

分布式微电网电压恢复协调控制策略

寇凌峰¹, 李洋², 吴鸣¹, 芮涛³, 胡存刚², 张倩²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

2. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽合肥 230601;

3. 安徽省工业节电与电能质量协同创新中心, 安徽大学, 安徽合肥 230601)

摘要: 本文针对直流微电网中的功率平衡与电压稳定问题, 提出了一种分布式电源协调控制策略。该策略通过在一致性算法中引入目标吸引函数, 结合等微增率原则, 能够快速地搜索分布式发电单元的最优功率输出点, 实现母线电压迅速恢复, 使得稳定后的直流微电网总运行成本最低。本文所提出的协调控制策略, 适用于直流微电网中电源的分布式控制, 由于没有中心控制器, 增加了系统的鲁棒性与灵活性。最后通过 Matlab/Simulink 搭建直流微电网仿真模型, 并对仿真结果进行分析, 验证了该策略的有效性。

关键词: 直流微电网; 分布式控制; 电压恢复; 一致性; 等微增率

DOI: 10.12067/ATEEE1801018

文章编号: 1003-3076(2018)05-0065-08

中图分类号: TM727

1 引言

微电网是未来智能电网中的重要组成部分, 对推进节能减排、提高电网供电可靠性与供电电能质量具有重要意义^[1,2]。相较于交流微电网, 直流微电网在接纳可再生能源发电系统、储能系统、电动汽车及其他直流用电负荷时, 具有更高的效率。但是分布式发电的随机性与用电负荷的不确定性容易带来系统功率不平衡问题, 会导致直流母线电压产生波动。系统可通过调节与交流微电网接口的 AC-DC 变流器或直流微电网内部的分布式电源及储能系统的输出功率, 实现系统功率平衡与电压稳定^[3]。

目前直流微电网的控制方式主要分为集中式控制、分散控制和分布式控制^[4]。文献[5,6]运用集中式控制方案, 中央处理器收集微电网内各分布式发电单元的运行信息, 通过集中处理, 将控制指令发送给各单元, 实现目标控制。但是, 这种控制方式需要庞大且复杂的通信网络, 导致微电网的运营成本

高昂, 同时容易受到通信延迟和通信故障的影响, 不利于系统的稳定运行。文献[7]提出了一种自适应调节下垂系数的分散式控制策略, 该方案考虑并网与孤岛两种运行方式, 将系统划分为四种工作模式, 维持母线电压恒定。文献[8]提出了一种非重要负荷降功率运行稳定直流母线电压的分散式控制策略, 并根据母线五种不同电压等级将系统划分为五种运行模式。从文献[7,8]可看出, 分散式控制具有无通信网络、分布式电源自适应调节等优点, 但是其直流母线电压难以运行在某一稳定值, 且未考虑直流微电网的运行成本, 难以实现系统的优化运行。相较于集中式控制方案与分散式控制方案, 基于弱通信网络的分布式控制策略具有更好的实时性与可靠性。

弱通信网络条件下的分布式控制, 只需利用局部信息交换实现多分布式电源的协同运行^[9,10]。文献[11]提出了一种适用于直流分布式储能系统的改进下垂控制方法, 该方法实现了负荷功率在不同储能单元间的动态分配, 同时利用二次控制补偿母

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及示范应用)(2016YFB0900400)、国家电网公司科技项目(应对高渗透率分布式能源接入的县域电网优化规划与协调控制技术及应用研究)(PDB17201600091)

作者简介: 寇凌峰(1985-), 男, 陕西籍, 高工, 硕士, 研究方向为分布式能源、微网优化规划与系统评估; 李洋(1992-), 男, 安徽籍, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源协调控制。

线电压跌落。但是该策略主要关注直流微电网的储能系统,并未考虑其他节点功率的投退。文献[12]针对传统下垂控制策略存在的问题,提出了一种分布式经济下垂控制策略,该策略利用一致性算法和自适应下垂相结合迭代搜索发电单元经济最优的运行点,使得发电系统的运行成本最低。在分析孤岛直流微电网动态特性的基础上,文献[13]提出了一种自适应P下垂控制策略以提高直流微电网的动态特性。文献[14]提出了一种基于次梯度的全分布式控制策略,该控制策略在控制母线电压稳定的基础上引入了最小发电成本,提高了系统的运行效益。在现有的关于直流微电网的研究中,很少涉及到可再生能源利用最大化和发电成本最小化这类经济目标。

基于以上分析,本文提出了一种最小化发电成本和最大化可再生能源就地消纳的分布式电源协调控制策略,实现了直流微电网的功率平衡和母线电压稳定。该控制策略只需在邻居间交换信息,通信负担小,增强了系统运行的稳定性;同时,弱通信网络可以自由选择邻居,为信息流通提供了多条通道,提高了系统的灵活性。通过在结合了等微增率原则的一致性算法中引入目标吸引函数,在最小化发电成本的基础上使得母线电压迅速稳定到标称值。

2 直流微电网模型

2.1 直流微电网结构

直流微电网一般由分布式电源 (Distributed Generator, DG)、储能装置 (Energy Storage System, ESS)、负荷和变换器等组成^[15]。其中,分布式电源包括传统发电机 (Conventional Generator, CG) 和可再生能源发电机 (Renewable Generator, RG), 而可再生能源发电机又包括风力涡轮机 (Wind Turbine, WT) 和光伏系统 (Photovoltaic System, PV) 等。本文设计的低压直流微电网模型如图1所示。

图1中的通信网络和物理网络是微电网信息物理系统最基本的组成部分,两者的网络拓扑结构可以相互独立。两层网络通过多个智能体系统 (Agent) 结合在一起,每个 Agent 由处理器和通信器两个部分组成。物理设备为物理网络的单元节点,单元节点包括分布式电源、储能装置和负荷等。通信器是通信网络的单元节点,在通信网络中起到收集本地物理节点和邻居通信节点信息的作用;处理器负责控制策略的运行和控制指令的发送。在有效融合通信层和物理层方面,控制器扮演了至关重要的角色。首先,控制器在接收外部离散信号的同时要实时监控本地物理设备的运行状态和采样本地的物

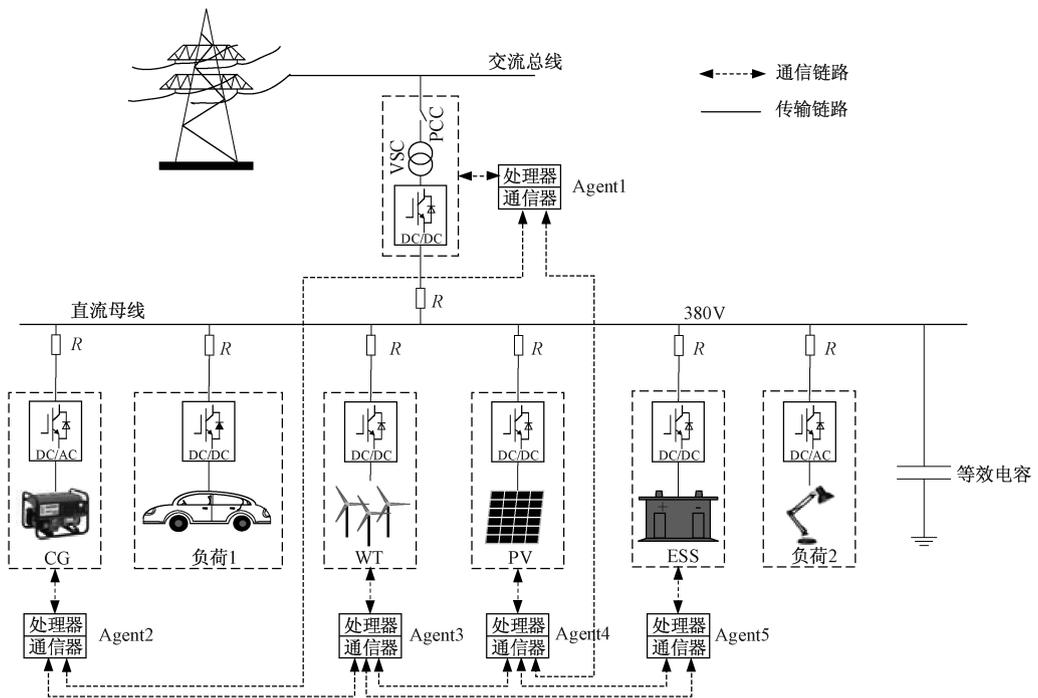


图1 400V 直流微电网结构

Fig. 1 400V DC microgrid configuration

理信息(包括电压、电流等),其次,控制器需要对收集到的信息按照设定的规则进行处理并给本地设备发送控制指令,保证整个微网系统准确高效的运行。

2.2 直流母线等效模型

直流微电网通常将系统母线电压稳定作为最重要的控制目标^[16],但是母线电压会受到功率的影响。假定电压均匀分布在小规模低压直流微电网中,分布在直流总线上的电容器可以被集中等效为容值为 C 的电容器。图 1 中的等效电容器为保持母线电压稳定提供支持作用。图 2 为直流微电网直流母线等效电路图。其中, P_{DG} 代表系统中分布式电源提供的总功率值, P_{ESS} 代表系统中储能装置提供的总功率值, P_{load} 代表系统中负荷总需求, P_{loss} 代表系统中线路总损耗, P_C 代表系统发电与需求之间的功率失配量。

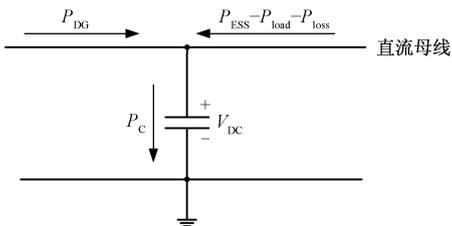


图 2 直流母线等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of DC bus

由图 2 可知,直流母线电容充放电功率,即发电功率与负荷及损耗之间的功率失配量 P_C 为:

$$V_{DC}C \frac{dV_{DC}}{dt} = P_C = P_{DG} + P_{ESS} - P_{load} - P_{loss} \quad (1)$$

3 系统发电成本模型

假设直流微电网系统中有 n 个分布式电源,总负荷为 $P_D = P_{load} + P_{loss}$,每个分布式电源的功率输出为 P_i ,每个发电单元的成本函数可以用一个二次函数表示:

$$C_i(P_i) = \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为成本函数的系数。则成本微增率函数为:

$$IC_i(P_i) = 2\alpha_i P_i + \beta_i \quad (3)$$

整个系统的总发电成本为:

$$C_{总} = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (4)$$

经济调度的目标是在满足系统供需平衡和发电单元容量限制条件下使得系统总发电成本最小,即

$$\min C_{总} = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (5)$$

$$\text{s. t. } P_D = \sum_{i=1}^n P_i \quad (6)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (7)$$

式中, P_i^{\min} 和 P_i^{\max} 分别为分布式电源 i 的容量最小值和最大值。利用内点惩罚函数法将发电单元的成本函数式(2)重构为:

$$C_i^\varphi(P_i) = (\alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i) - \varphi[\ln(P_i - P_i^{\min})] + \ln[(P_i^{\max} - P_i)] \quad (8)$$

式(8)对应的成本函数微增率表示为:

$$IC_i^\varphi(P_i) = (2\alpha_i P_i + \beta_i) - \varphi\left(\frac{1}{P_i - P_i^{\min}} - \frac{1}{P_i^{\max} - P_i}\right) \quad (9)$$

式中, φ 为一个足够小的数。式(9)为一个凸函数,当且仅当在满足 $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 时式(9)才是有意义的。如此,原始的经济调度问题可以被修改为无容量约束的形式:

$$\min \sum_{i=1}^n C_i^\varphi(P_i) \quad \text{s. t. } P_D = \sum_{i=1}^n P_i \quad (10)$$

利用拉格朗日乘子法解决式(10)的最优解问题,则拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned} F^\varphi(P_i, \lambda) &= \sum_{i=1}^n C_i^\varphi(P_i) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_D \right) \\ &= \sum_{i=1}^n (\alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i) - \\ &\quad \varphi[\ln(P_i - P_i^{\min}) + \ln(P_i^{\max} - P_i)] + \\ &\quad \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_D \right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, λ 为拉格朗日乘子。当满足式(12)时,式(10)获得最优解。

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial P_i} = \frac{\partial C_i^\varphi}{\partial P_i} - \lambda = IC_i^\varphi - \lambda = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^n P_i - P_D = 0 \end{cases} \quad (12)$$

因此,当重新定义的成本微增率收敛到一致值且系统功率平衡时,直流微电网的总发电成本最小。为了能够让每个发电单元的成本微增率收敛到一致值,本文利用一致性算法迭代搜索最优的一致值。

4 协调控制策略

4.1 传统一致性算法

在多智能体系统中分布式一阶一致性算法被定

义为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{u}_i(t) \\ \mathbf{u}_i(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} [\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)] = - \sum_{j=1}^n l_{ij} \mathbf{x}_j(t) \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{x}_i(t) = (x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{in}(t))^T \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{x}_i(t)$ 为第 i 节点的状态向量, 它能够表达包括电压、电流、输出功率或成本微增率在内的多种物理量; $\mathbf{u}_i(t)$ 为输入状态。当且仅当所有节点的状态变量相同时, 代表系统达到一致值。式(13)反映了一致性算法是全分布式的, 它只需利用本地和邻居的信息, 不需要了解全局信息。

在多智能体系统中, 如果无向网络是强连通的, 且

$$\lim_{t \rightarrow 0} |x_i(t) - x^*(t)| = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

则各个节点能够达到一致性 $x^*(t) = (1/n) \sum_{k=1}^n x_k(0)$ 。收敛到的一致值是初始化状态的“平均值”。

4.2 图论

直流微电网中各个节点之间通过通信网络进行信息交换, 由通信线路形成可分布式通讯网络拓扑, 令图 $\mathbf{G} = \{\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{A}\}$ 表示系统的通信网络拓扑结构图。通常情况下, 电力系统通信是全双工的, 所以定义图 \mathbf{G} 是一个无向网络。其中, $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, \mathbf{V} 代表 n 个节点的非空有限集合; \mathbf{A} 代表邻接矩阵; $\mathbf{E} = \{\{v_i, v_j\} | v_i, v_j \in \mathbf{V}\}$, \mathbf{E} 代表无向边的集合。如果在节点 v_i 和 v_j 间存在通信路径, 则 v_i 和 v_j 是彼此的邻居, 即认为两者之间存在一条无向边, 两者对应的邻接矩阵元素 $a_{ij} = a_{ji} > 0$, 否则 $a_{ij} = a_{ji} = 0$ 。节点 v_i 对应的度为 $d_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}$, 反映了该节点对其他节点的权重, 由 d_i 组成的度矩阵 $\mathbf{D} = \text{diag}[d_i]$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。假定通信网络是强连通的, 即不存在孤立节点。 \mathbf{L} 代表图的拉普拉斯矩阵, 则拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 的元素为:

$$\begin{cases} l_{ij} = -a_{ij} & i \neq j \\ l_{ii} = -d_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} \end{cases} \quad (15)$$

拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 是图论中最重要的矩阵之一, 它与图的动态特性有关。因为本文讨论的是无向网

络, 所以拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 是一个 n 维对称矩阵, 且每一行或每一列之和为零。

4.3 改进的一致性算法

从 4.2 节关于图论的简单介绍中可知, 邻接矩阵 \mathbf{A} 中元素的大小仅与通信拓扑图的结构相关。因此, 传统的一致性算法的收敛速度仅与通信拓扑结构有关, 一旦通信拓扑确定了, 算法的收敛速度也就确定了。但是由于电力系统的特殊性, 各个发电单元的成本微增率不同, 发电容量限制不同, 若是每个 Agent 都采用相同的一致性算法会影响一致性变量的收敛速度。针对上述问题本文采用了文献 [17] 提出的一致性算法:

$$\dot{P}_i(t) = \delta_i \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} [y_j(t) - y_i(t)] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式中, $\dot{P}_i(t)$ 为第 i 个发电单元在时刻 t 的功率变化率; δ_i 为与一致性算法收敛速度有关的系数; $y_i(t)$ 为重新定义的发电成本微增率, $y_j(t) = IC_i^{\varphi}(P_i)$ 可以作为一致性算法的状态输入。对式(16)离散化后得到:

$$P_i(k) = P_i(k-1) + \delta_i \Delta t \sum_{i=1}^n a_{ij} [IC_j(k-1) - IC_i(k-1)] \quad (17)$$

式中, $P_i(k)$ 为第 i 个发电单元在步长 k 下的功率输出量; Δt 为步长 k 和 $k-1$ 两次迭代之间的时间长度。基于一致性算法式(16), 直流微电网能够迭代收敛搜索到各个发电单元最优功率输出值, 此时, 各个单元发电成本微增率一致, 且系统总发电成本最小。

然而, 本文的最终控制目标是实现系统功率平衡及母线电压快速恢复, 因此本文在式(17)所提出的一致性算法中引入“目标吸引函数” Q_i^* 。引入 Q_i^* 是为了一致性算法能够收敛到某一确定的一致值, 而不是收敛到初始状态的“平均值”^[19]。鉴于两个控制目标的特性, Q_i^* 可以写成如下形式:

$$Q_i^*(k) = \varepsilon_i \Delta P(k) + \mu_i [V_{DC}^* - V_{DC}(k)] \quad (18)$$

式中, ε_i 和 μ_i 分别为两个目标吸引系数; V_{DC}^* 为母线电压标称值; $V_{DC}(k)$ 为母线电压测量值; $\Delta P(k)$ 为在步长 k 下全局功率失配项。经过很小的迭代步长 $k_c (> 0)$ 后, 各个发电单元的成本微增率收敛到一致值, 此时 $Q_i^* \rightarrow 0$ 。

因此式(17)中的一致性算法可重新定义为:

$$P_i(k) = P_i(k-1) + \delta_i \Delta t \cdot \sum_{i=1}^n a_{ij} [IC_j^{\varphi}(k-1) - IC_i^{\varphi}(k-1)] + Q_i^*(k) \quad (19)$$

由于本文采用全分布式控制,无法测得在步长 k 下系统功率供需不平衡量 $\Delta P(k)$ 的值,由 2.2 节的分析可知式(18)中:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n P_i - P_D = P_C = V_{DC} C \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (20)$$

对式(20)离散化得到:

$$\Delta P(k) = V_{DC}(k) C \frac{V_{DC}(k) - V_{DC}(k-1)}{\Delta t} \quad (21)$$

将式(18)、式(21)代入式(19)得到:

$$P_i(k) = P_i(k-1) + \delta_i \Delta t \sum_{i=1}^n a_{ij} [IC_j^{\varphi}(k-1) - IC_i^{\varphi}(k-1)] + \varepsilon_i V_{DC}(k) C \cdot \frac{V_{DC}(k) - V_{DC}(k-1)}{\Delta t} + \mu_i [V_{DC}^* - V_{DC}(k)] \quad (22)$$

对式(22)化简,得到:

$$P_i(k) = P_i(k-1) + K_{Ci} \sum_{i=1}^n a_{ij} [IC_j^{\varphi}(k-1) - IC_i^{\varphi}(k-1)] + K_{Di} V_{DC}(k) [V_{DC}(k) - V_{DC}(k-1)] + \mu_i [V_{DC}^* - V_{DC}(k)] \quad (23)$$

式中, $K_{Ci} = \delta_i \Delta t$; $K_{Di} = \varepsilon_i C / \Delta t$ 。

式(23)为最终的控制算法。本文提出的母线电压控制策略,对于任一个节点,只需要采集邻居的成本微增率 IC_i 和本地测得的 $V_{DC}(k)$ 、 $V_{DC}(k-1)$ 信息,相比于集中式方案,通信负担轻,在满足发电成本最低的前提下实现了多目标控制。

所提算法架构分为通信网络层和本地控制层两部分,具体如图 3 所示, $V_{DC}(k)$ 和 $V_{DC}(k-1)$ 分别为两次步长检测到的对应母线电压值, IC_i 和 IC_j 分别为本地和其对应邻居在步长 $k-1$ 下的发电成本微增率值。通信网络层负责采集邻居的 IC_j ($1 \leq j \leq n$) 信息和母线电压值,处理器将接收到的邻居信息和本地信息通过本文所提算法迭代获得本地发电单元目标输出功率值,目标输出功率可能会超出本地发电单元的功率输出限制,所以目标输出功率经过功

率限幅单元后才是本地发电单元实际目标功率输出量。

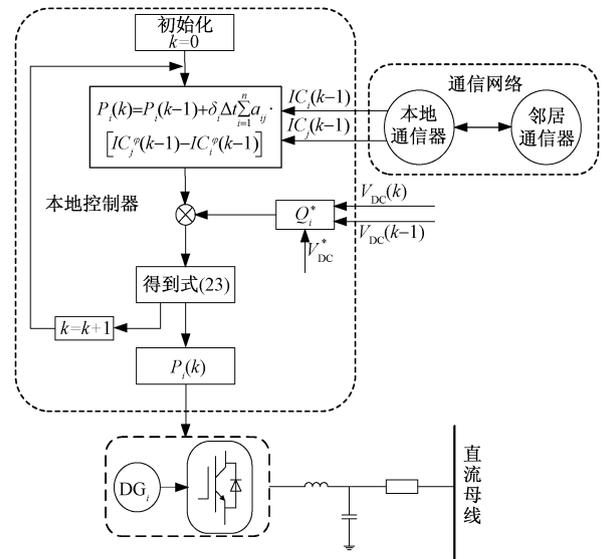


图 3 多目标协调控制策略架构

Fig. 3 Multi objective coordination control strategy architecture

5 仿真分析

为了验证本文所提的最小发电成本的直流微电网电压稳定策略的有效性,在 MATLAB/Simlink 中搭建了母线电压额定值为 400V 的小型直流微电网仿真模型,如图 1 所示。各发电单元成本函数的参数如表 1 和表 2 所示。该系统中含有一个光伏发电系统、一个风力发电系统、一个传统柴油发电机、一个储能系统和一个和配电网连接的并网变换器。线路电阻 R 为 0.02Ω ,直流母线电容容值为 2mF ,两个步长的时间间隔 Δt 为 0.1s 。初始状态,负荷 1 功率为 20kW 。在 15s 时突然增加功率为 10kW 的负荷 2,在 25s 时再加入功率为 5kW 的负荷 3,最后在 35s 时负荷 1 的功率从 20kW 突然下降到 10kW 。另外,不同的通信拓扑对一致性算法的收敛速度有影响,文献[4]具体分析了拓扑结构对收敛速度的影响因素,根据其结论,本文采用的通信拓扑结构如图 4 所示,其对应的邻接矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

表1 各发电单元成本参数

Tab.1 Cost parameters for each power generation unit

单元	α_i	β_i	γ_i	P_i^{min}/kW	P_i^{max}/kW
PCC	0.05	0	0	-	-
CG	0.00245	7.8	350	0	12
PV	0.00184	8.0	450	1	12
WT	0.00153	7.5	320	1	12
ESS	0.00722	0	300	0	12

表2 各发电单元控制参数

Tab.2 Control parameters of each power generation unit

单元	K_{C_i}	K_{D_i}	μ_i
PCC	0.001	0.01	0.01
CG	0.012	0.015	0.015
PV	0.015	0.017	0.017
WT	0.016	0.016	0.016
ESS	0.06	0.01	0.01

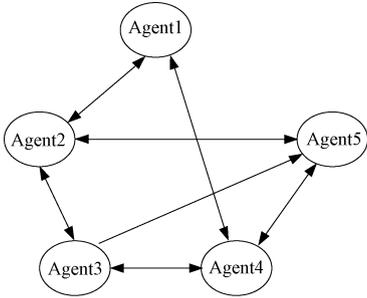


图4 仿真的通信系统拓扑

Fig.4 Communication topology for simulation

5.1 验证策略的有效性

根据设定的仿真系统,验证不同工况下本文策略的有效性和准确性,结果如图5~图8所示。从图5可知,五个发电单元的发电成本微增率收敛到一致值。图6中,母线电压很快稳定到额定值。从图7可知,可再生能源的发电优先级最高,最大化可再生能源利用率,减少了从主电网的购电成本。图8为系统发电总成本变化。

5.2 验证策略的鲁棒性

分布式算法的稳定性对控制系统的重要性不言而喻,通信过程中的通信延迟可能会导致电力系统不稳定。为了验证本文策略对系统通信延迟的鲁棒性,在仿真模型下模拟了不同通信延迟时间对电压稳定性的影响,结果如图9所示。从图9可知,随着通信延迟时间的增加,母线电压的稳定过程延长了,但是最后母线电压都可以很好地稳定在标称值,证明了本文策略可以很好地应对通信系统中存在的通信延迟。

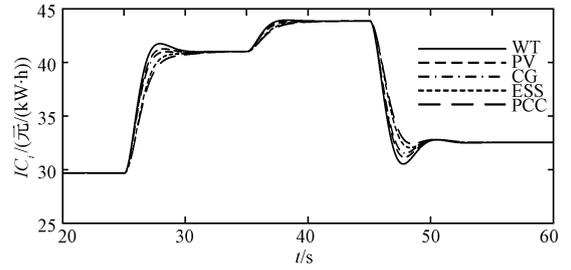


图5 微增率变化曲线

Fig.5 Increment rate curves

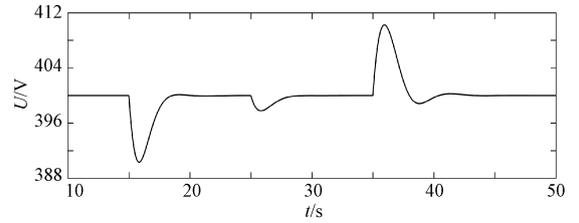


图6 母线电压调节过程曲线

Fig.6 Bus voltage regulation process curve

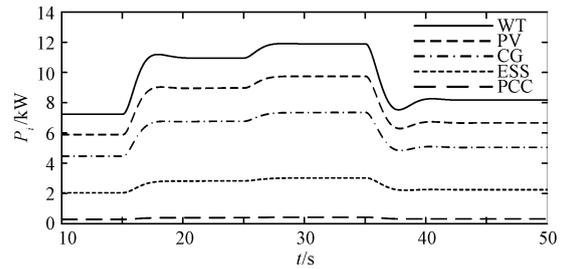


图7 发电输出功率曲线

Fig.7 Power output curve

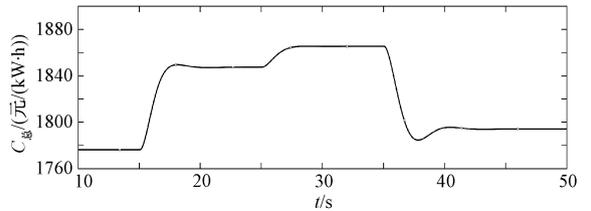


图8 系统总发电成本变化曲线

Fig.8 Total generation cost change curve of system

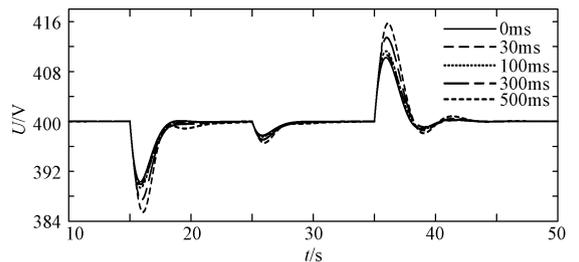


图9 不同通信延迟情况下电压稳定图

Fig.9 Voltage curves under different communication delays

5.3 策略对比

在分布式控制中,下垂控制是一种经典控制方法,本文通过与传统下垂控制的对比,验证所提策略的优越性。在相同的仿真参数下,本文所提策略与下垂控制的效果对比如图 10 和图 11 所示。从图 10 可知,下垂控制本身固有的控制特性决定了其无法将母线电压稳定到额定值,而本文所提控制策略能够经过很短的时间很好地将母线电压稳定到标称值。从图 11 可知,本文所提策略与下垂控制相比,有效地降低了系统的发电成本,提高了微电网系统的经济效益。

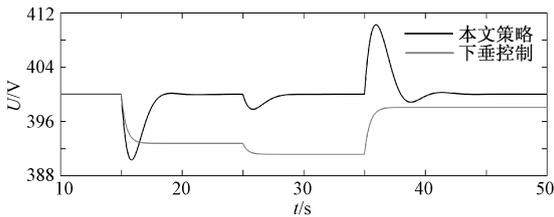


图 10 电压控制效果对比图

Fig. 10 Comparison diagram of voltage control

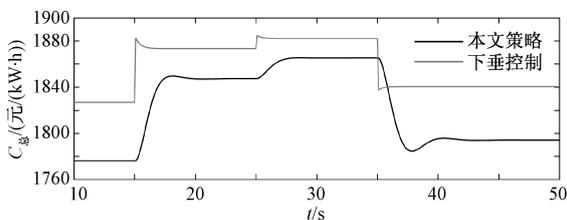


图 11 发电总成本对比图

Fig. 11 Total cost comparison diagram of power generation

6 结论

本文提出了一种针对直流微电网电压稳定的全分布式控制策略。该控制策略通过将一致性算法和等微增率原则相结合,在最小发电成本的基础上实现母线电压快速恢复和系统功率平衡,另外该策略对于系统存在的通信延迟具有很好的鲁棒性。每个 Agent 只需要交换彼此的成本微增率(IC)信息和采集母线的电压值,大大减小了微电网通信网络的通信负担。为了证明本文策略的有效性,在母线电压为 400V 的直流微电网拓扑上进行仿真验证。结果表明,本文策略在发电成本最小基础上能够快速有效地稳定母线电压和实现系统功率平衡,且稳定后的系统发电成本最小;同时仿真验证了不同通信延迟下系统仍然能很好地实现控制目标。

本文提出的分布式直流微电网电压恢复协调控

制策略有利于直流微电网的高效可靠的运行,对于直流微电网的发展与应用具有一定的意义。

参考文献 (References):

- [1] 刘文胜,毛晓明,陈志勇 (Liu Wensheng, Mao Xiaoming, Chen Zhiyong). 微网优化运行研究进展与展望 (A review on microgrid optimal operation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (2): 64-68.
- [2] 王成山,武震,李鹏 (Wang Chengshan, Wu Zhen, Li Peng). 微电网关键技术研究 (Research on key technologies of microgrid) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (2): 1-12.
- [3] 李霞林,郭力,王成山,等 (Li Xialin, Guo Li, Wang Chengshan, et al.). 直流微电网关键技术研究综述 (A review on the key stability control technologies of DC microgrid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (1): 2-17.
- [4] 吴莹,章雷其,赵睿,等 (Wu Ying, Zhang Lei, Zhao Rui, et al.). 稀疏通信下分布式电源微增率一致性加速算法 (Consensus acceleration algorithm of incremental cost rate for distributed generators under sparse communication network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (23): 86-92.
- [5] 陶银正,蒲道杰,毛福斌 (Tao Yinzheng, Pu Daojie, Mao Fubin). 虚拟同步发电机技术及其在光储微电网中的应用 (Virtual synchronous generator technology and its application in PV-storage micro-grid) [J]. 电气技术 (Electrical Engineering), 2016, (11): 36-40.
- [6] Salomonsson D, Soder L, Sannino A. An adaptive control system for a DC microgrid for data centers [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44 (6): 1910-1917.
- [7] 刘家赢,韩肖清,王磊,等 (Liu Jiaying, Han Xiaoqing, Wang Lei, et al.). 直流微电网运行控制策略 (Operation and control strategy of DC microgrid) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (9): 2356-2362.
- [8] 王盼宝,王卫,孟尼娜,等 (Wang Panbao, Wang Wei, Meng Nina, et al.). 直流微电网离网与并网运行统一控制策略 (Unified control strategy of islanding and grid-connected operations for DC microgrid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (17): 4388-4396.
- [9] Sun K, Zhang L, Xing Y, et al. A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic

- ic generation systems with battery energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (10): 3032-3045.
- [10] Bolognani Saverio, Zampieri Sandro. A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrids [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58 (11): 2818-2833.
- [11] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等 (Lu Xiaonan, Sun Kai, Huang Lipei, et al.). 直流微电网储能系统中带有母线电压跌落补偿功能的负荷功率动态分配方法 (Dynamic load power sharing method with elimination of bus voltage deviation for energy storage systems in DC microgrids) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (16): 37-46.
- [12] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等 (Lv Zhenyu, Wu Zaijun, Dou Xiaobo, et al.). 自治直流微电网分布式经济下垂控制策略 (A distributed droop control scheme for islanded DC microgrid considering operation costs) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (4): 900-910.
- [13] 王皓界, 韩民晓, Josep M. Guerrero, 等 (Wang Haojie, Han Minxiao, Josep M. Guerrero, et al.). 基于 I-V 下垂控制的直流微电网动态特性分析与改善 (Analysis and improvement of DC microgrid dynamic performance based on I-V droop control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 80-88.
- [14] Wang Z, Wu W, Zhang B. A distributed control method with minimum generation cost for DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31 (4): 1462-1470.
- [15] 杜少飞, 谢文超, 朱永强, 等 (Du Shaofei, Xie Wenchao, Zhu Yongqiang, et al.). 并网型直流微电网主动协调控制方法研究 (Research on active coordination control method for grid-connected DC microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (6): 30-38.
- [16] Chen D, Xu L. Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (4): 1897-1905.
- [17] Wan Y, Wen G, Cao J, et al. Distributed node-to-node consensus of multi-agent systems with stochastic sampling [J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2016, 26 (1): 110-124.
- [18] Gustavi T, Dimarogonas D V, Egerstedt M, et al. Sufficient conditions for connectivity maintenance and rendezvous in leader-follower networks [J]. Automatica, 2010, 46 (1): 133-139.
- [19] Li Q, Gao D W, Zhang H, et al. Consensus-based distributed economic dispatch control method in power systems [J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid. DOI: 10.1109/TSG.2017.2756041.

Coordinated control strategy for voltage recovery in distributed microgrids

KOU Ling-feng¹, LI Yang², WU Ming¹, RUI Tao³, HU Cun-gang², ZHANG Qian²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. Anhui Provincial Collaborative Innovation Center for Industrial Energy Saving and Power Quality Control, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In this paper, a coordinated control methodology for distributed power supply is proposed to solve the problem of power balance and voltage stability in DC microgrid. The methodology introduced the target attraction function into the consensus algorithm with the equal increment principle is able to search for the optimal power output of distributed generation units instantly and obtain DC bus voltage rapidly and stably, which make the total operating cost of a stabilized DC microgrid the lowest. The coordinated control methodology proposed in this paper is suitable for distributed control of power supply in DC microgrid. Due to the absence of central controller, the robustness and flexibility of the system are increased. Eventually, the simulation model of DC micro grid is built by Matlab/Simulink. Through the analysis of the simulation results, the effectiveness of the strategy is verified.

Key words: DC microgrid; distributed control; voltage recovery; consensus; equal increment rate