

基于调峰能力分析的电网弃风评估方法 及风电弃风影响因素研究

王丙乾, 董剑敏, 关前锋

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 由于风电出力的间歇性、随机性和反调峰特性, 大规模可再生能源风电并网造成京津唐地区冬季供热季弃风现象愈加严重。[方法] 为了能够定量研究电源调峰、联络线外送等弃风因素变化时对电网弃风的影响情况, 从而准确衡量不同情形下电网对风电的接纳能力, 文章从系统调峰的角度, 以电热负荷平衡约束、机组出力约束为条件建立风电弃风评估模型。[结果] 对京津唐电网弃风情况的模拟结果表明, 常规电源调峰越深、联络线外送深度越小, 系统接纳风电出力的空间越大; 而过快的风电装机容量增长速度和较高的热电机组供热比率, 会抑制风电出力, 从而导致弃风。[结论] 因此, 可通过激励系统中常规电源积极主动进行调峰、控制联络线外送峰谷差和热电机组出力范围来提高系统接纳风电的能力; 而根据未来规划水平, 选取某一比例的风电装机容量增长速度, 即可确定最佳的风电并网规模, 控制弃风电量在一定水平内。

关键词: 调峰; 弃风; 评估模型; 影响因素

中图分类号: TM614; TM721

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)02-0071-06

Research on the Evaluation Method and Influencing Factors of Wind Power Curtailment Based on System Regulation Capability Analysis

WANG Bingqian, DONG Jianmin, GUAN Qianfeng

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] Due to the intermittent, random and anti-peaking characteristics of wind power output, large-scale renewable energy wind power grid integration has made serious problem of wind power curtailment in winter heating period within Beijing-Tianjin-Tangshan region. [Method] To make quantitative research of the influence on wind power curtailment when power-peaking, tie-line delivery changes and accurately measure the accommodation capacity of wind power under different scenarios, the wind power curtailment evaluation method is established from the perspective of system peak-load regulation and subject to the balance of electric load, heating load and generator output constraints. [Result] The results show that the deeper depth of conventional peak-load regulation and the smaller depth of outside system delivery is, the large space of wind power accommodation capacity is accepted; while rapid growth of wind power installed capacity and higher rate of thermal power unit heating will inhibit wind power output, resulting in wind power curtailment. [Conclusion] So the ability of wind power accommodation capacity can be improved by activating the system peak-load regulation, controlling the liaison lines peak-to-valley difference and reduce the output range of the thermal power unit. While selecting a certain proportion of wind power installed capacity growth rate can control the amount of wind power to be rejected within a certain level.

Key words: peak-load regulation; wind power curtailment; evaluation method; influencing factors

近年来, 随着京津唐地区供热机组装机容量的不断提升和风电规模的快速发展, 在冬季供暖期因“风热冲突”所导致的大量弃风已经成为全社会关注的问题^[1-2]。弃风问题不仅造成了巨大的资源浪

费,还严重影响着电网企业的经营管理。因此,如何有效识别影响风电弃风的各种关键因素,并综合评估各类因素对弃风电量的影响大小,对于增强电网接纳风电能力、提高电网企业经营效益显得极为重要。

目前,已有诸多文献对该问题进行了研究,文献[3-5]主要从输电容量不足、配电线路阻塞、电源结构比例失调、并网网架薄弱等方面分析了风电弃风的主要原因;文献[6]从政策层面提出了弃风管理的相关建议,分析得出抽水蓄能建设规模、跨区输电能力、峰谷差电价是最主要影响因素。此外,还有学者从电网运行经济性的角度,分析热负荷及系统容量对风电弃风的影响^[7-8]。上述研究或是从定性的角度对弃风原因进行叙述,缺乏量化的研究方法作依据和支撑;或是仅从某一方面提出解决弃风的途径,而忽略了导致风电弃风的其他影响因素。

作为一种清洁能源和可再生能源,风电并网的技术因素主要由三方面决定:电源结构与系统调峰能力、电网的负荷特性与负荷水平、风电机组出力特性与风电技术装备水平,其中电源结构与系统调峰能力是电网消纳大规模风电的刚性物质基础^[9-10]。因此,本文主要从电源结构与调峰能力的角度,分析影响风电消纳水平的各种关键因素。虽然文献[11]将 Balmorel 模型应用到风电消纳能力的量化研究,分析电源调峰深度、区域外送需求等因素对弃风的影响,但模型构建较为复杂,计算量大。本文在该方案的基础上,以电热负荷平衡约束、机组出力约束为条件建立新的风电弃风评估模型,其原理简单透明,易于理解,计算量小。所建模型同样能够定量研究电源调峰、联络线外送等因素在不同情形下对电网弃风的影响情况。最后以京津唐电网作为算例进行实证分析。

1 基于调峰能力分析的弃风评估原理

1.1 弃风机理

在京津唐等主要依靠火电电源进行调峰的系统,在进入冬季后大量热电联产机组承担供热任务,调峰能力大大下降,再加上波动性、随机性和反调峰特性极强的风电的大规模接入,进一步增加了系统的调峰压力,只能被迫进行弃风,如图1所示。

可以看出,火电等常规电源最小技术出力、不可调节出力与风电最大可能出力叠加之后形成发电总出力曲线,由于在负荷低谷时段常规机组无法降低出力,电网的调峰能力和最小开机出力满足不了接纳大规模风电的要求,导致发电总出力曲线超出负荷叠加外送需求,即产生弃风。

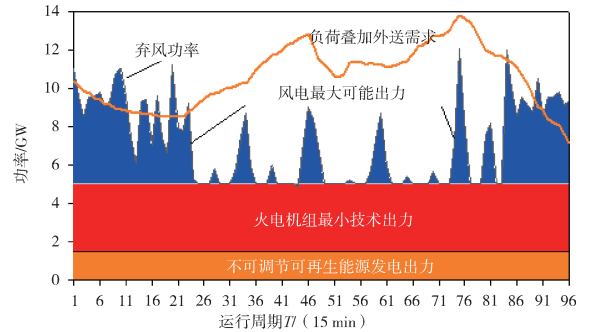


图1 风电弃风机理

Fig. 1 Mechanism of wind power curtailment

1.2 弃风评估基本思路

弃风功率为每个时段风电最大可能出力与风电每个时段实际出力的差值;每个时段弃风电量和风电发电量累加形成周期时段内风电弃风电量和风电发电量的总和;而弃风比例为周期时段内弃风电量与风电发电量的比值。因此,如何准确得到各时段的弃风功率显得极为关键。本文的方法是,首先通过对典型日各时段的负荷曲线进行模拟,并由机组出力、电源结构等数据计算各时段可接纳的风电出力空间;然后对各时段的风电出力曲线进行模拟得到风电最大可能出力空间;在此基础上计算典型日不同时段弃风电量,由此得到日弃风功率时序曲线、弃风比例等指标;最后综合分析常规电源调峰、联络线外送需求、风电接入规模及供热比率等因素在不同配比情形下对风电弃风的影响情况。弃风评估研究思路如图2所示。

2 风电弃风评估模型

2.1 目标函数

暂不考虑机组运行的经济效益和环境效益,在满足负荷和运行约束的前提下,建立的系统弃风评估模型如下:

$$F_{q,t} = \sum_{k=1}^K P_{wdf,k,t} - \left[P_t - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (P_{CON,i,t} + P_{CHP,j,t}) \right] \quad (1)$$

$$F_q = \sum_{t=1}^T F_{q,t} \quad (2)$$

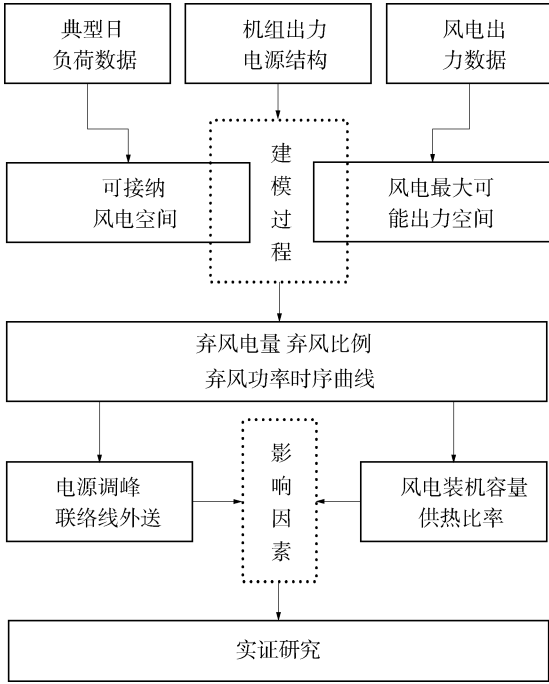


图2 弃风评估研究思路

Fig. 2 Research ideas of wind power curtailment

$$\sigma = \frac{F_q}{\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K P_{wdf,k,t}} \quad (3)$$

式中: $F_{q,t}$ 为系统在 t 时刻的弃风量; F_q 为运行周期内的总弃风量; σ 为弃风比例; $P_{CON,i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时刻的输出功率; $P_{CHP,j,t}$ 为热电机组 j 在 t 时刻的输出功率; $P_{wdf,k,t}$ 为风电机组 k 在 t 时刻的预测功率; P_t 为 t 时刻的系统总负荷; T 为运行周期。

2.2 约束条件

1) 电力平衡约束

$$\sum_{i=1}^I P_{CON,i,t} + \sum_{j=1}^J P_{CHP,j,t} + \sum_{k=1}^K P_{wdf,k,t} + \Delta P = P_t \quad (4)$$

式中: $\Delta P = \begin{cases} -\Delta P_1, & \text{高峰时刻} \\ \Delta P_2, & \text{低谷时刻} \end{cases}$; ΔP_1 为高峰时刻备用容量; ΔP_2 为低谷时刻调峰裕度。 $P_{wdf,k,t}$ 为风电机组 k 在 t 时刻的并网出力。

2) 热力平衡约束

$$\sum_{j=1}^J Q_{CHP,j,t} = Q_{D,t} \quad (5)$$

式中: $Q_{CHP,j,t}$ 为热电联产机组 j 在 t 时刻的供热量; $Q_{D,t}$ 为 t 时刻的热负荷需求量。

3) 机组出力约束

$$P_{CON,min} \leq P_{CON,t} \leq P_{CON,max} \quad (6)$$

$$P_{CHP,min} \leq P_{CHP,t} \leq P_{CHP,max} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{Wd,t} \leq P_{Wd,max} \quad (8)$$

式中: $P_{CON,min}$ 、 $P_{CON,max}$ 、 $P_{CHP,min}$ 、 $P_{CHP,max}$ 分别为纯凝机组出力上下限和热电机组出力上下限; $P_{Wd,max}$ 为风电机组最大出力。

4) 备用及调峰约束

电网正常运行时, 总用电负荷应大于全网机组最小出力并且小于全网机组最大出力, 才能保证发供电平衡。考虑高峰时段备用容量和低谷时段调峰裕度:

$$P_H + \Delta P_1 \leq \sum P_{G,max} \quad (9)$$

$$P_L - \Delta P_2 \geq \sum P_{G,min} \quad (10)$$

式中: P_H 、 P_L 为电网高峰和低谷时段负荷; ΔP_1 、 ΔP_2 为高峰时段备用容量和低谷时段调峰裕度; $\sum P_{G,max}$ 、 $\sum P_{G,min}$ 为全网机组最大出力和最小出力。

3 算例分析

3.1 基本数据

本文选取京津唐电网作为研究对象, 以 2015 年初京津唐电网的实际情况作为研究的基础数据。取 $T=96$, 即将全天分为 96 个时段, 每 15 min 为 1 个时段, 则(1)式、(2)式、(3)式分别表示系统每 15 min 时段内的弃风量、日弃风总量和日弃风比例。

负荷数据由冬季典型日电网实时运行情况为依据; 风功率预测数据由北京、天津和冀北送入 D5000 发电计划系统的风电发电预计划曲线作为依据; 电网高峰备用容量不低于 2 GW, 低谷调峰裕度不低于 600 MW; 风电装机容量 9 GW。

3.2 算例结果

假定热电机组按 80% 比例供热出力, 下限按 15.5 GW 计算, 上限 20 GW 计算, 根据模型计算出各时段的弃风功率分布如表 1 所示, 各时段弃风功率与日负荷和风电出力的关系曲线如图 3 所示 (左纵坐标为风电出力和弃风功率单位; 右纵坐标为日负荷单位)。

表1 典型如各时段弃风功率分布

Tab. 1 Load distribution of wind power curtailment in each period
GW

时段	弃风功率	时段	弃风功率	时段	弃风功率	时段	弃风功率
1	4.906 52	25	5.049 46	49	0.265 19	73	0
2	5.141 75	26	4.409 76	50	0.513 09	74	0
3	5.889 94	27	3.949 24	51	0.383 21	75	0
4	6.143 08	28	3.314 28	52	0.910 79	76	0
5	6.365 46	29	2.978 40	53	0.050 39	77	0
6	6.469 69	30	2.372 11	54	0	78	0
7	6.609 85	31	1.987 88	55	0.233 29	79	0
8	6.629 03	32	1.815 25	56	0	80	0
9	7.017 89	33	1.728 26	57	0.027 23	81	0.096 63
10	7.104 90	34	1.126 17	58	0	82	0
11	7.005 21	35	0.250 29	59	0	83	0
12	6.837 95	36	0	60	0	84	0.849 91
13	6.743 09	37	0	61	0.090 12	85	0.749 36
14	6.547 34	38	0	62	0	86	0.439 77
15	6.864 82	39	0	63	0.055 72	87	0.669 32
16	6.561 16	40	0	64	0	88	1.017 12
17	6.615 48	41	0	65	0	89	2.278 67
18	7.070 36	42	0	66	0	90	3.076 08
19	6.808 50	43	0	67	0	91	3.395 02
20	7.251 19	44	0	68	0	92	2.953 43
21	6.721 63	45	0	69	0	93	2.683 20
22	6.518 87	46	0	70	0	94	2.699 48
23	6.504 32	47	0	71	0	95	3.024 73
24	5.685 12	48	0	72	10.833 38	96	3.316 95

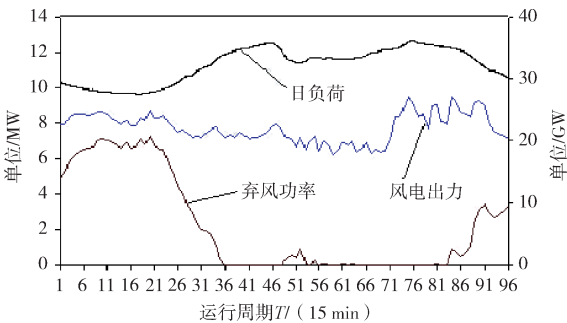


图3 各时段弃风功率与电网负荷和风电出力的关系曲线
Fig. 3 Relationship between wind power curtailment with power grid load and wind power output

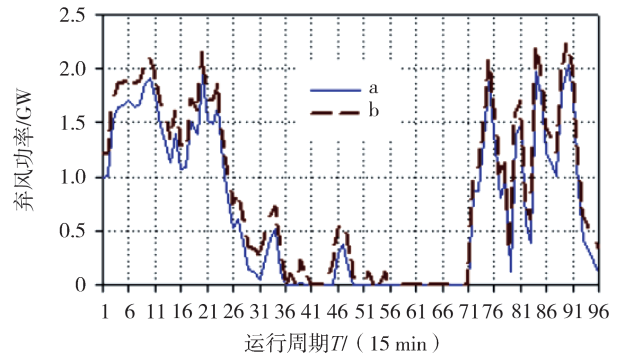
从图表可以看出，风电出力在白天较小，夜间最大，且波动较大，与日负荷的变化规律正好相反，风电弃风现象在冬季供暖期的负荷低谷时段(21:00~次日06:00)最严重。各时段弃风电量

总和为53.693 22 GWh，风电发电量为185.541 07 GWh，弃风比例高达28.94%；其中负荷低谷时段弃风电量为45.579 07 GWh，占典型日弃风总量的84.88%。这是因为在京津唐冬季供暖期，由于供热火电机组受到“以热定电”的出力约束，其最大开机能力和调峰水平都会下降，从而导致系统最小出力升高，压缩了风电的最大并网空间；同时，由于风电出力具有明显的反调峰特性，因此弃风现象主要发生于冬季供暖期的日负荷低谷时段。

3.3 风电弃风的影响因素分析

3.3.1 常规火电调峰能力对弃风电量的影响

本文假定300 MW及以上常规火电机组的最小出力率为50%。事实上，锅炉的最低稳燃负荷正常可以达到机组额定出力水平的30%，考虑到炉型和煤质的影响，其最小出力一般也可达到40%。在其他条件不变的情况下，当把300 MW及以上常规火电机组的最小出力深调至40%时，各时段弃风功率分布如图4所示。



注：a、b分别为火电最小出力40%、50%时的弃风功率。

图4 不同火电最小出力下的弃风功率分布

Fig. 4 Load distribution of wind power curtailment under different conditions of thermal power minimum output

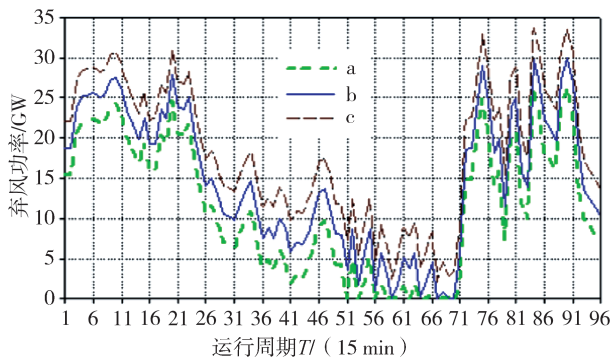
通过模型计算，当火电机组最小出力为40%时，日弃风电量为18.443 36 GWh，日弃风比例为24.57%，明显小于最小出力为50%时的情况(日弃风电量为23.637 87 GWh，日弃风比例为31.49%)。这就是说，在总负荷、风电出力等其他因素不变的情况下，系统接纳风电的能力随着火电机组最小出力水平的降低而增加。这是因为降低火电最小出力即可降低系统的最小开机出力，发电总出力曲线(如图1所示)可调范围增大，从而可为风电出力提供更大的接纳空间。

这也验证，常规火电调峰能力不足确实是导致

风电弃风的重要原因, 现实中可通过采取搭建调峰补偿交易平台, 通过有效的补偿和激励机制, 鼓励系统中常规电源积极主动进行调峰; 并鼓励抽水蓄能、燃气机组、蓄能电池等多种调峰手段协同建设, 充分发挥调峰电源的调峰潜力, 以提高系统接纳风电的能力。

3.3.2 联络线外送方式对弃风电量的影响

在其他条件不变的情况下, 当联络线外送调峰深度从 10% ~ 30% 变化时, 日弃风功率的变化情况如图 5 所示。



注: a、b、c 分别为联络线外送深度 10%、20%、30% 时的弃风功率。

图 5 不同联络线外送深度下的弃风功率分布

Fig. 5 Load distribution of wind power curtailment under different conditions of tie-line delivery depth

通过模型计算, 当联络线外送调峰每深调 10%, 日弃风电量分别增加 4.255 69 GWh 和 5.92 18 GWh, 日弃风比例分别增加 3.63% 和 4.77%, 即随着调峰深度的增加, 弃风电量和弃风比例都在增加。这是因为外送联络线的调峰深度越深, 负荷低谷时段的送出功率就越小(相当于增大了区域内发电负荷的峰谷差), 导致系统接纳风电并网的空间也就越小, 因此随着联络线外送调峰深度的增加, 弃风电量也随之加大。

由此可见, 如果采取扩大联络线外送能力的方式提高风电的接纳能力, 联络线外送的峰谷差就应该低于系统的综合调峰深度, 否则, 扩大联络线外送反而会增加区域内系统的调峰负担, 从而产生更严重的弃风现象。

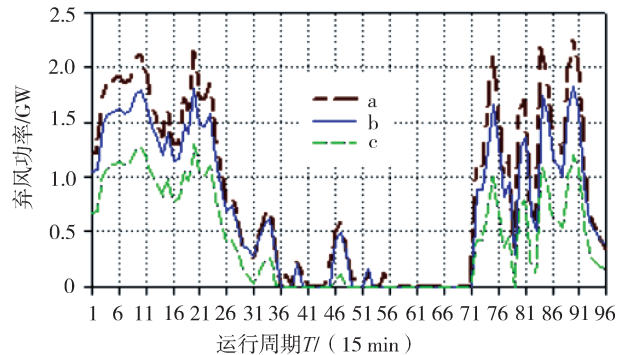
3.3.3 风电装机容量与弃风电量间的关系曲线

京津唐地区在 2013—2015 年中, 风电装机容量和冬季典型日负荷平均值的变化情况如表 2 所示。

表 2 京津唐风电装机容量与典型日负荷增长情况
Tab. 2 Changes of wind power installed capacity and daily load in Beijing-Tianjin-Tangshan region

年份/年	风电装机容量/GW	典型日负荷平均值/GW	风电装机容量增长比例/%	典型日负荷增长比例/%
2013	4.0	27.214 75	—	—
2014	6.0	29.582 43	50	8.7
2015	9.0	32.215 27	50	8.9

假定系统在这 3 年内的常规电源结构、机组调峰能力等因素基本保持不变, 随着风电装机容量和冬季典型日负荷水平的增长, 弃风情况也发生了很大变化, 根据模型计算出的日弃风功率分布如图 6 所示, 不同风电装机容量下的风电消纳情况如表 3 所示。



注: a、b、c 分别为风电装机容量 9 GW、6 GW、4 GW 时的弃风功率。

图 6 不同风电装机容量下的弃风功率分布

Fig. 6 Load distribution of wind power curtailment under different conditions of wind power installed capacity

表 3 不同风电装机容量下的风电消纳能力分析表

Tab. 3 Consumptive ability of wind power under different conditions of wind power installed capacity

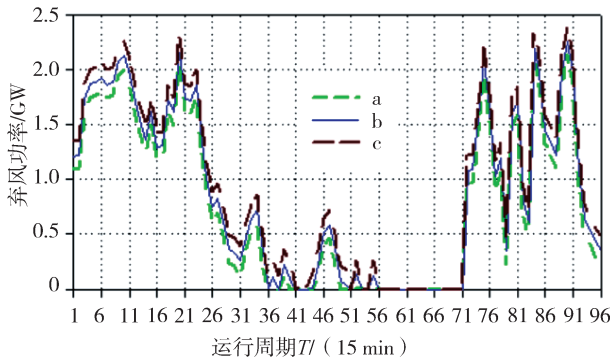
风电装机容量/GW	风电发电量/GWh	弃风电量/GWh	风电弃风比例/%
4.0	46.253 08	15.337 52	33.16
6.0	53.665 46	18.273 09	34.05
9.0	72.598 94	25.395 11	34.98

因此, 在未来的风电规划中, 可适当控制风电装机容量的增长速度, 即通过限制风电接入规模来减少弃风。理论上讲, 选定某一规模的风电装机容量, 即可相应确定最佳的风电并网规模和弃风电量。

3.3.4 供热机组出力范围与弃风电量间的关系曲线

在其他条件不变的情况下, 当热电机组的供热

出力范围从60%~100%变化时,日弃风功率的变化情况如图7所示。



注: a、b、c 分别为供热出力 60%、80%、100% 时的弃风功率。

图7 不同供热机组出力百分比下的日弃风功率分布

Fig. 7 Daily load distribution of wind power curtailment under different conditions of thermal power output

可以看出,弃风电量随着供热机组出力范围的加大而增多。通过模型计算,得出供热机组出力每增加20%,日弃风电量分别增加5.091 32 GWh和6.184 49 GWh,日弃风比例分别增加5.03%和6.11%。其原因是,由于热电机组“以热定电”的约束,不同供热出力比例范围内的电功率上下限发生了变化,供热出力百分比越大,则电功率上限越低、下限越高,导致系统调峰空间越小,从而留给系统接纳风电出力的空间范围就越小,形成更多的弃风电量。由此可见,根据热负荷及热电机组装机容量,选取一定“热电比”约束下的供热出力范围,即可控制弃风电量在一定范围内。

4 结论

本文从系统调峰角度分析了风电弃风机理,并在此基础上建立了风电弃风评估方法,其原理简单、透明,易于理解,计算量小。通过该方法,可定量分析当负荷水平、电源结构、调峰深度等弃风因素变化时,不同规模风电接入及在不同配比情景下的弃风情况,得到弃风功率持续曲线、弃风比例等指标,进而综合衡量电网对风电的接纳能力。

通过对京津唐冬季典型日弃风情况的算例分析验证了本文所建模型的有效性。结果表明,常规电源调峰越深、联络线外送深度越小,系统接纳风电出力的空间越大;而过快的风电装机容量增长速度

和较高比例的供热机组出力范围,会抑制风电出力,从而导致弃风。因此,可通过激励系统中常规电源积极主动进行调峰、控制联络线外送峰谷差和热电机组出力范围来提高系统接纳风电的能力;而根据未来规划水平,选取某一比例的风电装机容量增长速度,即可确定最佳的风电并网规模,控制弃风电量在一定水平内。

参考文献:

- [1] 黄大为,郭君宜. 热电联产机组参与系统调峰的调度策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 35-39.
- [2] 龙虹毓,徐瑞林,何国军,等. 基于热电风电协调调度的系统日调峰能力分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 30-34.
- [3] 王伟,徐婧,赵翔,等. 中国煤电机组调峰运行现状分析[J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 18-24.
- [4] 陈雷,卢斯煜. 风电场出力特性与集群效应分析方法研究[J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 31-37.
- [5] 王乾坤. 国内外风电弃风现状及经验分析[J]. 华东电力, 2012(3): 378-381.
- [6] 赵吴鹏. 电网接纳风电能力的制约因素分析及措施[J]. 应用能源技术, 2013(9): 47-50.
- [7] 吕泉,王伟,韩水,等. 基于调峰能力分析的电网弃风情况评估方法[J]. 电网技术, 2013(7): 1887-1894.
- [8] 张冲,胡林献,胡佳. 热电机组比重及热负荷对风电消纳率影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013(23): 120-125.
- [9] 郭象容. 电网接纳风电能力的技术因素分析[J]. 风能, 2011(11): 38-41.
- [10] 陈东,雷金勇. 南方电网风电功率预测系统应用扩展研究[J]. 南方能源建设, 2015(3): 28-33.
- [11] 谢国辉,李琼慧,高长征,等. 基于 Balmorel 模型的风电消纳能力研究[J]. 能源技术经济, 2011, 23(5): 29-33.

作者简介:



WANG B Q

王丙乾(通信作者)

1990-,男,山西晋城人,经济师,硕士,主要从事工程造价、技术经济管理的工作(e-mail) wangbingqian@gedi.com.cn.