

基于改进黑洞算法的微电网优化调度

仝 年, 李燕青, 申宏威, 李 允

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要:为提高微电网运行的经济性,需要对其进行日前优化调度。首先建立微电网优化调度数学模型,以微电网内部蓄电池充放电功率和燃料电池输出功率为优化向量,以微电网运行成本最少为优化目标,基于日前预测数据,先将一天分成24 h,以1 h作为1个调度时段进行优化;然后以15 min为1个时段将一天分成96个调度时段,将小时级优化调度的结果作为15 min级优化调度的初始值进行二次优化;最后采用差分进化改进黑洞算法分别求解模型。算例结果显示改进的黑洞算法收敛速度快,求得的优化结果能够作为未来一天中微电网内部蓄电池充放电功率和燃料电池输出功率的参考,减少微电网运行成本。

关键词:微电网;优化调度;黑洞算法;多时间尺度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.014 中图分类号:TM734 文章编号:1673-9140(2021)05-0113-07

Optimal scheduling of microgrid based on improved black hole algorithm

TONG Nian, LI Yanqing, SHEN Hongwei, LI Yun

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to improve the economical efficiency of micro-grid, it is necessary to conduct the day-ahead optimal scheduling. In this paper, a micro-grid optimal scheduling model is established for minimizing the operation cost of the micro-grid. The optimization variables of this model includes the battery charge/discharge power and fuel cells output power. Based on the day-ahead predicted data, one day is divided into 24 hours and the the scheduling period is set as 1 h. Then, taking 15 minutes as a period and the day is divided into 96 scheduling periods. The results of the one hour optimal scheduling are taken as the input of the 15 minutes optimal scheduling for re-optimization. The several heuristic algorithms are used to solve the models, respectively. The results show that the improved black hole algorithm converges faster than the others. The optimal results can be utilized as a reference for the battery charge/discharge power and the fuel cells output power for the next day. This method can effectively reduce the operating costs of micro-grid.

Key words: microgrid; optimal scheduling; black hole algorithm; multiple time scale

微电网是分布式发电的有效组织形式,能够提高可再生能源的渗透率,提高对用户供电的可靠性,弥补大电网集中供电的缺陷^[1]。微电网的优化调度能协调内部可调电源,提高运行经济性。

微电网的优化调度是一种非线性、多约束优化问题^[2-4],并且求解难度大。智能算法具有搜索能力强、适用范围广、鲁棒性强等优点,被广泛应用于微电网运行优化问题的求解中。文献[5]建立了微网热电联合优化调度的数学模型,在模型中加入热储能设备和电热转换设备,以微网运行成本最低为优化目标,考虑了网损等约束条件,利用改进的粒子群优化算法求解模型;文献[6]运用万有引力搜索算法求解微电网优化运行问题,用群体反向学习机制来改进万有引力算法迭代寻优的过程,采用精英策略来提高万有引力算法的可靠性和收敛速度,并引入记忆性和群体交流改进速度更新公式,取得了优于粒子群算法和基本万有引力算法的寻优效果;文献[7]在保证微电网可靠运行的前提下,以运行经济成本和环境成本最低为目标,考虑机组最小开停机约束和爬坡率等约束,利用二进制万有引力搜索算法,实现微电网动态优化调度,有效地提高了微电网的经济效益和环境效益。

该文建立了并网运行微电网的数学模型,在得到未来一天中光伏出力、风机出力和负荷功率预测数据之后,对微电网内部的可调电源出力和储能充放电进行优化调度,以达到微电网运行成本最小的目标,并采用改进黑洞算法求解模型。为了克服基本黑洞算法易陷入局部最优的缺点,引入差分进化算法的交叉、变异操作机制;为了提高搜索速度,引入粒子群算法惯性参量的概念对基本黑洞算法进行改进。

1 微电网优化调度模型

该文研究的微电网结构如图1所示,通过联络线并网正常运行时,公共连接点(point of common coupling, PCC)闭合。其中包含光伏(photovoltaic, PV)、风力发电机(wind turbines, WT)、燃料电池(fuel cell, FC)、储能(energy stored, ES)、能量转换装置和负荷等。假设并网运行时电网始终能够平衡

微电网功率缺额和接受微电网倒送功率。

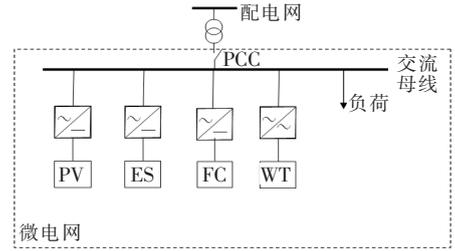


图1 微电网结构

Figure 1 Structure of microgrid

1.1 目标函数

以微电网运行成本最少为优化目标,具体表达为

$$\{\min F = F_1 + F_2 + F_4 + F_5$$

$$F_1 = \sum_{t=1}^T P_G(t) \cdot \Delta t \cdot G_{Pr}(t)$$

$$F_2 = \frac{C_{NG}}{Q_{LHV}} \sum_{t=1}^T \frac{P_{FC}(t)}{\eta_{FC}(t)} \Delta t$$

$$\eta_{FC}(t) = a_1 \frac{P_{FC}(t)}{P_{FCmax}} + a_2$$

$$\{F_3 = \sum_{i=1}^{N_{DG}} \sum_{t=1}^T K_{OM,i} \cdot P_i(t) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$F_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \{\beta_i [\alpha_{FC,i} P_{FC}(t) + \alpha_{G,i} P_G(t)] \Delta t \cdot 10^{-3}\}$$

$$F_5 = \frac{1}{P_{bat,r} T_a} Y_{cap} \cdot \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \cdot$$

$$\left\{ \sum_{t=1}^T |P_{bat}(t)| \right.$$

式中 F 为微电网运行成本,元; F_1 为从电网购电费用,元; F_2 为燃料电池燃料成本,元; F_3 为内部分布式电源(distributed generation, DG)运行维护成本,元; F_4 为环境成本,按污染气体治理费用计算,元; F_5 为根据蓄电池实际充放电计算的蓄电池折旧成本^[8]; T 为调度时段数; $P_G(t)$ 为第 t 个调度时段微电网与主网联络线平均功率,微电网向主网购电时为正值,售电时为负值,kW; Δt 为调度时段时长,h; $G_{Pr}(t)$ 为第 t 个时段电网购、售电价,元/(kW·h); C_{NG} 为燃气价格,取 3.14 元/ m^3 ; Q_{LHV} 为天然气低热值,取 9.5 (kW·h)/ m^3 ; $P_{FC}(t)$ 、 P_{FCmax} 分别为第 t 个调度时段 FC 平均输出功率和最大允许输出

功率, kW; $\eta_{FC}(t)$ 为第 t 个调度时段 FC 效率, 与其输出功率有关^[9]; N_{DG} 为微电网内 DG 数; $K_{OM,i}$ 为第 i 个 DG 单位运行维护成本系数, 元/(kW·h); $P_i(t)$ 为第 i 个 DG 在第 t 个调度时段平均输出功率, kW; M 为对环境有影响的气体排放种类数; β_i 为第 i 种排放气体的治理费用, 元/kg; $\alpha_{FC,i}$ 、 $\alpha_{G,i}$ 分别为 FC 和大电网对应第 i 种气体的排放系数, g/(kW·h); $P_{bat,r}$ 为蓄电池的额定功率, kW; T_a 为蓄电池年运行小时数; Y_{cap} 为蓄电池总投资成本, 元; r 为蓄电池折旧率; n 为蓄电池使用寿命, a; $P_{bat}(t)$ 为蓄电池充放电功率, 正值表示放电, 负值表示充电, kW。其中, $a_1 = -0.0023$, $a_2 = 0.6735$ 。

1.2 约束条件

1) 等式约束条件。功率平衡约束为

$$P_G(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{FC}(t) + P_{bat}(t) = P_T(t) \quad (2)$$

式中 $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 分别为第 t 个调度时段光伏组件和所有风电机交流母线侧平均输出功率, kW; $P_L(t)$ 为第 t 个调度时段负荷平均功率, kW。

2) 不等式约束条件。蓄电池充放电功率约束、荷电状态约束、初始状态约束、联络线功率约束、燃料电池发电功率约束与爬坡率约束为

$$P_{bat}^{\min} \leq P_{bat} \leq P_{bat}^{\max} \quad (3)$$

$$S_{OCmin} \leq S_{OC} \leq S_{OCmax} \quad (4)$$

$$S_{OCend} \geq S_{OCinit} \quad (5)$$

$$P_{Gmin} \leq P_G \leq P_{Gmax} \quad (6)$$

$$P_{FCmin} \leq P_{FC} \leq P_{FCmax} \quad (7)$$

$$P_{FC}(t+1) - P_{FC}(t) \leq r_1 \Delta t \quad (8)$$

式(3)~(8)中 P_{bat}^{\min} 、 P_{bat}^{\max} 分别为蓄电池最小、最大充放电功率, kW; S_{OC} 、 S_{OCmin} 、 S_{OCmax} 分别为蓄电池荷电状态和允许的最小、最大荷电状态; S_{OCinit} 、 S_{OCend} 分别为一天中蓄电池调度初始和终点时刻的荷电状态。 P_{Gmin} 、 P_{Gmax} 分别为联络线允许通过的最小和最大功率, kW, P_{Gmin} 为负值, 即微电网可以向大电网倒送功率; P_{FCmin} 、 P_{FCmax} 分别为 FC 输出的最小和最大功率, kW; r_1 为 FC 的爬坡率最大值, kW/h。

2 改进黑洞算法

2.1 基本黑洞算法

黑洞算法^[10] (black hole algorithm, BHA) 是 Abdolreza Hatamlou 参照宇宙中的黑洞吸引和吞噬星体现象, 于 2013 年提出的一种新的启发式搜索算法。该算法将搜索空间比作宇宙, 将解比作星体, 每个星体对应一个适用度值, 将最优解比作黑洞。算法具体搜索过程如下。

首先, 在允许的范围内随机产生 N_{star} 个星体。计算每个星体的适应度值, 将适应度值最优的星体作为黑洞。搜索过程中, 星体被黑洞吸引, 星体位置更新, 即

$$\begin{cases} x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k) \\ v_{i,j}(k) = r_{and} \cdot [x_{BH} - x_{i,j}(k)] \end{cases}, i=1,2,\dots, N_{star}, j=1,2,\dots, M_{star}, k=1,2,\dots, D_{ite} \quad (9)$$

式中 $x_{i,j}(k)$ 、 $x_{i,j}(k+1)$ 分别为第 i 个星体第 k 次和第 $k+1$ 次迭代的位置; $v_{i,j}(k)$ 为第 i 个星体在第 k 次迭代时的速度; x_{BH} 为黑洞的位置; r_{and} 为 $[0,1]$ 区间内的随机数; N_{star} 为星体数; M_{star} 为星体维度; D_{ite} 为最大迭代次数。

计算更新之后各个星体的适用度值, 将适应度值最优的星体作为黑洞。当星体与黑洞之间的距离 D_i 小于 R 时, 星体被黑洞吞噬。

$$\begin{cases} D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{M_{star}} (x_{BHj} - x_{ij})^2} \\ R = \xi \frac{f_{BH}}{\sum_{i=1}^{N_{star}} f_i} \end{cases} \quad (10)$$

式中 f_{BH} 为黑洞的适应度; f_i 为第 i 个星体的适应度; ξ 为调整吸引速度的常数。

当有星体被黑洞吞噬以后, 重新产生相同数量的新星体。重复式(9)、(10)的操作, 直到最优适用度值达到要求或达到最大迭代次数后停止搜索。

2.2 黑洞算法的改进

基本黑洞算法容易陷入局部最优, 寻优效果不

理想。该文引入差分进化算法交叉、变异操作和粒子群算法惯性参量的概念对基本黑洞算法进行改进。

1) 引入交叉变异操作。对于星体 x_i , 随机选择另外 4 个星体 x_p, x_q, x_k, x_l , 按以下 3 种变异策略产生新的星体^[11]。

策略 1 为

$$T_i^1 = x_l + F \cdot (x_p - x_q) \quad (11)$$

策略 2 为

$$T_i^2 = x_i + F \cdot (x_{\text{BH}} - x_i) + F \cdot (x_p - x_q) \quad (12)$$

策略 3 为

$$T_i^3 = x_{\text{BH}} + F \cdot (x_p - x_q) + F \cdot (x_l - x_k) \quad (13)$$

式中 F 为缩放因子, 取值区间为 $[0, 2]$ 。

策略 1 具有全局搜索能力, 策略 2、3 具有局部搜索能力。按如下进行交叉操作, 即

$$x_{i,j} = \begin{cases} \min(T_{i,j}^1, T_{i,j}^2, T_{i,j}^3), & r_{\text{and}} > C_R \\ x_{i,j}, & r_{\text{and}} \leq C_R \end{cases} \quad (14)$$

式中 C_R 为算法的交叉因子, 取值区间为 $[0, 1]$ 。

对新的星体位置进行边界处理后计算其适应度值, 若优于原星体 x_i 的适应度值, 则新星体取代原星体, 否则保留原星体。

2) 引入惯性参量。基本黑洞算法中星体位置更新时只考虑了黑洞的吸引作用, 即全局最优值的影响。该文模仿粒子群算法中的粒子更新方法, 既考虑全局最优位置的影响, 又加入个体历史最优位置的影响, 将星体位置更新的公式修改为

$$\begin{aligned} v_i(k) &= \omega v_i(k-1) + r_1 [x_i^{\text{best}}(k) - v_i(k)] + r_2 [x_{\text{BH}} - x_i(k)] \\ \omega &= \omega_{\text{max}} - (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}})k/D_{\text{ite}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中 x_i^{best} 为第 i 个星体历史最优位置; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数; ω 为惯性参量; $\omega_{\text{max}}, \omega_{\text{min}}$ 分别为惯性参量最大值和最小值。

2.3 改进黑洞算法步骤

改进黑洞算法 (improved black hole algorithm, IBHA) 流程如图 2 所示。具体步骤如下。

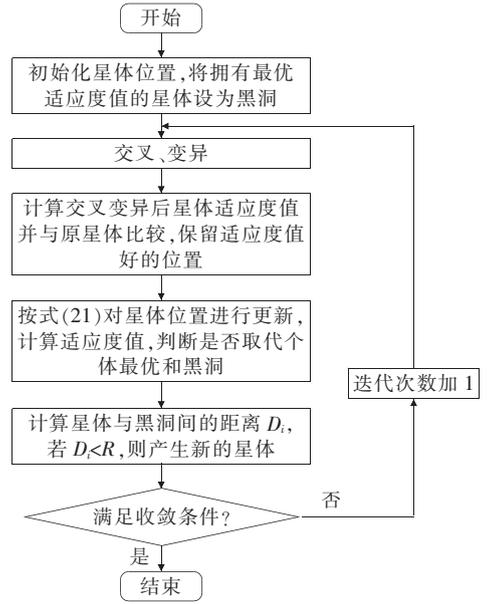


图 2 改进黑洞算法流程

Figure 2 Flowchart of improved black hole algorithm

1) 输入算法参数 (星体个数, 星体的维数, 星体各维度取值范围, 最大寻优次数等)。初始化所有星体的位置, 计算各星体的适应度, 将拥有最优适应度值的星体设为黑洞。

2) 针对每个星体, 随机选择另外 4 个星体, 按 3 种策略变异后与原星体交叉。

3) 计算变异、交叉后星体适应度值并与原星体比较, 保留适应度值好的星体位置。

4) 按式 (15) 对星体位置进行更新, 计算适应度值, 判断是否取代个体最优和黑洞。

5) 计算星体与黑洞间的距离, 判断是否被黑洞吞噬, 若吞噬, 则产生新的星体。

6) 判断是否满足结束条件, 即最优适应度值达到要求或达到最大迭代次数, 若满足, 则结束寻优, 输出计算结果; 若不满足, 则迭代次数加一, 返回步骤 2 继续计算。

3 微电网经济运行优化步骤

优化变量中既包含蓄电池充放电功率, 又包含 FC 输出功率。当以 15 min 为一个调度时段时, 一天中共 96 个时段, 优化变量的维数达到 182, 寻优难度过大。因此, 先以 1 h 为一个调度时段, 利用改

进的黑洞算法求解该优化模型,将每个小时优化结果作为对应的 4 个以 15 min 为一个调度时段的优化模型的变量初始值,继续用改进的黑洞算法求解得到最终的优化结果。

4 算例分析

该文研究的微电网算例中的电源参数如表 1 所示。蓄电池总容量为 300 kW·h,充放电效率均为 0.86,最大充放电功率均为 90 kW。铅酸蓄电池总投资成本为 20 万元,年运行小时数为 8 760 h,年折旧率为 6.3%,使用寿命为 15 a。为了延长蓄电池的使用寿命,防止过充和过放,将 S_{OCmin} 、 S_{OCmax} 分别设为 0.2、0.9。另外,还要保持每个调度周期的蓄电池初始荷电状态 $S_{OCinit} = 0.6$ 。变流器转换效率均为 0.95,一天中最大负荷功率为 200 kW,负荷模型采用 IEEE-RTS 的时序模型^[12];联络线最大功率为 200 kW,最大反送功率为 100 kW。FC 爬坡率上限为 2 kW/min。

电网采用分时电价,一天中各时段微电网从电网购电和向电网售电电价如表 2 所示。污染气体治理费用、FC 和电网的排放系数如表 3 所示。

表 1 分布式电源参数

Table 1 Parameters of DGs

电源	功率/kW		维护费用/ (元/(kW·h))	数量
	下限	上限		
PV	0	300	0.010	1
WT	0	10	0.030	4
FC	8	40	0.026	2

表 2 各时段售电及购电电价

Table 2 Time-of-use electricity price

时段	元/(kW·h)	
	售电电价	购电电价
00:00~08:00	0.30	0.32
08:00~12:00	0.30	0.78
17:00~21:00	0.30	0.78
12:00~17:00	0.30	0.54
21:00~24:00	0.30	0.54

表 3 污染气体治理费用及排放系数

Table 3 Carbon emission coefficients

污染气体类型	治理费用/ (元/kg)	污染排放系数/(g/(kW·h))			
		PV	WT	FC	Grid
SO ₂	6.238	0	0	0.000	0.9
NO _x	26.540	0	0	0.023	0.6

未来一天中光伏出力、风电功率和负荷平均功率预测曲线如图 3 所示。由图 3 可知,光伏出力和风机出力的波动性比较大,且最大出力时刻与负荷需求最大时刻之间有一定的时间差。

将未来一天分成 24 个时段,每个时段为 1 h,即小时级优化,运用改进黑洞算法对优化模型进行求解,50 个星体迭代 200 次,得到优化结果。同样的优化模型,采用粒子群优化算法、基本黑洞算法和改进黑洞算法(particle swarm optimization, PSO)求解。在粒子数和迭代次数等参数相同的情况下,粒子群算法、基本黑洞算法和改进黑洞算法求解该模型 10 次所得结果的平均值收敛曲线如图 4 所示。

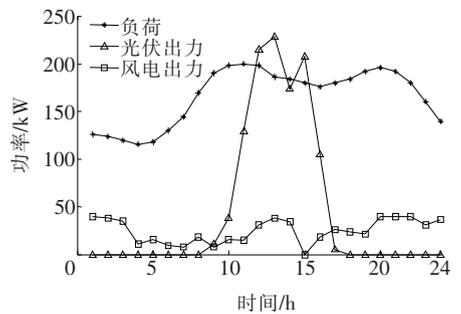


图 3 未来一天光伏、风电、负荷功率预测曲线

Figure 3 Predicted values of daily load, PV and WT

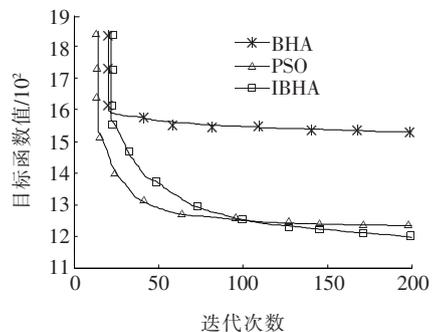


图 4 3 种算法迭代收敛曲线

Figure 4 Iterative convergence curves of three algorithms

由图4可知,IBHA较BHA和PSO搜索能力更强。BHA在搜索时容易陷入局部最优,IBHA加入的交叉变异操作,有效地改善了算法的全局搜索能力。迭代150次之后,IBHA收敛曲线仍然有明显的下降趋势,而BHA和PSO在后期搜索乏力。

由IBHA求得的小时级优化结果如图5所示。由图5可知,联络线功率在电网峰时段和新能源发电充足时显著降低,在12:00—13:00微电网内部新能源发电输出功率多余的情况下向电网反送电量。但反送的电量较少,微电网尽量将新能源发电内部消纳。FC在电网峰时段增大出力,在新能源发电充足时减小出力,降低了微电网运行成本。蓄电池工作的总体情况是在电网电价较低的平、谷时段和新能源发电充足时充电,在电网电价高的峰时段放电,不仅降低了微电网从电网的购电费用、充分利用新能源发电,还达到了削峰填谷的作用。

将优化结果中24个时段的价值分别作为对应的4个15 min时段的初值,运用IBHA对15 min级优化模型进行求解,30个星体迭代50次,得到优化结果如图6所示。

由图6可以看出,15 min级优化在小时级优化的基础上对蓄电池充放电功率和FC输出功率进行

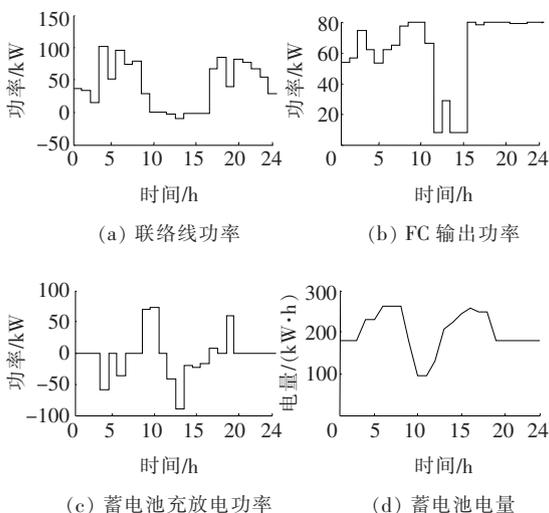


图5 小时级联络线功率、FC输出功率、蓄电池充放电功率和蓄电池电量曲线

Figure 5 Hourly tie line output power, FC power, battery charge/discharge power and battery energy capacity

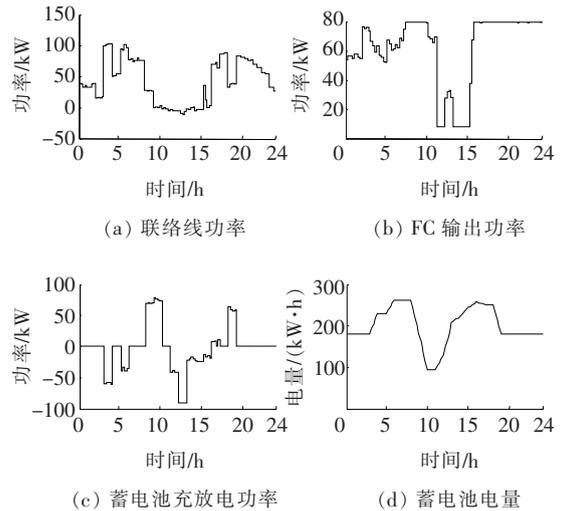


图6 15 min级联络线功率、FC输出功率、蓄电池充放电功率和蓄电池电量曲线

Figure 6 Tie line output power, FC power, battery charge/discharge power and battery energy capacity in 15 minutes period

了微调,求得微电网未来一天的运行成本为1200.15元。联络线的功率数据上报给大电网,作为大电网调度的参考。

5 结语

微电网是解决新能源发电消纳问题的手段之一。该文在保证微电网内部负荷供电的同时,优先利用内部新能源发电,通过优化调度降低微电网的运行成本。但是微电网中新能源出力和负荷都具有随机性,预测数据和实际值不可避免的存在误差。日前优化仅作为微电网调度的参考,要解决预测数据和实际值的误差问题,就要对实时优化调度进行研究。另外,只针对有功功率进行优化,进一步的研究将同时考虑有功和无功功率的优化。

参考文献:

- [1] 王源,南海鹏,关欣. 风水储微电网优化调度策略研究[J]. 高压电器,2020,56(5):216-222.
WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin. Optimal scheduling strategy of wind-hydro-storage micro-grid [J]. High Voltage Apparatus,2020,56(5):216-222.

- [2] 陈寒,唐忠,鲁家阳,等. 基于 CVaR 量化不确定性的微电网优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5):105-115.
CHEN Han, TANG Zhong, LU Jiayang, et al. Research on optimal dispatch of a microgrid based on CVaR quantitative uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5):105-115.
- [3] 原亚宁,李琳,赵浩然. 基于主从博弈模型的交直流混合微电网网协调优化运行方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(3):30-37.
YUAN Yaning, LI Lin, ZHAO Haoran. Optimization operation method for AC/DC hybrid microgrid considering source network coordination based on master-slave game[J]. Smart Power, 2019, 47(3):30-37.
- [4] 马立新,徐嘉辉,杨天笑. 基于 MPSO 算法含电动汽车的微网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8):116-122.
MA Lixin, XU Jiahui, YANG Tianxiao. Optimal scheduling of microgrid with electric vehicles based on MPSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8):116-122.
- [5] 朱翰超,马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2):139-146.
ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2):139-146.
- [6] Li, P, Xu W N, Zhou Z Y, et al. Optimized operation of microgrid based on gravitation search algorithm[C]//2013 International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS 2013), Busan, Korea, 2013.
- [7] Li P, Zhou Z Y, Lin X P, et al. Dynamic optimal operation scheduling of microgrid using binary gravitational search algorithm[C]//2014 IEEE PES general meeting, Washington, USA; IEEE, 2014.
- [8] 张楠. 风光储微网系统的控制与优化运行研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
- [9] Li P, Ma J, Zhao B. Game theory method for multi-objective optimal operation of microgrid[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA; IEEE, 2015.
- [10] Hatamlou A. Black hole: a new heuristic optimization approach for data clustering[J]. Information Sciences, 2013, 222:175-184.
- [11] 范炜锋. 万有引力搜索算法的分析与改进[D]. 广州:广东工业大学, 2014.
- [12] Grigg C, Wong P, Albrecht P, et al. The IEEE reliability test system-1996. a report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods[J]. IEEE Transactions on Power System, 1999, 14(3):1010-1020.