

# 针对风电间歇性扰动的 旋转备用智能优化调度策略

柳进, 于继来, 柳焯

(哈尔滨工业大学电气工程及其自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

## An Intelligent Optimal Dispatch Strategy for Spinning Reserve Coping With Wind Intermittent Disturbance

LIU Jin, YU Jilai, LIU Zhuo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

**ABSTRACT:** The rapid variation in wind power output is severe where wind power penetration is high. When the rapid ramping events (RREs) happen one by one, net load forecasting error between adjacent them sometimes may bring the power grid serious imbalance. In this paper, an intelligent dispatching strategy for spinning reserve is proposed to challenge from wind power intermittent disturbance. Firstly, we consider the system reserve contribution (SRC) at the key time interval to cope with the future worst possible situation, and determine the identification index of the urgency time interval. In order to mining SRC potential, in an urgent situation, we also establish the decision-making mechanism of different reserve state belonging to different time interval, and make emergency real-time optimal dispatching by using "two subsets optimization method". In the implementing process, the proposed intelligent strategy for spinning reserve has strong adaptable optimizations, which can be adapted to the change from normal to urgency situation; especially the different reserve needs can be satisfied in different time intervals. Moreover the strategy can realize the target coordination among guarding against the impacts from RREs, and can enable minimize the additional cost of urgent optimization comparing with conventional optimization, and can create favorable conditions for more renewable energy (especially wind energy) into power grids.

**KEY WORDS:** wind energy; intermittent disturbance; rapid ramping event (RRE); system reserve contribution (SRC);

基金项目: 国家863高技术基金项目(2011AA05A105); 国家自然科学基金项目(51077027)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2011AA05A105); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51077027).

intelligent dispatch

**摘要:** 在风电高渗透条件下, 风电的间歇性扰动是严峻的。在陡坡事件接连发生时期, 相邻陡坡事件间距的净负荷预测误差, 有时可能导致电网严重失衡。为应对风电间歇性扰动的挑战, 提出旋转备用智能优化调度策略。首先, 考虑关键时段的系统备用贡献能否应对前方最坏可能发生的情况, 确定期段紧急态势的识别指标, 增强前瞻响应能力。其次, 为挖掘系统备用贡献的潜力, 针对紧急态势条件, 给出不同时段归属不同备用状态的决策机制, 并运用“两子集合优化”方法, 进行旋转备用智能优化调度。所提智能策略在实施过程中具有较强的适应性优化能力, 适应态势的缓急变迁, 适应不同紧急态势, 特别是在紧急态势期间适应不同系统备用贡献状态的需要。这种适应性优化在预防陡坡事件冲击和节约化石能源、减少污染排放之间, 能够实现目标协调, 使紧急态势下的实时优化相对于常规实时优化的附加代价极小化, 为更多的可再生能源(特别是风能)进入电网创造有利条件。

**关键词:** 风能; 间歇性扰动; 陡坡事件; 系统备用贡献; 智能调度

## 0 引言

风电输出功率受到气候因素的影响而呈现随机间歇式的扰动, 给电力网运行模式带来了新的挑战<sup>[1-3]</sup>。如何应对这些随机间歇性扰动, 备用调度起着举足轻重的作用<sup>[4-7]</sup>。由风电间歇性扰动或高速切除事件所产生的陡坡事件(rapid ramp event, RRE)<sup>[8-9]</sup>, 对电网可靠运行形成威胁。在高峰(或低谷)负荷期间, 当系统净负荷迅速地陡升(或陡降)时, 风电的突然变化和净负荷预测的误差能够引起值得关注的功率失衡。风力发电中的陡坡事件将给

净负荷预测带来严重困难,特别是邻近陡坡事件间距的预测。安排适当的备用容量,能够帮助电力系统克服较大预测误差和发电机组非计划退出所带来的困难<sup>[10-11]</sup>。当平衡容量、爬坡容量、爬坡时间和爬坡速率等不确定因素的范围已经掌握时,可以对实时调度系统作出调整,以加强处理陡坡段落误差问题的能力。

文献[4]研究了高风电渗透率电力系统旋转备用的估计问题,得出了与一般看法不同的结果,该文作者认为,风电渗透率的增大,并不必然需要增加更多的旋转备用,还可能在当前运转的火电机组群体内部,增大地挖掘系统备用贡献(system reserve contribution, SRC)潜力。即存在切实可行的方法,在不启停任何发电机组的条件下,能够将有关时段的系统备用贡献增长可观的数量<sup>[12-15]</sup>。从间歇性扰动对电网冲击的角度看,在安全预警、在线调度控制、决策支持系统的研究设计中,引入时空分解协调思想<sup>[16-17]</sup>,是一个新的发展方向。

为了应对风电间歇性扰动,本文针对旋转备用智能调度策略进行深入地研究。研究在紧急陡坡事件期间,提高对未来最坏可能情况的前瞻响应能力。研究在间歇冲击型紧急态势下,不同时段归属不同备用状态的决策机制和旋转备用智能优化调度,同时重点考虑适应性优化问题。

## 1 增强前瞻响应能力

### 1.1 陡坡事件的影响与向前看能力

随着风电渗透率的增加,净负荷曲线上陡坡段落的强度和频度都明显增大。由于阵风间歇性特点,一波陡坡事件刚出现,另一波陡坡事件紧随其后,这是一种可能发生的高风险态势,因此必须增强向前看的能力。

在高峰负荷期间,电网缺乏上行发电备用,此时上行陡坡较难管理。如果上行陡坡一个接一个地到来,系统运行人员的操作将会非常困难。类似地,在低谷负荷期间,电网缺乏下行发电备用。两个相邻的陡坡之间的间距,具有明显的不确定性,因此净负荷预测中经常出现时间定位误差(timing errors)。增强发电备用,能够比较容易地预防强度误差或变化速率误差带来的冲击。

对于实时调度而言,净负荷的超短期预报通常每5 min进行一次。为了估计未来紧急陡坡事件的发电需求,这种预报需要拥有一个较长的向前看范

围。在图1中,向前看范围(look ahead horizon)中,有8个实时调度的时段。图中给出了对h时段的预报结果,该时段是向前看范围的首时段。向前看范围中有2个陡坡段,一个处于h+3时段(线段gh)。另一个处于h+6时段(线段mn)。

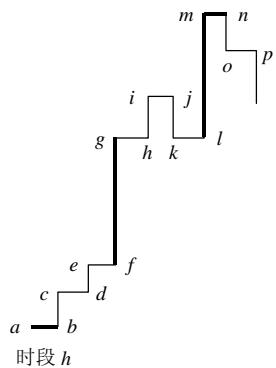


图1 紧急 RRE 期间的净负荷预报

Fig. 1 Net load forecasting during the urgent RRE period

高峰期间净负荷处于高水平,系统的上行旋转备用主要存储在某些目标性能较差的运行火电机组之中,因为在此情况下性能较好的机组的发电功率接近容量极限,它们的上行旋转备用非常小。由于爬坡速率约束的限制,从性能较差机组释放上行旋转备用的进程相当缓慢,通常难以赶上陡坡段变化的步伐。在上述情况下,一种系统运行人员可能采取的措施是启动或关停调峰机组。这不是有吸引力的选择,而一种较好的选择是用调整不同机组上、下行发电备用的途径加强系统运行灵活性,以此来应对来自陡坡事件不确定性的挑战。

### 1.2 系统备用贡献

为了增强向前看的能力,不仅要关注陡坡事件的冲击,还要考察运行机组旋转备用应对这类冲击的能力。从旋转备用管理的观点看,运行火电机组集合可以定义两个子集合:旋转备用富裕的子集合 $S_{\text{rich}}$ 和旋转备用缺乏的子集合 $S_{\text{lack}}$ 。

$k$ 时段内旋转备用富裕的子集合 $S_{\text{rich}}^k$ 中第 $i$ 号机组在所能提供的旋转备用贡献(reserve contribution) $R_{\text{Ci}}$ 可以用下式表述:

$$R_{\text{Ci}} = Tr_i, \quad i \in S_{\text{rich}}^k \quad (1)$$

式中:  $T$ 为一个实时调度时段的持续时间(5 min); $r_i$ 为第 $i$ 号机组输出功率增长(或降低)速率,假设上行与下行速率相等;  $Tr_i$ 为一个实时调度时段期间,该机组输出功率的全速增量。

$k$ 时段内旋转备用缺乏的子集合 $S_{\text{lack}}^k$ 中,第 $j$

号机组所能提供的上行备用贡献  $R_{Cj}$  可表示为

$$R_{Cj} = P_{j\max} - P_j, \quad j \in S_{\text{lack}}^k \quad (2)$$

下行备用贡献  $R_{Cj}$  可表示为

$$R_{Cj} = P_j - P_{j\min}, \quad j \in S_{\text{lack}}^k \quad (3)$$

式中  $P_{j\max}$ 、 $P_{j\min}$  分别是第  $j$  号机组输出功率上、下限值。

为了应对冲击, 系统在一个时段期间, 能够贡献出来的系统备用贡献等于在一个实时调度时段(5 min)期间, 能够从运行发电机组集合整体, 得到的旋转备用总量。即第  $k$  时段的系统上、下行备用贡献可表示为

$$S_{\text{RC}k} = \sum_{i \in S_{\text{rich}}^k} Tr_i + \sum_{j \in S_{\text{lack}}^k} (P_{j\max}^k - P_j^k) \quad (4)$$

$$S_{\text{RC}k} = \sum_{i \in S_{\text{rich}}^k} Tr_i + \sum_{j \in S_{\text{lack}}^k} (P_j^k - P_{j\min}^k) \quad (5)$$

式中: 等号右端第 1 项是在  $k$  时段期间, 系统从运行机组子集合  $S_{\text{rich}}^k$  中得到的旋转备用总量; 等号右端第 2 项是在  $k$  时段期间, 系统从运行机组子集合  $S_{\text{lack}}^k$  中得到的旋转备用总量。

高峰负荷期间, 当子集合  $S_{\text{lack}}^k$  的机组输出功率减少时, 它们的上行备用贡献能够增大; 然而当子集合  $S_{\text{rich}}^k$  的机组输出功率增大时, 它们的的上行备用贡献有可能并不减少。很明显, 有可能通过从子集合  $S_{\text{lack}}^k$  到子集合  $S_{\text{rich}}^k$  转移机组输出功率, 来挖掘系统备用贡献的增长潜力, 以应对陡升事件的冲击。

### 1.3 间歇冲击型紧急态势的识别指标

间歇冲击型紧急态势要出现在以下 3 种情况:

情况 1 是  $k$  时段处于净负荷曲线高峰区段, 并且在该时段向前看范围内, 有上行陡坡段; 情况 2 是  $k$  时段处于净负荷曲线低谷区段, 并且在该时段向前看范围内, 有下行陡坡段; 情况 3 是出现在某种事故之后, 并且在  $k$  时段的向前看范围内, 存在陡坡段。

假设  $W_1^k$ 、 $W_2^k$  和  $W_3^k$  分别为  $k$  时段处于情况 1、情况 2 和情况 3 的特征标识符;  $N_{\text{up}}^k$ 、 $N_{\text{down}}^k$ 、 $N_{\text{outage}}^k$  分别为  $k$  时段向前看范围内, 上、下行陡坡段数目和重要设施(线路或机组)事故后退出运行的预估数目;  $T_{\text{Hpeak}}$  为高峰负荷门槛值<sup>[11]</sup>;  $T_{\text{Hvalley}}$  为低谷负荷门槛值, 则

$$W_1^k = \begin{cases} 1, & (P_{\text{L}}^k \geq T_{\text{Hpeak}}) \cap (N_{\text{up}}^k \geq 1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$W_2^k = \begin{cases} 1, & (P_{\text{L}}^k \leq T_{\text{Hvalley}}) \cap (N_{\text{down}}^k = 1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$W_3^k = \begin{cases} 1, & (N_{\text{outage}}^k \geq 1) \cap [(N_{\text{up}}^k \geq 1) \cup (N_{\text{down}}^k \geq 1)] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$k$  时段处于间歇冲击型紧急态势的充要条件为  $C_{\text{DSN}}^k = 1$ , 其中

$$C_{\text{DSN}}^k = \begin{cases} 1, & (C_{\text{DNCSS}}^k = 1) \cap (C_{\text{DSFF}}^k = 1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $C_{\text{DSN}}^k$  为间歇冲击型紧急态势判别指标。

必要条件为  $C_{\text{DNCSS}}^k = 1$ , 其中

$$C_{\text{DNCSS}}^k = \begin{cases} 1, & (W_1^k = 1) \cup (W_2^k = 1) \cup (W_3^k = 1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

充分条件为  $k$  时段在常规实时优化调度下, 系统备用贡献不足, 即  $C_{\text{DSFF}}^k = 1$ , 其中

$$C_{\text{DSFF}}^k = \begin{cases} 1, & S_{\text{RCL}}^k(\text{传统}) < P_{\text{Lmax}}^k - P_{\text{L}}^k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_{\text{Lmax}}^k$  和  $P_{\text{L}}^k$  分别为  $k$  时段的向前看范围中的最大净负荷预测值和净负荷预测值。

借助式(11), 可以识别任一  $k$  时段是否处于间歇冲击型紧急态势。一经确认处于该态势, 即可启动执行本策略的程序, 对其进行旋转备用智能优化调度。

## 2 3 种 SRC 状态的决策机制

### 2.1 SRC 增强态

从旋转备用管理的角度看, 间歇冲击型紧急态势中, 系统备用贡献在不同的时段有增强态、保持态和释放态等 3 种备用管理状态。

若  $k$  时段常规实时优化调度下满足式(11), 即系统备用贡献  $S_{\text{RC}}^k(\text{传统})$  不充分, 则  $k$  时段处于 SRC 增强态  $S_{\text{Tenhance}}^k$ , 判断它的条件为  $S_{\text{Tenhance}}^k = 1$ , 其中

$$S_{\text{Tenhance}}^k = \begin{cases} 1, & (j > k) \cap (C_{\text{DSFF}}^k = 1) \cap (V^{k-1} = 0) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $j$  为出现  $P_{\text{Lmax}}^j$  的时段号;  $V^{k-1}$  为上  $(k-1)$  时段处于 SRC 增强(或保持)态, 并能完成 SRC 增强(或保持)任务的标识符。 $V^{k-1} = 0$  表示上时段不处于 SRC 增强态, 或者虽然处于 SRC 增强态, 但不能完成 SRC 增强任务。

SRC 增强态是尽可能增补 SRC 的不足, 以应对前方陡坡段的冲击。即调整子集合  $S_{\text{rich}}$  与  $S_{\text{lack}}$  之

间的输出功率转移  $S_{\text{shift}}^k$ , 以使系统备用贡献为

$$S_{\text{RC}}^k = P_{\text{Lmax}}^k - P_{\text{L}}^k \quad (13)$$

SRC 增强态的特征是前方有陡坡段; 且在常规实时优化调度下, SRC 不足以应对前方陡坡段的冲击。此外,  $(k-1)$ 时段不处于 SRC 增强态。

如果“两子集合优化”后, 系统备用贡献未达到式(13)的水平, 就应当给  $V^k$  置零, 以便 $(k+1)$ 时段接力, 继续去履行 SRC 增强态的任务。本文决策有以下原则: 首先从运行火电机组内部挖掘 SRC 的增长潜力, 不足之时再由其它渠道补充。

当调度中心得到  $V^k=0$  的信息后, 应当立即从运行火电机组以外其它渠道(抽水蓄能、邻近电网联络线、需求侧管理等)补充 $(k+1)$ 时段的备用。

## 2.2 SRC 保持态

如果增强态是在 $(k-1)$ 时段完成, 或者已增强的 SRC 在 $(k-1)$ 时段中能够得到保持, 陡坡段发生在  $k$  时段之后, 则  $k$  时段处于 SRC 保持态  $S_{\text{Tretain}}^k$ , 判断它的条件:  $S_{\text{Tretain}}^k = 1$ , 其中

$$S_{\text{Tretain}}^k = \begin{cases} 1, & (j > k) \cap (V^{k-1} = 1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

SRC 保持态的特征是前方有陡坡段, 且 $(k-1)$ 时段处于 SRC 增强(或保持)态, 并能够完成 SRC 增强(或保持)任务, 使系统备用贡献为

$$S_{\text{RC}}^{k-1} = P_{\text{Lmax}}^{k-1} - P_{\text{L}}^{k-1} \quad (15)$$

SRC 保持态的任务是保持 SRC 的充足性, 以应对前方陡坡段的冲击。即调整子集合  $S_{\text{rich}}$  与  $S_{\text{lack}}$  之间的输出功率转移  $S_{\text{shift}}^k$ , 使系统备用贡献保持式(13)的水平。

由式(13)和(15)可得:

$$S_{\text{RC}}^k = S_{\text{RC}}^{k-1} + P_{\text{Lmax}}^k - P_{\text{Lmax}}^{k-1} - (P_{\text{L}}^k - P_{\text{L}}^{k-1}) \quad (16)$$

当  $P_{\text{Lmax}}^k = P_{\text{Lmax}}^{k-1}$  时,  $k$  时段的超短期净负荷预报对前方最大负荷的预测, 于是有

$$S_{\text{RC}}^k = S_{\text{RC}}^{k-1} - (P_{\text{L}}^k - P_{\text{L}}^{k-1}) \quad (17)$$

在高峰期负荷上升阶段有  $P_{\text{L}}^k > P_{\text{L}}^{k-1}$ , 因此有  $S_{\text{RC}}^k < S_{\text{RC}}^{k-1}$ , 也就是说, 需要保持的系统备用贡献  $S_{\text{RC}}^k$  略小, 相应地, 子集合间输出功率转移量  $S_{\text{shift}}^k$  也比上时段的  $S_{\text{shift}}^{k-1}$  略小, 从而“两子集合优化”的附加代价也能略小。

## 2.3 SRC 释放态

如果增强态的任务能够在 $(k-1)$ 时段完成, 或

者已增强的 SRC 在 $(k-1)$ 时段中能够得到保持, 陡坡段将发生在  $k$  时段, 则  $k$  时段处于 SRC 释放态  $S_{\text{Tdischarge}}^k$ , 判断它的条件为

$$S_{\text{Tdischarge}}^k = \begin{cases} 1, & (j = k) \cap (V^{k-1} = 1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

SRC 释放态的特征是陡坡段就在  $k$  时段, 且 $(k-1)$ 时段处于 SRC 增强(或保持)态, 并能够完成 SRC 的增强(或保持)任务。SRC 释放态的任务是将先前时段增强或保持的充足的 SRC 释放出来, 以应对当前陡坡段的冲击。

## 3 旋转备用智能优化调度

### 3.1 旋转备用智能优化调度模型

旋转备用智能优化调度要适应不同紧急态势的特点, 还要适应不同系统备用贡献管理状态的需要, 主要体现: 1) 优化适应态势缓急变迁。当态势缓和时, 进行常规实时优化调度; 当态势紧急时, 进行旋转备用智能优化调度。2) 旋转备用智能优化调度能够适应高峰期上行旋转备用紧缺、低谷期下行旋转备用紧缺或事故后上(或下)行旋转备用紧缺等不同特点。上、下行采用既相似又有区别的优化模型。3) 旋转备用智能优化调度在紧急态势期间不同的系统备用管理状态(增强态、保持态、释放态), 对两种机组子集合间输出功率转移量, 作不同的适应性调整。

按照国家能源发展和环境保护政策, 为更多的可再生能源(特别是风能)进入电网创造有利条件, 在实时优化调度模型的建立中, 不论常规实时优化还是旋转备用智能优化, 本文都遵循节能发电调度的原则, 重点研究间歇冲击型紧急态势下旋转备用智能优化调度模型, 谋求运行火电机组总体化石能源费用和污染排放费用极小化。

旋转备用富裕的火电机组子集合  $S_{\text{rich}}$  与旋转备用缺乏的火电机组子集合  $S_{\text{lack}}$  之间的输出功率转移, 会产生附加费用。为了尽可能压缩附加费用, 可采取火电机组子集合  $S_{\text{rich}}$  与子集合  $S_{\text{lack}}$  分别进行优化的“两子集合优化方法”<sup>[7]</sup>。下文给出高峰期上行旋转备用紧缺时“两子集合优化”的实时调度模型。低谷期下行或事故后上行等情况的模型与上行的类似, 但须注意上、下行的区别, 篇幅所限在此不再赘述。

1) 子集合  $S_{\text{lack}}$  的优化。

旋转备用缺乏子集合  $S_{\text{lack}}$  的目标函数:

$$\min \sum_{i \in S_{\text{lack}}} f(P_i) \quad (19)$$

等式约束:

$$\sum_{i \in S_{\text{lack}}} P_i^k = \sum_{i \in S_{\text{lack}}} P_i'^k - S_{\text{shift}}^k \quad (20)$$

不等式约束:

$$P_{i\min} \leq P_i^k \leq P_{i\max} \quad (21)$$

式中:  $S_{\text{shift}}^k$  为旋转备用缺乏的子集合  $S_{\text{lack}}$  和旋转备用富裕的子集合  $S_{\text{rich}}$  之间输出功率转移量;  $f(P_i)$  为机组  $i$  的费用函数;  $\sum_{i \in S_{\text{lack}}^k} P_i^k$  为旋转备用缺乏的子集合  $S_{\text{lack}}^k$  在  $k$  时段由旋转备用智能优化确定的输出功率总和;  $\sum_{i \in S_{\text{lack}}^k} P_i'^k$  为子集合  $S_{\text{lack}}^k$  在  $k$  时段由常规优化确定的输出功率总和。 $P_{i\min} = \max\{P_{i\max} - Tr_i, P_i^{k-1} - Tr_i\}$ , 从中可知,  $P_{i\max} - Tr_i$  反映两个子集合的界限约束, 机组  $i$  属于子集合  $S_{\text{lack}}$ , 它的输出功率不得小  $P_{i\max} - Tr_i$ , 否则它将改属于子集合  $S_{\text{rich}}$ , 而  $P_i^{k-1} - Tr_i$  反映机组功率变化速率约束。

2) 子集合  $S_{\text{rich}}$  的优化。

旋转备用富裕的子集合  $S_{\text{rich}}$  的目标函数:

$$\min \sum_{j \in S_{\text{rich}}} f(P_j) \quad (22)$$

等式约束:

$$\sum_{j \in S_{\text{rich}}^k} P_j^k = \sum_{j \in S_{\text{rich}}^k} P_j'^k + S_{\text{shift}}^k \quad (23)$$

不等式约束:

$$P_{j\min} \leq P_j^k \leq P_{j\max} \quad (24)$$

式中:  $P_{j\max} = \min\{P_{j\max} - Tr_j, P_j^{k-1} + Tr_j\}$ ;  $f(P_j)$  为机组  $j$  的费用函数;  $\sum_{j \in S_{\text{rich}}^k} P_j^k$  为子集合  $S_{\text{rich}}^k$  在  $k$  时段由旋转备用智能优化确定的输出功率总和;  $\sum_{j \in S_{\text{rich}}^k} P_j'^k$  为子集合  $S_{\text{rich}}^k$  在  $k$  时段由常规优化确定的输出功率总和。

### 3.2 旋转备用智能优化调度的适应性

在旋转备用智能优化调度下, 在紧急态势期间, 实施优化调度应有适应不同紧急态势的特点, 适应态势的缓急变迁, 特别是适应不同系统备用管理状态的需要。态势缓和时, 进行常规实时优化调度, 不进行旋转备用智能优化调度; 而在间歇冲击型紧急态势时, 才进行旋转备用智能优化调度。本文中常规实时优化调度, 对运行火电机组集合总

体, 进行以节约化石能源, 减低污染排放为目标的有功功率优化调度; 而旋转备用智能优化调度, 则对子集合  $S_{\text{rich}}$  和  $S_{\text{lack}}$ , 分别进行相同目标的有功功率优化调度。

虽然在间歇冲击型紧急态势期间, 要实施旋转备用智能优化调度, 但在此期间任何时段, 还要进行常规实时优化计算。首先, 需要根据式(9)—(11), 识别缓急态势时段; 其次, 这也是子集合优化模型的需要, 例如  $\sum_{i \in S_{\text{lack}}^k} P_i^k$  就是子集合  $S_{\text{lack}}^k$  在  $k$  时段由常规优化确定的输出功率总和。

旋转备用智能优化调度是常规实时优化调度在紧急态势下的有力补充。在间歇冲击型紧急态势期间, 常规实时优化调度下的 SRC 往往是不足的, 此时旋转备用智能优化调度就是要通过子集合间输出功率的转移, 来增强 SRC。

### 4 挖掘 SRC 增长潜力的算例

一个电网运行火电机组的参数如表 1 所示。设运行火电机组总体承担系统净负荷, 表 1 中  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为火电机组  $i$  费用函数的系数;  $f(P_i)$  为实时调度一个时段(5 min)期间, 火电机组  $i$  化石能源费用函数(含污染排放的税费)。

表 1 运行火电机组的参数

Tab. 1 Operation parameters of thermal power units

类型	容量/MW	台数	$a_i$	$b_i$	$c_i$	爬坡速率/(MW/m)
A	300	15	0.00979	7.884	531.3	3
B	300	16	0.01293	6.373	514.5	3
C	600	10	0.00227	9.616	353.1	6
D	600	8	0.00239	9.385	368.4	6
E	1 000	9	0.00168	8.979	340.8	10
总和	29 100	58	—	—	—	—

$$f(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$$

紧急陡坡事件净负荷预测无误差和有误差时期的旋转备用智能调度计算结果如表 2 和 3 所示。其中,  $P_L^k$  为  $k$  时段净负荷预测值;  $S_{\text{RC}}$  为系统备用贡献;  $R_{\text{Clack}}$  为子集合  $S_{\text{lack}}$  的备用贡献;  $R_{\text{Crich}}$  为子集合  $S_{\text{rich}}$  的备用贡献。

表 2 中, 从  $h$  时段到  $h+7$  时段, 系统经历了 2 个陡坡。在上述 8 时段中, 总费用为 2 554 146.0 元, 子集合间“输出功率转移”的附加代价为 1 987.3761 元, 附加代价的百分数为 0.07781%, 与其它手段(如启动调峰机组)相比, 其值非常小。

表2 紧急RRE期间预测无误差时的计算结果

Tab. 2 Calculation results without predicted error during the urgent RRE period

时段	$P_L^k/$ MW	$S_{RC}/$ MW	$R_{Clack}/$ MW	$R_{Crich}/$ MW	$S_{hft}/$ MW	费用/ 元	附加代价/ 元
$h$	27 120	1 055.000	590.000	465.0	590	311 454.6	252.47
$h+1$	27 213	1 327.40	562.350	765.0	890	312 960.5	593.32
$h+2$	27 456	1 315.40	550.400	765.0	690	316 173.6	732.54
$h+3$	28 012	518.60	53.602	465.0	0	312 665.1	0.00
$h+4$	27 894	714.99	249.990	465.0	250	321 297.0	207.59
$h+5$	27 975	694.99	229.990	465.0	230	322 351.4	201.47
$h+6$	28 526	429.87	189.870	240.0	0	329 483.6	0.00
$h+7$	28 398	465.00	0.000	465.0	0	327 760.2	0.00
总和	—	—	—	—	—	2 554 146.0	1 987.38

表3 紧急RRE期间预测有误差时的计算结果

Tab. 3 Calculation results with predicting error during the urgent RRE period

时段	$P_L^k/$ MW	$S_{RC}/$ MW	$R_{Clack}/$ MW	$R_{Crich}/$ MW	$S_{hft}^k/$ MW	费用/ 元	附加 代价/元
$h$	27 120	1 055.0000	590.0000	465.0	590	311 454.6	252.47
$h+1$	27 213	1 327.3460	562.3460	765.0	890	312 960.5	593.31
$h+2$	27 456	1 315.3970	550.3970	765.0	690	316 173.6	732.53
$h+3$	28 012	518.6022	53.6022	465.0	0.0	312 665.1	0.00
$h+4$	28 526	460.1220	220.1220	240.0	0.0	329 484.9	0.00
$h+5$	28 399	465.0000	0.0000	465.0	0.0	327 773.6	0.00
$h+6$	27 975	465.0000	0.0000	465.0	0.0	322 149.2	0.00
$h+7$	27 893	465.0000	0.0000	465.0	0.0	321 076.3	0.00
总和	222 594	—	—	—	—	2 553 737.8	1 578.31

在  $h$  时段的向前看范围内, 有 2 个陡坡引人注目。如果实际的净负荷与对  $h$  时段的向前看范围所进行的预测结果非常接近, 则计算结果可参看表 2。

假设  $h$  时段的向前看范围内, 从  $h+3$  时段到  $h+7$  时段有明显的净负荷预测误差, 如图 2 所示, 在这种情况, 计算结果可参看表 3。

图 2 中, 系统也经历了 2 个陡坡, 但靠后的陡

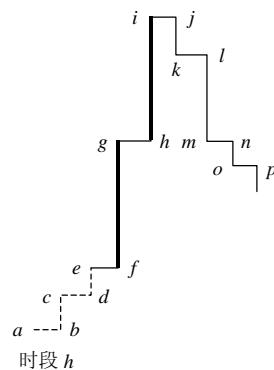


图2 向前看范围中有预测误差的情形

Fig. 2 A predicted errors in the look forward to the scope

坡由于预测的时间定位误差, 提前到了  $h+4$  时段 (线段  $ij$ )。按照备用管理状态的决策机制,  $h$  时段和  $h+1$  时段处于 SRC 增强态,  $h+2$  时段处于 SRC 保持态, 在  $h+3$  时段以前, 系统备用贡献得到了充分的增强和保持, 因此系统可分别度过来自  $h+3$  时段和  $h+4$  时段的 2 次连续间歇性大扰动。

对系统备用贡献 SRC 的增强和保持, 有利地支持系统承受最严重的间歇性大扰动的打击。虽然第 2 个陡坡提前出现, 显著提高了第 2 次打击的强度, 但它不加大子集合间输出功率转移的附加代价。实际上, 表 3 中上述 8 个时段子集合间输出功率转移附加代价的总和为 1 578.312 3 元, 比表 2 中的附加代价还少。

为了对旋转备用智能优化调度与常规优化调度结果进行对比, 表 4 和 5 给出了  $h$  时段两种优化调度结果。两表中, I 型和 II 型机组属于旋转备用富裕的子集合; III 型、IV 型和 V 型机组属于旋转备用缺乏的子集合。表 4 中子集合间功率转移量  $S_{hft}^h$  为零; 表 5 中子集合间功率转移量  $S_{hft}^h$  为 590 MW, 与表 2 和 3 一致。

表 4 和 5 中, 发电机组总输出功率相同, 都是 27 120 MW; 两表中总费用很接近, 都在 31 万 1 千余元的范围之中, 二者的差距为 252.3 元, 它是表 2 和 3 中,  $h$  时段的附加代价; 两表中总备用贡献相差很大, 后者的 1 055 MW 比前者的 465 MW

表4 h时段常规优化调度的结果

Tab. 4 Optimal dispatch results by conventional

类型	容量/MW	数量	爬坡速率/(MW/min)	输出功率/MW	备用贡献	类型费用/(0.2 元/min.)
I	300	15	15	235.487 6×15	15×15	43 961.74
II	300	16	15	236.730 4×16	16×15	43 964.75
III	600	10	30	600×10	0	69 399.00
IV	600	8	30	600×8	0	54 878.40
V	1 000	9	50	1 000×9	0	98 998.20
总计	29 100	58	—	27 120	465	311 202.10

表5 h时段旋转备用智能优化调度的结果

Tab. 5 Optimal dispatch results by proposed strategy

类型	容量/MW	数量	爬坡速率/(MW/min)	输出功率/MW	备用贡献	类型费用/(0.2 元/min.)
I	300	15	15	257.247 2×15	15×15	48 109.52
II	300	16	15	253.205 7×16	16×15	47 314.60
III	600	10	30	575.191 2×10	248.090	66 351.57
IV	600	8	30	594.637 7×8	42.898	54 353.32
V	1 000	9	50	966.776 2×9	299.010	95 325.35
总计	29 100	58	—	27 120	1 055.000	311 454.40

大一倍有余。

旋转备用智能优化调度, 在  $h$  时段通过发电机组子集合间的功率转移, 只花费 250 余元的附加代价, 将系统备用贡献提高了一倍有余(与常规优化调度相比)。通过其它途径, 很难达到这种功效。

## 5 结论

为了应对风电间歇性扰动带来的挑战, 本文在分析电网上、下行旋转备用短缺时期, 再次遭受陡坡事件冲击的多种高风险态势的基础上, 提出了旋转备用智能优化调度策略。结论如下:

1) 增强前瞻响应能力。在紧急陡坡事件期间, 跟踪变化过程, 从净负荷预测误差中搜寻可能的未来隐患, 根据时段紧急态势的识别指标, 捕获间歇型扰动所引起的陡坡时段最坏的情况, 对于最陡坡时段提前作好准备。

2) 为应对间歇冲击型紧急态势, 建立 3 种系统备用贡献管理状态(增强态、保持态、释放态)的决策机制。

3) 为适应间歇冲击型紧急态势期间, 不同时段不同备用管理状态需要, 提出了紧急实时优化调度方法。对备用缺乏子集合  $S_{rich}$  与备用富裕子集合  $S_{slack}$  之间的输出功率转移, 进行灵活的适应性调整。

4) 加强备用调度实施中适应性优化, 适应不同缓急变化态势。当缓和态势时, 实施常规优化调度; 当紧急态势时, 实施旋转备用智能优化调度。该调度需要适应高峰期上行旋转备用紧缺、低谷期下行旋转备用紧缺或事故后上行旋转备用紧缺等不同情况, 分别采用相应的优化模型。在紧急态势中, 备用管理状态随时段变迁而改变, 优化调度应随之作出适应性的改变。

5) 在挖掘 SRC 增长潜力的前提下, 所提智能调度可以实现间歇冲击型紧急态势期间, 节约化石能源、减低污染排放和预防二次打击之间的目标协调, 以甚小的附加代价, 提高电网应对随机间歇性扰动的坚韧能力。

## 参考文献

- [1] Doherty R, Denny E, Malley M O. System operation with a significant wind power penetration[C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Kuri, USA: IEEE, 2004: 1002-1007.
- [2] Makarov Y V, Loutan C, Ma J. Operational impacts of wind generation on California power systems[J]. IEEE Trans. Power System, 2009, 24(2): 1039-1050.
- [3] Ummels B C, Gibescu M, Pelgrum E, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch[J]. IEEE Trans. Energy Convers, 2007, 22(1, ): 44-51.
- [4] Miguel A. Ortega-Vazquez and Daniel S. Kirschen. Estimating the spinning reserve requirement in systems with significant wind power generation penetration[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2009, 24(1): 114-124.
- [5] Lee S T, Yamayee Z A. Load-following and spinning-reserve penalties for intermittent generation[J]. IEEE Trans. Power Application System, 1981, 100(3): 1203-1211.
- [6] Galiana F D, Bouffard F, Arroyo J M, et al. Scheduling and pricing of coupled energy and primary, secondary and tertiary reserve[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(11): 1970-1983.
- [7] Dany G. Power reserve in interconnected system with high wind power production[J]. IEEE Power Tech Proceedings. Porto, Portugal: IEEE, 2001: 6.
- [8] Potter C W. Potential benefits of a dedicated probabilistic rapid ramp event forecast tool[C]//IEEE/PES Power System Conference and Exposition. Seattle, WA: IEEE, 2009: 1-5.
- [9] Kamath C. Understanding wind ramp event through analysis of historical data[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans: IEEE, 2010: 1-6.
- [10] Wu H, Gooi H B. Optimal scheduling of spinning reserve with ramp constraints[C]//IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting. New York: IEEE, 1999: 785-790.
- [11] Gooi H B, Mendes D P, Bell K R W, et al. Optimal scheduling of spinning reserve[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1999, 14(4): 1485-1492.
- [12] 刘长义, 柳进, 柳焯. 提高电网攀峰响应能力的研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 34-37.  
Liu Chang-yi, Liu Jin, Liu Zhuo. Studies on enhancing power system response ability for climbing steep peak load[J]. Automation of Electric Power System, 2002, 26(2): 34-37(in Chinese).
- [13] 柳进, 潘毅, 刘长义, 等. 攀峰过程协调优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 36-40.  
Liu Jin, Pan Yi, Liu Changyi, et al. Coordination optimal dispatching in process of climbing peak[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 36-40(in Chinese).
- [14] Lin Wei, Liu Jin, Liu Zhuo. Enhancing operational flexibility with significant wind energy penetration[C]//The Annual Electrical Power and Energy Conference,

- Winnipeg, Canada, Oct. 2011.
- [15] 张伯明, 吴素农, 蔡斌, 等. 电网控制中心安全预警警与决策支持系统设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 1-5.
- Zhang Boming, Wu Sunong, Cai Bin, et al. Design of an early warning and security countermeasure system for electric power control centers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 1-5(in Chinese).
- [16] 李予洲, 张伯明, 吴文传, 等. 在线有功调度协调控制系统的研究与开发[J]. 电力自动化设, 2008, 28(5): 12-15.
- Li Yuzhou, Zhang Boming, Wu Wenchuan et al. Development of online coordination control system for active power dispatch[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2008, 28(5): 12-15(in Chinese).
- [17] 柳进, 潘毅, 于继来, 等. 基于前沿陡升信息保持策略的高峰负荷预报研究[J]. 中国电机工程学报, 2004,

24(5): 12-17.

Liu Jin, Pan Yi, Yu Jilai, et al. Peak load forecasting based on the strategy of preservation for steep rising information in forefront[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 12-17(in Chinese).



柳进

收稿日期: 2012-05-09。

作者简介:

柳进(1958), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化调度与数据挖掘在电力系统的应用;

于继来(1965), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统模式分析与灵活交流输电系统;

柳焯(1929), 男, 教授, 研究方向为电网安全、稳定运行分析和控制。

(责任编辑 张玉荣)

## 《中国电机工程学报》连续 10 年获“中国百种杰出学术期刊”称号, 2 篇论文入选“2011 年中国百篇最具影响国内学术论文”

2012 年 12 月 7 日, 科技部中国科学技术信息研究所在北京国际会议中心召开了中国科技论文统计结果发布会, 发布了 2011 年度中国科技论文统计结果, 包括《2012 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》、中国国内和国际科技论文产出状况、总体趋势分析以及国际和国内影响等。

《中国电机工程学报》荣获“2011 年中国百种杰出学术期刊”, 在 40 种动力与电力工程类核心期刊中, 总被引频次、学科影响指标、综合评价总分均位列第一, 《学报》已连续 9 年学科各项指标总排名第一, 在全国 1998 种核心期刊中名列第 24 位, 比 2011 年前进了 6 位。“中国百种杰出学术期刊”以《中国科技期刊引证报告》(核心版)(中国科技信息研究所出版)公布的“中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)”收录的中国科技论文统计源期刊的二十余个科学计量指标(总被引频次、影响因子、即年指标、他引率、引用刊数、扩散因子、学科影响指标、权威因子、海外论文比、基金论文比等)为基础, 依据中国科技学术期刊综合评价指标体系, 采用层次分析法, 由专家打分确定重要指标的权重, 并分学科对每种期刊进行综合评定。

《中国电机工程学报》自获得“2002 年中国百种杰出学术期刊”称号以来, 已连续 10 年获此殊荣。

此次发布会同时还公布了中国百篇最具影响国际和国内学术论文, 清华大学孙元章和燕山大学赵清林在《中国电机工程学报》2009 年第 4 期和 2007 年第 16 期上刊登的《基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度》、《单相逆变器并网控制技术研究》入选“2011 年中国百篇最具影响国内学术论文”, 至此, 《中国电机工程学报》共有 10 篇论文获此奖项。此次论文选取范围是从 2007—2011 这 5 年中中国科技论文与引文数据库收录的中文论文中选出, 主要考察论文的创新性、论文的文献类型、发表论文的期刊水平、是否为研究热点等, 评选出的百篇论文代表了各个学科科研成果的最高水平。

《中国电机工程学报》近年来积极关注社会热点, 发掘、遴选和刊登高水平稿件, 从专业层次上对智能电网、特高压输电、废弃物的减量化与资源化利用、控制和减少污染物排放、可再生能源发电、电动汽车等方面都进行过深入的报道。其中, 刊登的多篇论文相关内容被新华网、中国日报网、中国网、中国科学院网、中国高新技术产业报等知名媒体关注, 社会效益显著。2012 年, 《中国电机工程学报》又积极开展对国家重大项目“973 项目”“863 项目”和综述性论文的约稿, 并开展了“大规模间歇式电源并网与大容量储能系统”专题的组稿工作, 积极跟踪科研热点, 反映最新研究成果, 学术影响力不断扩大。