

文章编号:0254-0096(2019)12-3628-07

电网储能与弃风协调运行方法

葛维春

(国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110006)

摘要: 提出电网通过储能建立消纳风电的安全屏障,研究储能投入能力评估和判别方法,建立储能运行模型和储能额定功率与风电消纳需求关系模型,构建电制热储热负荷与供暖期弃风相关性分析方法,探索弃风电量、弃风小时数与弃风电力的定性关系。实际分析案例表明,储能消纳弃风效果明显,储能功率按最大弃风功率配置,储能利用效率并不高,电制热储热负荷消纳的是供暖期的弃风电量。

关键词: 储能; 风电; 电力系统; 风电消纳; 弃风率

中图分类号: TM732

文献标识码: A

0 引言

对高比例接入清洁能源电网,全额消纳的关键是储能容量配置和储能控制策略建立。以往,由于储能容量较小,无法支撑电网规模化消纳清洁能源,但当电网有足够容量的储能时,如何控制使其发挥最大作用就成为电网多源协调运行的关键。文献[1]阐述了我国和全球可再生能源发展之间的相似性,总结了我国可再生能源发展的相关经验及存在问题;提出通过源-网-荷-储及市场共同协调,促进可再生能源健康稳步发展;并通过分析全球能源互联网的发展需求和现有基础,提出我国可再生能源发展对建设全球能源互联网的启示和建议,文中重点提出源-网-荷-储协调运行可促进可再生能源发展,强调了“储”的作用。文献[2]提出一种联合发电系统复合控制策略,并在 Rtlab 环境下,搭建含改进控制策略的风光储联合出力追踪本地负荷仿真模型;文中对风光储联合出力就是用储能平衡风光与本地负荷,对于独立运行微网有指导意义。文献[3]建立可选型、定容的储能优化配置模型,用于决策满足系统充裕性需求的储能配置方案;结合储能和常规机组的技术特点,增强了配置结果的经济性;通过储能和常规机组协调进行风电爬坡时功率调节,用储能补偿风电爬坡过程中的功率变化,这要求储能要有足够容量,同时忽略其他能源的调

节作用。文献[4]提出一种风电场与含储热的热电联产形成共同体联合运行的调度模式,并基于该调度模式提出考虑风电出力不确定性的联合系统优化调度模型,该模型充分利用储热带来的灵活性,实现联合运行系统在上网收益和惩罚费用之间的协调,获得收益最高的风电场和热电联产联合优化的调度策略,文中所提调度模式只针对风电场和储热联合体为电网带来的灵活性,未从电网角度合理调度弃风提高电网灵活性。文献[5]给出了电力系统灵活性的概念及其特征,提出多时间尺度灵活性供给-需求平衡的通用数学方法和灵活性度量指标;建立了灵活性裕度的概率模型,阐明曲线平移类、曲线整形类和综合类 3 种类型灵活性增加途径;依据灵活性平衡机理可实现源-网-荷-储复杂场景下的综合灵活性优化,指出电网灵活性指标对清洁能源消纳的作用,对源-网-荷-储复杂场景下灵活优化具有指导意义。文献[6]建立基于场景方法的光热电站与风电联合系统的多日随机调度模型,该模型充分考虑多日风、光功率预测的不确定性,进行联合系统日前自调度;最后,通过算例分析,讨论了不同预测时间尺度、储能参数取值对自调度结果的影响,文中突出储能对光伏和风电的调节作用,实际上将两个不确定性变量合并成一个变量(还是不确定性变量),应重点分析 2 个不确定性变量的互补和叠加特性对

收稿日期: 2018-07-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0902100); 国家自然科学基金(U1766204)

通信作者: 葛维春(1961—), 男, 博士、教授级高级工程师, 主要从事电力系统自动化方面的研究。13804012589@126.com

储能的需求。文献[7]建立基于多场景的含储热的电热综合调度模型来优化确定蓄热罐运行策略;提出一种简化的实用化确定方法,而且两者所确定的蓄热罐运行方式差异很小,因此实用化确定方法完全可替代基于多场景的电热综合调度模型,文中强调了电网调度的作用,也只有通过电网调度才能实现弃风电储热。

上述研究成果都突出了储能对提高源-网-荷协调调度的作用,研究消纳弃风,但缺乏对弃风规律的研究。只有掌握弃风电规律才能有的放矢实施控制,同时缺乏电网调度,通过储能对弃风控制进行深入研究,才能体现储能对降低弃风率作用。本文以规模化储能为基础,以电网调度运行行为出发点,研究电网储能运行模型、储能容量与清洁能源消纳需求模型和弃风电力与弃风电量的关系。通过实例分析北方冬季取暖季消纳弃风效果^[8]。

1 电网储能投入能力分析

对高比例接入清洁能源电网,电网正常调节能力主要是水电和火电,由于清洁能源发电比例大,水电和火电调节空间下降,影响清洁能源消纳。为提高清洁能源消纳,电网建设了各种储能设备^[9,10]。储能设备运行延伸了水电和火电调节空间,使电网建立了一个消纳清洁能源的安全屏障,只有在储能设备全部投入后,才开始弃风电。电网储能投入的调节能力由电池储能容量 P_E 和电储热 P_C 容量^[11]决定,如式(1)所示。

$$P_{CE} = \sum_{I=1}^N P_E(I) + \sum_{I=1}^M P_C(I) \quad (1)$$

式中, P_{CE} ——电网储能的调节能力; N ——电池储能数量; $P_E(I)$ ——第 I 台电池储能设备额定容量; M ——电储热数量; $P_C(I)$ ——第 I 台电储热设备额定容量。

电网由储能建立起的安全屏障对消纳清洁能源意义重大^[12],只要储能有投入能力,电网就不会弃清洁能源,所以储能容量至关重要^[13],储能容量大,安全屏障越安全;反之,储能容量小,则无法建立真正的安全屏障。

2 储能投入条件

电网有正常调节能力,不会投入储能,仅由水

电和火电即可满足电网正常调节要求^[14],但当水电和火电失去正常调节能力时,储能将投入,判别方法如式(2)~式(4)所示。

$$(P_h - P_{hm}) < q_1 \quad (2)$$

式中, P_h ——火电运行总容量; P_{hm} ——火电运行总最小容量; q_1 ——较小的裕度值,相当于火电运行到死区,火电失去正常调节能力。

$$(P_s - P_{sm}) < q_2 \quad (3)$$

式中, P_s ——水电运行总容量; P_{sm} ——水电运行总最小容量; q_2 ——较小的裕度值,相当于水电运行到死区,水电失去正常调节能力。

只有当式(2)和式(3)同时成立时,电网才可投入储能,判别条件用 Y 表示,如式(4)所示。 $Y=1$ 时,电网运行可投入储能。

$$Y = \begin{cases} 1, & (P_h - P_{hm}) < q_1 \cap (P_s - P_{sm}) < q_2 \\ 0, & (P_h - P_{hm}) < q_1 \cup (P_s - P_{sm}) < q_2 \end{cases} \quad (4)$$

3 电网储能运行模型

电网水电和火电失去调节能力后,如果没有其他调节措施,就必须弃风电以保证电网安全。无论是电池储能还是电储热,在基于提高清洁能源消纳能力上都相当于负荷,对于电储热,每投入一组储热单元,就相当于投入一组负荷 $P_L(t)$,如式(5)所示。

$$P_L = P_C \quad (5)$$

要满足:

$$P_C \leq P_{CM} \quad (6)$$

式中, P_{CM} ——电储热的最大容量。

对于电池储能,在投入充电模式时,与电储热相同,相当于负荷,如式(7)和式(8)所示。

$$P_L = P_E \quad (7)$$

要满足:

$$P_E \leq P_{EM} \quad (8)$$

式中, P_{EM} ——电池储能的最大容量。

在投入放电模式时相当于发电,如式(9)所示。

$$P_G = P_E \quad (9)$$

要满足式(10)约束:

$$P_G \leq P_{EM} \quad (10)$$

式中, P_G ——电池处于发电状态时的出力。

电网投入一组负荷,相当于为电网提供一个 P_C 或 P_E 大小的发电空间,电网运行状态重新调整。

如果电网负荷继续下降或清洁能源发电需求继续提高,则需继续投入储能,直到当储能全部投入为止。

4 储能容量与清洁能源消纳需求模型

首先,由于储能技术的应用,为消纳清洁能源设置一个安全屏障,但这个安全屏障与储能容量密切相关,容量较小时极易突破这个安全屏障,容量较大时安全屏障抵御冲击能力就强。因此,需建立储能容量与清洁能源消纳需求模型。清洁能源消纳策略是先弃风电,再限核电,最后弃光伏。可见,风电又为核电和光伏建立了一道安全屏障,故需研究两个屏障之间的关联关系。

4.1 北方冬季供暖期弃风电规律

北方冬季供暖期间,热电联产机组大幅降低调峰能力,使供暖期成为弃风电量最多时间段,年总弃风电量 P_{NWQ} 如式(11)所示。

$$P_{NWQ} = \sum_{I_1=1}^{N_1} \sum_{J_1=1}^{M_1} (P_Q(I_1, J_1)) \quad (11)$$

式中, N_1 —— 一年天数; M_1 —— 一天 24 h; $P_Q(I_1, J_1)$ —— 第 I_1 天第 J_1 小时弃风力发电量。

年取供暖期弃风电量总加 P_{NWNQ} 如式(12)所示,取暖期弃风率如式(13)所示。

$$P_{NWNQ} = \sum_{I_2=1}^{N_2} \sum_{J_1=1}^{M_1} (P_{NQ}(I_2, J_1)) \quad (12)$$

$$h_n = P_{NWNQ} / P_{NWQ} \\ = \sum_{I_2=1}^{N_2} \sum_{J_1=1}^{M_1} (P_{NQ}(I_2, J_1)) / \sum_{I_1=1}^{N_1} \sum_{J_1=1}^{M_1} (P_Q(I_1, J_1)) \quad (13)$$

式中, N_2 —— 取暖期天数; $P_{NQ}(I_2, J_1)$ —— 第 I_2 天第 J_1 小时取暖期弃风电量。

取暖期低谷弃风电量总加 P_{NWNQ} 如式(14)所示。

$$P_{NWNQ} = \sum_{I_2=1}^{N_2} \sum_{J_2=1}^{M_2} (P_{NDQ}(I_2, J_2)) \quad (14)$$

式中, M_2 —— 一天低谷小时数; $P_{NDQ}(I_2, J_2)$ —— 第 I_2 天第 J_2 小时取暖期低谷弃风电量。

取暖期低谷弃风率如式(15)所示。由 h_n 和 h_{nd} 即可评估取暖期弃风率和取暖期低谷弃风率。

$$h_{nd} = P_{NWNQ} / P_{NWQ} \\ = \sum_{I_2=1}^{N_2} \sum_{J_2=1}^{M_2} (P_{NDQ}(I_2, J_2)) / \sum_{I_1=1}^{N_1} \sum_{J_1=1}^{M_1} (P_Q(I_1, J_1)) \quad (15)$$

在北方弃风大部分发生在冬季供暖期,弃风率几乎占总弃风电量的 90%,但在供暖期,其低谷弃风占比并不是太高,这是因为大部分消纳弃风的措施都针对低谷运行时段,因此电网针对弃风消纳采用电储热技术,在供暖期跟踪弃风电制热储热,热网需要供热时输出热量,大幅降低供暖成本和弃风率。

4.2 弃风电力与弃风容量关系模型

电网储能容量储备如果大于平衡状态下风力发电增量,电网不会发生弃风电现象,即储能容量越大,发生弃风电现象越少,但储能容量也不能足够大,其原因:一是电网对储能容量的需求有限度;二是储能容量配置过大,投资也过大。因此,电网要合理配置储能容量,电网配置储能的大小 P_C 或 P_E 与小时弃风电力的大小 P_{wsq} 、弃风电力小时数 T_{wq} 和弃风电量 P_{wq} 有关。小于等于 $P_{wsq}(K)$ 的小时弃风电力对应的总的弃风电量如式(16)所示。根据式(16)即可求出弃风电力小于 $P_{wsq}(K)$ 的弃风电量 P_{wq} 。当式(17)成立时,储能消纳的弃风电即为 P_{wq} 。

$$P_{wq} = \sum_{I_1=1}^{N_1} \sum_{J_1=1}^{M_1} (P(I_1, J_1)), \quad P(I_1, J_1) < P_{wsq}(K) \quad (16)$$

$$P_C + P_E = P_{wsq}(K) \quad (17)$$

P_{wq} 和 $P_{wsq}(K)$ 可用一个曲线来描述,横轴为 $P_{wsq}(K)$,纵轴为 P_{wq} ,如图 1 所示。从图 1 可看出, P_{wq} 最高点的 $P_{wsq}(K)$ 即为储能容量利用率最大点 P_{cm} ,而 $P_{wsq}(K)$ 最大点即为最大储能容量 P_{cm} 。理论上,储能应按 P_{cm} 容量配置,可全部消纳弃风电;但储能的利用效率较低,如果储能按 P_{cm} 容量配置,效率较高,不能全部消纳弃风电。

对于第 I_1 天第 J_1 小时的弃风电量,只要小于 $P_{wsq}(K)$, P_{wsq} 就记录 $T_{wq}(I_1, J_1) = 1$,否则为零,如式(18)所示,则弃风电小时数即可表达为式(19)所示形式。

$$T_{wq}(I_1, J_1) = \begin{cases} 1, & P(I_1, J_1) < P_{wsq}(K) \\ 0, & P(I_1, J_1) > P_{wsq}(K) \end{cases} \quad (18)$$

$$T_{wq}(K) = \sum_{I_1=1}^{N_1} \sum_{J_1=1}^{M_1} (T_{wq}(I_1, J_1)) \quad (19)$$

这样就可建立 $P_{wsq}(K)$ 、 P_{wsqK} 和 $T_{wq}(K)$ 之间的关系曲线,如图 1 所示。当 $P_{wsqK} P_{wsq}(K) = P_{cm}$ 时,弃风小时数为 1。

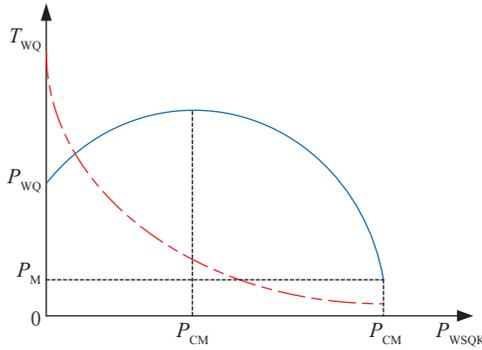


图 1 弃风电力与弃风电量关系曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of relationship between abandoned wind power and abandoned wind power

5 电网储能跟随供暖期弃风评估模型

电网安装储能是为了消纳弃风,而且储能的运行成本主要是电费,如果储能能跟随弃风运行,必将大幅提高储能的利用效率和效果。储能跟随弃风主要是看两者运行时段是否一致,记录供暖期弃风 $T_{wq}(I_2, J_1)$ 、储能 $T_c(I_2, J_1)$ 投入时间序列,如式(20)和式(21)所示。

$$T_{wq}(I_2, J_1) = \begin{cases} 1, & P_{wq}(I_2, J_1) > 0 \\ 0, & P_{wq}(I_2, J_1) \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$T_c(I_2, J_1) = \begin{cases} 1, & P_c(I_2, J_1) > 0 \\ 0, & P_c(I_2, J_1) \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中, P_{wq} 、 P_{wq} 和 P_c ——弃风电力和储能电力。

$T_{wq}(I_2, J_1)$ 与 $T_c(I_2, J_1)$ 经与运算后,形成新的时间序列 $T_{wqc}(I_2, J_1)$,如式(22)所示。

$$T_{wqc}(I_2, J_1) = T_c(I_2, J_1) \cap T_{wq}(I_2, J_1) \quad (22)$$

$T_{wqc}(I_2, J_1)$ 的时间序列表明储能投入和弃风时段重合的时间序列。 $T_{wqc}(I_2, J_1)$ 值越接近储能 $T_c(I_2, J_1)$,说明储能跟随弃风电投入效果越好,也越能说明储能对弃风的调节作用效果越明显。也即有弃风发生时,储能一定是投入的,反过来,储能投入不一定有弃风电发生, $T_{wq}(I_2, J_1)$ 、 $T_c(I_2, J_1)$ 和 $T_{wqc}(I_2, J_1)$ 三者关系如式(23)所示。

$$T_{wq}(I_2, J_1) \approx T_{wqc}(I_2, J_1) \ll T_c(I_2, J_1) \quad (23)$$

6 数值分析

本文以某个省级电网实际运行数据为例,在 Matlab 环境下,基于电网储能运行模型及储能容量与清洁能源消纳需求模型,采用计算数据描点方式进行仿真分析。该省级电网中最大负荷约为 25000 MW、最小负荷约为 20000 MW、风电装机约为 7000 MW,火电机组在供暖期大部分是热电联产机组,调节能力下降约 30%,集中式电制热储热额定功率 940 MW,电池储能额定功率 15 MW。

6.1 储能调节能力

储能调节能力可由式(1)计算,3个 5 MW 电池储能电站,总容量 15 MW;3个热电厂集中式电储热装置,容量分别为 260、280、400 MW,一个 30 MW 分布式电储热装置,总容量 970 MW,则总的调节能力 P_{ce} 为 985 MW,也即电网形成一个 985 MW 的安全屏障,在电网正常调节能力失去时,电网仍有 985 MW 的发电空间,如果清洁能源发电需求小于 985 MW,电网不会进入紧急控制域,不会弃清洁能源。

6.2 电网弃风电运行规律分析

表 1 为 2013~2018 年前 4 个月的风力发电合计、弃风电合计、调峰因素弃风合计、网架因素弃风合计、弃风率、调峰占比和网架占比。从表 1 可看出从 2013 年开始,风力发电量逐年增加,弃风电量在 2016 年达到高峰,弃风率在 2015 年达到高峰,在 2016 年的下降幅度不大,2017 年弃风电量大幅减少,弃风率也降到 10%以下,2018 年前 4 个月,弃风电量和弃风率都大幅下降;2013 年网架弃风占比达到 12.74%,之后由于电网加大针对风电接入改造力度,因网架原因弃风电量大幅下降,直到 2018 年前 4 个月,因网架原因弃风电量又达到 34.96%,这是因调峰原因弃风电量大幅下降所致。电网在 2016 年相继投入 540 MW 储热装置,2017 年全年发挥巨大作用,使 2017 年弃风率大幅下降,在 2018 年初,电网又投入 30 MW 分布式电网直接调控相变储热装置,在一座大型热电厂建成 400 MW 电极式储热装置,使电网调度直接调控的异常调节容量达到 985 MW,这些储能基本消纳的是弃风电,而且是跟随弃风电运行方式,不弃风不投运,大幅提高了电网通过电储能提高风电的接纳能力。

表1 2013~2018年前4个月各类风电数据

Table 1 Various types of wind power data tables from 2013 to first 4 months of 2018

项目	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年1~4月
发电合计/亿kWh	99.68	102.13	110.63	127.44	148.16	65.43
弃风合计/亿kWh	10.39	7.85	19.86	20.36	14.05	1.23
弃风率/%	10.42	7.69	17.95	15.98	9.48	1.88
调峰/亿kWh	9.06	7.82	19.80	20.22	13.73	0.80
网架/亿kWh	1.32	0.03	0.06	0.14	0.31	0.43
调峰占比/%	87.26	99.60	99.69	99.29	97.76	65.04
网架占比/%	12.74	0.40	0.31	0.71	2.24	34.96

表2为取暖期弃风电量和弃风率表。从表2可看出,除2013年外,取暖期弃风电占比均约为90%,占弃风电量的大部分,所以针对取暖期的弃风电储热消纳风电措施是十分正确的,实际上,电网针对取暖期弃风还采取了其他措施,比如热电联产机组深度调峰,而且有国家政策支持,2017年和2018年取暖期弃风占比有所下降,正是因为这些消纳弃风电的技术和政策措施所致。

表2 取暖期弃风电量和弃风率数据

Table 2 Data of electricity discharging and discarding rate in heating period

年度	总弃风/ MM	取暖季弃风/ MM	取暖季 弃风率/%
2013年	1038566	711644	68.52
2014年	785314	751279	95.67
2015年	1986006	1852376	93.27
2016年	2036407	1835226	90.12
2017年	1404515	1221015	86.93
2018年1~4月	122804	104433	85.04

表3为低谷时段弃风合计和弃风占比。由表3可看出,低谷时段弃风电占比相对稳定,在60%,2018年一季度降到37.03%,主要是针对低谷弃风的技术作用开始显现。从表3还可看出,非低谷时段弃风率也有40%,说明利用弃风供暖可以消纳90%弃风电量,如果采用纯低谷方式,仅能消纳50%弃风电量。

6.3 储能跟随供暖期弃风电能力分析

图2为小时储能次数、弃风次数与储能和弃风同时发生次数图。由图2可看出,供暖期弃风次数与储能和弃风同时出现的次数相近,说明储能与

表3 低谷时段弃风和弃风占比

Table 3 Percentage of abandoned winds and abandoned winds in low seasons

年份	弃风合计/ MW	低谷时段弃 风合计/MW	弃风 占比/%
2013年	1038565.79	648171.71	62.41
2014年	785313.56	512237.83	65.23
2015年	1986006.00	1215776.09	61.22
2016年	2036407.00	1160040.85	56.97
2017年	1404515.00	829111.23	59.03
2018年1~4月	122804.25	45479.87	37.03

弃风的同步性,只要有弃风就有储能投入;反之,有储能投入不一定有弃风发生,电网在低谷运行时段,储能投入次数远高于弃风次数,说明由于有了储能投入,减少了大量弃风次数。

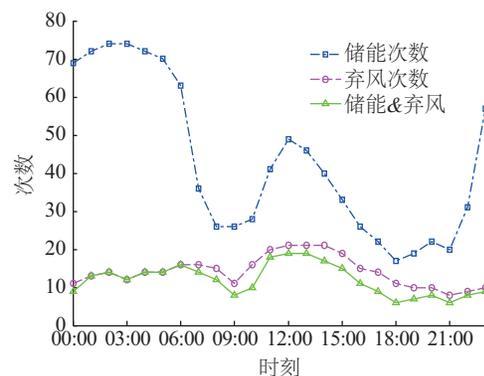


图2 小时储能次数、弃风次数与储能和弃风同时发生次数

Fig. 2 Energy storage times, frequency of wind abandonment, simultaneous occurrence of energy storage and wind abandonment

图3为电网某一天实际运行的储能投入总量、总弃风电量和总应弃风电量关系图。总的应弃风

电量合计等于储能投入总量与总的弃风电量的和。由图3可看出,如果没有储能投入,弃风电量就是图中最上面的那条曲线,最大幅值几乎达到4000 MW,有了储能投入,弃风电最大幅值不到1000 MW,大幅降低了弃风电量,使实际弃风电力大幅小于应弃风电力,消纳风电能力显著增强。

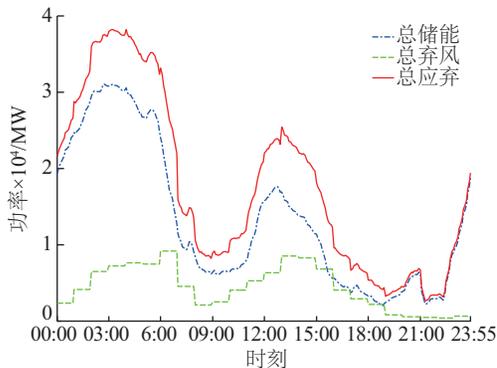


图3 储能投入总量、总弃风量和总应弃风量关系

Fig. 3 Diagram of total energy input, total abandoned air volume, and total amount of discharge amount

6.4 电网弃风电力与弃风电量分析

图4为2018年弃风电力与对应小时数和弃风电量图。从图4可看出,随着弃风电力的增加,弃风电次数减少,弃风电量开始增加然后减少。图4两条曲线,一条单调减少,一条相当于抛物线,两条曲线在弃风电力达到2800 MW时,弃风电次数是1次,电量2781.88 MWh时终止,2800 MW就是最大弃风电力;最大弃风电量15011.9 MWh对应1600 MW弃风电力,这个弃风电力就是应配置的储能容量,是最大弃风电力的57.14%;如果以消纳全部弃风电力2800 MW配置储能,将多配置1400 MW,而仅能消纳弃风电量28284.55 MWh。

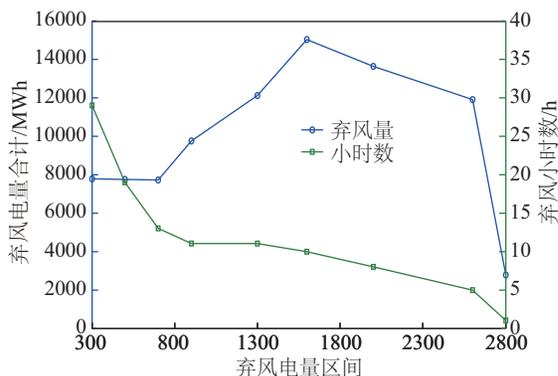


图4 2018年弃风电力与小时数和电量图

Fig. 4 Schematic diagram of wind power, hours and electric quantity of 2018

7 结论

本文重点分析储能对电网消纳弃风电的作用,建立储能分析模型,研究北方冬季弃风电规律,提出弃风电与储能评估方法和弃风电力与对应弃风电次数和电量模型,通过实例展示了储能对消纳弃风电的效果以及对风电消纳的安全屏障作用。揭示了北方地区冬季供期季弃风电可达总弃风电90%,而低谷时段仅占60%,表明采用弃风电储热供暖是消纳弃风电的最佳方法。

[参考文献]

- [1] 黄其励. 中国可再生能源发展对建设全球能源互联网的启示[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 1—9.
- [1] Huang Qili. Insights from china renewable energy development for global energy interconnection [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 1—9.
- [2] 张明理, 王璐, 徐建源, 等. 风光储联合发电系统复合控制策略研究[J]. 高压电器, 2018, (1): 64—72.
- [2] Zhang Mingli, Wang Lu, Xu Jianyuan, et al. Research on compound control strategy of Wind/PV/Storage hybrid power generation system [J]. High Voltage Apparatus, 2018, (1): 64—72.
- [3] 王思渊, 江全元, 葛延峰. 考虑风电爬坡事件的储能配置[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1093—1101.
- [3] Wang Siyuan, Jiang Quanyuan, Ge Yanfeng. Optimal configuration of energy storage considering wind ramping events [J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1093—1101.
- [4] 戴远航, 陈磊, 闵勇, 等. 风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3470—3479, 3675.
- [4] Dai Yuanhang, Chen Lei, Min Yong, et al. Optimal dispatch for joint operation of wind farm and combined heat and power plant with thermal energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3470—3479, 3675.
- [5] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9—20.
- [5] Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9—20.
- [6] 晋宏杨, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 含大规模储热的光热

- 电站-风电联合系统多日自调度方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 17—23.
- [6] JinHongyang, Sun Hongbin, Guo Qinglai, et al. Multi-day self-scheduling method for combined system of csp plants and wind power with large-scale thermal energy storage contained [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 17—23.
- [7] 吕 泉, 王海霞, 陈天佑, 等. 考虑风电不确定性的热电厂蓄热罐运行策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 23—29.
- [7] Lyu Quan, Wang Haixia, Chen Tianyou, et al. Operation strategies of heat accumulator in combined heat and power plant with uncertain wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 23—29.
- [8] 李本新, 韩学山, 刘国静, 等. 风电与储能系统互补下的火电机组组合[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 32—37.
- [8] Li Benxin, Han Xueshan, Liu Guojing, et al. Thermal unit commitment with complementary wind power and energy storage system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 32—37.
- [9] 于 汀, 刘广一, 蒲天骄, 等. 计及柔性负荷的主动配电网多源协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 95—100.
- [9] Yu Ting, Liu Guangyi, Pu Tianjiao, et al. Multiple coordinated optimization control of active distribution network considering flexible load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 95—100.
- [10] 黄亚唯, 李欣然, 黄际元, 等. 电池储能电源参与AGC的控制方式分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 83—89.
- [10] Huang Yawei, Li Xinran, Huang Jiyuan, et al. Analysis of control methods for AGC with battery energy storage system [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2017, 29(3): 83—89.
- [11] Arndt N, Frank- Detlef D, Gunnar H, et al. A perspective on energy storage and other means to integrate increasing shares of renewable electricity generation [J]. Green, 2014, 4(1-6): 41—48.
- [12] Cole W J, Powell K M, Edgar T F. Optimization and advanced control of thermal energy storage systems [J]. Reviews in Chemical Engineering, 2012, 28 (2-3): 81—99.
- [13] Hodge B M, Martinez-Anido C B, Wang Q, et al. The combined value of wind and solar power forecasting improvements and electricity storage [J]. Applied Energy, 2018, 214: 1—15.
- [14] Li Yi, Wu Xiaopeng, Li Qiusheng, et al. Assessment of onshore wind energy potential under different geographical climate conditions in China [J]. Energy, 2018, 152(6): 498—511.

COORDINATED OPERATION METHOD OF GRID ENERGY STORAGE AND ABANDONED WIND

Ge Weichun

(State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: This paper proposed a method to establish the safety barrier of power grid through energy storage to realize wind power accommodation. Based on the capability assessment and identification method of energy storage input, the model between the energy storage operation mode and rated power and the wind power accommodation demand was established. It also constructed a method for analyzing the correlation between electric heating thermal storage load and abandonment wind during heating period. The qualitative relationship between abandoned wind electric quantity, abandoned wind hours and abandoned wind power were explored. The case study shows that the effect of energy storage is obvious. However, if the energy storage capacity is only configured according to the maximum abandonment wind power, the energy storage efficiency is not high because the electric heating thermal storage only consumes the abandoned wind power during heating period.

Keywords: energy storage; wind power; electric power system; wind power accommodation; abandoned wind rate