

风电全功率变流器谐波抑制与调制策略改进

洛松巴登

八宿大唐西藏新能源有限责任公司 西藏自治区 昌都 854600

摘要：随着电力电子技术的广泛应用，变流器在各类工业场景与民用设备中扮演着愈发关键的角色，但其谐波问题也日益凸显。本文首先分析了变流器谐波产生原因与危害，介绍无源、有源滤波及多电平技术等常见谐波抑制方法。接着剖析传统调制策略优缺点，接着提出了基于载波调制和空间矢量的改进策略，进行理论分析。最后通过MATLAB搭建仿真模型，对比传统与改进调制策略下输出电压电流波形及谐波含量，验证改进策略在谐波抑制和提升电能质量方面的有效性。

关键词：风电全功率变流器；谐波抑制；调制策略改进

引言：在风电系统中，全功率变流器是关键设备，但谐波问题影响其性能与电能质量。变流器谐波产生原因多样，危害严重，降低电能质量、增加设备损耗等。现有谐波抑制方法各有优劣，传统调制策略也存在不足。本文聚焦风电全功率变流器，分析谐波产生原因，介绍常见抑制方法，剖析传统调制策略，提出基于载波调制和空间矢量的改进策略，并通过理论分析与仿真验证其有效性。

1 风电全功率变流器谐波分析

风电全功率变流器主要由机侧变流器、网侧变流器和直流母线电容构成，机侧变流器将风力发电机输出的交流电转换为直流电并实现最大功率点跟踪控制，网侧变流器把直流电转换为与电网同频率、同相位的交流电以实现单位功率因数并网，直流母线电容用于稳定直流母线电压^[1]。其谐波产生原因有三方面，其一是电力电子器件的非线性特性，变流器中的开关管如IGBT在开通和关断过程中会产生非线性电压和电流进而产生谐波；其二是调制策略的影响，不同调制策略使变流器输出电压和电流波形不同，影响谐波含量，部分传统调制策略会产生较多低次谐波；其三是电网阻抗和不平衡，电网阻抗存在会使变流器输出的谐波电流在电网中产生谐波电压影响电能质量，电网不平衡会导致变流器输出电流含负序分量增加谐波含量。谐波危害众多，会降低电能质量，使电压和电流波形畸变，出现电压偏差、频率偏差等问题，影响用户正常用电；会增加设备损耗，在电网设备和变流器内部产生额外损耗，降低设备效率、缩短设备使用寿命；会干扰通信系统，对附近通信产生不良影响，降低通信质量；还可能引发谐振，在某些情况下与电网中的电容、电感等元件发生谐振，导致过电压和过电流，危及电网和设备安全，因此对风电全功率变流

器谐波进行分析并采取有效抑制措施十分必要，以保障电力系统的稳定运行和用电设备的安全可靠。

2 常见谐波抑制方法

2.1 无源滤波技术

其基本原理是依据电感、电容对不同频率信号呈现的不同阻抗特性，让谐波电流通过特定设计的无源元件组合时受到阻碍，从而将谐波从电路中分离出去。常见无源滤波器包含单调谐滤波器、高通滤波器和双调谐滤波器等类型。单调谐滤波器针对特定频率谐波设计，在谐振频率处对相应谐波呈现低阻抗，使该次谐波大部分流入滤波器而被滤除；高通滤波器可滤除高于某一截止频率的谐波，对高频谐波有较好抑制效果；双调谐滤波器能同时对两个特定频率谐波进行滤除^[2]。无源滤波技术具备结构简单、成本低廉的显著优点，其构成元件少，电路结构不复杂，制造和维护成本相对较低，在一些对成本敏感且对滤波要求不是特别苛刻的场合应用广泛。然而，该技术也存在明显不足，滤波特性受电网阻抗影响较大，电网阻抗会改变滤波器的实际滤波频率和效果，当电网阻抗与滤波器阻抗在某些频率下匹配时，容易与电网发生谐振，谐振会导致滤波器过载，甚至损坏滤波器元件，还可能使电网中的谐波电流进一步放大，严重影响电网的安全稳定运行，降低电能质量，给电网中的其他设备带来损害风险。

2.2 有源滤波技术

实时监测电网中的谐波电流，利用电力电子器件的快速开关特性，生成一个与检测到的谐波电流大小精准相等、相位严格相反的补偿电流，将该补偿电流注入电网，使其与原有的谐波电流相互抵消，从而达到滤除谐波、净化电网电流的目的。有源滤波技术优势显著，滤波效果出色，能针对不同频率和幅值的谐波进行动态跟

踪补偿,有效降低电网电流的总谐波畸变率,大幅提升电能质量,为对电能质量要求苛刻的精密设备提供稳定可靠的电力支持。该技术不受电网阻抗影响,无论电网阻抗如何变化,都能稳定发挥滤波作用,避免了因电网阻抗波动导致的滤波性能下降和谐振问题,保障了电网的安全稳定运行。不过,有源滤波技术也存在一些局限性,成本较高是其突出问题,电力电子器件价格昂贵,且需要配备复杂的控制电路和检测装置,增加了设备的制造成本和维护成本,限制了其在一些对成本敏感领域的大规模应用。此外,控制复杂也是该技术的一大挑战,要实现精确的谐波检测和补偿电流生成,需要先进的控制算法和高速的数字信号处理技术,对控制系统的硬件和软件要求较高,增加了系统设计和调试的难度。

2.3 多电平技术

多电平技术聚焦于提升变流器输出电能质量,其通过增加变流器输出电平数,让输出电压波形更趋近正弦波,以此降低谐波含量。在传统两电平变流器中,输出电压仅有两种电平状态,波形阶梯较大,谐波成分多。而多电平技术使输出电压有更多电平层次,波形阶梯变小,更平滑地逼近正弦波,进而减少谐波对电网和用电设备的影响。常见多电平变流器拓扑结构有二极管钳位型、飞跨电容型和级联H桥型等。二极管钳位型利用二极管对中间电平进行钳位,实现多电平输出;飞跨电容型借助飞跨电容存储和释放能量,达到多电平控制目的;级联H桥型由多个H桥单元级联组成,每个H桥单元独立控制,共同实现多电平输出。多电平技术在谐波抑制方面效果显著,能有效降低输出电压和电流中的谐波含量,提高电能质量,减少设备损耗和电磁干扰,提升系统稳定性和可靠性^[3]。由于要实现多电平输出,需要较多开关器件,这不仅增加了硬件成本,还使系统结构更复杂。更多开关器件意味着更多的控制信号和驱动电路,增加了控制系统的设计难度和复杂性,对控制算法和硬件性能提出更高要求,也给系统的调试和维护带来挑战。

2.4 改进调制策略

通过对变流器开关信号生成方式的优化,使输出电压和电流波形更接近理想正弦波。传统调制策略在控制变流器开关管通断时,往往无法充分考虑输出波形的质量,导致谐波成分较多,影响电能使用效率与设备运行稳定性。而改进调制策略从谐波产生的根源出发,重新规划开关管的动作时序与占空比。一方面,改进策略注重对输出电压空间矢量的精准控制。在三相变流器中,不同开关状态组合形成多个空间矢量,改进策略通过合理选择和合成这些空间矢量,使输出电压矢量更均匀地

分布在空间中,从而让输出电压波形更平滑,减少低次谐波的产生。另一方面,改进调制策略会结合实时监测的电网状态和负载需求,动态调整调制参数。当电网频率、电压波动或负载发生变化时,策略能迅速做出响应,优化开关信号,确保输出电压和电流始终保持较好的波形质量。此外,部分改进策略还会引入谐波预测与补偿机制,提前预估可能产生的谐波,并在调制过程中生成相应的补偿信号,进一步降低谐波含量。通过这些方式,改进调制策略有效优化了变流器输出波形,在提高直流电压利用率的显著减少了谐波,为电力电子设备的高效稳定运行提供了有力保障。

3 风电全功率变流器谐波调制策略改进

3.1 传统调制策略分析

SPWM以正弦波为调制波、三角波为载波,通过比较二者大小控制开关管开通与关断。其原理基于模拟信号对比,将正弦波的幅值变化转化为开关管的通断时间变化,进而生成近似正弦波的输出电压。该策略实现较为简单,硬件电路和控制算法都不复杂,成本相对较低。然而,SPWM存在明显不足,其直流电压利用率较低,在相同直流母线电压条件下,输出交流电压幅值受限,无法充分发挥直流侧电压的能量转换能力。输出电压中含有较多低次谐波,这些谐波会增加电网和用电设备的损耗,影响电能质量,降低系统运行效率。SVPWM基于空间矢量概念,把三相变流器的开关状态组合成空间矢量,依据参考电压矢量的位置和大小,选择合适的空间矢量进行合成^[4]。这种策略能更有效地利用直流母线电压,使输出电压幅值提高约15%,直流电压利用率显著提升。而且,其输出电压波形更接近正弦波,谐波含量少,可减少对电网的谐波污染,提高系统稳定性和可靠性。但SVPWM计算复杂度较高,需要实时计算参考电压矢量所在扇区、作用时间等参数,对控制器的运算能力和处理速度要求较高,增加了系统设计和实现的难度。

3.2 改进调制策略提出

(1) 基于载波调制,推出基于载波移相的改进SPWM策略。此策略对多个载波实施移相操作,让各相开关信号错开特定角度,打破原有谐波分布规律,使谐波相互抵消,降低输出电压谐波含量。同时结合载波频率调制技术,依据系统实时运行状态,如负载变化、电网频率波动等,动态调整载波频率。当谐波情况变化时,及时改变载波频率以改变开关频率,避开谐波易产生频段,进一步提升谐波抑制效果。(2) 基于空间矢量,在传统SVPWM策略基础上提出优化空间矢量选择的改进策略。先深入分析不同空间矢量对输出电压谐波的影响,明确

各矢量与谐波产生的关系,据此挑选最优空间矢量组合合成参考电压矢量,从源头上减少谐波产生。并且引入谐波补偿算法,该算法实时监测输出电压中的谐波成分,通过特定计算生成补偿信号,将补偿信号叠加到输出电压上,对已产生的谐波进行实时补偿,使输出电压波形更接近理想正弦波,有效改善电能质量,提高变流器在复杂工况下的稳定性和可靠性,满足对电能质量要求较高的应用场景需求。

3.3 改进策略理论分析

对于改进策略展开理论分析,基于载波调制的改进策略上,对基于载波移相的改进SPWM策略构建数学模型,深入剖析其输出电压谐波特性。运用傅里叶级数展开输出电压,得出精确的谐波表达式,从数学层面清晰地证明该策略可使低次谐波含量显著降低,优化输出电压波形。针对载波频率调制对谐波抑制的作用进行探究,综合考虑系统运行参数、开关损耗等因素,确定出能最大程度抑制谐波且保证系统稳定运行的最佳载波频率调制范围,为实际应用提供理论支撑^[5]。在基于空间矢量的改进策略方面,建立基于优化空间矢量选择的改进SVPWM策略数学模型,详细分析不同空间矢量组合对输出电压谐波的具体影响,明确各组合与谐波产生的内在联系。通过将传统SVPWM策略与改进策略的谐波含量进行对比,从理论角度凸显改进策略在谐波抑制上的优势。此外,推导谐波补偿算法的数学表达式,深入分析其补偿原理与效果,明确算法在不同工况下对输出电压谐波的补偿能力,确保改进策略在实际应用中能有效提升电能质量,增强变流器运行的稳定性与可靠性。

3.4 仿真验证

在仿真验证环节,首先进行仿真模型搭建,借助MATLAB仿真软件构建风电全功率变流器仿真模型,该模型涵盖机侧变流器、网侧变流器以及直流母线电容等关键部分,精准模拟变流器内部电能转换与传输过程。同时搭建电网模型,依据实际电网参数设置,如电压等级、频率、阻抗等,营造贴近真实的电网环境,为后续

仿真提供可靠基础。完成模型搭建后开展仿真结果分析,分别对传统调制策略与改进调制策略进行仿真操作。在仿真过程中,保持其他条件一致,仅改变调制策略,以准确对比不同策略下的输出特性。对输出电压和电流的波形进行细致观察与分析,通过波形图直观判断其平滑程度与畸变情况。运用专业算法计算输出电压和电流的谐波含量等关键指标。经对比发现,改进的调制策略在谐波抑制方面成效显著,能有效减少谐波含量,提升电能质量。具体而言,基于载波移相的改进SPWM策略实施后,输出电压的总谐波失真(THD)明显降低;基于优化空间矢量选择的改进SVPWM策略应用时,输出电压的THD也大幅下降,充分证明改进调制策略在优化风电全功率变流器性能、提高电能质量上的有效性与优越性。

结束语

综上所述,通过对谐波产生原因、危害及常见抑制方法的分析,明确了研究重点。改进的调制策略从载波调制和空间矢量两方面入手,经理论分析和仿真验证,在谐波抑制和提升电能质量上效果显著。这不仅为风电变流器的优化提供了新思路,也为电力电子技术在风电领域的高效应用及电网稳定运行提供了有力支持。

参考文献:

- [1]陆翌,吴文博,顾益磊,许烽,等.中频跟网型全功率变流器风机的等效仿真建模方法[J].浙江电力,2025,44(7):72-81.
- [2]张陇.全功率风电变流器拓扑选择与控制技术研究[J].中国科技纵横,2024(22):141-143.
- [3]周党生,陈佳明,张东来,郑大鹏.风电变流器在弱电网下的畸变问题和应对策略[J].电力电子技术,2023,57(12):94-97+108.
- [4]周湘杰,刘晓桂,钱娜,李松林,等.抑制电网背景谐波的地铁双向变流器控制策略[J].城市轨道交通研究,2025,28(8):169-174.
- [5]朱锋,周超,张盟军,王磊,等.多级叠层变流器单管故障谐波优化容错控制方法[J].电力系统装备,2025(5):78-81.