

# 基于能量可实现的多源电力系统短期优化调度

杨晓萍<sup>1</sup>, 王旭花<sup>1</sup>, 薛 媛<sup>1</sup>, 彭博阳<sup>1</sup>, 李 湃<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 电力科学研究院, 北京 100192)

**摘 要:** 针对风电出力的不确定性和波动性在电力系统调度中引起的能量不平衡, 在离散时间平均模型的基础上, 考虑调度计划的可实现性, 引入积分约束, 同时将需求侧响应和储能技术纳入, 建立以弃风量最小为目标的能量可实现短期联合优化调度模型。并将含积分约束的调度模型转化为线性目标函数和非线性约束的凸规划问题进行求解。实际算例的结果表明, 该文提出的优化调度模型在考虑能量可实现的基础上增加电力系统对风电的消纳能力, 凸规划的求解方法能快速获得全局最优解。

**关键词:** 风电; 能量平衡; 凸规划; 优化调度; 积分约束; 风电消纳

**中图分类号:** TK743

**文献标志码:** A

## 0 引 言

中国风电快速发展的同时风电的弃风问题逐步凸显, 2016 年中国弃风电量创历史新高, 达 396.1 亿 kWh。风电出力具有间歇性和不稳定性, 逆负荷分布加剧了风电消纳的难度<sup>[1-3]</sup>。在传统电力系统调度中, 含风电的调度系统由于受到火电机组爬坡限制, 不能够快速制定风电在极端情况下常规机组的调度计划。风电出力不足时可能导致常规机组提供的总旋转备用不足<sup>[4-5]</sup>。

为充分利用风力发电, 减弱风力发电带来的安全隐患, 国内外学者提出许多安全有效的方法。文献[6]基于可调节特性的高载能负荷, 与常规电源共同参与电网的优化调度, 形成源荷协调的调度模式。文献[7]基于需求侧响应和储能, 与常规电源共同参与电网的优化调度, 多方联合协调优化运行增加风电的消纳能力。文献[8-10]建立含大容量储热的热电联产调度模型, 充分利用储热带来的灵活性, 提升系统消纳风电的能力。文献[11-12]结合电动汽车充放电的负荷特性, 提出风电与电动汽车协同调度模型。上述研究的共同点都是基于离散时间平均功率模型对含常规机组的电力调度系统进行优化。考虑火电机组爬坡约束可能会导致短时间内能量的不平衡, 文献[13]提出在生产制造系统优化调度中采用积分约束的方法, 建立功率和能量的积分关系, 保证功率对时间的积分等于能量的实时需

求。文献[14]验证在含有风电的调度系统中考虑能量平衡的可行性。

针对风电出力的不确定和波动性、火电机组爬坡约束会引起能量的不可交付性因素, 本文在离散平均功率模型的基础上, 根据风电出力的区间预测结果及需求侧和储能系统的调节作用, 在连续时间内建立含有积分约束的能量可实现优化调度模型。并将优化调度模型转化为线性目标函数和非线性约束的凸规划模型, 使用凸规划的方法求解。最后通过实际算例验证模型的有效性和算法的正确性。

## 1 基于离散平均时间功率的含风电调度模型

与传统电力相比, 风电调节更迅速, 具有参与调度的潜力, 考虑需求侧响应和储能, 功率平衡约束、旋转备用约束、风电实时出力约束、火电机组出力约束、火电机组爬坡等约束条件, 以最小弃风量为目标函数建立联合调度模型:

$$Z = \min_{g_{i,k}, el_{i,k}, \delta_k, D_k, Q_k} \sum_{k=1}^K \delta_k \quad (1)$$

式中,  $i$  ——火电机组编号;  $k$  ——调度时段编号;  $K$  ——调度总数;  $g_{i,k}$  ——火电机组  $i$  在  $k$  时刻的发电功率, MW;  $\delta_k$  ——最小弃风量, MWh;  $el_{i,k}$  ——火电机组  $i$  在  $k$  时刻的出力, MWh;  $D_k$  —— $k$  时刻的负荷需求, MWh;  $Q_k$  —— $k$  时刻储能系统充放电过程中的功率

大小, MW。

1) 功率平衡约束:

$$ew_k + \sum_{i=1}^I et_{i,k} + Q_k = D_k \quad (2)$$

式中,  $ew_k$  ——  $k$  时刻风电场出力, MWh。

实施分时电价后发电侧机组上网有功功率<sup>[8]</sup>:

$$D_k = D_k(\Delta P_p, \Delta P_f, \Delta P_v) \quad (3)$$

式中,  $\Delta P_p$ 、 $\Delta P_v$ 、 $\Delta P_f$  ——峰时段、平时段、谷时段的电价调整幅度; 下标: p、f、v 分别代表峰时段、平时段、谷时段的负荷需求。

基于离散平均时间功率系统的上旋转备用:

$$D_k - \sum_{i=1}^I et_i(\underline{g}_{i,k}) + Q_k \geq \overline{ew}_k - \delta_k \quad (4)$$

式中,  $\overline{ew}_k$  ——  $k$  时刻风电场出力上限, MWh;  $\underline{ew}_k$  ——  $k$  时刻风电场出力下限, MWh;  $et_i$  ——火电机组  $i$  的出力下限, MWh;  $\underline{g}_{i,k}$  ——火电机组  $i$  在  $k$  时刻的最小发电功率, MW。

基于离散平均时间功率系统的下旋转备用:

$$D_k - \sum_{i=1}^I \overline{et}_i(\overline{g}_{i,k}) + Q_k \leq \underline{ew}_k \quad (5)$$

式中,  $\overline{g}_{i,k}$  ——火电机组  $i$  在  $k$  时刻的最大发电功率, MW;  $\overline{et}_i$  ——火电机组  $i$  的出力上限, MWh。

$$\delta_k \geq 0 \quad (6)$$

2) 储能系统充放电约束:

$$Q \leq Q_k \leq \bar{Q} \quad (7)$$

式中,  $Q$ 、 $\bar{Q}$  ——为储能系统的最大放电功率及最大充电功率, MW。

3) 火电机组  $i$  的发电功率约束:

$$\bar{g}_{i,k} \leq g_{i,k} \leq \underline{g}_{i,k} \quad (8)$$

4) 火电机组的爬坡约束:

$$-\Delta_i \leq u_i(k) \leq \Delta_i \quad (9)$$

式中,  $\Delta_i$  ——机组  $i$  最大爬升速率, MW/h;  $u_i(k)$  ——机组  $i$  在  $k$  时刻的瞬时爬升速率, MW/h。

需求侧管理与储能技术通过实施分时电价及储能系统降低用户在用电高峰的负荷需求并转移至平时段和谷时段, 继而影响不同时段发电侧上网有功功率的状况, 提高系统对风电的消纳能力。

## 2 离散系统能量的不可交付性

为更好地说明传统模型基于离散时间的能量不可交付性, 介绍以下例子: 用有 2 个参数相同的热电厂和

1 个风电场, 建立基于离散时间的风电弃风量最小化模型, 每个时间段为 1 h。风电出力是一个时间段的风电预测值, 风电的置性区间和系统的负荷要求如表 1 所示。2 个火电场的功率输出如表 2 所示, 火电厂的参数如表 3 所示。

表 1 为风电出力、风电场出力极值区间和各时段的负荷需求。

表 1 风电预测和各时段的负荷需求

Table 1 Wind power point predictions and load demand in each time period

时段/h	1	2	3	4	5
$pw_k$ /MW	125	200	140	155	165
$\overline{pw}_k$ /MW	150	250	160	190	180
$\underline{pw}_k$ /MW	100	170	110	125	130
$D_k$ /MW	525	1200	1040	1095	565

注:  $pw_k$  ——风电场出力;  $\overline{pw}_k$ 、 $\underline{pw}_k$  ——风电场出力上限、风电场出力下限;  $D_k$  ——  $k$  时刻的负荷需求。

表 2 为火电机组各时段发电功率, 在第 1 个时段和第 2 个时段火电机组输出分别为 200 和 500 MW。2 个火电机组的功率输出加上风电的功率输出等于第一时段的负荷需求, 如果在风电出力的极值下, 2 台火电机组满足发电功率输出和爬坡速率的约束时, 不能满足第 2 个时段的净负荷需求。

表 2 各时段 2 台火电机组的功率输出

Table 2 Power outputs of two thermal units in each time period

时段/h	1	2	3	4	5
机组 1	200	500	450	470	200
机组 2	200	500	450	470	200

表 3 为火电机组的参数, 火电机组功率输出从第 1 时段的 200 MW 以最大爬坡速率到第 2 个时段的 500 MW, 然后持续以 500 MW 的输出功率运行, 火电机组第 2 时段最大可实现发电量为 425 MW。在第 2 个时段 2 个火电机组的最大发电量总和为 850 MW, 在第 2 时段当风电场出力在风力预测的下界时, 风电功率为 170 MW, 此时段净负荷需求为 1030 MW, 火电机组以最大发电功率运行, 2 台火电机组的最大发电量还是远远小于 1030 MW, 无法满足负荷需求。当机组的爬坡越小时, 未实现的电力就越多。

表3 2台火发电机组的参数

Table 3 Parameters of two thermal units

机组( <i>i</i> )	$\bar{g}_i$ /MW	$\underline{g}_i$ /MW	$\Delta_i$ /MW·min <sup>-1</sup>
1	500	200	10
2	500	200	10

注：*i*—火电机组编号； $\bar{g}_i$ 、 $\underline{g}_i$ —火电机组 *i* 的发电功率上限、火电机组 *i* 的发电功率下限； $\Delta_i$ —火电机组 *i* 的爬升速率。

### 3 考虑能量可实现的优化调度模型

考虑调度计划的可实现性,将积分约束纳入调度系统中建立能量可实现模型,使机组在一个时段内的计划发电量等于实际发电量,保证能量的可交付性。建立火电机组发电功率与能量、功率变化率与发电功率之间的积分约束关系,在连续时间内建立发电优化调度模型为:

$$Z = \min_{g_{i,k}, \bar{g}_{i,k}, \underline{g}_{i,k}, D_k, Q} \sum_{k=1}^K \delta_k \quad (10)$$

基于能量可实现系统的上旋转备用:

$$D_k \cdot \tau - \sum_{i=1}^I \bar{e}t_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) + Q_k \geq \bar{e}w_k - \delta_k \quad (11)$$

式中,  $\tau$ ——每个调度时段时间长度, h。

基于能量可实现系统的下旋转备用:

$$D_k \cdot \tau - \sum_{i=1}^I \underline{e}t_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) + Q_k \leq \underline{e}w_k \quad (12)$$

式中,

$$\bar{e}t_i = \begin{cases} \frac{(g_{i,k-1} - \underline{g}_i)^2 + (g_{i,k} - \underline{g}_i)^2}{2\Delta_i} + \underline{g}_i \tau, & g_{i,k-1} + g_{i,k} < 2\underline{g}_i + \Delta_i \tau \\ -\frac{(g_{i,k-1} - \underline{g}_{i,k})^2}{4\Delta_i} + \frac{\tau}{2}(g_{i,k-1} + g_{i,k}) - \frac{\Delta_i}{4}\tau^2, & g_{i,k-1} + g_{i,k} \leq 2\underline{g}_i + \Delta_i \tau \end{cases} \quad (13)$$

$$\underline{e}t_i = \begin{cases} \frac{(\bar{g}_i - g_{i,k})^2 + (g_{i,k} - \underline{g}_i)^2}{2\Delta_i} + \underline{g}_i \tau, & g_{i,k-1} + g_{i,k} \geq 2\bar{g}_i - \Delta_i \tau \\ -\frac{(g_{i,k-1} - \bar{g}_{i,k})^2}{4\Delta_i} + \frac{\tau}{2}(g_{i,k-1} + g_{i,k}) + \frac{\Delta_i}{4}\tau^2, & g_{i,k-1} + g_{i,k} < 2\bar{g}_i - \Delta_i \tau \end{cases} \quad (14)$$

火电机组能量与发电功率关系:

$$et_{i,k} = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} g_i(t) dt \quad (15)$$

式中,  $g_i(t)$ ——火电机组 *i* 的发电功率, 为时间连续函数;  $t$ ——连续时间变量。

发电功率与火电机组爬升速率关系:

$$g_i(t) = g_i(0) + \int_0^t u_i(\xi) d\xi \quad (16)$$

调度初始时间发电功率:

$$g_i(0) = g_{i,0}^* \quad (17)$$

式中,  $g_i(0)$ ——初始时刻火电机组 *i* 的发电功率, MW;  $g_{i,0}^*$ ——给定的初始时刻火电机组 *i* 的发电功率, MW。

由以上能量可实现调度模型可看出:火电机组发电量是关于机组瞬时发电功率始、末的二元函数,可精确表达发电能量的上下界。

### 4 模型求解方法

上述提出的考虑能量平衡的调度优化模型是一个非常复杂的在连续时间内含积分控制问题,可以将其转化为一个更易于求解约束的最优的凸规划问题。以下2组约束的等价性在文献[13]中已经被证明:

约束 1:

$$\text{s.t.} \begin{cases} et_{i,k} = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} g_i(t) dt \\ g_i(t) = g_i(0) + \int_0^t u_i(\xi) d\xi \\ \bar{g}_{i,k} \leq g_{i,k} \leq \underline{g}_{i,k} \\ -\Delta_i \leq u_i(t) \leq \Delta_i \end{cases} \quad (18)$$

约束 2:

$$\text{s.t.} \begin{cases} |g_{i,k} - g_{i,k-1}| \leq \Delta_i \tau \\ et_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) \leq p_i(k) \leq \bar{e}t_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) \\ \bar{g}_{i,k} \leq g_{i,k} \leq \underline{g}_{i,k} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $p_i(k)$ ——火电机组 *i* 在 *k* 时段的发电量, MWh。

满足约束 1 的可行解同样满足约束 2, 反之亦然。可直接给出约束 2 的等价关系式:

$$\bar{g}_{i,k} \leq g_{i,k} \leq \underline{g}_{i,k} \quad (20)$$

$$-\Delta_i \tau \leq g_{i,k} - g_{i,k-1} \leq \Delta_i \tau \quad (21)$$

$$\underline{e}t_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) \leq et_{i,k} \leq \bar{e}t_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) \quad (22)$$

文献[13]中另一重要理论,在约束式(22)中,  $\bar{e}t_i(.,.)$  是光滑的凸函数,  $\underline{e}t_i(.,.)$  是光滑的凹函数。约束式(20)、约束式(21)线性不等式约束和约束式(11)、约束式(12)都是凸面的,因此本文中模型求解问题转换成一个线性目标函数和非线性约束的凸规划问题。这样这个优化模型可以很容易的使用凸规划的方法求解。

### 5 算例分析

为验证文中所建模型的可行性,以某区域 10 台火电机组和 1 个风电场为例,通过对 10 组风电数据的测试,得到火电机组最优功率输出曲线和最小弃风量进行

分析。调度时长为 24 h, 每个调度时段为 1 h。对应于模型: 火电机组数量  $I=10$ , 调度时长  $K=24$ 。表 4 为各时段负荷需求, 表 5 为火电机组参数<sup>[15]</sup>。

表 4 各时段负荷需求

Table 4 System load demand on each period

时段/h	$D_t/\text{MW}$	时段/h	$D_t/\text{MW}$	时段/h	$D_t/\text{MW}$
1	650	9	800	17	850
2	680	10	850	18	800
3	700	11	900	19	900
4	750	12	1000	20	1000
5	750	13	950	21	950
6	800	14	1000	22	850
7	850	15	950	23	750
8	850	16	900	24	680

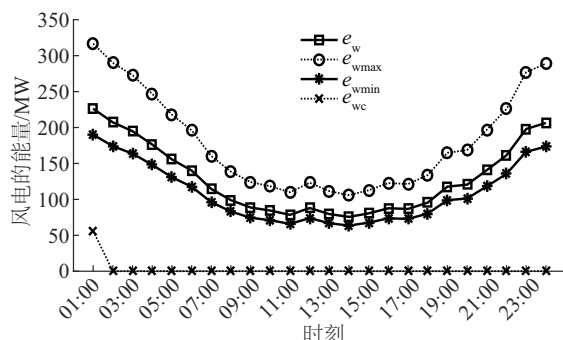
表 5 火电机组参数

Table 5 Parameters of thermal units

机组 ( $i$ )	$\bar{g}_i/\text{MW}$	$\underline{g}_i/\text{MW}$	$\Delta_i/\text{MW} \cdot \text{min}^{-1}$	$g_i(0)/\text{MW}$
1	455	150	24	150
2	455	150	24	150
3	162	25	8	25
4	162	25	8	25
5	162	25	8	25
6	162	25	8	25
7	162	25	8	25
8	162	25	8	25
9	80	25	4	25
10	55	10	2	10

注:  $g_i(0)$ —火电机组  $i$  的发电初始速率。

分别对 2 种情形进行分析: 1) 考虑能量平衡约束; 2) 在考虑能量平衡约束的基础上再考虑需求侧响应及储能。通过对 10 组风电数据的测试可得到这 2 种情形下风电的最小弃风量和火电机组最优出力。图 1 为考虑能量平衡约束时系统弃风量的变化情况, 由图 1 可看出所有风电出力都在置信区间内。由于模型建立在连续区间, 火电机组出力可实现, 风电通过调度火电机组提高利用率, 减少弃风量, 故此模型可以评估风电在电力系统中消纳能力。

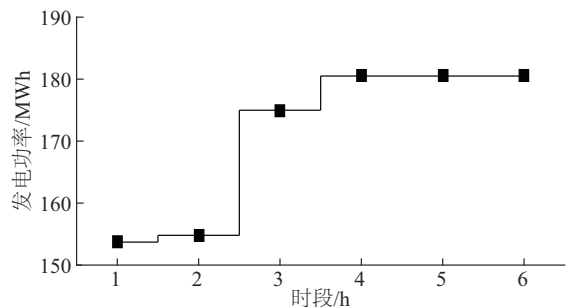


注:  $e_w$ —风电预测出力;  $e_{wmax}$ —预测风力发电的最大出力;  $e_{wmin}$ —预测风力发电的最小出力;  $e_{wc}$ —每个时段的弃风量。

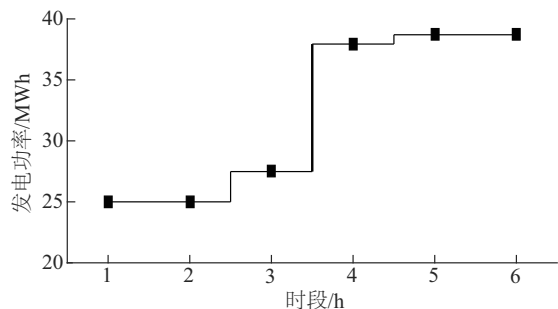
图 1 情形 1 弃风量的变化

Fig. 1 Change of wind curtailment minimization on situation one

图 2 分别为机组 I-1 (图 2a) 和 I-3 (图 2b) 在前 6 个时段的最优出力功率曲线图, 图中每个小黑点代表了该机组在这个时段末的瞬时发电功率。本文在连续时间内考虑火电机组的爬坡约束建模, 打破了传统调度中由火电机组爬坡约束引起的能量不平衡。使得火电机组在电力调度中得到确切的制定。保证火电机组出力可实现。



a. 机组 I-1 的最优出力功率曲线



b. 机组 I-3 的最优出力功率曲线

图 2 机组 I-1 和 I-3 的最优出力功率曲线

Fig. 2 Optimal output power curve of unit I-1 and unit I-3

本文提出的关于考虑能量平衡约束的模型能够通过调度火电机组的出力, 分析电力系统对风电的消纳能力, 尽可能多的消纳风电, 减少弃风量, 且所建立的模型



是基于连续时间的,火电机组的出力可实现。

在上述模型的基础上考虑需求侧管理和储能技术,需求管理和储能技术具有改变负荷分布的功能,而负荷的分布又影响发电调度的安排和弃风量的变化,以某一电压等级为例,用户用电单价为 464 ¥/MWh,实施分时电价后峰时段和谷时段电价分别提高和降低 25%,弹性需求矩阵为:

$$E = \begin{bmatrix} -0.25 & 0.11 & 0.04 \\ 0.20 & -0.25 & 0.14 \\ 0.18 & 0.21 & -0.25 \end{bmatrix} \quad (23)$$

本文模型不考虑储能系统的容量,只验证含储能技术后系统对弃风量的影响。

假设容量无限大,由储能系统充、放电不能同时进行,  $Q_k$  在  $[-100, 0]$  区间表示储能系统放电功率区间,  $Q_k$  在  $[0, 100]$  区间表示储能系统充电功率。

储能系统充放电功率:

$$-100 \leq Q_k \leq 100 \quad (24)$$

表6 分时电价时段划分

Table 6 Time division of time division price

谷时段	平时段	峰时段
00:00~05:00	05:00~08:00	08:00~14:00
21:00~24:00	14:00~19:00	19:00~21:00

将储能系统充放电约束、分时电价时段划分数代入基于能力可实现调度模型模型得到基于能量平衡约束的基础上考虑需求侧响应及储能条件下,最小弃风量变化图,如图 3 所示。

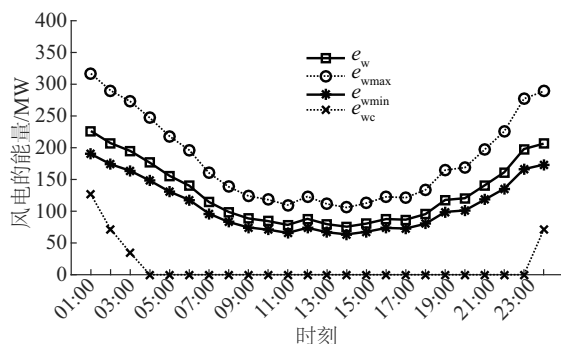


图3 情形2弃风量的变化

Fig. 3 Change of wind curtailment minimization on situation two

图 3 为考虑分时电价和储能时弃风量的变化,图 2a 可看出在考虑能量平衡约束的基础上考虑分时电价和储能后,风电弃风量明显减少,分时电价与储能系统的引入在一定程度上改变了负荷的分布,减小了最大负荷

和最小负荷的落差。谷时段负荷水平的提高,降低了风电反调峰特性给电力调度带来的难题。就储能系统而,主要在谷时段进行充电,峰时段提供电能,降低了风电反调峰特性给电力系统带来的危害。提高了风电利用率。

## 6 结 论

本文考虑需求侧响应和储能技术在连续时间内基于能量可实现提出一种优化调度方法,将优化调度模型转换成求凸函数最优解。对建立的模型进行求解,分析算例结果,可得以下主要结论:

1)将能量平衡约束纳入模型中,可实现火电出力的确切制定,解决由火电机组爬坡约束带来的能量不可实现问题。

2)考虑需求侧响应和储能技术,改变负荷的分布,降低了风电反调峰特性给电力系统带来的危害,提高风电利用率,降低弃风水平。

随着风电装机的不断增加,应电力市场改革要求,尽可能的消纳风电,实现弃风量减少。利用本文提出的优化模型,实现了火电机组出力的确切制定,得到每个时段的弃风量。当实际风电在极端情况下,可以更好的制定调度计划。实现机组的最优出力。

## [参考文献]

- [1] POURBEIK P, SANCHEZ-GASCA J J, SENTHIL J, et al. Generic dynamic models for modeling wind power plants and other renewable technologies in large scale power system studies [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2017, 32(3):1108-1116.
- [2] 戚永志, 刘玉田. 风电高风险爬坡有限度控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 69-75.  
QI Y Z, LIU Y T. Finite control of high risk wind power ramping [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 69-75.
- [3] KARAIPOOM T, NGAMROO I. Optimal superconducting coil integrated into DFIG wind turbine for fault ride through capability enhancement and output power fluctuation suppression [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2014, 6(1): 28-42.
- [4] 肖运启, 王昆朋, 贺贯举, 等. 基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2132-2139.  
XIAO Y Q, WANG K M, HE G J, et al. Fuzzy

- comprehensive evaluation for operating condition of large-scale wind turbines based on trend predication[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2132-2139.
- [5] 薛松, 王致杰, 韩蕊, 等. 考虑风电并网的快速响应火电机组安全经济规划模型[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2888-2895.
- XUE S, WANG Z J, HAN R, et al. A secure and economic planning model for fast response thermal units considering grid-integration of large-scale wind farm[J]. Power system technology, 2013, 37(10): 2888-2895.
- [6] 殷桂梁, 张雪, 操丹丹, 等. 考虑风电和光伏发电影响的电力系统最优旋转备用容量确定[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3497-3504.
- YIN G L, ZHANG X, CAO D D, et al. Determination of optimal spinning reserve capacity of power system considering wind and photovoltaic power affects[J]. Power system technology, 2015, 39(12): 3497-3504.
- [7] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.
- LIU W Y, WEN J, XIE C, et al. Multi- objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [8] 宋艺航, 谭忠富, 李欢欢, 等. 促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 610-615.
- SONG Y H, TAN Z F, LI H H, et al. An optimization model combining generation side and energy storage system with demand side to promote accommodation of wind power[J]. Power system technology, 2014, 38(3): 610-615.
- [9] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.
- CHEN L, XU F, WANG X, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [10] 戴远航, 陈磊, 闵勇, 等. 风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3470-3489.
- DAI Y H, CHEN L, MIN Y, et al. Optimal dispatch for joint operation of wind farm and combined heat and power plant with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3470-3479.
- [11] 张晓花, 谢俊, 赵晋泉, 等. 考虑风电和电动汽车等不确定性负荷的电力系统节能减排调度[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2408-2414.
- ZHANG X H, XIE J, ZHAO J Q, et al. Energy-saving emission- reduction dispatching of electrical power system considering uncertainty of load with wind power and plug-in hybrid electric vehicles [J]. High voltage engineering, 2015, 41(7): 2408-2414.
- [12] 鞠立伟, 李欢欢, 陈致宏, 等. 基于两步制自适应求解算法的风电-电动汽车多种并网模式效益对比分析模型[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1492-1498.
- JU L W, LI H H, CHEN Z H, et al. A benefit contrastive analysis model of multi grid- connected modes for wind power and plug-in hybrid electric vehicles based on two-step adaptive solving algorithm [J]. Power system technology, 2014, 38(6): 1492-1498.
- [13] 管晓宏, 翟桥柱, 冯泳翰, 等. 一类含积分约束的生产制造系统优化调度[J]. 中国科学:技术科学, 2010(1): 41-51.
- GUAN X H, ZHAI Q Z, FENG Y H, et al. Optimization based scheduling for a class of production systems with integral constraints [J]. Science in China (Series E): technological sciences, 2010(1): 41-51.
- [14] YUAN W, ZHAI Q Z. Energy based wind curtailment minimization in short- term generation scheduling of power system [C]//2015 Chinese Automation Congress (CAC), IEEE, Wuhan, China, 2016:1394-1399.
- [15] ZHAI Q Z. Research on the model and algorithms for hydrothermal scheduling[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005.

## OPTIMAL POWER DISPATCH BASED ON GENERATION SIDE, DEMAND SIDE AND ENERGY STORAGE SYSTEM OF ENERGY BALANCE

Yang Xiaoping<sup>1</sup>, Wang Xuhua<sup>1</sup>, Xue Yuan<sup>1</sup>, Peng Boyang<sup>1</sup>, Li Pai<sup>2</sup>

(1. School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** To the uncertainties and volatility of wind power, it can lead the energy unbalance, propose a short time optimal power dispatch model. Using the model with integral constraint to replace the frequent-used discrete time based average power model. The method is based on an exact formulation and detailed analysis of the electrical energy produced by conventional generators. And adding the demand side reaction and energy storage system into the model, building a nonlinear programming model which the object function is the minimum of wind curtailment. Because the local optimal solution of convex programming is equal to the global optimal solution, The optimal power dispatch model can be turned into a simple convex function for optimal solution. Numerical results show that the optimization model presented in this paper can give an energy based assessment of the wind integration capacity.

**Keywords:** wind power; energy balance; convex optimization; optimal dispatch; integral constraint; wind integration capacity