

考虑火电机组深度调峰的实时发电计划模型及应用

董超^{1,2}, 张彦涛^{3,4}, 刘嘉宁¹, 吴炳祥^{3,4}

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600;

2. 广东电网有限责任公司安全经济运行与市场化调度重点实验室, 广东 广州 510600;

3. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106;

4. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061)

摘要:伴随我国大规模新能源接入和用电峰谷差日趋增大, 调峰需求逐步提升, 而由于我国电源结构不尽合理, 调峰电源紧缺, 造成电网调峰困难。深度挖掘火电机组深度调峰能力, 分析其运行特性, 在常规优化模型的基础上, 引入深度调峰出力平稳段运行时间、最小深度调峰时间等约束, 并对机组最大最小出力、爬坡等常规约束进行改进, 建立考虑火电机组深度调峰的实时发电计划优化模型。采用广东电网实际运行数据进行算例分析, 结果满足电网实际运行需求。

关键词:火电机组; 实时发电计划; 深度调峰; 最小深度调峰时间; 平稳性

中图分类号: TM 761; TM 611

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.017

0 引言

随着经济快速发展及人民生活水平日益提高, 我国电网新能源装机容量不断增大, 用电结构也发生了变化。第一产业用电量逐年下降, 第二、三产业用电量逐年上升, 导致电网峰谷差逐渐增大。

为解决国内峰谷差加剧带来的调峰难题, 接纳更多的风能等可再生能源, 文献[1-5]引入了多周期协调优化和多能源协调优化技术, 通过日前发电计划和实时发电计划的有机结合, 提高调度运行的精细化水平, 最大限度实现火电、水电、抽蓄、核电等多种能源协调优化配置。伴随国内智能电网调度支持系统的快速发展, 实时发电计划优化模型及其闭环控制技术^[5-7]取得了显著成果, 已从调度精细化的时间维度和多能源互补的能源维度最大限度满足系统调峰要求, 并在国内多个网、省级电网实现实用化运行。

由于我国多数电网的电源结构以火电为主, 水电比重较小, 随着风能、太阳能等清洁能源的快速发展, 电网调峰问题更加严峻, 因此, 火力发电机组参与深度调峰成为一种趋势。近年来, 风电、光伏^[6-9]预测技术快速发展, 但目前负荷预测和新能源预测仍存在较大偏差, 尤其对于耗电量且峰谷差较大、机组资源有限的电网, 迫切要求在实时发电计划层面考虑火电机组深度调峰。本文在现有实时发电计划优化模型^[10-13]的基础上引入火电机组深度调峰技

术, 根据火电机组深度调峰的运行特性进行数学建模, 适应目前国内电源结构不合理情况下的调峰需求, 弥补国内智能电网调度系统在该技术领域的空白。本文仅对火电机组深度调峰的建模方法进行详细描述, 其他不再赘述。

1 火电机组深度调峰特性分析

在设计煤种或接近设计煤种的条件下, 大多数机组的调峰能力均能达到制造厂家的设计值。火力发电机组深度调峰时, 由于汽轮机一般可在 20%~30% 的额定负荷下稳定运行, 因此机组的最低负荷往往取决于锅炉。锅炉厂所给定的锅炉不投油最低稳燃负荷随煤种、锅炉形式、机组容量不同而有所差异。锅炉厂设计时给定的锅炉不投油最低稳燃负荷大致为 200 MW/45% BMCR、300 MW/35% BMCR、600 MW 以上/30% BMCR, 其中锅炉最大连续蒸发量 BMCR (Boiler Maximum Continuous Rating) 主要是在满足蒸汽参数、炉膛安全情况下的最大出力。一般情况下, 锅炉厂家设计的最大出力 BMCR 应是在锅炉额定蒸发量 (ECR) 的基础上增加 3%~6%, 但由于各个锅炉的实际情况不同, 有些锅炉未达到上限。因此折合成机组额定负荷后, 按约增加 5% 计算, 即 200 MW/50% ECR、300 MW/40% ECR、600 MW 以上/35% ECR, 循环流化床锅炉的最低不投油稳燃负荷为 35% ECR。

考虑到影响最低稳燃负荷的因素较多, 应根据各个电厂实际运行状况确定深度调峰负荷, 确保机组运行的安全性。由于火电机组深度调峰情况下稳定运行受诸多因素影响, 因此, 火电机组深调峰出力不应在最小技术出力和深调峰出力下限之间随意波动, 应位于某一出力水平稳定运行, 保证火电机组深度调峰情况下的稳定性和安全性。另外, 火电机组

收稿日期: 2018-06-04; **修回日期:** 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51477121); 中国南方电网有限责任公司重大科技项目 (036000KK52160011)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51477121) and the Key Science and Technology Program of China Southern Power Grid Company Limited (036000KK-52160011)

不宜在深度调峰状态和正常运行状态之间频繁切换,所以应考虑深度调峰最小运行时间限制。

2 考虑深度调峰的优化模型

2.1 优化目标

常规实时发电计划优化模型^[11]为多目标优化,主要目标是与日前计划偏差电量最小,目标表达式为:

$$F_0 = F_l + F_b + F_c \quad (1)$$

其中, F_0 为常规优化目标^[11]; F_l 为日内计划与日前计划电量偏差成本; F_b 为发用电平衡松弛成本; F_c 为网络安全松弛成本。

本文在文献[11]常规优化目标的基础上,进一步引入深度调峰目标成本,优化目标表达式如下:

$$\min F = F_0 + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \Delta_{i,t} \quad (2)$$

其中, I 为深度调峰机组总数; T 为优化周期时段数; $\Delta_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的深度调峰成本。

本文为多目标优化模型,为实现发用电不平衡或网络安全不满足时自动深度调峰,正常情况下不以深度调峰为目标,深度调峰微增成本应低于发用电平衡和网络断面松弛成本,高于机组正常调整微增成本,通过目标权重调整得到满足电网安全经济运行需求的优化结果。本文着重介绍火电机组深度调峰技术的优化建模思路及其实际运行效果,不对不同目标权重的优化结果进行对比分析。

2.2 约束条件

深度调峰是在最小技术出力的基础上进一步下调出力,火电机组深度调峰运行的特性决定了深度调峰状态下机组出力点为离散点,且深度调峰的单位成本伴随调峰深度增加而提升。为了更好地说明深度调峰机组的出力区间,可以通过图1进行说明,图中 $\mu_{i,m}$ 为机组 i 在深度调峰离散出力区间 m 的单位调峰成本, $p_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的优化出力。

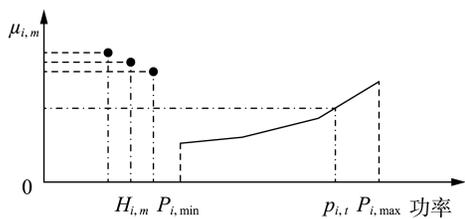


图1 深度调峰机组功率价格曲线

Fig.1 Power price curve of unit for deep peak regulation

本文中常规优化目标 F_0 以与日前计划偏差成本最小为主要目标,因此,图1中连续区间的成本曲线在本文中未使用,仅用来显示说明深度调峰机组的出力区间。从图中可以看出,深度调峰单位成本随机组调峰深度递增,通过深度调峰目标成本最小限制机组调峰深度。

为实现实时发电计划优化模型^[11]对深度调峰功能的兼容扩展,深度调峰离散型出力点可看作两端点相同的出力区间,连续出力曲线可看作以最小、最大技术出力为左、右端点的出力区间,至此,深度调峰机组出力范围可以认为由离散型出力区间 $[H_{i,m,t}^l, H_{i,m,t}^r]$ 合并而成。

$$\begin{cases} H_{i,m,t}^l = H_{i,m,t}^r & m < M \\ H_{i,m,t}^l = P_{i,t}^{\min}, H_{i,m,t}^r = P_{i,t}^{\max} & m = M \end{cases} \quad (3)$$

其中, $m=1,2,\dots,M$,为机组出力区间编号, M 为机组出力区间总数,当 $m=M$ 时,出力区间 m 为连续型出力区间,称为常规出力区间; $H_{i,m,t}^l$ 为机组 i 在时段 t 出力区间 m 的左端点; $H_{i,m,t}^r$ 为机组 i 在时段 t 出力区间 m 的右端点; $P_{i,t}^{\min}$ 为机组 i 在时段 t 的最小技术出力; $P_{i,t}^{\max}$ 为机组 i 在时段 t 的最大技术出力。

由于一台机组同一时刻只能位于某一个出力区间内,引入唯一性约束:

$$\sum_{m=1}^M \lambda_{i,m,t} \leq 1 \quad (4)$$

其中, $\lambda_{i,m,t}$ 为0-1变量,表示深度调峰机组出力区间运行状态,若 $\lambda_{i,m,t}=1$,表示机组 i 在时段 t 位于出力区间 m ,若 $\lambda_{i,m,t}=0$,则表示机组 i 在时段 t 不位于出力区间 m 。

引入深度调峰机组出力区间状态标识后,深度调峰成本 $\Delta_{i,t}$ 可以进一步表示为:

$$\Delta_{i,t} = \sum_{m=1}^M \lambda_{i,m,t} \mu_{i,m} (P_{i,t}^{\min} - H_{i,m,t}^l) \quad (5)$$

深度调峰机组出力上下限约束为:

$$\sum_{m=1}^M \lambda_{i,m,t} H_{i,m,t}^l \leq p_{i,t} \leq \sum_{m=1}^M \lambda_{i,m,t} H_{i,m,t}^r \quad (6)$$

此约束表达式配合式(4)使得机组出力位于某个出力区间内。

考虑到火电机组深度调峰运行的稳定性,机组出力不宜随意波动,应稳定运行于某个离散出力点,引入如下约束限制机组深调峰状态下离散出力点之间的切换:

$$\sum_{t=1}^T \lambda_{i,m,t} \leq \beta_{i,m} T \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^{M-1} \beta_{i,m} \leq 1 \quad (8)$$

其中, $\beta_{i,m}$ 为0-1变量,若 $\beta_{i,m}=1$,表示机组 i 出力计划位于出力区间 m ,若 $\beta_{i,m}=0$,则表示机组 i 出力计划不位于出力区间 m 。

为了避免机组在深度调峰和正常运行状态间频繁切换,引入深度调峰最小运行时间和非深度调峰最小运行时间限制。初始时段深度调峰最小运行时间约束为:

$$1 - \sum_{t=1}^{T^s} \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_{i,m,t} = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^{T^c} \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_{i,m,t} = 0 \quad (10)$$

其中, T^s 为初始最小深调峰时段数, 即最小深度调峰时段数扣除已深度调峰运行时段数; T^c 为初始最小非深调峰时段数, 即最小非深度调峰时段数扣除已非深度调峰运行时段数。

为限制优化周期内各个时段深度调峰状态的切换, 引入如下约束:

$$s_{i,t} - e_{i,t} = \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_{i,m,t} - \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_{i,m,t-1} \quad (11)$$

$$s_{i,t} + e_{i,t} \leq 1 \quad (12)$$

其中, $s_{i,t}$ 为 0-1 变量, 若 $s_{i,t} = 1$, 表示机组 i 在时段 t 进入深度调峰状态, 若 $s_{i,t} = 0$, 则表示机组 i 在时段 t 运行状态无变化; $e_{i,t}$ 为 0-1 变量, 若 $e_{i,t} = 1$, 表示机组 i 在时段 t 退出深度调峰状态, 若 $e_{i,t} = 0$, 则表示机组 i 在时段 t 运行状态无变化。

优化周期内机组最小深度调峰、非深度调峰运行时间约束:

$$\begin{cases} s_{i,t} + \sum_{t_2=t}^{t+T^2} e_{i,t_2} \leq 1 \\ e_{i,t} + \sum_{t_1=t}^{t+T^1} s_{i,t_1} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

其中, T^1 为最小深度调峰模式运行时间; T^2 为最小非深度调峰模式运行时间; t, t_1, t_2 表示时段。

为了兼容常规实时发电计划优化模型^[5], 对原常规优化模型中相关约束进行技术改造。机组出力上下限约束改造为:

$$P_{i,t}^{\min} u_{i,t} - \eta_{i,t} \leq p_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} u_{i,t} \quad (14)$$

其中, $u_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的开停机标志; $\eta_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的深调峰功率, 可以进一步表达为如式 (15) 所示。

$$\eta_{i,t} = \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_{i,m,t} (P_{i,t}^{\min} - H_{i,m,t}^1) \quad (15)$$

由于深度调峰离散出力点之间未必满足爬坡约束, 所以深度调峰状态下不考虑爬坡约束, 仅在常规出力区间内考虑爬坡。机组爬坡和滑坡约束修正为:

$$p_{i,t} - p_{i,t-1} \leq r_{i,t}^u \lambda_{i,M,t} L + P_{i,t}^{\max} (1 - \lambda_{i,M,t}) \quad (16)$$

$$p_{i,t-1} - p_{i,t} \leq r_{i,t}^d \lambda_{i,M,t} L + P_{i,t}^{\max} (1 - \lambda_{i,M,t}) \quad (17)$$

其中, L 为时段长度; $r_{i,t}^u$ 为机组 i 在时段 t 的爬坡速率; $r_{i,t}^d$ 为机组 i 在时段 t 的滑坡速率; $\lambda_{i,M,t}$ 表示机组 i 在时段 t 是否位于常规出力区间 M 。

2.3 火电机组深度调峰模型分析

由式 (3) 易知, 火电机组深度调峰技术的引入, 使得深度调峰机组出力区间变为多个离散出力区间的组合, 不再是单一的连续出力区间。由于一台机组同一时刻只能位于某一个出力区间内, 进而引入式 (4) 和深度调峰机组出力区间运行状态 0-1 变量, 使得实时发电计划优化模型由线性规划 (LP) 模型转化为混合整数规划 (MIP) 模型, 模型结构复杂化, 增加了求解难度。

根据火电机组深度调峰运行特性分析, 引入深度调峰状态出力平稳性约束式 (7)、(8) 和最小深度调峰运行时间约束式 (9) — (13), 防止火电机组深度调峰运行状态的频繁切换和深度调峰状态下出力的随意波动造成机组运行失稳, 保证深度调峰状态下机组安全稳定运行。对于实时计划某个优化周期内而言, 可以通过深度调峰最小运行时间限制深度调峰状态, 然而, 对于在本优化周期之前已处于深度调峰状态下的机组, 需要知晓其已进入深度调峰状态的时间, 深度调峰最小运行时间扣除已进入深度调峰状态的时间即为其继续深度调峰状态运行时间, 因此, 深度调峰最小运行时间约束由式 (9)、(10) 和式 (11) — (13) 两部分约束组成。

深度调峰机组出力范围的离散化, 使得常规实时发电计划优化模型^[11] 中的机组出力上下限约束和机组爬坡约束都无法满足实际运行要求。为了兼容常规实时发电计划优化模型, 一方面引入新的机组出力上下限约束式 (6), 另一方面改造现有的机组出力上下限和爬坡约束式 (14) — (17), 既满足深度调峰的技术要求, 又不对现有的功能造成影响, 是对常规实时发电计划优化模型的有效扩展和提升。

采用分支定界和切平面方法求解考虑火电机组深度调峰的实时发电计划优化模型, 该算法理论成熟, 计算效率满足实际运行要求。由于常规优化模型中关键约束为软约束^[10-13], 因此, 本文中引入和修改的相关约束不影响优化模型的收敛性和鲁棒性。

3 算例分析

广东注重历史文化和传统民俗各类社会活动, 这对电力负荷有明显影响。另外, 广东地处亚热带及热带气候区, 降水在年内分配不均, 台风频繁, 气象条件的变化对负荷需求也有十分显著的影响。在同一天内, 峰谷差一般占最高负荷的 30% ~ 40%, 高达 30 GW, 同时呈现夏季三峰三谷、冬季两峰两谷的特性。

近年来, 广东电网峰谷差逐年增加^[14-15], 电网规模和用电负荷总量居全国省级电网前列, 2016 年最高负荷达到 100.07 GW。该电网包括 282 台建模机组, 总装机容量为 104.3 GW, 电源结构见附录中

图 A1。

图 2 为发用电不平衡量。由图可知,火力发电装机容量占多数,抽水蓄能电站容量有限,调峰电源缺乏。由于峰谷差太大,负荷高峰时刻火电机组开机过多,负荷低谷时刻又不能频繁停机,只能深度调峰,因此,目前的电源结构造成了电网调峰的困难。

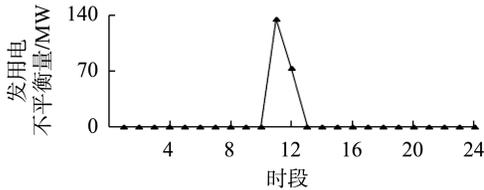


图 2 发用电不平衡量

Fig.2 Unbalanced amount of power generation and consumption

本文以广东电网实际运行数据构造算例,对建立的优化模型进行验证分析,仅选择某机组进行深度调峰功能分析,其他机组深度调峰出力情况不做细述。算例优化周期为未来 2 h,每 5 min 为一时段,共 24 个时段。选取 2017 年 2 月 12 日 11:10—13:05 由负荷高峰至负荷低谷快速下降的时段进行优化,优化周期内的超短期系统负荷预测及可调空间见附录中图 A2,图中,可调出力上、下限分别是指系统最大、最小发电能力,系统发电能力满足系统负荷要求。

超短期系统负荷变化率、系统爬坡速率和系统滑坡速率见附录中图 A3。系统负荷变化率是指相邻 2 个时段的负荷变化速率,系统爬坡、滑坡速率是指相邻 2 个时段发电能力的上升、下降速率。从图中可知,在第 11 时段,系统负荷变化速率大于系统滑坡变化速率,因此,发电能力下降速率无法满足系统负荷下降速率要求,发用电不平衡,需要借助火电机组深度调峰提升火电下降速率满足系统发用电平衡要求。

由以上分析可知,判断系统发用电是否平衡,不仅要分析发电能力范围是否满足系统负荷要求,而且要分析发电能力变化速率是否满足负荷率变化率要求,只有二者同时满足,才能保证系统发用电平衡。

3.1 考虑常规深度调峰约束出力分析

常规深度调峰约束是指约束式(3)—(6)和约束式(14)—(17),由上述基础数据分析可知,在不考虑火电机组深度调峰的情况下,无法满足发用电平衡,如图 2 所示。

为满足系统发用电平衡要求,火电机组参与深度调峰,在此仅选 1 台机组深度调峰出力计划进行分析,参与深度调峰前、后的出力曲线如图 3 所示。

从图 3 可知,机组出力突破最小技术出力,适应系统负荷急速下降的要求,然而,机组深度调峰出力在最小技术出力和深度调峰出力下限之间随意波

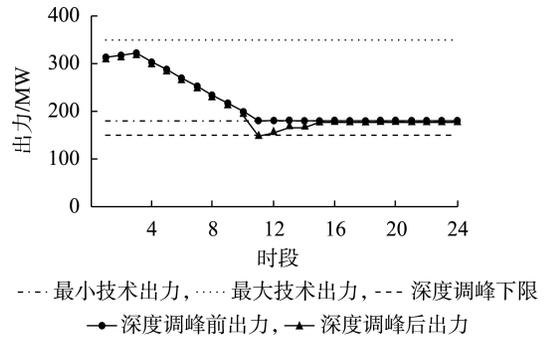


图 3 深度调峰前、后机组出力对比分析

Fig.3 Comparison and analysis of unit output before and after deep peak regulation

动,不满足深度调峰出力平稳性要求。

3.2 考虑深度调峰平稳性约束出力分析

为抑制火电机组深度调峰状态下出力随意波动,引入深度调峰平稳性约束式(7)、(8),保证火电机组深度调峰状态的稳定运行。考虑深度调峰平稳性约束深度调峰前、后机组出力曲线如图 4 所示。

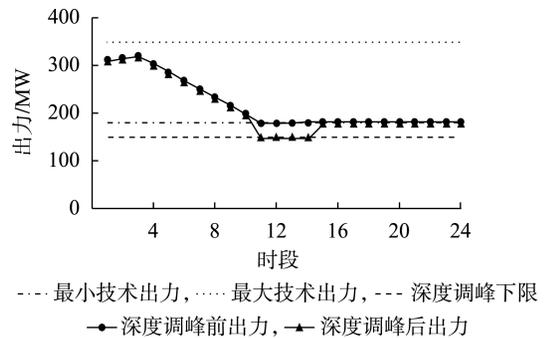


图 4 深度调峰前、后机组出力对比分析

Fig.4 Comparison and analysis of unit output before and after deep peak regulation

从图 4 易知,考虑深度调峰平稳性约束后,机组深度调峰出力平稳,避免了机组出力随意波动影响深度调峰运行的稳定性。然而,深度调峰伴随间歇性,导致深度调峰机组在正常运行状态和深度调峰状态之间频繁切换。

3.3 考虑深度调峰最小运行时间约束出力分析

为适应深度调峰运行特性,避免深度调峰机组在正常运行状态和深度调峰状态下频繁切换,引入深度调峰最小运行时间约束式(9)—(13)。假设深度调峰最小运行时间为 4 h,机组深度调峰前、后出力曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,机组进入深度调峰状态后,持续运行,满足深度调峰最小运行时间(4 h)要求。该约束可避免深度调峰机组短时间内在正常运行状态和深度调峰状态之间频繁切换,适应深度调峰实用化需求。

3.4 火电深度调峰的实时发电计划工程应用

在实际运行中,广东实时发电计划以 5 min 为周期滚动编制未来 2 h 的机组出力计划,并实时更

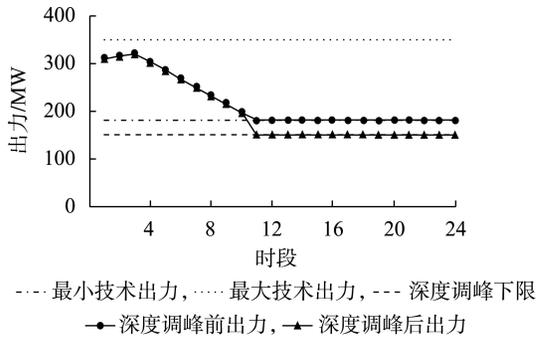


图5 深度调峰前、后机组出力对比分析

Fig.5 Comparison and analysis of unit output before and after deep peak regulation

新至数据采集与监控(SCADA)系统供自动发电控制(AGC)使用。实时调度计划经常采用自主深度调峰策略,一方面由于强对流天气、台风等原因,广东第二、三季度负荷稳定性较差,预测准确率有待提高;另一方面广东高峰期负荷高企,而负荷低谷期西电由于水电大发等原因较难减送,因此无法通过日前计划安排机组停机;三是广东稳定断面数量众多且重载比例大,调节资源有限,需要机组深度调峰控制断面。基于以上原因考虑,广东迫切需要实时计划对火电机组进行深度调峰,满足广东电网实际运行要求,某典型机组跟踪实时计划参与深度调峰的功率曲线见附录中图A4。

4 结语

本文针对目前国内电源结构不尽合理情况下用电峰谷差日趋增大和新能源大规模接入带来的调峰困难,深度挖掘火电机组深度调峰能力,分析其运行特性,结合常规实时计划模型,建立考虑火电机组深度调峰的实时发电计划优化模型。本文模型不仅兼容现有实时发电计划优化模型,同时考虑机组深度调峰状态下运行的平稳性和最小运行时间,保证火电机组深度调峰状态下安全稳定运行。基于本文的实时发电计划编制系统已在广东电网得到应用,实际应用效果良好,可在类似省级电网进行推广。本文仅分析火电机组深度调峰建模和实际应用,后续可进一步开展特高压交直流电源、火电机组深度调峰和快速启停机组的联合优化,更好地解决我国峰谷差加剧带来的调峰难题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 陈之栩,李丹,梁吉,等. 华北电网日内发电计划及实时调度系统[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):54-57.
CHEN Zhixu, LI Dan, LIANG Ji, et al. Intraday generation plan and real-time dispatch system of north China grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 54-57.
- [2] 谢丽荣,张勇,王岗,等. 中短期多周期发电计划的协调方式和闭环控制[J]. 电力系统自动化,2014,38(10):126-130.

- XIE Lirong, ZHANG Yong, WANG Gang, et al. Coordination method and closed-loop control of medium-short term multi-cycle generation scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10):126-130.
- [3] 胡泽春,丁华杰,孔涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):36-41.
HU Zechun, DING Huajie, KONG Tao. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-storage plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 36-41.
- [4] 牛林华,龚庆武,黄炳翔,等. 大规模风电入网下的风光火电力系统联合优化调度[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):52-58.
NIU Linhua, GONG Qingwu, HUANG Bingxiang, et al. Optimal dispatch of wind-gas-coal power generation system with large-scale wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 52-58.
- [5] 肖欣,周渝慧,何时有,等. 含流域梯级水电的水火风互补发电系统联合运行优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):100-108.
XIAO Xin, ZHOU Yuhui, HE Shiyong, et al. Optimal joint operation of hydro-thermal-wind hybrid power system with cascaded hydro power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 100-108.
- [6] 牛哲文,余泽远,李波,等. 基于深度门控循环单元神经网络的短期风功率预测模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):36-42.
NIU Zhewen, YU Zeyuan, LI Bo, et al. Short-term wind power forecasting model based on deep gated recurrent unit neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 36-42.
- [7] 叶林,杨丹萍,赵永宁. 风电场风能资源评估的测量-关联-预测方法综述[J]. 电力系统自动化,2016,40(3):140-151.
YE Lin, YANG Daping, ZHAO Yongning. Overview of wind resource measure-correlate-predict methods for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 140-151.
- [8] 龚莺飞,鲁宗相,乔颖,等. 光伏功率预测技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(4):140-151.
GONG Yingfei, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. An overview of photovoltaic energy system output forecasting technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 140-151.
- [9] 王继东,冉冉,宋智林. 基于改进深度受限玻尔兹曼机算法的光伏发电短期功率概率预测[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):43-49.
WANG Jidong, RAN Ran, SONG Zhilin. Probability forecast of short-term photovoltaic power generation based on improved depth restricted Boltzmann machine algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 43-49.
- [10] 张怡,张峰,朱炳铨,等. 适用于大规模新能源接入的日内滚动计划闭环控制系统[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):52-58.
ZHANG Yi, ZHANG Feng, ZHU Bingquan, et al. Closed-loop control system of intraday rolling generation schedule for renewable energy generation integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 52-58.
- [11] 徐帆,陈之栩,张勇,等. 实时发电计划模型及其应用[J]. 电力系统自动化,2014,38(6):117-122.
XU Fan, CHEN Zhixu, ZHANG Yong, et al. Real-time generation scheduling model and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 117-122.
- [12] 徐帆,丁怡,谢丽荣,等. 实时发电计划闭环控制模型与应用[J]. 电网技术,2014,38(11):3187-3192.
XU Fan, DING Qia, XIE Lirong, et al. A closed-loop control model

for real-time generation scheduling and its application[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3187-3192.

- [13] 张彦涛,任景,孙晓强,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.
- [14] 陈浩,李战鹰. 广东电网调峰分析[J]. 广东电力, 2001, 14(2): 6-8.
CHEN Hao, LI Zhanying. Analysis of peak shaving of Guangdong Province[J]. Guangdong Electric Power, 2001, 14(2): 6-8.
- [15] 牛逸宁,艾欣,刘晓. 广东电网调峰特性分析[J]. 广东电力, 2012, 25(10): 1-4.
NIU Yining, AI Xin, LIU Xiao. Analysis on peak shaving characteristic of Guangdong Power Grid[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(10): 1-4.

作者简介:



董超

董超(1988—),男,湖北黄石人,高级工程师,硕士,主要研究方向为智能电网调度运行、电力现货市场设计与运行(E-mail: dcedward1205@163.com);

张彦涛(1983—),男,河南漯河人,工程师,硕士,主要研究方向为最优化技术、电力系统运行和优化(E-mail: zhangyantao@sgepri.sgcc.com.cn);

刘嘉宁(1974—),男,广东江门人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为智能电网调度运行;

吴炳祥(1983—),男,福建泉州人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统运行和优化。

Real-time generation scheduling model and its application considering deep peak regulation of thermal power units

DONG Chao^{1,2}, ZHANG Yantao^{3,4}, LIU Jianing¹, WU Bingxiang^{3,4}

(1. Electric Power Dispatching & Control Center of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510600, China;

2. Key Laboratory of Safety, Economic Operation and Market Operation of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510600, China;

3. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

4. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: The demand of peak regulation is gradually growing along with the access of large-scale renewable energy and the gradual increase of electricity peak-valley difference, while the power source for peak regulation is insufficient due to the unreasonable power source structure in China, which causes difficulties in peak regulation of power grid. The deep peak regulation ability of thermal power units is deeply excavated, and their operation characteristics are analyzed. On the basis of conventional optimization model, the constraints such as operation time in stationary segment of deep peak regulation output and minimum deep peak regulation time are introduced, the conventional constraints such as maximum and minimum unit output and ramping are improved, and an optimal real-time generation scheduling model with the consideration of deep peak regulation of thermal power units is built. The practical operation data of Guangdong Power Grid is used for case analysis, and the results meet the requirement of practical power grid operation.

Key words: thermal power units; real-time generation scheduling; deep peak regulation; minimum deep peak regulation time; smoothness

(上接第 107 页 continued from page 107)

Error comparison and analysis of high-voltage current transformer based on different testing methods

LIU Gang¹, XIONG Xiaofu¹, LIAO Ruijin¹, HAO Jian¹, LIU Kun²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Corporation Metering Center, Chengdu 610045, China)

Abstract: There are various methods to test the error of high-voltage current transformer, however, there is little analysis on the difference and accuracy among testing results of these methods. The error of high-voltage current transformer is tested and compared with single-phase testing, absolute value calculation of the current error considering the influence of voltage and current error testing under rated voltage. And the reason of their differences is analyzed. The results show that voltage has a negative influence on ratio error and phase displacement of current transformer, and its effect is mainly predominant at currents less than 20% of rated current. The larger the current is, the smaller the influence will be, and the influence decreases gradually until it can be neglected with the increase of current. The current errors tested at low voltage are inaccurate at low current, and the absolute value of the variations of current error is much larger than the results tested at high voltage, as a result, the current error of high-voltage current transformer should be tested directly at rated primary voltage.

Key words: testing method; current transformer; error analysis; leakage current; absolute value of the variations of current error

附录:

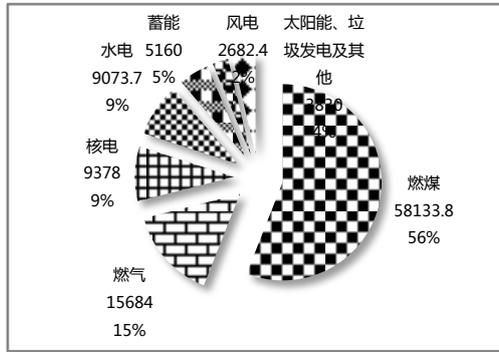


图 A1 各类型机组成容量及比例

Fig.A1 Installed capacity and proportion of each type of unit

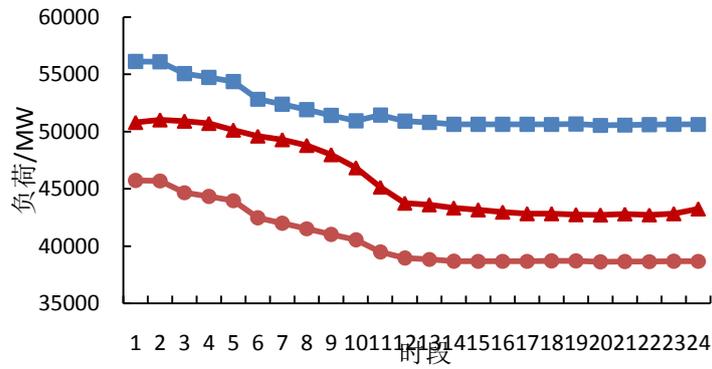


图 A2 超短期负荷预测与可调出力限值

Fig.A2 Ultra- short term load forecast and adjustable power limit

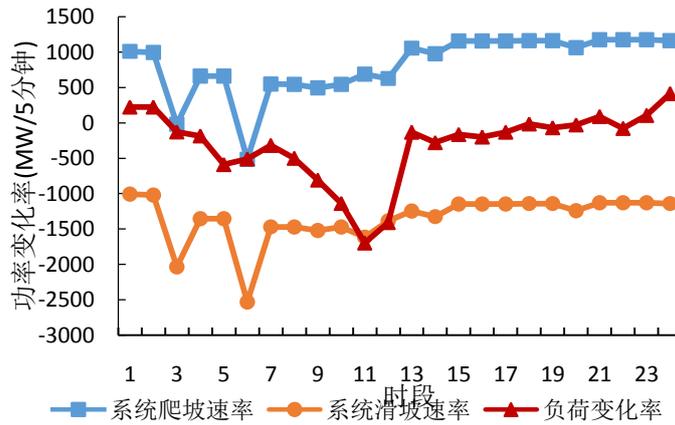


图 A3 超短期负荷变换率和系统爬坡滑坡速率

Fig.A3 Ultra- short term load change rate and ramp up-down rate

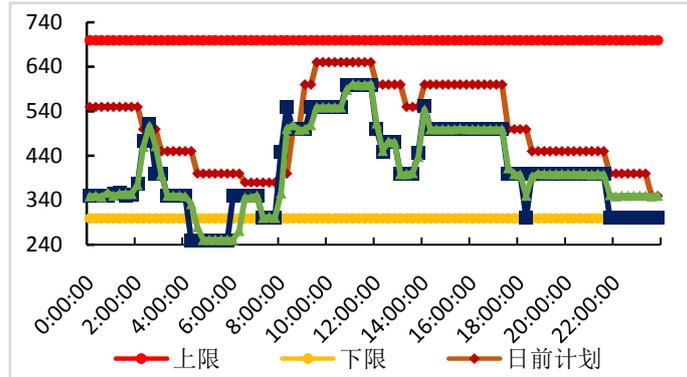


图 A4 深度调峰的实际运行效果

Fig.A4 Actual operation effect of deep peak shaving