

基于智能单粒子算法的微电网经济调度

吴昊, 王艳松

(信息与控制工程学院(中国石油大学(华东)), 山东 青岛 266580)

摘要: 为充分消纳可再生能源, 以分时电价为杠杆, 通过经济调度手段, 对微电网内分布式发电资源进行优化配置。在综合考虑各类分布式电源发电成本和环境成本的基础上, 计及热电联供收益、电能交易收益、电价补贴等多项运行收益, 建立微电网多目标经济函数。考虑储能系统在不同时间断面上的耦合性问题以及时移特性, 结合分时电价、净负荷曲线进行预调度。考虑微电网实时调度的快速性要求, 运用智能单粒子算法搜索调度变量的最优解, 并与常规粒子群算法进行对比。算例分析了基于冬季典型日数据的微电网调度方案和各项经济指标, 结果表明微电网调度模型、调度策略和优化算法合理有效。

关键词: 微电网; 有功优化; 储能系统; 分阶段经济调度策略; 智能单粒子算法

Economic dispatch of microgrid using intelligent single particle optimizer algorithm

WU Hao, WANG Yansong

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: For the purpose of absorbing the renewable energy sources adequately, the time-of-use electricity price is used as leverage and economic dispatching as a means to realize the optimal arrangement of distributed generation resources. On the basis of consideration for generation cost and environmental cost, economic incomes such as CHP income, energy trading income and renewable energy distributed generation subsidy are added to establish a multi-objective function. A pre-dispatching strategy which considers the coupling between different time intervals of storage system as well as time-of-use electricity price, net load curve is proposed. The intelligent single particle optimizer is applied to seek the best solution of dispatching variables compared to particle swarm optimization. The analysis of dispatching scheme and economic index based on typical winter data validate the effectiveness of dispatching model, dispatching strategy and optimal algorithm.

Key words: microgrid; active power optimization; battery energy storage system; phased economic dispatching strategy; intelligent single particle optimizer (ISPO)

0 引言

近年来, 分布式电源(distributed generation, DG)因其环境友好, 输、配电费用低, 灵活高效^[1-2]等优点大量接入电网。但风电、光电等可再生能源发电具有间歇性、波动性, 不宜分散接入电网^[3-4], 因此含分布式电源的微电网(microgrid, MG)作为新的电力组织形式快速发展, 成为主网供电的有效补充^[5-6]。微电网内部能源结构复杂、分布式电源类型多样, 且具有经济、环保等多目标属性。在此背景下, 微电网的经济调度成为国内外学者研究的热点。

储能系统(energy storage system, ESS)的能量双向流动性对于平滑微电网可再生能源发电波动、提

高微电网供电稳定性等具有显著作用^[8]。文献[9]利用电动汽车的储能特性, 降低了微电网的静态储能设备投资和运行费用。本文针对微网中广泛应用的蓄电池储能系统(battery energy storage system, BESS), 综合考虑储能设备使用周期、电能交易成本、负荷峰谷性三个因素进行储能系统预调度, 以降低微电网的投资、运行成本。

在经济调度模型的求解方面, 传统线性规划方法和新型智能算法应用广泛。文献[10]运用混合整数线性规划求解风力发电经济调度模型, 文献[11]运用改进的细菌觅食算法搜索各分布式电源的最优出力。在智能算法中, 粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)因其简洁易实现、参数调整简单

等特点受到青睐。文献[12]采用基于迁移态的粒子群算法对分布式电源出力进行优化；文献[13]采用离散二进制粒子群算法对离网状态的微电网模型进行优化。本文应用基于粒子群算法改进的智能单粒子算法(Intelligent Single Particle Optimizer, ISPO)寻找经济调度模型的最优解,与粒子群算法相比,智能单粒子算法提高了微电网的实时调度速度。

建立热电联产型(Combined Heat and Power, CHP)微电网多目标经济调度模型,结合冬季典型日数据,验证模型、调度策略、优化算法的有效性。

1 微电网经济调度模型

微电网基本结构如图1所示。

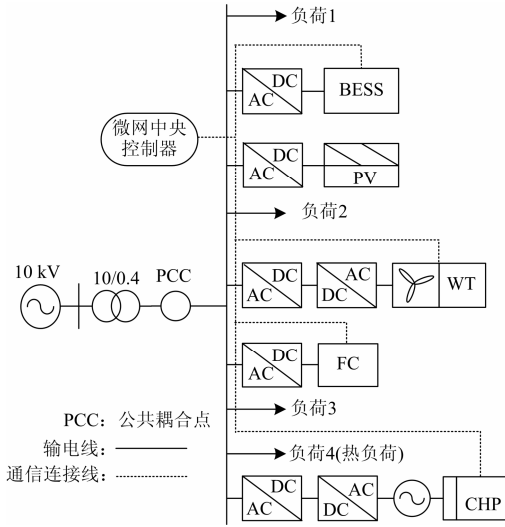


图1 微电网基本结构图

Fig. 1 Basic construction of microgrid

微型燃气轮机(MT)、燃料电池(FC)发电模型采用文献[14]中数学模型,光伏电池组(PV)发电模型采用文献[15]中数学模型,小型风机(WT)发电模型采用文献[12]中数学模型,蓄电池储能系统(BESS)充放电模型采用文献[16]中数学模型。

1.1 多目标函数

综合考虑微电网的发电成本最低、环境成本最低和运行经济收益最高,建立多目标函数为

$$f(P) = \min T \cdot \sum_{t=1}^K (F_1(t) + F_2(t) - F_3(t)) \quad (1)$$

式中: K 为调度时段个数; T 为调度时段时长; $F_1(t)$ 为发电成本; $F_2(t)$ 为环境成本; $F_3(t)$ 为经济收益。

1.1.1 发电成本

微电网发电成本包含各分布式电源燃料成本及运行维护费用,如式(2)。

$$F_1(t) = C_F(t) + C_{OM}(t) \quad (2)$$

式中: $C_F(t)$ 为分布式电源燃料成本,元/h; $C_{OM}(t)$ 为分布式电源运行维护成本,元/h。

其中,分布式电源燃料成本为

$$C_F(t) = P_{MT}(t) \cdot f_{MT} + P_{FC}(t) \cdot f_{FC} \quad (3)$$

式中: $P_{MT/FC}(t)$ 为 t 时段微型燃气轮机及燃料电池发电功率, kW; $f_{MT/FC}$ 为微型燃气轮机及燃料电池生产单位电能的燃料成本,元/kW·h。

分布式电源运行维护成本为

$$C_{OM}(t) = P_{MT}(t) \cdot k_{MT} + P_{FC}(t) \cdot k_{FC} + P_{BESS}(t) \cdot k_{BESS} \quad (4)$$

式中: $P_{BESS}(t)$ 为 t 时段储能系统充放电功率, kW; $k_{MT/FC/BESS}$ 为 t 时段微型燃气轮机、燃料电池、储能系统生产单位电能的运行维护成本,元/kW·h。

1.1.2 环境成本

常规能源发电产生 CO_x 、 SO_2 、 NO_x 等污染物,为减少环境污染,提高新能源发电比例,将常规能源发电污染物治理费用计为环境成本。

$$F_2(t) = P_{MT}(t) \cdot (w_{MTCO} \cdot \sigma_{CO} + w_{MTSO} \cdot \sigma_{SO} + w_{MTNO} \cdot \sigma_{NO}) + P_{FC}(t) \cdot (w_{FCCO} \cdot \sigma_{CO} + w_{FCNO} \cdot \sigma_{NO} + w_{FCO} \cdot \sigma_{SO} + w_{FCNO} \cdot \sigma_{NO}) \quad (5)$$

式中: $w_{MTCO/MTSO/MTNO}$ 为微型燃气轮机生产单位电能的排污数量, g/kW·h; $w_{FCCO/FCO/FCNO}$ 为燃料电池生产单位电能的排污数量, g/kW·h; $\sigma_{CO/NO/SO}$ 为单位污染物治理费用,元/g。

1.1.3 运行经济收益

微电网运行的经济收益由电能交易收益、热电联产制热收益、可再生能源发电补贴构成。

$$F_3(t) = C_{GRID}(t) + C_{CHP}(t) + C_{SUB}(t) \quad (6)$$

式中: $C_{GRID}(t)$ 为电能交易收益,元/h; $C_{CHP}(t)$ 为热电联产制热收益,元/h; $C_{SUB}(t)$ 为可再生能源发电补贴,元/h。

其中,微电网通过联络线与主网进行功率交换,利用分时电价差进行电能交易获取收益。

$$C_{GRID}(t) = |P_{GRID}(t)| \cdot price(t) \quad (7)$$

式中: $P_{GRID}(t)$ 为 t 时段微电网与主网的交换功率, kW; $price(t)$ 为 t 时段电能交易价格, $P_{GRID}(t) > 0$ 取分时购电价格, $P_{GRID}(t) < 0$ 取分时售电价格,元/kW·h。

提供电能的同时,微电网利用微型燃气轮机进行热电联产,实现能量梯级利用、获取制热收益。

$$C_{CHP}(t) = Q(t) \cdot q_{CHP} \quad (8)$$

式中: $Q(t)$ 为微电网 t 时段制热功率, kW; q_{CHP} 为单位制热收益,元/kW·h。

为鼓励新能源建设,国家对分布式光伏发电、分布式风力发电施行全电量补贴政策。

$$C_{\text{SUB}}(t) = (P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t)) \cdot c_{\text{SUB}} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{WT/PV}}(t)$ 为 t 时段 WT 和 PV 的发电功率, kW; c_{SUB} 为可再生能源分布式发电补贴, 元/kW·h。

1.2 约束条件

本文在考虑功率平衡、分布式电源出力及联络线容量等约束的基础上, 重点分析了蓄电池储能系统运行约束。

1.2.1 功率平衡约束

功率平衡约束是微电网运行的关键约束, kW, 即微电网有功源功率之和与微电网负荷需求时时相等。

$$P_L(t) = P_{\text{MT}}(t) + P_{\text{FC}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{GRID}}(t) + P_{\text{BESS}}(t) \quad (10)$$

式中, $P_L(t)$ 为 t 时段微电网内的负荷需求, kW。

1.2.2 分布式电源出力上下限约束

分布式电源出力受发电特性和环境条件制约。

$$\underline{P}_i(t) \leq P_i(t) \leq \overline{P}_i(t) \quad (11)$$

式中: $P_i(t)$ 为 t 时段分布式电源 i 发电功率, kW;

$\overline{P}_i(t)$ 、 $\underline{P}_i(t)$ 为 t 时段分布式电源 i 出力上/下限, kW。

1.2.3 联络线容量约束

联络线传输微电网与主网之间的双向功率流, 自身存在容量限制:

$$|P_{\text{GRID}}(t)| \leq \overline{P}_{\text{GRID}} \quad (12)$$

式中, $\overline{P}_{\text{GRID}}$ 为联络线容量上限, kW。

1.2.4 蓄电池储能系统运行约束

蓄电池储能系统具有时间耦合特性, 其 t 时段电量与 $t-1$ 时段电量相关:

$$E(t) = E(t-1) - P_{\text{BESS}}(t) \cdot T \cdot \eta_{\text{C/D}} - Z \cdot E_{\text{rated}} \quad (13)$$

式中: $E(t)$ 为 t 时段储能系统电量, kW·h; E_{rated} 为储能系统额定容量, kW·h; $\eta_{\text{C/D}}$ 为储能系统充放电效率; Z 为储能系统自放电损耗比例。

储能系统自身特性决定其充放电功率上限:

$$|P_{\text{BESS}}(t)| \leq \overline{P}_{\text{BESS}} \quad (14)$$

式中, $\overline{P}_{\text{BESS}}$ 为储能系统充放电功率上限, kW。

为提高蓄电池储能系统使用寿命, 降低微电网设备折旧投资, 蓄电池组采用部分荷电状态循环模式^[16], 即在较窄的荷电状态窗口($\alpha_1\% \sim \alpha_2\%$)内进行单向充放电循环。由电量变化反映储能系统荷电状态变化:

$$\Delta E(t) = E(t) - E(t-1) \quad (15)$$

储能系统充电至荷电窗口上界或放电至荷电

窗口下界时变更充放电状态, 判别条件如下:

$$(\Delta E(t) > 0 \& \frac{E(t)}{E_{\text{rated}}} \geq \alpha_2) \parallel (\Delta E(t) < 0 \& \frac{E(t)}{E_{\text{rated}}} \leq \alpha_1) \quad (16)$$

2 微电网分阶段经济调度策略

基于可再生能源发电的波动性和储能系统不同时间断面上的耦合性, 提出微电网分阶段经济调度策略如图2所示。首先结合日前预测、分时电价等进行储能系统预调度; 然后结合预调度和超短期预测进行微电网实时调度。

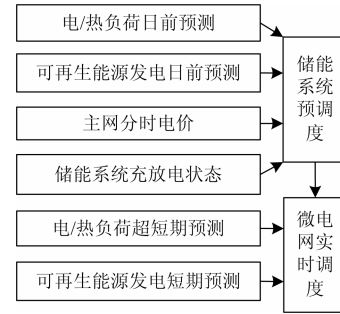


图2 分阶段经济调度策略流程

Fig. 2 Phased economic dispatching strategy

2.1 储能系统预调度

目前我国电力用户普遍执行分时电价^[17], 结合主网分时电价和储能系统能量的双向流动性, 在主网谷价时段允许储能系统充电, 峰价时段允许储能系统放电, 结合电价差获取经济效益。且储能系统工作在部分荷电状态循环模式, 充放电状态根据控制条件(式(16))进行变更, 保持储能系统在不同时间断面上的耦合性。

根据微电网热负荷日前预测, 可以得到微型燃气轮机最小出力, 将微电网中部分不可中断负荷 P_{base} 作为基荷追踪微型燃气轮机的最小出力; 根据可再生能源发电日前预测, 利用微电网中部分柔性负荷 P_{flexible} 追踪可再生能源的发电波动; 结合微电网电负荷日前预测 P_{forecast} , 可以得到微电网净负荷预测 $P_{\text{net}} = P_{\text{forecast}} - P_{\text{base}} - P_{\text{flexible}}$, 净负荷为考虑可再生能源发电波动和多联供系统固定基荷的微电网负荷预测, 能反映发电侧需要追踪的真实负荷曲线。

储能系统结合分时电价、储能系统充放电状态, 利用能量双向流动性进行“削峰填谷”, 平滑微电网净负荷曲线: 在微电网净负荷曲线的谷荷时段允许充电, 峰荷时段允许放电, 减轻微网供电压力。

由表1, X 、 Y 、 Z 三个变量分别代表主网分时电价、净负荷曲线、储能系统状态。当 $X \cdot Y \cdot Z = 1$ 时, 储能系统作为分布式电源参与调度; 当 $X + Y + Z = 0$

时,储能系统作为负荷参与调度;否则不参与调度。

表 1 储能系统预调度变量赋值表

Table 1 BESS pre-dispatching control variables assignment

预调度因素	判别条件	控制变量
主网分时电价	峰价时段	$X=0$
	谷价时段	$X=1$
	平价时段	/
净负荷曲线	峰荷时段	$Y=0$
	谷荷时段	$Y=1$
	平荷时段	/
储能系统状态	放电状态	$Z=0$
	充电状态	$Z=1$

2.2 微电网实时调度

微电网调度对象包含各类分布式电源、联络线和储能系统,因此微电网实时调度中的调度变量为:微型燃气轮机出力 P_1 、燃料电池出力 P_2 、风机出力 P_3 、光伏电池出力 P_4 、联络线交易功率 P_5 、储能系统放电功率 P_6 。

根据储能系统预调度结果,当储能系统不参与调度或作为负荷参与调度时, $P_6=0$;根据微电网的运行方式,当微电网孤网运行时联络线停止功率传输, $P_5=0$ 。结合超短期预测和各分布式电源的运行约束确定各变量的取值区间 $[P_{i\min}, P_{i\max}]$ 。

综上确定参与实时调度的调度变量和变量的取值范围,利用优化算法对调度模型进行求解。

3 智能单粒子优化求解算法

微电网经济调度模型的优化求解可归类为带约束多目标优化问题(Multi-objective Constrained Optimization Problems, MCOPs)。智能优化算法在电力系统优化问题中的应用越来越广泛^[18-19],本文应用基于粒子群算法改进的智能单粒子算法求解优化模型。

3.1 粒子群算法

粒子群算法是根据鸟群觅食的运动规律提出的,鸟群中的个体相互分享自己相对于食物的位置信息,群体搜索最靠近食物的个体附近的区域,向食物靠近。将鸟群模型抽象成“粒子群”,将鸟群觅食抽象成“寻找最优解”。粒子群算法中粒子通过速度决定寻优的方向,每个粒子经历过的最优位置即自身最优位置,所有粒子经历过的最优位置即群体最优位置。粒子速度的更新既取决于飞行惯性(粒子当前速度),也包含粒子对自身信息的学习(当前位置与自身最优位置对比)和对群体信息的学习(当前

位置与群体最优位置对比)。通过对自身和群体信息的学习,粒子群向最优位置靠近,优化问题向最优解收敛。粒子群算法参数调整简单、易于实现,适宜于工程应用,但寻优时易收敛于次优位置,降低了算法速度,智能单粒子算法针对这一现象进行了改进^[20]。

3.2 智能单粒子算法

微电网实时调度的可行解中包含 N 个调度变量,每个变量的初始值在各自取值区间内随机生成,组成 N 维单粒子 $P=[P_1, \dots, P_i, \dots, P_N]$ 。

算法每次寻优只更新单粒子 P 的一维,即一个调度变量。将单粒子 P 代入多目标函数 $f(P)$ 评价优劣, $f(P)$ 值越小,单粒子质量越优。

第 k 次寻优后,若单粒子质量提升则保持修正速度 $v_{i\text{-correct}}^{k+1}=v_{i\text{-correct}}^k$ 不变,否则利用修正因子修正 $v_{i\text{-correct}}^{k+1}$,改变优化方向。

为使寻优速度具有一定的随机性,保证寻优范围尽可能覆盖可行解区域,根据迭代次数和寻优半径生成随机速度 $v_{i\text{-random}}^{k+1}$ 。

第 i 个变量的优化增量 ΔP_i^{k+1} 由修正速度 $v_{i\text{-correct}}^{k+1}$ 、随机速度 $v_{i\text{-random}}^{k+1}$ 两部分组成。比较寻优前后粒子质量,若粒子得到优化则寻优成功,否则寻优失败保持第 k 次寻优结果不变。

达到规定迭代次数后,单粒子最终收敛于多目标函数的全局最优解,即为各变量最优出力。

智能单粒子算法针对粒子群算法易收敛于次优位置的缺点进行改进,对寻优过程降维,以单粒子单维寻优取代粒子群整体寻优,保证单粒子各维质量同时提升,始终向最优解收敛,避免陷入次优解,提升了优化速度^[21]。

4 算例分析

微电网结构如图1所示,采用冬季典型日负荷曲线、分时电价、环境条件等^[22]对模型、调度策略、优化算法进行验证。

4.1 微源出力优化结果

并网运行方式下各微源出力优化结果如图3所示。由图中电负荷曲线可知,1~7时、23~24时,微电网负荷需求小,处于谷荷时段;10~14时、18~22时微电网负荷需求大,处于峰荷时段。经过储能系统预调度:谷荷时段蓄电池作为负荷充电“填谷”,峰荷时段蓄电池作为微源放电“削峰”,平滑负荷曲线,且调度周期内蓄电池只进行了一次荷电窗口内

的运行循环,避免了频繁充放电,有效延长储能设备使用周期。

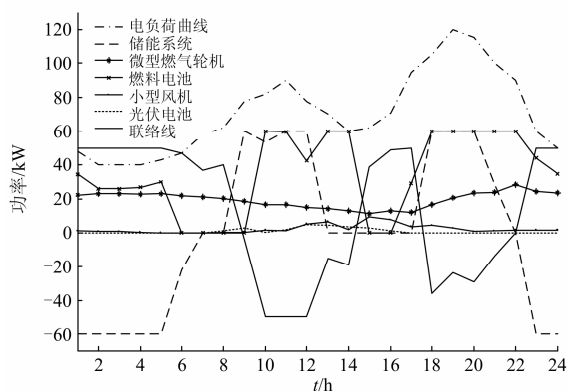


图3 并网运行方式微源优化结果

Fig. 3 Dispatching results in grid-connected operation

经过微电网实时调度:谷价时段电价低,配合储能系统充电,微电网通过联络线从主网购电;峰价时段电价高,配合储能系统放电,微电网通过联络线向主网出售电能;通过分时电价差获取收益。风电、光电按出力上限发电,可再生能源利用率较高。微型燃气轮机基本按出力下限发电,在满足微电网热负荷需求前提下降低发电成本。

孤网运行方式下各微源出力优化结果如图4。

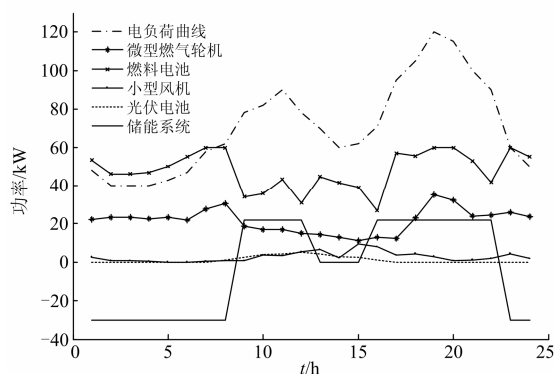


图4 孤网运行方式微源优化结果

Fig. 4 Dispatching results in isolated-connected operation

经过预调度,储能系统在孤网运行时平滑负荷曲线,提高系统稳定性,避免在一个调度周期内频繁充放电,延长使用周期。

经过微电网实时调度,风电、光电按出力上限发电;微型燃气轮机基本按出力下限发电,在某几个时段(如6~8时),其他微源(燃料电池等)满发仍不能满足负荷需求时,微型燃气轮机增加出力保证系统稳定运行。

4.2 微电网经济成本

微电网可并网运行(主网和分布式电源协同供

电)、孤网运行(分布式电源独立供电),为分析微电网经济成本,引入对照情况:主网独立供电。微电网不同运行方式下的经济成本对照如表2所示。

表2 不同运行方式下微电网经济成本

Table 2 Comprehensive cost comparison of three modes

成本类型/元	协同供电	微网独立供电	主网独立供电
发电成本	999.98	1 267.13	0
环境成本	161.70	207.27	0
制热收益	-124.80	-124.80	0
发电补贴	-32.31	-36.81	0
电能交易	-89.81	0	1 851.86
多目标函数	914.72	1 312.79	1 851.86
单位电能成本	0.536 8	0.770 4	1.087 6

由表2可知,微电网负荷由主网独立供电时单位电能成本最高,为1.087 6元/kW·h。

孤网运行时(微电网独立供电),由于分布式发电成本低且获取电价补贴,多联供系统的能量梯级利用增加热电联产收益,单位电能成本下降为0.770 4元/kW·h。

并网运行时(主网和微电网协同供电),由于微电网与主网进行电能交易获取收益,单位电能成本进一步下降,为0.536 8元/kW·h。

4.3 智能单粒子算法与粒子群算法对比

以24个调度时段中1时段的优化求解过程为例,分别应用智能单粒子算法、粒子群算法对经济调度模型进行优化,用多目标函数的适应值评价解的质量,用函数计算次数衡量优化速度。对比结果如图5所示:智能单粒子算法在计算次数达到约200次时收敛于最优解;粒子群算法在优化初始阶段即陷入局部最优解,函数计算次数达到约750次时收敛于最优解。智能单粒子算法收敛速度快,优化时间少,更符合实时优化的快速性要求。

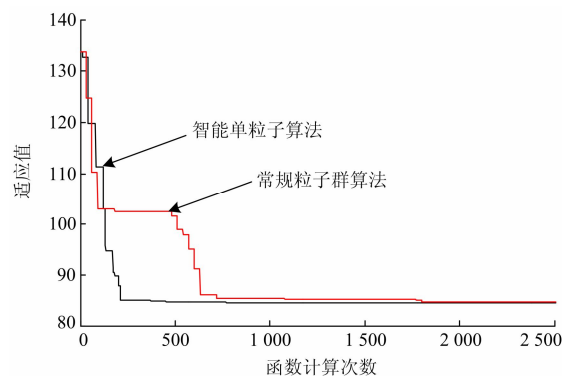


图5 智能单粒子算法与粒子群算法优化对比

Fig. 5 Optimization comparison between ISPO and PSO

5 结论

本文围绕微电网运行的经济、环保、目标,以

热电联产型微电网经济调度模型为基础, 结合分阶段经济调度策略和智能单粒子优化算法搜索微电网的最优运行点:

(1) 在考虑发电成本、环境成本的基础上, 计及了热电联供收益、电能交易收益和电价补贴等运行效益, 进一步优化利用微电网内的电力资源。

(2) 提出微电网分阶段经济调度策略, 通过预调度解决储能系统在不同时间断面上运行状态的耦合问题, 避免储能系统频繁充放电。

(3) 应用的智能单粒子算法具有快速性, 更好地满足微电网调度的实时性要求。

此外, 丰富储能形式、引入负荷调度等都可以作为微电网经济调度进一步研究的内容。

参考文献

- [1] TAN W S, HASSAN M Y, MAJID M S, et al. Optimal distributed renewable generation planning: a review of different approaches[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 18: 626-645.
- [2] LASSETER R H, CERT S. Microgrid[C] // International Conference on System of Systems Engineering. San Antonio, TX, United States: IEEE, 2007: 1-5.
- [3] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.
ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [4] 黄银华, 李常春, 罗方旋, 等. 大规模风电接入对福建电网调峰的影响[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 97-100.
HUANG Yinhua, LI Changchun, LUO Fangxuan, et al. Impact of large-scale wind farm connected with Fujian power grid on peak load regulation[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 97-100.
- [5] 窦春霞, 李娜, 徐晓龙. 基于多智能体系统的微电网分散协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 125-134.
DOU Chunxia, LI Na, XU Xiaolong. Multi-agent system based decentralized coordinated control strategy for microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 125-134.
- [6] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-11.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-11.
- [7] 谈丽娟, 赵彩虹, 陈子奇, 等. 电动汽车与分布式电源的微电网经济调度[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 100-105.
TAN Lijuan, ZHAO Caihong, CHEN Ziqi, et al. Economical dispatch for microgrids of electric vehicles and distributed power[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 100-105.
- [8] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及蓄电池储能寿命影响的微电网日前调度优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 172-180.
YANG Yanhong, PEI Wei, DENG Wei, et al. Day-ahead scheduling optimization for microgrid with battery life model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 172-180.
- [9] 郭美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风光储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35.
MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 30-35.
- [10] 田建芳, 毛亚珊, 翟桥柱, 等. 基于风电消纳能力评估的安全约束经济调度方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2392-2398.
TIAN Jianfang, MAO Yashan, ZHAI Qiaozhu, et al. Security constrained unit commitment with wind power based on evaluation of wind power penetration capacity[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2392-2398.
- [11] 彭春华, 谢鹏, 詹骥文, 等. 基于改进细菌觅食算法的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2392-2398.
PENG Chunhua, XIE Peng, ZHAN Jiwen, et al. Robust economic dispatch of microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2392-2398.
- [12] 白峪豪. 含分布式电源的微电网经济调度模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
BAI Yuhao. Research on microgrid economic dispatch model with distributed power sources embedded[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [13] KUMAR R H, USHAKUMARI S. Optimal management of islanded microgrid using binary particle swarm optimization[C] // International Conference on Advances

- in Green Energy, Trivandrum, Kerala, India: IEEE, 2014: 251-257.
- [14] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 7-15.
- CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Genetic algorithm based economic operation optimization of a combined heat and power microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 7-15.
- [15] 洪博文, 郭力, 王成山, 等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 100-107.
- HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Mode and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 100-107.
- [16] RAND D A J. Valve-regulated lead-acid batteries[M]. Elsevier Science & Technology, 2004.
- [17] 徐永丰, 吴洁晶, 黄海涛, 等. 考虑负荷率的峰谷分时电价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 96-103.
- XU Yongfeng, WU Jiejing, HUANG Haitao, et al. Time-of-use tariff model considering load factor[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 96-103.
- [18] 刘前进, 许慧铭, 施超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 1-7.
- LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on power flow optimization based on multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 1-7.
- [19] 陈海东, 庄平, 夏建矿, 等. 基于改进萤火虫算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 149-154.
- CHEN Haidong, ZHUANG Ping, XIA Jiankuang, et al. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on modified firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 149-154.
- [20] 纪震, 周家锐, 廖惠连, 等. 智能单粒子优化算法[J]. 计算机学报, 2010, 33(3): 556-561.
- JI Zhen, ZHOU Jiarui, LIAO Huilian, et al. A novel intelligent single particle optimizer[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(3): 556-561.
- [21] JIE Zeng. A self adaptive intelligent single particle optimizer compression algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2014, 25(6): 1285-1292.
- [22] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- LI Le. Study of economic operation in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

收稿日期: 2016-03-23; 修回日期: 2016-05-27

作者简介:

吴昊(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网的优化规划与节能技术; E-mail: wuhao_19930115@163.com

王艳松(1965-), 女, 博士, 教授, 研究生导师, 主要研究方向为电网的优化规划与节能技术, 电网故障诊断与配
电自动化, 电力负荷预测, 电能质量分析与谐波治理等。

E-mail: wys91517@163.com

(编辑 魏小丽)