

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180826

应对大功率缺失的分-省协调实时调度模型

罗治强¹, 杨军峰¹, 王其祥^{2,3}, 胡林献³

(1. 国家电力调度控制中心, 北京 100031; 2. 国网洛阳供电公司, 河南 洛阳 471000;
3. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对大功率交直流联络线故障将导致受端电网大规模功率缺失, 而省域电网内部分机组由省级电网调度, 另一部分由区域分中心调度等问题, 研究分-省两级电网调度中心实时发电计划协调调整策略。首先建立了省调机组/直调机组有功调整量分配模型和出力跟踪校验模型。针对省调机组/直调机组可能无法完全跟踪分配到的有功调整量的情况, 进一步提出了省调机组/直调机组有功协调策略及出力校正模型, 形成了一套适用于省域电网大功率缺失场景的省调机组/直调机组实时发电计划协调编制方法。仿真结果表明, 与常规实时调度方法相比, 该方法有助于快速恢复省域电网大功率缺失后的有功平衡。

关键词: 分-省协调; 实时调度; 大功率缺失; 省调机组; 直调机组

Region-province coordinated real-time dispatch model considering large-scale power loss

LUO Zhiqiang¹, YANG Junfeng¹, WANG Qixiang^{2,3}, HU Linxian³

(1. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China; 2. State Grid Luoyang Power Supply Company, Luoyang 471000, China; 3. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Failure of high-power AC/DC tie-line will lead to large-scale power loss in the receiving-end power grid, and a part of the provincial units are dispatched by the provincial power grid (P-Units), the other part is dispatched by the regional grid (R-Units). In view of the above problems, the coordinated adjustment strategy of real-time generation plan for regional and provincial dispatching units is studied. Firstly, the models for the allocation of active power adjustment and output tracking between P-Units and R-Units are constructed. For the cases that P-Units or R-Units might not be able to track the allocated active power adjustment, a coordination strategy for active power of P-Units and R-Units is proposed, followed by an output correction model. Together, a set of real-time scheduling methods coordinated P-Units and R-Units which are suitable for provincial power grid under large power loss are formed. Simulation result shows that compared with conventional real-time scheduling method, the proposed method is conducive to fast recovery of provincial grid active power balance after large-scale power loss.

This work is supported by Science & Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5442dz180019) "Research and Application of Core Technology in Global Planning Decision and Spot Market".

Key words: region-province coordination; real-time dispatch; large-scale power loss; provincial dispatching units; regional dispatching units

0 引言

特高压直流输电输送容量大、距离远^[1], 直流故障将导致受端电网产生巨大的有功缺口^[2]。在此

情形下, 如何实现调度计划的即时调整以填补功率缺额成为亟需解决的问题。

机组调度计划按时间尺度可分为日前计划^[3-4]、日内滚动计划^[5-6]、实时计划^[7-10]及自动发电控制(AGC)动态调整^[11-13], 各时间尺度间采取“逐级细化、滚动修正”的协调模式^[14]。在间歇性电源比例不断提高的电网环境下, 实时调度问题得到广泛研

基金项目: 国家电网公司科技项目(5442dz180019)“全局计划决策与现货市场核心技术研究与应用”

究。文献[7]以系统机组运行成本和排放量费用最小为目标建立了超短期优化调度模型。文献[8]以电网运行安全为首要目标构建了基于有效静态安全域的实时调度模型。文献[9]结合随机规划与鲁棒优化理论,以系统运行成本和节点风电接纳风险成本最小为目标建立了鲁棒实时调度模型。

上述文献所构建实时调度模型的一个共同特点是将所有机组出力统一优化。而实际上,一个省域电网内只有部分机组由省级调度机构管理(省调机组),另一部分则由区域分中心直接管理(直调机组)。通常处理方式是:省内有功扰动由省调机组负责平衡,直调机组则跟踪分中心制定的发电计划曲线调整出力,两套发电计划体系相互独立运行。目前,考虑省调机组/直调机组出力实时协调的文献极少,且主要针对间歇性能源预测误差及负荷预测偏差调整^[15-17]。但上述场景与大功率缺失造成的系统有功变化有明显区别:前者为经常性偏差,且偏差较小,可通过常规实时计划小幅度调整逐步消除;而大功率缺失往往由突发性故障引起,且规模巨大,因此常规实时发电计划调整方式并不完全适用。针对诸如特高压直流闭锁故障后实时调度问题的研究尚不多见。文献[18]建立的区域互济日内计划调整模型虽然可通过联络线计划和机组计划的一体化调整实现功率再平衡,但同样未考虑省调机组和直调机组的协调问题。文献[19]提出的省间紧急功率支援协调优化调度策略侧重于大功率缺失后短时间内备用容量的优化分配,对于如何实现后续省调机组和直调机组调度计划的调整未作详细说明。

本文在现有研究成果的基础上,考虑到一个省域电网内省调机组与直调机组共存的实际情况,研究适用于省域电网大功率缺失场景的实时调度模型。分别建立了省调机组和直调机组的有功调整量分配模型、有功出力跟踪校验模型、有功出力协调策略和有功出力校正模型,最后通过实例仿真对所建立模型进行了分析验证。

1 分-省协调实时调度流程

本文假设大功率缺额可通过调用省内机组的备用容量填补,且联络线计划已知,因此,如何在省调机组/直调机组之间分配功率缺额及负荷波动等系统有功调整需求是实现分-省协调调度的关键。完整的分-省协调实时调度包括以下四个主要步骤。

(1) 获取大功率缺额、超短期负荷预测等数据,计算全省总有功调整量 $\Delta P_{adj,t}$,并将其分配至省调机组($\Delta P_{m,t}$)和直调机组($\Delta P_{n,t}$)。

(2) 省调机组/直调机组各自跟踪 $\Delta P_{m,t}$ 、 $\Delta P_{n,t}$ 调整出力。计算省调机组/直调机组出力调整量与分配调整量的差值,分别记为 $\Delta L_{m,t}$ 、 $\Delta L_{n,t}$ (差值为0即代表完全跟踪);记录机组出力调整结果。

(3) 基于 $\Delta L_{m,t}$ 、 $\Delta L_{n,t}$ 及机组出力调整结果,进行省调机组/直调机组出力协调,求得协调后的省调机组/直调机组有功功率。

(4) 省调机组/直调机组在第(2)步机组出力调整结果的基础上,跟踪各自协调后的有功功率进行出力校正,得到最终实时调度结果。

分-省协调实时调度流程如图1所示。

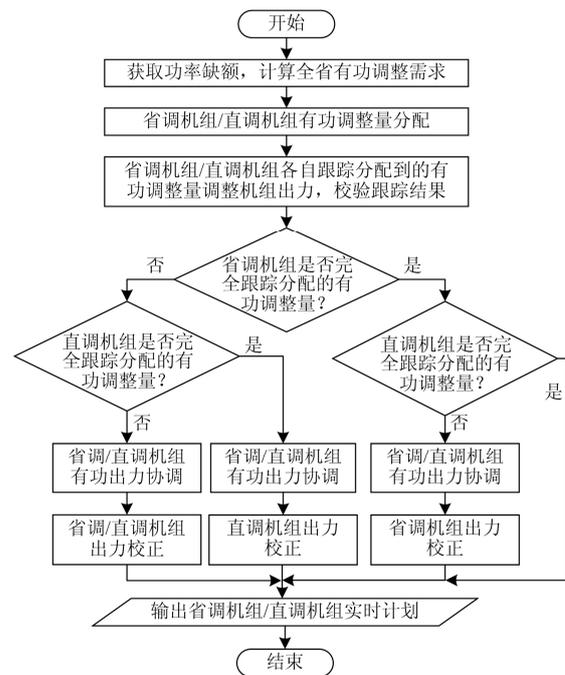


图1 分-省协调实时调度流程图

Fig. 1 Flow chart of region-province coordinated real-time dispatch

2 分-省协调实时调度模型

2.1 省调机组/直调机组有功调整量分配

由于本文模型针对省域电网内省调机组和直调机组出力进行优化,且假设联络线计划已知,因此,省调机组和直调机组应承担的总有功调整量为

$$\Delta P_{adj,t} = \Delta P_s + (L_t - L_0) - (P_{a,t} - P_{a,0}) - (P_{z,t} - P_{z,0}) \quad (1)$$

式中: ΔP_s 为功率缺额; L_t 为 t 时段超短期负荷预测; L_0 为大功率缺失前系统负荷; $P_{a,0}$ 、 $P_{z,0}$ 分别为大功率缺失前一时刻区域间和区域内联络线馈入该省电网的功率; $P_{a,t}$ 、 $P_{z,t}$ 分别为该省 t 时段区域间和区域内联络线日前计划功率。

省调机组与直调机组间按装机容量比例分配总

有功调整量。

$$\begin{cases} \Delta P_{m,t} = \Delta P_{adj,t} \times \frac{P_{m,max}}{P_{m,max} + P_{n,max}} \\ \Delta P_{n,t} = \Delta P_{adj,t} \times \frac{P_{n,max}}{P_{m,max} + P_{n,max}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\Delta P_{m,t}$ 、 $\Delta P_{n,t}$ 分别为 t 时段分配给省调机组、直调机组的有功调整量； $P_{m,max}$ 、 $P_{n,max}$ 分别为省域电网内省调机组和直调机组装机容量。

省调机组/直调机组各自应满足的有功平衡为

$$\begin{cases} \sum_{i \in M} P_{i,t} = P_{m,0} + \Delta P_{m,t} = P'_{m,t} \\ \sum_{i \in N} P_{i,t} = P_{n,0} + \Delta P_{n,t} = P'_{n,t} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_{i,t}$ 为 t 时段机组 i 出力； $P_{m,0}$ 、 $P_{n,0}$ 为功率缺失前省调机组、直调机组出力； M 为省调机组集合； N 为省域电网内直调机组集合； $P'_{m,t}$ 、 $P'_{n,t}$ 分别为 t 时段省调机组分配出力、直调机组分配出力。

2.2 省调机组/直调机组出力跟踪校验

考虑到省调机组/直调机组受爬坡、出力极限约束，可能无法跟踪分配到的有功调整量而导致有功平衡方程(3)无法满足、优化不收敛，引入机组出力松弛功率，将有功平衡方程(3)修正为

$$\begin{cases} \sum_{i \in M} P_{i,t} + \Delta L_{m,t} = P'_{m,t} \\ \sum_{i \in N} P_{i,t} + \Delta L_{n,t} = P'_{n,t} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\Delta L_{m,t}$ 、 $\Delta L_{n,t}$ 分别为 t 时段省调机组、直调机组出力松弛功率，其物理意义为省调机组/直调机组出力调整量与分配到的有功调整量的差值。

省调机组/直调机组各自优化目标为

$$\begin{cases} \min F_{m,t}^1 = \sum_{i \in M} (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + \alpha_m |\Delta L_{m,t}| \\ \min F_{n,t}^1 = \sum_{i \in N} (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + \alpha_n |\Delta L_{n,t}| \end{cases} \quad (5)$$

式中： a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的发电成本系数； α_m 、 α_n 为单位松弛惩罚成本(本文取为100)。

$\Delta L_{m,t}$ 、 $\Delta L_{n,t}$ 可在优化中由式(4)求得，目标函数中只有机组出力为优化变量。

2.3 省调机组/直调机组出力协调

当省调机组或直调机组无法完全跟踪分配到的有功调整量时，应进行省调机组/直调机组有功出力协调，共同平衡电网负荷。分省平衡模式下，省内机组出力松弛应优先由省域电网内省调机组与直调机组相互协调解决，省调机组/直调机组出力协调模型如下所述。

(1) $\Delta L_{m,t} = 0$ & $\Delta L_{n,t} = 0$ 或 $\Delta L_{m,t} \Delta L_{n,t} > 0$ 时，表

明省调机组与直调机组均能跟踪分配的有功调整量调整出力，或均达到出力极限而无调节空间，这两种情况下不再进行出力协调、校正。

(2) $\Delta L_{m,t} \neq 0$ & $\Delta L_{n,t} = 0$ 时，表明省调机组无法完全跟踪分配到的有功调整量。此时可由直调机组协助省调机组承担一部分功率，省调机组不再进行后续出力校正环节。

$$\begin{cases} P''_{n,t} = P'_{n,t} + \Delta L_{m,t} \\ P_{n,t,min} \leq P''_{n,t} \leq P_{n,t,max} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{n,t,max} = \sum_{i \in N} \min(P_{i,max}, P_{i,t-1} + r_{u,i} \tau) \quad (7)$$

$$P_{n,t,min} = \sum_{i \in N} \max(P_{i,min}, P_{i,t-1} - r_{d,i} \tau) \quad (8)$$

式中： $P''_{n,t}$ 为协调后直调机组应平衡的有功功率； $P_{n,t,max}$ 、 $P_{n,t,min}$ 分别为 t 时段省域电网内直调机组的出力上、下限之和； $P_{i,max}$ 、 $P_{i,min}$ 为机组 i 出力上、下限； $r_{u,i}$ 为机组 i 出力上调速率； $r_{d,i}$ 为机组 i 出力下调速率； τ 为实时调度单时段时长。

(3) $\Delta L_{m,t} = 0$ & $\Delta L_{n,t} \neq 0$ 时，表明直调机组无法完全跟踪分配到的有功调整量。此时可由省调机组协助直调机组承担一部分功率，直调机组不再进行后续出力校正环节。

$$\begin{cases} P''_{m,t} = P'_{m,t} + \Delta L_{n,t} \\ P_{m,t,min} \leq P''_{m,t} \leq P_{m,t,max} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $P''_{m,t}$ 为协调后省调机组应平衡的有功功率； $P_{m,t,max}$ 、 $P_{m,t,min}$ 分别为 t 时段省域电网内所有省调机组的出力上、下限，其计算方法参考直调机组。

(4) $\Delta L_{m,t} \Delta L_{n,t} < 0$ 时，表明省调机组、直调机组均无法完全跟踪分配到的有功调整量，但是两者松弛方向相反。从有功平衡的角度，两者松弛功率可以相互抵消一部分。只需将剩余无法抵消的部分分配至有备用容量的机组即可。

$\Delta L_{m,t} > 0$ & $\Delta L_{n,t} < 0$ 时，

$$\begin{cases} P''_{m,t} = P'_{m,t} - \Delta L_{m,t} + \min(0, \Delta L_{m,t} + \Delta L_{n,t}) \\ P''_{n,t} = P'_{n,t} - \Delta L_{n,t} + \max(0, \Delta L_{m,t} + \Delta L_{n,t}) \end{cases} \quad (10)$$

$\Delta L_{m,t} < 0$ & $\Delta L_{n,t} > 0$ 时，

$$\begin{cases} P''_{m,t} = P'_{m,t} - \Delta L_{m,t} + \max(0, \Delta L_{m,t} + \Delta L_{n,t}) \\ P''_{n,t} = P'_{n,t} - \Delta L_{n,t} + \min(0, \Delta L_{m,t} + \Delta L_{n,t}) \end{cases} \quad (11)$$

同时，省调机组/直调机组均应满足出力约束：

$$P_{m,t,min} \leq P''_{m,t} \leq P_{m,t,max} \quad (12)$$

$$P_{n,t,min} \leq P''_{n,t} \leq P_{n,t,max} \quad (13)$$

2.4 省调机组/直调机组有功出力校正

省调机组/直调机组有功出力协调完成后，省调

机组/直调机组应根据协调结果校正各自出力。以机组发电调整成本最小为优化目标进行出力校正, 省调机组与直调机组优化目标分别为

$$\begin{cases} \min F_{m,t}'' = \sum_{i \in M} (a_i \Delta P_{i,t}^2 + (2a_i P_{i,t} + b_i) \Delta P_{i,t}) \\ \min F_{n,t}'' = \sum_{i \in N} (a_i \Delta P_{i,t}^2 + (2a_i P_{i,t} + b_i) \Delta P_{i,t}) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\Delta P_{i,t}$ 为机组 i 出力校正量。校正后机组 i 出力为

$$P_{i,t}^c = P_{i,t} + \Delta P_{i,t} \quad (15)$$

省调机组和直调机组有功平衡约束分别为

$$\sum_{i \in M} P_{i,t}^c = P_{m,t}'' \quad (16)$$

$$\sum_{i \in N} P_{i,t}^c = P_{n,t}'' \quad (17)$$

以上模型中, 2.1 和 2.3 节为纯数学计算; 2.2 与 2.4 节优化模型为混合约束非线性最小值问题, 由于决策变量较多, 为保证解的全局最优性, 本文采用文献[20]提出的改进粒子群算法求解。

3 算例分析

以国内某省域电网的实际数据构造算例系统对所建立模型进行验证和分析。系统共有 75 台机组, 包括省调机组 44 台, 分中心直调机组 31 台, 省调机组与直调机组装机容量比例为 0.541 7 : 0.458 3。假设 t_0 时刻, 该省一回特高压直流输电线路发生单极闭锁故障, 造成功率缺失 3 786 MW。故障前省调机组、直调机组、区域内联络线及直流等各种成分电源的供电功率如表 1 所示。

表 1 故障前各种成分电源供电功率

电源成分	省调机组	直调机组	直流	联络线
功率/MW	11 182.32	10 656.31	7 572	4 318.3

取 5 min 为一个调度时段, 按以下 3 种方式对功率缺失后 1 h 内的机组出力进行优化调整:

- (1) 常规实时调度方式, 即直调机组跟踪日前计划调整出力, 只调整省调机组出力填补功率缺额;
- (2) 省调机组/直调机组按装机容量比例分担有功调整量并进行出力调整, 即按 2.2 模型调整机组出力;
- (3) 在(2)的基础上进行省调机组/直调机组出力协调和校正, 即按 2.4 模型校正机组出力。

各调度时段超短期负荷预测、直调机组和区域内联络线日前计划如表 2 所示。

3 种方式下的省调机组、直调机组出力调整结果如图 2 所示。为便于直观分析省调机组/直调机组

对分配的有功功率的跟踪情况, 省调机组/直调机组分配的有功功率见图 2。

表 2 超短期负荷预测及直调机组、联络线日前计划

时段	超短期	联络线	直调机组
	负荷预测/MW	日前计划/MW	日前计划/MW
1(t_0)	33 730.65	4 320	10 656.31
2	33 831.84	4 320	10 702.69
3	33 629.46	4 320	10 609.93
4	32 381.42	4 000	10 184.62
5	30 694.89	4 000	9 411.678
6	30 357.59	4 000	9 257.091
7	30 694.89	4 450	9 205.442
8	32 718.73	4 450	10 132.97
9	34 911.22	4 450	11 137.79
10	36 091.8	4 910	11 468.03
11	36 597.76	4 910	11 699.91
12	36 766.41	4 910	11 777.2

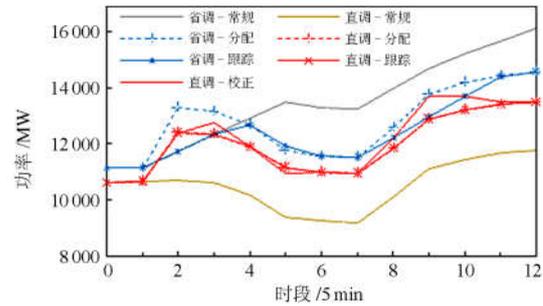


图 2 机组出力调整曲线

Fig. 2 Unit power output adjustment curves

从图 2 可以看出, 常规实时调度方式下, 直调机组出力完全跟踪日前计划, 而省调机组在故障后 20 min 内出力持续增加。省调机组与直调机组按比例分担功率缺额时, 省调机组调节压力减小, 出力比常规方式降低; 反之, 直调机组出力上调。但省调机组受爬坡速率约束, 在故障后 15 min 内无法跟踪分配到的有功功率, 出力与常规方式相近。故障发生 15 min 后负荷快速变化的时段, 由于备用容量和爬坡速率约束, 省调机组出力也无法完全跟踪分配的有功功率。而直调机组在各个调度时段基本都能跟踪分配的有功功率。

图 2 未给出省调机组出力校正曲线的原因: 省调机组出力受爬坡约束, 无法完全跟踪分配到的有功调整量, 无可调节空间, 因而不进行出力校正。其出力松弛量由直调机组协调承担, 因而存在直调机组的出力校正曲线。故障后第 2 个 5 min 计划内, 直调机组出力比跟踪结果上调, 协助省调机组承担了一部分功率; 故障发生 15 min 后的各时段, 直调

机组出力校正量与省调机组出力松弛量相等。

3种方式下的全省总供电功率及供电功率与负荷预测的偏差如表3所示。

表3 各种方式全省总供电功率及有功偏差

Table 3 Power supply and imbalance of different modes

时段	供电功率/MW			有功偏差/MW		
	方式(1)	方式(2)	方式(3)	方式(1)	方式(2)	方式(3)
1(t_0)	33 731	33 731	33 731	0	0	0
1+	29 945	29 945	29 945	-3 786	-3 786	-3 786
2	30 550	32 228	32 228	-3 282	-1 604	-1 604
3	31 084	33 219	32 819	-2 546	-810	-410
4	30 918	32 381	32 381	-1 463	0	0
5	30 686	30 695	30 878	-9	183	0
6	30 358	30 358	30 358	0	0	0
7	30 695	30 695	30 695	0	0	0
8	32 349	32 719	32 353	-370	-366	0
9	34 079	34 911	34 086	-832	-825	0
10	35 374	36 092	35 605	-718	-486	0
11	36 092	36 598	36 522	-506	-76	0
12	36 590	36 766	36 766	-176	0	0

从表3可以看出,采用常规实时调度方式(方式(1))时,只通过省调机组出力调整,需25 min才能完成系统有功平衡恢复。省调机组/直调机组出力协调调整时,有功平衡恢复可在故障后15 min内完成。方式(1)和方式(2)条件下,系统有功在第7个调度时段以后再次出现不平衡现象,其原因在于:省调机组受备用容量约束,在系统有功平衡恢复完成后,机组出力可调节空间减小,负荷快速变化时无法满足有功实时平衡需求。方式(3)仿真条件下,直调机组参与出力协调,各时段均可满足系统有功实时平衡需求。

4 结语

针对省域电网内机组分别由省级调度中心、区域分中心调度以及常规实时调度方法未考虑省调机组与直调机组之间协调,无法适用于大功率缺失场景的问题,建立了省调机组和直调机组的有功调整量分配模型、有功出力跟踪校验模型、有功出力协调策略和有功出力校正模型。某省电网的实例仿真结果表明:省调机组与直调机组出力协调调整有助于电网有功平衡的快速恢复,满足大功率缺失后的实时调度需求。

参考文献

[1] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection

method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.

- [2] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522. LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [3] 刘克俭, 王铁强, 时珉, 等. 大规模直购电下基于让渡价格的日前发电计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 28-33. LIU Kejian, WANG Tieqiang, SHI Min, et al. Research of day-ahead generation plan based on assignment price under consumers' direct-purchasing electricity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 28-33.
- [4] 张新松, 礼晓飞, 王运, 等. 不确定性环境下考虑弃风的电力系统日前调度[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 75-82. ZHANG Xinsong, LI Xiaofei, WANG Yun, et al. Day-ahead dispatching in consideration of wind power curtailments in uncertain environments[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 75-82.
- [5] 邓佳乐, 胡林献, 邵世圻, 等. 电热联合系统多时间尺度滚动调度策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3796-3803. DENG Jiale, HU Linxian, SHAO Shiqi, et al. Multi-time scale rolling scheduling method for combined heat and power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3796-3803.
- [6] 宋卓然, 赵琳, 张子信, 等. 热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 110-116. SONG Zhuoran, ZHAO Lin, ZHANG Zixin, et al. Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 110-116.
- [7] 杨冬锋, 周苏荃, 魏剑啸, 等. 基于MPC的超短期优化调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 21-26. YANG Dongfeng, ZHOU Suquan, WEI Jianxiao, et al. Ultra-short term optimal dispatch method based on MPC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 21-26.
- [8] 杨明, 程凤璐, 韩学山. 电力系统实时调度的有效静态安全域法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1353-1362. YANG Ming, CHENG Fenglu, HAN Xueshan. Real-time dispatch based on effective steady-state security regions

- of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1353-1362.
- [9] 于丹文, 杨明, 韩学山, 等. 计及风电概率分布特征的鲁棒实时调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 727-738.
YU Danwen, YANG Ming, HAN Xueshan, et al. Robust real-time dispatch considering probabilistic distribution of wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 727-738.
- [10] 郭永明, 李仲昌, 尤小虎, 等. 计及备用容量优化配置的风火联合随机经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 31-36.
GUO Yongming, LI Zhongchang, YOU Xiaohu, et al. Stochastic economic dispatch model for joint delivery of wind power and thermal power generation system considering optimal scheduling of reserve capacity[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 31-36.
- [11] 颜伟, 王聪, 毛艳丽, 等. 基于 OPF 的互联电网 AGC 优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 35-40.
YAN Wei, WANG Cong, MAO Yanli, et al. AGC optimal model based on OPF technology for interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 35-40.
- [12] 李金龙, 袁贵川, 周剑, 等. 基于特高压功率与电网频率偏差的省级电网 AGC 复合闭锁策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 108-114.
LI Jinlong, YUAN Guichuan, ZHOU Jian, et al. Composite locking strategy of provincial power grid AGC system based on UHV power deviation and frequency offset[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 108-114.
- [13] 谭涛, 姜杰, 何潜, 等. 省级电网 AGC 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 63-66.
TAN Tao, JIANG Jie, HE Qian, et al. Research on provincial power grid AGC control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 63-66.
- [14] 郭晓蕊, 王珂, 杨胜春, 等. 计及风电时空互补特性的互联电网有功调度与控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 139-144.
GUO Xiaorui, WANG Ke, YANG Shengchun, et al. Active power scheduling and control scheme for interconnected power grids considering time-space complementary characteristics of wind energy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 139-144.
- [15] 许丹, 蔡帜, 李晓磊, 等. 基于约束调整的多级计划协调模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 147-150.
XU Dan, CAI Zhi, LI Xiaolei, et al. Multi-level coordination plan model based on constrained adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 147-150.
- [16] 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, 151.
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 System, 2015, 39(6): 128-133, 151.
- [17] 丁恰, 孙骁强, 张彦涛, 等. 网省紧耦合电网实时发电计划优化模型及应用[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 83-88, 95.
DING Qia, SUN Xiaoqiang, ZHANG Yantao, et al. Real-time generation scheduling optimization model and its application in tightly coupled regional and provincial power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 83-88, 95.
- [18] 许丹, 葛睿, 蔡帜, 等. 应对大规模功率缺失的区域电网日内发电计划优化调整方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 68-73.
XU Dan, GE Rui, CAI Zhi, et al. Optimization and adjustment method for intraday generation scheduling of regional power grid considering large-scale power loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 68-73.
- [19] 王莹, 刘兵, 刘天斌, 等. 特高压直流闭锁后省间紧急功率支援的协调优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2695-2702.
WANG Ying, LIU Bing, LIU Tianbin, et al. Coordinated optimal dispatching of emergency power support among provinces after UHVDC transmission system block fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2695-2702.
- [20] 邵世圻, 戴赛, 胡林献, 等. 计及热网特性的电热联合系统调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 24-30.
SHAO Shiqi, DAI Sai, HU Linxian, et al. Research on heat-electricity combined scheduling method considering the characteristics of the heating network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 24-30.

收稿日期: 2018-07-07; 修回日期: 2018-10-01

作者简介:

罗治强(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为大电网安全经济运行;

杨军峰(1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网经济运行、电力市场、智能电网;

王其祥(1994—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: wang_qx1204@163.com

(编辑 姜新丽)