

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.06.009

# 基于需求侧响应的配电网储能容量识别

方逸波<sup>1</sup>, 袁晓冬<sup>2</sup>, 费骏韬<sup>2</sup>, 许庆强<sup>3</sup>, 史林军<sup>1</sup>, 吴峰<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:**随着越来越多的分布式储能系统在负荷侧并网运行, 需求侧响应获得了更多的手段。用户侧储能响应容量是用户侧系统需求侧响应能力的重要组成部分。为估计不同时刻和条件下用户侧储能容量, 文中提出一种基于需求侧响应的配电网储能容量识别方法。考虑不同类型负荷用户的需求响应协同控制策略的目标, 用粒子群算法进行储能充放电与受控负荷投切策略过程求解, 最后计算储能系统的响应容量。结果表明, 各类负荷的占比与分布式电源出力对响应容量均产生一定影响, 为了取得安全性和稳定性以及使用效率之间的平衡, 应当根据控制目标合理配置储能容量。

**关键词:**需求侧响应; 储能系统; 容量识别; 粒子群算法; 协同控制策略

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)06-0061-08

## 0 引言

包括可控负荷、分布式电源(distributed generation, DG)、用户侧储能系统(energy storage system, ESS)在内的需求侧资源利用受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。DG规模小、成本小, 而且大多为清洁能源, 吸引众多学者对其研究<sup>[2-4]</sup>。然而, 许多DG存在固有不确定性, 直接接入电网会造成冲击, 威胁电网的安全稳定性<sup>[5-7]</sup>, 需要ESS平抑波动。

需求响应指通过价格信号或者激励机制来增加需求侧在电力系统中的作用<sup>[8]</sup>。即需求侧在供电侧的干预下改变自身固有用电习惯的供需互动, 实现供需动态优化平衡、提升电力资源优化配置水平, 常常用于实现减小负荷的峰谷差等目标<sup>[9]</sup>。

掌握电网中设备的运行状态等信息对电网高效运行至关重要。ESS在电网运行中起重要作用, 包括提供紧急功率支撑, 消纳可再生能源的出力<sup>[10]</sup>, 削峰填谷<sup>[11]</sup>等, 因此识别不同条件(包括气候, 供电区域等)和不同时刻下可参与需求侧响应的用户侧ESS容量, 是进行电网调度以及ESS自适应控制的重要依据。

配电网中用户侧ESS的接入为需求侧响应提供了新的手段, 系统侧通过电价等措施鼓励用户侧ESS根据目标进行充放电。针对ESS参与需求响应的策略已有大量研究: 文献[12]提出目标为消纳新能源出力的需求响应策略; 文献[13]提出在风险约

束下利益最大化的需求响应策略; 文献[14]以最小化系统运行费用和最大化用户满意度为目标计算运行方式; 文献[15]将购电费用最低和负荷峰值降低作为目标设计需求响应策略; 文献[16]考虑减少经济成本和排污成本, 提出广义需求响应资源的协同控制策略; 文献[17]以光伏利用率最大和年净利润最大为目标, 提出基于需求响应协同控制策略的ESS容量配置方法。

以上研究均未考虑因各类负荷目标不同而存在的控制策略上的差异性, 也未考虑其联合效应, 缺少识别不同时刻和条件下用户侧ESS响应容量的方法。因此文中提出基于需求侧响应的配电网储能容量识别方法: 考虑包括居民/商业/工业负荷在内的不同类型用户的需求响应协同控制目标, 用粒子群算法进行ESS充放电与负荷投切策略求解, 最后对系统内剩余ESS电量求和, 计算响应容量。结果表明负荷结构与分布式发电对响应容量均产生一定影响, 可为ESS配置与系统运行策略设计的后续研究提供一定参考。

## 1 需求侧响应策略

ESS与各类负荷的需求侧响应协同控制策略是文中计算配网需求侧响应容量的基础。设计控制策略前, 应根据各类负荷用户的需求, 决定每一类负荷的优化目标。文中以居民负荷、商业负荷、工业负荷为例, 分析3类负荷的需求, 然后设定ESS与各类负荷的需求侧响应控制策略。

### 1.1 各类负荷的优化目标

居民负荷通常集中在居民区, 用户希望购电费

收稿日期: 2019-06-23; 修回日期: 2019-07-17

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“客户侧分布式储能柔性协调控制与联合运行关键技术研究”

用尽量低,同时也希望不改变自己的用电习惯;而且居民负荷通常在电网中占比较小,因此可以不考虑其对系统稳定的贡献,只需满足约束条件即可。因此,居民负荷优化目标为减少用电成本和减少负荷投切。

商业负荷通常在系统中占比较高,对系统稳定性和安全性有较高的重要性。因此,商业负荷优化目标主要为减少负荷的峰谷差,同时需要尽量减小净负荷的波动。

工业负荷在系统中占比通常较高,因此对电力系统稳定有较高重要性;而工厂的生产活动有很强的计划性,通常不希望改变过多用电计划。因此工业负荷优化目标为减小净负荷的峰谷差和减少负荷投切。

### 1.2 优化变量和计算方法

算例中用户侧的需求侧响应资源包括可投切负荷和 ESS。文中采用的需求侧响应协同控制策略将一个优化周期(通常为 1 d)分为多个时段(文中为 96 个),这些时段分为 2 类,即高负荷时段和低负荷时段,按下式划分:

$$t \in \begin{cases} p_h & L_n(t) \geq \bar{L}_n \\ p_l & L_n(t) < \bar{L}_n \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $t$  为时刻;  $p_h$ ,  $p_l$  分别为高负荷和低负荷时段;  $\bar{L}_n$  为一个优化周期内净负荷的均值;  $L_n(t)$  为  $t$  时刻的净负荷,即从公共耦合点(point of common coupling, PCC)观察,考虑 DG 出力和 ESS 充放电的需求侧负荷情况,计算如下:

$$L_n(t) = L(t) - P_{DG}(t) + P_{ESS}(t) \quad (2)$$

式中:  $L(t)$  为负荷功率;  $P_{DG}(t)$  为 DG 出力;  $P_{ESS}(t)$  为 ESS 功率,为正值时表示充电,为负值时表示放电。

为了防止 ESS 起到系统运行优化的反作用,同时为了简化计算方法,文中方法要求在高负荷时段,不允许 ESS 充电或负荷投入;在低负荷时段,不允许 ESS 放电或负荷切除。

为了减少变量数,提高算法的收敛性,优化的变量为各个时段 ESS 充/放电量以及负荷的投/切量(该时段各个时刻的功率之和);为简化计算步骤,规定各个时刻的充放电量或者投切量按照原始净负荷情况进行同比例分配。假设在时段  $i$  的负荷投/切量为  $\Delta L(i)$ ,各时刻的投切量计算如下:

$$L'(t) - L(t) = \Delta L(i) \frac{L_n(t) - \bar{L}_n}{\sum_{\tau \in p_i} (L_n(\tau) - \bar{L}_n)} \quad (3)$$

式中:  $L'(t)$  为经过投切之后的负荷;  $p_i$  为时段  $i$  对应的时刻集合。类似地,假设在时段  $i$  中 ESS 的充/放电量为  $\Delta S_{ESS}(i)$ ,则每个优化步长中 ESS 的充放电量计算如下:

$$P_{ESS}(t) = \Delta S_{ESS}(i) \frac{L_n(t) - \bar{L}_n}{\sum_{\tau \in p_i} (L_n(\tau) - \bar{L}_n)} \quad (4)$$

### 1.3 优化模型

需求侧响应的主要目的为削峰填谷,平抑输出波动,经济效益最大等,这些目的均能找到相应的目标。

(1) 减少净负荷不平衡程度:

$$O_1 = \sum_{t=t_0}^T |L'_n(t) - \bar{L}_n| \Delta T \quad (5)$$

式(5)体现了各时刻净负荷和平均净负荷之差的累积量。 $t_0$  为需求侧响应周期开始时间;  $T$  为优化周期长度;  $L'_n$  为优化后的净负荷;  $\Delta T$  为步长。

(2) 减少功率波动:

$$O_2 = \sum_{t=t_0+1}^T |L'_n(t) - L'_n(t-1)| \Delta T \quad (6)$$

式(6)体现了相邻的 2 个时段的需求侧净负荷差距的累计程度,反映了净负荷曲线的平滑度。

(3) 经济性最优:

$$O_3 = \sum_{t=t_0}^T L'_n(t) p(t) \Delta T \quad (7)$$

式中:  $p(t)$  为随时间变化的价格,且价格经无量纲化处理,为与固定价格的比值。

(4) 对部分用户而言,应该尽量减少负荷的改变量,保证用户的满意度。用户的满意度与负荷改变量有关:

$$O_4 = \sum_{t=t_0}^T |L'(t) - L(t)| \Delta T \quad (8)$$

结合各类负荷的优化目标选择其响应目标。居民负荷选择  $O_3$  和  $O_4$ ,并加上响应的权重,商业负荷选择  $O_1$  和  $O_2$ ,工业选择目标为  $O_1$  和  $O_4$ ,并且权衡各个目标的重要性,根据经验设定相应的权重系数。

文中采用罚系数法将以下 3 个约束条件加入优化模型:

(1) 用户不满意程度。负荷的损失不应该过大。计算方法是每一时刻的负荷损失相加,允许的上限是 10%。

$$C_1 = \begin{cases} A(t) & A(t) > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$A(t) = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^T N_{\text{nosati}}(t) \Delta T - 0.1 \quad (10)$$

式中:  $N_{\text{nosati}}(t)$  为用户不满意程度, 计算如下:

$$N_{\text{nosati}}(t) = \begin{cases} 1 - \frac{L'(t)}{L(t)} & L'(t) < L(t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

(2) 周期内投切负荷不平衡程度。一个周期内负荷投切应大致相等, 其计算方法是将各个时刻的投切量相加, 允许的上限为一个步长最大负荷量的消耗能量的 10%, 计算如下, 其中  $L_{\text{max}}$  为原负荷量的最大值。

$$C_2 = \begin{cases} B(t) & B(t) > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$B(t) = \frac{1}{L_{\text{max}} \Delta T} \left| \sum_{t=t_0}^T (L'(t) - L(t)) \Delta T \right| - 0.1 \quad (13)$$

(3) 周期内 ESS 充放电不平衡程度。为了下一个优化周期的正常运行, 每个周期内应该尽量满足充放电相等。允许上限最大容量的 10%, 计算如下, 其中  $S_{\text{ESS}}$  为 ESS 系统额定容量:

$$C_3 = \begin{cases} C(t) & C(t) > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中:

$$C(t) = \frac{1}{S_{\text{ESS}}} \sum_{t=t_0}^T P_{\text{ESS}} \Delta T - 0.1 \quad (15)$$

综上所述, ESS 与各类负荷协同控制策略的目标函数为式(16)一式(18)。

(1) ESS 与居民负荷协同控制策略的优化目标函数:

$$\min F_{\text{res}} = \alpha_{3,\text{res}} O_3 + \alpha_{4,\text{res}} O_4 + \beta_1 C_1 + \beta_2 C_2 + \beta_3 C_3 \quad (16)$$

式中:  $F_{\text{res}}$  为居民负荷需求侧响应的目标函数;  $\alpha_{3,\text{res}}$ ,  $\alpha_{4,\text{res}}$  分别为  $O_3$  和  $O_4$  在居民区需求侧响应优化目标中对应的权重;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  分别为约束条件  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  相应的惩罚系数。

(2) ESS 与商业负荷协同控制策略的优化目标函数:

$$\min F_{\text{com}} = \alpha_{1,\text{com}} O_1 + \alpha_{2,\text{com}} O_2 + \beta_1 C_1 + \beta_2 C_2 + \beta_3 C_3 \quad (17)$$

式中:  $F_{\text{com}}$  为商业负荷需求侧响应的目标函数,  $\alpha_{1,\text{com}}$ ,  $\alpha_{2,\text{com}}$  分别为  $O_1$  和  $O_2$  在商业区需求侧响应优化目标中对应的权重。

(3) ESS 与工业负荷协同控制策略的优化目标函数:

$$\min F_{\text{ind}} = \alpha_{1,\text{ind}} O_1 + \alpha_{4,\text{ind}} O_4 + \beta_1 C_1 + \beta_2 C_2 + \beta_3 C_3 \quad (18)$$

式中:  $F_{\text{ind}}$  为商业负荷需求侧响应的目标函数;  $\alpha_{1,\text{ind}}$ ,  $\alpha_{4,\text{ind}}$  分别为  $O_1$  和  $O_4$  在工业区需求侧响应优化目标中对应的权重。

ESS 模型包括部分约束条件。ESS 的基本参数包括: 装机容量, 荷电状态(即文中的响应容量, 用  $S$  表示), 充/放电最大功率, 循环效率, 自放电率, 循环次数等等。其中装机容量为最基本的参数, 表示 ESS 的最大电量, 而荷电状态则表示 ESS 剩余可用的容量, 可以表示为一不等式约束<sup>[18]</sup>:

$$S_{\text{min}} \leq S \leq S_{\text{max}} \quad (19)$$

式中:  $S_{\text{min}}$  为不损害 ESS 的最低荷电状态, 文中取为 0.1 倍的装机容量;  $S_{\text{max}}$  为最大荷电状态, 大部分情况下为装机容量或装机容量乘以系数, 文中为 0.9。

计算荷电状态的简单方法是安时积分法, 即文中采用的识别方法<sup>[19]</sup>:

$$S(t) = S(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t i(t) dt}{C} \quad (20)$$

式中:  $t_0$  为优化开始的时刻;  $S(t)$  为  $t$  时刻 ESS 的荷电状态;  $i(t)$  为 ESS 在  $t$  时刻的充/放电电流, 以充电时电流方向为正方向;  $C$  为 ESS 的最大容量; 荷电状态为以最大容量为基准值的标么值。

由于换流器的容量限制和储能元件本身的限制, ESS 存在充放电最大功率(有时不对称), 限制了 ESS 的输出最大功率, 表示如下:

$$P_{\text{charge}} \leq P_{\text{charge,max}} \quad (21)$$

$$P_{\text{discharge}} \leq P_{\text{discharge,max}} \quad (22)$$

式中:  $P_{\text{charge}}$  为充电功率;  $P_{\text{charge,max}}$  为最大充电功率;  $P_{\text{discharge}}$  为放电功率;  $P_{\text{discharge,max}}$  为最大放电功率。如果认为 ESS 充放电限制大小相等, 则可仅由一个不等式表示:

$$|P_{\text{ESS}}| \leq P_{\text{ESS,max}} \quad (23)$$

式中:  $P_{\text{ESS}}$  为 ESS 充放电功率, 以充电时电流方向为正方向;  $P_{\text{ESS,max}}$  为充放电功率的最大值。

效率指的是每一次充放电循环, 输出的能量与输入容量之比, 文中不考虑。因此充放电量为 ESS 响应容量的改变量。

循环次数反映了 ESS 的寿命。在寿命周期的后期系统老化现象将变得严重, 容量和效率降低, 自放电率降低, 性能劣化<sup>[20]</sup>。文中不考虑 ESS 的循环次数和折旧, 因此荷电状态的限制, 充放电限制均为常数。

#### 1.4 计算方法

文中采用的协同控制策略求解方法为标准粒子群算法, 算法流程如图 1 所示。

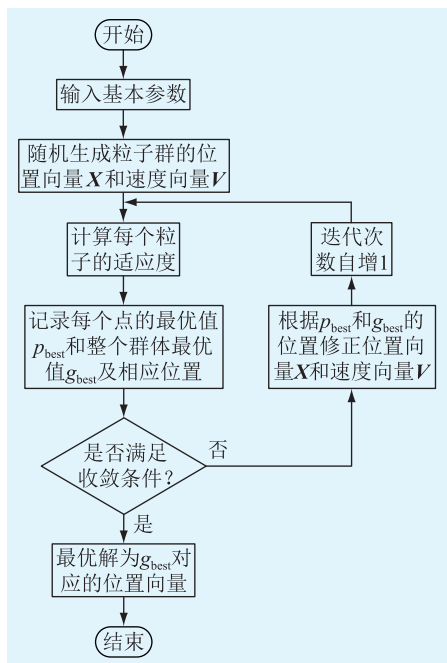


图1 粒子群算法流程

Fig.1 Flow chart of particle swarm optimization

粒子群算法是一种全局随机优化算法,利用拥有基本行动准则的粒子作为个体,使整个粒子群体表现出某种复杂特性以解决优化问题,有着收敛迅速的特点<sup>[21]</sup>。算法中,每个粒子的位置代表一种解,每一次迭代中,各个粒子根据整个粒子群的历史最佳位置和自己所达到的最佳位置进行速度和位置的修正,如果成功,粒子群将在若干次迭代后收敛于某一点,此点对应问题最优解。

## 2 储能容量识别

ESS 具有电源和负荷的双重特性<sup>[22-26]</sup>,利用这种特性,可以随时增减电网中的电源或者负荷量,实现灵活调度。而配电网 ESS 响应容量是判断需求侧响应能力的重要标准之一,用户侧 ESS 响应容量识别是 ESS 自适应控制的基础。

智能识别电网中各种条件和时刻下 ESS 容量对更全面地把握电网条件有重要帮助。当电力系统对有功率有需求时,或者需要 ESS 充电消纳冗余出力时,由于在满足响应需求和保证 ESS 响应能力需要做权衡以作出最有利于全局的决定,掌握电力系统中的 ESS 的响应容量状况,和评价 ESS 响应能力至关重要。

配电网中通常含有各种类型负荷的用户。不计充放电的损耗,自放电现象和 ESS 的折旧,在各类型负荷与 ESS 的协调控制优化流程结束之后,根据每个时刻的充放电量和整个优化周期的初始电量,计算出每个时刻配网中 ESS 的剩余容量,具体

计算如下:

$$E_{ESS,n}(t) = E_{ESS,n}(t_0) + \Delta T \sum_{\tau=t_0}^t P_{ESS,n}(\tau) \quad (24)$$

$$E_{ESS}(t) = \sum_n E_{ESS,n}(t) \quad (25)$$

式中:  $E_{ESS,n}(t)$  为  $n$  类(包括居民类、商业类、工业类)负荷用户在  $t$  时刻所拥有的 ESS 的剩余容量。式(25)则将所有类型拥有的 ESS 剩余量求和,即得到整个配电系统中所有的响应容量,以完成配电网中 ESS 系统容量的识别。

## 3 算例分析

### 3.1 场景设置

目前还没有标准的带有 ESS 和不同类型负荷的需求响应算例,因此文中从具有参考意义的文献中选取数据建立仿真场景。文中选取的算例是基于文献[21]的配电网网络组成和优化配置结果,为了简化计算步骤,不计网损和电压变化,将配电网中所有的参与者包括光伏电站(photovoltaic, PV),风电场(wind turbine, WT), ESS 和负荷聚合为连于同一 PCC 点,如图 2 所示。

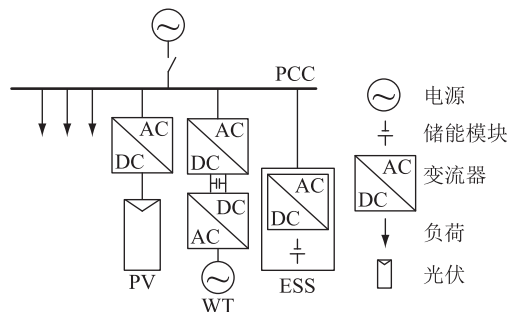


图2 配电网简图

Fig.2 Simplified distribution system

风机装机容量为 500 kW,光伏发电系统装机容量为 1 000 kW,ESS 装机容量为 2 500 kW·h<sup>[21]</sup>,充放电功率限制为 500 kW;由于 DG 出力和各类负荷曲线无关,而这些曲线都很少能在同一篇文献中找到,因此取不同文献中较有代表性的曲线。其中光伏,风机输出的曲线取自文献[27];居民负荷取自文献[9];商业负荷曲线形状取自文献[28];工业负荷曲线形状取自文献[29]。各类曲线形状如图 3 所示(均经过标幺化)。

总负荷容量为 2 500 kW;设每一类负荷的用户所拥有的 DG 和 ESS 装机容量的比例与负荷占比相同。取优化周期为 24 h,平均分为 96 个时刻。每一类负荷均规定优化周期开始时的初始储能容量,其中居民负荷用户为其装机容量 40%,商业负荷用户为 50%,工业负荷用户为 30%,各类负荷 30%可投



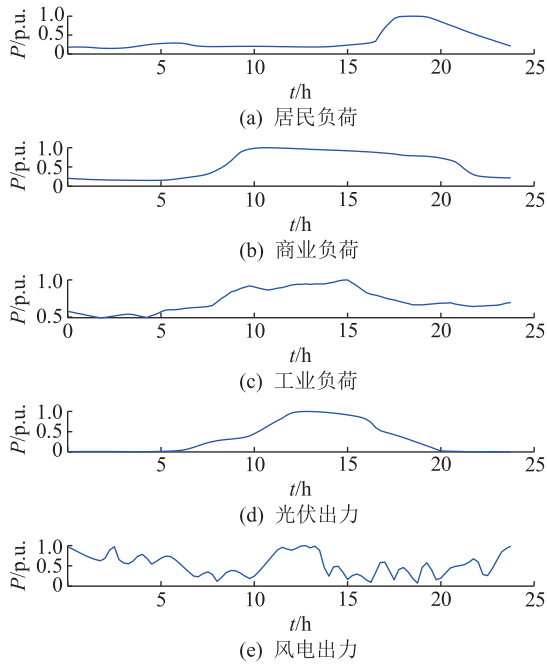


图3 功率曲线

Fig.3 Power profiles

切。此算例中,考虑到各类目标对于各类负荷用户的重要性,权重系数  $\alpha_{3,res}$  取 0.5,  $\alpha_{4,res}$  取 0.5,  $\alpha_{1,com}$  取 0.3,  $\alpha_{2,com}$  取 0.7,  $\alpha_{1,ind}$  取 0.5,  $\alpha_{4,ind}$  取 0.5;惩罚系数  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  均为 100。为了研究不同情况下文中方法的使用情况,设置 3 个场景。场景 I 为基本场景, DG 发电量最高,负荷结构为居民 20%,商业 50%,工业 30%;场景 II 在场景 I 的基础上,将 DG 发电量改为 1/4,其余不变;场景 III 在场景 I 的基础上,调整负荷结构为居民 40%,商业 50%,工业 10%,其余不变。文中协同控制策略的解法采用粒子群算法,在 Matlab 环境下仿真。

### 3.2 仿真结果

仿真结果如图 4—图 6 所示。总体而言,在 3 种场景下,负荷的投切量都较小,这是减小负荷投切量的结果。由此可见,需求响应的目标主要由 ESS 实现。另外总体上看,ESS 响应容量均呈早晨上升,白天下降,晚上再次上升的趋势,属于一充一放,且达到最大值以及最小值的时刻都较为接近。但是,ESS 均没有得到完全利用,这是因为文中用的算例是基于文献[21]的配置结果,其不仅考虑了 ESS 用于削峰填谷的收益,还考虑了各种可能出现的场景下 ESS 要有足够大的调节空间,因此拥有一定的裕度。而文中考虑的运行目标中,均不考虑各个状态下的调节空间,因此需要的配置容量也较少。

为了更细致、更直观地对比各个场景的运行结果之间的差异,进一步分析不同负荷结构和 DG 出力对配电网中 ESS 的响应容量的影响,文中将 3 个

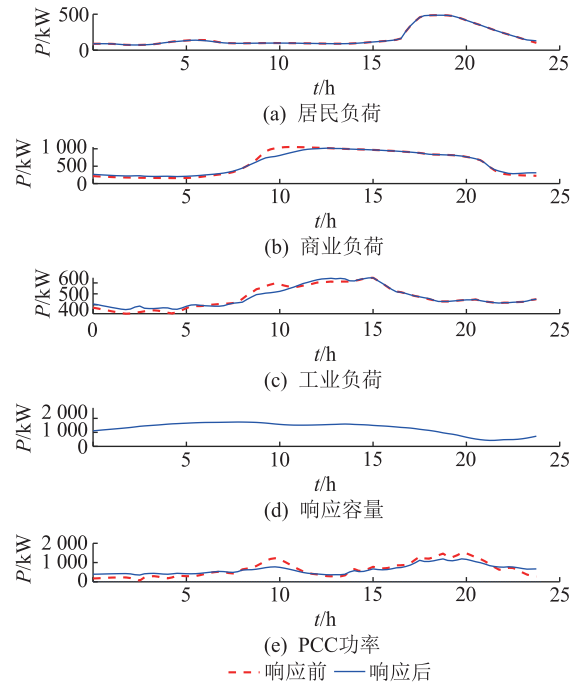


图4 场景 I 结果

Fig.4 Results of scene I

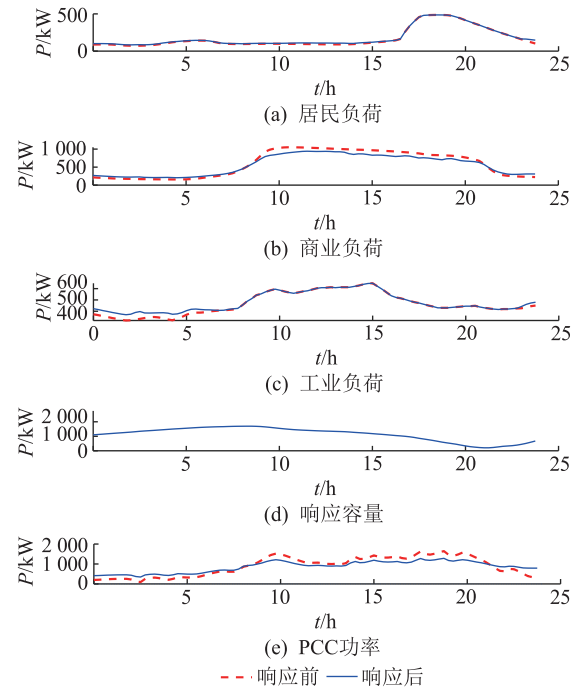


图5 场景 II 结果

Fig.5 Results of scene II

场景的削减峰谷差水平,ESS 利用率和 ESS 容量最大值以及最小值和到达时刻等指标进行对比,结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 显示,3 个场景削峰填谷的效果均在 40% 以上。场景 II 与场景 III 中原峰谷差比场景 I 稍高,峰谷差削减量也稍大。3 个场景中,ESS 的利用率均在 60% 上下。若不考虑各种状态下的 ESS 使用

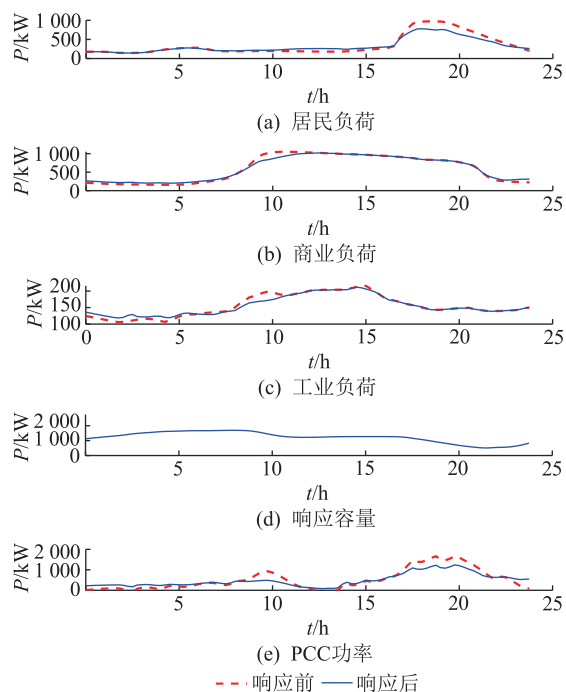


图6 场景Ⅲ结果

Fig. 6 Results of scene III

表1 优化结果总结

Table 1 Results of optimization

场景	原峰谷差/kW	削减量/kW	削减比率/%	储能利用率/%
I	1 443	603	41.8	58.3
II	1 555	715	46.0	64.4
III	1 736	743	42.8	52.7

表2 响应容量识别结果总结

Table 2 Results of responsible capacity identification

场景	最高点时刻	最低点时刻	最高点/kW	最低点/kW
I	7:45	21:15	1 740	428
II	8:25	21:00	1 698	250
III	7:45	21:30	1 693	508

裕度,可以将 ESS 配置容量降至 1 800 kW 左右,从而提高 ESS 配置利用率。

表 2 显示,场景 II 和场景 III 的 ESS 响应容量最低点与最高点都比较接近场景 I 的结果,但是达到最高点和最低点的时刻有所差别。场景 II 中,由于 DG 出力降低, DG 发电时, ESS 的充电量减小,因此充电比场景 I 更晚达到最大值,而放电比场景 I 更早达到最小值,从图像上总体看, ESS 响应容量高的持续时段较短;而场景 III 中,改变了负荷结构,由于考虑负荷形状时,均考虑了某类负荷可能达到的最大功率,而平均负荷较低的居民负荷比例提高,导致总负荷量减小,因此在场景 I 与场景 III 同时达到响应容量最高点的时候,放电更晚达到最小值。

## 4 结论

文中研究了基于配电网中 ESS 与不同类型负荷协同需求响应策略的 ESS 响应容量识别方法,并得出以下结论:

当 ESS 响应容量过低时,若外部有紧急有功支撑的需求时,有可能无法响应,威胁系统安全性和稳定性;而 ESS 响应容量过高时,若系统中有多余的 DG 出力,将无法消纳而造成浪费。而响应容量的最高点和最低点出现时间与系统的 DG 出力情况、负荷结构均有联系,当 DG 出力降低时, ESS 的响应容量的高峰时刻会推迟且低谷时刻会提前,总体上响应容量高的时间长度会减小;另外,当系统中负荷波动较大的负荷类型占比提高时, ESS 响应容量的低谷时刻会推迟。应当根据协同控制策略合理配置 ESS 容量,提高 ESS 利用率的同时保证系统稳定性。

今后的研究中可以考虑系统侧的响应需求和 ESS 的响应能力,平衡两者之间的关系,设计全局最优化的 ESS 自适应控制策略。

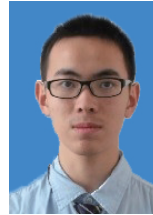
## 参考文献:

- [1] 田世明,王蓓蓓,张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3576-3589.  
TIAN Shiming, WANG Beibei, ZHANG Jing. Key technologies for demand response in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(22):3576-3589.
- [2] 王成山,武震,李鹏. 分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J]. 电力系统自动化,2014,38(16):1-8,73.  
WANG Chengshan, WU Zheng, LI Peng. Prospects and challenges of distributed electricity storage technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(16):1-8,73.
- [3] 张振伟,赵晋泉,韩佳兵,等. 考虑大量分布式电源接入的主配网协同优化控制[J]. 电网与清洁能源,2017,33(7):110-115.  
ZHANG Zhenwei, ZHAO Jinquan, HAN Jiabing, et al. Collaborative optimization control of the transmission and distribution networks considering a large number of DGs connected [J]. Power System and Clean Energy, 2017,33(7):110-115.
- [4] 余立武,李浩然,刘岩. 考虑分布式电源出力随机性的配电网无功优化策略[J]. 电网与清洁能源,2017,33(11):91-98.  
YU Liwu, LI Haoran, LIU Yan. Reactive Power optimization strategy of distribution network with randomness of distributed power supply considered [J]. Power System and Clean Energy, 2017,33(11):91-98.
- [5] 丁明,陈忠,苏建徽,等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):19-25,102.  
DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(1):19-

- 25, 102.
- [6] 温智平, 梁振锋, 彭书涛, 等. 分布式电源接入对操作型自动装置影响研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(11): 123-128.  
WEN Zhiping, LIANG Zhenfeng, PENG Shutao, et al. An overview of researches of the influence of distributed resources on the operation-type automatic device [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(11): 123-128.
- [7] 李文汗, 赵冬梅, 王心, 等. 考虑分布式电源并网的配电网适应性评价方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 117-123.  
LI Wenhan, ZHAO Dongmei, WANG Xin, et al. Adaptability evaluation for the distribution equipment considering distributed generations [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 117-123.
- [8] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.  
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response researching deregulated electricity markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [9] 王海燕, 同向前, 路娇, 等. 基于需求侧响应和储能电量预估的微网运行调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 86-93.  
WANG Haiyan, TONG Xiangqian, LU Qiao, et al. Dispatching strategy of microgrid based on demand side response and energy estimation of energy storages[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 86-93.
- [10] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.  
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [11] 吴霜, 季聪, 孙国强. 含分布式储能的配电网多目标运行优化策略研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 20-26.  
WU Shuang, JI Cong, SUN Guoqiang. Multiple objection operation strategy optimization research of distribution network including distributed energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 20-26.
- [12] 彭政, 崔雪, 王恒, 等. 考虑储能和需求侧响应的微网光伏消纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 63-69.  
PENG Zheng, CUI Xue, WANG Heng, et al. Research on the accommodation of photovoltaic power considering storage system and demand response in microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 63-69.
- [13] NGUYEN D T, LE L B. Risk-constrained profit maximization for microgrid aggregators with demand response [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 135-146.
- [14] 曾君, 徐冬冬, 刘俊峰, 等. 考虑负荷满意度的微电网运行多目标优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3325-3334.  
ZENG Jun, XU Dongdong, LIU Junfeng, et al. Multi-objective optimal operation of microgrid considering dynamic loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3325-3334.
- [15] 何舜, 郑毅, 蔡旭, 等. 基于荷-储型微网的需求侧管理系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 15-20.  
HE Shun, ZHENG Yi, CAI Xu, et al. Optimal operation for demand side management based on load-storage microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 15-20.
- [16] 邢龙, 张沛超, 方陈, 等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12, 133.  
XIN Long, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Optimal operation for microgrid using generalized demand side resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 7-12, 133.
- [17] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716.  
ZHOU Nan, FAN Wei, LIU Nian, et al. Battery storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [18] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.  
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [19] 欧阳佳佳. 储能电池管理系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 15-16.  
OUYANG Jiajia. Research on energy storage battery management system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 15-16.
- [20] BENOICIRCT R, CHRISTOPHE S. 电网储能技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 11-33.  
BENOICIRCT R, CHRISTOPHE S. Power grid energy storage technology [M]. Beijing: Mechanical industry press, 2017: 11-33.
- [21] 沈显君. 自适应粒子群优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.  
SHEN Xianjun. Adaptive particle swarm optimization (PSO) and its application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [22] 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.
- [23] 张静炜, 朱想, 赫卫国, 等. 考虑光伏发电和储能系统调压能力的配电网储能容量优化配置[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 30-35.

- ZHANG Jingwei, ZHU Xiang, HE Weiguo, et al. Optimized configuration for ESS capacity of distribution network considering voltage regulation ability of photovoltaic generation and ESS[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(7):30-35.
- [24] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20):69-77.
- LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20):69-77.
- [25] 张祥, 周博文. 微网储能系统的模糊控制策略研究[J]. *智慧电力*, 2018, 46(4):16-21.
- ZHANG Xiang, ZHOU Bowen. Study on fuzzy control strategy based on Micro-grid energy storage system[J]. *Smart Power*, 2018, 46(4):16-21.
- [26] 郭森, 赵浩然, 赵名锐, 等. 多类异质电储能系统优选模型研究[J]. *智慧电力*, 2018, 46(10):11-17.
- GUO Sen, ZHAO Haoran, ZHAO Mingrui, et al. Optimal selection model for multi-class heterogeneous electrical energy storage systems[J]. *Smart Power*, 2018, 46(10):11-17.
- [27] 赵金利, 于莹莹, 李鹏, 等. 基于锥优化的储能系统参与配电网运行调节快速计算方法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(2):30-35, 48.
- ZHAO Jinli, YU Yingying, LI Peng, et al. A fast calculation method of energy storage system for distribution network regulation based on conic programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(2):30-35, 48.
- [28] 南昌市委. 南昌市电力需求侧管理节电资源潜力调查报告[EB/OL]. <http://fgw.nc.gov.cn/News.shtml? p5=2988328>, 2012.
- Nanchang Municipal Development and Reform Commission. Nanchang power demand side management power saving potential investigation and analysis report[EB/OL]. <http://fgw.nc.gov.cn/News.shtml? p5=2988328>, 2012.
- [29] 李珞新. 行业用电分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- LI Luoxin. Industry power analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

作者简介:



方逸波

方逸波(1995),男,硕士在读,研究方向为储能技术在电力系统中的应用(E-mail:yibofang@hhu.edu.cn);

袁晓冬(1979),男,硕士,教授级高级工程师,从事电力系统及其自动化相关工作;

费骏韬(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统及其自动化相关工作。

## Capacity identification of energy storage in distribution grids based on demand response

FANG Yibo<sup>1</sup>, YUAN Xiaodong<sup>2</sup>, FEI Juntao<sup>2</sup>, XU Qingqiang<sup>3</sup>, SHI Linjun<sup>1</sup>, WU Feng<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Demand response (DR) has obtained more methods with a growing number of distributed energy storage systems (ESSs) tied to the grid on the demand side. Responsible capacity of ESSs is one significant aspect of DR ability of the demand side. The article proposes a method to identify the responsible capacity of ESSs in the distribution grid to estimate demand side ESSs' responsible capacity under different circumstances. The work considers various DR co-control aims of different kinds of loads and solves the operation strategy of ESS and changeable loads by particle swarm optimization, then calculates the responsible capacity of ESSs. The results show that load structure and distributed power outputs have an impact on the responsible capacity, to achieve the balance between security and reliability of power system operation and efficiency of ESSs, proper capacity allocation should take control objective into account.

**Keywords:** demand response; energy storage system; capacity identification; particle swarm optimization; collaborative control strategy

(编辑 方晶)