

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181487

维持局部孤网稳定切换的网源荷分布式协调控制方法

程维杰¹, 任祖怡², 刘金生¹, 李娜³, 殷明慧³, 张俊芳³, 柳伟³

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;
3. 南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 由于土地、发电资源等条件的限制, 现代大型城市主要由外部电网进行负荷供电, 形成大型受端城市电网。大型受端城市电网与主系统解列后, 功率不平衡会导致频率下降, 甚至可能引发网络崩溃, 维持其稳定切换以形成局部孤网供电具有重要的理论和现实意义。网源荷协调控制是维持局部孤网稳定切换的关键, 然而, 对于局部孤网, 尤其是非计划形成的局部孤网, 是较难实现集中式协调控制的。鉴于此, 引入分布式多代理系统, 提出一种无需集中控制器的网源荷分布式协调控制方法。有别于依赖集中控制器、且通信结构复杂的传统集中式控制方法, 分布式协调控制在仅依靠相邻节点通信的状况下, 通过改进的平均一致性算法获取电网运行全局参数, 实现网源荷全局协调控制。该控制方法能够较好地适应网络结构变化, 挖掘网源荷协调潜能。同时, 提出的改进平均一致性算法具有更好的收敛性能, 为局部孤网切换时的频率和电压控制提供快速全局数据支撑。基于PSCAD/EMTDC和Matlab仿真平台, 在典型工况下对网源荷协调控制策略进行分析和验证, 结果表明所提出的改进平均一致性算法和分布式网源荷协调控制方法能够维持局部孤网稳定切换。

关键词: 局部孤网; 网源荷协调控制; 分布式多代理系统; 改进平均一致性算法; 全局信息

Network-source-load distributed coordination control method for maintaining stable switching of local isolated networks

CHENG Weijie¹, REN Zuyi², LIU Jinsheng¹, LI Na³, YIN Minghui³, ZHANG Junfang³, LIU Wei³

(1. Shenzhen Power Supply Bureau CO., LTD., Shenzhen 518000, China; 2. Nanjing NR Electric CO., LTD., Nanjing 211102, China; 3. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Due to the limitations of land, power generation resources and other conditions, modern large-scale cities are mainly powered by external power grids, forming a large receiving end city power grid. After the large-scale urban power grid is disconnected from the main system, the power imbalance will lead to a decrease in frequency, which may even cause the network to collapse. It is of great theoretical and practical significance to maintain stable switching to form local isolated network power supply. Coordination control of network-source-load is the key to ensure stable switching of local isolated networks. However, it is difficult to realize centralized coordinated control for local isolated networks, especially for unplanned local isolated networks. In view of this, this paper introduces a distributed multi-agent system and proposes a distributed coordination control method of network-source-load without centralized controller. Apart from the traditional centralized control method which relies too much on the centralized controller and complex communication structure, the distributed coordination control obtains the global parameters of the grid operation through the improved average consistency algorithm under the condition of only relying on the communication of the adjacent nodes to realize the network-source-load global collaborative control. The proposed control method can adapt to the changes of network structure and tap the coordination potential of network-source-load. Meanwhile, the improved average consistency algorithm has better convergence performance, and provides fast global data support for frequency and voltage control of local isolated network switching. The network-source-load coordination control technology is analyzed and verified under typical working conditions based on PSCAD/EMTDC and Matlab simulation platforms. The results show that the proposed improved average consistency algorithm and distributed network-source-load coordination control method can guarantee the stable switching of local isolated networks.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607036).

Key words: local isolated network; coordinated control of network-source-load; distributed multi-agent system; improved average consistency algorithm; global information

0 引言

伴随着城市经济的发展, 负荷用电量不断增加的同时对电网供电可靠性及电能质量要求也在不断提升。但城市电网常常由于环保及发电厂址资源等因素的限制, 主要依靠外部网络输送电能, 受端特征明显^[1-2]。同时随着国家能源战略及电网规划的开展, 高受电比例的城市电网数目逐年增加。一般大型受端城市电网主要依靠关键联络线送电, 联络线一旦故障, 其局部进入孤网运行的风险很高^[3-4], 而高受电比例受端电网一旦解列, 由于功率不平衡造成较大功率缺额, 频率下降明显, 可能会发生网络崩溃, 维持局部孤网的稳定切换显得尤为重要^[5-6]。深入研究孤网切换时的网源荷协调控制技术可以提高系统运行控制水平, 防止局部系统崩溃瓦解, 防止大面积停电事故的发生。

随着电网结构的复杂程度不断增加, 原有的由调度中心统一判断、调度的集中式控制通信难度和管理难度逐渐增加, 同时该控制模式容易发生单点故障, 控制可靠性大大降低^[7-8]。文献[9]中集中式多代理系统的合理分散和集中使电网的运行控制层次更加清晰, 克服了传统集中式控制需要处理大量模型和数据的缺点, 减小了通信结构的压力。文献[10]在微电网不同运行状态下, 采用集中控制器决定各个变流器的下垂控制模式, 并将恒功率控制和电压/频率控制两种控制方法相结合验证微电网由正常状态过渡到紧急状态的可行性。但是由于集中式多代理控制仍对集中控制器要求较高, 一旦其发生故障, 控制系统仍将崩溃^[11-12]。而文献[13]基于分散式控制架构设计了微电网分层控制方法保障其经济运行。由于分散式控制没有统一控制器, 系统中的控制单元表现为若干个分散而相对独立的子控制机构, 各个子模块完成各自的运算功能, 与集中式控制相比, 减小了通信难度, 实现了“即插即用”的功能。但正是由于分散式控制采用局部控制器使得控制信息不完整, 难以满足全局目标, 整体协调困难^[14-15]。

为了能够灵活适应电网结构变化, 并从全局统筹优化控制, 逐渐将分布式控制引入电力系统领域。分布式控制具有无需集中控制器、通信难度小、结构适应性好、全局性好等优点^[16-17]。文献[18]提出微网孤岛运行状态下的分布式协调控制, 解决了由下垂控制引起的分布式电源电压频率偏差问题, 使其恢复到参考值并实现有功均分。文献[19]基于复杂动态网络理论, 利用分布式控制方法完成了智能

电网中的故障辨识、电压暂态稳定等多目标任务, 保障了智能电网的安全监测和优化运行。文献[20]提出了主动配电网分布式电压控制, 利用不完整网络信息保障全局电压稳定并完成最大化接入分布式电源的目标。文献[21]提出了一种基于多智能体系统的交直流混合电网自律分散控制策略。各智能体在仅与邻居通信, 交互电压、频率等状态信息的基础上, 通过多智能体一致性控制策略实现了各端换流站间有功功率的合理分配, 同时平抑了负荷波动。文献[22]基于多智能体系统的一致性理论, 设计了应用于电力传输网络负载变化场景下的分布式变频控制器, 实现了调节电网频率及降低发电成本的目的。但到目前为止, 分布式控制应用较多的是智能电网、微电网及主动配电网等领域, 而对于主网控制方面的应用研究则相对较少。

本文将分布式系统应用于主网控制领域, 结合主网在孤网切换时的机组及负荷时空分布和通信覆盖情况, 提出一种基于集中式信息和分散式局部信息相结合的电网、多个机组、多级负荷互动配合的网源荷分布式协调控制方法。

1) 构建面向局部孤网的网源荷分布式协调控制架构, 采用分布式多代理系统, 无需依赖集中控制器实现去中心化, 仅与相邻节点进行通信, 以降低通信难度并能够灵活应对网络结构变化。

2) 为了满足不含集中控制器的多代理间的信息交互需要, 提出一种改进的平均一致性算法, 以提升信息交互的收敛速度。

3) 提出维持孤网稳定切换的网源荷协调控制策略, 融合多机组出力协调、负荷多级减载等多种控制策略, 为重要负荷的可靠供电及局部电网的稳定运行提供支撑。

1 分布式多代理改进平均一致性算法

主网与大电网解列后形成孤网, 或者在孤网运行时发生故障或扰动, 这些都是非计划的突发状况。此时系统中不含集中控制器, 无法完整获取各条联络线及各节点的功率信息, 难以完成分布式多代理系统的控制目标。因而需要采用平均一致性算法, 分享各相邻节点信息获取重要的全局信息, 完成集中控制器的工作内容。

1.1 平均一致性算法

1) 节点信息更新

本文使用一种基于离散信息的平均一致性算法取代传统的集中式控制算法。在某一网络中, 各节点信息可以通过信息交互系数不断迭代从而取得平均值, 在此基础上获得全局信息, 具体表达如式(1)。

$$s_i[k+1] = \sum_{j=1}^n e_{ij} \cdot s_j[k], i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

节点 i 将其信息值 s_i 不断更新为与相邻节点间的信息加权线性组合, 最终获得全局的平均一致信息, 表达式为

$$s_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_j[0], i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

将式(1)用矩阵形式表述为

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{E}\mathbf{S}^k \quad (3)$$

式中: k 是离散时间下的迭代次序; e_{ij} 是信息交互系数矩阵 \mathbf{E} 中的元素, 由网络拓扑结构决定; \mathbf{S}^{k+1} 是节点信息矩阵。

2) 信息交互矩阵

信息交互矩阵与网络结构有关, 不同的系数矩阵元素确定方法对于信息分享的迭代次数及计算速度有很大影响, 所以合理设置信息交互矩阵尤为重要。文献[23]提出了一种 Metropolis 法设置矩阵元素, 具体表达式如式(4)。

$$e_{ij} = \begin{cases} 1 - [\max(n_i, n_j) + 1], & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 连通} \\ 1 - \sum_{j \in N_i} 1 / [\max(n_i, n_j) + 1], & j = i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: n_i 和 n_j 分别是节点 i 和节点 j 相邻节点的数目, $\max(n_i, n_j)$ 为相邻节点数目中的较大值; N_i 为与节点 i 相邻的节点集合, $j \in N_i$ 表示节点 j 与节点 i 相邻。

根据 Metropolis 方法制定迭代矩阵, 各节点可以局部调整迭代系数以适应系统配置变化, 同时能保证信息发现过程的稳定性。

1.2 改进平均一致性算法

为了提高 Metropolis 方法的收敛速度, 本文提出了一种改进平均一致性算法。每个节点用邻居值的加权平均值 $(n_i+n_j)/2$ 更新其局部变量, 并引入收敛系数 δ 增加相邻节点值与其自身之间的局部差异, 从而获取更好的收敛速度。改进一致性算法的迭代矩阵表达式如式(5)。

$$e_{ij} = \begin{cases} \frac{\delta}{(n_i + n_j)/2}, & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 连通} \\ 1 - \sum_{j \in N_i} \frac{\delta}{(n_i + n_j)/2}, & j = i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中, δ 是改进一致性算法的收敛系数, 且 $0 < \delta < 1$, δ 很接近 1。

收敛系数 δ 的合理选择对改进算法的收敛速度有很大的影响。本文利用 Matlab 在 0 到 1 之间以 0.0001 为间隔选择收敛速度最快时的最优收敛系数 δ , 并与系数 δ 在其他取值时的算法收敛速度对比, 说明合理选择收敛系数的必要性。

基于上述方法计算得到的信息交互系数矩阵的各个元素满足以下条件:

$$\begin{cases} \sum_i e_{ij} = 1 \\ \sum_j e_{ij} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

2 网源荷分布式协调控制

当局部电网脱离大电网后, 功率不平衡, 频率开始下降。根据频率的下降幅度判断实施不同的协调控制策略(网源荷协调控制、网源协调控制), 主要区别在于是否需要减负荷, 控制步骤如图 1 所示。

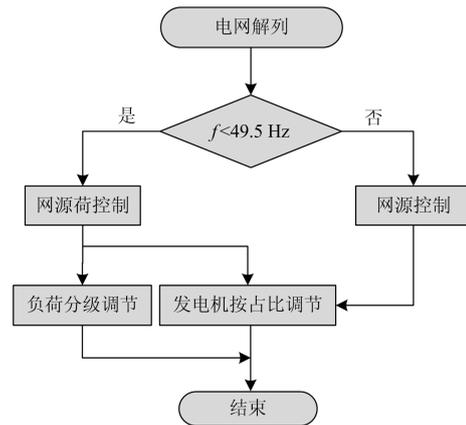


图 1 网源荷分布式协调控制步骤

Fig. 1 Distributed coordination control steps of network-source-load

2.1 全局信息分享

当主网与大电网解列后, 包含节点数目和功率缺额等在内的电网信息将发生改变, 同时非计划形成的局部孤网不含集中控制器, 无法获取正确的全局信息。本文通过改进的平均一致性算法依靠相邻节点通信获取包括节点数目、功率缺额和备用容量等在内的全局信息, 在此基础上实施网源荷协调控制策略。分布式信息分享流程如图 2 所示。

1) 当式(3)由节点 i 预定义的序列号初始化时, 此时式(3)将会收敛到平均值 i/n , 则最终的节点数目就可以用 $i/(i/n)$ 求得。

$$\begin{cases} S_{ai} = i/n \\ n = i/S_{ai} \end{cases} \quad (7)$$

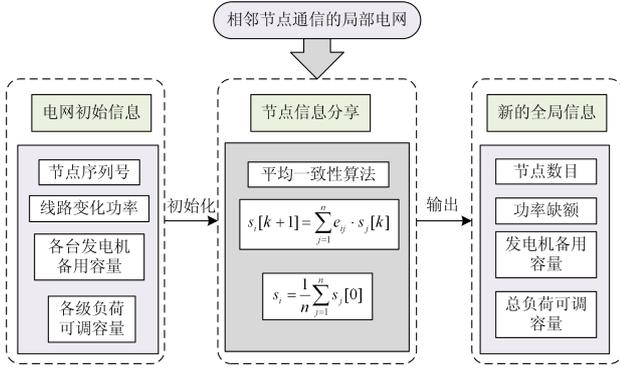


图 2 分布式信息分享流程

Fig. 2 Distributed information sharing process

当电网结构发生变化时，节点预定义的序列号初始化时将会收敛到新的平均值 $i/(n+\Delta n)$ 或 $i/(n-\Delta n)$ ，此时电网的节点数目也将会由 n 变为 $n \pm \Delta n$ 。

2) 当式(3)由联络线的功率变化量初始化时，此时式(3)将会收敛到平均功率缺额，则最终的功率缺额就可以用节点数目和平均功率缺额的乘积得到。

$$\begin{cases} \bar{S}_q = \sum_{y=1}^n \Delta S_{line_y}^{[0]} / n \\ S_q = n \bar{S}_q \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\Delta S_{line_y}^{[0]}$ 是各条联络线的功率变化； \bar{S}_q 是平均功率缺额； S_q 是总功率缺额。

3) 与此类似，当式(3)由各台发电机组的备用容量初始化时，此时式(3)将会收敛到平均备用功率，则最终的备用功率就可以用节点数目和平均备用功率的乘积得到。

$$\begin{cases} \bar{S}_b = \sum_{y=1}^n (S_{r_y}^{[max]} - S_{r_y}^{[0]}) / n \\ S_b = n \bar{S}_b \end{cases} \quad (9)$$

式中： $(S_{r_y}^{[max]} - S_{r_y}^{[0]})$ 是各台发电机组的备用容量； \bar{S}_b 是发电机组平均备用容量； S_b 是发电机组备用容量总和。

4) 在减负荷时需要依据负荷的重要等级合理减载，因而为了在减负荷时考虑负荷等级，引入负荷调节系数计算最大可切负荷量。当式(3)由各级负荷的可切量初始化时，式(3)将会收敛到平均可切负荷量，则最终的可切负荷总量就可以用节点数目和平均可切负荷量的乘积得到。

$$\begin{cases} \bar{S}_k = \sum_{y=1}^n \varepsilon_{L_y} S_{L_y} / n \\ S_k = n \bar{S}_k \end{cases} \quad (10)$$

式中： ε_{L_y} 与负荷等级相对应，一级负荷为 0，表示一级负荷不可切；二级负荷系数对应为 0.5，部分二级负荷可切；三级负荷系数对应为 1，全部三级负荷可切； S_{L_y} 是第 y 个负荷的实际负载量； \bar{S}_k 是平均最大可切负荷量； S_k 是最大可切负荷量。

2.2 网源荷分布式协调控制策略

在获得节点数目、功率缺额、备用容量和可切负载量等信息后，通过频率判断进行网源荷协调控制，具体分布式协调频率控制策略如图 3 所示。

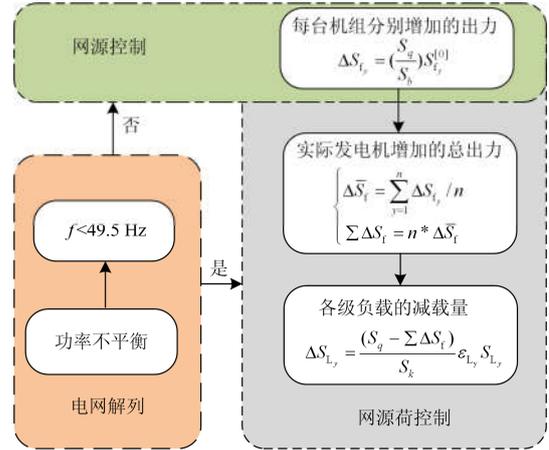


图 3 分布式协调频率控制策略

Fig. 3 Distributed coordinated frequency control strategy

1) 网源分布式协调控制

当高受电比例电网脱离大电网孤网运行时，会形成一定的功率缺额，若系统频率未减小到 49.5 Hz 时，即此时的功率缺额较小，依靠发电机组的可调容量就可以调节功率平衡使电网恢复至初始频率。

根据功率缺额在备用容量中的占比 S_q/S_b ，算得每台机组协调增加的出力。

$$\Delta S_{r_y} = \left(\frac{S_q}{S_b}\right) S_{r_y}^{[0]} \quad (11)$$

式中： $S_{r_y}^{[0]}$ 是第 y 个发电机的备用容量； ΔS_{r_y} 为第 y 个发电机组的实际协调增量。

2) 网源荷分布式协调控制

若局部孤网运行时系统频率下降幅度较大，减小至 49.5 Hz 以下，此时的功率缺额较大，不仅需要发电机控制，同时也需要减负荷进行协调控制。

发电机控制与式(11)一致，根据功率缺额在备用容量中的占比 S_q/S_b 增加发电机的出力；在此基础上根据改进平均一致性算法得到实际发电机增加的出力：

$$\begin{cases} \Delta \bar{S}_f = \sum_{y=1}^n \Delta S_{r_y} / n \\ \sum \Delta S_{r_y} = n \Delta \bar{S}_f \end{cases} \quad (12)$$

与发电机组出力分配相类似, 根据负荷实际减载总量在最大可调负荷总量中的占比, 算得每个负荷的协调减载量:

$$\Delta S_{L_y} = \frac{(S_q - \sum \Delta S_f)}{S_k} \varepsilon_{L_y} S_{L_y} \quad (13)$$

式中: $\varepsilon_{L_y} S_{L_y}$ 为第 y 个负荷的可减载量; $S_q - \sum \Delta S_f$ 为负荷实际减载总量; ΔS_{L_y} 为第 y 个负荷的协调减载量。

3 仿真实验

为了验证改进一致性算法和网源荷协调控制策略的有效性和鲁棒性, 本文以某地区电网为例进行仿真实验。

某地区电网结构如图 4 所示: 以三相电源模型作为与主网相连的外部电网模型, 配有相应电压等级的变压器若干, 并以此作为区域电网分区标准, 将其分为 3 个片区。同时图 4 包含 4 个发电机组模型, 每台发电机组配有一台变压器为相应片区负载供电。整个电网共 28 个负荷节点, 系统频率为 50 Hz。

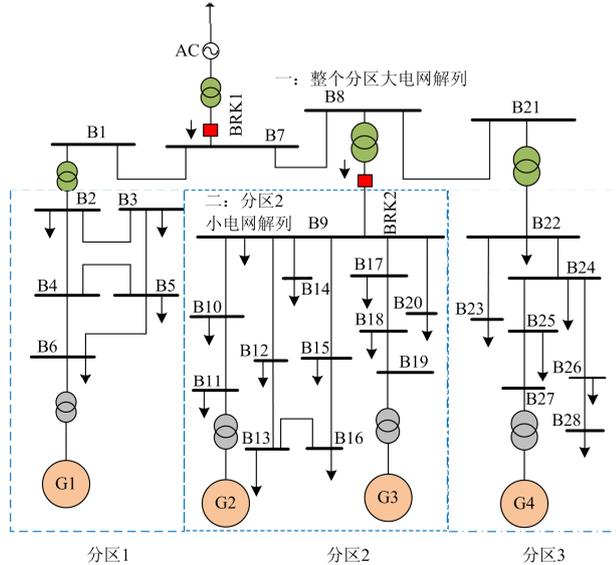


图 4 某地区电网结构图

Fig. 4 Structural diagram of a regional power grid

本文重点研究维持较高受电比例受端电网和局部小电网离网稳定切换的网源荷分布式协调控制策略, 仿真场景描述如表 1 所示。

仿真算例中的电网各节点依据电力线载波通信, 因而通信拓扑和电力拓扑是一样的。基于图 4 的地区电网结构图, 仅相邻节点通信, 给出与之相对应的地区通信网络拓扑结构图, 如图 5 所示。

表 1 仿真场景参数

Table 1 Simulation scene parameters

场景一:	场景描述	主网发生故障与外部电网解列, 对该孤网切换场景执行网源荷协调控制操作								
高受电比例受端电网孤网切换	目的	验证网源荷分布式协调控制方法的有效性								
发电机/MW	分区一	分区二			分区三					
	G1/135	G2/150	G3/135	G4/120						
负荷参数/MW	一级	二级	三级	一级	二级	三级	一级	二级	三级	
	72	22	18	240	20	40	127	4	19	
场景二:	场景描述	片区 2 局部小电网与外部电网解列, 在小电网孤网切换场景下实现网源荷协调控制								
局部小电网孤网切换	目的	验证网源荷分布式协调控制方法的实用性								
发电机/MW	分区二	G2/150, G3/135								
负荷参数/MW	一级	二级	三级							
	240	20	40							

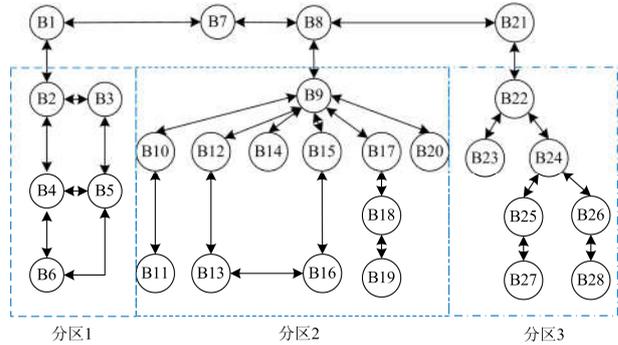


图 5 地区电网通信拓扑结构图

Fig. 5 Communication topology diagram of a regional power grid

3.1 仿真算例 1: 高受电比例受端电网孤网切换场景

假设在初始状态某区域主网与外部电网相连并且运行稳定, 在 2 s 时发生故障与外部电网解列形成孤网, 此时对该区域孤网切换场景进行网源荷协调控制。

3.1.1 改进平均一致性算法收敛性验证

依据改进一致性算法中的式(3)和式(5)分享得到全局信息, 包括全局节点数、功率缺额和发电机的备用容量及可切负荷总量。利用 Matlab 选择最优系数 δ 提高算法收敛速度, 并得到一般系数与最优系数情况下的收敛曲线如图 6 和图 7 所示。

对比图 6 和图 7 发现, 合理选择收敛系数 δ 后, 改进平均一致性算法收敛速度明显加快。同时根据式(6)一式(10)中的计算式求得相应全局信息, 如表 2 所示。

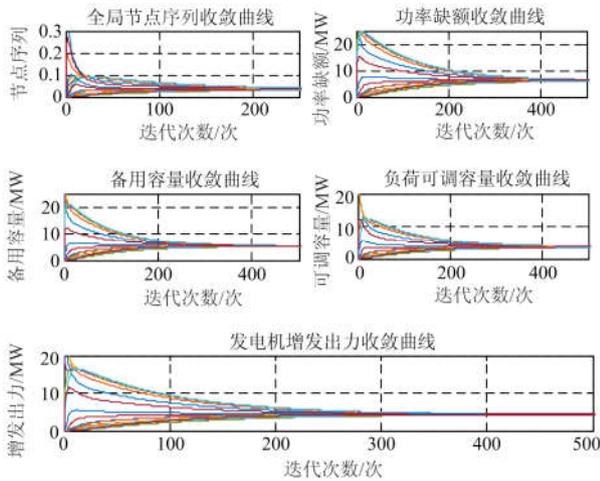


图 6 改进前信息交互收敛曲线

Fig. 6 Unimproved information interaction convergence curve

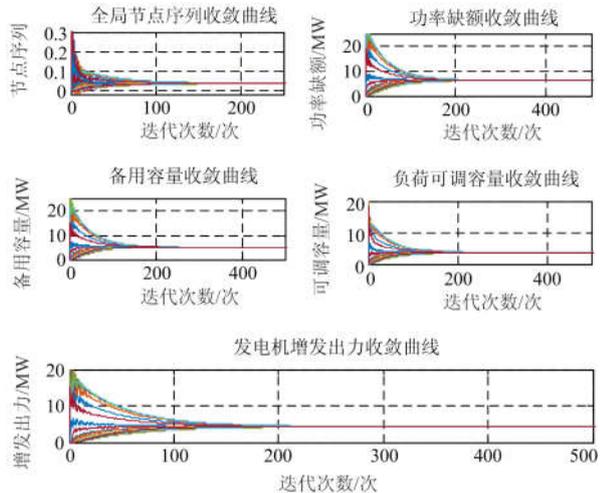


图 7 改进后信息交互收敛曲线

Fig. 7 Improved information interaction convergence curve

表 2 算例 1 全局信息

Table 2 Global information of example 1

节点数目	27
功率缺额/MW	174
备用容量/MW	147
可调负荷总量/MW	100
实际发电机增加出力/MW	120

3.1.2 网源荷协调控制方法有效性验证

依据网源荷分布式协调控制策略,利用 PSCAD 仿真模型得到高受电比例受端电网离网切换时的频率变化曲线、发电机出力变化曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,在 2 s 前系统运行稳定,此时的受电比例较高,达到 30.96%。在 2 s 时,区域电网与外部电网断开连接,频率下降较快。尽管发电机

已经增加了部分出力(在原有基础上增发 30%),但在 3.5 s 时频率仍下降至 49.5 Hz,由网源荷分布式协调控制策略可知,此时需要切负荷。各级切负荷量在分享得到的发电机增发出力(由图 7 和表 2 可知)的基础上,根据式(12)和式(13)计算得到。各个分区各级切负载量及发电机出力变化如表 3 所示。

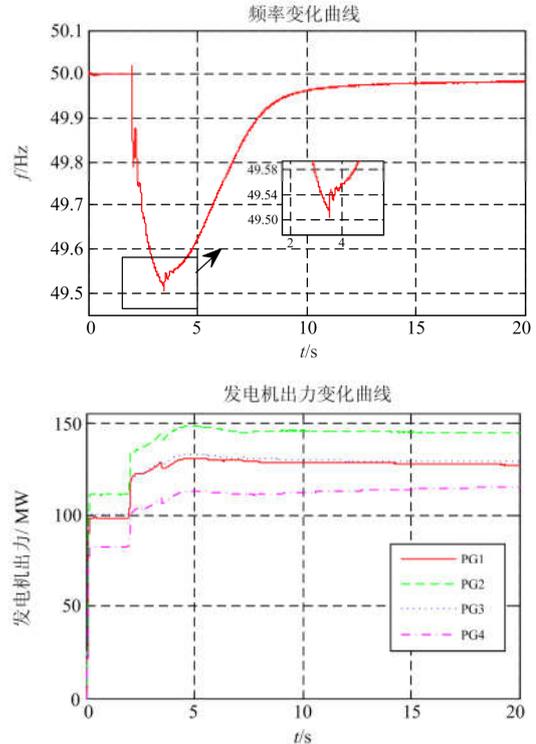


图 8 算例 1 协调频率控制曲线

Fig. 8 Coordinated frequency control curve of example 1

表 3 各区各级切负载量

Table 3 Multi-stage load shedding of each partition

发电机	增发出力/MW	分区	切二级负荷/MW	切三级负荷/MW	切总负荷/MW
GEN1	30.5	1	5.3	8.7	14
GEN2	33.5	2	6	24	30
GEN3	29.3	3	1	9	10
GEN4	26.7				

根据计算得到的各级切负荷量进行减载,在切去约 10%的负载后系统频率恢复良好,在 15 s 时频率已经基本恢复正常。同时发电机出力在切负荷时刻有所下降,之后出力较为平稳。

3.2 仿真算例 2: 局部小电网孤网切换场景

与仿真算例 1 类似,假设在初始状态局部小电网与外部电网相连并且稳定运行,在 2 s 时片区 2 局部小电网与外部电网解列形成孤网,此时在小电网孤网切换场景下进行网源荷协调控制。

3.2.1 改进平均一致性算法结构适应性验证

依据改进的分布式信息分享方法, 分享全局信息得到新的节点数、功率缺额、备用容量及可切负荷量, 并在 Matlab 中得到相应的收敛曲线和全局信息, 如图 9 和表 4 所示。

由图 9 和表 4 可知: 当故障网络发生改变时, 改进的平均一致性算法能够较好地适应网络结构变化, 及时更新节点数目等相关信息。

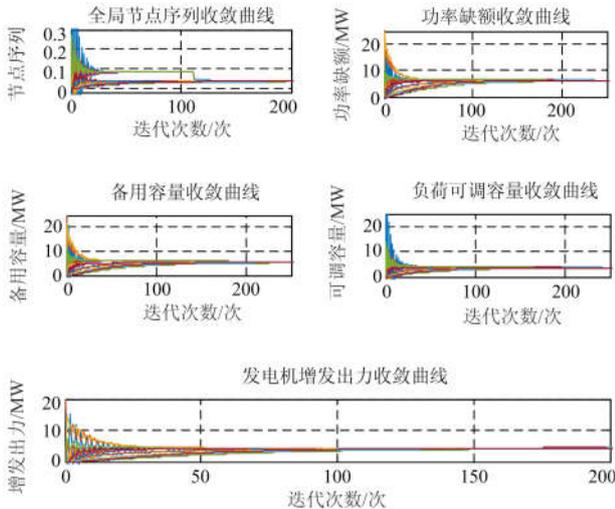


图 9 算例 2 信息交互收敛曲线

Fig. 9 Information interaction convergence curve of example 2

表 4 算例 2 全局信息

Table 4 Global information of example 2

节点数目	12
功率缺额/MW	80
备用容量/MW	73
可调负荷总量/MW	50
实际发电机增加出力/MW	52

3.2.2 网源荷协调控制方法实用性验证

依据网源荷分布式协调控制策略, 利用 PSCAD 仿真模型得到相应的频率变化曲线、发电机出力变化曲线, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 2 s 前系统运行稳定。2 s 时, 分区 2 片网与外部电网断开连接形成小电网孤网, 频率下降, 该片区两台发电机的出力在原有基础上增发 27.2%, 但在 3 s 时频率仍跌至 49.5 Hz。由网源荷分布式协调控制策略计算得到在切负载 28 MW(包括二级负载 5.6 MW, 三级负载 22.4 MW)后, 频率未跌落至 49.5 Hz 以下, 并在 12 s 时基本恢复正常。

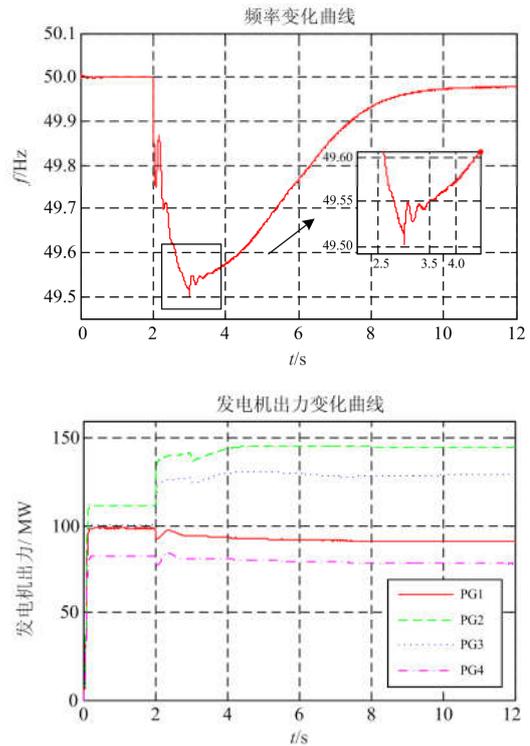


图 10 算例 2 协调频率控制曲线

Fig. 10 Coordinated frequency control curve of example 2

3.3 仿真算例 3: 局部小电网孤网切换及电源投入场景

与仿真算例 2 类似, 假设在初始状态局部小电网与外部电网相连并且稳定运行。在 2 s 时分区 2 局部小电网与外部电网解列形成孤网, 同时此刻增设额定容量为 150 MW 的新电源节点投入运行, 标记为节点 B29, 对该小电网孤网切换及电源投入场景进行网源荷协调控制。相应通信拓扑结构图如图 11 所示。

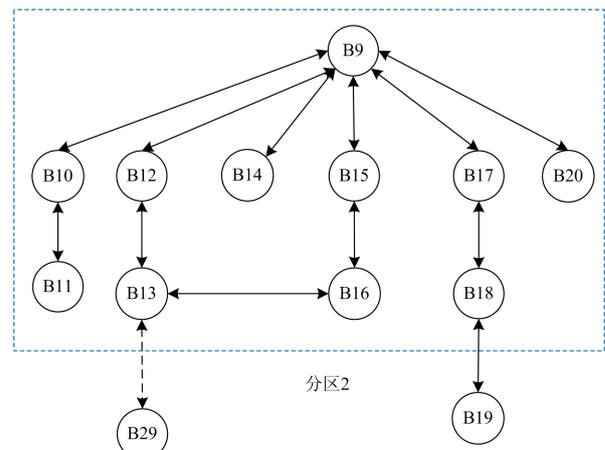


图 11 算例 3 通信拓扑结构图

Fig. 11 Communication topology diagram of example 3

3.3.1 改进平均一致性算法即插即用性验证

依据改进的平均一致性信息分享方法, 在新电源节点接入后, 分享全局信息得到新的节点数、功率缺额、备用容量及可切负荷量, 并在 Matlab 中得到相应的收敛曲线和全局信息, 如图 12 和表 5 所示。

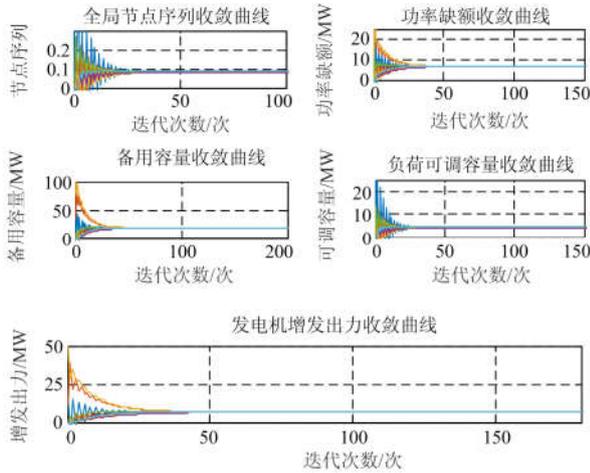


图 12 算例 3 信息交互收敛曲线

Fig. 12 Information interaction convergence curve of example 3

表 5 算例 3 全局信息

Table 5 Global information of example 3

节点数目	13
功率缺额/MW	80
备用容量/MW	223
可调负荷总量/MW	50
实际发电机增加出力/MW	80

由图 12 和表 5 可知: 改进的平均一致性算法能够满足电网通信结构变化和元件即插即用的要求, 及时更新节点数目等相关信息。

3.3.2 网源荷协调控制方法即插即用性验证

依据网源荷分布式协调控制策略, 利用 PSCAD 建立片区 2 电网增设电源节点后的仿真模型, 并得到相应的频率变化曲线、发电机出力变化曲线, 如图 13 所示。

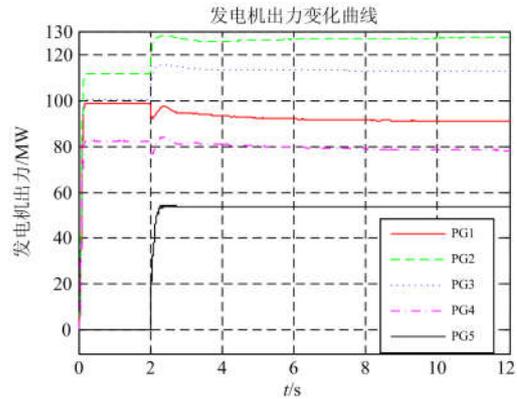
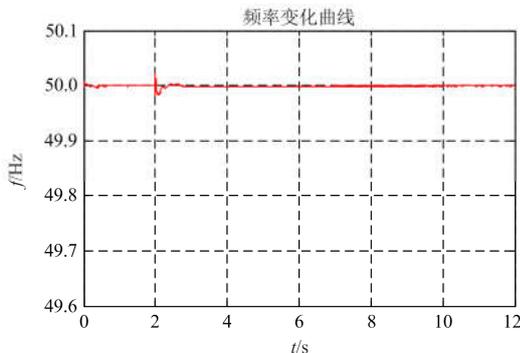


图 13 算例 3 协调频率控制曲线

Fig. 13 Coordinated frequency control curve of example 3

由图 13 与图 10 对比可知, 图 13 中 2 s 前系统运行稳定。2 s 时, 分区 2 片网与外部电网断开连接形成小电网孤网, 但由于新电源机组接入保证了频率的稳定性, 不需要进行切负荷操作。各台机组依据各自备用容量, 按照式(11)协同增发: 2 号发电机增发 14 MW; 3 号发电机增发 12 MW; 5 号发电机增发 54 MW。

3.4 小结

由算例 1 和算例 2 离网切换场景下的电网频率和发电机出力变化曲线可知, 基于改进平均一致性算法的网源荷分布式协调控制策略能够最大程度满足局部电网离网后的功率需求, 保证电网频率变化保持在合理范围内。同时由算例 3 验证了网源荷分布式协调控制方法能够适应网络结构变化, 满足元件即插即用的要求。

4 结论

本文提出了一种维持局部电网离网稳定切换的网源荷分布式协调控制方法, 将分布式多代理系统应用于主网孤网切换时的频率控制。基于改进平均一致性算法选取最优收敛系数分享获取全局信息, 提升了信息交互的收敛速度, 提高了分布式控制策略的实效性。利用 PSCAD/EMTDC 和 Matlab 在几种工况下对所提网源荷分布式协调控制策略进行了仿真验证和分析, 信息分享的良好适应性和电网频率的合理变化证明了分布式协调控制方法的有效性和实用性。

参考文献

[1] 黄欣, 左郑敏, 孙雁斌, 等. “十三五”广东可接纳西电力研究[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 18-23.
HUANG Xin, ZUO Zhengmin, SUN Yanbin, et al. Research on ability of Guangdong province accepting

- western electricity in 13th Five-year Plan[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(7): 18-23.
- [2] 屈克庆, 李文旗, 赵晋斌, 等. 孤岛微网不平衡负荷下控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(11): 8-14. QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinbin, et al. Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(11): 8-14.
- [3] 陈磊, 王永庆, 杨昊. 电网安全分析与仿真技术的现状分析及发展趋势研究[J]. *智慧电力*, 2017, 45(8): 33-38. CHEN Lei, WANG Yongqing, YANG Hao. Study on current situation and development trend of power grid security analysis and simulation technology[J]. *Smart Power*, 2017, 45(8): 33-38.
- [4] 王伟, 马鸿杰, 金敏杰. 大受端城市电网若干安全问题及对策[J]. *电力与能源*, 2011, 1(1): 26-29. WANG Wei, MA Hongjie, JIN Minjie. Several security issues and countermeasures of large receiving-end urban power grids[J]. *Power and Energy*, 2011, 1(1): 26-29.
- [5] 陈刚, 丁理杰, 李旻, 等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(7): 76-82. CHEN Gang, DING Lijie, LI Min, et al. Stability characteristics of southwest China power grid after asynchronous interconnection[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(7): 76-82.
- [6] 张培高. 孤网频率稳定与控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(15): 143-149. ZHANG Peigao. Research on frequency stability and control strategy in isolated power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(15): 143-149.
- [7] HAIDER S, LI G, WANG K. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 111-118. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.
- [8] 范其丽, 郑晓茜, 王璞, 等. 基于混合储能动态调节的独立混合微电网分布式协调控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(7): 105-114. FAN Qili, ZHENG Xiaoxi, WANG Pu, et al. Decentralized control for autonomous hybrid microgrid with hybrid storage system dynamical regulating[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(7): 105-114.
- [9] 阮博, 俞德华, 李斯吾. 基于一致性的微网分布式能量管理调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(15): 23-28. RUAN Bo, YU Dehua, LI Siwu. Consensus algorithm based distributed energy management strategy of microgrids[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(15): 23-28.
- [10] 刘红进, 袁斌, 戴宏伟, 等. 多代理系统及其在电力系统中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2001, 25(19): 45-52. LIU Hongjin, YUAN Bin, DAI Hongwei, et al. Multi-agent system and its application in power systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(19): 45-52.
- [11] 吴云亮, 肖峥, 闫秉科, 等. 微电网协调频率和电压控制策略研究[J]. *智慧电力*, 2017, 45(2): 15-20. WU Yunliang, XIAO Zheng, YAN Bingke, et al. Coordinated frequency and voltage control strategy for microgrid[J]. *Smart Power*, 2017, 45(2): 15-20.
- [12] 王硕君, 钟朝露, 陈劲, 等. 一种微电网并/离网运行模式统一控制策略[J]. *广东电力*, 2017, 30(6): 55-61. WANG Shuojun, ZHONG Chaolu, CHEN Jin, et al. Unified control strategy for grid-connection and island operation mode of micro-grid[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(6): 55-61.
- [13] 邓虹, 沈丹涛, 杨秀, 等. 多代理技术在微网保护中的实现[J]. *华东电力*, 2014, 42(8): 1520-1526. DENG Hong, SHEN Dantao, YANG Xiu, et al. Implementation of multi-agent technology in microgrid protection[J]. *East China Electric Power*, 2014, 42(8): 1520-1526.
- [14] 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.
- [15] DÍAZ N L, LUNA A C, VASQUEZ J C, et al. Centralized control architecture for coordination of distributed renewable generation and energy storage in islanded AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(7): 5202-5213.
- [16] ABDELAZIZ M M A, SHAABAN M F, FARAG H E, et al. A multistage centralized control scheme for islanded microgrids with PEVs[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5(3): 927-937.
- [17] XIN Huanhai, ZHAO Rui, ZHANG Leiqi, et al. A distributed hierarchical control structure and self-optimizing control strategy for FP type DGs in islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(1): 3-5.
- [18] GUERRERO J M, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS

- inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [19] GUERRERO J M, MATAS J, DE VICUNA L G, et al. Distributed control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [20] YANG H, LI S, LI Q, et al. Hierarchical distributed control for decentralized battery energy storage system based on consensus algorithm with pinning node[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 52-60. DOI: 10.1186/s41601-018-0081-5.
- [21] LU X, YU X, LAI J, et al. A novel distributed secondary coordination control approach for islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2726-2740.
- [22] 王新生, 张华强. 微电网分布式协调控制策略研究[J]. 电气传动, 2016, 46(5): 66-69.
WANG Xinsheng, ZHANG Huaqiang. Research on distributed cooperative control strategy for microgrid[J]. Electric Drive, 2016, 46(5): 66-69.
- [23] YANG C, GUAN Z H, LIU Z W, et al. Wide-area multiple line-outages detection in power complex networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 79: 132-141.
- [24] 王笑雪, 徐弢, 王成山, 等. 基于 MAS 的主动配电网分布式电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2918-2926.
WANG Xiaoxue, XU Tao, WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in active distribution networks utilizing multiple agent system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2918-2926.
- [25] 高扬, 艾芊, 郝然, 等. 交直流混合电网的多智能体自律分散控制[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1158-1164.
GAO Yang, AI Qian, HAO Ran, et al. Autonomous decentralized control of multi-agent system for AC/DC hybrid grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1158-1164.
- [26] ANDREASSON M. Control of multi-agent systems with applications to distributed frequency control power systems[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2013.
- [27] XIAO L, BOYD S, KIM S J. Distributed average consensus with least-mean-square deviation[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2007, 67(1): 33-46.

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2019-01-10

作者简介:

程维杰(1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

任祖怡(1972—), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制;

刘金生(1981—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(编辑 魏小丽)