

风电变流器的技术现状与发展

冯江华

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 风电变流器是风力发电系统的关键设备, 其性能直接影响到风电电能质量和风力发电系统的可靠性和稳定性。文章从风电变流器的类型入手, 介绍了当前风电变流器的拓扑结构、应用需求和典型产品技术现状, 并分析了其未来技术发展趋势, 为风电变流器技术发展和产业规划提供参考。

关键词: 风力发电; 风电变流器; 风电机组

中图分类号: TM315; TM46

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)03-0005-07

Technology Status and Development of Wind Power Converters

FENG Jiang-hua

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Wind power converter is the critical equipment for wind power generation system, and its performance affects the reliability and stability of the power quality and wind power generation system directly. Starting from the type of wind power converter, this article introduces the current wind power converter topology, application requirements, typical technology status and analyzes the future development trend of technology, which can provide reference for the technology development of wind power converter and its industrial planning.

Key words: wind power generation; wind power converter; wind turbine

0 引言

风电是目前技术最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的新能源, 风电产业是我国重要的战略性新兴产业。近5年来, 我国一直都是全球风电装机增长速度最快、新增风电装机容量最大的国家, 2012年更是跃升为世界第一风电并网大国, 风电年发电量已超过1 000亿kW·h, 在全部发电量中占比2%, 超越核电成为继火电和水电之后的第三大电源。在陆上风电飞速发展的同时, 海上风电也开始逐步形成规模。海上风电的特点是单机容量远比陆上风电大, 发电功率也相对平稳。根据国家能源局《可再生能源“十二五规划”》, 预计到2015年, 我国将建成海上风电5 GW, 形成海上风电产业链。2015年后, 中国海上风电将进入规模化发展

阶段, 达到国际先进技术水平, 2020年中国海上风电将达30 GW。

在风电装机容量快速增长的同时, 我国风电技术也取得了长足进步, 风力发电机组由20世纪90年代的定桨距、恒速技术, 发展到现在的变桨距、变速恒频技术, 而且兆瓦级大功率风电机组已成为主流, 单机容量不断刷新纪录。2012年, 国内陆上主流风电机组单机容量由1.5 MW逐步迈向2 MW和2.5 MW。3 MW级风电机组已有小批量生产, 紧跟国外当前技术发展水平开发的5 MW和6 MW风电机组也投入运行^[1]。

风电变流器是风力发电的核心部件, 其技术也基本成熟, 单机容量也随风电机组容量的扩大而逐步增大, 未来其国内年市场份额将在40亿~50亿元。

本文将介绍风电变流器的技术现状、基本类型、应用特点, 并对技术发展趋势进行展望, 为风电变流器技术发展和产业规划提供参考。

收稿日期: 2013-05-04

作者简介: 冯江华(1964-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事电气传动与控制的研究。

1 风电变流器的类型

风电变流器属于风力发电机组大型核心部件之一。为了使风机实现最佳风能捕获,风电机组需要采用变速恒频技术,使发电机的转速随风力的大小而变化,在较宽转速范围内维持最佳叶尖速比(桨叶顶端速度与风速之比),同时又能保证发电机的输出电压频率与电网频率相同。目前的风电机组主要利用风电变流器来实现变速恒频,同时还实现高电压和低电压穿越及对电网的无功功率支持。

当前国内外并网式风力发电系统中,风电机组主要采用双馈变流器和全功率变流器^[2]。

1.1 双馈变流器

双馈变流器用于变速恒频双馈风力发电系统(图1),风轮通过升速齿轮箱与双馈异步发电机主轴相连,将机械驱动转矩传递到双馈异步发电机轴,发电机定子直接连接电网,变流器一侧连接发电机转子,另一侧连接电网。

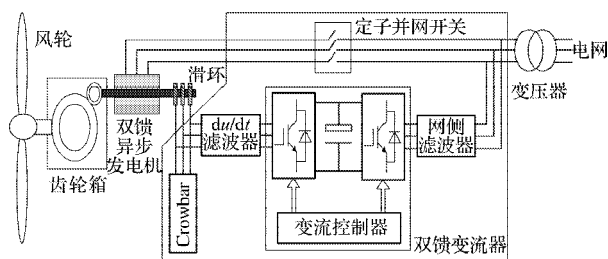


图1 双馈变流器应用示意图

Fig. 1 Application of a doubly-fed converter

发电机的转速控制需要风电机组整机控制系统通过变流器的电流控制来实现,发电机转子电流由变流器供给,通过控制转子电流的转差频率,来实现发电机定子输出电压与大电网同步。因发电机的电功率一部分直接经定子馈送到电网,另外一部分由转子经变流器馈送到电网,故这里的发电机称为双馈型发电机,变流器相应地被习惯称作双馈变流器。双馈变流器额定功率一般只需为双馈异步发电机额定功率的 $1/3 \sim 1/2$ 。

1.2 全功率变流器

全功率变流器主要用于直驱或半直驱式同步风力发电机系统(图2),风轮直接或通过升速齿轮箱与发电机主轴连接,将机械驱动转矩传递到发电机轴,变流器一侧连接发电机定子,一侧连接电网。这里的发电机可以为永磁或电励磁同步发电机,当然也有采用异步发电机的。发电机的转速控制需要风电机组整机控制系统通过变流器的电流控制来实现。因发电机所有的发电功率需要经变流器馈送到电网,故这里的变流器被

习惯称为全功率变流器或全馈变流器。考虑系统发热损耗,全功率变流器额定功率略大于发电机额定功率。

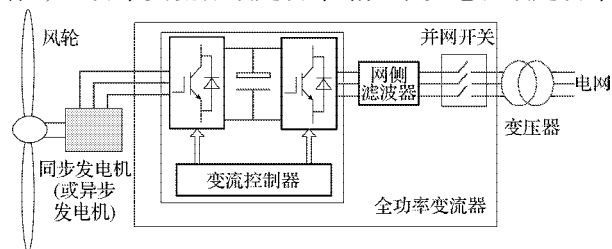


图2 全功率变流器应用示意图

Fig. 2 Application of a full power converter

2 风电变流器的拓扑结构

风电变流器按电压等级可分为低压和中压变流器,目前国内还没有出现高压风电变流器产品。低压风电变流器的典型额定电压为620~690 V,采用水冷却,也有强迫风冷却;中压风电变流器的额定电压为3 000~3 300 V,全部采用水冷或液冷。目前风电变流器所采用的功率器件绝大部分是1 700 V等级或1 200 V等级的IGBT模块;在商业化大型风电机组中,已有个别全功率风电变流器采用了IEGT(压装型IGBT)或IGCT功率开关器件。采用合适的功率开关器件和选取合理的变流器拓扑结构,有利于降低系统成本,提高可靠性和减少系统损耗。下面分别介绍当前主流的双馈变流器和全功率变流器的拓扑结构。

2.1 双馈变流器

适合于双馈异步风力发电系统的变流器有多种拓扑结构^[3-4],如电压型二电平双向PWM变流器、电流型与电压型并联变流器、晶闸管相控交交变流器、矩阵式变流器、多电平变流器以及普通箝位谐振变流器等。其中以电压型二电平双向PWM变流器应用最为广泛(图3),该变流器主电路结构简单,采用二电平双向PWM变流器拓扑,成本较低,可靠性高,相应的驱动及控制芯片技术成熟,控制性能好,是双馈异步风电机组的优选方案,目前国内外主流的功率在2.5 MW以下双馈变流器都采用该结构。

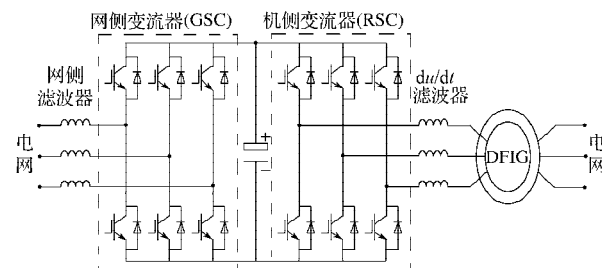


图3 两电平双向PWM变流器拓扑结构

Fig. 3 Topology of the two-level bidirectional PWM converter

二电平双向PWM变流器系统由2个电压型三相

PWM变流器单元通过直流母线连接而成,按其所在位置可分别称之为网侧变流器(Grid side converter, GSC)和机侧变流器(Rotor side converter, RSC)。通过直流母线电容解耦,运行过程中网侧变流器与机侧变流器可独立控制,各司其职。

网侧变流器主要有两个功能:(1)有效控制输出到电网的有功电流,保持直流母线电压稳定;(2)使输出电流保持正弦、谐波含量少、输入功率因数满足主控系统的要求。机侧变流器也有两个主要功能:(1)为双馈异步发电机转子提供励磁无功电流,间接调节其定子侧的功率因数;(2)通过控制双馈异步发电机转子有功电流来调节发电机的电磁转矩,进而控制机组转速,使双馈异步发电机运行在风力机的最佳功率曲线上,以实现最大风能追踪运行。

与网侧变流器相比,机侧变流器除了需要传输来自双馈异步发电机转子的有功功率外,还需要向双馈异步发电机转子提供额外的无功功率来控制双馈异步发电机定子对外发出或吸收无功,因此实际应用中机侧变流器的容量一般要比网侧变流器的大。以Converteam和Emersion公司的2 MW双馈风电变流器为例,网侧变流器的额定电流一般为580 A,而机侧变流器的额定电流则约为800 A。

双馈变流器采用典型容量为500~900 kVA、电压等级690 V的单个变流器模块,能够满足目前主流的1~2 MW双馈风电机组变流器的功率容量要求。对于功率更大的双馈风电机组,生产厂家多采用变流器模块并联的方式来增大变流器功率容量。

2.2 全功率变流器

目前全功率变流器典型额定功率为1.5 MW、2 MW、2.5 MW、3 MW、5 MW或6 MW,其中1.5 MW、2 MW和2.5 MW是当前的额定功率主流参数。根据风电机组接入点电压等级的不同,可将全功率变流器的拓扑结构分为两大类:一类采用二电平结构,主要应用于低压系统,电网电压等级在690 V以下;另一类采用多电平结构,主要应用于中压系统,电网电压等级在690 V以上。二电平变流器和多电平变流器在控制原理上有很多共同之处。

图4为目前广泛应用的低压系统全功率变流器的2种拓扑结构^[5]。类似于双馈变流器结构,全功率变流系统内部也可看成由网侧变流器和机侧变流器组成。2种变流器系统的网侧变流器拓扑结构相同,均采用三相电压型PWM整流器电路;而电机侧变流器拓扑结构则有所不同,图4(a)为采用不控整流加升压斩波电路的拓

扑形式,不控整流桥将发电机随风速发出的幅值和频率均变化的三相交流电转换为直流电,升压斩波器通过调节其输入电流控制发电机的负载转矩,从而实现发电机转速的调节。网侧的PWM整流器将电机侧的输入功率转换为恒幅恒频的三相交流电馈入电网,并满足网侧功率因数要求和减小对电网的谐波污染。该拓扑方式相对简单可靠,但控制上无法实现电机转矩和磁链的解耦,同时发电机定子电流中的低次谐波含量偏大。图4(b)为采用PWM整流加IGBT逆变的拓扑方式,与图4(a)的主要区别是,它用三相电压型逆变器取代了不控整流和升压斩波单元来控制发电机负载转矩。该拓扑能够实现对发电机的高性能控制,可避免不控整流和升压斩波两级结构给系统增加的复杂性。

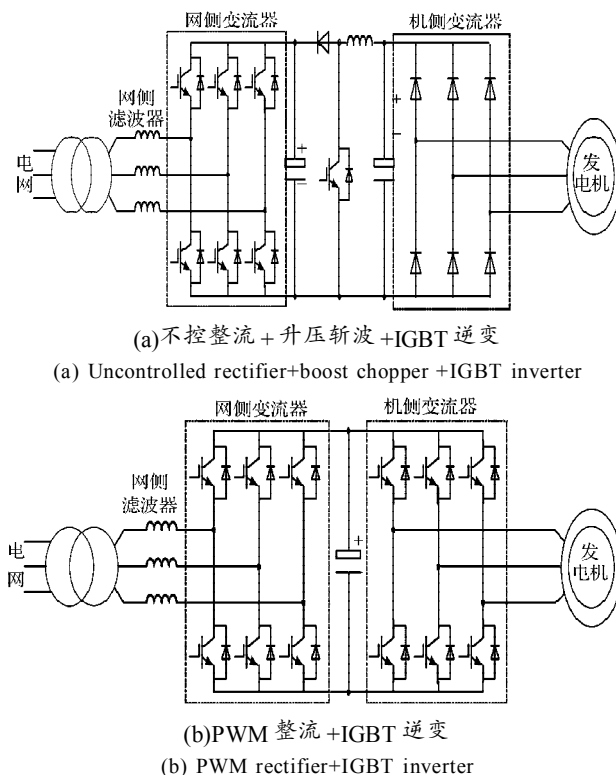


图4 全功率变流器拓扑结构

Fig. 4 Topology of the full power converter

在实际应用中,为提高机组容量,风电变流器常采用多重并联结构,可以是单个变流器柜内多个功率模块单元并联,也可以是多个变流器柜并联。一般单个功率模块的容量为450 kVA~1 MVA,对于典型的690 V电压等级的2 MW以上的全功率变流器,目前普遍采取两个或两个以上的变流器柜并联,而每个变流器内部采用多个功率模块单元并联。图5为ABB公司典型的2个变流器柜并联构成一个完整的全功率变流器系统的示意图^[6],2个变流器柜的网侧连接到变压器的公共接线端,而机侧分别连接到发电机的各套绕组的接线端(每套绕组间要求电气隔离)。

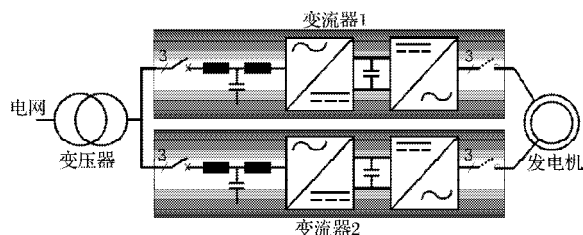


图5 多个变流器柜并联示意图

Fig. 5 Parallel converter cabinet

对于中压全功率变流器,一般采用多电平结构,所选用的功率器件的耐压等级也比较高。图6为ABB公司采取三电平的IGCT变流器典型拓扑,它能直接并网的电压为3.5 kV^[7]。

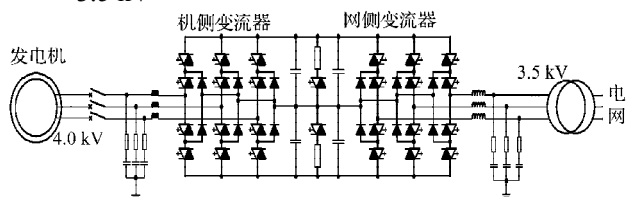


图6 三电平变流器拓扑

Fig. 6 Topology of a three-level inverter

3 特殊应用需求

风电变流器作为风力发电系统与电网的接口,是风电机组的核心部件,其功能直接关系到风力发电系统的可靠性和稳定性,是保障风电电能质量,实现风电接入电网的关键。区别于一般工业传动变频器,风电变流器由于其行业应用特点,需要满足以下一些特殊应用的要求。

3.1 需具备低电压和高电压穿越功能

所谓低电压穿越,指在风电机组并网点电压跌落的时候,风电机组能够保持不脱网,甚至还能向电网提供一定的无功功率,直到电网恢复正常,从而“穿越”这个低电压时间(区域)。高电压穿越则要求在电网短时出现高压的情况下不能脱网。火力发电或水力发电机组是可控发电能源,机组本身有励磁调节系统,能维持机端电压稳定,并入电网的机组相当于电压源。而风力发电则与之不同,风是不可控能源,风速的变化造成发电机的转速在大范围内变化。风力发电机多是异步或永磁式发电机,机组本身无励磁调节系统,从当前普遍采用的风机变流器控制情况来看,并入电网的风力发电机组相当于电流源,其输出电压取决于电网电压。当电网电压跌落或恢复时,不具备低电压和高电压穿越功能的风电变流器会引起交流侧过流或直流侧过压保护而脱网。风电机组的发电机、变压器等设备要消耗无功,当大量机组跳闸,会因无功消耗设备的减少以及送电路产生的充电功率而使系统电压升高,很多风机

又会因过电压而跳闸,使事故扩大。2011年1~8月份,全国共发生193起风电机组脱网事故,其中,一次损失风电出力10万~50万kW的脱网事故54起,一次损失风电出力50万kW以上的脱网事故12起^[8]。大面积风电机组脱网会造成电网崩溃。

风电场风电机组的低电压穿越主要由内部的风电变流器来实现,双馈风电变流器的低电压穿越控制算法异常复杂,全功率风电变流器的低电压穿越相对容易实现。由于国外风电技术发展较早,ABB、Converteam、The Switch等公司的风电变流器一般都具有低电压穿越功能。而国内在最近两年才自主开发成功双馈变流器低电压穿越技术,已有部分厂商,如禾望电气、海得新能源、尚能电气、科诺伟业、南车株洲电力机车研究所等公司的风电变流器具有低电压穿越功能,并陆续通过中国电力科学研究院主持的测试认证。

3.2 需具备更高可靠性

风电场大都位于交通不便的偏远地区或海上,风电设备及部件的维修和更换较困难,有些变流器模块还位于塔顶的机舱中,吊装、拆卸都很困难,再加上风电机组要求具有20年以上的寿命。因此,要求风电变流器必须具有非常高的可靠性,在出厂前需要对变流器进行全套的安全性和稳定性测试,对质量要求非常严格。最近几年多次发生的风机烧毁事件或安全事故,大多都与风电变流器的质量缺陷有关。目前国产风电变流器相比国外品牌产品虽有价格上的优势,但无论在技术上还是在可靠性方面仍存在较大的差距。一些风机整机厂家在采购了国产变流器,试用一段时间后,由于变流器故障频繁影响到发电量,这些厂家不得不再次改用国外变流器。

由于供大于求,目前国内风电机组价格偏低,风机整机厂的降本压力向部件厂商传递。风电变流器作为风电机组的核心部件,市场竞争激烈,过度降本的结果已影响到产品质量和可靠性,这种现状应当引起大家的重视。

3.3 需能适应恶劣环境

我国幅员辽阔,风力资源很丰富,但地域环境差异较大。现在风力发电几乎已在全国各地落根。一些风场湿度很大,极易引起凝露造成变流器故障;一些风场风沙较大,长期大风沙极易损坏变流器;一些风场建在潮间带及海上,变流器极易遭受盐雾的侵蚀而失效;一些风场建在极端温度区域,极端的低温或高温气候会造成变流器的结构损坏。这些恶劣的应用环境大大提高了风电变流器的设计难度,风机整机厂家都对变流器

的防护等级提出了较高要求,目前一般要求达到IP54等级。

4 相关标准分析

为避免电网故障引起的大面积风机脱网,国家标准委员会发布了由中国电力科学研究院主持起草的《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T19963-2011),它与能源行业标准《大型风电场并网设计技术规范》共同规定了风电场并网的相关技术要求。标准中对低压穿越提出了如图7所示的风电场低压穿越要求:风电场内的风电机组在并网点电压跌至额定电压的20%时应具有维持并网运行0.625 s的低电压穿越能力。对于总装机容量在百万千瓦级规模及以上的风电场群,当电力系统发生三相短路故障引起电压跌落时,每个风电场在低电压穿越过程中应具有动态无功支撑能力。这些并网标准的出台,能够有效解决风电事故频发的问题,有利于风电场运营商和电网企业在此标准的基础上增加风电并网量,最终提升风电产业的质量和效益。

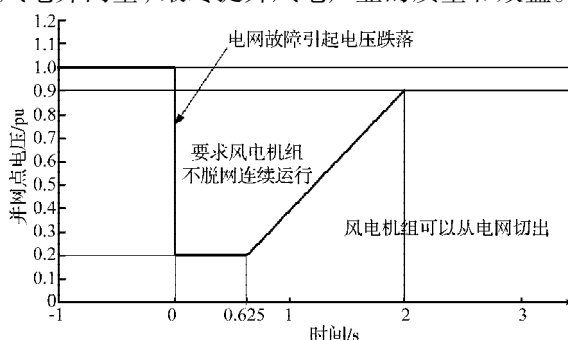


图7 风电场低电压穿越要求

Fig. 7 Requirements of LVRT in wind farm

这些标准美中不足的是,还没有对高电压穿越和零电压穿越进行明确要求,国内风电变流器厂家基本参考国外风电变流器的技术条件。比如南车株洲电力机车研究所有限公司自主开发的2 MW双馈风电变流器是按以下暂态电压波动范围技术条件来开发零电压、低电压与高电压穿越功能的。

(1) 高电压穿越:

- 120%~130%时,保证机组能持续运行100 ms;
- 115%~120%时,保证机组能持续运行500 ms;
- 110%~115%时,保证机组能持续运行2 s。

(2) 低电压穿越:

90%~20%时,保证机组能按《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T 19963-2011)中低电压跌落曲线要求运行。

(3) 零电压穿越:

- 0~20%时,保证机组能持续运行625 ms。

另外,《风电场接入电力系统技术规定》中对电压跌落中的无功支持的规定目前也存在不足,其要求总装机容量在百万千瓦级规模及以上的风电场群,当电力系统发生三相短路故障引起电压跌落时,每个风电场在低电压穿越过程中应具有动态无功支撑能力。可见,这只对电网三相对称跌落的情况提出了无功支持要求,是针对行业的技术现状而制定的。目前国内外风电变流器在三相电压不对称跌落的情况下还不能较好地控制风电机组对电网提供无功支持。然而电网电压跌落主要是由于输电线路故障造成的,根据电网故障可分为4种类型:单相故障、相间故障、两相故障和三相故障,各故障发生的概率依次为:70%~85%、8%~15%、4%~10%和3%~5%。由此可见,最后一种电网电压三相对称跌落的故障情况非常之少,可能一年也碰不到一次,而绝大部分是前3种情况引起的电网电压不对称跌落,其一年发生的次数可能有七八次。按当前标准,本来电网故障需要风电机组进行无功支持,而因主要是不对称跌落,造成依此标准的风电机组其实提供不了无功的尴尬局面,可望随着国内外风电变流器控制技术的成熟,本标准相关内容将在未来得到修订。

为了使制造企业有标准可依,国家能源局于2011年发布了《大型风电场并网设计技术规范》等18个重要标准,这些标准涉及大型风电场并网、海上风电建设、风电机组状态监测、风电场电能质量、风电关键设备制造要求等技术标准。其中与风电变流器直接相关的标准有:NB/T 31014-2011《双馈风力发电机变流器制造技术规范》和NB/T 31015《永磁风力发电机变流器制造技术规范》。它们给定了风电变流器的研发设计、组织生产、质量检验、产品认证等依据,主要内容包括:一般要求、绝缘、负载控制功能、过载能力、总谐波畸变系数、电网适应能力、效率、温升、并网切入电流、保护功能、电磁兼容、低温、高温、贮存、耐湿热试验、防护等级、噪声、通信要求、功率因数、转矩控制等。这些标准的出台对保证风电变流器的质量和运行可靠性,支撑风电产业的良性发展至关重要。

5 典型风电变流器介绍

这里介绍一些国内外代表当前技术水准的风电变流器供应商的产品。

(1) ABB公司的产品^[9-11]

在风电变流器行业,国外ABB公司的产品基本能代表行业的最高技术水平,产品系列比较齐全。其变流器的显著特点是:采用模块化设计,结构虽非常紧凑,

但可维护性好;控制算法比较先进;网侧和机侧都采用直接转矩控制的方法;网侧均采用LCL滤波器;抑制共模电流的磁环都布置在功率模块的直流侧。其ACS800-67系列低压变流器主要用于双馈风力发电机组;ACS800-77LC和ACS800-87LC系列为低压全功率风电变流器,ACS800-77LC系列风电变流器的功率范围为840~3 180 kW;PCS 6000系列为中压(3.3 kV或4.16 kV)变流器,采用三电平IGCT拓扑,功率覆盖范围大(3~9 MVA)。图8为ABB公司5 MW中压全功率变流器实物图。据2011年统计,ABB公司风电变流器产品在我国市场占有率最高,其中双馈变流器达21%,全功率变流器达32.3%。

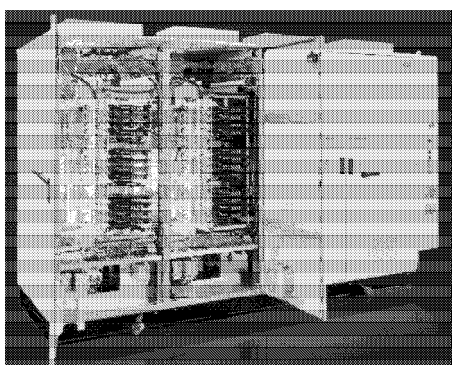


图8 ABB 5 MW 中压全功率变流器

Fig. 8 5 MW medium-voltage full power converter of ABB

(2) Convertteam(科孚德机电公司)产品^[12]

国外Convertteam公司有3个系列的风电变流器,其中ProWind系列为低压(690 V)双馈变流系统,最大功率可至5 MW;MV3000系列为低压(380~690 V)全功率变流系统,水冷方式,IGBT脉冲调制,多个功率模块并联组合,最大输出功率可达6 MW;MV7000系列为中压(3 kV或6 kV)全功率变流系统,采用强大的IEGT功率开关器件,水冷方式,三电平IEGT脉冲调制,系统设计紧凑,功率覆盖范围3~12 MVA(图9)。Convertteam产品2011年在我国全功率变流器市场占有率达14.7%。

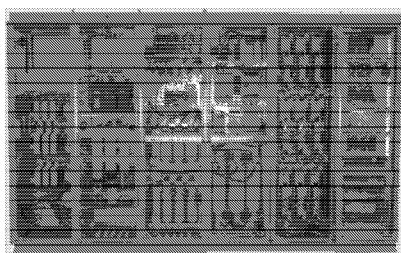


图9 Convertteam公司的MV7000中压风电变流器

Fig. 9 MV7000 wind power converter of Convertteam

(3) 南车株洲电力机车研究所有限公司产品

南车株洲电力机车研究所有限公司利用自身在变流技术方面的强劲优势和在风机整机方面的应用经验,

从2006年开始自主开发生产风电变流器,其产品目前主要是满足公司内风电事业部风机整机产品的配套需要。该公司基于自主开发的SPM系列功率模块单元先后开发了1.5 MW、1.65 MW、2 MW平原型与高原型双馈风电机组变流器,以及2.0 MW和2.5 MW全功率变流器。这些产品在国内网上或论坛中习惯被简称为南车时代风电变流器,其中1.5 MW、1.65 MW双馈机组变流器已有上千套在运行,是国产成套变流器设备中装机最多的。南车时代风电变流器2011年在国内双馈变流器市场占有率为4%。

SPM系列功率模块单元结构紧凑,功率密度非常高,技术先进,性价比高,其功率部分与控制部分集成在一起(图10)。

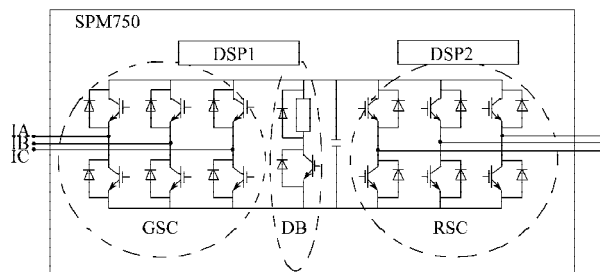


图10 SPM系列变流模块的内部结构

Fig. 10 Internal structure of SPM series converter module

功率部分包括背靠背形式连接的两个IGBT三相桥功率模块单元,一个用作网侧PWM整流变流器(GSC),另一个用作机侧变流器。二电平结构,采用1 700 V/450 A或1 700 V/600 A的IGBT,水冷方式,模块带直流支撑电容,每个功率模块单元带3个电流传感器和直流母线电压检测装置,IGBT均带温度检测信号输出。

模块的控制部分由1块主控制板(包含控制电源、模拟量检测、数字IO、转速检测、CAN通信接口、LEM传感器检测、同步信号选择、光纤接口和脉冲驱动板接口等)和2套DSP控制板(分别控制两个不同的功率模块单元),以及相应的驱动控制板(包括3块网侧驱动板、3块机侧驱动板、1块斩波电路驱动板)组成。其驱动采用CONCEPT公司的IGBT驱动芯片。

DSP控制板采用双DSP + FPGA结构,采用高性能双核DSP(OMAPL138)控制芯片,内含ARM9核和C67XX DSP核。如图10所示,DSP1具有电机控制、变流器逻辑控制、上位机通信等功能;DSP2完成四象限整流控制算法。用FPGA实现DSP之间的双口RAM、PWM波脉冲生成、AD管理和硬件保护逻辑等功能。电流电压采样周期40 μ s,具有类似示波器的存储功能,可以同时存储故障前800 ms和故障后200 ms的多达40路的波形。

SPM系列模块单元功率覆盖范围500~950 kVA,针

对大容量风电变流器的需求,SPM系列模块单元具有自动同步功能,可以实现最多4个模块并联同步运行。

6 技术发展趋势

随着风电技术的不断完善和深入发展,风电变流器将会朝着电网友好型、智能型、高可靠型的方向不断发展。

6.1 控制技术不断优化,以满足风场风电机组对电网友好的需要

因风能具有高度的随机波动性与间歇性,大容量的风电接入会对电力供需平衡、电力系统的安全以及电能质量带来诸多严峻的挑战。从风电场角度考虑,风机需要具有低电压穿越能力,确保电网发生波动时风机不解列。针对常见的电网故障造成的三相不对称电压跌落情况,要求未来的风电变流器能像现在的对称跌落情况一样对电网补无功,以支持电网的恢复。

风电变流器要能满足分布式风电的并网技术要求。目前我国风电开发利用以大规模集中开发、远距离输送为主,在发展过程中遇到消纳难、送出难等问题。为了缓解目前大规模风电发展的瓶颈,需要因地制宜地发展分布式风电,让风电就近接入负荷侧。由于我国配电网较为薄弱,为适应分布式风电的并网运行特点,要求风电变流器在电压偏差、闪变、谐波等技术方面进一步提高技术水平,风电变流系统应能实现有功和无功的远程调节控制,并避免有功功率的陡升和陡降,能配合风电机组进行电网电压控制。分布式发电存在可能孤岛运行的问题,全功率变流器需要具有防孤岛功能^[13]。

6.2 将具备故障智能诊断和远程监控功能

由于风电场都建在偏远地区,实现现场无人值守、少人值班的远程监视与控制是大势所趋。风机变流器需要实时将工作状态信息提供给风电场的远程监控系统,配合远程监控系统评估变流器装置的可靠性,并对关键零部件寿命进行预测,以便于及时安排检修和维护;要求能自动记录和留存风电变流器故障发生前后一段时间的电流、电压等各种波形,能通过远程监控系统传输给技术人员进行分析处理。

6.3 电压等级将越来越高,功率器件将多样化

目前风电变流器以低压690 V为主流,采用3 000 V或3 300 V中压变流器的机组总共不超过百台。随着机组功率增大,变流器单机功率也将越来越大,为了降低损耗和提高系统效率,中压变流器今后几年将有很大发展,高压风电变流器也将逐步出现。在功率器件应用趋势方面,可以预计,双馈风电变流器仍将采用1 700 V等级的IGBT器件。功率小于3 MW的全功率风电变流器将

采用1 700 V等级的IGBT;功率大于5 MW的变流器,根据各风电变流器厂家的实际情况及自身的技术积累会选用IGBT、IEGT或IGCT器件。

6.4 系统拓扑结构随风电机组容量的增大不断发展和创新

未来双馈变流器与全功率变流器将长期并存,仍都是主流。双馈风电变流器还将是采用背靠背的电压型PWM二电平变流器形式。3 MW以下的全功率风电变流器仍然将采用当前主流的2种拓扑结构,即一种是二极管不控整流+升压+两电平逆变的拓扑结构;另一种是二电平PWM整流器+二电平PWM逆变器的拓扑结构。对于大于5 MW全功率风电变流器,其拓扑结构的发展趋势为不控整流+中点箝位三电平逆变,或为背靠背的中点箝位三电平变流器。目前风电变流器功率器件开关频率一般在2 000~3 000 Hz之间,未来随着风电变流器容量的不断增大,开关频率将大为降低。为降低谐波含量,变流器的移相、并联技术将得到广泛应用。

随着海上风电技术和高压直流输电技术的发展和成熟,一种全新的风电变流系统拓扑将得到应用^[14-15]。如图11所示,各风电机组的输出电压由各自的整流变流器整流成直流电压后串联成更高的直流电压,通过高压直流输电方式输出到并网变电站进行集中逆变并网,并网变电站的多个PWM逆变器同样是在直流侧进行串联并输入高压,各逆变器可采用载波移相控制技术,在开关频率较低的情况下保证输出电流的谐波含量较低。这种系统的拓扑结构能降低风场项目总成本和损耗,有很好的应用前景。

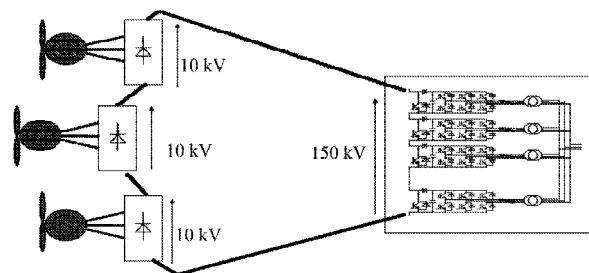


图 11 风电机组串联型高压直流输电

Fig. 11 High-voltage direct current transmission of DC series-type wind turbines

7 结语

风电变流器为风力发电系统的关键设备,其技术随着风电机组的应用需求的增长而不断创新和完善;其产业前景很广,但要求也在不断提高。为促进我国风电产业的稳健发展,迫切需要国内各风电变流器厂家不断提高其产品的质量,完善产品的性能,并提高产品的环境适应性。

(下转第34页)