

混合电源及功率预测系统在风电并网中的应用

孟令斌, 朱凤龙

(辽宁工程技术大学, 辽宁 葫芦岛 125100)

摘要: 随着风电场装机容量的不断增加, 解决大规模风电场并网对电网稳定性的影响问题就显得尤为重要。考虑到风能的特点及我国能源的地理分布情况, 首先介绍了风电-火电“打捆运行”为电力系统供电的联合运行方式, 通过调节火电厂的输送功率对风电进行调度, 以实现电网的稳定及对风能接纳能力的最大化。其次, 提出了多尺度选择的风电功率预测及误差校正方法, 根据不同尺度的风电功率变化规律, 可实现对风机组、电力系统的控制, 以便于风电调度。最后, 配以合适的储能装置、无功补偿设备可进一步增强电网的稳定性。通过假设的算例进行了验证和分析, 具有一定的适应性和实用性。

关键词: 风电并网; “打捆”运行; 功率预测; 风电调度; 储能技术

Applications of the mixing power and power forecasting system in wind power

MENG Lingbin, ZHU Fenglong

(Liaoning Technical University, Huludao 125100, China)

Abstract: With the installed capacity of wind farms is increasing, to solve the problem about the stability of the grid is particularly important. Taking into account the characteristics of wind and distribution of energy, firstly, this paper introduces a new way of "bundling operation" to provide electricity to the system. By adjusting the power of the thermal power plants, we can make a schedule of wind power to maximize the acceptance of wind energy. Secondly, a power prediction method and error correction method of multi-scale chosen is put forward. According to the variation of wind power at different scales, we can control the air handling units and the power systems. Lastly, using appropriate energy storage device and reactive power compensation equipment can further enhance the stability of the grid. Data simulation confirms the feasibility of the model.

Key words: grid-connected wind power; “bundling” run; power prediction; wind power scheduling; storage technology

中图分类号: TM619

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)13-0079-07

0 引言

近年来, 随着全球化石资源的不断枯竭以及环境的不断恶化, 世界各主要经济体纷纷出台相应政策, 将发展新能源提升到了国家安全高度。其中, 风电作为应用技术最成熟, 最具有商业发展价值的新型能源得到了快速的发展^[1-4]。同时, 风电作为一种间歇性、波动性能源^[5-6], 在大规模接入电网时会给电力系统的安全稳定运行带来新的挑战。因此, 采用多种电源联合供电的运行方式及对风电场输出功率进行精确的预测成为了解决这一问题的重要方法。

当风电接入电力系统后, 风电的不确定性会给系统稳定性带来很大的扰动, 因此进行风电功率预

测, 进行风电调度是解决这一问题的好办法。文献[7]对数字天气预报(NWP)法、时间序列法、神经网络法进行了介绍, 并引入差分算子、经验模式分解的方法对时间序列进行平稳化处理, 进一步提高了预测精度。文献[8]对传统的风电短期功率预测方法进行了改进, 选取BP神经网络法作为基本预测方法进行实例分析, 并以SVM法对BP神经网络法进行验证。文献[9]基于数值天气预报的建模方法, 利用NWP进行风电功率预测, 并利用某风电场的历史数据进行实例分析, 验证了其良好的预测精度, 大大简化了预测模型, 提高了运行效率。而常用的风电调度方法常常以风机个体为单位, 根据目标函数与约束条件对单各风机进行控制。如文献[10]介绍了在弃风量最小、风力发电企业的发电收益最大

的调度模式下针对单个风机容量进行功率分配的方法。文献[11]提出了一种基于功率预测信息的风电场有功优化控制方法，根据多尺度的预测结果，以减少机组控制系统的动作次数为目标，采用固定比例分配的算法，使得各机组输出功率变化达到最优化。

本文从保证电网供电功率稳定、风电利用最大化入手，不考虑风电场自身的容量而将风电场作为整体按小系统来考虑。由于负荷是可以准确预测的，所以本文选取风电-火电联合应用为电力系统供电：利用风电功率预测系统进行风电功率预测及误差校正，根据负荷变化规律及风电预测功率对火电厂输送功率进行调节，以此来减小因风电不稳定性而造成电网功率波动的影响，并以实际数据进行了验证和分析。最后，介绍了储能和无功补偿装置的合理利用对进一步加强系统的稳定性的意义。

1 我国风电发展的常见问题

我国 85%风电并网装机容量和发电量集中在“三北”地区，而用电负荷主要集中在东南沿海等发达地区，因此生产、消费的区域性差异使得风电需要进行长距离的输送^[12]。由于风能属于过程性能源，是不可控的，具有随机性、不稳定性等特点，加之我国边远地区电网以及农村电网比较脆弱，强壮性不高，使得大规模风电场接入电力系统时会导致电网的稳定性降低，严重时会发生电网崩溃及大范围停电，造成严重的经济损失，给人们的生活带来不便。例如 2010 年全国发生了 80 起风电机组脱网事故；2011 年 1~8 月份全国共计发生 193 起风电机组脱网事故；2012 年西安城南停电，影响 15 万人民的正常生活。因此，如何安全可靠地实现风电场接入已迫在眉睫。

2 风电场输送功率、输送电压稳定性的改善

2.1 风电、火电的联合应用(“打捆”运行)

近年来,风电技术在我国得到了迅猛发展,装机容量迅速提升。但其本身不稳定性特点使得其在大规模并网时会对系统的稳定性带来严重影响。考虑到在我国风能资源与煤炭资源的地理分布具有较高的重合度以及风能本身的特点，本文设计了以下方案：用风电、火电的混合发电厂作为电力系统的发电系统，加上风电功率预测系统、储能技术及无功补偿技术的综合运用，通过调节火电厂的输送功率、储能系统的工作状态及调整无功补偿系统补偿值来维持整个系统的输送功率及输送电压的稳定。

例：假设整个系统输出功率为 500 MW，某风

电场由 30 台单机容量为 1.5 MW 的风机组组成，并网电压为 500 kV，为使风电并网时对电力系统稳定性的影响降到最低，设计了以下方案，详见图 1。

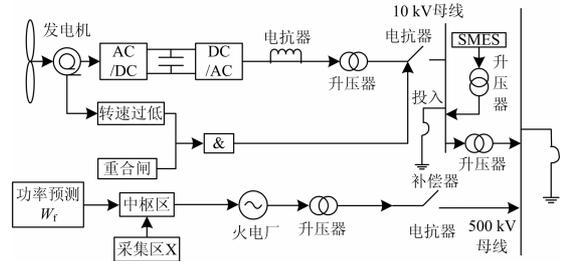


图 1 混合电厂设计图

Fig. 1 Hybrid power plant design

采用双馈变速恒频风电机组，通过变频系统可以使发电机转速与电网频率完全解耦，保证电网频率在风速变化时保持不变。将风电场的输出电压经过升压器汇集到 10 kV 母线上，对其统一进行功率补偿后再升压连接到 500 kV 的高压母线上。文献[8]指出如果风电的比重超过整个电网的 10%，将会对电力系统的安全稳定运行及电能质量产生不利的影响，因此设计中火电厂容量设定为 500 MW。风电预测系统给出的预测功率为 W_f ，采集信息区块给出数据 X (风电场实际投入运行的电机数量)，因此由中枢区的计算模块可得出火电厂应提供的功率为 $(500 - 1.5X - W_f)MW$ 。从文献[9]得知 1.5 MW 的风机出事概率为 0.206 8，所以本设计中 5 台同时故障的概率为 17%，考虑到经济性，设定储能区(SMES)容量为 10 MW。

图 2、图 3 分别给出了采用 APPT 功率仿真工



图 2 风电独自运行

Fig. 2 Wind power to run alone

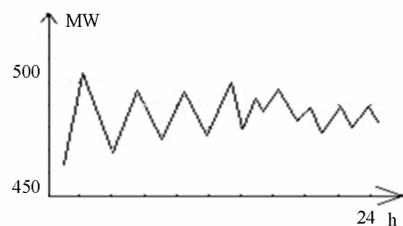


图 3 风电-火电联合运行

Fig. 3 Wind power-thermal power joint run

具模拟 24 小时内风电、风电-火电联合运行时的功率变化, 通过比较可以知道, 图 3 的功率比图 2 稳定, 即 $\Delta 1/50 > \Delta 2/500$ 。

2.2 功率预测

2.2.1 时间尺度选择及数据库建立

目前常见的功率预测根据预测提前时间尺度可分为超短期、短期和中长期功率预测^[13]。对风能进行多尺度的功率预测研究不仅可以满足对风电机组控制的需要, 也有助于电能的合理调度, 从而提高电网的稳定性, 保证供电质量^[14]。已知误差率随预测时间的增加而增大, 因此本文选取的超短期和短期时间尺度分别为 30 min 和 2 h, 并将前 72 h 的功率预测值、实际值和误差率 ϕ 组成的时间序列作为历史数据。首先对数据库中时间序列加以处理, 剔除不良信息; 然后根据之前短期时间内风速的变化规律及选取尺度 t 对历史数据序列进行分段处理, 选出用于风电功率预测的最佳时间序列段。

2.2.2 风电功率预测系统

风电在电力系统中的渗透水平不断提高的同时, 风电的随机性给风电的发展、电网的建设带来了很大的不便^[15]。所以, 对风电功率的预测就显得十分必要了。

经过近 10 年的大量研究工作, 国内外已经成功研发了短期风电预测系统。文献[13-15]探讨了基于 BP 神经网络的风电场出力短期预测系统, 并进行了预测误差的分析, 但是仿真结果显示该方法误差较大, 影响因素较多。文献[16]详细介绍了欧美国家风电预测系统的研究成果及其预测模型, 其中 AWPPS 系统模型及 ARMINES 系统模型可以在线运行, 并能自动调整参数, 并且已经成功运用到商业领域, 效果理想。

神经网络法是一种最常见的方法。该方法通过构造神经网络模型, 利用数据库中历史风速值和对应的风电场出力数据作为输入进行训练, 得到输出值, 并用该值来反映未来时间 t 内风电场将风资源转化成有效电能的能力。而 BP 网络由于具有非线性逼近的特性和结构简单、操作方便等特点, 在风电功率预测中得到了高度重视。BP 神经网络有输入层、隐含层和输出层三部分组成, 其中输入层包含风速、大气气压、风向、大气密度等信息; 隐含层包含一系列大量的输入-输出模式映射关系; 输出层由输出数据组成。图 4 给出了 BP 神经网络的结构图。

图 3 中, 在输入层(x_1, x_2, \dots, x_n)输入 NWP 中信息(大气压强、空气密度、大气湿度、风向、风速等), 通过隐含层中映射关系进行分析计算, 将结果

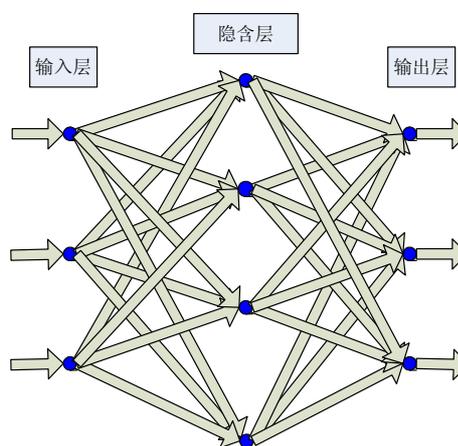


图 4 3 层 BP 神经网络结构图

Fig. 4 3-layer BP neural network structure

从输出层输出。在超短期功率预测中常常只考虑风速 v 作为输入。当程序开始后, 首先选择预测时间尺度, 当短尺度 $t=30$ min 时, 则进入神经网络进行训练, 由隐含层、输出层的激活函数(purelin、tansig)以及网络训练函数进行计算, 并根据所截取数据段的变化规律进行预测, 加以误差校正后输出; 当 $t=2$ h 时, 采用自适应拟合的方法对数据库序列进行拟合, 按照其基本的变化规律对输入风速值进行功率预测, 并采用 ARIMA 方法对预测结果进行校正输出。风电场神经网络功率预测流程图如图 5 所示。

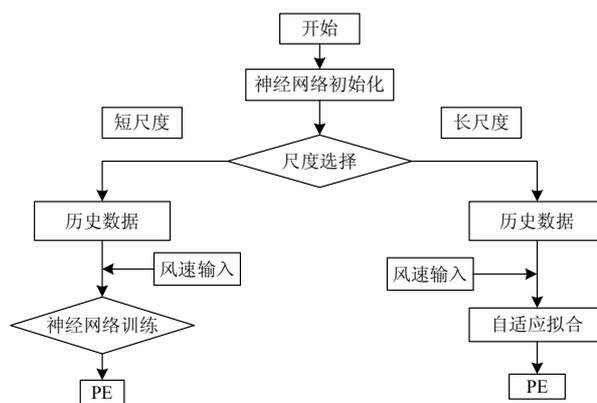


图 5 BP 神经网络的风电场出力预测流程图

Fig. 5 Flowchart of wind power pre-forecasting

以新疆某风电场实际数据为案例, 依据图 5 流程进行预测($t=30$ min), 预测结果分布图如图 6 所示。

由图 6 可知, 当 $t=30$ min 时, 预测值能够较好地反应实际值, 且两者的变化趋势大致上保持同步; 但是当实际功率突变较大时, 预测值误差也会随之增大, 最大误差将会大于 30%, 不能满足使用要求, 必须进行误差校正。

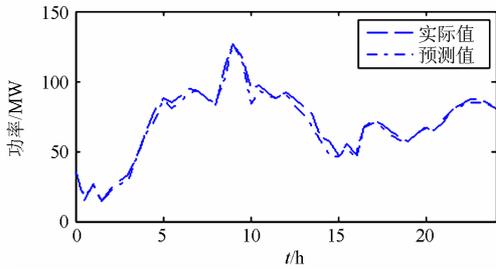


图 6 0~24 h 风电场出力预测结果

Fig. 6 Output forecast results of wind farm during 0~24 h

2.2.3 误差校正

事实表明, 不论用何种预测方法进行预测, 结果都会有一定误差, 因此减小预测误差也是功率预测的关键环节。当不考虑风电场自身的容量并且把风电场按小系统来考虑, 当误差率绝对值 $|\phi| \leq 5\%$ 时, 可以认为误差预测值是可信的, 即预测值的可信度大于等于 95%。此时

$$P_0 = P_E \quad (1)$$

对于 $|\phi| > 5\%$ 的预测值则按照式(2)、式(3)进行修正。

$$\text{已知 } \phi = \frac{P_e - P}{P} \times 100\%,$$

$$\text{当 } \phi < -5\% \text{ 时, } P_0 = P_E(1 - \phi) \quad (2)$$

$$\text{当 } \phi < 5\% \text{ 时, } P_0 = P_E(1 + \phi) \quad (3)$$

式中: P_e 为数据库中的预测值; P 为数据库中与 P_e 同一时间下风电场的实际功率值; P_E 为校正前预测值; P_0 为校正后输出值。

综上所述:

$$P_0 = \begin{cases} P_E & |\phi| \leq 5\% \\ P_E(1 - \phi) & |\phi| > 5\% \end{cases} \quad (4)$$

功率预测误差校正的流程图如图 7 所示。

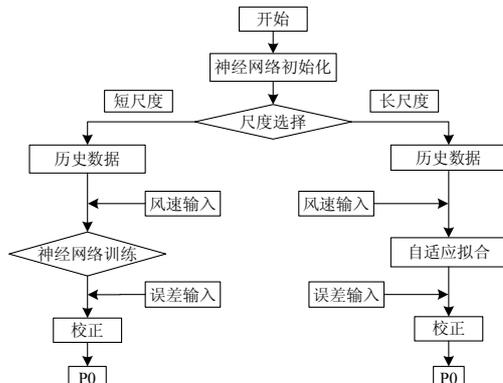


图 7 风电场功率预测误差校正流程图

Fig. 7 Error correction flowchart of wind farm power prediction

由式(4)对图 6 值进行校正, 校正结果如图 8、图 9 所示。

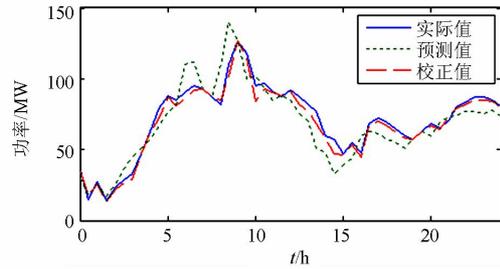


图 8 0~24 h 风电场出力预测校正图

Fig. 8 Calibration graph of wind farm output forecast during 0~24 h

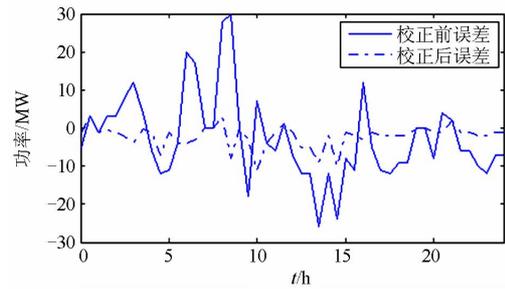


图 9 校正前后误差对照图

Fig. 9 Error correction control diagram

通过观察图 8、图 9 可知, 误差校正后的最大误差可由原来的 30%变为 12%, 且误差小于 5% 的值占到 84%, 误差小于 10% 的值可达到 95% 以上, 因此可知, 用误差校正后的预测值更能反应风电场风电的输送能力。

2.3 风电场储能技术的选择

储能系统(energy storage system, ESS)具有动态吸收能量并适时释放的特点, 能有效弥补风电的间歇性、波动性缺点, 改善风电场输出功率的可控性, 提升稳定水平。在风电并网系统中, 常需要利用各种储能技术来提高系统供电的稳定性和经济性^[17-18]。目前常用的储能技术主要有机械储能、化学储能和电磁储能。文献[19-26]给出了各种储能技术在电力系统中的应用方向及其各自的主要优、缺点。考虑到各种储能技术的综合特性, 本设计中选用超导储能技术(super conducting magnetic energy storage, SMES)。文献[23]中探讨了超导储能在电力系统中的应用问题, 并设计了对应的控制方法, 结果表明超导储能能够有效地保持并网点电压的稳定, 平滑机组的功率输出, 增强系统的稳定性; 文献[24]表明, 超导储能风电系统可以有效地降低风电的输出功率及系统的频率波动, 增加穿透电压的极限。

本文设计中由于风电功率预测系统给出的是 2 小时(预测误差随预测的提前时间 t 的增长而增加)的平均功率, 因此当风速较大, 风力发电机组输出电能较多时, 储能系统将风力发电机过剩电能暂储于储能系统, 降低系统电压峰值; 当风速较小、无风机组故障停运, 风力发电机组输出的电能不足或电网负载增加时, 储能系统将储存的能量释放出来并转化为电能来弥补电网电能需要, 保持电网输送功率的稳定。另外, 某风电机因故障停机时, 火电厂输出功率不能立即发生改变, 此时就需要储能装置进行放电; 当故障解除风电机运行时, 储能装置开始进入储能状态。

2.4 采集区

采集区主要通过监控 10 kV 母线上断路器的开断情况来确定风电机的运行情况。采集断路器断开的个数 X 传递至中枢区。通过 X 我们就可以知道此时火电厂的输送功率应为 $(500-W_{\text{r}}+1.5X)\text{MW}$ 才能保证输送功率的稳定。

3 风电并网的无功补偿问题

无功功率是保证电力系统电能质量、电压质量、降低网络损耗以及安全运行必不可少的部分^[27-28]。无功功率的不足会导致系统电压的降低, 增加线路损耗, 严重时损坏电力设备, 使系统解列, 造成大面积停电事故。在高压母线处进行无功补偿就是为了保证传输电压的稳定, 减小线路损耗。已知, 在视在功率一定时, 无功补偿可以增大功率因数, 增加有功输出, 节约电能。综合电网损耗、电网性能等因素, 电能传输时必须保持适当的输送电压 U 及输送电流 I ; 为满足传输所需的 U 、 I 时, 就要进行适当的无功补偿, 保证有足够的有功输出。

目前常用的无功补偿方法有安装同步调相机、并联电容器、并联电抗器以及使用静止无功补偿器等。文献[29-31]介绍了几种补偿技术的应用原理、应用条件以及应用效果, 应用结果显示采用无功补偿技术的电力系统系统损耗较少, 传输电压比较平稳, 电能质量较高。例如郑州电网使用无功补偿技术后使得河南南北联络线的功率输送极限提高了 5%; 凤凰山电站的 SVC 技术使得线路过高电压得到抑制, 并且在保证系统电压的稳定、改善系统电压的水平、降低电网损耗方面都有较好体现。

4 总结与展望

本文通过对风力、火力复合电源及无功补偿方案在风电并网中应用的理论分析, 理论上说明了混合电源技术、无功补偿技术、风电功率预测技术的

综合应用可以有效地优化电能质量, 提高风能利用率, 提高电网的稳定性和经济性。但是由于目前风电功率预测技术尚不成熟, 而国外的技术又不适用于我国, 因此我国在这方面还有很长的路要走。但是, 随着技术的不断成熟, 我国风电的发展前途将会十分广阔。

参考文献

- [1] 徐乾耀, 康重庆, 江长明, 等. 多时空尺度风电消纳体系初探[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 28-32.
XU Qian Yao, KANG Chongqing, JIANG Changming, et al. Preliminary analysis on wind power accommodation system from multiple temporal and spatial scale perspective[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 28-32.
- [2] 李辉, 赵斌, 史旭阳, 等. 含不同风电机组风电场暂态运行特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 1-7.
LI Hui, ZHAO Bin, SHI Xuyang, et al. Simulation study on the transient operational performances of a wind farm including different wind turbine generator systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 1-7.
- [3] 谭谨, 王晓茹, 李龙源. 含大规模风电的电力系统小扰动稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 15-23.
TAN Jin, WANG Xiaoru, LI Longyuan. A survey on small signal stability analysis of power systems with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 15-23.
- [4] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.
HUANG Xueliang, LIU Zhiren, ZHU Ruijin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [5] 蒋程, 刘文霞, 张建华, 等. 含风电接入的发电系统风险评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 260-270.
JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Risk assessment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 260-270.
- [6] 施琳, 罗毅, 涂光瑜, 等. 考虑风电场可调度性的储能容量配制方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 120-127.
SHI Lin, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Energy storage

- sizing method considering dispatch- ability of wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 120-127.
- [7] 洪翠, 林维明, 温步瀛. 风电场风速及风电功率预测方法研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(1): 60-66. HONG Cui, LIN Weiming, WEN Buying. Overview on prediction methods of wind speed and wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(1): 60-66.
- [8] 茆美琴, 曹雨, 周松林. 基于误差叠加修正的改进短期风电功率预测方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 34-38. MAO Meiqin, CAO Yu, ZHOU Songlin. Improved short-term wind power forecasting method based on accumulative error correction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 34-38.
- [9] 王建成, 杨苹, 杨曦. 基于数值天气预报的风电功率预测建模研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(2): 34-38. WANG Jiancheng, YANG Ping, YANG Xi. Research on wind power prediction modeling based on numerical weather prediction[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(2): 34-38.
- [10] 张粒子, 周娜, 王楠. 大规模风电接入电力系统调度模式的经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 105-110. ZHANG Lizi, ZHOU Na, WANG Nan. Economical comparison for different generation scheduling with large scale wind power connected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 105-110.
- [11] 汤奕, 王琦, 陈宁, 等. 采用功率预测信息的风电场有功优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 1-8. TANG Yi, WANG Qi, CHEN Ning, et al. An optimal active power control method of wind farms based on wind power forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 1-8.
- [12] 王春亮, 宋艺航. 中国电力资源供需区域分布与输送状况[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 69-74. WANG Chunliang, SONG Yihang. Distribution of power resource demand and supply regions and power transmission in china[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 69-74.
- [13] 唐家银, 王沁, 何平, 等. 同时考虑故障相关和变故障率的可修系统可靠性计算[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(19): 119-126. TANG Jiayin, WANG Qin, HE Ping, et al. Taking into account the failure rate of failure becomes relevant and reliable computing systems repairable[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010, 40(19): 119-126.
- [14] 蒋程, 刘先正. 风电机组出力的概率性评估[J]. 现代电子学报, 2013, 30(1): 51-54. JIANG Cheng, LIU Zhengxian. Probabilistic assessment on the output power of wind turbines[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(1): 51-54.
- [15] 周建强, 李玉娜, 屈卫东, 等. 基于风速时空信息的BP神经网络超短期风速预测研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 109-112. ZHOU Jianqiang, LI Yuna, QU Weidong, et al. A study on BP neural network ultra-short term wind speed forecast based on historical and spatial wind speed data[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 109-112.
- [16] 袁越, 李强, 李群, 等. 风电功率特性分析及其不确定性解决方案[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(1): 67-72. YUAN Yue, LI Qiang, LI Qun, et al. Wind power characteristic analysis and its uncertainty solution[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(1): 67-72.
- [17] 刘世念, 苏伟, 魏增福. 储能技术在风电并网领域的市场需求分析[J]. 科技管理研究, 2014(1): 120-122. LIU Shimian, SU Wei, WEI Zengfu. Forecast of energy storage applied in wind power integration[J]. Science and Technology Management Research, 2014(1): 120-122.
- [18] 严干贵, 刘嘉, 崔杨, 等. 利用储能技术提高风电调度入网规模的经济性[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 45-52. YAN Gangui, LIU Jia, CUI Yang, et al. Economic evaluation of improving the wind power scheduling scale by energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 45-52.
- [19] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9. ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [20] 袁铁江, 晁勤, 李义岩, 等. 大规模风电并网电力系统经济调度中风电场出力的短期预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 23-27. YUAN Tiejiang, CHAO qin, LI Yiyang, et al. Short-term

- wind power output forecasting model for economic dispatch of power system incorporating large-scale wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 23-27.
- [21] 刘立阳, 吴军基, 孟绍良. 短期风电功率预测误差分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 65-70.
LIU Liyang, WU Junji, MENG Shaoliang. Research on error distribution of short-term wind power prediction[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 65-70.
- [22] FOX B. 风电并网: 联网与系统运行[M]. 刘长浔, 冯双磊, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [23] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等. 风电并网中的储能技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 145-151.
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on application of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power system Protection and Control, 2013, 41(23): 145-151.
- [24] 李强, 袁越, 谈定中. 储能技术在风电并网中的应用研究进展[J]. 河海大学学报, 2010, 38(1): 115-122.
LI Qiang, YUAN Yue, TAN Dingzhong. Progress on application of energy storage technology in wind power grids[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(1): 115-122.
- [25] 陈娜娜, 宁祎, 李富生, 等. 风电并网中储能技术应用的探讨[J]. 机电工程技术, 2011, 40(12): 49-51.
CHEN Nana, NING Yi, LI Fusheng, et al. Discussion on application of energy storage system of wind power[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2011, 40(12): 49-51.
- [26] TOMKOEI A, TAKAHASHI R. Smoothing control of wind power generator output by superconducting magnetic energy storage system[J]. Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems, 2007, 26(12): 302-307.
- [27] 鲁伟静, 丁光彬, 王鹏飞. 无功补偿技术与无功补偿设备分析[J]. 水科学与工程技术, 2012(1): 65-68.
LU Weijing, DING Guangbin, WANG Pengfei. Discussion of reactive compensation technology and the analysis of the reactive compensation equipments[J]. Water Science and Engineering Technology, 2012(1): 65-68.
- [28] 孙红霞, 赵彩宏. 光伏/风电并网测试装置的设计与开发[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 103-109.
SUN Hongxia, ZHAO Caihong. Design and development of testing devices for photovoltaic/wind power grid connection[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 103-109.
- [29] 朱建军, 卢志刚. 中低压配电网的无功补偿[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(4): 19-23.
ZHU Jianjun, LU Zhigang. Reactive power compensation in low and middle voltage distribution grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(4): 19-23.
- [30] 阳丽, 蒋正忠, 韦佳祥. 电力系统无功补偿的研究[J]. 电气开关, 2012, 50(3): 46-49.
YANG Li, JIANG Zhengzhong, WEI Jiexiang. Research on reactive power compensation of power systems[J]. Electrical Switch, 2012, 50(3): 46-49.
- [31] 贾秩军. 基于风电并网的无功优化研究[J]. 能源与节能, 2015(4): 34-35.
JIA Yijun. Study on reactive power optimization based on wind power network[J]. Energy and Energy Conservation, 2015(4): 34-35.

收稿日期: 2014-09-26; 修回日期: 2014-11-16

作者简介:

孟令斌(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源开发; E-mail:654904430@qq.com

朱凤龙(1958-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高电压与电工理论与新技术。

(编辑 葛艳娜)