微电网经济运行的分布式二次电压-频率恢复控制

董密¹,李力¹,粟梅¹,宋冬然^{1†},杨建¹,李正国²

(1. 中南大学 自动化学院, 湖南 长沙 410083; 2. 深圳职业技术学院 汽车与交通学院, 深圳 广东 518055)

摘要:由于传统下垂控制的特点,微电网中分布式能源的输出电压和频率易受负荷变化的影响.为此,本文提出 了分布式二次电压-频率恢复控制算法,在二次控制层实现电压-频率恢复与同步的同时,提高微电网系统运行的经 济性,并减少由于运行时间尺度不一致造成的供需不匹配.此外,本文提出的控制算法能实现孤岛模式向并网模式 转变的无缝切换,能有效应对通讯故障,在极端情况下系统仍能保持稳定.最后,本文对所提出的算法进行了稳定 性证明,并利用仿真和实验验证该算法的有效性和可靠性.

关键词:分布式;电压-频率恢复;二次控制层;经济性;运行时间尺度;无缝切换

引用格式: 董密, 李力, 粟梅, 等. 微电网经济运行的分布式二次电压--频率恢复控制. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 461 – 472

DOI: 10.7641/CTA.2019.80426

Distributed secondary voltage-frequency recovery control algorithm for economic operation of microgrid

DONG Mi¹, LI Li¹, SU Mei¹, SONG Dong-ran^{1†}, YANG Jian¹, LI Zheng-guo²

(1. School of Automation, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. Automative Transportation Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen Guangdong 518055, China)

Abstract: Because of the inherent characteristics of the traditional droop control, the output voltage and frequency of the distributed energy in the AC microgrid are easily affected by the load. To addressed this issue, in this paper, we propose a distributed secondary voltage-frequency recovery control algorithm, which are used to maintain the voltage and the frequency at nominal values and minimize the total generation cost. Using the proposed algorithm, the economy of the system can be greatly improved, and the mismatch between the supply and the demand caused by the inconsistent running time scale is reduced. In addition, the presented algorithm successfully realizes a seamless handover from the islanded mode to the grid-connected mode, effectively deals with the communication failure, and maintain the stability of the system in extreme cases. The stability of the proposed control algorithm is analyzed and proved. Finally, simulations and experiments show the validity and the reliability of the proposed algorithm.

Key words: distributed; voltage-frequency recovery; secondary control level; economic dispatch; running time scale; seamless handover

Citation: DONG Mi, LI Li, SU Mei, et al. Distributed secondary voltage-frequency recovery control algorithm for economic operation of microgrid. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(3): 461 – 472

1 引言

微电网是将多个分布式电源(distributed generation, DG)、负荷、储能装置、电力电子变换器及保护 和测量装置连接在一起的小型可控实体^[1-3].它可根 据电网的需求,工作在孤岛模式、并网模式以及由孤 岛转向并网或并网转向孤岛的切换的同步模式^[2,4]. 在孤岛模式下,由于缺少大电网的电压支撑,微电网 除提供有功和无功输出以满足负载需求,还需维持自 身的电压和频率.通过模拟同步发电机的传统下垂控制,利用本地的测量信息,根据各DG的下垂系数,可 实现负荷需求的自主分配^[5].但由于下垂控制的固有 特性,其输出电压和频率易受负荷变化的影响,当微 电网突加重载时,系统很难保证其输出的电能质量^[6].因此,有必要对微电网的电压--频率恢复问题进行研 究.

目前,用于传统电网结构的分层控制逐渐被用来

收稿日期: 2018-06-11; 录用日期: 2019-01-21.

[†]通信作者. E-mail: songdongran@csu.edu.cn; Tel.: +86 18163656151.

本文责任编委: 耿华.

国家自然科学基金项目(51677194)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51677194).

控制微电网[7-9],它分为4个控制层,分别是内环控 制、一次控制、二次控制和三次控制.每一层控制都有 相应的控制目标和实现方法,且每一层的运行时间尺 度都有很大的差异. 电压--频率恢复问题主要在二次 控制层解决. 近年来, 有大量文献对电压-频率恢复问 题进行研究[7,10-14]. 文献[10]提出一种新型下垂控制 策略,利用高频脉冲来实现电压恢复.文献[11]采用一 种主动同步控制策略,该方法可实现微电网模式的平 滑切换. 文献[7]提出一种集中式的方法采集全局信 息,计算电压--频率偏差信号,并利用通讯网络将偏差 送至系统中的所有DG,该方法能有效解决电压-频率 恢复问题,但由于该方法需要全局通信,通讯成本昂 贵,且一旦发生单点故障将影响系统中的其他设备. 随着网络技术的发展和分布式协调控制在多智能体 领域的广泛应用^[14],有学者提出一种基于多Agent的 分布式控制结构,只需与相邻节点通信就可实现全局 的同步[12-13]. 文献[12]提出首先将非线性的微电网模 型线性化,再采用分布式协同控制方法解决同步问题. 文献[13]提出一种分布式有限时间算法来实现电压-频率恢复,然而,这些方法均没考虑微电网的运行成 本,未实现经济调度,不能最大化利用可再生能源.

微电网的经济调度问题(economic dispatch problem, EDP)是近年来的研究热点,由于微电网中分布 式能源所占比例较高,其间歇性和随机性给微电网的 调度带来不少困难[15].为此,研究者们提出各种方法 来解决微电网的经济调度问题[15-20]. 文献[15]提出一 种基于极端场景下的微电网鲁棒经济调度方法,该方 法对于减少弃风和切负荷电有较明显的优势. 文 献[16]提出一种分散的无需通信的算法来实现微电网 的经济调度,并用小信号分析方法分析了算法的稳定 性. 文献[17]提出一种基于一致性算法的孤岛型微电 网群实时协同功率分配方法,该算法能保证微电网系 统的供需平衡. 文献[18]提出一种基于离散一致性算 法的智能配电网下的经济调度方法,并解决了孤岛智 能配电网的频率自治与协同控制问题. 文献[19]提出 了一种针对直流微电网成本最小的分布式算法,并分 析了该算法的收敛性. 文献[20]提出一种分布式算法 同时解决频率恢复和经济调度问题.虽然上述这些方 法能够大范围解决微电网的EDP, 但是都依靠三次控 制的微电网中心控制器来实现的. 而三次控制层的运 行时间尺度通常是在分钟-小时级,以假设在这期间 负荷不变作为前提,这造成了三次控制与二次控制之 间运行时间尺度的不匹配,降低了微电网运行的经济 性[18]

针对上述问题,本文提出一种考虑微电网经济运行的分布式二次电压-频率恢复控制算法.所提出的算法在原有下垂控制的基础上,增加额外的控制变量,利用分布式通讯网络来实现全局的电压-频率恢复.

另外,该算法通过利用分布式通讯网络,将微电网三 次控制解决的EDP放在与电压-频率恢复算法同一层 次的控制器,通过分布式一致性算法寻找最优成本微 增率和最优有功输出来合理设计下垂系数,优化微电 网运行成本.最后,利用MATLAB仿真和实验平台验 证了所提出控制算法的可靠性.

2 微电网的控制方法

2.1 微电网的控制目标

微电网中的DG按照统一的方式来达到预先设定的目标^[1,21],其主要有以下3个控制目标:

1) 电压恢复与电压同步.

在孤岛模式下,所有DG的输出电压要控制到彼此 接近,并恢复至统一的电压参考值附近,以减小无功 潮流;在并网情况下,公共耦合点(point of common coupling, PCC)处的电压须与主网保持同步.

2) 频率恢复与频率同步.

微电网内各DG的输出频率须保持同步,且相角差 必须维持在一定范围内.微电网由孤岛模式向并网模 式的切换,其频率和相角与大电网的同步是必要条件 之一^[11].

3) 微电网的经济运行.

EDP是电力系统中的一个重要的优化问题,通过 多种方法预测负荷计算潮流,从而确定各个微源的最 优出力. EDP的数学表达式为

$$\min C_{\text{total}} = \min \sum_{i=1}^{n} C_i(P_{G_i}).$$
(1)

由于无功发电成本不到有功发电成本的1%,因此, *C_i*(*P*_{Gi})是关于有功功率的综合成本函数^[18-22],具体 可表示为

$$C_i(P_{G_i}) = \alpha_i P_{G_i}^2 + \beta_i P_{G_i} + \gamma_i, \ i = 1, 2, \cdots, n,$$
(2)

其中:成本系数 α_i , β_i 和 γ_i 都是正实数,该函数包含了 发电成本、维修成本等;同时; P_{Gi} 还应受到**DG**的容 量限制,即

$$P_{\mathrm{G}i,\mathrm{min}} \leqslant P_{\mathrm{G}i} \leqslant P_{\mathrm{G}i,\mathrm{max}},\tag{3}$$

其中: P_{Gi} , min 是第i个 DG 的最小有功功率输出值, $P_{Gi,max}$ 是最大有功功率输出值.

2.2 微电网的控制方法

微电网可视为大电网的缩小版,要实现上述目标 并且规范微电网的运行,目前比较流行的是采用分层 控制方法^[7-9],每层控制方法如下:

1) 一次控制.

一次控制通常采用下垂控制,根据本地测量的有 功和无功功率来调节内环电压和频率参考值,用于感 性线路的下垂控制^[23-24]表达式为

$$\begin{cases} f_i^{\text{ref}} = f^* - m_i P_{\text{G}i}, \\ v_{\text{d}i}^{\text{ref}} = E^* - n_i Q_{\text{G}i}, \\ v_{\text{q}i}^{\text{ref}} = 0, \end{cases}$$
(4)

其中: $f^* \pi E^*$ 是期望的额定输出频率和电压, $f_i^{\text{ref}} \pi v_{di}^{\text{ref}}$ 是内环频率和电压控制的参考值, $m_i \pi n_i$ 是下垂系数, $P_{Gi} \pi Q_{Gi}$ 是本地测量的经过低通滤波器滤波后的逆变器输出有功功率和无功功率.

一次控制的运行时间尺度通常在毫秒-秒级,为了 确保系统的可靠性,各DG之间的下垂控制无需通信 就可实现自治.但由于下垂控制的固有特性,电压和 频率跟随负载变化,这就造成了各DG的输出电压和 频率不同步,因此需采用各种方法来确保电压-频率 同步并恢复到额定值.

2) 二次控制.

二次控制的主要任务是将微电网各微源的电 压-频率恢复到额定值,同时,在微电网系统由孤岛模 式向并网模式切换时,该层控制还起着预同步作用, 其运行时间尺度相较于一层控制较长,通常在秒-分 钟级^[9].电压-频率偏差常用PI控制器获得,其计算公 式如下:

$$\begin{cases} \Delta f_{\rm e} = k_{\rm pfs} (f^* - f_i^{\rm ref}) + k_{\rm ifs} \int (f^* - f_i^{\rm ref}) \mathrm{d}t, \\ \Delta v_{\rm e} = k_{\rm pvs} (E^* - v_{\rm d}^{\rm ref}) + k_{\rm ivs} \int (E^* - v_{\rm d}^{\rm ref}) \mathrm{d}t, \end{cases}$$
(5)

其中: $k_{pfs} \pi k_{pvs}$ 分别是电压和频率偏差的比例系数的, $k_{ifs} \pi k_{ivs}$ 是积分系数.

为实现电压--频率的恢复和同步,过去常借助集中 式的通讯网络将电压--频率偏差信息送至所有的 DG^[5,7,9],一次控制的下垂公式改为

$$\begin{cases} f_i^{\text{ref}} = f^* - m_i P_{\text{G}i} + \Delta f_{\text{e}}, \\ v_{\text{d}i}^{\text{ref}} = E^* - n_i Q_{\text{G}i} + \Delta v_{\text{e}}. \end{cases}$$
(6)

该方法适合微源位置相对集中且数量不多的情况, 而当微电网系统中所含微源数量较多且位置相对分 散时,就需要一个强大的通讯网络,这样大大增加了 建设成本.

3) 三次控制.

三次控制负责管理和调度多个微网,控制潮流,同时实现微电网的经济运行,即完成上述第3个控制目标,其运行时间尺度通常在5min~1h^[8].而在微电网实际运行中,负载是实时变化的,三次控制的时间尺度较长,不能较快反应出负载的变化,这就降低了微电网运行的经济性.

3 微电网经济运行的分布式二次电压-频率 恢复控制算法

分布式协同控制由于其高效性、稳定性和经济性 在智能电网领域得到了广泛应用^[25-26].本文借助通 讯网络提出一种分布式协同控制算法,将三次控制的EDP和二次控制相结合,在实现电压-频率恢复的同时考虑微电网的经济运行.

3.1 通讯网络及图论基本知识

本文采用基于分布式网络模型的电压--频率恢复 和同步控制算法,其模型如图1所示.



图 1 基于分布式通讯网络的两层微电网控制系统 Fig. 1 Two-layer control system based on distributed cyber physical for microgrids

图1中 x_i 表示第i个DG的状态,包括电压、频率、 有功功率、无功功率等.如果第i个DG与第j个DG之 间存在着通讯链路,那么 $a_{ij} = 1$,否则 $a_{ij} = 0$.要实 现协同控制算法,那么其通讯网络必须满足强连通的 条件^[22,26],其分布式一致性算法如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = u_i, \\ u_i = -\sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i - x_j), \end{cases} \quad i = 1, \cdots, n, \quad (7)$$

改写成矩阵形式为

$$\dot{x} = -Lx,\tag{8}$$

其中: $x = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^{\mathrm{T}}$, L是拉普拉斯矩阵,

本文采用双向通讯网络,因此满足 $a_{ij} = a_{ji}$,在式 (7)的作用下,当系统中满足 $x_i = x_j$ 时,即实现同步.

3.2 分布式二次电压-频率恢复和同步控制算法

由于下垂控制的固有特性,在重载时,输出电压和 频率低于额定值,为实现电压-频率的恢复,本文提出 一种基于通讯网络的分布式电压-频率恢复算法,

第3期

今

式(6)改写成 $\begin{cases}
f_i^{\text{ref}} = f^* - m_i P_{\text{G}i} + \Delta f_i = f^* - e_{P_{\text{G}i}} + \Delta f_i, \\
v_{\text{d}i}^{\text{ref}} = E^* - n_i Q_{\text{G}i} + \Delta v_i = E^* - e_{Q_{\text{G}i}} + \Delta v_i, \\
\end{cases}$ (10) 其中 $\Delta f_i \pi \Delta v_i$ 是第i个DG的额外控制变量,用于频 率和电压的恢复控制.对式(10)求导,得到

其中ufii, uf2i, uv1i和uv2i是电压和频率恢复的辅助控制变量, 通过与相邻DG的信息交换, 变量设计为

$$\begin{cases} u_{f1i} = -k_{f_1} \times (\sum_{i=1, j \neq i}^{n} a_{ij} \operatorname{sgn}(m_i P_{Gi} - m_j P_{Gj}) | m_i P_{Gi} - m_j P_{Gj} |^{k_2}), \\ u_{v1i} = -k_{v_1} \times (\sum_{i=1, j \neq i}^{n} a_{ij} \operatorname{sgn}(n_i Q_{Gi} - n_j Q_{Gj}) | n_i Q_{Gi} - n_j Q_{Gj} |^{k_2}) \end{cases}$$
(13)

和

$$\begin{cases} u_{f2i} = -k_{f_2} \sum_{i=1, j \neq i}^{n} a_{ij} \operatorname{sgn}(\Delta f_i - \Delta f_j) |\Delta f_i - \Delta f_j|^{k_2} - k_{f_2} b_i \operatorname{sgn}(\Delta f_i - \Delta f_e) |\Delta f_i - \Delta f_e|^{k_2}, \\ u_{v2i} = -k_{v_2} \sum_{i=1, j \neq i}^{n} a_{ij} \operatorname{sgn}(\Delta v_i - \Delta v_j) |\Delta v_i - \Delta v_j|^{k_2} - k_{v_2} b_i \operatorname{sgn}(\Delta v_i - \Delta v_e) |\Delta v_i - \Delta v_e|^{k_2}, \end{cases}$$
(14)

其中: sgn(·)是符号函数, k_{f1}, k_{v1}, k_{f2}和k_{v2}都是正的 系数, k₂是正的控制增益, 其满足0 < k₂ < 1. 与集中 式的电压--频率恢复算法不同, 本文所提出的方法不 需要每个控制器都计算电压--频率偏差值, 预先定义 几个DG作为领导者, 只有领导者的控制器需要根据 式(5)计算电压--频率的偏差值, 并经由通讯网络将偏 差值传送给系统中的其他控制器. 系统中的领导者越 多, 则系统全局实现电压--频率恢复和同步的速度越 快, 但相应的通讯建设成本也就越高.

下面对本文所提出的分布式二次电压--频率恢复 算法的稳定性进行分析.

定理1 对于含有多个并联DG的交流微电网系统,如果系统中DG之间的通讯拓扑是无向的且存在稀疏通信,那么在控制变量*u*_{fi}和*u*_{vi}的作用下,在稳态时,系统中所有DG的输出频率*f*_i^{ref}和电压*v*_{di}^{ref}将实现同步,并收敛于额定值*f**和*E**.

证 由于电压恢复与频率恢复算法类似,因此,本 文只分析了频率恢复算法的稳定性.

首先,建立如下Lyapunov函数:

$$V(f) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} (m_i P_{\mathrm{G}i})^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} (\Delta f_i)^2.$$
(15)

可以看出,式(15)是连续可微的,并且是恒成立的.对 式(15)进行微分,得到

$$\dot{V}(f) = \sum_{i=1}^{n} m_i P_{Gi}(m_i \dot{P}_{Gi}) + \sum_{i=1}^{n} \Delta f_i \Delta \dot{f}_i.$$
(16)

将式(11)-(14)代入式(16)得到下式:

 $\dot{V}(f) =$

 $\sum_{i=1}^{n} m_{i} P_{Gi}(m_{i} \dot{P}_{Gi}) + \sum_{i=1}^{n} \Delta f_{i} \Delta \dot{f}_{i} = \\ -k_{f1} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij}(m_{i} P_{Gi} - m_{j} P_{Gj}) \operatorname{sgn}(m_{i} P_{Gi} - m_{j} P_{Gj}) |m_{i} P_{Gi} - m_{j} P_{Gj}|^{k_{2}} - \\ k_{f2} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij} (\Delta f_{i} - \Delta f_{j}) \operatorname{sgn}(\Delta f_{i} - \Delta f_{j}) \cdot \\ |\Delta f_{i} - \Delta f_{j}|^{k_{2}} - \\ k_{f2} \sum_{i=1}^{n} b_{i} (\Delta f_{i} - \Delta f_{e}) \operatorname{sgn}(\Delta f_{i} - \Delta f_{e}) \cdot \\ |\Delta f_{i} - \Delta f_{e}|^{k_{2}} \leqslant 0.$ (17)

 $\begin{cases} \dot{f}_i^{\text{ref}} = -m_i \dot{P}_{\text{G}i} + \Delta \dot{f}_i = u_{\text{f}i}, \\ \dot{v}_i^{\text{ref}} = -n_i \dot{Q}_{\text{G}i} + \Delta \dot{v}_i = u_{\text{v}i}. \end{cases}$

 $\begin{cases} m_i \dot{P}_{\mathrm{G}i} = u_{\mathrm{f1}i}, \ \Delta \dot{f}_i = u_{\mathrm{f2}i}, \\ n_i \dot{Q}_{\mathrm{G}i} = u_{\mathrm{v1}i}, \ \Delta \dot{v}_i = u_{\mathrm{v2}i}, \end{cases}$

由此可知,本文所提出的分布式频率恢复算法是渐进 稳定的.

令 $\dot{V}(f) = 0$,只有当下面两个条件都满足时, $\dot{V}(f) = 0$ 才成立.

$$m_1 P_{G1} = m_2 P_{G2} = \cdots m_i P_{Gi} = \cdots = m_n P_{Gn},$$
(18)

$$\Delta f_1 = \Delta f_2 = \cdots \Delta f_i \cdots = \Delta f_n = \Delta f_e.$$
(19)

可以看出,这是系统的平衡点,在稳态时,所有DG的 频率将实现同步.此外,稳态时 $f_i^{\text{ref}} = 0$,则 $f_i^{\text{ref}} = f^*$,即所有的频率收敛于额定值 f^* . 证毕.

注1 本文提出的算法不仅适用于孤岛模式,还可用于同步和并网模式.在同步模式下,须将电压-频率偏差计算式(5)中的*E**和*f**替换为大电网的电压*V*_{MainGrid}和频率 *f*_{MainGrid}.此外,该算法具有很强的鲁棒性,如果系统中的所 有DG都是相互连接的,那么该算法将成为集中式控制算法, 而一旦系统发生通讯故障,那么DG不再接收偏差信号,此时 的Δ*f_i*将变为0,该算法就变成了传统的完全分散的下垂控制,

(11)

(12)

电压--频率恢复算法不再起作用. 该算法在系统出现通讯故 障无法满足强连通条件时仍能保持稳定, 这一特点对系统的 稳定运行具有重要的现实意义.

3.3 分布式二次微电网经济运行控制算法

要实现微电网的经济运行,即要通过设计合理的下垂系数使得输出功率P_{Gi}在稳定时等于参考功率 P^{ref}.下面将详细介绍控制算法及其实现.

3.3.1 不考虑DG容量的情况

根据相关文献[3,10]可知,利用拉格朗日算子可求出实现EDP的最优参考功率*P*_{*Gi*},即满足下列条件:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots \lambda_i = \cdots = \lambda_n = \lambda^*, \qquad (20)$$

$$\lambda^* = \frac{\left(P_{\rm D} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\beta_i}{2\alpha_i}\right)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2\alpha_i}},\tag{21}$$

其中: $P_{\rm D}$ 是总的功率需求; λ_i 定义为成本微增率, 是成本函数对有功功率的导数:

$$\lambda_i = \frac{\partial(C_i)}{\partial P_{\mathrm{G}i}} = 2\alpha_i P_{\mathrm{G}i} + \beta_i, \qquad (22)$$

λ*是最优成本微增率. 当系统中所有DG的微增率相 等时, 微电网可实现运行成本最优. 此时的最优输出 功率为

$$P_{\mathrm{G}i}^* = \frac{(\lambda^* - \beta_i)}{2\alpha_i}.$$
(23)

最优成本微增率λ*和最优功率输出P_{Gi}可用传统的集中方式获得,然而该方式不适用于有多个DG且位置较为分散的微电网系统.为此,本文设计采用分布式一致性算法来获得,并且将这一算法放在二次控制来实现,不仅减少了通讯成本,同时减少了由于三次控制和二次控制运行时间尺度不一致造成的非经济运

行.首先,不考虑DG容量限制,令

$$\dot{\lambda}_i = k_\lambda u_{\lambda_i}.\tag{24}$$

同样地,令分布式辅助控制变量 u_{λ_i} 为

$$u_{\lambda_i} = -\left(\sum_{j=1, j \neq l}^n a_{ij} \operatorname{sgn}(\lambda_i - \lambda_j) |\lambda_i - \lambda_j|^{k_2} + b_i \Delta P\right),$$
(25)

其中

$$\Delta P = k_{\rm pps} (P_{\rm D} - \sum_{i=1}^{n} P_{\rm Gi}) \operatorname{sgn}(P_{\rm D} - \sum_{i=1}^{n} P_{\rm Gi}) \cdot |P_{\rm D} - \sum_{i=1}^{n} P_{\rm Gi}|^{k_2},$$
(26)

式中 k_{pps} 是正的比例系数. 此外, 通过基于区域控制 误差(area control errors, ACE)的逆工程^[27]来估计负 载需求与实际发出功率之差. 然后, 将式(26)计算的 ΔP 传送给领导DG, 再由分布式通讯网络将该差值传 送给系统中的其他DG. 接下来分析该算法的稳定性.

定理 2 对于含有多个并联DG的交流微电网系统,如果系统中DG之间的通讯拓扑是无向的,且存在稀疏通信,那么在控制变量 u_{λ_i} 的作用下,在稳态时,系统中所有DG的成本微增率 λ_i 和有功功率 P_{G_i} 将收敛于最优值 λ^* 和 $P^*_{G_i}$.

证 首先,建立如下Lyapunov函数:

$$V(\lambda) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} (\lambda_i)^2.$$
(27)

由上式可知 $V(\lambda) \ge 0$ 是恒成立的. 对上式求导得到

$$\dot{V}(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \dot{\lambda}_i = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i k_\lambda u_{\lambda i}.$$
(28)

将式(25)和(26)代入式(28)得到

$$\dot{V}(\lambda) = -k_{\lambda} \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} (\sum_{j=1, j\neq i}^{n} a_{ij} \operatorname{sgn}(\lambda_{i} - \lambda_{j}) |\lambda_{i} - \lambda_{j}|^{k_{2}} + b_{i} \Delta P) = -k_{\lambda} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij} (\lambda_{i} - \lambda_{j}) \operatorname{sgn}(\lambda_{i} - \lambda_{j}) |\lambda_{i} - \lambda_{j}|^{k_{2}} - k_{\lambda} k_{\text{pps}} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} b_{i} \lambda_{i} (P_{\text{D}} - \sum_{i=1}^{n} P_{\text{G}i}) \operatorname{sgn}(P_{\text{D}} - \sum_{i=1}^{n} P_{\text{G}i}) |P_{\text{D}} - \sum_{i=1}^{n} P_{\text{G}i}|^{k_{2}} \leq 0.$$

$$(29)$$

由此可知,本文设计的分布式二次微电网经济运行控制算法是渐进稳定的. 令 $\dot{V}(\lambda) = 0$,只有当下面两个条件都满足时, $\dot{V}(\lambda) = 0$ 才成立.

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots \lambda_i = \cdots = \lambda_n, \tag{30}$$

$$P_{\rm D} = \sum_{i=1}^{n} P_{{\rm G}i} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\alpha_i},$$
 (31)

可以看出这是系统的平衡点,在稳态时,所有DG的λ_i 相等,并收敛于最优成本微增率λ*.这样在不考虑DG 容量的情况下,最优成本微增率(21)和最优有功功 率(23)通过分布式算法就求解出来. 证毕.

3.3.2 考虑DG容量的情况

实际应用中DG容量是有限的,其发出的最大功率 随环境变化而变化,因此必须考虑这种更为实际的情况.本文依然利用上述分布式一致性算法来求解,但 过程有稍许不同,如图2所示.

图2中的输出功率参考值 P_{Gi}^{ref} 是求解最优值 P_{Gi}^{*} 的 过程值,在考虑容量限制情况下需增加一个判断功率 过程,过程值 P_{Gi}^{ref} 与 $P_{Gi,max}$ 作比较,一旦 P_{Gi}^{ref} 超过 了 $P_{Gi,max}$,则保持 P_{Gi}^{ref} 不变,与之对应的 λ_i 也不再参 与迭代计算,剩余的DG继续迭代计算直至 ΔP 减小到

465

合理的范围内. 在这种情况下的最优成本微增率和最优输出功率为

$$\lambda^* = (P_{\rm D} - \sum_{i=1, i \in n_{\rm sat}}^n P_{\rm Gi} + \sum_{i=1, i \notin n_{\rm sat}}^n \frac{\beta_i}{2\alpha_i}) / \sum_{i=1, i \notin n_{\rm sat}}^n \frac{1}{2\alpha_i},$$
(32)

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}i}^{*} = \frac{\lambda^{*} - \beta_{i}}{2\alpha_{i}}, & i \in n, \ i \notin n_{\mathrm{sat}}, \\ P_{\mathrm{G}i}^{*} = P_{\mathrm{G}i,\mathrm{min}} \vec{\mathrm{m}} P_{\mathrm{G}i,\mathrm{max}}, \ i \in n_{\mathrm{sat}}, \end{cases}$$
(33)

其中n_{sat}表示超出最大输出功率的DG数量之和.



图 2 考虑容量限制情况下的最优成本微增率的计算过程

Fig. 2 The calculation process of the optimal incremental cost with power constraint

3.3.3 分布式二次微电网经济运行的实现

根据Pref来设计下垂系数,满足下列两个条件:

$$m_i = \frac{\rho_{\mathrm{P}i}}{P_{\mathrm{G}i}^{\mathrm{ref}}},\tag{34}$$

$$\frac{\rho_{\mathrm{P1}}P_{\mathrm{G1}}}{P_{\mathrm{Gi}}^{\mathrm{ref}}} = \frac{\rho_{\mathrm{P2}}P_{\mathrm{G2}}}{P_{\mathrm{G2}}^{\mathrm{ref}}} = \dots = \frac{\rho_{\mathrm{Pn}}P_{\mathrm{Gn}}}{P_{\mathrm{Gn}}^{\mathrm{ref}}} = \eta_p, \quad (35)$$

其中 η_i 和 ρ_i 是比例系数,它们之间的关系^[28]为

$$\frac{\eta_{\rm p1}}{\rho_{\rm P1}} = \frac{\eta_{\rm p2}}{\rho_{\rm P2}} = \dots = \frac{\eta_{\rm pn}}{\rho_{\rm Pn}} = 1.$$
(36)

只有满足上述条件,系统才会在有限时间内达到供需 平衡,实现微电网的经济运行.通常情况下,EDP是在 三次控制层被解决,然而三次控制层运行时间尺度通 常是在分钟-小时级.当本文给出的分布式微电网经 济运行控制算法在三次控制层上运行时,系统达到供 需平衡和稳定需要很长时间.因此,本文提出将EDP 放在二次控制层解决,整个二次控制算法实现如 图3所示.这样既避免了通讯成本的增加,也提高了系 统达到稳态的速度.

4 仿真及实验分析

4.1 仿真平台与参数

为了验证所提出的微电网经济运行的分布式二次 电压--频率恢复算法的可靠性和有效性,本文利用 MATLAB/Simulink平台设计了带有5个DG的三相交 流微电网,其额定频率为50Hz,额定电压有效值为 311V,DG之间的通讯采用环形连接,如图4所示.

通讯拓扑相邻节点之间的通信是无向的,通讯拓 扑的拉普拉斯矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

另外,选取DG1为领导者,其余4个DG为跟随者.DG的参数如下:DG1-DG5: $L_{\rm f} = 3$ mH, $C_{\rm f} = 150$ µF, $R_{\rm s} = 0.1 \Omega$, $L_{\rm line} = 1$ mH, $R_{\rm line} = 1 \Omega$.

具体控制参数和运行成本系数见表1和表2.

表1 微电网系统的控制参数

 Table 1 Controlling parameters of the microgrid system

称	参数	数值
P-f下垂系数	$m_{\rm ref}$	10^{-5}
Q-V下垂系数	$n_{\rm ref}$	10^{-3}
电压偏差比例系数	$k_{\rm pvs}$	10
电压偏差积分系数	k_{ivs}	0.1
频率偏差比例系数	$k_{\rm pfs}$	5
频率偏差积分系数	$k_{\rm ifs}$	0.1
功率偏差比例系数	$k_{\rm pps}$	0.05
电压恢复增益系数	$k_{ m v}$	150
频率恢复增益系数	$k_{ m f}$	5
微增率增益系数	k_{λ}	5
电压外环比例系数	$k_{\rm pv}$	0.0015
电压外环积分系数	k_{iv}	4
电流内环比例系数	$k_{\rm pi}$	4

表 2 微电网系统的运行成本系数



单元	$lpha_i$	β_i	γ_i	$P_{\mathrm{G}i,\mathrm{min}}$	$P_{\mathrm{G}i,\mathrm{max}}$
DG1	0.087	4.13	45	0	10
DG2	0.076	3.62	33	0	10
DG3	0.075	3.25	66	0	15
DG4	0.112	2.78	82	0	20
DG5	0.098	1.54	54	0	40



图 3 考虑微电网经济运行的二次电压-频率恢复控制框图 Fig. 3 The control block diagram of distributed secondary voltage-frequency recovery algorithm considering economic operation of microgrid



图 4 通讯拓扑图 Fig. 4 Communication topology between DGs

4.2 仿真 1: 负载变化的情况

本仿真考虑负载变化的情况,同时考虑DG的容量 限制. 在 $t \leq 20$ s时,假设此阶段总的功率需求 P_D 是 48 kW,根据式(25)和(27)可计算出此时的最优成本微 增率是 $\lambda^* = 4.814$ kW,相应的5个DG发出的最 优有功功率分别为: $P_{G1}^* = 3.93$ kW, $P_{G2}^* = 7.86$ kW, $P_{G3}^* = 10.43$ kW, $P_{G4}^* = 9.08$ kW和 $P_{G5}^* = 16.70$ kW.

当t > 20 s时,负载需求发生变化,总的功率需求变 为 $P_{\rm D} = 60$ kW.此时根据式(23)和(25)计算发现DG2 的最优有功功率超出其容量限制,需要更改计算方式, 再根据式(32)和(33)计算得到新的最优成本微增率 $\lambda^* = 5.2625$ \$ /kW,相应的5 个 DG发出的最优有 功功率分别为: $P_{\rm G1}^* = 6.51$ kW, $P_{\rm G2}^* = 10.00$ kW, $P_{\rm G3}^*$ = 13.42 kW, $P_{\rm G4}^* = 11.08$ kW和 $P_{\rm G5}^* = 19.00$ kW.

图5(a)-(b)显示出在本文所设计的控制算法下,所 有DG的输出电压和频率在稳态时总是维持在额定值 311 V和50 Hz, 在负载发生变化时, 经过短暂的波动 最后趋于稳定. 图5(c)--(d)是在负载变化时的输出功 率和成本微增率波形图. 在20s内, 5个DG的输出功率 逐渐接近最优值:超出20s后,由于DG2的容量限制, DG2的输出功率在达到10kW后不再继续增加,而剩 下的4个DG再重新寻找平衡点,如图5(d)所示.图5(e) 是总的功率需求与实际发出的总功率变化图,在负载 需求发生变化时,各微源发出的功率之和经过一段时 间后与总需求相匹配. 图5(f)是各微源的实际输出电 压.该仿真反映出本文所提出的方法能实现电压-频 率恢复和同步,同时实现微电网的经济运行,并能实 时对负载变化作出响应.



DG1

DG4

(c) DG的有功功率

-DG3

DG5







4.3 仿真 2: 微电网的模式切换情况

微电网系统中的DG必须知道自身的工作模式才 能选择合适的控制算法.本仿真中,微电网一开始处 于孤岛模式, 在t = 5 s时, 领导DG接受到并网信号时, 然后所有DG改变控制算法进入由孤岛转向并网的同 步模式. 当系统满足式(37), 并能维持至少200 ms的时 间, 微电网可切换为并网模式^[4]:

$$\begin{split} |f_{\text{maingrid}} - f_{\text{pcc}}| &\leq 0.05 \text{ Hz}, \\ |v_{\text{maingrid}} - v_{\text{pcc}}| &\leq 0.03 \text{ pu}, \\ |\phi_{\text{maingrid}} - \phi_{\text{pcc}}| &\leq 0.0175 \text{ rad} = 1^{\circ}. \end{split}$$
(37)

469

在t = 10 s时,当微电网遇到故障或接收到人为指令时需要与大电网隔离时,微电网又重新进入孤岛模式. 图6(a)-(e)是微电网在模式切换时的波形图,在本文所提出的控制算法下,所有DG的输出电压和频率始终能够维持同步,完成模式切换.





(e) 电网和PCC的频率

图 6 微电网模式切换仿真结果图

Fig. 6 Simulation results of synchronizing mode

4.4 仿真 3: 通讯故障情况

本仿真考虑了通讯故障情况下控制算法的可靠性, 仿真分为3个阶段:

第1阶段: 0 < t < 20 s, 通讯网络正常, 通讯拓扑 及负载设置与仿真1一致, 由图形可知, 系统很快进入 稳态, 电压和频率保持在额定值;

第2阶段: 20 < t < 40 s, 通讯网络发生单向通讯 故障, 其拉普拉斯矩阵变为

L	=	
_		

2	-1	0	0	-1		1	0	0	0 ·	-1]
-1	2	-1	0	0		-1	1	0	0	0
0	-1	2 ·	-1	0	$\stackrel{t>20\mathrm{s}}{\Rightarrow}$	0	-1	1	0	0
0	0	-1	2	-1		0	0 ·	-1	1	0
$\lfloor -1 \rfloor$	0	0 ·	$^{-1}$	2_		0	0	0 -	-1	1

此时通讯网络仍能保持强连通,由下图波形可知,在 短暂的波动后,电压、频率、成本微增率等都能恢复到 稳定状态.

第3阶段: t > 40 s,设计发生更为严重的通讯故障,此时系统不能保持强连通,那么本文所设计的算法将自动切换成传统的分散式下垂控制.此时的下垂系数仍保持在通讯故障那一刻,跟随者DG将不再接收频率偏差 Δf_e 和电压偏差信号 Δv_e ,电压和频率偏离额定值,但系统仍保持稳定.图7(a)-(c)的波形验证了本文所设计的算法对通讯故障的可靠性.







4.5 仿真 4: EDP在不同通讯频率下的仿真结果

本仿真考虑了在不同通讯频率下的负载供需匹配 情况.由于传统的EDP是在三层解决的,其通讯频率 远低于二次层,若采用分布式算法,迭代过程将耗费 较长时间,而放在二次控制,将在较短时间内达到供 需平衡.图8是在不同通讯频率下的负载需求和迭代 计算过程中的负载参考值之和.从图中可以看出,通 讯频率越高,其达到平衡的时间越短,对通讯设备的 要求就越高;反之,通讯时间越长,达到平衡的时间也 越长,有可能造成系统不稳定.因此,在实际中需要权 衡利弊,选择合适的通讯频率.







Fig. 8 Simulation results with different communication frequency

4.6 实验:负载变化情况的实验结果

为验证本文提出的参数设计方法,建立了一套4台 微源并联的额定电压为60V的实验样机,如图9所示. 图10显示4个微源在负载变化情况下的实验输出波形. 在负载变化之前,4个微源的输出电压均维持在额定 值,输出有功功率按照经济最优原则分配,并在一定 时间内达到稳定;当负载发生变化时,输出电压经过 短暂的波动恢复到额定值,输出有功功率仍按照经济 最优原则分配.



图 9 含有4个微源的实验平台 Fig. 9 Experimental platform with 4 DGs







5 结语

本文针对传统下垂控制电压--频率偏差问题提出 了一种基于分布式网络的二次电压--频率恢复和同步 控制算法,在实现电压--频率恢复的同时考虑微电网 的经济运行.相较于以往的控制算法,本文的方法是 完全分布式的,选择某一微源作为领导者,负责计算 电压--频率偏差,并通过分布式通讯网络将偏差值传 送至系统其他微源,实现全局的同步.另外,本文还提 出了将传统三次控制解决的EDP放在二次控制层利 用分布式算法解决,既降低了通讯成本,又减少了供 需不匹配的时间,提高了系统运行的经济性.仿真结 果表明,本文提出的算法能够很好地实现系统的电 压-频率恢复和同步,并按照经济性原则分配微源出 力,实现模式的无缝切换,在通讯故障的极端情况下 也能保证微电网安全和稳定运行.

参考文献:

- ALI K, MUHAMMAD M. Smart Power Grids 2011. Berlin, Germany: Springer, 2011.
- [2] MOHAMED Y, RADWAN A. Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 2(2): 352 – 362.
- [3] LIU Jizhen, WANG Wei, HU Yang, et al. Control and optimization of alternate electrical power system with renewable energy sources. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(12): 1555 1561.
 (刘吉臻, 王玮, 胡阳, 等. 新能源电力系统控制与优化. 控制理论与应用, 2016, 33(12): 1555 1561.)
- [4] SUN Y, ZHONG C, HOU X, et al. Distributed cooperative synchronization strategy for multi-bus microgrids. *Electrical Power and Energy Systems*, 2017, 86: 18 – 28.
- [5] PALIZBAN O, KAOHANIEMI K. Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 797 – 813.
- [6] PILLONI A, PISANO A, USAI E. Robust finite-time frequency and voltage restoration of inverter-based microgrids via sliding-mode cooperative control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(1): 907 – 917.
- [7] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 158 – 172.
- [8] VANDOORN T L, VASQUEZ J C, KOONING J D, et al. Microgrids: hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2013, 7(4): 42 – 55.
- [9] BOUZID A M, GUERRERO J M, CHERITI A, et al. A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 751 – 766.
- [10] SUN Xiaofeng, HAO Yancong, ZHAO Wei, et al. Research of power sharing and voltage restoration without communication for islanded microgrid. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 1(31): 55 – 61.

(孙孝峰,郝彦丛,赵巍,等.孤岛微电网无通信功率均分和电压恢复研究.电工技术学报,2016,1(31):55-61.)

- [11] FENG Jianzhou, WANG Xiaohuan, ZHANG Chunjiang, et al. Active synchronization control of inverter based on frequency recovery control. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(6): 7 12.
 (冯建周, 王晓寰, 张纯江, 等. 基于频率恢复控制的逆变器主动同步策略研究. 电工电能新技术, 2016, 35(6): 7 12.)
- [12] BIDRAM A, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3462 – 3470.
- [13] GUO F, WEN C, MAO J, et al. Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(7): 4355 – 4364.
- [14] HONG Yiguang, ZHANG Yanqiong. Distributed optimization: algorithm design and convergence analysis. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(7): 850 – 857.

(洪奕光,张艳琼.分布式优化:算法设计和收敛性分析.控制理论与应用,2014,31(7):850-857.)

[15] CHEN Haoyong, WANG Yongchao, XUAN Peizheng, et al. Robust economic dispatch method of microgrid containing high proportion of wind power. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(8): 1104 – 1111. (陈皓勇, 王勇超, 禤培正, 等. 含高渗透率风电的微网系统鲁棒经济

调度方法. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 1104 – 1111.)

- [16] HAN H, LI L, WANG L, et al. A novel decentralized economic operation in islanded AC microgrids. *Energies*, 2017, 10: 804; doi:10.3390/en10060804.
- [17] YANG Jiahao. Consensus algorithm based real-time collaborative power dispatch for island multi-microgrid. Automation of Electric Power Systems, 2017, 5(41): 8 15.
 (杨家豪. 基于一致性算法的孤岛型微电网群实时协同功率分配. 电力系统自动化, 2017, 5(41): 8 15.)
- [18] ZHANG Zeyu, ZHANG Xiaoshun, YU Tao. Collaborative consensus algorithm for automatic generation control in an islanded smart distribution grid. *Control Theory & Applications*, 2016, 5(33): 599 – 607.

(张泽宇,张孝顺,余涛.孤岛智能配电网下的快速自动发电控制机 组一致性协同控制算法.控制理论与应用,2016,5(33):599-607.)

- [19] LI C, VASQUEZ J C, GUERRERO J M. Convergence analysis of distributed control for operation cost minimization of droop controlled DC microgrid based on multiagent. *Proceedings of the 31st Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. California: IEEE, 2016: 3459 – 3464.
- [20] WANG Z, WU W, ZHANG B. Fully distributed power dispatch method for fast frequency recovery and minimal generation cost in autonomous microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(1): 19–31.
- [21] CHEN G, LEWIS F L, NING F, et al. Distributed optimal active power control of multiple generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(11): 7079 – 7090.
- [22] YANG Z, XIANG J, LI Y. Distributed consensus based supplydemand balance algorithm for economic dispatch problem in a smart grid with switching graph. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(2): 1600 – 1610.

[23] XIE Lingling, SHI Bin, HUA Guoyu, et al. Parallel operation technology of distributed generations based on improved droop control. *Power System Technology*, 2013, 37(4): 992 – 998.
(谢玲玲, 时斌, 华国玉, 等. 基于改进下垂控制的分布式电源并联运行技术. 电网技术, 2013, 37(4): 992 – 998.)

- [24] WANG Zhaojian, CHEN Laijun, LIU Feng, et al. Distributed frequency control of multi-microgrid with regulation capacity constraints of controllable loads. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(15): 46 53.
 (王召健,陈来军,刘锋,等. 考虑可控负荷调节能力的多微电网分布 式频率控制. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 46 53.)
- [25] YANG Jian, YUAN Wenbin, NIE Yuwen, et al. The design of delay stability in DC microgrids with distributed control. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(8): 1074 1083.
 (杨建, 原文宾, 聂雨雯, 等. 直流微电网分布式控制的时滞稳定化. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 1074 1083.)
- [26] XI Yugeng, LI Xiaoli. Hierarchical structure design for multi-agent consensus. Control Theory & Applications, 2015, 32(9): 1191 1199.
 (席裕庚,李晓丽.多智能体系统一致性的递阶结构设计. 控制理论 与应用, 2015, 32(9): 1191 1199.)
- [27] LI N, ZHAO C, CHEN L, et al. Connecting automatic generation control and economic dispatch from an optimization view. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2016, 3(3): 254 – 264.
- [28] DEHKORDI N M, SADATI N, HAMZEH M. Fully distributed cooperative secondary frequency and voltage control of islanded microgrids. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(2): 675 – 685.

作者简介:

董密 教授,硕士生导师,主要研究方向为控制理论与应用、分 布式能源与电能质量,E-mail: mi.dong@csu.edu.cn;

李力 硕士研究生,研究方向为分布式新能源发电与智能电网, E-mail: lili112209@163.com;

粟 梅 教授,博士生导师,研究方向为电力系统自动化、电力电子与电力传动, E-mail: sumeicsu@mail.csu.edu.cn;

宋冬然 副教授,硕士生导师,研究方向为风力发电、电力电子技术及可再生能源, E-mail: songdongran@csu.edu.cn;

杨 建 教授,博士生导师,研究方向为新能源利用、电力电子技术及运动控制算法,E-mail: jian.yang@csu.edu.cn;

李正国 教授,研究方向为电力电子与可再生能源、智能电网, E-mail: Lizhengguo@szpt.edu.cn.