

电力系统谐波对风电机组运行的影响和抑制

张鸿芳

内蒙古龙源蒙东新能源有限公司 内蒙古赤峰 024000

摘要: 电力系统中的谐波对风电机组的运行产生显著影响, 导致发电效率下降、设备寿命缩短及电网稳定性降低。通过优化风电机组设计、采用有效的滤波技术以及加强电网监控, 可以有效抑制谐波, 提升风电机组的运行稳定性和电能质量。

关键词: 电力系统谐波; 风电机组; 运行; 影响; 抑制

引言

电力系统谐波是由非线性负载和电力电子设备引起的频率成分畸变, 严重影响风电机组的运行效率和电能质量。随着风能发电的普及, 风电机组并网时面临谐波问题的挑战日益增大。因此, 研究电力系统谐波对风电机组的影响及其有效抑制措施, 对于提升风电机组的性能和稳定性具有重要意义。

一、电力系统谐波概述

1. 谐波的定义与产生原因

(1) 数学定义

谐波在数学上的定义为非正弦周期信号按傅里叶级数展开后, 除了基波分量之外的其他频率分量。即若一个信号为周期性的, 其在频域上可以被分解为多个频率的分量, 其中除去基频外的所有频率成分均为谐波成分。谐波的存在通常意味着电力系统中的信号波形发生了畸变, 远离了理想的正弦波形^[1]。

(2) 电力系统内的产生源

电力系统中谐波的产生, 通常源于负载特性及相关设备的工作方式。其中, 非线性负载是最常见的谐波源, 例如工业中的电弧炉, 它的工作过程中电流不再呈现简单的正弦波形, 而是存在较强的高次谐波分量。此外, 电气化铁路也是一大谐波源, 由于电力供应系统的电力传输采用的是直流供电和交流供电的混合方式, 从而产生了不同频率的谐波成分。需注意的是, 电力电子装置的广泛应用加剧了谐波问题的复杂性。变频器和整流器等设备工作时会把交流电转换为直流电或调节交流电的频率, 这一过程产生的脉冲信号本质上包含了大量的高频谐波。例如, 变频器为了实现不同负载的调节, 采用了脉宽调制技术, 这种调制方式使得输入信号中带有许多高次谐波成分, 对电网的波形质量产生影响。

2. 谐波的特征

谐波在电力系统中的特征主要体现在频率和幅值上^[2]。具体而言:

在频率特征上, 谐波频率是基波频率的整数倍。以 50 Hz 的电力系统为例, 常见的谐波频率分别为 100 Hz (第二次谐波)、150 Hz (第三次谐波) 等, 这些高次谐波会在电力系统中不同程度地影响电能质量。

幅值特征上, 不同的谐波分量具有不同的幅值。一般来说, 低次谐波 (如第二、第三谐波) 的幅值较大, 而高次谐波的幅值逐渐减小。然而, 某些情况下, 由于设备特性或系统负荷的不同, 某些高次谐波也可能具有较大的幅值, 尤其是在负载高度非线性的情况下。谐波的幅值直接影响到电力设备的运行效率及其安全性, 过高的谐波幅值会导致设备过热、电力损耗增加, 甚至引发设备故障。

二、风电机组及其运行特点

1. 常见风电机组类型

风电机组种类繁多, 各种类型的风电机组在设计和运行方式上有所不同, 以适应不同的风能资源和电网需求。其中, 定桨距失速型风电机组是较为传统的一种类型, 它通过风轮的桨叶角度固定来控制功率输出。这种设计较为简单, 适用于风速变化不大的地区。然而, 随着技术的进步, 变桨距调节型风电机组逐渐成为主流。而变桨距设计可以根据实时风速和风向的变化调节桨叶角度, 从而优化发电效率并保持风机的稳定运行。这种类型的机组在较为复杂的风能环境下具有更好的适应性, 能够在不同的风速范围内平稳运行。

除此之外, 直驱永磁同步风电机组以其独特的驱动方式, 省去了传统齿轮箱的机械损耗。其直接连接的永磁同步电机不仅提高了机组的效率, 还减少了维修需求, 适合长期稳定运行。双馈感应风电机组则采用了双馈电

机与变频控制技术，可以在风速较低或较高时仍保持较为稳定的输出功率。这种类型的机组具有较强的调节能力，能够有效应对电网的波动。

2. 风电机组正常运行的关键参数

风电机组的正常运行离不开几个关键参数的有效控制，其中转速控制范围至关重要。风电机组的转速直接影响发电效率和电能输出的稳定性。过高或过低的转速均可能导致机组效率下降或产生机械故障^[3]。因此，合理的转速范围设计可以确保风电机组在不同风速条件下都能有效运行。而输出功率特性曲线则是衡量风电机组性能的重要指标。风电机组的功率输出与风速之间具有非线性关系。通常，风速在某一特定范围内，风电机组能够稳定输出功率。超出此范围，无论是过低的风速还是过高的风速，均无法提供理想的发电功率。因此，了解并优化这一特性曲线对于提高机组发电效益、确保稳定运行至关重要。

此外，电压和频率的稳定区间也是风电机组能否高效运行的关键因素之一。风电机组通常需要与电网进行并网运行，电网的电压和频率波动会对机组的正常运行产生影响。风电机组必须具备一定的电压和频率调节能力，在电网波动范围内保持功率输出的稳定，避免因电压和频率异常而造成停机或故障。对于现代风电系统而言，稳定的电压与频率调节能力是保证大规模风能并网的前提。

三、电力系统谐波对风电机组运行的影响

1. 对发电效率的影响

谐波对风电机组的发电效率有着极为明显的影响，尤其是在设备的功率损耗和功率因数方面。在实际运行中，风电机组受到谐波电流的影响，导致多个设备出现额外的能量损耗。例如，在发电机绕组、变压器等关键设备中，谐波引起的额外铜损和铁损会显著降低机组的运行效率。发电机绕组中由于谐波电流的存在，电流波形发生畸变，导致额外的电阻发热现象。这种发热不仅降低了发电机的效率，还加速了设备的老化，增加了维护成本。

此外，谐波电流还会导致功率因数的降低。风电机组的功率因数是衡量电能有效输出的一个重要指标。当电网中谐波含量增加时，谐波电流的存在使得风电机组的总电流波形偏离了理想的正弦波，从而导致功率因数降低。这意味着相同的电压下，风电机组输出的有效功率减少，电能的利用效率也随之下降。长期以来，低功率因数不仅影响风电机组的发电效益，还可能导致电网运营商对风电机组采取限电或罚款措施。

2. 对电气设备的危害

谐波对风电机组的电气设备存在严重危害，特别是在绝缘老化和设备故障方面。具体而言，谐波电流产生

的高次电场作用，使得风电机组中的电气设备特别是绝缘材料的老化速度加快。电机、电缆等设备在长期运行中，因受到谐波的影响，绝缘层逐渐劣化，容易发生击穿或漏电等故障。以电力电缆为例，受高次谐波作用，电缆中的绝缘材料的绝缘性能逐步下降，极大地缩短了设备的使用寿命，增加了设备更换的频率和维护成本。

此外，谐波还可能导致设备发生故障，尤其是在电容器组的保护方面。风电机组通常配备电容器组以改善功率因数，但谐波可能引发电容器组的谐振，产生过电压，进而损坏电容器。这种过电压不仅威胁到设备的安全，还可能影响整个风电场的稳定运行。以某些风电场的实际案例为例，电容器组由于谐波的共振现象导致故障停机，严重影响了发电能力。同时，谐波还可能干扰继电保护装置的正常工作，造成误动作，从而导致设备的误停或无法及时恢复，严重时可能引发大规模的电力事故。

3. 对控制系统的干扰

在风电机组的控制系统中，谐波同样对控制精度和通信稳定性构成了威胁。现代风电机组大多采用变流器技术来调节输出功率，而谐波则会影响变流器的控制精度。由于谐波使得变流器的输入信号出现失真，系统无法准确地对电压、电流等关键参数进行调节，这直接影响到风电机组的功率调节和输出稳定性。例如，风电场中某些采用变频器调速的机组，因谐波失真，造成转速调节不精确，降低了系统对风速变化的响应速度和效率。

此外，谐波产生的电磁干扰还可能影响风电机组控制系统内部的通信线路。控制系统中的数据传输依赖于高速信号的稳定传递，但谐波会导致信号波形畸变或信号丢失，从而造成通信中断或数据错误。这种问题在风电场的大规模并网中尤为突出，可能导致风电机组的运行信息传递延迟或错误，进一步影响整个系统的调度与响应。尤其在风电并网发电量较大时，实时数据的准确性尤为关键，任何通信故障都可能导致整个风电场的运行效率降低，甚至产生安全隐患。

四、基于电力系统谐波对风电机组影响的抑制措施

1. 基于风电机组自身的抑制方法

风电机组自身的设计优化是抑制谐波产生的有效途径。具体而言，在风电机组的设计阶段，通过改进拓扑结构来减少对谐波的敏感性是一个重要措施。例如，现代风电机组中逐渐采用多电平变流器技术。多电平变流器相比传统的两电平变流器，能够有效地分散谐波的频率分布，显著降低输出电流中的谐波含量。这不仅改善了电能质量，还降低了对电气设备的损害风险^[4]。

此外，主动控制策略也是风电机组抑制谐波的重要

手段。通过应用如矢量控制、直接转矩控制等先进的控制算法，可以有效地抑制谐波电流的产生。这些控制策略能够优化风电机组的运行状态，精确控制发电机的转速和扭矩，减少谐波干扰。尤其是在采用脉宽调制（PWM）技术时，优化PWM的调制策略能够改善输出波形质量，降低高次谐波的产生。这一方法在实际风电场中得到了广泛应用，有效提高了风电机组的稳定性和电网兼容性。

2. 电力系统侧的抑制措施

除了风电机组自身的优化外，电力系统侧的谐波抑制措施同样至关重要。无源滤波器是电力系统中常见的谐波抑制设备，其原理基于电感、电容等元件组成的滤波电路，通过谐振原理滤除特定频率的谐波。无源滤波器能够有效地抑制某一频率范围内的谐波，但其无法适应电力系统中谐波频率的变化，因此在选型和安装时，需要根据系统的具体谐波情况选择合适的参数和安装位置。例如，在一些高谐波环境中，通常需要根据谐波分析结果，精确设计滤波器的额定参数，以确保其能够最大化地发挥效果。

相比之下，有源电力滤波器（APF）具有更为灵活的适应性。它通过实时监测电网中的谐波电流或电压，能够根据变化的谐波情况进行补偿，具有较好的动态响应性能。有源滤波器能够针对电网中变化的谐波进行有效的实时调节，尤其在风电并网系统中，能够应对风速波动导致的频繁电能质量波动，提供更高效的谐波抑制。

3. 综合管理策略

为了有效应对谐波问题，电力系统的综合管理策略不可或缺。具体而言，加强对电力系统谐波的实时监测非常重要。通过在关键位置设置谐波监测点，并配备高精度的谐波测量仪器，可以及时掌握电力系统中的谐波状况^[5]。这一措施能够为电力系统的运行调整提供数据支持，确保谐波问题得到早期发现和及时处理。

此外，制定合理的电力系统运行规划和标准同样不可忽视。在电网规划过程中，应考虑谐波因素的影响，并制定严格的谐波限值标准。这些标准在确保电力系统稳定运行的同时，也可以有效约束风电机组等可再生能源接入时的电能质量，从而保障整个电力系统的健康运行。通过这样的综合管理策略，可以从根本上提升电力系统应对谐波的能力，确保风电等可再生能源的稳定、高效并网。

五、基于电力系统谐波对风电机组运行影响的抑制措施实施时的注意事项

1. 谐波监测与评估

结合前文中的问题描述，在选择抑制措施之前，必

须进行全面的谐波监测。通过在风电机组接入点布置谐波分析设备，实时监测电网中的谐波水平。这一过程能够帮助识别谐波的频率成分和幅值，为后续设备选择提供数据支持。例如，如果风电场中谐波主要集中在低次谐波，则可以优先考虑多电平变流器，而对于高次谐波的情况，则适合使用有源滤波器进行补偿。

2. 设备选型与配置

根据谐波的频谱特征，合理选择合适的滤波设备对于风电机组的运行有着极大的影响。具体而言，无源滤波器虽然能够有效抑制某一特定频率范围的谐波，但在面对变化的谐波频率时其适应性较差，因此需要精确评估风电场的谐波特性。此外，安装位置和设备容量也至关重要，若配置不当，可能会引起新的电压波动或系统不稳定。

3. 与电网的协调性

风电机组的谐波抑制措施应与电网运行模式相协调。特别是在风速波动大、负荷变化频繁的情况下，谐波的变化也较为复杂。因而，抑制设备的动态响应能力需与电网的频率、电压波动相匹配，避免因设备响应不及时导致系统故障。

结语

综上所述，随着可再生能源比例的不断提升，风电机组的并网运行变得愈加重要。电力系统中的谐波问题不仅影响风电机组的发电效率和设备寿命，还可能对电网的稳定性构成威胁。因此，采取有效的谐波抑制措施，优化风电机组的设计与控制，是保证风电系统长期稳定运行的关键。通过技术创新与综合管理，可有效减少谐波对风电机组的负面影响，推动绿色能源的可持续发展。

参考文献

- [1] 李佳彬, 张超宇, 胡鹏等. 针对电网不平衡与谐波干扰的风电机组锁相环改进设计[J]. 风力发电. 2023(05): 15-20.
- [2] 谢广庆. 大规模风电接入电网谐波影响研究[J]. 进展·科学视界. 2021(05): 113-114.
- [3] 王涛, 诸自强, 年行. 非理想电网下双馈风力发电系统运行技术综述[J]. 电工技术学报. 2020(03): 453-471.
- [4] 郝鹏, 郝强, 王建国. 风电并网系统中的谐波抑制技术研究与应用[J]. 电力设备管理. 2024(05): 69-71.
- [5] 郑涛, 颜景娴, 王铭灏. 励磁涌流对双馈式风力发电机组二次谐波特性的影响[J]. 电网技术. 2021(09): 3514-3522.