

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.21.005

考虑大规模风电接入的备用容量计算

王丹平¹, 陈之栩², 涂孟夫¹, 杨争林³, 丁 怡¹

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 210061;

2. 华北电网有限公司, 北京市 100053; 3. 中国电力科学研究院(南京), 江苏省南京市 210003)

摘要: 备用需求是日前发电计划优化中的重要约束,也是保障电网可靠运行的重要基础之一。随着大规模风电的集中接入,传统以高可靠性常规电源为依据的备用设置方法难以保障间歇性电源接入下的电网可靠运行。考虑大规模风电间歇特性,兼顾电网运行的安全性和经济性,采用聚类分析技术对风电功率预测数据进行筛选,建立风电功率预测误差与备用需求变化间的关联模型,得到风电接入后的新能源备用容量。实际系统算例测试验证了其有效性。

关键词: 正态分布; 预测误差; 发电可靠性; K 均值聚类; 欧氏距离; 备用容量

0 引言

风能的间歇性和随机性给电力系统的运行增加了风险^[1-2],使得当前以高可靠性常规电源为依据的备用设置无法满足风电并网后系统运行的可靠性需求,需要研究新的备用分析方法,维持电力系统的功率平衡和稳定。因此,在大规模风电接入后,迫切需要对系统的备用容量进行研究。

近年来,新能源备用的研究受到越来越多的关注。文献[3]指出风能的不可控性使得对风电功率的预测无法与其他传统能源一样可靠。随着风电容量比例的增加,系统需要与风电场额定功率相当的备用容量。文献[4]考虑负荷预测误差和机组故障停运等随机因素,建立系统备用容量获取模型。文献[5-6]对传统备用容量确定的概率性方法进行扩展,采用原有概率性方法的思路求得最优备用容量。文献[7-8]采用对历史预测误差数据进行统计分析的方法得到风电功率预测误差及负荷预测误差分布,并运用曲线拟合法得到风电接入后满足系统一定可靠性水平的备用容量。

文献大都通过对历史预测数据进行统计分析得到预测偏差的概率密度函数,但没有对数据进行筛选,由于备用容量统计分析是基于对历史数据规律的归纳与总结,通过寻找其历史变化规律,对未来的变化规律进行外推。因此,历史数据的筛选对备用结果有很大影响。文献[9-11]在构造模型时,均在聚类分析理论的基础上对数据进行筛选,其思路值得借鉴。

收稿日期: 2012-02-11; 修回日期: 2012-06-01。

国家电网公司科技项目“华北电网间歇式能源日前日内协调优化调度系统研究与开发”。

在大规模风电接入的电力系统中,除机组故障和系统负荷预测误差等因素,风电的随机性、间歇性也会使风电功率预测存在较大误差,系统随机性增大。传统以常规能源为基础的备用设置已不满足风电接入后系统的可靠性要求,因此,需要研究新的备用设置方法来弥补因风电功率预测误差造成的系统供电和负荷的不平衡。

本文结合某网级电力系统实际情况,考虑大规模风电接入情形下系统的备用容量需求,以应对风电功率预测误差造成的系统供电和负荷的不平衡。考虑大规模风电间歇特性,兼顾电网运行安全性和经济性,本文引入聚类分析技术,对风电功率预测数据进行筛选,并进行统计分析,建立风电功率预测误差与旋转备用需求变化间的关联模型,形成日前新能源备用需求计划。

1 发电可靠性指标

本文将备用容量满足系统安全运行要求的概率作为系统可靠性指标^[12],备用需求不超过给定值限值的概率为:

$$\int_{R(y) \leq \xi} p(y) dy \quad (1)$$

式中: $y \in Y$ 为决定风电备用需求的不确定随机变量; $p(y)$ 为 y 的概率密度函数; $R(y)$ 为风电接入引起的备用需求; ξ 为给定限值。

若置信度水平为 $\alpha \in (0, 1)$, 则满足某一置信度水平的风险备用需求可表示为:

$$R_\alpha = \max \left\{ \xi \in R: \int_{R(y) \leq \xi} p(y) dy \leq \alpha \right\} \quad (2)$$

式中: α 为备用容量满足系统运行的置信度水平^[13]; R_α 为风险备用需求。

从物理意义上讲, $1-\alpha$ 可看做系统失负荷概率

所允许的上限值。

2 风电功率预测误差分布模型描述

2.1 相似度比较法求相似日

虽然风电出力难以预测且误差大,但其季节性分布非常有规律,在风电大发和匮乏季节所需的备用容量增加不同,因此本文根据风电的规律性变化,将相似性理论引入系统风电输出功率变化规律的研究中,选出与计划日较为相似的历史数据,并对历史数据进行筛选,再对相似日的风电功率预测误差数据进行统计分析,以提高备用容量计算的准确性。

在进行相似度比较时,由于计划日的输出功率未知,可用计划日前一日的风电功率数据代替计划日的实测数据进行相似性比较。

将历史日和计划日的输出功率序列进行相似度比较,采用欧氏距离作为判定相似性程度的依据,欧氏距离的定义如下:

$$d_{i,j} = \left(\left| \frac{x_{i,1}}{P_{\text{cap},i}} - \frac{x_{j,1}}{P_{\text{cap},j}} \right|^2 + \left| \frac{x_{i,2}}{P_{\text{cap},i}} - \frac{x_{j,2}}{P_{\text{cap},j}} \right|^2 + \cdots + \left| \frac{x_{i,96}}{P_{\text{cap},i}} - \frac{x_{j,96}}{P_{\text{cap},j}} \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \cdots, x_{i,96})$ 和 $X_j = (x_{j,1}, x_{j,2}, \cdots, x_{j,96})$ 分别为 i 日和 j 日的输出功率序列,一日共 96 个采样点; $P_{\text{cap},i}$ 和 $P_{\text{cap},j}$ 分别为 i 日和 j 日的采样机组装机容量;欧式距离 $d_{i,j}$ 为 i 日和 j 日的输出功率序列在几何平均距离上的相似性, $d_{i,j}$ 越小,相似度越大。

若给定阈值为 Z ,输出功率序列 X_i 和 X_j 满足 $d_{i,j} < Z$,则称 X_i 和 X_j 几何相似。依次将历史日的输出功率序列和计划日序列进行比较,若 $d_{i,j} < Z$,则视为相似数据,并将其作为计算备用的历史样本数据区间。

选取数据库中 4 d 的典型历史数据作为说明,如图 1 所示。

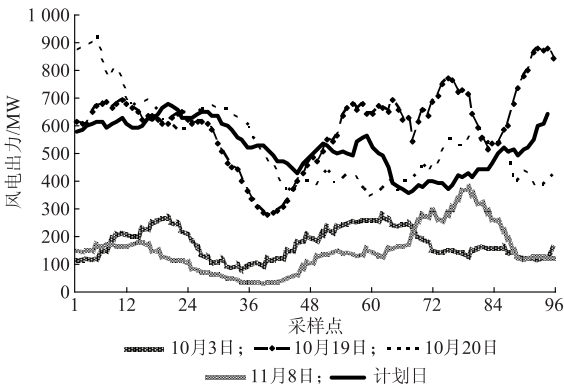


图 1 相似日比较

Fig. 1 Comparison of data on similar historical days

将计划日 11 月 20 日与图中 4 个历史日期数据进行相似度比较,计算得到 10 月 3 日,10 月 19 日,10 月 20 日,11 月 8 日与计划日的欧式距离分别为 1.417,0.41,0.45,1.475;若设定阈值 $Z=1.2$,其中 10 月 19 日和 10 月 20 日的欧式距离小于阈值,认为可以作为相似日,并作为备用计算的历史数据,而 10 月 3 日和 11 月 8 日则不予考虑。

2.2 改进的 K 均值聚类法求相似时段

聚类分析技术直接比较各事物之间的性质,将性质相近的归为一类,性质差别较大的归入不同的类,因此常被用来衡量数据源间的相似性。

考虑到风电输出功率在计划日内各时段存在较大差异,其预测误差在不同时段分布也不同,需要对计划日各个时段分别进行备用计算,计算量较大。

在风电日内引入聚类分析技术,对相似日历史数据进行时段聚类。聚类后,只需对各相似时段进行备用分析。

K 均值聚类是一种比较典型的划分方法聚类,给定 N 个向量和 K 个聚类,通过一系列迭代,将 N 个向量划分为 K 个相似的类,使同一类中的对象相似度尽可能高,而不同类之间的相似度尽可能低。考虑到 K 均值聚类随机选择 K 个类的初始聚类中心对结果影响较大,本文通过采用层次聚类得到 K 个划分,将这 K 个划分的中心作为初始聚类中心,再将相似日各时段(此时段指一日 24 个时段,其数据由 1 h 内的 4 个采样数据求均值法得到)的输出功率序列进行 K 均值聚类^[14],得到计划日相似时段,然后分别对各个相似时段进行备用分析。首先设定聚类个数为 K ,算法流程如图 2 所示。

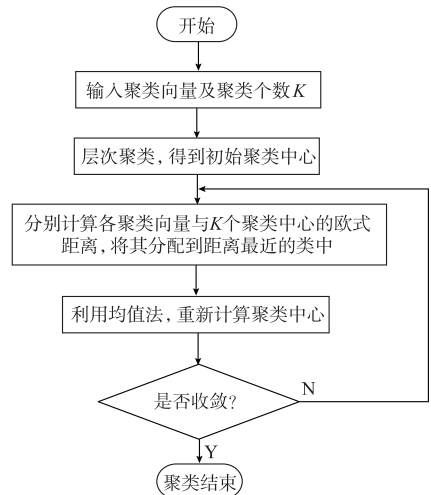


图 2 改进的 K 均值聚类流程

Fig. 2 Flow chart of improved K-means clustering

2.3 风电功率预测误差分布

文献[8]中,风电功率预测值和实际值的偏差服从正态分布,基于此结论统计与计划日相似的历史时间范围内,各相似时段风电输出功率预测总量和实际输出总量的误差。

在日前计划编制时更关心一日的误差情况。根据调度的需要和新能源输出功率情况,统计电网的计划和运行数据,统计数据间隔为 15 min,对每个时间点,风电预测误差为实际出力与预测出力的差值。每个时间点 t 风电出力误差如下:

$$e_{wp,t} = P_{wp,t}^{fore} - P_{wp,t}^{real} \tag{4}$$

式中: $e_{wp,t}$ 为时间点 t 的风电功率预测误差; $P_{wp,t}^{real}$ 为时间点 t 的风电输出功率; $P_{wp,t}^{fore}$ 为时间点 t 的风电预测输出功率。

若将一日分为若干个时段(聚类分析分为 4 个相似时段),统计每个时段预测出力偏差分布。对于时段 T ,其时间范围内共有 N 个时间点(间隔为 15 min),历史数据时间长度为 M 天,则对于时段 T ,共有 MN 个出力偏差数据,利用极大似然估计法,可得到偏差分布的期望和方差。

3 新能源备用计算模型

备用是针对系统运行中不确定性因素(系统负荷、机组事故等)配置的,在常规能源电力系统中^[15],备用容量可用来应对系统负荷预测误差及机组停运带来的影响。风电并网后,因风电预测精度远不及负荷预测,系统随机性增大,备用容量可用来应对大规模风电场出力的不确定性给系统带来的影响。

本文考虑大规模风电接入情形下的新能源备用容量,即用于弥补风电功率预测误差造成的系统供电不平衡的备用容量。因此,与风电功率预测误差概率分布函数相同,风电出力误差对备用的需求同样为概率密度函数,若 $f_T^{reserve}(e_{wp})$ 为 T 时段新能源旋转备用需求概率密度函数,其与风电偏差概率密度函数 $f_T(e_{wp})$ 的关系为:

$$f_T^{reserve}(e_{wp}) = f_T(e_{wp}) \tag{5}$$

新能源备用由一定系统可靠性水平 α 决定,其表达式为隐函数,即

$$\int_{-\infty}^{R_{wind,h}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{wind,h}} \exp\left(-\frac{(\xi - \mu_{wind,h})^2}{2\sigma_{wind,h}^2}\right) d\xi = \alpha \tag{6}$$

式中: $R_{wind,h}$ 为 h 时段新能源备用容量; $\mu_{wind,h}$ 为 h 时段风电功率预测误差分布期望; $\sigma_{wind,h}$ 为 h 时段风电功率预测误差分布方差。

综上所述,新能源备用计算流程如图 3 所示。

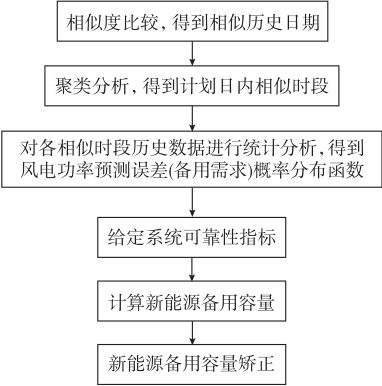


图 3 新能源备用计算流程
Fig. 3 Calculation flow chart of new energy reserve capacity

4 实例分析

采用 C++ 编程,以风电机组总装机容量为 2 830 MW 的某网级电力系统为案例分析对象,计算日前备用计划。将案例日风电功率数据和历史数据进行相似性比较,得到相似历史数据,并通过聚类分析得到相似历史时段,相似时段如表 1 所示。

表 1 相似时段列表
Table 1 Similar time segment

聚类	相似时段
1	0,1,5,6,7,9
2	2,3,4,10,22,23
3	11,12,13,14,15,16
4	8,17,18,19,20,21

从聚类结果看,通过聚类得到的相似时段基本符合风电场出力规律。通过对各相似时段预测误差数据进行统计分析,计算备用容量得出:风电接入后,当系统可靠性指标分别为 0.85,0.90,0.95 时,需要设置的新能源备用容量如图 4 所示。

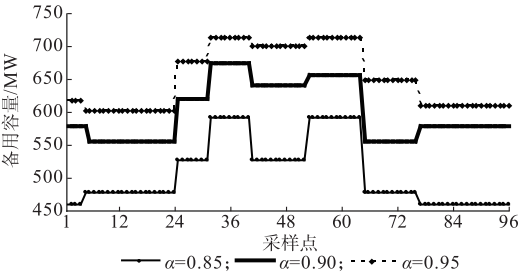


图 4 新能源备用容量
Fig. 4 New energy reserve capacity

由图 4 可以看出,当系统可靠性水平越高(即备用容量设置的置信度水平越高),系统所需要的新能源备用容量相对越大。但随着置信水平的增加,系统备用容量的增量逐渐减小,这说明系统在不同置

信水平下备用容量获取区间的灵敏度不同。当可靠性指标增加到一定水平,系统所需设置的新能源备用容量增量会越来越少。

采用经验估计法,用负荷的百分比(本文为3%)设置常规能源备用,得到常规备用容量,与风电并网后,系统需要设置的新能源备用容量需求如图5所示。

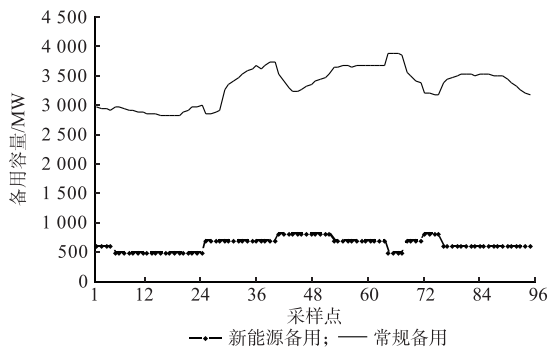


图5 系统备用与新能源备用容量

Fig. 5 System reserve and new energy reserve capacity

由图5可以看出,目前接入电网的风电装机容量比重有所增加,但相对常规能源比例较小,故新能源备用相对于常规能源备用需求较少。但随着新能源比重的增加,系统需要设置的新能源备用比例会随之增加。

此外,通过计算发现,当备用容量增加到一定水平时,其对系统的可靠性水平的提高并不显著,不同置信水平下新能源备用容量如图6所示。

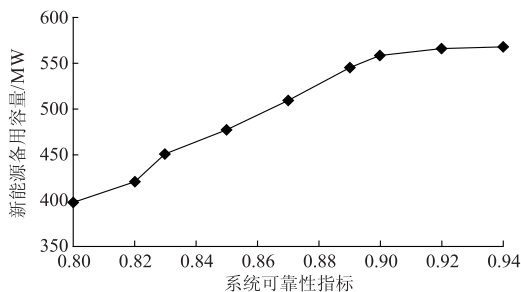


图6 不同置信水平下新能源备用容量

Fig. 6 New energy reserve capacity under different confidence levels

因此,系统运行人员在确定置信度水平时,应综合考虑备用获取成本和置信度水平,以期在经济性和安全性之间取得平衡。

5 结语

本文研究大规模风电入网条件下,保证系统安全运行的新能源备用需求。风电并网后,由于风能的间歇性和不稳定等特性,使得系统随机性增大。

为保证系统安全运行,考虑增加额外的备用容量以应对风电功率预测偏差给系统带来的影响。本文引入聚类分析方法对历史数据进行筛选,建立风电功率预测误差与备用需求变化间的关联模型,计算日前新能源备用需求计划,为新能源接入电网后系统的安全运行提供了保障。

上述模型是以满足系统安全运行为前提的调度。考虑到经济性要求,若机组提供旋转备用,则需要支付一定的备用费用,系统总运行成本应包含这一费用。将备用需求加入安全约束经济调度和安全约束机组组合优化模型中统一求解,可实现经济性和可靠性之间的协调,也可作为进一步研究的方向。

参考文献

- [1] GOUVEIA E M, MATOS M A. Evaluating operational risk in a power system with a large amount of wind power[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(5): 734-739.
- [2] BRORISH K, KIRTLEY J. Pitfalls of modeling wind power using Markov chains[C]// Proceedings of the IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, March 15-18, 2009, Seattle, WA, USA: 6p.
- [3] 周双喜,王海超,陈寿孙. 风力发电运行价值分析[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 110-114.
ZHOU Shuangxi, WANG Haichao, CHEN Shousun. Analysis on operation value of wind power resources[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 110-114.
- [4] 王乐,余志伟,文福拴. 基于机会约束规划的最优旋转备用容量确定[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 14-19.
WANG Le, YU Zhiwei, WEN Fushuan. A chance-constrained programming approach to determine requirement of optimal spinning reserve capacity[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 14-19.
- [5] ORTEGA-VAZQUEZ M A, KIRSCHEN D S. Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(1): 114-124.
- [6] 苏鹏,刘天琪,李兴源. 含风电的系统最优旋转备用的确定[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 158-162.
SU Peng, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Determination of optimal spinning reserve of power grid containing wind [J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 158-162.
- [7] DOHERTY R, O'MALLEY M. A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 587-595.
- [8] BLUDSZUWEIT H, DOMINGUEZ-NAVARRO J A, LLOMBART A. Statistical analysis of wind power forecast error[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 983-991.
- [9] 金海峰,熊信良,吴耀武. 基于相似性原理的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 45-48.
JIN Haifeng, XIONG Xingen, WU Yaowu. Short-term load forecasting based on analogous theory [J]. Automation of

Electric Power Systems, 2001, 25(23): 45-48.

[10] 鞠平,姜巍,赵夏阳,等. 96点短期负荷预测方法及其应用[J]. 电力系统自动化,2001,25(22):32-36.
JU Ping, JIANG Wei, ZHAO Xiayang, et al. Ninety-six points short-term load forecasting theory and applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(22): 32-36.

[11] 杨争林,唐国庆,宋燕敏,等. 改进的基于聚类分析的超短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(24):83-87.
YANG Zhenglin, TANG Guoqing, SONG Yanmin, et al. Improved cluster analysis based ultra-short term load forecasting method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 83-87.

[12] 张国强,吴文传,张伯明. 考虑风电接入的有功运行备用协调优化[J]. 电力系统自动化,2011,35(12):15-19.
ZHANG Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Optimization of operation reserve coordination considering wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 15-19.

[13] 葛炬,王飞,张粒子. 含风电厂电力系统旋转备用获取模型[J]. 电力系统自动化,2010,34(6):32-37.
GE Ju, WANG Fei, ZHANG Lizi. Spinning reserve model in

the wind power integrated power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 32-37.

[14] 何迎生,段明秀. 基于改进 kmeans 聚类方法的 RBF 神经网络设计[J]. 邵阳学院学报:自然科学版,2008,2(5):48-50.
HE Yingsheng, DUAN Mingxiu. Design of RBF network based on improved kmeans clustering[J]. Journal of Shaoyang University: Natural Science Edition, 2008, 2(5): 48-50.

[15] 孙荣富,张涛,梁吉. 电网接纳风电能力的评估与应用[J]. 电力系统自动化,2011,35(4):70-75.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power integration capacity in power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 70-75.

王丹平(1986—),女,通信作者,硕士,主要研究方向:电力系统运行与优化。E-mail: wangdanping@sgepri.sgcc.com.cn

陈之栩(1978—),男,博士,主要研究方向:电力市场、经济调度、电力系统优化。

涂孟夫(1974—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统运行与优化。

Reserve Capacity Calculation Considering Large-scale Wind Power Integration

WANG Danping¹, CHEN Zhixu², TU Mengfu¹, YANG Zhenglin³, DING Qia¹

(1. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China;

2. North China Grid Co. Ltd., Beijing 100053, China;

3. China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: Reserve demand is an important constraint in the optimization for daily generation scheduling, which is also important for the safe grid operation. With large-scale wind power integration, the traditional method of the reserve setting based on conventional energy resources cannot meet the demand of the grid operation security. Considering the intermittence of the wind power, and economical and security factor, an associated model between prediction error of wind farm output and varying reserve capacity is established by using clustering analysis to sift the data of wind farm output. Analysis of actual system examples shows the effectiveness of the proposed model.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: normal distribution; prediction error; power generation reliability; K-means clustering; Euclidean distance; reserve capacity

中国第三大水电站向家坝水电站正式蓄水

经国家能源局批准,2012年10月10日上午9点,位于四川省宜宾市的国内第三大水电站——向家坝水电站实施导流洞封堵,正式下闸蓄水,预计一周内水位将由目前的280 m左右蓄水至354 m。

向家坝水电站是金沙江下游梯级电站开发中的最末一个梯级电站,装机容量6.4 GW,单机800 MW水轮发电机组为世界最大,装机规模仅次于三峡、溪洛渡水电站,目前为中国第三大水电站。2002年10月,向家坝水电站经国务院正式批准立项,2006年11月26日正式开工建设,2015年将全面投产。

【摘自国家电网公司网】