缙华,刘菲. 分布式电源自律分散调度控制方法研究[J]. 电气技术,2015,16(2):23-26.
- [8] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
- [9] LIU W, GU W, SHENG W, et al. Liu W, Gu W, Sheng W, et al. Decentralized multi-agent system-based cooperative frequency control for autonomous microgrids with communication constraints[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014,5(2):446-456.
- [10] LIU S, WANG P X, LIU X. Impact of communication delays on secondary frequency control in an islanded microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015,62(4):2021-2031.
- [11] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化,2012,35(16):1-8.
- [12] QIN J, GAO W H, ZHENG X. Second-order consensus for multi-agent systems with switching topology and communication delay[J]. *Systems & Control Letters*, 2012,60(6):390-397.
- [13] 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.
- [14] Zhang Z, CHOW M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012,27(4):1761-1768.
- [15] XI J, YU Y, LIU Y G, et al. Guaranteed-cost consensus for singular multi-agent systems with switching topologies[J]. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, 2009,61(5):1531-1542.
- [16] 赵睿,章雷其,辛焕海. 微网孤岛运行的分散自趋优控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):30-36.
- [17] BINETTI G, ABOUHEAF M, LEWIS F, et al. Distributed solution for the economic dispatch problem[C]//*Control & Automation (MED), 2013, 21st Mediterranean Conference on. Chania: IEEE*, 2013:243-250.
- [18] XIN H, QU Z, SEUSS J, et al. A self-organizing strategy for power flow control of photovoltaic generators in a distribution network[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011,26(3):1462-1473.
- [19] XU Y, ZHANG W, HUG G, et al. Cooperative control of distributed energy storage systems in a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015,6(1):238-248.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

吴莹,陈彬,范元亮,等. 基于分散-分布式控制理念的微网等微增率加速算法研究[J]. 机电工程,2016,33(5):608-613.

WU Ying, CHEN Bing, FAN Yuan-liang, et al. Research of incremental cost consensus acceleration algorithm for microgrid based on decentralized-distributed control concept[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(5):608-613.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>