

基于强化学习的直流微电网分布式经济下垂控制

符 杨¹, 郭笑岩², 米 阳¹, 李振坤¹, 袁明瀚³

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网威海供电公司, 山东 威海 264200;
3. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:针对直流微电网在传统下垂控制下整体运行成本偏高且存在电压静态偏差的问题,提出一种基于强化学习的完全分布式经济下垂控制策略。通过分布式一致性算法寻找系统最优经济运行点,并利用偏差调整和Adam算法优化经济下垂系数,以提高计算的速度与效率;通过改进强化学习原理进行电压的二次优化控制。利用MATLAB/Simulink搭建具有不同运行成本单元的直流微电网仿真模型,结果验证了所提策略的有效性和优越性以及即插即用特性。

关键词:直流微电网;经济下垂控制;一致性算法;完全分布式;强化学习

中图分类号:TM 73;TM 727

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109024

0 引言

微电网是一种由分布式电源 DG (Distributed Generation)、储能、用户负荷和相关电力电子装置组成的新型电网形式,是将 DG 并入电网的有效途径^[1]。其中直流微电网因其建设经济性、运行高效性、不存在相位同步问题以及谐波和无功功率损耗等优势受到了广泛关注^[2]。直流微电网普遍采用传统的下垂控制策略,仅按各 DG 的容量比实现功率分配与电压调整,简单可靠。但由于不同类型 DG 的经济成本和发电特性不同^[3],传统下垂控制无法保证系统的经济性。因此,考虑经济优化实现直流微电网的稳定运行具有一定的现实意义与研究价值。

针对微电网经济控制,文献[4]提出经济下垂控制的概念,即通过各调控单元的本地信息来调控各下垂控制系数,促使经济性高的发电机优先发电,以此实现经济最优,该控制不同于传统下垂控制采取功率均分的控制策略。目前,经济下垂控制的实现方式主要有集中式和分布式2种。传统的控制方式通常采用集中式控制。文献[5-6]依赖于集中控制器处理优化目标数据,并通过集中式通信网络传输

优化指令,实时发送给各 DG,使其调整出力与下垂控制系数,以实现经济运行的目的。集中式控制具有较好的实时性和可靠性,但是其对通信依赖性较高,在面对单点故障和通信堵塞等复杂工况时缺乏灵活性和安全性。针对分布式控制方式,文献[7]提出一种基于源-荷协同的完全分布式控制策略,将一致性算法和调频控制相结合,避免了对集中处理器的依赖。文献[8]提出一种分布式协同下垂控制,通过协调相邻控制单元动作来改善整体电压分布。然而文献[7-8]均未考虑经济性问题。为了改善微电网运行成本的经济性,文献[9]考虑 DG 的发电成本,并以完全自治的形式动态调整其下垂控制系数,在没有集中控制器和通信链路的情况下降低直流微电网的总发电成本。文献[10]则在经济下垂策略中考虑公用电网电价的问题,实现并网直流微电网的分布式经济控制。

此外,作为分布式控制的进一步改进,基于人工智能技术的强化学习 RL (Reinforcement Learning) 技术已在电力系统领域的负荷预测^[11]、电网故障检测和诊断^[12]等方面得到应用。RL 主要通过使用奖励反馈机制来评估解决方案的质量^[13],其可应用于电压稳定性的控制策略中。目前大部分下垂控制是有差调节,可能会使部分节点出现静态电压偏差问题,因此可以通过 RL 对状态数据进行实时训练与优化计算,实现电压的二次优化^[14],该方法相比于传统的二次调压方法具有更高的灵活性与快速性。文献[15]提出一种分布式 RL 策略来协调直流微电网的电压恢复,证实了 RL 在调压方面的优势。然而这些文献均没有考虑运行经济性问题。

基于上述分析,本文提出一种改进的完全分布式经济下垂控制策略。为了优化整个下垂控制系统的经济性和快速性,利用基于 Adam 算法和偏差调整原理的分布式一致性算法使系统处于最优经济

收稿日期:2020-12-23;修回日期:2021-07-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61873159);上海市科委项目(18020500700);上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900);“电气工程”上海市Ⅱ类高原学科项目;上海市电站自动化技术重点实验室项目

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(61873159), Shanghai Committee of Science and Technology Project(18020500700), Shanghai Green Energy Grid Engineering Technology Research Center Project(13DZ2251900), “Electrical Engineering” Shanghai Class II Plateau Discipline Project and Shanghai Power Station Automation Technology Key Laboratory Project

运行状态,并调整各控制单元的下垂系数,同时通过改进的分布式RL原理进行电压的二次优化控制,提高控制策略的鲁棒性,实现电压快速稳定。利用MATLAB/Simulink搭建具有不同运行成本单元的直流微电网模型,并仿真验证了所提控制策略的有效性和优越性以及即插即用的特性。

1 直流微电网中的经济下垂控制

1.1 DG成本函数

经济下垂控制本质上是在微电网电压稳定的前提下使其运行成本最低的优化问题。广义而言,待优化的目标主要可以分为内燃机、可调度的可再生能源和公用电网3种,其成本函数取决于能源类型、运行特性和额定值等诸多因素。为了便于分析,本文只考虑燃料价格、运行效率及维护费用,且不考虑公用电网与微电网的交互成本。

针对直流柴油发电机、直流微型涡轮机等内燃机,由于其燃料成本远高于AC-DC变换器损耗成本,因此忽略AC-DC变换器损耗成本。此外,由于部分负荷具有阀点效应^[9],相应的成本函数为非凸函数形式:

$$\begin{cases} C_{ii}(P_i) = A_i P_i + \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i + \Delta P_{ei} \\ \Delta P_{ei} = |e_i \sin[h_i(P_i^m - P_i)]| \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_i 为可调度单元*i*的输出功率,可调度单元包含直流微电网中所有的内燃机、变压器、可调度的可再生能源等,此处指内燃机,后文指相应可调度单元; A_i 为内燃机*i*的维护费用系数; α_i 、 β_i 、 γ_i 、 e_i 为内燃机*i*燃料消耗成本系数; h_i 为内燃机*i*阀点效应系数; P_i^m 为内燃机*i*阀点功率极限值。通过用 $\sqrt{x^2+v^2}$ 来凸优化 $|x|$,本文中 x 指代 ΔP_{ei} ,优化项系数 $v>0$,则式(1)的凸函数形式为:

$$\begin{cases} C_{ii}(P_i) = \alpha_i P_i^2 + (\beta_i + A_i) P_i + \gamma_i + \Delta P_{ei} \\ \Delta P_{ei} = \sqrt{e_i^2 \sin^2[h_i(P_i^m - P_i)] + v^2} \end{cases} \quad (2)$$

可调度的可再生能源依靠DC-DC变换器输出功率,因此应考虑该变换器的损耗。以燃料电池为例,其成本函数为:

$$C_{2i}(P_i) = (B_i + C_i)(P_i + v_i + q_i P_i + w_i P_i^2) \quad (3)$$

式中: B_i 、 C_i 分别为可再生能源*i*的维护费用系数和运行成本系数; v_i 、 q_i 、 w_i 为可再生能源*i*的变换器损耗系数。对于不可调度的光伏单元,一般将其与电池储能耦合后转换为可调度的DG,成本函数也包括维护成本和转换器损失,可表示为:

$$C_{3i}(P_i) = B_{pv} P_i + C_{pv}(a_{pv} P_i + b_{pv} P_i^2) \quad (4)$$

式中: B_{pv} 、 C_{pv} 分别为光伏的维护费用系数和运行成本系数; a_{pv} 、 b_{pv} 为光伏损耗系数。

1.2 经济下垂控制策略

传统的下垂控制策略以各控制单元的容量比例

为标准来调整下垂系数,实现电压的稳定性控制,但忽略了系统运行的经济性。其表达式为:

$$U_{oi} = U_{ref} - n_i P_i \quad (5)$$

式中: U_{oi} 为可调度单元*i*的变流器输出电压; U_{ref} 为电压的参考值; n_i 为可调度单元*i*的传统功率下垂系数。

对于传统的经济下垂控制策略,通常使下垂系数与机组群的最高发电成本成正比^[9],控制策略为:

$$U_{oi} = U_{ref} - \lambda_i C(P_i) \quad (6)$$

式中: λ_i 为可调度单元*i*的传统经济下垂系数; $C(P_i)$ 为DG_{*i*}的发电成本。

为了使微电网达到最优经济运行状态,本文对传统的经济下垂控制策略进行改进,通过控制各DG的耗量微增率均收敛至同一值,使其满足等微增率准则^[3],从而实现系统总运行成本最小。改进后的控制策略为:

$$U_{oi} = U_{ref} - R_i L_i(P_i) \quad (7)$$

$$L_i(P_i) = \left. \frac{dC(P_i)}{dP_i} \right|_{P_i=P_i(k)} \quad (8)$$

式中: R_i 为可调度单元*i*的改进经济下垂系数; $L_i(P_i)$ 为DG_{*i*}的耗量微增率; $P_i(k)$ 为当前第*k*次迭代计算得到的DG_{*i*}输出功率。

2 改进的一致性算法

为实现本文所提出的经济下垂控制策略,可使用一致性算法计算各DG耗量微增率的收敛值。

2.1 传统一致性算法

一致性算法实质是通过局部智能体与相邻智能体之间的信息交互,不断优化和更新局部智能体的状态参数,使其收敛至稳定的公共值。其中相邻智能体是指与本地智能体具有直接通信连接的智能体。在直流微电网中,设第*k*次迭代计算的待优化DG_{*i*}的耗量微增率 $L_i(k)$ 为智能体*i*的一致性变量。随着*k*值的逐渐增大,相邻智能体*j*的一致性变量值将趋于一致。算法核心公式为:

$$L_i(k+1) = \sum_{j \in X_i} d_{ij} L_j(k) \quad (9)$$

式中: d_{ij} 为状态转移矩阵*D*的元素^[7],状态转移矩阵为非负行随机方阵^[16],且该矩阵的所有特征根均小于1; X_i 为与智能体*i*相联系的智能体*j*的集合。

然而,随着可再生能源在直流微电网中的渗透率逐渐升高,系统对控制策略即插即用特性的要求也越来越高,传统一致性算法的性能已无法满足快速性和即插即用特性的需求。为此,本文提出一种改进的一致性算法来完善经济下垂控制策略。

2.2 基于偏差调整原理的完全分布式改进

根据式(9)可知,传统一致性算法仅能保证各发电单元的耗量微增率均收敛至同一值,而无法实现微电网模型中的必要约束条件,如功率平衡约束、爬

坡约束、容量约束等。为此,在算法计算的过程中添加偏差调整项进行修正,保证算法的计算结果满足功率平衡这一等式约束条件,提高调控效率,加快系统进入稳定状态。此外,对于爬坡约束和容量约束这 2 种不等式约束条件,由于其关系到电压的二次控制效果,因此将由第 3 节的改进 RL 算法来协助满足。对式(9)改进后得到:

$$L_i(k+1) = \sum_{j \in X_i} d_{ij} L_j(k) + \delta \varphi_i(k) \quad (10)$$

式中: δ 为调整系数; φ_i 为可调度单元*i*的偏差调整项,其值通常根据整个直流微电网的不平衡功率计算得到,为实现控制策略的完全分布式以及满足即插即用特性的要求,可由式(11)得到。

$$\varphi_i(k+1) = \sum_{j \in X_i} e_{ij} \varphi_j(k) - (P_i(k+1) - P_i(k)) \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n (P_i(0) + \varphi_i(0)) = 0 \quad (12)$$

式中: n 为待优化可调度单元总数; e_{ij} 为状态转移矩阵*D*转置后的矩阵元素。式(12)为偏差调整项的初始值设定。根据文献[16]的推导,式(10)~(12)将使计算结果不断接近满足约束条件的最优解,这些公式结构属于完全分布式,满足直流微电网运行对即插即用特性的需求。

2.3 基于 Adam 算法的改进

为配合下一步电压的二次优化控制,本文引入 Adam 算法对上述算法进行进一步改进,提高算法的运算效率,加快算法的收敛速度。

基于随机梯度下降(SGD)^[17]的 Adam 算法可用于优化连续可微的目标函数,可对一致性算法的计算结果进行优化。该算法可根据梯度的第一阶和第二阶矩的估计计算各参数的自适应学习速率,具有计算时间短、所需内存小等优点。本文对 Adam 算法进行完全分布式改进,然后将其融入改进一致性算法中共同辅助经济下垂控制策略实现系统的最优经济运行。

本文的待优化目标函数为 $C(P_i)$,在 Adam 算法中分别更新一阶梯度 $m(k)$ 和二阶梯度 $v(k)$ 的指数移动平均值,并利用超参数 ψ_1 、 ψ_2 控制其指数衰减率^[17]。

有偏差的一阶梯度估计和二阶梯度估计的更新迭代公式^[17]为:

$$\begin{cases} m(k) = \psi_1 m(k-1) + (1-\psi_1) \nabla_r C(P(k-1)) \\ v(k) = \psi_2 v(k-1) + (1-\psi_2) \nabla_r^2 C(P(k-1)) \end{cases} \quad (13)$$

偏差校正后的一阶矩估计 $m'(k)$ 和二阶矩估计 $v'(k)$ 的更新迭代公式^[17]为:

$$\begin{cases} m'(k) = m(k) / (1-\psi_1^k) \\ v'(k) = v(k) / (1-\psi_2^k) \end{cases} \quad (14)$$

因此, P 的集中式迭代公式^[17]为:

$$P(k) = P(k-1) - \theta m'(k) / (\sqrt{v'(k)} + \varepsilon) \quad (15)$$

式中: θ 为步长,通常设置为 0.001; ε 为微调步长的系数。由于式(15)属于集中式计算,梯度矩估计方向具有单一性,仅以自身参数信息为参考,只能取得自身最优解,无法保证得到全局最优解,因此本文对式(15)进行分布式改进,基于分布式一致性原理提出以下分布式迭代公式:

$$P_i(k) = P_i(k-1) - \sum_{j \in X_i} w_{ij}'' m_j'(k) / (\sqrt{v_j'(k)} + \varepsilon) \quad (16)$$

$$w_{ij}'' = \begin{cases} -2/(x_i + x_j) & j \neq i, j \in X_i \\ -\sum w_{ij}'' & j = i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中: w_{ij}'' 为变换矩阵 W'' 的元素,满足 $I^T W'' = 0$ 和 $W'' I = 0$, I 为单位列向量; x_i 为智能体*i*的权重; $m_j'(k)$ 与 $v_j'(k)$ 分别为第 k 次迭代计算的智能体 j 偏差校正后的一阶矩估计和二阶矩估计。该改进使每个智能体自身仅接收相邻智能体的参数信息,通过一致性算法运算便可得到全局最优参数,不仅保证了结果的全局最优,也避免了因全局数据被集中收集处理而造成数据传输堵塞与延迟等情况,有利于整体分布式算法的设计。

通过优化后的第 k 次迭代计算的智能体 i 输出功率 $P_i^*(k)$ 得到第 k 次计算的迭代智能体 i 目标耗量微增率 $L_i^*(k)$,进而实时调整下垂系数 R_i 得到目标下垂系数 R_i^* ,其控制策略为:

$$R_i^*(k) = (U_{\text{ref}} - U_i(k)) / L_i^*(k) \quad (18)$$

式中: $R_i^*(k)$ 为可调度单元*i*在第 k 次迭代更新的目标下垂系数; $U_i(k)$ 为第 k 次迭代更新的智能体 i 节点电压值。当各发电单元的耗量微增率均收敛于同一值时,所提控制策略的改进经济下垂系数 R_i^* 达到最优,系统将处于最优经济运行状态。

3 基于改进 RL 算法的二次优化控制

由于线路阻抗的影响,传统控制算法不再满足电压补偿量的精度要求,进而可能使系统出现电压静态偏差现象。目前,分布式二次优化控制方案已被证明是下垂控制的一种可行解决方案^[13],而 RL 算法是一种研究自动控制和多智能体系统的有效算法。

3.1 RL 原理的 Q 学习算法

RL 算法是一种基于马尔可夫决策原理的算法, Q 学习算法是 RL 算法的决策核心,对状态-动作值函数直接进行迭代优化,在线寻找最优策略,实现整体的折扣奖励值最大化。定义值函数为:

$$Q^\pi(s_k, a_k) = r(s_k, a_k) + \eta V^\pi(s_{k+1}) \quad (19)$$

式中: $Q^\pi(s_k, a_k)$ 为在策略 π 中状态 s_k 下采取动作 a_k 获得奖励的期望值; π 表示在状态 s_k 下智能体 i 在动作 a_k 中应选取的动作策略; $r(s_k, a_k)$ 为在策略中状态

s_k 下采取动作 a_k 获得的立即奖励值; η 为学习率; $V^\pi(s_{k+1})$ 为在策略 π 中状态 s_{k+1} 下的值函数。通过贪婪算法^[15]获得每次的动作 a_k , 系统最优动作策略 π^* 可表示为:

$$\pi^* = \operatorname{argmax}_{a_{k+1}} Q(s_k, a_{k+1}) \quad (20)$$

式中: argmax 为最大值自变量点集函数。

3.2 本地奖励与全局奖励

根据 RL 原理, 本文根据直流微电网的特点对其进行改进, 首先根据直流微电网运行约束条件, 定义智能体 i 执行动作后的本地奖励 r_i 为:

$$r_i = r'_{i1} + r'_{i2} + r'_{i3} \quad (21)$$

$$r'_{i1} = \begin{cases} 1 & P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \\ -1 & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

$$r'_{i2} = \begin{cases} 1 & -R_{i,D} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_{i,U} \\ -1 & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

$$r'_{i3} = \begin{cases} 0 & 0 \leq |U_{\text{ref}} - U_i| < u_1 \\ -\tau_1 |U_{\text{ref}} - U_i| & u_1 \leq |U_{\text{ref}} - U_i| < u_2 \\ -\tau_2 |U_{\text{ref}} - U_i| & u_2 \leq |U_{\text{ref}} - U_i| < u_3 \\ -\tau_3 |U_{\text{ref}} - U_i| & |U_{\text{ref}} - U_i| \geq u_3 \end{cases} \quad (24)$$

式中: r'_{i1} 为智能体 i 的容量约束奖励项; r'_{i2} 为智能体 i 的爬坡约束奖励项; r'_{i3} 为智能体 i 的本地电压偏移奖励项, 其值根据智能体 i 采集的当前电压 U_i 与 U_{ref} 的偏差程度来选定; P_{\max} 和 P_{\min} 分别为可调度单元输出功率的最大值和最小值; $P_{i,t}$ 为时刻 t 智能体 i 所代理的可调度单元的输出功率; $R_{i,U}$ 和 $R_{i,D}$ 分别为智能体 i 应满足的爬坡约束的上升限制和下降限制; $\tau_1 - \tau_3$ 为本地奖励系数; $u_1 - u_3$ 为电压偏差界限值。通过式(21)~(24)实现对电压的调节, 不仅满足了微电网中必要的不等式约束条件, 同时也保证了不同负荷水平下策略的有效性。

通常将全局奖励 r_g 定义为各本地奖励之和。由于直流微电网中的 DG 日益增多, 因此需采用分布式控制策略。但分布式控制不能通过集中处理器获得所有智能体的本地奖励之和, 因此为满足所提控制策略的完全分布式要求, 本文运用一致性原理对 RL 算法中全局奖励的获取方式进行改进, 通过周边相邻智能体的本地奖励 r_j 计算各 r_i 一致收敛于全网平均全局奖励 r_{ave} 来等效 r_g 。 r_i 的迭代公式以及全网平均全局奖励 r_{ave} 的计算公式分别为:

$$r_i(k+1) = \sum_{j \in N_i} d_{ij} r_j(k) \quad (25)$$

$$r_{\text{ave}} = \lim_{k \rightarrow \infty} r_i(k+1) \quad (26)$$

3.3 分布式二次最优控制

根据直流微电网中的状态变量, 改进 RL 算法中 Q 学习原理的运算参数形式。设智能体 i 采集到的直流微电网中节点 i 的电压值 U_i 为状态值, 对电压进行

调整的补偿量为动作集中的动作值 Δu_{k+1} , 结合平均全局奖励 r_{ave} 得到最大值 Q , 训练计算的迭代公式为:

$$Q_i^\pi(U_{i,k+1}, \Delta u_{k+1}) = (1-\eta) Q_i^\pi(U_{i,k}, \Delta u_k) + \eta [r_{\text{ave},k} + \chi \max_{\Delta u_{k+1}} Q_i^\pi(U_{i,k+1}, \Delta u_{k+1})] \quad (27)$$

式中: $U_{i,k}$ 为第 k 次迭代计算时节点 i 的电压值; Δu_k 为第 k 次迭代计算时选择的动作补偿电压; $r_{\text{ave},k}$ 为第 k 次迭代计算时的平均全局奖励值; χ 为折现系数; Q_i^π 为在策略 π 下智能体 i 所代表的值函数值。通过最大值 Q 找出最优二次策略, 将得到的最优动作 Δu_{k+1} 作为电压补偿量 δ_v , 实现电压的二次优化控制。最优动作的选择公式为:

$$\pi^*(U_{i,k}) = \operatorname{argmax}_{\Delta u_{k+1}} Q_i(U_{i,k}, \Delta u_{k+1}) \quad (28)$$

式中: $\pi^*(U_{i,k})$ 为在状态 $U_{i,k}$ 下智能体 i 在动作集中应选取的最优动作策略。

由上述分析可知, 在本文所提的经济下垂控制策略中, 改进的一致性算法与电压二次优化控制在功能上互补, 可实现协同并行调节, 提高了控制效率^[18]。本文所提控制策略中, 主体采用双闭环控制, 其中内环采用电流控制环, 外环采用直流电压控制环。本文所提控制策略的总体控制结构框图见附录 A 图 A1。具体步骤如下。

1) 智能体 i 通过通信联络线与相邻的智能体 j 互相交换一致性变量历史信息 L_i 与 L_j , 并利用式(10)~(17)所示改进的一致性算法得到当前最优功率分配值 P_i^* 与最优一致性变量 L_i^* 。

2) 智能体 i 通过通信联络线与相邻的智能体 j 互相交换本地奖励历史信息 r_i 与 r_j 。利用改进的 RL 原理中式(21)~(26)通过当前 P_i^* 与 r_j 得到当前本地奖励信息 r_i 与平均全局奖励信息 r_{ave} 。

3) 通过最优一致性变量 $L_i^*(k)$ 与本地节点电压数据 $U_i(k)$, 利用式(18)调整下垂系数, 得到当前最经济的下垂控制系数 $R_i^*(k)$ 。

4) 通过迭代计算电压数据 $U_{i,k}$ 与平均全局奖励信息 $r_{\text{ave},k}$, 利用改进的 RL 原理中式(27)、(28)进行数据训练, 得到最优动作 Δu_{k+1} , 并将其作为电压补偿量 δ_v 。

5) 将电压补偿量 δ_v 与最优下垂控制系数 R_i^* 代入底层下垂控制系统中, 并配合双闭环控制系统实现直流微电网的经济下垂控制。

4 仿真分析

为验证所提经济下垂控制策略的有效性, 基于 MATLAB / Simulink 搭建孤岛直流微电网仿真系统, 其包含 2 台微型燃气轮机 (MT₁、MT₂)、3 台燃料电池 (FC₁—FC₃)、1 组电池-光伏单元 (BA-PV, 下文简称 PV) 及 5 个恒功率负荷 (Load₁—Load₅), 其中 FC₃ 为即插即用机组。系统母线电压为 500 V, 直流母线

间的阻抗为 0.4Ω , 初始负荷 Load_2 — Load_5 均设置为 5 kW , Load_1 设置为 10 kW 。每个发电单元都连接一个通信节点, 即信息与能量流交汇的公共点。通信节点上安装用于监测、通信与调制的智能体代理。整个微电网仿真系统的初始数据见附录 A 表 A1, 其连接结构和通信拓扑见附录 A 图 A2。

4.1 有效性分析

设置所提策略在 0.15 s 时启动; 设置 0.4 s 时 Load_1 增加 5 kW 以改变系统运行环境; 设置 0.7 s 时 Load_3 增加 5 kW 。各单元的一致性变量、输出功率、节点电压及直流微电网不平衡功率分别见图 1—4。

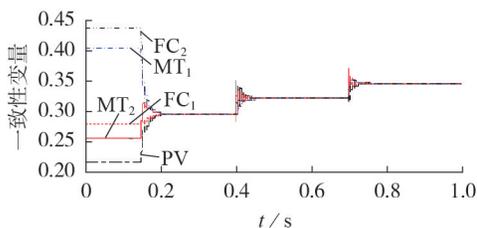


图 1 各一致性变量仿真结果

Fig.1 Simulative results of each consensus variable

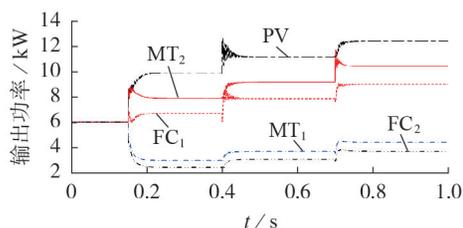


图 2 各输出功率仿真结果

Fig.2 Simulative results of each output power

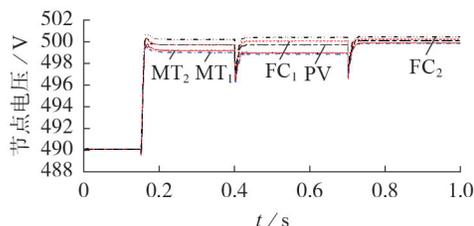


图 3 各节点电压仿真结果

Fig.3 Simulative results of each node voltage

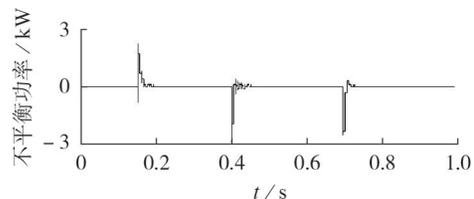


图 4 直流微电网不平衡功率

Fig.4 Unbalanced power of DC microgrid

由图 1—4 可以看出, 每当系统的运行环境发生变化时, 所提策略会对直流微电网中的电压、出力以及约束条件等指标进行优化调节。

由图 1 可以看出, 在每个时间阶段所提策略都

会使各发电单元的一致性变量有效收敛并趋于一致, 使系统工作在最优经济运行状态。由图 2 可以看出, 每个时间阶段对应状态下各发电单元的输出功率趋于稳定, 满足各自的容量约束。由图 3 可以看出, 在每个时间阶段内各节点电压在极短的时间内都恢复并稳定在 500 V 左右, 且偏差满足国家规定的 $\pm(3\% \sim 5\%)$ 要求。由图 4 可以看出, 系统的不平衡功率逐渐趋近于 0, 满足功率平衡约束, 具有较好的稳态和暂态性能。

此外, 为了验证本文所提控制策略相较于其他控制策略的优越性, 本文按照文献[19]搭建仿真平台, 并与其所提控制策略和传统下垂控制策略进行对比。3 种控制策略所用的直流微电网环境参数、各发电单元运行参数以及仿真工况均一致, 传统下垂控制策略和文献[19]控制策略下各节点的电压仿真情况见附录 A 图 A3、A4。选取 $0.4 \sim 0.7 \text{ s}$ 时间段的仿真结果进行数据对比, 如表 1 所示。

表 1 实验结果对比

Table 1 Comparison of experimental results

控制策略	电压偏差率 / %					电压恢复稳定时间 / s
	PV	FC_1	FC_2	MT_1	MT_2	
本文控制策略	0.07	0.01	0.21	0.23	0.08	0.03
文献[19]控制策略	0.19	0.07	0.47	0.53	0.17	0.11
传统下垂控制策略	1.70	1.40	1.34	1.00	0.97	0.09

由表 1 可知, 本文控制策略在消除各节点稳态电压偏差方面的效果优于文献[19]控制策略和传统下垂控制策略。此外, 由于本文控制策略中改进的 Adam 算法提高了整个控制流程进行的速度, 本文控制策略的电压恢复稳定时间短于文献[19]控制策略和传统下垂控制策略。

4.2 经济性对比

本节将从经济性方面对比所提控制策略与文献[19]控制策略, 仿真参数及过程同 4.1 节。在附录 A 图 A5 中给出了传统下垂控制下各单元输出功率情况。根据图 A5 与文献[19]中的仿真数据, 计算出在相同成本函数下各控制策略的总成本, 如图 5 所示。图中实验阶段 1 表示 $[0.15, 0.4) \text{ s}$ 仿真时段, 实验阶段 2 表示 $[0.4, 0.7) \text{ s}$ 仿真时段, 实验阶段 3 表示 $[0.7, 1) \text{ s}$ 仿真时段。

由图 5 可知, 本文控制策略成本分别比文献[19]控制策略、传统下垂控制策略平均节省 9% 、 13% 左右, 因此本文控制策略在经济性方面具有更大的优势。

4.3 即插即用特性分析

本节仿真设置在 0.15 s 时启动所提策略, 在 0.35 s 时将燃料电池 FC_3 投入母线 5。如附录 A 图 A2 所示, 当需要将 FC_3 投入母线 5 时, 与 FC_3 相连的通信节点 6 将会向通信节点 2、3 发出通信连接信号, 以进

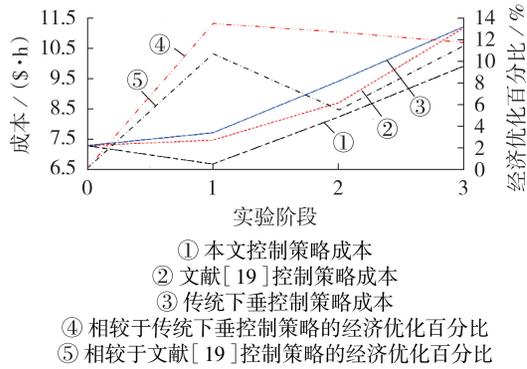


图5 经济性对比仿真结果

Fig.5 Simulative results of economy comparison

行参数信息交互,同时,通信节点6将向处于断开状态的断路器发出合闸指令,图A2中红色的实验线路将由原来的断开状态转换为通路状态,使得 FC_3 接入母线5。仿真参数和工况条件均与4.1节相同,各单元的一致性变量、输出功率、节点电压及直流微电网不平衡功率分别如图6—9所示。

由图6和图7可看出,控制策略运行后, FC_3 的一致性变量与原有的5台机组进行一致性迭代,且仍能收敛至同一值,使系统达到最优经济运行状态,且各节点电压在受到扰动后仍能稳定在500V左右。

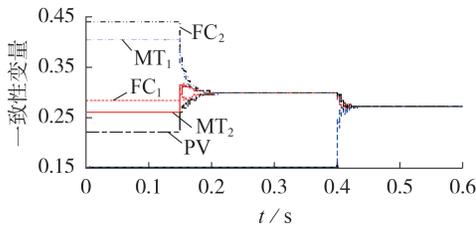


图6 各一致性变量仿真结果

Fig.6 Simulative results of each consensus variable

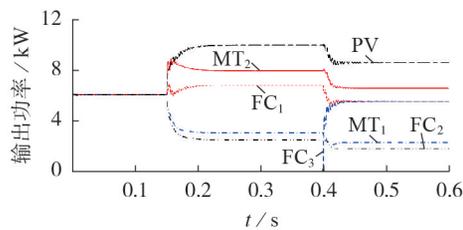


图7 各输出功率仿真结果

Fig.7 Simulative results of each output power

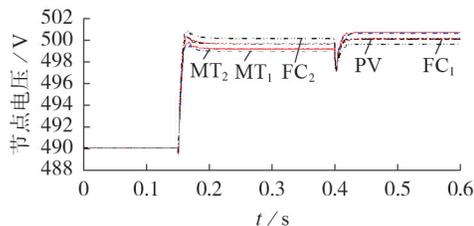


图8 各节点电压仿真结果

Fig.8 Simulative results of each node voltage

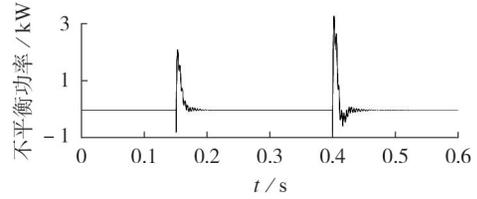


图9 直流微电网不平衡功率

Fig.9 Unbalanced power of DC microgrid

由图8和图9可看出,由于参数与 FC_1 相同,故 FC_3 输出功率与 FC_1 相同,且仍能调节系统满足有功功率平衡的约束条件。因此,所提控制策略能够满足含DG的直流微电网对即插即用特性的需求,且在不同的拓扑结构下,所提策略均能实现经济调压。

5 结论

本文在传统下垂控制的基础上,考虑直流微电网的运行成本,提出一种完全分布式经济下垂控制策略,通过基于改进的一致性原理使直流微电网可始终处于最优经济运行状态,且通过改进的RL原理二次优化控制直流微电网的电压稳定。仿真分析表明,与文献[19]控制策略和传统下垂控制策略相比,所提控制策略具有较好的经济性,控制效率更高,且对功率与电压的稳定性控制效果更好,对提高直流微电网的电压稳定性与系统经济性有重要意义。

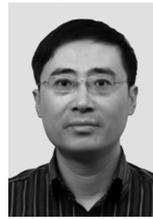
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] LI H, ESEYE A T, ZHANG J H, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2 (1): 1-14.
- [2] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307. LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307.
- [3] 周晓倩, 艾芊. 基于自适应经济下垂控制的微电网分布式经济控制 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 50-55. ZHOU Xiaolian, AI Qian. Distributed economic control of microgrid based on adaptive economic droop control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 50-55.
- [4] NUTKANI I U, LOH P C, BLAABJERG F. Droop scheme with consideration of operating costs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1047-1052.
- [5] BARKLUND E, POGAKU N, PRODANOVIC M, et al. Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2346-2352.
- [6] MI Y, CHEN X, JI H P, et al. The coordinated control strategy for isolated DC microgrid based on adaptive storage adjustment without communication [J]. Applied Energy, 2019, 252: 113465.
- [7] 边晓燕, 孙明琦, 赵健, 等. 基于一致性算法的源-荷协同分布式优化调控策略 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1334-

- 1347,1540.
 BIAN Xiaoyan,SUN Mingqi,ZHAO Jian,et al. Distributed coordinative optimal dispatch and control of source and load based on consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(4):1334-1347,1540.
- [8] MAKNOUNINEJAD A,QU Z H,LEWIS F L,et al. Optimal, nonlinear, and distributed designs of droop controls for DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(5): 2508-2516.
- [9] 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). Pittsburgh,PA,USA:IEEE, 2014:765-769.
- [10] NUTKANI I U,PENG W,LOH P C,et al. Autonomous economic operation of grid connected DC microgrid[C]//2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems(PEDG). Galway,Ireland:IEEE,2014: 1-5.
- [11] 郑瑞骁,张妹,肖先勇,等. 考虑温度模糊化的多层长短时记忆神经网络短期负荷预测[J]. 电力自动化设备,2020,40(10): 181-186.
 ZHENG Ruixiao,ZHANG Shu,XIAO Xianyong,et al. Short-term load forecasting of multi-layer long short-term memory neural network considering temperature fuzziness[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(10):181-186.
- [12] 王冰冰,刘忠,梅军,等. 基于储能内置式换流器的柔性直流配电网故障快速恢复策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(11): 17-23,39.
 WANG Bingbing,LIU Zhong,MEI Jun,et al. Fast recovery strategy of flexible DC distribution network based on energy storage built-in converter after fault[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(11):17-23,39.
- [13] 沈珺,柳伟,李虎成,等. 基于强化学习的多微电网分布式二次优化控制[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):198-206.
 SHEN Jun,LIU Wei,LI Hucheng,et al. Reinforcement learning based distributed secondary optimal control for multiple microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(5):198-206.
- [14] LI X L,GUO L,HONG C,et al. Hierarchical control of multi-terminal DC grids for large-scale renewable energy integration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(3): 1448-1457.
- [15] LIU Z F,LUO Y,ZHUO R Q,et al. Distributed reinforcement learning to coordinate current sharing and voltage restoration for islanded DC microgrid[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2018,6(2):364-374.
- [16] 吕朋蓬,赵晋泉,李端超,等. 基于信息物理系统的孤岛微网实时调度的一致性协同算法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1471-1480.
 LÜ Pengpeng,ZHAO Jinquan,LI Duanchao,et al. A consensus-based collaborative algorithm for real time dispatch of island microgrid in cyber physical system[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(6):1471-1480.
- [17] KINGMA D,BA J. Adam:a method for stochastic optimization [C]//3rd International Conference for Learning Representations. San Diego,USA:[s.n.],2015:1-15.
- [18] SAHOO B,ROUTRAY S K,ROUT P K. Robust control approach for the integration of DC-grid based wind energy conversion system[J]. IET Energy Systems Integration,2020,2(3):215-225.
- [19] 吕振宇,吴在军,窦晓波,等. 自治直流微电网分布式经济下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(4):900-910.
 LÜ Zhenyu,WU Zaijun,DOU Xiaobo,et al. A distributed droop control scheme for islanded DC microgrid considering operation costs[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(4):900-910.

作者简介:



符 杨

符 杨(1968—),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为变压器故障监测与故障诊断、风力发电与并网技术(**E-mail**:mfudong@126.com);

郭笑岩(1995—),男,山东菏泽人,硕士,主要研究方向为能源互联网优化调度与控制(**E-mail**:gxy1995113@163.com);

米 阳(1976—),女,河南南阳人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为新能源发电技术、微电网稳定控制(**E-mail**:mongyangmi@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Distributed economic droop control for DC microgrid based on reinforcement learning

FU Yang¹,GUO Xiaoyan²,MI Yang¹,LI Zhenkun¹,YUAN Minghan³

(1. College of Electric Power Engineering,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China;

2. State Grid Weihai Electric Power Company,Weihai 264200,China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation,Shanghai University,Shanghai 200072,China)

Abstract: Aiming at the problems of high overall operation cost and static voltage deviation of DC microgrid under the traditional droop control,a fully distributed economic droop control strategy based on reinforcement learning is proposed. The optimal economic operation point of the system is searched by the distributed consensus algorithm,and the economic droop coefficient is optimized by the deviation adjustment term and Adam algorithm to improve the calculation speed and efficiency. The secondary optimal control of voltage is carried out by improving the reinforcement learning principle. The simulation model of DC microgrid with units of different operation costs is built by MATLAB/Simulink,and the results verify the effectiveness and superiority of the proposed strategy,and its plug-and-play characteristics.

Key words: DC microgrid;economic droop control;consensus algorithm;fully distributed;reinforcement learning

附录 A:

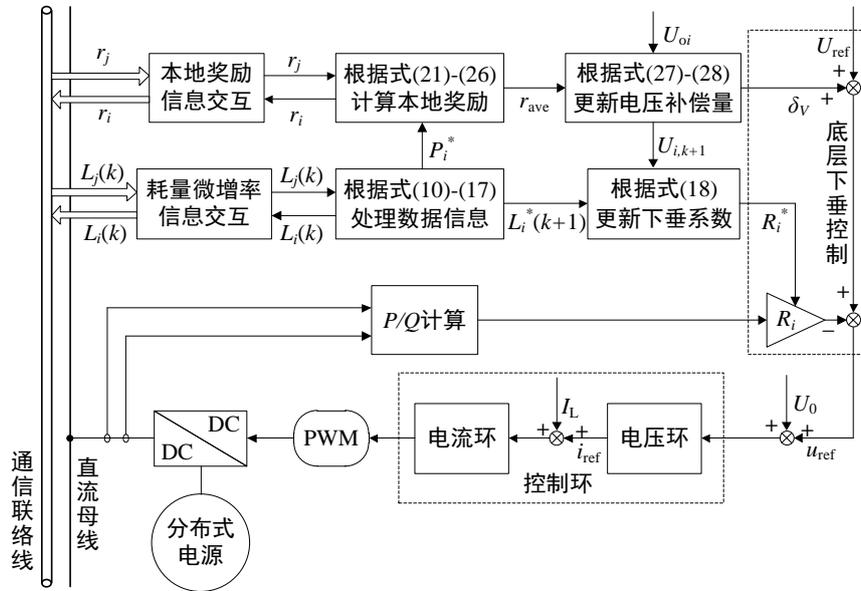


图 A1 控制结构框图

Fig.A1 Control structure block diagram

注: U_0 和 I_L 分别为直流母线当前电压和电流; u_{ref} 和 i_{ref} 分别为调控后的参考电压与参考电流。

表 A1 微电网仿真系统的初始数据

Table A1 Initial data of microgrid simulation system

对象	$\alpha/ [\$ \cdot (\text{kW}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$	$\beta/ [\$ \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$\gamma/ (\$ \cdot \text{h}^{-1})$	P_0/kW	P_N/kW
BA+PV	0.010	0.10	0.001 5	6	15
FC ₁	0.011	0.15	0.015 0	6	15
FC ₂	0.010	0.14	0.010 0	6	15
MT ₁	0.018	0.19	0.050 0	6	20
MT ₂	0.020	0.20	0.040 0	6	20

注: P_0 为各可调单元的初始功率; P_N 为各可调单元的额定功率。

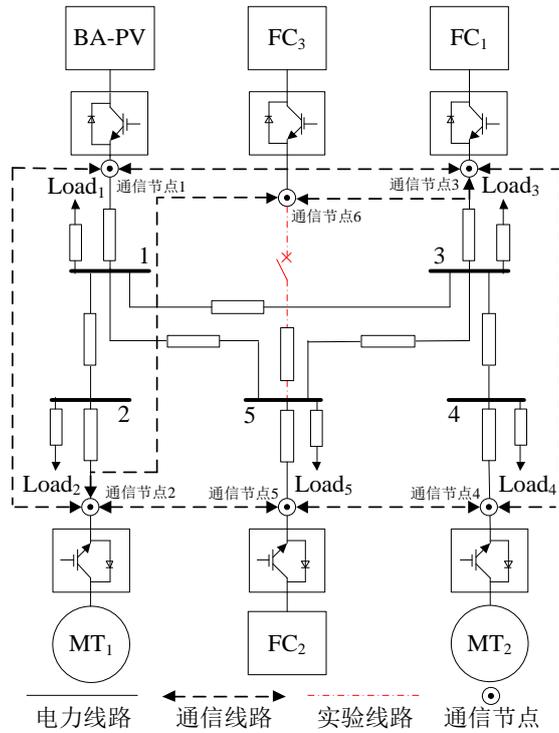


图 A2 直流微电网仿真系统

Fig.A2 DC microgrid simulation system

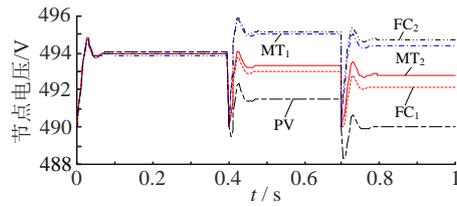


图 A3 传统下垂控制的电压仿真

Fig.A3 Voltage simulation of traditional droop control

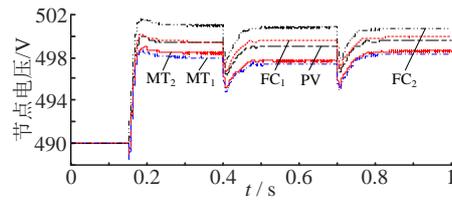


图 A4 对比文献的经济下垂控制的电压仿真

Fig.A4 Voltage simulation of economic droop control from compared literature

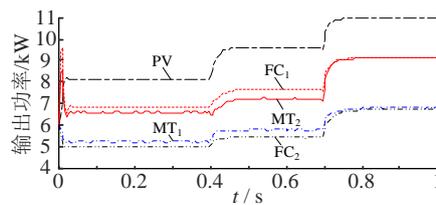


图 A5 基于传统下垂控制的功率输出

Fig.A5 Power output based on traditional droop control