基于自适应经济下垂控制的微电网分布式经济控制

周晓倩,艾 芊

(上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要:在孤岛微电网中,传统下垂控制按分布式能源的容量比分配有功功率,容易使微电网的整体运行成本 偏高。为有效降低系统运行成本,依据等微增率准则提出一种基于边际成本的经济下垂控制框架,在该框架 下分布式能源能够按照等边际成本出力。考虑到分布式能源的最大出力限制,提出基于一致性的分布式自 适应控制器,将功率稳定在最大值,从而退出边际成本一致性。提出一种分布式二次频率控制器有效恢复孤 岛微电网的频率。仿真结果证明了所提控制器的有效性以及抗通信失败的性能。

关键词:孤岛微电网;边际成本;经济控制;分布式;一致性;频率

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.008

0 引言

中图分类号:TM 761

微电网是一种由多种分布式能源 DERs(Distributed Energy Resources)组成的小型发配电系统^[1], 交流孤岛微电网中普遍采用传统下垂控制按照容量 比分配有功功率^[2],由于不同类型 DER 的运行成本 和发电特性不同,其易造成整个微电网的运行成本 偏高。因此,在当今越来越重视经济性的时代,考虑 成本优化以实现微电网的经济运行尤为重要。

经济运行通常采用集中式方法,诸如二次规划 算法、智能算法等解决优化模型,求得的最优运行曲 线实时发送给 DERs 以实现有效降低发电成本的目 的[3]。集中式方法虽然精度高,但是对大规模问题 求解困难,容易受中央系统单点故障和监控设备通 信失败的影响,可靠性不高。近年来,分布式优化运 行备受研究者的青睐,其主要分为分布式优化与分 布式经济控制2个方面。针对分布式优化,基于多 智能体一致性理论,文献[4]提出了一种以调节成 本为一致性变量的协同经济功率分配框架。文献 [5]使用前向梯度和有限时间一致性算法来解决含 有热发电机和风机的经济调度模型。对于分布式经 济控制,考虑到下垂控制在孤岛微电网中应用的普 遍性和便捷性,一些学者提出经济下垂控制框架。 文献[6-8]设计了一种非线性经济下垂控制器,该控 制器通过使高成本的发电机少出力以及低成本的发 电机多出力来降低发电成本,然而该控制器基于 DERs 的发电成本而并非边际成本设计,因此只能使 系统经济运行而并非最优经济运行,此外,它也未考 虑孤岛微电网的二次电压和频率恢复。文献[9]提 出了一种自治的三层控制架构来实现不同 DERs 之 间的等边际成本,由于其采用了低通滤波器来减少

收稿日期:2018-04-25;修回日期:2018-11-19

基金项目:国家重点研发技术资助项目(2016YFB0901302) Project supported by the National Major Research and Development Program of China(2016YFB0901302) 非线性下垂控制器对系统稳定性的影响,动态响应 较慢。文献[10]针对低压孤岛微电网,提出基于边 际成本-电压的下垂控制,但是由于线路阻抗的影 响,其在一次下垂控制中未能实现边际成本相等,而 是基于一致性算法在二次控制中实现,这无疑增加 了设计复杂度,且采用传统的有功-电压下垂控制也 可以实现。针对采用下垂控制的微电网,文献[11] 采用一致性算法实现边际成本相等,然而由于其需 要选择主导节点来控制边际成本增加或者减少的方 向,削弱了稳定性。

考虑孤岛微电网的经济性,本文提出一种边际 成本频率下垂控制框架,该框架在一次控制中即可 实现各个 DER 的边际成本相等,从而实现最优经济 运行。当某个 DER 的功率达到出力上限时,启动对 应的自适应控制器将功率稳定在最大值,从而退出 边际成本一致性。采用分布式二次频率控制器 DSFC(Distributed Secondary Frequency Controller)快 速地使系统频率恢复到额定值。除此之外,将虚拟 阻抗^[12-13]应用在线阻抗为阻性的低压网络中以改善 无功功率分配特性,且使用文献[14-15]提出的分布 式二次电压控制器 DSVC(Distributed Secondary Voltage Controller)来恢复节点电压幅值,同时改善无功 分配。

1 边际成本频率经济下垂控制

1.1 边际成本

对于不同类型的 DERs,发电成本可以统一写成 凸二次函数形式^[16],如式(1)所示。

$$\begin{cases} C_{i,G}(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \\ 0 \leq P_i \leq P_{i,\max} \end{cases} \quad i = 1, 2, \cdots, N_G \quad (1)$$

其中, P_i 为发电机 i 的有功功率; a_i 、 b_i 、 c_i 为正的发 电成本系数; $P_{i,max}$ 为发电机 i 的出力上限; $C_{i,G}(P_i)$ 为发电机 i 的发电成本; N_G 为发电机的数目。

式(2)给出了发电机 *i* 的边际成本 $L_i(P_i)$ 。

$$L_i(P_i) = \frac{\mathrm{d}C_{i,\mathrm{G}}(P_i)}{\mathrm{d}P_i} = 2a_iP_i + b_i \tag{2}$$

1.2 经济下垂控制

如果不考虑 DERs 的出力限制,依据等微增率 准则^[11],当微电网中所有 DERs 的边际成本达到相 同时,系统总运行成本最小。依据该准则,为了实现 整个微电网的最优经济运行,在传统有功频率下垂 控制的基础上,考虑各个 DER 的边际成本,提出如 式(3)所示的经济下垂控制框架。

$$f_i = f^* - \lambda_i L_i(P_i)$$
 $i = 1, 2, \cdots, N_G$ (3)

其中, f_i 为 DER i的频率; f^* 为额定频率; λ_i 为经济下垂系数, 其取值应满足式(4)。

$$\lambda_i \leq \frac{\Delta f_{\max}}{L_i(P_{i,\max})} \tag{4}$$

其中,Δf_{max}为系统频率与基准频率的最大偏差。

如果不考虑 DERs 的功率限制,通过选择相同 的经济下垂系数 λ_i ,各个 DER 的边际成本 $L_i(P_i)$ 相 同。然而,每个 DER 均有最大功率限制,当某个 DER 达到它的最大出力限制时,应该稳定在最大 值,即其边际成本为常值。此时,达到功率饱和的 DER 应调节其经济下垂系数 λ_i 的值使 $\lambda_i L_i(P_{i,max})$ 与其余 DERs 的 $\lambda_i L_i(P_i)$ 相同。本文设计一种基于 一致性算法的自适应控制器完成此功能。

2 基于一致性的自适应控制器

2.1 一致性算法^[11]

微电网中,不同节点之间的通信可以描述为权 重拓扑 G(d, X, A),其中 $d = \{1, 2, ..., n\}$ 表示不同 的节点,n为节点个数; $X \subseteq d \times d$ 表示不同节点之间 的通信连接; $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 为通信拓扑连接矩阵,其中 $a_{ij} = a_{ji} \ge 0$,如果节点 i 能够接收到来自节点 j 的信 息,则 $a_{ij} > 0$,否则 $a_{ij} = 0$ 。节点 i 的邻居集合可表示 为 $N_i = \{j \in d: (i, j) \in X\}$ 。假设 x_i 表示节点 i 的状态 信息,其可以根据式(5)来更新自身的状态。

$$\dot{x}_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j - x_i)$$
(5)

式(5)称为连续时间平均一致性算法,一致性 问题的目的在于使所有节点的状态达到一致且为稳 态时所有节点状态信息之和的平均值,即 $x_i = x_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} x_k(i, j \in \{1, 2, \dots, n\}, i \neq j)$ 。对于每一个节点的 $x_i(i \in \{1, 2, \dots, n\})$ 而言,其仅通过自身以及邻居的状态信息来更新自己的信息。为了进一步描述式(5),本文定义凸权重 w_{ij} ,重写为式(6)。

$$\frac{1}{\sum_{j \in N_i} a_{ij}} \dot{x}_i = -x_i + \sum_{j \in N_i} w_{ij} x_i$$

$$w_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k \in N_i} a_{ik}} \ge 0, \ \sum_{j \in N_i} w_{ij} = 1$$
(6)

当系统逐渐变成稳态时,*x_i*逐渐趋于0,*x_i*将等 于邻居状态信息的权重平均值,即:

$$x_i = \sum_{j \in N_i} w_{ij} x_j \tag{7}$$

2.2 基于一致性的自适应控制器

在一致性算法的基础上,提出基于一致性的自适应控制器,其主要通过调节饱和 DER 的经济下垂系数 λ_i 来处理最大功率限制问题,如式(8)所示。

$$\begin{cases} \psi_{i}\dot{\lambda}_{i} = \frac{1}{L_{i}(P_{i,\max})} \sum_{j \in N_{i}} a_{ij}(\lambda_{j}L_{j}(P_{j}) - \lambda_{i}L_{i}(P_{i})) \\ P_{i} \ge P_{i,\max} \end{cases}$$

$$(8)$$

$$(8)$$

$$\lambda_{i} = \lambda_{0} \quad 0 \le P_{i} < P_{i,\max}$$

其中, ψ_i 负责经济下垂系数调节的速度, ψ_i 越大,速 度越慢;权重系数 a_{ij} 与 $\lambda_i L_i(P_i)$ 达到一致性的速率 有关, a_{ij} 越大,速率越快。对于式(8)中第一式而 言,DER *i*达到饱和,其边际成本 $L_i(P_{i,max})$ 是一个 常值,此时 λ_i 应随着其余 DERs 的调节而变化,直

到
$$\lambda_i L_i(P_{i,\max}) = \lambda_j L_j(P_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \lambda_k L_k(P_k)$$
。对于式

(8)中第二式,对于未饱和的 DER i 而言, λ_i 是一个 常值 λ_0 ,即初始下垂系数,其边际成本 $L_i(P_i)$ 将随 着系统运行时间而变化直到与其余未饱和 DERs 的 边际成本达到相同。即当 DER i 还未达到最大功率 限制时,采用式(8)中第二式给出经济下垂系数;当 其达到最大功率限制时,式(8)中第一式用来更新 经济下垂系数。

与式(6)、(7)相同,当系统稳定时,饱和 DER i的经济下垂系数 λ_i 由其邻居的经济下垂系数及其边际成本的权重平均值决定,如式(9)所示。

$$\lambda_{i} = \frac{1}{L_{i}(P_{i,\max})} \sum_{j \in N_{i}} w_{ij} \lambda_{j} L_{j}(P_{j})$$

$$w_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k \in N_{i}} a_{ik}} \ge 0$$
(9)

3 分布式二次控制

3.1 分布式二次频率控制 本文提出的 DSFC 如式(10)、(11)所示。

$$f_i = f^* - \lambda_i L_i(P_i) + \Delta f_i \tag{10}$$

$$\Delta f_i = \frac{1}{k_i} \int_0^t \left[(f^* - f_i) + \sum_{j \in N_i} b_{ij} (\Delta f_j - \Delta f_i) \right] \mathrm{d}t \quad (11)$$

其中, Δf_i 为二次调节变量; k_i 为决定频率 f_i 调节速率的正常数, k_i 越大,速率越慢; b_{ij} 为微电网通信拓

扑邻接矩阵 B 的权重系数,其和二次调节变量 Δf_i 达到一致的速率有关, b_i 越大,速率越快。

DSFC 实现频率恢复的机理如下:二次控制式 (11)的作用是使得每个 DER 的频率 f;恢复到额定 值 f^* ,且保证每个 DER 的二次调节变量 Δf_i 相等。 因此,当每个 DER 的输出功率未达到最大值 P_{i.max} 时,其经济下垂系数 λ_i 相等且均为 λ_0 ,每个 DER 在 式(11)的积分作用下恢复到额定频率以及二次调 节变量达到相等,此时对于式(10),可以推出各个 DER 的边际成本 $L_i(P_i)$ 也达到相等,即在频率恢复 的同时仍然实现边际成本的相等性:当其中某个 DER i 的输出功率达到最大值 P_{i.max}时,其经济下垂 系数 λ_i 将大于 λ_0 ,其余 DERs 的经济下垂系数仍为 λ_0 ,每个 DER 在式(11)的积分作用下恢复到额定频 率以及二次调节变量达到相等,此时对于式(10), 可以推导出达到最大输出功率的 DER i 的边际成本 小于其余 DERs 的边际成本,且其余 DERs 之间的边 际成本仍然相等,即式(10)、(11)仍然能保证在频 率恢复的同时有效地处理边际成本。

上述 2 种情况分别如图 1(a)、(b)所示。对于 图 1(a),由于 DER 1 与 DER 2 均未达到最大输出功 率,因此有、无二次控制的下垂特性均是重合的,当 二次控制式(11)执行之后,DER 1 与 DER 2 的频率 均恢复到额定值并且两者边际成本相等。对于图 1 (b),由于 DER 1 达到最大输出功率,DER 2 未达到最 大输出功率,因此仅有一次控制与含有二次控制的 下垂特性不是重合的,当二次控制式(11)执行之 后,DER 1 与 DER 2 的频率恢复至额定值并且 DER



(a) DER 1与 DER 2 均未达到最大输出功率



① 仅有一次控制(DER 1),② 仅有一次控制(DER 2) ③ 含有二次控制(DER 1),④ 含有二次控制(DER 2)





1的边际成本 $L_1(P_{1,\max})$ 小于 DER 2 的边际成本 $L_2(P_2)_{\circ}$

传统下垂控制($f_i = f^* - m_i P_i, m_i$ 为传统下垂系数)的大信号稳定性分析见文献[17],得到的稳态 网络频率 f_s 为:

$$f_{\rm ss} = f^* - P_0 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i}$$
(12)

其中, P_0 为微电网内部有功功率负荷总和。类似地,对于等式(10)、(11),稳态网络频率 f_{ssl} 可表示为:

$$f_{ss1} = f^* - \sum_{i=1}^{n} L_i(P_i) / \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda_i}$$

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = P_0$$
(13)

$$E_{i} = E^{*} - n_{i}Q_{i} + \Delta E_{i}, \ n_{i} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{Q_{i,\max}}$$
(14)

$$\Delta E_{i} = \frac{1}{r_{i}} \int_{0}^{t} \left[\eta_{i} (E^{*} - E_{i}) + \sum_{j \in N_{i}} c_{ij} \left(\frac{Q_{j}}{Q_{j,\max}} - \frac{Q_{i}}{Q_{i,\max}} \right) \right] dt$$
(15)

其中, E_{max} 、 E_{min} 分别为最大和最小的电压限制; $Q_{i,max}$ 为额定的无功容量; E^* 为额定的网络电压; Q_i 为DER i输出的无功功率; n_i 为无功电压下垂系数; ΔE_i 为二次调节变量; r_i 与系统达到稳态的速率有关, r_i 越大,速率越慢; η_i 负责电压调节的精度, η_i 越大,精度越高; c_{ij} 为微电网通信拓扑邻接矩阵 C的权重系数,其与无功功率分配的精度有关, c_{ij} 增加,精度提高。文献[14-15]给出了式(15)的小信号稳定性分析,从中可以得知无功功率均分和电压调节 2个目标是相互冲突的,所以应该选择合适的 η_i 和 c_{ij} 值来保证式(15)的稳定性。具体的取值影响请参考文献[14-15]。

3.3 分布式控制策略的具体实现

每个 DER 的分布式控制策略图如附录中图 A1 所示,其包含经济下垂控制器式(3)、无功电压控制 器式(14)、基于一致性的自适应控制器式(8)、 DSFC 式(11)、DSVC 式(15)。

每个 DER 均配备一个智能体 DCr,其主要负责 通信和一致性计算。对于稀疏的通信网络,DCr *i* 仅 和邻居的 DCr *j* 通信,由于不存在中心节点,因此其 有较高的可靠性。以 DER *i* 为例,DCr *i* 采集本地电 压 E_i 、无功功率 Q_i 、本地频率 f_i 及 $\lambda_i L_i(P_i)$,发送相 关信息(Q_i , Δf_i , $\lambda_i L_i(P_i)$)给邻居智能体 DCr *j*,并从 邻居智能体 DCr *j* 接收相关信息(Q_j , Δf_j , $\lambda_j L_j(P_j)$)。 获得邻居的相关参数值之后,每个智能体执行一致 性算法实现频率恢复、电压调节以及调节经济下垂系数稳定最大输出功率的目标。

4 仿真证明

仿真所用的孤岛微电网如图 2 所示,其包括 4 台传统发电机 CG(Conventional Generator),1 个可选 的最大功率点跟踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)运行的光伏发电系统。孤岛微电网的通信 网络拓扑如图 3 所示,通信邻接矩阵 $A = [a_{ij}]$ 、 $B = [b_{ij}]$ 、 $C = [c_{ij}]$ 的取值见式(16)。线路 Line 4—7 阻 抗均为 0.1+j0.006 Ω, CG 之间的连接线 Line 1—3 阻 抗分别为 0.2+j0.012 Ω、0.3+0.018 Ω、0.4+j0.027 Ω。 对于 CG*i*, $\lambda_0 = 0.01$, $k_i = 0.02$, $r_i = 0.01$, $\eta_i = 5$, $\psi_i = 0.01$, $n_i = 10^{-4}$, $Q_{i,max} = 20$ kvar。其余仿真参数如表 1 所示。





图 2 孤岛微电网的结构

Fig.2 Structure of isolated microgrid



图 3 分布式通信拓扑图

Fig.3 Topology of distributed communication

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

_				
	发电机	$a_i / [\not \cdot (\mathbf{k} \mathbf{W} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{h})^{-1}]$	$b_i / [\mathbf{\hat{k}} \cdot (\mathbf{k} \mathbf{W} \cdot \mathbf{h})^{-1}]$	$P_{i,\max}/\mathrm{kW}$
	CG1	0.005 4	2.2	14.0
	CG2	0.006 3	2.5	15.0
	CG3	0.004 6	1.8	20.0
_	CG4	0.003 5	3.5	16.5
-				

4.1 有效性分析

仿真在打开开关,即整个孤岛微电网仅含4台

CG的情况下进行,采用本文所提分布式经济运行策略,有效性结果如图4所示。





从图 4(a)、(b)可以看出,5 s之前微电网运行 在轻负荷状态下,所有 CG 的边际成本达到一致,没 有 CG 达到饱和;5 s之后,系统负荷大幅度增加,CG4 由于较低的发电成本输出功率达到饱和,即16.5 kW, 因此 CG4 退出边际成本一致性,其余 CG(CG1— CG3)继续保持等边际成本运行;10 s之后,系统负 荷降为初始状态,所有 CG 的边际成本又一次达到 相等,并与5 s前的收敛值相同。从上述分析可知, 根据等微增率准则,微电网在整个运行过程中一直 以最优经济状态运行,系统运行成本最低。

从图 4(c)、(d)知,系统频率一直保持在额定值 f*=50 Hz 运行,电压幅值稳定在额定值 E*=311 V 附近。由于无功功率均分和电压调节是相互冲突 的,因此无功功率未能均匀分配,但相差不太大。

4.2 加入光伏 MPPT 之后的性能

图 5 给出了开关闭合后,微电网包含 4 台 CG 和 1 个以 MPPT 运行的光伏系统的运行结果。在整个 运行过程中,光伏系统的输出功率先不断减少后不 断增加,系统总负荷保持不变。从图 5 可以看出,当 光伏系统输出功率不断减少时,3 台 CG 的输出功率 不断增加,对应的边际成本以相等的状态不断增加。 当光伏的功率减少到接近于 0 时,CG4 输出功率达 到饱和,退出边际成本一致性。之后随着光伏的功 率逐渐增加,CG 的输出功率不断减少,各台 CG 的 边际成本以相同的状态不断减小。加入光伏 MPPT



图 5 加入光伏 MPPT 之后的性能 Fig.5 Performance after adding MPPT of PV

之后,根据等微增率准则,在微电网的整个运行过程 中,系统始终保持在最优经济状态。从 4.1 节和本 节可以看出本文所提分布式经济策略的可行性与有 效性,采用经济下垂控制的 CG 不但可以单独以最 优状态运行,也可以集成以最大功率输出运行的可 再生能源以最优状态运行。

4.3 抗通信失败性能

本文所提基于一致性的分布式策略具有抗通信 失败的性能,即使通信单线连接失败,只要通信拓扑 是连通的,所提的分布式策略仍然是有效的。图6 给出了微电网抗通信失败的运行结果,5s之前,图3 所示的单线连接 Link(1,2) 以及 Link(1,4) 断开, 通 信拓扑失去连通性;5 s之后,仅Link(1,2)连接恢 复,Link(1.4) 连接仍失败。从图 6 可以看出,在整 个运行过程中,由于 CG4 输出功率达到饱和(16.5 kW),边际成本一直保持在最大值不变。由于通信 拓扑失去连通性,CG1 被孤立,因此5 s 之前 CG1 的 边际成本比 CG2/CG3 要高,微电网运行在非最优状 态:5 s之后,Link(1,2)恢复,微电网的通信拓扑被 连通,CG1 重新连入通信,因此其边际成本保持和 CG2/CG3相同,微电网运行在最优状态。5 s之后, 即便通信连接 Link(1,4) 是断开的, 所提的分布式 策略仍然是有效的,即所提策略具有抗单线连接通 信失败的性能。



图6 抗通信失败性能



5 结论

在传统下垂控制的基础上,考虑孤岛微电网的 运行成本,本文提出一种简便实用的分布式经济控 制框架,采用该框架孤岛微电网可以始终以最小成 本运行,且所提分布式经济运行控制框架具有抗通 信失败的性能。本文所提分布式经济控制框架未考 虑线路损耗对系统总成本以及边际成本的影响,这 将是本文下一步的工作。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 熊雄,王江波,井天军,等. 微电网群功率优化控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):10-17.
 XIONG Xiong, WANG Jiangbo, JING Tianjun, et al. Power optimization control of microgrid cluster[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(9):10-17.
- [2]黄骏翅,曾江,杨林,等. 低压微网逆变器自适应谐波下垂控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):204-226.
 HUANG Junchi,ZENG Jiang, YANG Lin, et al. Adaptive harmonic droop control strategy of low-voltage microgrid inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):204-226.
- [3] LI C, BOSIO F, CHEN F, et al. Economic dispatch for operating cost minimization under real-time pricing in droop-controlled DC microgrid[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2016, 5(1):587-595.
- [4]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
 [J].电力系统自动化,2017,41(5):8-15.
 YANG Jiahao. Consensus algorithm based real-time collaborative power dispatch for island multi-microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(5):8-15.
- [5] GUO F, WEN C, MAO J, et al. Distributed economic dispatch for smart grids with random wind power [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016,7(3):1572-1583.
- [6] NUTKANI I U, LOH P C, BLAABJERG F. Droop scheme with consideration of operating costs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(3):1047-1052.
- [7] NUTKANI I U, LOH P C, WANG P, et al. Autonomous droop scheme with reduced generation cost[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12):6803-6811.
- [8] NUTKANI I U, LOH P C, BLAABJERG F. Cost-based droop scheme with lower generation costs for microgrids [J]. IET Power Electronics, 2014,7(5):1171-1180.
- [9] XIN H, ZHANG L, WANG Z, et al. Control of island AC microgrids using a fully distributed approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015,6(2):943-945.
- [10] 苏晨,吴在军,吕振宇,等. 基于边际成本下垂控制的自治微电
 网分布式经济运行控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):
 59-66.

SU Chen, WU Zaijun, LÜ Zhenyu, et al. Droop control based on marginal cost for distributed economic operation of islanded microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11):59-66.

- [11] ZHANG Z, YING X, CHOW M Y. Decentralizing the economic dispatch problem using a two-level incremental cost consensus algorithm in a smart grid environment[C] // Proceedings of 2011 North American Power Symposium. Boston, USA: IEEE, 2011:1-7.
- [12] 王逸超,谢欣涛,陈仲伟,等.不同容量微网逆变器的自适应虚 拟阻抗运行策略[J].电力自动化设备,2018,38(6):29-33.
 WANG Yichao,XIE Xintao,CHEN Zhongwei, et al. Adaptive virtual impedance operation strategy of microgrid inverters with different capacities[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(6): 29-33.
- [13] GUERRERO J M, VICUNA G D, 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.
- [14] SCHIFFER J, SEEL T, RAISCH J, et al. Voltage stability and reactive power sharing in inverter-based microgrids with consensusbased distributed voltage control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 24(1):96-109.
- [15] SIMPSON 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.
- [16] WANG Z, WU W, ZHANG B. A fully distributed power dispatch method for fast frequency recovery and minimal generation cost in autonomous microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7 (1):19-31.
- [17] SHAFIEE Q, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Distributed secondary control for islanded microgrids - a novel approach [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(2):1018-1031.

作者简介:



周晓倩(1988—),女,河南商丘人,博 士研究生,主要研究方向为微电网的优化 与运行控制(E-mail:xqzhou@sjtu.edu.cn); 艾芊(1969—),男,湖北武汉人,教 授,博士,主要研究方向为电能质量、分布式 发电、微电网(E-mail:aiqian@sjtu.edu.cn)。

同兒侑

Distributed economic control of microgrid based on adaptive economic droop control ZHOU Xiaoqian, AI Qian

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In island microgrid, the traditional droop control allocates active power according to the capacity ratio of distributed energy, which may easily cause high overall operation cost of microgrid. In order to effectively reduce the system operation cost, an economic droop control framework based on the marginal cost is proposed according to the equal incremental criterion, in which the outputs of distributed energies are corresponding to the equal marginal costs. Considering the maximum output limitation of distributed energy, the distributed adaptive controller based on the consistency is proposed to stabilize the power at the maximum value to exit the marginal cost consistency. A distributed secondary frequency controller is proposed to effectively recover the frequency of island microgrid. Simulative results verify the effectiveness of the proposed controller and the performance against communication failures. **Key words**; island microgrid; marginal cost; economic control; distributed; consistency; frequency



图 A1 每个 DER 的分布式控制架构

Fig. A1 Distributed control architecture of each DER