

计及用户电价响应的微网和配电网联合调度运行模型

张涛¹, 章佳莹¹, 王凌云², 徐雪琴³

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

摘要:针对现阶段微网清洁能源接入率低、供能经济性差等问题,在考虑配电网高环境处理费用的前提下,构建计及用户主动电价响应,以用户综合购电成本和环境处理费用最低为优化目标的微网和配电网联合调度模型。利用基于信息熵理论建立的多目标评价体系对由非支配排序遗传算法(NSGA-II)求得的非劣解进行综合评价,以获得最佳的运行方案。算例以南方沿海某智能小区电网为参考系统,设置了3种场景分析蓄电池、配电网接入对优化目标的影响,并将仿真结果与专家评价模式下的优化方案进行对比,结果验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词:微网;配电网;主动电价响应;联合调度模型;信息熵;NSGA-II;多目标评价体系;专家评价

中图分类号:TM 734

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.026

0 引言

近年来,随着能源互联网概念的提出,以能源高效消纳为基础,实现电力、天然气等多种复杂网络多区域共享的能源“源-网-荷-储”协调调度的研究引起了国内外的广泛关注^[1]。微网作为包含多种分布式微源、储能系统、负荷的微型发配电系统,已成为清洁能源高比例接入的重要智能化平台。但现阶段我国微网中清洁能源渗透率低、微源成本高,微网的供能经济性劣于配电网。因此,有必要在微网供能中引入配电网,以提高系统供能运行的灵活性与经济性^[2]。

目前,在微网用户供能方面,国内外专家已开展大量的研究工作。文献[3-4]在传统电力系统经济调度中引入分时电价机制,考虑清洁能源出力随机性对机组优化结果的影响。文献[5]在同一微网模型中,分别按发电的成本、单元类型分类,构建了2种多目标优化模型,并利用改进粒子群优化(PSO)算法进行求解。但所得非劣解集是一组由互相矛盾的目标构成的解集合,难以确定最优解。为此,文献[6]构建含指标效用值的合成函数对方案进行评价,文献[3]则依据模糊运算法则,基于层次分析法(AHP)对非劣解集中的粒子进行定性分析,保证了决策者思维和过程的一致性。但微网中高折损成本储能电池(SB)的接入,增加了微网的综合供电成本,无法实现系统的经济、环保综合最优。因而,文献[7]基于微网“源-荷”不确定特性,构建了以发电

成本最小为目标函数的微网与配电网的互动联合调度模型。文献[8-9]基于微网与配电网的动态优化模型,将两者作为虚拟博弈的参与者,采用协同演化博弈算法、联盟博弈算法求得微网与配电网的最佳协调运行方案,解决了 Pareto 解集选择困难的问题。然而博弈论在求解复杂问题时存在一定的局限性,仅能解决含有均衡解析解的问题。

本文以南方沿海某智能小区含冷热电联供(CCHP)系统的电网为例,以小区用户综合购电成本、环境处理费用最低为优化目标,建立了用户电价响应机制下的微网与配电网的联合调度模型。为了解决多目标优化中最优解选取困难的问题,本文采用基于信息熵理论的多目标评价体系对不同场景下的粒子进行综合评价,获得最优方案,并通过算例验证了该方法的有效性和实用性。

1 CCHP 系统

基本 CCHP 系统是由微型燃气轮机、溴化锂制冷机、热交换器组成,可向用户供应电、冷/热能的联合供能系统^[10]。本文基于传统 CCHP 系统“以冷定电”约束制约微型燃气轮机灵活出力,提出采用加装压缩式制冷机解耦冷电约束方法,减少微型燃气轮机强制电能出力的含压缩式制冷机 CCHP 系统,其能量流动图如图 1 所示。

其数学表达式为:

$$\eta_{MT} = a_{MT} \left(\frac{P_{MT}}{65} \right)^3 - b_{MT} \left(\frac{P_{MT}}{65} \right)^2 + c_{MT} \frac{P_{MT}}{65} + d_{MT} \quad (1)$$

$$Q_{co/ho} = Q_{MT} \eta_{rec} \eta_{COP\ co/ho} \quad (2)$$

$$Q_{MT} = \frac{P_{MT}(1 - \eta_{MT} - \eta_1)}{\eta_{MT}} \quad (3)$$

$$\eta_{rec} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \quad (4)$$

收稿日期:2018-01-31;修回日期:2018-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407104);三峡大学学位论文培优基金项目(2018SSPY073)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407104) and Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University(2018SSPY073)

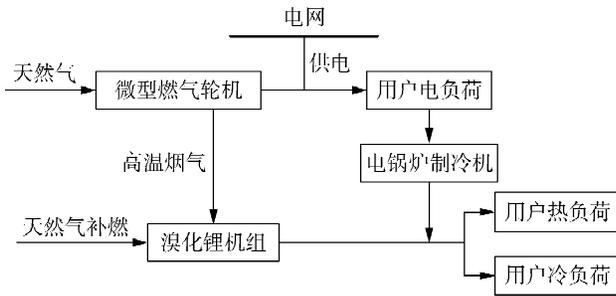


图 1 含压缩式制冷机的 CCHP 系统能量流动图

Fig.1 Energy flow diagram of CCHP system containing compression chiller

$$Q_{CH} = \eta_{CH} P_{CH} \quad (5)$$

其中, η_{MT} 为微型燃气轮机的电能转换效率; P_{MT} 为微型燃气轮机的输出功率; Q_{co} 、 Q_{ho} 分别为系统的制冷、制热量; a_{MT} 、 b_{MT} 、 c_{MT} 、 d_{MT} 为微型燃气轮机的功率系数; η_{rec} 为高温烟气的余热回收效率; $\eta_{COP_{co}}$ 、 $\eta_{COP_{ho}}$ 分别为溴化锂机组的制冷、制热系数; Q_{MT} 为微型燃气轮机的排气余热; η_1 为微型燃气轮机的散热损失系数; W_1 、 W_2 分别为高温烟气进、出溴冷机的温度; W_0 为环境温度; Q_{CH} 、 P_{CH} 、 η_{CH} 分别为压缩式制冷机的制冷量、用电量和制冷效率。

2 计及用户电价响应的微网和配电网联合调度模型

本文在传统单微网供能模式的基础上, 提出计及用户电价响应的微网和配电网联合调度模型。在此模型中, 由于微网与配电网之间可进行双向能量交互, 微网可将产生的多余电能售卖给配电网以赚取成本差价, 导致微网对用户的供电价格随其对配电网售电功率的变化而在配电网电价上下浮动, 另又考虑微网单位环境处理费用略低于配电网, 故系统须权衡用户购电成本与环境处理费用 2 个目标函数以获得最优调度方案。

图 2 为计及用户电价响应的微网和配电网联合调度模型的基本框图。首先, 用户依据实时电价调整自身的用电习惯, 改变电负荷曲线; 然后, 系统从用户购电经济性和供能环保性两方面出发优化各微源、配电网出力。其中, 用户冷能仅由 CCHP 系统供应, 而电负荷则由微网与配电网共同供应。另外, 用户与配电网之间仅进行单向电能交换, 而微网与配

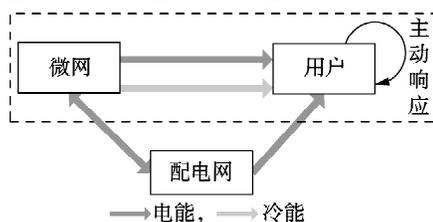


图 2 微网与配电网联合调度模型的能量流动图

Fig.2 Energy flowchart of joint dispatch model of microgrid and distribution network

电网可进行电能的双向交换。

2.1 基于电量电价弹性矩阵的负荷响应

在智能电网中, 基于分时电价的用户侧负荷响应对减小负荷峰谷差、提高系统运行稳定性有重要的意义。现阶段, 微网系统主要依据用户对多时段电价高低的响应, 利用电量电价弹性指标表征各时段电价变化率与负荷变化率的比值^[11], 其表达式为:

$$m = \frac{\Delta E}{E} \left(\frac{\Delta c_p}{c_p} \right)^{-1} \quad (6)$$

其中, m 为电量电价弹性指标; c_p 、 Δc_p 分别为峰谷电价和其与固定电价相比的差额; E 、 ΔE 分别为负荷响应前的用电量与负荷响应量。

依据分时电价与传统固定电价比值, 可以建立包含自弹性系数、互弹性系数的电量电价弹性矩阵^[12]。其中, 自弹性系数、交叉弹性系数分别如式(7)、式(8)所示。

$$M(x, x) = \frac{\Delta E_x}{E_x} \left(\frac{\Delta c_{px}}{c_{px}} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$M(x, y) = \frac{\Delta E_x}{E_x} \left(\frac{\Delta c_{py}}{c_{py}} \right)^{-1} \quad (8)$$

其中, $M(x, x)$ 为自弹性系数, 表征了 x 时段电价变化百分率与 x 时段电量变化百分率之间的比值; $M(x, y)$ 为交叉弹性系数, 表征了 y 时段电价变化百分率与 x 时段电量变化百分率之间的比值; E_x 、 ΔE_x 分别为 x 时段用户的电量及其变化量; c_{px} 、 c_{py} 和 Δc_{px} 、 Δc_{py} 分别为 x 、 y 时段的电价及其变化量。

根据前文构建的电量电价弹性矩阵 M , 可将其代入式(8), 求得基于分时电价的用户负荷响应量:

$$E_{TOU} = E_0 + \begin{bmatrix} E_{0,f} & 0 & 0 \\ 0 & E_{0,p} & 0 \\ 0 & 0 & E_{0,g} \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} \Delta c_{pf}/c_{p0,f} \\ \Delta c_{pp}/c_{p0,p} \\ \Delta c_{pg}/c_{p0,g} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $E_0 = [E_{0,f}, E_{0,p}, E_{0,g}]^T$ 和 $E_{TOU} = [E_f, E_p, E_g]^T$ 分别为实施分时电价前、后的用电量; $c_{p0,f}$ 、 $c_{p0,p}$ 、 $c_{p0,g}$ 和 Δc_{pf} 、 Δc_{pp} 、 Δc_{pg} 分别为传统固定电价及其与峰谷电价的差值; M 为电价电量弹性矩阵。

2.2 目标函数

在本文所提微网和配电网联合调度模型中, 用户、电力企业分别从用户购电成本与环境处理费用出发, 考虑微网中微源的燃料、运维成本和主微网交互效益对用户购电价格的影响, 以及配电网火电厂供能对环境污染的影响。通过权衡各时段微网、配电网的购电成本和环境处理费用, 使用户综合购电成本、环境污染处理费用达到最低, 其函数表达式为 $\min[F_1, F_2]$ 。

a. 用户综合购电成本。

用户综合购电成本包括用户直接向配电网购电

的成本和经微网综合优化的电能成本。其中,配电网直购电成本为分时电价与配电网购电量的乘积,微网购电成本为计及微网各微源的燃料、运维成本和主微网交互和制冷收益的综合购电价格与购电量的乘积。本文将用户购能分成 24 个时段分析,每一时段时长为 1 h,其目标函数为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F_1(P) = \sum_{t=1}^T (C_b^t P_C^t + C_M^t P_M^t) \\ C_M^t = C_b^t + \sum_{i=1}^N (C_G(P_i^t) + C_{OMG}(P_i^t) + C_{JH}^t - C_{sci}^t) / P_M^t \\ C_G(P_i^t) = C_{gas} \frac{1}{L_{HVgas}} \sum_{t=1}^T \frac{P_i^t}{\eta_t} \\ C_{OMG}(P_i^t) = K_{OM} \sum_{t=1}^T P_i^t \\ C_{JH}^t = C_b^t P_b^t - C_s^t P_s^t \end{array} \right. \quad (10)$$

其中, T 为周期调度时段数; N 为微网内可控机组台数; P_M^t 、 P_C^t 分别为用户在 t 时段向微网、配电网实际购买的电量; C_b^t 、 C_s^t 分别为用户向微网的购、售电价格; P_i^t 为可控机组 i 在 t 时段的输出功率; C_{sci}^t 为系统制冷收益; $C_G(P_i^t)$ 、 $C_{OMG}(P_i^t)$ 分别为第 i 个微源在 t 时段的燃料、运维成本; C_{gas} 为天然气价格,单位为元/ m^3 ; L_{HVgas} 为天然气低热值,单位为 $kW \cdot h/m^3$; η_t 为可控机组在 t 时段的发电效率; K_{OM} 为可控机组的运行维护比例参数; P_b^t 、 P_s^t 和 C_{JH}^t 分别为主微网的购、售电交互功率和综合交互效益。

b. 环境综合处理费用。

在传统电网中,燃烧化石燃料会产生大量污染气体,而微网由于清洁能源的全额接入,使环境综合处理费用较配电网有所降低。因此有必要在追求用户经济效益的同时考虑环境综合处理费用以减小企业环境处理的压力。其中,环境综合处理费用函数表达式为:

$$\min F_2(P) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^J \alpha_k \lambda_k \sum_{t=1}^T P_i^t \right) + C_w P_i^t \quad (11)$$

其中, J 为污染气体的类型数; α_k 为可控机组产生的污染气体物 k 的外部折扣费用,单位为元/kg; λ_k 为污染气体排放系数,单位为 $kg/(MW \cdot h)$; C_w 为配电网单位发电功率的污染气体处理价格。

2.3 约束条件

2.3.1 系统功率平衡约束

a. 电功率平衡约束。

$$E_{TOU}^t = \sum_{i=1}^N (P_i^t + X_i^t P_{ch}^t - Y_i^t P_{dis}^t) + P_C^t \quad (12)$$

其中, E_{TOU}^t 为在用户电价响应后 t 时段的电负荷需求; P_{ch}^t 、 P_{dis}^t 分别为储能电池在 t 时段的充、放电功

率; X_i^t 、 Y_i^t 为储能电池在 t 时段的工作状态,启用时为 1,反之为 0。

b. 冷功率平衡约束。

$$P_{co}^t = P_{MT,co}^t + \eta_{CH} P_{CH}^t \quad (13)$$

其中, P_{co}^t 为用户在 t 时段的冷能需求; $P_{MT,co}^t$ 为溴化锂机组在 t 时段提供的冷能。

2.3.2 可控机组出力上下限约束

$$P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^{\max} \quad i=1,2,\dots,N \quad (14)$$

其中, P_i^{\max} 、 P_i^{\min} 分别为可控机组 i 输出功率的上、下限。

2.3.3 储能系统约束

a. 运行状态约束。

$$0 \leq X_i^t + Y_i^t \leq 1 \quad (15)$$

b. 脉冲因数约束。

$$0.8 \leq N_{pulse}^t \leq 1 \quad (16)$$

c. 充/放电功率约束。

$$0 \leq P_{dis}^t \leq N_{pulse}^t P_{rate} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{ch}^t \leq 1.2 P_{rate} \quad (18)$$

d. 储能容量约束。

$$E_{bat}^{\min} \leq E_{bat}^t \leq E_{bat}^{\max} \quad (19)$$

e. 始末能量平衡约束。

$$E_{bat}^0 = E_{bat}^T \quad (20)$$

其中, N_{pulse}^t 为储能电池在 t 时段的脉冲因数; P_{rate} 为储能电池的额定功率; E_{bat}^t 为储能电池在 t 时段的储能容量; E_{bat}^{\max} 、 E_{bat}^{\min} 分别为储能电池的最大、最小储能容量; E_{bat}^0 、 E_{bat}^T 分别为调度周期始、末储能电池的储能能量。

3 模型的求解

非支配排序遗传算法(NSGA-II)是一种适用于求解复杂多目标优化问题、有较强搜索性能的非支配快速排序算法。在本文计及用户电价响应的微网与配电网联合调度模型中,采用 NSGA-II 对微源、配电网出力进行多次优化迭代,可获得模型的 Pareto 最优解集。但在实际应用中,由于解集内各粒子相互矛盾,较难公正地选择一个解作为最优实施方案。现有文献常以正态分布和降半 Γ 形分布为效益函数的隶属度函数对模糊化后的数据求和平均以获得综合评价值^[13-14]。这种将模糊化后数值仅求和平均得到综合评价值判断的方法太过于主观,无法准确体现各目标值在最优解综合评价中的重要性。为此,本文在 NSGA-II 的计算过程中引入多目标评价矩阵,以获得最具代表性的最优解方案。

信息熵是一种来源于热力学,表征信息在时空分布上不确定性程度的指标。一般认为变量的不确

定度越大,所需的信息量也越多,则信息的熵值也就越大。而在多目标问题的最优解求解过程中,可基于粒子在二维平面上的空间分布得到各目标函数信息量的熵值,确定各目标值在粒子评价中的权重。在本文提出的系统多目标综合评价体系中,先利用三角形隶属度函数对各目标函数值进行模糊归一化处理:

$$a_{ij} = \frac{\max\{x_j\} - x_{ij}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (21)$$

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^s a_{ij}} \quad (22)$$

其中, s 为参与评价的粒子个数; x_{ij} 为第 i 个粒子第 j 个目标值; a_{ij} 为第 i 个粒子第 j 个目标值标准化处理后的指标值; $\max\{x_j\}$ 、 $\min\{x_j\}$ 分别为第 j 个目标函数的最大、最小值; b_{ij} 为第 i 个粒子第 j 个目标值的占比。

然后将归一化后的指标值依据熵值理论求得其信息熵值 H_j 和熵权 w_j :

$$H_j = -K \sum_{i=1}^s b_{ij} \ln b_{ij} \quad (23)$$

$$w_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)} \quad (24)$$

其中, $K = 1/\ln s$; n 为评价指标数量。

依据综合评价函数求得 Pareto 前沿最优解:

$$\max\{v_{\text{value},i}\} = \max\left\{\sum_{j=1}^n w_j b_{ij}\right\} \quad (25)$$

4 算例仿真与分析

4.1 算例模型及参数设置

本文选取南方沿海某智能小区微网、配电网共同接入的联合调度系统为设计案例,其基本结构、微源额定功率如图 3 所示,系统中含有加装压缩式制冷机的 CCHP 系统、燃料电池(FC)、储能电池、光伏(PV)、风电(WT)等微源。由 CCHP 系统为用户供冷,其他微源则直接向用户供电,或经公共连接点(PCC)将双向交互的电能供给用户,配电网与用户仅进行单向能量交互。由于本文主要分析计及用户电价响应的微网与配电网中微源的优化出力,故假设该智能小区风、光等清洁能源以全额供电的方式接入微网,其夏季典型日风、光、负荷的预测曲线见附录中附图 1。

算例相关的微源参数数据及负荷数据见文献[15],其中,CCHP 系统中加装的压缩式制冷机的制冷效率为 0.9;蓄电池的初始容量 $E_{\text{bat}}^0 = 200 \text{ kW}\cdot\text{h}$,充放电效率为 0.95。为了使微网与配电网可在不出现

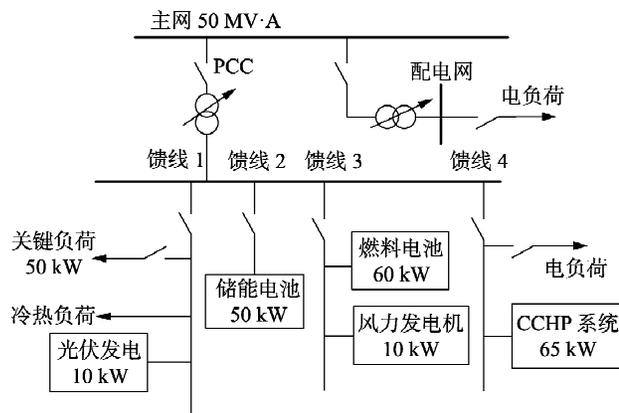


图 3 算例系统结构图

Fig.3 Structure diagram of example system

倒卖的情况下进行双向功率交互,设定微网在平、谷时段的购电价格低于峰时段的售电价格,售电价格在各时段均低于其购电价格。微网与配电网的具体购、售电时间划分及价格见附录中附表 1。NSGA-II 参数设置如下:种群规模为 50,交叉百分比为 0.7,变异百分比为 0.4,变异比例为 0.02,最大迭代次数为 1 000。

4.2 仿真分析

算例结合智能小区微网用户用电量与分时电价的线性关系,参考文献[11]所提出的需求弹性系数,依据传统模式中配电网的固定购电价格 0.5 元/(kW·h)、固定售电价格 0.39 元/(kW·h),可求得此模型中电量电价弹性矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} -0.0173 & 0.0383 & 0.0520 \\ 0.0192 & -0.0426 & 0.0577 \\ 0.0202 & 0.0448 & -0.0607 \end{bmatrix} \quad (26)$$

将 M 代入式(9),可求得各时段负荷的响应值,并由此画出需求侧响应前、后的负荷变化曲线,如图 4 所示。

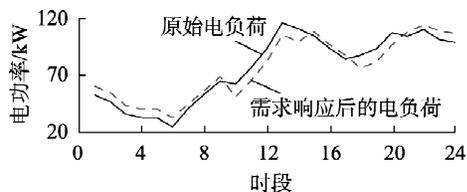


图 4 需求侧响应前、后负荷曲线

Fig.4 Load curves before and after demand-side response

由图 4 可见,计及电能价格对用户用电习惯影响的电负荷曲线在电价峰、谷时段分别向下、向上平移;而在平时段,负荷则依据峰、谷时段用户电负荷的变化情况进行调整,满足用户在单位周期内的电能需求。通过负荷响应前、后峰谷差对比可知,用户的主动电价响应使负荷曲线的峰谷差降低了 11.2%。

为了进一步研究储能系统和配电网接入微网对

用户购电成本 and 环境污染的影响,本文根据所提方法分别对含储能系统、配电网接入前/后的模型进行多时段优化,并设置了以下 3 种场景:场景 1,无储能系统,无配电网接入;场景 2,有储能系统,无配电网接入;场景 3,有储能系统,有配电网接入。

通过 NSGA-II 进行 1 000 次优化迭代,可得到微网在 3 种场景下的 Pareto 最优解集,如图 5 所示。

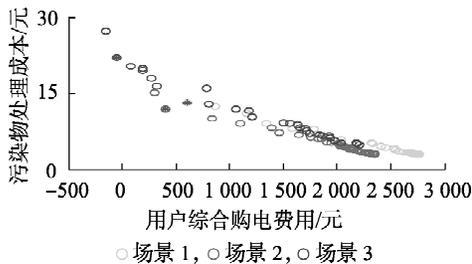


图 5 各场景的 Pareto 前沿对比

Fig.5 Comparison of Pareto frontiers among three scenes

由图 5 可见,随着用户综合购电成本的上升,环境综合处理费用逐渐降低。这是因为在微网中,配电网的低价接入虽可降低用户综合购电成本,但也会排放更多的污染气体,增加污染物处理费用,使 2 个目标相互冲突、相互博弈并呈反向发展趋势。为了研究各场景下储能系统、配电网对目标函数的影响,本文基于前文提到的多目标综合评价矩阵对 3 种场景下的 Pareto 最优解集进行综合评价分析,得到各场景的最优解如表 1 所示。

表 1 3 种场景的最优解

场景	F_1 /元	F_2 /元
1	603.42	13.10
2	407.24	11.88
3	-53.94	22.06

对比场景 1、2 的目标值可见,微网中储能系统的接入使用户综合购电成本、环境综合处理费用分别降低 32.5% 和 9.3%,场景 2 明显优于场景 1。这是因为蓄电池储存谷时段廉价电能用于弥补峰时段高价电能缺额,从而降低系统微源污染物排放和用户综合购电成本。对比场景 2、3 的目标值可见,场景 3 下用户的综合购电费用相较于场景 2 降低了 113.24%,但污染物处理费用却提高了 85.7%,2 种场景下最优解的目标值之间相互制约;而场景 3 由于配电网的接入,使用户有了新的购电渠道,由仅向微网购电转为考虑经济性交替从微网和配电网购电转换。为了更好地判断上述 3 种场景下粒子的综合效用水平,本文提出了对不同场景进行综合评价,建立了如式(27)所示的社会满意度函数。

$$F(i) = \sum_{j=1}^2 \frac{\max\{m_j\} - m_{ij}}{\max\{m_j\} - \min\{m_j\}} \quad (27)$$

其中, m_{ij} 为第 i 个场景下第 j 个目标函数的目标值; $\max\{m_j\}$ 、 $\min\{m_j\}$ 分别为第 j 个目标函数的最大、最小值。

综合表 1 中 3 种场景最优解的目标函数值分析可得,3 种场景的社会满意度值分别为 0.47、0.76 和 0.77,即场景 3 中含储能系统和配电网接入的微网具有更高的社会满意度。

4.3 专家评价权重分析

基于信息熵理论建立的多目标评价矩阵是依据 Pareto 解集中各粒子的分布而确定的权重系数矩阵,能较为准确地计算粒子在客观评价下的目标值。但在实际最优方案选取中,由于某目标相关技术的改进或革新,使原有评价体系无法准确体现模型的重点。为此,本文根据模型实际要求设定各目标的专家评价权重 p_j ,结合前文提出的熵权值 w_j 调整综合权重 q_j 来综合评价各 Pareto 前沿粒子。专家权重调整的表达式为:

$$q_j = \frac{p_j w_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (28)$$

本文结合现阶段我国能源工业发展水平较低、国家能源政策重心还处在系统经济性优化阶段的现状,在考虑随着未来微源出力效率提高、能源政策重心将由经济性转移到环保性来的发展趋势,设置了 2 种重要性专家评价权重方案 S_2 和 S_3 ,在方案 S_2 中 $w_1=0.8$ 、 $w_2=0.2$,方案 S_3 中 $w_1=0.8$ 、 $w_2=0.2$,然后将其与无专家评价方案 S_1 的粒子进行对比,结果如图 6 所示。

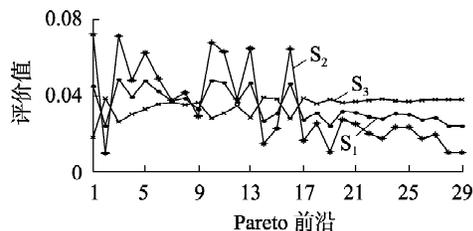


图 6 3 种权重方案的评价结果比较

Fig.6 Evaluation result comparison among three weight schemes

图 7 为场景 3 中 Pareto 最优解集在不同专家权重情况下,求得的最优解所对应方案在系统单位周期内的配电网输出功率。由图 6、7 可见,在无专家评价方案 S_1 中,第 3 个粒子的评价价值较高,此时,用户从配电网处购买的电能较多,综合购电费用较低,系统环保性也较好;而专家评价权重方案 S_2 中,第 1 个粒子的评价价值最高,由图 7 可见,该粒子在各调度时段对应的配电网输出功率明显高于第 3 个粒子,导致系统的环境处理费用上升,但用户综合购电成本明显下降;而在专家评价权重方案 S_3 中,第 14 个

粒子的评价价值最高,粒子的用户电需求转由含清洁能源接入的微网供给,环境处理费用大幅下降,但用户综合购电成本也有一定程度的提高。综上,不同的专家权重策略可使模型得到不同的优化方案,这为实际系统中不同工程需求下的经济环保优化提供了充足的技术支持。

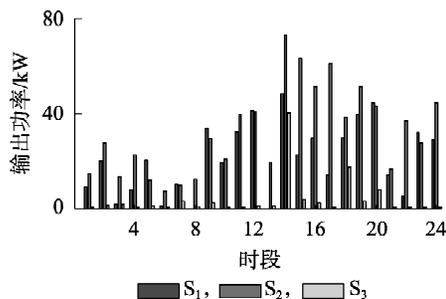


图7 3种权重方案下配电网输出功率

Fig.7 Output power of distribution network in three weight schemes

5 结论

本文基于含CCHP系统的智能小区微网,建立了含储能系统、配电网接入的微网和配电网联合调度模型,并采用基于信息熵理论的NSGA-II求解得到其在不同优化场景下的最优方案,这不仅实现了系统运行的经济性、环保性最优,还降低了传统多目标折衷解选择主观性的影响。通过将专家评价与传统信息熵权重法结合,使系统在满足工程不同优化重点的同时,可快速获得最客观的优化方案,从而提高了算法优化的灵活性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 别朝红,王旭,胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2017,37(22):6445-6462.
BIE Zhaohong, WANG Xu, HU Yuan. Review and prospect of planning of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22):6445-6462.
- [2] 张涛,史苏怡,徐雪琴. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(4):22-28.
ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4):22-28.
- [3] 盛四清,张立. 考虑风光荷预测误差的电力系统经济优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(9):80-85.
SHENG Siqing, ZHANG Li. Economic dispatch of power system considering the prediction error of wind power, solar energy and load [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(9):80-85.
- [4] 毛晓明,陈深,吴杰康,等. 分时电价机制下含蓄电池微网的优化调度[J]. 电网技术,2015,39(5):1192-1197.
MAO Xiaoming, CHEN Shen, WU Jiekang, et al. Optimal dispatching of microgrid containing battery under time-of-use price mechanism [J]. Power System Technology, 2015, 39(5):1192-1197.
- [5] 芦思为,黄彦全,张培,等. 改进粒子群算法的微网经济调度[J]. 电测与仪表,2017,54(22):23-29.
LU Siwei, HUANG Yanquan, ZHANG Pei, et al. Economic dispatch of micro-grid based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(22):23-29.
- [6] 刘峪涵,汪泓,谭阳红. 并网型微电网多目标容量优化配置及减排效益分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(9):70-75.
LIU Yuhuan, WANG Feng, TAN Yanghong. Multi-objective optimal capacity configuration and emission reduction benefit analysis of grid-connected microgrid [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(9):70-75.
- [7] 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.
- [8] 徐意婷,艾芊,胡剑生. 基于协同演化博弈算法的微网和配电网动态优化[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(18):8-16.
XU Yiting, AI Qian, HU Jiansheng. Dynamic optimization of micro-grid and distribution network based on co-evolutionary game algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18):8-16.
- [9] WALID S, ZHU H, H. VINCENT P. Coalitional game theory for cooperative micro-grid distribution networks [C] // 2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). Kyoto, Japan; IEEE, 2011:1-5.
- [10] JIANXIAO W, HAIWANG Z, QING X, et al. Optimal joint-dispatch of energy and reserve for CCHP-based microgrids [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(3):785-794.
- [11] 陈沧杨,胡博,谢开贵,等. 计入电力系统可靠性与购电风险的峰谷分时电价模型[J]. 电网技术,2014,38(8):2141-2148.
CHEN Cangyang, HU Bo, XIE Kaigui, et al. A peak-valley TOU price model considering power system reliability and power purchase risk [J]. Power System Technology, 2014, 38(8):2141-2148.
- [12] ALDAOUDEYEH A M I, KAVASSERI R G, LIMA I T. Characterization of forward electricity market price variations and price-responsive demands [C] // 2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech). Denver, United States; IEEE, 2017:211-218.
- [13] 马瑞,李文晔,李暄,等. 分布式冷热电联供系统负荷随机模糊建模[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):53-58.
MA Rui, LI Wenyue, LI Xuan, et al. Random fuzzy model for load of distributed combined cooling, heating and power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15):53-58.
- [14] 徐意婷,艾芊. 含微电网的主动配电网协调优化调度方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):18-26.
XU Yiting, AI Qian. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11):18-26.
- [15] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.
LI Le. Research on economic operation of microgrid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

作者简介:

张 涛(1981—),男,安徽阜阳人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统优化运行、高电压绝缘及测试技术、电力系统过电压与接地技术(**E-mail**:unifzhang@hotmail.com);

章佳莹(1994—),女,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方



张 涛

向为微网优化调度(**E-mail**:594134712@qq.com);

王凌云(1981—),男,湖北宜昌人,副教授,博士,主要研究方向为新能源发电运行优化与控制(**E-mail**:wly@ctgu.edu.cn)。

Joint dispatch operation model of microgrid and distribution network considering user response to electricity price

ZHANG Tao¹,ZHANG Jiaying¹,WANG Lingyun²,XU Xueqin³

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University,

Yichang 443002, China;3. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

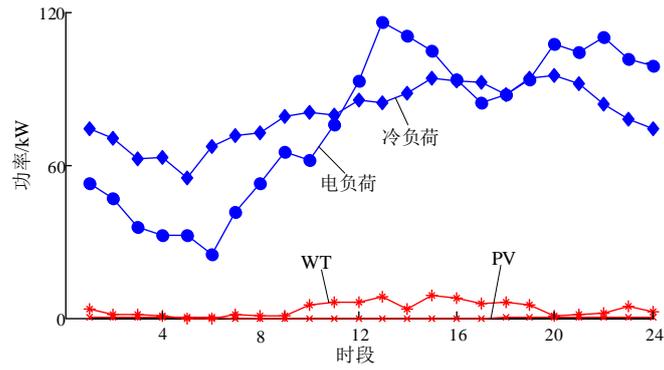
Abstract: Aiming at the problems of low access rate of clean energy and poor energy supply economy of microgrid at present, a joint dispatch model of microgrid and distribution network considering the users' active price response is established on the premise of high environmental disposal costs of the distribution network, which takes the minimum users' total electricity purchasing costs and environmental disposal costs as its optimization objective. The non-inferior solutions obtained by the NSGA- II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) are evaluated comprehensively by the multi-objective evaluation system based on the information entropy theory to obtain the best operation scheme. A smart district grid in the southern coastal area is taken as an example to analyze the influences of the connection of battery and distribution network on the optimization objective in three given scenes, and simulative results verify the validity and practicality of the proposed method, compared with the optimal schemes in the expect evaluation mode.

Key words: microgrid; distribution network; active price response; joint dispatch model; information entropy; NSGA-II; multi-objective evaluation system; expert evaluation

附录

附表 1 分时电价的划分及定价
Table 1 TOU period division and price

时段	时间范围	购电价格/ [元 (kW h) ⁻¹]	售电价格/ [元 (kW h) ⁻¹]
峰时段	10:00—14:00	0.83	0.65
平时段	06:00—10:00, 14:00 至次日 01:00	0.49	0.38
谷时段	01:00—06:00	0.17	0.13



附图 1 夏季典型日风/光/负荷预测曲线

Fig.1 Predictive curves of photovoltaic power, wind power and load in a typical summer day