

海上风电场电力变流器控制策略研究

陈子祥, 李杰, 孙广斌

海洋石油工程股份有限公司, 天津 300450

摘要 : 本文探讨了海上风电场中电力变流器的作用及其控制策略, 旨在提升风电场运行效率和发电量。文章介绍了电力变流器的基本原理、类型和技术参数, 随后重点分析了矩阵变换器、多电平逆变器以及直流侧和交流侧电压控制策略在海上风电场的应用及其优势。还探讨了通过控制系统优化、故障诊断与预测维护、变流器拓扑结构优化、器件选择优化以及能量回收与回馈技术等方法, 实现海上风电场电力变流器的运行优化和能效提升。

关键词 : 海上风电场; 电力变流器; 控制策略; 能效提升; 直流侧电压控制

Research On Control Strategy Of Power Converter For Offshore Wind Farms

Chen Zixiang, Li Jie, Sun Guangbin

Offshore Oil Engineering Corporation, Tianjin 300450

Abstract : This paper discusses the role of power converter and its control strategy in offshore wind farms, aiming to improve the operational efficiency and power generation of wind farms. The article introduces the basic principles, types and technical parameters of power converters, and then focuses on analyzing the application and advantages of matrix converters, multilevel inverters, and DC-side and AC-side voltage control strategies in offshore wind farms. The operation optimization and energy efficiency improvement of power converters in offshore wind farms are also discussed through control system optimization, fault diagnosis and predictive maintenance, converter topology optimization, device selection optimization, and energy recovery and feedback technology.

Keywords : offshore wind farm; power converter; control strategy; energy efficiency improvement; DC side voltage control

引言

近年来, 我国海上风电产业取得了显著的成果, 成为世界上最大的海上风电市场。然而, 海上风电场面临着复杂的海洋环境和高可靠性要求, 这对电力变流器的控制策略提出了更高的挑战。

电力变流器作为海上风电场的关键设备, 其主要功能是将风电机组产生的交流电转化为高质量的直流电, 并通过海缆输送到陆上电网。电力变流器的控制策略对于保障风电场的稳定运行、提高发电效率和降低运维成本具有重要意义。

一、电力变流器在海上风电场的作用

海上风电是绿色能源, 资源丰富, 分布广泛, 优化能源结构, 可以有效地减少对化石能源的依赖。随着能源短缺、环境恶化、气候变暖等问题的日益加剧, 为加快全球低碳化转型进程, 实现碳中和目标, 新能源发电在世界范围内得到蓬勃发展。其中, 风力发电已成为当下装机容量增幅最大、发展最快的新能源发电技术。^[1]

其中, 电力变流器在海上风电场中起着核心作用, 它不仅将风力发电机产生的交流电转换为符合电网标准的电能, 确保了风电场的电能能够顺利并入电网, 还通过最大功率点跟踪技术, 根据风速的变化调整发电机的输出, 以实现最大的发电效率。

此外, 电力变流器还能够对电网进行无功功率的调节, 以维

持电网的电压稳定, 提高电网的运行质量。在电网发生故障时, 电力变流器能够提供一定的故障穿越能力, 保证海上风电场的持续供电能力。同时, 电力变流器的设计还需要考虑到减少谐波对电网的影响, 避免对其他电气设备造成干扰。电力变流器还配备有保护装置, 能够在检测到异常时及时切断电源, 保护设备和人员安全, 并提供实时数据监控, 便于运行维护。

二、电力变流器的基本原理

(一) 电力变流器的作用

电力变流器是电力电子技术中的一种关键设备, 主要用于改变交流电 (AC) 或直流电 (DC) 的电压和电流的大小和频率。它在电力系统、工业生产和可再生能源领域等方面发挥着重要作用

用。电力变流器的主要作用包括电压和电流的转换，电压和频率的调节，提高电力质量，能源节约和效率提升，以及支持可再生能源。

电力变流器能实现交流与直流电的转换，满足设备电压和频率需求，提升电能质量，减少谐波污染，增强电力系统稳定性和可靠性，提高运行效率，降低能源损耗，对节能减排有重要作用，并在可再生能源如风电和太阳能发电中是实现高效电能转换和并网的关键设备。

（二）电力变流器的工作原理

电力变流器的工作原理基于半导体器件的开关特性。它通过控制半导体器件（如绝缘栅双极晶体管（IGBT））的开关，实现对电能的转换和控制。具体来说，电力变流器将发电机产生的交流电转换为直流电，再将其转换为符合电网要求的交流电。^[2]在这个过程中，电力变流器能够实现电压、频率和相位的精确控制，以确保电能的高质量传输。

三、海上风电场电力变流器控制策略

（一）矩阵变换器控制策略及其在海上风电场的应用

在当今世界，可再生能源的开发和利用越来越受到重视。其中，风能作为一种清洁、可再生的能源，具有巨大的发展潜力。海上风电场因其较高的风速和较稳定的运行环境，成为了风能开发的重要方向。^[3]而电力变流器作为海上风电场的核心组件，其控制策略的选择和应用直接关系到风电场的性能和效益。

矩阵变换器是一种电力电子设备，它能够实现任意输入电压和频率到任意输出电压和频率的转换。与传统的电力变流器相比，矩阵变换器具有结构简单、效率高、谐波含量低等优点。这些优点使得矩阵变换器在海上风电场的应用中具有较大的优势。

矩阵变换器的控制策略主要包括两个方面：一个是输入电流的控制，另一个是输出电压的控制。输入电流的控制主要是通过控制矩阵变换器中的半导体器件进行开关控制，来实现对输入电流的大小和相位的控制。^[4]输出电压的控制则是通过对输入电压和输入电流的相位差进行控制，来实现对输出电压的大小和相位的控制。在海上风电场的应用中，矩阵变换器控制策略具有以下几个优点：

1. 高效率：矩阵变换器可以实现较高的效率，降低风电场的运行成本，提高经济效益。
2. 低谐波含量：矩阵变换器输出电压的谐波含量较低，对电网的影响较小，有利于提高电网的稳定性和电能质量。
3. 灵活的电压和频率控制：矩阵变换器可以实现任意输入电压和频率到任意输出电压和频率的转换，有利于风电场适应不同的电网环境和需求。
4. 较强的故障穿越能力：矩阵变换器在电网故障时，可以迅速调整输出电压和频率，保证风电场的持续供电能力。

尽管矩阵变换器控制策略在海上风电场的应用中展现出多方面的优势，但它同时也遭遇了一系列的技术难题和发展瓶颈。控制算法的复杂性要求控制系统必须具备更高的处理能力和响应速

度。半导体器件在高开关频率下的运行，对器件的耐久性和稳定性提出了更为严苛的标准。

此外，由于矩阵变换器在海上风电场的使用尚处于初级阶段，其研究深度和应用广度仍有待加强，这依赖于持续的技术创新和突破。

（二）多电平逆变器控制策略及其在海上风电场的应用

近年来，海上风电场因其风速高、稳定、对环境的影响较小等优势，逐渐成为风力发电的重要发展方向。^[5]多电平逆变器是一种电力电子设备，主要用于将直流电转换为交流电。与传统的两电平逆变器相比，多电平逆变器具有输出电压波形质量高、谐波含量低、电磁干扰小、损耗小等优点。这些优点使得多电平逆变器在海上风电场的应用中具有较大的优势。

多电平逆变器控制策略主要包括两个方面：一是输出电压的控制，二是输出功率的控制。输出电压的控制是为了保证逆变器输出电压波形的稳定性和质量，使其满足电网对电压波形的要求。输出功率的控制是为了实现风电场的最大功率输出，提高风电场的发电效率。多电平逆变器控制策略具有以下优势：

1. 提高电压波形质量：多电平逆变器具备高波形质量、低谐波含量的输出电压特性，这使其能有效减少对电网的污染，显著提升风电场的发电品质，从而增强电能的可用性和可靠性，对促进清洁能源的发展具有积极影响。
2. 减小电磁干扰：多电平逆变器输出电压波形质量高，电磁干扰小，可以减小对其他电子设备的干扰，提高风电场的运行稳定性。
3. 降低损耗：多电平逆变器输出电压波形质量高，损耗小，可以提高风电场的发电效率，降低运行成本。
4. 提高最大功率输出：多电平逆变器通过优化功率转换，能够实现风电场的最大功率输出，从而显著提高发电效率，这对于最大化可再生能源的利用和提升整体能源转换效率至关重要。

（三）直流侧电压控制策略在海上风电场的应用

直流侧电压控制策略对于保证海上风电场的稳定运行和高效发电具有重要意义。^[6]直流侧电压控制策略主要包括两个方面：一是电压的稳定控制，二是电压的优化调节。电压的稳定控制是为了保持直流侧电压的稳定性，防止电压波动对风电场的运行产生影响。电压的优化调节是为了实现风电场的最大功率输出，提高风电场的发电效率。在海上风电场的应用中，直流侧电压控制策略具有以下优势：

1. 提高电压稳定性：直流侧电压控制策略可以有效地稳定直流侧电压，防止电压波动对风电场的运行产生影响，保证风电场的稳定运行。
2. 实现最大功率输出：直流侧电压控制策略可以实现风电场的最大功率输出，提高风电场的发电效率，增加风电场的经济效益。
3. 提高电能质量：直流侧电压控制策略可以优化调节直流侧电压，提高风电场输出电能的质量，减少对电网的污染，提高风电场的发电质量。
4. 减小损耗：直流侧电压控制策略可以减小直流侧电压的波

动,降低变流器和逆变器的损耗,提高风电场的运行效率。

(四) 交流侧电压控制策略在海上风电场的应用

海上风电场的运行过程中,风力发电机组产生的电能通过变流器转换为直流电,再通过逆变器转换为交流电,然后通过交流侧电压控制策略进行调节并输送到电网中。交流侧电压控制策略对于保证海上风电场的稳定运行和高效发电具有重要意义。

交流侧电压控制策略主要包括两个方面:一是电压的稳定控制,二是电压的优化调节。电压的稳定控制是为了保持交流侧电压的稳定性,防止电压波动对风电场的运行产生影响。^[7]电压的优化调节是为了实现风电场的最大功率输出,提高风电场的发电效率。在海上风电场中,交流侧电压控制策略展现出如下优点:

- 1.提高电压稳定性:交流侧电压控制策略可以有效地稳定交流侧电压,防止电压波动对风电场的运行产生影响,保证风电场的稳定运行。
- 2.实现最大功率输出:交流侧电压控制策略可以实现风电场的最大功率输出,提高风电场的发电效率,增加风电场的经济效益。
- 3.提高电能质量:交流侧电压控制策略可以优化调节交流侧电压,提高风电场输出电能的质量,减少对电网的污染,提高风电场的发电质量。
- 4.减小损耗:交流侧电压控制策略可以减小交流侧电压的波动,降低变流器和逆变器的损耗,提高风电场的运行效率。

四、海上风电场电力变流器的运行优化与能效提升

(一) 海上风电场电力变流器的运行优化

1. 控制系统优化

通过采用先进的控制策略,如预测控制、自适应控制等,可以有效提高电力变流器的运行效率和稳定性。预测控制可以根据风电场的实时运行数据,优化电力变流器的控制参数,从而实现风电场发电量的最大化。^[8]自适应控制则可以根据海洋环境的实时变化,自动调整电力变流器的运行状态,以适应不断变化的海上风电场运行需求。

2. 故障诊断与预测维护

由于海上风电场的维护难度大、成本高,因此采用故障诊断与预测维护技术对于保证电力变流器的稳定运行具有重要意义。^[9]通过实时监测电力变流器的运行数据,可以提前发现潜在的故障隐患,并采取相应的措施进行预警和维修,从而降低故障发生的风险,延长电力变流器的使用寿命。

(二) 海上风电场电力变流器的能效提升

1. 变流器拓扑结构优化

通过采用新型电力变流器拓扑结构,如多级变流器、模块化变流器等,可以提高电力变流器的转换效率和功率密度。多级变流器可以实现电压和电流的多级转换,降低变流过程中的能量损耗。模块化变流器则可以实现故障隔离和模块化维护,提高电力变流器的可靠性和可维护性。

2. 变流器器件选择优化

在电力变流器的器件选择方面,可以采用高效、低损耗的器件,如碳化硅(SiC)器件、氮化镓(GaN)器件等。这些新型器件具有更高的击穿电压、更好的热性能和更低的导通电阻,可以有效降低电力变流器的运行损耗,提高能效。

3. 能量回收与回馈技术

在海上风电场,电力变流器在运行过程中会产生一定的热量。通过采用能量回收与回馈技术,可以将这部分热量转化为电能,实现能源的再利用。^[10]同时,还可以将电力变流器的冗余能量回馈到电网,提高整个风电场的能效。

结束语

海上风电场对提升清洁能源效率与稳定性至关重要,其电力变流器控制策略如矩阵变换器和多电平逆变器技术的优化,以及直流侧电压控制,对提高性能、降低成本、保证电能质量具有显著作用。尽管存在技术挑战,但随着人工智能、大数据技术的融入和电力电子器件的进步,预计这些控制策略将拓展其应用范围,助力绿色能源发展,支持碳中和目标实现。

参考文献

- [1]高晓杰.海上风电场直流汇流级联升压变流系统拓扑及控制策略研究[D].曲阜师范大学,2023.DOI:10.27267/d.cnki.gqfsu.2023.000960.
- [2]翟晟珉,应飞祥,秦少茜,等.“双碳”背景下海上风电维护策略研究现状与展望[J].智慧电力,2023,51(10):23-30.
- [3]陈金路,张翔宇,郑向远,等.海上风电智能运维关键技术与发展建议[J].海洋开发与管理,2023,40(06):117-128.DOI:10.20016/j.cnki.hykyfygl.20230713.001.
- [4]黄攀,田智捷,吴寿康.储能电站与海上风电场联合运行控制策略研究[J].电工技术,2023,(22):76-78+104.DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2023.22.020.
- [5]孙文艺,李勇,辛道越,等.海上风电场高频暂态过电压抑制措施[J].机电工程技术,2023,52(09):241-245+251.
- [6]刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,(7).
- [7]张振,汤翔,毕书奇,等.超高压交流海上风电场升压站布置设计方法[J].电工技术,2023,(12):88-91.DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2023.12.024.
- [8]胡宗邱,时洪奎,张斯翔,等.大型海上风电场一体化电力系统暂态稳定性研究[J].电子设计工程,2023,31(12):58-61+67.DOI:10.14022/j.issn1674-6236.2023.12.012.
- [9]王康顺.基于可拓云模型的海上风电场选址综合评价[D].大连海事大学,2023.DOI:10.26989/d.cnki.gdlhu.2023.000214.
- [10]樊双婕.海上风电场大容量直流汇集变流器拓扑与控制技术[D].华北电力大学(北京)2023.DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.001555.