

含柔性负荷的火电机组深度调峰的源荷分层优化调度

樊国旗¹, 刘海南², 黄健¹, 樊国伟³, 段青熙³, 潘伟东¹, 宋朋飞³, 柳庆丰¹

(1. 国网金华供电公司, 浙江 金华 321017; 2. 国网石嘴山供电公司, 宁夏 石嘴山 753000;
3. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;

摘要:风电大规模接入对系统调峰带来巨大挑战,为解决因系统调峰能力不足导致的弃风问题,提出了一种含柔性负荷的火电机组深度调峰的源荷分层优化调度方法。该方法分为上层和下层两个优化模型,上层以系统峰谷差最小为目标,旨在减少系统调峰压力;下层模型以系统成本最小为目标,确定各个火电机组出力。通过实际算例对比柔性负荷优化调度前后系统总成本,验证所提调度方法的经济性和有效性。

关键词:柔性负荷;深度调峰;分层优化

中图分类号:TM734 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2021)03-0007-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210302

Source and Load Hierarchical Optimization Dispatch for Deep Peak Shaving of Thermal Power Units Considering Flexible Load

Fan Guoqi¹, Liu Hainan², Huang Jian¹, Fan Guowei³, Duan Qingxi³,

Pan Weidong¹, Song Pengfei³, Liu Qingfeng¹

(1. State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321017, Zhejiang, China;

2. State Grid Shizuishan Electric Power Supply Company, Shizuishan 753000, Ningxia, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Large-scale wind power integration brings great challenges to system regulation. In order to solve the problems of wind abandonment due to the insufficient system regulation ability, a method of source and load hierarchical optimization dispatch for deep peak shaving considering flexible load is proposed. This method is divided into two optimization models: the upper layer and the lower layer. The upper layer aims to minimize the peak-valley difference of the system to reduce system peak shaving pressure, and the lower layer model aims to minimize the system cost, including the cost of thermal power and wind abandonment costs, and define the thermal power output. The total system cost with and without the improved flexible load optimization dispatch methods are compared. Finally, an actual example is used to verify the economy and effectiveness of the proposed dispatch method.

Key words: flexible load; deep peak shaving; hierarchical optimization

0 引言

风电在促进可持续发展战略发挥着重要作用^[1-2],

基金项目:国家重点研发计划项目“面向跨境互联的多能互补新型能源系统关键技术研究”(2018YFE0208400)

但风电反调峰特性对电力系统调峰带来巨大挑战,需要优化系统运行促进风电消纳^[3-4]。

针对此类问题,文献[5]通过预留部分负荷资源,在需要消纳新能源时,调用该预留负荷提高风电利用率;文献[6-7]通过调用高载能负荷实现削峰填谷作用;文献[8-9]通过火电深度调峰等多种途

径促进新能源消纳;文献[10]在新能源出力高峰时段,通过抽水蓄能增大系统负荷,减少火电机组深度调峰功率;在新能源出力低谷时段,则由抽水蓄能电站放水发电减小火电机组发电压力。

上述文献多是针对源侧或负荷侧进行研究,较少综合考虑负荷和电源分层优化调度进行研究。因此,提出了一种含柔性负荷的火电机组深度调峰的源荷分层优化调度方法,通过上层优化减小系统峰谷差,减少系统开机台数,降低常规调峰最小技术出力;通过下层优化减小系统成本,确定火电机组出力和弃风功率。通过某地区电力系统实际算例,验证所提分层调度方法可有效促进风电消纳,降低系统成本。

1 风电并网对电网特性影响

风电具有逆调峰特点,并网后会加大电网等效负荷峰谷差。当等效负荷小于火电机组最小技术出力时,会导致弃风。等效负荷峰谷差计算如式(1)、式(2)所示。

$$P_{el,原始,t} = P_{1,原始,t} - P_{wind,t} \quad (1)$$

$$P_{el,原始,差} = P_{el,原始}^{max} - P_{el,原始}^{min} \quad (2)$$

式中: $P_{el,原始,t}$ 为原始等效负荷功率; $P_{1,原始,t}$ 为原始负荷功率; $P_{wind,t}$ 为风电功率; $P_{el,原始,差}$ 为原始等效负荷峰谷差; $P_{el,原始}^{max}$ 为原始等效负荷最大功率; $P_{el,原始}^{min}$ 为原始等效负荷最小功率。

图 1 为某日风电、原始负荷、原始等效负荷和未深度调峰时弃风情况。可知,含风电等效负荷峰谷差为 3 611.1 MW,不含风电等效负荷峰谷差 2713 MW,增加了系统调峰负担 893.1 MW;最大弃风功率 1128 MW,充风量为 5 066.7 MWh,弃风率为 24.8%,弃风较为严重。因此需要考虑调用其他资源减小系统调峰压力,减少弃风。

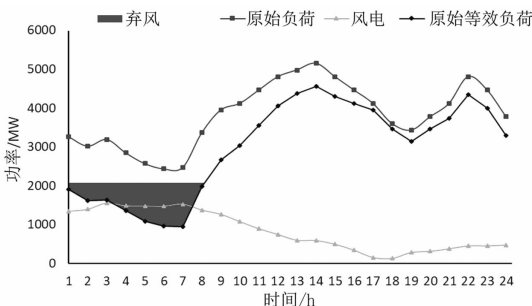


图 1 风电并网对系统的影响

2 柔性负荷、火电机组深度调峰分析

2.1 火电机组深度调峰

火电机组常规调峰由于受到最小技术出力 ($50\% P_N$, P_N 为机组最大技术出力) 限制,其调峰空间小。系统因调峰能力不足导致弃风,因此需要增加系统调峰能力。通过技术改造,火电机组最小出力可先降低至不投油火电机组最小技术出力 ($40\% P_N$),然后再降低至投油火电机组最小技术出力 ($30\% P_N$),这样可以增大火电机组调峰空间,进而接纳更多风电。火电机组出力变化如图 2 所示。

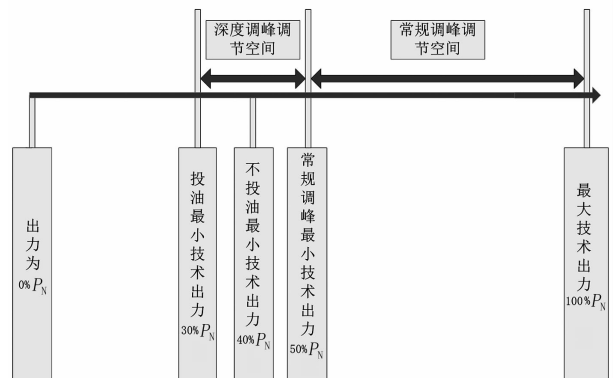


图 2 火电机组出力变化

火电机组深度调峰主要产生机组损耗成本、投油成本。其深度调峰增加的成本为 10 ~ 50 元/MWh^[11],而深度调峰补偿价格约为 200 元/MWh^[12],由于增加火电机组收益,因此火电机组愿意参与深度调峰。

火电机组深度调峰机组损耗成本为

$$C_{f,深度}^{损耗} = \frac{\beta \cdot S_J}{2 \cdot N_{F,t}} \quad (3)$$

式中: β 为机组损耗系数; S_J 为机组购机成本; $N_{F,t}$ 为机组 t 时刻的转子致裂周次,和火电机组出力大小有关。

火电机组深度调峰机组投油成本为

$$C_{f,深度}^{投油} = Q_{oil,t} \cdot c_{oil} \quad (4)$$

式中: $Q_{oil,t}$ 为深度调峰投油量; c_{oil} 为投油成本单价。

2.2 柔性负荷

柔性负荷可以改变生产时间,从而优化电网等效负荷,改善峰谷差特性。当需要柔性负荷(如电解铝)调峰时,首先采用电压调节功率,利用电解铝额定工作电压在 $\pm 10\%$ 范围内变化不会影响产品质

量特性进行调节;当所需参与调峰功率增加(减少)超过 30 MW 时,采用投入(退出)一组电解铝负荷(30 MW)进行调节,使电压恢复至额定工作电压,以此类推,从而可以实现柔性负荷连续调峰效果。柔性负荷参与调用如图 3 所示。

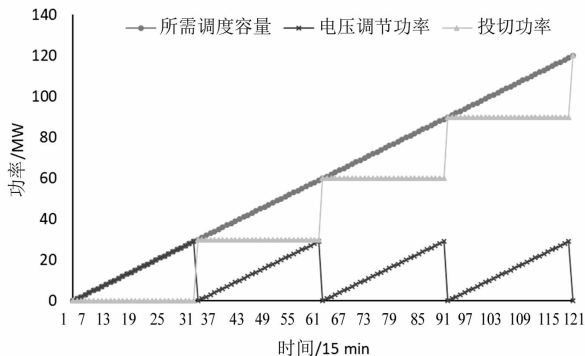


图 3 柔性负荷参与调用

电解铝耗能大,因此对电价成本比较敏感,但转移负荷本身较为容易且不会增加成本,而获得的调用补偿可以减少生产费用。因此电解铝负荷参与调度意愿较强。

调用容量约束为

$$\Delta P_{gl}^{\min} \leq u_t^{gl} \Delta P_{gl,t} \leq \Delta P_{gl}^{\max} \quad (5)$$

式中: ΔP_{gl}^{\max} 和 ΔP_{gl}^{\min} 分别为柔性负荷可调用容量的上下限; $\Delta P_{gl,t}$ 为柔性负荷可调用电量; u_t^{gl} 为布尔变量,表示调用高载能负荷情况,取值为 +1 表示增加高载能负荷,-1 表示减少高载能负荷,0 表示不调用高载能负荷。

调用时间约束为

$$\begin{cases} t_{gl,on}^{\min} \leq t_{gl,on} \leq t_{gl,on}^{\max} \\ t_{gl,off}^{\min} \leq t_{gl,off} \leq t_{gl,off}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $t_{gl,on}$ 、 $t_{gl,off}$ 分别为连续增加、减少高载能负荷时间; $t_{gl,on}^{\min}$ 和 $t_{gl,on}^{\max}$ 分别为增加高载能负荷时间上下限; $t_{gl,off}^{\min}$ 和 $t_{gl,off}^{\max}$ 分别为减少高载能负荷时间上下限。

3 分层优化调度模型

3.1 分层优化调度模型结构

分层优化调度模型如图 4 所示。

上层模型以优化等效负荷峰谷差最小为目标,提高火电机组低谷时间出力,减少深度调峰调用功率,进而减少深度调峰调用成本;降低火电机组高峰时间出力,增大火电机组向上调节能力(火电机组最大技术出力 and 当前出力差值),从而提高火电机

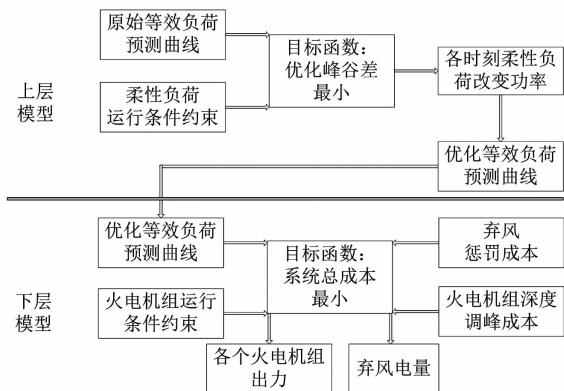


图 4 分层优化模型结构

组面对风电缺额或者其他火电机组故障时的风险能力。柔性负荷参与调峰后能够优化等效负荷曲线。

下层模型以系统成本最小为目标,系统成本包括火电机组成本、弃风成本和柔性负荷调用成本。火电机组容量越大成本越低,所以首先调用大容量机组深度调峰,其次调用小容量机组深度调峰。

3.2 分层优化调度模型目标函数

上层优化模型以优化等效负荷峰谷差最小为目标,即

$$\min(P_{1,优化}^{\max} - P_{1,优化}^{\min}) \quad (7)$$

式中: $P_{1,优化}^{\max}$ 为柔性负荷优化后最大负荷; $P_{1,优化}^{\min}$ 为柔性负荷优化后最小负荷。

总调用柔性负荷成本 C_n 为

$$C_n = \sum_{t=1}^T |\Delta P_{n,t}| \cdot c_n \quad (8)$$

式中: $\Delta P_{n,t}$ 为调用柔性负荷功率, $\Delta P_{n,t}$ 为正表示增大柔性负荷功率, $\Delta P_{n,t}$ 为负表示减小柔性负荷功率; T 为调用柔性负荷时间; c_n 为调用柔性负荷单位成本。

下层优化模型以系统成本最小为目标。

$$\min(C_{w,a} + C_f) \quad (9)$$

式中: $C_{w,a}$ 为弃风成本; C_f 为火电机组成本。

$$C_{w,a} = \sum_{t=1}^T (P_{w,t} - P_{w,t}^s) \cdot c_w \quad (10)$$

式中: $P_{w,t}$ 为风电理论功率; $P_{w,t}^s$ 为风电实际功率; T 为弃风时间; c_w 为弃风单位成本。

$$C_f = \sum_{t=1}^{T''} \sum_{i=1}^N (a_i P_{f,i,t}^2 + b_i P_{f,i,t} + c_i) + C_{f,深度} \quad (11)$$

式中: T'' 为火电运行的时间总数; N 为火电机组的数量; $P_{f,i,t}$ 代表第 i 台火电机组 t 时刻的功率大小;

a_i, b_i, c_i 分别为第 i 台火电机组发电成本的二次、一次和常数系数; $C_{f, \text{深度}}$ 为火电机组深度调峰成本^[10]。

3.3 约束条件

约束条件包括系统备用约束、系统功率平衡、火电机组常规调峰和深度调峰出力上下限约束, 分别如式(12)至式(15)所示。

$$\sum_{i=1}^N P_{f,i}^{\max} \geq 1.05 P_{\text{el,优化}}^{\max} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{f,i,t} + P_{w,t}^s = P_{l,t} + \Delta P_{\text{fl},t} \quad (13)$$

$$P_{f,i}^{\min} \leq P_{f,i,t} \leq P_{f,i}^{\max} \quad (14)$$

$$P_{f,i, \text{深度调峰}}^{\min} \leq P_{f,i,t} \leq P_{f,i, \text{最小技术出力}}^{\min} \quad (15)$$

式中: $P_{f,i}^{\max}$ 为第 i 台火电机组最大功率; $P_{\text{el,优化}}^{\max}$ 为优化后最大等效负荷; 1.05 表示备用为 5%; $P_{f,i,t}$ 为第 i 台火电机组 t 时功率; $P_{l,t}$ 为原始负荷功率; $P_{f,i}^{\min}$ 为第 i 台火电机组最小技术出力功率; $P_{f,i, \text{深度调峰}}^{\min}$ 为第 i 台火电机组深度调峰时最小技术出力功率。

4 算例分析

4.1 仿真系统设计

以图 1 所示的风电并网数据和表 1 所示的火电机组参数进行仿真。火电机组最小技术出力为额定容量的 50%。

表 1 火电机组参数

容量/MW	数量	a	b	c
600	4	0.010 14	165.6	6 877.2
300	6	0.078 42	139.3	9 604.4
200	3	0.744 60	172.4	2 444.2

风电上网电价为 250 元/MWh, 补贴电价为 350 元/MWh, 弃风单位成本为 600 元/MWh; 柔性调用单位成本为 153 元/MWh, 柔性负荷参与调度每组容量为 30 MW, 最大可调用 20 组。

4.2 仿真验证结果

1) 经仿真该日原始等效负荷、柔性负荷优化等效负荷、柔性负荷调用功率如图 5 所示。

由图 5 可知, 在原始负荷低谷期增加调用柔性负荷为 1 820.86 MWh, 在原始负荷高峰期减小柔性负荷为 1 148.3 MWh, 总调用柔性负荷为 2 969.17 MWh; 柔性负荷优化后等效负荷峰谷差为 2 571.8 MW, 峰谷差降低 28.78%; 优化前最

大等效负荷为 4553 MW, 优化后最大等效负荷为 4113 MW, 减小了 440 MW; 优化前最小等效负荷为 1 541.8 MW, 优化后最小等效负荷为 941.9 MW, 增大最小等效负荷 599.9 MW。

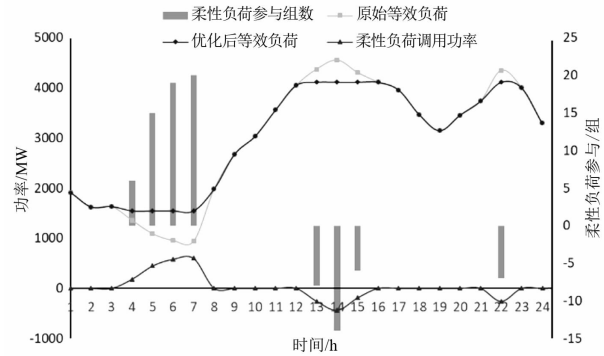


图 5 柔性负荷优化等效负荷与原始等效负荷对比

2) 柔性负荷优化等效负荷前后开机台数对比如表 2 所示。

表 2 柔性负荷优化等效负荷前后开机数对比

单位: 台

机组	600 MW 机组	300 MW 机组	200 MW 机组
柔性负荷优化前	4	6	3
柔性负荷优化后	4	6	1

由表 2 可知, 柔性负荷优化等效负荷后可减少 200 MW 机组开机两台。

3) 柔性负荷优化前后等效负荷火电机组出力对比如图 6 所示。

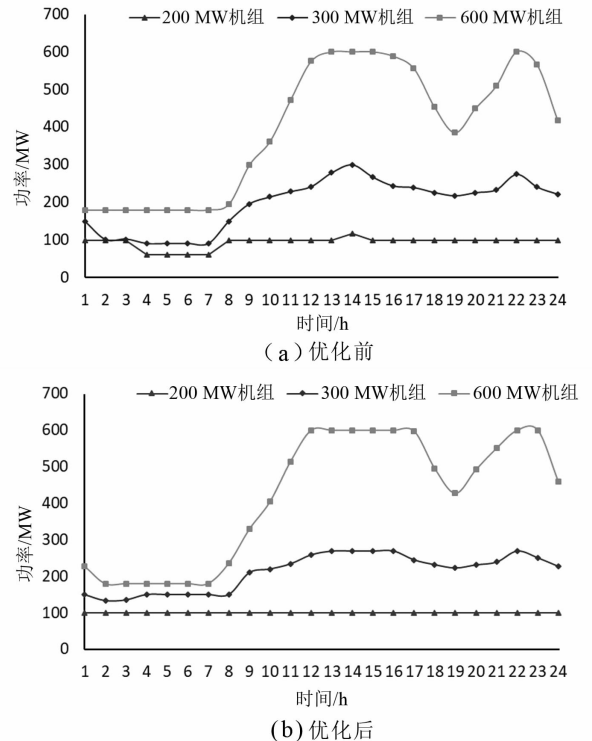


图 6 柔性负荷优化前后火电机组出力对比

由图6可知:柔性负荷优化后提高火电机组平均出力,其中600 MW、300 MW和200 MW单台机组平均出力分别提高21.84 MW、15.51 MW和5.93 MW;提高了火电机组平均利用小时。

4) 柔性负荷优化前后火电机组深度调峰和弃风功率对比如图7所示。

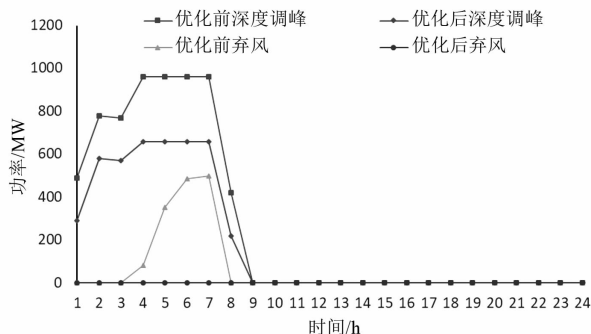


图7 柔性负荷优化前后火电机组深度调峰与弃风对比

由图7计算可知,柔性负荷优化前火电机组深度调峰为6 293.4 MWh,而优化后为4 285.9 MWh,减少火电机组深度调峰2 007.5 MWh;柔性负荷优化后没有弃风,而优化前弃风1 413.4 MWh,减少弃风1 413.4 MWh。

5) 柔性负荷优化前后成本对比如表3所示。

表3 柔性负荷优化前后成本对比

优化状态	火电运行成本/万元	火电深度调峰成本/万元	弃风成本/万元	柔性负荷成本/万元	总成本/万元
优化前	1 410.41	13.39	84.8	0	1 508.6
优化后	1 363.42	8.88	0	45	1 417.3

可以看出,柔性负荷优化后火电机组运行成本减小了46.99万元,火电机组深度调峰成本降低了4.51万元,弃风成本降低了84.8万元,虽然柔性负荷调用成本增加了45万元,但总成本仍降低91.3万元。由于增加的柔性负荷成本45万元补偿给了柔性负荷企业,达到了柔性负荷企业和电网企业双赢的目的。

5 结语

针对风电并网系统调峰能力不足问题,提出含柔性负荷的火电机组深度调峰的分层优化调度方法;上层优化等效负荷,可减小系统峰谷差;下层优化系统成本,减少火电机组深度调峰成本、新能源限电成本以及系统总成本。

通过仿真验证,所提柔性负荷优化火电机组深

度调峰可以减少火电机组开机台数,提高单台火电机组平均利用小时。同时可以降低柔性负荷企业成本,达到电网企业和柔性负荷企业双赢的目的。

参考文献

- [1] 张振宇,王文倬,马晓伟,等. 基于风险控制的新能源纳入电力系统备用方法[J]. 电网技术,2020,44(9): 3375-3382.
- [2] 苗树敏,滕予非,罗彬,等. 计及风电不确定性的风-水短期联合优化调度方法[J]. 四川电力技术,2020,43(2):1-6.
- [3] 樊宇琦,丁涛,孙瑜歌,等. 国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J/OL]. 中国电机工程学报:1-24[2020-11-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201408>.
- [4] 马超,肖汉,李嘉逸. 基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法[J]. 四川电力技术,2021,44(1): 77-82.
- [5] 王伯伊,庄斌,刘迪,等. 基于负荷资源预留的智能用电设备群调控策略[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(3):92-98.
- [6] 刘海南,蔺红,樊国旗,等. 基于风荷耦合特性的源荷储的优化调度[J]. 智慧电力,2021,49(1):42-47.
- [7] 樊国旗,樊国伟,刘昌东,等. 基于改进的电力现货交易下调度研究[J]. 四川电力技术,2020,43(4):15-19.
- [8] 杨秋霞,高辰,刘同心,等. 考虑柔性负荷的含光伏电力模糊随机优化调度风险研究[J]. 太阳能学报,2020,41(7):142-151.
- [9] 任景,薛晨,马晓伟,等. 计及新能源资源分级的柔性调度模型预测控制[J]. 智慧电力,2020,48(9):30-36.
- [10] 薛晨,任景,张小东,等. 含虚拟储能的新能源高渗透电网深度调峰备用决策模型[J]. 中国电力,2019,52(11):35-43.
- [11] 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.
- [12] 国家能源局西北监管局. 西北区域省间调峰辅助服务市场运营规则[S]. 西安:国家能源局西北监管局,2020.

作者简介:

樊国旗(1993),男,硕士,主要研究方向为电力系统调度及新能源消纳。

(收稿日期:2021-03-19)