

# 海上风电变流器研究现状与展望

蔡旭<sup>1</sup>, 陈根<sup>1</sup>, 周党生<sup>2</sup>, 张建文<sup>1</sup>, 王琰<sup>2</sup>, 邵昊舒<sup>1</sup>, 王武华<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院风力发电研究中心, 上海市 闵行区 200240;

2. 深圳市禾望电气股份有限公司, 广东省 深圳市 518055)

## Review and Prospect on Key Technologies for Offshore Wind Power Converters

CAI Xu<sup>1</sup>, CHEN Gen<sup>1</sup>, ZHOU Dangsheng<sup>2</sup>, ZHANG Jianwen<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, SHAO Haoshu<sup>1</sup>, WANG Wuhua<sup>2</sup>

(1. Wind Power Research Center, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,

Minhang District, Shanghai 200240, China;

2. Shenzhen Hopewind Electric Co., Ltd., Shenzhen 518055, Guangdong Province, China)

**Abstract:** Offshore wind power investment has the characteristics of high-cost and high-risk, which makes it demanding that offshore wind power should develop towards large capacity. Full converter wind turbine (FCWT) is now the mainstream of offshore wind turbine generator, and FCWT requires that the capacity of converter should match with the capacity of wind turbine generator. Meanwhile, FCWT puts higher requirements for its operation efficiency, reliability and availability. Offshore wind turbine generator which adopts paralleled two-level converter or three-level converter gradually becomes the mainstream for offshore wind turbine converter. Operation efficiency and availability can be significantly improved by the operation optimization, fault tolerance and reconstruction control of the parallel converter system. Modifications can also be implemented for wind turbine converter to enable frequency response ability. This paper comprehensively reviews related research status and technical trends of offshore wind power converters in operational efficiency and availability, as well as the technical requirements for high penetration of wind power and low-cost electricity transaction.

**Keywords:** offshore wind power converter; efficiency; reliability; availability

**摘要:** 海上风电投资成本高、风险大, 为提高其经济性, 海上风电机组向超大容量化快速发展。全功率变换风电机组成为海上机组的主流, 该机组要求变流器的容量与机组容量相匹配, 同时对其运行效率、可靠性和可用度提出了更高的要求。采用两电平或三电平变换器并联组成的变流器是海上风电变流器的主流结构, 对并联变流系统的

优化运行、容错和重构控制可有效提升其效率和可用度, 对风电变流器控制的改进也可以使机组主动参与电网频率响应。针对海上风电变流器运行效率和可用度提升技术、风电高比例并网和平价上网的技术需求, 综合评述其研究现状和技术趋势。

**关键词:** 海上风电变流器; 效率; 可靠性; 可用度

## 0 引言

近年来, 可再生能源快速发展, 已成为世界能源转型的核心。风能资源丰富、技术成熟, 是目前最具规模化开发前景的可再生能源。根据全球风能理事会 (Global Wind Energy Council, GWEC) 的统计, 2017年全球新增装机容量超过52.5 GW, 全球累计装机容量达到539 GW<sup>[1]</sup>。自2009年以来, 中国一直保持着全球最大新增风电市场的地位, 2015年新增装机容量32.97 GW, 累计装机容量129.34 GW<sup>[2]</sup>。中国提出2030年非化石能源占一次能源比重20%的目标<sup>[3]</sup>, 大力发展风电将是实现这一战略目标的重要手段。随着陆上风电的不断开发, 风电开发的重心开始从陆上转向海上。海上风能资源丰富, 具有风速高、发电量时间长、环境影响小等优点, 海上风电大规模开发将是未来风电发展的趋势。

海上风能资源丰富但海上风电投资大, 提升单台风机的容量可以大大提高海上风电的经济效益。因此, 海上风电机组正在向超大容量化发展。大容量海上风电机组采用变速机组, 可以在较宽的风速范围内实现最大功率跟踪, 提高风能变换效率与并网电能质

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51677117)。  
National Natural Science Foundation of China (51677117).

量，降低机组的机械应力<sup>[4]</sup>。目前海上风电机组的主流机型根据电机类型划分有：双馈风电机组、鼠笼异步感应电机机组、永磁同步电机机组和电励磁机组，根据驱动类型可以分为高速机组、直驱机组和半直驱机组。随着机组向10 MW级迈进，由于大型齿轮箱制造技术的限制，直驱型风电机组将逐渐占据上风。

双馈风电机组的发电机定子与电网直接相连，转子经变流器与电网相连，发电机的定子和转子都可以向电网输出功率。双馈发电机可以运行在同步转速 $\pm 30\%$ 的范围内，满足不同风况需求，提高机组的发电效益。变流器容量仅为机组容量的30%，因此双馈风电机组的成本较低。但是，由于定子与电网直接相连、机侧变流器的容量有限，使得双馈机组的低电压穿越与全功率变换机组相比难度大，机组电网稳定性较差<sup>[5-7]</sup>。

随着电网并网导则和机组可靠性要求的日益严苛，大容量风电机组采用全功率变换是趋势所在<sup>[8]</sup>。全功率变换风电机组采用同步发电机或鼠笼异步电机为发电机，发电功率经变流器全功率变换后接入电网，变流器的容量与发电机容量相匹配。全功率变流器使得发电机和电网完全解耦，提升了风电机组的电网适应性。全功率变换风电机组的主要缺点是成本偏高<sup>[9-10]</sup>。鼠笼异步电机一般运行在高速状态，在风力机和发电机之间需要配置增速齿轮箱，故称为增速型全功率机组。同步发电机因在低速下仍然具有较高的运行效率，故风力机无需齿轮箱增速即可与发电机连接，系统可靠性更高<sup>[11-12]</sup>，称为直驱型全功率风电机组。直驱型全功率风电机组将是未来大容量海上风电机组的主要机型<sup>[13-14]</sup>。无齿轮箱设计还可提高机组的能量转换效率和可靠性，降低运行维护成本。但是低速同步发电机的极对数很多，发电机体积大，制造成本和技术难度均较高。

风力发电系统由风力涡轮机、传动链、发电机、变流器、变压器和电气控制系统组成，如图1所示。风力机捕获风能，通过传动链将能量传送到发电机，发电机实现机电能量转换，变流器实现风电功率的变

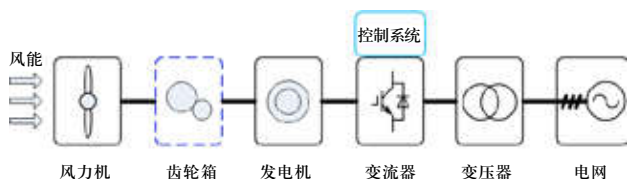


图1 典型风力发电系统结构示意图

Fig. 1 Scheme of typical wind power generation system

换与控制，将随风速变化频率波动的电能转换为频率稳定的电能，工频变压器实现并网功率的电压匹配。其中，发电机和变流器是整个风力发电系统的关键组成部分。

作为发电机和电网的接口，风电变流器是风电机组中的核心设备，是机组电气性能、变换效率、可用度的主要决定因素之一，是整个风力发电系统的关键与核心<sup>[9,15-17]</sup>。随着风电机组单机容量的不断增大，风电变流器的大容量化是发展趋势。由于风电功率波动剧烈，风电变流器的电热应力变化剧烈，给变流器的安全可靠带来威胁。此外，海上盐雾浓度高、湿度大、时常有灾害性天气，对电气设备的安全运行带来重大影响<sup>[18]</sup>，需要风电变流器具有较高的可靠性<sup>[19-21]</sup>。随着风电机组并网渗透率的不断提高，需要风电变流器有较高的电网适应性<sup>[22-24]</sup>和电网故障支撑能力<sup>[25-27]</sup>，满足电网电能质量要求。变流器实现风电功率的安全可靠并网，需要满足一系列基本要求：机侧变流器用于控制发电机转矩，变速运行实现最大功率跟踪捕获；网侧变流器用于满足相关并网导则，具有快速的有功功率响应和无功控制能力。

## 1 海上风电变流器主电路拓扑、器件及参数

风电变流器一般采用背靠背结构，机侧变换器和网侧变换器之间设置直流环节，根据直流环节储能器件的不同，变换器可以分为电压源型变换器和电流源型变换器。电压源型变换器直流侧接电容，电流源型变换器直流侧接电感。在风电变流器中，多采用电压源型变换器<sup>[28-29]</sup>，有一些电流源型变换器的研究文献<sup>[30-31]</sup>，但尚无应用案例。

当前海上风电变流器的主流拓扑是两电平拓扑和三电平拓扑，两电平拓扑主要应用于低压风电变流器中，三电平拓扑在中、低压风电变流器中均被广泛应用。随着控制技术的成熟，更多电平的拓扑也开始应用于风电变流器<sup>[32-35]</sup>。表1列出了当前主流商用风电变流器的技术参数。

表1 主流商用风电变流器技术参数

Table 1 Technical parameters of major commercial wind power converters

制造商	变流器系列	额定功率	额定电压	拓扑结构
ABB	ACS 880	0.8~8 MW	690 V	两电平并联
ABB	PCS 6000	最高12 MW	3.3/4.16 kV	三电平并联

续表

制造商	变流器系列	额定功率	额定电压	拓扑结构
Siemens	Dynavert XL	最高8 MW	690 V	两电平并联
Converteam	MV 3000	最高6 MW	690 V	两电平并联
Converteam	MV 7000	5~8 MW	3.3 kV	三电平NPC
禾望电气	HW FP690	5.5 MW	690 V	两电平并联
禾望电气	HW 8000	5~8 MW	3000 V	三电平NPC
阳光电源	WG 3000 KFP	3 MW	690 V	两电平并联
阳光电源	WG 6000 KFP	6 MW	3.3 kV	三电平并联
中国中车	CRRC x MW	最高6 MW	690 V	两电平并联
海德新能源	HD04FPx000	4~8 MW	690 V	两电平并联
海德新能源	HD04FP5000	5 MW	3000 V	三电平并联

由表1可知,目前风电变流器低压和中压方案共存,多采用并联型的拓扑结构。多变换器并联能够有效提高变流器容量、降低生产成本、提高系统的运行可靠性。

海上风电机组的大容量化和全功率变换是发展趋势,由于受到齿轮箱容量的制约,5 MW以上风电机组的传动链采用直驱型较普遍。中、低压海上风电机组共存,其中690 V低压机组历久弥新,3000 V中压机组方兴未艾。海上风电机组的大容量化使得变流器的容量不断增大,需要采用更大功率等级的功率器件,或者采用多变换器并联的拓扑结构来满足大功率变换的要求。海上运维不便,对风电机组的运行可靠性提出了更高的要求,采用多变换器并联结构可以有效提升系统的可靠性。海上风电的投资高,必须提高系统效率,增加机组的发电量,才能提高海上风电的经济效益。因此,海上风电机组对效率、可靠性和可用性的要求越来越高。

对于大容量风电机组,采用低压方案时,风电机和变流器的出口电流很大,不仅增加了电缆线路的传输损耗,而且带来诸多安装与可靠性问题。采用中压变流方案可以减小线路传输损耗,节省电缆成本,三电平拓扑还可提升功率变换效率,故中压变流方案备受欢迎。目前限制中压方案的瓶颈在于低速同步发电机出口电压的提升上。中压变流器技术上的问题已基本解决,变流器本身的成本偏高,如采用IGCT或者IEGT等开关器件,对水冷设备的特殊要求会进一步增加系统成本,因此中压变流方案的整体优势尚不明显,多MW级风电机组的低压和中压方案将会长期共存,10 MW级以上中压方案可能是必然的选择。由于海上风电机组的运维不便,一旦停机将会造成巨大经

济损失,因此,海上风电变流器往往采用多变流器并联结构,以提高其运行的可靠性。

海上风电机组在大容量、全功率变换趋势下,与其功率匹配的风电变流器的容量也日趋增大。受到功率半导体器件的电气规格的限制,大功率海上风电变流器通常采用多变换器并联的技术方案来增加系统容量<sup>[36-38]</sup>。此外,海上风电机组的运行维护的成本高,并联型变流器具有灵活的冗余控制特性,可提高海上风电变流器的运行可靠性<sup>[39-40]</sup>。Siemens的海上直驱风电机组SWT-8.0-154采用双变流器并联的变流方案,Gamesa的海上半直驱机组G132-5.0 MW采用4台变流器并联的变流方案。可见,多变换器并联是海上风电变流器的必然选择。

并联型海上风电变流器主要分为两类:两电平并联型和三电平并联型,如图2所示。两电平并联型风电变流器主要用于低压变流系统,三电平并联型风电变流器应用于低压、中压变流系统。并联型风电变流器的高效、可靠运行控制是亟需攻克的关键技术。

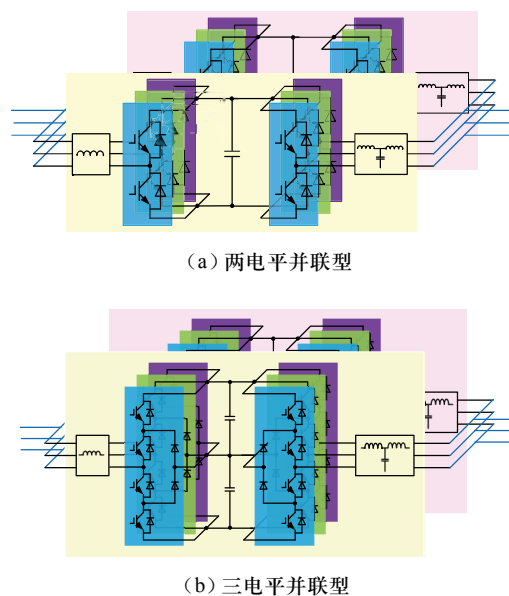


图2 海上风电变流器的主流拓扑结构

Fig. 2 Major topologies for offshore wind power converter

## 2 海上风电变流器的效率提升技术

效率是衡量功率变换器性能的重要指标。大容量风电机组的初始投资和运维成本都比较高,风电变换效率的高低直接关系到风电的经济性,提升风电变流器的效率是关键。对于风电变流器,其效率与变换器的拓扑结构、功率开关器件、PWM调制方式、功率损耗机制和并网导则等因素密切相关。

提高风电变流器的效率,可以采用高效率变换拓扑,如三电平拓扑的变换效率高于传统的两电平拓扑<sup>[41]</sup>;可以采用软开关技术<sup>[42-43]</sup>替代传统的硬开关技术提高变换器运行效率;碳化硅、氮化镓等<sup>[44-45]</sup>新型功率器件实现大容量化后,可以替代传统的硅器件,在同等开关频率下这些宽禁带器件的开关损耗远低于硅器件;采用低损耗的PWM调制方式<sup>[46-47]</sup>,如DPWM调制使得一相电平钳位其对应开关器件不动作,从而有效降低器件的功率损耗;采用有源阻尼控制<sup>[48-49]</sup>方法替代无源阻尼降低滤波器的功率损耗;采用中压功率变换方式替代传统的低压方案<sup>[50]</sup>,通过提高电压减小电流,从而降低变换器中开关器件、滤波器和传输线路上的功率损耗;采用效率优化拓扑<sup>[51-52]</sup>,提高变换器的功率变换效率。

对于大容量风电变流器,若采用低压变流方案,变流器的电流会很大,增加了并联电缆的数量和传输线路的损耗,影响了系统的效率和可靠性<sup>[53-54]</sup>。为了减小大功率变换时的电流来提升变流器的效率,可以采用中压变流方案<sup>[55-57]</sup>。适用于中压变流器的拓扑主要有多电平拓扑、模块化多电平拓扑和H桥级联拓扑。模块化多电平拓扑<sup>[58]</sup>通过子模块串联提高变换器的电压和功率等级,可以扩展到任意电压和功率等级,子模块的开关频率较低,可以降低功率器件的损耗,提升变换器效率。多电平拓扑降低了功率器件所需的电压等级,在大功率变换器中应用较多<sup>[59]</sup>,如三电平、五电平拓扑。文献[60]比较了中点钳位型、飞跨电容型三电平和级联型中压全功率变流器的优缺点,并表明变流器性能随着电平数的增加而提升。

并联型变流器的传统控制策略一般采用功率均分控制模式,功率均分控制策略简单,广泛应用于功率恒定的应用场合。风电功率具有随机、波动的特性,这就使得风电变流器的实际载荷波动剧烈。统计数据表明,风电变流器的平均载荷一般低于其额定功率的50%。功率变换器的实际运行效率与其负载功率水平密切相关,不同载荷时的效率差异较大,尤其是负载较低时,其效率远低于额定工况下的效率。因此,传统的功率均分控制并不适合功率波动较大、平均载荷较低的场合。为了提高并联型风电变流器的运行效率,首先可以从提高单个变换器的效率着手,文献[41-43,46-52]提出了一系列提高单个变换器效率的优化方法,但是这些效率提升方法并没有考虑并联变换器独特的结构特点。因此,可以充分利用并联结构的特点,从并联系统的整体控制策略着手,研究优化运

行控制策略对并联系统的整体效率进行优化与提高。

变换器的实际效率与其实际负载功率密切相关,因此并联型变流器的整体效率取决于并联系统内各个变换器的实际运行功率,即并联变换器的组合运行方式。波动功率下,并联型变换器的运行效率的提高,可以通过动态分配并联系统内各个变换器的实际运行功率来实现。文献[61]提出一种提高并联型DC-DC变换器效率的电流分配策略,基于变换器的电流-效率模型,根据并联变换器的效率模型的差异采取不同的电流分配策略,但是该方法属于静态功率分配,并未考虑波动工况下并联变换器效率的提升。文献[62]基于变换器的损耗模型,提出以并联系统效率最优的协调控制策略,优化微网各个并联变换器的稳态功率分配。文献[63]提出并联逆变器的智能控制策略,基于粒子群算法离线优化并联变换器的功率分配从而提高并联系统低载工况下的效率。针对功率等级相同、结构不同的变换器并联系统,文献[64]提出一种并联运行方式,不同类型的变换器效率曲线差异较大,提高了并联系统运行的优化自由度。文献[65]提出分级投切的功率控制策略,根据并联系统的运行工况分级投切变换器的数量,提高并联逆变器的整体效率。文献[66]提出一种提高并联变流器系统运行效率的自适应功率优化控制方法。基于单个变换器的效率曲线,通过控制优化算法优化不同负载功率时各并联变换器的功率分配值。

### 3 海上风电变流器的可靠性提升技术

由于海上风电的初始投资和运维成本较高,大容量海上风电机组的可靠性直接关系到海上风电的经济效益与开发成败。风电变流器作为风电机组中的关键组成设备,其运行的可靠性是亟需解决的关键技术问题。

根据风力发电系统故障及停机原因的统计与分析,风电机组中电气系统和控制部分的故障率最高,变流器作为电气系统的主要组成部分,容易成为风力发电系统的薄弱环节<sup>[67-68]</sup>。风电变流器的故障不仅会使得风电机组停机带来发电损失,同时还会增加运行维护成本,大大增加风电的度电成本。因此,大规模风电并网必须提高风力发电系统的可靠性,提高风电的经济效益。

风电变流器的可靠性影响因素很多,其故障失效机制目前还没有明确结论<sup>[17]</sup>。一般认为变流器的可靠

性由其拓扑结构的可靠性和功率器件的可靠性共同决定<sup>[16]</sup>。文献[15]对多种工业应用场合的电力电子变换器的可靠性进行调研,结果表明:功率半导体器件是电力电子变换器中最为脆弱的部件。德国IWES的学者通过对双馈机组和感应电机全功率机组变流器的现场运行数据进行分析,发现功率器件的失效机制并不是变流器故障的主要原因,如铝键合线脱落、焊接点和焊接层疲劳失效,恶劣环境下(如盐雾、凝露等)变流器硬件的欠防护和电气过应力才是变流器故障的主要原因<sup>[17]</sup>。

尽管对于变流器故障机制莫衷一是,基于控制策略改进来提高变流器的可靠性将会是一种主要手段。这种控制策略一般是通过降低IGBT等开关器件电热应力的变化率来提高变流器的整体可靠性。

引起功率器件失效的因素很多,如电气应力、湿热、机械应力、宇宙射线、腐蚀污染等。大量研究表明,热应力是引起IGBT模块失效的主要原因<sup>[69]</sup>。风电功率的随机波动造成变流器的载荷间歇性波动,使得变流器的热状态频繁变化,进一步增加了功率开关器件承受的热应力,降低了变流器的可靠性。海上高湿度及高盐雾的恶劣运行环境要求变流器采用高防护等级的结构设计,此时载荷的大幅波动使得变流器内部出现热分布不均匀,会产生“凝露”现象<sup>[17]</sup>,影响变流器的安全可靠运行。

美国国防部提出MIL-HDBK-217导则,采用应力分析法评估电力电子设备的可靠性,将加速因子与基本故障率之积作为动态故障率来评估其可靠性。对于风电变流器而言,其整体故障率可以认为是所有器件故障率的线性叠加。由于风电变流器的运行工况复杂多变,MIL-HDBK-217导则采用的故障率模型已无法准确评估大容量风电变流器的可靠性。基于物理失效机制的可靠性模型可以更好地评估风电变流器等复杂电力电子系统的可靠性<sup>[70]</sup>。影响变流器可靠性的物理因素中,热应力引起的机械疲劳是IGBT模块失效的最主要因素。由于功率模块各层材料的热膨胀系数不同,长时间的结温波动会导致焊接层疲劳或键合线脱落<sup>[71]</sup>,导致其使用寿命缩短,从而影响功率模块的可靠性。

风电的随机、波动特性使得变流器的运行工况不断变化,亦使得IGBT结温长期处于波动状态,进而加速变流器使用寿命的终结。近年来,如何提高风电变流器的可靠性成为业界关注的重点。由于传统风电变流器的设计准则已经不能满足电力电子设备日益增

长的可靠性要求,以可靠性为目标的设计准则应运而生。在设计阶段,通过变流器的寿命预测<sup>[72-75]</sup>、可用度评估<sup>[76-78]</sup>等,对系统的可靠性进行评估;在运行阶段,通过在线监测<sup>[79-81]</sup>和状态控制<sup>[82-83]</sup>等措施对其运行状态进行管理;故障后通过快速地诊断、定位、隔离故障<sup>[84-85]</sup>,对变流器进行容错控制<sup>[86-88]</sup>、故障重构控制,维持系统的持续运行。

对于大容量复杂电力电子系统的可靠性问题,国际学术界的研究方兴未艾。丹麦奥尔堡大学的可靠性研究中心研究电力电子系统可靠性,从变流器应力分析与寿命评估,提高可靠性控制策略等方面着手<sup>[89-94]</sup>。文献[76]从理论计算入手对不同拓扑的变流器可靠性进行了对比分析。文献[95]研究了不同物理失效机制下热循环周期对半导体器件寿命的影响。文献[73]提出了基于结温波动的逆变器寿命评估方法。此外,基于任务配置的可靠性设计<sup>[21,96]</sup>也是电力电子可靠性研究的基础问题,实现基于实际工况及运行环境的电力电子变换器可靠性设计。

分析变流器的热应力及其影响是可靠性研究的基础,而如何对变流器进行热控制是提高其可靠性的重要手段,变流器的使用寿命主要取决于功率器件。因此,平滑功率器件的结温波动,降低变流器的热应力可以有效延长风电变流器的使用寿命。近年来国内外学者在这方面展开了许多针对性研究,文献[97]提出一种精确的电热模型,为热应力研究提供理论基础。文献[90]针对三电平拓扑中功率器件的损耗分布不均导致的热不平衡问题,研究通过优化调制的方法来均衡变流器内部的热分布。文献[91]比较了几种拓扑风电变流器低电压穿越过程中的热应力,其中三电平、五电平H桥拓扑可以有效减轻功率器件的热应力。文献[92-93]研究了双馈型变流器的热行为,并通过控制无功环流来改善变流器内部的热状态。文献[98]提出一种电热仿真模型的参数提取方法,为精确仿真变流器热应力提供基础。文献[99]研究了三相PWM逆变器中IGBT模块的结温高效准确仿真模型。文献[100-101]分析了不同风速记录时间对风电变流器中寿命评估的影响。文献[102]提出并联型风电变流器基于无功环流和正交环流的热控制来平滑结温波动。文献[103]提出一种基于开关序列调整的热控制来平滑结温波动。这些方法通过控制及调制策略的优化与改进,实现了功率器件的结温平滑,延长变流器使用寿命。这些热应力控制方法都是通过损耗控制的方法平滑器件结温波动来提高变流器可靠性。但是,采用损耗控制时变流

器的运行方式和变流器效率最优是相悖的。因此,综合考虑变流器效率的热应力控制研究意义重大。

随机、波动性风电功率工况下,功率器件的结温波动剧烈,除了会造成机械疲劳损伤导致器件失效,还会引起变流器内部热分布不均匀。对海上风电变流器而言,为了应对盐雾、潮湿等恶劣工作环境,一般采用封闭式全水冷的高防护等级柜体设计,此时,当风功率突降时,变流器内部将会出现局部冷点,容易形成凝露现象。凝露会导致功率器件发生故障,给变流器的安全运行带来隐患<sup>[19]</sup>。预防凝露一般采用加热或者除湿控制降低变流器内部的相对或绝对湿度,提高露点温度的方法<sup>[104]</sup>。通过电热应力控制可以在不增加硬件设备的情况下均匀热分布,从而实现防凝露。

#### 4 海上风电变流器的可用度提升技术

随着大容量电力电子变流器的广泛使用,变流器的安全可靠运行日益成为关注焦点,对变流器的故障穿越能力要求越来越高。控制变流器电热应力的可靠性提高方法只在正常工况下有效,具有很大的局限性。当变流器处于故障工况时,就需要进行容错控制来提升变流器的容错性能,保证变流器故障后仍具有一定的运行能力,提高变流器的可用度。故障发生后,风电变流器通过容错控制可以使得风电机组故障后继续运行直至维修,减少意外故障造成的被动停机。

正常运行模式下,风电变流器需要具有良好的输出性能;而容错运行模式下,变流器可以牺牲部分性能指标来维持系统继续运行,提高机组的总体发电量。根据系统有无冗余配置,容错变流器系统可以分为余度控制系统和容错控制系统<sup>[105-106]</sup>。余度控制系统利用冗余桥臂或冗余变换器替代故障单元从而实现系统硬件拓扑的容错;容错控制系统则改变控制策略实现系统软件控制的容错。有冗余配置变流器一般可以保证故障前后性能不变,无冗余变流器容错后往往需要降功率运行。

容错控制系统的总体性能与故障诊断隔离的速度与精度、有无冗余配置、容错控制策略密切相关。故障诊断与隔离模块是容错系统中最为关键的部分,只有快速地诊断故障、定位故障,才能迅速隔离故障,是实现容错控制的基础。

对于有冗余配置变流器系统,根据系统硬件冗余的方式可以分为开关级冗余、桥臂级冗余、模块级冗

余和系统级冗余<sup>[87-88]</sup>。变换器发生故障后,先隔离故障器件、桥臂、模块或系统,再利用冗余的硬件单元替代故障单元,从而实现变换器故障后的容错运行。功率开关器件发生开路故障后,可以通过冗余桥臂<sup>[107-108]</sup>、虚拟桥臂<sup>[109-112]</sup>的容错控制策略实现变换器的容错运行。冗余桥臂方法是指变换器发生故障后,先隔离故障桥臂,再投入冗余桥臂替代故障桥臂,从而实现变换器故障后的容错运行。虚拟桥臂利用双向开关将故障桥臂与直流母线中点相连,利用直流母线虚拟桥臂,变流器运行在三相四开关模式,从而实现故障后的容错运行。利用冗余桥臂与虚拟桥臂重构变换器时,每相桥臂都需要配置双向开关,增加了硬件成本,不便于推广应用,因此文献[113]提出一种最少硬件配置的容错运行拓扑,只需1个双向开关连接网侧变压器中点和直流母线中点。

对于无硬件冗余变流器系统,利用双向开关连接背靠背变流器两侧变换器的同相桥臂,可以通过共用桥臂实现容错控制。文献[114-115]提出基于预测控制的桥臂复用容错控制策略,文献[116]对桥臂复用的方法进行了深入研究,提出共用直流母线、共用单相桥臂的容错控制方法。桥臂复用会增加共用桥臂的电压、电流应力,系统需要降功率运行,对于电机驱动系统还需要限制电机转速。三电平拓扑的电压矢量存在冗余矢量,增加了三电平拓扑容错控制的自由度<sup>[117-118]</sup>。当三电平拓扑的外管发生开路故障时,故障相无法产生对应的电压矢量,文献[119]通过减小调制制度来满足电压输出需求,对于P或N型小矢量的缺失则通过冗余矢量替代、优化开关序列实现容错控制。文献[120]提出一种钳位二极管开路故障容错控制方法,通过利用冗余开关状态实现容错运行。文献[121]针对永磁风电系统的机侧变换器,提出d轴电流注入的容错控制,消除外管开路导致的电流畸变和转矩波动,但注入d轴电流会改变系统的功率因数。

对于并联变换器系统,并联拓扑结构增加了容错控制的自由度。常规控制策略下,并联变流系统中的变换器故障后即切除,系统降功率运行。这种控制策略虽然简单却降低了并联系统的可用度。针对并联型电机驱动系统,文献[122]提出了直接补偿、不对称补偿的容错控制策略,文献[123]优化并联变换器的电流分配实现开路故障下最大转矩容错运行。容错运行后,系统的性能不可避免地会降低,文献[124]比较了最大转矩、最小损耗容错控制模式的优缺点,提出一种全转速范围最大转矩的容错控制策略。文献[125]提

出一种转速、损耗协调容错控制策略,在低负载工况下采用最小损耗控制模式,在高负载工况下实行最大扭矩控制模式,优化不同工况下系统的可用度和运行效率。

容错控制策略的故障穿越能力有限,一般只能实现单故障容错运行,当多故障发生后,容错控制策略就无法维持系统的继续运行。因此,研究多故障下的重构控制策略意义重大,尤其是无硬件冗余的重构控制技术。基于软件控制层面的系统重构是大容量功率变换应用领域的首选。文献[126]提出一种基于FPGA的背靠背变流器的重构控制方法,该变流器通过共用一相桥臂实现故障重构,重构变流器运行在五桥臂模式。文献[127]提出一种永磁同步电机的重构驱动控制,正常时双三相独立运行,故障后共用一相桥臂采用五相运行模式实现重构控制,共用桥臂需要配置辅助双向开关,本质上是一种硬件辅助、软件优化的重构控制方法。基于三电平拓扑的结构特点,文献[128]提出了一种改变内外管占空比的方法实现三电平NPC逆变器的重构控制,该方法不具有普适性。因此,有必要研究新的基于软件实现、具有普适性的重构控制策略,文献[129]基于并联系统的结构特点,提出一种故障重构控制策略,可以实现多桥臂故障下的重构运行,提高了并联系统的可用度。重构控制将是未来研究的热点。

## 5 风电机组电网支撑与无闭锁故障穿越技术

大型风力发电机组将风电变流器作为与电网交互的接口设备,控制效果好,响应速度快,但是无法给电网提供惯量支撑<sup>[130]</sup>。

随着风电渗透率的不断增加,缺少必要的惯量和阻尼将严重影响电网的稳定运行,因此如何改变风电变流器的控制方式,使得风电机组具备惯量响应能力,成为当下“电网友好型”风电场研究的热点方向之一。

目前主流的风电机组虚拟惯量控制的方式是在机组主控制器中增加反应电网频率变化的附加功率,根据电网频率的变化动态修改功率指令,从而实现惯量响应与频率支撑<sup>[131-132]</sup>。针对风电机组在虚拟惯量控制下的稳定性进行分析,文献[133]建立了考虑锁相环和虚拟惯量控制下的双馈风电机组小干扰信号模型,通过数学解析的方式说明了虚拟惯量影响系统小干扰稳定性的机理。

另外一种普遍采用的虚拟惯量控制路线是风电变流器的电压源型控制,风电变流器外特性上体现为电压源,自动响应负荷变化,实现虚拟惯量控制。

文献[134]提出一种双馈风电机组虚拟同步控制方法,具有较强的弱网适应性,机侧变流器采用虚拟同步控制,模拟同步机转子运动方程,网侧变流器采用惯性同步方式实现与电网的同步。文献[135]提出一种新型虚拟同步风机故障穿越方法,利用动态补偿转子电压的故障分量来提高系统的故障穿越能力。文献[136]研究了全功率风电机组虚拟惯量控制的实验测试方法,实现了模拟仿真与实物实验的结合。文献[137]将虚拟惯量技术与风场黑启动相结合,使得风场黑启动过程中的频率稳定性大大提高。文献[138]提出一种新型全功率风电机组虚拟同步控制方法,机侧变流器控制直流母线电压,网侧变流器控制风机并网功率。

风电机组的虚拟惯量控制将导致诸多严重的问题,例如频率的二次跌落、加剧轴系低频扭振等。文献[139]改变虚拟惯量的附加功率方式,将附加有功功率改为斜坡式变化,实现电网频率二次跌落的有效抑制。文献[140]利用扩张状态观测器动态实时评估风电机组的输出功率。在一次调频能力方面,文献[141]通过降功率运行使得风机具备一次调频能力,在频率变化时及时投入有功备用,抑制电网频率的深度跌落。

为了解决虚拟惯量控制导致的轴系振荡问题,文献[142]将传统的两质量块模型作为研究对象,指出电气负阻尼的产生原因是励磁控制参数的不当选择。文献[143]则将研究对象对准三质量块模型,通过时域仿真指出电网故障也是导致轴系振荡的潜在原因之一。文献[144]指出双馈风电机组的传动系统扭振如果得不到有效抑制,将导致机组转速失稳。

除了上述两种优化方向之外,目前虚拟惯量控制的研究还着眼于性能分析与综合评估。文献[145]将有风电调频下的稳态频率偏移之差作为评价惯量控制的量化指标。文献[146]基于数模分析和仿真验证,论证了功率增量对于系统等效惯性时间常数的影响。文献[147]推导了虚拟惯量控制参数与电网频率变化之间的量化关系。

随着装备Crowbar电路的DFIG机组的广泛制造和使用,多数DFIG已初步满足电网低电压故障下的不脱网运行要求,电网遭遇低电压故障时,Crowbar电路需及时投入,同时转子变流器闭锁,失去了控制转子电流的能力,无法调节定子有功、无功电流输出。

为了改善变流器控制闭锁带来的上述问题,文献

[148]采用了超级电容器储能配合协调控制方法,在故障发生时将转子过流能量借由超级储能吸收,实现了故障过程中功率的动态控制。文献[149]进一步改善了异常电压的耐受范围,借由超级电容器储能系统实现了电网高、低电压综合故障的安全穿越。文献[150]通过在故障穿越期间投入转子电阻,限制转子电流保障了转子变流器的可控性,在实现故障穿越的同时有效改善了机组的转速稳定性和瞬态行为。

## 6 结论与展望

采用两电平或三电平变换器并联组成的变流器是海上风电变流器的主流结构,风电的全功率变换和超大容量化是发展趋势,容量将从多MW级进入10 MW级。伴随着容量的进一步提升和高压大电流宽禁带器件的技术突破,采用模块化多电平或级联多电平拓扑的海上风电变流器也将具有可行性。高压大容量化并联系统的运行控制、容错和重构可有效提升变流系统的效率和可用度。

风电高渗透率并网是必然趋势,而风电平价上网是发展风电的必由之路,对海上风电而言,采用控制的方法提高风电机组的发电效率和可利用率是最经济可行的手段。风电变流器作为风力发电机组与电网的接口,既是风电机组也是电网的强可控环节,其技术进步直接影响着机组的并网能力和发电效率。海上风电变流器的技术发展趋势体现在:轻载且大幅波动工况下变流器的效率提升技术、以容错运行为代表的变流器利用率提升技术、变流器的无闭锁故障穿越技术、变流器适应风电直流并网的技术、以主动阻尼电网频率为代表的变流器电网支撑技术和变流器的紧凑化和维护便利化设计技术等。

## 参考文献

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind report 2017[R/OL]. (2018)[2019-01-31]. <http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf>.
- [2] 国家可再生能源中心. 国际可再生能源发展报告[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016: 21-26.
- [3] 董秀成, 高建, 张海霞. 能源战略与政策[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 170-174.
- [4] 吴斌, 朗永强, Navid Zargari, 等. 风力发电系统的功率变换与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 8-11.
- [5] 年珩, 程鹏, 贺益康. 故障电网下双馈风电系统运行技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4184-4197.
- [6] Nian H, Cheng P, Zhu Z Q. Coordinated direct power control of DFIG system without phase-locked loop under unbalanced grid voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2905-2918.
- [7] Yao J, Li H, Chen Z, et al. Enhanced control of a DFIG-based wind-power generation system with series grid-side converter under unbalanced grid voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3167-3181.
- [8] Carroll J, McDonald A, McMillan D. Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG drive trains[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 663-670.
- [9] Blaabjerg F, Liserre M, Ma K. Power electronics converters for wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 708-719.
- [10] Liserre M, Cardenas R, Molinas M, et al. Overview of multi-MW wind turbines and wind parks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1081-1095.
- [11] 耿华, 许德伟, 吴斌, 等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 68-75. Geng Hua, Xu Dewei, Wu Bin, et al. Control and stability analysis for the permanent magnetic synchronous generator based direct driven variable speed wind energy conversion system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 68-75(in Chinese).
- [12] Polinder H, Van der Pijl F F A, De Vilder G J, et al. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 725-733.
- [13] Polinder H, Ferreira J A, Jensen B B, et al. Trends in wind turbine generator systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3): 174-185.
- [14] 邓秋玲, 姚建刚, 黄守道, 等. 直驱永磁风力发电系统可靠性技术综述[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 144-151. Deng Qiuling, Yao Jiangan, Huang Shoudao, et al. An overview on reliability technology for direct drive permanent magnet wind power generation system[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 144-151(in Chinese).
- [15] Yang S, Bryant A, Mawby P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.
- [16] 周维维, 吴军科, 杜雄, 等. 功率变流器的可靠性研究现状及展望[J]. 电源学报, 2013 (1): 1-15. Zhou Luwei, Wu Junke, Du Xiong, et al. Status and outlook of power converter's reliability research[J]. Journal of Power Supply, 2013(1): 1-15(in Chinese).
- [17] Fischer K, Stalin T, Ramberg H, et al. Field-experience based root-cause analysis of power-converter failure in wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2481-2492.



- [18] 黄玲玲, 曹家麟, 张开华, 等. 海上风电机组运行维护现状研究与展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 729-738.  
Huang Lingling, Cao Jialin, Zhang Kaihua, et al. Status and prospects on operation and maintenance of offshore wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 729-738(in Chinese).
- [19] Zhang P, Du Y, Habetler T G, et al. A nonintrusive winding heating method for induction motor using soft starter for preventing moisture condensation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(1): 117-123.
- [20] Chung H S, Wang H, Blaabjerg F, et al. Reliability of power electronic converter systems[M]. Herts: Institution of Engineering and Technology, 2015.
- [21] Susana Estefany De León-Aldaco; Hugo Calleja; Jesús Aguayo Alquicira. Reliability and mission profiles of photovoltaic systems: a FIDES approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2578-2586.
- [22] 贺益康, 徐海亮. 双馈风电机组电网适应性问题及其谐振控制解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5188-5203.  
He Yikang, Xu Hailiang. The grid adaptability problem of DFIG-based wind turbines and its solution by resonant control scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5188-5203(in Chinese).
- [23] 刘昌金. 适应电网环境的双馈风电机组变流器谐振控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [24] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高LCL型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2327-2335.  
Yang Dongsheng, Ruan Xinbo, Wu Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2327-2335(in Chinese).
- [25] 王鹏, 王晗, 张建文, 等. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1528-1537.  
Wang Peng, Wang Han, Zhang Jianwen, et al. Design and application of supercapacitor energy storage system used in low voltage ride through of wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1528-1537(in Chinese).
- [26] Huang Q, Zou X, Zhu D, et al. Scaled current tracking control for doubly fed induction generator to ride-through serious grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2150-2165.
- [27] 余阳阳, 姜卫东, 阚超豪, 等. 不对称电网下背靠背系统前端整流器的优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2261-2271.  
She Yangyang, Jiang Weidong, Kan Chaohao, et al. An optimal control method of front-end rectifier in the back-to-back systems based on asymmetric grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2261-2271(in Chinese).
- [28] Gohil G, Bede L, Teodorescu R, et al. Line filter design of parallel interleaved vses for high-power wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 6775-6790.
- [29] Gohil G, Bede L, Teodorescu R, et al. Magnetic integration for parallel interleaved vses connected in a whiffletree configuration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11): 7797-7808.
- [30] Dai J, Xu D, Wu B. A novel control scheme for current-source-converter-based PMSG wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(4): 963-972.
- [31] Giraldo E, Garcés A. An adaptive control strategy for a wind energy conversion system based on PWM-CSC and PMSG[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1446-1453.
- [32] Yuan X, Chai J, Li Y. A transformer-less high-power converter for large permanent magnet wind generator systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 318-329.
- [33] Yuan X. A set of multilevel modular medium-voltage high power converters for 10-MW wind turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 524-534.
- [34] Diaz M, Cardenas R, Espinoza M, et al. Control of wind energy conversion systems based on the modular multilevel matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8799-8810.
- [35] Li J, Bhattacharya S, Huang A Q. A new nine-level active NPC (ANPC) converter for grid connection of large wind turbines for distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3), 961-972.
- [36] 张建文, 王鹏, 王晗, 等. 多逆变器并联的均流控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 61-68.  
Zhang Jianwen, Wang Peng, Wang Han, et al. Average-current control strategy of multiple parallel inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 61-68(in Chinese).
- [37] Li R, Xu D. Parallel operation of full power converters in permanent-magnet direct-drive wind power generation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1619-1629.
- [38] Lv J, Zhang J, Cai X, et al. Circulating current control strategy for parallel full-scale wind power converters[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(4): 639-647.
- [39] Shahin A, Moussa H, Forrissi I, et al. Reliability improvement approach based on flatness control of parallel-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 681-692.
- [40] Yu X, Khambadkone A M. Reliability analysis and cost optimization of parallel-inverter system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3881-3889.
- [41] Kantar E, Hava A M. Optimal design of grid-connected voltage-source converters considering cost and operating factors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5336-5347.
- [42] 许春雨, 陈国呈, 张瑞斌, 等. 三相软开关逆变器的PWM

- 实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 23-27.  
Xu Chunyu, Chen Guocheng, Zhang Ruibin, et al. A PWM realization method for three-phase soft-switching inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 23-27(in Chinese).
- [43] 张化光, 王强, 褚恩辉, 等. 新型谐振直流环节软开关逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 21-27.  
Zhang Huaguang, Wang Qiang, Chu Enhui, et al. A novel resonant DC link soft-switching inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 21-27(in Chinese).
- [44] 盛况, 郭清, 张军明, 等. 碳化硅电力电子器件在电力系统的应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 1-7.  
Sheng Kuang, Guo Qing, Zhang Junming, et al. Development and prospect of SiC power devices in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 1-7(in Chinese).
- [45] 张波, 邓小川, 张有润, 等. 宽禁带半导体SiC功率器件发展现状及展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(2): 111-118.  
Zhang Bo, Deng Xiaochuan, Zhang Yourun, et al. Recent development and future perspective of silicon carbide power devices-opportunity and challenge[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009, 4(2): 111-118(in Chinese).
- [46] Lee J S, Yoo S, Lee K B. Novel discontinuous PWM method of a three-level inverter for neutral-point voltage ripple reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3344-3354.
- [47] Jiao Y, Lee F C. New modulation scheme for three-level active neutral-point-clamped converter with loss and stress reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5468-5479.
- [48] Peña-Alzola R, Liserre M, Blaabjerg F, et al. LCL-filter design for robust active damping in grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2192-220.
- [49] 陈新, 韦徽, 胡雪峰, 等. 三相并网逆变器LCL滤波器的研究及新型有源阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 71-79.  
Chen Xin, Wei Zheng, Hu Xuefeng, et al. Research on LCL filter in three-phase grid-connected inverter and novel active damping control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 71-79(in Chinese).
- [50] Papafotiou G A, Demetriades G D, Agelidis V G. Technology readiness assessment of model predictive control in medium- and high-voltage power electronics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5807-5815.
- [51] 陈根, 王勇, 蔡旭. 兆瓦级中压风电变流器的新型串联混合三电平NPC拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 48-54.  
Chen Gen, Wang Yong, Cai Xu. A novel serial hybrid three-level NPC topology for multi-MW medium voltage wind power converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 48-54(in Chinese).
- [52] 曾翔君, 张宏韬, 李迎, 等. 大功率直驱风电系统高效率变流器设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 15-21.  
Zeng Xiangjun, Zhang Hongtao, Li Ying, et al. Design of high-efficiency converters for large direct-drive wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 15-21(in Chinese).
- [53] Faulstich A, Stinke J K, Wittwer F. Medium voltage converter for permanent magnet wind power generators up to 5 MW[C]. Proceedings of the Seventh European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden: EPE, 2005: 1-9.
- [54] Zhang L, Cai X. A novel multi-level medium voltage converter designed for medium voltage wind power generation system[C]. Proceedings of the Second Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu: IEEE, 2010: 1-4.
- [55] Ng C H, Parker M A, Ran L, et al. A multilevel modular converter for a large, light weight wind turbine generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1062-1074.
- [56] Duran M J, Kouro S, Wu B, et al. Six-phase PMSG wind energy conversion system based on medium-voltage multilevel converter[C]. Proceedings of the Fourteenth European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham: EPE, 2011: 1-10.
- [57] 李鑫, 张建文, 蔡旭. 级联H桥中压风电变流器故障状态优化控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 861-869.  
Li Xin, Zhang Jianwen, Cai Xu. Control strategy of cascade multi-cell MV wind power converter under fault condition[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 861-869(in Chinese).
- [58] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.  
Wang Shanshan, Zhou Xiaoxin, Tang Guangfu, et al. Modeling of modular multi-level voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 1-8(in Chinese).
- [59] Rodríguez J, Bernet S, Wu B, et al. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 2930-2945.
- [60] Senturk O S, Helle L, Munk-Nielsen S, et al. Medium voltage three-level converters for the grid connection of a multi-MW wind turbine[C]. Proceedings of the Thirteenth European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona: EPE, 2009: 1-8.
- [61] 孙晋坤, 刘庆丰, 冷朝霞, 等. 基于效率模型的 DC-DC 变换器并联系统电流分配策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 10-18.  
Sun Jinkun, Liu Qingfeng, Leng Zhaoxia, et al. A current distribution strategy for parallel DC-DC converters based on the efficiency model[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 10-18(in Chinese).
- [62] Wang S, Liu J, Liu Z, et al. Efficiency-based optimization of steady-state operating points for parallel source converters in stand-alone power system[C]. Proceedings of the Eighth International Power Electronics and Motion Control Conference. Hefei: IEEE, 2016: 163-170.

- [63] Teng J H, Liao S H, Huang W H, et al. Smart control strategy for conversion efficiency enhancement of parallel inverters at light loads[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(12): 7586-7596.
- [64] Vogt T, Peters A, Frohleke N, et al. Power profile based selection and operation optimization of parallel-connected power converter combinations[C]. *Proceedings of the Seventh International Power Electronics Conference-ECCE Asia*. Hiroshima: IEEE, 2014: 2887-2892.
- [65] Yu X, Khambadkone A M, Wang H, et al. Control of parallel-connected power converters for low-voltage microgrid—Part I: A hybrid control architecture[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(12): 2962-2970.
- [66] 陈根, 蔡旭. 提升并联型风电变流器运行效率的自适应功率优化控制[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(22): 6492-6499. Chen Gen, Cai Xu. Adaptive power optimal control for operation efficiency improvement of parallel wind power converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(22): 6492-6499(in Chinese).
- [67] Wang H, Ma K, Blaabjerg F. Design for reliability of power electronic systems[C]. *Proceedings of the Thirty-eighth Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal: IEEE, 2012: 33-44.
- [68] Busca C. Modeling lifetime of high power IGBTs in wind power applications—An overview[C]. *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Industrial Electronics*. Gdansk: IEEE, 2011: 1408-1413.
- [69] Choi U M, Blaabjerg F, Lee K B. Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(5): 2517-2533.
- [70] Wang H, Liserre M, Blaabjerg F, et al. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, 2(1): 97-114.
- [71] Scheuermann U, Schmidt R. Impact of solder fatigue on module lifetime in power cycling tests[C]. *Proceedings of the Fourteenth European Conference on Power Electronics and Applications*. Birmingham: EPE, 2011: 1-10.
- [72] Mainka K, Thoben M, Schilling O. Lifetime calculation for power modules, application and theory of models and counting methods[C]. *Proceedings of the Fourteenth European Conference on Power Electronics and Applications*. Birmingham: EPE, 2011: 1-8.
- [73] Huang H, Mawby P A. A lifetime estimation technique for voltage source inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(8): 4113-4119.
- [74] Ma K, Liserre M, Blaabjerg F, et al. Thermal loading and lifetime estimation for power device considering mission profiles in wind power converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(2): 590-602.
- [75] Sangwongwanich A, Yang Y, Sera D, et al. Lifetime evaluation of grid-connected PV inverters considering panel degradation rates and installation sites[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(2): 1225-1236.
- [76] Richardeau F, Pham T T L. Reliability calculation of multilevel converters: Theory and applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013: 60(10): 4225-4233.
- [77] Morozumi A, Yamada K, Miyasaka T, et al. Reliability of power cycling for IGBT power semiconductor modules[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(3): 665-671.
- [78] Hahn B, Durstewitz M, Rohrig K. Reliability of wind turbines[J]. *Wind Energy*, 2007: 329-332.
- [79] 周生奇, 周维维, 孙鹏菊, 等. 小波相关分析在IGBT模块缺陷诊断中的应用[J]. *电机与控制学报*, 2012, 16(12): 36-41. Zhou Shengqi, Zhou Luowei, Sun Pengju, et al. Application of wavelet correlation analysis in defect diagnosis of IGBT module[J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(12): 36-41(in Chinese).
- [80] Zhou S, Zhou L, Sun P. Monitoring potential defects in an IGBT module based on dynamic changes of the gate current[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(3): 1479-1487.
- [81] 周维维, 周生奇, 孙鹏菊. 基于杂散参数辨识的IGBT模块内部缺陷诊断方法[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(5): 156-163. Zhou Luowei, Zhou Shengqi, Sun Pengju. Diagnostic method for internal defects of IGBTs base on stray parameter identification[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(5): 156-163(in Chinese).
- [82] Yang S, Xiang D, Bryant A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(11): 2734-2752.
- [83] 李辉, 刘盛权, 冉立, 等. 大功率并网风电机组变流器状态监测技术综述[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(8): 1-10. Li Hui, Liu Shengquan, Ran Li, et al. Overview of condition monitoring technologies of power converter for high power grid-connected wind turbine generator system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(8): 1-10(in Chinese).
- [84] Deng F, Chen Z, Khan M R, et al. Fault detection and localization method for modular multilevel converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(5): 2721-2732.
- [85] Caseiro L M A, Mendes A M S. Real-time IGBT open-circuit fault diagnosis in three-level neutral-point-clamped voltage-source rectifiers based on instant voltage error[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(3): 1669-1678.
- [86] Li S, Xu L. Strategies of fault tolerant operation for three-level PWM inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, 21(4): 933-940.
- [87] Zhang W, Xu D, Enjeti P N, et al. Survey on fault-tolerant techniques for power electronic converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(12): 6319-6331.
- [88] 徐殿国, 刘晓峰, 于泳. 变频器故障诊断及容错控制研究综述[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(21): 1-12. Xu Dianguo, Liu Xiaofeng, Yu Yong. A survey on fault diagnosis and tolerant control of inverters[J]. *Transactions of China*

- Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 1-12(in Chinese).
- [89] Wang H, Zhou D, Blaabjerg F. A reliability-oriented design method for power electronic converters[C]. Proceedings of the Twenty-eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Long Beach: IEEE, 2013: 2921-2928.
- [90] Ma K, Blaabjerg F. Thermal optimised modulation methods of three-level neutral-point-clamped inverter for 10 MW wind turbines under low-voltage ride through[J]. IET Power Electronics, 2012, 5(6): 920-927.
- [91] Ma K, Blaabjerg F, Liserre M. Thermal analysis of multilevel grid-side converters for 10-MW wind turbines under low-voltage ride through[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(2): 909-921.
- [92] Zhou D, Blaabjerg F, Lau M, et al. Optimized reactive power flow of DFIG power converters for better reliability performance considering grid codes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1552-1562.
- [93] Zhou D, Blaabjerg F, Lau M, et al. Thermal behavior optimization in multi-MW wind power converter by reactive power circulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(1): 433-440.
- [94] Isidoril A, Rossi F M, Blaabjerg F, et al. Thermal loading and reliability of 10-MW multilevel wind power converter at different wind roughness classes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(1): 484-494.
- [95] Oezkol E, Hartmann S. Load-cycling capability of HiPak IGBT modules[R]. ABB Application Note 5SYA2043-02 Jan, 2012.
- [96] Musallam M, Yin C, Bailey C, et al. Mission profile-based reliability design and real-time life consumption estimation in power electronics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2601-2613.
- [97] Ma K, Bahman A S, Beczkowski S, et al. Complete loss and thermal model of power semiconductors including device rating information[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2556-2569.
- [98] 徐铭伟, 周维维, 杜雄, 等. NPT型IGBT电热仿真模型参数提取方法综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 134-141.  
Xu Mingwei, Zhou Luowei, Du Xiong, et al. Review of parameter extraction methodology for electro-thermal simulation model of NPT IGBT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 134-141(in Chinese).
- [99] 徐铭伟, 周维维, 杜雄, 等. 三相逆变器中绝缘栅双极型晶体管模块结温仿真评估[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2014, 37(2): 37-45.  
Xu Mingwei, Zhou Luowei, Du Xiong, et al. The junction temperature simulation assessment model of IGBT module in three-phase inverters[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2014, 37(2): 37-45(in Chinese).
- [100] Li H, Ji H, Li Y, et al. Reliability evaluation model of wind power converter system considering variable wind profiles[C]. Proceedings of the Sixth Annual IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pittsburgh: IEEE, 2014: 3051-3058.
- [101] 杨珍贵, 周维维, 杜雄, 等. 风速记录差异对评估风电变流器可靠性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2566-2572.  
Yang Zhengui, Zhou Luowei, Du Xiong, et al. Effect of different records of wind speed on reliability evaluation of wind power converters[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2566-2572(in Chinese).
- [102] Zhang J, Chen G, Cai X. Thermal smooth control for multi-MW parallel wind power converter[C]. Proceedings of the 2013 IEEE Region 10 Conference. Xi'an: IEEE, 2013: 1-4.
- [103] Chen G, Zhang J, Zhu M, et al. Adaptive thermal control for power fluctuation to improve lifetime of IGBTs in multi-MW medium voltage wind power converter[C]. Proceedings of the Seventh International Power Electronics Conference. Hiroshima: IEEE, 2014: 1496-1500.
- [104] Bayerer R, Lassmann M, Kremp S. Transient hygrothermal-response of power modules in inverters—The basis for mission profiling under climate and power loading[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 613-620.
- [105] 蒋雪峰, 黄文新, 郝振洋, 等. 双绕组永磁容错电机驱动的垂直提升系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3054-3061.  
Jiang Xuefeng, Huang Wenxin, Hao Zhenyang, et al. Vertical lift system based on a dual-winding fault-tolerant permanent magnet motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 3054-3061(in Chinese).
- [106] 蒋雪峰, 黄文新, 郝振洋, 等. 双绕组永磁容错电机的冗余电驱动系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 22-29.  
Jiang Xuefeng, Huang Wenxin, Hao Zhenyang, et al. Redundant control system of dual-winding fault-tolerant permanent magnet motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 22-29(in Chinese).
- [107] Fan Y, Zhu W, Zhang X, et al. Research on a single phase-loss fault-tolerant control strategy for a new flux-modulated permanent-magnet compact in-wheel motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(2): 658-666.
- [108] Errabelli R R, Mutschler P. Fault-tolerant voltage source inverter for permanent magnet drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 500-508.
- [109] Naidu M, Gopalakrishnan S, Nehl T W. Fault-tolerant permanent magnet motor drive topologies for automotive x-by-wire systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(2): 841-848.
- [110] 年珩, 周义杰, 曾恒力. 开绕组永磁同步发电机的容错控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 58-67.  
Nian Heng, Zhou Yijie, Zeng Hengli. Fault-tolerant control technique of permanent magnet synchronous generator based on open winding configuration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 58-67(in Chinese).
- [111] 郑玮仪, 曾志勇, 赵荣祥. 容错型三相并网变换器的建模分析与矢量调制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2202-2212.  
Zheng Weiyi, Zeng Zhiyong, Zhao Rongxiang. Modeling and modulation of the fault-tolerant grid-connected three-phase

- PWM converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2202-2212(in Chinese).
- [112] 安群涛, 孙醒涛, 赵克, 等. 容错三相四开关逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 14-20.  
An Quntao, Sun Xingtao, Zhao Ke, et al. Control strategy for fault-tolerant three-phase four-switch inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 14-20(in Chinese).
- [113] Freire N M A, Cardoso A J M. A fault-tolerant PMSG drive for wind turbine applications with minimal increase of the hardware requirements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 2039-2049.
- [114] Zhou D, Zhao J, Liu Y. Independent control scheme for nonredundant two-leg fault-tolerant back-to-back converter-fed induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 6790-6800.
- [115] Zhou D, Zhao J, Li Y. Model-predictive control scheme of five-leg AC-DC-AC converter-fed induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4517-4526.
- [116] Jacobina C B  $\tilde{A}$ , de Freitas I S, Lima A M N. DC-link three-phase-to-three-phase four-leg converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 1953-1961.
- [117] 刘勇超, 葛兴来, 冯晓云. 两电平与三电平NPC逆变器单桥臂故障重构拓扑SVPWM算法比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 775-783.  
Liu Yongchao, Ge Xinglai, Feng Xiaoyun. Comparison study of SVPWM algorithms of the post-fault reconfigured topologies for two-level and three-level NPC inverters with failure of a leg[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 775-783(in Chinese).
- [118] Ku H K, Im W S, Kim J M, et al. Fault detection and tolerant control of 3-phase NPC active rectifier[C]. Proceedings of the Fourth Annual IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Raleigh: IEEE, 2012: 4519-4524.
- [119] Choi U M, Blaabjerg F, Lee K B. Reliability improvement of a T-type three-level inverter with fault-tolerant control strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2660-2673.
- [120] Choi U M, Lee J S, Blaabjerg F, et al. Open-circuit fault diagnosis and fault-tolerant control for a grid-connected NPC inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 7234-7247.
- [121] Lee J S, Lee K B. Open-switch fault tolerance control for a three-level NPC/T-type rectifier in wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1012-1021.
- [122] Wang Z, Chen J, Cheng M, et al. Fault-tolerant control of paralleled-voltage-source-inverter-fed PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 4749-4760.
- [123] Duran M J, Prieto I G, Bermudez M, et al. Optimal fault-tolerant control of six-phase induction motor drives with parallel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 629-640.
- [124] Baneira F, Doval-Gandoy J, Yepes A, et al. Comparison of postfault strategies for current reference generation for dual three-phase machines in terms of converter losses[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(11): 8243-8246.
- [125] Wang W, Zhang J, Cheng M, et al. Fault-tolerant control of dual three-phase permanent-magnet synchronous machine drives under open-phase faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2052-2063.
- [126] Shahbazi M, Poure P, Saadate S, et al. FPGA-based reconfigurable control for fault-tolerant back-to-back converter without redundancy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3360-3371.
- [127] Wang W, Cheng M, Zhang B, et al. A fault-tolerant permanent-magnet traction module for subway applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1646-1658.
- [128] Nguyen T D, Tuong N D, Lee H H. Carrier-based PWM strategy for post-fault reconfigured 3-level NPC inverter under imbalanced DC-link voltages[C]. Proceedings of the Eighth International Power Electronics and Motion Control Conference. Hefei: IEEE, 2016: 2406-2411.
- [129] 陈根, 蔡旭. 并联型风电变流器故障重构控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4339-4349.  
Chen Gen, Cai Xu. Fault reconfigurable control for parallel wind power converters[J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(15): 4339-4349(in Chinese).
- [130] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.  
Wang Chengshang, Wang Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4(in Chinese).
- [131] 张建良, 齐冬莲, 吴越, 等. 双馈感应风机虚拟惯量控制器的设计及仿真实验研究[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(5): 115-118.  
Zhang Jianliang, Qi Donglian, Wu Yue, et al. Research on design and simulation experiment of virtual inertia controller for doubly fed induction generator[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(5): 115-118(in Chinese).
- [132] Zhang Z S, Sun Y Z, Lin J, et al. Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants[J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(1): 38-47.
- [133] 马静, 李益楠, 邱扬, 等. 双馈风电机组虚拟惯量控制对系统小干扰稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 1-7.  
Ma Jing, Li Yanan, Qiu Yang, et al. Impact of virtual inertia control of DFIG wind turbines on system small-signal stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 1-7(in Chinese).
- [134] 张琛, 蔡旭, 李征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 476-485.  
Zhang Chen, Cai Xu, Li Zheng. Control of DFIG-based wind turbines with the capability of automatic grid-synchronization

- and stable operation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 476-485(in Chinese).
- [135] 程雪坤, 孙旭东, 柴建云, 等. 电网对称故障下双馈风力发电机的虚拟同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 47-54.  
Cheng Xuekun, Sun Xudong, Chai Jianyun, et al. Virtual synchronous control strategy for doubly-fed induction generator wind turbines under symmetrical grid faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 47-54(in Chinese).
- [136] 侍乔明, 王刚, 马伟明, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2033-2042.  
Shi Qiaoming, Wang Gang, Ma Weiming, et al. An experimental study method of D-PMSG with virtual inertia control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 2033-2042(in Chinese).
- [137] 汤奕, 戴剑丰, 冯祎鑫, 等. 基于虚拟惯量的风电场黑启动频率协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 19-24.  
Tang Yi, Dai Jianfeng, Feng Yixin, et al. Cooperative frequency control strategy for wind farm black-start based on virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 19-24(in Chinese).
- [138] Zhong Q C, Ma Z Y, Ming W L. Grid-friendly wind power systems based on the synchronverter technology[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 719-726.
- [139] El Itani S, Annakkage U D, Joos G. Short-term frequency support utilizing inertial response of DFIG wind turbines[C]. Proceedings of the 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [140] 刘璋玮, 刘锋, 梅生伟, 等. 扩张状态观测器在双馈风机虚拟惯量控制转速恢复中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1207-1217.  
Liu Zhangwei, Liu Feng, Mei Shengwei, et al. Application of extended state observer in wind turbines speed recovery after inertia response control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1207-1217(in Chinese).
- [141] Feng Y, Xie Z. Coordinated primary frequency regulation and inertia response based on DFIG using over speed and torque reserve[J]. Chinese Control Conference, 2017: 9141-9144.
- [142] 郝正航, 余贻鑫. 励磁控制引起的双馈风电机组轴系扭振机理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 81-86.  
Hao Zhenghang, Yu Yixin. Analysis on wind turbine driven DFIG shaft torsional oscillation mechanism caused by excitation control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 81-86(in Chinese).
- [143] 解大, 王瑞琳, 王西田, 等. 多机型风电机组机网扭振的模型与机理[J]. 太阳能学报, 2011, 32(9): 1281-1287.  
Xie Da, Wang Ruilin, Wang Xitian, et al. Models and principles of kinds of wind turbine for torsional vibration studies[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(9): 1281-1287(in Chinese).
- [144] 张琛, 李征, 高强, 等. 双馈风电机组的不同控制策略对轴系振荡的阻尼作用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 135-144.  
Zhang Chen, Li Zheng, Gao Qiang, et al. Damping effects on torsional oscillation of DFIG drive-chain using different control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 135-144(in Chinese).
- [145] 朱国伟. 直驱式风电机组参与调频对电网频率稳定性的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [146] Akbari M, Madani S M. Analytical evaluation of control strategies for participation of doubly fed induction generator-based wind farms in power system short-term frequency regulation[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(3): 324-333.
- [147] 邢鹏翔, 侍乔明, 王刚, 等. 风电机组虚拟惯量控制的响应特性及机理分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1302-1310.  
Xing Pengxiang, Shi Qiaoming, Wang Gang, et al. Response characteristics and mechanism analysis about virtual inertia control of wind generators[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1302-1310(in Chinese).
- [148] 王鹏, 王晗, 张建文, 等. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1528-1537.  
Wang Peng, Wang Han, Zhang Jianwen, et al. Design and application of supercapacitor energy storage system used in low voltage ride through of wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1528-1537(in Chinese).
- [149] 张琛, 李征, 蔡旭, 等. 超级电容提升双馈风电机组异常电压耐受能力[J]. 太阳能学报, 2016, 37(11): 2792-2799.  
Zhang Chen, Li Zheng, Cai Xu, et al. Enhanced abnormal voltage tolerance of DFIG wind turbine using super-capacitor energy storage system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(11): 2792-2799(in Chinese).
- [150] 凌禹, 蔡旭. 基于转子串电阻的双馈风电机组故障穿越技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 25-30.  
Ling Yu, Cai Xu. Fault ride-through of DFIG wind turbine with rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 25-30(in Chinese).

收稿日期: 2018-11-21; 修回日期: 2019-01-29。

作者简介:



蔡旭

蔡旭 (1964), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源功率变换与并网技术、大功率电力电子与电力系统控制, E-mail: xucai@sjtu.edu.cn。

陈根 (1987), 男, 博士, 研究方向为大功率风电变流器的高效、可靠控制, E-mail: chengen@sjtu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)