

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.06.033

考虑电网故障后转子转速的风电场等值建模

胡庆林, 付 盼

(内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 风力发电装机容量逐年上升,对大型风电场并网发电过程中的动态特性研究十分必要,为了对风电场进行快速、精确建模,提出1种将被并入电网发生故障后,风力发电机转子转速作为风电机组分群聚类的依据,应用SPSS软件,快速聚类方法——K-均值聚类算法进行聚类。通过MATLAB/Simulink软件对DFIG型风电场进行多机等值建模,考虑电网发生故障时对系统暂态特性的影响。在保证仿真精度的前提下大幅度缩小了仿真时间,且更加接近风电场实际运行工况。经过对仿真结果的对比分析验证了该方法的优越性。

关键词: 风电场建模; K-均值聚类; 转子转速; 双馈发电机

Equivalent Model of Wind Farm Considering the Rotor Speed After Grid Fault

HU Qinglin, FU Pan

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology,
Inner Mongolia Baotou, 014010, China)

Abstract: To study the dynamic characteristics of large wind power plants and to model the wind farm rapidly and accurately, it is suggested that the rotor speed of wind power generator be taken as the parameter for clustering the wind turbine unit when it is incorporated into the power grid. A fast clustering algorithm, named K-means clustering algorithm, is employed for clustering via the software SPSS. An equivalent model of multiple generators in DFIG-type wind farm is established by the software MATLAB/Simulink considering the impact of grid failure on transient characteristics of system. The simulation time is reduced greatly on the premise of ensuring the accuracy of the simulation, and the simulation result is more close to the actual operating condition of wind farm. The superiority of the proposed method is verified by comparative analysis of simulation results.

Key words: wind farm model; K-means clustering; rotor speed; doubly-fed induction generator

0 引言

中国风力发电机组装机容量已经跃居世界首位^[1-3],对风电场理论研究所具有的重要意义不言而喻^[4-6]。其中风电场等值建模一直是理论研究的重点之一,风电场可能由数十台风机构成,如对风场内所有风机详细建模,则所建模型过于庞大,仿真计算速度慢长,无法满足实际工程中对风电场快速建模的需要,并且对风电场理论分析重点在于风电场整体输出(有功、无功、并网点电压等)对被并入电网动态特性的影响,因此对每台风机进行建模分析的意义

不大。

许多文献都对风电场等值建模方法进行了论述,文[7]按不同机组类型分群,将同1类型的风机等效为1台机组,这种方法应用在风场内机组种类较多的场合;文[8]将能够表征风电机运行特性的特征状态变量作为分群依据,进行多机表征建模;文[9]论述了基于遗传算法的等值建模方案;文[10]提出利用同调等值法将风电场内所有运行状态相似的机组等效为1台风机,对风场进行多机等值;文[11]对复杂情况下的尾流效应进行分析,提出将“尾流影响因子”相同的机组等效为1台风机;文[12]指出目前风电场出现的“空转弃风”现象,将风能利用系数作

收稿日期:2018-01-11; 修回日期:2018-03-13

基金项目:内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY14165)。

Project Supported by Inner Mongolia Autonomous Region University Scientific Research Project(NJZY14165).

为风机分群依据,此方法可以较好的解决当电网管理部门发出限电指令时对风电场的建模分析。

以上文献从不同角度对风电场建模展开研究,每种模型都有其优缺点及适用场合。总结可知风电场多机等值建模,机组分群依据多与输入风速有关,然而风速并不是表征机组运行状态的唯一指标,有些情况下由风速作为分组依据的等值模型,仿真精确度并不理想,如当风场发生“空转弃风”时,并且当风场内各机组输入风速差别较大时,运用此方法会使风机分组数目过多,不利于快速建模。鉴于此,提出1种将被并入电网发生故障后风力发电机转子转速作为风电机组分群聚类的依据,对风电场进行动态等值建模。应用SPSS软件,快速聚类方法——K-均值聚类算法进行聚类。通过MATLAB/Simulink软件对DFIG型风电场进行多机等值建模。仿真结果验证了该方法的可行性。

1 机组聚类指标

风电场并网运行中,如电网发生故障,风力机轴系处于松弛状态,轴系中存储能量释放,转子转速加快^[13]。故障前轴系存储能量越多、故障作用时间越久,转速变化量也就越大,引起机组输出振动越明显^[14]。也就是说,故障排除时转子转速大小可以体现出轴系中存储能量多少及故障作用时间长短,进而体现出故障排除后风机运行状态^[15]。因此文中选取故障排除后发电机组转子转速作为机组聚类指标,表达式为

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \quad (1)$$

式(1)中: ω 为故障后转子转速; ω_0 为转子初始转速; $\Delta\omega$ 为故障作用时转子转速增量。

1.1 初始转速

由感应电机理论相关知识可得,发电机电磁转矩 T_e 为^[16]

$$T_e = \frac{U^2 \frac{r_1}{s}}{\left| \frac{r_1}{s} \right|^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad (2)$$

式(2)中: x_1 、 x_2 分别为转子、定子电抗; r_1 为转子电阻; s 为转差; U 为机端电压。将机组的电磁转矩用机械功率 P_m 替换,对式(2)进行整理得出转子初始转速为

$$\omega_0 = 1 + \frac{U^2 r_1 - \sqrt{U^4 r_1^2 - 4P_m^2 (x_1 + x_2)^2 r_1^2}}{2P_m (x_1 + x_2)^2} \quad (3)$$

1.2 转速增量

轴系模型常用2个质量块模型即分别将风力

机、发电机各等效为1个质量块,其数学模型方程的标么值表达式为^[17]

$$\begin{cases} 2H_l \frac{d\omega_l}{dt} = T_m - K_s(\theta_r - \theta_l) \\ 2H_g \frac{d\omega_r}{dt} = -T_e + K_s(\theta_r - \theta_l) \\ \frac{d\theta_l}{dt} = \omega_l \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: H_l 、 H_g 分别为风力机及发电机转子惯性时间常数; T_m 、 T_e 分别为风力机机械转矩及发电机电磁转矩; K_s 为轴系刚度系数; ω_l 、 ω_r 分别为风力机及发电机转子转速; θ_l 、 θ_r 分别为风力机及发电机角位移^[18]。

机组轴系存储的能量

$$\begin{cases} W_s = \frac{1}{2} K_s \Delta\theta^2 \\ \Delta\theta = \theta_r - \theta_l \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $\Delta\theta$ 代表2质量块相对角位移。

对式(4)进行拉普拉斯变换整理,得出故障发生时两质量块相对角位移的状态方程

$$\begin{aligned} s^2 \Delta\theta(s) - s\Delta\theta(0_-) - \Delta\theta'(0_-) - \frac{T_m}{2sH_l} + \\ \frac{K_s}{2} \left(\frac{1}{H_l} + \frac{1}{H_g} \right) \Delta\theta(s) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

将初始条件 $\Delta\theta(0_-) = T_m/K_s$, $\Delta\theta'(0_-) = 0$ 代入式(6),对有理分式展开得

$$\Delta\theta(s) = T_m \left(\frac{a}{s} + \frac{bs}{s^2 + c} \right) \quad (7)$$

式(7)中:

$$a = \frac{H_g}{K_s(H_l + H_g)}; b = \frac{H_l}{K_s(H_l + H_g)}; c = \frac{K_s(H_l + H_g)}{2H_l H_g}。$$

再经拉普拉斯反变换,得出两质量块相对角位移时域表方程

$$\Delta\theta(t) = T_m a + T_m b \cos(t\sqrt{c}) \quad (8)$$

由以上关系式可得出转速增量表达式为

$$\Delta\omega = \frac{K_s T_m a t \sqrt{c} + K_s T_m b \sin(t\sqrt{c})}{2K_g \sqrt{c}} \quad (9)$$

式(9)中, t 为故障作用时间。

将式(3)、(9)代入式(1),机组的机械转矩 T_m 用机械功率 P_m 替换,整理出聚类指标表达式为

$$\begin{aligned} \omega = 1 + \frac{U^2 r_1 - \sqrt{U^4 r_1^2 - 4P_m^2 (x_1 + x_2)^2 r_1^2}}{2P_m (x_1 + x_2)^2} + \\ \frac{K_s P_m a t \sqrt{c} + K_s P_m b \sin(t\sqrt{c})}{2H_g \sqrt{c}} \end{aligned} \quad (10)$$

可以看出,只要掌握故障发生前机组的功率输出、故障作用时间、机端电压值及相关基本参数,便

可算出机组聚类指标,且上述数据容易获取。

2 多机等值建模方法

2.1 K-means 均值聚类

K-means 均值聚类作为1种较为成熟有效的聚类方法,其算法快速、简单^[19]。算法原理为,以数据距离计算函数最小作为划群标尺,将所有数据点分成 K 个簇,该聚类方法步骤如下:

1)在样本数据中任意抽取 K 个数据,定义为初始簇的均值向量;

2)对其余数据,依据其与每个簇均值向量间的距离,将该数据划分给最近的簇;

3)更新各个新生成的 K 个簇的均值向量;

4)重复步骤1)和3),直至算法停止条件满足,如均值向量不再发生变化,或达到最大迭代次数等。

经过以上聚类步骤使得同1簇内数据相似程度很高,而不同簇之间数据相似程度较低^[20],故障后转子转速作为分群依据因其是一维相量,应用K-means算法可以快速分组且分组结果不受初始聚类中心影响,提高了分类精确性。

文中利用SPSS分析软件对故障后转子转速进行K-means快速聚类,将分类结果做为多机等值建模的依据,每个簇代表1台等值风机。

2.2 等值风机参数计算

1)发电机参数。风电场机组型号相同,等值机组发电机参数计算公式为

$$\begin{cases} S_{eq} = nS \\ P_{eq} = \sum_{i=1}^n P_i \\ x_{m-eq} = \frac{x_m}{n} \\ \begin{cases} x_{1-eq} = \frac{x_1}{n} \\ x_{2-eq} = \frac{x_2}{n} \end{cases} \\ \begin{cases} r_{1-eq} = \frac{r_1}{n} \\ r_{2-eq} = \frac{r_2}{n} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: n 为风场内风机台数;下标eq为等值后; S 、 P 分别为容量和有功功率; x_m 为发电机励磁电抗; r_2 为定子电阻。

2)轴系参数

$$\begin{cases} H_{g-eq} = nH_g \\ H_{t-eq} = nH_t \\ K_{s-eq} = nK_s \end{cases} \quad (12)$$

3) 补偿电容和变压器参数

$$\begin{cases} C_{eq} = \sum_{i=1}^n C_i \\ S_{T-eq} = nS_T \\ Z_{T-eq} = \frac{Z_T}{n} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: C 为补偿电容; S_T 、 Z_T 为机端变压器容量和阻抗。

等值后风电场模型见图1。

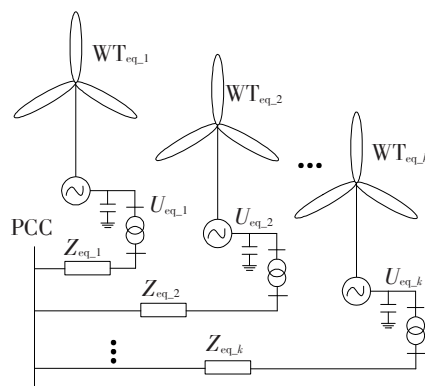


图1 风电场等值后示意图

Fig. 1 Wind farm diagram after equivalence

4)集电线路阻抗。集电线路由传输电缆组成,为了提高等值精度,需将集电系统的等值计算方法进行研究。假设聚类后其中1台等值机组由 N 台风机组组成,各机组连接方式为干线式,连接示意图见图2。

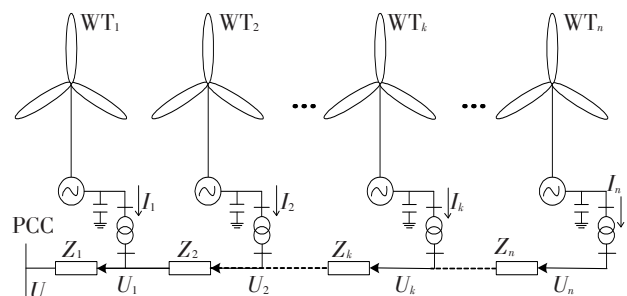


图2 干线式结构示意图

Fig. 2 Structural diagram connected in series

公共连接点(PCC)与 U_k 间电压差为

$$\Delta U_k = \frac{\sum_{i=1}^k \left(Z_i \sum_{j=i}^n P_j \right)}{\sqrt{3}U} \quad (14)$$

式(14)中: U 为PCC点处电压; Z_i 为第 i 条电缆的阻抗; P_j 为第 j 台机组输出功率。

以等值前各台机组输出功率为权重, N 台机组的加权平均电压差可由式(15)计算

$$\Delta \bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta U_i P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (15)$$

等值后,等值风机与PCC点间电压差值为

$$\Delta U_{eq-1} = \frac{Z_{eq-1} \sum_{i=1}^n P_i}{\sqrt{3}U} \quad (16)$$

等值过程中 $\Delta U_{eq-1} = \Delta \bar{U}$, 可得等值电缆阻抗为

$$Z_{eq-1} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^i \left(Z_k \sum_{j=k}^N P_j \right) P_i \right]}{\left(\sum_{i=1}^n P_i \right)^2} \quad (17)$$

2.3 等值模型误差的定量分析

为了定量分析不同等值模型有效性,分别定义 E_P 和 E_Q 表示有功、无功功率误差,它们的计算式为

$$\begin{cases} E_P = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |P_i - P| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |P| dt} \\ E_Q = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |Q_i - Q| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |Q| dt} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: P 、 Q 表示风电场出口处有功、无功功率(详细模型); P_i 、 Q_i 表示风电场出口处有功、无功功率(不同等值模型); t_1 、 t_2 表示计算误差选取的开始、结束时间。

3 算例分析

运用MATLAB/Simulink软件建立风电场并网模型见图3。图3中:A是故障发生处;B是并网点。该风场由16台额定容量为750 kW的双馈异步风力发电机组成,各机组经补偿电容、机端变压器(35 kV/690 V)通过传输电缆连接至公共连接点,最后经风电场并网变压器(110 kV/35 kV)及双回线路并入大电网。发电机组、变压器、补偿电容、集电电缆等参数见表1、2。

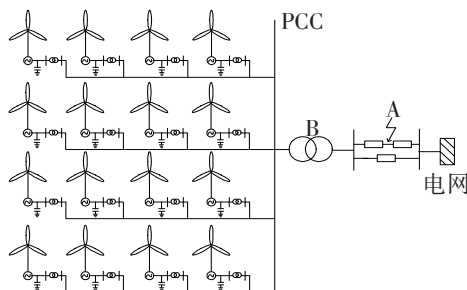


图3 风电场布局及并网模型

Fig. 3 Distribution map of wind farm and interconnection model

3.1 多机等值法与单机等值法对比

常用2种单机等值方法:等值模型1,将风场内全部风机等效为1台风力机加1台发电机,等效后机

表1 风电场电气参数

Table 1 Electric parameters of wind farm		
项目	参数	数值
发电机	额定功率/kW	750
	额定电压/V	690
	额定频率/Hz	50
	$R/p.u.$	0.010 30
	$R_s/p.u.$	0.017 18
	$X_m/p.u.$	7.800
	$X/p.u.$	0.110
	$X_s/p.u.$	0.124
风力机	H/s	2.5
	H_g/s	0.3
	$K/p.u.$	90
	$D/p.u.$	0
机端变压器	S/MVA	0.85
	$X/p.u.$	0.045
出口变压器	S/MVA	50
	$X/p.u.$	0.1
单位电缆	$R/(\Omega \cdot m^{-1})$	0.46×10^{-3}
	$X/(\Omega \cdot m^{-1})$	0.23×10^{-3}
	$C/(M\Omega \cdot m)$	5.25
各机组补偿电容容量	$C/\mu F$	1 500

表2 风场内机组间传输电缆长度

Table 2 Length of transmission cable in wind farm of every wind turbine

电缆	长度/m	电缆	长度/m
0-1	321	8-9	101
1-2	356	9-10	389
2-3	371	10-11	302
3-4	411	11-12	367
4-5	117	12-13	57
5-6	426	13-14	427
6-7	346	14-15	422
7-8	381	15-16	402

组容量等于风场内全部机组容量叠加,平均风速作为等效风机输入风速;等值模型2,同样将风电场等效为1台风电机,但是保留风场内每台风机的风力机部分,把所有风力机产生的机械转矩之和作为等效后发电机输入。对图3所述模型进行仿真,12 s时,A点发生三相短路故障,故障作用时间0.15 s。故障出现时各台机组的输入风速见表3,由式(10)算出的聚类指示与真实转速的对比见表4(标么值)。可以看出,真实值与计算值十分接近,验证了第1节公式推导的正确性。

应用SPSS软件,3-means聚类算法对计算所得的聚类指标进行聚类,将16台机组聚合成3台等值

表3 各风机输入风速

Table 3 Wind speed of wind turbine

机组	风速/(m·s ⁻¹)	机组	风速/(m·s ⁻¹)
1	9.5	9	9.4
2	12.6	10	12.5
3	13.2	11	12.8
4	14.2	12	14.3
5	11.6	13	9.3
6	9.8	14	13.0
7	14.5	15	14.1
8	14.0	16	14.6

表4 机群聚合指标与真实值对比(标么值)

Table 4 Comparison of the cluster classification index and actual values(per unit)

机组	ω	真实值	机组	ω	真实值
1	1.083 1	1.085 2	9	1.080 8	1.082 0
2	1.136 6	1.138 8	10	1.144 9	1.146 8
3	1.142 7	1.148 8	11	1.147 6	1.149 7
4	1.151 6	1.154 0	12	1.149 4	1.151 5
5	1.127 1	1.128 5	13	1.078 4	1.080 2
6	1.130 0	1.132 0	14	1.140 6	1.142 8
7	1.153 7	1.155 9	15	1.150 7	1.152 9
8	1.156 4	1.158 7	16	1.148 7	1.151 2

机组:分组情况见表5,由2.2节内容将有关参数算出,等值电缆参数见表6,对不同等值模型仿真得出风电场出口处有功、无功功率、电压响应曲线见图4。由式(18)算出不同等值模型有功、无功功率误差值见表7(其中: $t_1=11.5$ s, $t_2=13.5$ s)。

表5 2种分群依据的分类情况

Table 5 Results of two classification methods

分群依据	分组1	分组2	分组3
风速	1、9、6、13	2、3、5、10、11、14	4、7、8、12、15、16
故障后转子转速	1、9、13	2、5、6、14	3、4、7、8、10、11、12、15、16

表6 等值电缆参数

Table 6 Parameters of cable after equivalence

参数	数值
L_{eq1}/m	344.26
L_{eq2}/m	197.099
$R/(\Omega \cdot m^{-1})$	0.46×10^{-3}
$X/(\Omega \cdot m^{-1})$	0.23×10^{-3}
$C/(M\Omega \cdot m)$	5.25

从表7、图4可以看出,选取故障后转子转速作为风电机组分群依据的等值方法,其仿真结果与详细模型误差很小;风场内各机组输入风速差异明显

表7 3种等值模型误差

Table 7 Error of 3 equivalence models

不同等值模型	$E_p/\%$	$E_q/\%$
等值模型1	10.89	11.32
等值模型2	4.63	4.22
故障后转速模型	1.26	1.13

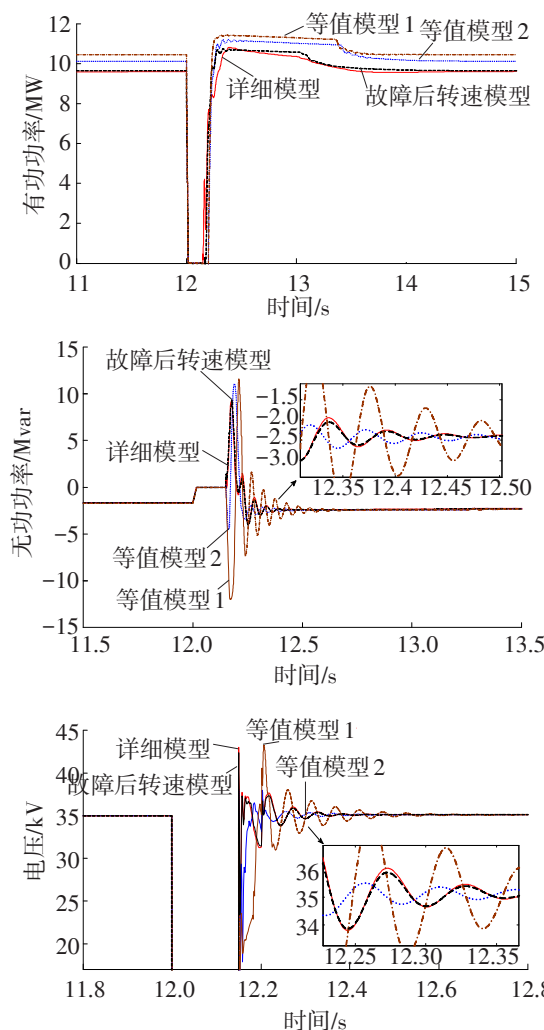


图4 风电场出口处动态响应

Fig. 4 Dynamic response of wind farm outlet

时,单机等值法建模误差很大,难以表征风场内各机组所处运行状态。

3.2 2种多机等值方法对比

与常用的以风速作为聚类指标的多机等值方法进行仿真对比,验证文中所选取聚类指标的优越性。仿真条件同前,2种等值方法均聚合成3台等值机组,分组结果见表4。对2种等值模型仿真得出风电场出口处有功、无功功率、电压响应曲线见图5。2种等值模型有功、无功功率误差值见表8。

从图5、表8可以看出,采用文中所选的聚类指标所建模型,在仿真精度上要优于以风速作为聚类指标所建模型,尤其是在故障切除后,系统过渡到新

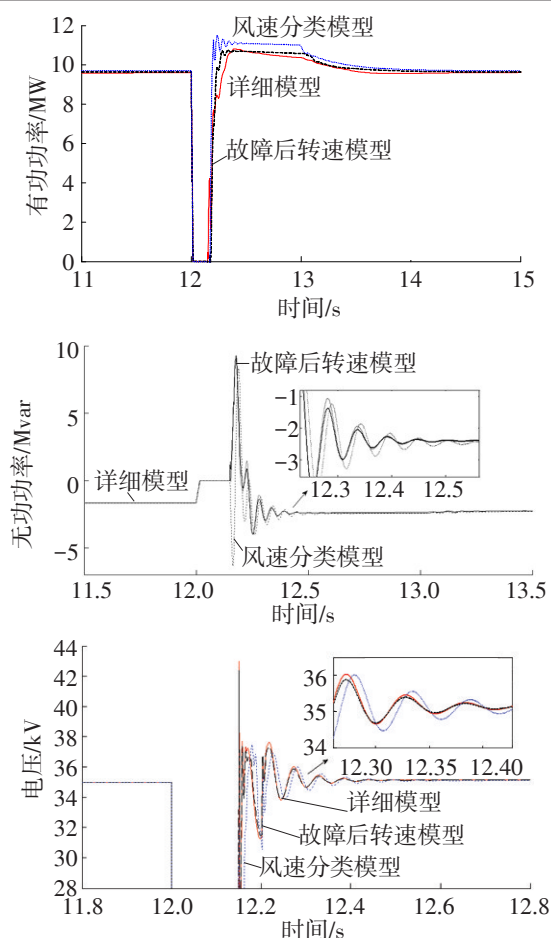


图5 风电场出口处动态响应

Fig. 5 Dynamic response of wind farm outlet

表8 2种等值模型误差

Table 8 Error of 2 equivalence models

不同等值模型	$E_P/\%$	$E_Q/\%$
分速分类模型	3.15	2.86
故障后转速模型	1.26	1.13

的稳态过程中,故障后转速模型与详细模型动态响应更加接近,验证了该方法的合理性。

4 结语

文中提出了1种用于风电场建模的分群依据,以故障后发电机转子转速为分群指标可以体现出轴系中存储的能量及故障作用时间长短,进而体现故障排除后风机运行状态;通过仿真结果的对比分析可以看出,此聚类依据确实在仿真速度和精度上都有理想的表现,可以作为大型风场建模过程中的1个参考方法,被用于分析风电场并网对电力系统的影响,且满足实际工程的精度要求。

参考文献:

[1] 李明东. 风场实现低电压穿越技术改造方案[J]. 中国电力, 2011, 44(6): 48-51.

LI Mingdong. Reform plan of wind farm low voltage ride-through technology[J]. Electric Power, 2011, 44(6): 48-51.

[2] 吴佳佳, 卫志农, 韩连山. 采用智能控制的DFIG风力发电系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 40-44.

WU Jiajia, WEI Zhihong, HAN Lianshan. DFIG wind generation system with intelligent control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(6): 40-44.

[3] 孙辉, 徐箭, 孙元章, 等. 考虑风速时空分布及风机运行状态的风电场功率计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 30-38.

SUN Hui, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Secondary voltage control considering rapid dynamic reactive power compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 30-38.

[4] 张硕. 计及风电场容量可信度的电力系统可靠性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.

ZHANG Shuo. Reliability studies of power systems concerning capacity credit of wind farms[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.

[5] 许海青, 李华强, 潘一飞, 等. 尾流效应和风特性对双馈风机LVRT的影响[J]. 电气传动, 2014, 44(4): 66-71.

XU Haiqing, LI Huaqiang, PAN Yifei, et al. Impacts of wake effect and wind characteristics on LVRT of DFIG[J]. Electric Drive, 2014, 44(4): 66-71.

[6] SHAMSHAD A, BAWADI M A, HUSSIN W M, et al. First and second order Markov chain models for synthetic generation of wind speed time series[J]. Energy, 2005, 30(5): 693-708.

[7] KANELLOS F D, KABOURIS J. Wind farm modeling for short-circuit level calculations in large power systems[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2009, 24(3): 1687-1695.

[8] 曹娜, 于群. 风速波动情况下并网风电场内风电机组分组方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 42-46.

CAO Na, YU Qun. Wind speed fluctuations case grid wind turbines in wind farms grouping method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 42-46.

[9] 余慎思, 李征, 蔡旭. 基于风电场动态时空关系的风速分布模型研究[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1432-1438.

SHE Shensi, LI Zheng, CAI Xu. Research on wind speed distribution model of wind farm based on its dynamic space-time relation[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1432-1438.

[10] 孙俊博, 解大, 杨敏霞, 等. 计及尾流效应的风电场电网相互作用分析[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(3): 73-79.

SUN Junbo, XIE Da, YANG Minxia, et al. Interaction analysis of wind farm and grid taking account of wake effects[J]. Journal of Electric Power Science

- and Technology, 2014, 29(3): 73-79.
- [11] HIRATA Y, MANDIC D P, SUZUKI H, et al. Wind direction modelling using multiple observation points[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2008, 366(1865): 591-607.
- [12] 王增平, 张乐丰. 考虑弃风的DFIG风电场动态等值模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 1-6.
WANG Zengping, ZHANG Lefeng. Dynamic equivalent model of wind farm with dfig considering wind power curtailment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 1-6.
- [13] 李辉, 王荷生, 赵斌, 等. 风电场不同等值模型的仿真研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(7): 1005-1013.
LI Hui, WANG Hesheng, ZHAO Bin, et al. Simulation analysis of a wind farm with different aggregated models[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(7): 1005-1013.
- [14] FERNÁNDEZ L M, GARCÍA 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.
- [15] 徐玉琴, 张林浩, 王娜. 计及尾流效应的双馈机组风电场等值建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 70-76.
XU Yuqin, ZHANG Linhao, WANG Na. Study on equivalent model of wind farms with DFIG considering wake effects[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 70-76.
- [16] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 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.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [17] 吴峰, 孔卫亚, 周宇, 等. 考虑多风电场风速变化规律的模拟数据生成方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2038-2044.
WU Feng, KONG Weiya, ZHOU Yu, et al. A wind speed modeling method for multiple wind farms considering variation regularities[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2038-2044.
- [18] 曹娜, 于群, 王伟胜, 等. 风电场尾流效应模型研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 222-229.
CAO Na, YU Qun, WANG Weisheng, et al. Research on wake effect model of wind farm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(1): 222-229.
- [19] 仲振, 王宝华. 双馈风电场次同步振荡建模与分析[J]. 可再生能源, 2015, 33(12): 1816-1824.
ZHONG Zhen, WANG Baohua. Modeling and analysis of a DFIG-based wind farm in sub-synchronous oscillation[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(12): 1816-1824.
- [20] 余洋, 米增强, 刘兴杰, 等. 基于运行数据的大型风电场建模方法研究[J]. 太阳能学报, 2011(10): 1543-1548.
YU Yang, MI Zengqiang, LIU Xingjie, et al. Modeling method of large-scale wind farm based on operating data[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(10): 1543-1548.

胡庆林(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、风电场建模与分析等。

付盼(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、高压电、风电场建模等(通讯作者)。

(上接第242页)

- [18] 王慧娟, 张建成, 冯骁. 直流微网中超级电容器储能系统控制方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5): 134-139.
WANG Huijuan, ZHANG Jiancheng, FENG Xiao. Study on control method of the ultra-capacitor energy storage system in DC micro-grid[J]. Power Capacitor & Power Compensation, 2016, 37(5): 134-139.
- [19] BORREGA M, MARROYO L, GONZALEZ R, et al. Modeling and control of a master, slave PV inverter with N, paralleled inverters and three, phase three, limb inductors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2842-2855.
- [20] 艾欣, 金鹏, 孙英云. 一种改进的微电网无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 147-155.
AI Xin, JIN Peng, SUN Yingyun. An enhanced reactive sharing control strategy of micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 147-155.
- [21] 王晓寰, 张纯江. 分布式发电系统无缝切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 217-222.
WANG Xiaohuan, ZHANG Chunjiang. Study of control strategy for seamless transfer of grid-connected distributed generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 217-222.
- [22] KROPOSKI B, LASSETER R, ISE T, et al. Making microgrids work[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 40-53.
- 汪玉凤(1962—), 女, 硕士, 教授, 主要从事电网电能质量调节与控制、电力系统调度自动化、矿山自动化与信息化等方面研发。
- 李琳(1991—), 女, 硕士, 研究生, 从事微电网并网和光伏发电方面的研究。
- 王立辉(1978—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为配电运检管理。
- 张志强(1972—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为配电运检管理。