

DOI: 10.7667/PSPC161113

基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究

祖其武¹, 牛玉刚¹, 陈蓓²

(1. 华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237;

2. 上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海 200070)

摘要: 微网的经济运行是一个多目标多约束问题。为了处理各个目标的重要性, 提出了一种集中式控制模型。Operator 利用二元对比法对发电侧发电成本、需求侧用电成本以及可靠性成本的重要性定性排序, 以及语气算子与模糊标度、相对重要性的隶属度值关系确定加权系数, 将多目标优化问题转换为单目标优化问题。Operator 利用改进的粒子群算法对发电侧发电成本、需求侧用电成本和可靠性成本三个指标进行折中处理。通过算例仿真, 对比分析了不同性能指标下该控制模型的实用性。在对分布式电源的出力以及用户负荷合理调度下, 既保证了微网的经济运行, 同时也保证了微网运行的可靠性。

关键词: 微网; 经济性; 可靠性; 粒子群; 多目标

Study on multi-objective economic operating strategy of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm

ZU Qiwu¹, NIU Yugang¹, CHEN Bei²

(1. Key Lab of Advanced Control and Optimization for Chemical Process, Ministry of Education, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China; 2. Central Academe, Shanghai Electric Group, Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: The economic operation of the microgrid is a multi-objective and multi-constraint problem. In order to distinguish the importance of each objective, this paper proposes a centralized control model. The operator uses the dualistic contrast to sort the importance of the generation cost in generation-side, electricity cost in demand-side and reliability cost, and uses the relations among tone operator, fuzzy scale and membership degree of relative importance to determine the weighted coefficient, and the multi-objective problem is transformed into the single objective problem. The operator uses improved particle swarm to deal with the generation cost in generation-side, electricity cost in demand-side and reliability cost. Comparative analysis of different performance index is made, and the example simulation shows that the proposed model is effective to schedule the output power of distributed generation and load, which ensures both the economic operation and the reliability of the microgrid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61673174).

Key words: microgrid; economy; reliability; particle swarm; multi-objective

0 引言

近年来, 由于分布式电源技术的发展, 特别是新能源接入微电网, 电力系统的拓扑结构^[1-2]发生了变化, 控制方式^[3-4]变得更加灵活, 能源利用效率^[5]得到了提高。这种技术的革新对提高微电网经济运行提供了手段。

目前, 微网的优化调度和经济运行是一个研究

热点领域。文献[6-7]在优化储能充放电模型的基础上, 对分布式电源出力进行协调, 减少了微网运行成本。以上文献只是对发电侧能源出力进行调度, 并没有考虑负荷的多样性以及负荷调控方式的灵活性对微网经济调度的潜力。文献[8]将需求侧响应应用于智能家居系统, 用户在动态价格的激励下, 对可转移负荷进行调度, 减少了家庭用电支出。虽然operator 利用需求侧响应对负荷进行了调度, 在一定程度上提高了微网运行收益, 但只是单纯地将需求侧响应与发电单元的调度结合在一起。实际过程

中, 这两者是存在冲突的, 如果用户一味地追求用电成本最小, 反而会给微网的调度带来难度, 增加了运行成本。同样, 微网一味地追求最小运行成本, 可能会以用户的舒适度, 甚至是用户的利益(商铺因切负荷造成经济损失)为代价。

新能源发电的随机性对微网运行的可靠性提出了更高要求, 也增加了微网的调度成本。文献[9]提出了一种多目标的储能容量优化配置策略, 对新能源发电功率波动的抑制、削峰填谷能力以及改善电压质量发挥重要作用。文献[10]考虑微网运行经济性与可靠性的相对重要程度, 对分布式电源的容量进行优化。除了新能源发电功率波动外, 负荷也存在功率波动或缺失。文献[11-12]提高系统的备用容量来抑制负荷缺失和波动。以上文献所采用的控制策略虽然提高了微网运行可靠性, 但同时也相应地增加了系统的初始投资成本。

基于以上分析, 本文提出了一种集中式控制模型, 分别对微网的发电侧发电成本函数、需求侧用电成本函数以及可靠性成本函数进行分析, 接着利用二元对比定权法确定每个目标函数权重, 将多目标优化转变成单目标优化问题。最后, 本文利用改进的粒子群算法对分布式电源的出力、用户负荷的调度进行优化, 使所有的目标函数折中处理, 降低微网运行成本, 提高微网的运行可靠性。

1 微网控制模型

本文提出了一种集中式的两层控制模型(如图1所示), 上层是调度层, operator是整个微网的控制中心, 一方面它可以接受下层的用户请求、发电功率及约束等信息, 另一方面它也可以将调度结果发送给用户和发电单元。下层由需求侧和发电侧组成, 发电侧主要包括光伏(Photovoltaic, PV)、风机(Wind Turbine, WT)、储能(Energy Storage, ES)和电网(grid)(这里考虑电网的功能也是为微网提供电能, 所以归类为发电侧), 用户侧包括所有的用户。

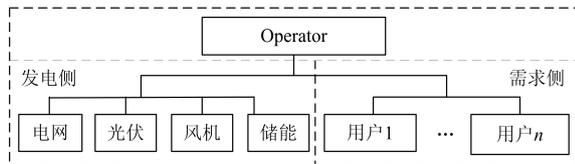


图1 微网控制模型

Fig. 1 Control model of microgrid

微网调度周期 T 设为一天, 一天分为24个供电时段, 假设在每个时段内发电单元的输出功率以及负载需求都是一个常数。

1.1 发电侧模型

发电侧主要为用户提供需求的功率, 包括新能源、储能和电网。

本文所考虑的新能源包括光伏发电和风力发电, 其机组发电成本^[13] $C_j(P_j(t); t)$ 为

$$C_j(P_j(t); t) = \sum_{t \in T} (a_j + b_j P_j(t) + c_j P_j^2(t)) \quad (1)$$

式中: $j=1$ 表示光伏发电; $j=2$ 表示风力发电; $P_j(t)$ 表示 t 时刻新能源的输出功率; a_j 、 b_j 和 c_j 都是大于等于零的常数。新能源发电满足的约束为

$$0 \leq P_j(t) \leq P_j^{\max}(t) \quad (2)$$

式中, $P_j^{\max}(t)$ 是新能源日前预测的最大值。本文也考虑了当新能源输出功率超过负载需求时, 可以通过改变光伏输出的控制模式或风机的转角, 减少新能源输出。

由于新能源发电的不确定性, 微网中往往加入储能作为缓冲装置, 协调新能源出力。储能既可以通过放电形式补充微网中功率缺额, 也可以通过充电形式吸收微网中剩余功率。储能的成本相对较高, 储能的充放电次数和充放电深度数都会影响储能的寿命, 文献[14]提出了一种储能容量租用模式的概念, 即租用价格乘以储能的租用容量, 利用该概念, 本文提出了储能的充放电成本 $C_{es}(P_{es}^c(t), P_{es}^d(t); t)$ 。

$$C_{es}(P_{es}^c(t), P_{es}^d(t); t) = \beta_{es} \sum_{t \in T} (\eta_c P_{es}^c(t) + \frac{P_{es}^d(t)}{\eta_d}) \quad (3)$$

式中: $P_{es}^c(t)$ 和 $P_{es}^d(t)$ 分别是储能充放电功率; η_c 和 η_d 分别是储能充放电效率; β_{es} 是储能充放电成本系数。

为了防止储能过充过放, 对储能的使用寿命造成影响, 储能的充放电功率满足如下约束。

$$Soc(t) = Soc(t-1) + \frac{\eta_c P_{es}^c(t)}{\alpha_{es}} - \frac{P_{es}^d(t)}{\eta_d \alpha_{es}} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{es}^c(t) \leq P_{es}^{c\max} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{es}^d(t) \leq P_{es}^{d\max} \quad (6)$$

$$Soc_{\min} \leq Soc(t) \leq Soc_{\max} \quad (7)$$

$$Soc(0) = Soc(T) \quad (8)$$

式中: $Soc(t)$ 和 $Soc(t-1)$ 分别是储能当前时刻和上一时刻荷电状态; α_{es} 是储能的容量; $P_{es}^{c\max}$ 和 $P_{es}^{d\max}$ 分别是储能最大充放电功率; Soc_{\max} 和 Soc_{\min} 分别是储能的最高最低荷电状态。式(4)是储能的荷电状态方程, 式(5)和式(6)分别是储能充放电约束, 式(7)是储能荷电状态约束, 式(8)保证储能在上一个调度周期末了时刻与下一个调度周期开始时刻的荷电状态相等, 避免了两个调度周期的干扰。

当分布式发电不足以平衡负荷需求时, 向电网购电是微网的一个重要选择。operator 根据计算的净负荷值决策出电网的出力。另外, 当微网的能量出现剩余时, 不考虑将能量回馈到电网。电网的购电成本 $C_{\text{grid}}(P_{\text{grid}}(t); t)$ 为

$$C_{\text{grid}}(P_{\text{grid}}(t); t) = C_b(t)P_{\text{grid}}(t) \quad (9)$$

式中, $C_b(t)$ 是 t 时刻购电电价。谷时段为 00:00~08:00, 11:00~13:00 和 22:00~24:00, 平时段为 08:00~11:00, 13:00~19:00 和 21:00~22:00, 峰时段为 19:00~21:00。表 1 是电网各时段电价^[15]。

表 1 电网分时电价

Table 1 Electricity price of power grid

电价/(元/kW·h)	谷时段	平时段	峰时段
购电价格	0.399 15	0.718 47	1.037 79

由于微网与电网物理联络线的约束, 购电功率满足如下约束:

$$0 \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid}}^{\text{max}}(t) \quad (10)$$

1.2 需求侧模型

图 1 中的用户负荷包括弹性负荷 $y_i(t)$ (电动汽车、洗衣机等) 和非弹性负荷 $b_i(t)$ (照明等) 两类负荷, 这些负荷需求曲线 operator 可以根据用户用电习惯进行预测。负荷满足的约束为

$$d_{\min} - b_i(t) \leq r_i(t) \leq d_{\max} - b_i(t) \quad (11)$$

$$D_{\min} \leq \sum_{i \in T} r_i(t) \leq \sum_{i \in T} y_i(t) \quad (12)$$

式中: $r_i(t)$ 表示弹性负荷 i 经过调度之后的实时负荷值; 式(11)是用户负荷进线约束, d_{\max} 和 d_{\min} 是用户进线线路容量最大最小值; 式(12)是用户出于节约用电成本或者线路电压不稳定等因素考虑, 对部分负荷进行切除, D_{\min} 可以保证弹性负荷 i 在给定调度区间内供电量的最小值。

由于弹性负荷偏离初始的工作时段, 给用户造成一定的不舒适度。不舒适度成本^[16] $C_i(r_i(t); t)$ 为

$$C_i(r_i(t); t) = \beta_i \sum_{i \in T} (r_i(t) - y_i(t))^2 \quad (13)$$

式中, β_i 是不舒适度成本系数。另外, 考虑到用户出于节约用电成本或者线路电压不稳定等因素, 本文允许用户切除部分负荷, 造成一定的经济损失。切负荷损失成本 $C_{i,\text{cut}}(r_i(t); t)$ 为

$$C_{i,\text{cut}}(r_i(t); t) = \beta_{i,\text{cut}} \left(\sum_{i \in T} y_i(t) - \sum_{i \in T} r_i(t) \right) \quad (14)$$

式中, $\beta_{i,\text{cut}}$ 是切负荷成本系数。

微网稳定运行需满足系统功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^m (r_i(t) + b_i(t)) - P_{\text{pv}}(t) - P_{\text{wt}}(t) - P_{\text{es}}^{\text{d}}(t) + P_{\text{es}}^{\text{c}}(t) = P_{\text{mt}}(t) + P_{\text{grid}}(t) \quad (15)$$

2 微网优化目标

本文的控制目标是对发电单元及负荷的合理调度, 保证微网经济运行和可靠性。我们主要从以下三个方面考虑。第一, 在保证负荷供电的基础上, 对分布式电源的出力进行调度, 使得微网发电成本最小。第二, 考虑到 operator 是为了整个微网系统的安全、稳定、经济运行服务, 所以用户负荷调度产生的调度成本也是 operator 关心的一部分。第三, 由于新能源发电的随机性和间断性, 给微网实时调度带来难度, 也增加了微网运行成本; 另外, 除了新能源发电存在不确定外, 负荷运行也存在波动, 这也会给微网调度带来额外的成本。为了消除新能源发电不确定性以及负荷波动给微网运行带来的影响, 本文通过向电网购电替代增大发电单元的备用容量来提高系统可靠性。因此, 本文最终优化目标包括发电侧发电成本、需求侧用电成本和可靠性成本, 如图 2 所示。

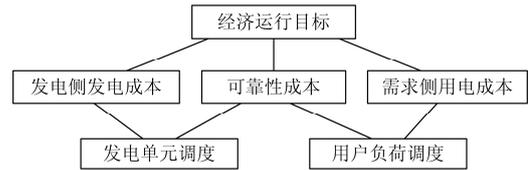


图 2 微网控制目标

Fig. 2 Control objective of microgrid

微网发电成本包括光伏发电、风力发电、储能充放电以及向电网购电成本。发电侧发电成本目标函数为

$$\min f_1 = \min \left\{ \sum_{j=1}^2 C_j(P_j(t); t) + C_{\text{es}}(P_{\text{es}}^{\text{c}}(t), P_{\text{es}}^{\text{d}}(t); t) + C_{\text{grid}}(P_{\text{grid}}(t); t) \right\} \quad (16)$$

式中, 优化变量包括 $P_j(t), Soc(t), P_{\text{es}}^{\text{c}}(t), P_{\text{es}}^{\text{d}}(t), P_{\text{grid}}(t)$ 。

用户作为微网的重要组成部分, operator 在对用户负荷调度中产生的不舒适成本以及切负荷损失成本也是微网运行成本的重要组成部分。需求侧用电成本目标函数为

$$\min f_2 = \min \left\{ C_i(r_i(t); t) + C_{i,\text{cut}}(r_i(t); t) \right\} \quad (17)$$

式中, 优化变量是 $r_i(t)$ 。

新能源发电具有不确定性, 因此 operator 在调

度过程中往往预留分布式电源的备用容量, 这部分备用容量增加了系统的初始投资成本, 并且这部分备用容量不是一直得到利用, 造成了设备闲置, 也增加了设备维修、保养、折旧等费用。另外, 用户负荷在工作时也会存在波动, 所以负荷的波动也会增加系统的备用容量。本文提出了一种微网运行可靠性成本, 该成本由新能源发电不确定成本和负荷波动成本组成。为了减少微网的投资成本, 新能源发电不确定和负荷波动产生的功率缺额, operator 选择向电网购电替代设备备用容量。这部分成本跟购买电量成正比, 而设备的备用容量是一个固定投资, 每时每刻微网都需要支付相应的设备维修、保养、折旧等费用。另外, 通过向电网购电, 这部分购买电力能够紧随负荷和新能源的波动, 不会造成能源的浪费, 减少了运行成本, 微网运行的可靠性也得到了保障。可靠性成本目标函数为

$$\min f_3 = \min \left\{ C_b \left[\sum_{t \in T} \sum_{i=1}^m \gamma_{rb}(r_i(t) + b_i(t)) + \sum_{t \in T} \sum_{j=1}^2 \gamma_{new} P_j(t) \right] \right\} \quad (18)$$

式中: 优化变量是 $r_i(t), P_j(t)$; γ_{rb} 和 γ_{new} 分别是负荷波动概率和新能源发电不确定性概率, 光伏发电和风力发电我们假设具有相同的特性, 他们的不确定概率统一用 γ_{new} 表示, 另外, 这里的概率以最坏的情况计算。

单个目标函数只能描述微网经济运行的单一指标, 不能够准确地描述微网经济运行。本文对微网经济运行的多个指标进行考虑, 但是多个指标之间往往存在冲突, 一般很难使所有的指标达到最优。因此, 本文对各个目标函数进行线性加权, 将多目标问题转换为单目标问题, 多个指标统一求解。

$$F = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 \quad (19)$$

式中, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别是发电侧发电成本 f_1 , 需求侧用电成本 f_2 和可靠性成本 f_3 的权重。权重系数是利用二元对比定权法^[15]确定。

Step 1: 根据重要性比较指标集合中任意二元, 并赋值, 建立指标重要性排序标度矩阵。

Step 2: 对指标重要性排序标度矩阵中的元素进行一致性检验。

Step 3: 根据表 2 中语气算子、模糊标度值以及隶属度值确定所有指标权重。

Step 4: 对各个指标权重线性加权。

由于微网运行成本主要由各分布式电源发电成本组成, 其次, operator 作为微网的服务者, 它

也会优先考虑用户的利益。所以, 根据标度矩阵中各指标的重要性排序以及表 2 中语气算子与模糊标度、隶属度的对应关系, 经计算本文中三个指标发电侧发电成本 f_1 , 需求侧用电成本 f_2 和可靠性成本 f_3 的权重系数依次为 0.532, 0.355 和 0.113。

表 2 语气算子与模糊标度、隶属度的对应关系

Table 2 Corresponding relationship among the tone operator, fuzzy scale and membership degree

语气算子	模糊标度值	隶属度	语气算子	模糊标度值	隶属度
同样	0.500	1.000	十分	0.800	0.250
	0.525	0.905		0.825	0.212
稍稍	0.550	0.818	非常	0.850	0.176
	0.575	0.739		0.875	0.143
略为	0.600	0.667	极其	0.900	0.111
	0.625	0.600		0.925	0.081
较为	0.650	0.538	极端	0.950	0.053
	0.675	0.481		0.975	0.026
明显	0.700	0.429	无可比拟	1.000	0.000

3 优化目标求解

考虑到用户分散在微网的各个位置, 并且各个用户之间都是独立的个体, 没有信息交互, 他们更不知道实时的发电信息。本文提出了一种集中式控制模型, operator 只需要读取用户的智能电表信息, 根据本文所提控制策略对用户负荷集中调度。另外, operator 宏观上调控着发电侧的发电信息, 能够对分布式电源的出力合理调度。

本文提出一种改进的粒子群算法求解式(19)的优化问题。标准粒子群算法中惯性权重系数 ω , ω 较大时, 全局收敛能力强, 局部收敛能力弱; ω 较小时, 局部收敛能力强, 全局收敛能力弱。但是在实际过程中, 在算法迭代的前期, 我们希望粒子运动速度快些, 避免粒子陷入局部最优; 在迭代后期, 我们希望粒子运动速度小些, 避免粒子偏离全局最优。所以我们选择一种动态惯性权重系数: $\omega = \omega_{max} - \omega_{max} k / N$, 其中, 最大惯性权重系数 $\omega_{max} = 1$, k 是当前迭代次数, N 是总的迭代次数。

另外, 标准粒子群算法中粒子越限时, 一般粒子值等于边界值, 即: 当 $x_{id} > x_{i,max}$, $x_{id} = x_{i,max}$; 当 $x_{id} < x_{i,min}$, $x_{id} = x_{i,min}$, 其中, x_{id} 是第 i 个粒子 d 维的位置, $x_{i,max}$ 和 $x_{i,min}$ 是第 i 个粒子的上界和下界值。这种方式处理比较简单, 但是粒子会早熟于边界点。本文提出了下面的处理粒子越限方法:

$$\text{当 } x_{id} > x_{i,max}, x_{id} = x_{i,min} + \text{mod}((x_{id} - x_{i,max}), (x_{i,max} - x_{i,min}))。$$

当 $x_{id} < x_{i,\min}$, $x_{id} = x_{i,\max} - \text{mod}((x_{i,\min} - x_{id}), (x_{i,\max} - x_{i,\min}))$ 。

这样, 粒子一旦越限, 粒子又会重新回到可行解集。

关于约束的处理, 标准粒子群算法一般采用罚函数法, 对越限的粒子进行惩罚, 但是这个惩罚因子的取值比较难确定。本文将约束分为两类, 一类是上下界约束, 比如式(2), 式(5)~式(7), 式(10), 我们设置为粒子初始化区间, 其他约束我们定义在适应度函数里面。我们首先定义一组违反约束计数向量和一组违反约束程度的向量, 然后才是计算适应度值, 所以在粒子个体最优和全局最优比较时, 我们先比较违反约束的次数, 其次是违反约束的程度, 最后才是适应度函数值的比较, 这样保证粒子群优化的解在可行解集内。

优化目标式(19)中变量有七组, 即 $r_i(t), P_j(t), Soc(t), P_{es}(t), P_{es}^c(t), P_{es}^d(t), P_{grid}(t)$, 每组是 24 维, 粒子群在优化高维问题时, 收敛性比较差, 所以需要降维。由式(3)和式(4)得:

$$C_{es}(Soc(t); t) = \beta_{es} \alpha_{es} \sum_{t \in T} (Soc(t) - Soc(t-1)) \quad (20)$$

式(9)和式(15)可以写成:

$$C_{grid}(P_{grid}(t); t) = C_b(t) \left(\sum_{i=1}^m (r_i(t) + b_i(t)) - P_{pv}(t) - P_{wt}(t) - P_{es}^d(t) + P_{es}^c(t) - P_{mt}(t) \right) \quad (21)$$

相应地, 约束中的变量 $P_{es}^c(t), P_{es}^d(t), P_{grid}(t)$ 也用其他变量替换。

下面给出基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行求解步骤。

Step 1: 建立适应度值函数, 违反约束次数函数以及违反约束程度函数。

Step 2: 初始化种群规模, 迭代次数, 粒子的位置向量和速度向量。

Step 3: 计算每个粒子的适应度值、违反约束的次数和违反约束程度。

Step 4: 每个粒子和个体最优依次比较违反约束次数、违反约束程度和适应度函数值, 如图 3 所示。

Step 5: 个体最优和全局最优依次比较违反约束次数、违反约束程度和适应度值, 类似图 3 所示。

Step 6: 按式(22)~式(24)更新粒子的速度和位置。

$$v_{id}^k = \omega v_{id}^{k-1} + c_1 r_1 (pbest_i - x_{id}^{k-1}) + c_2 r_2 (gbest_d - x_{id}^{k-1}) \quad (22)$$

$$\omega = \omega_{\max} - \omega_{\max} k / N \quad (23)$$

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + v_{id}^{k-1} \quad (24)$$

式中: v_{id}^k 是第 i 粒子 d 维速度值; c_1 、 c_2 是学习因子; r_1 、 r_2 是取值为[0,1]的随机函数; $pbest_i$ 和 $gbest_d$

分别是个体最优和全局最优。并按上文所提的粒子越限处理方法对越限粒子处理。

Step 7: 判断是否达到最大迭代次数, 否则返回 step 3。

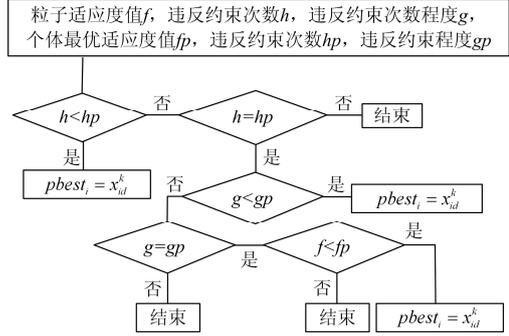


图 3 粒子评价函数比较

Fig. 3 Comparison of particle evaluation function

4 算例分析

4.1 算例系统

本文选取光电、风电、储能各一台。储能充放电效率分别是 $\eta_c=0.96, \eta_d=0.96$, 最大最小荷电状态分别是 $Soc_{\max}=0.9, Soc_{\min}=0.2$, 初始时刻和最终时刻荷电状态 $Soc(0)=Soc(T)=0.5$, 储能的充放电成本系数 $\beta_{es}=0.002$ 。用户数量选择 20, 为了简化分析, 假设所有用户负荷消耗都一样, 用户不舒适度成本系数 $\beta_i=0.002$, 用户切负荷损失成本系数 $\beta_{i,cut}=0.01$ 。用户负荷数据来源于 SCE 的居民和小型商业动态负荷曲线^[16], 新能源输出功率来源于香港天文台气象数据^[17](2012-09-01~2013-08-31)。负荷波动概率 $\gamma_{lb}=0.03$, 新能源发电不确定性概率 $\gamma_{new}=0.1$ 。粒子种群数量为 600, 最大迭代次数为 6000 次。

4.2 算例结果

由图 4 可以看出, 由于种群规模比较大, 粒子一直迭代到 4100 次时才趋于收敛。其中在迭代 2500

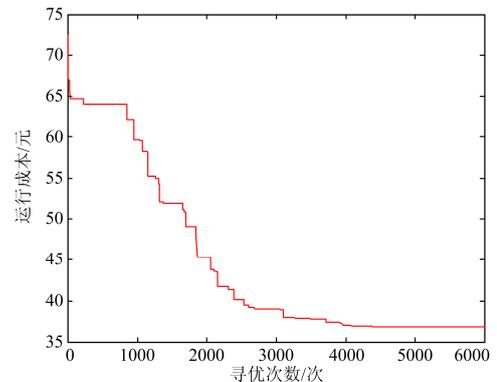


图 4 多目标粒子寻优过程

Fig. 4 Multi-objective particle optimization process

次之前, 由于惯性权重比较大, 算法的收敛速度比较快, 随着惯性权重减少, 算法的收敛速度减慢, 粒子逐渐趋向全局最优解。

本文分别对单目标最优的情况下也对其他目标进行了优化, 优化结果如表 3 所示。

表 3 不同指标下的运行成本

Table 3 Operating cost under different indicators

目标函数	发电侧发电成本/元	需求侧用电成本/元	可靠性成本/元
发电侧发电成本	47.0697	0.2838	23.1624
需求侧用电成本	163.9583	0	28.2992
可靠性成本	153.3213	0.2721	22.9706
多目标优化	63.4412	0.2722	27.2606

由表 3 可知, 当用户追求舒适度时, 需求侧响应不再起作用, 微网发电成本增加了, 相应地可靠性成本也会增加; 当用户追求可靠性时, 也会增加微网的发电成本; 当考虑多个目标按重要性优化时, 这个时候的运行成本不是最少的, 但优化的结果可以兼顾到每个指标。

另外四组实验中, 负荷总量依次是 18 kW, 18.0694 kW, 18.0011 kW, 18 kW (考虑四组实验分别进行, 只统计负荷量表示可靠性)。在考虑单目标优化时, 除了需求侧用电成本, 其他情况下都会或多或少地切负荷, 发电侧发电成本优化和多目标优化的切负荷量相同, 是因为发电侧发电成本占的比重比较大, 并且发电成本相对其他两项成本都要大很多, 所以, 两者的优化结果比较相似, 表 3 中的数据也可以证明这一点。

5 结论

针对多目标多约束的微网经济运行, 本文提出了一种集中式控制模型, 利用改进的粒子群算法分别对发电侧发电成本、需求侧用电成本和可靠性成本进行优化, 对比分析了不同目标最优的情况下其他目标函数值, 验证了本文按重要性对各目标线性加权的合理性。本文所提控制策略在保证发电成本最优的前提下, 对发电单元出力合理调度, 其次也完成了用户负荷的调度, 同时兼顾了微网运行的可靠性。

参考文献

[1] YI L, VGELIDIS G A, YASH S. Wind-solar resource complementarity and its combined correlation with electricity load demand[C] // 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009: 3623-3628.

- [2] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.
WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 73-78.
- [3] 孟安波, 李专. 采用多目标纵横交叉算法的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 109-115.
MENG Anbo, LI Zhuan. Dynamic environmental economic dispatch of power system adopting multi-objective crisscross algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 109-115.
- [4] 施涛, 朱凌志, 于若英. 电力系统灵活性评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 146-154.
SHI Tao, ZHU Lingzhi, YU Ruoying. Overview on power system flexibility evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 146-154.
- [5] 赵敏, 陈颖, 沈沉, 等. 微电网群特征分析及示范工程设计[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1469-1476.
ZHAO Min, CHEN Ying, SHEN Chen, et al. Characteristic analysis of multi-microgrids and a pilot project design[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1469-1476.
- [6] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
SONG Xiaoying, WANG Yansong. Economic and environmental dispatch of microgrid using co-evolutionary genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 85-89.
- [7] 刘天琦, 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.
- [8] BEDIKAKO B A, KLING K L, RIBERIRO P F. Multi-agent system architecture for smart home energy management and optimization[C] // 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Copenhagen, 2013: 1-5.
- [9] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 46-52.

- YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-objective optimal placement of energy storage systems in an active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 46-52.
- [10] 刘子秋, 黄民翔. 基于可靠性与经济的计及微电源自身特性的微电网能量优化配置[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1352-1357.
- LIU Ziqiu, HUANG Minxiang. Optimal energy allocation of microgrid based on reliability and economy by considering characteristics of micro source[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1352-1357.
- [11] 郭力, 刘文建, 焦冰琪, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 524-536.
- GUO Li, LIU Wenjian, JIAO Bingqi, et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 524-536.
- [12] 米阳, 王成山. 基于负荷估计的光柴独立微网频率优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 115-121.
- MI Yang, WANG Chengshan. Frequency optimization control for isolated photovoltaic-diesel hybrid microgrid based on load estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 115-121.
- [13] 艾芊, 章健. 基于多代理系统的微电网竞价优化策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 46-51.
- AI Qian, ZHANG Jian. Optimization bidding strategies of microgrids based on multi-agent system[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 46-51.
- [14] 江润州, 邱晓燕, 李丹, 等. 含储能系统的多微网智能配电网系统经济运行[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3596-3602.
- JIANG Runzhou, QIU 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.
- [15] 雷金勇, 谢俊, 甘德强. 分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(27): 29-36.
- LEI Jinyong, XIE Jun, GAN Deqiang. Optimization of distributed energy system and benefit analysis of energy saving and emission reduction[J]. Automation of Electric Power systems, 2009, 33(27): 29-36.
- [16] Regulatory information - SCE load profiles SCE dynamic load profiles[EB/OL]. <https://www.sce.com/wps/portal/home/regulatory/load-profiles/dynamic-load-profiles>.
- [17] WANG Hao, HUANG Jiangwei. Joint investment and operation of microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 833-845.

收稿日期: 2016-07-20; 修回日期: 2016-08-29

作者简介:

祖其武(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微网能量管理; E-mail: zuqw1991@163.com

牛玉刚(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为随机系统、无线传感网络、智能电网; E-mail: acniuyg@ecust.edu.cn

陈蓓(1985—), 女, 博士, 工程师, 研究方向为能源转换与储存技术、能源系统管理、优化与控制技术研究。E-mail: chenbei63@yahoo.com

(编辑 张爱琴)