

DOI: 10.7667/PSPC171227

## 跨省联络线的优化调度模式及预警策略研究

陈跃辉<sup>1</sup>, 向萌<sup>2</sup>, 张斌<sup>2</sup>, 左剑<sup>2</sup>, 芮虎<sup>2</sup>, 刘敦楠<sup>3</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410007; 2. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007; 3. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 传统的跨省联络线计划基于电力交易而制定, 与受端电网机组计划相互独立, 且不受负荷变化影响, 存在资源配置不合理、电网安全稳定运行受影响等问题。为此, 结合联络线对受端电网的影响特点, 将受端电网分为电网调峰困难、火电开机容量大和负荷平稳三种运行场景, 针对各场景分别构建了目标函数为受端电网安全裕度最大、风电消纳量最大以及联络线吸纳量最大的联络线调度优化模型。同时提出了针对联络线并网过程中可能出现的火电机组调整量不足、联络线和负荷变化趋势差异问题的预警模型。最后, 选取某电网实际数据对模型进行算例分析, 验证了模型的有效性与实用性。

**关键词:** 联络线; 受端电网; 优化调度; 调整量预警; 趋势预警

### Optimal dispatch modes of cross-provincial tie-line and early-warning strategy

CHEN Yuehui<sup>1</sup>, XIANG Meng<sup>2</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>, ZUO Jian<sup>2</sup>, GUO Hu<sup>2</sup>, LIU Dunnan<sup>3</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Ltd., Changsha 410007, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Corporation Ltd. Research Institute, Changsha 410007, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The traditional tie-line generation schedule is entirely based on the electricity transaction, hence it is independent from the generation schedule of local unit, and is not influenced by the load. These cause difficulties in resource allocation and safety and stability of power grid's operation. Thus, according to the influence characteristic of tie-line on power grid, this paper divides the execution scenes of power grid into three ones, i.e. difficult peak shaving, high capacity of running thermal power and stable load respectively, builds three optimal dispatch modes for those scenes, whose objective functions are the maximization of grid safety margin, target tie line's absorption capacity and local wind power's absorption capacity. Meanwhile, the warning strategy model which aims at the possible safety problem during tie line connecting to the grid, including the lack of adjust capacity of thermal units, differences in change trend of tie line and load, is proposed. Finally, a case study based on practical data of a certain power grid is given to show that the models and the methods in this paper are of validity and applicability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71401055).

**Key words:** tie-line; receiving-end power grid; optimized dispatching; adjustment amount warning; trending early-warning

## 0 引言

近年来,我国跨区域跨省联络线建设进展飞速,各区间省间电网联系日益紧密,联络线输电能力显著提升,在有效促进更大范围资源优化配置的同时也给电网带来了新的挑战<sup>[1-3]</sup>。一方面,外来电力增加导致电网电源发电空间缩小,负荷低谷时段电网向下调峰难度加大,尤其在调峰困难时期,调峰矛

盾更加突出,如何合理安排联络线输送功率保障电网调峰能力成为亟需解决的问题。另一方面,国内风电装机快速增加,规模不断扩大,但同时部分风电厂频频出现风电无法完全消纳的现象,其主要原因是区域内常规电源的调峰能力难以适应日益增长的风力发电需求。为提高风电的消纳量,需充分利用区间省间联络线,在更大范围内实现风电的共同消纳<sup>[4-5]</sup>。区域电网联络线优化调度是在保证电网安全、稳定的前提下,充分利用区域内各省网现有的电力资源,通过跨区、跨省网间联络线运行方式的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(71401055)

合理安排与调整, 尽最大可能满足本区域电网的电力、电量平衡。

在现有的国内文献中, 对联络线的并网优化主要从提高新能源消纳角度和经济性角度出发两种思路: 文献[6]以运行成本和弃风量最小为目标函数构建直联联络线运行方式优化决策模型, 提出了一种以提升新能源消纳能力为目标的直联联络线优化运行模式; 文献[7]提出计及电压、网络损耗等因素的联络线消纳能力分析; 文献[8]在现有联络线编制方式的基础上提出基于全网统筹的联络线分层模型, 将联络线计划与电网运行状态相结合; 文献[9]以省内发电成本最小, 不弃水调峰、尽量消纳特高压为目标, 建立了包括火电、水电、抽水蓄能和特高压联合优化的混合整数线性规划模型; 文献[10]以停电损失和建设费用加权和最小为目标函数, 以适应不同运行方式的保护整定值为约束, 建立联络线规划数学模型。文献[11]考虑分段开关、联络线等配网事故负荷损失指标最小和设备投资最小为目标的规划模型, 实现了分段开关和联络线的优化配置。文献[12]分析了在风电和设备故障等不确定性环境下的多区域能量和备用联合经济调度问题, 建立了主要考虑联络线有功功率传输极限约束的交流联络线模型。文献[13]研究了多区域风火协调优化调度问题, 考虑了各个区域内部的电力平衡、上备用、下备用等约束, 对联络线仅考虑有功功率传输极限约束。

综上所述, 现有研究多从电网运行的单一场景出发, 极少细致地考虑电网的实际运行情况, 无法适应电网实际运行中的复杂多变场景<sup>[14]</sup>。本文从电网调峰困难、开机容量大和负荷平稳运行场景出发, 分别构建了针对不同应用场景的联络线优化调度模式, 其目标函数分别对应为电网安全裕度最大、风电消纳量最大<sup>[15]</sup>以及联络线吸纳量最大。同时针对联络线并网过程中可能出现的安全状况提出预警策略, 包括调峰量预警和变化趋势预警<sup>[16-17]</sup>。

## 1 联络线优化调度模式

结合联络线输送功率对受端电网影响的特点<sup>[18]</sup>, 将电网运行状态分为以下三种场景: 调峰困难、开机容量大和负荷平稳运行场景。针对三种场景运行特点, 构建了目标函数分别为受端电网安全裕度最大、风电消纳量最大和联络线吸纳量最大的联络线优化调度模式。通过对三种模式的灵活配置, 可保证不增加受端电网调峰压力的情况下, 提高受端电

网风电消纳量, 实现联络线消纳的最大化。对于指导联络线计划制定、促进外来电力的消纳有参考作用。

### 1.1 模式一——受端电网安全裕度最大

在电网调峰困难时段, 本地负荷难以满足电网发电需求, 联络线输送功率增加使受端电网发电需求增加; 尤其在负荷低谷时段, 联络线输送功率增加挤占了部分出力空间, 系统向下调峰难度进一步增加, 导致某些时段受端电网被迫弃水弃风调峰。

因此在调峰困难时段, 联络线计划制定应优先保障不增加受端电网调峰难度, 即给可调机组留有足够调节裕度, 保证系统具备足够调峰能力应对负荷突变。此时目标为全天 96 点上下备用值最小时的系统调节裕度最大化, 构建联络线优化调度模式如下所述。

目标函数:

$$\begin{cases} \max F \\ F = \text{Min}(G_{L,t}^{\max} - G_{L,t}, G_{L,t} - G_{L,t}^{\min}) \end{cases} \quad (1)$$

约束条件<sup>[19]</sup>如下所述。

约束条件一: 超短期负荷平衡约束

$$D_t = G_{L,t} + G_{r,t} + L_{s,t} + L_{\text{other},t} \quad (2)$$

约束条件二: 本地机组出力上下限约束

$$G_{L,t}^{\min} \leq G_{L,t} \leq G_{L,t}^{\max} \quad (3)$$

约束条件三: 可再生能源出力约束

$$0 \leq G_{r,t} \leq G'_{r,t} \quad (4)$$

约束条件四: 本地机组快速调节能力约束

$$\begin{cases} (D_{t-1} - D_t) \leq \min(\Delta G_L, G_{L,t} - G_{L,t}^{\min}) \\ (D_t - D_{t-1}) \leq \min(\Delta G_L, G_{L,t}^{\max} - G_{L,t}) \end{cases} \quad (5)$$

约束条件五: 目标联络线日交换电量约束

$$\sum_{t=1}^{96} L_{s,t} \times \frac{1}{4} = L_s \quad (6)$$

式(1)一式(6)中:  $F$  表示本地机组调节裕度;  $G_{L,t}$  表示本地机组在  $t$  时刻的出力值;  $G_{L,t}^{\max}$ 、 $G_{L,t}^{\min}$  分别表示电网  $t$  时刻本地机组出力上限和出力下限;  $G_{r,t}$  表示电网可再生能源在  $t$  时刻的出力值;  $G'_{r,t}$  表示可再生能源  $t$  时刻的预测值;  $L_{s,t}$  表示在  $t$  时刻的目标联络线计划,  $L_{\text{other},t}$  表示其他联络线在  $t$  时刻的计划值;  $D_t$ 、 $D_{t-1}$  分别表示电网在  $t$  和  $t-1$  时刻出力需求;  $\Delta G_L$  表示本地机组的调整量,  $L_s$  表示目标联络线全天计划值总量。

### 1.2 模式二——受端电网风电消纳量最大

在枯水期受端电网火电机组开机容量大的时期，火电在低谷时期有最小开机台数和最小技术出力的约束，引起风电厂弃风，此时联络线不参与调峰，电网负荷将更加难以满足系统发电需求，弃风量增加。

为提高受端电网风电的消纳量，减小弃风比例，此时联络线计划建议基于受端电网风电吸纳量最大的优化调度模型来制定。优先分配风电出力，再基于各类约束条件分配联络线。假定每日的联络线计划总量不变，机组开机容量不变，构建联络线优化调度模式如下所述。

目标函数：

$$\max \sum_{i=1}^{96} G_{w,t} \quad (7)$$

约束条件如下所述。

约束条件一：超短期负荷平衡约束

$$D_t = G_{L,t} + G_{r,t} + L_{s,t} + L_{\text{other},t} \quad (8)$$

约束条件二：本地机组出力上下限约束

$$G_{L,t}^{\min} \leq G_{L,t} \leq G_{L,t}^{\max} \quad (9)$$

约束条件三：可再生能源出力约束

$$0 \leq G_{r,t} \leq G'_{r,t} \quad (10)$$

约束条件四：本地机组快速调节能力约束

$$\begin{cases} (D_{t-1} - D_t) \leq \min(\Delta G_L, G_{L,t} - G_{L,t}^{\min}) \\ (D_t - D_{t-1}) \leq \min(\Delta G_L, G_{L,t}^{\max} - G_{L,t}) \end{cases} \quad (11)$$

约束条件五：目标联络线日交换电量约束

$$\sum_{t=1}^{96} L_{s,t} \times \frac{1}{4} = L_s \quad (12)$$

式(7)中， $G_{w,t}$ 表示电网风电在 $t$ 时刻的出力值。

### 1.3 模式三——受端电网联络线吸纳量最大

当受端电网处于负荷平稳时段，系统备用容量相对充足，新能源基本可全额消纳。此时，充分利用电网备用容量，在电网安全的前提下最大程度保障目标联络线输送功率的全额消纳。

将电网其他机组出力范围置于备用约束边界处，在保障负荷变动在电网调节能力范围内的情况下，计算目标联络线电量的最大吸纳。构建联络线优化调度模式如下所述。

目标函数：

$$\max \sum_{i=1}^{96} L_{s,t} \quad (13)$$

约束条件如下所述。

约束条件一：超短期负荷平衡约束

$$D_t = G_{L,t} + G_{r,t} + L_{s,t} + L_{\text{other},t} \quad (14)$$

约束条件二：本地机组出力上下限约束

$$G_{L,t}^{\min} \leq G_{L,t} \leq G_{L,t}^{\max} \quad (15)$$

约束条件三：可再生能源出力约束

$$0 \leq G_{r,t} \leq G'_{r,t} \quad (16)$$

约束条件四：本地机组快速调节能力约束

$$\begin{cases} (D_{t-1} - D_t) \leq \min(\Delta G_L, G_{L,t} - G_{L,t}^{\min}) \\ (D_t - D_{t-1}) \leq \min(\Delta G_L, G_{L,t}^{\max} - G_{L,t}) \end{cases} \quad (17)$$

上述三种联络线调度优化模型本质上等于保障受端电网安全稳定运行情况下，联络线各时段输送功率极限问题，实现了对联络线运行方式的精细化建模。

## 2 联络线预警策略模型

在电网实际对联络线输送功率消纳过程中可能面临火电机组调整量不足、联络线和负荷变化趋势差异等问题，影响受端电网机组和负荷的安全稳定运行。针对上述问题，本小节提出了调整量预警模型和趋势预警模型。

### 2.1 调整量预警模型

受端电网调峰能力是制约联络线输送功率消纳的重要因素。在输送过程中，需对电网调峰量实时监控预警，在调峰量不足情况下给出预警。结合火电机组调峰特点，将系统调整量预警分为以下三种情景。

情景一：受端电网火电机组向上/下调节备用不足，需要给出预警。

由于偏差量过大导致绝对备用不足，如式(18)所示。

$$\underline{G}_{L,\text{thermal}} \parallel \bar{G}_{L,\text{thermal}} < 0 \quad (18)$$

式(18)中， $\bar{G}_{L,\text{thermal}}$ 和 $\underline{G}_{L,\text{thermal}}$ 分别表示电网火电机组的上调节备用和下调节备用。

情景二：当联络线计划值调整时，其调整量大于对应的电网火电机组的调整量时，需要给出预警。由于计划值调整量过大导致的绝对备用不足，如式

(19)所示。

$$\underline{G}_{L,\text{thermal}} < \underline{L} \parallel \bar{G}_{L,\text{thermal}} < \bar{L} \quad (19)$$

式(19)中,  $\underline{L}$ 、 $\bar{L}$  分别表示目标联络线的下调整量与上调整量。

情景三: 当在一定时段内由于负荷趋势、计划值偏差、预测值偏差等因素的影响, 造成受端电网火电机组在这时段内需要的出力调整量大于机组的快速调节能力时, 需要给出预警。快速备用不足, 如式(20)所示。

$$G_{L,\text{thermal},t+i} - G_{L,\text{thermal},t} > \Delta G_i \quad (20)$$

式(20)中:  $G_{L,\text{thermal},t+i}$ 、 $G_{L,\text{thermal},t}$  分别表示  $t+i$  时刻与  $t$  时刻需要的火电机组出力值;  $\Delta G_i$  表示  $i$  时段内快速调节火电机组需要的出力值。

## 2.2 趋势预警模型

联络线与负荷的趋势变化也很大程度上影响了调度的决策, 根据目标联络线计划曲线与受端电网负荷曲线, 构建同向变化率与恶化比例两个指标来进行趋同性分析。

(1) 同向变化率, 指负荷曲线与目标联络线计划曲线同向变化时段数占全天时段数的比例, 表示为

$$S = \frac{T_s}{T_{\text{di}}} \quad (21)$$

式(21)中:  $S$  表示同向变化率;  $T_s$  表示负荷曲线与目标联络线计划曲线同向变化的时段数;  $T_{\text{di}}$  表示一天总的时段数, 本文以 15 min 来划分时段, 一天总时段数为 96。

判断  $T_s$  是否属于同向时段依据的是: 在一个时段周期内, 负荷与目标联络线计划值的变化趋势是否相同。负荷变化率计算方程为

$$D_s = \frac{D_{\text{end}} - D_{\text{begin}}}{D_{\text{begin}}} \quad (22)$$

式(22)中:  $D_s$  表示负荷变化率;  $D_{\text{begin}}$  表示时段初的负荷值;  $D_{\text{end}}$  表示时段末的负荷值。同理可计算目标联络线计划值的变化率, 表示为  $L_s$ 。

判定方程如下:

$$\begin{cases} D_s \& L_s \geq K_1 & \text{同向上趋势} \\ K_2 < D_s \& L_s < K_1 & \text{无趋势} \\ D_s \& L_s \leq K_2 & \text{同向下趋势} \\ \text{其他} & \text{反向趋势} \end{cases} \quad (23)$$

式(23)的含义为, 当电网负荷与目标联络线的变化率均大于  $K_1$  时, 判定为同向上趋势; 当负荷与目标联络线的变化率均小于  $K_2$  时, 判定为同向下趋势; 当负荷与目标联络线的变化率均位于  $K_1$ 、 $K_2$  之间时, 判定为无趋势, 需进行二次判定。其他情况判定为反向趋势。其中  $K_1$  取正值,  $K_2$  取负值。

对“无趋势”项进行二次判定。

$$\alpha_{T,D} = \frac{\text{avg}\left(\sum_{t=1}^T (D_t - D_{\text{min}})\right)}{D_{\text{max}} - D_{\text{min}}} \quad (24)$$

式(24)中:  $\alpha_{T,D}$  表示时段周期  $T$  内的负荷在全天负荷中的相对位置;  $D_{\text{max}}$ 、 $D_{\text{min}}$  分别表示当天内的负荷最大值与负荷最小值;  $\text{avg}\left(\sum_{t=1}^T (D_t - D_{\text{min}})\right)$  为时段周期  $T$  内所有点负荷相对值的平均值。同理可计算时段周期  $T$  内目标联络线计划值在全天计划中的相对位置  $\alpha_{T,L}$ 。设定阈值  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$ ,  $\lambda_1, \lambda_2 \in (0, 1)$ , 判定方程如式(25)所示。

$$\begin{cases} \alpha_{T,D} \& \alpha_{T,L} > \lambda_1 & \text{判定同向} \\ \alpha_{T,D} \& \alpha_{T,L} < \lambda_2 & \text{判定同向} \\ \text{其他} & \text{判定反向} \end{cases} \quad (25)$$

在此判定方法中, 可设置多个阈值, 制定多个划分区间, 对负荷曲线与目标联络线计划曲线的所属相对位置进行细分。

(2) 恶化比例, 指全天本地机组出力爬坡大于负荷爬坡的时段数占全天时段总数的比例。若无其他因素影响, 本地机组爬坡应等于负荷爬坡, 造成这一现象的原因是因为联络线计划值的波动, 因此这一指标也在一定程度上反映了联络线计划与负荷的关系。恶化比例指标表示如式(26)所示。

$$B = \frac{T_b}{T_{\text{all}}} \quad (26)$$

式(26)中:  $B$  表示恶化比例;  $T_b$  表示本地机组爬坡大于负荷爬坡的时段数。本地机组爬坡  $\Delta G$  可表示为  $|G_{\text{end}} - G_{\text{begin}}|$ ; 负荷爬坡  $\Delta D$  可表示为  $|D_{\text{end}} - D_{\text{begin}}|$ ; 因此恶化量可表示为  $\phi = \Delta G - \Delta D$ 。

## 3 实例分析

本文选取某电网某日实际运行数据对上述模型进行实例分析。该电网该日各电源出力分布如图 1 所示。

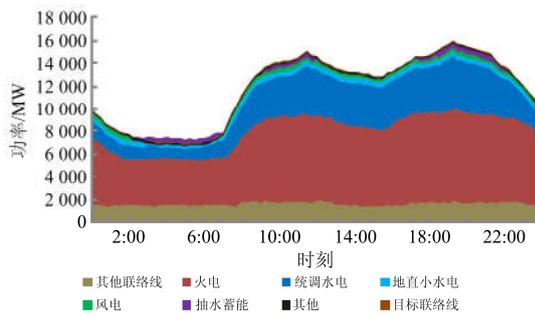


图 1 各类电源出力分布图  
Fig. 1 Output of all power unit

### 3.1 联络线优化调度算例分析

#### (1) 模式一——安全裕度最大

根据 1.1 节中构建的安全裕度最大化模型，目标联络线当天吸纳的总电量为 0.91 亿 kW 时，通过 Matlab 优化工具箱中的 linprog 函数进行求解可得火电机组出力分布如图 2 所示，火电机组的上备用最小值为 732 MW，下备用最小值为 482 MW。

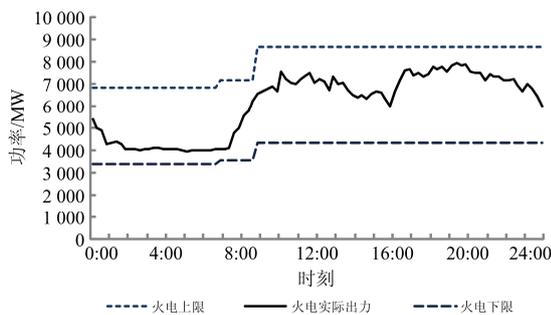


图 2 安全裕度最大模式下火电机组出力图  
Fig. 2 Output of thermal power unit in safety margin maximization mode

根据火电机组的可下调裕度，得出安全裕度最大模型下的目标联络线吸纳曲线如图 3 所示，联络线吸纳量最小值为 0，持续时间为 1:00—7:00，最大值为 760.58 MW。

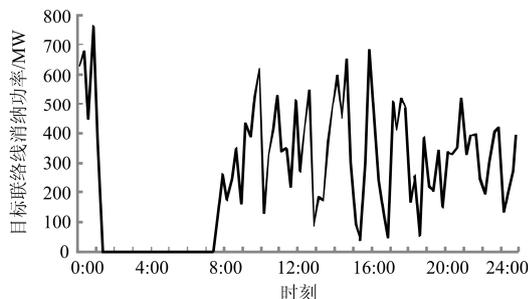


图 3 安全裕度最大模式下目标联络线吸纳值  
Fig. 3 Target tie line's absorption capacity in safety margin maximization mode

#### (2) 模式二——风电吸纳量最大

计算可得此模式下火电机组的上备用最小值为 684 MW，下备用最小值为 369 MW，如图 4 所示。根据火电机组的可下调裕度，得到目标联络线消纳曲线如图 5 所示，在本地风电吸纳量最大条件下，目标联络线吸纳量最小值为 306.43 MW，最大值为 3 420 MW。

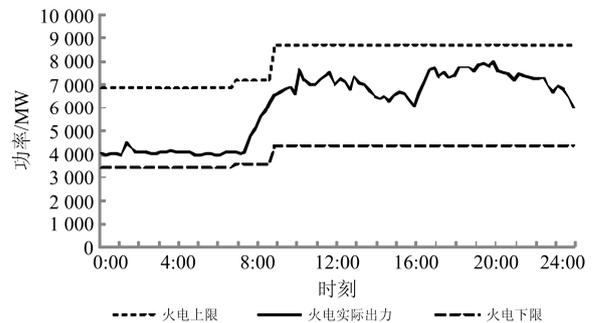


图 4 风电消纳量最大化模式下火电机组出力图  
Fig. 4 Output of thermal power unit in wind power's absorption capacity maximization mode

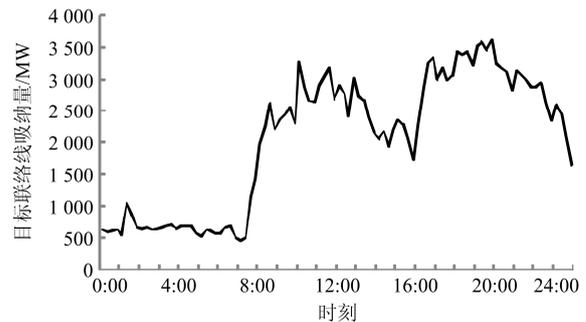


图 5 风电消纳量最大化模式下目标联络线消纳值  
Fig. 5 Target tie line's absorption capacity in wind power's absorption capacity maximization mode

#### (3) 模式三——联络线吸纳量最大

计算可得此模式下火电机组的上备用最小值为 1 158 MW，下备用最小值为 84 MW，如图 6 所示。根据火电机组的可下调裕度，得出目标联络线吸纳量最大模式下目标联络线消纳曲线如图 7 所示，目标联络线吸纳量最小值为 560.56 MW，最大值为 3 292.09 MW。

由于部分火电机组出力无法下调，为保障目标联络线消纳量最大，会导致部分风电无法消纳，测算弃风点及弃风量如图 8 所示。

汇总该日各模式下的目标联络线消纳值如图 9 所示，从分析结果中可得以下结论。

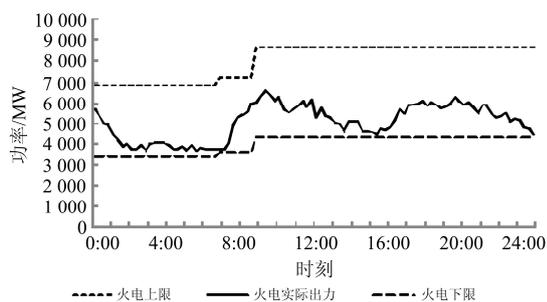


图 6 目标联络线吸纳量最大模式下火电机组出力图

Fig. 6 Output of thermal power unit in target tie line's absorption capacity maximization mode

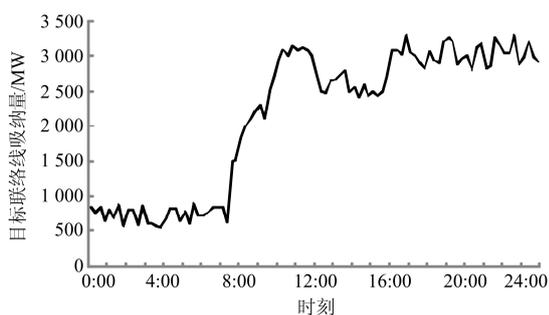


图 7 目标联络线吸纳量最大模式下目标联络线吸纳值

Fig. 7 Target tie line's absorption capacity in target tie line's absorption capacity maximization mode

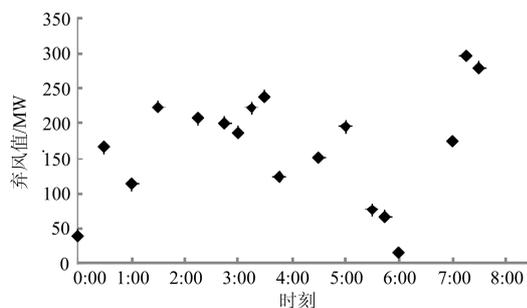


图 8 目标联络线消纳最大化模式下的弃风点

Fig. 8 Wind power curtailment condition in target tie line's absorption capacity maximization mode

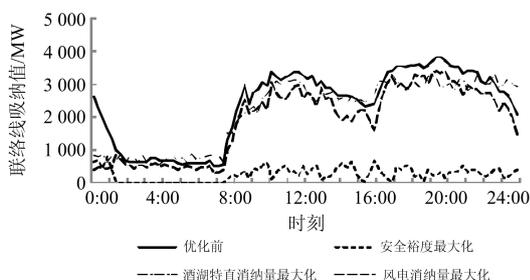


图 9 不同模式下目标联络线消纳能力对比图

Fig. 9 Comparison of targettie line's absorption capacity under different modes

(1) 为满足电网的安全裕度最大化, 在模式一的约束条件下目标联络线消纳值很低, 甚至一些时段消纳值为 0, 因此, 通常情况下不使用该模式制定联络线计划, 仅适用于电网调节困难时段。

(2) 模式二中的目标联络线消纳量优化结果表明, 为了给风电波动预留一定的备用容量, 导致目标联络线消纳曲线呈现较大的波动性。该模式适用于需保障风电消纳的电网开机容量大时段。

(3) 模式三中的目标联络线消纳量优化结果表明, 此时的目标联络线消纳量曲线波动较为平稳, 且在负荷低谷时期的消纳量有较明显的提升, 但为保障目标联络线消纳量的最大化, 会导致部分时刻的风电无法消纳。该模式适用于电网负荷平稳且需优先保障联络线消纳时段。

### 3.2 预警策略模型算例分析

#### (1) 调整量预警

以目标联络线吸纳量最大模式下 7:00 为算例进行分析, 该时刻下火电的绝对备用裕度为  $[157.44 \text{ MW}, 3\ 440.06 \text{ MW}]$ ,  $15 \text{ min}$  快速调节能力为  $\text{开机容量} \times \text{爬坡率}(2\%) \times 15 = 1126.48(\text{MW})$ , 可得到该时刻发出调整量预警的判定条件及预警类型, 如表 1 所示。

表 1 调整量预警判定条件与预警类型

Table 1 Predicate conditions and types of adjustment amount warning

| amount warning                          |         |
|---|---------|
| 判定条件                                    | 预警类型    |
| 未来 15 min 偏差量 $> 1\ 126.48 \text{ MW}$  | 快速上备用不足 |
| 未来 15 min 偏差量 $< -157.44 \text{ MW}$    | 绝对下备用不足 |
| 未来 15 min 偏差量 $< -1\ 126.48 \text{ MW}$ | 快速下备用不足 |
| 未来 15 min 偏差量 $> 3\ 440.06 \text{ MW}$  | 绝对上备用不足 |

#### (2) 趋势预警

在目标联络线吸纳量最大模式下, 该日电网总负荷及目标联络线吸纳量变化趋势如图 10 所示。

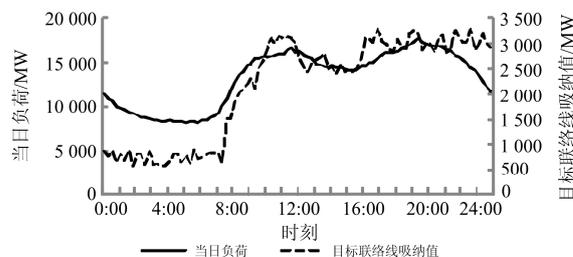


图 10 当日负荷与目标联络线吸纳值

Fig. 10 Day load and absorption capacity of the target tie line

设置时间跨度为 15 min, 时段数为 95, 对上图中数据做统计分析可得, 负荷与目标联络线的同向变化时段数为 49, 反向变化时段数为 46, 同向变化率为 51.58%, 反向变化时段的联络线计划对全网为反调节作用, 应提前进行预警, 便于在运行中做到及时调整。

#### 4 结论

(1) 本文构建了可灵活配置的三种联络线优化调度模式, 分别为安全裕度最大化的调度优化模式, 备用约束下的风电吸纳量最大化的优化调度模式和最大化联络线吸纳量模式, 三种调度模式分别适用于电网调节困难时段、开机容量大时段以及负荷平稳时段。通过对三种模式的灵活配置, 可在保障电网安全稳定运行情况下实现联络线输送功率消纳的最大化, 对于指导联络线计划制定、增加联络线吸纳量有指导作用。

(2) 为应对实时运行安全状况, 本文建立了调整量预警模型和趋势预警模型, 能够在机组备用不足以及联络线与负荷变化趋势不一致的情况下给出预警信号。该模型有助于在最大程度消纳联络线的同时保障机组与负荷的安全稳定。

(3) 将联络线优化调度模式及预警模型进一步产品化, 应用于实际电网调度运行中, 有助于保障联络线的可靠消纳以及电网的安全稳定运行。

#### 参考文献

[1] 刘军, 蒋晓荣. 华北电网联络线优化调度分析[J]. 华北电力技术, 2003(10): 21-24.  
LIU Jun, JIANG Xiaorong. Analysis on optimization of dispatching with tie lines in North China Network[J]. North China Electric Power, 2003(10): 21-24.

[2] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.  
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.

[3] 赵红生, 刘源, 陈伟彪, 等. 互联电力系统联络线功率波动机理及其扰动概率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 1-9.  
ZHAO Hongsheng, LIU Yuan, CHEN Weibiao, et al. Fluctuation mechanism of tie-line active power of interconnected power system and its oscillation

probability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 1-9.

[4] 黎孟岩. 风电接入后电网联络线功率调控与调度对策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
LI Mengyan. Studies on the tie-line power control and scheduling strategy in wind power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.

[5] 颜伟, 吕冰, 赵霞, 等. 分布式风电源与配网联络线协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 1-6.  
YAN Wei, LÜ Bing, ZHAO Xia, et al. Coordinated allocation of DGs and tie lines in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 1-6.

[6] 钟海旺, 夏清, 丁茂生, 等. 以直流联络线运行方式优化提升新能源消纳能力的新模式[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 36-42.  
ZHONG Haiwang, XIA Qing, DING Maosheng, et al. A new mode of HVDC tie-line operation optimization for maximizing renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 36-42.

[7] 赵珊珊, 宋晓辉, 孟晓丽. 双层次能源联络线结构配电网的接纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 63-68.  
ZHAO Shanshan, SONG Xiaohui, MENG Xiaoli. Analysis on maximum allowable capacity of distributed generation for distribution network with double-layer structure of energy lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 63-68.

[8] 舒东胜, 王甜, 徐箭, 等. 湖北电网消纳蒙鄂特高压直流能力研究[J]. 电力建设, 2015, 36(3): 59-64.  
SHU Dongsheng, WANG Tian, XU Jian, et al. Accommodating power ability of UHVDC transmission lines from Mengxi to Hubei Province[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(3): 59-64.

[9] 孙涛, 许梁, 徐箭, 等. 风电经特高压线路并网时湖北电网调峰方案[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2721-2728.  
SUN Tao, XU Liang, XU Jian, et al. A peak load regulation scheme for Hubei Power Grid connected with wind farms via UHV transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2721-2728.

[10] 王艳松, 孙桂龙, 曹明志. 基于动态规划法的配电网联络线优化规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 30-36.  
WANG Yansong, SUN Guilong, CAO Mingzhi. Research on the optimization of the tie lines based on dynamic programming for distribution network[J]. Power System

- Protection and Control, 2016, 44(10): 30-36.
- [11] SAHOO N C, GANGULY S, DAS D. Multi-objective planning of electrical distribution systems incorporating sectionalizing switches and tie-lines using particle swarm optimization[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2012(3): 15-32.
- [12] AHMADI-KHATIR A, CONEJO A J, CHERKAOUI R. Multi-area energy and reserve dispatch under wind uncertainty and equipment failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4373-4383.
- [13] CHEN C L, CHEN Z Y, LEE T Y. Multi-area economic generation and reserve dispatch considering large-scale integration of wind power[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55(2): 171-178.
- [14] 许丹, 李晓磊, 丁强, 等. 基于全网统筹的联络线分层优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 122-126.  
XU Dan, LI Xiaolei, DING Qiang, et al. Optimization of tie-line hierarchical schedule based on network-wide coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 122-126.
- [15] 胡宇. 考虑三峡和特高压的湖北电网多级协调优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
HU Yu. Study on multilevel coordination optimization dispatching of Hubei grid considering Three Gorges and UHV[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [16] 关小芳, 陈磊, 袁琦. 基于风险理论的预防控制与紧急控制的协调优化[J]. 陕西电力, 2014, 42(12): 30-34.  
GUAN Xiaofang, CHEN Lei, YUAN Qi. Coordination optimization of preventive control and emergency control based on risk theory[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(12): 30-34.
- [17] 王阳光, 周子恒, 陈磊. 基于风险的联络线过载问题预防和紧急协调控制量确定方法研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(11): 8-14.  
WANG Yangguang, ZHOU Ziheng, CHEN Lei. Method to obtain quantity of preventive control and emergency control for overload problems of tie lines based on risk[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(11): 8-14.
- [18] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 华东大受端电网直流接入能力评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 147-152.  
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability evaluation for East China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 147-152.
- [19] 张彦涛, 任景, 孙骁强, 等. 基于广义联络线网省协调的两阶段实时发电计划模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 128-133.  
ZHANG Yantao, REN Jing, SUN Xiaoqiang, et al. Two-stage real-time generation scheduling model based on coordination of regional and provincial power grid generalized tie-line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 128-133.

收稿日期: 2017-08-14; 修回日期: 2017-11-08

作者简介:

陈跃辉(1965—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电网规划与安全稳定分析、电能质量管理等工作;

向萌(1988—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为在线安全分析、电力系统中长期仿真分析工作;  
E-mail: 489395452@qq.com

张斌(1965—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划以及系统稳定分析研究。E-mail: 18973102082@qq.com

(编辑 姜新丽)