

基于 K - means 聚类算法的风电场 机群划分方法

徐立亮¹, 胡仁祥¹, 张毅¹, 常喜强², 闫亚东¹

(1. 国网吐鲁番供电公司 新疆 吐鲁番 838000;

2. 国网新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 针对风电场动态等值建模的难题,采用 K - means 聚类算法,探讨了风电场机群划分问题,致力于达到风电场并网运行点特性的一致性。为减小等值算法带来的误差,在风力机功率转换特性不变的前提下,采取只对同一机型的风电场进行等值划分的方式来完成。并以某实际风电场为例进行算例仿真,结果表明,等值前后风电场并网运行点特性保持一致,等值算法能够准确反映风电场机组的动态响应特性。

关键词: 聚类算法; 风电场; 等值参数; 等值模型

Abstract: For the problem of dynamic equivalent modeling for wind farms, K - means clustering algorithm is adopted, and the partitioning issues of wind turbine grouping are discussed, which is devoted to achieve the consistency for the characteristics of parallel operation point of wind farms. For reducing the error brought by the equivalent algorithm, and on the premise that the power conversion characteristics of wind turbine are unchanged, it completes equivalence partitioning only on the same type of wind farms. And the example simulation is carried out taking an actual wind farm for example. The results show that the characteristics of parallel operation point consist with each other before and after the equivalence of wind farms, so the equivalent algorithm can accurately reflect the dynamic response characteristics of wind turbines in wind farms.

Key words: clustering algorithm; wind farm; equivalent parameters; equivalent model

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015)06 - 0072 - 04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.017

0 引言

随着能源紧缺和空气污染指数不断上升,风电等新能源的大力发展已成为社会发展的必然趋势。但由于风能等清洁能源受约于空气稀薄因素的影响,呈现出间歇、突变的特性,致使风电不能快速发展。同时,风机在运转的过程中受制于地理位置的约束,一般表现出不同的出力特性。而对于实际的风电场并网分析过程,在计算精度最高化的指标限制下,如对每台风电机组均采用详细的模型进行建模仿真,显然会增加数据的规模,致使计算难以继续。正是在这种背景下,提出风电场等值算法,为准确分析大容量风电场对电力系统稳定运行的影响提供方法,对含风电等新能源的电力系统仿真分析具有一定的理论参考价值。

近年来,国内外学者对风电场等值问题进行了诸多研究,均是采取将整个风电场等风速的理论,在

前人的分析过程中无一对大型风电场进行分区计算^[1-2]。文献[3]对近年在风电场等值方面的研究进行了总结,在各种方法研究的基础上采用了最小二乘法对风电场等值过程中的参数进行优化。文献[4]在考虑风电机组的运行方式和机组类型的前提下应用潮流计算的方法对同时含有双馈风机与直驱风机的风电场进行等值计算。文献[5]对风电场等值方法进行了阐述,在等值的过程中仅依据风机捕获风速的不同而进行分群,并没有考虑风电机组阻抗等内部因素的等值。文献[6]在风电场开机方式和单机运行点改变时,对风电机组及并网区系统的相互影响进行研究,从而达到简化等值模型的目的。风电场的等值计算,其本质是在整个风电场有功功率不变的前提下进行的,而传统的等值计算过程都是利用某台风机在实测风速下的功率乘以该风电场风电机组的台数来近似表示此风电场的实际出力,显然在计算的过程中并没有考虑到地理位置的差异性,从而忽略了各区域风速的变化。因此,严格来讲

此处风电机组的计算风速并非实测风速,根本无法达到从源头消除误差的目的。

针对此风电场等值建模的难题,提出基于 K-means 聚类算法的风电场机群划分方法。其中,在对风电场进行等值计算时,为了追求计算速率,同时保证计算结果的准确性,采取对风电场中同一类型的风电机组进行等值计算的策略。另外,出于精度最优化的考虑,在实际的等值计算中,采取从当地的风资源分布情况、风电场等值机群的划分及风电场内部的电网参数等三方面进行等值划分^[7-8]。最后,为了验证等值计算的准确性,应用电力系统综合程序 PSASP 对某典型地区的风电场进行详细模型的搭建,并应用聚类算法对该风电场进行等值建模,希望通过两种建模方式的对比,对一些参数分析调整,得到一组适应于风电场不同运行状态时的一组等值参数,为以后的风电场计算提供一定的捷径。

1 风电场机组的聚类方法

1.1 风电机组的运行区域划分

风电机组的机械功率输出方程为

$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

由于自然风在利用的过程中并不能完全转化为可用的机械能,引入风能利用系数 C_p 表征风能的捕获效率,其随叶尖速比、桨距角的变化曲线如图 1 所示。

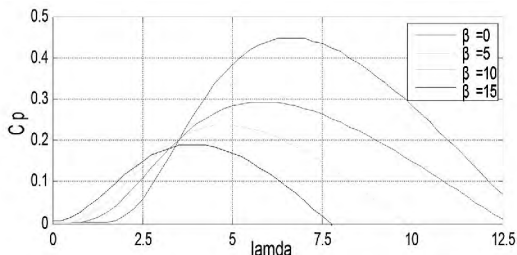


图 1 风能利用系数图

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12.5}{\lambda_1}} \quad (2)$$

式中:

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

λ 为叶尖速比; β 为桨距角。

风电机组在运行的过程中,受本身机械强度以及电力电子器件容量的制约,风电机组在运行过程中受的功率与转速的可以分为以下 4 个运行区域。在运行过程中功率—风速曲线如图 2 所示。图 2

中, V_{in} 是切入风速, V_r 是额定风速, V_{out} 是切出风速。

由图 2 可以看出风力发电机运行在 4 个区域中。

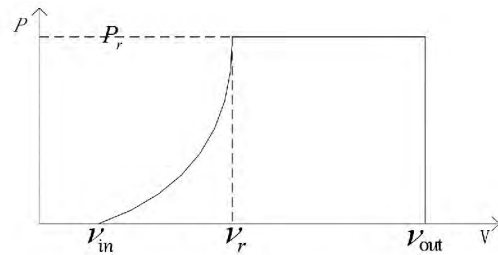


图 2 风机输出功率与风速的关系

1) 当风速 $V < V_{in}$ 时,风机不能正常启动产生能量。

2) 当风速 V 满足 $V_{in} \leq V < V_r$ 时,风机输出功率随着风速的增加而呈现出大幅上升的趋势。在此阶段一直处于最大功率跟踪运行中,风能利用系数一直处于最大值,叶尖速比也处于最佳状态,即 $C_p(\lambda, \beta)$ 已经处于定值,输出功率只随风速 V 的改变而变化。

3) 当风速 V 满足 $V_r \leq V < V_{out}$ 时,功率保持在额定功率 P_r ,不随时间的变化而发生变化。当运行当此阶段时输出功率已经达到了最大值,为了保护设备以及处于安全性的考虑,随着风速的增加,桨距角开始动作使得风力机功率保持在额定功率。

4) 当风速 $V > V_{out}$ 时,为了保障风机的安全运行,此时转换的功率为 0 即风机停止运行。

1.2 聚类算法

聚类算法又称为群分析法,是统计学中研究分类问题的方法之一。K-means 算法是基于欧氏距离的聚类算法,在计算过程中应用欧氏距离作为相似度的评价指标。该算法的具体计算过程如下^[1]:

1) 选取 K 个对象作为初始聚类的中心;

2) 每个对象代表一个簇的初始平均值,将剩余的对象划分到对应距离最近的初始簇中;

3) 循环步骤 2) 在迭代的过程中若第 n 次测量函数的值与第 $n-1$ 次迭代相同,表明已达到迭代目的,迭代终止。

2 风电机组动态参数聚合

2.1 风力机及控制参数等值^[9-11]

所用的风力机都是同种型号的,故每个风力机的内部构建都是相同的。整个风电场的风速模型可以定义为

$$v = \sqrt[3]{\sum v_i^3 / n} \quad (3)$$

式中 v_i 表示每台风机所捕获到的风速; n 表示风电场中风机的台数; v 表示等效后风电场的风速。

将风电场的扫风面积近似等效为各个风机扫风面积的求和得

$$A = \sum A_i \quad (4)$$

在等值的过程中,为了保证整个风电场在等效模型与详细模型下的输出功率一致性,将风力机的转速等效模型定义为

$$\omega = \sqrt[3]{\sum \omega_i^3 / n} \quad (5)$$

可以求出等值后的叶尖速比

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{\sqrt[3]{\sum \omega_i^3 / n} R}{\sqrt[3]{\sum v_i^3 / n}} \quad (6)$$

由以上的分析可以看出等值后的风力机与风力机群中每台风力机的最佳叶尖速比是相同的。被等值机群风力机机械之和为

$$\begin{aligned} \sum P_{mi} &= \frac{1}{2} \rho A_i R^3 \sum \omega_i^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda^3} \\ &= \frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{1}{n} \sum \omega_i^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda^3} \end{aligned} \quad (7)$$

由于等值是针对距离比较相近的风力机组进行计算的,它们都是通过同一根母线并网的,等值风电场的容量、有功功率以及无功功率等参数都可以直接用各个风电机组的相关参数求和的形式表示。

2.2 风电场模型等值参数计算^[12]

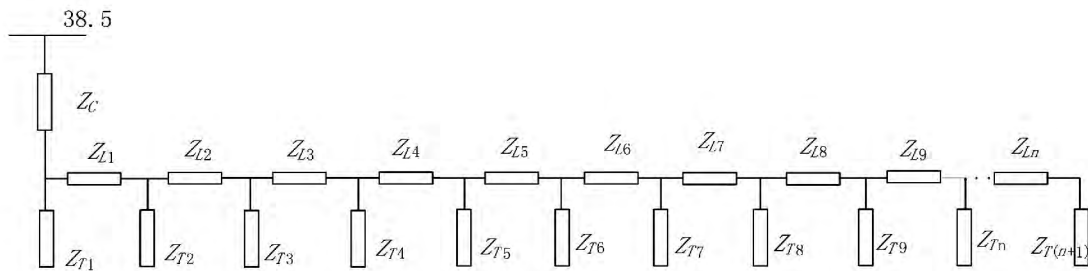


图4 实际风电场内部接线图

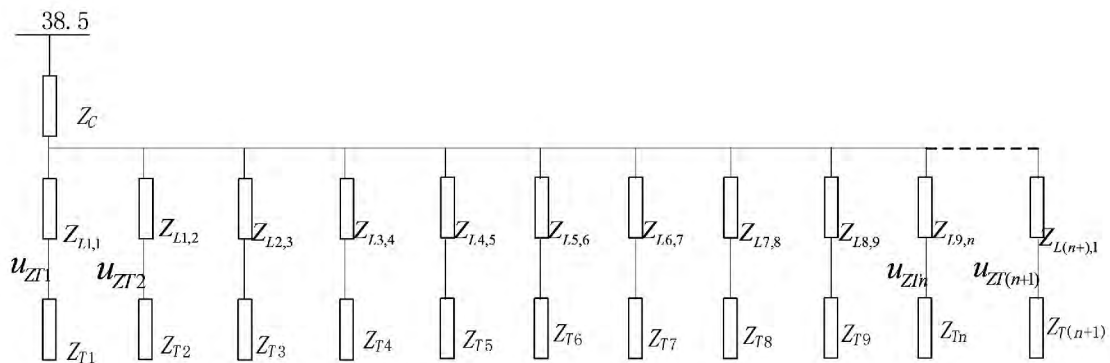


图5 简化后的风电场内部接线图

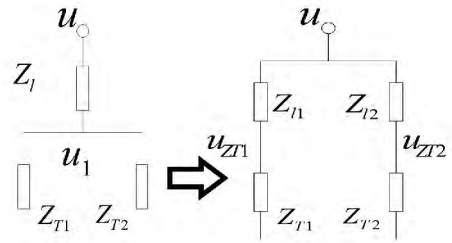


图3 风电场内部电网变换图

在风电场等值电路的计算中,需保持变换前后端子的端电压恒定不变。

为了使端电压保持不变,在变换的过程中应该满足等式:

$$u_1 = u_{ZT1} = u_{ZT2} \quad (8)$$

有恒等式:

$$\frac{u(Z_{T1} // Z_{T2})}{Z_1 + Z_{T1} // Z_{T2}} = u \frac{Z_{T1}}{Z_{11} + Z_{T1}} = u \frac{T_{T2}}{Z_{11} + Z_{T1}} \quad (9)$$

$$Z_{11} = \frac{Z_{T1} Z_1}{Z_{T1} // Z_{T2}} \quad (10)$$

$$Z_{12} = \frac{Z_{T2} Z_1}{Z_{T1} // Z_{T2}} \quad (11)$$

为了使实际风电场内部接线图简化的方便,将同一机群中相同的阻抗值用 $Z_{L1}, Z_{L2}, \dots, Z_{Ln}; Z_{T1}, Z_{T2}, \dots, Z_{T(n+1)}$ 两组不同的参数表示。风电场实际内部接线图如图4所示。

表1 不同出力下的稳态仿真结果

机组出力	模型类型	数值	相对	数值	相对	数值	相对
		100%	误差	75%	误差	50%	误差
有功 /MW	详细	199.3	0.3%	149.84	0.33%	100.1	0.4%
	等值	198.7		149.3		99.69	
电压 / (p. u.)	详细	35.518	0.15%	36.219	0.08%	36.732	0.02%
	等值	35.573		36.25		36.746	

表2 不同功率因数的稳态仿真结果

功率因数	模型类型	数值	相对	数值	相对	数值	相对
		0.98	误差	0.99	误差	1	误差
有功 /MW	详细	195.46	0.2%	197.43	0.32%	199.32	0.31%
	等值	195.83		196.79		198.7	
电压 / (p. u.)	详细	37.022	0.08%	36.586	2.6%	35.518	0.15%
	等值	37.053		36.629		35.573	

由于等值是针对运行点相近的机群,且这些机群并联接到同一母线上。由式(9)的恒等关系可以将图4所示的实际风电场内部接线图简化成图5所示的简化接线图。

将图5中的 $Z_{T1}, Z_{T2}, \dots, Z_{T(n+1)}$ 做出如下的修正:

$$Z'_{T1} = Z_{T1} + Z_{L1,1} \quad (12)$$

$$Z'_{T2} = Z_{T2} + Z_{L1,2} \quad (13)$$

由于等值机群中风机型号相同,故有

$$Z_{L1} = Z_{L2} = \dots = Z_{Ln} = Z_L \quad (14)$$

$$Z_{T1} = Z_{T2} = \dots = Z_{T(n+1)} = Z_T \quad (15)$$

将式(14)和式(15)依次代入式(12)和式(13)

可得

$$Z'_{T1} = Z'_{T2} = \dots = Z'_{T(n+1)} = Z'_T \quad (16)$$

将式(14)~式(16)代入式(10)和式(11)中可得

$$Z'_T = Z_T + \frac{Z_T \times Z_L}{Z_T // Z_T} \quad (17)$$

通过上面的转换可以得到

$$Z = Z_C + Z'_{T1} // Z'_{T2} // \dots // Z'_{T(n+1)} \\ = Z_C + \frac{1}{\frac{1}{Z'_T} + \frac{1}{Z'_T} + \dots + \frac{1}{Z'_T}} \quad (18)$$

为了表征所建等效模型的准确性,在所做的分析中提出了利用相对误差来反应等效方法可信程度的策略。将详细模型与等值模型之间的差异性用相对误差来表示,其中,详细模型的数值定义为 V_{detail} ,等值模型的数值定义为 $V_{\text{equivalent}}$,相对误差值定义为 V_{relative} ,则相对误差可用式(19)来表示。

$$V_{\text{relative}} = \frac{|V_{\text{equivalent}} - V_{\text{detail}}|}{V_{\text{detail}}} \times 100\% \quad (19)$$

3 算例分析

为了验证等值模型的正确性,对风电场出口的潮流计算结果进行比较。在 PSASP 中进行计算验证,计算过程中所用风机额定功率为 1.5 MW,变流器额定功率为 0.59 MW,PSASP 中采用风机出口电压 0.69 kV,通过变压器变到 20 kV,再经过升压变压器升到 110 kV,接入无穷大系统。该地区风场风机属于双馈风电机组,控制方式为“功率因素”控制方式。

表1为机组不同出力情况下,等值模型与详细模型在 35 kV 汇流母线处的有功功率和电压值。表2为在不同功率因数运行状态下,等值模型与详细模型在 35 kV 汇流母线处的有功功率和电压值。实验结果表明,在两种运行状态下,等值模型与详细模型的相对误差都比较小,从而验证了等值模型的正确性。

4 结论

分析了大型风电场等值建模的方法,从风能分布模型、等值机群的划分及风电场内部的电网参数等三方面进行等值划分。为了验证所建立等值模型的正确性,在两种不同运行方式下计算等值模型与详细模型的相对误差,通过对比分析可以看出等值模型与详细模型间的误差非常小,为实际工程应用中风电场等值计算提供了捷径,具有一定的参考价值。

(下转第84页)

4 结 论

改进了现有的电能质量在线监测方案,并通过多组实例对改进方案进行了验证,得出以下结论:

1) 所改进的电能质量在线监测方案在一定程度上避免了错误遥测、遥信信号造成的设备状态误判,具有较好的适应性;

2) 所改进的方案在设备负荷变化明显时,具有更好的适应性及可行性。

下一步工作中,将同时从技术与管理两个角度出发,对电能质量在线监测方案进行优化,在技术上研究负荷变化较小的情况下设备状态的判断方法,从管理上研究杜绝错误信息上送的手段,双管齐下,进一步提升电能质量在线监测的水平。

参考文献

[1] Q/GDW 649-2011 电能质量监测系统技术规范[S].
 [2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(一)——电能质量一般概念[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):1-4.
 [3] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(二)——供电网谐波的测量与分析[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):1-4.
 [4] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)——电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动

化设备,2003,23(12):1-4.

[5] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(四)——电压波动与闪变的测量分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):1-4.
 [6] 刘俊勇,杨洪耕,肖先勇. 电能质量问题的研究和技术进展(五)——电能质量监测与数据管理. 电力自动化设备,2004,24(2):1-4.
 [7] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(六)——电能质量控制技术进展[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):1-4.
 [8] 肖先勇,杨洪耕,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(七)——电力市场环境下的电能质量问题[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):1-4.
 [9] 符玲,何正友,麦瑞坤,等. 小波熵证据的信息融合在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008(13):64-69.
 [10] 郭创新,彭明伟,刘毅. 多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报,2009(31):1-7.
 [11] 王勇,刘金宁,曹曼,等. 基于概率论与证据理论的风电场电能质量评估方法研究[J]. 华北电力大学学报,2012,39(3):65-70.

作者简介:

赵 静(1982) 博士,研究方向为调度自动化;
 温丽丽(1982) 硕士,研究方向为调度自动化;
 郭 亮(1982) 博士,研究方向为调度自动化。

(收稿日期:2015-08-15)

(上接第75页)

参考文献

[1] 林俐,潘险险. 基于分裂层次半监督谱聚类法的风电场机群划分方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):8-14.
 [2] 陈迎. 基于运行数据的风电场等效建模研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
 [3] 闫广新,晁勤,刘新刚,等. 含变速双馈风电机组风电场的等值问题[J]. 可再生能源,2008,26(1):21-23.
 [4] 张元,郝丽丽,戴嘉祺,等. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(6):138-146.
 [5] 米增强,苏勋文,杨奇迹. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报,2010,25(5):162-170.
 [6] 辛拓,申洪,李扬絮,等. 一种实用的风电场等值方法研究[J]. 广东电力,2012,25(4):59-64.
 [7] 贾彦,刘璇,李华,等. 考虑尾流效应对风电场机组布

局的影响分析[J]. 可再生能源,2014,32(4):429-435.

[8] 孙蕾. 变速恒频风力发电机组建模与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2009,47-52.
 [9] 李芸,王德林. 大型风电场的等值模型及其改进研究[J]. 电工电能新技术,2014,33(7):11-17.
 [10] 付蓉,谢俊,王保云. 风速波动下双馈机组风电场动态等值[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):1-6.
 [11] 袁贵川,倪林,陈颖. 大型风电场等值建模与仿真分析[J]. 广东电力,2010,23(11):6-9.
 [12] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.

作者简介:

徐立亮(1990) 硕士,从事电网运行工作。

(收稿日期:2015-08-14)