

# 基于情景分析法风电场中储能系统经济调度

厉伟<sup>1</sup>, 颜宁<sup>1</sup>, 张博<sup>1</sup>, 马少华<sup>1</sup>, 戈阳阳<sup>2</sup>, 肖婉秋<sup>3</sup>

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110003; 3. 国网沈阳市于洪区供电公司, 辽宁 沈阳 110141)

**摘要:** 为保证电网安全、稳定、经济运行, 储能系统在电力系统中得到了广泛应用, 通过调控其功率及运行状态, 可提高电网各个环节的灵活性, 实现电网经济调度。本文首先综合考虑储能系统功率、容量、状态维持时间、爬坡速率等约束条件及风力发电机组出力、开停机时间等约束条件, 建立储能系统的稳态模型与机组组合调度模型, 并对风电出力进行预测, 采用情景分析方法, 以电力系统中总发电成本最小为优化目标, 实现风电上网情况下含规模化储能系统电网经济有效运行。并通过实际算例分析储能系统对风电机组开停机、出力的影响及储能对接纳风电的作用, 达到平衡风力发电机组承担负荷分布、降低发电成本的目标。

**关键词:** 储能系统; 机组组合; 情景分析法; 削峰填谷; 经济调度

**DOI:** 10.12067/ATEEE1708044      **文章编号:** 1003-3076(2018)02-0047-06      **中图分类号:** TM614

## 1 引言

2016 年国家能源局发布了《风电发展“十三五”规划》相关文件<sup>[1]</sup>, 文件中指出随着新能源的快速发展, 未来 5 年风电的装机和并网容量会显著增加, 风电消纳问题有待更好解决。为解决上述问题文件提出了深度调节系统的调峰能力, 有效提高系统的灵活性运行, 合理优化调度运行管理, 有效提高接纳风电的潜力等目标。风电场接入大规模的储能系统可有效提高风电的接纳能力, 平衡风力发电机组承担负荷分布, 降低发电成本<sup>[2-4]</sup>。

大规模储能系统接入风电场后, 其经济调度是需要解决的重要问题。经济调度基本要求是在保证系统安全、稳定、可靠前提下, 提高电能产生、输送效率, 降低供电成本。研究储能系统接入电网后对其安全稳定性的影响, 首先需要对储能系统建立稳态模型。目前应用广泛的储能系统为电池储能系统, 文献[5]建立了电池储能系统结构模型, 在模型中考虑容量、有功、无功限制, 该模型适用于储能系统接入电网的机电暂态分析计算, 为本文研究奠定了基础。文献[6]分析了风电接入电网后对电力系统

机组组合问题带来的影响, 提出了基本的建模方法和求解算法。机组组合问题及最优潮流计算问题是经济调度的重要组成部分<sup>[7,8]</sup>, 而风力发电并网会对机组组合和最优潮流结果产生影响, 利用储能系统参与调峰, 可平抑出力波动, 缓解风力发电带来的不利影响, 促进风电利用率。因此, 采用大规模储能系统参与电网经济调度对电力系统优化运行具有重要意义<sup>[9,10]</sup>。

本文研究含规模化储能系统风电场接入的电网经济调度问题, 首先建立储能系统的稳态模型与机组组合调度模型, 在此基础上研究储能系统参与机组组合和多时间段最优潮流问题, 提出一种最优潮流算法, 求取最优经济调度解。实例验证了储能系统可使全天各个时间潮流分布产生耦合作用, 平衡风力发电机组承担负荷分布, 降低发电成本。

## 2 电池储能系统稳态模型

对电池储能系统参与电网经济调度问题分析时, 首先要建立储能系统稳态模型。模型主要由存储装置、能量转换装置、控制器组成, 储能元件通过变流器与电网相连, 通过控制变流器实现与电网能

**收稿日期:** 2017-08-11  
**基金项目:** 国家电网公司科技项目(2017YF-42)  
**作者简介:** 厉伟(1962-), 男, 辽宁籍, 教授, 博导, 博士, 研究方向为高电压试验技术、储能系统调控技术等;  
颜宁(1988-), 女, 辽宁籍, 博士研究生, 研究方向为储能系统经济调度等(通讯作者)。

量交换。在储能阶段,电能从网侧流到储能元件中进行能量存储;在放电阶段,电能从储能装置流向电网。系统模型结构如图1所示。

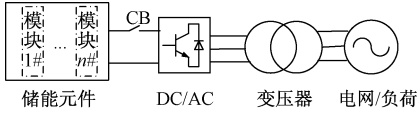


图1 电池储能系统模型结构图

Fig.1 Structure diagram of battery energy storage system model

受到电池容量和变流器系统各方面的限制,储能系统相邻时间段能量关系为:

$$E(i+1) = E(i)(1-\xi) + [P_c^+(i) \cdot \eta^+ - P_c^-(i)/\eta^-] \Delta t \quad (1)$$

式中,  $\eta^+$  和  $\eta^-$  分别为充、放电效率,充放电效率与环境温度、放电深度、内阻等有关;  $\xi$  为储能系统自放电率,与电池内部特性有关;  $E(i)$  为前一时刻储能系统能量;  $P_c^+(i)$ 、 $P_c^-(i)$  分别为储能系统  $i$  时段储存、释放功率。式(1)表示电池储能系统任意时刻能量平衡。

电池储能系统受到储存能量限制,如式(2)所示:

$$E_{\min} \leq E(i) \leq E_{\max} \quad (2)$$

式中,  $E_{\min}$  和  $E_{\max}$  分别为储能系统剩余最小和最大容量。

电池储能系统的充电功率和放电功率需要满足如下要求:

$$\begin{cases} c(i) \cdot P_{\min}^+ \leq P_c^+(i) \leq c(i) \cdot P_{\max}^+ \\ f(i) \cdot P_{\min}^- \leq P_c^-(i) \leq f(i) \cdot P_{\max}^- \\ 0 \leq c(i) + f(i) \leq 1 \\ c(i), f(i) \in \{0, 1\} \\ \frac{P_c^+(i)}{P_{\max}^+} \leq c(i) < \frac{P_c^+(i)}{P_{\min}^+} + 1 \\ \frac{P_c^-(i)}{P_{\max}^-} \leq f(i) < \frac{P_c^-(i)}{P_{\min}^-} + 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $c(i)$  和  $f(i)$  为储能系统充放电状态  $i$  时刻控制变量,  $c(i) = 0$ , 代表储能系统该时刻不充电;  $c(i) = 1$ , 代表储能系统该时刻处于充电状态;  $f(i) = 0$ , 代表储能系统该时刻不放电;  $f(i) = 1$ , 代表储能系统该时刻处于放电状态;  $P_{\max}^+$  和  $P_{\min}^+$  分别为最大、最小充电功率;  $P_{\max}^-$  和  $P_{\min}^-$  分别为最大、最小放电功率;  $\frac{P_c^+(i)}{P_{\max}^+} \leq c(i) < \frac{P_c^+(i)}{P_{\min}^+} + 1$  和  $\frac{P_c^-(i)}{P_{\max}^-} \leq f(i) < \frac{P_c^-(i)}{P_{\min}^-} + 1$  为状态变量的功率约束,目的是保证充放电状态与

功率的一致性,如当  $P_c^+ = 0$  时,  $c(i) = 1$ , 系统此时不充电。

运行周期内充放电次数满足如下要求:

$$\sum_{i=1}^T (|c(i+1) - c(i)| + |f(i+1) - f(i)|) \leq N \quad (4)$$

式中,  $T$  为一个运行周期内分割成的时段数;  $N$  为一个运行周期内最大状态转换次数。

发电爬坡速率和滑坡速率满足如下要求:

$$\begin{cases} P_c^+(i+1) - P_c^+(i) \leq c(i) R_c^{\max} \\ P_c^-(i+1) - P_c^-(i) \geq -c(i+1) R_f^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $R_c^{\max}$  和  $R_f^{\max}$  分别为最大爬坡速率和最大滑坡速率。

最小状态维持时间满足如下要求:

$$\begin{cases} T_c c^q(i) \leq \sum_{t=1}^{T_c} c(i) \leq T_c \\ T_f f^q(i) \leq \sum_{t=1}^{T_f} f(i) \leq T_f \\ T_i (c^s(i) = 1 \mid f^s(i) = 1) \leq \sum_{t=1}^{T_i} (c(i) = 0 \cap f(i) = 0) \leq T_i \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $T_c$ 、 $T_f$  和  $T_i$  分别为储能最小维持时间、释能最小维持时间和状态转换固定时间;  $c^q(i)$  和  $f^q(i)$  分别为储能状态和释能状态启动变量;  $c^s(i)$  和  $f^s(i)$  分别为储能状态和释能状态停止变量; 第三个表达式为限定状态转换时间,表示储能和释能状态停止时间不大于储能系统不工作时间的总和。

在此模型基础上,可以考虑电池储能系统参与电网经济调度问题。

### 3 电池储能系统稳态模型

#### 3.1 基于情景集的风电储能系统机组组合问题

机组组合问题是一种大规模组合优化问题。大规模储能系统接入电网会对风电机组出力产生影响,通过对储能系统与机组之间协调优化,既可以减轻机组负担,使机组输出曲线平滑,又可以通过改变储能系统运行状态,减少风电机组开停机次数,并实现削峰填谷作用,更有利促进风力发电大规模应用。

由于风电出力的不确定性,本文采用情景分析法对机组组合问题进行研究,对风电场出力情况进行预测,预测误差服从正态分布  $N(0, \sigma^2)$ , 且标准差为 10%, 并设定预测结果  $\pm 3\sigma$  偏差为风电机组出力极限值,如图2所示。

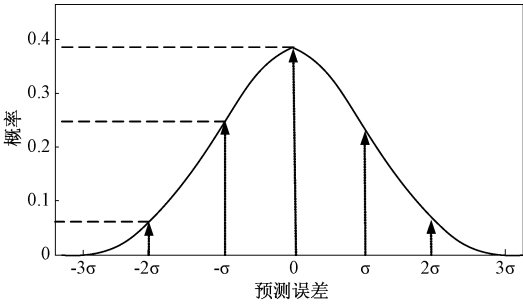


图2 正态分布情景选取图

Fig.2 Scenario analysis diagram of normal distribution

在此范围内选取7个离散场景,并求取各个场景下发生概率,结果如表1所示。

3.2 储能系统接入的电网经济调度分析

电力系统经济调度分析,首先考虑一个调度周

$$F = \min \sum_{s=1}^k \eta_s \left\{ \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N [c_n^s(i) F_n(P_n^s(i)) + F_{gn}] + \sum_{i=1}^T \sum_{m=1}^M \left| [c_m^s(i) F_m^c(i) - f_m^s(i) F_m^f(i)] - [c_m^s(i-1) F_m^c(i-1) - f_m^s(i-1) F_m^f(i-1)] \right| + U_m^s(i) F_g(i) \right\} \quad (7)$$

式中, $N$ 和 $M$ 分别为风电机组与储能系统数量; $s$ 为情景集; $k$ 为总情景数; $\eta_s$ 为情景 $s$ 发生概率; $c_n^s(i)$ 为在情景 $s$ 下第 $n$ 台机组在 $i$ 时段的系统状态变量; $P_n^s(i)$ 为在情景 $s$ 下第 $n$ 台机组在 $i$ 时段的出力; $c_m^s(i)$ 、 $f_m^s(i)$ 、 $U_m^s(i)$ 分别为情景 $s$ 下第 $m$ 台储能系统的充电状态、释能状态、外界能源消耗率; $F_n(P_n^s(i))$ 、 $F_{gn}$ 、 $F_m^c(i)$ 、 $F_m^f(i)$ 、 $F_g(i)$ 分别为风电机组常规运行成本、风电机组常规开停机成本、储能系统能量存储成本、储能系统能量释放成本、外界能源消耗成本。

典型的风电机组运行成本 $F_n(P_n^s(i))$ 表示风电机组运行费用与风电机组出力存在函数关系,典型运行成本特性函数为二次函数,即

$$F_n(P_n^s(i)) = a_n [P_n^s(i)]^2 + b_n P_n^s(i) + c_n \quad (8)$$

式中, $a_n$ 、 $b_n$ 、 $c_n$ 为二次函数系数,选取不同风电机组其取值略有不同。

电力系统中,风电机组总功率、储能系统收发功率、负荷需求保持动态平衡,平衡关系为:

$$\sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N P_n^s(i) - \sum_{i=1}^T \sum_{m=1}^M [P_{mc}^s(i) - P_{mf}^s(i)] = \sum_{i=1}^T P_d(i) \quad (9)$$

式中, $P_d(i)$ 为在情景 $s$ 下第 $i$ 个时间段内系统总负荷; $P_{mc}^s(i)$ 、 $P_{mf}^s(i)$ 分别为在情景 $s$ 下第 $i$ 个时间段内储能、释放功率。

在满足式(9)电力系统平衡条件下,风电机组

表1 风电出力情景概率分布

Tab.1 Scenario probability distribution of wind power

| 场景序号 | 预测误差       | 风电出力率(%) | 概率     |
|------|------------|----------|--------|
| 1    | $-3\sigma$ | 70       | 0.0062 |
| 2    | $-2\sigma$ | 80       | 0.0606 |
| 3    | $-\sigma$  | 90       | 0.2417 |
| 4    | 0          | 0        | 0.3830 |
| 5    | $+\sigma$  | 110      | 0.2417 |
| 6    | $+2\sigma$ | 120      | 0.0606 |
| 7    | $+3\sigma$ | 130      | 0.0062 |

期内 $T$ 个时间段机组组合问题,机组组合问题通常以电力系统中总发电成本最小为目标,即考虑风力发电机组常规运行成本、开停机成本、储能系统能量存储及释放成本、外界能量消耗成本,风电并网后发电成本最小目标函数为:

与储能系统需满足的约束条件如式(3)~式(6)所示。

3.3 全局粒子群算法求取发电成本最优解

本文在粒子群算法基础上提出全局粒子群优化算法,使粒子具有全局感知能力,能够自身感知到周围最好的位置,并且移动到这些位置的中心点。为了维持全局粒子群算法的局部和全局搜索,引入了新的惯性权重。为了避免此算法早熟,将算出的全局最优解进行了一定程度的扰动。全局粒子群算法求解不但加快了收敛速度,而且能较快逃离局部最优解。根据式(3)~式(6)约束条件,通过此算法可有效求出风电并网储能系统接入电网后,电力系统总发电成本的最小值。具体流程如图3所示。

将每个情景集 $s$ 下的发电成本看成1个粒子,将此电力系统中不同情景集下总成本值看成1个群体,以一定的速度移动粒子,单个粒子按每个情景集下成本最小进行移动的最好位置 $P_{best}$ 和按电力系统整体成本最小移动的最好位置 $G_{best}$ 共同决定粒子群移动的方向。不断更新粒子群中各个粒子的位置 $x$ 和速度 $V$ ,第 $k$ 步的更新公式为:

$$\begin{cases} V_{ip}^k = V_{ip}^{k-1} + C_1 \cdot rand_1 \cdot (P_{besti} - x_{ip}^{k-1}) + C_2 \cdot rand_2 \cdot (G_{besti} - x_{ip}^{k-1}) \\ x_{ip}^k = x_{ip}^{k-1} + V_{ip}^{k-1} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $i=1,2,\cdots,n,n$ 为粒子群中粒子的个数; $p=1,$

$2, \cdots, r, r$  为解向量的维数;  $rand_1$  和  $rand_2$  为利用算法求解时各个粒子给定的随机数;  $C_1$  和  $C_2$  为权重。

为确定中心点  $center$ , 则移动粒子  $i$ , 当移动到第  $k$  步时, 其表达式为:

$$\begin{cases} center(x_{i,k}) = aver\{[f(x_{j,k}) < f(x_{i,k})] \\ \cap [dis(x_{j,k}, x_{i,k}) < senselimit]\} \\ aver(x_1, x_2, \cdots, x_n) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ x_{new}^k = x_{new}^{k-1} + rand() (x_{center}^{k-1} - x_{new}^{k-1}) \end{cases}$$

(11)

式中,  $i, j = 1, 2, \cdots, n$ ;  $dis(x_{j,k}, x_{i,k})$  为粒子  $i$  和  $j$  之间的距离;  $senselimit$  为粒子间距离最小值;  $rand()$  在  $(0, 2)$  间服从均匀分布。

4 算例分析

本文以 IEEE RTS 24 节点系统进行算例分析, 此拓扑结构中包含 24 个节点、20 台风力发电机组、38 条线路, 在节点 3~6 分别接入 4 个电池储能系统, 考虑 24h 内机组组合问题, 为减少设备频繁动作, 优化计算间隔为 0.5h, 并通过 MATLAB 对此算例进行求解。风电机组的基本参数如表 2 所示。采用锂电池作为储能单元, 储能系统初始投资成本如表 3 所示, 储能系统基本特性参数如表 4 所示。

表 2 风电机组基本参数

Tab. 2 Basic parameters of wind turbines

| 参数             | 数值      |
|----------------|---------|
| 风力发电机组选型       | 双馈异步发电机 |
| 机组台数/台         | 20      |
| 额定输出功率/MW      | 1.5     |
| 风机出口电压/V       | 690     |
| 风电机组运行平均成本/万元  | 2.3     |
| 风电机组开停机平均成本/万元 | 0.023   |

表 3 储能系统初始投资成本

Tab. 3 Initial investment cost of energy storage system

| 成本构成                | 平均值    |
|---------------------|--------|
| 电源转换系统/(元/kW)       | 3651.3 |
| 存储部件/(元/(kW·h))     | 6269.7 |
| 固定运行维护成本/(元/(kW·年)) | 54.4   |
| 可变运行维护成本/(元/(MW·h)) | 16.6   |
| 替代成本/(元/kW)         | 2909.9 |

表 4 储能系统基本特性参数

Tab. 4 Basic characteristic parameters of energy storage system

| 参数          | 数值  |
|-------------|-----|
| 最大容量/(MW·h) | 6   |
| 储能效率(%)     | 95  |
| 最大储能功率/MW   | 15  |
| 充电状态转换成本/万元 | 0   |
| 自损耗率(%)     | 7   |
| 最小容量/(MW·h) | 1.2 |
| 释能效率(%)     | 93  |
| 最大释能功率/MW   | 15  |
| 放电状态转换成本/万元 | 0   |
| 能量转换阶段额外能耗率 | 0   |

由于风电出力的不确定性, 本文采用情景分析法对机组组合问题进行研究, 通过考虑风电功率波动和系统故障等不确定情景来预测风力发电出力特性, 本文选用的 7 个风电预测情景下的风电出力曲线如图 3 所示。

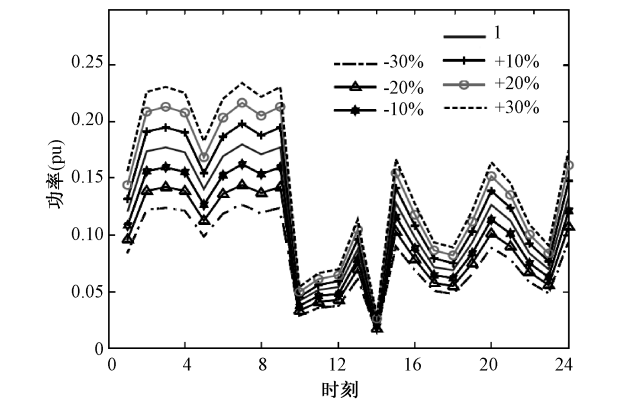


图 3 不同情景集下的风电出力曲线

Fig. 3 Wind power curves under different scenario sets

由图 3 可以看出风电出力波动率在  $[-30\%, 30\%]$  时系统功率输出的偏差值, 根据表 1 提供的预测误差发生概率可知, 功率输出偏差值大的情况发生概率极低, 所以情景分析法能够很好地减小预测误差。

储能系统接入前后风力发电机组出力如图 4 所示。可以看出, 储能系统接入后有效抑制了风电输出波动, 使得电网更好地接纳风电。

提取电力系统中某日运行风电、储能系统及周边地区负荷实际数据, 以风电机组和储能系统总体发电成本最小为优化目标, 通过全局粒子群算法进行多目标优化求解, 寻优结果如表 5 所示。

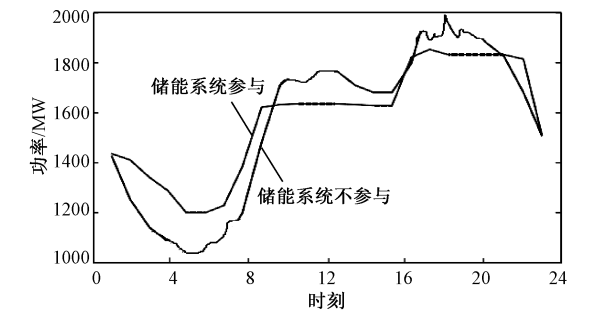


图4 储能系统参与前后机组出力曲线

Fig.4 Unit output curve before and after energy storage system involved

表5 储能系统参与前后成本比较

Tab.5 Cost comparison before and after energy storage system involved

|                  | 储能<br>未参与 | 储能<br>参与 | 节约成本<br>比例(%) |
|------------------|-----------|----------|---------------|
| 风电机组运行<br>成本/万元  | 46.63     | 45.13    | -1.67         |
| 风电机组开停机<br>成本/万元 | 0.73      | 0.46     | -37.0         |
| 储能系统运行<br>成本/万元  | 0         | 0.37     | —             |
| 储能系统开停机<br>成本/万元 | 0         | 0.61     | —             |
| 总成本/万元           | 47.36     | 46.57    | 1.67          |
| 弃风量/(MW·h)       | 106.94    | 15.61    | 85.41         |

由表5可以看出,接入储能系统后总成本降低了1.67%,消纳风电量提高了85.41%。根据数据分析可知储能系统的接入在降低运行成本的同时有效消纳了风电。

考虑储能系统功率、容量、状态维持时间、爬坡速率等约束条件及风力发电机组出力、开停机时间等约束条件的影响,通过全局粒子群算法求取电力系统总体成本最小。电力系统总体成本受到风电机组与储能系统数量、情景集数、情景发生概率、储能系统和风机运行状态等情况限制。

一天中,储能系统和风电机组运行状态实时变化,所得到的优化结果也同样实时变化,由于此方法具有一般性,可根据参数不同,优化选取时间间隔,得到实时优化结果。

通过情景集的方式对风电场出力进行预测,采用情景分析法对风电机组参与下机组组合问题进行协调优化,分析结果表明,采用此方法,有效利用风能,可提高电力系统经济性。

5 结论

本文首先综合考虑储能系统功率、容量、状态维持时间、爬坡速率等约束条件及风力发电机组出力、开停机时间等约束条件,建立储能系统的稳态模型与机组组合调度模型,通过算例分析,得出如下结论:

(1)为实现储能系统的经济调度,给出了以风电机组和储能系统总体发电成本最小联合运行方案,有效提高了风电场运行的安全、稳定、经济性。

(2)考虑风电机组与储能系统协调运行,基于情景分析法对风电机组出力进行预测,使得电力系统有效利用风能,合理优化储能系统的调度,减少储能运行成本、开停机成本的同时有效减少弃风量,保证电力系统经济运行。

(3)通过全局粒子群算法使得总体发电成本最小。该算法可以快速寻优,具有很强的逃离局部最优能力,能够加快搜索全局最优解的速度,是快速解决电力系统经济稳定运行的新方法。

参考文献 (References):

[1] 风电发展“十三五”规划 (Wind power development planning in “13th Five-Year”) [Z]. 北京: 国家能源局 (Beijing: National Energy Administration), 2016-11.

[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] 苗福丰, 唐西胜, 齐智平 (Miao Fufeng, Tang Xisheng, Qi Zhiping). 储能参与风电一次调频的容量优化 (Capacity optimization of energy storage participating to wind plant primary frequency regulation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (4): 35-42.

[4] Wang X Y, Mahinda V D, Chou S. Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23 (3): 868-877.

[5] 殷志敏, 晁勤, 王纯琦, 等 (Yin Zhimin, Chao Qin, Wang Chunqi, et al.). 基于风储经济调度的储能容量优化配置 (An optimization calculation method of wind farm energy storage capacity based on economic dispatch) [J]. 可再生能源 (Renewable Energy Resources), 2016, 34 (1): 64-71.

- [ 6 ] 刘吉臻, 王海东, 李明扬 (Liu Jizhen, Wang Haidong, Li Mingyang). 含风电的电力系统机组组合问题研究综述 (Review on unit commitment of power systems with wind power integration) [J]. 电力建设 (Power Construction), 2014, 35 (12): 38-44.
- [ 7 ] Yan Ning, Xing Zuoxia, Li Wei, et al. Economic dispatch application of power system with energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (7): 0610205.
- [ 8 ] Chakraborty S, Senjyu T, Saher A Y, et al. Optimal thermal unit commitment integrated with renewable energy sources using advanced particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2009, 4 (5): 609-617.
- [ 9 ] 施琳, 罗毅, 涂光瑜, 等 (Shi Lin, Luo Yi, Tu Guangyu, et al.). 考虑风电场调度性的储能容量配置方法 (Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (5): 120-127.
- [10] 杨秀, 陈洁, 朱兰, 等 (Yang Xiu, Chen Jie, Zhu Lan, et al.). 基于经济调度的微网储能优化配置 (Optimization allocation of energy storage for microgrid based on economic dispatch) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2013, 41 (1): 53-60.

## Economic dispatch of energy storage system in wind farm based on scenario analysis method

LI Wei<sup>1</sup>, YAN Ning<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, MA Shao-hua<sup>1</sup>, GE Yang-yang<sup>2</sup>, XIAO Wan-qiu<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110003, China;

3. State Grid Corporation Yuhong District Electric Power Company, Shenyang 110141, China)

**Abstract:** To ensure the grid security, stability and economic operation, energy storage system has been widely used in power system to regulate its power and operational status and to improve the flexibility of grid, so as to achieve the economic dispatch. Firstly, considering the energy storage system power, capacity, state maintenance time, ramp rate and other constraints, and wind turbine output, open downtime and other constraints, the paper presents a steady-state model of the energy storage system and unit commitment scheduling model, and by predicting wind power and using scenario analysis, power system total generation cost minimization as the optimization target, the model achieves cost-effective operation in the case of wind power added to the grid. And through practical example, the paper analyzes the effect of the energy storage system to the starting and shutting down of wind turbines and their output, and also the effect to acceptance of wind power, so as to balance the load distribution between wind turbines and to reduce the cost of electricity.

**Key words:** energy storage system; unit commitment; scenario analysis; peak load shifting; economic dispatch