

# 基于损耗分配方法的风电场等值建模

李卓男, 艾欣, 方杰, 潘伟

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

## Equivalent Modelling of Wind Farm Based on Loss Distribution Method

LI Zhuonan, AI Xin, FANG Jie, PAN Wei

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**摘要:** 在涉及风电机组集群建模的情况下, 由风能的随机性导致的实时变化会增加额外的计算量, 从而延长仿真所用时间。本文针对辐射型网络的风电场, 提出了一种经由功率叠加和损耗分配的简化等值模型。该模型在已知风电场各台机组功率及线路长度等参数的情况下, 将风电场简化为少量机组并联形式的模型, 以简化前后风电场内部线损相等为原则进行线路变换, 同时满足风电场出口处的有功功率、暂稳态电压幅值及波形稳定的目的。仿真结果显示, 该等值模型较好地模拟了风电场内部的运行情况, 达到了预定的等值效果, 并具有较高的精度。

**关键词:** 风电场; 等值模型; 损耗分配; 网络变换

**Abstract:** As to the modeling of wind power units, real-time changes caused by the randomness of wind energy will introduce huge calculation amount, which extends the simulation time. In this paper, as to wind farm with radiant network, a simplified equivalent model is put forward through power superposition and loss allocation. This model simplifies multi-unit wind farms into one with parallel connection of a small amount of units under the condition of such known parameters as unit power and line length in the wind farm, which conducts line conversion with the principle of equivalence for internal line loss in the wind farm before and after simplification, and meanwhile meets the stability requirement of active power, transient and steady-state voltage amplitude and waveform at the exit of the wind farm. The simulation result shows that this equivalent model well simulates the internal operation of wind farm, and achieves the expected equivalent effect and has high precision.

**Keywords:** wind farm; equivalent model; loss distribution; network transformation

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863 计划)  
(2011AA05A301)

## 0 引言

中等规模的风电场通常由几十台到上百台风电机组构成, 且内部各机组的出力处于不断变化之中, 在风电场的动态仿真时, 若使用详细模型, 就必然使风电场模型的仿真陷入数十乃至数百分钟冗长的计算中, 仿真效率很低<sup>[1]</sup>。所以, 在风电场的实时仿真中可以采取牺牲些许仿真精度、大幅提高仿真效率的原则, 仅考虑风电场的整体特性, 忽略内部机组的具体动态<sup>[2-4]</sup>, 对风电机组的内部网络进行变换, 从而建立风电场的聚合等值模型。

一般而言, 风电场的建设除了需要考虑适当的选址, 还需要追求必要的经济性, 凭借典型情况下低成本优势<sup>[5]</sup>, 辐射型网络成为风电场比较普遍的内部连接方法<sup>[6]</sup>。

以往对风电场聚合的原理大多使用简化处理的思想, 将模型在近似的情况下作降阶处理。文献<sup>[7]</sup>忽略了定子电磁暂态, 将发电机模型降至三阶, 但每台机组需要用 7 个状态变量来表示, 计算量仍很大。文献<sup>[8]</sup>使用了支撑矢量聚合原理对风电机组进行概率性分组, 对等值机的串联阻抗利用等损耗的原则进行计算, 模型较为简单, 但受风速和风向影响较大, 风速和风向每变化一次, 风电场内机组分组的情况就会改变一次, 从而降低该等值方法的实用性。其他文献中的等值方法<sup>[9-11]</sup>大多将导线变换为 T 型等值电路, 依然产生了冗余计算和复杂的编程工作。文献<sup>[11]</sup>提出将同群机组输出电流的幅值与相位设为完全相等的思想, 但这种假设必须忽略集电网络。大多数等值都具有相当高的精确度和等效性, 减少了仿真的时间, 却增加了额外的运算量和技术要求。

本文采用的方法是忽略风电场内部因电能从风电机组到集电网络之间的线路阻抗而形成的压降对其输出电流幅值造成的影响,且认为风电场内部电流相位的相同,按照损耗分配原则针对不同机组对线路内部各段分别造成的损耗进行细化分析,再由损耗不变的原则对辐射型网络中的等值阻抗进行计算,运算简单,适用于包括有机组处于停运状态在内的大多数情况。分群方法灵活,可制定任意步长进行分群聚类,也可以聚合为一台机组,且几乎不受机组空间分布、特定分群原则和运行状态的约束。

## 1 损耗分配

风电场内机组出力各不相同,出力近似相等的机组往往呈随机分布,难以从空间分布的角度进行基于区域划分的聚合简化。且因为辐射型网络的特点,会出现几台机组共用同一条输电线路的情况,所以在聚合的过程中,线路的阻抗不能进行直接叠加。

针对此问题,本文提出损耗分配原理,在忽略线路阻抗造成微小压降的前提下,认为多条线路汇聚之后的单线阻抗之中,每条线路的电流造成的功率损耗之比等于汇聚前的电流之比。如图1所示。

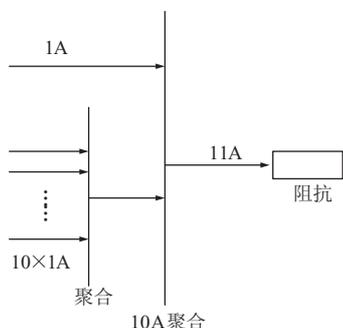


图1 电流的基本聚合原理

如图1中的两个同相位但大小不同(10A和1A)的电流汇聚于同一节点之后流入同一阻抗,因而会造成一定的损耗。10A的电流可以认为是10个1A电流的集合,而11个1A的电流通过同一阻抗,各自造成的损耗自然是平均分配的,故10A电流造成的损耗是1A电流造成损耗的10倍。

我国风电场中风电机组在产生电能之后,将电压升至统一数值(我国标准<sup>[12]</sup>是690V升至35kV,美国的标准<sup>[13]</sup>为575V升至25kV),才能使电能经由集电网络进入汇流母线和集电网络,电网内部的功率因数角拥有统一标准,且风电场具备无功补偿

设备,在短时间和短距离差之内不会发生明显的偏差变化,所以电流相位相等的要求是可以满足的。故可知损耗分配原理在风电场内部使用是可行的。

## 2 风电场内部机组及线路等值

### 2.1 风电机组的聚合

本文改进了文献[8]的方法,在已知风电场内部所有机组出力的情况下,将出力近似相等的机组进行功率叠加计算。可以将整个风电场内所有机组聚合为单一等值机组,也可以对出力标么值制定相应的步长,对处于不同输出功率的风电机组进行划分,分到同一类的机组被聚合为一台机组,聚合之后的单机功率等于该类风电机组功率的叠加:

$$S_{\text{eq}} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

式中: $n$ 为单个聚类之内风电机组的数量; $S_i$ 为该类别内第 $i$ 台机组的输出功率。

而功率不同在风电场内部网络中体现为电流大小的不同,即

$$\frac{S_i}{S_j} = \frac{3U_i I_i}{3U_j I_j} = \frac{3U I_i}{3U I_j} = \frac{I_i}{I_j} \quad (2)$$

在这种情况下,等值聚合之后单台风电机组的输出功率和输出电流都被认为是归为一类之中所有风电机组功率和电流之和,对机组本身的阻抗等参数可粗略地作并联化处理。

### 2.2 线路阻抗的聚合

本文采用以损耗相等的原则计算线路等值阻抗。在聚合之后的机组中,每一台聚合机组到汇流母线之间都有一个进行过等值计算的虚拟阻抗,先讨论每条线路上有4台机组的简单模型。

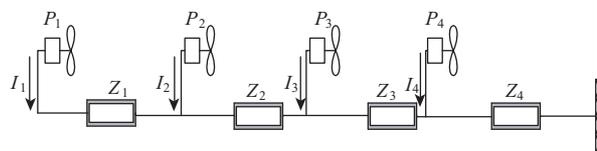


图2 风电场单一线路上的风电机组及阻抗位置

如图2所示,4台机组的出力、输出电流和4段线路的阻抗以下标1、2、3、4表示。若将特定机组在单段线路上造成的损耗以 $P_{\text{loss}}$ 表示,因而对4段线路之间的损耗有

$$P_{\text{loss}} = \left( \sum_{i=1}^j I_i \right)^2 Z_j \quad (3)$$

这样，根据损耗分配原理，单台机组对一段线路阻抗造成的损耗也可以计算出来：

$$P_{\text{loss}ij} = \frac{I_i}{\sum_{m=1}^j I_m} \left( \sum_{m=1}^j I_m \right)^2 Z_j = I_i Z_j \sum_{m=1}^j I_m \quad (4)$$

式中： $P_{\text{loss}ij}$  为第  $i$  台风电机组对第  $j$  段线路所造成的损耗分量。

若不考虑因电流的增大造成的线路不同状况的集肤效应等因素，近似认为线路阻抗参数可以用线路长度来表征，可对计算进行进一步的简化，认为机组间的线路长度为 1，末端长度为  $a$ 。4 台风电机组的输出电流之比近似视为其输出功率之比，故 4 个输出电流分别为  $k_1 I$ 、 $k_2 I$ 、 $k_3 I$  和  $k_4 I$ 。模型因而简化为图 3。

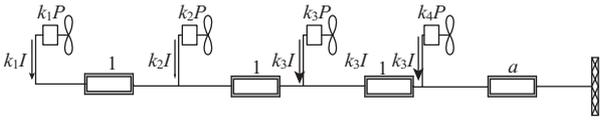


图 3 风电场单线功率及阻抗简化

在计算中，制定基准值  $P$  之后，风电机组出力的标幺值分别为  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ ，根据损耗分配原理，第一台机组  $k_1$  对 4 段线路损耗的贡献值  $P_{\text{loss}}$  为第一段：

$$P_{\text{loss}} = I_1^2 Z_1 = k_1^2 \quad (5)$$

同样有第二、三、四段：

$$P_{\text{loss}} = (k_1 k_2)^2 \frac{k_1}{k_1 + k_2} = k_1 (k_1 + k_2) \quad (6)$$

$$P_{\text{loss}} = (k_1 + k_2 + k_3)^2 \frac{k_1}{k_1 + k_2 + k_3} = k_1 (k_1 + k_2 + k_3) \quad (7)$$

$$P_{\text{loss}} = (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)^2 \frac{ak_1}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4} = ak_1 (k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \quad (8)$$

故第一台风电机组对单条线路造成的总损耗为

$$P_{\text{loss}} = \sum_{j=1}^4 \text{Loss}_{1j} = k_1 [(3+a)k_1 + (2+a)k_2 + (1+a)k_3 + ak_4] \quad (9)$$

同理可求得第二、三、四台机组造成的总线损。按照上述几个等式，可以粗略地完成单线条路中 4 台机组的并联化，而将风电机组出力数据代入之后，另外 3 条线路都可以依上式完成。因为损耗分配方法的机理是考虑每台机器造成的损耗并只与

它本身造成损耗等效的阻抗进行串联，之后再与其他的机组连同它们对应的阻抗进行并联，以此达到一个进行完全拆分过的多机组并联体，不论多少台机组，理论上都可以依照此方法来达到机组聚合的目的。

### 3 风电场聚合模型算例

完成单线内部的聚合之后就可以进行全网络聚合，本文对有 4 条线路共 16 台机组的简单模型进行计算。

#### 3.1 聚合所需矩阵的建立

在机组聚合之前需要确定一些参数并建立风电场的出力矩阵  $S$  和线路长度矩阵  $L$ 。考虑尾流效应，因为风电机组对风力的阻挡作用<sup>[14]</sup>，在上风向的风速要高于下风向，导致机组输出功率也有类似的变化规律，因而造成了风电机组功率在空间分布上的逐渐变化。根据额定风速下一般强度的尾流效应和风电场布局，风电场 16 台机组的出力(标幺值)矩阵  $S$  和线路长度矩阵  $L$  为

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.95 & 0.88 & 0.86 & 0.91 \\ 0.95 & 0.83 & 0.78 & 0.73 \\ 0.90 & 0.80 & 0.74 & 0.70 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1.6 \\ 1 & 1 & 1 & 0.6 \\ 1 & 1 & 1 & 0.6 \\ 1 & 1 & 1 & 1.6 \end{pmatrix} \quad (11)$$

按照风电场分机损耗的计算式，可以求得表征 16 台机组各自造成损耗的损耗矩阵  $\Delta P$  为

$$\Delta P = \begin{pmatrix} 12.4 & 11.4 & 9.4 & 6.4 \\ 7.25 & 5.88 & 4.17 & 1.97 \\ 6.90 & 5.24 & 3.54 & 1.44 \\ 9.06 & 7.33 & 5.52 & 3.52 \end{pmatrix} \quad (12)$$

#### 3.2 聚合机组和线路阻抗的确定

由  $S$  可以制定相应的步长从风电机组出力的角度对风电机组进行分类，在此分别以输出功率标幺值数值的 0.1 和 0.3 为步长，将 16 台机组聚合为 3 台机组和 1 台风电机组的整合形式，每台聚合机都与经过计算确定数值的等值阻抗进行串联。

以聚合为 3 台机组的情况为例，以 0.1 为步长，将 16 台机组进行聚合，等值成为  $S_{\text{eq}_1}$ 、 $S_{\text{eq}_2}$

和  $S_{eq\_3}$  这 3 台机组, 故有

$$S_{eq\_m} = \sum_{j=1}^n S_{in\_j} (1 \leq m \leq 3) \quad (13)$$

其中, 被划分到同一个类别的机组相应的参数用下标 in 来表示,  $n$  为分组内机组的数量。而第  $i$  台聚合机相连的等值阻抗计算的原则为

$$I_i^2 Z_{eq\_i} = \sum_{j=1}^n (\Delta P_{in\_j}) \quad (14)$$

由此, 3 个等值机组的功率大小和串联等值阻抗都可以获得

$$S_{eq} = (7.71 \quad 3.37 \quad 2.95)^T \quad (14)$$

$$L_{eq} = (1.090 \quad 1.992 \quad 1.611)^T \quad (15)$$

同理可知, 聚合为一台机组的情况下, 聚合机的出力为 14.03, 等值阻抗在线路长度表征为 0.515, 由此, 两个不同聚合程度的可供验证的模型已经得到了完整建立。

## 4 仿真验证

聚合准确度将用仿真验证的方法来进行评估, 本文使用 Matlab/Simulink 进行模型的建立和仿真。单台机组容量为 1.5MW, 风电场内部线路的线电压为 690V, 经由升压站的变压器使电压升至 35kV, 最终与 110kV 的外部电网相连接。外部风速为风电机额定风速, 但考虑尾流效应。16 台风电机组的出力和线路长度按照矩阵  $S$  和  $L$  所示, 设定静止无功补偿器 (STATCOM) 的容量为 8Mvar。仿真对机组启动 11s 内的情况进行分析。

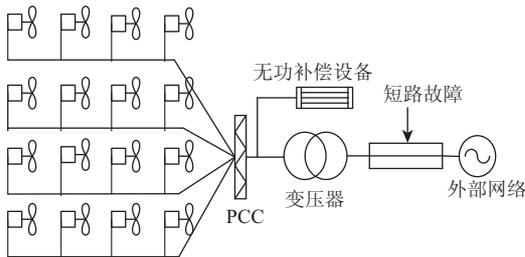


图 4 仿真用风电场模型简图

因为风电机组的模型同时包括风力机的静态空气动力学特性和电机以及控制系统的动态特性<sup>[16]</sup>, 而且, 考虑到一个等值模型的仿真不仅应该追求正常运行时的电压、有功功率的相等或相近, 还需要考虑暂态响应的相同或相似。所以本文对仿真模型

设置 35kV 传输线上的线路故障, 时间区间为 9~9.2s。为不失一般性, 以单相短路故障为例进行仿真并读取波形, 检验的指标为出口电压和有功功率。

在波形的读取中, 可以将 16 台机组运行出来的波形数据稳定值取为一个基准值, 纵轴以标么值的形式表示, 以方便观察和误差的分析。有功功率基准值取 16 台机组运行出结果并测得的最终稳定的数据, 电压值取 49.5kV。

在仿真中主要对开机和暂态响应这两种最易出现误差的状态进行波形的局部放大观察, 以确定仿真在特殊状态下可以保证的精确度, 读取的波形见图 5~10, 图中电压和有功功率均为标么值。

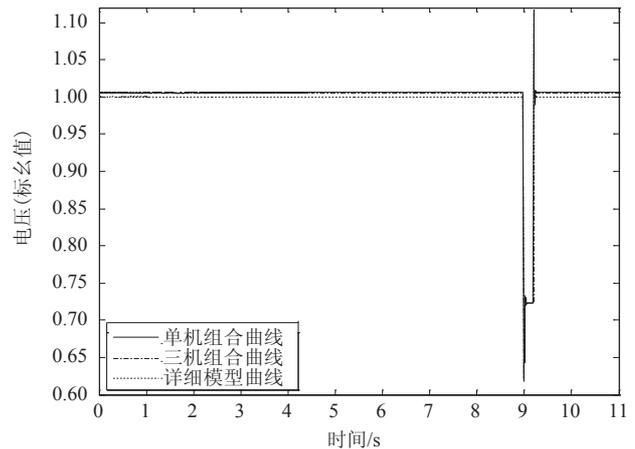


图 5 聚合前后电压对比

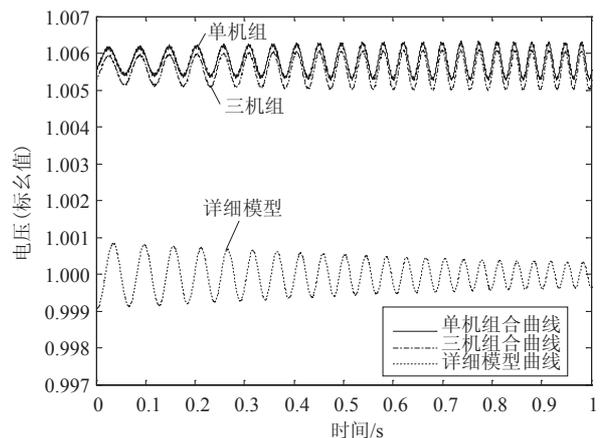


图 6 聚合前后电压(启动过程)对比

由波形图可见, 三机组聚合和一机组聚合模型在任何状态下, 与详细模型的电压偏差并不大, 最大也在 0.6% 以内, 可以满足仿真的要求。三机组

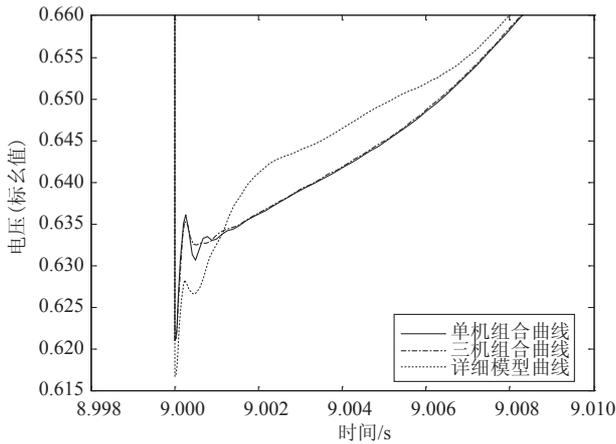


图 7 聚合前后电压暂态响应对比

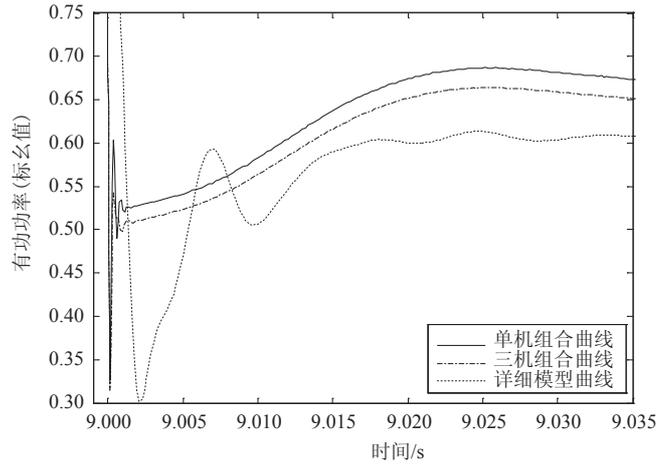


图 10 聚合前后有功功率暂态响应对比

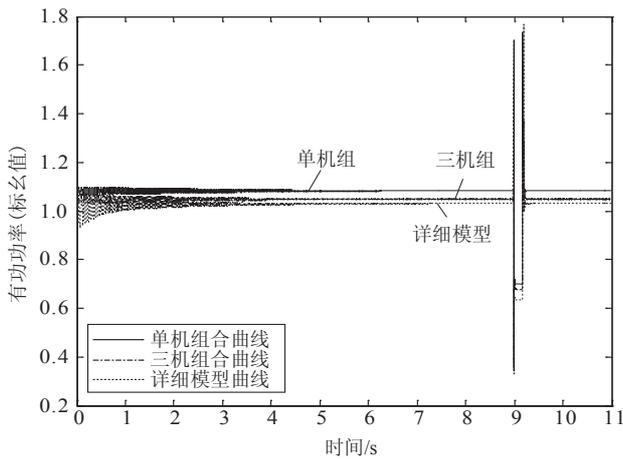


图 8 聚合前后有功功率对比

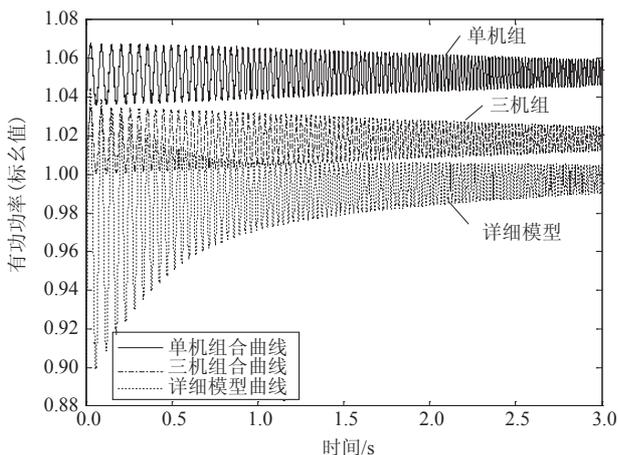


图 9 聚合前后有功功率(启动过程)对比

聚合和单一机组聚合的电压波形在任何状况下均呈现高度重合状态。若模型仅用于分析暂稳态电压，二者与详细模型的差别并无明显差别。仿真结果中

有功功率则呈现了轻微的误差，平稳状态下一个机组模型误差在 4.5% 左右，三机组模型误差约为 1.6%。误差较大的地方出现在启动过程中，电压降的忽略和机组、箱变的强行并联化也会引入误差。

本文仿真使用的运行平台为 Matlab 2010a。一台机组仿真持续时间为 36.04s，三机组仿真持续时间为 78.85s，16 机组详细模型仿真时间约为 1071s。由此可见，三机组等值模型是简化模型的首选，因为其仿真持续时间较短且可以达到一定的精度，这点在在有功功率的分析中体现尤为明显。

虽然该仿真的误差要大于一些技术手段较高的途径<sup>[8,10,11,15]</sup>，启动过程的仿真也并不完善，但输入数据容易获得，矩阵  $S$  可以实时测得，而特定风电场的线路长度矩阵  $L$  是固定的，使得仿真对数据的预处理时间和仿真持续时间得以大幅减少，无需引入额外的技术或设备支持。通过模型的合理完善，该误差可以进一步减小。文中的等值模型支持任意一种分群方式的聚合，在追求高速率、高灵活度、计算简单和一般精度的仿真要求下，可以对风电场的状态模型进行简单迅速仿真。

### 5 结 论

本文提出了一种利用损耗分配原理计算等值电阻的方法，以此发展出原理和计算都简单易行的风电场机组聚合的等值建模方法。在风电机组分布及出力情况、线路长度及相关参数已知的情况下，可将风电机组的辐射型网络，等值为少量机组与通过损耗分配原理计算出来的等值阻抗串联，最终全部以并联状态汇聚于集电网络的等值模型。

仿真验证以风电场出口处传输线电压及有功功率尽可能与详细模型尽可能吻合为原则。结果表明,三机组聚合和一个机组聚合的情况下,不存在超过1%的电压误差,但存在除开启状态之外的时间内有功功率的微小误差。但两者都大幅提高了动态仿真速率,只需要详细模型仿真时间的1/14和1/30,在已经进入运行状态的风电场仿真分析中,可以依靠实时读取的机组出力,经过固定的线路阻抗矩阵进行计算,根据聚合要求迅速获得等值机组及阻抗数值,具有仿真效率高的特点。

### 参 考 文 献

- [1] 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): 116-119.
- [2] 孙元章, 吴俊, 李国杰. 风力发电对电力系统的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31(2): 55-62.
- [3] 田春笋, 李琼林, 宋晓凯. 风电场建模及其接入电网稳定性的影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-51.
- [4] 范高峰, 赵海翔, 戴慧珠. 大规模风电对电力系统的影响和应对策略 [J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(1): 44-47.
- [5] 王建东, 李国杰. 海上风电场内部电气系统布局经济性对比 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 99-103.
- [6] 王民浩, 易跃春, 陈观福, 等. 中国风电场工程建设标准与成果汇编 [M]. 2009年版. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [7] 陈雷, 邢作霞, 潘建, 等. 大型风力发电机组技术发展趋势 [J]. 可再生能源, 2003, 1(4): 27-30.
- [8] Ali M, Ilie I S, Milanovic J V, et al. Wind Farm Model Aggregation Using Probabilistic Clustering [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2013, 28(1): 309-316.
- [9] 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, 05: 162-169.
- [10] 金宇清, 黄桦, 鞠平, 等. 用于风电场聚合建模的内部集电网络变换方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 16(40): 34-41.
- [11] 何桂雄, 晁勤, 田易之, 等. 风电场恒速发电机动态等值参数聚合的研究 [J]. 可再生能源, 2009, 27(1): 14-18, 22.
- [12] GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定 [S]. 2011.
- [13] US FERC Order No. 661 Interconnection for wind energy [S]. 2005.
- [14] 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.
- [15] 徐玉琴, 王娜. 基于聚类分析的双馈机组风电场动态等值模型的研究 [J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 1-5.
- [16] Muller S, Deicke M, Doncker R W D. Doubly Fed Induction Generator System for Wind Turbines [J]. IEEE Induction Applications Magazine, 2002, 8(3): 26-33.

收稿日期: 2013-09-19

作者简介:

李卓男(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、新能源发电与智能电网, E-mail: 277360727@qq.com;

艾欣(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析运行与控制、微网及智能电网, E-mail: aixin@ncepu.edu.cn;

方杰(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制、新能源发电与智能电网, E-mail: 89332886@qq.com;

潘伟(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制、新能源发电与智能电网, E-mail: panwei803@163.com.

(责任编辑: 杨秋霞)