

DOI: 10.7667/PSPC161158

计及线路保护反时限特性的备用优化模型

李竹, 雷霞, 刘灵恺, 白佩琳, 李骊, 雷海

(流体及动力机械教育部重点实验室(西华大学), 四川 成都 610039)

摘要: 针对故障状态下传统备用配置比例较高而导致经济性差的特点, 计及线路保护的反时限特性, 建立了故障状态下电力系统备用协调经济调度模型。该模型以最小化发电成本和备用成本为目标函数, 常规机组性能、网络安全等为约束条件, 并结合线路保护的反时限特性将线路潮流约束按备用响应时间松弛转化为对应时间尺度可承受的热稳定极限值, 从而综合求解不同响应速度备用的协调优化经济调度问题, 提高备用配置的经济性。该模型是一个混合整数线性规划问题, 需要将模型中的非线性式进行线性化或近线性化, 并调用商用混合整数线性规划 CPLEX 求解器进行求解。最后, 通过 IEEE 6 机 30 节点进行算例仿真, 验证了该模型的合理性和方法的有效性。
关键词: 事故状态; 备用配置; 反时限特性; 经济调度; 混合整数线性规划

Optimal reserve dispatch model considering inverse-time line protection

LI Zhu, LEI Xia, LIU Lingkai, BAI Peilin, LI Li, LEI Hai

(Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education (Xihua University), Chengdu 610039, China)

Abstract: Due to poor economy caused by higher traditional reserve configuration, an economic dispatch model of reserve coordination at contingency state considering inverse-time characteristic of line protection is presented. The model aims to minimize the cost of generation and reserve under satisfying constraints of general unit and network security and combing with the inverse-time characteristic of line protection, relaxing general power flow constraints to thermal stability limit value of corresponding time scale according to reserve response time, then synthetically solve coordinated optimal reserve dispatch of different response speed to improve the economy of reserve configuration. The model is a mixed-integer linear programming problem, it needs to be linearized or nearly linearized in the model, and the commercial mixed-integer linear programming CPLEX solver is used to solve the problem. Finally, numerical experiences prove the rationality of the presented model and the effectiveness of the proposed approach in IEEE 30 systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677020), Sichuan Province Key Laboratory of Power Electronic Energy-Saving Technologies & Equipment (No. szjj2014-015), and Graduate Student Innovation Fund of Xihua University (No. ycjj2016159).

Key words: contingency state; reserve configuration; inverse-time characteristic; economic dispatch; mixed-integer linear programming

0 引言

由于电力系统设备的随机故障和负荷的随机波动, 系统运行人员在制定日前调度计划时必须考虑预留一定的备用容量来保证电力系统的安全可靠运

行。因此, 研究合理的备用容量及分配具有重要的经济价值。

电力系统故障状态下, 操作人员对备用容量进行调度以保证系统安全运行的同时, 需要考虑备用配置及调度的经济性。备用不足会导致系统功率缺额, 进而影响系统的安全; 备用过剩又会造成资源的浪费, 降低电力系统的经济性。目前, 常见备用设置有确定性方法、概率性方法、基于成本效益分析的方法和随机优化方法。确定性方法是将电力系

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677020); 四川省电力电子节能技术与装备重点实验室开放基金(szjj2014-015); 西华大学研究生创新基金(ycjj2016159)

统备用容量设置为在线运行机组的最大容量或者一定比例的最大负荷量^[1]。概率性方法是以概率分析为基础的备用配置方法,即在考虑系统可靠性水平的基础上配置备用,以系统的可靠性约束代替必须满足的备用约束^[2-3]。基于成本效益分析的方法是通过对比备用效益和成本的经济价值分析,寻找成本和效益之间最佳的平衡点,更符合市场环境下的备用决策理念^[4-5]。随机优化方法就是在综合考虑各种随机因素对系统未来运行状态影响的基础上,以系统未来运行状态的发生概率为权重,应用随机优化方法进行备用决策^[6-7]。文献[6-7]以发电机组和输电线路的故障为预想场景集,以期望成本最小为目标函数,在各故障场景下综合考虑风险成本来配置备用容量,但文中并未考虑机组故障后启停状态的调整,而且对线路潮流也进行了严格的约束。文献[8-9]提出了多重故障场景下,对预想场景进行故障筛选和故障排序的有效方法。文献[10]将停电损失加入到机组组合的目标中,从侧面确定了最优的备用容量,但文中给出蒙特卡洛法抽样需要大量的抽样,从而大大增加了计算的规模。文献[11]在备用协调调度中考虑了校核线路和校核场景,并提出了校核线路和校核场景的缩减方法,提高了求解的速率,而文中由于系统引入风电而造成的不确定性,所以对线路采用了严格的安全约束,从而增大了备用成本。文献[12-14]运用传统的智能算法或机会约束规划法求解机组组合和备用优化问题,虽然能求解出优化结果,但此类算法在面对大规模机组时,求解效率较低,不适合求解复杂的系统问题。而文献[15-17]运用混合整数线性规划求解机组组合和备用优化问题,在针对大规模机组时,能够大大提高求解速度。

目前对于备用的调度及机组组合问题多是在备用容量固定的情况下进行优化,这种传统的方式鲜有考虑不确定问题的本身特性及对系统造成的影响,导致备用配置较为保守,从而降低了经济性。针对以上问题,本文提出了预想场景下考虑线路保护反时限特性的备用优化模型,该模型不仅考虑了系统故障的不确定性,而且在预想场景下结合线路保护的长反时限特性和备用响应的速度,松弛了线路的安全约束,在保证系统安全性的同时提高了系统备用配置的经济性。

文章结合备用响应速度对线路反时限过电流保护特性进行改进,并得出对应时刻线路热稳定极限程度;建立了预想场景下考虑线路保护反时限特性的备用优化模型;将该模型在 IEEE 6 机 30 节点系统中进行算例分析,验证了模型的合理性和方法的有效性。

1 线路反时限过电流保护特性

所谓的线路反时限特性是指保护动作时间随短路电流的增大而减小,其本质与线路的热稳定性直接相关,根据其含义可知,反时限特性更适合描述系统中的故障特性^[18-19]。反时限过电流保护的通用公式一般有两种,包括国际电工委员会 IEC 标准和 IEEE/ANSI 标准^[20-21],本文主要采用国际电工委员会标准 IEC255-3 中的长反时限特性,其通用公式为

$$t_p = \frac{120T_d}{I_f / I_d - 1} \quad (1)$$

式中: t_p 为保护装置动作时间; T_d 为时间整定值(或时间系数); I_f 为保护装置测得的故障电流; I_d 为电流整定值; 将长反时限特性曲线式结合本文改进为

$$t_p = \frac{120T_d}{I_{l,\tau,m} / I_d - 1} \quad (2)$$

式中: $I_{l,\tau,m}$ 为预想场景 m 发生后的 τ 时刻线路 l 上的故障电流; I_d 为线路的常规限值。将长反时限特性曲线式改进为

$$t_p = \frac{120T_d}{X - 1} \quad (3)$$

式中, X 表示线路越限程度, $X \leq 1$, 表示线路不越限。所以,线路热稳定约束式可以变换为

$$X_{l,\tau,m} \leq \bar{X}_{l,\tau} \quad (4)$$

式中, $X_{l,\tau,m}$ 、 $\bar{X}_{l,\tau}$ 分别为预想场景 m 发生后 τ 时刻线路 l 的越限程度及其对应时刻的热稳定极限程度。改进后的长反时限特性曲线如图 1 所示。

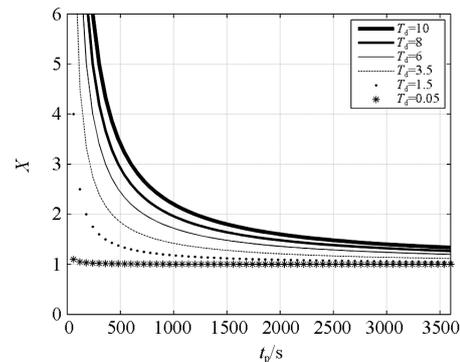


图 1 长反时限特性曲线

Fig. 1 Long inverse-time characteristic curve

2 预想场景下考虑线路保护反时限特性的备用协调经济调度模型

2.1 预想场景的分类

本文的预想场景集主要由不同类型的单一预想场景构成,表示电力系统运行过程中所面临的预想

场景。一个预想场景集包含 2 个子集, 分别为故障机组子集和故障线路子集。

$$\begin{cases} \Omega_{t,m} = \{N_{t,m}, L_{t,m}\}, m = 0, 1, 2, \dots, M \\ M = N + L \end{cases} \quad (5)$$

式中: $N_{t,m}$ 、 $L_{t,m}$ 分别为 t 时段预想场景 m 的故障机组子集和故障线路子集(只考虑单一故障), $m=0$, 表示无故障; M 为故障总集; N 为机组总数; L 为线路总数。

2.2 目标函数

本文提出计及线路保护反时限特性的备用协调调度模型来解决预想场景下的机组发电和备用调度问题。考虑发电和不同响应速度的备用调度优化目标为系统的总成本最小, 包含系统在预想场景下的发电成本和备用成本。目标函数表示为

$$\min F = [f(P_{i,t}) + g(r_{i,t,v})] \quad (6)$$

$$f(P_{i,t}) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [(a \cdot P_{i,t}^2 + b \cdot P_{i,t} + c) + ST_{i,t}] \cdot u_{i,t} \quad (7)$$

$$g(r_{i,t,v}) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^V c_{i,t,v}(r_{i,t,v}) \cdot r_{i,t,v} \quad (8)$$

$$ST_{i,t} = [K_i + B_i(1 - e^{-t_{\text{off},i,t-1}/\tau_i})]u_{i,t}(1 - u_{i,t-1}) \quad (9)$$

式中: $f(P_{i,t})$ 为发电成本; $g(r_{i,t,v})$ 为备用成本; a 、 b 、 c 为发电成本费用系数; $ST_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的启机费用; $u_{i,t}$ 表示机组 i 在 t 时段的状态, $u_{i,t}=1$ 表示开机, $u_{i,t}=0$ 表示停机; $c_{i,t,v}(r_{i,t,v})$ 为 v 类备用容量的价格函数; $r_{i,t,v}$ 为机组 i 在时段 t 提供的 v 类备用容量; N 、 T 、 V 分别为机组数、时段数、备用种类, v 越小, 备用响应速度越快, 其中 $v=1$ 为瞬时备用, 其响应速度为秒级, $v=2$ 为 10 min 旋转备用, 其响应时间为 5~10 min, $v=3$ 为 30 min 备用, 其响应时间为 10~30 min, $v=4$ 为 60 min 备用, 其响应时间为 30~60 min; K_i 、 B_i 分别为启机费用中的固定成本和冷启动成本; τ_i 为机组的热时间常数。机组的关机成本较小, 本文不予考虑。

2.3 约束条件

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N A_{k,i} P_{i,t,m} = \sum_{l=1}^L E_{k,l} P_{l,t,m} + P_{d,k,t,m} \quad (10)$$

式中: $P_{i,t,m}$ 、 $P_{l,t,m}$ 、 $P_{d,k,t,m}$ 分别为 t 时段故障场景 m 下的 i 机组出力、线路有功潮流、 k 节点有功负荷; $A_{k,i}$ 、 $E_{k,l}$ 分别为节点机组关联矩阵和节点支路关联矩阵元素。

2) 机组输出功率约束

$$\begin{cases} \gamma_{i,t,m} \cdot P_{i,\min} \cdot u_{i,t} \leq P_{i,t,m} \leq \gamma_{i,t,m} \cdot P_{i,\max} \cdot u_{i,t} \\ \gamma_{i,t,m} = 0, i \in N_{t,m} \\ \gamma_{i,t,m} = 1, i \notin N_{t,m} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\gamma_{i,t,m}$ 为 t 时刻预想场景 m 下机组 i 的故障状态。

3) 机组爬坡速率约束

$$P_{i,t} - s_{i,d} \cdot \Delta t \leq P_{i,t+1} \leq P_{i,t} + s_{i,u} \cdot \Delta t \quad (12)$$

式中, $s_{i,u}$ 、 $s_{i,d}$ 分别为机组 i 的上、下爬坡速率, MW/min。

4) 系统备用约束(备用不分类)

$$\sum_{i=1}^N \sum_{v=1}^V r_{i,t,v,m} \geq R_t \quad (13)$$

式中, R_t 为系统总备用需求。

5) 线路有功潮流约束(备用不分类)

$$P_{l,t} \leq |P_{l,\max}| \quad (14)$$

式中, $P_{l,\max}$ 为线路 l 的潮流最大值。

6) 机组备用容量约束(备用分类)

$$\begin{cases} r_{i,t,u,v,m} \leq T_v \cdot s_{i,u} \\ r_{i,t,d,v,m} \leq T_v \cdot s_{i,d} \end{cases}, v = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

式中, T_v 为不同响应类型备用对应的时间, $T_1=3$ min, $T_2=10$ min, $T_3=30$ min, $T_4=60$ min。

7) 最小开停机时间约束

$$u_{i,t} = \begin{cases} 1, & 1 \leq t_{\text{on},i,t-1} \leq T_{\text{on},i} \\ 0, & 1 \leq t_{\text{off},i,t-1} \leq T_{\text{off},i} \\ 0 \text{ or } 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$i = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, T$

式中: $t_{\text{on},i,t}$ 、 $t_{\text{off},i,t}$ 分别为机组 i 在第 t 时段之前(不包括第 t 时段)的连续运行和连续停运的时间; $T_{\text{on},i}$ 、 $T_{\text{off},i}$ 分别为机组 i 的允许最小连续运行和停运持续时间。

8) 线路热稳定约束(备用分类)

$$I_{l,\tau,m} \leq \bar{I}_{l,\tau};$$

$$(l=1, 2, \dots, L; \tau=3 \text{ min}, 10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 60 \text{ min}) \quad (17)$$

式中, $I_{l,\tau,m}$ 、 $\bar{I}_{l,\tau}$ 分别为预想场景 m 发生后的 τ 时刻流过线路 l 的电流和线路的热稳定极限值。预想场景发生后线路上的电流是一个与时间有关的函数(如图 2)。上限值根据线路反时限过电流保护特性曲线求解得出, 具体分析见第 1 节。

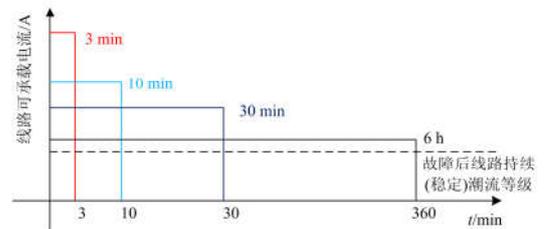


图 2 故障后线路可承载电流随时间变化的关系
Fig. 2 Relationship between lines' current limit value changing over time

此时,式(4)—式(17)中除去式(13)、式(14)就构成了预想场景下考虑线路反时限特性过流保护的备用优化模型。此模型中待优化的变量为: $u_{i,t}$ 、 $P_{l,t,m}$ 、 $P_{i,t,m}$ 、 $r_{i,t,v,m}$ 、 $X_{l,\tau,m}$ (即 $I_{l,t,m}$)。而对于本文所建模型为混合整数非线性规划问题,一般的智能算法难以求解,尤其是当系统元件较多时,一般的智能算法不仅求解时间很长,而且难以求得最优解。为了能够简便、快速、准确地求解,本文参考文献[22]方法对非线性化模型进行线性化或近线性化,并调用商用混合整数线性规划 CPLEX^[23]求解器进行求解。

3 算例研究

本文算例仿真采用 IEEE 6 机 30 节点测试系统对备用进行优化。选择 $T_d=6$, 根据 $t_p=120T_d/(X-1)$ 得出 4 个线路可承受越限极值程度的值, 即:

$t_p=180$ s 对应于 $\bar{X}_\tau = 5$; $t_p=600$ s 对应于 $\bar{X}_\tau = 2.2$;
 $t_p=1800$ s 对应于 $\bar{X}_\tau = 1.4$; $t_p=3600$ s 对应于 $\bar{X}_\tau = 1.2$;

- ① 当 $X_{l,\tau,m} \geq 5$ 时, 启用 3 min 备用进行调整;
- ② 当 $2.2 \leq X_{l,\tau,m} \leq 5$ 时, 启用 10 min 备用进行调整;
- ③ 当 $1.4 \leq X_{l,\tau,m} \leq 2.2$ 时, 启用 30 min 备用进行调整;
- ④ 当 $1.2 \leq X_{l,\tau,m} \leq 1.4$ 时, 启用 60 min 备用进行调整。

根据 IEEE30 节点标准数据及文献[24]中线路限值标幺值数据, 综合得线路的热稳定限值(70℃下长期允许载流量)为 702 A, 本文取 $I_d=700$ A, 为了简便, 此处取所有线路的限值均为 700 A, 则预想场景发生后的 τ 时刻线路 l 的电流上限值 $\bar{I}_{l,\tau} = 3.50$ kA、1.54 kA、980 A、840 A。($\tau=3$ min、10 min、30 min、60 min)。发电机参数和负荷参数参见附录, 每个节点的负荷按照 IEEE30 节点标准数据占总负荷的百分比进行分配。备用不分类的情况统一采用 10 min 备用进行调整。本文只考虑单重故障并只对负荷最大的第 20 时段安排备用容量。本文给定以下 5 种情况 3 种场景, 分别对其进行仿真分析:

- 1) 备用不分类。备用需求量定为最大预测负荷的 8%, 即 18.14 MW。
- 2) 备用不分类。2 号机组故障。
- 3) 备用不分类。支路 3—4 故障。
- 4) 备用分类并考虑线路过流保护反时限特性的情况, 2 号机组故障。
- 5) 备用分类并考虑线路过流保护反时限特性的情况, 支路 3—4 故障。

表 1 和表 2 分别给出了上述 5 种情况下的备用优化结果和总成本(包含发电成本和备用成本); 图 3 给出了情况 2 与情况 4 的费用对比; 图 4 给出了情况 3 和情况 5 的费用对比。

表 1 5 种场景的备用优化结果

Table 1 Reserve dispatch in five cases

| 机组号 | v | 备用优化结果/MW | | | | |
|--------|-----|-----------|-------|-------|-------------------|---------------|
| | | 场景分类 | | | 4(3/10/30/60 min) | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1(G1) | 1—4 | 7.57 | 12.00 | 0 | 0/6.32/4.56/1.12 | 0/4.27/0/1.45 |
| 2(G2) | 1—4 | 5.45 | 0 | 0 | 0/0/0/0 | 3.56/2.14/0/0 |
| 3(G5) | 1—4 | 3.31 | 20.42 | 2.34 | 3.70/5.38/11.34/0 | 4.68/0/0/0 |
| 4(G8) | 1—4 | 1.35 | 15.38 | 11.48 | 2.56/3.77/9.05/0 | 2.04/0/0/0 |
| 5(G11) | 1—4 | 0 | 12.86 | 1.30 | 0/5.42/7.44/0 | 0/0/0/0 |
| 6(G13) | 1—4 | 0.53 | 19.74 | 3.02 | 0/8.68/11.06/0 | 0/0/0/0 |

表 2 5 种情况下的发电成本及备用成本

Table 2 Generation and reserve cost in five cases

| 场景种类 | 发电成本/\$ | 备用成本/\$ | 总成本/\$ |
|------|---------|---------|---------|
| 1 | 6479.39 | 501.72 | 6981.11 |
| 2 | 6588.26 | 3053.43 | 9641.69 |
| 3 | 6525.39 | 711.74 | 7191.13 |
| 4 | 6416.82 | 2810.00 | 9161.26 |
| 5 | 6407.48 | 575.78 | 7055.17 |

1) 情况 1 中, 备用容量在给定值的情况下, 备用在各机组之间的分配是在满足各类约束条件的基础上, 按其备用调节成本大小来进行。

2) 情况 2 中, 2 号机组故障, 备用需求量设为 2 号机组的容量即 80 MW。对比情况 2 和情况 1 可知: 情况 2 中发电成本和备用调节成本都较大。不难理解, 备用成本较大是因为备用需求量的不同; 发电成本较大是因为机组 2 故障后, 为了满足负荷需求, 不造成功率缺额, 从而在满足各类约束条件的情况下, 增加发电成本相对较高机组的出力。

3) 情况 3 中, 发电成本相对情况 1 较大, 这是因为, 在支路 3—4 故障的情况下, 为了满足支路 1—2 不越限的约束, 机组 1 必须减少出力, 而其减少的这部分出力需要由其他发电成本相对较大的机组填

补。另外, 情况 3 中备用的需求量与情况 1 相差不大的原因在于, 即使在负荷不发生改变的情况下, 系统也需要留有一部分备用, 一旦因为线路故障或其他原因导致线路阻塞, 系统工作人员可以利用这部分备用进行调节以消除阻塞, 维持系统的稳定运行。

4) 情况 4 中, 在 2 号机组故障的场景下, 将线路的绝对潮流约束按照线路保护的反时限特性松弛为不同时间尺度下的热稳定限值约束, 并通过调用不同响应速度的备用, 以满足当前时间尺度下的热稳定限值, 进而满足功率平衡。由图 3 观察可直观得出, 情况 4 的发电成本和备用成本较情况 2 都更小。这是由于情况 4 中允许线路潮流在规定的时间内超过正常的限值, 对比常规情况相当于提高了线路的限值, 使得发电成本更小的机组能够出更多的力; 备用也不需要全部调用成本相对较高的, 而是只要在满足规定时间的热稳定限值, 就可以协调调用不同响应速度的备用, 以减少备用成本。

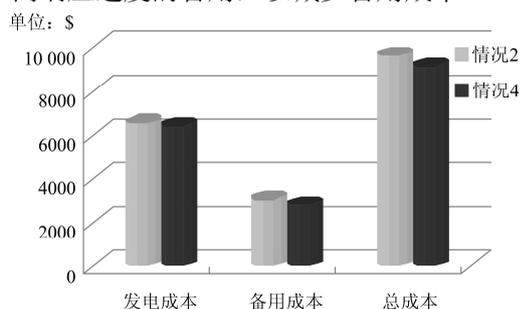


图 3 情况 2 与情况 4 的费用对比

Fig. 3 Cost comparison between case 2 and case 4

5) 由图 4 观察可直观得出, 情况 5 的发电成本和备用成本较情况 3 都更小。因为情况 5 中相对于情况 3 中线路潮流的约束条件而言, 允许线路在规定的时间内部分越限。支路 3—4 故障后, 导致支路 1—2 超过正常的限值, 在情况 3 中, 这种越限是不允许的, 而在情况 5 中, 允许线路在规定的时

内部分越限(不超过对应时间段的越限程度), 从而使发电成本较小的机组能够增加出力, 以减少发电成本, 在不违背线路规定时间范围内越限程度的条件下, 通过不同响应速度的备用协调调度, 以降低备用成本。

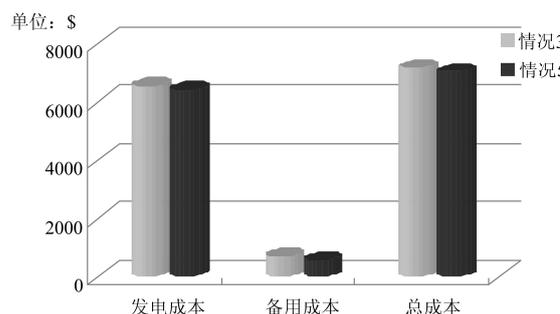


图 4 情况 3 与情况 5 的费用对比

Fig. 4 Cost comparison between case 3 and case 5

从情况 2 和情况 4 的对比、情况 3 和情况 5 的对比分析可得: 预想场景不同, 机组的出力和备用的配置方法也不同; 传统的备用配置方法虽然能保证安全, 但是会造成过多的资源浪费; 而考虑线路反时限保护特性的备用优化的优点在于能够在不影响系统安全性的同时提高经济性。

4 结论

针对不同的预想场景, 本文提出的考虑线路保护反时限特性的备用优化模型能够结合不同预想场景的特性, 在超出线路正常限值而不超过对应时间段极限越限程度的情况下, 通过不同响应速度的备用协调调度, 在满足系统需求和安全性的同时, 较传统方法更为经济。如果多重故障同时发生时, 为了提高计算效率、降低计算量, 可以采用当前较为流行的 Benders 分解方法将模型进行分解, 以致能够迅速而高效地求得最优解, 这是本文后续需要开展的研究工作。

附录 基础数据

表 A 发电机数据
Table A Generator data

| i | $P_{i,max}$ | $P_{i,min}$ | $s_{i,u}$ | $s_{i,d}$ | K_i | B_i | $T_{on,i}$ | $T_{off,i}$ | a_i | b_i | c_i | $C_{i,t,1}$ | $C_{i,t,2}$ | $C_{i,t,3}$ | $C_{i,t,4}$ |
|--------|-------------|-------------|-----------|-----------|-------|-------|------------|-------------|--------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1(G1) | 200 | 80 | 1.5 | 1.5 | 50 | 150 | 5 | 5 | 0.0375 | 20 | 200 | 25 | 20.8 | 17.3 | 14.4 |
| 2(G2) | 80 | 20 | 2.2 | 2.2 | 30 | 120 | 3 | 3 | 0.0575 | 17.5 | 150 | 35 | 29.2 | 24.3 | 20.3 |
| 3(G5) | 50 | 10 | 2.5 | 2.5 | 20 | 100 | 2 | 2 | 0.0625 | 10 | 120 | 40 | 33.3 | 27.8 | 23.2 |
| 4(G8) | 35 | 10 | 3.0 | 3.0 | 25 | 75 | 2 | 2 | 0.0834 | 32.5 | 100 | 45 | 37.5 | 31.3 | 26.1 |
| 5(G11) | 30 | 10 | 3.3 | 3.3 | 20 | 60 | 2 | 2 | 0.25 | 30 | 80 | 60 | 50 | 41.7 | 34.8 |
| 6(G13) | 40 | 12 | 2.7 | 2.7 | 10 | 80 | 2 | 2 | 0.25 | 30 | 90 | 55 | 45.8 | 38.2 | 31.8 |

注: $P_{i,max}$, $P_{i,min}$ 单位为 MW; $s_{i,u}$, $s_{i,d}$ 单位为 MW/min; K_i , B_i 单位为 \$; $T_{on,i}$, $T_{off,i}$ 单位为 h; a_i , b_i , c_i 单位分别为 \$/MW², \$/MW, \$; $C_{i,t,v}$ 单位为 \$/MW。

表 B 预测负荷数据
Table B Forecast loads data

| 时段 | 负荷/MW | 时段 | 负荷/MW | 时段 | 负荷/MW |
|----|-------|----|-------|----|-------|
| 1 | 130.0 | 9 | 200.8 | 17 | 204.3 |
| 2 | 135.2 | 10 | 190.2 | 18 | 212.4 |
| 3 | 140.8 | 11 | 198.6 | 19 | 218.6 |
| 4 | 150.6 | 12 | 220.2 | 20 | 226.7 |
| 5 | 160.5 | 13 | 216.4 | 21 | 224.5 |
| 6 | 165.3 | 14 | 206.2 | 22 | 216.9 |
| 7 | 180.4 | 15 | 195.4 | 23 | 180.7 |
| 8 | 211.6 | 16 | 188.6 | 24 | 160.3 |

参考文献

- [1] 中国电力百科全书编写委员会. 中国电力百科全书 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997: 423-457.
- [2] GOOI H B, MENDES D P, BELL K R W. Optimal scheduling of spinning reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4): 1485-1492.
- [3] BOUFFARD F, GALIANA F. An electricity market with a probabilistic spinning reserve criterion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 300-307.
- [4] 王建学, 王锡凡, 张显. 电力市场中弹性运行备用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 20-27.
WANG Jianxue, WANG Xifan, ZHANG Xian. The flexible operating reserve model in the power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 20-27.
- [5] 黄大为, 韩雪山, 雷鸣. 电力市场中电能与旋转备用的二层优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 110-114.
HUANG Dawei, HAN Xueshan, LEI Ming. Bi-level optimal model of energy and spinning reserve in electricity market[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 110-114.
- [6] BOUFFARD F, GALIANA F, CONEJO A. Market-clearing with stochastic security-part I: formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1818-1826.
- [7] BOUFFARD F, GALIANA F, CONEJO A. Market-clearing with stochastic security-part II: case studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1827-1835.
- [8] 刘怀东, 陈彧, 崔晓君, 等. 基于期望损失指标的电力系统故障筛选和排序[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 8-13.
LIU Huaidong, CHEN Yu, CUI Xiaojun, et al. Contingency screening and ranking based on dynamic security region of the power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 8-13.
- [9] ARDAKANI A J, BOUFFARD F. Identification of umbrella constraints in DC-based security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3924-3934.
- [10] 刘兴宇, 温步瀛, 江岳文. 基于条件风险价值的含风电电力系统旋转备用效益研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 169-178.
LIU Xingyu, WEN Buying, JIANG Yuewen. Study on the benefit from spinning reserve in wind power integrated power system based on conditional value at risk[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017 32(9): 169-178.
- [11] 夏澍, 周明, 李庚银. 考虑线路安全校核的含风电电力系统有功和备用协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 18-26.
XIA Shu, ZHOU Ming, LI Gengyin. A coordinated active power and reserve dispatch approach for wind power integrated power systems considering line security verification[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 18-26.
- [12] 刘文学, 梁军, 负志皓, 等. 考虑节能减排的多目标模糊机会约束动态经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 62-70.
LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained dynamic dispatch considering energy saving and emission reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 62-70.
- [13] 卢鹏铭, 温步瀛, 江岳文. 基于多时间尺度协调机组组合的含风电系统旋转备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 94-100.
LU Pengming, WEN Buying, JIANG Yuewen. Study on optimization of spinning reserve in wind power integrated power system based on multiple timescale and

- unit commitment coordination[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(5): 94-100.
- [14] 曾德良, 简一帆. 火电厂负荷分配的多目标优化算法分析[J]. *热力发电*, 2016, 45(5): 363-370.
ZENG Deliang, JIAN Yifan. Multi-objective optimization algorithm for load distribution in thermal power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(5): 363-370.
- [15] 张粒子, 李丰, 叶红豆, 等. 考虑风电和负荷波动及 N-1 故障的发电备用优化方法研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(1): 64-73.
ZHANG Lizi, LI Feng, YE Hongdou, et al. Optimal reserve dispatch approach considering wind power and load fluctuations and N-1 fault[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2014, 35(1): 64-73.
- [16] 舒隽, 李春晓, 苏济归, 等. 复杂预想场景下电力系统备用优化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(10): 105-110.
SHU Juan, LI Chunxiao, SU Jigui, et al. Optimal reserve dispatch model considering complicated contingency Scenarios[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(10): 105-110.
- [17] 汪洋, 夏清, 康重庆. 考虑电网 N-1 闭环安全校核的最优安全发电计划[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(10): 39-45.
WANG Yang, XIA Qing, KANG Chongqing. Optimal security constrained generation scheduling considering closed-loop N-1 security correction[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(10): 39-45.
- [18] 韦嘉, 柏瑜, 熊兰, 等. 反时限过流保护模型优化与曲线交叉研究[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(9): 56-60, 65.
WEI Jia, BAI Yu, XIONG Lan, et al. Research of inverse time overcurrent protection model optimization and curve intersection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(9): 56-60, 65.
- [19] 严琪, 肖万芳. 反时限电流保护整定计算相关问题研究[J]. *电力自动化设备*, 2008, 28(7): 77-80.
YAN Qi, XIAO Wanfang. Setting coordination of inverse-time over-current relays[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2008, 28(7): 77-80.
- [20] IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays: IEEE Std C37. 112—1996[S].
- [21] Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time, second edition: IEC Publication 255-3(1989-05)[S].
- [22] 赵逸众, 曾卫东, 童博, 等. 排放约束下的火电厂节能经济调度模型[J]. *热力发电*, 2015, 44(6): 47-51.
ZHAO Yizhong, ZENG Weidong, TONG Bo, et al. economical scheduling model for energy saving of a thermal power unit with pollutant emission constraints[J]. *Thermal Power Generation*, 2015, 44(6): 47-51.
- [23] ILOG CPLEX11.2 User's manual[Z]. ILOG Corporation, 2008.
- [24] 张强, 韩学山, 徐建政. 安全经济调度与均匀调度间关系分析[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2005, 17(2): 84-89.
ZHANG Qiang, HAN Xueshan, XU Jianzheng. Analysis of security economic dispatch and homogeneous dispatch[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2005, 17(2): 84-89.

收稿日期: 2016-07-28; 修回日期: 2016-11-16

作者简介:

李竹(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行; E-mail: 379297688@qq.com

雷霞(1973—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力市场、主动配电网及电力系统经济调度。E-mail: snow_lei246@mail.xhu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)