

# 风力发电变流器发展现状与展望

马伟明, 肖 飞

(海军工程大学电力电子技术研究所, 武汉 430033)

[摘要] 风电机组宽泛的使用环境,使作为机组关键设备之一的大容量变流器必须满足高功率密度、高可靠性与优良控制性能等要求。国产风电变流器的研发近几年有了较快的发展,但总体上依然落后于国外先进水平。文章对风电变流器,重点是直驱式全功率变流器的若干关键技术做了介绍,给出了相关问题的解决思路。

[关键词] 风力发电; 变速恒频; 双馈型; 直驱型; 变流器

[中图分类号] TM313 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)01-0011-10

## 1 前言

风力发电在过去的10年间一直作为世界上增长最快的能源。作为世界第二大能源消费国,我国已将能源列为核心发展战略之一,国家能源委员会的成立意味着能源问题是涵盖国家各层面的战略问题。在新能源战略规划中,风力发电占有重要地位。我国风能资源丰富,第四次全国风能资源普查的阶段性成果显示,不包括青藏高原,我国陆上50 m高度风能资源潜在开发量为23.8亿kW,70 m高度可以达到28.5亿kW,110 m可以达到38.04亿kW,近海5 m到25 m水深线以内区域可装机容量约2亿kW。受传统石化能源价格上涨和国家政策鼓励等因素的影响,我国的风力发电行业也进入了快速发展时期。数据显示,2008年我国新增风电机组5 130多台,装机容量624.6万kW,新增装机增长率为89%,2009年新增1 200万kW风电装机容量。目前,中国风电装机总容量已连续5年实现翻番,并跻身全球10大风能市场,位列美国 and 德国之后,成为全球发展速度最快的风力发电市场。

在风电装机容量快速增长的同时,风电技术

也取得了长足进步,特别是风力发电机组自身,由20世纪90年代的定桨距、恒速技术,发展到现在的变桨距、变速技术,而且单机容量不断刷新纪录。兆瓦级大功率风电机组正逐步成为主流,海上风电技术逐渐成熟,有力地促进了特大型风电机组的发展(单机容量大于或等于5 MW)。变速恒频风电机组的共同特点是需要辅之相应的电力电子变流装置,配合发电机进行功率控制,使风机在较宽转速范围内实现最佳功率捕获,并且实现对电网低电压穿越及无功功率支持。电力电子技术在其中发挥了巨大的作用,其涵盖电力电子器件、变流电路和控制电路三个部分,是电力、电子、控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科,和现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关,如图1所示。

我国大型风力发电技术自主水平相对滞后,且发展不均衡。风机叶片、发电机、齿轮箱等一些关键部件虽已实现国产化,但变流器、控制系统、高性能齿轮箱与轴承的关键技术等还主要依赖于国外进口。当前,陆地风力发电机组主力机型的单机容量以1.5 MW、2 MW为主,在这一功率等级及以上的全功率变流器几乎被国外产品所垄断,严重制约了

[收稿日期] 2010-06-08

[基金项目] 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目(50721063)

[作者简介] 马伟明(1960—),男,江苏扬中市人,中国工程院院士,海军工程大学教授,主要从事舰船电气工程领域研究;

E-mail: maweimin@public.wh.hb.cn

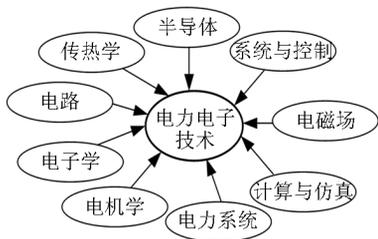
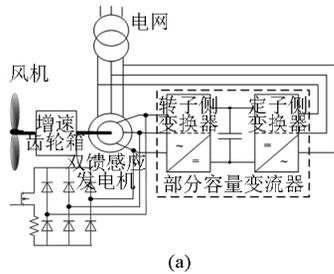


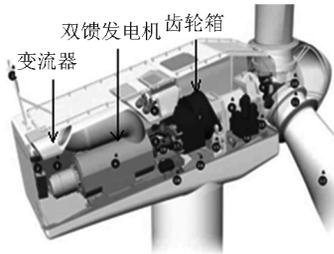
图1 电力电子技术与其他学科的交叉

Fig.1 Power electronics technology intersected by other subjects

并控制输出功率因数,定子侧变流器保持直流侧电压稳定。



(a)



(b)

图2 双馈异步发电系统结构及机舱布置示意图

Fig.2 Structure of the doubly fed induction generation system and the arrangement of the equipments

我国风电产业的发展。近年来,国内在兆瓦级风电变流器的研发上也取得了较大进展,但还需接受用户长期现场运行的考验。其中,由海军工程大学研制的直驱型2 MW级全功率变流器已开始小批量投产,合肥阳光、金风科技等其他公司同类产品也正在产业化过程之中。为应对风力发电的迅速发展和装机容量的增长,亟需推进我国风电设备行业的自主创新能力和提高国产技术和装备的竞争能力。

文章针对两种主流风电系统,对兆瓦级风力发电变流器进行了介绍,重点分析了直驱型风力发电变流器的控制、设计及低电压穿越策略。

## 2 两种典型风力发电系统及其发展趋势

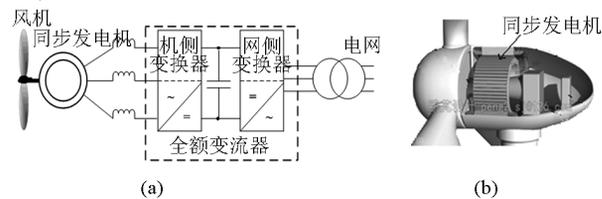
按照发电机转速的不同,风电系统可分为定转速、受限变转速和变转速3种;根据传动链组成,风电系统可分为齿轮箱驱动型和直接驱动型;根据变流器容量的不同,分为部分容量变流器风电机组和全部容量(全额)变流器风电机组两类。

定转速和受限变转速发电只能在某一风速下工作于最大出力点,不能实现最大风能的抽取,效率低,且可靠性不高,将逐步退出历史舞台。变速发电采用同步发电机或双馈发电机,风速变化时,转速也随之变化,保证在不同风速下,风轮机都工作在最高效率点。通过电力电子变流器,使电机接入恒频、恒压电网发电。目前在变速恒频技术中,双馈型风力发电系统和同步直驱型风力发电系统已成为主流。

### 2.1 双馈型和同步直驱型风力发电系统的比较

典型的双馈型变速恒频风力发电系统包括多级齿轮、双馈感应发电机和背靠背双PWM变流器(见图2)。双馈发电机定子侧直接与电网连接,转子侧通过背靠背双PWM变流器与电网连接,其中转子侧变流器调节转子的频率和转速,实现变速恒频运行,

同步直驱风力发电系统中同步发电机输出频率和电压随转速变化的交流电,经背靠背变流器系统接至电网(见图3)。目前,市场上直驱式风力发电机可分为电激磁同步发电机和永磁同步发电机两大类。同步直驱风力发电系统采用的是全功率变流器,一般放置于塔筒底部。



(a)

(b)

图3 直驱式发电系统结构及机舱布置示意图

Fig.3 Direct driven generation system and the arrangement of the equipments

目前国际上双馈发电风电系统占据了一半以上的市场份额,而同步直驱型风力发电系统在大功率应用场合有着独特的优势。表1为两种典型风力发电系统的比较。

表1 两种典型风力发电系统比较

Table 1 Comparison of two typical wind energy generation systems

系 统	优 势	局 限 性	大 功 率 产 品 型 号
双馈型风力发电系统	电机转速高, 体积重量小; 变流器中仅流过转差功率, 容量小	多级齿轮箱存在摩擦损耗、发热、噪声等问题, 需要定期维护; 低压穿越难度大	丹麦 Vestas V90 (3.0 MW) 西班牙 Gamesa G128 (4.5 MW) 德国 Repower 5 M (5 MW)
同步直驱型风力发电系统	无齿轮箱, 机械噪声小, 机组寿命、系统效率和运行可靠性高; 发电机通过变流器与电网隔离, 更容易实现低压穿越功能	发电机转速较低, 转矩较高, 极数较多, 导致体积较大; 变流器容量需按 100% 功率选取	GE 公司 Multi-megawatt 系列 德国 Enercon E-126 (6~7 MW) ABB PCS6000 (5 MW)

## 2.2 风力发电技术发展趋势

纵观国内外的发展情况, 为提高风力发电效率, 降低成本, 改善电能质量, 减少噪声, 实现稳定可靠运行, 大型风力发电技术呈现出如下特点:

1) 单机容量稳步上升。目前双馈异步发电机组的单机容量已达到 5 MW, 其转轮直径为 126 m, 采用 3 级齿轮箱结构(传动比为 97)和 6 极双馈异步发电机。直驱型风电机组单机容量可达到 7 MW, 采用无刷励磁同步发电机和全容量变流器<sup>[1]</sup>, 容量为十几兆瓦的海上风电机组也已见诸报道。

2) 直驱式和半直驱式传动系统的应用范围越来越广泛。无齿轮箱的直驱方式虽然会增加风力发电机的设计开发成本, 但却能显著提高系统运行的可靠性, 降低系统运行维护费用, 因而受到了越来越广泛的关注和应用。但是, 多极发电机因绕组布置空间的要求导致重量和体积大幅增加, 因此采用折中理念的半直驱布局在大型风机设计中也得到了应用<sup>[2]</sup>, 如德国 Multibrid 公司设计的 M5000 采用了半直驱技术。直驱式和半直驱式风力发电机必须采用全功率变流并网技术, 全容量变流器可以更容易实现低电压维持运行等功能, 满足电网对风电并网日益严格的要求。随着电力电子技术的发展, 设计大功率变流器也变得更容易<sup>[3,4]</sup>。

3) 永磁同步发电机得到了更多应用。永磁同步发电机不从电网吸收无功, 无需励磁绕组和直流电源, 也不需要滑环碳刷, 结构简单且技术可靠性高, 对电网运行影响小。在大功率变流装置技术和高性能永磁材料日益完善的背景下, 大型风机越来越多地采用永磁同步发电机<sup>[5]</sup>。

4) 对变流器容量及可靠性要求越来越高。随着风力发电的快速发展和直驱式、半直驱风电系统的广泛应用, 变流器的容量也要随之增大。由于可控电力电子器件的蓬勃发展, 变流器领域已逐步出

现交—直—交变流器一统天下的局面。而为实现大容量、高质量输出波形及高可靠性, 多电平变流器开始得到应用, 如中点二极管箝位多电平变换器、飞跨电容多电平变换器、级联 H 桥多电平变换器等通用多电平变换器等<sup>[6]</sup>。

## 3 风力发电变流器中的关键技术

电力电子变流器作为风力发电与电网的接口, 既要风力发电机进行控制, 配合风机控制器实现对风能的捕获, 又要向电网输送优质电能, 还要实现低电压穿越等功能。并且由于风电机组对变流器的性能及空间尺寸有严格要求, 对变流器系统的控制、电气及结构等设计也提出了较高要求。整个变流器系统设计包括顶层电气设计、控制算法设计以及结构散热设计等。

### 3.1 变流器顶层电气设计

主要涵盖了变流器拓扑形式、参数范围、保护与通信接口方式等电气性能的研究。如: 双馈型系统中, 变流器必须采用双 PWM 变流器, 保证功率能够双向流动。而在直驱式系统中变流器可以有不同的拓扑结构。根据每种电力电子变换拓扑的特点, 整个系统的控制方法都会相应地发生变化。采用背靠背双 PWM 全控拓扑结构, 与机侧采用不控整流桥的变流器相比, 可以大大减少机侧电流谐波; 而且通过解耦控制, 可以实现对电机的多种控制策略, 如最大转矩/电流比控制、效率最优控制、定子磁通矢量控制、直接转矩控制以及更多现代智能控制方法。

标准、可靠的通信方式是实现信息实时交换与能量管理的前提。在变流器通信系统设计中, 要根据风电系统要求并结合变流器功能, 融合信息技术, 合理设计快捷、可靠的通信方式。同时完善、可靠的保护设计也是保障人员和系统安全的关键环节, 必须合理地设计保护环节和整定保护值, 实现对系统的可靠保护。

### 3.2 变流器控制技术

典型的双馈和永磁直驱变速恒频风电系统中, 都采用背靠背双 PWM 变流器(如图 2、图 3 所示)。包括电机侧变流器(或转子侧变流器)与电网侧变流器, 能量可以双向流动。对永磁同步电机直驱系统, 电机侧 PWM 变流器通过调节定子侧的  $d$ 、 $q$  轴电流, 实现转速调节及电机励磁与转矩的解耦控制, 使发电机运行在变速恒频状态, 额定风速以下具有最大风能捕获功能; 对双馈发电系统, 转子侧变流器通过调节转子侧  $d$ 、 $q$  轴电流, 实现转速调节及有功、无功功率的解耦控制。电网侧 PWM 变流器同样通过调节网侧的  $d$ 、 $q$  轴电流, 保持直流侧电压稳定, 控制流向电网的无功功率, 通常运行在单位功率因数状态, 同时还要提高注入电网的电能质量。下面以永磁直驱型变流器为例介绍其具体控制方法。

永磁直驱型变流器系统需要配合风机控制器(塔基主控制器)实现将发电机发出的变频率、变幅值的交流电能转换为工频电能, 整个风机系统的控制图如图 4 所示。变流器的控制包括永磁同步电机的无速度传感器控制与电网侧 PWM 逆变器控制。通过控制发电机和直流环节之间的整流器而控制发电机的转速, 同时将电机发出的电能变换后输入直流环节, 达到最大风能捕获的目的, 如果采用转子定向控制, 还需要根据机端电压电流对转子位置进行估计; 通过控制电网侧逆变器实现有功传输和无功补偿, 使电功率稳定地向电网传输。同时, 还需要合适的滤波器来保证电能质量。要实现低压穿越功能, 还需要对电网故障进行实时检测。

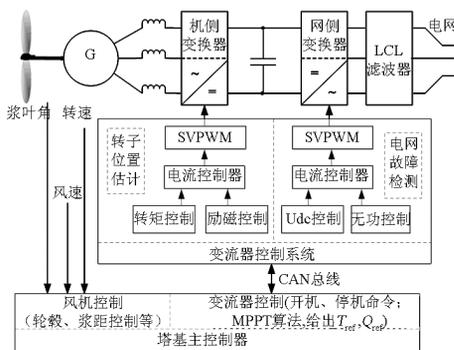


图 4 一种直驱风机系统的控制框图

Fig. 4 Control frame of one type of direct driven generation system

对变流器进行电流控制一般都在两相旋转坐标下进行, 对机侧变流器控制牵涉到旋转变换方向的

选取。根据定向方式可将发电机侧的控制分为定子电压定向控制和转子磁场定向控制等。采用机端定子电压定向比较简单, 但不能准确控制机端电压, 且难以实现能量的双向流动。而采用转子磁场定向可以克服这些弊端, 但实现较为复杂, 常用的方法有模型参考自适应辨识法和滑模观测器法等。例如采用滑模观测器法首先需要建立内置式永磁同步电机静止坐标系下的扩展反电动势数学模型<sup>[7,8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & \omega(L_d - L_q) \\ \omega(L_d - L_q) & R + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \{ (L_d - L_q) \{ \omega L_d - L_q \} + \omega \psi \} \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

然后构造滑模电流观测器的状态方程:

$$L_d \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & -\omega(L_d - L_q) \\ \omega(L_d - L_q) & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - K \begin{bmatrix} \text{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \text{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3)$$

最后在扩展反电动势估计值的基础上获取转子位置角和转速信息, 从而实现对永磁同步风力发电机的转矩电流和励磁电流的独立控制, 可以设计最大转矩/电流比控制、单位功率因数控制等控制策略。

对于网侧变流器, 为实现电网故障下的运行, 需要引入正负序坐标系下的双电流内环控制。正序电流内环解耦控制算法为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} v_d^P = -(K + \frac{K_{il}}{s})(i_d^{P*} - i_d^P) + \omega L i_q^P + e_d^P \\ v_q^P = -(K + \frac{K_{il}}{s})(i_q^{P*} - i_q^P) - \omega L i_d^P + e_q^P \end{cases} \quad (4)$$

类似可得负序电流内环解耦控制算法:

$$\begin{cases} v_d^N = -(K + \frac{K_{il}}{s})(i_d^{N*} - i_d^N) + \omega L i_q^N + e_d^N \\ v_q^N = -(K + \frac{K_{il}}{s})(i_q^{N*} - i_q^N) - \omega L i_d^N + e_q^N \end{cases} \quad (5)$$

目前, 对于组成背靠背变流器的 PWM 整流器与逆变器, 一般对两侧的变流器均单独建模并设计

其控制参数,然后在联机调试时再对两侧变流器的控制参数进行调整。由于这种设计方法忽略了对动态有影响的环节与数字系统的延时,以及模型存在的误差,使得这些模型难以满足实际要求。因此,需要全面考虑两侧变换器的参数,以及机侧与网侧变流器的动态过程,结合 PWM 整流器、PWM 逆变器的模型及背靠背系统的特点,通过合理假设与简化,对变流器这一强非线性系统进行等效,用于指导控制器的设计,保证系统的稳定性与动静态性能。

### 3.3 变流器结构及散热设计

由于风电机组可能会工作在各种恶劣环境中,如风沙、严寒、沿海等,且变流器在风电机组中的安装空间非常有限,这就要风电变流器必须具备高功率密度、高防护等级与高可靠性,这对系统的结构设计及生产提出了较高要求。在小容量通用变流器中一些无足轻重甚至根本不存在的问题却成为风电变流器设计中的技术难点,如开关器件的限制,各种连接线、接头及其线路杂散参数的影响、散热系统设计等。

综合上述因素的影响,3 MW 以下变流器的设计采用两电平拓扑较为合理,三电平结构的设计会使系统成本增大。两电平变流器又可采用功能模块的并联结构实现,如器件并联、两个三相半桥模块并联,也可采用单个大功率 IGBT 功率模块构成一个三相半桥实现全部的能量传送。为实现高功率密度,前者的总体设计会较为复杂,且对生产与工艺有较高要求,在控制上则要求实现器件或设备的均流控制;后者的设计会相对简单,对生产与工艺的要求相对降低,控制也相对简单,但对开关器件有较高要求,同时必须尽量减小线路寄生参数,削弱较大  $di/dt$  和  $du/dt$  对开关器件的影响。

考虑到变流器生产、安装、维护的便利和空间限制,在结构设计上需要考虑采用模块化的设计理念,比如说将一个桥臂的两个 IGBT 功率模块、直流母线电容、吸收电容与散热系统全部集成,构成一个集成功率变换单元,只需 6 个集成功率变换单元便可构成一套背靠背变流器,且集成功率变换单元之间可互换,也可以集成功率变换单元,构成其他结构的大功率变流器。

由于变流器需要在  $-15 \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境温度范围内可靠工作,且需要防盐雾腐蚀、潮湿,对体积也有着严格的限制,变流器的结构及散热系统设计需要充分考虑这些因素,在大功率变流器中通常采用

液体闭式循环散热与空气循环冷却相结合,而在海上风力发电场合,可以利用海水进行外部冷却。

### 3.4 低压穿越技术

#### 3.4.1 低压穿越定义

随着风场、风电机组的容量不断增大,出于对电力系统稳定性的要求,期望风场或风电机组的功能和表现更接近于传统的发电机组,即风电机组要积极参与提高电力系统稳定性和可靠性的调节工作。风电系统低电压穿越能力是指风电系统在并网点电压跌落时,能够保持并网,并向电网提供无功功率,支持电网恢复,直到电网正常工作。造成电网电压跌落的原因主要有:电网故障、过负荷、风场附件的大功率设备启动等,如图 5 所示。

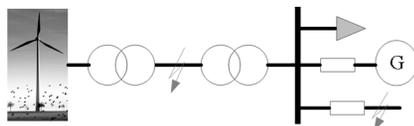


图 5 电网电压跌落原因示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the reason for voltage sags

#### 3.4.2 现行的低压穿越标准

欧洲等发达国家已相继制定了风力发电机组具备电网故障运行能力的强制性标准,且不同国家有不同的要求<sup>[10-13]</sup>。这些标准大体都可以用图 6 所示的低压穿越要求曲线来表示,不同的要求也就体现在时间点和电压跌落程度的差异上。当电网电压在曲线以上时,风电机组要保持并网,并能够在电压跌落及恢复阶段向电网提供无功功率,帮助电网电压恢复稳定。只有当电网电压低于规定曲线以后才允许风电机组脱网。这就要求风电系统必须具有较强的低电压穿越能力,能快速向电网提供无功支持。德国要求电网电压跌至 15% 时持续 300 ms(即在图 6 中  $t_1 = 0.3\text{ s}$ 、 $U_1 = 15\%$ ),澳大利亚要求电网

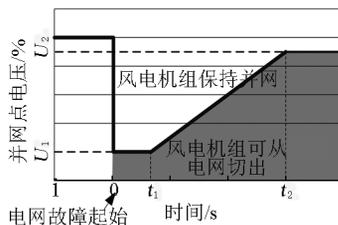


图 6 风电场低压穿越要求曲线

Fig. 6 Requirements of the low voltage ride through curve in wind farms

电压跌至 0 % 时持续 175 ms ( $t_1 = 0.3$  s,  $U_1 = 0$  %), 而且德国和西班牙明确要求风电机组在低压穿越时, 要实现电网的无功支持, 且无功电流最大为 100 % 的额定电流。我国目前也已经制定了风电场低电压穿越的相关要求规范 ( $t_1 = 0.62$  s,  $t_2 = 3$  s;  $U_1 = 20$  %、 $U_2 = 90$  %) [14]。

目前, 国外一些产品已具备较为完善的低压穿越功能。如 ABB 公司的一些变流器可实现低压穿越, 在穿越期间可同时对电网进行无功支持; GE 风能公司的一些产品也可实现低压穿越, 还具有独立可选的电网随动无功补偿功能。自主开展对双馈和同步直驱风力发电系统的低电压穿越问题的深入研究、设计并构建相关试验测试平台, 是国内相关研究人员必须面临的挑战。

### 3.4.4.3 低压穿越技术中的关键问题

在电网电压跌落情况下, 对双馈机组和同步直驱风电机组的行为特性与提高其低压穿越能力的研究, 已成为国内外风电技术研究的热点问题。尤其是电压跌落深度较大时, 仅依靠控制策略的作用有限, 需要对变流器进行保护, 将多余的能量进行存储或释放。

对于双馈型机组, 由于电机和电网直接相连, 电网发生不对称跌落对电机特性有直接影响, 其动态过程对于双馈型机组较为复杂, 控制难度大。首先, 定子电压骤降将引起定子电流增大, 由于定、转子之间的强耦合, 使得转子侧也感应出较大电流, 而大电流会导致电机铁心饱和、电抗减小, 使定、转子电流进一步增大。而且, 定转子电流的大幅波动会造成发电机电磁转矩的剧烈变化, 对风电机组机械系统产生很大的扭切应力冲击。同时, 仅靠定、转子绕组自身漏阻抗不足以抑制浪涌电流, 过大的电流和电压会导致定转子绕组绝缘以及直流母线电容的损坏。可行的方法包括在定子侧、直流母线、转子侧增加硬件保护设备实现低压穿越。同时, 由于在电网跌落期间双馈发电系统中暂态浪涌电流的存在, 要求进行无功补偿时很可能会加剧系统的暂态过程, 因此还需要研究不同无功补偿时刻对系统稳定运行的影响 [14, 15]。

直驱型机组由于发电机和电网间由背靠背变流器实现了电气解耦, 因此, 电网的任何类型故障不会

对发电机运行特性造成直接影响, 只要变流器将多余能量通过制动电阻消耗掉或以其他方式存储起来, 确保其处于安全工作范围内即可, 发电机不需采取额外的控制策略, 因此现有的特大型风电机组中, 为实现电网对低压穿越的要求, 均采用了直驱型机组, 并配套有制动功率单元以实现低压穿越, 如图 7 所示。

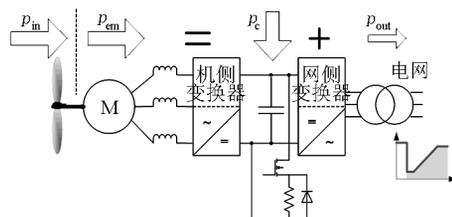


图 7 直驱型机组能量流动示意图

Fig. 7 Schematic diagram of energy flow in direct driven generation systems

简而言之, 在电网电压发生跌落时, 风电机组需要同时考虑系统能量管理和变流器自身的安全。其中的关键问题如下所示:

1) 快速有效的不对称电压、电流检测技术。电压跌落是电网中最为常见的故障之一, 有单相、两相对地故障、相间故障和三相故障等类型, 其故障类型和比例为: 单相对地故障 70 %, 两相对地故障 15 %, 相间故障 10 %, 三相故障 5 %; 还可以分为对称故障和不对称故障, 大部分电压跌落故障属于不对称故障。电压跌落的深度不等, 最低可以到零, 持续时间为 0.5 个电网电压周期到数秒。为实现可靠功率传输, 变流器控制系统须在尽可能短的时间内 (必须小于最严重情况时的不间断运行时间), 完成对不对称三相电网电压和电流的频率、相位、正序和负序分量等相关信息快速、准确的提取, 以及每相电压跌落程度的计算, 为低压穿越算法实现准确的信息。对电网不对称的有效信息, 进行快速、准确的提取一直是研究的热点和难点, 实时性越强, 难度越大。主要问题在于检测算法的准确性与快速性之间的矛盾, 以及算法本身的复杂程度。一种采用双  $dq$  变换 SPLL 算法可以较好实现检测的准确性与快速性, 具体算法见式 (6):

由此得到基于双  $dq$  变换的 SPLL 模型, 如图 8 所示。

$$\begin{bmatrix} U_d^+ \\ U_q^+ \\ U_d^- \\ U_q^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{U_{am} + U_{bm} + U_{cm}}{3} & \frac{\sqrt{3}(U_{cm} - U_{bm})}{6} & \frac{2U_{am} - U_{bm} - U_{cm}}{6} \\ -\frac{U_{am} + U_{bm} + U_{cm}}{3} & 0 & \frac{U_{bm} + U_{cm} - 2U_{am}}{6} & \frac{\sqrt{3}(U_{cm} - U_{bm})}{6} \\ \times & \frac{2U_{am} - U_{bm} - U_{cm}}{6} & 0 & \frac{U_{am} + U_{bm} + U_{cm}}{3} \\ \times & \frac{\sqrt{3}(U_{cm} - U_{bm})}{6} & \frac{U_{am} + U_{bm} + U_{cm}}{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \sin 2\theta \\ \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

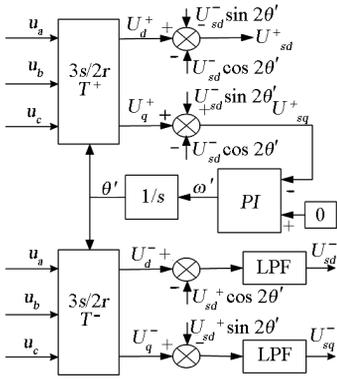


图 8 双 dq 变换 SPLL 模型

Fig. 8 SPLL model with double dq transformation

2) 变流器在电网电压跌落下的控制与保护策略。电网电压不对称时,对变流器的合理控制是双馈型机组和直驱型机组面临的共同问题。当电网电压不对称时,如果只对正序分量进行控制,则此时出

现的负序电压会产生很大的负序电流。严重时,将导致网侧变流器过流,甚至烧毁装置;负序电流的出现也会导致直流电压出现二倍工频的二次谐波,直流电压的波动导致电容频繁充放电,减少电容使用寿命,同时使交流侧产生 3 次谐波,电能质量变差<sup>[16-18]</sup>。因此,采取的应对措施包括抑制三相电压源型变流器交流负序电流的不平衡控制策略和抑制直流电压谐波的不平衡控制策略。但对于三相三桥臂的 PWM 变流器而言,如果没有零序通路,则使得直流电压无二次谐波与三相电流对称之间存在矛盾,即要使直流电压无二次谐波,则三相电流必须注入负序分量,使得三相电流不对称;反之,三相电流对称,则直流电压必然含有二次谐波。式(7)给出了此时正负序电流参考值的计算公式。随着单机容量的不断增加和电网对风电机组相关性能要求的提高,可尝试采用三相四线制变流系统来解决这一矛盾。

$$\begin{bmatrix} I_d^+ \\ I_q^+ \\ I_d^- \\ I_q^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{d,ref}^+ \\ I_{q,ref}^+ \\ I_{d,ref}^- \\ I_{q,ref}^- \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} U_d^+ & U_q^+ & U_d^- & U_q^- \\ U_q^+ & -U_d^+ & U_q^- & -U_d^- \\ U_d^- & U_q^- & U_d^+ & U_q^+ \\ -U_d^- & -U_q^- & U_d^+ & U_q^+ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{P_{ref} U_d^+}{D_1} + \frac{Q_{ref} U_q^+}{D_2} \\ \frac{P_{ref} U_q^+}{D_1} - \frac{Q_{ref} U_d^+}{D_2} \\ -\frac{P_{ref} U_d^-}{D_1} + \frac{Q_{ref} U_q^-}{D_2} \\ -\frac{P_{ref} U_q^-}{D_1} - \frac{Q_{ref} U_d^-}{D_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中

$$D_1 = (U_d^{+2} + U_q^{+2}) - (U_d^{-2} + U_q^{-2})$$

$$D_2 = (U_d^{+2} + U_q^{+2}) + (U_d^{-2} + U_q^{-2})$$

直驱型系统的主要问题在于机侧变流器输入能量与网侧变流器输出能量不匹配而导致直流电压上升,可采取措施储存或消耗未能送出的能量,目前广泛应用的方案是采用制动电阻的耗能方式。

当电压跌落持续时间较长时,无论是双馈型还是直驱型都需要考虑配合变桨控制来限制风电机组

捕获的风能,即通过调节桨叶减少风机端的输入能量,达到电压跌落时的功率平衡,但这个过程相对较慢。

3) 风电机组应对电网故障进行无功补偿。新的电网运行准则不但要求风电系统在电网电压跌落期间能够保持和电力系统之间的连接,并且要求根据电压跌落的幅度向电网提供不同的无功功率。比如在德国 E. ON 公司制定的标准中提出,在电网电压跌落 10% ~ 50% 区间提供额定电流 20% ~

100% 的无功电流补偿,而在电压跌落大于 50% 区间提供 100% 额定电流的无功电流补偿。这些严格的运行标准规范对风电机组尤其是变流器的控制提出了较高的要求,因此在变流器设计时需要充分考虑变流器自身的容量、控制和检测的实时性等。

## 4 风力发电变流器发展展望

### 4.1 高功率密度、通用模块化设计

风力发电机组容量的增长要求变流器的功率密度不断得到提高,同时未来的海上风场环境也要求系统有很高的可靠性和方便的维护性。因此需要采用功率等级更高的半导体器件和模块化的设计方式。目前风电变流器应用最广泛的开关器件为 IGBT,而随着变流器容量的增加,功率等级更高的 IGCT 将逐步得到推广应用。而且 IGCT 器件采用平板结构(如图 9 所示),因此器件工作过程中产生的损耗可以通过上下两个散热面向外传导,这就为充分发挥器件的功率处理能力、减小设备体积创造了有利条件。在 ABB PCS6000(5 MW)全功率变流器中采用了图 10 所示的积木式模块,该模块集成了 8 个 IGCT 单元、吸收电路及水冷回路,取出任何一个 IGCT 单元都不需要拆卸母排和水管,并且智能保护系统能够在没有保险管的前提下保证 IGCT 损坏不会导致其余部件的损毁,其可靠性和可维护性达到了相当高的水平<sup>[19]</sup>。

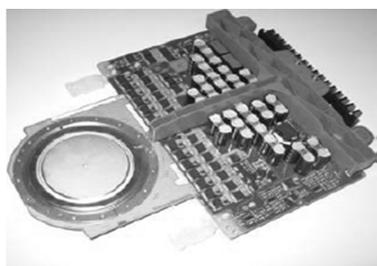


图 9 IGCT 及驱动模块  
Fig. 9 IGCT and drive module

### 4.2 电压电流等级不断提高,拓扑结构更加灵活多样

随着风电机组单机容量的不断增大,风电变流器的电压与电流等级也在不断提高,多电平变流器拓扑得到了广泛关注。变流器采用多电平方式后,可以在常规功率器件耐压基础上,实现高电压等级,获得更多级的输出电压,且波形更接近正弦,谐波含量少,电压变化率小。目前,世界范围内从事大功率风力发电用变流器和高压变频器研制的一些公司,

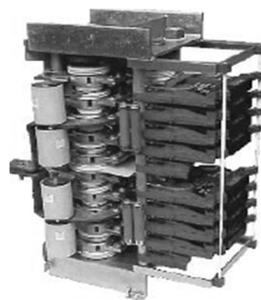


图 10 三电平双相 IGCT 集成单元  
Fig. 10 Three-level two-phase IGCT integration system

均采用多电平的产品方案:ABB 用于风力发电的变流器 PCS6000 采用四象限二极管钳位三电平结构(如图 11 所示),器件采用 IGCT;Siemens 也有相似的应用,功率器件采用高压 IGBT;法国 ALSTOM 公司采用飞跨电容型四电平拓扑,功率器件采用 IGBT,另外还基于 IGCT 开发出了飞跨电容型五电平变频器<sup>[20]</sup>。

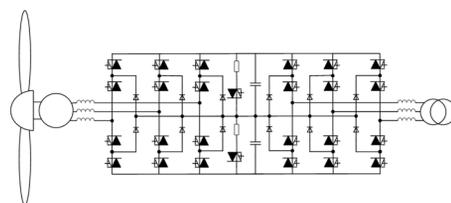


图 11 四象限二极管钳位三电平电路拓扑  
Fig. 11 Topology structure of three-level four-quadrant diode-clamp circuit

### 4.3 低压穿越问题研究逐步深入

风力发电装机容量越大,其低电压穿越能力对电网的影响越大,而变流器是实现这一功能的主要承担者。因此,使风电机组能够满足和火力发电类似的转轴可靠性标准是变流器设计的一个重要目标。通过提高发电机组和变流器控制设计,低电压穿越技术能使风电机组在出现严重电网扰动时可以不间断运行并快速向电网提供无功,减少电压崩溃的危险。从国外直驱风电产品及其应用看,为适应新的电网规则对低电压穿越和无功支持的要求,都已将这些功能集成到其产品中,可见低电压穿越与无功支持已成为大型风电机组必须具备的重要功能之一。

目前国内相关研究还存在两个急需解决的前提条件,一是相关的正式标准需要尽快推广实施,二是需要根据标准建立相应的试验平台。国外一些变流

器厂商都相继建立了专门的低电压穿越测试设备和实验室,如 ABB 针对最新出台的 IEC 61400-21 标准建立了如图 12 所示的电网故障模拟装置,其原理图如图 13 所示<sup>[21]</sup>。

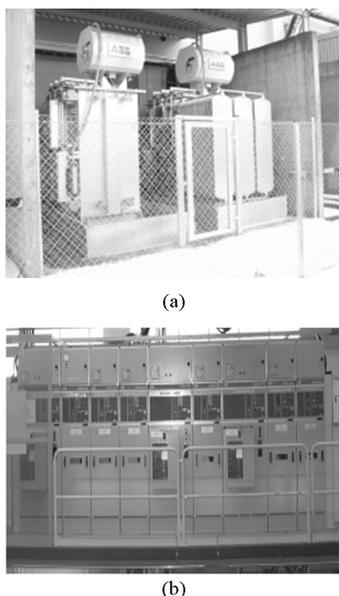


图 12 低电压穿越测试设备  
Fig. 12 Test equipment of low voltage ride through

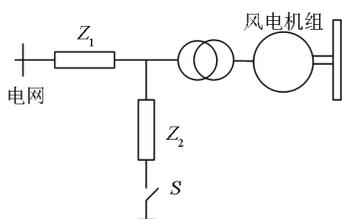


图 13 低电压穿越测试原理图  
Fig. 13 Test principle of low voltage ride through

此外,在无功支持实现的研究中,如何协调多台风力发电机的无功功率控制,获得更好的风电场电压控制效果,也引起了相关研究人员的关注:变流器无功调节通常以风电场接入点电压水平为控制目标,通过接入变流系统,单台风力发电机组可以通过变流器的快速电压控制,实现调节自身输出无功功率的功能;但多台发电机组均自行调节输出无功功率,反而可能加剧风场公共接入点电压的波动,与稳定风场公共接入点电压的初衷背道而驰。

#### 4.4 电磁兼容问题

随着直驱风电机组的大型、超大型化,以及风力

发电所占电网发电份额的逐年扩大,作为主要电网接入设备,变流器系统的电磁兼容性能无疑成为影响风电机组甚至风场发电性能的重要因素。目前,在电磁兼容性和电磁干扰治理方面,关于小容量变流装置的研究成果已有较多文献发表,且多数研究关注于低频段的谐波分析和电磁干扰抑制,而对高频段的辐射干扰方面研究较少。由于大容量变流器在功率信号等级、结构尺寸和电路拓扑上的差异,以往的电磁干扰抑制技术很难直接应用,必须研究适合于高强度电场、磁场工作场合的干扰抑制技术。另外,从风电机组系统的电磁兼容角度,也需要开展高频辐射干扰的研究工作,确保系统工作在一个良好的电磁环境中。

## 5 结语

随着风力发电技术的迅猛发展,单机容量越来越大,这要求与之配套的风电变流器必须具备高功率密度、高可靠性和优良的控制性能。当前,相关产品多被国外公司垄断,国产风电变流器虽然在近几年开始有了较快的发展,但与国外先进技术水平相比,在标准化、智能化、功能完备性、可扩展性与成熟性等方面,仍存在差距。进一步深入研究大容量风电变流器的特有问题与关键技术,推进国产大功率变流器的研发、试验及生产,对于促进自主创新、提高国产技术和装备的竞争能力有着重要的意义。

#### 参考文献

- [1] Arulampalam A, Ramtharan G, Jenkins N. Trends in wind power technology and grid code requirement[C]// International Conference on Industrial and Information System. Sri Lanka, 2007: 129-133.
- [2] John T. Wind energy - the facts[J]. Wind Energy, 2009, 33(3): 305-307.
- [3] 李辉, 薛玉石, 韩力. 并网风力发电机系统的发展综述[J]. 微特电机, 2009(5): 55-60.
- [4] 施跃文, 高辉, 陈钟. 特大型风力发电机组技术现状与发展趋势[J]. 神华科技, 2009, 7(2): 34-38.
- [5] Grauers A. Design of direct driven permanent-magnet generators for wind turbines[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 1996.
- [6] 徐甫荣. 中高压变频器主电路拓扑结构的分析比较[J]. 电气传动自动化, 2003, 25(4): 5-12.
- [7] Lchikawa S, Tomita M, Doki S. Sensorless control of permanent magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 363-372.
- [8] 陈明亮, 肖飞, 王颖雄. 直驱型永磁同步风力发电机无传

- 感器控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(6):792-797.
- [9] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [10] Clements J, Julija M, Thomas A. International comparison of requirements for connection of wind turbines to power systems[J]. Wind Energy, 2005, 8(3):295-306.
- [11] Johan M, Sjoerd W H. Short circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):174-180.
- [12] Manoj R R, Ned M. A novel robust low voltage and fault ride through for wind turbine application operating in weak grids [C]//The 31st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. USA, 2005:2481-2486.
- [13] Flannery P S, Venkataramanan G. Evaluation of voltage sag ride-through of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid side converter[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. USA, 2007:1839-1845.
- [14] 李建林, 许洪华. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [15] 胡家兵, 贺益康. 双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2):49-52.
- [16] Chong H N, Li R, Jim B. Unbalanced grid fault ride through control for a wind turbine inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 44(3):845-856.
- [17] Nargari. Performance investigation of a current controlled voltage regulated PWM rectifier in rotating and stationary frames [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 42(5):396-401.
- [18] Choi J W, Sul S K. Fast current controller in three phase AC/DC boost converter using d-q axis crosscoupling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 13(1):179-185.
- [19] Markus E, Philippe M, Alexander F. Full size voltage converters for 5 MW offshore wind power generators [EB/OL]. <http://www.abb.com/windpower>, 2010-04-30.
- [20] 赵栋利, 胡书举, 赵斌. 风力发电机、变流器及其低电压穿越概述[J]. 变频器世界, 2009(2):35-40.
- [21] Jouko N, Slavomir S, Jari P M. Low voltage ride through testing of wind turbine drives [EB/OL]. <http://www.abb.com/windpower>, 2010-04-30.

## The status and outlook of wind power converters

Ma Weiming, Xiao Fei

(Research Institute of Power Electronic Technique,  
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

[Abstract] The power converter, which is one of the critical equipments of the system, must meet the requirements of high power density, high reliability and excellent control performance. Great development has been achieved in China about wind power converters, which is still lagging behind the advanced level of the world. In this paper, some critical technologies of direct driven wind power converter systems are introduced and the related design ideas are proposed.

[Key words] wind power generation; variable speed constant frequency; doubly fed induction generation system; direct driven generation system; power converter