

# 基于风电仿真模型等值的相关讨论

常喜强<sup>1</sup> 赵明君<sup>1</sup> 梁静<sup>2</sup> 周专<sup>3</sup>

- (1. 国网新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830006;
2. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830016;
3. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830016)

**摘要:** 随着新疆大规模风电的集中投产, 电网中风电装机容量比例不断增加, 风电运行对电网的影响也越来越大。其动态特性特别是故障时的特性不但影响电网的输电能力, 也影响了自身的送出能力。为使电网仿真更加符合实际, 需进一步提高风电仿真精度。对风电场模型的优化细化, 对风力发电系统特性进行精确的模拟, 是研究含风电系统的电网动态特性和制定相关控制策略的必要前提, 因此风电场的等值建模对于研究含风电电力系统的相关问题十分必要。就目前工程仿真常见的风电场仿真模型进行了论述, 结合电网运行实际情况就存在的不足进行了讨论, 提出了建议和应对改进措施, 为今后开展相关工作提供借鉴, 为光伏电站等值建模提供参考, 对含风电场电网的安全稳定分析以及控制策略的研究具有重要的参考意义。

**关键词:** 风电场建模; 风电机组; 等值; 涉网特性

**Abstract:** With the large-scale wind power being put into centralized operation in Xinjiang, the proportion of wind power installed capacity in the grid increases continuously, and the impact of wind power operation on the grid is also growing. Its dynamic characteristics, especially the characteristics during the fault affect not only the transmission capability of power grid, but also its own transmission capability. In order to make the grid simulation more realistic, the accuracy of wind power simulation should be improved. The optimization and refinement of wind farm model and the accurate simulation for the characteristics of wind power generation system, are a necessary prerequisite to study the dynamic characteristics of power grid with wind power system and the development of relevant control strategies, so the equivalent model of wind farm is necessary for studying the issues related to wind power system. The common simulation models of wind farm in current engineering simulation are discussed. Combined with the actual situation of the grid, the existing shortcomings are also discussed, the suggestions and improvement measures are proposed, which provides a reference for the future work of the equivalent modeling of photovoltaic power plants and for the security and stability analysis of power grid with wind farms as well as the research of control strategies.

**Key words:** wind farm modeling; wind turbine; equivalent; characteristics related to power grid

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)04-0031-05

随着风电场快速建设, 风电发电容量日益增加<sup>[1-2]</sup>。电网中风电装机容量的比例不断增加。风电机组运行特性有别于常规机组, 其出力的随机性、波动性、间歇性随着装机容量的不断增大对电网的影响明显, 其动态特性特别是故障时的特性不但影响电网的输电能力, 也影响了自身的送出能力。因此风电场等值建模及模型的准确性对于研究含大容量风电场的电力系统安全稳定性以及控制措施十分重要。模型准确、特性贴近实际是研究含风电系统的电网动态特性和制定相关控制策略的必要前提, 为使电网仿真更加符合实际, 需进一步提高风电仿

真精度。对风电场模型的优化细化, 对风力发电系统特性进行精确的模拟, 下面就目前工程仿真常见的风电场仿真模型进行了论述, 结合电网运行实际情况就存在的不足进行了讨论, 提出了建议和应对改进措施, 为今后开展相关工作提供借鉴。

## 1 风电及风电场建模概况

风电场仿真建模包括风电机组的建模和风电场的建模, 目前均有大量的研究。风电场建模可以分为详细建模和等值建模。详细建模是通过建立风电

场内每台机组的模型并联接架空线或电缆等集电系统模型而搭建起来的。风电场内有数十甚至上百台风电机组,若对每一台风电机组进行详细建模,会极大地增加电力系统模型的复杂度,导致仿真时间过长,影响计算的收敛性。随着风电场中风电机组的台数和风电场容量的不断增大,这一建模手段由于过于繁杂的建模过程和过长的仿真时间而不再实用。为了减少计算量,节省仿真时间,按照不同的计算研究内容和目的及仿真程序的要求,对风电场进行简化、等值采用等值建模手段。采取不同的仿真模型,以等值机与单台风电机组的功率转换特性不变为原则;以被等值的风电机组同群风电机组运行点一致原则。

具体的等值建模方法有以下 4 种:①将整个风电场等值为单台风电机组,其容量等于所有风电机组容量之和<sup>[5]</sup>。②只考虑风电机组的功率-风速曲线,计算等效风速作为风电场的输入<sup>[6-7]</sup>,从而得到风电场的输出功率。③利用现代的动态等值方法如同调等值法、模式等值法<sup>[8]</sup>,对风电场受到干扰后具有相同或接近动态特性的机组分组,同组的风电机组等效成一台风电机组,从而得到用多台机表征的风电场等值模型。④利用风速对风电机组进行分组,同组风电机组进行参数等值,用多台机表征风电场<sup>[9-10]</sup>。

由于大型风电场占地面积广、风电机组数量多,场内风速分布并不均匀,各风电机组处于不同的运行点,因此方法①和方法②采用的单机等值法会带来较大误差;方法③的分组依据是风电场遭受较大干扰或故障时风电机组的动态特性,适用于暂态过程分析,而在风电场稳态运行过程中,对风电场输出特性起主导作用的因素则是风速和风向;方法④建立的等值模型精度较高,但大型风电场内风速变化差异大,有可

能导致分组过多,仿真时间变长,且机组间风速变化往往具有连续性,导致分组指标不明显。

## 2 风电场建模存在的问题

根据上述仿真建模的情况,结合电网运行,上述风电场建模中出现以下误差,一是风电机组建模过于考虑机组自身特性,未与系统分析结合,存在机组参数控制与系统参数不匹配的情况,二是对于风电场的等值存在误差不可控问题。具体分析如下。

### 2.1 风机机组自身参数与系统参数不协调匹配

#### 2.1.1 风机自身参数

目前,仿真计算中采用的风机模型及参数多借鉴与 Matlab、Degslent、Pscad 程序模型,借鉴开发移植综合稳定程序 PSASP 及 BPA,在移植过程中详细模拟风机自身的特性,对于系统只考虑公共并网点 PCC 点接口,在与传统电力系统分析的接口上存在着参数不匹配情况,导致正常计算时无故障情况下的系统曲线不平衡,影响计算精度。风机因等值参数变化而无法查找出,影响计算精度和计算结果的可信程度。

#### 2.1.2 风机涉网动态特性

目前仿真计算中发现风机涉网动态特性与实际运行不完全相符,表现在故障时风机特性、故障切除后风机恢复特性方面。根据《酒泉风电低电压穿越能力验证试验》相关结论,如图 1 所示,在风机切除过程中和恢复过程中,风机的脱网速度及恢复速度对系统稳定性的影响很大,影响了风电接纳能力。

#### 2.1.3 风机涉网保护特性

风电机组的涉网保护定值与其接入系统运行特性存在着不协调配合,主要表现在高低电压穿越定值与过流保护定值以及变频器的保护定值等方面。

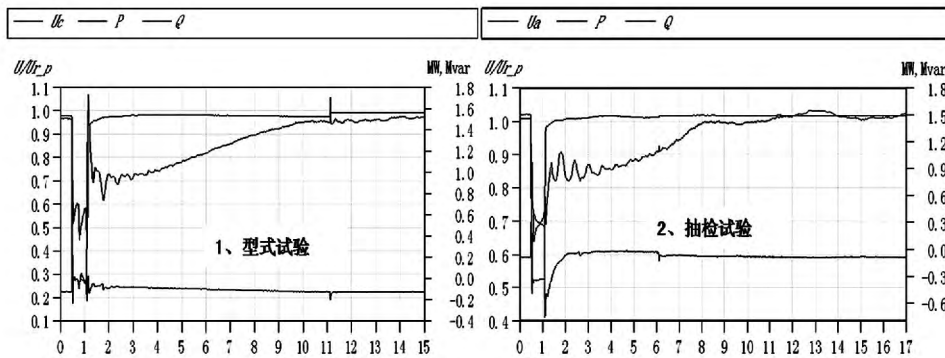


图 1 故障情况下风电机组出力特性曲线

在对风机进行暂态仿真计算时,不能很好的模拟故障情况下的风机保护的動作特性,而风机厂家考虑对机组自身的保护,因此在风机涉网保护定值方面的仿真模拟不能真实反映,不能正确的反应实际电网中风电机组运行特性。

### 2.2 风电场等值存在精度不足问题

#### 2.2.1 工程等值的问题

风电场中风电机组通过箱式变压器和电缆或架空线接入汇流母线上。在对风电场进行等值时,未详细考虑计及风电场中常规设备的电气参数影响,如箱式变压器、电缆、架空线路等参数。未考虑风机分布的连接线、架空线和电缆线及混合联系部分,同时风电场等值模型中的阻抗参数通过电阻的串并联计算得出,但是由于风电场中风电机组的排布位置不统一,导致在对风电场进行等值计算时各种参数是有区别于实际电网中运行的参数,进而影响含风电场电网的仿真计算精度。

#### 2.2.2 不同机型之间的等值问题

规模化风电场的开发通常由不同的开发商建设,不同开发商在各风区建设以不同风机为单位的的风电场,同时各风电场通过同一汇集站送出,因此造成一个汇集站下包含有多种型号的风电机组,如图2所示。在对风电场进行等值时一般只用一种机型或两种机型等值接入汇集站,忽略了汇集站下可能含有多种不同机型,不同机型之间可能互相影响。使得工程计算等值的方法造成风电场群的仿真特性区别于实际风电场群的运行特性。

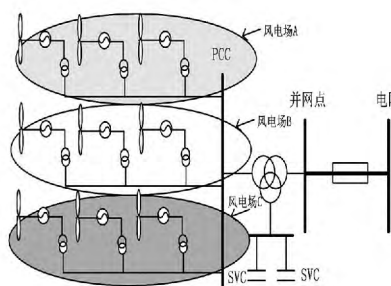


图2 汇集站下各风电场接线示意图

#### 2.2.3 风向、风速、风的出力的等值简化

由于风电场规模一般较大,各台机组风速、风向不同,且受风电场内各风电机组的排布影响,各风电机组的风能利用系数也不同。很多等值模型为了简化等值过程,多是假设风电场所有风电机组风速相同来进行等值处理的。假设风电场的平均风速作为等值机组的输入风速,但风电机组的功率输出与其

输入风速并非线性关系,所以该等值方法出力存在一定的误差,风机在不同出力时的响应特性也不相同,因此存在一定的误差。

## 3 规模化后等值误差增大问题

### 3.1 短路电流贡献率问题

在对含风电场的电网进行短路计算时,当风电装机规模小时,风电场对电网提供的短路电流很小。但是随着风电场装机规模的不断增大,风电场对电网提供的短路电流也随着增加,在对电网进行仿真计算时,不能忽略风电场对电网短路电流的影响。在对规模化风电场进行等值时需要详细考虑风电场内架空线路、电缆、箱变参数以及接线方式。若还沿用常规风电场的等值方法,将增大对含规模化风电场的电网仿真计算精度。表1为在不同风电汇集站处发生短路时短路电流。

表1 在不同风电汇集站处发生短路时短路电流

变电站	电流		
	正常电流/kA	故障电流/kA	增长倍数
A	0.106	0.323	3.047
B	0.101	0.396	3.920
C	0.279	0.299	1.071
D	0.213	0.266	1.250
E	0.122	7.357	60.300

### 3.2 规模化后出力等值问题

风电场规模化建设,风电场容量由常规的49.5 MW变成了200 MW,风电场总风机的台数由原来的33台变成80台,风电场的占地面积增大。由于风电机组的出力受风速的影响,风电机组的功率输出与其输入风速并非线性关系。风电场内每台风机的风速、风向、风能利用系数将不同。风机在不同出力时的响应特性也不相同,因此存在一定的误差。

因此在对规模化风电场进行等值时,需要进一步完善风机的详细等值模型,不能简单像小容量风机等值那样。同时由于规模化风电场存在不同型号的机组,不同风电机组的功率曲线不同。因此在保证规模化风电场出力与实际运行相近前提下,需要细化风电场风机等值数量。

### 3.3 动态特性问题

规模化风电场后,风电场的装机容量增大,在风电大发时其相当于一台常规机组。由于风电机组的

输出功率受风速的影响,其出力具有随机性、间歇性,因此风电场的送出线路上潮流变化大,进而导致规模化风电场对电网的动态特性不能被忽略。在对规模化风电场进行等值计算时,不同风机不同特性的误差随着规模化后误差将进一步增大,需考虑各种模型下的风电等值动态特性误差,尽量保持等值风电场的动态响应特性与实际运行中动态响应特性相似,但存在对比困难。

### 4 无功补偿 SVC、SVG 仿真问题

风电场中都装有动态无功补偿装置(SVC、SVG),而动态无功补偿装置对风电场并网点稳定性起到很大的作用。实际风电场中 SVC 或 SVG 接在 PCC 点或升压站的低压侧母线上,无功补偿接线示意图如图 3 所示。

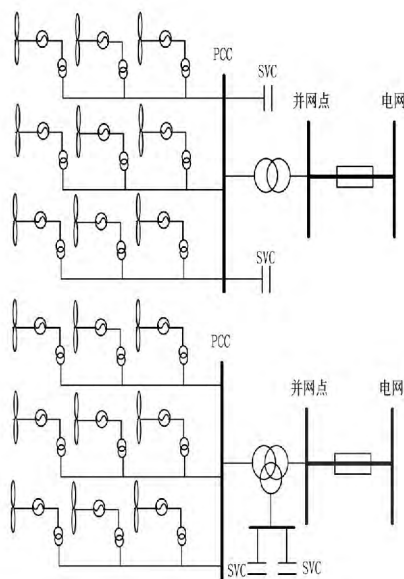


图 3 风电场中无功补偿接线示意图

在对风电场进行等值建模时,动态无功补偿装置的等值以及接入点对含风电场的电网有很大的影响。在对无功补偿装置等值建模时,将动态无功补偿装置等值成一个无功负荷,接入点为无功补偿装置实际并网。这种建模方法对于真实模拟动态无功补偿作用存在一定的误差,特别是风电场汇集站下的单个风电场等值时,误差将进一步增大,影响了仿真的精度。

### 5 新疆电网内仿真分析中出现的问题

目前新疆电网对风电场进行等值建模时,细化国内其他地区风电场等值建模。是将风电场等值由

1 台机组改为 3 台机组,考虑了不同机组类型,同时考虑风机箱变,等值到发电机出口 690 V,但忽略风电场内的线路连接方式,也考虑了风电场的 SVC、SVG 模型,风电场升压汇集站下的风电场也进行了较为详细的建模。这种建模方法一定程度上细化了仿真分析,提高了计算精度和结果可信度。但在实际运行过程中,仿真结果仍存在一定的偏差,影响电网中风电的接纳能力计算。在对塔城、阿勒泰、博州、哈密地区风电送电能力仿真分析时,发现了风电场风机模型及等值对风电接纳能力有一定的影响。风电故障时的脱网速度、故障消失后的恢复速度与电网调整速度对仿真计算结果影响较大。存在着风机故障反应速度与常规电源发电机组的调节速度存在着相互影响、相互制约作用,影响仿真计算结果,仿真分析中的风机动态特性偏严重。图 4 为哈密主变压器以及哈密南主变压器功率分别约 722 MW、547 MW 时哈密主变压器发生三永故障曲线。

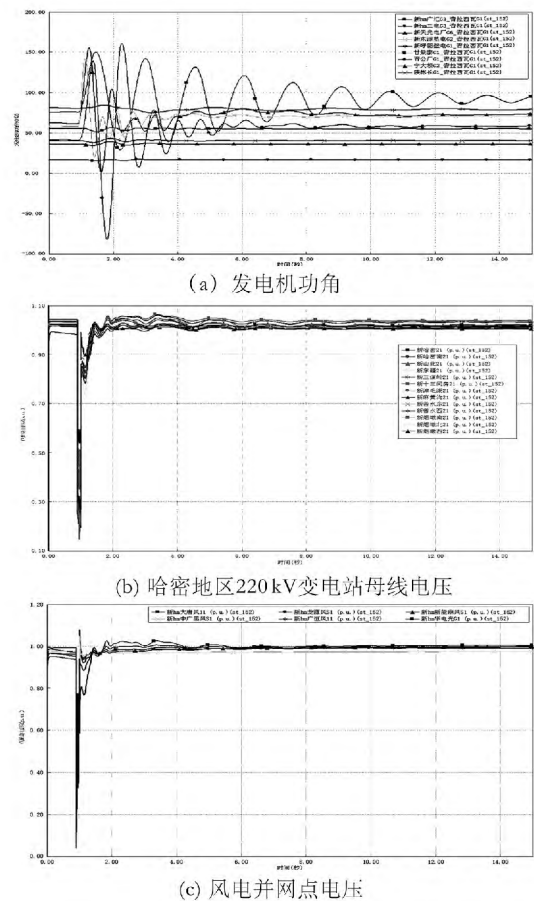


图 4 哈密主变压器高压侧三永故障

在对酒泉地区风电低电压穿越能力验证试验中也发现了类似的情况,风电场内的风机响应速度,响应特性也与仿真有一定的差异,通过修正模型后,使

仿真分析结果与实际试验结果相似。

## 6 相关建议

目前,随着风电的大力开发,新疆电网风电开发的小集中、大分散模式也逐步演变为大集中模式,特别是哈密地区。风电规模化发展,大规模风电运行对电网的影响也越来越大,风电运行的间歇性、波动性给电网运行控制带来了很大的难度,需要进一步深入研究规模化风电接入系统后的运行特性及表现出的动态特征,以便于对风电运行的掌控,因此需要开展大量深入的仿真分析,通过对现有的风电机组等值、风电场等值模型的讨论,建议对风机及风电模型的开发进行如下改进。

(1) 随着计算机数据处理计算速度的提升,计算机仿真对电力系统限制的问题已经得到了很大解决,因此考虑风电场模型尽量采用包含电缆架空线路、箱变等较为详细的模型,对于风机模型也尽量采用包含控制模型在内的较为详细的模型,以提高仿真计算精度,最大程度的捕捉到风机及风电场在故障情况下的动态特征,但需要考虑数值计算的误差。

(2) 目前风电场开发以分布式开发、49.5 MW 一个单元开发、200 MW 一个单元开发为主要形式,故针对上述情况,开发单机、49.5 MW 集合式、200 MW 集合式的标准化模块风电场模型,以标准化模块为单元,详细建模风电场内计及风机模型、风机间连接电缆、架空线路、风机箱变、多台机组连接关系。同时提高系统仿真计算人员的建模效率及建模准确度,开放选择其中的重要参数。

(3) 借鉴水电、火电典型参数库、输变电设备典型参数库的做法,建立风电场典型风机典型参数库、风机控制典型数据库、风电场风机典型运行数据库、风电场运行控制典型数据库、风机扰动典型数据库、分地区风速扰动数据库,以集合国内外风电运行的丰富资源,提高仿真计算分析效率及精度。

(4) 细化风电分析,建立风电分析计算规定,对计算深度和计算广度进行规定,在短路电流计算、动态稳定小干扰计算、暂态稳定计算、电压稳定计算、频率稳定计算、风速及风机干扰计算等方面统一规范标准,以减少风电仿真计算的标准和项目的不统一性,提高仿真精度及仿真计算效果,不断丰富风电仿真技术。

(5) 建立风电仿真分析与实际运行对比验证机

制,对风电场内风机故障时的行为特性进行反演,通过继电保护故障录波器录波数据、向量测量装置 PMU 录波数据与仿真分析的数据进行对比拟合,发现问题提高仿真精度。

(6) 将机电暂态与电磁暂态混合仿真技术广泛应用于风电仿真计算,形成成熟的算法并应用于实际工程中,通过电磁暂态细化风机特性反演,通过机电暂态模拟风机电磁暂态对系统的影响。

(7) 风电的快速发展,小容量的风电对系统的影响已经演变为大容量规模化风电群对电网的影响,其动态特性已不容忽视。通过上述各方面的开发及应用,提高风电仿真特性的准确性,以模拟仿真提高风电掌控能力,同时可以将风电仿真的成功经验应用于光伏电站的仿真分析中,以提高对光伏发电的认识,提高含风电、光伏的新能源的仿真分析计算水平,以应对规模化新能源发展带来的新问题。

### 参考文献

- [1] 李俊峰,施鹏飞,高虎. 中国风电发展报告(2010版)[M]. 海口:海南出版社,2010:6-7.
- [2] 雷亚洲, Gordon L. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 25(12): 27-32.
- [3] Gerardo G, Tapia A, Ostolaza J X. Two Alternative Modeling Approaches for the Evaluation of Wind Farm active and Reactive Power Performances[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(4): 909-1000.
- [4] 严干贵,李鸿博,穆钢,等. 基于等效风速的风电场等值建模[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(3): 13-19.
- [5] Fernandez L M, Garcia C A, saenz J R. Equivalent models of Wind Farms by Using Aggregated Wind turbines and Equivalent wind[J]. Energy Conversion and Management, 2009(50): 691-704.
- [6] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [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.
- [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.

作者简介:

- 常喜强(1976), 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制;  
赵明君(1964), 硕士, 研究方向为电网调度运行与控制;  
周专(1987), 硕士, 研究方向为电力系统规划、稳定与控制。

(收稿日期: 2014-05-04)