

基于逆向需求响应的风力发电与储能式 空调负荷的调度模型研究

罗 庆¹, 张新燕¹, 晁 勤¹, 肖良剑², 李 江³

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 国电青松能源有限公司, 吐鲁番 838000;

3. 国网新疆电力公司昌吉供电公司, 昌吉 831100)

摘 要: 为有效降低电网的弃风率, 提出利用储能式负荷可控吸纳电能特性, 将风力发电和储能式负荷的电力供需关系逆向对调, 让风力发电的出力为需求侧“负荷”; 在“负荷”随机变化波动下, 建立以储能(冷/热)式负荷为供应侧“电源”实时满足供应的调度模型, 以此让风力发电机组与储能式负荷平稳运行, 消纳风力发电的电能。最后, 以空调式储热、储冷负荷为例, 在需求响应下, 仿真验证该模型的可行性; 同时验证在该调度模型下, 可将风力发电场的弃风率降至10%以内。

关键词: 储能式负荷; 需求响应; 调度模型; 电力供需; 风力发电; 弃风

中图分类号: TM76

文献标志码: A

0 引 言

风力发电由于风资源的不可控, 造成出力波动的随机性, 储能技术是解决风力发电出力平稳调度的有效途径。现今的研究提出为提高风能消纳基于储能的充放电特性, 按照预先设置的策略吸纳和释放电能。文献[1-3]中阐述了基于平抑风功率波动配置储能的方法, 提高风功率出力预测精度, 以此让电网平稳调度消纳风能。文献[4]提出基于风力发电逆调峰出力特性, 利用储能设备充放电特性, 采用削峰填谷的方案配置储能, 以此提高风电利用率。文献[5-6]对提高风力发电消纳提出复合储能协调优化、配置电池储能系统优化等方法平抑风功率波动以此让电网消纳。虽然上述研究方法对提高风能利用率有很大作用, 但仍受制于储能设备价格昂贵、寿命短等经济技术问题, 目前此类提高风电消纳能力的项目多停留在试点阶段, 且亟需储能技术和制造工艺的突破, 未能充分消纳风能。

由于居住环境及生活方式的变化, 建筑供暖供冷空调需求的激增, 储能式空调负荷可实现利用电能将冷能、热能进行储存供应, 因此本文提出能有效消纳风力发电的调度模型: 利用建筑物冬季用热、夏季用冷

的需求, 首先建立全时段储能式空调系统负荷随机响应模型, 利用实时风力发电出力曲线, 建立负荷逆向响应风力发电出力的调度模型, 利用空调负荷转换, 将实时风力发电的电能变换为二次利用的建筑物使用的热能(冷能); 同时, 利用储能式空调的储能装置, 将热能/冷能进行储存, 便于能源的全时段使用。

1 逆向需求响应的调控方法

常规电力需求响应是指电力用户随时间段电价不同而选择合适时段电价进行用能^[7]。逆向需求响应定义为将出力随机波动变化的风力发电场视为负荷, 将可实时调整负荷的用户视为电源, 利用“电源”的实时可调整特性, 满足“负荷”的随机波动变化, 以此逆向需求响应, 提高甚至全额消纳不稳定的可再生能源, 调控方法如图1所示。风力发电由于随机性、间歇性和波动性等, 导致电力系统调度不能实时调控, 需系统常规电源实时备用以弥补风力发电出力的不稳定性。现有可实时调整供冷热的储能负荷是逆向需求响应的示例, 利用冷热可储的特性, 弥补风力发电出力的不足及冗余, 以此提高风力发电的消纳^[8-10], 即以风力发电的不稳定出力为“负荷”, 制热、制冷且存储的能源为“电源(正负可

收稿日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(51367015; 51667018); 国家国际科技合作专项(172013DFG61520)

通信作者: 张新燕(1965—), 女, 博士、教授、博士生导师, 主要从事新能源发电并网及消纳、电力故障诊断等方面的研究。
xjcxzy@126.com

逆)”,实时满足风力发电不稳定出力的“负荷”与制热、制冷能源存储“电源”之间的匹配与平衡^[11-12]。

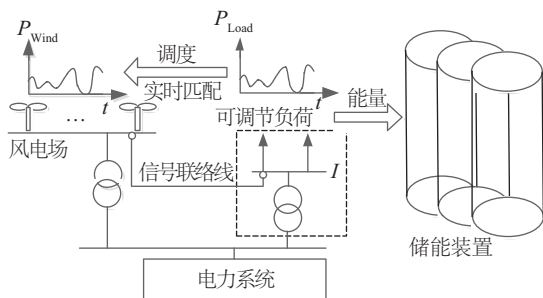


图1 逆向需求实时响应拓扑图

Fig. 1 Schematic diagram of real-time response to reverse demand

2 全天候空调系统逆向“电源”出力模型

对空调的制热、制冷进行能源存储,采取的储存方式较为经济方便,现有储能方式多为高比热容的储能媒介,如水、镁砖等。利用储能设施对风力随机发电电能进行冷、热能源的转化,并将能源进行储存,以此满足空调系统供热、供冷的能源全天候供应^[13]。

2.1 制热/制冷模型

供热: $Q_1 = P_h \times t_1 \times \eta_1$, $P_h = I^2 \times R$, 其中 P_h 为供热锅炉功率; t_1 为制热时间,对应风力发电场未系统调度的(弃风电量)有效发电时间; η_1 为热利用率。 P_h 调节电阻 R 控制输出温度,调节温度的精度及响应时间决定了 P_h 的调节范围,即制热爬坡速率。

制冷: $Q_2 = P_c \times t_2 \times \eta_2$, 其中 P_c 为制冷用电功率; t_2 为制冷时间,对应风力发电场未系统调度的(弃风电量)有效发电时间; η_2 为冷利用率。 P_c 调节温度的精度及响应时间决定了 P_c 的调节范围,即制冷爬坡速率与风力发电场出力跟踪。利用变频空调控制空气压缩机转速方式,实现功率控制能量输出。

2.2 储能(热/冷)装置模型

储能设施储存的能源 $Q = C \times M \times \Delta T$, C 为储能媒介的比热容, M 为储能媒介的质量, ΔT 外界温度与存储温度差。同时要求储能设施满足全天候供应要求, $Q_b = q \times A \times t_3$, 其中 q 为建筑供热(冷)标准, A 为建筑面积, t_3 为供能时间。因保障建筑能源供应,即 $Q \geq Q_b$, 其中 Q 为储能设施内储存的热/冷源的容量, Q_b 为用户热/冷量需求,可折算为热耗转化为功率关系。

2.3 空调系统逆向“电源”出力模型

本文利用空调负荷可实时调节特性及相应储能装置的储能(热/冷)作用,将负荷空调系统逆向为“电源”,用“电源”将出力特性不稳定、电力系统不能正常调度的风力发电场的“弃风电量”为“负荷”,进行充分利用消纳。“电源”出力特性:

$$f_M(P_{M,n}) = |P_h, P_c|, P_h \in (0, P_{he}], P_c \in (0, P_{ce}] \quad (1)$$

式中, $f_M(P_{M,n})$ ——“电源”发电功率 $P_{M,n}$ 在制热(P_h)/冷(P_c)功率间变动,用网络通信技术与风力发电机组检测风速进行连接对比,达到实时与风速匹配输出功率 $P_{M,n}$ 。

3 逆向响应风力发电出力“负荷”模型

3.1 弃风电量模型

在电力系统调度中,致使弃风电量的主要原因有: 1)对风力发电厂的出力预报采取保守量上网调度,致使风力发电高于调度预期的电量弃掉; 2)风力发电的随机性致使电网不能调度产生弃风电量(弃风电量 $W_{\text{dump},w} = P_{\text{dump},w,n} \times t_n$, 其中 t_n 为风电弃风时间),弃风功率 $P_{\text{dump},w,n}$ 模型为:

$$P_{\text{dump},w,n} = P_{w,n} - P_{\text{dispatching},w,n} \quad (2)$$

式中, $P_{w,n}$ ——风力发电厂发电功率; $P_{\text{dispatching},w,n}$ ——电网调度功率。

3.2 逆向响应风力发电出力“负荷”模型

将风力发电不可调度出力定义为逆向响应“负荷” $P_{\text{dump},w,n}$, 其具有波动性、随机性及不可预见性,模型表达式为:

$$f_w(P_{\text{dump},w,n}) = \frac{\pi}{2} C_p R^2 \rho (v_n - v_{p,n})^3 \quad (3)$$

式中, C_p ——风功率系数; R ——风轮半径; ρ ——空气密度; v_n ——自然风速; $v_{p,n}$ ——电网预测调度风速。

从式(3)可知,逆向响应风力发电出力“负荷”将转化为风轮负动能,消化“电源”。

4 基于逆向需求响应的风力发电与储能式空调负荷的调度模型

4.1 目标函数

本文中逆向需求响应风力发电与储能式空调负荷提高消纳的日前调度目标函数模型,可用式(4)表示:

$$\min F(P_{M,n}, P_{\text{dump},w,n}) = \int_0^t [f_M(P_{M,n}) - f_w(P_{\text{dump},w,n})] \quad (4)$$

以上均是实时响应,制冷/热所需电量与风力发电场弃风电量匹配使得差值最小。

4.2 约束条件

储能式空调负荷的制热/冷爬坡速率对风力发电场出力跟踪的约束条件。

1)系统有功平衡约束:

$$P_{M,n} = P_{\text{dump},w,n} \quad (5)$$

2)“电源”机组(制热/冷)的爬坡速率约束:

$$-\beta_{\text{Mdown},n} \leq P_{M,n} - P_{M,n-1} \leq \beta_{\text{Mup},n} \quad (6)$$

3)“电源”机组(制热/冷)最大和最小出力约束:

$$P_{\text{Mmin},n} \leq P_{M,n} \leq P_{\text{Mmax},n} \quad (7)$$

式中, $P_{M,n}$ —— n 时段“电源”机组出力; $P_{M,n-1}$ —— $n-1$ 时段的“电源”机组出力; $\beta_{\text{Mdown},n}$ 、 $\beta_{\text{Mup},n}$ ——时段 n “电源”机组出力的下降率和上升率。

4.3 调度控制策略

风力发电场与储能式空调负荷线路连接如图 1 所示,均接入电力系统中,且有调度信号线连接调度。调度实行实时调度,开始调度,预判风力发电场是否有弃风,有则空调“电源启动”,进行预判弃风规模是否达到“电源”的最小启动条件,达到则“电源”与弃风“负荷”进行匹配消纳,否则结束。具体调度流程如图 2 所示。

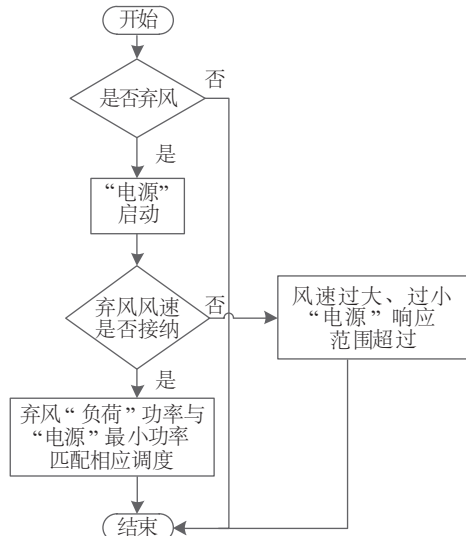


图2 逆向需求响应的调度策略流程图

Fig. 2 Flow chart of scheduling strategy for reverse demand response

根据风力发电场的风速情况,满足电力系统计划调度用电的不动,正常按照调度计划进行调度,对风力发电出力冗余部分,调用空调负荷系统,充分消纳冗余电能。

5 仿真分析验证

本文基于图 1 拓扑图,在 Matlab/simulink 里建立仿真模型。示例中风力发电场装机容量为 99 MW,办公楼宇面积 18000 m²,配备空调供热负荷容量 24 MW、供冷负荷容量 36 MW,配备 9 台具有蓄热/冷的“双蓄”功能的常压 300 m³ 蓄能罐设备,仿真中以 7 月 1 日风速为例,采用空调制冷功能(36 MW 负荷)进行风力发电消纳仿真实验。

5.1 系统仿真稳定分析

系统以风力发电场某日实际风速和电网调度为例进行调度仿真,案例中空调负荷侧母线 I 运行的电压、频率如图 3 所示。从仿真中的电压、频率情况分析,电压、频率均符合系统正常稳定运行,逆向负荷需求安全稳定调度策略得以验证,可用于对风力发电场中弃风能源进行有效消纳。

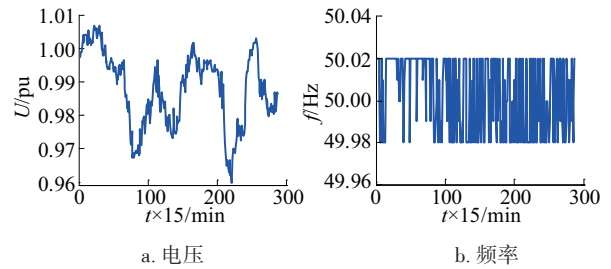


图3 空调负荷侧母线 I 仿真运行的电压、频率

Fig. 3 Voltage and frequency of simulated operation of air conditioning load side bus I

5.2 逆向需求响应消纳风电仿真

仿真中,风力发电场风速下的实际发电功率(实际功率)及电网调度功率如图 4 所示,实际功率与调度功

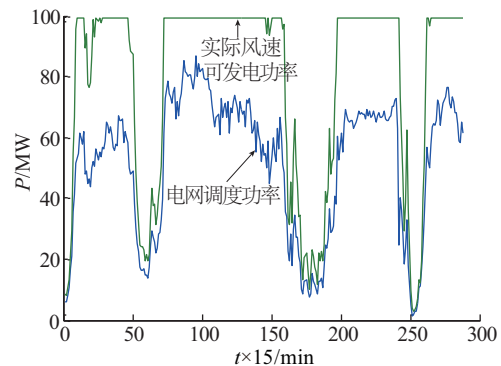


图4 风力发电场实际风速可发电功率与电网调度功率

Fig. 4 Wind farm actual wind speed power generation power and grid dispatching power

率之差为弃风功率,图4中两曲线间的量为风力发电场弃风发电量。将实际风速和调度功率分别引入模型中进行仿真,空调负荷消纳风力发电功率曲线如图5所示。从图5中可得,在按照逆向需求响应的调度策略下,空调负荷按照其最大容量对弃风电量进行充分消纳,电网正常调度下风力发电场弃风电量为195.49万kWh、弃风率为34.45%,空调负荷消纳弃风电量为184.87万kWh,风力发电场弃风电量10.62万kWh,仅占实际风力发电厂发电量的1.87%,即弃风率为1.87%。造成不能完全消纳原因是在某些时刻风电弃风发电功率超出空调负荷最大容量功率。仿真结果验证了逆向需求响应下的风力发电与储能式空调负荷能够有效解决电网非正常调度下的弃风问题。

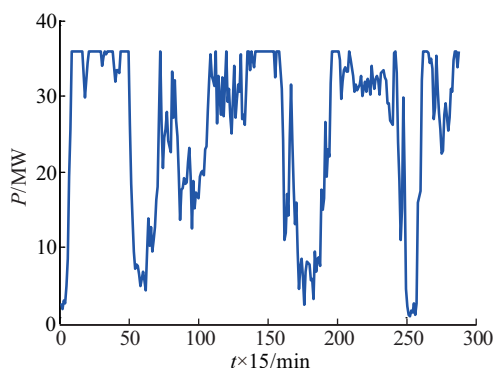


图5 案例中空调负荷消纳的功率曲线

Fig. 5 Power curve of air conditioning load consumption in case

6 结 论

储能式空调负荷侧需求响应市场应用前景广阔。空调负荷可挖掘潜力大、调度方式灵活,已越来越多地应用于负荷的需求响应,在电力系统的调度运行中发挥着重要作用。本文采用逆向逻辑思维法,将新能源发电与负荷进行逆向转换,让负荷模拟为“电源”实时调度迎合新能源“负荷”,构建实时调度电源,让新能源能够深度消纳。此方法在理论上能有效解决电网中并网风力发电机组的弃风问题、提高新能源消纳,但本文是通过仿真进行验证的,后续还需在实际案例中进行论证。

[参考文献]

[1] 雷敏,魏务卿,曾进辉,等.考虑需求响应的负荷控制对供电可靠性影响分析[J].电力系统自动化,2018,42(10):53-59.
LEI M, WEI W Q, ZENG J H, et al. Analysis of the influence of load control considering demand response

on power supply reliability [J]. Automation of electric power systems, 2018, 42(10): 53-59.

[2] 苏小林,刘孝杰,阎晓霞,等.计及需求响应的主动配电网短期负荷预测[J].电力系统自动化,2018,42(10):60-66,134.

SU X L, LIU X J, YAN X X, et al. Short-term load forecasting of active distribution network considering demand response [J]. Automation of electric power systems, 2018, 42(10): 60-66, 134.

[3] 张智晟,于道林.考虑需求响应综合影响因素的RBF-NN短期负荷预测模型[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1631-1638,1899.

ZHANG Z S, YU D L. RBF-NN short-term load forecasting model considering the comprehensive influencing factors of demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1631-1638, 1899.

[4] 张炜,王秀丽.基于分段竞价的售电侧需求响应策略[J].电力系统自动化,2017,41(14):24-29.

ZHANG W, WANG X L. Sales-side demand response strategy based on segment bidding [J]. Automation of electric power systems, 2017, 41(14): 24-29.

[5] 文刚,翁维华,赵岩,等.考虑负荷聚集商参与的源荷互动双层优化模型[J].电网技术,2017,41(12):3956-3963.

WEN G, WENG W H, ZHAO Y, et al. Two-source optimization model of source-charge interaction considering load aggregator participation [J]. Power grid technology, 2017, 41(12): 3956-3963.

[6] 程瑜,赵鹏飞.含光伏及储能的民用负荷需求响应策略与效益分析[J].太阳能学报,2017,38(4):1055-1062.

CHEN Y, ZHAO P F. Communication load response strategy and benefit analysis of photovoltaic and energy storage [J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(4): 1055-1062.

[7] 王健,鲁宗相,乔颖,等.高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究[J].电网技术,2017,41(7):2115-2124.

WANG J, LU Z X, QIAO Y, et al. Study on the demand response mode of high-energy load to improve the local consumption of wind power [J]. Power grid technology, 2017, 41(7): 2115-2124.

[8] 戚野白,王丹,贾宏杰,等.基于需求响应的集群温控负荷建模及参与低频减载策略研究[J].中国电机工程学报,2017,37(3):751-760.

QI Y B, WANG D, JIA H J, et al. Research on cluster temperature control load modeling and participation in

- low frequency load shedding strategy based on demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 751-760.
- [9] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167.
- SONG M, GAO C W, SU W H. Modeling and control of air conditioning load for demand response applications[J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(14): 158-167.
- [10] 卫文婷, 王丹, 贾宏杰, 等. 一种基于模型预测的城市园区分层分布式温控负荷需求响应控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2049-2056.
- WU W T, WANG D, JIA H J, et al. A hierarchical predictive distributed temperature control load demand response control strategy based on model prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2049-2056.
- [11] 汤奕, 鲁针针, 伏祥运. 居民主动负荷促进分布式电源消纳的需求响应策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 49-55.
- TANG Y, LU Z Z, FU X Y. Demand response strategy of residents' active load to promote distributed power consumption[J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(24): 49-55.
- [12] YANG X. Optimization of load control optimization and demand response mechanism for system services[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3608-3614.
- [13] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2-9, 189.
- DING Y, HUI H X, LIN Z Z, et al. Business model and market framework design for power demand side active response[J]. Automation of electric power systems, 2017, 41(14): 2-9, 189.

RESEARCH ON LOAD SCHEDULING MODEL OF WIND POWER GENERATION AND ENERGY STORAGE AIR CONDITIONING BASED ON REVERSE DEMAND RESPONSE

Luo Qing¹, Zhang Xinyan¹, Chao Qin¹, Xiao Liangjian², Li Jiang³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumq 830047, China; 2. Guodian Qingsong Energy Co., Ltd., Turpan 838000, China; 3. State Grid Xinjiang Power Company Changji Power Supply Company, Changji 831100, China)

Abstract: In order to effectively reduce the wind curtailment rate of wind farms in the power grid, this paper proposes the characteristics of using energy storage load regulation to absorb electric energy. The power supply and demand relationship between wind power generation and energy storage load were reversed, and the output of wind power generation "demand" on the demand side was made. Under the random change of "load", a scheduling model with energy storage (cold/hot) load as the supply side "power supply" to meet the supply in real time was established. In this way, the wind turbine and the energy storage load are smoothly operated to absorb the electric power of the wind power generation. Finally, the air-conditioning heat storage and cold storage load is taken as an example to verify the feasibility of the model under demand response. At the same time, it is verified that the wind curtailment rate can be reduced to less than 10% in the scheduling model.

Keywords: energy storage load; demand response; electric power dispatching model; power supply and demand; wind power generation; wind curtailment