

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.09.019

基于改进分裂 H-K 聚类算法的风电场机群划分方法

朱成亮, 刘三明, 王致杰, 潘磊, 殷建炜

(上海电机学院电气工程系, 上海 200240)

摘要: 针对风电场建立多机等值模型时等效风机数目不确定的问题,通过分析风电机组的运行机理,以风机的实际参数为聚类指标,引入轮廓系数计算不同等值数目时的轮廓值,选择最优的聚类数目,运用改进分裂 H-K 聚类算法进行聚类。在 MATLAB 平台上建立风电场详细模型和聚类模型,在两种风速模式下分析两种模型输出的有功功率和无功功率曲线,结果表明两种模型曲线在同时间点上相对误差率很小,提高了模型精度。文中提出的方法可以运用于风电场的多机等值建模,能够比较准确地反映风电场的动态响应特性。

关键词: 双馈风力发电机; 轮廓值; 聚类方法; 动态等值

Wind Turbine Grouping Method Based on Divisive H-K Clustering Algorithm for Wind Farm

ZHU Chengliang, LIU Sanming, WANG Zhijie, PAN Lei, YIN Jianwei

(College of Electric Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the present problems that the number of clusters in the equivalent model of wind farm is uncertainty, the mechanism of wind turbine is analysed. Taking the actual parameters of wind turbine as cluster indexes, silhouette coefficient is introduced to calculate different number of clusters in the equivalent model to obtain the optimal number of clusters of wind farm. According to the clustering algorithm, complete equivalent model of wind farm is set up. A detailed model and clustering model of wind farm are built on MATLAB. Under two wind speed conditions, the active power and reactive power curve of the two models are analyzed in the two models. The results of simulation show that, using the method of equivalent model and the detailed model of wind farm in the output of active power and reactive power curves at the same time the relative error is quiet little. The accuracy of the model is improved. So this method can be used in making equivalent model of wind farm, which can accurately reflect the dynamic response of wind farm.

Key words: doubly-fed wind power generator; contour value; cluster method; dynamic equivalence

0 引言

为了解决日益严重的能源危机和环境污染问题,各国均鼓励开发和利用可再生能源。风能作为一种清洁可再生的能源,正受到世界各国的关注。

随着风电技术的不断发展,风电场并网的规模也在不断的扩大,但是风能具有很强随机性和不确定性,为了更加准确地分析电网与风场之间的相互作用和影响,深入研究风电场机群动态等值模型对包含有风电场的电力系统的动态稳定性具有十分重要的意义。

在以往的研究中,主要是两种方法来获风场模

收稿日期:2016-04-07; 修回日期:2016-06-15

基金项目:上海市教育委员会科研创新资助项目(15ZZ106,14YZ157);上海自然科学基金(12ZR1411600,14ZR1417200,15ZR1417300);上海电机学院登峰学科建设项目资助(15DFXK01)。

Project Supported by Research and Innovation Projects of Shanghai Education Commission Funded(15ZZ106,14YZ157), Shanghai Natural Science Foundation(12ZR1411600,14ZR1417200,15ZR1417300),Shanghai Dianji University Dengfeng Funded Projects(15DFXK01).

型;第1种通常是假设所有风机输入风速相同,将整个风电场等值为一台风力发电机,即单机等值法,但是由于尾流效应和地貌特征的影响,风电场的风机运行状态并不相同,不同运行状态的风机控制策略也不同,对于控制的响应也不同,简单的等值为一台风机会降低风电场模型的准确性;第2种这是多机等值法,文[1]通过研究发现风速时滞会平缓双馈式风机风电场输出功率,风机之间的尾流效应会造成风能的损失。为了提高模型的精确程度,通过定义风电机组的聚类指标,根据指标值得差异对机组进行聚类划分,在众多的聚类的方法中,k-means 聚类方法是经典的聚类方法;文[2]基于 k-means 聚类算法建立了风电场动态等值模型,但是该方法缺乏明显激励分析。近年来提出了一些新的新的聚类等值方法用于风电机组的聚类划分。文[3]提出了以分裂层次半监督谱聚类算法对风电场机组进行划分的方法,但没有对划分指标和聚类数目进行详细说明。

在分析前人研究成果的基础上发现,目前来说对风电场的聚类数目的确定以经验法居多没有制定详细的标准,因此文中引入轮廓值,对其进行分析处理,将聚类数目的选取给予合适的准则,然后再依据聚类方法对风电场进行聚类^[4-5]。

鉴于 k-means 方法和层次聚类方法在数据处理上的优缺点,将两者结合形成的 H-K 聚类方法,其基本方法是先使用分裂层次聚类算法获取初始信息,然后使用 k-means 算法进一步完善聚类过程。文中给予机群划分确立一个明确的标准,以此为基础界定大规模风电场进行多机等值建模时所需要的等值机型的数目,使用分裂层次聚类方法和 k-means 聚类方法相结合的聚类方法完成聚类^[6]。

1 聚类有效性评估

传统聚类算法对聚类数目没有统一的标准,需要人为设定聚类数目,不确定性太强。Kanfam 提出轮廓系数这一概念,将各个簇中元素的聚合度和离散度结合在一起形成一种有效性评估。轮廓系数的计算方法是在簇中选取一个元素与选取簇中其它元素的相似性和与其他簇中元素的相似性量化,然后将量化后的数据按照一定的方式组合作为评价聚类的标准、对于某一元素 x_i 的轮廓系数计算公式为^[7]

$$S(i) = \frac{m_i - n_i}{\max(m_i, n_i)} \quad (1)$$

式(1)中: n_i 为元素 x_i 与簇中的其他元素之间的平均距离; m_i 为元素 x_i 到其他簇中元素平均距离的

最小值; $S(i)$ 的值域在 $[-1, 1]$ 之间,轮廓系数越接近于 1 说明该元素在一个紧密独立的集体中,越接近于 -1 则说明元素不属于该簇,若轮廓系数为 0 则表明样本集中不存在自然簇结构,而是均匀分布的结构。

2 对聚类指标的选取

风力机获得的功率为

$$P = 0.5 \rho \pi R^2 \nu^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

式(2)中: λ 为叶尖速比; R 为风轮半径; ω_w 为叶片旋转角速度; ν 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数,根据经验公式可表示为

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_1}} \quad (3)$$

$$\text{式(3)中, } \lambda_1 = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1}$$

双馈风力发电机的暂态过程与机械传动部分也有一定的关系,风能经由轮毂、联轴器、齿轮箱传至发电机,可以用两个微分方程为:

$$T_d \frac{dT_t}{dt} = T_w - T_t; \quad (4)$$

$$T_j \frac{ds}{dt} = T_e - T_{t0} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: T_w 为风力机转矩; T_t 为转子机械转矩; T_e 为发电机电磁转矩; T_d 为传动系统惯性时间常数; T_j 为发电机惯性时间常数。

随着电力电子技术和微机控制技术的发展,双馈发电机组在风电场的得到了广泛的应用,所以文中主要以双馈风机组为例进行分析,在两相同步旋转坐标系下,双馈风力发电机组的磁链方程和电压方程为^[8-9]:

$$\psi_d = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}; \quad (6)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}; \quad (7)$$

$$\psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd}; \quad (8)$$

$$\psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq}; \quad (9)$$

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + p \psi_{sq} - \omega \psi_{sq}; \quad (10)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + p \psi_{sd} + \omega \psi_{sd}; \quad (11)$$

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + p \psi_{rd} - (\omega - \omega_r) \psi_{rq}; \quad (12)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + p \psi_{rq} + (\omega - \omega_r) \psi_{rd}; \quad (13)$$

式(6)–(13)中: u_{sd} 为定子电压 d 轴分量; u_{sq} 为定子电压 q 轴分量; u_{rd} 为转子电压 d 轴分量; u_{rq} 为转子电压 q 轴分量; i_{sd} 为定子电流 d 轴分量; i_{sq} 为定子电流 q 轴分量; i_{rd} 为转子电流 d 轴分量; i_{rq} 为转子电流 q 轴分量; ψ_{sd} 为定子磁链 d 轴分量; ψ_{sq} 为定子磁链 q 轴分量; ψ_{rd} 为转子磁链 d 轴分量; ψ_{rq} 为转子磁链 q 轴分量; R_s 为定子电阻; R_r 为转子电阻; L_s 为 d 、 q 坐标系中定子等效两相绕组自感; L_m 为 d 、 q 坐标

系中定、转子同轴等效绕组间的互感; L_r 为 d 、 q 坐标系中转子等效两相绕组自感; ω_r 为两相中转子角速度; ω 为两相旋转坐标系角速度; p 为微分算子。

由(6)-(13)可得:

$$U_s = R_s I_s + p\psi_s + j\omega\psi_s; \quad (14)$$

$$U_r = R_r I_r + p\psi_r + j(\omega - \omega_r)\psi_r; \quad (15)$$

$$\psi_s = L_s I_s + L_m I_r; \quad (16)$$

$$\psi_r = L_r I_r + L_m I_s. \quad (17)$$

不考虑因磁场变化引起的电磁功率和铜耗,由式(14)-(17)可得到双馈风机的定子、转子输出的有功功率为^[10]:

$$P_s = -\frac{3}{2} \operatorname{Re}[j\omega\psi_s \vec{I}_s]; \quad (18)$$

$$P_r = -\frac{3}{2} \operatorname{Re}[j(\omega - \omega_r)\psi_r \vec{I}_s]; \quad (19)$$

$$P_r = -s P_s. \quad (20)$$

由于现在双馈式风机采用恒定功率因素方式运行^[11-13],因此 $\cos\varphi$ 是定值。双馈式风力发电机组的有功功率 P 和无功功率 Q 都有定子侧和转子侧两部分组成,控制 PMW 的功率因素可以使其接近于,转子的有功功率很小,所以无功功率接近,可根据式(20)得:

$$P = P_r + P_s = (1-s)P_s; \quad (21)$$

$$Q = Q_s; \quad (22)$$

$$\tan\varphi = Q_s/P_s. \quad (23)$$

采用定子电压矢量控制,忽略定子电阻,当同步旋转坐标系的 d 轴定向于定子电压矢量 U_s 上时:

$$u_{sd} = U_s \approx -\omega\psi_{sq}; \quad (24)$$

$$u_{sq} = 0; \quad (25)$$

$$\psi_{sq} = 0. \quad (26)$$

基于定子电压矢量控制条件下,可得到DFIG的定子输出有功功率和无功功率与转子的 d 轴和 q 轴电流之间的关系为:

$$i_{sd} \approx -\frac{2P_s}{3U_s}; \quad (27)$$

$$i_{sq} \approx -\frac{2Q_s}{3U_s}. \quad (28)$$

在此情况下通过定子电压矢量控制,有功功率和无功功率达到解耦的目的,控制转子的轴和轴电流就可以控制DFIG的有功功率和无功功率。

将(24)-(26)代入双馈风机的磁链方程中可得到:

$$i_{sq} = -\frac{U_s}{\omega L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{qd}; \quad (29)$$

$$i_{sd} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rd}. \quad (30)$$

对式(16)进行等效变换可得

$$\psi_s = L_s I_s + L_m I_r = L_m I_{ms}. \quad (31)$$

式(31)中, I_{ms} 为定子等效励磁电流矢量,由此可以得到

$$\psi_r = L_r I_r + L_m I_s = \frac{L_m^2}{L_s} I_{ms} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) I_r. \quad (32)$$

再将式(31)、(32)代入式(14)、(15)中,假定处于理想电网条件下,则 U_s 保持不变,定子磁链也保持不变那么 $dI_{ms}/dt \approx 0$,所以式(14)、(15)可以简化为

$$U_s = R_s I_s + j\omega\psi_s; \quad (33)$$

$$U_r = R_r I_r + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{dI_r}{dt} + j(\omega - \omega_r)\psi_r. \quad (34)$$

将式(8)、(9)的转子磁链用定子电压和转子电流表示为:

$$\psi_{rd} = (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) i_{rd}; \quad (35)$$

$$\psi_{rq} = (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) i_{rq} - \frac{U_s L_m}{\omega L_s}. \quad (36)$$

再将式(35)、(36)代入转子电压表达式中可得到:

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rd}}{dt} - (\omega - \omega_r) [(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) i_{rq} - \frac{U_s L_m}{\omega L_s}]; \quad (37)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rq}}{dt} + (\omega - \omega_r) (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) i_{rd}. \quad (38)$$

这样通过控制定子电压就可以控制有功和无功功率。对式(8)、(9)进行变化,提取转子电流的 d 轴和 q 轴表达式为:

$$i_{rd} = \frac{\psi_{rd}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{sd}; \quad (39)$$

$$i_{rq} = \frac{\psi_{rq}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{sq}. \quad (40)$$

对式(12)、(13)中转子电压 d 轴和 q 轴方程同乘 $\frac{L_m}{R_r}$,并带入式(37)、(38)可得到:

$$\frac{L_m}{R_r} u_{rd} = \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} - \frac{L_m^2}{L_r} i_{sd} + \frac{L_m}{R_r} \frac{d}{dt} \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} - (\omega - \omega_r) \frac{L_m}{R_r} \psi_{rd}; \quad (41)$$

$$\frac{L_m}{R_r} u_{rq} = \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq} - \frac{L_m^2}{L_r} i_{sq} + \frac{L_m}{R_r} \frac{d}{dt} \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq} - (\omega - \omega_r) \frac{L_m}{R_r} \psi_{rd}. \quad (42)$$

为了简化方程,令 $T_\theta' = L_m/R_r$ 表示暂态开环时间常数, $L_s' = L_s - L_m^2/L_r$ 表示暂态电感, $E_d' = \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd}$ 表示转子 d 轴暂态电压, $E_q' = \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq}$ 表示转子 q 轴暂态电压,采用零阶积分流形替代定子动态响应,这样就可

以得到简化后系统的动态方程为:

$$T_{\theta}' \frac{dE_q'}{dt} = T_{\theta}' \frac{L_m}{L_r} u_{rd} + (L_s - L_s') i_{sd} - E_d' + 2\pi f_{\theta} s T_{\theta}' E_q'; \quad (43)$$

$$T_{\theta}' \frac{dE_d'}{dt} = T_{\theta}' \frac{L_m}{L_r} u_{rq} + (L_s - L_s') i_{sq} - E_q' + 2\pi f_{\theta} s T_{\theta}' E_d'. \quad (44)$$

式(43)、(44)中: s 为电机滑差; f_{θ} 为工频。以上通过推导以及实际风机所能获得参数 s 、 T_w 、 T_r 、 I_{sd} 、 I_{sq} 、 I_{rd} 、 I_{rq} 、 U_{rd} 、 U_{rq} 、 E_d' 和 E_q' 作为研究对象可以发现, 双馈式风机的仿真过程主要是这些转态变量的变化。在稳态过程中, 转矩平衡所以 T_w 、 T_r 、 T 都是相等的, 而风机的参数不同是因为风电机组的发电机部分参数不同, 因此聚类指标可以进一步简化。选取 s 、 R_s 、 R_r 、 L_s 、 L_r 、 L_m 作为聚类指标进行建模。若需要知道详细数据也可以通过以上公式进行推导求得。

3 风电场的动态等值

3.1 等值模型参数计算

等值模型参数计算^[14-17]有以下几种。

3.1.1 发电机参数

$$\begin{cases} S_{eq} = nS, P_{eq} = \sum_{i=1}^n P_i', Q_{eq} = \sum_{i=1}^n Q_i' \\ R_{seq} = \frac{R_s}{n}, R_{req} = \frac{R_r}{n'} \\ L_{seq} = \frac{L_s}{n'}, L_{req} = \frac{L_r}{n'}, L_{meq} = \frac{L_m}{n} \end{cases} \quad (45)$$

式(45)中: R_{seq} 和 R_{req} 分别是等值发电机定子和转子电阻; L_{seq} 和 L_{req} 分别是等值发电机定子和转子电抗; L_{meq} 是等值发电机励磁电抗。

3.1.2 轴系参数

$$\begin{cases} T_{deq} = nT_d \\ T_{jeq} = nT_j \\ K_{seq} = nK_s \end{cases} \quad (46)$$

式(46)中, K_s 为轴系刚度系数。

3.1.3 电容器参数

$$\begin{cases} C_{eq} = \sum_{i=1}^n C_i \\ S_{Teq} = nS_T \\ Z_{Teq} = \frac{Z_T}{n} \end{cases} \quad (47)$$

式(47)中: C 为单台风机直流侧电容; S_T 为机端变压器容量; Z_T 为机端变压器阻抗。

风电场等值为台双馈风机后的风电场模型见图 1。图 1 中 PCC 为风电场公共连接点。

3.1.4 集电系统参数

当风电场内部的机组等值后, 风电场内机组的外部线路也需要一个等值的阻抗模型来替。

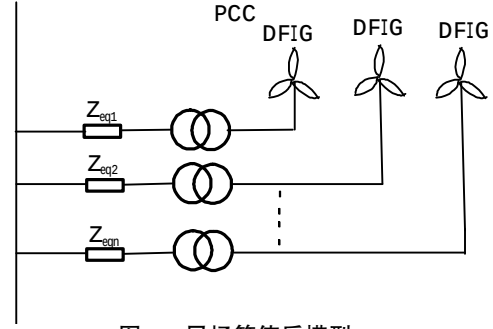


图 1 风场等值后模型

Fig. 1 Wind farm structural diagram after equivalence

$$Z_{eq} = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{k=1}^i Z_k \sum_{j=k}^n P_j \right) P_i / \sum_{i=1}^m P_i^2. \quad (48)$$

3.2 算法步骤

算法具体步骤为:

- 1) 先采用分裂层次聚类算。将 24 台双馈风机的参数当成一个样本, 设定子集数目为 k 。
- 2) 在所有子集中寻找具有最大直径的子集 c , 即子集中存在欧式距离最大的两个点。
- 3) 找出子集 c 中与其他点平均相异度最大的一个点 p , 并将其放入一个新的子集中。
- 4) 继续在子集 c 中寻找新的子集中的点的距离小于到子集 c 中最近的点, 并放入新的子集中。直到子集 c 中没有点分配到新的子集中。
- 5) 计算不同 k 值时的轮廓系数。选取轮廓系数值最大作为最优聚类数。
- 6) 在最优聚类数的状态下, 计算出聚类中心代替 k -means 聚类算法中的随机聚类中心进行聚类。
- 7) 计算剩余点到各个聚类中心的距离并分配进入最近的类别中。分配完成后计算新的聚类中心。若聚类中心的变化则重新计算聚类中心再次分配直至收敛。

4 算例仿真

利用 MATLAB 中的 Simulink, 建立整个风力发电机组接入电网的实例, 总装机容量为 36 MW 的风电场有 24 台单机容量为 1.5 MW 的风力机组组成, 出线连接 35 kV 系统再由馈线和 220 kV 系统相连。

按照拟定的仿真模式设置仿真参数^[18-20], 并且依照聚类指标进行聚类, 通过 MATLAB 对聚类结果进行分析, 按照既定指标聚类之后得到的各类别的轮廓系数见图 2。

将 24 台双馈式风机聚成 2, 3, 4, 5 类进行分析, 发现只有前两种聚类模式可以使轮廓系数保持在以上, 表明 24 台双馈式风机在聚类成两类或者 3 类时, 在各自的簇中处于一个比较机密的结合体。聚

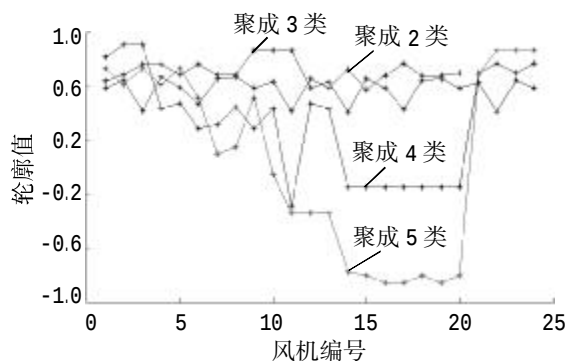


图2 按照变量聚类的轮廓值

Fig. 2 Outline values of variables by clustering

类成两类和3类的轮廓系数和分别为15.352 5和15.769 6。在仿真分析之后发现轮廓值和较大的一组对于风电场功率曲线拟合更好。

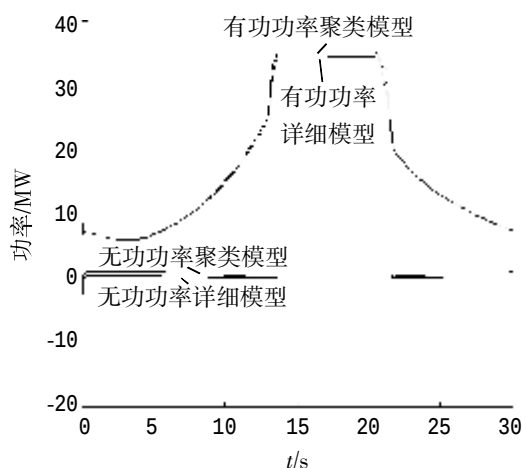


图3 在第1种风速模式下的风场出力曲线

Fig. 3 Wind farm output active power and reactive power of first wind speed model

在两种风速模式下对建立的模型准确性进行验证:

1)在第1种风速模式下的风场出力曲线见图3。图3中:风速由基本风和渐进风叠加,基本风速为5 m/s,叠加的渐进风在2 s开始、10 s结束;最大风速17 m/s,保持20 s后结束。

2)随机波动风速下,波动风速由12 m/s的恒定风速和噪声信号合成。在第2种风速模式下风场出力曲线见图4,误差见表1。

在MATLAB仿真模拟后,从图4可以看出,风电场的有功曲线、无功曲线和详细模型基本一致,精确程度很高;通过误差分析也可以得出,所建立的模型基本符合要求。

5 结语

文中提出的等值方式适用于双馈式风力发电机组的动态等值。在认为风机的轴系参数均相同的情

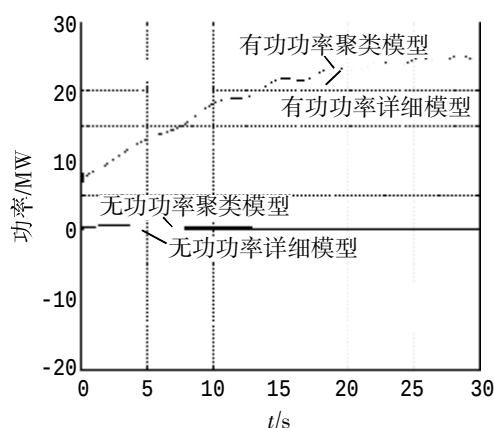


图4 在第2种风速模式下风场出力曲线

Fig. 4 Wind farm output active power and reactive power of second wind speed model

表1 误差分析

Table 1 Error of equivalence methods

参数	有功误差/%	无功误差/%
第1种风速模式下	0.13	0.17
第2种风速模式下	0.17	1.02

况下研究风电场的动态等值模型与之前的聚类方式相比,提出依靠风机内部参数作为聚类指标,以聚类的轮廓值为标准划分机群。

与传统的等效建模相比,模型精度提高,更加简洁,适用于大容量风电场对电力系统的影响分析。

参考文献:

- [1] TRUDNOWSKI D J, GENTILE A, KHAN J M, et al. Fixed speed wind-generator and wind-park modeling for transient stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1911-1917.
- [2] 何建明.大型风电场动态等值建模研究[D].广州:华南理工大学,2013.
HE Jianming. Research on dynamic equivalent modeling of large wind farms[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [3] 林俐,潘险险.基于分裂层次半监督谱聚类算法的风电场机群划分方法[J].电力自动化设备,2015,35(2):93-96.
LIN Li, PAN Xianxian. Wind turbine grouping based on semi-supervised split-hierarchical spectral clustering algorithm for wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 93-96.
- [4] 陈树勇,王聪,申洪,等.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):25-29.
CHEN Shuyong, WANG Cong, SHEN Hong, et al. Dynamic equivalence for wind farms based on clustering algorithm[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(4): 25-29.
- [5] 王聪.基于聚类算法的风电场动态等值问题研究[D].吉林:东北电力大学,2012.

- WANG Cong. The dynamic equivalence for wind farm based on clustering algorithm[D]. Jilin:Northeast Dianli University, 2012.
- [6] 张冬梅. 基于轮廓系数的层次聚类算法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2009.
- ZHANG Dongmei. Research on hierarchical clustering algorithm based on silhouette[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009.
- [7] 蔡元萃, 陈立潮. 聚类算法研究综述[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(1): 145-146.
- CAI Yuancui, CHEN Lichao. Summarizing the researches on the clustering algorithm [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2007, 17(1): 145-146.
- [8] WEI Qiao, HARLEY R G, VENAYAGAMOORTHY G K. Dynamic modeling of wind farms with fixed-speed wind turbine generators[C]//2007 Power Engineering Society General Meeting. Tampa, Florida, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [9] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc. 1994: 450-650.
- [10] 徐玉琴, 王 娜. 基于聚类分析的双馈机组动态等值模型研究[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(3): 72-77.
- XU Yuqin, WANG Na. Study on dynamic equivalence of wind farms with DFIG based on clustering analysis [J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(3): 72-77.
- [11] 雷巧红. 双馈感应风电机组并网运行动态仿真分析及研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- LEI Qiaohong. Analysis and research on dynamic simulation of double-fed induction wind generators connected with grid[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology 2007.
- [12] 申 洪. 变速恒频风电机组并网运行模型研究及应用[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
- SHEN Hong. Studies on integrated variable-speed constant frequency wind turbine models and the application[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2004.
- [13] 黄 梅, 万航羽. 在动态仿真中风电场模型的简化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 147-152.
- HUANG Mei, WAN Hangyu. Simplification of wind farm model for dynamic simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 147-152.
- [14] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 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): 162-169.
- MI Zengqiang, SU Xunwen, YANG Qixun, et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [15] TRUDNOWSKI D J, GENTILE A, KHAN J M. Fixed-speed wind-generator and wind-park modeling for transient stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1911-1917.
- [16] 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.
- FU Rong, XIE Jun, WANG Baoyun. Study on dynamic equivalence model of wind farms with DFIG under wind turbulence[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 1-6.
- [17] 瞿 鹏, 周孝信, 田 芳, 等. 双馈式风力发电机的机电暂态建模[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 36-40.
- ZI Peng, ZHOU Xiaoxin, TIANG Fang, et al. Electromechanical transient modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generator[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(5): 36-40.
- [18] 胡 杰, 余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术, 2006, 33(24): 26-30.
- HU Jie, YU Yixin. A practical method of parameter aggregation for power system dynamic equivalence[J]. Power System Technology, 2006, 33(24): 26-30.
- [19] 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]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119.
- [20] MILLER N W, SANCHEZ-GASCA J J, PRICE W W, et al. Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 MW wind turbine generators for stability simulations[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto Ontario, Canada: IEEE, 2003: 1977-1983.

朱成亮(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定性分析。

刘三明(1961—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为划目标规划、最优控制、电力系统规划与优化运行、风电场建模仿真及风电机组故障诊断技术。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。

《高压电器》编辑部