

# 基于改进ECA算法的分布式微电网系统的经济优化调度研究

文/中冶赛迪电气技术有限公司 周有为 钟雨哲 余代海 童建林

考虑分布式能源输出功率的不确定性给微电网系统的经济调度造成的巨大压力，结合鲁棒优化原理将传统微网系统经济调度模型中的随机因子进行相应处理，建立了含分布式能源系统的微网经济调度的鲁棒优化调度模型。该模型能够实现微电网系统对各电源的动态优化调度，降低了微网系统安全稳定运行的经济成本。

电力电子制造技术的成熟发展，推动了可再生能源发电技术的应用革新。分布式发电技术具有能源高效利用、环境污染小、供电方式灵活以及低成本等优势，逐步成为解决能源可持续问题和环境危机的可行途径。然而，大规模分布式电源并网会给电力系统运行稳定性带来很大冲击，为了提高电力系统对分布式能源的渗透承载力，有效发挥分布式能源的优势，分布式能源的微电网系统就此得到快速发展。尤其是国家能源局在2015年9月将《配电网建设改造行动计划（2015—2020年）》规划纲要颁布后，在政策层面就已经将分布式新能源并网、微电网示范工程推入到了配电网规划中来，因此，这就使得微电网的发展前景十分明朗。但从客观上分析，分布式可再生能源无法摆脱功率的随机性、波动性等属性，使得微电网依照传统调度的模式很难全面消纳。因此，改进分布式能源接入微电网后的调度模式以及促进微电网的经济运行，已成为广大学者研究的热点。而对于不确定性问题其实已有诸多随机规划方法。丁明等提出了以概率论为基础的随机规划方法，但在实际生产中很难得到分布式能源准确的出力曲线，并且需要收集大量的样本数据对分布式能源出力进行模拟，这种方法理论上可行，但增加了实际应用的难度。孙欣等通过构造某

一模糊变量来描述分布式能源出力的不确定性，并采用模糊集合进行条件约束，以此获得用户满意度来建立隶属度优化函数。但在实际应用中，仅依靠有限的样本数据和决策者的经验感观来建立不确定性的优化函数，这样反而带有很强的主观性或者增加了误差风险。纵观以上不确定优化方法，Darya Kastsian等将鲁棒规划法作为解决随机问题的手段，利用“集合”的形式反映变量的随机性，避开了概率因素，使得约束范围内都可获得优化解析函数。因此，本文拟采用鲁棒规划理论，并基于可再生能源、储能、热电联产和热负荷等对象建立微电网，同时兼顾燃气轮机燃料和运维成本，以及微电网向大电网的购电和热电联产系统售热收益等因素，构建促进可再生能源消纳的微电网经济调度的鲁棒规划模型。

另外，鉴于微电网经济调度问题是一个多约束、非线性等问题，传统的智能算法很难完成求解过程，本文拟采用帝国竞争算法对所提的优化模型进行求解。该算法衍生于人类社会帝国间相互角逐领地的过程，相较于传统PSO、GA等优化算法，该算法在优化经济调度方面具有优势。张懿议等人的研究表明该算法要比传统智能算法具有更高收敛准确度和连续性。然而，基本帝国竞争算法依然存在

收敛速度慢、易陷入局部最优等缺陷,需进一步改进利用。

综上所述,本文利用改进帝国竞争算法对微电网经济调度的鲁棒优化模型进行求解,该算法既能兼顾个体多样性和收敛速度,又能解决传统智能算法存在的求解速度慢和陷入局部最优的缺陷。最后,算例优化结果表明所提的方法和模型能够有效地解决微电网系统经济调度的问题。

## 鲁棒优化调度模型

### 1. 微电网传统调度模型

为充分运用好微电网经济性、环保性等优势潜能,本文考虑以分布式可再生能源、储能设备和热电联产等因素建立微电网经济调度模型。其中,微电网系统所产生的综合成本包含微燃气轮机燃料费用、运维成本和设备折旧费用,微电网向大系统的购电成本和热电联产系统的售热效益,构建的优化调度模型如下

$$F_t = C_{f,t} + C_{DP,t} + C_{grid,t} - C_{sh,t} \quad (1)$$

$$C_{f,t} = \sum_{i \in n} f_i(P_{MTi,t}) \quad (2)$$

$$C_{DP,t} = \sum_{i \in n} \left[ \frac{C_{z,i}}{8760k_i} \times \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} \times P_{MTi,t} \right] \quad (3)$$

$$C_{OM,t} = \sum_{i \in n} K_{OM,i} \times P_{MTi,t} \quad (4)$$

$$C_{grid,t} = C_{pt} \times P_{grid,t} \quad (5)$$

$$C_{sh,t} = Q_{he,t} \times K_{ph} \quad (6)$$

$$f_i(P_{MTi,t}) = \frac{C_{ng}}{L} \sum_{t=1}^T [P_{MTi,t} \Delta t / \zeta_{MTi,t}] \quad (7)$$

$$Q_{he,t} = K_{he} \times \sum_{i \in n} [P_{MTi,t} (1 - \zeta_{MTi,t} - \zeta_{li}) / \zeta_{MTi,t}] \quad (8)$$

式中,  $C_{f,t}$ 、 $C_{DP,t}$ 和 $C_{OM,t}$ 表示时段 $t$ 内微燃气轮机的耗能费用、设备折旧费用和运维费用;  $C_{grid,t}$ 表示时段 $t$ 内微电网系统向大电网购电的费用;  $C_{sh,t}$ 表示时段 $t$ 内热电联产售热带来的经济效益;  $f_i$ 表示第 $i$ 个微燃气轮机的燃料成本函数;  $P_{MTi,t}$ 表示第 $i$ 个微燃气轮机在时段 $t$ 内的输出功率;  $n$ 表示机组台数;  $C_{z,i}$ 表示第 $i$ 个微燃气轮机安装费用成本;  $k_i$ 表示第 $i$ 个微燃机的容量系数;  $r$ 表示年利率;  $n_i$ 表示第 $i$ 个微燃气轮机的投资回收期;  $K_{OM,i}$ 表示第 $i$ 个微燃气轮机的单位运维系数费用;  $C_{pt}$ 表示时段 $t$ 内微电网向大系统的单位购电成本;  $P_{grid,t}$ 表示时段 $t$ 内微电网系统向大电网

系统购买的电量;  $Q_{he,t}$ 表示时段 $t$ 内热电联产系统的供应热量;  $K_{ph}$ 表示单位售热价格;  $C_{ng}$ 表示微燃气轮机购买天然气的单位成本;  $\zeta_{MTi,t}$ 表示第 $i$ 台微燃气轮机在时段 $t$ 内的发电效率;  $L$ 表示微燃气轮机的供热低值;  $K_{he}$ 表示溴冷机制热的单位成本系数;  $\zeta_{li}$ 表示第 $i$ 台燃气机的散热指标系数。

### 2. 目标模型的约束条件

#### 1) 功率平衡的限定条件

$$P_{out,t} + P_{MT,t} + P_{sb,t} + P_{grid,t} = P_{load,t} \quad (9)$$

式中,  $P_{out,t}$ 表示分布式能源在时段 $t$ 内的输出有功;  $P_{MT,t}$ 表示全部微燃气轮机在时段 $t$ 内的输出有功;  $P_{sb,t}$ 表示储能设备在时段 $t$ 内的输出能量;  $P_{load,t}$ 表示在时段 $t$ 内的微电网系统的供电负荷。

#### 2) 有功输出约束条件

$$P_{MTi,min} \leq P_{MTi,t} \leq P_{MTi,max} \quad (10)$$

式中,  $P_{MTi,min}$ 、 $P_{MTi,max}$ 分别表示第 $i$ 台微燃气轮机输出功率的最小值和最大值。

#### 3) 微燃气轮机的功率爬坡约束

$$|P_{MTi,t} - P_{MTi,t-1}| \leq \mu \quad (11)$$

#### 4) 线路功率约束

$$0 \leq P_{grid,t} \leq P_{grid,max} \quad (12)$$

式中,  $P_{grid,max}$ 为微电网和大电网系统之间的联络线最大允许传输功率。

#### 5) 储能装置状态约束

为了简化模型,本文只考虑在微燃气轮机和分布式能源发电的功率高于微电网用电负荷时,才向储能装置充电。

$$\begin{cases} P_{sb,t,chr,max} \leq P_{sb,t} \leq P_{sb,t,dis,max} \\ C_{SOC,min} \leq C_{SOC,t} \leq C_{SOC,max} \\ C_{SOC,t} = C_{SOC,0} + \frac{1}{C_{sb}} \int_{t_0}^t (I_{sb} - I_{loss}) d\tau \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $P_{sb,t,chr,max}$ 、 $P_{sb,t,dis,max}$ 分别表示时段 $t$ 内储能装置充、放电的最大功率;  $C_{SOC,t}$ 表示储能装置在时段 $t$ 内的剩余容量,  $C_{SOC,min}$ 、 $C_{SOC,max}$ 分别表示最小值和最大值,本文分别设定其对应值为40%、100%储能装置的额定容量;  $C_{SOC,0}$ 表示初始储能状态,设额定容量的50%数值;  $I_{sb}$ 表示储能装置的充放电工作电流,其中高于0时为放电状态,低于0时为充电状态;  $I_{loss}$ 表示电流发热损耗。

当储能装置工作于放电状态时,  $P_{sb,t,dis,max}$ 对应值为

$$P_{sb,t,dis,max} = \min[(C_{SOC,t} - C_{SOC,min})C_{sb} / \Delta t, I_{sb,max}] \quad (14)$$

式中,  $C_{sb}$  表示储能装置的额定容量;  $I_{sb, \max}$  表示储能装置最大允许放电电流。当其处于充电状态时,

$P_{sb, t, chr \max}$  对应值为

$$P_{sb, t, chr \max} = \min[(C_{SOC, \max} - C_{SOC, t})C_{sb} / \Delta t, 0.2C_{sb} / \Delta t] \quad (15)$$

6) 热电联产系统售热条件约束为

$$Q_{he, t} \geq Q_{demand, t} \quad (16)$$

式中,  $Q_{demand, t}$  表示在时段  $t$  内的热电联产系统的所需热量。

7) 旋转备用条件约束为

$$\begin{aligned} & P_{out, t} + P_{MT, t} + P_{grid, \max} + \\ & \min[P_{sb, dis \max}, (C_{SOC, (t-1)} - C_{SOC, \min} - D_{sb}Q_{sb})\eta_D] \\ & \geq P_{D, t}(1+l\%) \end{aligned} \quad (17)$$

式中,  $D_{sb}$ 、 $Q_{sb}$  和  $\eta_D$  分别表示储能装置在时段  $t$  内的放电系数、总容量和放电效率;  $l\%$  为应付用电负荷波动时微电网系统可提供的旋转备用率, 本文取 10%。

## 3. 分布式可再生能源的出力模型

本文利用式 (18) 来描述分布式可再生能源的输出功率, 且能很好地体现分布式能源的间歇性、随机性特点, 即

$$\begin{cases} P_{out, t} = \bar{P}_{out, t} + P_{out, t}^{er} \\ \text{s.t. } |P_{out, t}^{er}| \leq \bar{P}_{out, t} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $P_{out, t}$  表示分布式可再生能源在时段  $t$  内的实际输出功率;  $\bar{P}_{out, t}$ 、 $P_{out, t}^{er}$  分别表示分布式能源的预测功率和输出功率偏差;  $\bar{P}_{out, t}$  为输出功率的最大偏差值。

采用式 (18) 表示分布式能源的输出功率后, 式 (9) 和式 (17) 中  $P_{out, t}$  转化为随机变量。因此, 单以传统的确定性调度模型很难对其进行合理优化, 应转变调度方法。

## 鲁棒随机规划方法下的微电网调度模型

### 1. 鲁棒规划方法简介

结合鲁棒规划方法优化不确定问题得到了广泛应用, 该方法主要是利用集合来描述问题的不确定性因子, 运用鲁棒规划方法整合出等式模型, 可保证在不确定集合内的任意元素均能找到可行解。本文所讨论的含分布式可再生能源的微电网经济调度模型原本就属于鲁棒规划问题。对决策方来说, 着重考虑的是制定的调度模型在满足相应约束范围的基础上, 尽量避免因消纳可再生能源后对微电网系

统的运行稳定性所带来的不良影响。

### 2. 不确定等式的转化

为了将含分布式可再生能源的调度模型转换为传统调度模型, 采用鲁棒优化方法对式 (9)、式 (17) 中的不确定因子进行变换, 从而得到

$$\begin{aligned} \max P_{out, t} & \leq \frac{\min[P_{sb, \max}, (C_{SOC, (t-1)} - C_{SOC, \min} - D_{sb}Q_{sb})\eta_D]}{l\%} + \\ & \frac{P_{grid, \max} - P_{MT, t}l\% - (P_{sb, t} + P_{grid, t})(1+l\%) - \bar{P}_{out, t}}{l\%} \end{aligned} \quad (19)$$

结合对偶理论可对  $\min(-P_{out, t})$  构造相应的拉格朗日函数

$$\begin{aligned} L(P_{out, t}, z_t, \delta_t, \gamma_t) & = -P_{out, t} + z_t P_{out, t} + \\ & \delta_t (P_{out, t} - \bar{P}_{out, t}) + \gamma_t (P_{out, t} - P_{out, t}) \end{aligned} \quad (20)$$

式中,  $z_t$ 、 $\delta_t$  和  $\gamma_t$  均表示拉格朗日系数。

对式 (21) 中的不确定量  $\bar{P}_{out, t}$  利用对偶原理处理后, 可将式 (9) 和式 (17) 中的不确定量  $P_{out, t}$  进行转化, 并以此得到鲁棒优化方法下的调度模型

$$\begin{aligned} [P_{out, t} + (\delta_t - \gamma_t)\bar{P}_{out, t} - (\delta_t + \gamma_t)P_{out, t}^{er}]l\% & \leq \\ \min[P_{sb, \max}, (C_{SOC, (t-1)} - C_{SOC, \min} - D_{sb}Q_{sb})\eta_D] + & (21) \\ P_{grid, \max} - P_{MT, t}l\% - (P_{sb, t} + P_{grid, t})(1+l\%) & \end{aligned}$$

式中,  $z_t$ 、 $\delta_t$  和  $\gamma_t$  算子的关系可由式 (20) 进行拉格朗日偏微分求解得出, 具体过程略。通过以上转化, 可将分布式随机功率场景转化为传统的调度模型进行优化。

## 改进帝国竞争算法

### 1. 随机模拟

随机模拟方法通常应用于随机抽样测试系统, 是以给定的概率来抽取随机变量, 因此, 该方法随机的结果是一个统计结果, 但适用于随机规划模型, 且行之有效。

对于随机约束

$$P\{g_i(x, \xi) \leq 0, i=1, 2, \dots, n\} \geq \beta \quad (22)$$

式中,  $\xi$  为一个已知概率密度函数为  $\varphi(\xi)$  的随机向量;  $x$  为决策变量。

校核随机抽样粒子的收敛条件如图 1 所示。

### 2. 帝国竞争原始算法

帝国竞争算法 (ECA) 作为一种新型智能算法, 是基于国家之间互相掠夺领地的现象发展而来的。该算法设定  $N$  个初始参与国, 其中有  $N_{imp}$  相对强

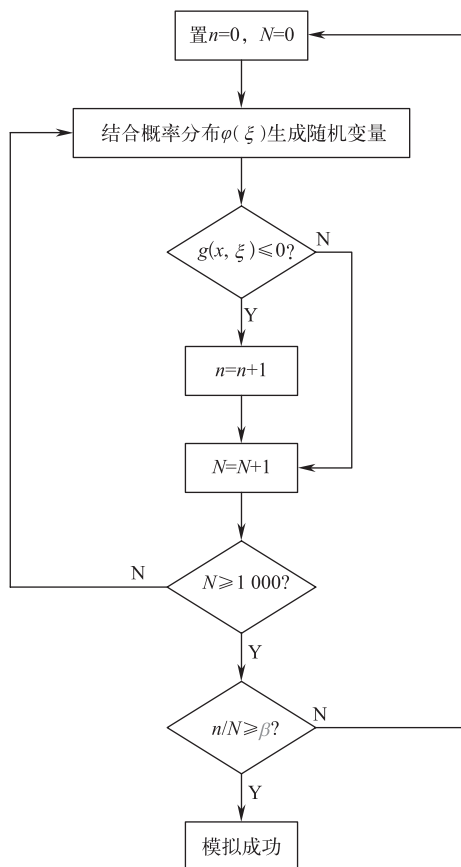


图1 随机模拟技术检验约束条件过程

大的国家被选为帝国，余下 $N - N_{\text{imp}}$ 个国家作为被掠夺国家。每个被掠夺国家可归属于某个帝国，且在进化中，国力强的帝国能够占领更多的弱小国家，弱小的帝国也有失去原有的殖民国。当所有的参与国被某一帝国占领后，则结束进化。该算法可大致分5个步骤：

1) 帝国成员初始化。设定待求的 $h$ 个决策变量构成向量组并表示一个国家，即 $\text{cot} = [x_1, x_2, \dots, x_h]$ ，将参与掠夺的国家总数设为 $N_{\text{cot}}$ 。每个国家参与掠夺的成本作为优化函数 $f$ ，设定第 $n$ 个国家统一标准化后的实力值如下式，且规定取值越小，能量越大。

$$F_n = \frac{f_n - \max\{f_i\}}{\sum_{i=1}^h (f_i - \max\{f_i\})} \quad (23)$$

2) 被掠夺地同化操作。当一个殖民地被某帝国侵占后，殖民地受到该帝国的综合影响会逐渐偏向该帝国。令偏向距离 $I_{\text{dis}} \sim U(0, \delta \times d)$ ， $d$ 表示某帝国和其殖民地的距离，取 $\delta > 1$ ，目的是确保被殖民

地能从任一方向靠近该帝国；靠近方向和殖民地与该帝国地理连线上的夹角选取 $\theta \sim U(-\gamma, \gamma)$ ， $\gamma$ 表示调整偏移量。

3) 帝国实力更新操作。当殖民地的能量值大于对应帝国的能量值时，应互换两者地位。

4) 殖民地竞争过程。首先要计算每个帝国参与殖民地竞争过程前的能量值，即采用统一标准化后的各帝国对应的总能量值

$$C_{Ak} = \left| (f_k + \delta f_{k\text{rol}}) - \max(f_k + \delta f_{k\text{rol}}) \right| \quad (24)$$

式中， $f_{k\text{col}}$ 表示帝国 $k$ 占领殖民地后的平均成本； $f_k$ 表示帝国 $k$ 的总成本。

从总体能量最小的帝国占领的殖民地中选出能量最弱的殖民地，由其他 $N_{\text{imp}} - 1$ 个帝国参与到该殖民地抢夺中来，其中，帝国 $j$ 成功掠夺该殖民地的概率如下

$$\rho_j = \frac{C_{Aj}}{\sum_{i=1}^{k_i} C_{Ai}} \quad (25)$$

5) 删除帝国操作。经历残酷的帝国掠夺后，较小能量值的帝国统治的殖民地会被能量强的帝国占领，最终丧失全部殖民地，此时该帝国应走向消亡，即算法进化中将解除其参与的权利。当算法中仅剩一个帝国后，算法进化结束，该帝国为最优解。否则，进入步骤2)。

### 3. 改进ECA算法

混沌粒子运动兼具规律性和不可预测性的运动规则，但是在某一时刻其粒子状态又是随机的。为了摆脱ECA算法本身易陷入局部最优的缺点，可引用混沌算法中的映射原则求解随机优化问题。结合映射原理

$$y_{k+1} = cy_k(1 - y_k) \quad (26)$$

式中， $c$ 是控制参数，其取值范围 $[0, 4]$ ； $y_k$ 范围设定为 $[0, 1]$ 。

为了提高算法的寻优速度，本文设定 $y_k = \frac{1}{2}(1 + x_k)$ ，因此式(26)可变换为

$$x_{k+1} = 1 - rx_k^2 \quad (27)$$

为了更好地将混沌映射原理应用到ECA算法中来，控制好 $\theta$ 的大小极为重要，决定着优化结果的准确性。 $\theta$ 是殖民地同化过程中殖民地移动方向和

殖民地与帝国连线的夹角。 $\theta$ 取值越大,则算法全局搜索能力越强,反之则算法更倾向于搜索当前区域。本文将基本ECA算法中由 $\theta \sim U(-\gamma, \gamma)$ 产生 $\theta$ 改为采用式(27)混沌映射产生 $\theta$ ,以加强ECA算法的全局搜索能力。另外,由于混沌映射的不重复性,算法的收敛速度也得到了提高。改进ECA算法的求解流程如图2所示。

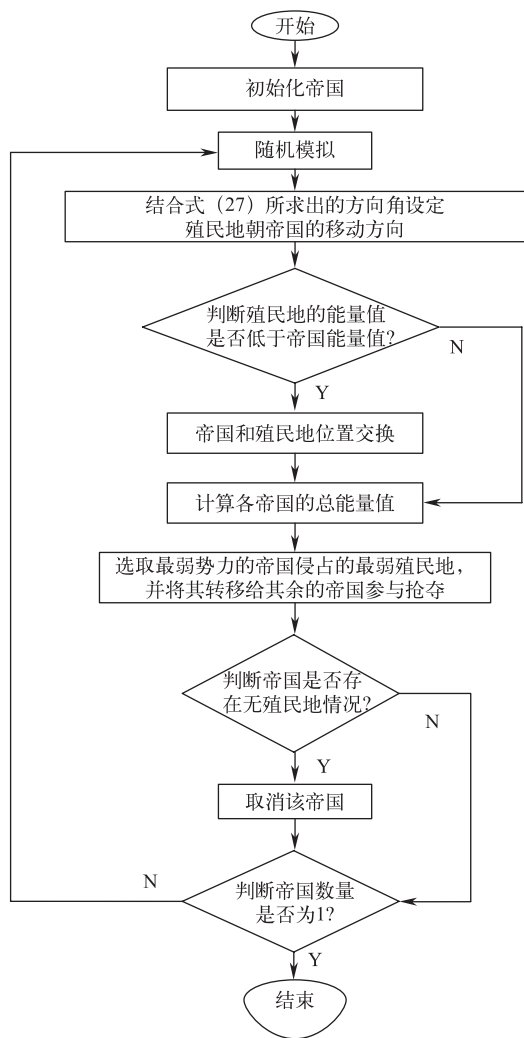


图2 改进ECA算法的求解流程

## 算例分析

本文选取图3所示的微电网系统进行经济调度优化分析,以此来验证所提模型和方法的有效性。以一天为时间周期进行调度,每小时做一次优化运算。假定微电网系统从主网购买的备用容量的上限为20 kW;MT燃料成本可参考相关文献;可控机组的CO<sub>2</sub>排放治理成本可参考相关文献;其他微电网

系统相关参数见表1。对于分布式可再生能源出力最大偏差设定为预测值的 $\pm 20\%$ ,各负荷及可再生能源的预测出力如图4所示。

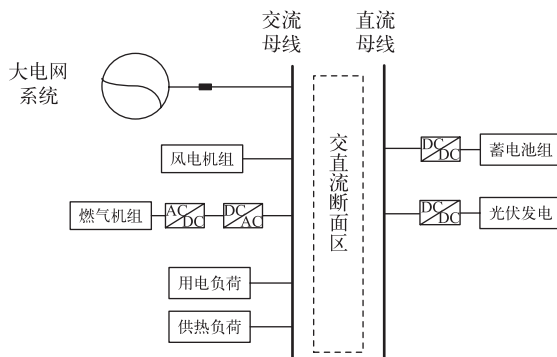


图3 微电网系统示意图

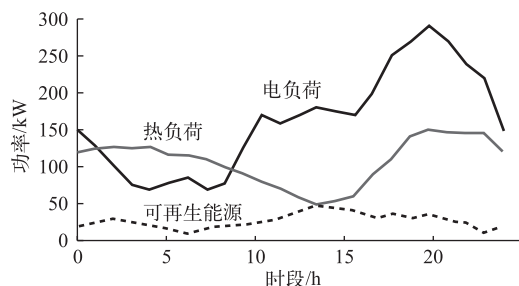


图4 热-电负荷及分布式能源输出功率的预测值

表1 微电网系统相关参数

| 项目      | 功率/kW |     | 运维成本系数<br>/元/kW | 爬坡速率<br>/kW/h |
|---------|-------|-----|-----------------|---------------|
|         | 最小值   | 最大值 |                 |               |
| 风电机组    | 0     | 55  | -               | -             |
| 光伏电池    | 0     | 10  | -               | -             |
| 微燃气轮机   | 15    | 80  | 0.042           | 10            |
| 微电网注入功率 | 0     | 100 | -               | -             |

### 1. 算法优劣性对比

为了充分说明改进后的帝国算法能够提高优化模型的准确度和算法速度,本文将其与常规帝国算法、遗传算法进行比较,分析其优劣性。具体对比如图5所示。

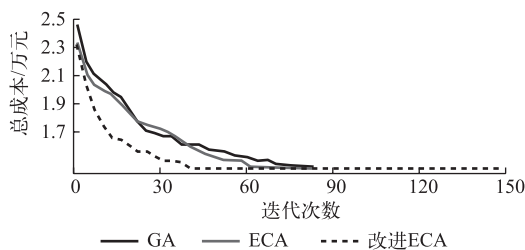


图5 算法比较

从图5可看出,在优化的前期这三种算法表现出的收敛性都还可以。但随着迭代次数增加,改进的ECA算法在大约50次迭代后曲线基本进入收敛状态,也充分说明了改进的ECA算法具有更强的全局搜索能力和收敛性。

2. 鲁棒性能分析

通过利用传统调度模型和鲁棒调度模型对微电网分别进行优化调度后,对两者的调度结果进行分析。传统优化调度结果如图6所示。鲁棒法调度结果如图7所示。

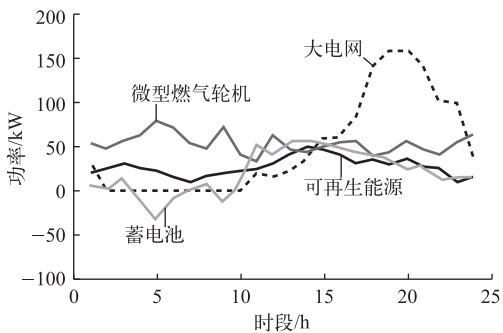


图6 传统调度结果

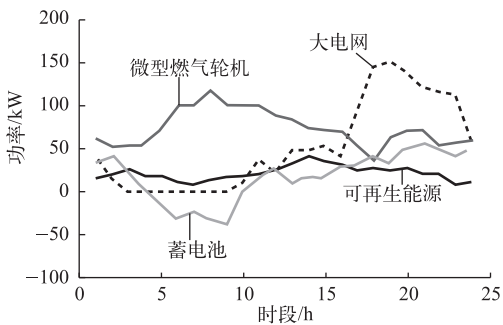


图7 鲁棒法调度结果

蓄电池出力低于0时,表示该时段蓄电池为充电状态。综合图6和图7可知:利用鲁棒优化方法对微电网系统进行经济调度后,分布式可再生能源的输出功率在各时段均比常规方法调度结果的输出功率要低。原因在于微电网系统首要任务是确保系统在接纳可再生能源后仍要安全可靠运行,因此就不能以传统模式下充分保证可再生能源并网为主要目标进行优化调度,从而兼顾了微电网系统的运行安全性和可再生能源消纳并网。

因此,更进一步验证了本文构建的鲁棒调度模型能够很好地处理可再生能源输出功率不确定性的问题,对两种模式下的调度结果进行了风险管控分

析。即两种调度方法策略下利用随机抽样得到可再生能源输出功率场景的总费用和调度优化模型的总费用之差。其值越小,说明对应优化调度策略规避可再生能源功率不确定性的风险越低,在分布式可再生能源预测功率偏差 $\pm 20\%$ 内开展100次随机模拟来描述其出力场景,并计算两种调度策略下相应的总成本和风险,其比对结果见表2。

表2 两种调度方法的风险对比

| 优化经济指标 |     | 取值     |       |
|--------|-----|--------|-------|
|        |     | 本文模型   | 传统模型  |
| 总成本/万元 | 最大值 | 1.451  | 1.863 |
|        | 最小值 | 1.912  | 1.535 |
|        | 均值  | 1.685  | 1.597 |
| 风险值/万元 | 最大值 | -0.522 | 0.159 |
|        | 最小值 | -0.114 | 0.386 |
|        | 均值  | -0.323 | 0.241 |

从表2可看出,利用鲁棒优化方法优化后随机抽样得到的总费用均低于传统调度方法的费用,其风险值表现为负数。原因在于鲁棒优化方法中考虑了全部可能的功率场景,确保在最坏场景下获得最小的总成本。此外,为保证微电网系统运行稳定性,传统调度方法下系统需要备足备用容量来应对分布式可再生能源功率波动,使实际成本要高于鲁棒优化方法下的总成本。因此,传统优化调度方法很难应对可再生能源不确定性的处理,增加了系统调度的风险。

结束语

通过对含分布式可再生能源的微电网系统调度模型进行分析,本文将鲁棒规划理论引用到微电网系统的经济调度中来,就此提出了含可再生能源的微电网系统鲁棒优化调度方法,并结合改进ECA算法进行了优化求解,并得出了以下结论:

1) 利用鲁棒规划方法可兼顾分布式可再生能源输出功率的不确定性和微电网系统的运行稳定性,保证分布式能源消纳的同时,还能促进微电网系统的安全运行。

2) 通过改进ECA算法的应用,使得模型优化求解过程具有更强的全局搜索能力和更快的收敛速度。总体来说,本文所提的模型和算法在满足运行稳定性的基础上能够获得较好的经济性,可为含分布式可再生能源微电网系统的经济调度问题提供新模式。EA