

安全可靠约束下的微电网电能最优调度模型设计研究

傅予, 李铁

(国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:微电网本质上是一个主动配电网,是分布式电源(DG)系统和不同负荷在配电网电压水平上的联合体。通过分析微电网中安全可靠性以及节能环保等因素,在符合安全可靠约束的前提下,设计综合分析微电网运行成本、电压偏差的微电网多目标经济调度模型,实现微电网电能的最优化调度。通过在模型内设置符合系统安全性以及可靠性的电压安全裕度以及失负荷率的安全约束指标,采用粒子群-细菌觅食(PSO-BF)算法求解微电网多目标经济调度模型,在应用过程中考虑系统发电成本、燃料成本、设备运行维护成本、同大电网运行交互成本以及污染气体排放罚款成本,实现微电网电能优化调度问题的求解。实验结果表明,安全可靠约束下的 PSO-BF 模型相比于 PSO 等传统模型进行微电网电能调度收敛效率高,节能效果显著。

关键词:安全可靠;约束;微电网;最优调度模型;粒子群-细菌觅食(PSO-BF)算法

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22397

Research on Design of Optimal Scheduling Model for Microgrid Electrical Energy Under the Constraints of Safety and Reliability

FU Yu, LI Tie

(State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shengyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: The microgrid is essentially an active distribution network, which is a combination of the distributed generation (DG) system and different loads at the distribution network voltage level. By analyzing factors such as safety and reliability, energy conservation and environmental protection in the microgrid, and under the premise of meeting safety and reliability constraints, a microgrid multi-objective economic dispatch model comprehensively analyzing the operating costs and voltage deviations of the microgrid was designed to optimize the power of the microgrid scheduling. By setting the safety constraint indexes of voltage safety margin and load loss rate in line with the system safety and reliability in the model, the particle swarm optimization-bacteria foraging (PSO-BF) algorithm was used to solve the multi-objective economic dispatch model of the microgrid. In the application process, system power generation costs, fuel costs, equipment operation and maintenance costs, interaction costs with large grid operations, and pollution gas emission fines were considered to solve the problem of optimal scheduling of microgrid power. The experimental results show that the PSO-BF model under safety and reliability constraints has higher convergence efficiency and significant energy saving effect than traditional models such as PSO for power dispatching in microgrids.

Key words: safety and reliability; constraints; microgrid; optimal scheduling model; particle swarm optimization-bacterial foraging(PSO-BF)algorithm

随着国家对电网项目的不断重视和发展,配电网改造和新建项目日益增多,而以主动配电网为形态构建的微电网对电能调度也提出了极高

的要求。只有不断提高电力系统的环保、经济等状况才能适应电网结构和功能日益发展的趋势。若要实现微电网和主动配电网的良好发展,需要

基金项目:国家电网公司科技项目资助(2018ZX-09)

作者简介:傅予(1971—),男,硕士,高级工程师,Email:cygj4012008@163.com

解决日益增长的能源需求与能源匮乏的冲突、能源污染与环保的冲突;增强电力能源利用率、优化能源分配;为电网的发展营造一个安全高效的环境^[1-2]。

以解决上述问题为目的,首先,合理安排电力燃料种类、污染物分解、电网安全等要素,实现电力发展环境最优化。其次,电网供电质量和供电安全性等问题得到部分缓解,依赖于分布式电源以微电网形式融入到大电网中。但微电网优化模式日益繁琐,导致可再生能源存在随机性以及间歇性的弊端,这些缺点使得微电网调度方法以及控制策略的研究增加了难度^[3]。基于这些因素,为了实现微电网电能的最优调度,设计一种考虑安全可靠性约束下的微电网电能最优调度模型。

1 安全可靠性约束下的微电网电能最优调度模型设计

1.1 微电网电能优化调度多目标模型构建

位于孤网状态下的微电网,既要做到排污量和运行成本最低,又要符合热电负荷的规定以及其内部单元的运转模式。位于并网状态下的微电网,解决好与大电网潮流双向流动以及电能互购等难题是关键^[4],也要顾及上述的影响因素。设计的微电网系统电能优化调度公式为

$$\min Z_{\text{cost}} = \lambda_1 C_g + \lambda_2 C_e \quad (1)$$

式中: Z_{cost} , C_g , C_e 分别为微电网总费用、系统发电价格和污染气体排放罚款成本; λ_1, λ_2 分别为 C_g, C_e 的权重系数。

经分析可知,发电成本以及排污罚款成本是微电网系统运行成本的主体。根据经济杠杆原理,来探究不同要素对发电成本的影响程度,影响越大其权重比例就越大,则 $0 \leq \lambda_1, \lambda_2 \leq 1$ 。

1.2 微电网安全性与可靠性约束分析

1.2.1 节点电压安全裕度

通过控制节点电压的方式来促进微电网系统内部元件的稳定运转。文章用电压安全裕度来描述微电网安全性指标^[5],即微电网最低电压偏差安全裕度以给定的置信水平要求。

$$M_{\text{VSM}} = P \left[\min \left(\frac{\Phi ||\delta U_i| - |\Delta U_{i,t}||}{|\delta U_i|} \right) \geq \xi \right] \geq \beta \quad (2)$$

式中: M_{VSM} 为最低电压偏差安全裕度; P 为调整系数; $\Delta U_{i,t}, \delta U_i$ 分别为 t 时段节点 i 的电压偏差量与其允许的最大节点电压偏差,文章取 δU_i 为额定

值的 $-8 \sim +5\%$; ξ, β 分别为电网安全裕度的门限值、电网节点电压安全裕度的置信水平; Φ 为 $0-1$ 状态变量,具体公式如下:

$$\Phi = \begin{cases} 1 & |\Delta U_{i,t}| \leq |\delta U_i| \\ 0 & |\Delta U_{i,t}| > |\delta U_i| \end{cases} \quad (3)$$

1.2.2 供电可靠水平

基于微电网的弊端引起高估系统出力,为实现系统安全牢固,文章将失负荷概率看成微电网供电可靠指标,也就是系统总负荷的功率始终大于微电网系统总输出功率^[5]。所以,用系统失负荷概率 P_{LOLP} 以给定的置信水平要求来描述处于未知状态的微电网供电稳定性:

$$P_{\text{LOLP}} = PY \leq 1 - \gamma \quad (4)$$

其中

$$Y = \sum_{i=1}^m k_{i,t} (P_{i,t} + r_{u,i}) + (P_{\text{line},t} + R_{\text{line},t}) + \sum_{j=1}^w k_{j,t} (P_{j,t} \pm \delta_{j,t}^w) + \sum_{l=1}^v k_{l,t} (P_{l,t} \pm \delta_{l,t}^s) \leq P_{L,t} \pm \delta_{L,t}^L$$

式中: γ 为微电网系统真实性的置信水平; m, w, v 分别为微电网中可控机组、风力发电机(wind turbine, WT)以及光伏电池(photo voltaic, PV)的数目; $r_{u,i}$ 为 i 个可控机组爬坡率的最大值; $P_{\text{line},t}, R_{\text{line},t}$ 分别为 t 时段中微电网向低电压配电网(distribution network, DN)购电电量以及旋转待用容量; $k_{x,t}$ 为从 $(0, 1)$ 之间任意选取的状态变量,其用于描述 t 时段分布式电源(distributed generation, DG)是开启还是闭合, $x=i, j, l$; $\delta_i^L, \delta_{j,t}^w, \delta_{l,t}^s$ 分别为该时段负荷预测误差、WT以及PV出力误差; $P_{i,t}, P_{j,t}, P_{l,t}, P_{L,t}$ 分别为 t 时段可控机组、WT、PV以及负荷预测值。

1.3 考虑安全性与可靠性的微电网经济调度

1.3.1 多目标模型中各分量的求解

1) 系统发电成本 C_g 。燃料费用、运行维护费用、和大电网交互电能的费用共同构成了隶属于微电网各单元的发电成本。因此这几项也是微电网系统的发电成本。则

$$C_g = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^n (C_{\text{fuel},k} + C_{\text{om},k}) + C_{\text{grid}} \right] \quad (5)$$

式中: n 为处于微电网内部的分布式发电单元量; T 为小时数;用 $C_{\text{fuel},k}, C_{\text{om},k}, C_{\text{grid}}$ 分别为第 k 个分布式单元的燃料费用、运行维护费用以及微电网与大电网的交互费。

2) 系统燃料成本 C_{fuel} 。新式环保的风力以及光伏发电方式具有无废气排放、无燃料费用的优

势,通过采用这两种方式来减少发电成本。所以,除了计算微型燃气轮以及燃料电池在发电时所需燃料成本以及维修费用,再加上两种发电方式的功率消耗即可^[6]。下面公式描述了燃料成本的计算方法:

$$C_{\text{fuel},k} = \frac{C_k C_{\text{st}}(P_{\text{DG},k}) C_{\text{op}}(P_{\text{DG},k})}{f(P_{\text{DG},k})} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{DG},k}$, C_k 分别为第 k 个分布式单元的功率消耗以及燃料费用; $f(P_{\text{DG},k})$, $C_{\text{st}}(P_{\text{DG},k})$, $C_{\text{op}}(P_{\text{DG},k})$ 分别为第 k 个分布式单元的所需燃料、机组启动所需燃料以及运转阶段所需燃料费用。

3) 设备的运行维护成本 C_{om} 。机器开关费用、人工费用、网络消耗等构成了微电网设备运行的维护成本,一般来说,微电网设备运行成本与电能的形成用以下公式描述,两者是线性关系^[7]:

$$C_{\text{om},k} = \zeta_k P_{\text{DG},k} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: ζ_k 为第 k 个分布式单元设备的运转费用消耗。

4) 与大电网电能交互成本 C_{grid} 。处于并网运行模式使得微电网可以在短缺电能的情况下向大电网索取电能,在自身正常运转又有多余电能的情况下,向大电网出售电能,为微电网的运行提供了极大的便利^[8]。两者的电能交互成本用下式表示:

$$C_{\text{grid}} = \begin{cases} C_{\text{buy}} P_{\text{grid}}(t) & P_{\text{grid}}(t) \geq 0 \\ -C_{\text{sell}} P_{\text{grid}}(t) & P_{\text{grid}}(t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_{grid} , C_{buy} , C_{sell} 分别为微电网与大电网的交互功率、微电网从大电网购电价格以及向大电网售电价格。

5) 污染气体排放罚款成本 C_e 。基于部分发电单元在产出电能的阶段里,释放污染性气体使得生存环境遭到破坏,我国出台了关于污染物排放的罚款政策,采用分析不同发电单元产出状况的方式算出关键性污染物的释放量。碳化物、氮化物、硫化物是排放气体的主要污染源^[9],所以罚款费用主要来源于此类污染物的排放。以下公式表示微电网发电污染气体处罚费用:

$$C_e = \sum_{j=1}^n [\zeta_{kj}(P_{kj} - f_{jp}) - \zeta_{kj}\delta_{kj}] \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

式中: ζ_{kj} 为第 k 个分布式单元第 j 种污染物处罚系数; f_{jp} , δ_{kj} 分别为第 j 种污染物处罚费用率以及污

染物数量种类; P_{kj} 为第 k 个分布式单元第 j 种污染物估计电量费用率。

1.3.2 约束条件

微电网运转既要符合式(2)~式(4)又要执行如下规则,以实现其高效便捷安全的运转^[10]。

1) DG 出力约束:

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

式中: $P_{i,\max}$, $P_{i,\min}$ 分别为第 i 个 DG 出力上、下限。

2) 微电网功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^m k_{i,t}(P_{i,t} + \delta_{i,t}) + \sum_{j=1}^w k_{j,t}(P_{j,t} \pm \delta_{j,t}^w) + \sum_{l=1}^v k_{l,t}(P_{l,t} \pm \delta_{l,t}^s) + (P_{\text{line},t} + \delta_{\text{line},t}) = P_{\text{L},t} \pm \delta_{\text{L},t}^l \quad (11)$$

式中: $\delta_{\text{line},t}$ 为 t 时段 DG 与微电网交换功率的调整量。

式(11)中 $\delta_{\text{line},t}$ 与 $R_{\text{line},t}$ 满足条件 $\delta_{\text{line},t} \leq R_{\text{line},t}$ 。

3) 微电网与主网联络线传输功率约束:

$$P_{\text{line},\min} \leq P_{\text{line},t} \leq P_{\text{line},\max} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{line},\max}$, $P_{\text{line},\min}$ 分别为联络线传输功率的上、下限。

4) 可控机组爬坡率约束:

$$r_{d,i} \Delta t \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq r_{u,i} \Delta t \quad (13)$$

式中: $r_{d,i}$ 为 i 个可控机组爬坡率的最小值; Δt 为可控机组爬坡的时间。

5) 输电线路传输功率安全约束。通过将各单元输送功率控制在允许的最高点以下的方式,使得电能传输高效、平稳地进行^[6]:

$$\sum_i [(P_{i,t} - l_{i,t}) S_{i,j,t}] \leq P_{i,j,\max} \quad (14)$$

式中: $P_{i,t}$ 为节点 i 在第 t 时段内的功率; $l_{i,t}$ 为支路 $i-j$ 可接受输出功率的最高点功率; $P_{i,j,\max}$ 为支路 $i-j$ 支路上的最大传输功率; M 为微电网总节点量,满足 $i \leq M$ 条件; $S_{i,j,t}$ 为在 t 时段内节点 i 输入功率对 $i-j$ 的灵敏度。

1.3.3 基于 PSO-BF 算法的微电网能量优化调度

采用粒子群-细菌觅食算法 (particle swarm optimization-bacterial foraging, PSO-BF) 修正粒子速度和位置,在避免粒子早熟收敛的情况下,构建微电网电能最优调度模型。考虑系统发电成本、燃料成本、设备运行维护成本、同大电网运行交互成本以及污染气体排放罚款成本,对微电网电能调度问题进行优化求解^[10]。

粒子群算法能迅速找到解决问题的最佳方式,细菌觅食算法有利于细菌各分子通过趋化价

段发掘最近范围内的最佳值,防止最佳解所处范围被细菌过滤掉的现象^[11]。所以,粒子群-细菌觅食算法是细菌觅食算法有发展规律的趋化过程,融入到粒子群算法进行部分查找阶段,不仅改进了粒子群算法与细菌觅食算法的弊端,又实现了此算法快速、高效、目标明确的工作状态,改善了局部查找的功能。

PSO-BF算法修正粒子速度和位置表达式为

$$\begin{cases} V'_i = w \cdot V_i + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (pbest_i - X_i) + \\ c_2 \cdot \text{rand} \cdot (gbest_i - X_i) \\ X'_i = X_i + V'_i \end{cases} \quad (15)$$

式中: V'_i, X'_i 分别为修正后的速度和位置; V_i, X_i 分别为粒子原速度以及位置; t 为某一时间段; w 为粒子速度环境影响系数; $pbest, gbest$ 分别为各粒子的最佳位置以及种群内全部粒子的最佳位置; c_1, c_2 分别为 $pbest, gbest$ 粒子的学习因子; rand 为0或1变量。

以下公式描述了 PSO-BF 的修正过程:

$$\begin{cases} V'_i = w \cdot V_i + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (pbest_i - X_i) + \\ c_2 \cdot \text{rand} \cdot (gbest_i - X_i) \\ P(i, m+1, n, H) = P(i, m, n, H) + c(i) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P(i, m+1, n, M)$ 为粒子 i 在第 $m+1$ 代趋向第 n 代繁殖的位置; $P(i, m, n, M)$ 为粒子 i 在第 m 代趋向第 n 代繁殖的位置; $c(i)$ 为步长; H 为最大迭代次数; m 为翻转次数; n 为趋化次数。

将 PSO-BF 进行反复运算。假设有这样一个球,其半径用 ε 来表示,球心用粒子整体最佳位置 $gbest$ 来表示, X_i 到球心的长度用 D 来描述。文章采用以下公式来避免粒子早熟收敛的现象:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - gbest)^2} \quad (17)$$

式中: N 为现有的粒子量。

当粒子 i 在球里面时,则 $D < \varepsilon$ 。

设置 M 表示球内的粒子量, esp 表示可接受的粒子处于球内概率的最大值,则有:

1)可随机将球内的粒子分布到空间,应满足 $M/N > esp$ 的条件。

2)不能将球内的粒子分布到空间,应满足 $M/N < esp$ 的条件。

下文对 PSO-BF 算法如何进行微电网优化调度求解进行了详细的描述:

1)将分布式电源的出力、负荷、风速等数据进行还原设置,重新定义 PSO-BF 算法的规模大

小、最大迭代次数、翻转次数以及趋化次数分别为 s, H, m 以及 n 。

2)求解即刻全局以及个体最佳的分布式电源出力 $gbest, pbest$ 时,应采用目标函数对粒子的适应度值实施评估,同时通过公式(16)对分布式电源出力进行修正。

3)对完成修正的粒子 i 适应度 $J(i, m)$ 同粒子动态波动时的最佳适应度值,以及翻转次数 m 值,是否趋近于阈值动态变化次数 N_s ,如果存在 $J(i, m) < J_{\text{last}}$ 和 $m < N_s$,粒子应持续变化,再进行修正,否则运行过程4)。

4)观察趋化次数 n 是否超过最大趋化迭代次数 N_c ,若超过,执行5);若没超过,执行2)。

5)采用式(17)得到各粒子到 $gbest$ 的长度 D ,然后决定是否分散粒子。

6)通过公式(15)来修正粒子的速度、位置等数据。

7)观察迭代次数 H 是否超过最大迭代次数 $Iter$ 的上限,若超过,执行8);若没超过,执行2)。

8)最后得到整体的最佳解也就是微电网机组的最佳出力,实现微电网电能的最优调度,得到微电网最优调度模型为

$$\min F = \sum_{i=1}^n [C_{d,t}(\delta_{i,t}, \delta_{b,i}) + C_{liDe,t}(P_{liDe,t}) + CM_{i,t}(P_{i,t})] \quad (18)$$

式中: $C_{d,t}$ 为 t 时段微电网出现的交换费用; $\delta_{i,t}$ 为 t 时段可控机组 i 的维护费用; $\delta_{b,i}$ 微电网运行费用; $C_{liDe,t}$ 为最大允许目标函数偏离程度; $P_{liDe,t}$ 为微电网机组运行效率; $CM_{i,t}$ 为机组 i 在第 t 时段的功率最大值; $P_{i,t}$ 为机组 i 在第 t 时段的负荷功率。

2 实验分析

2.1 运行成本检测

为了验证改进调度模型的有效性及其可行性,实验以 PSO 调度模型^[12]、机会约束调度模型^[13]和上文中 PSO-BF 调度模型下的某微电网运行成本为基础进行实验分析。

表1为不同调度模型下微电网运行成本表。分析表1数据可知,PSO 调度模型的燃料成本远远高于其它两种调度模型,并且运行维护成本和污染罚款也高于其它两种调度模型。机会约束调度模型和 PSO-BF 调度的电能交互结果是负数,说明两种模型实现了同主网的交互融合,微电网通过向主网出售多余的电能的方式获得部

分收入,使得总的发电成本比 PSO 调度模型低,并且 PSO-BF 调度模型的总发电成本最低。因此能够得出,PSO-BF 调度模型下的实验微电网运行成本最低,模型调度效果最佳。

表 1 不同调度模型下微电网运行成本

Tab.1 Operation cost of microgrid under different scheduling models

项目	燃料成本/元	运行维护成本/元	污染罚款/元	电能交互成本/元	总发电成本/元
PSO 调度模型	1 153.248 0	2 401.765 0	4.447 1	0.000 0	3 660.547 6
机会约束调度模型	530.155 0	1 931.108 2	1.882 8	-56.703 3	2 427.547 2
PSO-BF 调度模型	540.423 5	1 926.808 6	2.001 2	-160.176 5	2 130.371 4

系统在孤网运行情况时,热电功率平衡仅能从微电网内部供给,实验从经济性能最大化出发,得到本文调度模型的优化结果用图 1 和图 2 描述。

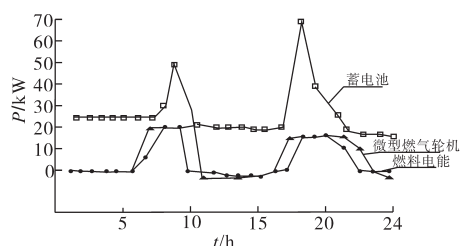


图 1 不同发电设备负荷总功率分析

Fig.1 Analysis of load total power with different power equipments

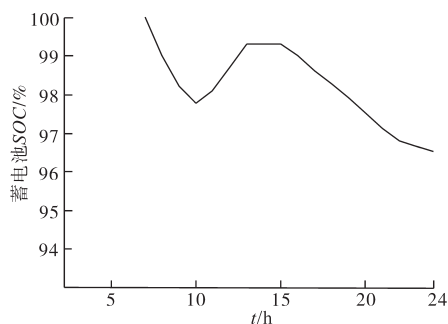


图 2 微型燃气轮机蓄电池 SOC 变化趋势

Fig.2 SOC change trend of micro gas turbine battery

由图 1 可知,0~7 h 中,本文调度模型下的实验微电网负荷总功率低于新能源发电功率,有部分能量残存,因为蓄电池能量已经饱和,所以剩余能量只能使用卸荷负载删除,7~10 h 中,新能源电量不够充分,应及时使用蓄电池放电进行补充,补充不充分的部分根据发电成本最小化按顺序启用燃料电池、微型燃气轮机发电。

由图 2 可知,在 7~10 h,蓄电池 SOC 降低,主要是由于电能负荷需要增大,蓄电池输出电能用于补贴电能负荷;在 10~13 h 中,新能源电能在保证负荷的同时剩余能量将补充蓄电池,蓄电池

SOC 提高。13~15 h 中,假使蓄电池的持续供给量如破容量限制,则充电暂停,在 15 h 以后,蓄电池输出电能,蓄电池的 SOC 下降。综合分析这些结果说明,本文调度模型实现了配电网的优化调度,确保微电网电能变化的平稳性。

2.2 不同调度模型的收敛状态监测

实验检测传统基于 PSO 的配电网调度模型和 PSO-BF 调度模型在目标函数中运行 20 次后,两种调度模型在微电网电能最优调度过程中的收敛结果如图 3 所示。

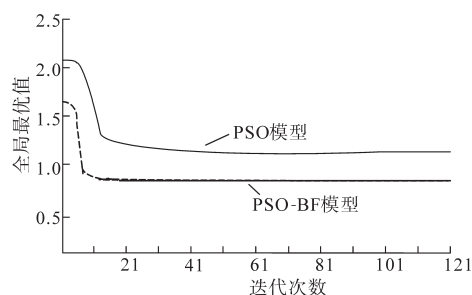


图 3 不同调度模型的收敛曲线

Fig.3 Convergence curves of different scheduling models

分析图 3 能够看出,相对于基于 PSO 的配电网调度模型,基于 PSO-BF 模型的收敛效率更高,并且收敛精度比传统方法更强。PSO-BF 模型对细菌觅食算法进行了优化,提高了配电网电能调度的收敛性能。因此得知在全局搜索力和局部搜索过程中,PSO-BF 模型的性能最佳,具有搜索精度准确,收敛时间短,适合全局优化的特点,实用性能强。

2.3 优化结果及分析

采用 PSO-BF 模型和算法进行实时优化计算。实验以文献[14]提出的微电网系统为例。实验系统由风力发电单元以及含光伏发电单元、微型燃气轮机和储能单元各一台构成,如果不同单元参数和微电网购售过程的不同峰谷电价存在一定的差异,微电网以及大电网中联络线的最大客观传输量是 50 kW,设置储能单元原始 SOC 为 60%^[14],采用 PSO-BF 算法和统计方法,基于 Matlab 脚本程序在不同的运行状态下,实施微电网系统的仿真检验实验。

设定并网运行模式 1 为新能源和微型燃气轮机发电,储能单元放电;并网运行模式 2 为新能源和微型燃气轮机发电,从电网中购电,储能单元不发挥作用;并网运行模式 3 为新能源发电,储能单元放电,并且将多余的电量进行出售;并网运行模式 4 为新能源发电,多余的电量通过储能单

元进行充电。某日并网运行高峰时段的调度结果如表2所示。

表2 并网运行高峰时段调度结果

并网运行模式	风/光伏发电/MkW	微型燃气轮机/MkW	燃料电池/MkW	储能单元充电/MkW
1	21.31	4.3	0	0.0
2	12.29	21.0	0	0.0
3	98.86	0.0	0	0.0
4	65.52	0.0	0	12.1

并网运行模式	c	SOC变化/%	电网购电/MkW	电网售电/MkW
1	22.7	52.0	0.00	0.00
2	0.0	58.0	19.65	0.00
3	22.7	62.0	0.00	74.91
4	0.0	78.5	0.00	0.00

根据表2描述的 PSO-BF 调度模型在并网运行高峰时段调度结果可知:如果风能、光伏发电不能对负荷需求给予充足能量时,假使储能充分,储能单元则对缺额电能进行及时补充,可控为电源相对出力;假使储能不满,不能对储能单元实施充电,则微型燃气轮机及时对缺额电能进行补充,此时应向电网购电,并完成燃料电池的发电;如果风能、光伏发电量未到达最低值,则 PSO-BF 模型不再调控微电源出力;如果微电网中电能量未达到最低值,则 PSO-BF 调度模型放电向电网售电;假设储能不充分那么则使用剩余电量向储能单元补充电量。

设定孤岛运行模式1为新能源和微型燃气轮机发电,储能单元放电;孤岛运行模式2为新能源、微型燃气轮机和燃料电池发电;孤岛运行模式3为新能源发电,多余的电量通过储能单元进行充电;孤岛运行模式4为新能源和微型燃气轮机发电,多余的电量通过储能单元进行充电。孤岛运行高峰时段的调度结果如表3所示。

由表3可以看出,当配电网处于孤岛状态,采用 PSO-BF 调度模型的微电网可控微电源不必从上级电网调度电能,若风能、光伏发电无法提供微电网负荷需求并且储能能量足够,则储能单元放电将补充所缺电能;若微电网储能缺乏,则从微型燃气轮机以及燃料电池获取电能;当以上仍不能达到符合需求那么将依照等级减载。在风能、光伏发电足够充分时,剩余电量将对储能单元充电,在此基础之上的剩余电量会作用与小光伏单元出力。

实验检测 PSO-BF 调度模型的全天调度结果时,在上文中风力发电、光伏发电以及负荷 24 h 整点估计信息的基准上,假设三者间隔是 5 min,1 d

表3 孤岛运行高峰时段调度结果

Tab.3 Dispatching results of islanding operation during peak hours

孤岛运行模式	风/光伏发电/MkW	微型燃气轮机/MkW	燃料电池/MkW	储能单元充电/MkW
1	11.74	11	0	0.0
2	12.66	21	6	0.0
3	75.58	0	0	36.0
4	55.58	11	0	22.9

孤岛运行模式	风/光伏发电/MkW	微型燃气轮机/MkW	切负荷/MkW	切出力/MkW
1	22.7	46.0	0.00	0.0
2	0.0	65.0	2.72	0.0
3	0.0	70.6	0.00	4.7
4	0.0	59.9	0.00	0.0

的运动信息,采用并网双向功率流动模式的模拟统计得到的微电网的实际负荷作为评估标准,统计 PSO 调度模型和 PSO-BF 调度模型的实时调度交互功率以及日供电成本分别如图4、表4所示。

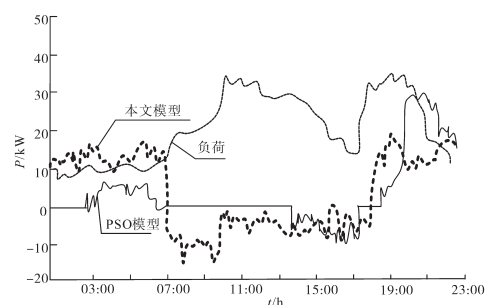


图4 微网与电网实时调度交互功率曲线

Fig.4 Interactive power curves for real-time dispatching of micro-network and power grid

表4 采用 PSO-BF 模型与 PSO 模型下实时调度日供电成本

Tab.4 Using PSO-BF model and PSO model to dispatch daily power supply cost in real time

模型	电网交互成本/元	燃气轮机成本/元	燃料电池成本/元	总成本/元
PSO-BF 模型	7.19	21.17	0	28.36
PSO 模型	44.28	0.00	0	44.28

分析图4可得,在7h以内,本文模型的实时调度交互功率较大,随后出现下降,在7~17h表现相对平稳,此后出现较大增幅。本文模型相对于 PSO 模型,在峰平时段对电网供电更有利,可有效起到平峰填谷的效果。

从表4可看出,PSO 模型下微电网实时调度每天供电成本是 44.28 元,PSO-BF 模型下微电网实时调度日供电成本是 28.36 元,每天供电成本比 PSO 模型降低 15.92 元,使成本降低到 30% 之多,说明 PSO-BF 调度模型具有较高的经济价值。

3 结论

文中设计了一种安全可靠性约束下的微电网电能最优调度模型,该模型采用 PSO-BF 算法修正粒子速度和位置,在避免粒子早熟收敛的情况下,构建微电网电能最优调度模型。可确保管理人员在谷时段通过储能单元实施充电储能,在峰平时段对电网供电,可以起到平峰填谷的效果。同时,实现了微电网的安全可靠性以及节能环保控制,提高了微电网总体调度质量。

参考文献

- [1] 李振坤,李一骄,宋德毅,等.独立型微电网日前与日内协调优化调度[J].电力科学与技术学报,2018,33(2):50-58.
Li Zhenkun, Li Yijiao, Song Siyi, *et al.* Coordinated optimal dispatch of independent microgrid before and during the day[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2):50-58.
- [2] 杨旭红,尹聪聪.基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J].电气传动,2020,50(5):75-80.
Yang Xuhong, Yin Congcong. Coordinated control strategy based on island mode optical storage DC microgrid[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [3] 余雪莹,李华强,杨龙杰,等.兼顾企业综合成本与用户用电体验的微电网双层优化配置[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):38-45.
Yu Xueying, Li Huaqiang, Yang Longjie, *et al.* Bi-level programming method for optimal sizing of grid-connected DC microgrid system based on economic efficiency of enterprises and customer electricity experience[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2):38-45.
- [4] 魏伟,孙恒楠,罗凤章,等.基于开放市场环境的多微电网系统优化调度方法[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(7):19-25.
Wei Wei, Sun Hengnan, Luo Fengzhang, *et al.* Multi-microgrid system optimal scheduling method based on open market[J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2016, 28(7): 19-25.
- [5] 李强,车文龙.基于改进粒子群优化神经网络的电机故障诊断[J].电气传动,2020,50(1):103-108.
Li Qiang, Che Wenlong. Motor fault diagnosis based on improved particle swarm optimization neural network[J]. Electrical Drive, 2020, 50(1): 103-108.
- [6] Swaminathan S, Pavlak G S, Freihaut J. Sizing and dispatch of an islanded microgrid with energy flexible buildings[J]. Applied Energy, 2020, 276(C): 115355.
- [7] 张世翔,田琴丹.基于低碳效益的微电网能量优化调度[J].工业安全与环保,2016,42(9):91-94.
Zhang Shixiang, Tian Qindan. Energy optimization scheduling model of the micro-grid reflect low-carbon benefits[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(9):91-94.
- [8] Tooryan F, Hassanzadeh Fard H, Collins E R, *et al.* Smart integration of renewable energy resources, electrical, and thermal energy storage in microgrid applications[J]. Energy, 2020, 212(1):118716.
- [9] 董苏.基于超短期功率预测的配电网调度模型[J].计算技术与自动化,2020,39(2):73-77.
Dong Su. Distribution network dispatching model based on ultra-short-term power forecast[J]. Computing Technology and Automation, 2020, 39(2):73-77.
- [10] 蒙璟,李训聿,丁霞燕.基于改进自适应权重多目标粒子群算法的分布式电源优化配置[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):55-60,106.
Meng Jing, Li Xunyu, Ding Xiayan. Optimal allocation of distributed generation based on improved adaptive weight multi-objective particle swarm optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2):55-60, 106.
- [11] 潘晨,滕欢,梁梦可,等.基于改进粒子群算法考虑阀点效应的经济负荷最优分配[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):151-156,162.
Pan Chen, Teng Huan, Liang Mengke, *et al.* Optimal distribution of economic loads based on the improved particle swarm optimization considering valve-point effects[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1):151-156, 162.
- [12] 王向红,钱文姝.基于改进 PSO 算法的微电网调度方法[J].电网与清洁能源,2017(7):53-57.
Wang Xianghong, Qian Wenshu. Micro-grid scheduling method based on improved PSO algorithm[J]. Power Grid and Clean Energy, 2017(7):53-57.
- [13] 盛四清,孙晓霞.含风电场的混合机会约束经济调度模型[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(8):82-86,102.
Sheng Siqing, Sun Xiaoxia. Mixed chance constrained economic dispatch model for wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(8): 82-86, 102.
- [14] 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.
- [15] 张弛,曾杰,曾嵘,等.直流孤岛微电网的两级功率协同控制方法[J].电气传动,2019,49(12):58-63.
Zhang Chi, Zeng Jie, Zeng Rong, *et al.* A two stage cooperative power control method for islanded DC microgrid[J]. Electric Drive, 2019, 49(12):58-63.

收稿日期:2020-09-07

修改稿日期:2020-09-27