

考虑风速的风电场等值方法

李洪美^{1,2}, 万秋兰¹, 向昌明³

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 徐州师范大学 电气工程及自动化学院, 江苏 徐州 221116; 3. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 基于对风电场输出功率与输入风速关系的分析, 提出了考虑风速的风电场等值方法。该方法考虑了风电机组在不同风速情况下风能利用系数不同的特点, 将风能利用系数描述为风速的分段函数并将其作为权值对风速加权等值。对所提等值方法与传统的不考虑风能利用系数差异的等值方法进行了仿真比较, 结果表明所提等值方法较传统等值方法等值误差更小。

关键词: 风速; 等值; 双馈风电机组; 风能利用系数; 风电场

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.023

0 引言

随着风电的发展, 风电在系统容量中所占比例不断增大, 风电场对电力系统稳定性的影响也日趋明显。在电力系统仿真模型中考虑风电场对系统的影响显得越来越重要。而目前的风电场通常是由众多机组组成, 如果在仿真时考虑各台机组的详细模型会增大仿真计算量, 使仿真时间大幅增加。所以建立风电场的等值简化模型成为进行电力系统仿真必须面临的问题。

双馈风电机组 (DFIG) 由于具有有功功率和无功功率解耦控制的特性, 成为目前风电场中应用最为广泛的风电机组。目前国内外很多文献对含有该机组的风电场的等值问题进行了探讨^[1-10]。很多等值模型为了简化等值过程, 多是假设风电场所有风电机组风速相同来进行等值处理的。由于风电场规模一般较大, 各台机组风速不同, 所以有文献取风电场的平均风速作为等值机组的输入风速, 但风电机组的功率输出与其输入风速并非线性关系, 所以该等值方法误差较大。为了减小等值误差, 文献^[11-13]利用风电机组风速功率关系, 计算出每台机组在各自风速下的有功输出, 然后将输出功率叠加, 倒推风速。该方法计算结果相对较准确, 但计算量大。

文献^[14]根据风轮机机械特性曲线, 将风电机组按照转子转速分为 3 组, 然后进行等值。但该等值方法的前提是要计算出各台机组的转子转速, 从而增加了分类的计算量。

本文根据风电机组输入风速与输出功率的关系, 在分析影响输出功率的各个因素的基础上, 提出了考虑风电机组的风能利用系数而进行风速等值的新方法。

1 风电场风速等值

忽略风电机组损耗, 根据风力发电原理, 风电机组输出功率为:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (1)$$

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

其中, $\lambda = \omega_r R / v$ 为叶尖速比, R 为叶片的扫风半径, ω_r 为风轮机转速; P 、 C_p 、 v 分别为机组的输出功率、风能利用系数和机组轮毂高度处风速, 最大风能利用系数 $C_{pmax} = 0.48$; ρ 为空气密度; A 为风电机组叶轮扫风面积; β 为风轮机叶片桨距角; $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5.0$, $c_5 = 21.0$, $c_6 = 0.0068^{[15]}$ 。

风电场总的输出功率为 (假设各机组型号相同):

$$P_\Sigma = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} C_{pi} \rho A v_i^3 = \frac{1}{2} \rho A \sum_{i=1}^n C_{pi} v_i^3 \quad (2)$$

其中, n 为机群机组总数。

由等值前后风电机组总的额定功率不变, 设机组 i 的额定功率为 P_{ie} , 由于同一风电场一般采用额定功率相同的机组, 所以有 $P_{ie} = P_e$, P_e 为机组的额定功率, 即:

$$P_{e\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{ie} = n P_e \quad (3)$$

所以, 有:

$$P_\Sigma = \frac{1}{2} \rho A \sum_{i=1}^n C_{pi} v_i^3 = \frac{n}{2} \rho A C_{peq} v_{eq}^3 \quad (4)$$

其中, v_{eq} 为风电场等值风速, C_{peq} 为等值风能利用系数。

则可得:

$$v_{eq}^3 = \frac{\sum_{i=1}^n C_{pi} v_i^3}{n C_{peq}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{pi}}{C_{peq}} v_i^3 \quad (5)$$

由式(1)知,当风速小于等于额定风速时, $\beta=0$,此时 C_p 只与叶尖速比 λ 有关, λ 是转速与风速的比值。而风电机组转子转速是风速的分段线性函数^[16],具体关系如图1所示,图中转子转速 ω_r 为标么值。

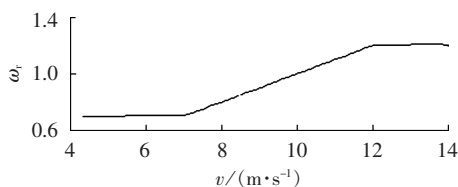


图1 风速-转子转速曲线

Fig.1 Curve of wind speed vs. rotor speed

这里针对额定风速为13 m/s的某一具体风电机组,根据其实际的风速-转矩数据,通过曲线拟合得到其风速-转速数学表达关系见式(6)。所用风电机组参数如下:发电机,额定功率为1.632 MW,额定电压为690 V,额定频率为50 Hz, $R_s=0.00706$ p.u., $R_r=0.005$ p.u., $X_m=2.9$ p.u., $X_s=0.171$ p.u., $X_r=0.156$ p.u., $H=5.04$ s;电缆, $R=0.1153$ Ω/km, $L=0.00105$ H/km, $C=11.33$ μF/km。

$$\omega_r = \begin{cases} 0.0038v + 0.6832 & 0 \leq v \leq 7 \\ 0.0998v + 0.0015 & 7 < v \leq 13 \\ 0.004v + 1.0472 & v > 13 \end{cases} \quad (6)$$

可以看出,风速大于7 m/s小于等于13 m/s时, λ 近似为常数,即在该段风速范围内机组运行于最佳叶尖速比,此时各台机组的风速虽然不同,但 C_p 值相同,为简化等值,取 C_{peq} 为该风速段的值,即 $C_{pi}=C_{peq}(7 < v_i \leq 13)$,由式(5)知,该风速段机组的等值风速为:

$$v_{eq}^3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{pi}}{C_{peq}} v_i^3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3 \quad (7)$$

当风速高于额定风速或低于7 m/s时, $C_{pi} \neq C_{peq}$,此时根据关系式(5)只要求得 $C_{pi}/C_{peq}=\alpha_i$ 比值即可。

通过实际仿真数据得到 $4.5 < v < 7$ 和 $12.5 < v \leq 16$ 时其风能利用系数比值关系表达式分别为 $\alpha_i = 0.0301v_i^3 - 0.6696v_i^2 + 4.9688v_i - 11.3061$ 以及 $\alpha_i = -0.0158v_i^2 + 0.3804v_i - 1.29$ 。当风速大于16 m/s后,机组输出功率恒定。

对上述关系进行综合得到等值风速表达式:

$$v_{eq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i v_i^3}{n} \right)^{1/3} \quad (8)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_i \leq 4.5 \\ 0.0301v_i^3 - 0.6696v_i^2 + 4.9688v_i - 11.3061 & 4.5 < v_i < 7 \\ 1 & 7 \leq v_i \leq 12.5 \\ -0.0158v_i^2 + 0.3804v_i - 1.29 & 12.5 < v_i \leq 16 \\ 13.3407/v_i^3 & v_i > 16 \end{cases}$$

2 风电机组参数等值

本节主要研究参数相同的机组等值问题,所以等值前后机组参数只有个别发生改变,发生变化的参数等值如下:

$$\begin{cases} S_{eq} = \sum_{i=1}^n S_i \\ C_{eq} = \sum_{i=1}^n C_i \\ P_{Teq} = \sum_{i=1}^n P_{Ti} \end{cases} \quad (9)$$

其中, S 为风机的额定输出功率; C 为逆变器电容器电容; P_T 为风轮机的机械功率;下标eq表示等值参数。

3 仿真实验

以某风电场为例进行了仿真实验。该风电场35 kV线路共2回线,线路总长20.523 km。一回主干线:LQJ-240/40型线路长度为9.331 km,LQJ-95/20型线路长度为1.503 km,共有13台风机。二回主干线:LQJ-240/40型线路长度为9.331 km,LQJ-95/20型线路长度为0.358 km,共有14台风机。风电机组采用恒功率因数控制。取风电场一天24 h运行情况,风速、有功功率取样间隔5 min。

风速分别采用如下2种等值方式进行等值。

- 等值方式1,采用式(8)进行等值。
- 等值方式2,采用下式进行等值:

$$v_{eq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^3}{n} \right)^{1/3} \quad (10)$$

采用上述2种方式得到的等值风速如图2所示。将上述2种等值方式得到的风速代入等值系统与原系统的实测数据进行比较,图3为风电场接入点有功功率输出 P 比较曲线,图中 P 为标么值。

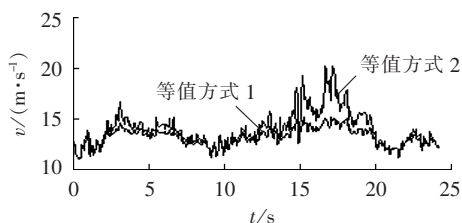


图2 风电场等值风速

Fig.2 Equivalent wind speed of wind farm

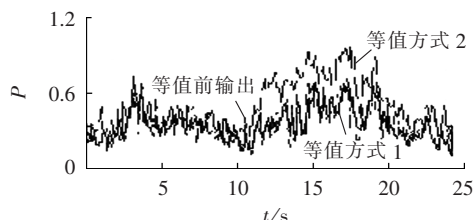


图3 风电场接入点有功功率

Fig.3 Active power of PCC

从仿真图可以看出,采用本文所述的等值方式 1, 风速波动时,系统的有功功率更接近于实际系统。而采用等值方式 2 会产生较大的等值误差。

从上述 2 种情况下的仿真比较可以看出,为了减少风电场等值误差,在求取风电场等值风速时,应该考虑机组在不同风速下的风能利用系数的不同,而不是简单地采用等值方式 2 所述的方法将所有风况下机组都看作运行于最佳叶尖速比来进行等值,这样势必会导致等值不准确,特别是在大风速时会产生较大的等值误差。

4 结论

本文研究分析了风速与风机总输出有功功率之间的关系,提出风电场等值风电机组新的风速等值方法,该方法考虑了风电机组在不同风速情况下风能利用系数不同的特点,在求等值风速时,不仅考虑机组风速,还考虑了机组的风能利用系数,分别求得低风速段、中风速段和高风速段的风能利用系数与最佳叶尖速比时的风能利用系数的比值,采用风速的立方分别乘以风能利用系数比值,然后叠加取平均值,得到等值风速的立方值,从而求得等值风速。通过仿真,证明了该等值方法较常规等值方法误差更小。本文研究为相同类型机组等值提供了一种简洁有效的等值途径。

参考文献:

- [1] SLOOTWEG J G, KLING W L. Aggregated modeling of wind parks in power system dynamics simulations[J]. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 626-631.
- [2] FERNANDEZ L M, SAENZ J R, JURADO F. Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines[J]. Renewable Energy, 2008, 33(1): 129-140.
- [3] FERNANDEZ L M, SAENZ J R, JURADO F. Dynamic models of wind farms with fixed speed wind turbines[J]. Renewable Energy, 2006, 31(8): 1203-1230.
- [4] 孙国霞, 李啸骢. 大型变速恒频风电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10): 69-73.
SUN Guoxia, LI Xiaocong. Modeling and simulation of variable-speed wind generator system with large capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(10): 69-73.
- [5] 姜文, 严正, 杨建林. 基于解析法的风电场可靠性模型[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 79-83.
JIANG Wen, YAN Zheng, YANG Jianlin. Wind farm reliability model based on analytical method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 79-83.
- [6] 陈树勇, 王聪, 申洪. 基于聚类算法的风电场动态等值[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 11-19.
CHEN Shuyong, WANG Cong, SHEN Hong. Dynamic equivalence

for wind farms based on clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 11-19.

- [7] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.
LI Dongdong, CHEN Chen. A study on dynamic model of wind turbine generator sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119.
- [8] PASUPULATI S, ELLIS A, KOSTEROV D. Method of equivalencing for a large wind power plant with multiple turbine representation [C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA: [s.n.], 2008: 1-9.
- [9] MULGADI E, BUTTERFIELD C P, ELLIS A, et al. Equivalencing the collector system of a large wind power plant[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006. Montreal, QC, USA: [s.n.], 2008: 20-24.
- [10] FERNANDEZ L M, GARCIA C A, SAENZ J R, et al. Reduced model of DFIGs wind farms using aggregation of wind turbines and equivalent wind[C]//IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2006. MELECON 2006. Malaga, USA: [s.n.], 2006: 881-884.
- [11] FERNANDEZ L M, GARCIA C A, SAENZ J R, et al. Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3): 691-704.
- [12] 苏勋文. 风电场动态等值建模方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
SU Xunwen. Research on dynamic equivalent modeling of wind farms[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [13] BROCHU J, LAROSE C, GAGNON R. Validation of single and multiple-machine equivalents for modeling wind power plants [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 532-541.
- [14] HANSEN A D, SORENSEN P. Control of variable speed wind turbines with doubly-fed induction generators[J]. Wind Engineering, 2004, 28(4): 411-432.
- [15] 吴红斌. 基于风力机特性的风电机组潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 22-25.
WU Hongbin. Power flow analysis of wind power generator based on wind turbine characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 22-25.
- [16] MENG Z J. Improving the performance of the equivalent wind method for the aggregation of DFIG wind turbines[J]. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, Michigan, USA: [s.n.], 2011: 1-6.

作者简介:

李洪美(1969-), 女, 山东烟台人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电;

万秋兰(1950-), 女, 江西南昌人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail: qlwan@seu.edu.cn)。

(下转第 159 页 continued on page 159)

- [12] 邓苏. 信息系统集成技术[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2004.
- [13] 杨合民,李朝晖,王宏. 基于局部放电监测的水轮发电机主绝缘诊断分析系统[J]. 电力系统自动化,2004,28(15):61-66.
- YANG Hemin,LI Zhaohui,WANG Hong. Integrated diagnosis and analyzing system for stator insulation of large-size hydro-generators based on partial discharge[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(15):61-66.
- [14] 万元,李朝晖,薛松,等. 发电机中性点局部放电在线监测系统研究[J]. 水电能源科学,2009,27(4):197-201.
- WAN Yuan,LI Zhaohui,XUE Song,et al. Study on partial discharge online monitoring system mounted at neutral point for electric generators[J]. Water Resources and Power,2009,27(4):197-201.
- [15] 史会轩,李朝晖,毕亚雄. 基于声波探测的水轮机空化分析方法

研究与应用[J]. 水利水电技术,2008,39(9):75-77.

SHI Huixuan,LI Zhaohui,BI Yaxiong. Study and application of method for analysis on cavitation characteristics of hydro-turbine based on acoustic detection[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2008,39(9):75-77.

作者简介:

谢国财(1985-),男,江西南昌人,博士研究生,从事电力设备状态监测与故障诊断方面的研究工作(E-mail:xgc30@163.com);

李朝晖(1963-),男,湖南岳阳人,教授,博士研究生导师,从事发电生产过程控制、电站集成自动化、计算机仿真与自动测试方面的研究工作。

Integrated monitoring of hydroelectric generators based on Community Intelligence

XIE Guocai,LI Zhaohui

(College of Hydropower and Information Engineering,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: The framework of integrated monitoring of hydroelectric generators based on CIA (Community Intelligence Agent) model is introduced,which is made up of the CIA system in control domain and the CIA system in maintenance domain. The CIA model contains the message processing layer,behavior control layer and core functional layer,and each CIA contacts with external module(such as other CIAs) through Request message or Report message. The interaction,collaboration,associated action and data sharing among all CIAs in maintenance domain are realized via the real-time field bus(such as CAN bus) or Ethernet. The state data of whole hydroelectric generators are divided into the sampled data,transient data,detailed data and summary data,for which the selectively intelligent storage is applied to improve the pertinence and validity of state analysis and fault diagnosis with less storage space. The real-time interaction,collaboration,associated action among CIAs in monitoring system and the state data fusion of hydroelectric generators are realized through the time fusion,operating condition fusion,abnormal event fusion and conflict resolution strategy,which effectively guarantees the relevance of operating states from different subsystems of hydroelectric generators.

Key words: hydroelectric generators; integration; monitoring; Community Intelligence; intelligent control; operating condition fusion; time fusion; abnormal event fusion

(上接第 123 页 continued from page 123)

Wind farm equivalence method considering wind speed

LI Hongmei^{1,2},WAN Qiulan¹,XIANG Changming³

(1. Electrical Engineering School,Southeast University,Nanjing 210096,China;

2. School of Electrical Engineering & Automation,Xuzhou Normal University,Xuzhou 221116,China;

3. Jiangsu Fangtian Power Technology Co.,Ltd.,Nanjing 211102,China)

Abstract: Based on the analysis of the relationship between the output power of wind farm and the input wind speed,a method of wind farm equivalence considering wind speed is proposed,which,considering the wind power utilization coefficient of wind generator varies along with the wind speed,describes piecewise the wind power utilization coefficient as the function of wind speed and takes it as the weight of equivalent wind speed. The proposed equivalence method is compared with the traditional equivalence method by simulation and result shows that the error of equivalence considering different wind power utilization coefficients is smaller.

Key words: wind speed; equivalence; DFIG; power utilization coefficient; wind farms