

考虑调峰资源互济的区域电网优化调度方法

方必武¹, 肖亮¹, 孙成¹, 陈亦平¹, 薛艳军², 张德亮²

(1. 南方电网公司 电力调度控制中心, 广东 广州 510623;

2. 北京清大科越股份有限公司, 北京 100084)

摘要: 为了提升清洁能源消纳能力, 充分利用各省区调峰资源, 研究了不同类型电源调峰能力, 提出了一种考虑调峰资源互济的区域电网优化调度方法。不同类型电源的调峰能力不同, 基于燃煤机组调峰经济性差异, 提出了基本调峰能力、不投油调峰能力、投油调峰能力三项评价指标, 以量化省级电网不同经济区间下的系统调峰能力。考虑省区间调峰资源差异, 构建了基于两层架构的区域电网优化调度方法。上层架构用于优化区域电网内各省级电网送受电计划, 下层架构在给定送电计划基础上优化编制发电计划, 确定燃煤机组调峰计划。通过两层架构间的迭代实现对区域电网优化调度问题的求解。在 IEEE RTS-96 三区域系统基础上构造算例, 验证所提出方法的可行性。结果表明, 该方法能直观量化各省区调峰能力, 并通过经济评价指标实现跨区调峰资源互济, 有助于提升区域电网清洁能源消纳能力。

关键词: 区域电网; 优化调度; 调峰资源; 调峰能力; 两层架构

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22783

An Optimization Dispatch Method for Regional Power Grid Considering Peaking Resource Mutual Support

FANG Biwu¹, XIAO Liang¹, SUN Cheng¹, CHEN Yiping¹, XUE Yanjun², ZHANG Deliang²

(1. Power Dispatching and Control Center, China Southern Grid, Guangzhou 510623, Guangdong, China;

2. Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: In order to improve the absorption capacity of clean energy and make full use of the peak regulation resources of each province, the peak regulation capacity of different types of power sources was studied, and a regional power grid optimization dispatching method considering the mutual aid of peak regulation resources was proposed. Different types of power supply have different peak-regulating capacities. Based on the economic difference of peak-regulating capacity of coal-fired power units, three evaluation indexes were proposed, namely basic peak-regulating capacity, non-fuel peak-regulating capacity and fuel peak-regulating capacity, to quantify the system peak-regulating capacity of provincial power grid under different economic zones. Considering the difference of peak dispatching resources between provinces, an optimal dispatching method of regional power grid based on two-layer architecture was constructed. The superstructure was used to optimize the power delivery and reception plans of each provincial power grid within the regional power grid, while the lower structure optimized the generation plan based on the given power transmission plan and determined the peak load adjustment plan of coal-fired units. The optimization dispatching problem of regional power grid was solved by iteration between two layers architecture. A case study was constructed based on the IEEE RTS-96 three-region buses system to verify the feasibility of the proposed method. The results show that this method can directly quantify the peak shifting capacity of each province and region, and realize the mutual aid of peak shifting resources across regions through economic evaluation indexes, which is helpful to improve the clean energy consumption capacity of regional power grid.

Key words: regional power grid; optimization dispatch; peak-regulating resource; peak regulating capacity; two-layer architecture

近年来, 风电、光伏等新能源发展迅速, 对电网调峰提出了严峻挑战。科学优化电网运行方式, 充分利用调峰资源, 在提升清洁能源消纳能力的同时降低系统调峰成本, 成为电网优化调度

基金项目: 国家自然科学基金(51907035)

作者简介: 方必武(1991—), 男, 硕士, 高级工程师, Email: fangbw@csg.cn

通讯作者: 张德亮(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, Email: zdl20002@163.com

领域研究的热点。

文献[1]研究了燃煤机组深度调峰过程,构建了燃煤机组深调运行费用模型,并据此提出了考虑新能源随机特性的电网深度调峰优化方法。文献[2]分析了燃煤机组深度调峰对其电量计划执行的影响,提出了调峰服务与电量协调的安全约束经济调度方法。文献[3]提出了调峰权集中交易模式,通过调整燃煤电厂间的调峰辅助服务承担量,优先调用调峰能力强、成本低的燃煤机组,提升系统调峰期间运行效益。文献[4-5]研究了不同调峰深度下影响燃煤机组运行效益的主要因素,构建了考虑多段式燃煤机组调峰成本评价模型,并提出了电网优化调度方法。文献[6]研究了区域电网跨省调峰互济的可行性,并提出了省间调峰交易市场运行机制。文献[7]研究了省级电网调峰需求评估模型,以区域电网内各省调峰压力尽可能均衡为优化目标,提出了区域电网优化调度方法。

可以看出,当前考虑系统调峰的电网优化调度方法往往以省级电网为研究对象,对区域电网范围内调峰资源优化调度研究相对较少。实际上由于各省电网运行特性差异,区域电网范围的调峰资源优化调度更具潜力^[8]。

为此,本文将介绍不同类型电源调峰特性,重点研究燃煤机组不同调峰深度下的经济性差异。在此基础上,考虑各区域调峰资源差异,构建了以区域预期调峰成本最低为目标的区域电网优化调度方法。最后,基于三区域电网模型构造算例,验证了所提出方法的有效性。

1 电源调峰能力及系统调峰资源分析

1.1 电源调峰能力分析

电源调峰能力是指在满足清洁能源消纳等运行要求的前提下,为满足电力平衡要求,各类型电源按照调度指令要求调减出力的能力。考虑不同类型电源运行特性,特别是电源调峰期间经济性差异,现行运行规程将电源调峰划分为基本调峰及有偿调峰两类。

基本调峰是各类型电源所必须履行的调峰责任,电源提供基本调峰成本相对较低。如表1所示,根据性能差异,燃煤机组、燃气机组等主要电源可分为不停机、可停机和不调节三类。燃煤机组为典型的不停机调峰电源,由于其启停成本较高且出力调减能力有限,基本调峰能力为其最

小技术出力,一般为最大技术出力50%。燃气机组、梯级水电均可停机调峰,但梯级水电停机必须满足清洁能源消纳所需要的水位控制要求,保证无弃水风险。小水电、风电、光伏等电源出力由降水、来风、日照等气象因素决定,无调峰能力。

表1 主要类型电源基本调峰能力

Tab.1 Main types of power supply basic peak regulation capacity

类型	基本调峰能力
燃煤机组	调减至最小技术出力,一般为最大技术出力50%
燃气机组	100%,可停机调峰
梯级水电 (非径流式)	100%,若无弃水风险,可停机调峰
小水电 (径流式)	无调峰能力
风电	无调峰能力
光伏	无调峰能力

根据系统运行需要,燃煤机组还可继续调减出力,提供有偿调峰服务。当前我国大部分燃煤机组仅具备深度调峰能力,文献[6]研究了燃煤机组深度调峰能力影响因素,将深度调峰划分为不投油和投油两个阶段。图1为燃煤机组调峰过程。

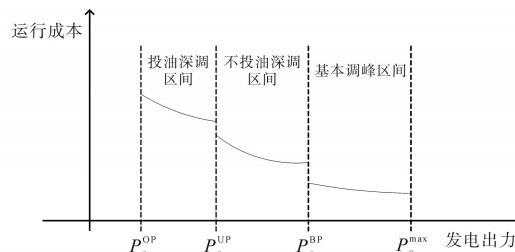


图1 燃煤机组调峰过程

Fig.1 Peak-adjusting process of coal-fired units

如图1所示,基本调峰阶段燃煤机组调峰成本主要受煤耗率增大影响;不投油调峰阶段燃煤机组调峰成本还需要进一步考虑设备劳损;转入投油调峰阶段后,除上述两方面因素外还需要考虑投油、等离子点火等稳燃措施影响,因此燃煤机组深调成本可用三段式函数表示如下^[9-10]:

$$w_c(P) = \begin{cases} w_{c,coal}(P) & P_c^{BP} \leq P \leq P_c^{max} \\ w_{c,coal}(P) + w_{c,equ}(P) & P_c^{UP} \leq P \leq P_c^{BP} \\ w_{c,coal}(P) + w_{c,equ}(P) + w_{c,oil}(P) & P_c^{OP} \leq P \leq P_c^{UP} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $w_c(P)$ 为燃煤机组运行成本函数; P 为该机组发电功率; $w_{c,coal}(P)$, $w_{c,equ}(P)$, $w_{c,oil}(P)$ 分别为燃煤机组不同发电功率下的煤耗成本、设备损耗成本和投油稳燃成本; P_c^{max} 为燃煤机组最大技术出力; P_c^{BP} 为基本调峰对应的发电出力; P_c^{UP} 为不投油深调所能达到的最小发电出力; P_c^{OP} 为投油深

调所能达到的最小发电出力。

文献[4]研究了煤耗成本、设备损耗成本和投油稳燃成本模型,结果表明随着调峰深度增加,燃煤机组调峰成本将显著增大。实际分析中,可参照文献[4-5]研究结果,对燃煤机组煤耗成本、设备损耗成本、投油稳燃成本建模量化分析。

此外,部分燃煤机组能够提供启停调峰,即在规定时间内与电网解列,停止对外发电。考虑到当前具备该性能的燃煤机组还相对较少,本文中暂不考虑该类机组影响。

1.2 系统调峰资源分析

调峰能力仅能量化系统中各类型电源调峰能力的数值,但是并不能揭示系统调峰过程中经济性上的差异。为此,本文将引入调峰资源概念,与调峰能力相比,主要差别是根据燃煤机组不同调峰深度下成本的显著差异,以多个调峰能力指标反映不同调峰水平下系统调峰经济性的差别,从而为区域电网优化调度提供参考。

参考文献[6]所提出的燃煤机组调峰成本模型,本文将以基本调峰能力、不投油调峰能力、投油调峰能力三个指标来量化系统调峰资源,可表示为

$$P^{BPA} = P^{EL,max} - \sum_{c=1}^{NC} P_c^{BP} \quad (2)$$

$$P^{UOPA} = P^{BPA} + \sum_{c=1}^{NC} (P_c^{BP} - P_c^{UP}) \quad (3)$$

$$P^{OPA} = P^{UOPA} + \sum_{c=1}^{NC} (P_c^{UP} - P_c^{OP}) \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} P^{EL,max} &= \max_t (P_t^{EL}) \\ &= \max_t (P_t^L + P_t^C - P_t^N) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: P^{BPA} 、 P^{UOPA} 、 P^{OPA} 分别为系统基本调峰能力、不投油调峰能力、投油调峰能力; NC 为系统中燃煤机组台数; $P^{EL,max}$ 为考虑外送及风电、光伏等不调节类型电源发电影响后的系统最大等效负荷; P_t^L 、 P_t^{EL} 分别为某省级电网时刻统调负荷及等效负荷; P_t^C 、 P_t^N 分别为该时刻省间外送电计划及清洁能源发电出力; $\max_t$ 为取时间序列最大值的函数。

以上三项指标能够用于量化省级电网不同运行经济水平下的调峰能力。在区域电网优化调度问题中,为保证区域内调峰资源的科学利用,各省级电网调峰需求应处于相同的调峰能力区间范围内。

2 基于两层架构的区域电网优化调度

2.1 实施框架

在区域电网中,由于各省区电源结构、负荷特性等方面的差异,调峰需求及调峰能力分布并不均衡,为区域电网范围内调峰资源互济提供了基础条件。然而,区域电网规模庞大,若采用统一建模集中优化的方式,其优化模型的规模将过于庞大,求解效率难以满足实际需求。

为此,本文将提出一种基于两层架构的区域电网优化方法,其核心思路是将区域电网优化调度问题拆分为省间送受电计划优化与省内优化调度两个问题,利用区域电网调峰资源均衡调用的特征,通过上述两个问题迭代,实现区域电网优化调度问题的高效求解。两层架构中,上层架构为省间送受电优化,通过调整外送受电计划曲线实现省间调峰资源互济;下层架构为省内优化调度。通过以上两个阶段的迭代,实现区域电网优化调度和调峰资源互济。优化调度流程如图2所示。

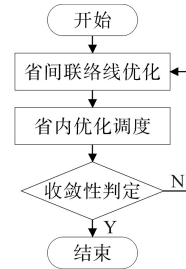


图2 优化调度流程

Fig.2 Optimized scheduling process

2.2 省间送受电计划优化

省间送受电计划的目的是根据各省级电网调峰资源分布差异,优化调整其送受电计划,尽可能使各省级电网调峰需求处于相同调峰能力区间范围,使整个区域电网调峰资源调用最均衡,经济性最佳^[11-12]。

然而由式(2)~式(5)可知,调峰资源所涉及的各项评价指标准确计算的前提是获得明确的外送受电计划及水电、风电、光伏等非燃煤机组发电计划。为此,首轮迭代中,可参考相似日人工给定其初始值,并在迭代中不断更新。根据上述给定的送受电计划及发电计划,参照式(2)~式(4)即可计算得到各省区调峰资源分布情况。在此基础上,以区域电网调峰资源调用量尽可能小且分布尽可能均衡为优化目标,考虑运行日省间送受电量、送受电功率等约束条件,即可构建

省间优化调度模型。该模型可表示为

$$\begin{aligned} & \min(\alpha_1 \sum_{p=1}^{NP} a_p + \alpha_2 \text{Var}(a_p)) \quad (6) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \Delta T \sum_{t=1}^{NT} P_{p,t}^{\text{EX}} = E_p^{\text{EX}} \\ PR_p^{\min} \leq \frac{\max(P_{p,t}^C) - \min(P_{p,t}^C)}{\max(P_{p,t}^C)} \leq PR_p^{\max} \\ P_p^{C,\min} \leq P_p^C \leq P_p^{C,\max} \\ a_p = \begin{cases} 1 & PA_p \geq P_p^{\text{BPA}} \\ 2 & P_p^{\text{UOPA}} \geq PA_p \geq P_p^{\text{BPA}} \\ 3 & P_p^{\text{OPA}} \geq PA_p \geq P_p^{\text{UOPA}} \end{cases} \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

式中: a_p 为调峰状态变量; $\text{Var}(a_p)$ 为区域电网内不同省区调峰状态变量方差; $P_{p,t}^{\text{EX}}$ 为时刻 t 省级电网 p 的送电功率; $\Delta T, NT$ 分别为优化模型时段间隔及时段数; E_p^{EX} 为当天省级电网 p 的计划送电量; $PR_p^{\max}, PR_p^{\min}$ 分别为送电计划调峰率上、下限值; $P_p^{C,\max}, P_p^{C,\min}$ 分别为送电功率上、下限值; PA_p 为根据送电功率计划该省区的调峰需求; $P_p^{\text{BPA}}, P_p^{\text{UOPA}}, P_p^{\text{OPA}}$ 分别为该省区所有燃煤机组所能提供的基本调峰能力、不投油调峰能力和投油调峰能力。

式(6)所示的优化目标包括两部分:第一部分要求区域电网整体调峰资源调用尽可能小,对应区域电网各省区调峰状态变量之和最小;第二部分要求区域电网调峰尽可能均衡,对应区域电网各省区调峰状态变量方差最小。 α_1, α_2 分别为上述两方面优化目标的权重系数。式(7)所示的约束条件依次为送受电量约束、送受电计划调峰率约束、送受电功率限值约束即各省区调峰状态变量约束。该模型本质上为混合整数规划问题,当省级电网数量增加时,所包含的混合整数优化变量也将大幅增加,利用分支定界法可直接对其高效求解^[13-14]。

2.3 省内优化调度

省内优化调度的目标根据省间送电计划优化编制结果,进一步细致编制各省级电网调度计划。省内优化调度以该区域电网燃煤机组运行成本最低为目标,考虑电力电量平衡、网络传输能力和机组运行特性等相关约束条件,该模型表示为^[15-17]

$$\begin{aligned} & \min(\alpha_3 \Delta T \sum_{t=1}^{NT} \sum_{c=1}^{NC} w_{c,t}(P) + \alpha_4 \Delta T \sum_{t=1}^{NT} PNC_t) \quad (8) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} P_t^L + P_t^C = P_t^N + \sum_{c=1}^{NC} P_{c,t}^G - PNC_t \\ PP_c^{G,\min} \leq P_{c,t}^G - P_{c,t-1}^G \leq PP_c^{G,\max} \\ P_c^{\text{OP}} \leq P_{c,t}^G \leq P_c^{G,\max} \\ PNC_t \geq 0 \\ P_l^{S,\min} \leq \sum_{c=1}^{NC} GSDF_{lc} P_{c,t}^G + P_{l,t}^{\text{EB}} \leq P_l^{S,\max} \end{cases} \quad (9) \end{aligned}$$

式中: $w_{c,t}(P)$ 为燃煤机组 c 时段 t 的运行成本; PNC_t 为时刻 t 该区域电网因调峰能力不足所产生的弃风、弃光等清洁能源损失功率; $P_{c,t}^G$ 为燃煤机组 c 时段 t 的发电计划; $PP_c^{G,\max}, PP_c^{G,\min}$ 分别为燃煤机组 c 爬坡能力上、下限; $P_c^{G,\max}, P_c^{\text{OP}}$ 分别为燃煤机组最大技术出力 and 投油调峰所能达到最小发电出力; $P_l^{S,\max}, P_l^{S,\min}$ 分别为运行断面 l 的潮流上、下限; $P_{l,t}^{\text{EB}}$ 为该断面时段的基态潮流; $GSDF_{lc}$ 为燃煤机组与该运行断面的潮流转移分布因子; $\sum_{t=1}^{NT} \sum_{c=1}^{NC} w_{c,t}(P), \Delta T \sum_{t=1}^{NT} PNC_t$ 分别为燃煤电厂运行成本优化项和清洁能源损失电量优化项; α_3, α_4 为对应权重系数。

优化求解上述模型,可以得到各区域电网燃煤机组运行成本最小为目标的调度计划。

2.4 判定分析

本文所提出优化方法的目标在于合理调用区域电网各子区域的调峰资源,降低区域电网整体运行,为此以迭代前后区域电网整体运行成本为参考指标,判定上述优化过程是否满足收敛条件,可表示为

$$\sum_{p=1}^{NP} W_p^A - \sum_{p=1}^{NP} W_p^B \leq \varepsilon \quad (10)$$

式中: NP 为区域电网中省级电网数量; W_p^B, W_p^A 分别为迭代前、后省级电网 p 的运行成本; ε 为允许偏差限值。

各省级电网运行成本即为省内优化调度所得到的最优解。

3 算例分析

3.1 基础数据

为验证所提出算法的有效性,在 IEEE RTS-96 三区域节点系统基础上构造算例。该算例系统共有节点 73 个,划分为对称的三个子区域电网。各区域电网间通过直流联络线连接。

如图 3 所示,该区域电网最大负荷 6 317 万 kW,最小负荷 3 048 万 kW。三个子区域电网中,区域 1 与区域 2 负荷相对较低,且两者相比,区域 1 峰谷差率较低,负荷更为平稳。

如表 2 所示,算例系统火电装机共 7 930 万 kW,其中区域 1 与区域 2 装机均为 2 910 万 kW,区域 3 装机 2 110 万 kW。三个区域电网基本调峰能力对应负荷率均为最大技术出力 50%,在此基础上为尽可能使三个区域电网调峰能力差异性更加

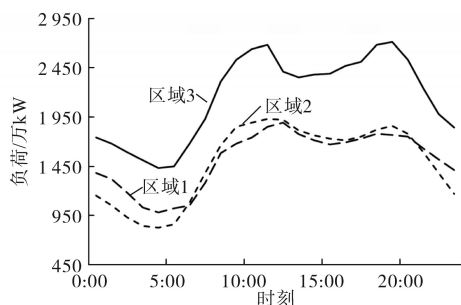


图3 区域电网负荷

Fig.3 Regional grid load

显著,设定区域1燃煤机组调峰能力最强,其燃煤机组不投油调峰最小负荷对应负荷率40%,投油调峰最小负荷对应负荷率35%;区域2燃煤机组不投油调峰最小负荷对应负荷率45%,投油调峰最小负荷对应负荷率40%;区域3则分别对应43%和38%。各区间火电机组运行成本参考文献[5]算例参数。

表2 发电机组基本信息

Tab.2 Basic information of generation unit					
所在节点	所在区域	装机/万kW	基本调峰负荷率/%	不投油调峰负荷率/%	投油调峰负荷率/%
107	区域1	150	50	40	35
113		250	50	40	35
115		100	50	40	35
116		75	50	40	35
118		200	50	40	35
121		200	50	40	35
122		150	50	40	35
123		330	50	40	35
207	区域2	150	50	45	40
213		250	50	45	40
215		100	50	45	40
216		75	50	45	40
218		200	50	45	40
221		200	50	45	40
222		150	50	45	40
223		330	50	45	40
315	区域3	100	50	43	38
316		75	50	43	38
318		200	50	43	38
321		200	50	43	38
322		150	50	43	38
323		330	50	43	38

算例共有风电装机390万kW,每个区域电网各130万kW。如图4所示,三个区域相比,区域1风电呈一定顺调峰特性,有利于该区域调峰改善;区域2则呈明显逆调峰特性,加剧了该区域调峰压力;区域3峰谷时段风电较为平稳。

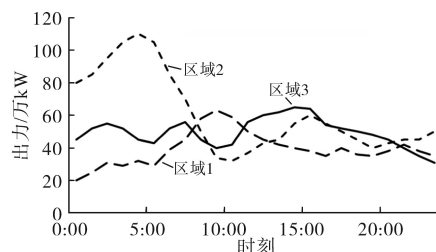


图4 区域电网功率预测

Fig.4 Wind power prediction of regional power grid

3.2 优化结果

算例中区域1和区域2设定为送出区域,区域3设定为受入区域,规定区域1和区域2该运行日计划送电量为6500万kW·h。参照本文所提出的两层架构优化方法,由于无历史相似运行日作为参考,初始时刻设定区域1与区域2按照平均模式,送电计划全天维持270万kW。如图5所示,经过5轮迭代后即满足收敛条件,输出优化结果,表明该算法具有较高的收敛速度。

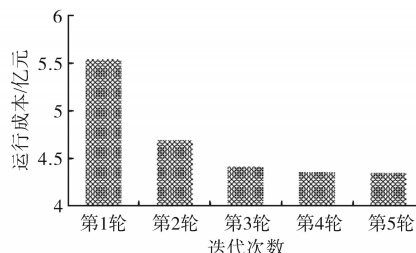


图5 迭代过程

Fig.5 Iteration process

送电计划曲线如图6所示,区域1和区域2送电计划呈现较大的差异,区域1送电计划在夜间低谷时段基本维持其最小送电要求的100万kW,而在高峰时段则逐步增至其最大送电能力,送电计划正调峰特征显著;区域2送电计划夜间低谷时段则处于较高送电功率水平,而受限于全天计划电量限制,高峰时段则处于最小送电要求水平。

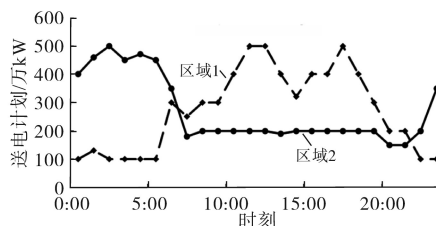


图6 送电计划曲线

Fig.6 Transmission schedule curves

区域1和区域2送电计划之所以产生如此显著的差异,根本原因在于各区域间调峰能力和调峰需求间的差异。区域1负荷峰谷差较小,且新能源发电功率为正调峰类型,在三个区域中调峰需求最小,而其燃煤机组调峰能力最强;区域2峰

谷差相对较大,新能源逆调峰曲线进一步增大了其他调峰需求,而其调峰能力在三个区域中最低。为充分调用三个区域调峰资源,提升区域电网运行效益,优化算法在低谷时段优先安排区域2送电,而将区域1送电安排在负荷高峰时段。

区域调峰资源调用情况如图7所示,优化结果显示,三个子区域电网调峰均发生于1:00—6:00时段范围,进一步统计易知1:00—2:00及6:00三个子区域调峰资源均处于不投油调峰区间;而在3:00—5:00则处于投油调峰区间。这一结果表明本文所提出的优化方法使得各区域电网调峰资源调用基本均衡,从而保证各子区域燃煤机组能处于最佳运行区间,最大限度均摊调峰压力,提升电网运行效益。

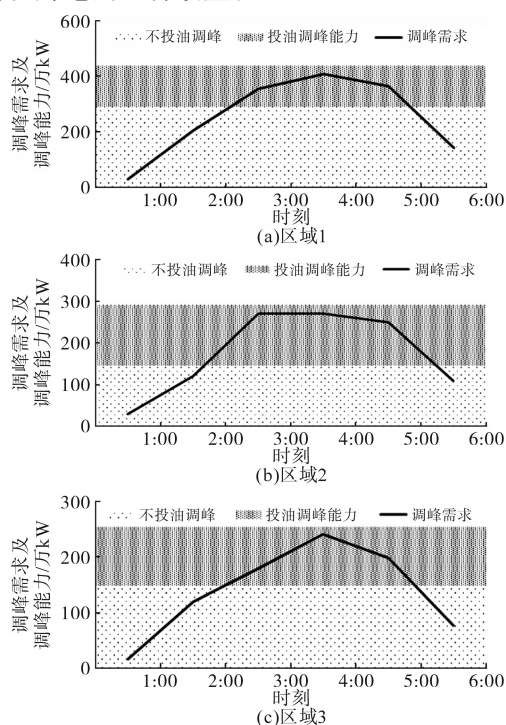


图7 区域调峰资源调用情况

Fig.7 Regional peaking resource invocation

3.3 对比分析

为了进一步说明本文所提出算法的有效性,将对比本文所提出方法与传统等调峰率模式优化方法、区域电网统一建模优化方法的优化结果。传统等调峰率模式下,要求各区域电网所有燃煤机组按照等调峰深度原则均等分摊调峰需求;而区域电网统一建模优化方法下,则通过将整个区域电网统一建模,对其直接优化求解。

表3所示从优化结果和求解时间两个维度对比三种优化算法求解结果。优化结果为区域电网运行成本,可以看出传统等调峰率模式的优化

结果显著高于另外两种优化方法,本文所提出算法与区域电网统一建模算法基本相同。而从求解时间来看,区域电网统一建模算法则是本文所提出算法的3倍左右,其原因在于考虑燃煤电厂调峰特性的电网优化调度方法本质上属于混合整数非线性优化方法,而采用统一建模求解方法将大幅增加待求解问题的规模和复杂性,造成求解效率显著下降。

表3 优化方法对比分析

Tab.3 Comparative analysis of optimization methods

方法	优化结果/亿元	求解时间/s
本文方法	4.33	45
传统等调峰率模式优化方法	4.58	12
区域电网统一建模优化方法	4.34	148

从上述对比分析可以看出,本文所提出的优化方法具有较高的计算精度和求解效率,更适用于解决当前互联电网规模快速增大下我国区域电网优化调度问题。实际上,本文所提出的方法自2018年底开始已经在南方电网得到应用,用于解决南方五省区的网省间协调问题。从实际应用情况来看,调度运行人员基于前期运行情况,能够给出基本符合实际运行需要的初始条件,从而为快速获得符合实际要求的优化结果创造有利条件。近两年的实际应用表明,该方法具有较高的收敛效率,能够用于解决大规模互联电网优化问题,并且提升电网运行效益。

4 结论

本文研究了不同类型电源的调峰特性,重点分析了燃煤电厂的调峰能力,构建了不同深调区间的燃煤机组运行成本模型,在此基础上提出了调峰资源概念。根据燃煤机组调峰经济性差异,提出了基于两层架构的区域电网优化调度方法,以实现区域电网中各子区域的调峰资源互济,对提升区域电网清洁能源消纳能力及提升运行效益具有显著效果。

参考文献

- [1] 应益强,王正风,吴旭,等. 计及新能源随机特性的电网深度调峰多目标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 34-42.
Ying Yiqiang, Wang Zhengfeng, Wu Xu, et al. Multi-objective strategy for deep peak shaving of power grid considering uncertainty of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 34-42.

- [2] 李岩春,张化清,林伟,等. 调峰辅助服务与电量协调优化的日内安全约束经济调度[J]. 中国电力,2018,51(10):95-102.
Li Yanchun, Zhang Huaqing, Lin Wei, *et al.* Intraday security-constrained economic dispatch with coordinative optimization of peak regulation ancillary service and unit energy[J]. *Electric Power*, 2018, 51(10): 95-102.
- [3] 杨丽君,梁旭日,王心蕊,等. 考虑调峰权交易提高风电二次消纳能力的热电联合经济调度[J]. 电网技术,2020,44(5):1872-1880.
Yang Lijun, Liang Xuri, Wang Xinrui, *et al.* Combined heat and power economic dispatching considering peak regulation right trading to improve secondary accommodation capability of wind power[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1872-1880.
- [4] 林俐,邹兰青,周鹏,等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):21-27.
Lin Li, Zou Lanqing, Zhou Peng, *et al.* Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(7): 21-27.
- [5] 林俐,田欣雨. 基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析[J]. 电网技术,2017,41(7):2255-2263.
Lin Li, Tian Xinyu. Analysis of deep peak regulation and its benefit of thermal units in power system with large scale wind power integrated[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2255-2263.
- [6] 黄海煜,熊华强,江保锋,等. 区域电网省间调峰辅助服务交易机制研究[J]. 智慧电力,2020,48(2):119-124.
Huang Haiyu, Xiong Huaqiang, Jiang Baofeng, *et al.* Design of day-ahead trading mechanism for trans-provincial peak-shaving auxiliary service of regional power grid[J]. *Smart Power*, 2020, 48(2): 119-124.
- [7] 陆文甜,林舜江,刘明波,等. 含风电场的交直流互联电力系统网省协调有功调度优化方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):89-96.
Lu Wentian, Lin Shunjiang, Liu Mingbo, *et al.* A regional and provincial grid coordination optimization method for active power dispatch in AC/DC interconnected power system with wind power integration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(7): 89-96.
- [8] Liu Yikui, Wu Lei, Li Jie. A fast LP-based approach for robust dynamic economic dispatch problem: a feasible region projection method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(5): 4116-4119.
- [9] 杨海生,张拓,唐广通,等. 低压缸零出力技术对供热机组深度调峰性能影响及调峰补偿标准探讨[J]. 热能动力工程,2020,35(6):268-273.
Yang Haisheng, Zhang Tuo, Tang Guangtong, *et al.* Influence of zero-output technology of low-pressure cylinder on deep peak regulation performance of heating unit and compensation standard for peak regulation[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35(6): 268-273.
- [10] 胡建根,童家麟,茅建波,等. 典型燃煤锅炉深度调峰能力比较研究[J]. 锅炉技术,2019,50(6):59-64.
Hu Jiagen, Tong Jialin, Mao Jianbo, *et al.* The research of the comparison of deep peak regulation capacity for typical coal-fired boilers[J]. *Boiler Technology*, 2019, 50(6): 59-64.
- [11] 张伟,刘路登,王海港,等. 含风电并网系统鲁棒区间优化调度[J]. 科学技术与工程,2020,20(19):7696-7703.
Zhang Wei, Liu Ludeng, Wang Haigang, *et al.* Robust interval optimal dispatching of power systems with wind power integrated[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(19): 7696-7703.
- [12] 朱永利,高卉,王开艳,等. 计及调峰能力差异性的系统多源优化调度[J]. 水电能源科学,2020,38(1):204-208.
Zhu Yongli, Gao Hui, Wang Kaiyan, *et al.* Multi-source optimization scheduling of system considering the differences of peak shaving capacity[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(1): 204-208.
- [13] Chen Guo, Li Chaojie, Dong Zhaoyang. Parallel and distributed computation for dynamical economic dispatch[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(2): 1026-1027.
- [14] Cai Desmond, Enrique Mallada, Adam Wierman. Distributed optimization decomposition for joint economic dispatch and frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4370-4385.
- [15] 路朋,叶林,汤涌,等. 基于模型预测控制的风电集群多时间尺度有功功率优化调度策略研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(22):6572-6583.
Lu Peng, Ye Lin, Tang Yong, *et al.* Multi-time scale active power optimal dispatch in wind power cluster based on model predictive control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(22): 6572-6583.
- [16] 王淑云,娄素华,吴耀武,等. 计及火电机组深度调峰成本的大规模风电并网鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化,2020,44(1):118-125.
Wang Shuyun, Lou Suhua, Wu Yaowu, *et al.* Robust optimal dispatch of large-scale wind power integration considering deep peak regulation cost of thermal power units[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 118-125.
- [17] 赵建荣,王林,张海龙,等. 基于偏差控制的两级式光伏系统有功调度策略[J]. 电气传动,2017,47(5):54-57.
Zhao Jianrong, Wang Lin, Zhang Hailong, *et al.* Active power dispatch strategy of two-stage photovoltaic inverter based on deviation control[J]. *Electric Drive*, 2017, 47(5): 54-57.

收稿日期:2020-12-07

修改稿日期:2020-12-22