

新能源时代电力电子技术在风力发电中的应用

宋晓飞¹ 刘洋² 冯伟³

1. 华润新能源(临汾)风能有限公司 山西 临汾 041000

2. 华润新能源投资有限公司山西分公司 山西 太原 030000

3. 华润新能源(乡宁)有限公司 山西 临汾 041000

摘要: 新能源时代, 风力发电对电力电子技术需求迫切。电力电子技术应用于风力发电机电能转换、风电场电网接入及风电与储能协同等方面。但应用中面临电力电子装置可靠性、高功率场景效率损耗、成本与经济性平衡等挑战。为此, 可通过采用新型器件与拓扑提升可靠性, 改进控制策略提升效率, 以及实施全生命周期管理平衡成本, 以此推动电力电子技术在风力发电领域的更好应用。

关键词: 新能源时代; 电力电子技术; 风力发电; 应用

引言: 在新能源大规模并网的时代背景下, 风力发电作为清洁能源的关键力量, 对电力电子技术有着迫切且多元的需求, 涉及电能质量优化、电网兼容性提升及系统效率提高等多方面。电力电子技术贯穿于风力发电机电能转换、风电场电网接入以及风电与储能协同等核心应用场景。然而, 其在风力发电应用中面临可靠性难题、高功率场景下的效率损耗以及成本与经济性平衡等挑战。因此, 深入探讨电力电子技术在风力发电中的重要性、应用场景、面临挑战及优化方向, 对推动风力发电产业高质量发展意义重大。

1 新能源时代风力发电对电力电子技术的重要性

在新能源大规模并网的时代格局下, 风力发电作为清洁能源的重要支柱, 对电力电子技术产生了多维度且极为迫切的需求, 这些需求深刻影响着电力电子技术的应用走向与发展重心。(1) 电能质量优化是首要需求。风力发电机, 特别是变速恒频风力发电机, 所输出的电能质量欠佳, 电压波动、频率偏差以及谐波含量超标等问题较为突出。这些不稳定因素若直接接入电网, 会对电网中的各类设备造成损害, 影响用户的正常用电体验。电力电子技术在此过程中扮演着关键角色, 它能够将发电机输出的变频交流电, 精准且高效地转换为工频交流电。同时, 借助先进的滤波与控制算法, 有效抑制谐波, 使电能质量达到电网运行的高标准要求, 确保电能能够安全、稳定地融入电网系统。(2) 电网兼容性提升的需求也日益凸显。随着风电在电力系统中所占比例的不断攀升, 电网对风电的接纳与兼容能力提出了更高要求。当电网遭遇电压跌落、频率波动等突发故障时, 风电场必须具备低电压穿越(LVRT)、高电压穿越(HVRT)能力, 防止因风电大规模脱网而进一步恶化电网故障状况。此外, 风电

场还需具备灵活的无功功率调节能力, 辅助电网维持电压的稳定平衡。而这一切功能的实现, 都高度依赖于电力电子技术的精准控制与快速响应。(3) 系统效率提升同样不容忽视。风力发电的经济性在很大程度上取决于发电效率, 而电力电子装置的转换效率直接影响着风电系统的整体效能。当前, 部分电力电子装置在高功率运行时, 开关损耗与导通损耗较大, 造成了电能的浪费。因此, 必须通过优化电力电子电路拓扑结构、改进先进的控制策略等手段, 降低装置损耗, 提升风电系统的发电效率, 进而增强其经济效益与市场竞争力^[1]。

2 电力电子技术在风力发电系统中的核心应用场景

2.1 风力发电机的电能转换

风力发电机中, 双馈感应发电机与永磁同步发电机作为主流机型, 其输出电能无法直接并网, 需经电力电子变流器转换。(1) 双馈感应发电机采用“背靠背”双PWM变流器。网侧变流器先将发电机转子输出的变频交流电整流为直流电, 机侧变流器再将直流电逆变为工频交流电。在此过程中, 还能实现对发电机转速的精准控制, 使发电机在风速波动时保持恒频输出, 保障电能稳定。(2) 永磁同步发电机输出电压频率随转速改变, 需借助全功率变流器将变频交流电转换为工频交流电, 达成“变速恒频”运行, 以满足并网条件。(3) 变流器的核心部件是IGBT等功率半导体器件, 其开关频率与控制精度对电能转换质量起着决定性作用。优化PWM控制策略, 如采用空间矢量脉宽调制(SVPWM), 能有效降低变流器输出谐波含量, 提升电能质量。此外, 运用三电平、五电平等多电平变流器拓扑结构, 可减小器件承受的电压应力, 降低开关损耗, 提高变流器功率等级与转换效率, 尤其适用于5MW以上大型风电机组^[2]。

2.2 风电场的电网接入

风电场并网过程中,为保障电网稳定运行,必须借助电力电子装置来解决无功功率平衡与电能质量治理这两大关键问题。目前,常用的电力电子装置主要有静止无功发生器(SVG)、静止无功补偿器(SVC)以及有源电力滤波器(APF)。(1) SVG基于电压源型变流器构建,它能够精准控制变流器输出的无功电流,进而快速调节风电场的无功功率。具体而言,当电网电压处于偏低状态时,SVG会输出感性无功功率,促使电网电压得以提升;而当电网电压偏高时,SVG则输出容性无功功率,有效降低电网电压。通过这种方式,SVG可以有力抑制电压波动与电压跌落现象,显著提升风电场的低电压穿越能力。相较于传统的SVC,SVG具备更快的响应速度,其响应时间可达毫秒级,且无功调节范围更为广泛,因此已然成为风电场无功补偿的主流设备。(2) APF的主要作用是治理风电场并网时产生的谐波污染。风力发电系统中的变流器、风机辅助设备(如变频器、整流器)会生成大量谐波电流,若这些谐波电流注入电网,会导致电网电压波形发生畸变,进而影响其他用户的正常用电。APF通过实时检测电网中的谐波电流,生成与之大小相等、方向相反的补偿电流,从而抵消谐波分量,使电网电流恢复为正弦波,确保风电场的谐波排放符合国家标准要求。

2.3 风电与储能协同

风能具有显著的间歇性,这给风电并网及稳定供电带来了挑战。为有效应对这一问题,风电场通常会配套建设储能系统。储能变流器(PCS)作为储能系统与电网、风电系统之间的关键接口,是实现“风电-储能”协同运行的核心电力电子装置。(1) 储能变流器具备双向电能转换能力。在风电出力过剩的情况下,PCS能够迅速将多余的交流电转换为直流电,为储能电池进行充电,将风能以电能的形式储存起来。而当风电出力不足或者电网对电能的需求增加时,PCS又会将储能电池中储存的直流电转换为交流电,并注入电网,从而平抑风电功率的波动,保障供电的稳定性。(2) 储能变流器还具有辅助电网稳定运行的重要功能。当电网频率偏差超出规定允许范围时,PCS可以根据频率偏差的大小,精准调节储能系统的充放电功率,实现调频目的。当电网电压出现波动时,PCS能够通过无功功率调节,辅助维持电压的稳定。通过优化储能变流器的控制策略,例如采用下垂控制、虚拟同步机控制等方式,可以进一步提升储能系统与电网的兼容性,显著增强风电场的调度灵活性。

3 电力电子技术在风力发电应用中面临的挑战

3.1 电力电子装置的可靠性问题

风力发电系统多处于户外复杂环境,如高原、沿海、荒漠等,电力电子装置(如变流器、SVG)长期承受高温、低温、湿度变化、风沙、盐雾等因素的影响,易导致器件老化、性能下降,甚至引发故障。例如,IGBT模块在高温环境下的寿命会显著缩短,高温还可能导致模块结温过高,引发热击穿;沿海地区的盐雾会腐蚀装置的散热系统与电气连接部件,导致接触不良或绝缘性能下降。风力发电系统的功率波动会导致电力电子装置频繁启停或处于动态负荷状态,增加器件的开关次数,加速器件磨损。据统计,变流器故障已成为风电机组停机的主要原因之一,不仅影响发电效率,还增加了运维成本。

3.2 高功率场景下的效率损耗问题

随着风电机组向大型化(如10MW以上)、风电场向规模化发展,电力电子装置需承受更高的功率负荷,而在高功率运行时,装置的开关损耗与导通损耗显著增加,导致转换效率下降。例如,IGBT模块在导通时存在导通压降,会产生导通损耗;在开关过程中,电压与电流的交叠会产生开关损耗,功率越大,损耗越明显。为满足高功率需求,电力电子装置通常采用多模块并联拓扑,而模块间的电流不均衡会进一步增加损耗,降低整体效率。效率损耗不仅会导致电能浪费,还会产生大量热量,需配备更庞大的散热系统,增加装置的体积与成本。

3.3 成本与经济性平衡问题

电力电子装置的核心器件(如IGBT、大功率电容)成本较高,尤其是高功率等级的器件,导致装置整体成本居高不下。以风电机组变流器为例,其成本约占风电机组总成本的15%-20%,大型风电场的SVG、APF等装置也需要大量资金投入。电力电子装置的运维成本较高:由于装置结构复杂,故障诊断与维修难度大,需专业技术人员与专用设备;部分核心器件(如IGBT模块)损坏后需整体更换,进一步增加了运维成本。成本问题制约了电力电子技术在中小型风电场的普及应用,也影响了风电产业的整体经济性^[1]。

4 电力电子技术在风力发电中应用的优化方向

4.1 基于新型器件与拓扑的可靠性提升

通过采用新型功率半导体器件,提升电力电子装置的环境适应性与寿命。(1) 宽禁带半导体器件(如SiC、GaN)具有耐高温、耐高压、开关速度快、损耗低的特点,相比传统的Si基IGBT,SiC器件可在更高温度(如200°C以上)下稳定运行,显著提升装置在高温环境下的可靠性;同时,SiC器件的开关损耗更低,可减少热量产生,降低散热系统的负担。(2) 优化电力电子电路拓扑,提升装置的抗干扰能力与容错性。例如,采用模块化多

电平变流器(MMC)拓扑,当单个模块故障时,系统可自动切除故障模块,其余模块继续运行,避免整体装置停机;在装置设计中增加冗余电路,如冗余IGBT模块、冗余散热通道,确保在局部故障时装置仍能维持基本功能,提升系统可靠性。(3)加强装置的环境适应性设计,如采用防腐涂层处理外壳、使用密封性能更好的柜体、配备温度自适应散热系统,减少恶劣环境对装置的影响。

4.2 基于控制策略优化的效率提升

在风力发电场景中,为提升电力电子装置转换效率,可从控制策略优化入手。(1)在变流器控制方面,采用自适应PWM控制策略十分关键。该策略能依据装置运行功率灵活调整开关频率,当处于高功率运行状态时,降低开关频率可有效减少开关损耗;而在低功率运行时,提高开关频率有助于降低谐波含量,进而实现效率与电能质量的平衡。(2)对于多模块并联拓扑,均流控制策略不可或缺。下垂均流、主从均流等策略可确保各模块电流均衡分配,避免因电流不均衡产生额外损耗。同时,引入模型预测控制(MPC)技术,通过构建装置的数学模型,提前预测不同控制策略下的损耗与输出性能,从而精准选择最优控制方案,进一步提升效率。(3)优化装置散热设计也至关重要。传统风冷散热效率有限,可采用液冷散热、热管散热等高效散热技术替代。这些技术能大幅提升散热效率,降低散热系统的功率消耗,从而间接提升装置的整体效率,保障风力发电系统中电力电子装置高效稳定运行^[4]。

4.3 基于全生命周期管理的成本优化

通过全生命周期管理,平衡电力电子装置的初始成本与运维成本,提升经济性。(1)在设计阶段,采用“成本-可靠性-效率”多目标优化模型,选择性价比更高的器件与拓扑,避免过度设计导致的成本浪费;例如,在中小功率风电场,可采用基于Si基器件的简化拓扑,在

满足性能要求的前提下降低成本。(2)在运维阶段,引入预测性维护技术,通过安装传感器监测电力电子装置的关键参数(如IGBT结温、电容容值、散热系统温度),结合数据分析预测器件寿命与故障风险,提前制定维护计划,避免突发性故障导致的高额维修成本;同时,建立器件回收与再利用体系,对损坏的IGBT模块、电容等器件进行检测与修复,符合条件的重新投入使用,降低更换成本。(3)推动电力电子装置的标准化与模块化设计,减少设计成本与备件库存成本;通过规模化生产,降低器件与装置的制造成本,提升电力电子技术在风力发电中的普及性。

结束语

在新能源时代,电力电子技术对风力发电意义重大,贯穿电能转换、电网接入、风电与储能协同等核心场景。然而,其应用面临可靠性、效率损耗、成本经济性等挑战。不过,通过采用新型器件与拓扑、优化控制策略、实施全生命周期管理等优化方向,能够有效提升电力电子装置的环境适应性、转换效率,平衡成本与经济性。未来,随着技术的持续创新与突破,电力电子技术将在风力发电领域发挥更关键的作用,推动风电产业向更高效、稳定、经济的方向迈进,助力全球能源结构向清洁、低碳转型。

参考文献

- [1]刘越.新能源时代电力电子技术在风力发电中的应用探索[J].科技经济导刊,2020,v.28;No.707(09):37+40.
- [2]石晓东.风机发电机中电力电子技术的应用[J].中国新技术新产品,2020(16):37-38.
- [3]杨涛.电力电子技术在新能源发电领域中的应用[J].电子世界,2020(08):169-170.
- [4]朱希华.电力电子技术在大型风力发电机领域的应用[J].电子技术与软件工程,2019(22):219-220.