

# 浅谈构网型全功率风电机组网侧变流器耦合分析及抑制策略

闫乐

(国家能源集团哈密煤电新能源分公司 839000)

摘要: 风电机组网侧变流器是将风力发电机组中产生的交流电能转换为高质量的交流电能并输送给电网的核心装置。该变流器不仅需要具备高效、可靠的功率转换功能, 同时还需要实现与电网的协调和耦合。然而, 由于风电机组网侧变流器直接面对电网, 其工作环境受到电网的影响, 存在部分问题和挑战。本文将针对构网型全功率风电机组网侧变流器耦合分析及抑制策略展开探讨, 并对构网型全功率风电机组网侧变流器的基本原理和工作机制进行介绍。其次通过对耦合效应的分析, 揭示电网对变流器运行的影响和导致的问题。最后提出有效的耦合抑制策略, 从而解决变流器在电网环境中的稳定性和可靠性问题。

关键词: 风电机组网侧变流器; 风力发电机组; 耦合分析

随着风力发电的高比例接入电网, 全功率风电机组的稳定运行能力面临着挑战。传统的网侧变流器采用锁相环(PLL)同步策略, 构网型全功率风电机组的网侧变流器则基于功率同步策略, 利用直流电压的动态特性实现直流电压同步的构网型控制。由于构网型控制存在功率耦合问题, 无功通过耦合通道影响有功功率, 进一步引起网侧直流电压的动态波动。其中, 变流器作为构网型全功率风电机组的核心设备, 具有将风能转换为电能并与电网进行交互的功能。然而, 在实际运行中, 变流器存在与耦合相关的问题, 包括电磁耦合、机械耦合和电网耦合等方面, 上述问题会对风电系统的性能、效率和可靠性产生一定的影响, 因此, 对变流器的耦合分析和抑制策略的研究具有重要意义。

## 1. 全功率网侧变流器的直流电压同步控制

在全功率风电变流器中, 机侧变流器控制功率输出, 网侧变流器作为接入电网的接口, 需要控制直流侧电容上的直流电压, 从而保证功率传输的稳定性。全功率网侧变流器是电网连接的主动功率滤波器, 在电力系统中起到了重要的作用。其直流电压同步控制结构是实现稳定直流电压的重要手段。直流电压同步控制结构通常包括 PI 控制器、PWM 控制器和电流环控制器等。

PI 控制器主要用于计算直流电压的误差, 并输出控制电压参考值。其输出电压计算公式为:

$$u_d = K_p \cdot e + K_i \cdot \int e dt$$

$u_d$  为控制电压参考值,  $e$  为直流电压误差,  $K_p$  和  $K_i$  分别为比例增益和积分增益。

PWM 控制器根据 PI 控制器输出的控制电压参考值和电流环控制器输出的电流指令值, 生成用于控制功率电子开关器件的 PWM 信号。其输出 PWM 信号的占空比计算公式为:

$$D = \frac{u_d}{V_{dc}} + \frac{i_d R}{V_{dc}}$$

其中,  $D$  为 PWM 信号的占空比,  $V_{dc}$  为直流母线电压,  $i_d$  为电流环控制器输出的直流电流指令值,  $R$  为直流电流环中的电阻值。

电流环控制器用于计算直流电流的误差, 并输出电流指令值给 PWM 控制器。其输出电流指令值计算公式为:

$$i_d^* = K_{p_i} \cdot (i_d^* - i_d) + i_d^*$$

其中,  $i_d^*$  为电流指令值,  $i_d$  为实际直流电流值,  $K_{p_i}$  为电流环控制器的比例增益。

直流电压同步控制结构通过 PI 控制器、PWM 控制器和电流环控制器协同工作, 能够实现对直流电压的稳定控制。其中, PI 控制器负责计算直流电压的误差并输出控制电压参考值, PWM 控制器根据参考电压和电流指令值生成 PWM 信号, 电流环控制器计算直流电流的误差并输出电流指令值, 通过协同作用实现对直流电压的精确控制。

## 2. 网侧耦合效益分析

对于风电机组网侧变流器的耦合分析, 需要考虑风机械转动能量输出的不确定性以及风速的变化对发电机输出电能的波动影响。在这种情况下, 变流器需要具有良好的响应速度和稳定性来应对不断变化的风能输入。同时还需要考虑到变流器对电网侧的影响, 包括电压、频率和无功功率的控制。在并网运行时, 变流器需要保证输出的电能符合电网的要求, 能够实现平稳而可靠的并网, 同时对电网具有一定的支撑作用, 确保电网的稳定运行。此外, 网侧变流器的耦合分析还需要考虑到系统的动态特性和稳定性, 包括控制策略的设计和参数调节等方面。在考虑风电机组网侧变流器与电网系统的耦合时, 需要充分考虑风电系统的特性和电网的特性, 通过合理的设计和控制策略来实现二者之间的协调运行。

## 3. 构网型全功率风电机组网侧变流器抑制策略

### 3.1 有源电流注入控制

有源电流注入控制基于对电网侧电流和电压的精确测量和分析,结合先进的控制算法,实现对风电系统的有功功率调节,主要根据电网需求主动响应和调整风电系统的有功和无功功率输出。通过这种方式,风电系统可以在不同的运行工况下保持灵活和稳定的注入特性,同时减小对电网的影响。此外,有源电流注入控制还可协调控制变流器内部的电流控制环和电压控制环,通过优化控制算法实现快速而准确的电流调节,有助于提高风电系统的动态响应能力和对电网挥发性的适应性。通过灵活且智能地调节风电系统的输出,使其能够更好地适应电网的运行状况,从而提高风电系统与电网的协同性和稳定性。

### 3.2 无功功率控制

无功功率控制依托先进的控制算法和精密的电力电子设备,实现对变流器输出的无功功率进行调节,具体通过监测电网侧的无功功率需求,引入功率因数调节器(PF)来确保电网的功率因数维持在合适的水平。同时变流器也需要灵活地调节输出的无功功率,包括无功容性和无功感性功率。无功功率控制系统需要根据电网需求实时调整,以确保风电系统输入的无功功率与电网需求相匹配,上述过程需要对无功功率的需求进行实时分析,并快速响应使得风电系统具备较强的适应性和灵活性。通过这种策略,风电系统能够在不同的运行条件下,向电网提供所需的无功功率支持,维持电网的稳定运行,防止过载和系统失衡。

### 3.3 电压响应控制

电压响应控制是电力系统中关键的一项控制策略,旨在保持电网各节点的电压稳定,并在受到外部扰动时能够快速调节并恢复到稳定状态。该策略通过对系统中的电压进行实时监测和分析,结合控制算法实现对发电侧和负载侧电压的动态调节,进而应对电网负荷变化、短路故障等情况,维持系统电压在合理范围内。具体而言,电压响应控制策略需要对系统的电压特性进行准确建模,并基于上述模型开发相应的控制算法,包括控制发电机励磁系统、无功补偿装置等,进而实现对电压的快速响应调节。此外,通过合理设计电网结构,包括合理设置变电站和配电设备,有效布置无功功率补偿装置等来实现电压的稳定控制。电压响应控制要求系统具备快速响应、高精度和稳定性,因此需要运用先进的控制算法,并结合通讯技术、智能装置等手段实现远程监测和控制,适应电网运行的复杂和动态变化。通过电压响应控制策略的实施,可以有效维护电网的电压稳定性,提高电网的可靠运行水平,减少系统故障发生的可能性,保障电能传输的安全稳定。同时,也有助于推动电力系统的智能化和信息化发展,为全球清洁能源的高效利用和大规模接入电网提供关键技术支持。

### 3.4 频率响应控制

频率响应控制策略基于对电网频率的实时监测和分析,通过调节发电侧和负载侧的功率输出,实现对电网

频率的动态调节,确保其在额定频率范围内稳定运行。具体策略表现为,频率响应控制依托高速发电机励磁系统、储能装置以及智能逆变器等设备,结合先进的控制算法,实现对发电机组的快速调节和对电网频率的控制。同时,通过合理的负荷侧响应和配电网设计,可以实现负荷侧的灵活调节,提高电网的频率稳定性。此外,频率响应控制还需要借助智能化调度系统,通过对电网负荷预测和发电侧资源优化配置,实现对电网频率的瞬时响应和长期稳定控制。频率响应控制策略要求系统具备快速响应、高可靠性和智能化管理能力,因此需要结合先进的电力电子技术、通讯技术和智能控制手段,进而适应电网运行的动态变化和复杂性。通过频率响应控制策略的实施,可以有效保障电网频率的稳定性,提高电网的可靠运行水平,减少系统失稳的风险,从而确保电能传输的安全稳定。

### 3.5 防止谐波注入

防止谐波注入主要通过采用滤波器、谐波抑制装置和谐波电流限制器等设备,结合合适的系统设计和运行控制,有效地减少谐波电流和谐波电压的注入,维护电网的电能质量。同时,防止谐波注入策略需要对系统中谐波产生的特点进行准确分析和识别,上述过程主要通过合理设置谐波滤波器和有源功率滤波器等设备,对谐波电流和电压进行有效衰减和抑制。此外,也可以通过谐波电流限制器等装置,对谐波电流进行实时监测和控制,使其不超出规定范围,并能够有效吸收和消除谐波。除此之外,通过合理规划电力系统的谐波分布和谐波来源,以及采用谐波抑制装置和先进的控制算法,也可以有效减少谐波注入,确保电网的稳定运行。

### 结束语

本文以构网型全功率风电机组网侧变流器为研究对象,通过对其耦合分析及抑制策略的深入探讨,为风电行业的发展提供了重要的理论支撑和实际指导。通过对不同环境下的变流器耦合特性进行研究,本文提出了一系列有效的抑制策略,为提高风电系统的稳定性和可靠性提供了宝贵的参考。通过对变流器的分析和优化设计,可以对风电发电系统的可靠性和经济性做出重要贡献,为风能资源的高效利用和全球清洁能源的可持续发展提供有力支持。除此之外,本文为构网型全功率风电机组网侧变流器的性能优化和系统稳定性提供了理论基础和实践指导,对促进风电行业技术的进步和风电资源的更加有效利用具有积极的推动作用。

### 参考文献:

- [1]陈立,王正齐,叶冰艺,等.海上风电经 VSC-HVDC 系统受端电网不对称故障抑制策略[J].电机与控制应用,2023(11).
- [2]蔡小龙.构网型风电机组电网故障电压支撑研究[J].电力设备管理,2023(9).
- [3]孙晨.海上风电场柔直系统受端站变流器的研究[D].曲阜师范大学,2021(5).