

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231496

基于二层邻居牵制一致性的并网微电网经济优化控制方法

吴文泰, 张春, 栾惟聪, 欧阳昌乐, 叶文

(安徽工程大学电气工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 为提高并网微电网系统经济优化响应速度, 降低整体发电运行成本, 提出二层邻居牵制一致性算法。该算法将成本微增率(incremental cost rate, ICR)定义为状态变量, 引入功率偏差消除项快速消除总功率偏差, 利用二层邻居项和牵制项实现快速收敛于最优 ICR, 计算得到各分布式电源(distributed generation, DG)的最优有功出力参考值。随后提出基于二层邻居牵制一致性的并网微电网经济优化控制方法。该方法基于构建的三层分布式分层架构, 第一控制层为双闭环反馈的下垂控制, 第二控制层采用电压频率优化控制, 稳定系统的频率和电压, 第三控制层将各 DG 最优有功出力参考值输出到 P/f 下垂控制层, 从而实现系统经济优化以及负荷功率供需平衡的目标。最后搭建 8 个 DG 并联运行系统仿真模型进行仿真实验。仿真结果表明, 所提方法能完成有功出力的经济分配, 且系统响应性能优, 在负荷突增、功率越限、分时电价、拓扑切换、计及线路损耗、即插即用等因素影响系统运行时, 所提方法能使微电网快速达到经济优化状态。

关键词: 成本微增率; 二层邻居牵制一致性; 并网微电网; 经济优化控制; 分布式分层控制

Economic optimization control method for a grid-connected microgrid based on second-order neighbor pinning consensus

WU Wentai, ZHANG Chun, LUAN Weicong, OUYANG Changle, YE Wen

(School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: To improve the economic optimization response speed of a grid-connected microgrid system and reduce the overall generation operational cost, a second-order neighbor pinning consensus algorithm is proposed. The incremental cost rate (ICR) is defined as a state variable, the power deviation elimination term is introduced to quickly eliminate the total power deviation, and the second-order neighbor term and pin term are used to achieve fast convergence to the optimal ICR. The optimal active output reference value for each distributed generation (DG) is calculated. Then, an economic optimization control method of grid-connected microgrids based on second-order neighbor pinning consensus is proposed. The new method is based on a constructed three-layer distributed hierarchical architecture. The first control layer is a droop control with dual closed-loop feedbacks, the second uses voltage-frequency optimization control to stabilize the system's frequency and voltage, and the third outputs the optimal active output reference value of each DG to the P/f droop control layer to achieve the economic optimization of the system as well as the balance between load power supply and demand. Finally, a simulation model of the eight-DG parallel operation system is built. The simulation results show that the proposed method can complete the economic distribution of active power output, and the system has excellent response performance. When the system is affected by factors such as sudden load increase, power overlimit, time-of-use tariffs, topology switching, line loss and plug and play, etc., the proposed method can make the microgrid reach the economic optimization state quickly.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U21A20146).

Key words: incremental cost rate; second-order neighbor pinning consensus; grid-connected microgrid; economic optimization control; distributed hierarchical control

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (U21A20146); 安徽高校协同创新项目资助 (GXXT-2020-070); 安徽工程大学项目式课程建设项目资助 (2023xmskk03)

0 引言

随着经济的迅速增长,人类面临着日益严峻的能源需求和环境危机。传统的化石燃料能源如煤炭、石油和天然气的使用,导致全球气候变暖和生态环境破坏等问题日益突出。因此,人们开始关注太阳能、风能等清洁能源的发展,这些能源具有较小的规模和较低的运行成本,被称为分布式电源。为了应对分布式电源种类多样、数量庞大且分散的特点,微电网被作为连接分布式电源和配电网之间的桥梁^[1-5]。

微电网分为交流、直流及交直流混合微电网,通常由 DG、电力变换器、负荷、储能、静态开关和断路器等构成,可运行于并网或孤岛模式^[6-11]。由于 DG 的出力具有随机性、波动性和不确定性,会给电力系统带来功率、频率和电压的扰动,影响微电网优化调度,严重时会影响电力系统的稳定性和安全性。微电网优化调度的目的是在满足供需平衡和相关约束的同时,降低整个微电网的经济成本^[12-14]。微电网优化调度问题一般都是根据等微增率准则,转化为功率分配过程中增量成本的一致性问题。因此研究并网微电网经济优化调度中的实时功率分配、保证电网电压和频率的稳定具有重要意义。

目前基于常规一致性的微电网优化调度算法都是在一致项后加入功率偏差消除项,实现微电网有功出力的优化分配。为提高一致性算法的收敛速度,一些学者对常规一致性算法进行改进,文献[15]提出一种改进的多智能体领导-跟随一致性算法,该算法在领导节点一致项后加入功率偏差消除项,保证功率的优化分配,从而降低微电网的整体发电运行成本。文献[16]提出一种改进的多智能体一致性算法,该算法将增量成本定义为一致性变量,在所有节点上加入功率偏差消除项,与传统一致性算法相比,该算法能降低微电网的整体发电运行成本。文献[17]提出一种基于一致性原理和梯度下降法的完全分布式优化调度策略,该策略通过将梯度下降法与一致性算法相结合,实现微电网发电成本的优化并提高收敛速度。文献[18]提出一种基于领导-跟随多智能体的改进有限时间一致性算法,该算法在一致项后加入增益系数和功率偏差消除项,实现微电网发电成本的优化并提高收敛速度。文献[19]提出一种考虑线损和时延的分布式协同控制微电网优化调度方法,在线损和时延影响系统运行时,该方法可同时实现优化调度和频率调节。文献[20]提出一种基于改进牵制一致性的并网微电网优化控制方法,该方法在一致项后加入功率偏差消除项和牵制

项,通过计算系统的最优成本微增率(incremental cost rate, ICR),得到系统经济优化运行时各分布式电源(distributed generation, DG)的最优有功出力参考值,实现微电网发电成本的优化。文献[15-19]虽然都能使发电成本降低,实现源侧系统稳定,但是计算出的各 DG 有功出力未能达到最优。文献[20]计算出的各 DG 有功出力虽然能达到最优,但并网微电网系统经济优化响应较慢。

为实现并网微电网系统经济优化响应的快速性,使各 DG 的 ICR 快速收敛于最优值,实现系统运行总成本最小化,本文引入二层邻居项和牵制项,提出基于二层邻居牵制一致性的并网微电网经济优化控制方法,实现系统经济优化和负荷功率供需平衡。最后通过仿真实验验证了所提方法能完成有功出力的经济分配,且系统响应性能优,在负荷突增、功率越限、分时电价、拓扑切换、计及线路损耗、即插即用等因素影响系统运行时,所提方法能使微电网快速达到经济优化状态。

1 并网微电网经济优化成本模型

并网微电网系统经济优化目标是在满足总负荷需求的前提下,实现运行总成本最小化。其中,光伏等不可控型 DG 的运行和维护成本低且光伏发电不需要燃料,因此,只考虑可控型 DG 的运行成本,可控型 DG 的运行成本主要由燃料成本和运行维护成本构成。其中燃料成本为二次函数,运行维护成本为一次函数。定义 DG 的有功出力为自变量,得到各可控型 DG 的运行成本模型,如式(1)所示。

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

式中: C_i 为各 DG 的运行成本; P_i 为各 DG 的有功出力; α_i 、 β_i 、 γ_i 为发电成本系数; n 为 DG 总数。

在微电网稳定运行时,功率平衡约束如式(2)所示。

$$\sum_{i=1}^n P_i + P_G = P_D \quad (2)$$

式中: P_D 为系统总负荷需求; P_G 为微电网与电网交互功率, $P_G > 0$ 时,微电网从电网中吸收电能, $P_G < 0$ 时,微电网馈送电能至电网。

令电网电力价格为 p_r ,经济优化的目标就是实现并网微电网运行成本 C_{total} 最小化,即

$$\min C_{\text{total}} = \min \sum_{i=1}^n C_i(P_i) + p_r \cdot P_G \quad (3)$$

且各 DG 有功出力极限制约束为

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (4)$$

式中, $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 分别为各 DG 有功输出的上限和下限。

当所有 DG 都在发电约束下运行时, 利用式(2)和式(3)构建如式(5)所示的拉格朗日函数。

$$F = p_r \cdot P_G + \sum_{i=1}^n C_i(P_i) + \lambda(P_D - P_G - \sum_{i=1}^n P_i) \quad (5)$$

式中: F 为拉格朗日函数; λ 为拉格朗日系数。

将式(5)分别对 P_i 和 P_G 求微分, 并对公式进行变换, 进而得到经济优化目标函数的最优解为

$$\begin{cases} P_i^* = \frac{\lambda - \beta_i}{2\alpha_i} \\ \lambda = p_r \\ P_G^* = P_D - \sum_{i=1}^n P_i^* \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_i^* 为各 DG 的最优有功出力参考值; P_G^* 为经济优化状态下微电网与电网交互功率值。

2 二层邻居牵制一致性算法

2.1 一致性算法

通常用图 $G = (V, E)$ 来描述多智能体系统, 其中节点 $V = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示多智能体系统中的智能体, E 表示各个智能体之间的有向通信。 a_{ij} 为智能体 i 到智能体 j 的边的数量, 图 G 的边表示为 (i, j) , 若图 G 中节点 i 和节点 j 相连, 且 $\forall i \neq j$, 则 $a_{ij} > 0$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。 A 为邻接矩阵, 用来描述节点间的关系, 定义 A 的拉普拉斯矩阵 $L = (l_{ij})_{n \times n}$, 其中 l_{ij} 为

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} & i = j \\ -a_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

当 L 有一个零特征值且其余特征值均具有正实部, 一致性算法收敛。一致性算法如式(8)所示。

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j(k) \quad (8)$$

式中, $x_i(k+1)$ 表示节点 i 在迭代 $k+1$ 次时的一致性状态量。在式(8)中加入功率偏差消除项, 得到文献[16]提出的改进一致性算法, 如式(9)所示。

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j(k) + \mu \Delta P \quad (9)$$

式中: μ 为功率偏差消除项系数; ΔP 为总功率偏差, $\Delta P = P_D - \sum_{i=1}^n P_i - P_G$ 。

定义各 DG 的 ICR 为其成本函数对其有功输出的导数。若各 DG 有功出力在约束范围内, 则并网微电网实现经济优化运行时, 各 DG 的 ICR 均收敛于最优值, 记为 λ^* 。将式(1)对 P_i 求偏导, 并令 $dC_i(P_i) / dP_i = \lambda_i$, 则

$$\lambda_i = 2\alpha_i P_i + \beta_i \quad (10)$$

当各 DG 的 ICR 收敛于 λ^* , 即 $\lambda_i = \lambda^*$, 且各 DG 的有功出力在约束范围内时, 得到系统运行总成本最小化时的有功出力 P^* , 如式(11)所示。

$$P^* = \frac{\lambda_i^* - \beta_i}{2\alpha_i} \quad (11)$$

式中, λ_i^* 表示节点 i 的最优一致性状态量。

选取各 DG 的 ICR 为一致性变量, 并对式(9)进行变换, 得到基于 ICR 的一致性协议(下文简称“传统算法”), 如式(12)所示。

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \mu \Delta P \quad (12)$$

$$d_{ij} = |l_{ij}| / \sum_{j=1}^n |l_{ij}| \quad (13)$$

式中, d_{ij} 为由拉普拉斯矩阵确定的系数。

引理^[24]: 各 DG 间的通信拓扑对应的拉普拉斯矩阵是行随机矩阵, 则等式(12)的一致性算法稳态收敛。通信线路增加, 对应拓扑的代数连通度增加, 算法收敛速度加快。

2.2 算法的改进

为实现快速收敛于最优 ICR, 达到供需平衡, 本文引入二层邻居项和牵制项。所谓二层邻居^[23]是指节点邻居的邻居, 即节点 i 与节点 j 相连, 节点 j 又与节点 h 相连, 那么节点 i 与节点 h 相互联系, 加入二层邻居项^[23]可以使一致性算法具有更快的收敛速度和更好的收敛性能。目前, 未见有文献将二层邻居项应用于微电网优化调度中。具体的二层邻居算法如式(14)所示。

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j(k) + \sum_{h=1}^n a_{ih} \cdot x_h(k) \quad (14)$$

式中, $\sum_{h=1}^n a_{ih} \cdot x_h(k)$ 为二层邻居项。选取各 DG 的 ICR 为一致性变量, 对式(14)进行变换, 得到基于 ICR 的二层邻居一致性协议, 如式(15)所示。

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \sum_{h=1}^n d_{ih} \cdot \lambda_h(k) \quad (15)$$

在式(15)中加入牵制项^[25], 如式(16)所示。

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \sum_{h=1}^n d_{ih} \cdot \lambda_h(k) + \xi_i(p_r - \lambda_i(k)) \quad (16)$$

式中, ξ_i 为牵制系数, 表示对增量成本的参考度。

由式(12)和式(16)得到改进的二层邻居牵制一致性算法(下文简称“改进算法”), 如式(17)所示。

$$\lambda_i(k+1) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^n d_{ih} \cdot \lambda_h(k) + \mu \Delta P + \xi_i(p_r - \lambda_i(k)) \quad (17)$$

$$d_{ij} = |l_{ij}| / \sum_{j=1}^n |l_{ij}| \quad d_{ih} = |l_{ih}| / \sum_{h=1}^n |l_{ih}| \quad (18)$$

式中, $\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot \lambda_j(k) + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^n d_{ih} \cdot \lambda_h(k)$ 满足行随机矩阵。由式(17)可得, λ_i 收敛于 λ^* 时, 各 DG 的有功出力参考值 $P^*(k+1)$ 如式(19)所示。

$$P^*(k+1) = \frac{\lambda_i^*(k+1) - \beta_i}{2\alpha_i} \quad (19)$$

式中, $\lambda_i^*(k+1)$ 表示节点 i 在迭代 $k+1$ 次时的最优一致性状态量。

考虑功率传输过程中的线路损耗, 则需要将式(2)的功率平衡约束变换为式(20)。

$$\sum_{i=1}^n P_i + P_G = P_D + P_{\text{loss}} \quad (20)$$

式中, P_{loss} 为线路损耗。为方便求解 P_{loss} , 文献[26]将线损模型简写为如式(21)所示形式。

$$P_{\text{loss}} = \eta_1 P_1^2 + \eta_2 P_2^2 + \dots + \eta_n P_n^2 \quad (21)$$

式中, $\eta_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为线损模型参数。根据式(17)和式(20), 系统运行总成本最小时 P^* 如式(22)所示。

$$P^* = \frac{\lambda_i^* - \beta_i}{2\alpha_i + 2\eta_i \lambda_i^*} \quad (22)$$

改进算法流程如图 1 所示。

3 分布式分层优化控制

图 2 为并网微电网分布式分层控制架构。该分布式分层架构分为 3 层。第一控制层为双闭环反馈的下垂控制层, 第二控制层为电压频率优化控制层, 稳定系统的频率和电压, 第三控制层为经济优化控制层, 优化各 DG 有功出力, 实现有功出力的合理分配和响应快速性, 随后将各 DG 最优出力参考值输出到 P/f 下垂控制层中。

本文假设光伏发电系统通过 DC/DC 变换器和逆变器与电网连接, 并且逆变器采用与电力系统相

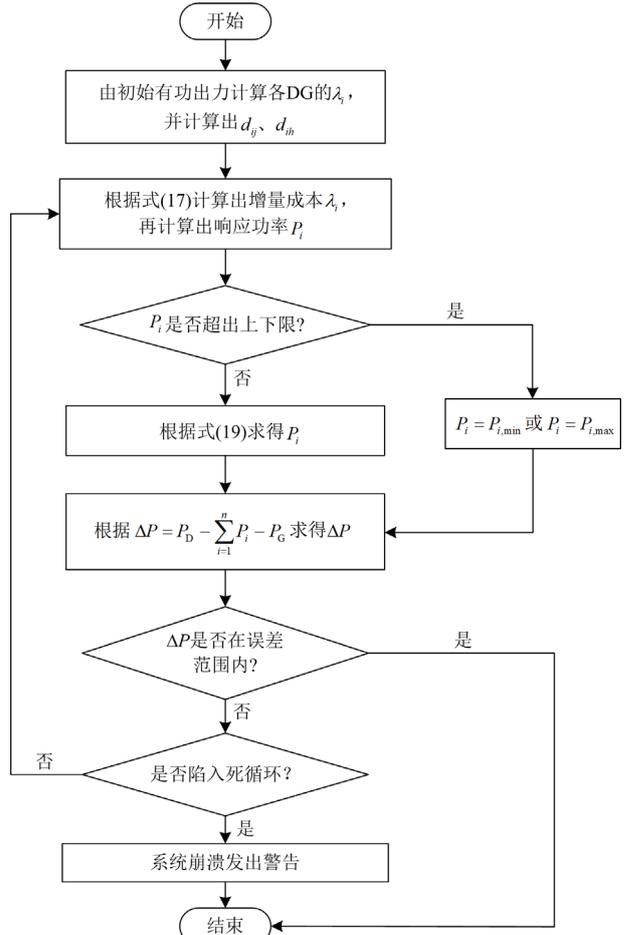


图 1 改进算法流程图

Fig. 1 Improved algorithm flow chart

似的一次调频和调压方式, 系统中有功功率 P 与频率 f 呈线性相关, 无功功率 Q 与电压差 $(U - U_{\text{PCC}})$ 呈线性相关, 其中 U_{PCC} 为公共连接点处电压。逆变器部分采取 P/f 和 Q/U 下垂控制, 下垂控制表达式如式(23)所示。

$$\begin{cases} f_i = f_i^* - m_i(P_i - P_i^*) \\ U_i = U_i^* - n_i(Q_i - Q_i^*) \end{cases} \quad (23)$$

式中: f_i 、 U_i 、 Q_i 分别表示各 DG 输出侧的输出频率、电压幅值和无功功率; m_i 、 n_i 分别表示有功下垂系数和无功下垂系数; f_i^* 、 U_i^* 、 P_i^* 、 Q_i^* 分别表示各 DG 的参考频率、参考电压幅值、参考有功功率、参考无功功率。

第二控制层获取逆变器并网后网侧的输出频率和电压信息, 并将其与参考值进行比较, 计算出误差项。然后, 通过 PI 控制器对误差项进行处理, 生成补偿项。这些补偿项随后被输出到第一控制层, 用于补偿下垂控制环节的频率和电压参数, 如

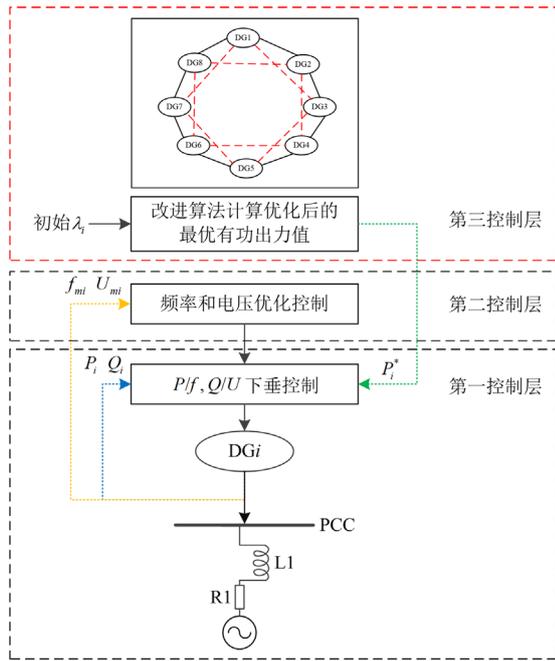


图2 并网微电网分布式分层控制架构

Fig. 2 Distributed hierarchical control architecture of grid-connected microgrid

式(24)一式(27)所示, 从而提高系统的频率和电压稳定性。

$$f_{i,sec} = k_{i,f1}(f_i^* - f_{mi}) + k_{i,f2} \int (f_i^* - f_{mi}) dt \quad (24)$$

$$f_i = f_i^* - m_i(P_i - P_i^*) + f_{i,sec} \quad (25)$$

$$U_{i,sec} = k_{i,u1}(U_i^* - U_{mi}) + k_{i,u2} \int (U_i^* - U_{mi}) dt \quad (26)$$

$$U_i = U_i^* - n_i(Q_i - Q_i^*) + U_{i,sec} \quad (27)$$

式中: $f_{i,sec}$ 、 $U_{i,sec}$ 分别表示频率补偿项和电压补偿项; f_{mi} 、 U_{mi} 分别表示逆变器网侧的频率和电压幅值; $k_{i,f1}$ 、 $k_{i,f2}$ 分别表示频率优化 PI 控制器的比例系数、积分系数; $k_{i,u1}$ 、 $k_{i,u2}$ 分别表示电压优化 PI 控制器的比例系数、积分系数。

为降低系统总运行成本, 在第三控制层中, 各 DG 利用局部通信获取邻近 DG 的有功出力信息, 并通过传感器获取自身的有功出力信息。这些信息被输送到智能体的处理器中, 利用式(10)计算出 ICR。然后, 利用式(17)对 ICR 进行更新, 并利用式(19)计算出优化的有功出力参考值。优化的有功出力参考值被输送到 P/f 下垂控制层, 实现 DG 有功出力的经济分配, 从而使得并网微电网系统处于经济优化运行状态。这样可以降低各 DG 的运行成本和电网购电成本, 同时满足负荷总功率需求。通过

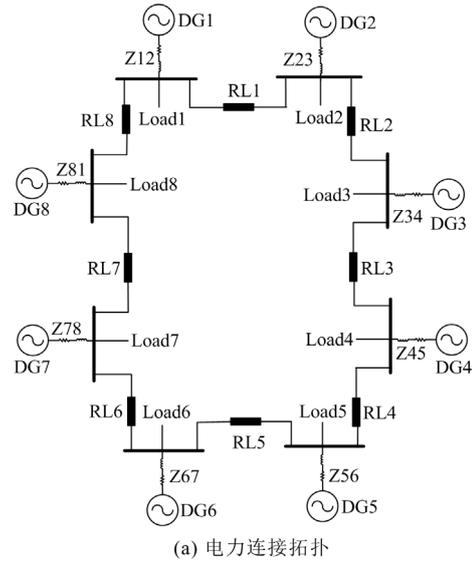
三层控制之间的协调作用, 系统能够快速响应负荷变化, 保持系统稳定性, 并达到经济优化目的。

4 实验与分析

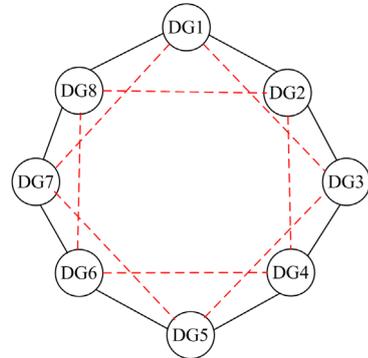
本文利用 Matlab/Simulink 仿真平台, 构建了一个包括 8 个并联运行 DG 的系统仿真模型。通过与传统算法相比较, 验证本文改进算法在并网微电网经济优化控制中的有效性。系统的电力连接拓扑和通信拓扑如图 3 所示, 在通信拓扑中, 实线表示智能体的原来通信, 虚线表示智能体间的二层邻居通信。每个 DG 的参数如表 1 所示。

4.1 源侧系统频率和电压优化控制及功率响应性能研究

本文采用变负荷工况下 8 个 DG 的 Matlab 仿真模型, 对系统频率和电压优化能力以及 DG 功率响应特性进行研究, 并验证频率和电压优化控制以及下垂控制响应的有效性。设 0 s 时源侧系统加入负荷



(a) 电力连接拓扑



(b) 通信拓扑

图3 电力连接拓扑和通信拓扑

Fig. 3 Power connection topology and communication topology

表 1 各 DG 参数一览表
Table 1 List of DG parameters

	α_i	β_i	$P_{i,min}/kW$	$P_{i,max}/kW$	初始有功 P_0/kW
DG1	0.0009	3.2256	0.5	5.040	2
DG2	0.0014	3.2344	0.5	2.436	1
DG3	0.0011	3.2968	1.0	3.780	3
DG4	0.0012	3.2624	1.0	4.200	2
DG5	0.0012	3.3304	0.3	2.352	1
DG6	0.0015	3.2344	0.5	3.780	2
DG7	0.0014	3.2044	0.3	4.200	1
DG8	0.0012	3.2344	0.5	5.040	1

Load1—Load7 并进行下垂控制响应,将第三控制层得出的最优有功出力参考值输送到下垂控制层,4 s 时加入负荷 Load8,8 s 时 Load8 退出,则变负荷工况下源侧 DG8 的输出频率、有功出力、输出电压幅值变化波形如图 4—图 6 所示。

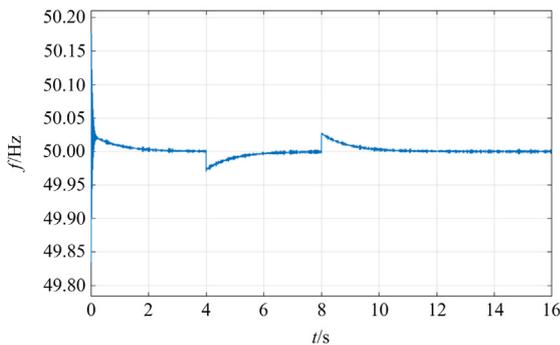


图 4 变负荷工况下微电网源侧 DG8 输出频率变化波形
Fig. 4 Waveforms of DG8 output frequency change on source side of microgrid in variable load condition

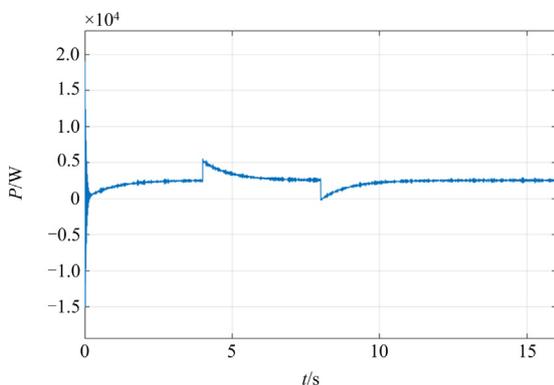


图 5 变负荷工况下微电网源侧 DG8 有功出力变化波形
Fig. 5 Waveform of DG8 active output change on source side of microgrid in variable load condition

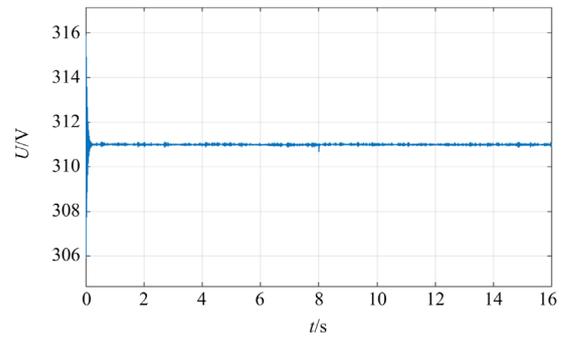


图 6 变负荷工况下微电网源侧 DG8 输出电压幅值变化波形
Fig. 6 Waveform of DG8 output voltage amplitude change on source side of microgrid in variable load condition

由图 4—图 6 可知,在源侧系统初始响应时,第三控制层将得到的最优有功出力参考值输送到下垂控制层,使 DG8 的有功出力稳定在 2.489 kW。第二控制层补偿下垂控制产生的频率补偿量和电压偏移量,使输出频率稳定在 50 Hz,输出电压稳定在 311 V。在 4 s 时加入 Load8, DG8 的输出频率会先下降,经过第二控制层优化后输出频率恢复至 50 Hz,实现频率稳定。而在 4 s 时加入的负荷无功功率为 0,负荷的无功功率未发生变化,输出电压在第二控制层优化作用下一直维持在 311 V,实现电压稳定。在负荷加入后, DG8 的有功出力会先上升,在第三控制层的作用下有功出力再次稳定在 2.489 kW。同理,在 8 s 时 Load8 退出,所提方法仍能使频率、电压、有功出力保持稳定。由此可知,采用改进算法能使系统具有较优的频率、电压恢复能力以及功率响应能力。

4.2 负荷突增时系统响应性能对比分析

针对负荷突增的情形采用传统算法和改进算法对系统性能进行仿真实验。图 7—图 9 和图 10—图 12 分别为采用传统算法和改进算法时各 DG 的 ICR

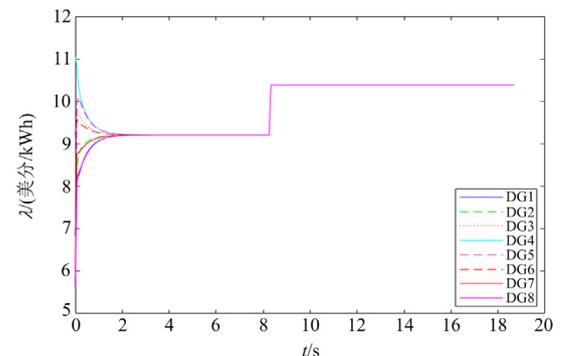


图 7 采用传统算法时各 DG 的 ICR 变化曲线
Fig. 7 ICR variation curves of each DG when using the conventional algorithm

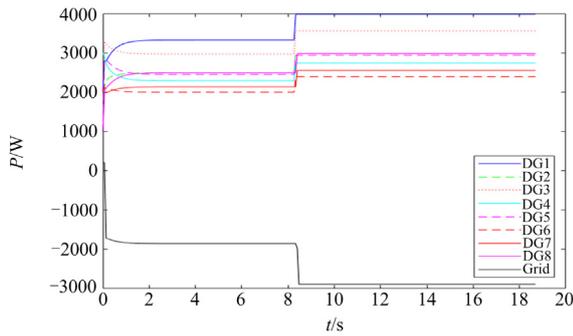


图 8 采用传统算法时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线

Fig. 8 Variation curves of active output of each DG and grid-side output power when using the conventional algorithm

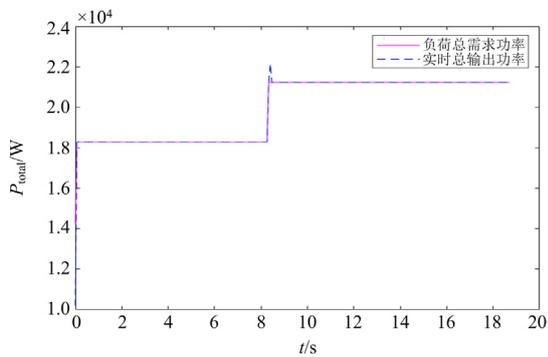


图 9 采用传统算法时总输出功率和总需求功率的变化曲线
Fig. 9 Variation curves of total output power and total demand power when using the conventional algorithm

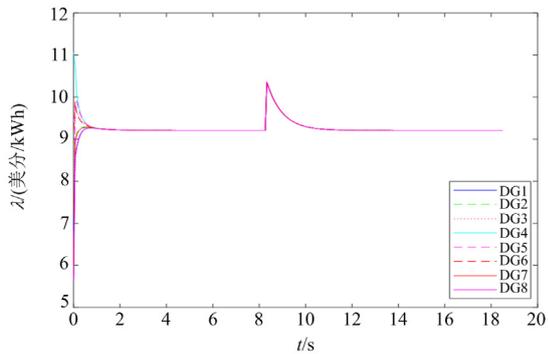


图 10 采用改进算法时各 DG 的 ICR 变化曲线
Fig. 10 ICR variation curves of each DG when using the improved algorithm

变化曲线、各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线、总输出功率和总需求功率的变化曲线。

由图 7、图 8 可知, 传统算法在负荷 8 加入前后增量成本分别为 9.21 美分/kWh 和 10.33 美分/kWh, 不等于最优 ICR, 源侧系统无法实现经济优化运行。

在 0~8.26 s 实现收敛的时间为 2.24 s。在负荷加入后, 各 DG 的有功出力和电网输出功率随负荷增加而增加, 但传统算法计算出的各 DG 有功出力未能达到最优。由图 10、图 11 可知, 改进算法在 0~8.26 s 实现收敛的时间为 1.45 s, 负荷加入后各 DG 的 ICR 先增后减, 最后达到 9.21 美分/kWh, 运行成本降低, 源侧系统实现经济优化运行。在负荷加入后, 各 DG 的有功出力快速增加, 随着电网输出功率逐渐增加而降低, 最终电网承担了增加的总负荷需求。由图 9、图 12 可知, 传统算法和改进算法都可以实现供需平衡。由此可知, 采用改进算法时收敛速度更快, 能实现供需平衡, 系统可实现运行成本最小化等目标。

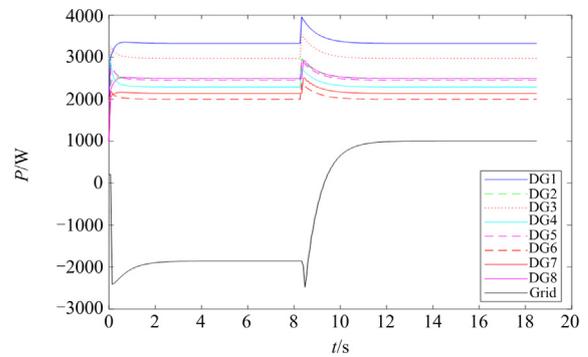


图 11 采用改进算法时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线

Fig. 11 Variation curves of active output of each DG and grid-side output power when using the improved algorithm

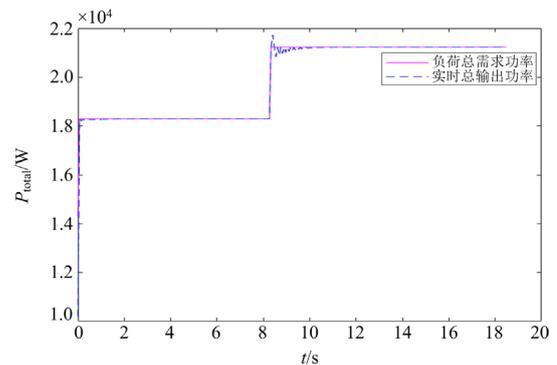


图 12 采用改进算法时总输出功率和总需求功率的变化曲线
Fig. 12 Variation curves of total output power and total demand power when using the improved algorithm

4.3 功率越限影响研究

图 13 为不考虑各 DG 有功出力上下限约束时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线, 图 14 为考虑各 DG 有功出力上下限约束时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线。

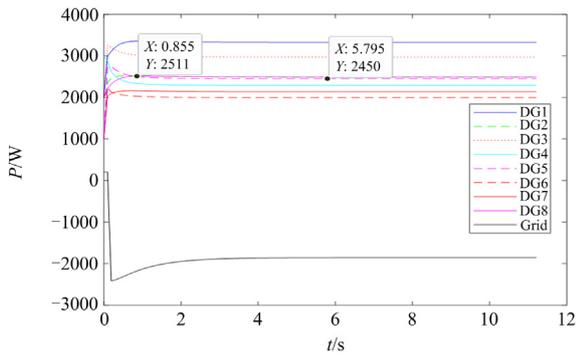


图 13 不考虑各 DG 有功出力上下限约束时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线

Fig. 13 Variation curves of active output of each DG and grid-side output power without considering the upper and lower bound constraints on the active output power of each DG

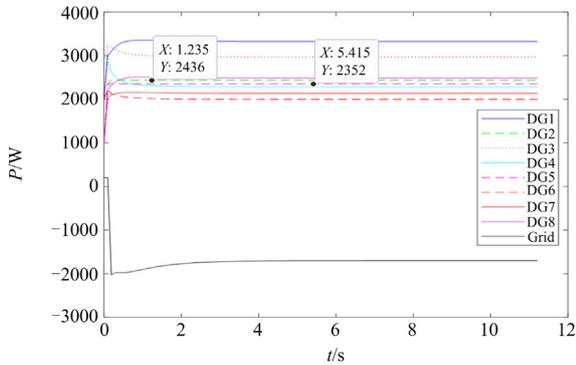


图 14 考虑各 DG 有功出力上下限约束时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线

Fig. 14 Variation curves of active output of each DG and grid-side output power considering the upper and lower bound constraints on the active output power of each DG

由图 13、图 14 可知，在不考虑各 DG 有功出力上下限约束时，DG2 和 DG5 分别可以发电 2511 W 和 2450 W，而在考虑各 DG 有功出力上下限约束时，DG2 和 DG5 发生越限，DG2 和 DG5 取其上限值，分别发电 2436 W 和 2352 W。由此可知，在有功出力约束存在的情况下，各 DG 有功出力超出上下限时，被约束等于功率上下限值，以满足不等式约束，多出或减少的负荷需求在其余 DG 之间进行经济分配，实现经济运行。

4.4 全天分时电价影响研究

基于分时电价机制，电网电价在高峰、平谷、低谷分别取值 13.21 美分/kWh、9.21 美分/kWh、7.21 美分/kWh。在源侧系统实现经济优化运行时，各 DG 的 ICR 都会收敛于电价，随着负荷需求的增大，各 DG 的 ICR 和有功出力的收敛值会逐渐增大，呈

上升趋势。如图 15 所示，本文将全天分为 00:00—08:00、08:00—09:00、09:00—12:00、12:00—17:00、17:00—22:00、22:00—24:00 这 6 个时间段，每个时间段因其负荷需求不同，ICR 收敛于不同的电价。图 16—图 18 分别为全天分时电价下各 DG 的 ICR 变化曲线、各 DG 的有功出力与电网侧

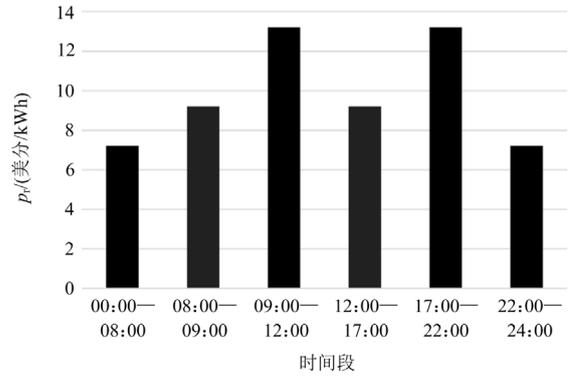


图 15 源侧全天分时电价示意图

Fig. 15 Schematic of all-day time-of-use tariffs on source-side

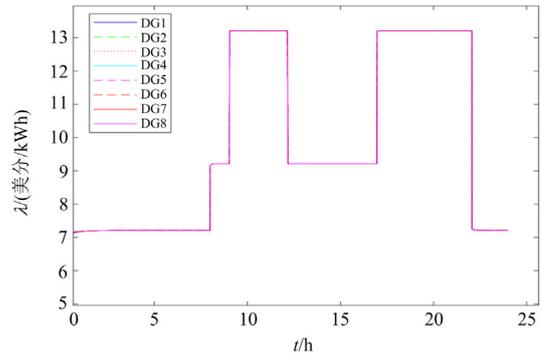


图 16 全天分时电价下各 DG 的 ICR 变化曲线

Fig. 16 ICR variation curves of each DG at all-day time-of-use tariffs

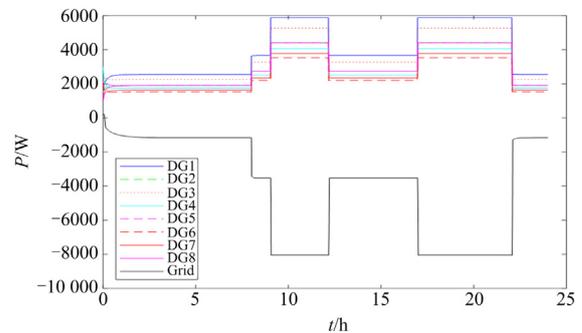


图 17 全天分时电价下各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线

Fig. 17 Variation curves of active output of each DG and grid-side output power at all-day time-of-use tariffs

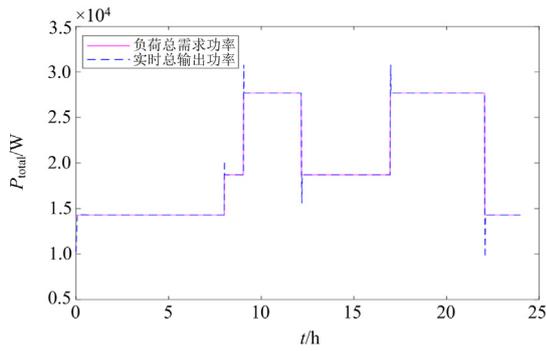


图 18 全天分时电价下总输出功率和总需求功率的变化曲线
Fig. 18 Variation curves of total output power and total demand power at all-day time-of-use tariffs

的输出功率变化曲线、总输出功率和总需求功率的变化曲线。

由图 16—图 18 可知, 源侧系统在 0~8 h 时处于初始零响应状态, 电价恒定在 0 h 之前的源侧系统响应状态。在 8~9 h 时, 负荷总需求功率从 14.285 kW 增加至 18.285 kW, 各 DG 的 ICR 随着负荷需求的增加快速收敛至 9.21 美分/kWh, 各 DG 的有功出力 and 电网的输出功率增加以满足 4 kW 负荷的增加, 从而达到供需平衡, 且动态响应速度较快。在 9~12 h 时, 负荷需求功率继续增加, 从 18.285 kW 增加至 27.685 kW, 进入用电高峰期, 此时各 DG 的 ICR 随着负荷需求的增加快速收敛至 13.21 美分/kWh, 各 DG 的有功出力 and 电网的输出功率继续增加以满足 9.4 kW 负荷的增加。各 DG 有功出力上升实现经济分配, 达到供需平衡。由此可知, 本文提出的改进算法能够快速响应负荷总功率的变化, 具有较优的动态和静态性能。

4.5 拓扑切换影响研究

考虑拓扑切换情况, 如图 19 所示, 从 Ga、Gb、Gc 任一拓扑开始切换, 每隔 3.53 s 切换到下一状态, 分别研究从 Ga→Gb→Gc、Gb→Gc→Ga、Gc→

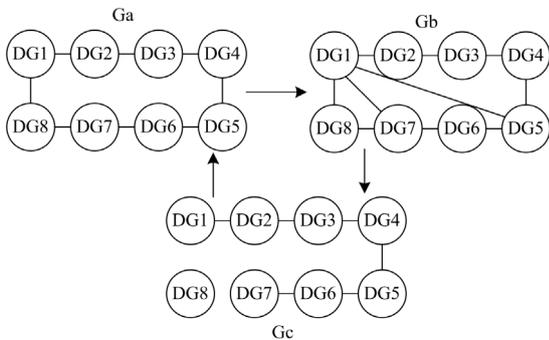


图 19 拓扑切换示意图

Fig. 19 Topology switching diagram

Ga→Gb 这 3 种情况下各 DG 的 ICR 变化情况, 如图 20—图 22 所示。

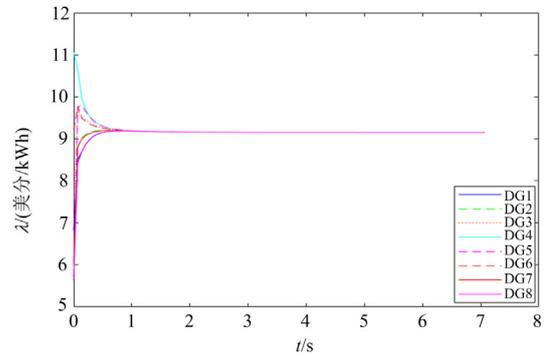


图 20 从 Ga→Gb→Gc 下各 DG 的 ICR 变化曲线

Fig. 20 ICR change curves of each DG under Ga to Gb to Gc

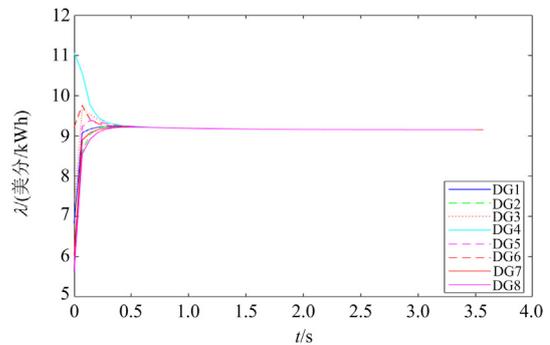


图 21 从 Gb→Gc→Ga 下各 DG 的 ICR 变化曲线

Fig. 21 ICR change curves of each DG under Gb to Gc to Ga

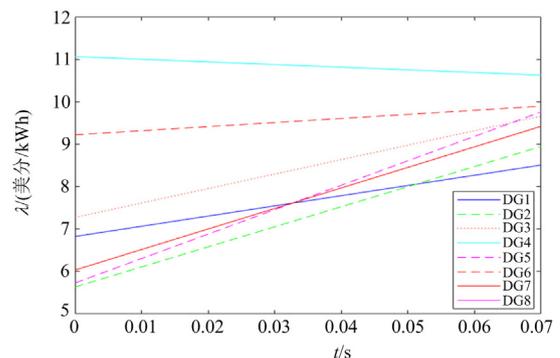


图 22 从 Gc→Ga→Gb 下各 DG 的 ICR 变化曲线

Fig. 22 ICR change curves of each DG under Gc to Ga to Gb

由图 19 可知, Gb 的代数连通度大于 Ga, Gc 中 DG8 退出连接。由图 20—图 22 可知, 基于改进算法能使各 DG 的 ICR 快速收敛于最优值, 即 9.21 美分/kWh。拓扑切换由 Ga→Gb→Gc 需要 1.45 s 收敛于最优值, 而 Gb→Gc→Ga 仅需要 0.9 s 就可以收敛于最优值, 拓扑切换由 Gc→Ga→Gb 因 DG8 退出,

矩阵 L 不满足行随机矩阵, 导致源侧系统失稳, 控制失效。由此可知, L 在满足行随机矩阵的情况下, 代数连通度越高, 源侧系统的响应速度更快, 稳态响应性能更优。

4.6 计及线路损耗影响研究

设线损模型参数为: $\eta_1 = 0.000\ 001$, $\eta_2 = 0.000\ 002$, $\eta_3 = 0.000\ 003$, $\eta_4 = 0.000\ 004$, $\eta_5 = 0.000\ 005$, $\eta_6 = 0.000\ 006$, $\eta_7 = 0.000\ 007$, $\eta_8 = 0.000\ 008$, 由式(21)可得 $P_{\text{loss}} = 0.098\ \text{kW}$ 。图 23、图 24 分别为不计及线损和计及线损时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线。

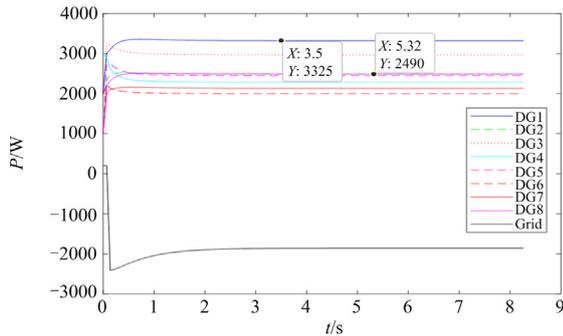


图 23 不计及线损时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线

Fig. 23 Variation curves of active output of each DG and grid-side output power without taking into account line losses

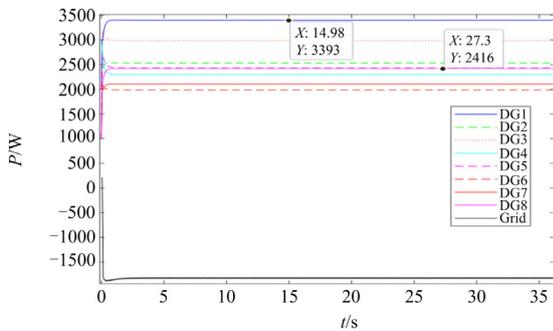


图 24 计及线损时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线

Fig. 24 Variation curves of active output of each DG and grid-side output power when line losses are taken into account

由式(21)可知, η_i 越大, 产生相同功率时第 i 个 DG 造成的线损越大。本文中 η_1 最小、 η_8 最大, 由图 23、图 24 可知, DG1 在不计及线损时发电 3325 W, DG8 在不计及线损时发电 2490 W, 在计及线损时, DG1 发电 3393 W, DG8 发电 2416 W。由此可知, 线损参数最小的 DG 在算法优化后有功出力增加最多, 线损参数最大的 DG 在算法优化后有功出力

减少最多, 使优化结果更贴合经济性目标, 由此验证了在计及线损时本文经济优化运行算法的有效性。

4.7 即插即用影响研究

DG 的投入和退出都会影响电网的输送功率和微电网的有功出力, 使得经济运行总成本发生变化。图 25、图 26 分别为 DG8 在 3.36 s 退出连接, 7 s 重新连接时各 DG 的 ICR 变化曲线、各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线。

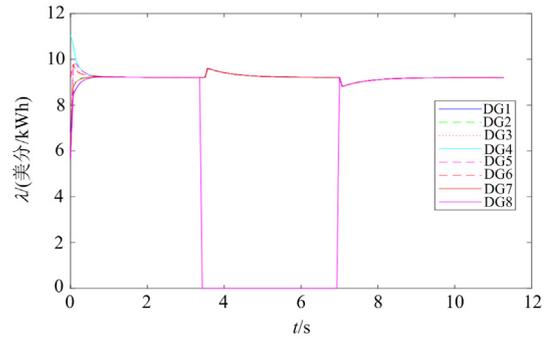


图 25 DG8 投入、退出时各 DG 的 ICR 变化曲线

Fig. 25 ICR change curves of each DG when DG8 is put in and taken out of service

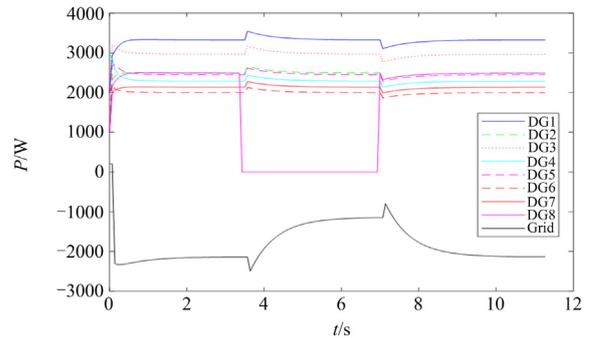


图 26 DG8 投入、退出时各 DG 的有功出力与电网侧的输出功率变化曲线

Fig. 26 Variation curves of active output of each DG and grid-side output power when DG8 is put in and taken out of service

由图 25、图 26 可知, 在 1.45~3.36 s, 各 DG 的 ICR 稳定在 9.21 美分/kWh, 各 DG 的有功出力和电网输出功率共同满足负荷需求。在 3.36 s 时, DG8 退出, DG8 的 ICR 和有功出力降至 0, DG1—DG7 为了满足负荷需求, ICR 和有功出力开始增加, 随着电网输出功率逐渐增加而降低, 最后在 5.26 s 时各 DG 的 ICR 重新稳定在 9.21 美分/kWh。在 7 s 时, DG8 重新连接, DG8 的 ICR 和有功出力迅速增加, DG1—DG7 为了满足负荷需求, ICR 和有功出力开始减少, 随着电网输出功率逐渐减少而增加, 最后在 8.9 s 时各 DG 的 ICR 又重新稳定在 9.21 美

分/kWh。由此可知,采用改进算法能使并网微电网源侧系统在 DG 投入和退出时动态响应速度快,源侧整体响应性能较优。

5 结论

本文提出了一种基于二层邻居牵制一致性的并网微电网经济优化控制方法,用于实现微电网的经济优化调度。系统在不同场景下基于改进算法的性能分析如表 2 所示。

表 2 不同场景下基于改进算法的系统性能分析一览表

Table 2 List of system performance analysis based on improved algorithm in different scenarios

场景	性能分析
负荷突增	在负荷突增后增量成本能快速收敛到最优 ICR 值,实现供需平衡和运行成本最小化
功率越限	各 DG 有功出力超出上下限时,被约束等于功率上下限值,以满足不等式约束,多出或减少的负荷需求在其余 DG 之间进行经济分配,实现经济运行
分时电价	能高效快速地响应负荷总功率的变化,实现经济运行,具有较优的动态和静态性能
拓扑切换	L 满足行随机矩阵时,代数连通度越高,系统具有更快的响应速度和更优的稳态响应性能,更快实现经济调度
计及线路损耗	线损参数越小的有功出力增加越多,线损参数越大的有功出力减少越多,实现经济运行
即插即用	任一 DG 投入和退出时,其余 DG 和电网共同响应增加或减少的负荷需求,实现经济运行。

主要结论如下。

1) 本文所提改进算法由于引入了二层邻居项和牵制项,使得成本微增率快速收敛于最优值,各 DG 有功出力能够达到最优且收敛速度较快,实现供需平衡,系统可实现运行成本最小化。

2) 在满足行随机矩阵的前提下,代数连通度越高,系统的响应速度越快。在考虑线损时,能根据线损模型参数实现各 DG 的最优有功出力,使优化结果更贴合经济性目标。在多智能体投入、退出时动态响应速度快,源侧整体响应性能较优。

3) 以增量成本作为一致性变量,将改进算法优化的有功出力参考值输送到 P/f 下垂控制层,实现 DG 有功出力的经济分配,从而使得并网微电网系统处于经济优化运行状态。与第二控制层共同实现电压频率的稳定和有功出力的最优分配。

在微电网经济优化控制的后续工作中,将继续考虑时延、潮流约束、信息安全等因素。

参考文献

[1] 伍也凡,刘浩田,肖振锋,等.考虑源-网-荷不确定性的增量配电网规划研究综述[J].电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 177-187.

WU Yefan, LIU Haotian, XIAO Zhenfeng, et al. Review of incremental distribution network planning considering the uncertainty of source-network-load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 177-187.

[2] JABR R A. Economic operation of droop-controlled AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 3119-3128.

[3] 朱晓荣,李铮,孟凡奇.基于不同网架结构的直流微电网稳定性分析[J].电工技术学报,2021,36(1):166-178. ZHU Xiaorong, LI Zheng, MENG Fanqi. Stability analysis of DC microgrid based on different grid structures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 166-178.

[4] LIN Zhiyi, SONG Chunyue, ZHAO Jun, et al. Improved approximate dynamic programming for real-time economic dispatch of integrated microgrids[J]. Energy, 2022, 255.

[5] MORTEZAPOUR V, GOLSHANNAVAZ S, POURESMAEIL E, et al. A new hybrid control technique for operation of DC microgrid under islanded operating mode[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 646-656.

[6] KHAN M Y A, ZHANG R, LIU H, et al. A unified distributed hierarchical control of a microgrid operating in islanded and grid connected modes[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(10): 2489-2511.

[7] 朱珊珊,汪飞,郭慧,等.直流微电网下垂控制技术综述[J].中国电机工程学报,2018,38(1):72-84,344. ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84, 344.

[8] 陈景文,周媛,李晓飞,等.光储直流微网混合储能控制策略研究[J].智慧电力,2022,50(1):14-20,87. CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20, 87.

[9] 陈钦泽,王文,岳雨霏,等.基于功率补偿量及下垂系数衰减的直流微电网并网转离网无缝切换控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(16):14-22. CHEN Qinze, WANG Wen, YUE Yufei, et al. Seamless switching control strategy of a DC microgrid from grid to off grid based on power compensation and droop coefficient attenuation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 14-22.

[10] 朱吉然,牟龙华,郭文明.考虑并网运行微电网故障方向识别的逆变型分布式电源故障控制[J].电工技术学报,2022,37(3):634-644. ZHU Jiran, MU Longhua, GUO Wenming. Fault control of inverter interfaced distributed generator considering fault direction identification of the grid-connected microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 634-644.

- [11] 瞿祎, 欧阳曾恺, 朱虹, 等. 基于改进高斯滤波器的含锁相环 PV-BES 微电网的孤岛检测和无缝切换控制[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 38-46.
QU Yi, OUYANG Zengkai, ZHU Hong, et al. Island detection and seamless switching control of PV-BES microgrid with phase-locked loop based on improved Gaussian filter[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 38-46.
- [12] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 69-79.
YAN Xiangwu, WANG Qing'ao, LU Junda, et al. Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 69-79.
- [13] 马宽, 何国锋, 董燕飞, 等. 基于多策略改进 PSO 算法的微电网优化调度研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 23-29, 45.
MA Kuan, HE Guofeng, DONG Yanfei, et al. Microgrid optimal scheduling based on multi-strategy improved PSO algorithm[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 23-29, 45.
- [14] 程杉, 汪业乔, 廖玮霖, 等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 63-71.
CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 63-71.
- [15] TONG Zejun, ZHANG Chun, WU Shuang, et al. Distributed hierarchical economic optimization approach of microgrid based on multi-agent leader-following consensus[J]. Energy Reports, 2023, 9(2): 638-645.
- [16] LUO Shanna, PENG Kaixiang, HU Changbin, et al. Consensus-based distributed optimal dispatch of integrated energy microgrid[J]. Electronics, 2023, 12(6): 1468-1478.
- [17] 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.
- [18] 李浩宇, 张春, 吴零晨, 等. 基于改进有限时间一致性的微电网经济优化调度[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-12[2023-11-23]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001348>.
LI Haoyu, ZHANG Chun, WU Lingchen, et al. Economic optimal dispatching of microgrid based on improved finite time consistency[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA: 1-12[2023-11-23]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001348>.
- [19] ZENG Siming, WANG Lei, LI Tiecheng, et al. Stability and distributed optimization for AC microgrid considering line losses and time delay[J]. Electronics, 2023, 12(7): 1698-1710.
- [20] TONG Zejun, ZHANG Chun, WU Xiaotai, et al. Economic optimization control method of grid-connected microgrid based on improved pinning consensus[J]. Energies, 2023, 16(3): 1203-1215.
- [21] MASLAK G, ORLOWSKI P. Microgrid operation optimization using hybrid system modeling and switched model predictive control[J]. Energies, 2022, 15(3): 833-844.
- [22] SU Wenzhe, YU Shenglong, LI Hong, et al. An MPC-based dual-solver optimization method for DC microgrids with simultaneous consideration of operation cost and power loss[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 936-947.
- [23] JIN Zhipu, MURRAY R M. Multi-hop relay protocols for fast consensus seeking[C]// Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control, December 13-15, 2006, San Diego, USA: 1001-1006.
- [24] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [25] LI Luoyi, HAN Ying, LI Qi, et al. Event-triggered decentralized coordinated control method for economic operation of an islanded electric-hydrogen hybrid DC microgrid[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45.
- [26] QIAO Li, GAO Wenzhong, ZHANG Huaguang, et al. Consensus-based distributed economic dispatch control method in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 941-954.
- [27] 郭慧, 汪飞, 顾永文, 等. 基于电压分层控制的直流微电网及其储能扩容单元功率协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 3117-3131.
GUO Hui, WANG Fei, GU Yongwen, et al. Coordinated power control strategy for DC microgrid and storage expansion unit based on voltage hierarchical control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3117-3131.
- [28] 张步云, 王晋宁, 梁定康, 等. 采用一致性算法的自治微电网群分布式储能优化控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1705-1713.
ZHANG Buyun, WANG Jinning, LIANG Dingkan, et al. Optimization control strategy of distributed energy storage in autonomous microgrid cluster on consensus algorithm[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1705-1713.

收稿日期: 2023-11-24; 修回日期: 2024-03-22

作者简介:

吴文泰(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化控制; E-mail: yp17355377219@163.com

张春(1972—), 男, 通信作者, 硕士, 教授, 研究方向为智能控制理论与应用、智能微电网系统等。E-mail: chzhang@ahpu.edu.cn

(编辑 周金梅)