

文章编号: 1005-2992(2012)06-0001-09

联网运行风力发电系统的动态建模方法综述

崔 杨¹, 严干贵¹, 李鸿博²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 吉林省电力有限公司培训中心, 长春 130025)

摘 要: 风力发电机组建模是研究风电联网运行对电力系统影响诸多问题的基础。针对电力系统稳定问题研究中元件建模的特点, 对风电机组动态建模的特点进行了分析, 分析了目前一些常见建模方法的特点, 对笼型异步、双馈感应及永磁同步等主流风电机组机型的建模研究方法进行了综述, 最后探讨了风电机组建模的主要研究方向。

关 键 词: 风力发电; 动态建模; 多时间尺度; 仿真

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

开发利用可再生能源对改善能源结构、实现可持续发展具有重要的战略意义, 也为解决我国能源与环境问题开辟了新的途径。风能是目前最具大规模开发利用潜力的可再生能源, 风电联网运行是其大规模开发利用最有效的途径。

我国风力发电产业发展迅速, 正朝单机容量大型化和风电场规模大型化的趋势发展。我国正在规划建设8个装机容量近千万千瓦的大型风电基地, 分布在甘肃酒泉地区、新疆哈密地区、内蒙古中西部、吉林西部、河北、江苏和山东沿海等地。据国家能源局统计, 截至2010年底, 我国风电装机容量已超过3107万千瓦, 居全球第二, 占全国总发电装机容量的比重超过3.25%, 个别区域电网的风电装机比重已超过20%。此外, 我国风电机组已由单机千瓦级向兆瓦级过渡, 1.5~2 MW的风机已成为主流, 而海上风电则要求更大容量的风机设备。图1、2分别为风电机组单机容量及中国风电装机容量的变化趋势^[1]。

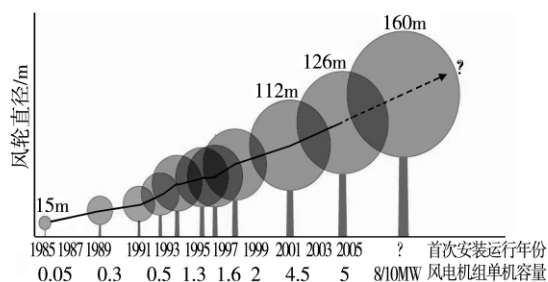


图1 风电机组单机容量变化趋势

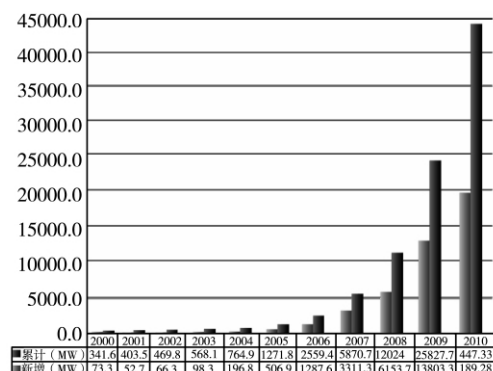


图2 2000-2010年中国风电装机容量增长趋势

电力系统是一个复杂的能量动态系统, 其稳定运行需要满足任一时刻有功、无功的供需平衡、功角稳定、电压稳定等多种约束条件。众所周知, 风能具有随机性、不确定性, 导致了风电功率具有波动性, 不易控制、难以准确预测。随着并网风电规模的增大, 作为一种新型发电系统的风力发电机组、风电场,

收稿日期: 2012-09-14

基金项目: 东北电力大学博士科研启动基金(BSJXM-201101)

作者简介: 崔 杨(1980-), 男, 内蒙古包头市人, 东北电力大学电气工程学院讲师, 博士, 主要研究方向: 风力发电联网运行控制、电力系统继电保护等。

其动态特性对电力系统运行会带来怎样的影响,一直是学术界和工程界研究的热点。

模型是对实际系统的有限映像,在一定的边界条件下能够反映实际系统的某些方面或某些特性^[2]。基于模型的系统仿真法一直是分析电力系统各类问题的首选方法,同样也可以作为分析风电系统相关问题的方法。

本文首先讨论了电力系统稳定问题研究中建模的特点,并对联网运行风电系统建模的特点进行了分析,然后针对主流风电机组及风电场模型的国内外研究现状进行了综述,最后探讨了风电机组建模研究的主要方向。

1 风电机组模型对电力系统稳定分析的影响

1.1 电力系统稳定分析的建模特点

电力系统稳定问题按其物理特征不同,可分为静态稳定与动态稳定。静态稳定问题可分为功角稳定和静态电压稳定两大类;动态稳定问题可分为暂态稳定、小干扰稳定和动态电压稳定三类。由于各类问题的物理本质不同、影响因素不同,相应的元件模型、分析方法都有较大的不同^[3-5]。

电力系统静态稳定包括:当系统受到小扰动后由同步力矩不足引起的静态功角稳定(又称小干扰功角稳定),及小扰动后不发生电压崩溃的静态电压稳定(又称小干扰电压稳定)。静态稳定主要用以定义系统正常运行和事故后运行方式下静稳定储备情况。主要研究方法基于以代数方程描述的元件及网络数学模型,在潮流计算的分析结果中求得静稳极限。

电力系统动态稳定包含的三类问题中,暂态稳定(亦称大干扰动态稳定)指系统受到大扰动后同步阻尼力矩不足时,在系统动态元件和控制装置的作用下保持稳定的能力;用于研究时间范围在扰动后第一摆至 10 秒内的非周期失稳和振荡失稳过程。小干扰稳定(亦称小干扰动态稳定)指系统受到小扰动后由于阻尼力矩不足引起的功角稳定问题,用于研究扰动之后 10-20 秒时间范围内的转子增幅振荡失稳过程。动态电压稳定(亦称大干扰电压稳定)指系统受到大扰动后不发生电压崩溃的能力,主要分析在考虑负荷动态特性和控制装置作用下的系统电压稳定性,根据研究需要其时间范围可以从几秒到几十分钟。

以上分析可见,在分析电力系统各类稳定问题时,应根据所研究稳定问题的物理本质以及影响该稳定过程的主要因素,合理地建立元件的数学模型并考虑适当的时间尺度。例如,对于静态稳定、小干扰稳定的分析中,可采用简化的代数方程或线性化微分方程的方法;而在暂态稳定或动态电压稳定的计算分析中,则必须考虑详细的动态元件、控制系统等的数学模型,如调速器、励磁系统、电力电子装置等。

1.2 联网风电机组模型的多时间尺度特性

研究风电机组特性及其并网特性需要基于建立风电机组的模型,但由于风电机组类型以及风电并网相关问题的多样化,在分析不同的研究目的时需要考虑不同的边界条件,根据所研究问题的性质和对计算精度的要求,对风力发电系统各组成部分的动态特性可以采用不同的数学模型。

风力发电机组是个复杂的小型能量动态系统,其主要部件风力机、轴系、发电机及其相应控制系统,依次完成风能-机械能-磁场能-电能的转化过程,并使整个风电系统保持稳定运行。在描述风电机组详细动态特性时,应分别建立其各个部件的数学模型。

从能量转化过程的角度来看,风力机完成风能捕获后将能量以机械能的形式经由轴系传给发电机,考虑到风力机整体惯性较大,此动态过程的时间范围应该由风力机、轴系的转动方程以及风力机控制系统的时间常数决定,其典型时间尺度是秒级。发电机完成机械能-磁场能-电能的转化过程,其中机械能-电能过程的时间范围由转子运动方程和转子电气参数决定,典型时间尺度是秒级;磁场能-电能转化过程的时间范围则由定子的电气参数决定,典型时间尺度是毫秒级;考虑到发电控制系统作用的实现可能涉及到电力电子装置的动态过程,该过程的时间范围由其电气参数以及最大开关频率决定,典型时间尺度是微秒级。

由此可见,风力发电机组系统能量转化的动态过程受机组部件物理参数的影响不同,在时间尺度上

可划分为几个独立的子过程。若需研究不同子动态过程中风电机组的物理特性,建模时只要考虑影响该过程的主导因素即可,而忽略掉次要的因素,此即风电机组多时间尺度动态建模的思想。该思想表明同一机组的不同模型,只是动态过程中不同时间尺度子过程的不同描述而已,从而为模型之间建立了本质上的联系。

2 风力机及轴系模型

详细的风力机-轴系模型应包括空气动力学模型、风轮-塔架-机舱结构动力学模型以及轴系模型。风力机的能量传递过程可简述为:风作用在风轮上产生气动扭矩带动轴系系统,轴系系统再将扭矩传递至发电机;在此过程中发电机会产生反作用的扭矩,通过轴系系统又作用在风轮上,最终风轮转速达到某平衡值,完成风能-机械能的转换。

目前大型风电机组的风力机都具备可变桨距、可调转速的控制系统,由于气动、机械等方面的复杂机理,得到风力机的精确模型非常困难。因此,建立能满足研究需要的、简化的风力机模型,是目前风力机建模研究的主要方法。此外针对风力机风能捕获控制策略的研究大都还处于实验室阶段。

文献[6]基于片条理论建立了水平轴风力机气动性能计算模型,该模型考虑了风剪切、偏航、风轮的结构参数和风力机安装参数对计算模型的影响,并考虑叶尖损失、轮毂损失、叶栅理论及失速状态下动量理论的失效对片条理论进行了修正;文献[7]应用等效集中质量法,建立了同时考虑风力机叶片弯曲柔性以及风力机和发电机之间传动轴扭转柔性的风力机3个质量块等效模型,该模型可用于暂态稳定的分析;文献[8]研究了普通异步风力发电机组故障时两质块轴系模型松弛特性对暂态电压的影响;文献[9]在分析了风力机运行特性及最佳风能利用原理的基础上,在实验室实现了对风力机的直流电机模拟;文献[10]采用通用动态尾流理论进行风力机气动力学的计算分析,考虑了风力机的结构变形对气动性能、传动性能产生的影响。并用 MATLAB/Simulink 进行了风力机系统振动性能耦合仿真分析;文献[11]用风力机 AV 尾流数学模型计算了风力机尾流区速度分布和处于尾流区的风力机性能所受到的影响,该模型在一定程度上可以模拟风力机尾流区的速度分布;文献[12]提出了一种简化定桨距风力机的 MATLAB 模型,该模型可用于风电场的建设与规划仿真;文献[13]开发了一种新的风力机最大功率追踪控制方法,该方法利用电磁转矩对风力机转速实行完全控制,能够追踪步长根据风速的变化而变化,对快速变动的风速有较高的风能捕获效率;文献[14]利用辨识实验测试系统的输入输出数据,采用预报误差法得到水平轴风力机系统的多输入多输出随机模型,对所得到的随机模型进行了分析与检验,讨论了辨识模型与机理模型在风力机控制系统设计方面的优缺点;文献[15]应用人工神经网络的多层感知器模型结构,采用自适应学习速率的 BP 学习算法,对风力机系统的功能模型进行辨识,仿真结果与实验数据对比结果表明该方法具有较高的精度;文献[16]采用直流电机的输出特性模拟风力机的最大输出功率曲线,提供了一种在实验室条件下模拟风力机运行特性的实用方法,并给出了模拟系统的硬件结构。

3 发电机模型

目前主流风力发电机组有多种类型,按照风力机运行状态可分为定速型、变速型两种,根据风力机功率调节策略的不同,又分为定桨距控制、变桨距控制和主动失速控制三种;发电机类型有普通笼型异步发电机、双馈感应式发电机以及永磁同步发电机等,分别涉及恒速恒频、变速恒频和变速变频等不同的发电控制技术。

国外如丹麦奥尔堡大学、丹麦技术大学;英国曼彻斯特大学;瑞典查尔姆斯技术大学;德国杜伊斯堡大学等都对风电机组的模型进行过深入的研究^[17,18]。并且,国外已在多个商业化的电力系统分析软件中开发出了不同类型的风电机组模型,如加拿大 Manitoba 高压直流研究中心开发的 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真程序,西门子 PTI 公司开发的电力系统仿真程序 PSS/E,德国 DlgSILENT/Power Factory 电力

系统分析软件,以及美国通用公司开发的 PSLE 电力系统分析程序等等^[19-21]。

目前国内部分科研机构及高校对风电机组建模问题以及在电力系统分析软件中的实现也进行了大量研究。如清华大学、中国电力科学研究院、沈阳工业大学、河海大学、东北电力大学、华北电力大学等等,都对风电机组的建模及控制策略开展了深入的研究^[22-24]。同时国内多家发电公司或电网电力公司开展了多项研究,如龙源风电公司、大唐发电集团、吉林省电力公司、江苏省电力公司、甘肃省电力公司以及黑龙江省电力公司等等,在风电并网的相关问题研究领域取得了一些卓有成效的成果^[25-26]。但以上研究所用到的风电机组模型一般都是在科研性软件中实现的,且大都未经过模型试验验证;同时,国内成熟的商业化电力系统分析软件中还未能完成风电模型的商业化集成。

3.1 基于笼型异步发电机的恒速恒频风电机组建模

基于普通笼型异步发电机的恒速恒频风电机组,根据其风力机功率调节策略的不同,又分为定桨距控制、变桨距控制和主动失速控制三种。恒速恒频风电机组具有结构简单、运行方便等特点,但由于没有发电控制系统,该类型风电机组的风能利用效率较低,对系统无功需求较大,极大地影响电网的电压水平。目前基于笼型异步发电机的风电机组建模主要以研究该风电系统的软并网控制以及并网后对系统稳定性分析为主。

文献[27]建立了异步风力发电系统动态稳定数学模型,以及在一定程度上反映风电场实际风速变化的风速时空模型,该模型可以分析异步风力发电机组接入系统的动态稳定性,还可以计算风电场接入的穿透功率极限;文献[28-30]建立了以暂态电势为变量的风力发电机组的数学模型,并运用 MATLAB/SIMULINK 对数学模型进行了仿真;文献[31]建立了包括风速、风轮机、异步电机在内的变桨距恒速恒频风电系统数学模型,并分析了该风力发电系统在风速扰动或输电线路发生三相金属性接地短路故障时的动态过程;文献[32]提出了一种将系统频率偏差信号引入桨距角控制系统的改进桨距角控制方案,并在电力系统分析软件 DigSILENT/Power Factory 中建立基于普通异步发电机的风电机组和电力系统模型,对基于异步风电机组的电力系统小干扰稳定性及阻尼特性的分析结果都表明,改进的桨距角控制环节能够改善系统阻尼,且对系统功率振荡具有很好的阻尼和抑制作用;文献[33]建立了软并网最优控制数学模型,将自适应评价控制应用于软并网控制系统的设计,仿真结果表明这种软并网控制系统能够将软并网冲击电流限定在电机额定电流以内,满足软并网控制系统的性能要求;文献[34]提出了笼型异步发电机和静态无功发生器 SVG 构成独立运行的风力发电系统,通过实验装置验证,由 SVG 代替电容器提供发电机励磁能够避免依靠并联电容器提供无功功率的缺点;文献[35]提出了一种异步风力发电系统研究和实验平台的设计方案,该方案采用带有前馈解耦的间接磁场定向矢量控制来模拟风力机转矩特性。

3.2 基于双馈感应式发电机的变速恒频风电机组建模

采用变速恒频技术的双馈感应式风电机组是目前大型风电场的主流机型,由于采用了变桨距风力机控制,以及基于四象限变流器实现的变速恒频发电控制,使得该类型机组具有运行风速宽,风能利用率高,发电控制灵活等优点,因而成为目前各大型风电场广泛采用的一种机型。但由于需要采用变速齿轮箱才能达到较高的运行速度,因齿轮箱带来的风能转换、故障维护等方面一些突出的问题也不容忽视。

针对双馈感应风电机组建模的研究较多,主要包括不同精度的数学模型建立及不同控制策略的研究,还包括基于不同仿真平台和物理实验平台的双馈风电系统的研究。

在双馈感应风电机组数学模型研究方面,文献[36]在定子旋转磁场坐标下建立了由转子励磁电压双轴分量及发电机输入的机械转矩为控制变量的双馈发电机简化 3 阶动态模型, MATLAB 仿真详细比较了 DFIG 精确模型和简化模型在发电机运行状态发生改变后的各个物理量的响应特性,该模型能够用于风力发电中变速恒频风电机组建模及并网运行的研究;文献[37]给出了双馈机组的 8 阶、5 阶和 3 阶模型,并在 MATLAB 软件上实现了 3 种模型建模。其中 8 阶模型包括完整的传动系统模型、定子模型和转子模型;5 阶模型包括定子、转子模型和简化的传动系统模型忽略定子的暂态过程后;3 阶模型包括转子模型和简化的传动系统模型。仿真结果表明 8 阶模型具有最精确完整的响应,但仿真时间最长;3 阶模型采用最大程度的近似,但仿真时间最短;5 阶模型适合大多数既要求较快仿真速度又要求较高

精度的研究;文献[38]同时考虑风力发电机组的机械和电气动态特性,针对基于双馈感应发电机的变速风力发电机组轴系的特点,用等效集中质量法和动力学方程建立了其包含机械传动链动态的轴系模型,与发电机动态方程组成8阶微分方程组。该模型可用于风力发电系统控制系统的设计,以及分析机组在各种运行工况下的动态行为。

在双馈感应风电机组控制策略研究方面,文献[39]建立了变速恒频风力发电系统的矢量控制数学模型,分析了风力发电机运行时的动态性能,结果表明实行矢量控制后发电机和原动机之间可以完全解耦,发电机定子电压的频率、相位与风速的大小无关;文献[40]提出了一种基于定子磁场定向转子电流开环控制策略,并利用Matlab仿真分析了定子电压频率、幅值及相位的控制规律;文献[41]讨论了双馈发电机交流励磁变速恒频的发电原理、对变流器的要求,以及为实现最大风能捕获追踪和发电机有功、无功解耦控制的定子磁场定向矢量控制策略;文献[42]以DFIG的精确数学模型为依据,针对传统的两种矢量控制方式的不足,提出了改进的控制方案,使DFIG后电网电压骤降情况下有效控制转子电流,保护转子励磁变频器,提高变速恒频风电系统在电网故障下的不间断运行能力。

文献[43]分析了双馈感应风电机组当系统电压小幅跌落时的动态过程,仿真研究了基于IGBT的低电压穿越控制系统,该装置能快速的将发电机定子与电网解列。文献[44]在DiGSILENT/Power Factory中建立了具有暂态电压支持能力的变速风电机组转子侧变频器控制模型及用于故障后稳定控制的桨距角控制模型,提出了改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性的措施以实现风电场的低电压穿越功能。文献[45]应用电机矢量控制原理与比例-积分调节器串联校正等方法,建立基于PSCAD/EMTDC的双馈感应发电机变速风电机组动态模型,该模型为研究基于双馈感应发电机的变速风电机组的工作特性提供了新的手段。

3.3 基于永磁同步发电机的变速变频风电机组建模

变速变频技术主要应用于永磁同步发电机的风电机组类型,通过全功率变流器转换为工频输出功率接入电网,因此,广义的讲也属于变速恒频技术的范畴。由于采用了多极同步发电机,该类型机组多是直驱型,即省去了变速齿轮箱及其带来的运行及维护问题。但该机型对永磁材料的励磁性能稳定性要求高,且需要较大容量的变流器(一般要选发电机额定功率的120%以上),成本较高。随着电力电子技术和永磁材料制造技术的发展,具有风速适应范围宽、控制简单、有功和无功功率调节灵活等优点的直驱永磁同步风力发电机组具有较为广阔的发展前景。

文献[46]构建了永磁直驱风电系统的仿真模型,实现网侧变换器输出有功和无功功率的解耦控制,增加了卸荷负载以提高其应对电压跌落等故障的穿越能力,使机组可以安全运行在不同功率因数下,同时能在电网电压故障期间对系统提供一定的无功支持。文献[47]从结构和设计特点以及控制技术和制造成本等方面介绍了直驱永磁同步风力发电机组的研究现状和发展趋势。文献[48]建立了包括风力机模型、传动系统模型和发电机模型的D-PMSG数学模型,提出了风力机桨距角和发电机转速的控制策略。

文献[49]研究了大型直驱式永磁风力发电机控制的工作原理,及其并网后对电力系统故障电流的贡献、对电网谐波的影响、对电压闪变的影响以及对电网频率稳定性的贡献。文献[50]提出背靠背全功率变流器的永磁直驱风电系统运行在STATCOM模式时,可以有效提高机组低电压穿越能力。文献[51]设计了由不可控AC/DC整流器和可控DC/AC逆变器组成的实验室控制系统硬件平台,通过控制逆变器的输出电压或电流实时跟踪给定值,来控制永磁发电机电磁转矩,实现最大风能的获取和无功功率可调。

文献[52]采用双脉宽调制变换器作为直驱永磁同步发电机的并网电路,根据风力机和发电机的运行特性提出了一种基于最佳功率给定的发电机最大风能跟踪控制策略。文献[53]研究了永磁同步电机直接转矩控制理论,明确了零电压矢量在控制过程中的作用,并通过实验论证了基于定子磁链观测的永磁同步电机调速系统的实用性。文献[54]首先建立了详细的配备全功率变流器的2MW永磁直驱风力发电机组的数学模型,并研究了该机组的低电压穿越控制策略,该策略的重点在于直流电容电压的调整以及驱动力矩最小化的实现。文献[55]在PSS/E中建立了多极永磁同步风电机组的仿真模型,模型

包括风力机轴系、永磁电机、变流器及其控制系统等部分,该模型能够研究短期电压稳定性以及该类风电机组的低电压穿越能力。

4 风电场模型

风电场模型通常用于含风电的电力系统的规划、调度和优化控制,而用于风电场与电网暂态过程分析的研究,主要是基于风电机组的动态模型。风电场模型主要描述风电场输出功率与风速的关系,由于风电场内风电机组众多,且受各机组排列位置、尾流效应等因素的影响,想要建立精确的风电场模型是非常困难的。

通常各种研究关注的焦点往往是风电场整体的输出特性,因此目前针对风电场输出功率特性的研究,大部分是将风电场的整体特性作简化处理,而忽略风电场内部机组之间复杂的影响。研究方法包括:对不同类型风电场机组的出力进行等效扩大;对风速进行等效处理,再计算整个风电场的等值出力;或利用预测的理论对风电场的风速、功率的历史数据进行分析,从而得到相应时间段后风电场的输出功率值。

文献[56]建立了风电场的发电可靠性模型,该模型考虑了风速的随机变化、不同风电场之间风速的相关性、风电机组的功率特性及其强迫停运率、风电机组的布置和尾流效应以及气温等因素对风电场输出功率的影响,通过该模型在随机生产模拟和随机潮流分析等方面的应用,揭示了风电场输出功率的统计规律。文献[57]从风电并网研究的角度介绍了风力发电系统建模的一般思路,并比较了常用风电场模型的优劣,最后指出了风电场建模方法存在的主要问题。文献[58]在考虑了风电场的尾流效应、风电机组输出功率与尖速比和滑差等之间的函数关系的基础上,建立了风电场的稳态分析模型,并结合常规 PQ 模型提出了简化模型。

文献[59]在对实测风速数据分析的基础上,建立了适用于计算风电场最大装机容量的风电场模型,仿真分析与实测数据对比分析表明该方法能较好的等值风电场静态输出功率。文献[60]对风电场稳态模型和动态模型进行了研究,在 Matlab 软件中编写程序和搭建仿真模型,并对含风电场的电网进行电网潮流计算以及暂态稳定性分析。文献[61]建立了考虑机组尾流效应的风速模型,该模型能较准确地描述风速扰动下风电场输出功率的波动,在 DigSILENT/Power Factory 软件中形成以风速为基础的风电场与电力系统相互影响研究的计算程序,并分析了尾流效应对风电场输出特性的影响。

文献[62]针对风速随机变化的特性,在风速统计特性研究的基础上,用自回归滑动平均方法建立了具有一定功率谱密度特性的风速模型,并对该模型所模拟的风速序列进行了仿真分析和验证,结果表明该模型能够有效地产生动态分析和仿真所需的风速序列。文献[63]根据双馈异步发电机的静态特性对雅可比矩阵进行修正,给出了基于变速恒频双馈异步发电机的风电场在潮流计算中的一种改进模型。文献[64]介绍了大型风电场的等值建模的主要特点,探讨了含变速双馈风电机组的风电场等值方法和在等值过程中应注意的问题。

文献[65]提出了一种时间序列分析和卡尔曼滤波相结合的混合算法,该算法可以较好地解决了预测延时问题。文献[66]提出了基于时间序列法和神经网络法的风速预测方法,为了提高预测精度,该方法提出了滚动式权值的调整手段。文献[67]对国内外短期风电功率预测技术的研究现状进行了较全面的综述,介绍了与风电功率预测相关的物理方法和统计方法,分析了预测误差产生的原因及其评价方法,对我国的风电功率预测研究与开发工作提出了建议。

5 模型校验研究

风电机组/风电场模型最终要应用于电力系统仿真分析,必须先对模型的精度及有效性进行验证,最为有效的方法是与实际测量结果相验证。

目前用于工程的风电机组模型主要由风电开发商负责开发与校验,由于技术的相对封闭和标准的

缺失,风电机组/风电场模型的开发与验证严重滞后于风电机组的生产与投运。因此,许多研究学者和机构大都采用实验室或风电场试验(文献[68-73])或模型计算结果与国际公认的商业化风电仿真软件的分析结果进行对比(文献[74]),来校验所提出模型的相对有效性。

6 风电建模研究方向的探讨

目前风电机组特性、风电并网相关问题研究中,风电建模大多服务于各类孤散问题,不能建立本质上的联系。考虑到风力发电机组(场)本身是个较为复杂的非线性系统,含有多种变量,其联网运行动态过程涉及风机运动机电暂态、定转子电磁暂态、电网暂态等不同的时间常数,是个多时间尺度模型系统,因此笔者认为联网风电系统的建模应能反映以下动态过程的影响。

6.1 由变流器动态过程时间常数决定的电磁暂态模型

现代大容量风电机组大多引入了控制灵活的电力电子装置以改善运行性能,但电力电子器件的抗干扰能力较弱,同时风电机组大都以恒定功率因数控制($\cos\varphi=1$)的方式运行,不能对接入点的电压进行反馈补偿,当电网电压出现跌落时,风电机组还不具备低电压穿越的能力。事实上当电网电压严重跌落(如发生短路)时,为最大限度地保障风电机组安全,风电机组的保护将动作使机组立即与电网解列,当并网风电场规模很大时,就会加剧系统受扰动的程度。为此,在研究该类型问题时,应当建立与电力电子变流器动态过程时间尺度相应的电磁暂态模型。

6.2 由机械能与电能转换过程时间常数决定的机电暂态模型

空气的流体性质决定了风速变化的连续性,而风速连续变化导致风电功率波动亦具有连续性,通常不会出现大的阶跃,但是当风速过大会导致风电机组切机甚至整个风电场功率脱落,将给所接入电力系统造成大幅度的功率冲击;特别是当风力发电大规模集中接入以火电机组调频的区域电力系统时,风电功率的突然大幅变化(风电功率波动幅值大、波动速度快)将可能超出调频机组的响应能力,从而容易造成系统频率波动甚至频率越限,严重时将威胁着系统的运行安全。

风电场多数位于电网末端,当风电场大规模集中远距离联网时,其输出电功率的大幅间歇性波动将造成输电线路消耗无功功率的大幅间歇性波动;而目前变电所配置的无功补偿装置大多是固定补偿,受机械寿命限制而不能频繁投切调节;并且目前风电机组以恒定功率因数运行的方式,也不利于并网点电压的调节。因此,在有些运行方式下,风电场输出电功率的间歇性大幅波动可能会超出接入点所在区域电网的无功调节范围,而导致接入点电压越限,威胁着风电场接入点附近电气设备的运行安全,风电场也可能因之被接入系统切除以防止接入点电压持续越限。因此,风力发电大规模集中联网不但给所接入电力系统造成严重的调压负担,而且还会影响着风电场自身的持续联网运行。

风电联网运行对电网有功及无功功率的影响,应考虑机械能与电能的转换过程,风电模型应能反映该时间尺度下的机电暂态过程。

6.3 反映风能波动中长期动态过程的稳态模型

风电输出功率随机性强、波动大,难以准确预测,为研究中长期动态过程中风电并网对电网调峰、甚至电网规划的影响,该时间尺度下的风电模型应能刻画风电电源较长时间段内输出功率的波动特性,如风电功率波动范围、波动变化量等统计指标。

7 结 论

本文讨论了电力系统稳定问题研究中元件建模的特点,根据风力发电系统的结构特点,从风电联网运行的多时间尺度建模的角度,分析了目前常见的风电建模方法;着重讨论了笼型异步、双馈感应及永磁同步等主流风电机组机型及其控制系统的建模方法;最后,基于风电系统多变量、动态过程多时间尺度等角度,对风电机组建模研究方向进行了探讨。

参 考 文 献

- [1] 李俊峰, 施鹏飞, 高虎. 中国风电发展报告 2010 [R]. 海口: 海南出版社, 2010.
- [2] 肖田元. 系统仿真导论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [3] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 31-35.
- [4] 白雪峰, 倪以信. 电力系统动态安全分析综述 [J]. 电网技术, 2004, 28(16): 14-20.
- [5] 徐泰山, 薛禹胜, 韩祯祥. 关于电力系统电压稳定性分析方法的综述 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(5): 62-67.
- [6] 刘雄, 陈严, 叶枝全. 水平轴风力机气动性能计算模型 [J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 792-800.
- [7] 李辉, 韩力. 风电机组等效模型对机组暂态稳定分析结果的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 105-111.
- [8] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [9] 郑康, 潘再平. 变速恒频风力发电系统中的风力机模拟 [J]. 机电工程, 2003, 20(6): 40-43.
- [10] 许洪华, 倪受元. 独立运行风电机组的最佳叶尖速比控制 [J]. 太阳能学报, 1998, 19(1): 30-35.
- [11] 陈坤, 贺德馨. 风力机尾流数学模型及尾流对风力机性能的影响研究 [J]. 流体力学试验与测量, 2003, 17(1): 84-87.
- [12] 张小芳, 王爱龙, 田俊梅. 风力机的 MATLAB 模型及其应用 [J]. 电力学报, 2004, 19(2): 114-115.
- [13] 贾要勤, 曹秉刚, 杨仲庆. 风力机模拟平台的 MPPT 快速响应控制方法 [J]. 太阳能学报, 2004, 25(13): 364-370.
- [14] 包能胜, 叶枝全. 水平轴风力机状态空间模型参数辨识 [J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 371-375.
- [15] 金增, 包能胜, 陈庆新, 姜桐. 风力机系统的神经网络模型辨识 [J]. 太阳能学报, 1998, 19(2): 206-211.
- [16] 卞松江, 潘再平, 贺益康. 风力机特性的直流电机模拟 [J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 360-364.
- [17] 雷亚洲, Gordon Lightbody. 国外风力发电导则及动态模型简介 [J]. 电网技术, 2005, 29(12): 27-32.
- [18] Andreas Petersson. Analysis Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines [D]. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2005.
- [19] Francisco Jurado, Natividad Acero. USING VARIOUS COMPUTER TOOLS IN ELECTRICAL TRANSIENTS STUDIES [C]. 30th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, Kansas City, MO, October 18-21, 2000.
- [20] DiGSILENT GmbH "DiGSILENT PowerFactory V13-User Manual," DiGSILENT GmbH, 2003.
- [21] M. Poller. Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind-Farms [C]. Proceedings of the IEEE Power-Tech Conference, Bologna, 2003.
- [22] 潘文霞, 王瑞雪. PSASP 在风力发电机动态建模仿真过程中的应用 [J]. 江苏电机工程, 2006, 25(1): 65-67.
- [23] 关宏亮. 大规模风电场接入电力系统的小干扰稳定性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [24] 穆钢, 崔杨, 严干贵. 变速恒频风电机组的动态建模及仿真分析 [C]. 全国风力发电技术协作网成立大会论文集, 2006 年 8 月 16-18 日, 乌鲁木齐, Vol 1: 163-169.
- [25] 迟永宁, 李群英. 大规模风电并网引起的电力系统运行与稳定问题及对策 [J]. 电力设备, 2008, 9(11): 16-19.
- [26] 王晓波, 严干贵, 郑太一. 双馈感应风电机组联网运行仿真及实证分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 15-19.
- [27] 吴学光, 张学成, 印永华, 戴慧珠. 异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用 [J]. 电网技术, 1998, 22(6): 68-72.
- [28] 樊艳芳, 晁勤. 风力异步发电机的建模与仿真 [J]. 计算机仿真, 2002, 19(5): 56-58.
- [29] 王建生. 基于 MATLAB 的风力异步发电机动态仿真 [J]. 电力学报, 2005, 20(3): 237-239.
- [30] 李宝恩. 并网型异步风力发电机数学模型及启动仿真 [J]. 中国科技信息, 2005, 10: 4-5.
- [31] 苏正华. 基于 PSASP 的变桨距异步风力发电机的动态建模与分析 [J]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn>, 1-7.
- [32] 关宏亮, 迟永宁, 戴慧珠, 杨以涵. 异步风电机组接入系统的小干扰稳定及控制 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 54-58.
- [33] 潘文霞, 王伟, 李文朝, 陆小花. 异步风电机组软并网控制系统研究 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(7): 792-796.
- [34] 陈翰林, 卢振岭, 翟庆志. 笼型异步发电机和 SVG 用于独立运行风电系统 [J]. 可再生能源, 2007, 25(1): 86-88.
- [35] 乔明, 林飞, 孙湖, 郑琼林. 基于异步电机的风力机模拟实验平台的研究 [J]. 电气传动, 2009, 39(1): 40-43.
- [36] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 双馈发电机简化动态模型及在风电系统中应用 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 58-62.
- [37] 尹明, 李庚银, 周明, 赵成勇. 双馈感应风力发电机组动态模型的分析与比较 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 22-27.
- [38] 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.
- [39] 史林军, 潘文霞, 白先红. 双馈型变速恒频风力发电机矢量控制模型的研究 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 15-17.
- [40] 赵栋利, 许洪华, 赵斌. 变速恒频风力双馈发电机并网电压控制研究 [J]. 太阳能学报, 2005, 25(5): 587-591.
- [41] 贺益康, 郑康, 潘再平. 交流励磁变速恒频风电系统运行研究 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 55-60.
- [42] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 赵仁德. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.
- [43] A. Petersson, S. Lundberg and T. Thiringer. A DFIG Wind Turbine Ride-through System. Influence on the Energy Production [J]. Wind Energ, 2005; 8: 251-263.
- [44] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 25-31.
- [45] 冯双磊, 赵海翔, 任普春, 王伟胜, 戴慧珠. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真 [J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.
- [46] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.

- [47] 薛玉石, 韩力, 李辉. 直驱永磁同步风力发电机组研究现状与发展前景[J]. 电机控制与应用, 2008, 35(4): 1-5.
- [48] 尹明, 李庚银, 张建成. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65.
- [49] 张新燕, 王维庆. 大型直驱永磁风力发电机及其并网运行研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(4): 412-416.
- [50] 李建林, 胡书举, 孔德国, 许洪华. 功率变流器永磁直驱风电系统低电压[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 92-95.
- [51] 吴迪, 张建文. 变速直驱永磁风力发电机控制系统的研究[J]. 大电机技术, 2006, 6: 51-55.
- [52] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 刘刃. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15.
- [53] 田淳, 胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制系统理论及控制方案的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(1): 7-11.
- [54] J F Conroy and R Watson. Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator[J]. IET Renew. Power Gener., 2007, 1(3): 182-189.
- [55] V. Akhmatov. Modeling and Ride-through Capability of Variable Speed Wind Turbines with Permanent Magnet Generators[J]. Wind Energ., 2006, 9(4): 313-326.
- [56] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 周孝信. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29.
- [57] 娄素华, 李志恒, 高苏杰, 吴耀武. 风电场模型及其对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 330-334.
- [58] 吴义纯, 丁明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 36-39.
- [59] 胡雅娟. 基于实测运行数据的风电场整体模型的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2007: 23-28.
- [60] 万航羽. 风电场模型研究及应用[D]. 北京: 北方交通大学, 2008: 67-68.
- [61] 曹娜, 赵海翔, 任普春, 戴慧珠. 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): 69-72.
- [62] 李东东, 陈陈. 风力发电系统动态仿真的风速模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 41-44.
- [63] 刘艳妮, 王玮, 王英男. 电力系统潮流计算中风电场模型研究[J]. 华东电力, 2008, 36(4): 58-61.
- [64] 闫广新, 晁勤, 刘新刚, 周伟, 乔之勇. 含变速双馈风电机组风电场的等值问题[J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 21-23.
- [65] 潘迪夫, 刘辉, 李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 82-86.
- [66] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.
- [67] 谷兴凯, 戴慧珠. 风电功率预测技术综述[J]. 电网技术, 2007, 31(s2): 335-338.
- [68] E. Muljadi, C. P. Butterfield, J. Conto, K. donoho. ERCOT's Dynamic Model of Wind Turbine Generators[C]. WindPower 2005, Denver, Colorado, May 2005: 1-8.
- [69] Muljadi E., Butterfield C. P.. Model Validation at the 204-MW New Mexico Wind Energy Center[C]. Wind Power Conference, June 4-7, 2006, Pittsburgh, Pennsylvania.
- [70] M. Behnke, A. Ellis. Development and Validation of WECC Variable Speed Wind Turbine Dynamic Models for Grid Integration Studies[C]. AWEA's 2007 Wind Power Conference Los Angeles, California June 4-7, 2007.
- [71] Eduard Muljadi, Abraham Ellis. Validation of Wind Power Plant Dynamic Models[C]. the 2008 IEEE Power Engineering Society General Meeting Pittsburgh, Pennsylvania July 20-24, 2008.
- [72] M. Martins, A. Perdana. Validation of fixed speed wind turbine dynamic models with measured data[J]. Renewable Energy, 2007, 32(8): 1301-1316.
- [73] Karl Stol, Gunjit Bir. Validation of a Symbolic Wind Turbine Structural Dynamics Model[C]. Proc. of 19th ASME Wind Energy Symp, Reno NV 2000, pp. 41-48.
- [74] AbramPerdana, Sanna Uski. Validation of Aggregate Model of Wind Farm with FixedspeedWind Turbines against Measurement[C]. NORDIC WIND POWER CONFERENCE 22-23 MAY 2006, ESPOO, FINLAND.

Review of Interconnected Wind Power System Dynamic Modeling

CUI Yang¹, YAN Gan-gui¹, LI Hong-bo²

(1. Electrical Engineering College, Northeast Dianli University, Jilin Jilin 132012; 2. Jilin Electric Power Training Center, Changchun 130025)

Abstract: Simulation models of wind power units are the essential means to analyze the power grid problems caused by the interconnected wind power. After a brief analysis on element modeling in power system stability, this paper has studied the common characteristics of wind power generation system dynamic modeling methods, especially on the Squirrel-Cage Induction Generator, Double-Fed induction Generator and Permanent-Magnet Synchronous Generator. Finally, the main research directions of wind power modeling in multi-time scales have been discussed.

Key words: Wind power; Dynamic modeling; Multi-time scales; Simulation