

# 风力发电及其控制技术新进展\*

王志新, 张华强

(上海交通大学 电气工程系, 上海 200240)



王志新 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为海上风力发电、风光互补发电、电机系统节能。

**摘要:** 综述了风力发电技术态势, 即单机容量大型化、海上风机、定桨矩向变桨、变速恒频、无齿轮箱 (直驱式)、结构设计发展, 以及风电场远程监控及无线网络技术应用; 论述了风力发电系统结构, 如定速、变速风力发电系统原理及特点; 列举了机组状态监测系统、测量参数, 以及系统构成及实施功能; 介绍了风电机组功率控制策略, 以及变桨距控制、偏航控制、发电机控制原理及技术特点; 提出了风电机组低电压穿越技术措施, 如转子旁路保护电路、转子旁路加定子侧电力电子开关的组合电路、改进变换器控制算法、定子侧有源保护电路等; 最后, 针对多端电压源换流器高压直流输电用于风电场并网, 分析结果表明双馈风电机组等效模型能正常稳定工作, 在逆变侧发生故障时能较快恢复, 且控制效果明显。

**关键词:** 风电机组; 双馈; 直驱; 全功率变换器; 低电压穿越技术

**中图分类号:** TM 301.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5531(2009)19-0001-07

## New Development of Wind Energy Generation and Control Strategy

WANG Zhixin, ZHANG Huaqiang

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The development of wind energy generation, for example, larger rated power, offshore wind turbine generator system, VSCF, no gear-box driven, and construction design, remote wireless network wind farm monitoring system, was reviewed. The construction and theory of wind energy generation system, state monitoring system, testing parameters, system function were introduced. The power control strategies, such as pitch control, yaw control and generator control, were discussed, and LVRT was proposed. Analysis results show that MVSC-HVDC should be applied in the wind farm, because of its quick response and efficient control result.

**Key words:** wind turbine generator system; doubly-fed; direct-driven; full power converter; LVRT

### 0 引言

中国风能资源丰富, 可开发利用的风资源 14 亿 kW, 其中陆上 6 亿 kW、海上 8 亿 kW。2008 年中国累计装机容量达到 1 221 万 kW, 其中并网发电的有 894 万 kW。到 2020 年我国风电装机将达到 1.5 亿 kW。

相比化石能源和核电, 风能是一种开发成本较低、清洁环境、安全、可再生的能源形式。根据贝兹理论, 理论上风力机从风中吸收的能量不到空气动能的 59.3%, 但由于受到机械结构等限

制, 实际上该值要更小。因此, 如何才能提高转化效率、获取更多风能, 实现风能规模化利用, 一直为学者及业界所关注。近年来, 大型风电机组采用了变速变桨距控制技术, 旨在提高响应速度、获得最大能量 (低风速时捕获最大功率、高风速时捕获额定功率)。但是, 风能转换系统由于一些不确定因素的存在表现出强非线性特征, 风机产生的能量随着风速和风向的连续波动是快速变化的, 此外, 能源系统要求满足电能质量和可靠性指标, 一般传统线性定常控制器会引起超调和损失系统的稳定性, 大型变速变桨距风机的复杂性,

张华强 (1965—), 男, 教授, 博士, 研究方向为风力发电、电气节能技术。

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (60934005); 中国博士后基金项目 (20080440088); 上海市博士后基金项目 (08R214134); 上海市科技发展基金项目 (09195802900); 上海市白玉兰科技人才基金 (2009B075)

如控制算法、高阶、耦合、强非线性特征等,使得常规的控制方法就不太适合了。根据风速的不同,风力发电系统由4个动态过程构成:启动、变速运行、变桨距运行、刹车。启动和刹车过程的主要控制目标是使系统能在最短时间内有较快响应速度;变速控制的主要控制目标是调节风能、减少或消除风能产生过程中的急剧波动,捕获最大能量、减弱暂态负荷的影响;变桨距控制的主要控制目标是通过调节桨距角来维持风机输出额定功率不变。

## 1 风力发电技术发展态势

### 1.1 小容量向大容量发展

目前投运的主流机型都在1 MW以上,单机容量最大达到5 MW。美国已研制成功7 MW风力发电机,英国正在研制10 MW的巨型风力发电机。预计到2020年,将会有20 MW、30 MW甚至40 MW的风力发电机面世,风力发电机的制造将由制造机器转变为建造发电站。我国生产的3 MW双馈海上风电机组、2.5 MW直驱型风电机组已成功并网发电。

### 1.2 陆上风电向海上风电发展

许多国家都制订了大规模开发利用海上风能计划。2002年欧盟提出的目标是:到2010年风电装机达到4 000万kW,其中海上风电达到500万kW;2020年风电装机达到15 000万kW,其中海上风电达到5 000万kW;要求风电装机占整个欧盟发电装机的15%以上。我国海上风电发展已起步。正在建设的上海东海大桥10万kW近海风电场项目为国内首个大型海上风电场,整个工程计划在2010年完成,采用3 MW风电机组,2009年9月3台机组已成功并网发电。至2020年,上海规划建成5座海上风电场,装机110万kW。此外,我国还规划在浙江慈溪、临海、岱山,江苏盐城、山东青岛建设近海风电场。到2020年,全国规划海上风电累计装机超过1 500万kW。目前,海上风机安装及规划主要在潮间带(离海岸线5 m以内,机组的基础在涨潮时被水淹没)和近海(离海岸线5~50 m)、深海(离海岸线50 m以上)。

### 1.3 定桨距向变桨、变速恒频发展

变速运行与恒速运行的风电机组相比,可以按照捕获最大风能的要求,在风速变化的情况下

实时地调节风力机转速,使之始终运行在最佳转速上,具有减少机组机械应力、增加风能捕获、对风速变化的适应性好、生产成本低、效率高等优点。德国Enercon公司、丹麦Vestas公司生产的变速风电机组数量处于世界领先地位。

变桨距优于定桨距在于机组启动性能好、输出功率稳定、机组结构受力载荷小,另外,在风速高于切出风速时,还可通过桨叶顺桨,保护风机不受到损坏以增加风机的使用寿命。变桨机构已由同步变桨向智能独立变桨发展,但缺点在于因增加了变桨装置,故障概率加大,控制程序较复杂。

### 1.4 有齿轮箱向无齿轮箱(直驱式)发展

无齿轮箱直驱式永磁风力发电机轴直接连接到叶轮轴上,转子的转速随风速而改变,输出交流电的频率也随之变化,需经大功率电力电子变换器,将频率不定的交流电整流成直流电,再逆变输出工频交流电。国际先进的无齿轮箱直驱风力发电机的原理多沿用低速多极永磁发电机,并使用一台全功率变频器将频率变化的风电送入电网。

永磁电机相对于电励磁电机具有能量密度大的特点,再结合永磁材料性能不断在提高而价格却处于下降趋势,以及全功率器件价格不断下降,使得开发基于全功率变换器的可变速直驱永磁风力发电机越来越具有吸引力。考虑到单位造价或总重量的年产出能力,业界也采用一级增速齿轮箱(半直驱)的变速永磁风力发电机和多级齿轮增速箱的永磁同步风力发电机。

### 1.5 结构设计紧凑、柔性、轻盈化、高可靠性

尽管风电机组技术近年来有了长足的进步,但是从技术商业化程度看,风电机组寿命较短,难以保证技术使用寿命达到20年。因而有必要改进机构设计及相关部件,提高转子可靠性,通过风机系统的优化设计,选用更好的材料、部件、可变速转子、先进的控制装置来实现。这些改进不仅可减轻负荷,而且还可减少风机的重量和不同部件的费用。

美国最早开发3.2 MW直驱型变速永磁风力发电机。德国沙尔兰工业大学开发的直驱型永磁同步风力发电机,采用外转子结构、永磁励磁、蒸发冷却、新型轮毂发电方式,省去了滑环和直流电源,发电机的磁铁系统放在轮毂内,整机重量为现有同类直驱机型的60%,效率提高3%左右。

## 1.6 风电场远程监控系统及无线网络技术应用

由于风电场一般包括数十台风电机组,对这些风电机组进行联网集中管理与优化控制显得尤为重要。普通以太网使用光纤通信,而对于大型风电场,随着风电机组数量的增加,势必增加布线费用,且当风电场需要改建或扩充时,过多的通信线路会占用很多空间、造成铺设困难等。风电场远程监控系统一般都采用有线方式,成本较高。基于无线局域网的风电场监控系统,实现了各风力发电机的联网,能够降低布线难度和维护成本。

## 2 风力发电系统结构<sup>[1-6]</sup>

### 2.1 定速风力发电系统

丹麦制造商在 20 世纪 80 ~ 90 年代广泛采用定速风力发电系统,我国 600 kW、750 kW 风电机组也都采用这种发电系统。

### 2.2 变速风力发电系统

#### 2.2.1 双馈感应发电机风力发电系统

图 1 为双馈感应发电机风力发电系统,双馈感应发电机的定子直接和电网连接,绕线转子则通过滑环与变换器相连接。其中,变换器用于控制转子绕组电流,调节发电机输出功率和转矩。也有采取在转子回路外接电阻的方法,如丹麦 Vestas 的 OptiSlip 就采用该方法实现变速控制。

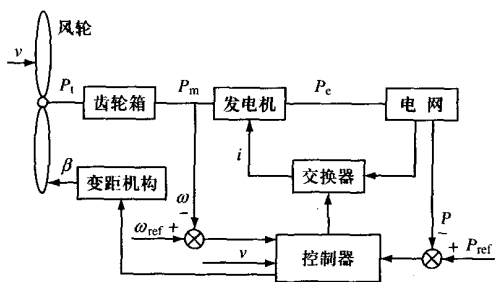


图 1 双馈型变速变桨距风电机组

由双馈异步电机的定子电流频率和转子机械和电流频率的关系,可知频率关系为

$$f_1 = \frac{n_p n_m}{60} + f_2 \quad (1)$$

式中: \$n\_p\$ 为极对数; \$n\_m\$ 为机械转速; \$f\_1\$ 为定子频率即电网频率; \$f\_2\$ 为转子电流频率。

可见,当风速变化引起电机转速变化时,只要改变通入电机转子里面励磁电流的 \$f\_2\$ 就可以保

持电机定子侧输出 \$f\_1\$ 不变。网侧变频器将电网的交流电整流为直流,转子侧变频器将直流逆变为交流,逆变的交流电频率由电机的转子转速决定,从而实现定子侧输出恒定频率的电流。

双馈感应发电机工作在一个有限的变速范围,该范围与变换器设计有关,变换器容量为发电机额定功率的 20% ~ 30%,具有相当大的价格优势且变速范围相对于转子外接电阻的 OptiSlip 更大。但是,风力发电机要求电网发生故障时能够实现低电压穿越,而双馈感应发电机系统会产生很大的电流峰值,为了保证系统安全运行,需要采用先进的保护系统。

#### 2.2.2 变换器有增速齿轮箱风力发电系统

全功率变换器有增速齿轮箱风力发电系统采用全功率变换器实现全范围内变速,发电机可为感应式、同步式、永磁式,通过增速齿轮箱与风力机连接,发电机再通过变换器与电网连接。

针对电网发生故障要求风力发电机能够实现低电压穿越,全功率变换器的风力发电系统容易实现,同时,具有良好的控制性能、可实现多重控制目标,如电压稳定控制、无功等综合控制,使其应用范围得以扩大。

#### 2.2.3 变换器无增速齿轮箱风力发电系统

取消了增速齿轮箱,发电机为同步式、永磁式,并设计成多极电机形式。直驱永磁发电机具有传动系统简单、效率高及控制鲁棒性好的特点,已有商业化多极永磁风电机系统厂商,如 Enercon、WinWind。

#### 2.2.4 风力发电系统并网控制与变换器

(1) 定速风力发电系统并网过渡过程,采用晶闸管软切入,过渡过程结束后,立即切除变换器,该变换器并非整个系统的核心。

(2) 变速风电系统,变换器需完成在变风速条件下,将风力机输出频率随风速变化的交流电转换为与电网电压、频率相同、与电网实现柔性连接的交流电,控制、调节风力机以获取最大风能。

(3) 交-交变换器变流效率高,且可四象限运行,功率可快速双向流动,但采取相控方式,输出电压含大量谐波,尤其是低频时谐波含量大、功率因数低。矩阵式交-交变换器采用全控器件和先进控制手段,使得输出电压灵活可控、低频谐波含量大大减小,输入电流保持正弦等。

(4) 交-直-交电压型变换器采用二极管不可控整流,输入电流畸变、谐波增大、输入功率因数低,且能量无法双向流动。采用交-直-交电压型双 PWM 变换器,两电平电压型双 PWM 变换器主电路拓扑方案非常成熟,可将风力发电系统的谐波含量控制得非常低,切可调节功率因数。同时,通过 PWM 控制,易于实现变换器四象限运行,电路设计及控制系统设计均较矩阵式变换器简单,因此,目前得以大量采用。

### 3 风电机组状态监测<sup>[7-8]</sup>

状态监测系统测量风电设备运行状态参数,评估设备运转状况全过程,是风电机组综合维修解决方案的关键部分。监测数据由现场的下位机采集并处理,通常采用 PLC、DSP 等通过预先设定的风电机组参数,控制风电机组状态。

#### 3.1 状态监测量

状态监测系统需建立在一个硬件平台上,选择合适的传感器,并安装在恰当的位置,通过特定的应用软件采集、储存、传递数据。传感器的性能选择主要考虑被测部位的振动状态及传感器的工作环境,要求振动传感器可靠性和灵敏度高、线性好、失真小、无相移、频响范围宽及抗干扰能力强。传感器的安装也十分重要,如果安装不正确,则会影响到测量结果,且会造成传感器本身的损坏。

#### 3.2 大型风力发电机组远程状态监控系统组成

如图 2 所示,大型风力发电机组状态监测的远程监控一般由下位机采集信息,再由通信线路和协议传至上位机(服务器和工控 PC 机)进行监控,通过人工发出指令,传至向下位机,对风电机组进行控制,并且网络监视机可在各地实时查看风电场的运行状况。上位机与下位机之间属于远距离一对多通信。

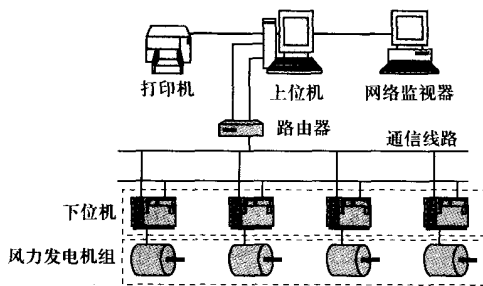


图 2 远程监控系统的组成

监控系统要求有友好的人机界面,以方便操作人员直观地查看。能实现实时监控,故障记录,趋势曲线,绘制报表,用户管理等功能。

风电机组的数据采集和监控系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)都是由风电机组制造商配套供应,各厂家的监控系统互不兼容。国内自行开发和在研究的监控系统有新疆风能研究所的通用风电场中央及远程监控系统和大型海上风电场的制造执行系统 MES。

专业轴承公司 SKF 的风电机组状态监测系统 WindCon2.0 是一个强大的状态监测与故障诊断的远程监控系统。其监测的数据用户界面友好,动态数据在数秒内更新,历史数据显示在趋势图下,一个或多个参数可自动地相对时间、转速 RPM 或其他工艺参数(如功率、温度、水平等)显示出来,趋势图也可以秒为单位进行更新。监控软件运行于常用的 MS 操作系统。每台被监测的机组的数据保存在数据库里。机组的数据及其连接图以图片形式显示出来。机组信息(包括转轴、轴承、齿轮、叶片等)的建立可通过拉放图片的方法来进行。每个部件的相关信息,如轴承型号、齿数、叶片数也可一并保存,基于这些信息,加上实际转速,所有的缺陷频率可自动计算出来。

### 4 风电机组功率控制技术<sup>[9-14]</sup>

#### 4.1 风力机变桨距控制

风电机组根据风轮叶片于轮毂的安装结构可分为定桨距和变桨距风电机两大类。其中,定桨距风电机的叶片固定安装在轮毂之上,风速变化时,桨叶安装角不会发生变化。

随着硬件设备和控制理论的发展,一直制约着变桨距风电机发展的可靠性问题渐渐被克服,变桨距控制技术重新得到重视。变桨距风电机的叶片与轮毂之间采用非刚性联结方式,允许叶片可以绕叶片纵梁进行节距调节,使得叶片相对于风向有不同的攻角。当风速持续变化时,叶片的攻角始终保持在最佳角度,从而使风电机组有可能在不同风速下始终保持其风轮的最佳转换效率,使输出功率最大。当风速大于切出风速时,风力机停止工作,桨叶顺桨以保护风力机不受到损坏。变桨距风电机与定桨距风电机相比具有在额定风速点以上输出功率平稳特点,同时,变桨距风

电机的叶片较薄,结构简单、重量小,使得发电机转动惯量小,易于制造大型发电机组。因此,大型风电机组采用变桨距技术。

传统的变桨距方式主要有电液伺服和电气伺服两种形式。出于限制动态转矩的目的,需要限制变桨距机构的输出节距角变化值,一般为 $5 \sim 12^\circ/\text{s}$ 。对于大型风力发电机组,叶片改变节距角时所需的驱动力相对比较大,且对变桨距机构的强度和定位精度都有较高的要求。所以,目前生产和运行的大型风力发电机组的变距装置都采用液压系统作为动力系统。

#### 4.2 风力机偏航控制

偏航控制系统是风电机组控制系统的重要组成部分。偏航系统一般由偏航轴承、偏航驱动装置、偏航制动器、偏航计数器、扭缆保护装置、偏航液压回路等组成,主要作用有两个:

(1) 与风电机组的控制系统相互配合,使风轮始终处于迎风状态,提高风电机组的发电效率;

(2) 保障风电机组的安全运行。

风电系统的偏航控制系统主要分为两大类:被动迎风偏航系统和主动迎风系统,前者多用于小型的独立风电系统,由尾舵控制,风向改变时,被动对风;后者则多用于大型并网型风电系统,由位于下风向的风向标发出的信号进行主动对风控制。因为自然界风的方向总在变化,所以,必须不断转动机舱使得风轮始终正面受风,增大风能的捕获率。但由于风向仪的精度及位于下风向等问题,不能做到100%对风,这不但降低了风能最大捕获率,也使对称的风电机组桨叶运行时受力不均,导致机组的振动与叶片的疲劳。因此,如何提高对风精度值得关注,需要进行更深入的理论研究,提出更有效的控制策略与算法,提高对风精度。

#### 4.3 风力发电机控制

目前,大型风电机组多数采用双馈异步风力发电机,双馈发电机的定子绕组接工频电网,转子绕组由具有可调节频率、相位、幅值和相序的三相电源激励,一般采用交-直-交变频器(变换器)。双馈发电机可在不同的风速下运行,其转速可以随风速的变化作相应调整,使风力机的运行始终处于最佳状态,提高了风能的利用率。同时,通过控制馈入转子绕组的电流参数,不仅可保持定子

输出的电压和频率不变,还可调节电网的功率因数,提高系统的稳定性。

#### 4.4 功率控制策略

(1) 基于风速的风力机输出功率控制方法,当风速在切入风速和额定风速之间变化时,采用变速控制方法,追踪最佳功率曲线,获得最大功率;当风速在额定风速和切出风速之间变化时,采用变桨距控制方法,调节桨叶桨距角的变化,保持额定功率不变。该方法的特点为能根据风速的大小选用不同的控制方法,实现风力机最大功率的输出,提高了发电机组风能利用效率,同时保证了风力机运行的稳定性和可靠性。

(2) 基于风向标和输出功率的风力机偏航控制方法,在风向变化绝对值 $> 15^\circ$ 时,采用风向标控制方法; $\leq 15^\circ$ 时则采用功率控制方法,因风向、风速变化会引起发电机输出功率变化,功率检测仪测得发电机输出功率,只有在风向变化时才进行偏航控制,风速变化对功率控制方法仅仅视作干扰信号。其中,功率控制方法又分为逆时针旋转、顺时针旋转和原位停止3种工况。该方法能缩短风力机对风时间,提高风力机对风精度、发电机组风能利用效率和风力机使用寿命。

### 5 低电压穿越(LVRT)技术<sup>[15]</sup>

#### 5.1 低电压穿越及其控制要求

(1) 当电力系统发生非永久性短路故障而造成电网电压下降时,危害极大。吉林西部仅2008年就多次发生因小的电网故障造成方圆200 km范围内的40万kW风电机组同时全部切除的现象;在甘肃玉门、甘肃安西、宁夏贺兰山风电场发生过类似的情况;甚至某些电气化铁路附近的风电场在机车经过时,也曾发生风电场内风电机组大部分甚至全部切除的现象。MW级双馈感应风电机组如何在故障期间不脱离电网,即为了使风电机组在故障后及时向系统提供电压和无功的支持,如何避免故障期间对风电机组齿轮传动机构和转子电力电子变流器的损伤。

(2) 综合考虑风电机组自身的安全性和新的人网规程要求,风力发电机组应满足要求:①当发生三相对地短路故障(电压跌落至15%)时,风力发电机升压变压器高压侧与电网的连接,至少应维持150 ms(60 Hz时,9个周期)而不脱网;

② 在发生不对称故障(如单相接地短路、两相相间或两相接地故障)时,风力发电机必须能够抵御和穿越低电压,直到断路器清除故障。

发达国家风电运营商已开始要求新采购的风电机组具有低电压穿越能力,同时,风电制造商为了保证产品顺利销售,也采用了很多改进措施,以提高风电机组的低电压穿越能力,并通过专门机构测试。但当前制造商大多是凭经验增大转子侧变流器的容量和齿轮箱静态转矩余量,结果是将风电机组的电流、电压应力转移到齿轮箱及大轴的机械应力,由于齿轮箱及大轴有一定的疲劳寿命周期,不会在测试时立刻就损坏,但这种方法势必给风电机组带来潜在的危害。

## 5.2 采取措施

为减少系统故障期间风电机组转子上不平衡转矩对齿轮传动机构的损伤,常用控制方法有:

(1) 无源转子泄放电路。包括无源转子泄放电路、转子泄放及电压嵌位电路、有源转子泄放电路(三相整流和 IGBT 斩波)。

(2) 定子侧电力电子开关加转子泄放电路。

(3) 改进交流励磁变流器(MSC)控制策略,这类方案的优点是只需修改励磁变流器的电流控制策略,不改变双馈感应发电机主电路,但有些文献没有考虑转轴及齿轮箱承受的瞬态转矩,文献指出,转轴及齿轮箱承受的瞬态转矩应限制在 1.5 TN 范围,但会产生转矩振荡。

研究表明,双馈感应发电机穿越电网不对称故障的效果并不理想,正常的双馈感应发电机转子侧励磁变流器(MSC)只能承受负序电压分量不超过  $20\% U_n$  的电网不对称故障,并且采用有源转子泄放电路方案时,转子泄放电路只能起到有限的辅助作用。通过修改励磁变流器的电流控制策略有助于增强穿越电网故障低电压的能力,但试验波形表明转矩仍在  $\pm 1$  TN 范围振荡,这种现象的发生对双馈感应发电机齿轮箱的机械结构危害极大。

(4) 双馈感应发电机定子侧串联有源变换器。

## 5.3 各种控制方法低电压穿越特性

(1) 转子旁路保护电路(Crowbar Circuit)无法兼顾转子侧变流器以及齿轮箱等机械部件实现全面保护,不同故障类型以及不同故障程度下的

保护电路参数也难以统一。

(2) 转子旁路加定子侧电力电子开关的组合电路需要同时加大电网侧变换器(GSC)和转子侧变换器(MSC)的容量,同时,不对称故障暂态期间电网侧变换器(GSC)连续保持有效的矢量控制以及故障后 20 ms 快速并网等操作具有很高的难度。

(3) 改进变换器控制算法提高低电压穿越能力的方法是以足够强大的励磁电源来抑制转子的感应电流作为基础的,但在电压跌落较大甚至到零值等极端情况下是不现实的。

(4) 定子侧有源保护电路在剧烈暂态变化的极端不对称故障期间保持串联变换器(SGSC)有效的矢量控制也是难以实现的。因此,就目前为止主流双馈感应风力发电机组低电压穿越问题仍是一个世界性的难题,非常具有挑战性。

## 6 多端电压源换流器高压直流输电风电场并网<sup>[16-17]</sup>

多端电压源换流器高压直流输电(MVSC-HVDC)用于风电场并网的联网方式,结果表明,DFIG 的等效模型能够正常稳定工作,该并网方式和控制策略使得在逆变侧发生故障时有较快的恢复特性,且具有良好的控制效果。目前,所有的风电场对提高交流系统稳定性几乎没有贡献,随着风能发电在整个发电量中的比重越来越大,应该对交流系统无功的支撑、暂态恢复、系统的稳定以及电压和频率的调节等方面发挥更大的作用。为了解决这些问题,人们往往从其他的方面入手,而忽视了对联网方式的研究。

随着电力电子技术的发展,采用 VSC-HVDC 联网具有以下优点:① VSC-HVDC 的换流站可对有功和无功独立控制,控制灵活方便;② VSC-HVDC 采用全控型器件,可工作在无源逆变方式,使利用 VSC-HVDC 为远距离孤立负荷送电成为可能;③ VSC 不仅无需交流侧提供无功功率,而且能够起到 STATCOM 的作用,即动态的补偿交流母线无功功率,稳定交流母线电压;④ 多个 VSC 可连接到一个固定极性的直流母线上,易于构成与交流系统具有相同拓扑结构的多端直流系统,运行控制方式灵活多变。对于 DFIG 的建模仿真和 VSC-HVDC 相关问题的研究很多,但基于 VSC-HVDC 用于风电场联网的研究鲜有报道。

VSC-HVDC 技术为风电的远距离传输提供一种新的可能,采用电压源换流器和绝缘栅双极晶体管为基础,将高压直流输电的技术应用于只有几兆瓦到几十兆瓦的功率相对小的直流输电系统。VSC-HVDC 的点对点控制和运行方式简单,输出电压波形好,功率因数高,在小功率传输方面具有很好的经济性。VSC-HVDC 除了具有传统的 HVDC 的优点外,还可用来连接远方小的发电厂,向小型孤立的远距离负荷供电,更为经济地向市中心供电,方便地连接各种分散式电源,因此,适合地处偏远地区的风电场远距离输电。

“十一五”期间国家电网公司和南方电网公司正在进行 VSC-HVDC 用于风电场联网的可行性研究。华东电网正在建设南汇风电场联网的 VSC-HVDC 示范工程。南方电网拥有丰富的陆上和海上风能资源,预计 2020 年广东风电装机将达到 3 000 MW 以上,采用 VSC-HVDC 用于海上风电场联网易构建 MVSC-HVDC 的输电结构。

目前,世界上已采用 VSC-HVDC 用于风电场联网方面的工程有:

(1) 1999 年 6 月,瑞典采用 VSC-HVDC 技术将 Gotland 岛的风力发电经过地下电缆送往本土,这是世界上第 1 个商业化的 VSC-HVDC 工程。随后在澳大利亚、丹麦、美国-墨西哥、美国、挪威、爱沙尼亚-芬兰、德国等国先后建成了容量和输送距离都不断增加的柔性直流输电系统。

(2) 2009 年,德国采用 VSC-HVDC 工程将世界上最大的风电场接入电网运行,其规模为 80 台 5 MW 的风机,距离海岸线约 130 km。

(3) 美国将在 2010 年建成目前世界上电压等级最高( $\pm 200$  kV)的 VSC-HVDC 系统。

可以看出,在世界范围内,采用 VSC-HVDC 系统将海上大规模风电场的风电送往负荷区,已经有了一定的运行经验。然而,我国还没有 VSC-HVDC 用于风电场接入和电力外送的示范工程。

## 7 结 语

风能是一种开发成本低、清洁、安全、可再生的能源形式,越来越受到重视。本文综述了风机的控制、结构设计、远程监控、低电压穿越以及新型并网(多端电压源换流器高压直流输电)技术,对推动我国电风事业的健康发展起到了一定的指

导意义。

## 【参 考 文 献】

- [1] WANG Zhixin, JIANG Chuanwen, AI Qian, et al. The key technology of offshore wind farm and its new Development in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1): 216-222.
- [2] 章安志,程大章. 风力发电系统控制技术的研究[J]. 低压电器, 2008(17): 49-52.
- [3] 刘其辉,贺益康,张建华. 并网型交流励磁变速恒频风力发电系统的控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 109-114.
- [4] 童菲,晁勤,曹慧. 应用 matlab 对风电系统的仿真[J]. 低压电器, 2007(19): 6-8.
- [5] WU Dingguo, WANG Zhixin. The study of multimode power control system for MW variable-speed wind turbine[J]. WSEAS Transactions on System, 2008, 7(10): 890-899.
- [6] WU Li, WANG Zhixin, TAMURA J. Stabilization of wind farm output with doubly-fed asynchronous machine[J]. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2007, 6(2): 222-227.
- [7] 王之华,王志新. 大型风力发电机组状态监测与控制技术研究[J]. 机电一体化, 2008(11): 41-43, 50.
- [8] 王成,王志新. 大型风电场远程监控系统及无线网络技术应用研究[J]. 自动化仪表, 2008(11): 16-20.
- [9] KONG Yigang, WANG Zhixin. Optimal power capturing of multi-MW wind generation system [J]. WSEAS Trans on System, 2008, 7(3): 125-132.
- [10] 孔屹刚,王志新. 风电机组可靠性建模和动态过程分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 652-656.
- [11] 朴海国,王志新. 风电机组偏航控制系统的新型算法——V<sub>HC</sub> 研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(8): 1028-1033.
- [12] 王志新,张华强. 风力发电技术与功率控制策略研究[J]. 自动化仪表, 2008(11): 1-6.
- [13] 朴海国,王志新. 风电机组偏航 FUZZY-PID 合成矢量控制系统仿真研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 183-188, 202.
- [14] KONG Yigang, WANG Zhixin. Modeling and analyzing the hydraulic variable-pitch mechanism for a variable-speed wind turbine [J]. Wind Engineering, 2007, 31(5): 341-352.

(下转第 19 页)



图5 太阳能跟踪系统光伏发电阵列

通信控制器的功能如前文所述,配置大屏幕显示供过往行人观看,起宣传作用;配置液晶显示供技术人员做人机界面使用;远程通讯利用无线通信将数据传输到监测计算机,使用 LabVIEW 的 VISA 节点实现串口通信;采用 LabVIEW 编程进行数据处理和波形显示;客户计算机利用 DataSocket 技术进行远程数据监测,并实现数据在 Internet 上实时传输<sup>[4]</sup>。经过近 1 年的运行,通过利用通信控制器实现远程通信,每天在监控主机生成一个监测数据记录文件,经过对记录数据进行分析,可得到一年四季光照强度和日发电量的变化,并可通过试验测试得到采用自动跟踪式的发电设备和固定式的发电设备发电功率曲线,以及控制直流电流和直流电压找到太阳能电池板发电的最大功率曲线。分析研究这些数据,可了解太阳能电池板发电受光照强度、温度、灰尘等因素的影响,对研究太阳能电池板发电的性能,从而更好地实现控制,提高发电效率有很大的帮助作用。

下面介绍一个实际应用实例。在 12 台跟踪式太阳能光伏阵列中选择两台进行试验,首先将 6# 电池板阵列的太阳能自动跟踪器关闭,并通过手动调节将电池板阵列调整为面向正南、仰角 45° 的位置,使其固定不动;而 7# 电池板阵列的太阳能自动跟踪器启动,使其自动跟踪太阳的位置。在此状态下测量两块电池板阵列的电压、电流和功率,因两块电池板阵列并联接在直流母排上,所以电压值为同一值,跟踪与不跟踪的电流变化曲

线和功率的变化曲线是一致的。利用通信控制器采集一天的数据远传到后台监控主机,经后台监控软件绘制的发电功率对比曲线如图 6 所示。

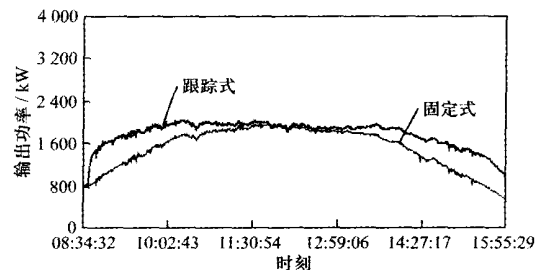


图6 太阳光跟踪式和固定式发电功率曲线对比

由图 6 可见,在早晚时间段上跟踪式的电池板阵列比固定式的电池板阵列在很大程度上提高了输出功率;而在中午时分二者输出功率基本一致。

#### 4 结 语

本文介绍的通信控制器经过近 1 年的运行验证,具有工作稳定、功能全面、人机界面友好、使用操作方便、结构简单、成本低、适用性强等特点。

该通信控制器除完整的通信功能外,还具有系统运行参数整定及显示功能,以及模拟量和开关量采集、计算功能,是一种功能较完整的光伏并网发电监控装置。

#### 【参考文献】

- [1] 张鹏,王兴君,王松林. 光线自动跟踪在太阳能光伏系统中的应用[J]. 现代电子技术,2007,25(14): 189-191.
- [2] 沈文,LEE E,詹卫前. AVR 单片机 C 语言开发入门指导[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [3] 潘新民,计算机通信技术[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [4] 杨乐平,李海涛. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

收稿日期:2009-08-21

(上接第 7 页)

- [15] 胡书举,李建林,许洪华. 风力发电用电压跌落发生器研究综述[J]. 电力自动化设备,2008,28(2): 101-103.
- [16] 李响,王志新,刘文晋. 海上风电柔性直流输电变

流器的研究与开发[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):10-14,20.

- [17] 王志新,李响,刘文晋. 海上风电柔性直流输电变流器研究[J]. 电网与清洁能源. 2008,24(8):33-37.

收稿日期:2009-09-09