

基于克隆选择算法的微电网多目标运行优化

薛贵挺¹, 张 焰¹, 刘玉娇¹, 祝达康²

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 为合理安排微电网中分布式能源的出力, 建立了以日电量成本最低、日温室气体排放量最少、全天中最大节点电压偏差最小为目标函数的微电网多目标运行优化模型, 并采用克隆选择算法进行求解。在求解过程中, 应用固定步长和变步长相结合的空间搜索方法来提高解的精度, 通过反复克隆、变异、选择等操作, 得到满足约束条件的 Pareto 最优解集, 进而利用模糊隶属度计算总体满意度, 解决最优解的选择问题。IEEE 33 节点系统算例验证了所提模型及算法的有效性。

关键词: 微电网; 分布式电源; 优化; 克隆选择算法; 综合效益; 模型

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.003

0 引言

作为大电网的有益补充及分布式电源 DG (Distributed Generation) 的有效利用形式, 微电网技术近年来得到快速发展, 由小容量 DG 组成的微电网更是受到人们广泛关注^[1-2]。这类微电网包含的 DG 主要有光伏电池 PV (PhotoVoltaic cell)、风电机组 WT (Wind Turbine)、燃料电池 FC (Fuel Cell)、微型燃气轮机 MT (MicroTurbine) 等。其中, PV 和 WT 属于“不可控”电源, 其输出功率与环境密切相关; FC 和 MT 属于“可控”电源, 可向外输出大小可控的功率。如何合理安排微电网中不同 DG 的运行计划, 保证微电网在不同时段都满足负荷要求, 并实现微电网优质运行, 是微电网研究中的一个重要方面^[3-4]。

目前, 针对微电网运行优化问题, 国内外也开展了较多研究。文献[5]以采用分层控制结构的微电网为研究对象, 通过中央控制器优化不同 DG 出力及微电网与主网间的交换功率, 实现微电网经济效益最大化。文献[6]建立了集中控制模式下的微电网优化调度模型, 提出不同的微电网调度策略, 讨论了控制策略、目标函数及电价类型对微电网系统运行优化结果的影响。文献[7]在考虑钠硫电池运行特性的基础上, 研究了含钠硫电池储能的微电网经济运行优化。文献[8]提出了基于功率预测模块、储能系统管理模块和运行成本优化模块的智能能量管理系统, 研究了含 PV 和能量储存系统 ESS (Energy Storage System) 的微电网经济运行问题。文献[9]在考虑可再生能源随机波动和微电网运行可靠性的条件下,

提出了基于机会约束规划的微电网动态经济调度模型, 讨论了微电网中不确定性因素对调度结果的影响。文献[10-11]计及可再生能源和负荷的随机性, 应用机会约束规划理论建立了热电联供型微电网经济运行优化模型, 并采用基于随机模拟技术的粒子群优化算法对其进行求解。以上文献均着重考虑微电网的经济和环保指标, 而未考虑微电网的技术指标 (如电压质量), 也未计及系统的网络损耗。实际上, 微电网运行优化涉及经济、环境、技术等多方面因素, 是典型的多目标优化运行问题^[3,12]。

虽然国外已有文献从经济、环保和技术三方面考虑, 研究微电网运行优化问题, 但所提出的模型还有待完善。文献[13]建立了以网络损耗、运行成本、CO₂ 排放量为目标的微电网运行优化模型, 而未考虑系统电压质量。文献[14]以有功损耗最小、电压偏差最小、电量成本最低和污染气体排放量最小为目标, 研究了含 DG 的配电网重构问题, 但文中的微电源未包含储能装置。

基于上述情况, 本文对优化模型进行完善, 建立含 ESS 和多种 DG 的微电网短时运行优化模型。该模型将实时电价考虑在内, 以系统日电量成本最小、日 CO₂ 排放量最少、全天中最大节点电压偏差最小为目标, 针对不同 DG 引入相应约束。首先随机产生各个可控 DG 和 ESS 的出力, 采用牛顿法进行含 DG 的微电网潮流计算, 得到不同目标的函数值, 其次根据 Pareto 准则应用克隆选择算法 CSA (Clone Selection Algorithm) 搜索最优潮流解, 然后利用模糊隶属度从求得的 Pareto 解集中挑选出符合运行人员要求的最优解, 最后通过对 IEEE 33 节点系统进行求解, 验证优化模型和算法的正确性。

1 微电网多目标运行优化模型

1.1 目标函数

a. 目标 1: 微电网系统日电量成本最低。微电网

收稿日期: 2013-03-14; 修回日期: 2014-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51177099); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2011AA05AA103)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51177099) and the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA05AA103)

中的 ESS 起能量储存作用,可以忽略其电量成本,因此微电网电量成本只包括 DG 发电成本、微电网与主网间的能量交换成本这 2 个部分。其中,DG 发电成本主要由燃料成本、折旧成本和运行管理成本 3 个部分组成,其大小受能源价格、折旧率、年利率等相关因素的影响。本文采用 DG 报价近似代替 DG 发电成本。

$$f_1 = \min C = \min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_{DG}} (P_{DG_i}^t B_{DG_i}^t) + P_{Grid}^t B_{Grid}^t \right] \Delta t \quad (1)$$

其中, C 为微电网系统的日电量成本; T 为优化周期总时段数,本文取 24; N_{DG} 为系统中 DG 的个数; $P_{DG_i}^t$ 为第 i 个 DG 在时段 t 的有功出力; $B_{DG_i}^t$ 为第 i 个 DG 在时段 t 的报价; P_{Grid}^t 为微电网在时段 t 的购电功率,购电为正,售电为负; B_{Grid}^t 为实时电价,即电网在时段 t 的报价; Δt 为单位时段的时间间隔,本文取 $\Delta t=1\text{h}$ 。

b. 目标 2:微电网系统全天的 CO_2 排放量最小。ESS 工作时不产生温室气体,因此认为微电网系统的 CO_2 排放量主要由 DG 单元和电网产生。

$$f_2 = \min E_m = \min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_{DG}} (k_{DG_i} P_{DG_i}^t) + k_{Grid} P_{Grid}^t \right] \quad (2)$$

其中, E_m 为微电网系统的全天 CO_2 排放量; k_{DG_i} 为第 i 个 DG 的 CO_2 排放系数; k_{Grid} 为电网的 CO_2 排放系数。

c. 目标 3:微电网系统全天中的最大节点电压偏差最小。

$$f_3 = \min \Delta U = \min \{ \max |1 - U_i^t| \} \quad (3)$$

其中, $i=1,2,\dots,N_{Bus}$; $t=1,2,\dots,T$; U_i^t 为节点 i 在时段 t 的电压幅值(标么值); N_{Bus} 为系统的节点总数。

1.2 约束条件

a. 潮流方程约束。

$$\begin{cases} P_{iGen}^t - P_{iESS}^t - P_{iL}^t = U_i^t \sum_{j \in i} U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \\ Q_{iGen}^t - Q_{iL}^t = U_i^t \sum_{j \in i} U_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \end{cases} \quad (4)$$

其中, P_{iGen}^t 和 Q_{iGen}^t 分别为节点 i 处的电源(电网或 DG)在时段 t 的注入有功和注入无功,若电源为电网,说明节点 i 是平衡节点(与电网相连),则上述功率等于微电网的购电功率,若电源为 DG,则上述功率等于 DG 的发电功率,若节点 i 既不与电网相连,也未安装 DG,则上述功率等于 0; P_{iESS}^t 为节点 i 处的 ESS 在时段 t 的充电功率,假定充电为正、放电为负,可将 ESS 当作负荷处理,若节点 i 处安装有 ESS,则 P_{iESS}^t 等于优化值,否则 P_{iESS}^t 等于 0; P_{iL}^t 和 Q_{iL}^t 分别为节点 i 处的负荷在时段 t 消耗的有功功率和无功功率; $j \in i$ 表示所有与节点 i 直接相连的节点,包括 $j=i$; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中相应元素的实部和虚部; θ_{ij}^t 为节点 i 和节点 j 在时段 t 的电压相角差。

b. DG 发电功率约束。

$$\begin{cases} P_{DG_i}^{\min} \leq P_{DG_i}^t \leq P_{DG_i}^{\max} \\ Q_{DG_i}^{\min} \leq Q_{DG_i}^t \leq Q_{DG_i}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $i=1,2,\dots,N_{DG}$; $P_{DG_i}^t$ 和 $Q_{DG_i}^t$ 分别为第 i 个 DG 在时段 t 的有功出力和无功出力; $P_{DG_i}^{\max}$ 和 $P_{DG_i}^{\min}$ 分别为第 i 个 DG 有功出力的上限和下限; $Q_{DG_i}^{\max}$ 和 $Q_{DG_i}^{\min}$ 分别为第 i 个 DG 无功出力的上限和下限。

c. ESS 运行约束。

$$P_{ESS_i}^{\min} \leq P_{ESS_i}^t \leq P_{ESS_i}^{\max} \quad (6)$$

$$E_{ESS_i}^{\min} \leq E_{ESS_i}^t \leq E_{ESS_i}^{\max} \quad (7)$$

$$E_{ESS_i}^t = E_{ESS_i}^0 + \sum_{j=1}^t P_{ESS_i}^j \Delta t \quad (8)$$

其中, $i=1,2,\dots,N_{ESS}$; N_{ESS} 为系统中 ESS 的个数; $P_{ESS_i}^t$ 为第 i 个 ESS 在时段 t 的充电功率; $P_{ESS_i}^{\max}$ 和 $P_{ESS_i}^{\min}$ 分别为第 i 个 ESS 充电功率的上限和下限; $E_{ESS_i}^0$ 和 $E_{ESS_i}^t$ 分别为第 i 个 ESS 的初始储能量和在时段 t 的储能量; $E_{ESS_i}^{\max}$ 和 $E_{ESS_i}^{\min}$ 分别为第 i 个 ESS 储能量的上限和下限。

d. 节点电压约束。

$$U_i^{\min} \leq U_i^t \leq U_i^{\max} \quad i=1,2,\dots,N_{Bus} \quad (9)$$

其中, $U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 分别为节点 i 电压幅值上限和下限。

e. 支路功率约束。

$$P_l^{\min} \leq P_l^t \leq P_l^{\max} \quad l=1,2,\dots,N_{Bran} \quad (10)$$

其中, P_l^t 为支路 l 在时段 t 传输的有功功率; $P_l^{\max}$ 和 $P_l^{\min}$ 分别为支路 l 有功传输功率的上限和下限; N_{Bran} 为系统支路数。当支路为微电网与电网间的联络线时,式(10)为交换功率约束。

1.3 约束条件处理

模型中,控制变量约束可以通过设定控制变量的搜索边界自动满足,状态变量约束采用罚函数法处理。罚函数法是将越界的部分以惩罚项的形式加到原有目标函数上,从而构成新的目标函数。应用罚函数思想,优化模型中的目标函数可转化为:

$$f_m^{\text{new}} = f_m + \lambda_{vm} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{Bus}} \Delta U_i^t + \lambda_{pm} \sum_{l=1}^T \sum_{l=1}^{N_{Bran}} \Delta P_l^t \quad (11)$$

$$\Delta U_i^t = \begin{cases} \min(|U_i^t - U_i^{\min}|, |U_i^t - U_i^{\max}|) & U_i^t < U_i^{\min}, U_i^t > U_i^{\max} \\ 0 & U_i^{\min} \leq U_i^t \leq U_i^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta P_l^t = \begin{cases} |P_l^t| - P_l^{\max} & |P_l^t| > P_l^{\max} \\ 0 & |P_l^t| \leq P_l^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

其中, m 为目标函数的编号; λ_{vm} 和 λ_{pm} 分别为第 m 个目标函数的电压越限项罚系数和支路功率越限项罚系数。

2 微电网运行优化模型求解

2.1 CSA

CSA 是近年来新兴进化算法之一,已经在工程领域取得较好的效果^[15-16]。本文采用基于 Pareto 准则

的多目标 CSA,主要过程如图 1 所示。

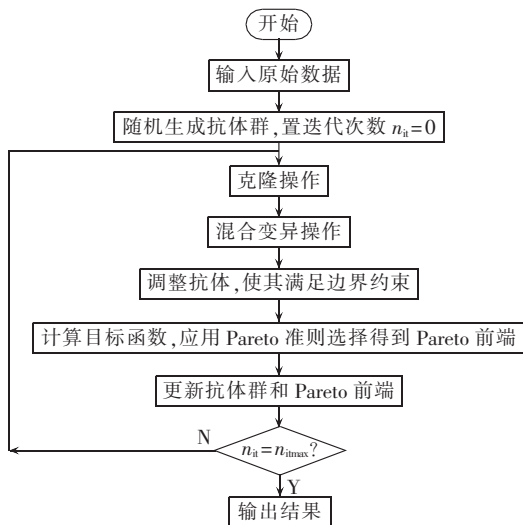


图 1 CSA 求解微电网运行优化模型流程

Fig.1 Flowchart of CSA for microgrid operation optimization model

具体说明如下。

a. 输入计算所需的原始数据,包括电网参数、负荷参数、DG 运行参数、电网电价等。

b. 随机生成初始抗体群,种群规模为 N_{pop} 。采用实数矩阵编码,如式(14)所示,每个抗体维数为 $N \times 24$ 。

$$A_k = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,t} & \cdots & a_{1,24} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,t} & \cdots & a_{2,24} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i,1} & a_{i,2} & \cdots & a_{i,t} & \cdots & a_{i,24} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{N,1} & a_{N,2} & \cdots & a_{N,t} & \cdots & a_{N,24} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, N 为控制变量个数; k 为抗体编号; $a_{i,t}$ 为第 i 个控制变量在时段 t 的取值。

c. 对抗体实施克隆操作,克隆数为 N_{clone} 。该变量取值需通过多次试验,综合考虑程序运行时间和优化效果确定。当每个抗体进行前 ρN_{clone} 次克隆操作时(ρ 为按固定步长变异的抗体比例系数),抗体中的元素按固定步长变异,如式(15)所示;当该抗体进行剩余次数的克隆操作时,抗体中元素按变步长变异,如式(16)所示。

$$a_{i,t}^{new} = a_{i,t} + (-1)^x s_{fix} \left(1 - \frac{n_{it}}{n_{imax}}\right)^2 D \quad (15)$$

$$a_{i,t}^{new} = a_{i,t} + (-1)^x (1 - s_{rand}) D \quad (16)$$

$$D = \begin{cases} a_i^{max} - a_{i,t} & x \% 2 = 0 \\ a_{i,t} - a_i^{min} & x \% 2 = 1 \end{cases} \quad (17)$$

其中, x 为随机整数; s_{fix} 为固定步长; s_{rand} 为 $[0,1]$ 之间的随机数; n_{it} 和 n_{imax} 分别为当前和最大迭代次数; a_i^{max} 和 a_i^{min} 分别为第 i 个控制变量的上限和下限; $\%$ 为求余运算符。

抗体变异率和变异规模分别为:

$$\gamma_{mut} = \gamma_{mut}^{max} - \frac{n_{it}}{n_{imax}} (\gamma_{mut}^{max} - \gamma_{mut}^{min}) \quad (18)$$

$$N_{mut} = \text{round}[\gamma_{mut} N_{dim}] \quad (19)$$

其中, γ_{mut} 、 γ_{mut}^{max} 、 γ_{mut}^{min} 分别为抗体当前、最大和最小变异率; $\text{round}[\cdot]$ 为取整运算符; N_{dim} 为抗体维数; N_{mut} 为抗体中变异元素的个数。

d. 调整变异后产生的新抗体,使其满足边界约束。

e. 计算目标函数,应用 Pareto 准则选择得到 Pareto 前端。

f. 更新当前 Pareto 最优解集和 Pareto 前端。

g. 验证终止条件。若满足,则输出结果,否则跳转到步骤 c。

2.2 最优解的确定

多目标优化问题没有单个最优解,而是存在一组 Pareto 最优解,如何根据预期目标从中选择一个最优解,人们提出了一些方法,主要有:线性加权法、分层序列法、评价函数法等。本文采用基于模糊隶属度函数的方法。由于各个子目标的量纲不同,不能直接加权,在此引用隶属度函数将多个优化子目标归一化。

对每个目标函数建立如下隶属度函数:

$$\mu_{f_m}(A_k) = \begin{cases} 1 & f_m(A_k) \leq f_m^{min} \\ \frac{f_m^{max} - f_m(A_k)}{f_m^{max} - f_m^{min}} & f_m^{min} < f_m(A_k) < f_m^{max} \\ 0 & f_m(A_k) \geq f_m^{max} \end{cases} \quad (20)$$

其中, A_k 为 Pareto 最优解集中的第 k 个抗体; μ_{f_m} 为第 m 个目标函数归一化后的函数值。

根据式(21)计算 Pareto 前端中每个元素对应的总体满意度。

$$N_{\mu}(k) = \sum_{m=1}^3 \omega_m \mu_{f_m}(A_k) \quad (21)$$

其中, ω_m 为第 m 个目标函数的权重系数。

3 算例及结果分析

3.1 算例系统

本文采用改进的 IEEE 33 节点系统作为算例,如图 2 所示^[17]。系统线路参数保持不变,基准容量为 $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$,基准电压为 12.66 kV ,峰值负荷为 3715 kW 和 2300 kvar 。节点 33 连接主网,潮流计算时作为平衡节点,电压经标幺化后为 $1 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$ 。节点电压的

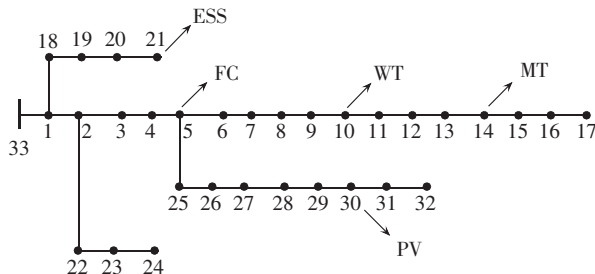


图 2 IEEE 33 节点配电系统

Fig.2 IEEE 33-bus distribution system

上、下限分别为 1.05 p.u. 和 0.95 p.u.,各条支路有功潮流上限为 3 MW。

表 1 为系统中 DG 参数及安装节点位置。表 2 为 DG 及电网 CO₂ 排放系数^[14]。算例中 PV 和 WT 的功率因数分别为 0.95 和 0.9,它们以最大功率点跟踪模式运行,其出力不是优化算法的控制对象。ESS 的最大储能量为 1000 kW·h,最小储能量为 250 kW·h,初始储能量为 500 kW·h。CSA 的初始种群规模为 200,克隆数为 20,最大迭代次数为 50,最大和最小变异率分别为 0.8 和 0.2。式(11)中的罚系数 λ_{v1} 、 λ_{p1} 、 λ_{v2} 、 λ_{p2} 、 λ_{v3} 、 λ_{p4} 分别为 10^6 、 10^6 、 10^7 、 10^7 、 10^2 、 10^2 。

表 1 分布式电源参数
Tab.1 Parameters of DGs

DG 类型	最小有功 / kW	最大有功 / kW	最小无功 / kvar	最大无功 / kvar	安装节点
PV	0	580	0	191	30
WT	0	500	0	242	10
FC	60	600	0	600	5
MT	120	600	0	600	14
ESS	-500	500	0	0	21

表 2 CO₂ 排放系数
Tab.2 CO₂ emission coefficients

对象	排放系数/[kg·(MW·h) ⁻¹]	对象	排放系数/[kg·(MW·h) ⁻¹]
PV	0	MT	723.933
WT	0	电网	921.245
FC	502.580		

图 3 为可控 DG 及电网的报价^[8],图中 t 表示时段, $t=6$ 表示 05:00—06:00,其他依此类推。图 4 为 PV、WT 的发电预测功率(有功)。图 5 为负荷需求曲线。

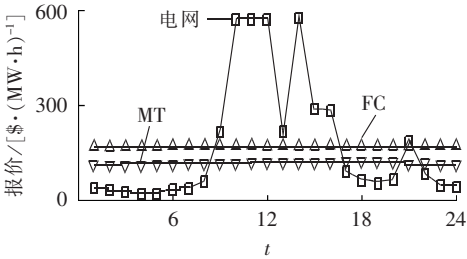


图 3 可控 DG 及电网报价

Fig.3 Quoted prices of controllable DGs and grid

3.2 结果分析

为验证模型的正确性和算法的有效性,本文计

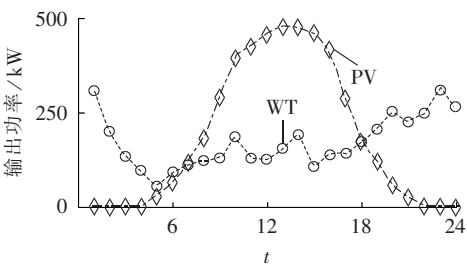


图 4 可再生能源发电预测

Fig.4 Power generation forecast of renewable energies

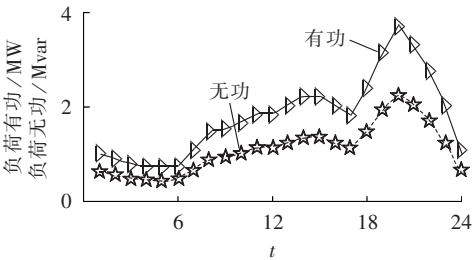


图 5 负荷需求

Fig.5 Load demands

算得到微电网在 4 种工况下的运行结果,如表 3 所示,表中电压偏差与惩罚项为标么值。其中,工况 1 是系统没有接入 DG;工况 2 是系统仅接入 PV 和 WT;工况 3 是系统同时接入 PV、WT、FC、MT 和 ESS,但只优化 FC、MT 和 ESS 的有功出力,此时 FC 和 MT 的无功出力为 0;工况 4 是在工况 3 的基础上,进一步优化 FC、MT 的无功出力。

从表 3 可以看出,在 4 种工况中,工况 1 的各项指标都是最差的;在系统接入 PV、WT 后,微电网的环保和技术指标得到改善,因为忽略了 PV、WT 的发电成本,所以工况 2 的电量成本较工况 1 也有所下降;工况 3 通过优化可控 DG 和 ESS 的有功出力,微电网的各项指标进一步得到改善,但仍会出现节点电压越限的情况;工况 4 采用有功-无功综合优化,系统各节点电压、各支路传输功率均在安全范围内,系统的线损电度数、技术和环保指标也是所有工况中最好的,表明采用有功-无功综合优化实现了微电网安全、优质运行。

采用 CSA 求解微电网优化模型,得到工况 4 的 Pareto 前端,如图 6 所示,图中电压偏差为标么值。Pareto 最优解集中有 83 个非劣解,运行人员根据不同目标的重视程度灵活调整权重系数,然后利用式(20)、(21)计算 Pareto 前端中各元素的总体满意

表 3 不同工况的输出结果
Tab.3 Outputs of different operating cases

工况	日电量成本/\$	日 CO ₂ 排放量/kg	全天中最大节点电压偏差	全天线损电度数/(kW·h)	电压越限惩罚项	功率越限惩罚项
1	8457	41379	0.0869	1340	1.1812	0.2248
2	6206	33043	0.0750	852	0.5403	0.0883
3	4638~5759	26720~27900	0.0528~0.0612	579~610	0.0221	0
4	4087~5763	24945~27232	0.0457~0.0494	465~559	0	0

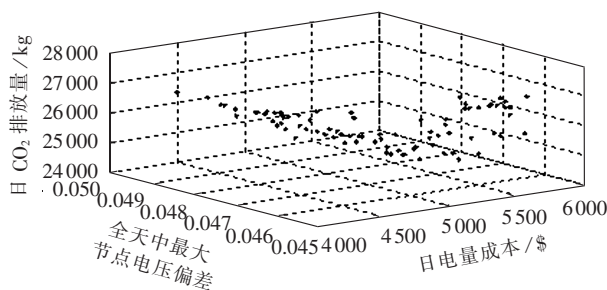


图 6 工况 4 的 Pareto 前端

Fig.6 Pareto front of case 4

度,选择最大满意度对应的最优解作为微电网当前的最佳运行方式。

表 4 为不同权重系数下的决策结果,表中 f_3 为标幺值。从中可以看出,运行人员对某个目标越重视,则该目标函数的权重就越大,其数值也就越小。由表 4 还可以看出,运行方式 4 和 5 的权重系数不同,然而它们对应的目标函数值却相同,这说明权重系数未能精确地反映运行人员的偏好。此外,线性加权法还存在权重系数难以确定、不同目标函数之间的关系无法考虑等方面的问题,因此如何有效地进行多目标决策是今后需要深入研究的内容。

表 4 不同权重系数下的决策结果

Tab.4 Decision-making results for different weights

运行方式	ω_1	ω_2	ω_3	$f_1/\$$	f_2/kg	f_3
1	1	0	0	4087	27093	0.0476
2	0	1	0	5514	24945	0.0480
3	0	0	1	5763	26897	0.0457
4	0.33	0.33	0.33	5010	25289	0.0458
5	0.25	0.25	0.50	5010	25289	0.0458
6	0.25	0.50	0.25	5327	25015	0.0459
7	0.50	0.25	0.25	4550	26031	0.0461

表 5 为运行方式 1 对应的各控制变量在不同时段的取值,从中可以得出以下结论。

a. 系统在各个时刻均保持功率平衡,不同的优化变量、微电网与电网之间的交换功率均在额定范围之内。

b. 在电网电价低于可控 DG 报价的时段,FC 和 MT 仍然向外输出功率,这样虽然会增加系统的电量成本,但有助于减少系统的碳排放量,并改善系统的电压质量,使微电网的综合效益最大。

c. $t=10$ 时,微电网向电网售电。原因在于,此时电网电价处于全天最高水平,微电网向电网售电有助于降低系统电量成本。

d. t 为 10、11、12 时,电网电价在全天中最高,ESS 处于放电状态; $t=13$ 时,电网电价与之前的 3 个时段相比有所下降,ESS 处于充电状态; $t=14$ 时,电网电价又恢复到全天最高水平,ESS 处于放电状态。由此可知,ESS 能够实现负荷转移,减少微电网在电价高峰时段的购电量,进而降低系统的日电量成本。

表 5 运行方式 1 对应的控制变量数值

Tab.5 Value of control variables in operating mode 1

t	FC 出力/ (kV·A)	MT 出力/ (kV·A)	ESS 负荷/ kW	交换功率/ kW
1	244+j158	146+j113	-127	218
2	543+j344	120+j495	-40	42
3	232+j96	209+j385	71	322
4	84+j72	229+j476	-32	312
5	257+j332	303+j308	279	392
6	74+j231	267+j137	196	487
7	123+j13	507+j179	151	420
8	135+j257	531+j122	-4.8	521
9	552+j328	574+j205	-5	26
10	599+j225	595+j186	-475	-555
11	407+j33	598+j343	-168	147
12	590+j281	588+j220	-95	18
13	567+j126	267+j191	413	1000
14	572+j544	587+j28	-302	119
15	581+j37	209+j338	-109	772
16	475+j402	397+j404	0.8	628
17	222+j198	323+j139	16	906
18	430+j372	406+j174	147	1398
19	358+j296	213+j67	40	2361
20	543+j598	597+j595	75	2408
21	586+j236	576+j434	-245	1741
22	431+j539	251+j412	86	1984
23	321+j205	228+j331	86	1292
24	166+j191	446+j236	39	288

4 结论

本文从经济、环保、技术三方面考虑,提出了以系统日电量成本最小、日 CO_2 排放量最少和全天中最大节点电压偏差最小为目标的微电网短时运行优化模型,并应用基于 Pareto 准则的 CSA 进行求解。建立模糊隶属度函数解决最优解的选择问题,运行人员根据对优化目标的重视程度,从 Pareto 最优解集中挑选出满足当前运行要求的可控 DG 最佳发电计划。算例结果分析表明:微电网中的 ESS 通过负荷转移有效降低了系统的电量成本;采用有功-无功综合优化,不仅能够满足负荷电压质量要求,而且还能够实现微电网经济和环境效益的最大化。

参考文献:

- [1] 曹一家,苗铁群,江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):1-6.
CAO Yijia, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 1-6.
- [2] 罗运虎,王冰洁,梁昕,等. 电力市场环境下载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.
- [3] 洪博文,郭力,王成山,等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):100-107.

- HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 100-107.
- [4] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.
- WANG Xingang, AI Qian, XU Weihua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.
- [5] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [6] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 78-82.
- DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Steady model and operation optimization for microgrids under centralized control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 78-82.
- [7] 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.
- [8] CHEN C, DUAN S, CAI T, et al. Smart energy management system for optimal microgrid economic operation[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(3): 258-267.
- [9] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84.
- LIU Xiaoping, DING Ming, ZHANG Yingyuan, et al. Dynamic economic dispatch for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77-84.
- [10] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27.
- WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.
- [11] 顾伟, 吴志, 王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 177-185.
- GU Wei, WU Zhi, WANG Rui. Multi-objective optimization of combined heat and power microgrid considering pollutant emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 177-185.
- [12] SCHWAEGERL C, TAO L A, MANCARELLA P, et al. A multi-objective optimization approach for assessment of technical, commercial and environmental performance of microgrids[J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21(2): 1271-1290.
- [13] SANSEVERINO E R, di SILVESTRE M L, IPPOLITO M G, et al. An execution, monitoring and replanning approach for optimal energy management in microgrids[J]. Energy, 2011, 36(5): 3429-3436.
- [14] NIKNAM T, KAVOUSIFARD A, TABATABAEI S, et al. Optimal operation management of fuel cell /wind /photovoltaic power sources connected to distribution networks[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(20): 8881-8896.
- [15] 焦李成, 尚荣华, 马文萍, 等. 多目标优化免疫算法、理论和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] 王敏, 刘维亭. 免疫克隆选择算法在船舶电力系统故障恢复中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 19-23, 60.
- WANG Min, LIU Weiting. Immune clone selection algorithm for shipboard power system service restoration[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 19-23, 60.
- [17] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

作者简介:



薛贵挺

薛贵挺(1982-),男,湖北襄阳人,博士研究生,主要研究方向为分布式电源并网控制技术、微电网控制技术(E-mail: xueguiting@163.com);

张焰(1958-),女,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统规划、电力系统可靠性、电力系统安全性;

刘玉娇(1985-),男,山东枣庄人,博士研究生,主要研究方向为智能电网环境下的电力系统能量和风险管理;

祝达康(1973-),男,浙江诸暨人,硕士,主要研究方向为电力系统电压稳定、规划、谐波分析。

Multi-objective operation optimization based on clone selection algorithm for microgrid

XUE Guiting¹, ZHANG Yan¹, LIU Yujiao¹, ZHU Dakang²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: In order to rationally arrange the outputs of distributed energy sources in microgrid, a multi-objective operation optimization model is built, which takes the minimum daily power generation cost, minimum daily emission and minimum daily maximum-node-voltage deviation as its objectives, and is solved with the CSA (Clone Selection Algorithm). Both fixed and variable step space searching methods are adopted to improve the solution accuracy and the repeated operations of cloning, mutation and selection are applied to obtain the optimal Pareto solution set satisfying the constraint conditions. The fuzzy membership is used to calculate the overall satisfaction degree for determining the optimal solution. The case study for IEEE 33-bus system verifies the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Key words: microgrid; distributed power generation; optimization; clone selection algorithm; comprehensive benefit; models