

考虑通信状态变化的直流微电网分布式事件驱动优化调度

赵海祺^{1,2}, 卢开诚¹, 董树锋¹, 葛明阳¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 浙江大学工程师学院, 浙江省杭州市 310015)

摘要: 在复杂的通信条件下,若微电网中分布式控制器无法实时监控与相邻控制器的通信状态,则会导致系统控制失稳。为解决该问题,提出一种微电网分布式控制算法。首先,基于一致性原理设计算法,以各节点分布式电源的增量成本作为一致性变量,实现微电网运行经济性最优,并考虑到直流微电网运行实际,降低了算法设计的复杂性。其次,提出一种设备运行模式自切换机制以改进分布式控制算法,分布式控制器可以根据与相邻节点分布式控制器的通信状态调整节点分布式电源的运行模式。然后,引入事件驱动控制技术,通过设计事件驱动条件降低控制过程中的通信频次,减少分布式控制器的能量损耗。最后,通过算例分析验证了所提微电网分布式事件驱动控制算法可以实现系统的经济调度,相较于下垂控制,可以实现设备在额定运行电压上下更小的波动,相较于未改进的分布式控制方法,可以根据通信状态自动调节运行模式,防止系统控制失稳。

关键词: 微电网; 分布式经济调度; 自切换; 通信状态; 事件驱动控制; 一致性算法

0 引言

微电网作为促进分布式能源大规模接入电力系统的有效方式^[1],受到广泛研究。微电网的经济调度旨在控制输出特性与发电成本均不相同的多种分布式能源在满足负荷需求和设备约束的前提下降低系统总的运行成本^[2]。

常见的微电网经济调度方式有3种:集中式控制^[3-4]、分布式控制和分散式控制。集中式控制的优势在于通过中央控制器控制所有可控分布式能源设备以更好地协调全局^[5],但随着微电网规模的不断增大,更加频繁的数据交互会增加中央控制器的通信和计算负担,影响控制的实时性。以下垂控制为代表的分散式控制是使用最为广泛的控制手段^[6-7],其无须进行设备间通信就可以实现控制,但是仅表现为最基础的控制,并且会导致微电网的电压和频率偏离基准值,因此通常仅用于底层控制。与其他的控制方法不同,分布式控制无需中央控制器,各可控分布式能源设备可以通过相邻单元的通信实现控制,并可对下垂控制导致的电压与频率偏离进行补偿,具有更好的鲁棒性和收敛速度,逐步受到学界的关注。

随着多年的发展,分布式控制已经有了较多的

成果,在微电网的控制中广泛应用,常见的算法包括一致性算法^[5,8-10]、扩散算法^[11-13]和交替方向乘子法^[14-15]等。文献[5]提出一种基于一致性原理和梯度下降法的完全分布式算法,以增量成本作为一致性变量,实现了微电网功率的合理分配,优化了微电网的运行成本;文献[9]提出一种针对微电网分布式储能的分组一致性控制策略,通过控制实现了储能单元组间的协调控制和储能单元的效率提升;文献[11]提出一种基于动态扩散算法的简化直流微电网分布式二层控制策略,在直流微电网面对负载突变和电气网络故障时均能够实现平均电压恢复以及电流均分,具备较强的鲁棒性。

现有研究成果已在分布式控制方面取得了较多理论性成果,但较少考虑工程实践中具体的设备与环境约束:1)现实中通信条件复杂,若分布式控制器无法根据与相邻控制器的通信状态灵活调整节点设备的运行模式,可能会导致系统失稳^[16];2)高通信频次的信息交互会消耗分布式控制器储存电量,降低使用寿命,并且由于信道资源的占用率变大,可能会影响微电网控制的实时性和精准度。

为解决上述问题,首先,以各分布式电源增量成本为一致性变量,设计了实现微电网运行经济性最优的一致性算法。考虑到直流微电网运行实际,设置了电压平均值约束,允许各个节点的电压在容许度的范围内波动,并提出以分布式电源输出电流表示的发电成本简化计算方法,降低了算法设计的复

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-08-18。

上网日期: 2023-09-26。

国家自然科学基金资助项目(52077193)。

杂性。其次,提出一种设备运行模式自切换机制,分布式控制器可以根据与相邻节点分布式控制器的通信状态调整分布式电源的运行模式。然后,引入事件驱动控制技术,设计了基于系统控制稳定性的事件触发条件,并加入了通信状态判定,不仅可以降低控制过程中的通信频次,也能灵活控制分布式电源的运行模式,提高系统运行稳定性。最终通过算例分析验证了所提算法的有效性。

1 图论基础与直流微电网分层控制

1.1 包含多个分布式电源的微电网拓扑

对于含有多台分布式设备的微电网系统,可以将每台分布式设备都看作一个节点,节点间通过电力联络线相连。

对于如图1所示的多节点系统来说,根据基尔霍夫定律,对于任意与一个及以上节点相连的节点,都有

$$I_{G_i} - I_{L_i} = \sum_{j \in N(i)} g_{ij}(U_i - U_j) \quad (1)$$

式中: U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压; I_{G_i} 和 I_{L_i} 分别为节点 i 处分布式电源的输出电流和负荷电流; $N(i)$ 为所有与节点 i 相邻的节点集合; g_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的线路导纳。

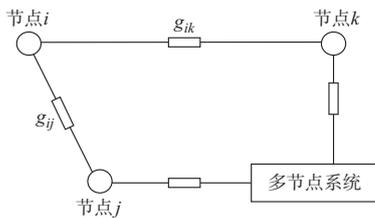


图1 多节点微电网系统
Fig. 1 Multi-node microgrid system

那么,对于多节点的微电网系统,有

$$I_G - I_L = GU \quad (2)$$

式中: $I_G = [I_{G_1}, I_{G_2}, \dots, I_{G_n}]^T$, $I_L = [I_{L_1}, I_{L_2}, \dots, I_{L_n}]^T$, $U = [U_1, U_2, \dots, U_n]^T$, 其中, n 为系统的节点个数; G 为节点联络矩阵,其元素表达式如式(3)所示。

$$G_{ij} = \begin{cases} \sum_{f \in N(i)} g_{if} & i = j \\ -g_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

式中: G_{ij} 为矩阵 G 中第 i 行第 j 列的元素。

基于该矩阵,就可以描述各个节点之间的通信状态。

1.2 基于事件驱动的一致性算法

1.2.1 离散一致性算法

在实际工程中,由于通信具有频次,因此系统的

控制过程表现出了实际的离散性^[17],对一致性算法的研究也多聚焦在离散领域,下文对离散一致性算法进行介绍。

对于一个系统,常采用以下离散一致性协议调节系统的控制输入:

$$u_i(k) = \sum_{j \in N(i)} a_{ij} [x_i(k) - x_j(k)] \quad (4)$$

式中: $u_i(k)$ 为对节点 i 的控制输入; $x_i(k)$ 和 $x_j(k)$ 分别为节点 i 和节点 j 在 k 时刻的状态变量; a_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的通信系数,系数越小则其通信状态越差,当 $a_{ij} = 0$ 时,表示节点 i 和节点 j 无通信连接。

那么,当各个节点通过与相邻节点进行信息交互达到状态量一致的时候,系统即达到了一致。

1.2.2 事件驱动控制的触发条件

在实际对微电网的控制中,由于分布式设备多布设于环境恶劣的场景中,此时采用基于事件驱动的一致性控制算法可以使分布式控制器仅在计算使用值与实际值大于设定的偏差时施加控制,能够有效减少分布式控制器之间通信的频次,提高通信资源利用率^[18]。

但是,如果事件触发条件设计得不合理,将不会达到最好的控制效果:若设置的触发阈值较大,则控制不够实时和精准,若设置的阈值过小,则可能出现芝诺现象^[19],导致控制系统死机。因此,应该寻找一个合适的条件,使得当计算使用值 $\hat{x}_i(t)$ 与实际值 $x_i(t_k)$ 的偏差大于某个阈值时进行通信交互,更新状态变量的值。

在控制过程中,若实际值与计算值的偏差超过阈值时,就可以认为系统处于不稳定状态,并且需要通过控制“消除”这种不稳定。基于这种思想,可以将系统稳定性条件作为事件触发条件,当该条件不满足时对微电网施加控制。

本文采用李雅普诺夫稳定性理论对系统稳定性进行分析,该理论自提出以来,在多个领域进行了广泛的应用,是目前研究者常用的稳定性分析方法,在微电网控制领域也已有诸多应用^[20-21],可以证明该方法的有效性。

通过附录A中证明部分展示的过程,可得到每个节点需要满足的充分条件为:

$$p_i^2 \leq \frac{\sigma \epsilon (1 - \epsilon L_{ii})}{L_{ii}} z_i^2 \quad (5)$$

式中: p_i 为节点 i 在控制过程中计算使用值与实际值的偏差; σ 为调节系数,可以在保持稳定性的前提下对事件触发的阈值进行调节; L_{ii} 为状态转移矩阵 L 中第 i 行第 i 列的元素; ϵ 为利用均值不等式对李雅

普诺夫方程一阶导数处理时引入的正常数; z_i 为节点*i*与其所有相邻节点状态变量的差值。

当该条件不满足时,应该触发控制事件,施加控制给微电网系统,使节点回归稳定。

2 直流微电网经济调度问题

2.1 分布式电源发电成本简化建模

对于分布式电源,已有较多的研究表明其发电成本可以表示为输出功率的二次函数^[22],即

$$F_{Gi} = \frac{1}{2} a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (6)$$

式中: F_{Gi} 为分布式电源的发电成本; P_{Gi} 为分布式电源的输出功率; a_i 、 b_i 、 c_i 分别为发电成本计算的二次系数、一次系数和常数。

对于直流微电网而言,在其运行过程中,直流母线电压值往往是在基准值上下波动的,若波动范围较小(节点电压 $U \approx 1$ p.u.),那么基于功率方程(输出功率 $P = UI$)就可将负荷功率的分布转化为负荷电流的分布^[23];此时,就可以通过调节直流微电网的节点电压值对节点间的功率流动进行调节,进而通过基尔霍夫电流定律根据节点间的电流和负荷电流约束分布式电源的出力,实现优化控制和经济调度的目的。各节点发电设备的输出功率 P_{Gi} 在运行中也近似等于输出电流 I_{Gi} ,则式(6)可以改写为:

$$F_{Gi} = \frac{1}{2} a_i I_{Gi}^2 + b_i I_{Gi} + c_i \quad (7)$$

在直流微电网控制中,若直接以输出功率 P 为控制对象进行算法设计,则输出功率 P 与节点电压 U 的非线性关系将导致算法的复杂度增大。因此,采用如式(7)所示的发电成本数学形式,可以降低分布式算法的复杂度。

2.2 以总发电成本最低为优化调度目标的经济调度模型

基于2.1节所述,得到微电网的经济调度最优化目标:

$$\min \sum_{i=1}^n F_{Gi} \quad (8)$$

在对直流微电网控制策略的设计中,不能忽视的问题是线路阻抗导致的节点电压差,当考虑到线路阻值时,若保持各节点电压均处于母线电压的基准值,则节点间的功率流动将无法进行,因此除功率平衡约束和各条母线分布式电源出力约束外,对母线电压的约束可设置为各条母线的平均值为母线电压基准值,以此来平衡电压稳定和功率流动经济调度的需要。即

$$\sum_{i=1}^n I_{Gi} = \sum_{i=1}^n I_{Li} \quad (9)$$

$$0 \leq I_{Gi} \leq I_{Gi}^{\max} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{U_i}{n} = U_{\text{nom}} \quad (11)$$

式中: I_{Gi}^{\max} 为节点*i*处分布式电源的最大输出电流; U_{nom} 为节点额定电压。

本文以增量成本作为一致性变量,则经济调度的最优条件为:

$$\frac{\partial F_{G1}}{\partial I_{G1}} = \frac{\partial F_{G2}}{\partial I_{G2}} = \dots = \frac{\partial F_{Gn}}{\partial I_{Gn}} \quad (12)$$

此时,称 $\mu_i = \partial F_{Gi} / \partial I_{Gi}$ 为节点*i*处分布式电源的增量成本,该最优化条件称为“等微增率准则”^[24]。

3 改进的分布式一致性控制算法

3.1 考虑通信状态变化的运行模式自切换机制

为使微电网的分布式控制器能够根据自身与相邻节点的通信状态及时调整节点设备的运行模式,本文提出了一种运行模式自切换机制:当分布式控制器与相邻节点存在通信时,根据一致性理论进行节点电压参考值计算并下发该指令,若分布式控制器与相邻节点均不存在通信时,则分布式控制器下发指令使节点的电压为母线电压基准值。在介绍这一机制之前,首先介绍设备连接码的定义。

设备连接码($u_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij}, \dots, u_{in}]$, $j = 1, 2, \dots, n$)用来表示分布式电源*i*与其他分布式电源的连接状态,以0、1表示,当分布式电源*i*与分布式电源*j*之间可以通信时(包括 $i = j$), $u_{ij} = 1$,否则 $u_{ij} = 0$ 。设备连接码在每次控制被触发时更新,在分布式电源*i*与相邻分布式电源的通信连接状态变化时变化。

对于不同的设备连接码,节点设备采用不同的运行模式:

1) 节点*i*的设备连接码 $u_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij}, \dots, u_{in}]$, $j = 1, 2, \dots, n$,当 $u_{ij} = 1$ 且其他均为0时,设备的输出电压设置为基准值;

2) 当节点*i*的设备连接码存在 $u_{ij} = 1$ ($i \neq j$)时,设备的节点电压受分布式控制器控制,并根据设备连接码与相应设备进行信息交互。

3.2 基于一致性算法的分布式控制

基于2.2节等微增率准则的思想,可以设计直流微电网经济调度分布式控制算法,但为了避免控制过程中由于追求一致性而导致部分分布式电源输出超限的情况发生,对增量成本的计算方法进行改进^[5,21,25]。

对于分布式电源 i , 其增量成本的最大值为:

$$\mu_i^{\max} = F_{G_i}(I_{G_i}^{\max}) = a_i I_{G_i}^{\max} + b_i \quad (13)$$

式中: μ_i^{\max} 为分布式电源 i 的最大增量成本。

由于各台分布式电源的一、二次系数不同, 其最大增量成本也不尽相同, 因此在控制过程中可能会出现如附录 A 图 A1(a) 所示的情况。如图 A1(a) 所示, 当系统的一致性变量取 μ 时, 可能会发生部分分布式电源出力越限的情况, 如电源 1。针对这个问题, 对 $\rho I_{G_i}^{\max} \leq I_{G_i} \leq I_{G_i}^{\max}$ 的部分进行弯折, 保证当 $\mu = \mu_{\max}$ 时, 各台分布式电源的输出电流均为最大值, 如图 A1(b) 所示, 这时, 增量成本 μ_i 的计算表达式为:

$$\mu_i = \begin{cases} a_i I_{G_i} + b_i & 0 \leq I_{G_i} < \rho I_{G_i}^{\max} \\ \tilde{a}_i I_{G_i} + \tilde{b}_i & \rho I_{G_i}^{\max} \leq I_{G_i} \leq I_{G_i}^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中: \tilde{a}_i 和 \tilde{b}_i 分别为弯折后发电成本计算的二次系数和一次系数, $\tilde{a}_i = (\mu_{\max} - a_i \rho I_{G_i} - b_i) / [(1 - \rho) I_{G_i}]$, 其中 ρ 为弯折点参数, 其值等于弯折点对应的功率与最大功率之比; $\tilde{b}_i = \mu_{\max} - \tilde{a}_i I_{G_i}^{\max}$ 。

根据式(5), 对于含有多个分布式电源节点的直流微电网, 其节点 i 的控制触发条件为:

$$e_i^2 > \frac{\sigma \epsilon (1 - \epsilon G_{ii})}{G_{ii}} \xi_i^2 \quad (15)$$

式中: $e_i = \mu_{r,i} - \mu_{et,i}$, 其中, $\mu_{r,i}$ 为分布式电源 i 的实时增量成本, $\mu_{et,i}$ 为上次控制触发时分布式电源 i 的增量成本; ξ_i 为分布式电源 i 与其相邻节点分布式电源的增量成本的差值; 对于 ϵ , 取值应保证式(15)右侧为正, 即 $0 < \epsilon < 1/G_{ii}$ 。

对于节点 i , 当触发条件满足时, 计算分布式电源 i 的实时增量成本 $\mu_{r,i}$, 并保存此刻实时增量成本为触发时增量成本 $\mu_{et,i}$ 。

$$\mu_{r,i}(k) = a_i I_{G_i}(k) + b_i \quad (16)$$

在计算 ξ_i 之前, 基于 3.1 节所述的设备连接码, 对 G 的求解方法进行改进。

根据式(3)的描述, 将 G 分解为:

$$G = D - A \quad (17)$$

其中, 矩阵 A 中第 i 行第 j 列的元素 A_{ij} 和矩阵 D 中第 i 行第 j 列的元素 D_{ij} 可分别表示为:

$$A_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ g_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (18)$$

$$D_{ij} = \begin{cases} \text{sum}(A(i, :)) & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\text{sum}(A(i, :))$ 表示对矩阵 A 中第 i 行的所有元素求和。

可以认为 $G = f(A)$, 当对 A 进行处理时, G 也

相应发生改变。在本文中对 A 的处理如下:

$$A' = u \odot A \quad (20)$$

式中: A' 为经过处理后用来计算 G 的矩阵。式(20)表示将矩阵 u 与矩阵 A 点乘计算得到矩阵 A' , 其中 $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ 。

然后使用 A' 进行计算, 可以得到 ξ_i 在 k 时刻的计算式为:

$$\xi_i(k) = \sum_{j \in N(i)} u_{ij} g_{ij} [\mu_i(k) - \mu_j(k)] \quad (21)$$

如此, 当节点 i 与其相邻节点的通信状态发生变化时, 可对信息交互的范围进行动态调整。

之后计算 $k+1$ 时刻节点的电压调节值, 计算方法为:

$$V_{\text{ref},i}(k+1) = V_{\text{ref},i}(k) - c \xi_i(k) \quad (22)$$

式中: $V_{\text{ref},i}(k)$ 和 $V_{\text{ref},i}(k+1)$ 分别为分布式电源 i 在 k 时刻和 $k+1$ 时刻的节点电压参考值; c 为步长调节系数, 为保证矩阵 ξ 的特征值小于 $1^{[26]}$, 取 c 的值在以下范围内: $0 < c < 1/(\lambda_{A_n} \lambda_{G_n}^2)$, 其中 λ_{A_n} 为发电成本系数 a_i 中的最大值, λ_{G_n} 为矩阵 G 的最大特征根。

3.3 算法流程

结合 3.1 节和 3.2 节, 可以得到改进的基于一致性算法的分布式控制算法流程: 当分布式控制器监测到控制的分布式电源的状态满足事件触发条件时, 尝试与相邻控制器进行通信, 并更新设备连接码。若与相邻控制器存在通信, 则进行一致性计算, 通过施加控制使相邻节点的分布式电源的增量成本趋于一致; 若与相邻控制器的通信全部中断, 则将本节点分布式电源的输出电压设置为母线电压基准值, 减少在“通信孤岛”状态时由于负荷波动对母线电压的影响, 并可以绘制出控制流程如图 2 所示。

4 算例分析

4.1 算例参数与算例设置

为验证本文所提直流微电网经济调度一致性算法在负荷功率分配以及调节母线电压方面的有效性, 在 Simulink 中搭建了某实际运行中包含 5 个节点的直流环网微电网模型, 其拓扑结构见附录 B 图 B1。黑色线路表示电能传输线路, 红色线路表示通信信息传输线路。

本算例中对分布式电源的分层控制结构为: 分布式控制器向节点发送电压参考值, 之后通过下垂控制调节各个节点分布式电源的出力。设置直流微电网模型的母线电压基准值为 400 V, 电流的基准值为 200 A, 在该直流微电网中, 接入节点 1 的分布式电源为光储单元(记作 DG1), 接入节点 2、节点 3

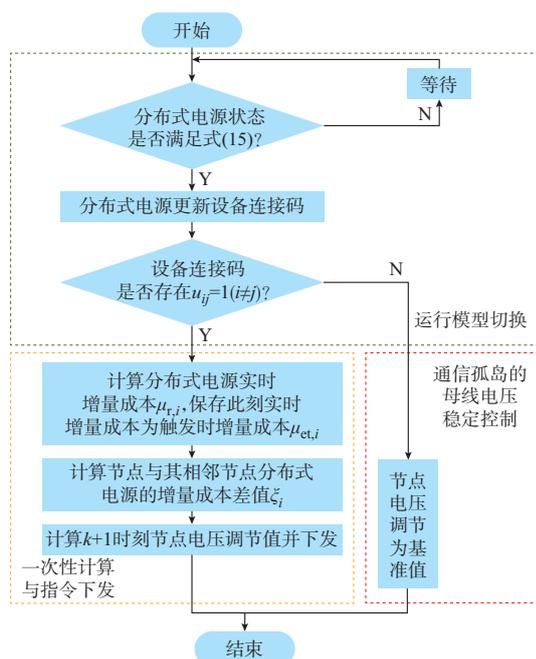


图2 算法流程图
Fig. 2 Algorithm flow chart

和节点4的分布式电源为微型燃气轮机(记作DG2、DG3、DG4),接入节点5的分布式电源为燃料电池(记作DG5)。对于以上分布式电源,其最大出力均为80 kW。其余系统内参数和负荷参数如附录B表B1和表B2所示^[21,27-28],分布式算法中的参数设置如表B3所示。

基于系统参数,本文设置算例如下:

1)算例1,直流微电网各分布式电源控制采用下垂控制(记作下垂控制),下垂控制参数取0.1;

2)算例2,直流微电网各分布式电源控制采用未考虑微电网设备在线状态的一致性算法(记作控制方法1),下垂控制的参数同算例1;

3)算例3,直流微电网各分布式电源控制采用考虑微电网设备在线状态的一致性算法(记作控制方法2),下垂控制的参数同算例1。

根据算例仿真结果,验证以下问题的正确性:

1)验证式(7)的正确性;

2)验证所提算法的有效性,本文考虑到线路阻抗对直流微电网控制的影响,允许各节点电压在基准值附近波动,但波动范围应存在一个容许度^[29],设为 $\pm 5\%$,若超过该范围,则发电设备和负荷设备不能保持正常运行,即算法的有效性存疑;

3)验证所提算法的经济性。

本文所用的仿真平台为MATLAB 2020b中的Simulink工具箱,版本为10.2。运行仿真平台的计算机配置为3.20 GHz Intel Core i7-8700处理器,

16 GB运行内存,算例的仿真时间设置为10 s。

4.2 结果分析

4.2.1 发电成本简化计算方法分析

在算例1中,仿真开始的1 s内各母线的电压参考值均设置为了400 V(1 p.u.),从1 s开始,各个分布式电源采用下垂控制的运行模式,直流微电网的仿真结果见附录C图C1。

为验证直流微电网分布式电源发电成本简化计算方法的正确性,表1分别列出了0~1 s、1~3 s、3~6 s、6~10 s这4个时段内采用发电功率和输出电流进行计算的各个阶段的直流微电网发电成本。

表1 两种计算方法所得发电成本的对比
Table 1 Comparison of generation costs obtained by two calculation methods

计算方法	发电成本/ 10^{-2} p.u.			
	0~1 s	1~3 s	3~6 s	6~10 s
按输出功率	7.307	7.152	8.915	6.831
按输出电流	7.307	7.355	9.315	7.002
误差/%	0	2.760	4.290	2.440

观察表1可以看到,按输出功率计算得到的发电成本小于输出电流计算得到的发电成本,这是由下垂控制过程中各个节点的电压均小于1 p.u.导致的,实际结果与分析结果相同。且两种发电成本计算方法的误差小于5%,在可接受的范围内。因此,可以证明前文所述的分布式电源发电成本简化计算方法的正确性。

但是需要说明的是,该简化仅在波动范围较小时成立,若采用该简化方法设计的控制策略在实际运行中的电压波动超过了设置的容许度,那么该控制方法的有效性就要被质疑,在此场景下对于简化方法正确性的讨论就没有意义。

4.2.2 一致性算法有效性分析

1)控制模式发生变化时的有效性分析

仿真1 s时系统由下垂控制转为控制方法2控制,其各节点中分布式电源的增量成本如附录C图C2所示,各台分布式电源的增量成本在0.7 s内即达到了一致,证明了所提算法的有效性。

2)负荷发生变化时的有效性分析

当6 s时系统的负荷发生变化时,各台分布式电源的增量成本如附录C图C3所示,当负荷发生变化时,各台分布式电源的增量成本会迅速调整至一致,实现经济调度,证明了所提算法的有效性。

3)通信发生变化时的有效性分析

对于算例2和算例3,假定直流微电网中DG2和DG5的通信链路于3.5 s时断开,DG4和DG5的

通信链路于 8.5 s 时断开,则采用控制方法 1 和控制方法 2 的仿真结果如图 3 所示。

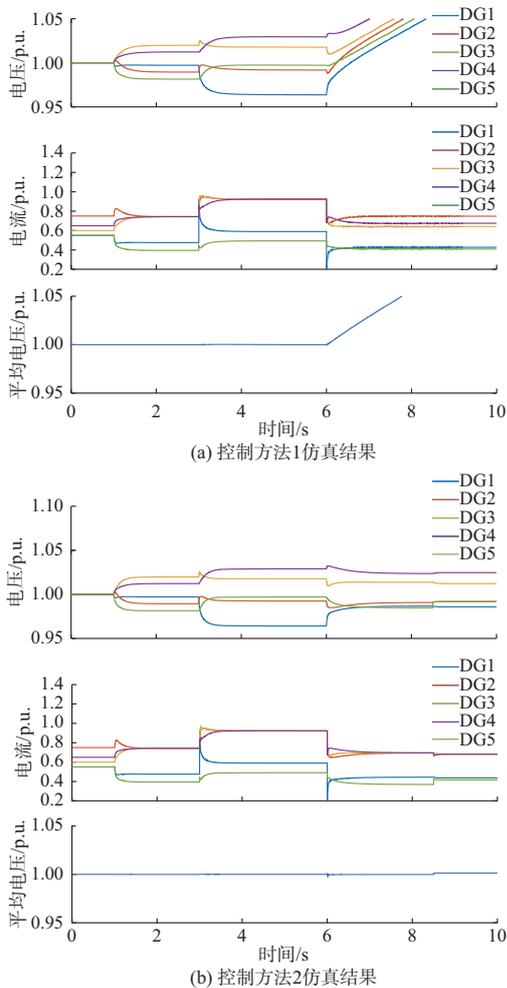


图 3 控制方法 1 与控制方法 2 的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of control methods 1 and 2

当不考虑设备在线状态的实时变化时,节点分布式控制器与相邻分布式控制器中断联系后,该节点保持最近一次信息交互的相邻状态的状态值进行计算。从图 3(a) 可以看到,当 3.5 s 时 DG2 与 DG5 之间的通信中断后,由于系统此时已经达到了稳定状态,因此没有失稳。但当负荷在 6 s 时再次变动时,由于 DG2 内储存的 DG5 的增量成本值依旧是通信未中断时的数值,因此会导致节点 2 的电压上升,并带动其他节点的电压上升,最终系统的节点电压上升至正常电压范围之外,系统崩溃。

如图 3(b) 所示,当考虑设备在线状态的实时变化时,系统不受通信中断的影响:在仿真时间为 3.5 s 时,DG2 与 DG5 之间的通信中断,但是分布式控制器通过本文提出的算法排除了通信中断节点的影响,DG2 与 DG5 均通过与未中断通信的相邻节点进行信息交互使系统保持稳定,且达到了最优运行状

态;当 8.5 s 时 DG5 不和任何相邻分布式电源通信后,5 台分布式电源的增量成本如附录 C 图 C4 所示。从图中可以看到,当 DG5 调节输出电压为基准值后,其他节点的分布式电源进行了出力功率的重新分配,在极短的时间内达到新的平衡,避免了系统的失稳崩溃。并且观察图 3(b) 可以看到,基于本文提出的算法,当 DG5 与所有相邻控制器的通信均中断时,该节点分布式电源迅速调节输出电压为基准值,对系统总的平均电压影响有限。

4.2.3 一致性算法的经济性分析

下垂控制和控制方法 2 在 0~1 s、1~3 s、3~5 s、5~6 s、6~8.5 s、8.5~10 s 这 6 个时段的发电成本如表 2 所示。

表 2 下垂控制和控制方法 2 各阶段发电成本
Table 2 Generation cost at each phase for droop control and control method 2

方法	发电成本/ 10^{-2} p.u.					
	0~1 s	1~3 s	3~5 s	5~6 s	6~8.5 s	8.5~10 s
下垂控制	7.307	7.355	9.315	9.315	7.002	7.002
控制方法 2	7.307	7.197	8.911	8.911	6.802	6.806

可以看到,控制方法 2 在控制过程中的系统发电成本均优于下垂控制,即使当 8.5 s 后 DG5 调节输出电压为基准值,总的发电成本也仅增加 0.06%。这是因为其他 4 台分布式电源通过信息交互,达到了新的一致性平衡。通过以上结果可以证明所提的控制方法 2 能够提高系统的经济性。

4.2.4 事件触发频次分析

对采用所提算法过程中各个节点触发控制的频次进行统计,并将各个节点在控制过程中的每个 100 ms 的控制触发次数展示如图 4 所示。

如图 4 可见,采用事件驱动技术之后,各节点控制器进行信息交互的频次相较于采用固定通信频次(本案例取 0.002 s/次)有了明显的降低,各节点分别为 1 243 次、1 256 次、1 256 次、1 257 次和 1 806 次。另外,对各个节点的事件触发次数随时间的变化进行了统计,如附录 C 图 C5 所示,可以看到,节点 1 至 4 的事件触发时刻与次数均相近,节点 5 在 8.5 s 前与其他节点相近,在 8.5 s 后出现了大幅的增加。其原因在于:节点 5 在 8.5 s 后与其他节点的通信全部中断后,接受分布式控制器指令调节节点电压为母线电压基准值。但由于其状态满足事件触发条件,因此会在每一个仿真时刻触发控制,并发出信号尝试与相邻节点进行通信,考虑到分布式控制器的通信频次与其能耗正相关,在 8.5 s 后分布式控制器能量的损耗的确出现了增加,但是从微电网控制系统整

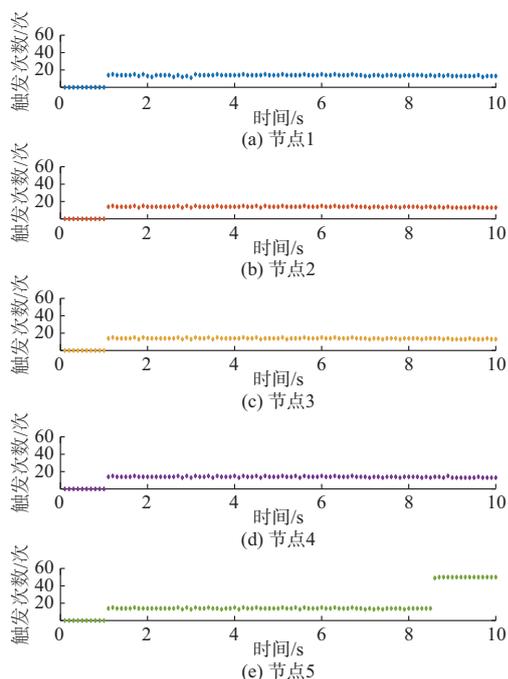


图4 各节点触发控制频次

Fig. 4 Trigger control frequency of each node

体来看,其通信频次与能耗相对于固定通信频次的控制模式也较低,体现出了事件驱动技术在分布式控制领域的节能性。

目前,本文所提的控制方法已经应用到了实际项目中,应用该控制方法的直流环形微电网部署在恶劣的环境中以保障部署区域的重要负荷供电。运行结果表明,包含设备运行模式自切换机制的分布式一致性算法在投入使用后可以实现微电网的经济和稳定运行。当系统总负荷出现变化时,供电设备可以快速调整出力;当由于工作需要信号屏蔽或气象原因导致部分供电设备通信中断时,可以保持系统运行稳定,并且满足负荷需求。

5 结语

在微电网控制器中部署能够抵抗通信中断影响的分布式控制算法,能够提高系统运行的安全性、稳定性和灵活性,规避通信导致的运行风险。但目前广泛应用的分布式控制在实际应用过程中并不能根据实际情况调节自身运行模式,容易受到通信异常的影响而导致微电网失稳崩溃。针对该问题,本文提出了一种微电网分布式控制算法:

1)提出以各节点分布式电源的增量成本作为一致性变量的一致性算法,可实现微电网运行经济最优。算例分析结果表明,相较于下垂控制,本文提出的控制方法经济性更高,并且能实现设备在额定运行电压上下更小的波动;

2)提出一种设备运行模式自切换机制,基于该机制,分布式控制器可以灵活调整节点分布式电源的运行模式,提高微电网运行的稳定性。算例分析结果表明,相较于未引入该机制的分布式控制方法,本文提出的控制方法可以使分布式控制器根据与相邻节点分布式控制器的通信状态自动调节分布式电源的节点电压,提高系统的稳定性;

3)提出的控制算法引入事件驱动控制技术,通过设计事件驱动条件降低控制过程中的通信频次,进而减少分布式控制器的能量损耗。算例分析结果表明,本文提出的控制方法可以实现该目的。

该分布式控制算法还可应用于分布式储能等分布式控制环境中,具有较高的推广价值。在之后的研究中,笔者将聚焦最优事件触发条件的设计与调整步长的选择,以实现更加快速的控制。另外,针对本文研究中节点设备采用下垂控制后通信频次骤增的问题,将继续研究以提出合适的解决方法。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 刘瑜超,刘胜,王景芳,等.基于分布式Raft算法的直流微电网功率协调控制[J].电力系统自动化,2022,46(19):70-77.
LIU Yuchao, LIU Sheng, WANG Jingfang, et al. Coordinated power control of DC microgrid based on distributed raft algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (19): 70-77.
- [2] 周焯,汪可友,李国杰,等.基于多智能体一致性算法的微电网分布式分层控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(11):142-149.
ZHOU Ye, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Distributed hierarchical control for microgrid based on multi-agent consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (11): 142-149.
- [3] NINAN J, OTHMAN Y, ALDHUHOORI S, et al. Microgrid cost optimization: a case study on Abu Dhabi[C]// 2018 8th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), May 8-10, 2018, Kuala Lumpur, Malaysia: 120-125.
- [4] 宋扬,石勇,刘宝泉,等.基于反向变异麻雀搜索算法的微电网优化调度[J].电力工程技术,2022,41(2):163-170.
SONG Yang, SHI Yong, LIU Baoquan, et al. Optimal dispatch of microgrid based on reverse mutation sparrow search algorithm [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41 (2): 163-170.
- [5] 米阳,彭建伟,陈博洋,等.基于一致性原理和梯度下降法的微电网完全分布式优化调度[J].电力系统保护与控制,2022,50(15):1-10.
MI Yang, PENG Jianwei, CHEN Boyang, et al. Fully

- distributed optimal dispatch of a microgrid based on consensus principle and gradient descent[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(15): 1-10.
- [6] 管尚书,陶顺,马喜欢.基于DCT的真双极直流配电网电压-电流二级控制[J].*电力工程技术*,2023,42(1):124-133.
GUAN Shangshu, TAO Shun, MA Xihuan. Voltage-current secondary control of true bipolar DC distribution network based on DCT[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(1): 124-133.
- [7] 刘盈杞,彭克,张新慧,等.基于摄动理论的直流微电网下垂系数优化方法[J].*电力系统自动化*,2022,46(23):94-101.
LIU Yingqi, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Optimization method of sag coefficient of DC microgrid based on perturbation theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(23): 94-101.
- [8] DONG M, LI L, NIE Y W, et al. Stability analysis of a novel distributed secondary control considering communication delay in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6690-6700.
- [9] 龙本锦,张靖,何宇,等.基于DMPC和储能单元约束的分组一致性控制策略[J].*电力系统保护与控制*,2022,50(24):23-36.
LONG Benjin, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Group consistency control strategy based on DMPC and energy storage unit constraints[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 23-36.
- [10] LI Q, GAO D W, ZHANG H G, et al. Consensus-based distributed economic dispatch control method in power systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(1): 941-954.
- [11] LIAO D W, GAO F, ZHAO Y T, et al. A dynamic diffusion algorithm for distributed secondary control of DC microgrids[C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 11-15, 2020, Detroit, USA: 1299-1306.
- [12] YU J H, GAO F, WEI S S, et al. An improved distributed secondary control scheme in islanded AC microgrids[C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 11-15, 2020, Detroit, USA: 1335-1342.
- [13] 聂涌泉,彭超逸,胡亚平,等.基于边缘计算的高渗透率微电网并行分布式优化经济调度[J].*南方电网技术*,2023,17(1):114-124.
NIE Yongquan, PENG Chaoyi, HU Yaping, et al. Parallel distributed optimal economic dispatch of high penetration microgrid based on edge computing[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(1): 114-124.
- [14] 黄豫,卓越,聂金峰,等.基于并行ADMM算法的氢电混合微电网经济调度方法[J].*动力工程学报*,2022,42(11):1061-1067.
HUANG Yu, ZHUO Yue, NIE Jinfeng, et al. Economic scheduling method of hydrogen-electricity hybrid microgrid based on parallel ADMM algorithm[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(11): 1061-1067.
- [15] XU Q W, XIAO J F, WANG P, et al. A decentralized control strategy for economic operation of autonomous AC, DC, and hybrid AC/DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(4): 1345-1355.
- [16] 方朝,吴红斌,杨晓东,等.考虑通信故障的配电网失联分布式电源群优化控制策略[J].*电力系统自动化*,2023,47(5):44-52.
FANG Chao, WU Hongbin, YANG Xiaodong, et al. Optimal control strategy of distributed generation group with communication failure in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(5): 44-52.
- [17] GAMAGE D, ZHANG X B, UKIL A, et al. Multi-agent system based coordinated consensus control for distributed multi-micro-grids[C]// IECON 2020 the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 18-21, 2020, Singapore: 1639-1644.
- [18] 施博辰,赵争鸣,虞竹珺,等.基于离散状态事件驱动的电力电子仿真技术和仿真软件发展现状与展望[J].*中国电机工程学报*,2022,42(16):6005-6016.
SHI Bochen, ZHAO Zhengming, YU Zhujun, et al. Developments and prospects of power electronics simulation technology and software based on discrete state event-driven approach[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(16): 6005-6016.
- [19] 韩康榕,李娜,钱荣荣.事件触发功率控制算法设计与分析[J].*北京邮电大学学报*,2021,44(3):35-40.
HAN Kangrong, LI Na, QIAN Rongrong. Design and analysis of the event-triggered power control algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2021, 44(3): 35-40.
- [20] DIMAROGONAS D V, FRAZZOLI E, JOHANSSON K H. Distributed event-triggered control for multi-agent systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(5): 1291-1297.
- [21] PENG J K, FAN B, TU Z H, et al. Distributed periodic event-triggered optimal control of DC microgrids based on virtual incremental cost[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(4): 624-634.
- [22] WOOD A J, WOLLENBERG B F. *Power generation, operation, and control*[M]. 2nd ed. New York: Wiley & Sons, 1996.
- [23] PENG J K, FAN B, LIU W X. Voltage-based distributed optimal control for generation cost minimization and bounded bus voltage regulation in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 106-116.
- [24] 徐瑞林,杨云,李俊杰,等.基于等微增率准则的微电网分布式经济调度方法[J].*重庆大学学报*,2018,41(12):73-82.
XU Ruilin, YANG Yun, LI Junjie, et al. Distributed economic dispatch method for microgrids based on the equal incremental cost criterion[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(12): 73-82.
- [25] YANG Z Q, XIANG J, LI Y J. Distributed virtual incremental cost consensus algorithm for economic dispatch in a microgrid[C]// 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), June 1-3, 2016, Kathmandu, Nepal: 383-388.
- [26] XU Y L, LIU W X. Novel multiagent based load restoration algorithm for microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 2(1): 152-161.

- [27] NUTKANI I U, PENG W, LOH P C, et al. Cost-based droop scheme for DC microgrid [C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 14-18, 2014, Pittsburgh, USA: 765-769.
- [28] 李一琳,董萍,刘明波,等.基于有限时间一致性的直流微电网分布式协调控制[J].电力系统自动化,2018,42(16):96-103.
LI Yilin, DONG Ping, LIU Mingbo, et al. Distributed coordinated control of DC microgrid based on finite-time consensus algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 96-103.
- [29] 薛花,任春雷,张晓雯,等.基于一致性理论的直流微电网多电力弹簧分布式电压平稳控制方法[J].中国电机工程学报,2021,41(21):7285-7304.
XUE Hua, REN Chunlei, ZHANG Xiaowen, et al. Distributed

consensus-based voltage regulation control of multiple DC electric springs in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7285-7304.

赵海祺(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:微电网能量管理与控制技术。E-mail:zhaohaiqi@zju.edu.cn

卢开诚(1996—),男,博士研究生,主要研究方向:微电网控制策略与事件驱动控制。E-mail:lukaicheng@zju.edu.cn

董树锋(1982—),男,通信作者,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统状态估计、有源配电网分析。E-mail:dongshufeng@zju.edu.cn

(编辑 孔丽蓓)

Distributed Event-triggered Optimal Scheduling for DC Microgrids Considering Communication Status Change

ZHAO Haiqi^{1,2}, LU Kaicheng¹, DONG Shufeng¹, GE Mingyang¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: Under complex communication conditions, if the distributed controller in the microgrid cannot monitor the communication status with adjacent controllers in real time, it will cause system control instability. To address this problem, a distributed control algorithm for the microgrid is proposed. Firstly, the algorithm is designed based on the consistency principle, and the incremental cost of the distributed generator at each node is used as a consensus variable to achieve the optimal economic operation of the microgrid. The algorithm considers the practical operation of DC microgrids, thereby reducing the complexity of the algorithm design. Secondly, a self-switching mechanism for equipment operation modes is proposed to improve the distributed control algorithm. The distributed controller can adjust the operation mode of node distributed generators according to the communication status with adjacent node distributed controllers. Then, the event-triggered control technology is adopted to reduce the communication frequency during the control by designing event-triggered conditions and saving the energy of distributed controllers. Finally, through case analysis, it is verified that the proposed distributed event-triggered control algorithm for microgrids can achieve economic scheduling. Compared with the droop control, the proposed control algorithm can achieve smaller fluctuations around rated operation voltage for equipment. Compared with unimproved distributed control methods, the proposed control algorithm can automatically adjust operation modes according to the communication status and prevent the system control instability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52077193).

Key words: microgrid; distributed economic scheduling; self-switching; communication status; event-triggered control; consensus algorithm

