

· 科普园地 ·

风力发电技术综述

孙浩然

(连云港供电公司,江苏连云港 222004)

摘要:目前全球都面临能源危机,可再生能源越来越受到人们的重视,风力发电作为新型的可再生能源发电技术在各国都得到迅猛的发展。对风力发电系统的基本形式、风电并网、最大风能捕捉、低电压穿越等技术发展进行了简要介绍。

关键词:可再生;风力发电;并网;控制;

中图分类号:TM614

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2010)04-0080-05

1 风力发电概述

地球表面各处接受太阳照射受热不同而产生温差,引起大气对流运动形成风。地球上风能蕴藏量巨大,而且取之不尽,用之不竭,是一种重要的可再生能源。据世界气象组织于1954年估计,地球上可为人们利用的风能有107 MW,这相当于10 000个100万kW的利用燃料发电的发电厂的容量,是地球上可供利用的水力的100倍。这是一个非常可观的数量^[1]。在中国,根据2004~2005年中国气象局进行的第三次全国风能资源普查,仅陆上10 m高空处的实际可开发的风能就有2.97亿kW。我国陆上加海上可开发风能总量有7~12亿kW^[2]。

人类利用风能的历史已经有数千年,然而利用风能发电的历史却始于1891年,但之后的较长时间发展缓慢。直到1973年石油危机后,风力发电作为新能源越来越受到重视。特别是20世纪90年代以来,风力发电加速发展^[2,3],总装机容量以年均25%以上的速度增长,每年新增容量的增长率也超过了30%。2007年,全球新增风电装机容量20 073 MW,累计风电装机容量94 112 MW。欧洲2007年新增电源中风电首次超过天然气发电,成为第一大增长电源。

中国发展风力发电始于1990年,2000年总装机容量为350 MW,到2006年增长为2 600 MW,年增长率近40%。2007年更是翻了一番,新增3 449 MW,居世界第三,总装机达到6 050 MW,居世界第五。图1给出了世界风电总装机前10位的情况。2008年8月12日,中国风电发电装机总量已经达到7 000 MW,占我国发电总装机容量的1%,这也意味着我国已进入可再生能源大国行列。

风力发电的快速发展和各国支持风电发展的政策紧密相关。为促进风力发电的发展,世界各国

政府出台了許多优惠政策,主要包括有:投资补贴、低利率贷款、规定新能源必须在电源中占有比例、规定最低风电电价、从电费中征收附加基金用于发展风电、减排CO₂奖励等。欧洲的德国、丹麦、荷兰等采用政府财政扶持、直接补贴的措施发展本国的风力发电事业;美国通过金融支持,由联邦和州政府提供信贷资助来扶持风力发电事业;印度通过鼓励外来投资和加强对外合作交流发展风力发电;日本采取的措施则是优先采购风电。多种多样的优惠政策促进了各国风力发电的快速发展。中国为促进风力发电的发展,先后实施了“乘风计划”、“光明工程”和“双加工程”,推行风电特许权项目,给予风电在资金、电价等方面的政策支持。2006年正式实施了《可再生能源法》及其一系列实施细则,大大促进了风力发电的发展。根据全球风能理事会以中等发展水平的预测,中国风力发电装机容量2010年将达到10 000 MW,2020年将达到70 000 MW,2050年将达到450 000 MW。

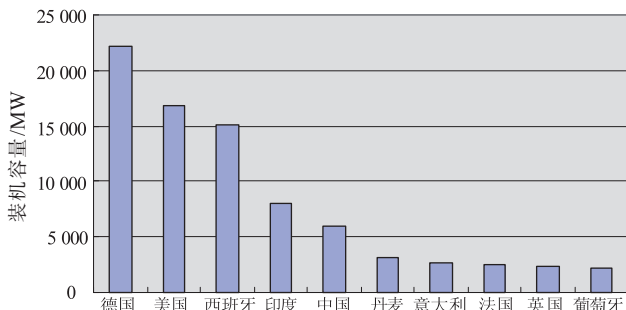


图1 2007年风力发电总装机统计

2 风力发电系统的基本形式

从机组结构上来看,风力发电经过多年的发展,曾出现过多种类型。图2是几种典型的风力发电系统拓扑^[4],这些拓扑的区别在于使用的发电机和电力电子变换器以及有无齿轮箱。

图2(a)是20世纪80年代到90年代被广泛采

用的传统结构。它的风力机采用失速调节,机组转速可以认为是不可调的。为了补偿感应发电机的无功功率使用了电容器组,为了平滑并网使用了软启动器进行软并网。

图 2(b)中,用电力电子变换器代替了软启动器和电容器组,把电网和感应发电机隔开,实现了机组在全风速下的变速运行。

图 2(c)中使用了绕线转子的感应发电机,并采用电力电子变换器外部改变转子电阻,从而获得转差率可控的 10%可调范围,并通过控制转差率控制机组输出的功率。

图 2(d)结构使用了双馈型感应发电机,用变频器控制转子绕组的电流。变频器功率仅为发电机额定功率的 20%~30%就可控制发电机的全功率输出。这种结构比图(c)的结构有更宽的调速范围,变换器所需功率较小,经济性好。我国东汽集团生产的 1.5 MW 风力发电机组就属于这种结构。

图 2(e)引入了绕线式同步发电机,经电力电子变换器连接电网。由于它需要励磁用整流电路、电刷和滑环,即使其可以实现变速恒频也不被看好。

图 2(f)与图 2(e)结构相同,也使用绕线式同步发电机。但由于它使用的是多极发电机,所以它不需要齿轮箱。Enercon 和 Lgaerwey 是典型应用这种结构的风力机制造公司。

图 2(g)所示结构有风力机直接驱动多级永磁同步发电机,省去了齿轮箱、电刷和滑环,提高了机组的运行可靠性,减少了维护费用。电力电子变换器可以使机组实现变速恒频运行。早期由于成本的原因只用于小型风力发电机,典型应用是作为船舶电源。近年来随着永磁体价格的降低这种结构被更广泛的应用,目前单机容量国内已经达到 2 MW。ABB 公司在 2000 年利用这种结构提出一个新的设想:用多极 3.5 MW 永磁发电机发出电能后经二极管整流器产生 21 kV 直流电,然后经高压直流输电并入电网。

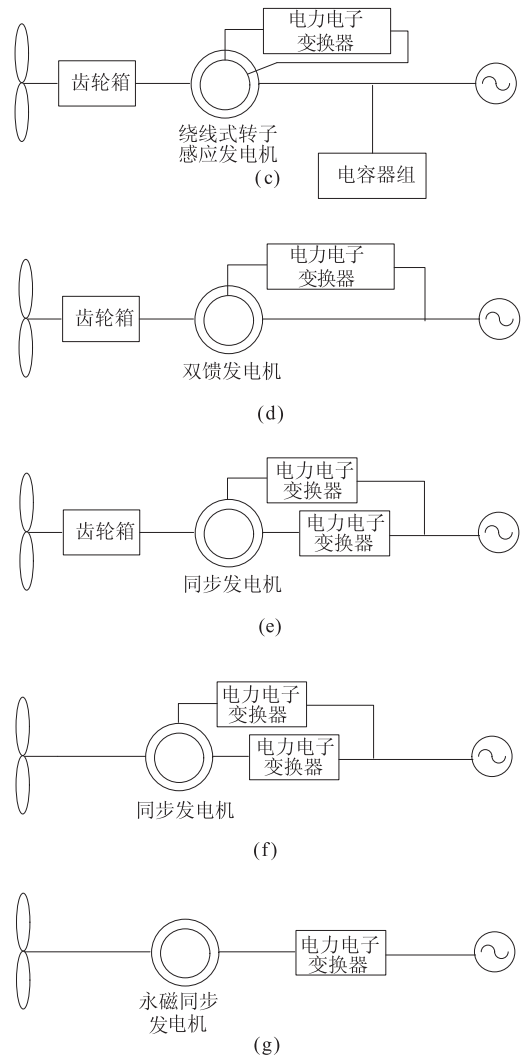
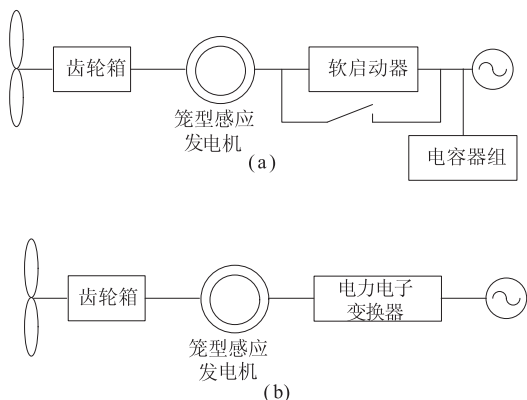


图 2 典型风力发电机组的拓扑结构

从技术发展上看,风力发电经历了从定桨距到变桨距、从恒速恒频(CSCF)到变速恒频(VSCF)的技术升级。节距角就是桨叶半径 R 处回转平面与桨叶截面弦长之间的夹角。变桨距控制就是通过改变桨叶节距角来调节风力机功率,使得在额定风速以下控制风力机运行于特定转速使其风能转换效率保持最大直到功率达到额定值;在风速超过额定值时降低转换效率保持额定功率直到切出风速,这是定桨距很难实现的。变速恒频发电是另一种新型的发电技术,尤其适合于风力发电。它适应了风能的随机、不稳定的特性,根据风速调节转速从而最大的输出能量,实现和电网的柔性连接,提高机组的风能转化效率,减少风力机的应力和磨损,优化了机组运行条件。20 世纪 90 年代以来,国内外新建的大型风力发电系统大多采用变速恒频技术。随着风力发电技术的广泛应用,变速恒频风力发电方式将得到更多重视,应用范围不断扩大^[5]。

变速恒频风力发电有多种机型,除了目前已经有较大市场份额的双馈风力发电机组和直驱永磁



风力发电机组以外,还有无刷双馈、爪极式、和开关磁阻等风力发电系统。双馈式风力发电系统的变流器容量只是系统额定容量的30%左右,成本较低,因此也成为当前变速恒频风力发电系统的主流机型。直驱式变速恒频风力发电系统采用低速永磁同步发电机(PMSG),取消了变速齿轮箱,不需要电刷,结构简单,便于维护,使用寿命长。与传统技术相比,输出功率可以增加20%以上,维护费用则可降低50%,这些足以抵消它采用全功率变换器所增加的成本;同时它具有可靠性更高,噪音更低等优点,因而代表着未来的发展方向^[6]。

从2002年全球各类风力发电机的市场份额统计可以看出,在风力发电市场中,采用笼型感应电机的恒速风力发电机、采用双馈感应发电机的变速风力发电机和采用永磁同步发电机的直驱永磁同步风力发电机占有绝对的优势^[7]。

随着新材料的应用、设计水平的提高以及控制系统的改进,风力发电的发展将会呈现出以下几个趋势^[7]:

(1)单机容量不断增大,兆瓦级的大机组的比重会不断增长。在欧洲,5 MW的风力发电机组已经商业化,在国内,2 MW和1.5 MW的机组技术已经成熟,在总装机容量中的比重分别从2006年的1%和9%增长到2007年的2%和18%。

(2)变桨距调节方式将会逐步取代定桨距失速调节方式。变桨距调节能够按最佳参数运行,额定风速以下能最多的吸收风能,额定风速以上能输出恒定功率,避免发电机超负荷,并且可以改善整机受力状况。

(3)变速运行方式将会取代恒速运行方式。变速运行可以控制风机运行于最佳叶尖速比以获取最大风能,同时使功率输出更稳定。

(4)直驱式的市场份额会越来越大。直接驱动省去齿轮箱,减少能量损失、停机时间、发电成本和噪声,降低了维护费用,提高了风电转换效率和可靠性。

(5)海上风力发电将会得到更大的发展。海上风能较陆上大且具有稳定的主导风向,允许安装单机容量更大的风机。

(6)风力发电机无刷化。无刷化可提高系统的运行可靠性,实现免维护提高发电效率。

3 风力发电中的关键技术

3.1 并网技术的研究和最大风能的捕获

对直驱式永磁发电系统研究的内容主要有并网及并网后的发电机转速控制的研究、提高系统可靠

性的控制的研究以及提高系统故障穿越能力的研究等几方面。这些研究几乎都是通过对全功率电力变换器的控制算法来实现相应的控制目的的。

并网控制方面,文献[8]提出了直流侧并网的新方法。在直流电容与DC/AC之间安装并网开关。并网前并网开关断开,DC/AC通过限流电阻对电容进行充电,此时发电机在风力机的带动下转速从0上升。当电容充电达到交流电网电压幅值时闭合并网开关,同步风力发电机并网。正常情况下,发电机转速从低到高逐渐上升,并在某一转速下并入电网。当由于某种原因,发电机在高转速下脱网需要重新并网,由于此时电容已经充电且直流母线电压高于网侧交流线电压幅值,因此只要将并网开关闭合就可实现并网。

直驱式永磁同步风力发电机经电力电子变换器并入电网以后的控制目标是风速小于额定风速时实现最大风能捕获,风速超过额定风速时使系统以额定功率输出^[9]。

最大风能捕获的目的就是通过适当的控制,使风力机转速随风速变化,始终沿着最佳功率曲线运行,从而使风能转化最大化。最大风能追踪可以有变桨距调节,也可以通过调节发电机功率来调节转速以保持最佳叶尖速比实现。出于可行性、经济性和可靠性的考虑,当前使用的主要是通过控制发电机输出功率以调节其电磁功率,进而调节发电机转速。

具体实现时,在发电机有功和无功功率解耦控制的基础上,根据有功功率给定的提取方法的不同,又有有速度传感器和无速度传感器的控制方法之分。有速度传感器的控制方法是根据风力机最佳功率曲线和风力机转速实时计算发电机输出功率给定。而无速度传感器的控制方法又有扰动法、参数估计法、查表法和人工在智能法几类。

文献[10-12]介绍了最大风能跟踪的扰动法,主要有爬山法、正弦波小扰动法和最佳转矩曲线法等。扰动法的基本原理是根据电机转速和直流电压之间的关系,先对直流电压的扰动,然后测量有功功率的变化,如果输出功率变化为正,则以扰动后位置为新工作点继续扰动,如果输出有功功率变化为负,则在原来工作点改变扰动,直到找到最佳工作点。根据改变扰动的策略又有2个思路,一个是功率变化为负时,改变扰动方向,如果向大向小2个方向的扰动都使得有功功率变化为负,则认为达到了最佳点;另一个叫变步长法,当有功功率变化为负时,不改变扰动方向,而是把扰动减半在原来工作点上再次扰动,直到功率变化小于一个很小的正数,认为达到最佳工

作点。文献[13]用发电机电动势的积分得到磁通链,而这个磁通链包含有转子的位置信息,进而估计出转子转速。文献[14]根据直流电压和发电机转速的关系,通过测量直流电压,通过查表得到转速。然后据此计算逆变器的有功给定,实现最大风能追踪。文献[15]针对双 PWM 变换器研究了发电机的单位功率因数控制,通过增加约束方程的方法,解决了电机定子超过极限值而导致系统不稳定的问题。文献[16]使用神经网络的方法估算风速,在根据估算的风速计算发电机转速给定并据此控制最大风能追踪。

目前对减小直驱式风力发电系统变换器的直流环节电容,以提高系统的可靠性的研究比较少。文献[17]建立了在主从控制方式下应用功率平衡联合控制策略的双 PWM 控制模型,使得整流部分充分利用了逆变部分的信息,提高了直流母线电压的动态控制性,减少了对变换器中电解电容容量的要求,提高了系统的可靠性和性能;文献[18]对用于海浪发电永磁同步机的变换器做了类似研究,通过在整流器和逆变器之间加入功率反馈环,达到电容充放电电流减小的目的,使得在电容量一定时,直流电压范围变小,为逆变创造了更好的条件。

文献[19]对风力发电用大功率逆变器进行了研究,提出了一种新的电路拓扑;文献[20]则对大型风电场接入系统方式进行了比较;而文献[21]则从桨距角控制、发电机转速控制、电力变换器功率解耦控制等方面对直驱永磁同步发电机的控制策略进行了全面的研究,为进一步研究奠定了基础。

3.2 低电压穿越的研究

电网电压跌落时,由于受变流器通流能力的限制,网侧逆变器注入电网功率减小。而此刻机侧整流器的功率并没有改变,造成直流侧的过电压。如果维持直流侧电压稳定,则必然造成逆变器过电流。过电压和过电流都将导致电力电子器件的损坏,为了保护变流器不被损坏,风力发电机组将在电压跌落时退出运行。电网穿透率小时,风力发电机组在电压跌落时退出运行还是可以接受的。

然而,随着风力发电规模的不断扩大,若风电机组在电压跌落时仍然采取被动保护式脱网,则会增加整个系统的恢复难度,甚至使故障更加严重,最终导致系统其他机组全部解列。目前在风力发电技术发展领先的一些国家,如丹麦、德国等已相继制定了新的电网运行准则,定量给出了风电系统离网的条件(如最低电压跌落深度和跌落持续时间),只有当电网电压跌落低于规定曲线以后才允许风力机脱网,当电压在凹陷部分时,发电机应提供无功功率。这就要求风电系统具有较强的低电压穿越能力,能

方便地为电网提供无功支持。因此必须研究低电压穿越的措施,实现电网电压跌落时风力发电机不脱网运行。

文献[22]通过在逆变器交流侧加装无功补偿装置和低通滤波器来应对电网电压不对称跌落对系统所造成的影响,使逆变器只能感受到电网的正序电压,保持其对称工作状态,从而实现低电压穿越;文献[23-26]通过直流侧加卸荷负载以消除电压跌落时直流侧的功率拥堵,避免直流侧的过电压和逆变器的过电流,实现低电压穿越。这些方法都要增加专门的元件,降低了系统的可靠性和经济性,使控制变得复杂。

4 结束语

风力发电作为可再生能源,未来的应用前景很好。目前风电的控制、并网等技术已经相对成熟。随着风电的发展,当风电场远离电网时的远距离并网方式的选择待进一步研究。另外,随着风电容量的增大,其对电网电能质量的影响、对系统稳定的影响是电力运行人员亟需面对和处理的问题。

参考文献:

- [1] 王承煦.风力发电[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [2] 李俊峰,高虎,马玲娟,等.2008中国风电发展报告[M].北京:中国环境科学出版社,2008.
- [3] 李俊峰,高虎.2007中国风电发展报告[M].北京:中国环境科学出版社,2007.
- [4] BLAABJERG F, CHEN Z, TEODORESCU R, et al. Power Electronics in Wind Turbine Systems[C]. Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC apos; 06. CES/IEEE 5th International Volume 1, Issue, Aug. 2006: 1-11.
- [5] 叶杭冶.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [6] 张春晖.大型风电设备发展的新方向——定子超高压转子永磁化[J].电器工业,2007(7):48-50.
- [7] 李志梅,赵东标.风电技术现状及发展趋势[J].电气技术,2007(6),48-50.
- [8] 徐科,胡敏强,杜炎森,等.直流母线电压控制实现并网与最大风能跟踪[J].电力系统自动化,2007,31(11):53-58.
- [9] 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
- [10] 王生铁,张润和,田立欣.小型风力发电系统最大功率控制扰动法及状态平均建模与分析[J].太阳能学报,2006,27(8):828-837.
- [11] 闫耀民,范瑜,汪至中.永磁同步电机风力发电系统的自寻优控制[J].电工技术学报,2002,17(6):82-86.
- [12] 房泽平,王生铁.小型风电系统变步长扰动 MPPT 控制仿真研究[J].计算机仿真,2007,24(9):241-244.
- [13] TOMONOBU S. Wind Velocity and Rotor Position

- Sensorless Maximum Power Point Tracking Control for Wind Generation System[J].Renewable Energy,2006,31:1764-1775.
- [14] 徐 科,胡敏强,郑建勇,等.风力发电机无速度传感器网侧功率直接控制[J].电力系统自动化,2006,30(23):43-47.
- [15] 冯哲峰,杨恩星,陈国柱.永磁直驱风力发电机的单位功率因数控制[J].机电工程,2007,24(9):70-73.
- [16] LI H,SHI K L, McLAREN P. Neural Network Based Sensorless Aximum Wind Energy Capture with Compensated Power Coefficient [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2005, 41(6): 1548-1556.
- [17] 王 锋,姜建国.风力发电机用双 PWM 变换器的功率平衡联合控制策略研究[J].中国电机工程学报,2006,26(22):135-139.
- [18] MAREK Jasiński, DARIUSZ wierzynski, MARIAN P, et al. Direct Active and Reactive Power Control of AC /DC/AC Converter with Permanent Magnet Synchronous Generator for Sea Wave Converter[C]. Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007.
- [19] 张 强,张崇巍,张 兴,等.风力发电用大功率并网逆变器研究[J].中国电机工程学报,2007,27(16):54-59.
- [20] 常 勇,徐 政,郑玉平.大型风电场接入系统方式的仿真比较[J].电力系统自动化,2007,31(14):70-75.
- [21] 尹 明,李庚银,张建成,等.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.
- [22] MARIUS F, CRISTIAN L, GHEORGHE-DANIEL A, et al. Voltage Sags Ride-Through of Motion Sensorless Controlled PMSG for Wind Turbines[C]. Industry Applications Conference, 2007.
- [23] 李建林,胡书举,孔德国,等.全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J].电力系统自动化,2008,32(19):92-95.
- [24] 胡书举,李建林,许洪华.直驱式 VSCF 风电系统直流侧 Crowbar 电路的仿真分析[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(3):118-123.
- [25] 李建林,胡书举,孔德国,等.全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J].电力系统自动化,2008,32(19):92-95.
- [26] 胡书举,李建林,许洪华.变速恒频风电系统应对电网故障的保护电路分析[J].变流技术与电力牵引,2008(1):45-51.

作者简介:

孙浩然(1970-),男,江苏连云港人,工程师,从事电力调度工作。

A Review of Wind Power Generation Technology

SUN Hao-ran

(Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222004, China)

Abstract: Facing the global energy crisis, people are paying more and more attention to renewable energy. As the new power generation technology using renewable energy, the wind power generation technology has already gotten rapid progress in many countries. The basic form of wind power generation system, interconnection technology, the maximum wind capture as well as the low voltage ride through technology are introduced in the paper.

Key words: renewable; wind power generation; interconnection; control

世博大舞台,有电更精彩

自国家电网公司正式签约成为世博会合作伙伴一年多来,上海市电力公司在国家电网和上海市政府的领导下,从建设世博、服务世博、参与世博等多方面,在履行合作伙伴义务、倾力整体办博工作、展现文明窗口素质、提升全民参与水平等方面做出大量积极工作,并以此为契机,树立了国家电网公司责任央企的良好形象。

此外,作为2010上海世博会的电力供应与服务单位,上海电力还积极参与世博会保电工程。包括世博隧道、世博变电站,以及220kV南市、连云变电站,110kV都市、群英、荟萃变电站,35kV世博“一轴四馆”电源供应项目等在内的85项世博电力建设工程,如点点繁星般散落在在世博园区及周边区域内。在数千名员工夜以继日的奋战下,今年5月至明年年初,这批工程将迎来集中投产期。而在整个世博期间,这批电力建设项目将发挥最大功用,确保一届精彩、难忘世博盛会的成功举办。

除了供电建设和用电服务之外,上海电力公司正号召全体员工以城市东道主和世博主人翁的姿态,投身各项公益活动。同时,众多的电力志愿者们也将活跃在服务世博的各个窗口,在更广阔的平台之上展现电力员工的风采。

2010年上海世博会正向我们走来,国家电网公司将站上全新而耀眼的舞台上,以世界为观众,用精彩纷呈的企业馆展示,演绎电力让城市和生活更美好的愿景,打造坚持可持续发展和肩负社会责任的优质企业形象,为一届成功、精彩、难忘的世博盛会贡献智慧与力量。