

基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置

吴杰, 温晨阳, 李珊, 师庆丹

(河北省电力电子节能与传动控制重点实验室, 燕山大学, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 针对光伏系统并入配电网和储能装置结合过程中的配置优化问题, 根据对光伏日发电预测曲线和配电网分时电价特性的分析, 建立经济调度模型; 在其基础上通过粒子群算法计算光伏系统的综合运行成本, 进而得出加入储能系统成本后的综合费用, 根据综合费用确定光伏和储能的最优容量。仿真分析和计算结果表明, 合理容量的光伏和储能装置不仅能提高配电网系统运行的经济性, 还能缓解系统的功率波动, 有一定的削峰填谷效应。

关键词: 光伏储能; 配电网; 分时电价; 经济成本; 优化配置

DOI: 10.12067/ATEEE1704027

文章编号: 1003-3076(2018)01-0023-08

中图分类号: TM615

1 引言

太阳能发电是一种重要的可再生能源, 作为分布式电源, 光伏发电设备制造成本大幅度降低, 大规模接入电网成为一种发展潮流。但光伏发电的随机性和不确定性导致其供电的随机性变化, 且变化幅度较大, 使系统在并网运行过程中产生瞬时的功率大幅度波动, 对供电的电能质量、可靠性和稳定性等造成较大的影响^[1]。蓄电池是中国光伏电站目前主要选用的储能装置, 具有充放电效率高、功率响应速度快的特点, 并且能提供较大的冲击电流, 在系统中可以发挥压频调节、电网故障恢复、电能质量的维护与改善的作用^[2]。

蓄电池的容量配置对光伏发电影响很大, 容量选择得太大, 不仅会增加投资, 电池还会长期处于充电不足的状态, 影响储能的使用效果和寿命, 不能较好地实现其经济性^[2]; 若容量选择过小, 光伏系统不能充分实现经济效益, 且电网的供电可靠性降低。因此, 光伏发电和蓄电池配置比例及协调控制, 是决定并网系统能否稳定、高效、经济运行的关键。目前, 确定储能容量有多种方案。文献[3]采用负荷缺电率指标来确定储能的容量配置, 并针对全钒液流电池作为储能装置进行优化配置。文献[4]以装置成本最低为目标, 提出了基于机会约束规划的混

合储能容量配置方法。文献[5,6]考虑了重要工业负荷的特性, 以光伏利用率和年净利率最大为目标, 构建工业光伏微网的储能容量优化配置的多目标模型。文献[7]考虑需求响应对光伏储能容量配置的影响, 构建基于电量电价的多时段响应模型和微网投资收益模型。文献[8]从储能平抑风光储发电系统输出功率波动的角度, 提出了两个评价有功功率波动的指标, 并进行储能容量优化。

本文研究光伏电站的工作原理, 根据某地光伏日出力曲线和分时电价的特点, 得出实现最大经济效益的光伏发电工作时间段, 通过对光伏出力和储能系统的协调控制, 完成配电网电能的经济调度, 从而确定蓄电池实现经济调度时的最优容量。

2 光储并网系统工作原理

光伏并网发电系统结构如图1所示。光伏发电系统包括光伏阵列、蓄电池组、DC/DC变换器和DC/AC双向变换器。根据光伏并网汇流母线的类型, 可分为基于直流母线的并网方式、基于交流母线的并网方式和基于交流与直流混合母线的并网方式。选用直流汇流母线的并网方式, 不仅具有扩容方便、控制简单的优点, 同时可以减少逆变器台数, 提高系统发电效率, 降低损耗, 减少系统投资成本。基于直流母线的并网方式已被广泛应用于中小型光

收稿日期: 2017-04-12

作者简介: 吴杰(1959-), 男, 山东籍, 教授, 研究方向为供电系统电能质量分析与控制;

温晨阳(1991-), 男, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为校园光伏并网与运行特性分析。

光伏发电系统^[9]。

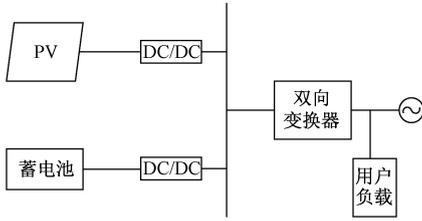


图1 光伏并网发电系统结构

Fig.1 Structure of PV grid connected system

光伏控制系统控制 DC/DC 变换器,使光伏始终保证以最大功率输出,提高光能利用率;储能控制系统根据蓄电池组的实时状态和经济调度方式,控制 DC/DC 变换器,决定蓄电池充放电状态和充放电功率的大小。光伏组件和蓄电池分别经过 DC/DC 变换器接入汇流母线,再经过 DC/AC 双向变换器并入电网。当光伏系统输出功率时,双向变换器将直流变为交流;当光伏系统从电网给蓄电池充电时,双向变换器将交流变为直流。

3 光伏并网系统经济调度模型

本文通过研究光伏电站预测出力曲线,确定光伏最佳工作时间区间,结合电网不同时段负荷的变化情况,在满足光伏并网系统稳定可靠运行的基础上,以经济性最优为目标,建立光伏发电系统的经济调度模型。

3.1 光伏系统输出特性分析

光伏系统输出功率主要由日照强度、电池温度决定,其发电特性不仅具有随机性和间歇性,且不能调度,季节、气候的变化会使输出功率产生较大波动,并网后会对电网有一定的冲击性。加入储能装置,不仅能改善光伏系统供电的电能质量,还能实现光伏发电的经济调度,提高系统的经济性。

根据配电网负荷变化,将全天 24h 的用电情况划分成高峰、平谷、低谷多个时段,对不同时段制定不同的电价水平^[10,11]。表 1 为某地光伏发电系统一天内不同时段的购售电价^[12]。

表 1 某地光伏并网系统分时电价

Tab.1 TOU of PV grid connected system

时段	0:00 ~ 8:00	8:00 ~ 13:00	13:00 ~ 16:00	16:00 ~ 22:00	22:00 ~ 24:00
购电 电价/元	0.41	1.22	0.79	1.37	0.79
售电 电价/元	0.46	1.26	0.95	1.26	0.95

图 2 为典型光伏日出力曲线^[13,14]。结合表 1 和图 2 可知,8:00~13:00 电价最高,光伏发电有一定的输出,光伏出力逐步上升,最终达到最大值;16:00~22:00 也属于高电价时段,而此时光伏出力处于下降阶段,最后降为 0。因此光伏发电直接并入电网会使经济性有所降低,需要通过控制储能装置的充放电实现光伏出力的经济调度,提高光伏系统运行的经济性。

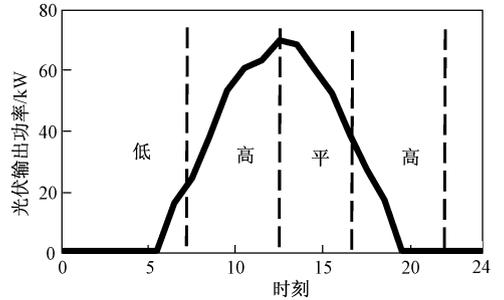


图 2 光伏日出力曲线

Fig.2 PV curve of daily output

根据光伏发电系统各时段的电价分布和负荷曲线,结合光伏日发电曲线,建立经济调度模型:在一天内,0:00~8:00 为用电低谷,此时段光伏系统从电网购电,为蓄电池充电,为用电高峰时段备用;8:00~13:00 为用电高峰段,此时光伏系统在最大功率跟踪下输出功率,同时蓄电池也输出功率;13:00~16:00 为用电平谷时段,此时光伏系统吸收或输出电能,其主要取决于光伏发电量的多少和负荷的大小;16:00~22:00 光伏和蓄电池输出电能;22:00~24:00 时,若蓄电池仍有剩余电量,则继续向系统供电,若没有剩余,也不再从电网购电。各时段蓄电池的充放电量可由经济调度模型计算得到。

3.2 蓄电池充放电模型

光伏并网系统储能的充放电与储能的荷电状态有关,单位时间 T 内蓄电池输出功率前后的荷电状态为:

$$S_{oc_{t+1}} = S_{oc_t} - \frac{P_{bat}^t T}{S_{bat}} \quad (1)$$

式中, S_{oc_t} 为 t 时刻的荷电常数; P_{bat}^t 为蓄电池的充放电功率,充电时为负值,放电时为正值; T 为充放电前后的时间间隔; S_{bat} 为蓄电池的容量。

3.3 目标函数

本文选取系统调度周期为一天,保证一定时期内光伏系统输出功率变化不大。在这个基础上,以一天内光伏系统总成本最低为目标,建立目标函数:

$$\min F = C_{PV}^{DAY} + C_{PV}^{com} + C_{bat}^{DAY} + C_{bat}^{com} + C_{grid}^{DAY} + f_{load} \quad (2)$$

式中, C_{PV}^{DAY} 为光伏系统在回收年限内平均日投资成本; C_{PV}^{om} 为光伏系统每天的维护成本; C_{bat}^{DAY} 为蓄电池在回收年限内平均日投资成本; C_{bat}^{om} 为蓄电池每天的维护成本; C_{grid}^{DAY} 为用户与电网之间的交换功率成本; f_{load} 为接入光伏系统后, 评价母线负荷率指标的惩罚函数。

3.3.1 光伏系统投资成本

光伏系统投资费用主要包括安装基础及支架、电池板、光伏逆变器、交直流电缆、配电柜等。因此, 光伏发电系统投资费用在回收年限内平均到每天的成本为:

$$C_{PV}^{DAY} = \frac{C_{PV}^{co} P_{wp} C_{PV}^{ev}}{365} \quad (3)$$

$$C_{PV}^{co} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (4)$$

式中, C_{PV}^{co} 为光伏系统的回收系数; P_{wp} 为光伏系统安装容量; C_{PV}^{ev} 为光伏系统平均每千瓦的投资成本; r 为贴现率, 即光伏系统的预计值和现值的比值, 电力系统中一般取 0.08 ~ 0.12; n 为光伏系统的回收年限。

3.3.2 光伏系统维护成本

光伏发电在日常运行过程中需要对系统进行安全监测和维护, 维护成本与系统输出的电能成正比关系, 在微电网中光伏发电系统的运行维护系数为 0.87 元/(kW·h)^[15], 则光伏系统的维护成本为:

$$C_{PV}^{om} = \sum_{t=1}^{24} K_{PV}^{om} P_{PV}^t \quad (5)$$

式中, K_{PV}^{om} 为光伏发电系统的运行维护系数; P_{PV}^t 为 t 时段内光伏输出功率。

3.3.3 蓄电池投资成本

在计算蓄电池的投资成本时, 也需要考虑蓄电池的折旧率。即蓄电池一次投资费用在回收年限内平均到每天的投资成本为:

$$C_{bat}^{DAY} = \frac{C_{bat}^{co} C_{bat}^{ev} S_{bat}}{365} \quad (6)$$

式中, C_{bat}^{co} 为蓄电池的成本回收系数; C_{bat}^{ev} 为蓄电池单位容量的投资成本^[13]。

3.3.4 蓄电池运行维护成本

蓄电池运行维护费用包括蓄电池寿命衰减成本和设备维护成本。本文选用免维护铅酸蓄电池, 使用寿命约 8 ~ 10 年, 在蓄电池的寿命有效期内所经受的循环次数约 300 ~ 500 次, 一般以衰减额定容量 20% 为寿命期限, 即每次完全充放电后蓄电池容

量衰减成本约为蓄电池投资成本的 0.4% ~ 0.6%。

$$C_{bat}^{com} = \frac{C_{bat}^{year} S_{bat}}{365} + \alpha \mu C_{bat}^{ev} S_{bat} \quad (7)$$

式中, C_{bat}^{year} 为蓄电池设备单位容量年运行维护费用; α 为蓄电池平均每天充放电循环次数; μ 为蓄电池平均每天的衰减率; C_{bat}^{ev} 为蓄电池单位容量的投资成本。

3.3.5 与电网交换功率成本

光伏日间输出功率提供给负载, 若出力不足以支持负载, 则从电网购电; 若光伏出力大于负载所需功率, 则向电网售电; 夜间光伏系统不输出功率, 则所需电能全部由电网购入。

$$C_{grid}^{DAY} = \sum_{t=1}^{24} C^t P_{grid}^t \quad (8)$$

式中, C^t 为 t 时段光伏系统的购售电价; P_{grid}^t 为 t 时段内光伏系统与电网间的交换功率, 当 $P_{grid}^t > 0$ 时, 表示用户购入电能, 当 $P_{grid}^t < 0$ 时, 表示用户售出电能。

3.3.6 惩罚因子

负荷率为系统平均负荷与最大峰值负荷的比值, 与系统负荷的高峰和低谷有关, 可以用来衡量一定时间内负荷的变动情况, 作为评价光伏系统削峰填谷效应的指标^[12]。负荷率越大, 说明电网负荷变动越小, 负荷曲线越平滑, 光伏系统削峰填谷效果越好。母线的负荷率指标作为惩罚因子加到目标函数中。母线负荷率 $Load_{rate}$ 计算公式如下:

$$Load_{rate} = \frac{\sum_{t=1}^{24} (P_{load}^t - P_{PV}^t - P_{bat}^t)}{24 P_{load}^{max}} \quad (9)$$

式中, P_{load}^t 为 t 时段的母线负荷; P_{PV}^t 为 t 时段的光伏发电功率; P_{bat}^t 为蓄电池 t 时段的充放电功率, 当 $P_{bat}^t > 0$ 时, 表示蓄电池放电, 当 $P_{bat}^t < 0$ 时, 表示蓄电池充电; P_{load}^{max} 为加入光伏系统后母线负荷的最大值。

f_{load} 为目标函数中母线负荷率的惩罚因子项, 惩罚判别条件为:

$$f_{load} = \begin{cases} 0 & f_{load} \geq f_{load}^{rate} \\ \beta(f_{load}^{rate} - f_{load}) & f_{load} < f_{load}^{rate} \end{cases} \quad (10)$$

式中, β 为惩罚系数; f_{load}^{rate} 为负荷率的标准值。

3.4 约束条件

3.4.1 功率平衡约束

根据并网光伏系统功率平衡约束条件可知:

$$P_{PV}^t + P_{bat}^t = -P_{grid}^t \quad (11)$$

3.4.2 储能约束

为了延长蓄电池的使用寿命,使蓄电池更好地实现其经济效益,充放电过程中禁止出现过充和过放的情况,在充放电控制系统中,要严格控制蓄电池的荷电状态 S_{oc} ,即

$$S_{oc_{min}} \leq S_{oc} \leq S_{oc_{max}} \quad (12)$$

式中, $S_{oc_{max}}$ 和 $S_{oc_{min}}$ 分别表示蓄电池荷电状态的最大值和最小值。

蓄电池的充放电功率应小于或等于其最大充放电功率,即

$$-P_{max} \leq P'_{bat} \leq P_{max} \quad (13)$$

式中, P_{max} 为蓄电池单位时间内充放电最大功率。

充放电速率过高会导致蓄电池电导率降低,使其实际功率输出能力下降;速率过低又会导致充电时间过长,无法快速储存光伏剩余电量,并且有可能使蓄电池长期低于最大荷电状态,影响蓄电池的寿命^[16]。选择蓄电池单位时间内最大充放电功率为额定容量的20%,则单位时间内最大充放电功率为:

$$P_{max} = 0.2S_{bat}/T \quad (14)$$

3.4.3 最大交换功率约束

为确保电网和光伏系统安全稳定运行,要求光伏并网系统与电网间的交换功率容量要在系统允许范围内,即

$$-P_{grid}^{min} \leq P'_{grid} \leq P_{grid}^{max} \quad (15)$$

式中, P_{grid}^{min} 、 P_{grid}^{max} 分别为光伏系统与电网交换功率的最小值和最大值。

4 蓄电池最佳容量计算

4.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法是进化算法的一种,其从随机解出发,通过迭代寻找最优解,通过解的适应度评价解的品质。本文采用粒子群优化算法进行优化计算时,要对约束条件进行处理。

4.1.1 功率平衡约束条件处理

蓄电池未接入系统时,负载与光伏出力的功率差额仅由电网补充,通过对功率平衡条件的变换,得出光伏系统与负载之间的功率差额为:

$$P'_{grid} = P'_{load} - P'_{PV} \quad (16)$$

蓄电池接入系统后,负载与光伏系统的功率差额由电网和蓄电池共同补充,即

$$P'_{grid} + P'_{bat} = P'_{load} - P'_{PV} \quad (17)$$

此时,可根据蓄电池的充放电状态判断光伏系统购售电的情况。

4.1.2 储能约束条件处理

蓄电池的荷电状态要始终保持在正常范围内,若出现越界现象,应当取其边界值。在优化计算开始时给蓄电池的荷电状态赋初值,根据下一时段内负载与光伏系统的功率差额和经济调度模型,结合蓄电池模型,即可得出蓄电池下一时段的荷电状态。

若蓄电池放电,剩余功率不足以补足下一时段内的功率差额,则

$$P'_{bat} = (S_{oc} - S_{oc_{min}})S_{bat}/T \quad (18)$$

若蓄电池充电,功率差额大于蓄电池吸收的功率,则

$$P'_{bat} = (S_{oc_{max}} - S_{oc})S_{bat}/T \quad (19)$$

在寻优过程中,若 $P'_{bat} < -0.2S_{bat}/T$, 则取 $P'_{bat} = -0.2S_{bat}/T$; 若 $P'_{bat} > 0.2S_{bat}/T$, 则取 $P'_{bat} = 0.2S_{bat}/T$ 。

4.1.3 最大交换功率约束条件处理

当光伏系统与电网交换功率 $P'_{grid} < -P_{grid}^{min}$ 时,取 $P'_{grid} = -P_{grid}^{min}$; 当光伏系统与电网交换功率 $P'_{grid} > P_{grid}^{max}$ 时,取 $P'_{grid} = P_{grid}^{max}$ 。

4.2 粒子群优化算法流程图

根据综合成本目标函数可知,若周期内气候及负荷状况相近,则最优解与光伏容量和储能容量密切相关,通过粒子群算法得出光伏系统运行的最小综合成本,从而确定光伏和储能的最佳容量。粒子群优化流程图如图3所示。

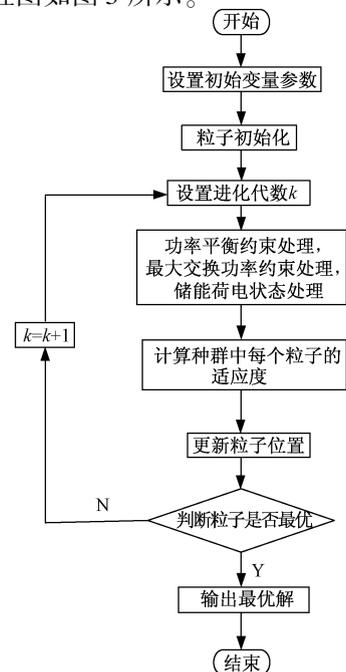


图3 优化流程图

Fig. 3 Optimization flow chart

5 算例分析

5.1 数据资料

以某地屋顶光伏并网系统为例,屋顶面积为3200m²,以最佳倾角和最小间距进行安装,保证板间无阴影遮挡。经过计算,屋顶光伏电池允许最大安装容量为100kW。

根据屋顶光伏发电工程报价,光伏发电系统建设成本为8000元/kW,光伏电池单片最大发电功率为1kW,折旧年限为15年,运行维护费用约0.87元/(kW·h)。选用铅酸蓄电池,其参数为:额定电压2V;额定容量1000A·h;安装投资费用为1000元/kW;最大荷电状态0.9;最小荷电状态0.1;单位容量设备年维护成本100元/kW;单次循环充放电衰减率为0.4%,充放电循环次数为500次,寿命为8年。

图4为光伏发电并网系统图。光伏电池与蓄电池经过DC/DC变换后并入直流母线,又经过双向变换器接入380V交流母线,与电网合力给负载供电。光伏并网系统并入电网的容量不宜超过上一级变压器最大负荷的25%,变压器额定容量为1250kV·A,则光伏和蓄电池接入电网总容量应小于300kW。图5为光伏发电曲线和负荷曲线。

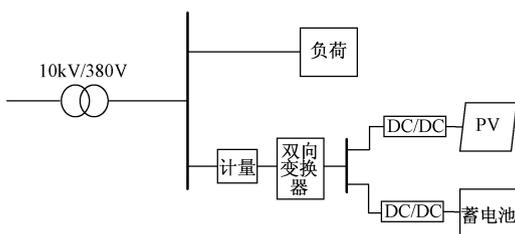


图4 光伏并网系统图

Fig. 4 PV grid connected system

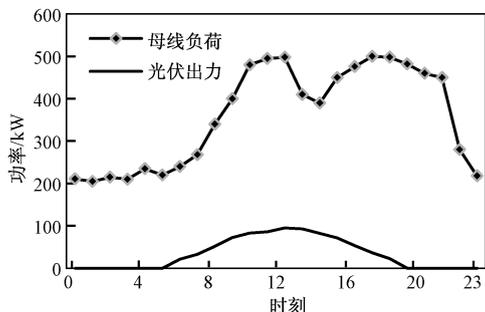


图5 光伏发电和负荷曲线

Fig. 5 PV and load curve

选取为待优化项的个数,即为2。目标函数为多目标优化,初始粒子数目数量不宜过少,选取初始粒子数为50。经过对优化程序的调试,为保证粒子有较快的学习速度和收敛速度,学习因子取值为 $c_1 = c_2 = 2$,惯性权重系数为0.9、0.4。

5.2 优化结果分析

光伏系统不加储能装置时,光伏发出的电能直接被负载使用,若有剩余则送入电网;光伏不发电时,电价峰值时段负荷所需电能全部从电网购买。此时光伏系统的综合成本目标函数为:

$$\min F = C_{PV}^{DAY} + C_{PV}^{om} + C_{grid}^{DAY} \quad (20)$$

经粒子群优化配置后,光伏安装容量与一天内系统投资成本、维护费用和综合成本关系如图6所示。由图6可知,光伏电站盈利(光伏综合成本为负值时)随着光伏安装容量的增加而增加,因此光伏容量在屋顶允许最大安装容量的范围内,安装的容量越大,光伏电站运行成本越低,经济性越好。经粒子群优化后,光伏安装容量为100kW。

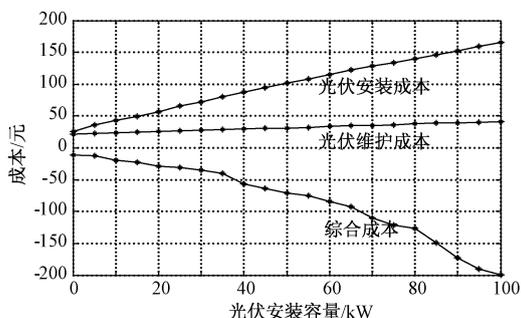


图6 不同光伏安装容量下的成本

Fig. 6 Cost of different PV installation capacity

在负荷平谷时段,光伏发电达到峰值,如果不加装储能装置,光伏发出的电量只能以平谷时段的电价上网,造成经济浪费。加装储能装置后,可以将光伏发出的一部分电量存储起来,到下一高峰时段释放,实现光伏电能的经济调度。

根据图6可以看出,光伏系统安装容量最大且不加储能装置时,综合成本最低,光伏系统发出的电能全部送入电网,但此时配电网负荷曲线波动较大,不能实现光伏发电的经济调度策略,不能体现光伏系统削峰填谷的作用^[17-19]。考虑加入光伏系统后对母线负荷率的影响,把配电网母线负荷率作为惩罚因子加入到目标函数中进行优化。光伏安装容量以100kW为最优容量,利用粒子群算法计算不同蓄电池安装容量与光伏系统运行成本的关系,结果如表2所示。储能装置容量为60kW·h时,综合成本

粒子群优化计算时,对粒子进行初始化。维度

最低,光伏系统经济性最优。

表2 光伏系统一天内的综合成本与蓄电池容量的关系

Tab.2 Relationship between integrated cost of PV system and battery capacity

蓄电池容量 / (kW·h)	综合成本/元	蓄电池容量 / (kW·h)	综合成本/元
0	-150.28	40	-188.41
5	-155.46	45	-192.26
10	-159.82	50	-195.75
15	-163.69	55	-201.06
20	-168.28	60	-206.53
25	-172.18	65	-200.25
30	-178.54	70	-193.92
35	-183.36		

在考虑光伏系统并网对配电网稳定运行影响的基础上加入储能装置,粒子群优化曲线如图7所示,经过65代的进化后,光伏系统综合经济成本为-206.53元/天,此时光伏安装容量为100kW,蓄电池安装容量为60kW·h。因此,选择蓄电池容量为60kW·h作为储能最优容量。

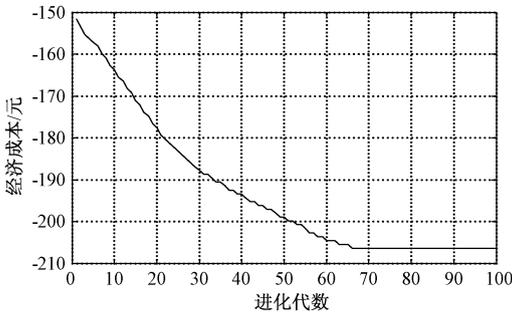


图7 粒子群优化曲线

Fig.7 Curve of particle swarm optimization

加入光伏系统对母线负荷曲线的影响如图8所示。可以看出,配电网未加入光伏系统时,母线负荷峰谷值波动大,配电网负荷率偏低;加入光伏系统后,在光伏出力阶段有效地降低了配电网的负荷峰值,负荷率有所上升,但峰谷差异仍然较大,需要削峰填谷。加入储能装置的光伏系统,通过对储能装置充放电的控制,在夜间用电低谷和白天用电平谷时段对蓄电池充电,提高用电低谷值,在用电高峰时段放电,降低用电峰值,实现电能的经济调度,有效提升了配电网负荷率。不仅使光伏系统运行更加经济合理,也为电网安全运行创造了条件。表3为三种情况下的母线负荷率与峰谷差。

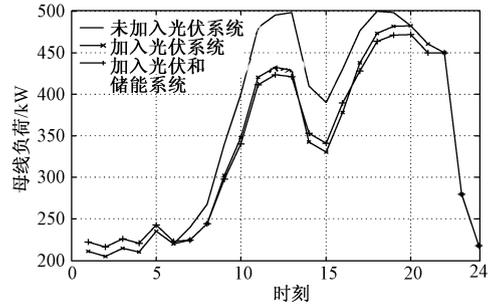


图8 加入光伏系统对母线负荷曲线的影响

Fig.8 Influence of PV system on load curve

表3 母线负荷率与峰谷差

Tab.3 Bus load rate and peak-valley difference

	最小负荷率	最小负荷 / kW	峰谷差 / kW	负荷率 (%)
未加入光伏	0.41	205	295	71.93
仅加入光伏	0.41	205	277	74.61
光伏和储能	0.44	217	255	79.92

6 结论

(1)将合理的光伏容量和储能容量并入配电网,通过对蓄电池充放电的控制,设计合理的经济调度模型,能更好地实现光伏发电的平稳输出,降低光伏系统的综合运行成本,提升系统运行的经济性。

(2)当储能成本对综合运行成本影响较小时,适当增加蓄电池的安装容量,可以实现对配电网负荷的削峰填谷,给配电网的安全经济运行提供条件。

参考文献 (References):

[1] 栗赛男, 马建伟, 孙芊, 等 (Li Sainan, Ma Jianwei, Sun Qian, et al.). 考虑不确定出力的微网内分布式发电和储能的容量配置 (Configuration optimization of capacity of distributed generation and energy storage in microgrid considering uncertain output) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 21-28.

[2] 丛晶, 宋坤, 鲁海威, 等 (Cong Jing, Song Kun, Lu Haiwei, et al.). 新能源电力系统中的储能技术研究综述 (Review of energy storage technology for new energy power system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (3): 53-59.

[3] 段俊东, 栗维冰, 薛静杰 (Duan Jundong, Li Weibing, Xue Jingjie). 基于经济调度的光伏并网系统储能容量研究 (Research on energy storage capacity in grid-connected photovoltaic system based on economic dis-

- patch) [J]. 河南理工大学学报(自然科学版)(Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)), 2015, 34 (6): 860-866.
- [4] 胡国珍, 段善旭, 蔡涛, 等 (Hu Guozhen, Duan Shanxu, Cai Tao, et al.). 基于液流电池储能的光伏发电系统容量配置及成本分析 (Sizing and cost analysis of photovoltaic generation system based on Vanadium redox battery) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (5): 260-267.
- [5] 谢石骁, 杨莉, 李丽娜 (Xie Shixiao, Yang Li, Li Lina). 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法 (Chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2012, 36 (5): 79-84.
- [6] 涂炼, 刘涤尘, 廖清芬, 等 (Tu Lian, Liu Dichen, Liao Qingfen, et al.). 计及储能容量优化的含风光储配电网可靠性评估 (Reliability evaluation considering storage capacity optimization for distribution system with wind-PV-storage) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2015, 35 (12): 40-46.
- [7] 许健, 刘念, 于雷, 等 (Xu Jian, Liu Nian, Yu Lei, et al.). 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置 (Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (9): 29-37.
- [8] 周楠, 樊玮, 刘念, 等 (Zhou Nan, Fan Wei, Liu Nian, et al.). 基于需求响应的光伏微电网储能系统多目标容量优化配置 (Battery storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (6): 1709-1716.
- [9] 朱永强, 贾利虎, 王银顺 (Zhu Yongqiang, Jia Lihu, Wang Yinshun). 微电网结构设计的基本原则 (Design of impedance conversion network employed for capacitive-coupled wireless power transmission system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (9): 44-49, 63.
- [10] 徐永峰, 吴洁晶, 黄海涛, 等 (Xu Yongfeng, Wu Jiejing, Huang Haitao, et al.). 考虑负荷率的峰谷分时电价模型 (Time-of-use tariff model considering load factor) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (23): 96-103.
- [11] 程瑜, 翟娜娜 (Cheng Yu, Zhai Nana). 面向智能电网的峰谷分时电价评估 (Evaluation of TOU price oriented to smart grid) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2010, 38 (21): 196-201, 214.
- [12] 栗维冰 (Li Weibing). 光伏储能发电系统出力可控及储能容量研究 (The research on controllability of output and capacity of energy storage in photovoltaic power system) [D]. 焦作: 河南理工大学 (Jiaozuo: Henan Polytechnic University), 2015. 21-22.
- [13] 兰国军, 栗文义, 尹凯, 等 (Lan Guojun, Li Wenyi, Yin Kai, et al.). 并网运行风/光/储微电网容量配置双目标优化 (Bi-objective optimization of capacity configuration based on grid-connected wind/photovoltaic/storage microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (3): 18-23.
- [14] 李璐, 肖湘宁, 陈鹏伟 (Li Lu, Xiao Xiangning, Chen Pengwei). 改进光伏模型及其在微网可靠性评估中的应用 (Improved photovoltaic model and its application in reliability evaluation of microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (11): 65-71.
- [15] Mohamed F A, Koivo H N. System modelling and online optimal management of microgrid using multiobjective optimization [A]. 2007 International Conference on Clean Electrical Power [C]. 2007. 5: 148-153.
- [16] Drouilhet S, Johnson B L. A battery life prediction method for hybrid power applications [A]. 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit [C]. 1997. 5-7.
- [17] 唐文左, 梁文举, 崔荣, 等 (Tang Wenzuo, Liang Wenju, Cui Rong, et al.). 配电网中分布式储能系统的优化配置方法 (Optimal allocation method of distributed energy storage system in distribution network) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2015, 36 (4): 38-45.
- [18] 杨江涛, 孙春顺, 杨安, 等 (Yang Jiangtao, Sun Chunshun, Yang An, et al.). 峰谷电价下配电网中分布式储能的容量配置 (Capacity configuration of distribution energy storage in distribution network under the peak-valley price) [J]. 电力科学与工程 (Electric Power Science and Engineering), 2016, 32 (11): 12-17.
- [19] 王成山, 于波, 肖峻, 等 (Wang Chengshan, Yu Bo, Xiao Jun, et al.). 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法 (Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (16): 1-8.

Optimal allocation of PV and accumulator system based on time-of-use price

WU Jie, WEN Chen-yang, LI Shan, SHI Qing-dan

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: This paper is concerned with configuration optimization problem about the PV system merging into the process of the combination of distribution network and the energy device. The economic dispatch model is based on the forecasting curve of the PV power generation and the analysis of the character about time-of-use price. Then on this basis, the total operation cost of the PV system is calculated by particle swarm optimization, and the total cost is obtained in which the cost of storage system has been counted. And the optimal capacity of the PV and energy storage can be defined according to the total cost. Through simulation analysis and computed result, it indicates that a reasonable amount of PV and storage device not only can improve the operational economy of the distribution network system, but also can alleviate the power fluctuation of the system. In addition, it has certain effectiveness on peak load shaving.

Key words: photovoltaic and energy storage; distribution network; time-of-use price; economic cost; optimal allocation

《电工电能新技术》2017 年度刊登稿件统计结果

2017 年本刊共刊登 132 篇稿件,在此,编辑部全体同仁向一贯支持本刊工作的广大作者和审稿专家致以最衷心的感谢!

2017 年刊登稿件的第一作者单位共 43 个,感谢如下单位的支持,现将统计结果公布如下:

排序	第一作者单位	篇数	排序	第一作者单位	篇数	排序	第一作者单位	篇数
1	中国科学院电工研究所	19	10	南方电网公司	3	22	青岛大学	1
2	国家电网公司	14	17	福州大学	2	22	青岛理工大学	1
3	华北电力大学	12	17	沈阳工业大学	2	22	上海大学	1
4	燕山大学	10	17	辽宁工程技术大学	2	22	Scottish and Southern Electricity Networks	1
5	河北工业大学	6	17	山东大学	2	22	太原理工大学	1
6	清华大学	5	17	中国矿业大学	2	22	西安交通大学	1
6	东北电力大学	5	22	华东交通大学	1	22	西安理工大学	1
8	华中科技大学	4	22	广西大学	1	22	新疆大学	1
8	上海交通大学	4	22	河海大学	1	22	浙江工商大学	1
10	中国农业大学	3	22	湖南大学	1	22	中国北方车辆研究所	1
10	北京交通大学	3	22	湖南工业大学	1	22	中国电力工程顾问集团 华北电力设计院有限公司	1
10	三峡大学	3	22	华南理工大学	1	22	重庆大学	1
10	天津大学	3	22	江苏大学	1	22	珠海城市职业技术学院	1
10	武汉大学	3	22	南京工业大学	1			
10	西南交通大学	3	22	南京航空航天大学	1			

注:篇数相同按单位名称字母排序。