

DOI: 10.7667/PSPC170736

基于层次分析法的孤立微电网多目标优化运行

李国庆, 翟晓娟

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对微网运行中风机出力和光伏出力等随机性因素, 建立了基于机会约束规划的孤立微电网经济运行模型。以包含风力机、光伏、负荷、储能和微型燃气轮机的微网为例, 以微网运行的成本作为总的目标函数, 将运行中机组的运行成本、运行过程中机组所排放的 CO₂ 的处理费用和机组所排放的 SO₂ 的处理费用作为三个子目标函数。在处理三个子目标函数的权重时采用层次分析法, 在处理机会约束时采用序列运算理论中的卷和运算。最后通过 Tomlab 优化工具求解目标函数, 得到微网运行的最优目标以及在最优目标时各个机组的出力情况。

关键词: 孤立微电网; 优化运行; 层次分析法; 机会约束规划; 序列运算

Multi-objective optimal operation of island micro-grid based on analytic hierarchy process

LI Guoqing, ZHAI Xiaojuan

(Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Aiming at the random factors in micro-grid operation such as fan output and photovoltaic output, a chance constrained programming economic operation model of isolated micro-grid is proposed. It takes the micro-grid including wind turbine, photovoltaic, load, energy storage, micro gas turbine as an example, micro-grid operation cost as the total objective function, and the unit operation cost, CO₂ emission treatment costs during unit operation, and SO₂ emission treatment costs of unit as three sub objective functions. The weight of processing the three sub objective functions is processed by using AHP, chance constrained programming is dealt with the Curl-sum operation of sequence operation theory. Finally, the tomlab optimization tool is used to solve the objective function, and the optimal objective of microgrid operation and the output of each micro unit in optimal target are obtained.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52243714001G).

Key words: isolated micro-grid; optimal operation; analytic hierarchy process (AHP); chance-constrained programming; sequence operation

0 引言

随着全球能源危机的加重, 具有减轻环境污染、降低线路损耗、改善电能质量等优点的分布式发电受到广泛的关注, 而微电网是一种新型的网络结构, 将多种分布式电源(Distribution Generation, DG)、负荷、储能系统和控制装置结合在一起, 最终实现自我控制和保护管理的自治系统, 既可以与外部电网并网运行, 又可以孤立运行, 改善负荷的供电可靠性, 因此微电网越来越受到大家的重视^[1-4]。但是由于分布式电源中的风力机、光伏等出力具有不确定

性, 加上负荷预测也有一定的误差, 这就给微电网的优化运行带来一定的难度^[5-7]。

对于上述问题, 国内外的研究学者做了大量的研究。文献[8]建立了包含多种分布式电源的微电网经济优化运行模型, 但是在处理模型时将风、光等出力做确定性计算, 违背了实际情况; 文献[9]建立了蓄电池的充放电模型, 通过优化各时段微电源的出力, 从而达到微网经济优化运行的目标, 但是存在和文献[8]一样的问题; 文献[10]建立了考虑机组经济性和环保性的多目标模型, 利用模糊处理的方法将多目标转化为单目标函数, 但是在确定隶属度函数时人为因素较大, 会对结果造成一定误差; 文献[11]在建模方面考虑得更为全面, 利用序列运算理论将机会约束转化为确定性约束, 但是在模型求

解时用的是遗传算法, 该算法的搜索速度比较慢。

综合上述存在的问题, 本文以包含风力机(Wind Turbine, WT)、光伏(Photovoltaic, PV)、负荷(Load)、微型燃气轮机(Micro Turbine, MT)和蓄电池(Storage Battery, SB)的微网为例, 利用层次分析法(Antylytic Hierarchy Process, AHP)确定三个子目标函数的权重, 从而解决了微网的多目标优化问题。算例中得到了目标函数与步长、置信度的关系及在各子目标函数权重不同时的结果, 为实际运行提供了参考。

1 微电网出力模型

1.1 风力机出力模型

对大量实测数据进行分析表明, 风速近似服从威布尔分布^[12], 其分布函数为

$$F(v) = 1 - \exp[-(v/c)^k] \quad (1)$$

其概率密度函数为

$$f_v(v) = k/c(v/c)^{k-1} \exp[-(v/c)^k] \quad (2)$$

式中: v 为实际风速; k 为形状参数, $k=1.8\sim 2.8$, 一般取 $k=2$; c 为尺度参数, 反映某个时段的平均风速, 有 $\bar{v} = c\Gamma(1/k+1)$ 。

风力机组的输出功率 P_w 和实际风速 v 的函数关系如式(3)。

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{in}, v > v_{out} \\ \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_r^3 - v_{in}^3} P_r & v_{in} \leq v < v_{out} \\ P_r & v_r \leq v < v_{out} \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_r 为额定风速; v_{in} 为切入风速; v_{out} 为切出风速; P_r 为风力机的额定输出功率。

输出功率 P_w 的分布函数为

$$F(P_w) = \begin{cases} 0 & P_w < 0 \\ 1 - \exp\left\{-\left[1 + \frac{v_r - v_{in}}{v_{in} P_r} P_w\right] \frac{v_{in}}{c}\right\}^k + \exp\left[-\left(\frac{v_{out}}{c}\right)^k\right] & 0 \leq P_w < P_r \\ 1 & P_w \geq P_r \end{cases} \quad (4)$$

1.2 光伏出力模型

一天中由于光照和温度的不断变化, 使得太阳能电池在一天中的出力是一个随机过程。太阳能电池组件的功率输出表达式如式(5)^[13]。

$$P_{pv} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 + k_1(T_c - T_r)] \quad (5)$$

式中: P_{pv} 为太阳能电池的实际输出功率; P_{STC} 为标准测试条件下的电池输出功率; G_{ING} 为实际光照强

度; G_{STC} 为标准测试条件下的辐照强度; k_1 为功率温度系数; T_c 为电池板工作温度; T_r 为参考温度。

太阳光照强度可近似看成 Beta 分布, 其概率密度函数为^[14]

$$f(G_{ING}) = \frac{\Gamma(\delta + \varphi)}{\Gamma(\delta)\Gamma(\varphi)} \left(\frac{G_{ING}}{G_{INGmax}}\right)^{\delta-1} \left(1 - \frac{G_{ING}}{G_{INGmax}}\right)^{\varphi-1} \quad (6)$$

式中: δ 、 φ 为 Beta 分布的形状参数, 其关系为 $\varphi = \delta(1-u)/u$; u 为光强平均值。

太阳能电池的出力与光照强度呈线性关系, 也呈 Beta 分布, 其概率密度函数为

$$f(P_{pv}) = \frac{\Gamma(\delta + \varphi)}{\Gamma(\delta)\Gamma(\varphi)} \left(\frac{P_{pv}}{P_{pvmax}}\right)^{\delta-1} \left(1 - \frac{P_{pv}}{P_{pvmax}}\right)^{\varphi-1} \quad (7)$$

式中, P_{pvmax} 为太阳能电池的最大输出功率。

2 微电网经济优化运行模型

2.1 机会约束规划模型

由于微电网的优化运行是一个复杂的多目标、多约束、多变量的问题^[15-16], 而且约束条件中不仅有等式约束, 同时还含有不等式约束, 传统确定性规划方法处理随机变量有很大局限性, 而采用机会约束规划能够更好地描述变量的不确定性。机会约束是随机规划的一个分支, 主要用于解决约束条件中含有随机变量且必须在观测到随机变量实现之前做出决策的问题^[17]。具体方法为: 考虑到实际情况下随机变量不能满足一些约束条件, 所以设定一个置信水平, 所做决策使约束条件成立的概率不能小于上述设定的置信水平, 接着把机会约束转化为各自确定的等价类, 然后用传统的方法求解其等价的确定性模型, 表达式如式(8)。

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t.} & g(x) \leq 0 \\ & P\{G(x, \phi) \leq 0\} \geq \eta \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f(x)$ 为目标函数; $g(x)$ 为确定性约束条件; $G(x, \phi)$ 为不确定性约束条件; $P\{\bullet\}$ 为某一事件的概率; η 为给定的置信度。

2.2 微网系统的目标函数

本文通过对各个子目标所占的权重、机组开机状态、运行状态进行优化, 最终使得微网运行的总成本最低, 具体目标函数如下所述。

2.2.1 目标函数

$$\min F = \omega_1 F_1 + \omega_2 F_2 + \omega_3 F_3 \quad (9)$$

式中: F 为微网运行的总成本; F_1 为机组运行的成本; F_2 、 F_3 分别为运行过程中 CO_2 、 SO_2 总的处理费用; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为所加的权重。

2.2.2 各子目标函数

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i S_{it} + b_i U_{it} + c_i U_{it} P_{it} + d_i R_{it}) \quad (10)$$

式中: S_{it} 为微燃机 i 在 t 时刻的开机状态; a_i 为开机成本; U_{it} 为微燃机 i 在 t 时刻的运行状态; b_i 为运行成本; P_{it} 为微燃机 i 在 t 时刻的出力; c_i 为相应的出力系数; R_{it} 为微燃机 i 在 t 时刻的旋转备用; d_i 为备用容量; T 为运行的时段数, 此处考虑一天 24 个时段; N 为微燃机组的台数, 取 3 台。

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N g_1 \gamma_1 P_{it} \quad (11)$$

$$F_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N g_2 \gamma_2 P_{it} \quad (12)$$

式中: g_1 、 g_2 分别为每千克 CO_2 、 SO_2 的处理费用; γ_1 、 γ_2 分别为微燃机 i 发出每千瓦电能时的 CO_2 、 SO_2 的排放系数。

2.3 约束条件

2.3.1 功率平衡约束

$$P_{it} + P_{ic} - P_{if} + P_{id} - \sum_{i=1}^N P_{it} = E_t \quad (13)$$

式中: P_{it} 为 t 时刻的卸荷负载出力; P_{ic} 为储能在 t 时刻的充电功率; P_{if} 为储能在 t 时刻的放电功率; P_{id} 为 t 时刻的负荷预测值; E_t 为 t 时刻风力机、光伏所组成的共同出力的期望值。

2.3.2 微燃机出力约束

$$P_{i\min} \leq P_{it} \leq P_{i\max} \quad (14)$$

式中, $P_{i\max}$ 、 $P_{i\min}$ 分别为机组出力的上下限。

2.3.3 储能约束

$$S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max} \quad (15)$$

$$S(0) = S(T) = S_{\min} \quad (16)$$

式中: S_{\min} 、 S_{\max} 分别为蓄电池所允许的剩余电量的最小值和最大值; $S(0)$ 、 $S(T)$ 分别为蓄电池运行一个周期的始末容量。

2.3.4 微燃机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_{it} - P_{i(t-1)} \leq R_{\text{rup}} \\ P_{i(t-1)} - P_{it} \leq R_{\text{idown}} \end{cases} \quad (17)$$

式中, R_{idown} 、 R_{rup} 分别为微燃机增加和降低有功功率的极限值。

2.3.5 旋转备用约束

$$P(\sum_{i=1}^N R_{it} + P_{it} \geq E_t - P_{wt} - P_{pvt}) \geq \eta \quad (18)$$

式中: P_{it} 为备用容量; P_{wt} 为 t 时刻风力机的出力; P_{pvt} 为 t 时刻光伏的出力; η 为给定的置信度。

3 方法介绍

3.1 序列运算理论

本文在处理机会约束时用到了—种数学理论——序列运算理论。序列运算理论是以数字信号处理领域中的序列卷积为出发点, 并扩展了原有的序列卷积概念^[18-19], 本文用了其中的卷和运算。

序列的取值为数轴上非负整数点上的—系列值, 已知序列 $a(i)$, $i=0, 1, \dots, N_a, \dots$, 称 N_a 为此序列的长度, 当且仅当:

$$1) a(i)=0, \text{ 对于所有 } i > N_a;$$

$$2) a(i) \neq 0, i=N_a.$$

即: 从整个数轴上观察, 序列 $a(i)$ 只在非负半轴上有定义, 且以 $i=N_a$ 为分界, 其左方的点可取任意值 (可以是 0, 也可以非 0), 其右方的点的取值均为 0, 在 $i=N_a$ 处取非 0 值。序列的每一项从 0 开始, 因此序列长度比该序列的项数少 1, 显然, 序列的长度也是非负整数, 序列长度的最小值为 0。光伏出力的概率性序列的长度为

$$N_{at} = [P_{\text{pvmax}}' / q] \quad (19)$$

式中: $[x]$ 为不超过 x 的最大整数; P_{pvmax}' 为 t 时刻光伏的最大出力; q 为离散化步长。

3.2 卷和运算

由于风力机、光伏的出力都是随机变量, 需要先根据两者的概率分布, 分别得到其概率性序列 $a(i_{at})$ 和 $b(i_{bt})$, 两者的序列长度分别为 N_{at} 和 N_{bt} 。做此变化是由于概率性序列运算理论是序列运算理论的一种特例, 而且是使序列运算理论得以实用化的关键, 在概率性序列运算理论中, 概率性序列可以代表某些—维离散型随机变量的概率分布。此处给出了上午十点, 风力机、光伏出力的概率分布情况, 如图 1 所示。

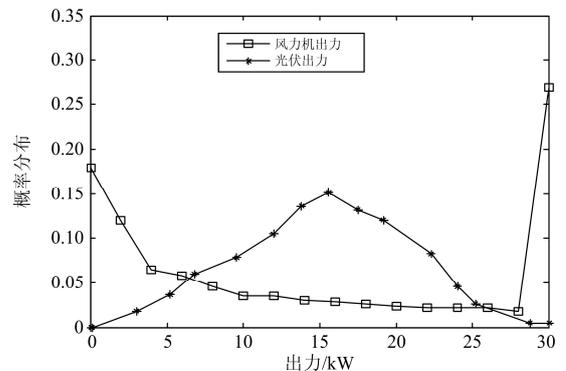


图 1 风力机与光伏出力概率性序列

Fig. 1 WT and PV output probability sequences

令风力机、光伏共同出力的概率性序列为 $c(i_{ct})$, 序列长度为 N_{ct} , 这里利用卷和运算可以得到共同出力的概率性序列 $c(i_{ct})=a(i_{at}) \otimes b(i_{bt})$, 根据定义可以表述为: $c(i_{ct}) = \sum_{i_{at}+i_{bt}=i_{ct}} a(i_{at}) \cdot b(i_{bt})$, 这只是一化简写法, 完整的表述如下:

$$\{(i_{at}, i_{bt}) | 0 \leq i_{at} \leq N_{at}; 0 \leq i_{bt} \leq N_{bt}; \text{s.t. } i_{at} + i_{bt} = i_{ct}\} \quad (20)$$

其中, $0 \leq i_{at} \leq N_{at}$ 和 $0 \leq i_{bt} \leq N_{bt}$ 为风力机和光伏两个原始序列的定义域约束, 上式的含义为: 在 i_{at} 和 i_{bt} 的定义域内, 对于满足条件 $i_{at}+i_{bt}=i_{ct}$ 的任意下标 (i_{at}, i_{bt}) 组合, 其相应的序列项的乘积 $i_{at} \cdot i_{bt}$ 均构成 $c(i_{ct})$ 项求和式中的一项。最终得到风力机和光伏共同出力的期望值, 如图 2 所示。

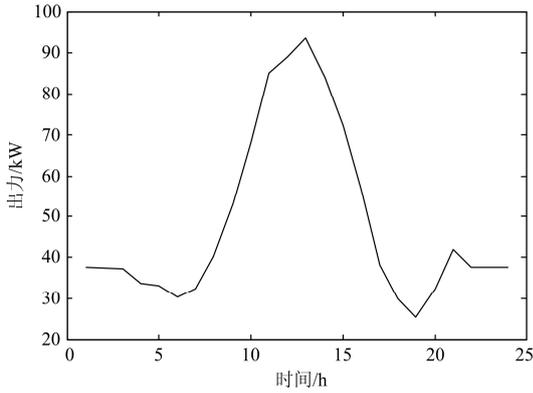


图 2 风机和光伏共同出力的期望值

Fig. 2 Expected values of wind turbine and PV output

最终风力机和光伏的等效负荷的出力期望值为

$$E_t = \sum_{i_{ct}=0}^{N_{ct}} i_{ct} c(i_{ct}) \quad (21)$$

3.3 层次分析法

微电网的多目标优化运行是一个变量繁多且结构复杂的问题。本文在优化过程中权重的确定尤为关键, 必须对各个子目标的重要程度做出正确估价, 而各个因素的重要程度是不一样的^[20-21], 为了反映因素的重要程度, 本文采用了层次分析法确定各子目标间的权重, 具体步骤如下所述。

1) 构造判断矩阵

以 F 表示目标, u_i, u_j (本文 $i, j=1, 2, 3$) 表示因素, u_{ij} 表示 u_i 对 u_j 的相对重要性数值, 最后构成了判断

$$\text{矩阵 } P = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{bmatrix}.$$

2) 权重计算

根据 1) 中判断矩阵, 采用公式 $P\beta = \lambda_{\max}\beta$ 求出

最大特征根 λ_{\max} 所对应的特征向量 β , 并对向量 β 做归一化处理, 得到权重分配。

3) 一致性检验

AHP 法对人们的主观判断加以形式化的表达及处理, 逐步剔除主观性从而尽可能地转化为客观事实, 但是并不是 2) 中所有的权重分配都是合理的, 需要对判断矩阵进行一致性检验。检验公式为

$$CR = CI / RI \quad (22)$$

式中: CR 为判断矩阵的随机一致性比率; CI 为判断矩阵的一般一致性指标; RI 为判断矩阵的平均一致性指标, 1~9 阶的判断矩阵的 RI 值见表 1。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (23)$$

式中, n 为指标的个数。

当判断矩阵 P 的 $CR < 0.1$ 时, 认为 P 具有满意的一致性, 否则需要调整矩阵中的元素, 使其满足一致性检验。

表 1 平均随机一致性指标 RI 的值

Table 1 Value of the average random consistency index RI									
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

4 算例分析

4.1 微网结构

本文的微网结构图如图 3 所示。

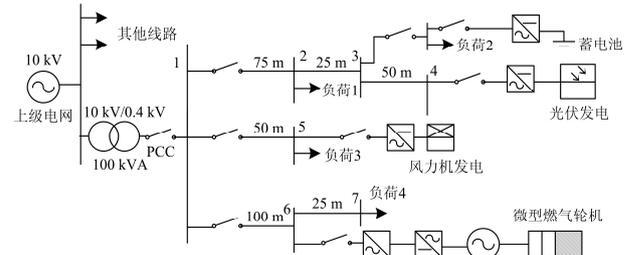


图 3 微网系统结构

Fig. 3 Microgrid system architecture

4.2 主要参数

1) 微燃机参数

本文中三台微燃机的各参数如表 2 所示。

表 2 三台微燃机的主要参数

Table 2 Main parameters of the three micro-turbines						
微燃机	$a_i/\$$	$b_i/\$$	$c_i/\$$	$d_i/\$$	P_{\min}/kW	P_{\max}/kW
MT1	1.2	1.4	0.38	0.02	5	30
MT2	1.6	0.9	0.42	0.06	10	25
MT3	2.9	1.2	0.49	0.04	10	50

2) 污染物排放参数

由于风力机和光伏属于清洁能源, 不排放污染物, 因此这里只考虑微燃机运行过程中的排放情况, 各参数如下所示^[22]。

$g_1=0.21$ \$/kg, $g_2=14.842$ \$/kg, $\gamma_1=489$ g/kWh, $\gamma_2=0.003$ g/kWh。

3) 蓄电池参数

$S_{ocmin}=20$ kW·h, $S_{ocmax}=100$ kW·h。

4.3 实例计算

对于本文的三个子目标函数, 按其重要程度即三个权重间的大小关系, 可以分为 $\omega_1>\omega_2>\omega_3$, $\omega_1>\omega_3>\omega_2$, $\omega_2>\omega_1>\omega_3$, $\omega_2>\omega_3>\omega_1$, $\omega_3>\omega_1>\omega_2$, $\omega_3>\omega_2>\omega_1$, $\omega_1=\omega_2=\omega_3$ 七种。此处以重要程度为机组运行成本>CO₂处理费用>SO₂处理费用即 $\omega_1>\omega_2>\omega_3$ 为例进行计算说明。

构造判断矩阵 $P=$
$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$
, 经过权重

计算后得到权重分配为 0.637、0.258、0.105, 最后利用式(22)和式(23)进行一致性检验, 得到 $CR=0.0332<0.1$, 即通过了一致性检验, 所以该权重分配是合理的。

4.4 优化结果

4.4.1 子目标函数不同重要程度所对应的优化结果

当重要程度 CO₂处理费用 > 机组运行成本 > SO₂处理费用, 即 $\omega_2 > \omega_1 > \omega_3$ 时, 通过层次分析法确定得到权重分配为 0.258 3、0.637 0、0.104 7, 此时微网的总运行成本与所选取步长、置信度的关系如表 3 所示。

表 3 微网成本与步长、置信度的关系表

Table 3 Relationship between cost and step size and confidence level of micro-grid

η	q/kW								
	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
0.90	289.5	290.1	291.1	292.2	291.2	297.3	292.6	307.0	294.3
0.92	290.2	290.7	291.8	292.9	291.9	297.7	293.1	307.0	294.5
0.94	290.5	291.0	292.1	293.1	292.2	298.0	293.4	307.3	294.8
0.96	290.9	291.4	292.4	295.5	292.5	298.4	293.8	307.7	295.2
0.98	291.5	292.0	293.1	294.1	293.2	299.0	294.4	308.2	295.8
1.00	293.2	293.7	294.7	295.7	294.8	300.1	296.0	309.8	297.4

由表 3 可以看出, 微网运行的总成本在 η 为 0.9、 q 为 2 kW 时取得最小值, 在 η 为 1.0、 q 为 5.5 kW 时取得最大值。用同样的方法得到另外六种情况的成本情况, 得到了相同的结果。由此可知, 最优结

果一定在 η 为 0.9、 q 为 2 kW 的条件下产生。表 4 给出了在该条件下, 三个子目标函数重要程度不同时的优化结果。

表 4 子目标函数重要程度不同时的优化结果

Table 4 Optimization results of different degree of importance of sub objective function

重要程度	$\omega_1>\omega_2>\omega_3$	$\omega_1>\omega_3>\omega_2$	$\omega_2>\omega_1>\omega_3$	$\omega_2>\omega_3>\omega_1$	$\omega_3>\omega_1>\omega_2$	$\omega_3>\omega_2>\omega_1$	$\omega_1=\omega_2=\omega_3$
总成本/\$	426.9	512.0	289.5	577.0	331.9	455.0	432.1

在利用层次分析法确定权重时, 子目标函数重要程度即权重不同, 所得到的优化结果是不同的。由表 4 可以得到, 本文所建立的模型在 $\omega_2>\omega_1>\omega_3$, 即 CO₂处理费用重要程度最高、SO₂处理费用的重要程度最低时, 取得了最优结果即成本的最小值, 该值为 289.5 \$, 同时仅从 CO₂和 SO₂的排放来看, 当 CO₂的重要程度高于 SO₂的重要程度时, 微网总的运行成本会降低, 这就为运行人员在实际操作中提供了参考。

4.4.2 最优结果时各台机组的出力情况

微网系统在 η 为 0.9、 q 为 2 kW 时取得最优结果, 在该情况时, 三台微燃机的出力情况如图 4 所示。

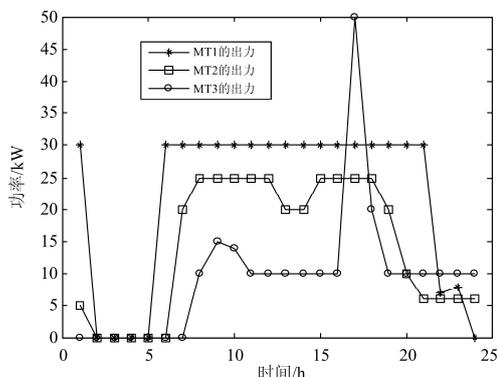


图 4 最优结果时各台机组的出力情况

Fig. 4 Output of each unit in the optimal result

由图4可以看到,MT1在很长时间内出力均匀,而MT2、MT3随着时间的变化,出力也会发生变化。但是MT2和MT3在20h后没有出现大幅度的启停状态,这是其显著的优点,但是MT1在20h后发生骤停,这样就会加剧机组的损坏,增加机组的维修费用,因此运行人员在实际操作中要根据实际情况选择合适的机组运行。

5 结论

综合考虑风力机、光伏等分布式电源的不确定性,提出基于层次分析法的孤立微电网多目标优化运行方法。采用序列运算理论,将DG不确定性出力转化为确定性因素;考虑经济性、环保性等多个目标,利用层次分析法确定各目标权重;通过Tomlab优化工具求解模型,最终在算例中得到了在不同的置信度以及不同步长时,对三个子目标函数重视程度不同时的优化结果。主要结论如下:

- 1) 在实际运行中要选取合适的步长与置信度,最终达到最优结果。
- 2) 层次分析法在本文中得到了很好的应用,这也为量纲相同的多目标函数转化为单目标函数提供了一定的借鉴。
- 3) 在实际运行中首先要足够重视CO₂的处理费用,其次要重视机组运行成本,这就为运行人员提供了一定的参考,具有实际的应用价值。

参考文献

- [1] WANG Ding, HE Haibo, MU Chaoxu, et al. Intelligent critic control with disturbance attenuation for affine dynamics including an application to a microgrid system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4935-4944.
- [2] GHANAEE R, FOROUD A A. Economic analysis and optimal capacity sizing of turbo-expander-based microgrid[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 11(4): 511-520.
- [3] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [4] 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 micro-grid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.
- [5] 王成山, 吴震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [6] 姜世公, 李琰, 王卫. 一种微网系统孤岛运行条件下的能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 130-135.
JIANG Shigong, LI Yan, WANG Wei. A novel power management strategy for microgrid on islanding mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 130-135.
- [7] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [8] GUO X Q, XU D, GUERRERO J M, et al. Space vector modulation for DC-link current ripple reduction in back-to-back current-source converters for microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6008-6013.
- [9] 刘天琪, 江东林. 基于储能单元运行方式的微电网经济运行[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.
- [10] 张晓花, 赵晋泉, 陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 71-76.
ZHANG Xiaohua, ZHAO Jinqun, CHEN Xingying. Multi-objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 71-76.
- [11] 刘方, 杨秀, 时珊珊, 等. 基于序列运算的微网经济优化调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 227-237.
LIU Fang, YANG Xiu, SHI Shanshan, et al. Economic operation of micro-grid based on sequence operation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 227-237.
- [12] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 88-98.
ZHU Xingyang, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia, et al. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected

- wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 88-98.
- [13] SZANIAWSKI P, ZABIEROWSKI P, OLSSON J, et al. Advancing the understanding of reverse breakdown in Cu (In, Ga) Se 2 solar cells[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2017, 7(4): 1136-1142.
- [14] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.
- XU Jian, LIU Nian, YU Lei, et al. Optimal allocation of energy system of PV microgrid for industries considering important load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 29-37.
- [15] 肖青, 陈洁, 杨秀, 等. 含多种分布式电源的微网动态经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 22-28.
- XIAO Qing, CHEN Jie, YANG Xiu, et al. Dynamic economic dispatch of microgrid with different types of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(4): 22-28.
- [16] 王金全, 黄丽, 杨毅. 基于多目标粒子群算法的微电网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1): 49-54.
- WANG Jinquan, HUANG Li, YANG Yi. Optimal dispatch of microgrid based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1): 49-54.
- [17] 任建文, 渠卫东. 基于机会约束规划的孤岛模式下微电网动态经济调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 73-78.
- REN Jianwen, QU Weidong. Dynamic economic dispatch based on chance-constrained programming for islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 73-78.
- [18] 殷桂梁, 张雪, 操丹丹, 等. 考虑风电和光伏发电影响的电力系统最优旋转备用容量确定[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3497-3504.
- YIN Guiliang, ZHANG Xue, CAO Dandan, et al. Determination of optimal spinning reserve capacity of power system considering wind and photovoltaic power affects[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3497-3504.
- [19] 康重庆, 白利超, 夏清, 等. 概率性序列及其运算理论[J]. 清华大学学报(自然科学报), 2003, 43(3): 322-325.
- KANG Chongqing, BAI Lichao, XIA Qing, et al. Probabilistic sequences and operation theory[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(3): 322-325.
- [20] 韩子娇, 李正文, 赵鹏, 等. 基于改进模糊 AHP 的电磁环网解环方案评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 95-101.
- HAN Zijiao, LI Zhengwen, ZHAO Peng, et al. Scheme evaluation for decoupling electromagnetic loop networks based on improved fuzzy AHP[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 95-101.
- [21] 唐雾葵, 汤克坚, 张浩, 等. 电池更换站模糊综合风险评估系统设计[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 118-122.
- TANG Wuwu, TANG Kejian, ZHANG Hao, et al. System design of fuzzy comprehensive risk assessment for battery replacement stations[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 118-122.
- [22] 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 365-373.
- ZHUANG Huaidong, WU Hongbin, LIU Haitao, et al. Multi-objective economic dispatch of microgrid system considering electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 365-373.

收稿日期: 2017-05-16; 修回日期: 2017-07-17

作者简介:

李国庆(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

翟晓娟(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网经济优化运行. E-mail: 269073221@qq.com

(编辑 魏小丽)