

考虑弃风的 DFIG 风电场动态等值模型

王增平, 张乐丰

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 我国弃风现象严重, 在此大环境下, 为了得到更为准确的风电场模型, 提出了一种考虑弃风的双馈感应异步发电机 (DFIG) 风电场的建模方法。该方法考虑了由于尾流效应导致风电场内各台风力机输入风速不同, 兼顾调度部门向风电场下达的弃风指令, 提出了以风能利用率 C_p 为分群指标, 建立了 DFIG 风电场的多机等效动态模型, 大幅度提高了仿真速度。该方法更贴近风电场实际运行情况, 分群指标易于得到。通过 PSCAD 算例仿真及结果对比, 表明该风电场等值模型的输出在稳态和故障情况下都能更好地拟合详细模型。

关键词: 弃风; 双馈感应发电机; 分群指标; 风能利用率; 多机表征

Dynamic equivalent model of wind farm with DFIG considering wind power curtailment

WANG Zeng-ping, ZHANG Le-feng

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In China, wind power curtailment is very common. For getting a more accurate wind farm model, a new wind farm model of DFIG considering wind power curtailment is proposed. This method takes both wake effect and the order from power dispatchers into account, to make power coefficient as a classification index, a multi-machine dynamic equivalence model with DFIG is built, the run time of this model is less. Classification index is easy to get and the model is more similar to actual operation situation. By establishing models on PSCAD platform, the results show that the proposed equivalent model can more accurately describe the output of the detailed model under both steady state and transient state.

This work is supported by National Key Basic R & D Program of China (973 Program) (No. 2012CB215200).

Key words: wind power curtailment; doubly-fed induction generator; classification index; power coefficient; multi-machine representation

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)13-0001-06

0 引言

近年来随着我国大力发展风力发电, 我国已经成为全球风电装机增长速度最快、新增风电装机容量最大的国家。目前风电装机容量已经超过美国成为世界第一。越来越多的大容量风电场的出现将会对电力系统产生越来越大的影响, 因此风电场建模是一个十分有意义的课题。

由于调峰能力不足、配电线路阻塞和输电容量不足等原因^[1], 风电场弃风问题已经成为风电发展面临的一大挑战。我国风电场主要集中在“三北”

地区, 这些地区网络薄弱, 线路输送能力较差, 外送通道不畅, 因此我国风电场弃风现象尤为严重。仅 2011 年“三北”地区风电场弃风电量就达 123 亿 kWh, 弃风率约为 16%。中国风能协会此前统计, 2012 年全国弃风电量约 200 亿 kWh, 较 2011 年的规模翻倍, 造成的经济损失超过 100 亿元。由此可见, 风电场弃风已经成为一种普遍现象, 要建立更为精确可靠的风电场模型, 就要考虑弃风现象对其的影响。

风电场弃风电量是指受多种因素影响, 风电场可发而未能发出的电量。该电量不包括风电场因风机自身设备故障原因未能发出的电量。DFIG 风电场通常是通过停运部分机组或者调节风力机叶片桨距角以降低风能利用率 C_p 来控制整个风电场输出电量。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973 项目) (2012CB215200); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2014XS08)

国内外很多学者已经对风电场建模进行了研究。文献[2]对现有风电场建模成果从四个方面进行了总结和分析。文献[3-5]将同一高度的一行风机等值成一台风机。文献[6]依据定速风机输入风速的不同建立了风电场动态模型。文献[7]依据尾流效应影响对风电场进行区域划分,以此建立风电场简化模型。文献[8-12]从不同方面研究了尾流效应对风电场的影响。文献[13]以故障切除时风电机组的转速为机组分群原则。文献[14]以扰动后发电机转子角偏差量作为判断机组是否为一群的标准。文献[15]以风速、转速差异作为特征变量,进行风电机组分群。文献[16]采用风电机组仿真过程中的状态变量矩阵作为分群指标。文献[17]基于风电场输出特性提出风电场动态等值模型参数的优化求解方法。文献[18]以同调等值法将风电场内永磁直驱式同步电机进行分群。

目前常用的分群方法是以风速、发电机转速以及运行状态等作为分群指标。虽然这些指标各有特点,但都没有考虑弃风问题。事实上,风电场出现的弃风电量难以体现在目前提出各类分群指标上,因此需要寻找新的、能反映弃风情况的分群指标,期望分群更加合理。当电网不能接纳全部风电时,必须按调度发出的指定功率进行控制,通过停机或调整桨距角来实现发出指定功率,此时便发生了弃风。而调整桨距角改变的是风能利用率 C_p , C_p 是桨距角和叶尖速比的函数,能很好地反映出风力机实时的运行状态。鉴于此,本文提出以 C_p 作为分群指标对风电场内DFIG进行分群。在新的分群指标的基础上,以K-means算法对DFIG进行动态分群,并进行参数等值处理,进而建立风电场的多机等值模型。通过PSCAD软件对算例进行仿真验证,证明了分群指标的优越性和模型的有效性。

1 单台DFIG

1.1 DFIG的工作原理

DFIG的定子绕组直接与电网相连,转子绕组一般接入交-直-交变换器供电,能够在不同的转速下运行,转速随风速的变化可做适当调整,使风力机始终运行在最佳状态,提高了风能的利用率。当发电机的负载和转速变化时,通过调节馈入转子绕组的电流,能保持定子输出的电压和频率不变,同时,还能调节发电机的功率因数。基于以上优点,目前DFIG已经成为我国风电场的主流风力机型。

1.2 风机的机械功率

风力机靠捕获风能向发电机提供机械功率。根据空气动力学原理,单台风力机捕获的风能与风速

的立方成正比,风力机叶片参数及其控制策略直接影响风能的捕获能力。风能捕获的机械功率为

$$P_w = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho_{\text{空气}} C_p V^3 \quad (1)$$

式(1)中: P_w 为风力机吸收的机械功率(W); R 为叶片半径(m); $\rho_{\text{空气}}$ 为风电场所在地空气密度(kg/m^3); C_p 表示风能利用率; V 为吹过风力机的风速。若忽略DFIG绕组的铜耗和铁耗,则单台DFIG吸收的机械功率近似等于其定子侧发出的有功功率。

1.3 机群分群指标 C_p

对于给定的风电场,其中叶片半径、空气密度都为恒定,而风能利用率 C_p 是叶尖速比 λ (叶尖速度与风速之比)和桨距角 β 的函数, $C_p = f(\lambda, \beta)$ 。当吹过风力机的风速小于额定风速时, C_p 保持最大利用率 $C_{p\text{max}}$,以此达到捕获最大风能的目的;当风速大于额定风速时,为了使输出功率保持在额定功率附近,桨距角调节系统启动,使 C_p 减小。当调度部门向风电场下达发电功率限值时,如果该限值低于风电场可发功率,风力机需要通过调节桨距角降低 C_p 来发出风电场指定的有功功率。尤其是在我国“三北”地区,冬季风大,为了设备不被低温冻坏,应尽量使风力机处于运行当中,经常需要调节每台风机叶片的桨距角来减小风机的出力。 C_p 可由式(2)、式(3)确定。

正常情况下

$$C_p = \begin{cases} C_{p\text{max}}, & V_w \leq V_{\text{额}} \\ \frac{P_N}{0.5\pi R^2 \rho_{\text{空气}} V_w^3}, & V_w > V_{\text{额}} \end{cases} \quad (2)$$

弃风发生时

$$C_p = \frac{P_r}{0.5\pi R^2 \rho_{\text{空气}} V_w^3} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中: P_N 为DFIG额定功率; P_r 为受限制出力。式(2)、式(3)表明,只要知道单台风力机的各个参数和 P_r ,就很容易计算出分群指标 C_p 。

2 DFIG风电场的多机表征

2.1 基于K-means聚类算法进行机群分类

本文依据分群指标 C_p 对风场内所有风力机进行分组, C_p 可以取 $[0, C_{p\text{max}}]$ 区间上的任意值。当

$C_p=0$ 时即机组处于停机状态。

K-means 算法是一种应用比较广泛的分类算法。该算法以标准测度函数最小为分类原则, 把 N 个样本点分为 K 类。其结果使得同类间的样本具有较高的相似性, 类间样本相似程度较低。由于本文采用的分群指标 C_p 是一维数据, 利用 **K-means** 算法实现数据分类速度很快, 且分类结果不依赖初始聚类中心, 因此本文采用该算法来实现 DFIG 风电场机群分群。

K-means 算法的具体分类步骤如下:

(1) 任意选取 K 个样本点作为初始聚类中心。

(2) 对剩余的每个样本点, 根据其与其各个类中心的距离, 将它归到最近的一类中。

(3) 计算每个类的样本均值, 并计算标准测度函数。

$$x_i = \frac{1}{N_i} \sum_{\varphi \in S_i} \varphi, \quad E = \sum_{i=1}^K \sum_{\varphi \in S_i} |\varphi - x_i|^2 \quad (4)$$

式(4)中: x_i 为第 i 个类的样本均值; S_i 为第 i 个类的样本点集合; N_i 为第 i 个类的样本总数; E 为标准测度函数, φ 为样本点。

(4) 以每个类的样本均值代替初始聚类中心, 重复步骤(2)~步骤(4), 直到标准测度函数收敛。

本文以各台机组的 C_p 作为样本点, 将分群数目 K 输入 **K-means** 算法中, 就可得到 K 个分群, 每个群对应一台等效 DFIG。

2.2 分群原则

分群的目的主要是减少仿真时间, 对于同一模型不同的仿真软件运行速度不同。分群数目 K 应由风电场规模和软件运行速度来决定, 在满足实际运行需要的基础上分群数目越少越好。实际中, 风电场一段运行时间 $[t_0, t_1]$ 内, 当等值模型与详细模型输出量之差 Δf 小于某个给定的阈值 δ 时, 可认为等值模型满足实际需要, 则分群数目是合理的, 如式(5)所示。

$$\int_{t_0}^{t_1} (\Delta f)^2 dt \leq \delta \quad (5)$$

阈值 δ 的大小由风电场规模、工程需要精度、仿真运行时间等多种因素决定, δ 越小等值模型精度越高。

2.3 等值模型的参数计算

通过 **K-means** 算法将风电场内 n 台 DFIG 分群, 得到 K 个群, 将每个群等效为一台 DFIG 风电机组。等效风电机组的参数由详细模型机组的参数聚合而得到。在聚合参数的过程中, 作如下假设:

(1) 等值 DFIG 的容量等于群内每台机组容量之和。

(2) 等值 DFIG 输出的有功功率等于群内各台机组发出的有功功率之和。

(3) 同一群即一台等效 DFIG 机组的 C_{peq} 取这一群机组 C_p 的均值。

(4) 忽略风电场内电缆的阻抗。

(5) 被等值的同一群风机接在同一条馈线上。

假设由 **K-means** 算法得到的某台等效 DFIG 是由 m 台机组聚合而来的, 则有

$$S_{eq} = \sum_{i=1}^m S_i, \quad P_{eq} = \sum_{i=1}^m P_i \quad (6)$$

式(6)中: S_i 和 P_i 分别为第 i 台 DFIG 的容量和有功功率; S_{eq} 为等值 DFIG 的容量; P_{eq} 为等值 DFIG 发出的有功功率。

A. 等值 DFIG 参数的计算

由于假设被等值的 m 台 DFIG 接在同一条馈线上, 所有机组采用 T 型等效电路, m 个 T 型等效电路并联得到等效 DFIG 电路, 等效 DFIG 电路的参数采用容量加权法^[19]计算得到。

待等值的参数有等值机的转子电阻 R_{req} 和电抗 X_{req} 、定子电阻 R_{seq} 和电抗 X_{seq} 、激磁电抗 X_{meq} 。

B. 等值风机等效输入风速的计算

为了简化等值风力机模型同时又考虑由于尾流效应造成的同一群内 m 台风力机输入风速的不同, 取

$$V_{eq} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^m V_i^3}{m}} \quad (7)$$

式(7)中: V_i 为第 i 台风力机的输入风速; V_{eq} 即为等值风力机的等效输入风速。

风电场多机表征如图 1 所示。

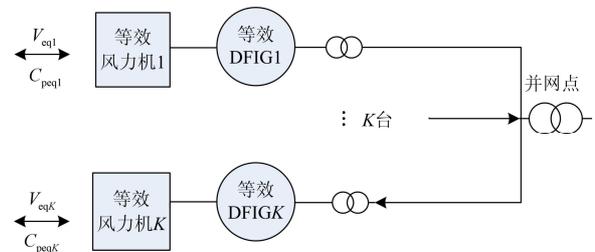


图 1 风电场多机表征图

Fig. 1 Diagram of multi-machine model

3 算例分析

风电场由容量 2 MW 的 DFIG 6 台、1.5 MW 的 DFIG 4 台共 10 台组成，每台 DFIG 配一台 0.69 kV/20 kV 箱式变压器。在风电场出口处升压变压器高压侧施加 A 相接地短路故障，故障在第 3 s 时发生，持续 0.2 s。风电场示意图如图 2。两类 DFIG 的参数如表 1 所示，场内每台风力机的输入风速见表 2，限制出力的 DFIG 机组见表 3。

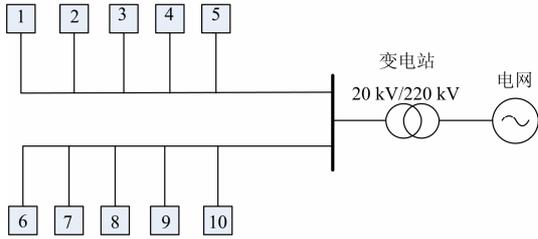


图 2 风电场结构图

Fig. 2 Layout of wind farm

表 1 两类 DFIG 的参数

Table 1 Parameters of two type DFIG

参数	2 MW	1.5 MW
额定功率/MW	2	1.5
定子电阻/pu	0.005 4	0.008 4
定子漏抗/pu	0.10	0.167
转子电阻/pu	0.006 07	0.008 3
转子漏抗/pu	0.11	0.132 3
激磁电抗/pu	4.5	5.419

表 2 各台风力机输入风速

Table 2 Wind speed of every wind turbine

机组	风速	机组	风速
1 号机	11.1	6 号机	10.1
2 号机	11.2	7 号机	10.8
3 号机	10.6	8 号机	10.7
4 号机	10.9	9 号机	10.2
5 号机	10.6	10 号机	10.7

表 3 限制出力的 DFIG

Table 3 DFIG of restricted power

机组	1	2	6	7	9
出力限值/MW	0.79	0.86	0.91	0.92	0.91

由于算例中机组数量较少，所以 K-means 算法中 K 取 2，即将所有风力机分成两类。

文献[13]指出以转速分群效果优于风速分群，

因此，本文将以 C_p 和转速这两个分群指标得到模型与详细模型进行对比。

由于等值 1 号机和等值 2 号机都是由 2 台 1.5 MW 和 3 台 2 MW 的 DFIG 组成，所以两台等值机参数相同，按照容量加权法得到的等值机的参数见表 4，以 C_p 、DFIG 转子转速分群指标分群的结果见表 5。两种分群方法的风电场出口处输出的结果与详细模型同样位置的输出结果对比见图 3~图 6。

表 4 两台等值机的参数

Table 4 Parameters of two equivalent units

参数	等值 1 号机	等值 2 号机
额定功率/MW	9	9
定子电阻/pu	0.006 1	0.006 1
定子漏抗/pu	0.115 4	0.115 4
转子电阻/pu	0.006 7	0.006 7
转子漏抗/pu	0.117 8	0.117 8
激磁电抗/pu	4.769 6	4.769 6

表 5 两种分群指标的分群结果

Table 5 Results of two classification methods

机组	等值 1 号机	等值 2 号机
以 C_p 分群	3,4,5,8,10	1,2,6,7,9
以转子转速分群	1,2,4,7,8,10	3,5,6,9

在图 3~图 6 中，实线：详细模型，虚线：以 C_p 分群，粗实线：以转子转速分群。

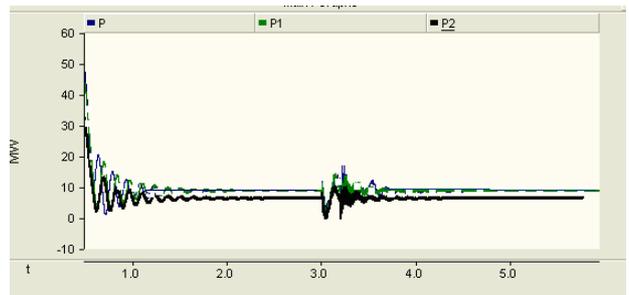


图 3 有功对比

Fig. 3 Comparison of active power

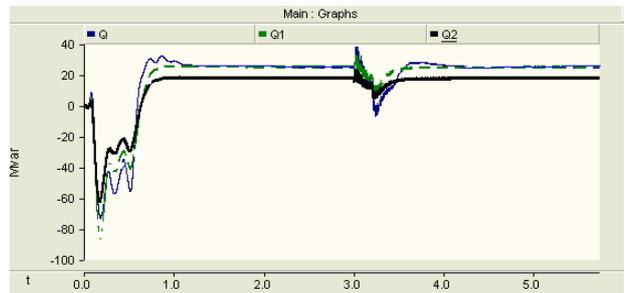


图 4 无功对比

Fig. 4 Comparison of reactive power

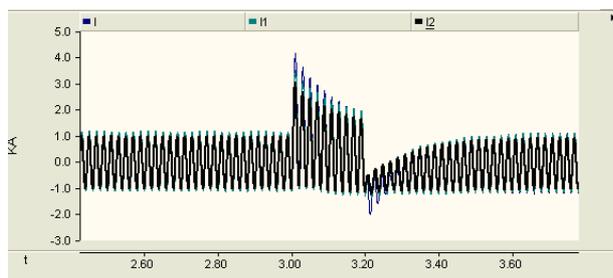


图 5 A 相电流对比

Fig. 5 Comparison of A-phase current

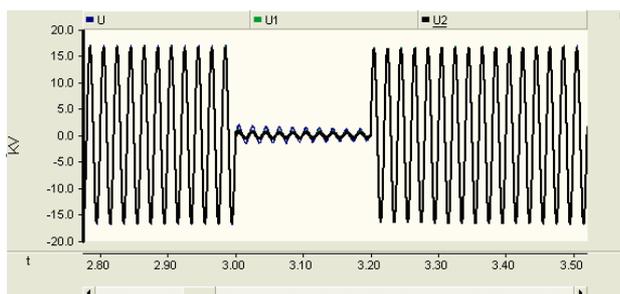


图 6 A 相电压对比

Fig. 6 Comparison of A-phase voltage

由图 3~图 6 可以看出, 以 C_p 为分群指标的多机等值模型与详细模型的误差更小, 拟合效果更好, 优于以转子转速分群的方法。由图 3、图 4 可以看出, 对于以 C_p 分群和以转速分群建立的风电场等值模型发出的有功功率和无功功率相差较大, 这反映出弃风主要对风电场发出的有功功率和无功功率造成影响, 与实际风电场运行情况一致; 由图 5 可以看出两种分群方法电流与详细模型的误差主要体现在故障瞬间故障电流的峰值上, 这与聚合得到的等值机的参数大小直接相关, 不同聚合参数的方法可以得到不同的等值机参数; 由图 6 可以看出, 对于上述两种分群方法建立的风电场等值模型出口处的电压相差不大, 这是由于本文搭建的 DFIG 模型均采用定子电压定向控制策略, 保持其定子电压为额定电压恒定, 因此弃风现象对其影响较小。与详细模型相比, 2 机等值模型速度快很多, 以 PSCAD 平台上 10 机模型为例, 详细模型运行需要数个小时, 2 机等值模型只需几分钟, 且随着详细模型中风机数量的增加, 尤其是对于实际运行中的大型风电场, 多机等值模型运行的速度优势明显。

4 结论

实际大型风电场中, 机组数量大, 发生弃风现象的机组更多, 因此以 C_p 为分群指标得到的分群结果优势会更明显, 风电场等值模型会更加准确、贴

近实际情况。

提出的由 DFIG 组成的风电场多机等值模型考虑了尾流效应以及弃风现象, 提出的新分群指标 C_p 使等值模型的输出与详细模型更加吻合。该模型仿真速度快, 占用内存小, 精度可以满足工程需要。可以为研究风电场的接入对电力系统的影响提供依据和参考。

参考文献

- [1] 朱向东. 目前中国风电弃风现状及对策[J]. 能源与节能, 2012(10): 30, 67.
ZHU Xiang-dong. Current situation and countermeasure of current China's wind power abandon wind[J]. Energy and Energy Conservation, 2012(10): 30, 67.
- [2] 葛江北, 周明, 李庚银. 大型风电场建模综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 146-153.
GE Jiang-bei, ZHOU Ming, LI Geng-yin. Review on large-scale wind farm modeling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 146-153.
- [3] 岳菁鹏, 张新伟, 张新燕, 等. 对风力发电场稳态时不同等值模型的研究[J]. 电机技术, 2010(5): 8-11.
YUE Jing-peng, ZHANG Xin-wei, ZHANG Xin-yan, et al. Study on different equivalence model of the steady-state wind farm[J]. Electrical Machinery Technology, 2010(5): 8-11.
- [4] 曹张洁, 向荣, 谭谨, 等. 大规模并网型风电场等值建模研究现状[J]. 电网与清洁能源, 2011(2): 56-60.
CAO Zhang-jie, XIANG Rong, TAN Jin, et al. Review of current research on equivalent modeling of large-scale grid-connected wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2011(2): 56-60.
- [5] 苏勋文, 米增强, 王毅. 风电场常用等值方法的适用性及其改进研究[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 175-180.
SU Xun-wen, MI Zeng-qiang, WANG Yi. Applicability and improvement of common-used equivalent methods for wind farms[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 175-180.
- [6] 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.
- [7] 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 Hang-yu. Simplification of wind

- farm model for dynamic simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 147-152.
- [8] 曹娜, 于群, 戴慧珠. 风速波动时风电场动态特性分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 497-502.
CAO Na, YU Qun, DAI Hui-zhu. Dynamic character analysis of wind farm under wind fluctuation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinca, 2009, 30(4): 497-502.
- [9] 曹娜, 赵海翔, 任普春, 等. 风电场动态分析中风速模型的建立及应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 68-72.
CAO Na, ZHAO Hai-xiang, REN Pu-chun, et al. Establish and application of wind speed model in wind farm dynamic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 68-72.
- [10] 苏勋文, 赵振兵, 陈盈今, 等. 尾流效应和时滞对风电场输出特性的影响[J]. 电测与仪表, 2010, 47(3): 28-31.
SU Xun-wen, ZHAO Zhen-bing, CHEN Ying-jin, et al. Impacts of wake effect and time delay on output characteristics of wind farm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(3): 28-31.
- [11] 郑睿敏, 李建华, 李作红, 等. 考虑尾流效应的风电场建模以及随机潮流计算[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1515-1520.
ZHENG Rui-min, LI Jian-hua, LI Zuo-hong, et al. Modeling of large-scale wind farms in the probabilistic power flow analysis considering wake effects[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(12): 1515-1520.
- [12] KIM H, SINGH C, SPRINTSON A. Simulation and estimation of reliability in a wind farm considering the wake effect[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 274-282.
- [13] 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 Zeng-qiang, SU Xun-wen, YANG Qi-xun, et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [14] 李秀全, 邵玉槐, 张强. 电力系统同调动态等值的应用[J]. 电气技术, 2008(2): 34-36.
LI Xiu-quan, SHAO Yu-huai, ZHANG Qiang. Application of coherency-based dynamic equivalence[J]. Electrical Engineering, 2008(2): 34-36.
- [15] 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 Bao-yun. Study on dynamic equivalence model of wind farms with DFIG under wind turbulence[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 1-6.
- [16] 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): 11-19, 24.
CHEN Shu-yong, WANG Cong, SHEN Hong, et al. Dynamic equivalence for wind farms based on clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 11-19, 24.
- [17] 乔嘉赓, 鲁宗相, 闵勇, 等. 风电场并网的新型实用等效方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 209-213.
QIAO Jia-geng, LU Zong-xiang, MIN Yong, et al. New dynamic equivalence method for grid-connected wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 209-213.
- [18] 蒙晓航, 叶林, 赵永宁. 永磁直驱同步风电场多机动态等值模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 25-32.
MENG Xiao-hang, YE Lin, ZHAO Yong-ning. Dynamic multi-machine equivalent model of direct drive permanent magnet synchronous generators of wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 25-32.
- [19] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
JU Ping, MA Da-qiang. Power system load modeling[M]. Beijing: China Water Power Press, 1995.

收稿日期: 2013-09-27; 修回日期: 2013-11-20

作者简介:

王增平(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微机保护、变电站综合自动化等方面的研究;

张乐丰(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化、风电场建模。E-mail: 443692711@qq.com