

基于动态奖惩电价的微电网与配网协调优化运行

胡晓通¹, 刘天琪¹, 刘舒², 何川¹, 刘一奎¹

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200122)

摘要: 为了减轻微电网接入对配网带来的影响, 同时提高微电网参与配网优化调度的积极性, 提出一种基于动态奖惩电价的含多微电网的配网分层协调优化模型及其优化方法。该模型以 10 kV 馈线处负荷曲线削峰填谷为目标, 给出各微电网的参考计划交换功率曲线, 各微电网再以各自综合发电成本最小为目标、日前调度交换功率为约束进行二次优化, 与配网下发计划交换功率曲线进行匹配, 根据匹配程度调整动态奖惩电价。引入一种改进的细菌群体趋药性算法, 通过速度和感知范围的自适应调整, 使算法的全局和局部搜索能力得到平衡。通过拉丁超立方抽样产生分布更为广阔的初代细菌, 从而减少算法陷入局部最优的可能性。以接入微电网的 IEEE 69 节点配网作为算例, 验证了所提模型和算法的有效性。

关键词: 配网; 微电网; 协调优化; 动态奖惩电价; 改进细菌群体趋药性算法

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.006

0 引言

不断消耗的化石燃料资源、较低的能源转化效率及较严重的环境污染等成为束缚电力系统发展的枷锁^[1-2]。为了解决上述问题, 人们引入了微电网。微电网^[3-4]由控制系统、储能系统和多种分布式电源组成, 并网运行下的微电网通过合理的调度策略, 可以降低可再生能源发电对电网的冲击, 同时参与主网负荷削峰填谷、降低运行成本^[2,5-6]。

目前大多数微电网优化运行的研究主要针对单个微电网, 而对于多微电网接入配网的协调优化的研究较少。文献[7]对并网不上网的接入方式, 建立了优化运行模型, 提出了 2 种不同的电力市场策略, 并分析了不同策略对微电网优化运行的影响。文献[8]在微电网与配网可以自由交换功率的基础上, 建立了计及制热收益的微电网优化运行模型, 同时附加联络交换功率限制约束, 对不同运行模式下微电网经济调度进行了分析。文献[9]在传统的优化运行模型的基础上, 考虑了微电网之间的容量租用, 采用动态回溯模拟法对含多微电网配电系统优化模型进行求解。文献[10]建立了含多微电网电力系统联合调度模型, 分别从电网层与微电网层进行优化, 在配网层优化时, 考虑微电网提供的购售电价以及出力限制。

文献[7-8]通过附加交换功率限制或设定微电网为并网不上网模式, 微电网基本不参与配网的协调优化; 文献[9-10]将微电网视为配网的一部分, 先

确定配网对微电网的调度计划, 再根据调度计划对微电网内的微源进行调度, 当微电网与配网分属不同利益方时, 无法兼顾微电网方的利益; 或是以发电成本最小为目标, 在配网制定调度计划时, 考虑微电网提供的购售电价以及出力限制, 并未考虑微电网参与配网负荷的经济分配及配网负荷的削峰填谷。另一面, 现有文献在微电网层优化时, 均按照在满足配网层下发调度计划的条件下, 以微电网利益最大化为目标进行二次优化, 由于微电网与配网二者利益往往相互冲突, 难以同时保证二者的利益。

为此本文提出一种基于动态奖惩电价的微电网与配网协调优化模型, 即先以 10 kV 馈线处负荷曲线削峰填谷作为目标函数, 给出各微电网的参考计划交换功率曲线, 各微电网再以综合发电成本最小为目标进行二次优化, 在优化时将微电网与配网间的前日调度交换功率作为约束, 与配网下发计划交换功率曲线进行匹配, 根据匹配程度的不同实现电价的动态化(即根据匹配程度, 采取“低罚高奖”的形式来确定实际的电价), 从而提高微电网参与配网的优化的积极性, 共同完成系统的协调优化。

1 微电网与配网协调优化模型

1.1 基于动态奖惩电价的配网协调优化策略

配网中可以接入多个微电网^[6], 微电网由风力发电机 WT(Wind Turbine)、光伏电池 PV(Photo Voltaic)、热电联产型微型燃气轮机 MT(Micro Turbine)、燃料电池 FC(Fuel Cell)、蓄电池 SB(Storage Battery)等微源及负荷构成, 通过公共连接点接入配网。

由于分布式发电和微电网的接入, 配网由传统被动单向供电向双向供电多电源供电转变^[11-12]。同时, 随着电力市场的逐步改革, 配电环节将逐步引入市场

收稿日期: 2015-04-04; 修回日期: 2016-01-04

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(20132700815-WB01)
Project supported by Science and Technology Project of SM-EPC(20132700815-WB01)

竞争机制^[13]。微电网与配网的功率交换将由经济利益驱动,可追求自身利益的最大化。同时,配网也会希望微电网能更多地参与配网优化运行的调控,比如参与配网负荷的经济分配或参与配网负荷的削峰填谷等^[10-13]。

为此,在微电网发电成本中引入动态双向奖惩电价,该奖惩电价取决于日前调度交换功率曲线与配网下发计划交换功率曲线的匹配程度,即定义其匹配度为:

$$N = 1 - \frac{1}{\sqrt{n_p}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_p} (A(i) - B(i))^2} \quad (1)$$

其中, $A(i)$ 、 $B(i)$ 分别为配网下发计划交换功率曲线和日前调度交换功率曲线模糊化后的隶属度函数值; n_p 为调度时段数。

再由其匹配度给出微电网的购售电价分别为:

$$C_p(t) = C_p(t)(\alpha - N) \quad (2)$$

$$C_s(t) = C_s(t)(\beta + N) \quad (3)$$

其中, $C_p(t)$ 、 $C_s(t)$ 分别为 t 时刻的基准购、售电价; $C_p(t)$ 、 $C_s(t)$ 分别为考虑动态奖惩电价后的实际的购、售电价; α 和 β 为动态奖惩电价调节系数,本文分别取为 1.5 和 0.5。

以此实现“低罚高奖”,即匹配程度越高则购电价越低、售电价越高。

在引入动态奖惩电价策略的基础上,采用两层优化策略,即首先从配网的角度出发,考虑微电网整体具有的电源和负荷的特性,将微电网视作双向可调节负荷接入配网,配网根据优化目标(10 kV 馈线负荷曲线削峰填谷)确定各微电网与配网的参考计划交换功率控制曲线。各微电网再进行二次优化,并以动态奖惩电价计入微电网发电成本,从而提高微电网参与配网的能量管理的积极性。

1.2 配网层优化模型

1.2.1 目标函数

配网希望微电网参与配网的调控,即在负荷高峰时向配网售电,在负荷低时购电,起到了削峰填谷的作用,从而改善配网的负荷特性。文献[14]提出因为方差可反映随机变量偏离其均值的程度,采用方差来衡量削峰填谷的效果。然而,仅通过负荷曲线的方差无法较为准确地描述负荷曲线的特性,因而引入负荷率和最小负荷系数,建立以馈线负荷曲线方差最小、负荷率最大和最小负荷系数最大为优化目标的配网运行优化模型,即优化目标函数为:

$$\min f_1 = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \left(D_1(i) - \frac{1}{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} D_1(j) \right)^2 \quad (4)$$

$$\max f_2 = \frac{1}{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} D_1(j) / D_{1\max} \quad (5)$$

$$\max f_3 = D_{1\min} / D_{1\max} \quad (6)$$

其中, $D_1(i)$ 为经过优化后第 i 个时段馈线上的负荷值; $D_{1\max}$ 和 $D_{1\min}$ 分别为最大和最小负荷。

1.2.2 约束条件

a. 微电网与配网交换功率约束:

$$P_{\text{grid},\min} \leq P_{\text{grid}} \leq P_{\text{grid},\max} \quad (7)$$

其中, $P_{\text{grid},\max}$ 和 $P_{\text{grid},\min}$ 分别为微电网与配网间的最大和最小交换功率。

b. 配网潮流与电压约束:

$$\Delta P_i = P_i - \sum_{j \in i} U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (8)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - \sum_{j \in i} U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (9)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (10)$$

其中, P_i 、 Q_i 分别为节点 i ($i=1, 2, \dots, n$) 的有功和无功功率, n 为节点数; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的导纳和相位差; U_i 、 $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别节点 i 的电压值和取值上、下限; $j \in i$ 表示节点 j 与节点 i 相连。

1.3 微电网层优化模型

1.3.1 目标函数

微电网层优化以微电网一天的发电成本(包括燃料成本、投资折旧成本、维护运行成本)、排污处理成本、考虑动态奖惩电价的微电网与配网交互成本及制冷收益所构成的综合发电成本最低为目标,建立微电网运行优化模型,即优化目标函数为:

$$\min C = \sum_{m=1}^{n_m} C_m \quad (11)$$

$$C_m = \sum_{t=1}^{n_h} [C_f(t) + C_{DP}(t) + C_{OM}(t) + C_e(t)] + C_{\text{grid}} - C_{\text{sc}} \quad (12)$$

$$C_f(t) = \sum_{i=1}^{n_1} F_i(P_i(t)) \quad (13)$$

$$C_{DP}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{C_{az,i}}{8760k_i} \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} P_i(t) \quad (14)$$

$$C_{OM}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} K_{OM,i} P_i(t) \quad (15)$$

$$C_e(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{m_i} V_{ej} Q_{ij} P_i(t) \quad (16)$$

$$C_{\text{grid}}(t) = C_p(t) P_{\text{GP}}(t) - C_s'(t) P_{\text{SP}}(t) \quad (17)$$

$$C_{\text{sc}}(t) = Q_{ce}(t) K_{pc} \quad (18)$$

其中, C_m 为各个微电网综合发电成本; n_m 为微电网总数; n_1 为微电网中微源数; P_i 为第 i 个微源的有功出力; $C_f(t)$ 、 $C_{DP}(t)$ 、 $C_{OM}(t)$ 、 $C_e(t)$ 分别为 t 时段各微电源的燃料成本、投资折旧成本、运行维护成本、排污处理成本; P_{GP} 、 P_{SP} 分别为微电网向主网购电和售电功率; C_{grid} 、 C_{sc} 分别为考虑动态奖惩电价的微电网与配网的交互成本和微型燃气轮机制冷收益; $C_{az,i}$ 、 k_i 、 r 、 n_i 、 $K_{OM,i}$ 、 V_{ej} 、 Q_{ij} 分别为单位容量的微电源的安装成本、容量因素、年利率、投资偿还期、单位电量运行维护成本系数、污染物的环境价值和污染物的排放量; m_i 为污染物的种类; $Q_{ce}(t)$ 为微型燃气轮机各时刻制冷量; K_{pc} 为单位制冷的收益。

1.3.2 约束条件

a. 微源有功出力约束:

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (19)$$

其中, $P_{i,\max}$ 和 $P_{i,\min}$ 分别为第 i 个微源有功出力的最大和最小值。

b. 增加与减少出力时的微型燃气轮机爬坡率约束分别如式(20)、(21)所示。

$$P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \leq R_{up} \quad (20)$$

$$P_{MT}(t-1) - P_{MT}(t) \leq R_{down} \quad (21)$$

其中, $P_{MT}(t)$ 为微型燃气轮机第 t 时刻出力; R_{up} 和 R_{down} 分别为增加和降低出力的限值。

c. 蓄电池运行约束:

$$P_{SB,\min} \leq P_{SB} \leq P_{SB,\max} \quad (22)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (23)$$

其中, P_{SB} 为蓄电池的出力; $P_{SB,\max}$ 和 $P_{SB,\min}$ 分别为蓄电池出力的最大和最小值; SOC 为蓄电池的剩余电量; $SOC_{\max}$ 和 $SOC_{\min}$ 分别为剩余电量的最大和最小限值。

d. 微电网与配网交换功率约束:

$$P_{grid,\min} \leq P_{grid} \leq P_{grid,\max} \quad (24)$$

e. 微电网内功率平衡约束:

$$P_{load} = P_{grid} + \sum_{i=1}^{n_l} P_{DG,i} \quad (25)$$

其中, P_{load} 为微电网总的负荷; P_{grid} 为微电网与配网的交换功率; $P_{DG,i}$ 为各微源的出力。

2 微电网与配网协调优化运行算法

2.1 基本细菌群体趋药性优化算法

细菌群体趋药性 BCC (Bacterial Colony Chemotaxis) 算法是一种从细菌趋药性 BC (Bacterial Chemotaxis) 算法发展而来的智能优化算法^[15-16], 包含趋化过程、感知过程和精英保留策略等步骤^[17]。文献^[15-17]已验证 BCC 算法与其他智能算法 (标准遗传算法、进化算法、粒子群优化算法等) 相比, 具有更好的全局性、快速性、更高的精度和较低的资源占用率。

2.2 拉丁超立方抽样

拉丁超立方抽样 (LHS) 是一种由 M. D. McKay 等提出的分层抽样方法^[18]。LHS 由于具有在相同采用规模下能够覆盖更大的采样空间以及具有更好的稳健性, 已逐渐成为一种广泛应用的抽样方法。

若采样空间为 D 维, 抽样规模为 N , U_i 和 L_i 分别为第 i 维变量的上界和下界, 则 LHS 采样方法如下: 将每一维变量划分为 N 个相等的区间, 即为 $[L_i, L_i + (U_i - L_i)/N], \dots, [L_i + (n-1)(U_i - L_i)/N, U_i]$, 从而获得 N^D 个区间。在每个区间中随机生成一个数, 就形成了 $N \times D$ 的采样矩阵 S , 再在 S 矩阵中每一列随机抽取一个数, 组成向量。

2.3 改进 BCC 算法

2.3.1 移动速度动态调整

基本 BCC 算法的速度 v 通常为常数, 然而 v 与细菌的全局搜索能力息息相关, 因而引入速度动态机制^[17], 如式(26)所示。

$$v^{n_s+1} = (v^{n_s} - v_{\min})e^{-\xi n_s} + v_{\min} \quad (26)$$

其中, n_s 为细菌规模; $v_{\min}$ 为速度的最小值; ξ 为控制速度减小的常数。

2.3.2 感应范围自适应

感应范围主要影响细菌聚集的快慢, 过快易陷入局部最优, 过慢会影响收敛速度, 因而对感知范围进行自适应调整^[17], 如式(27)、(28)所示。

$$\sigma = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \sqrt{\sum_{j=1}^T (x_{i,j} - x_{av,j})^2} \quad (27)$$

$$S_k = S_{kmin} + (e^{\xi \sigma} - 1) / \zeta \quad (28)$$

其中, T 为决策变量维数; $x_{i,j}$ 为第 i 个细菌第 j 维变量的值; $x_{av,j}$ 为细菌第 j 维变量的平均值; S_{kmin} 为感知范围的最小值; ζ 为控制感知范围减小的常数。

2.3.3 基于 LHS 的初代细菌生成

在 BCC 算法产生初代细菌时, 引入 LHS, 即将细菌规模 n_s 设定为采样规模, p 维决策变量空间设定为采样空间。利用 LHS 产生一个 $n_s \times p$ 阶采样矩阵 S , 矩阵 S 中每一列中的每一个数分别由一个不同的区间产生, 并且它们是无序排列的, 利用采样矩阵 S 生成初代细菌。

由于 LHS 能够在相同的采样规模下覆盖更大的采样空间, 因而通过 LHS 产生的初代细菌具有更为广阔的分布, 从而可以降低算法陷入局部最优的可能性。

2.4 改进 BCC 算法优化测试函数

采用 Rastrigin 函数对基本 BCC 和改进 BCC 算法性能进行测试^[17], 该函数如式(29)所示:

$$f = 20 + [x^2 - 10 \cos(2\pi x) + y^2 - 10 \cos(2\pi y)] \quad (29)$$

改进 BCC 及基本 BCC 算法参数设置如下: 细菌规模为 20, 初始迭代精度为 2, 最终迭代精度为 10^{-6} , 精度更新常数为 1.25, 最大迭代次数为 100, ξ 、 ζ 均为 0.01。优化仿真结果和优化收敛曲线如图 1、图 2 所示。

由图 1 和图 2 可见, 改进 BCC 算法由于采用了基于 LHS 生成初代细菌、动态调整移动速度以及自适应调整感应范围, 因而比基本 BCC 算法具有更广泛的初代细菌分布以及更快的收敛速度。

2.5 算法流程

为了加快运算速度, 设定一定的终止条件, 即连续 5 次迭代中细菌群体中最大与最小适应度函数值之差的绝对值小于精度后迭代终止。改进 BCC 算法的流程见图 3, 其中 $k_{\max}$ 为最大迭代次数。

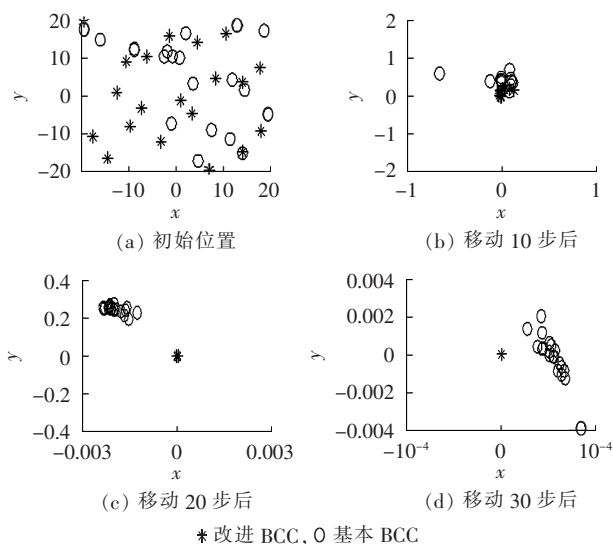


图 1 仿真结果
Fig.1 Simulative results

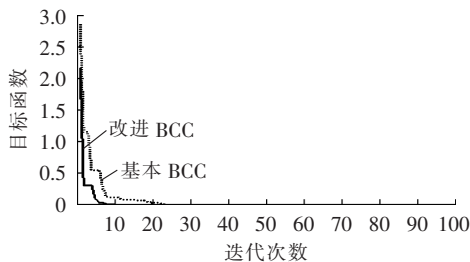


图 2 收敛曲线
Fig.2 Convergence curve

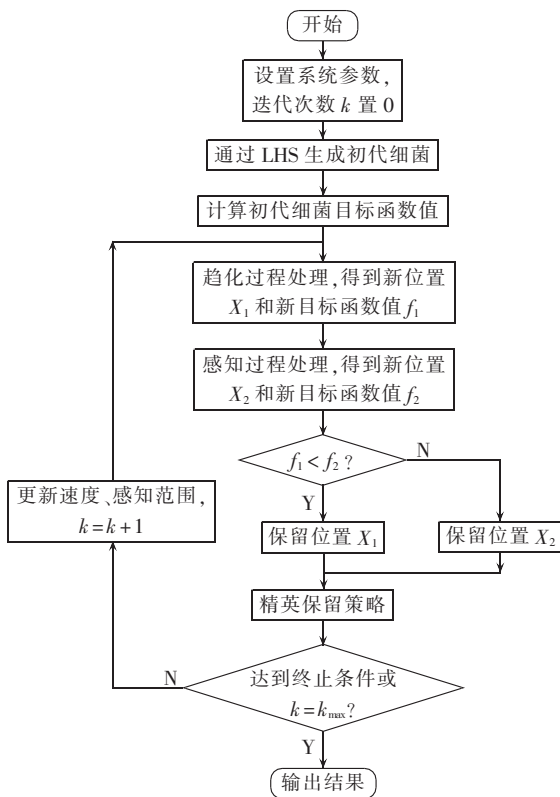


图 3 算法流程
Fig.3 Flowchart of algorithm

3 算例分析

3.1 算例模型

在配网节点 20、35、58 和 69 引入微电网,形成含微电网的配网,如图 4 所示。配网参数与文献[19]相同,其中配网各负荷时间分布如表 1 所示(表中负荷为标么值);各微电网中的微源参数分别如表 2、3 所示[8];基准电价、各微源的污染物排放系数及成本参照文献[20-21],如表 4 所示;各微源运行成本参照文献[21-22],如表 5 所示。

此外,根据冷负荷设定微电网 1 中的微型燃气轮机的输出功率曲线,其净发电功率与效率关系曲线和燃料成本函数参照文献[22],制冷收益设定为 0.2 元/(kW·h)^[23]。微电网与配网的交换功率的上、下限分别为 100 kW 和 -100 kW(以微电网向主网购电为正,反之为负)。蓄电池的最大、最小和初始荷电状态分别为 95%、20%、40%,微电网 1、微电网 2 和微电网 4 中蓄电池的额定容量分别为 2400、2000 和 1600 kW·h。配网电压允许偏差为 -5%~5%。各微电网的典型日风、光和负荷曲线分别如图 5 和图 6 所示。

3.2 仿真结果及讨论

在 MATLAB 环境中编写程序进行仿真,细菌规模为 50,最大迭代次数为 500 次,初始迭代精度为 2,最终迭代精度为 10⁻³,精度更新常数为 1.25,ξ、ζ 均为 0.01。粒子群算法取相同的粒子数。

本文采用基于 Pareto 的多目标优化技术来解决上述配网层运行优化模型,Pareto 解集如图 7 所示。图中解 1、解 2、解 3 是 3 个代表性的结果,解 1 为 Pareto 解集中的负荷曲线方差最小的解,解 2 为负荷率最大的解,解 3 为最小负荷系数最大的解。采用模糊隶属度进行折中处理,模糊隶属度函数为:

$$u_i = \begin{cases} 1 & f_i < f_{i\min} \\ \frac{f_{i\max} - f_i}{f_{i\max} - f_{i\min}} & f_{i\min} \leq f_i \leq f_{i\max} \\ 0 & f_i \geq f_{i\max} \end{cases} \quad (30)$$

其中, $f_{i\max}$ 、 $f_{i\min}$ 分别为第 i 个目标的最大、最小值; f_i 为第 i 个目标的函数值。

图 8 为改进 BCC 算法、基本 BCC 算法和粒子群优化算法的迭代收敛曲线,由图可知,改进 BCC 算法具有较好的收敛精度和较小的陷入局部收敛的概率。

考虑多个微电网接入,协调优化和不考虑协调优化时,10 kV 馈线在配网层不同目标函数下的适应度值如表 6 所示,各微电网综合收益如表 7 所示。协调优化后、不考虑协调优化时、原始系统负荷(微电网设定为并网不上网时 10 kV 出线处馈线负荷)曲线如图 9 所示。

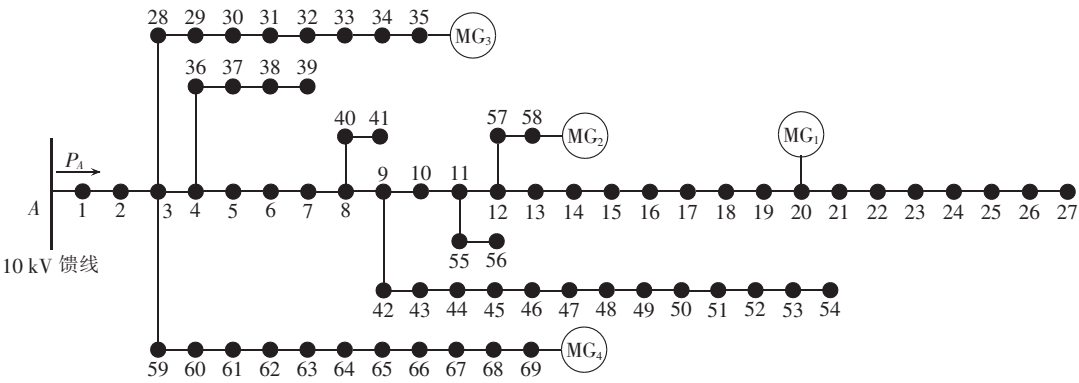


图 4 包含微电网的 IEEE 69 节点配电网

Fig.4 IEEE 69-bus distribution network with microgrids

表 1 IEEE 69 节点配电网各节点负荷时间分布
Table 1 Bus load distribution of IEEE 69-bus distribution network

时刻	负荷	时刻	负荷	时刻	负荷	时刻	负荷
01:00	0.16	07:00	0.18	13:00	0.66	19:00	0.24
02:00	0.12	08:00	0.26	14:00	1.00	20:00	0.28
03:00	0.09	09:00	0.35	15:00	0.66	21:00	0.30
04:00	0.07	10:00	0.35	16:00	0.53	22:00	0.23
05:00	0.02	11:00	0.54	17:00	0.27	23:00	0.20
06:00	0.11	12:00	0.67	18:00	0.24	24:00	0.15

表 2 微电网中各微源的参数

Table 2 Micro-source parameters of microgrid

电源类型	安装成本/(万元·kW ⁻¹)	寿命/a
微型燃气轮机	1	10
燃料电池	2.8	10
光伏电池	2	20
风机	1.2	10
蓄电池	0.066 7	10

表 3 各微电网中各微源的容量

Table 3 Micro-source capacities for different microgrids

电源类型	微电网	功率上限/kW	功率下限/kW
微型燃气轮机	1	65	15
	2	—	—
	3	100	15
	4	—	—
燃料电池	1	40	8
	2	—	—
	3	—	—
	4	—	—
光伏电池	1	40	0
	2	40	0
	3	—	—
	4	—	—
风机	1	60	0
	2	60	0
	3	—	—
	4	—	—
蓄电池	1	120	-120
	2	100	-100
	3	—	—
	4	80	-80

表 4 污染物治理成本及排污系数

Table 4 Pollution harness cost and emission factor

污染物类型	治污费用/(元·kg ⁻¹)	污染物排放系数/[g·(kW·h) ⁻¹]				
		光伏电池	风机	燃料电池	蓄电池	微型燃气轮机
CO ₂	0.210	0	0	635.04	0	184.082 9
SO ₂	14.842	0	0	0	0	0.000 928
NO _x	62.964	0	0	0.023	0	0.618 8
CO	0.125	0	0	0.054 4	0	0.1702

表 5 各微源运行管理成本

Table 5 Operation and maintenance cost of micro-sources

微源类型	$K_{OM}/[元·(kW·h)^{-1}]$	微源类型	$K_{OM}/[元·(kW·h)^{-1}]$
光伏电池	0.009 6	微型燃气轮机	0.128 0
风机	0.045 0	蓄电池	0.045 0
燃料电池	0.029 3		

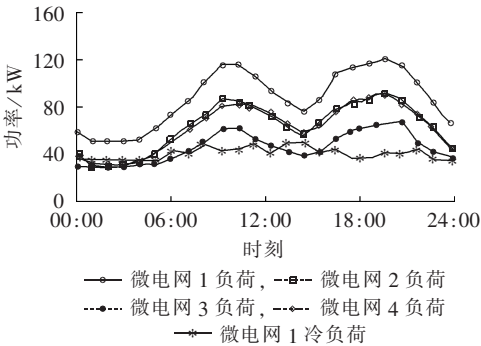


图 5 各微电网典型日负荷曲线

Fig.5 Typical daily load curve of different microgrids

由表 6 和表 7 可知,较不考虑协调优化(即仅采用基准电价,不采用动态奖惩电价,微电网仅考虑自身成本最优,忽略配网对微电网的调度计划),采用基于动态奖惩电价的协调优化,各微电网综合收益均有提高,配网 10 kV 馈线处负荷曲线特性均有改善(负荷曲线方差变小、负荷率变大和最小负荷系数变大)。

如图 9 所示,经过协调优化后,配网系统负荷特性较不考虑协调优化和原始配网系统负荷曲线有一定的改善。在 01:00—09:00 之间,配网负荷存在一个波谷,协调优化后的负荷较不考虑协调优化和原

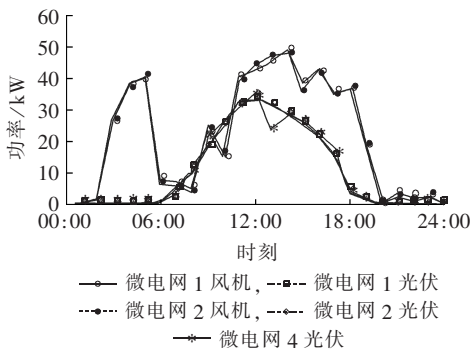


图 6 各微电网典型日风电和光伏曲线
Fig.6 Typical daily wind and photovoltaic power curves of different microgrids

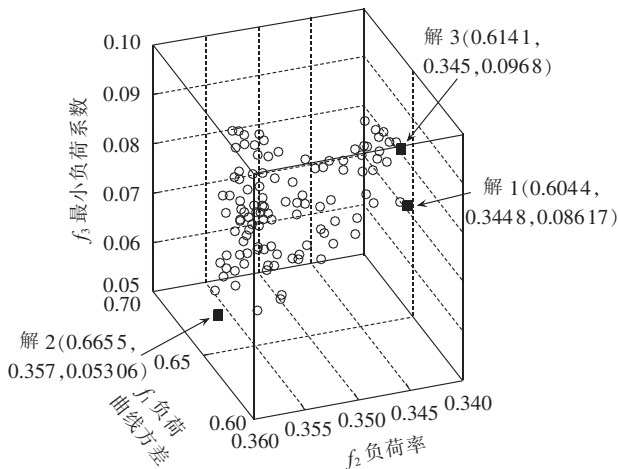


图 7 Pareto 解的目标函数空间分布
Fig.7 Pareto solution distribution in objective function space

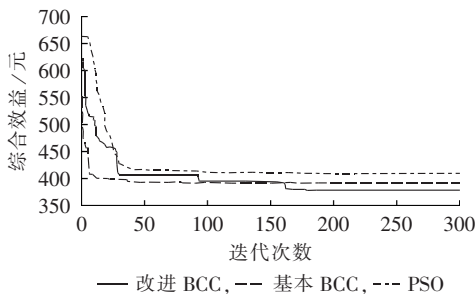


图 8 微电网 1 综合效益收敛曲线
Fig.8 Comprehensive benefit convergence curve of microgrid 1 for different algorithms

表 6 考虑与不考虑协调优化时配网 10 kV 馈线的各目标函数适应度值

Table 6 Fitness value of objective functions of 10 kV feeder,with and without coordinated optimization

条件	f_1	f_2	f_3
协调优化	0.608 1	0.347 3	0.093 5
不考虑协调优化	0.730 8	0.337 2	0.032 4
原始系统负荷	0.863 8	0.325 6	0.035 6

始配网系统均增大,说明在波谷时,协调优化可以促进微电网利用自身储能装置吸收系统低谷时段的电能,增大配网负荷;在 10:00—16:00 之间,配网存在

表 7 各微电网综合收益
Table 7 Comprehensive benefit of different microgrids

微电网	综合收益/元	
	协调优化	不考虑协调优化
1	379.17	668.61
2	-674.29	-109.72
3	923.87	1 109.11
4	75.82	364.72
总成本	704.58	2 032.72

注:成本为负代表盈利。

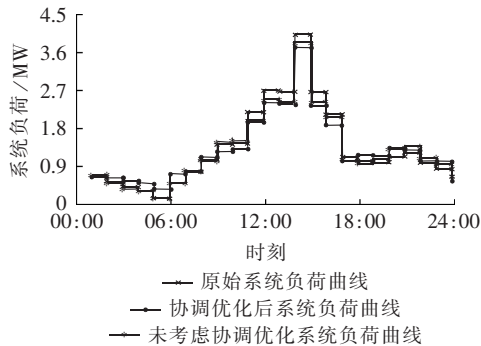


图 9 系统负荷变化
Fig.9 System load variation

一个波峰,协调优化后的负荷较不考虑协调优化和原始配网系统均减小,说明在波峰时,协调优化可以促进微电网利用自身微源在配网负荷高峰时段提供电能,可以减小配网负荷,因此配网馈线负荷总体波动更小、负荷率和最小负荷系数更大,实现负荷的“削峰填谷”,改善了系统的负荷特性。若增大微电网中微源的配置容量和微电网与配网的联络线功率限制,微电网将具有更加显著的“削峰填谷”的能力。

4 结论

a. 提出了微电网与配网协调优化策略,在优化过程中充分发挥微电网参与配网调度管理的作用,分别对含微电网配电系统的配网层和微电网层进行优化。

b. 在协调优化运行模型基础上,提出了动态奖惩电价策略,通过日前调度交换功率曲线与配网下发计划交换功率曲线的匹配程度来确定相应的实际电价,采取“低罚高奖”的形式对微电网进行补贴,从而提高微电网参与配网的调度管理的积极性。

c. 采用了一种改进 BCC 算法,与基本 BCC 算法相比,采用速度和感知范围的自适应调整,从而获得较为平衡的全局和局部搜索能力。同时,通过 LHS 产生初代细菌,使初代细菌能够较为广阔地分布在可行性空间中,从而减少陷入局部最优的可能性。

参考文献:

[1] 刘春阳,王秀丽,刘世民,等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):29-36.

- LIU Chunyang,WANG Xiuli,LIU Shimin,et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):29-36.
- [2] CHOWDHURY C,CHOWDHURY S P,CROSSLEY P. Microgrids and active distribution networks[M]. London,United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology,2009:1-3.
- [3] YAO D L,CHOI S S,TSENG K J,et al. Determination of short-term power dispatch schedule for a wind farm incorporated with dualbattery energy storage scheme[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy,2012,3(1):74-84.
- [4] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu,SU Jian,LÜ Zhipeng,et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):57-70.
- [5] 刘天琪,江东林. 基于储能单元运行方式优化的微电网经济运行[J]. 电网技术,2012,36(1):45-50.
LIU Tianqi,JIANG Donglin. Economic operation of microgrid based on operation mode optimization of energy storage unit[J]. Power System Technology,2012,36(1):45-50.
- [6] LASSETER R H. Smart distribution:coupled microgrids[J]. Proceedings of Tricomm,2011,99(3):1074-1082.
- [7] TSIKALAKIS A G,HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(1):241-248.
- [8] 陈洁,杨秀,朱兰,等. 不同运行调度模式下微网经济运行对比分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):106-113.
CHEN Jie,YANG Xiu,ZHU Lan,et al. Comparison of microgrid economic operation among different dispatch modes[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):106-113.
- [9] 江润洲,邱晓燕,李丹,等. 含储能系统的多微网智能配电系统经济运行[J]. 电网技术,2013,37(12):3596-3602.
JIANG Runzhou,QU Xiaoyan,LI Dan,et al. Economic operation of smart distribution network containing multi microgrids and energy storage system[J]. Power System Technology,2013,37(12):3596-3602.
- [10] 艾欣,许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(1):143-149.
AI Xin,XU Jiajia. Study on the microgrid and distribution network co-operation model based on interactive scheduling[J]. Power System Protection and Control,2013,41(1):143-149.
- [11] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
YOU Yi,LIU Dong,YU Wenpeng,et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(18):10-16.
- [12] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
LI Peng,DOU Pengchong,LI Yuwei,et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):8-16.
- [13] 罗运虎,王冰洁,梁昕,等. 电力市场环境下微电网不可再生分布式发电容量的优化配置问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):28-36.
LUO Yunhu,WANG Bingjie,LIANG Xin,et al. Configuration optimization of non-renewable energy distributed generation capacity[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):28-36.
- [14] 陈满,陆志刚,刘怡,等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J]. 电网技术,2012,36(9):232-237.
CHEN Man,LU Zhigang,LIU Yi,et al. Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy system operated in constant power mode[J]. Power System Technology,2012,36(9):232-237.
- [15] 李威武,王慧,邹志君,等. 基于细菌群体趋药性的函数优化方法[J]. 电路与系统学报,2005,10(1):58-63.
LI Weiwu,WANG Hui,ZOU Zhijun,et al. Function optimization method based on bacterial colony chemotaxis[J]. Journal of Circuit and System,2005,10(1):58-63.
- [16] MULLER S D,MARCHETTO J,AIRAGHI S,et al. Optimization based on bacterial chemotaxis[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(1):16-29.
- [17] 张晓辉,卢志刚,秦四娟. 基于改进细菌群体趋药性算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术,2012,36(2):109-114.
ZHANG Xiaohui,LU Zhigang,QIN Sijuan. Reactive power management based on improved bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. Power System Technology,2012,36(2):109-114.
- [18] MCKAY M D,BECKMAN R J,CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. Technometrics,2000,42(1):55-61.
- [19] BARAN M E,WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution system[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1989,4(1):725-734.
- [20] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):7-14.
DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin,et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):7-14.
- [21] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan,et al. Environmental benefits ananalysis of distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):11-15.
- [22] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.
LI Le. Study of economic operation in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University,2011.
- [23] RAMAKUMAR R,BULTER N G,RODRIGUEZ A P,et al. Economic aspects of advanced energy technologies[J]. Proceeding of the IEEE,1993,81(3):318-332.

作者简介:



胡晓通

胡晓通(1990—),男,四川广安人,博士研究生,研究方向为电力系统分析计算与稳定控制(E-mail:scu_huxiaotong@163.com);

刘天琪(1962—),女,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化(E-mail:tqliu@sohu.com)。

Coordinated optimal operation between microgrid and distribution network based on dynamic award and penalty price

HU Xiaotong¹, LIU Tianqi¹, LIU Shu², HE Chuan¹, LIU Yikui¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200122, China)

Abstract: In order to alleviate the impact of integrated microgrid on distribution network and increase the enthusiasm of microgrid participating in the optimal dispatch of distribution network, a layered and coordinated optimization model based on the dynamic award and penalty price is proposed with the optimization method for the distribution network integrated with multiple microgrids. At the network layer, it takes the load shifting of 10 kV feeder as its objective to obtain a power-exchange schedule reference for each microgrid, and at the microgrid layer, it takes the minimum total cost as its objective and the day-ahead power-exchange dispatch as its constraint, which is compared with the obtained power-exchange schedule reference to determine the matching degree for adjusting the dynamic award and penalty price. An improved bacterial colony chemotaxis algorithm is applied to balance the global and local search abilities by adaptively adjusting the velocity and perception range. The Latin hypercube sampling method is adopted to generate the original bacteria with wider distribution for reducing the possibility of local optimum. IEEE 69-bus distribution network integrated with microgrids is taken as an example and the results of case study verify the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Key words: distribution network; microgrid; coordinated optimization; dynamic award and penalty price; improved bacterial colony chemotaxis algorithm

(上接第 25 页 continued from page 25)

Optimal microgrid operation based on wind/PV power prediction

ZHANG Xiaobo, ZHANG Baohui, WU Xiong

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The ARMA(AutoRegressive Moving Average) model is used to predict the wind power, the multiple linear regression method is used to predict the photovoltaic power, the piece-wise linearization method is used to present the relationship between the fuel cost and output power of MT(MicroTurbine), and a battery model considering the charging/discharging efficiency and states is established. With the minimum internal fuel cost and the minimum electricity purchase cost as the objectives, the control strategy of microgrid operation is optimized by charging and discharging the battery. CPLEX software is applied to solve the optimization function and the results of optimal operation are presented, which show that, with the proposed optimization strategy, the battery is charged when the electricity price is lower while discharged when the electricity price is higher and the operating cost is less than that of the traditional control strategy.

Key words: microgrid; economy; optimization; wind power; photovoltaic; prediction; electric batteries