

# 基于直驱风力发电的变流器并网适应性研究

赵波波

山西粤电能源有限公司 山西 太原 030000

**摘要:** 本文聚焦直驱风力发电的变流器并网适应性研究,介绍了直驱风电系统结构、变流器原理及并网适应性关键指标。分析直驱风电变流器并网适配性瓶颈,涵盖弱电网、电网故障、谐波与电能质量、硬件与参数等方面。阐述了变流器并网适应性关键技术,如控制策略优化、宽风速范围适应性设计等。最后通过搭建仿真模型与实验平台进行验证,结果表明优化后的变流器在弱电网、故障穿越及电能质量等方面均有显著提升,有效增强了并网适应性。

**关键词:** 直驱风力发电;变流器;并网适应性

## 1 直驱风力发电系统与变流器原理

### 1.1 直驱风电系统结构

直驱风力发电系统主要由风力机、永磁同步发电机、变流器和电网等部分组成。风力机将风能转换为机械能,驱动永磁同步发电机旋转,发电机输出的是频率和电压随转速变化的交流电。与传统的双馈风力发电系统相比,直驱风力发电系统省去了齿轮箱这一易损部件,减少了机械传动损失,提高了系统的可靠性和效率。同时,永磁同步发电机具有高功率密度、高效率等优点,能够更好地适应风速的变化。

### 1.2 变流器工作原理

变流器是直驱风力发电系统中的核心部件,其主要作用是将发电机输出的不稳定的交流电转换为稳定的直流电,再将直流电逆变为与电网同频率、同相位的交流电,实现并网发电。变流器通常采用背靠背的双PWM变流器结构,包括机侧变流器和网侧变流器。机侧变流器的主要功能是实现了对发电机转矩和转速的控制,使发电机在不同的风速下都能运行在最佳状态,同时将发电机输出的电能转换为直流电。网侧变流器则负责将直流电逆变为符合电网要求的交流电,并实现单位功率因数并网,同时对电网的电压和频率进行支撑<sup>[1]</sup>。

### 1.3 并网适应性关键指标

并网适应性是衡量变流器能否稳定、可靠地接入电网并正常运行的重要指标。主要的并网适应性关键指标包括:(1)电压适应性,变流器应能够在电网电压一定范围内波动时正常工作,通常要求在电网电压跌落至额定电压的80%-90%以及升高至额定电压的110%-120%时,变流器能够保持并网运行,不脱网;(2)频率适应性,电网频率会在一定范围内变化,变流器应能够适应电网频率在49.5Hz-50.5Hz范围内的波动,保证输出电能的质量;(3)功率因数,变流器应能够实现单位功率因

数并网,即输入电网的电流与电压同相位,减少无功功率的损耗,提高电网的传输效率;(4)谐波含量,变流器输出的电流应具有较低的谐波含量,通常要求总谐波畸变率(THD)小于5%,以减少对电网的谐波污染。

(5)故障穿越能力,当电网发生故障时,如短路、接地等,变流器应能够在一定时间内保持并网运行,并向电网提供一定的无功功率支持,帮助电网恢复稳定。

## 2 直驱风电变流器并网适配性瓶颈分析

### 2.1 弱电网环境适配性瓶颈

弱电网通常指的是电网短路容量较小、电网阻抗较大的电网环境。在弱电网环境下,变流器的并网控制会受到较大影响。由于电网阻抗的存在,变流器输出的电流会在电网阻抗上产生电压降,导致并网点的电压波动和畸变。同时,弱电网的惯性较小,对功率变化的响应能力较弱,当风力发电系统的功率输出发生变化时,容易引起电网频率和电压的波动。另外,弱电网环境下还容易出现谐振问题,进一步影响变流器的并网稳定性。

### 2.2 电网故障场景适配性瓶颈

电网故障是不可避免的,常见的电网故障包括短路故障、接地故障等。当电网发生故障时,电网电压会大幅跌落,甚至出现短时中断。传统的变流器控制策略在电网故障时往往无法保持并网运行,会导致变流器脱网,影响风力发电系统的稳定性和可靠性<sup>[2]</sup>。另外,电网故障还可能引发变流器的过流、过压等问题,损坏变流器设备。

### 2.3 谐波与电能质量适配性瓶颈

变流器在运行过程中会产生一定量的谐波电流,这些谐波电流注入电网后会引发电网电压和电流的畸变,降低电能质量。谐波污染不仅会影响电网中其他电气设备的正常运行,还会增加电网的损耗,降低电网的传输效率。此外,直驱风力发电系统的输出功率具有波动性

和间歇性，这也会导致电网电压和频率的波动，进一步影响电能质量。

#### 2.4 硬件与参数适配性瓶颈

变流器的硬件设计和参数选择对其并网适应性有着重要影响。硬件方面，变流器的功率器件、电感、电容等元件的性能和质量直接影响变流器的可靠性和效率。例如，功率器件的耐压、耐流能力不足，容易导致器件损坏；电感和电容的参数选择不当，会影响变流器的控制性能和谐波抑制效果。参数方面，变流器的控制参数需要根据不同的电网环境和运行条件进行优化调整。如果参数设置不合理，会导致变流器的控制效果不佳，甚至出现不稳定运行的情况。

### 3 变流器并网适应性关键技术

#### 3.1 控制策略优化

在直驱风力发电系统中，弱电网环境是变流器并网面临的一大挑战，其适配性不足会严重影响系统的稳定性。为解决这一问题，采用虚拟同步机（VSM）控制技术是有效的途径。该技术通过模拟同步发电机的惯性与阻尼特性，为系统注入类似同步发电机的动态响应能力。具体而言，VSM控制引入虚拟惯性环节（ $H = 5-10\text{kW} \cdot \text{s}^2$ ）与阻尼环节（ $D = 1-5\text{pu}$ ），使得变流器在面对电网频率变化时，能够像同步发电机一样提供频率支撑。在频率响应方面，原本响应时间长达100ms，采用VSM控制后可缩短至50ms，大大提高了系统对频率波动的应对速度。在短路比（SCR）为1.2的弱电网环境下，功率波动幅度从20%显著降至5%以下，有效提升了系统在弱电网下的稳定性。同时，为改进锁相环设计，采用基于二阶广义积分器（SOGI）的dq锁相环。此锁相环具备自适应滤波功能，可有效抑制电压畸变与谐波干扰，将锁相误差从 $8.3^\circ$ 大幅降至 $1.2^\circ$ ，提高了对电网电压相位的准确跟踪能力。针对功率振荡问题，提出基于电网阻抗估计的自适应阻尼控制，通过实时检测电网阻抗变化，动态调整阻尼系数，使振荡抑制率提升65%。某仿真结果表明，优化后的变流器在弱电网下可稳定运行于 $\text{SCR} = 1.0$ 的极限工况，为弱电网环境下的稳定并网提供有力保障。

#### 3.2 宽风速范围适应性设计

直驱风力发电系统面临的风速范围较宽，为使变流器在0-25m/s的风速区间内都能高效运行，采用分段式MPPT控制策略是关键。在低风速段（0-10m/s），采用爬山法跟踪最优转速，且步长随功率变化自适应调整（0.1-0.5r/min）。这种自适应调整方式能够根据实时功率情况精准寻找最优转速，有效提升跟踪精度，从而更好地捕捉风能。在高风速段（10-25m/s），采用功率限幅控制，

通过网侧变流器主动降低有功功率输出，避免永磁同步发电机（PMSG）过载与变流器过压，保障系统安全稳定运行。此外，优化变流器硬件容量配置也至关重要。采用宽电压范围IGBT（额定电压1700V）与大容量直流母线电容（ $2000\mu\text{F}$ ），能够很好地适配风速波动导致的直流电压变化，将电压波动控制在 $\pm 3\%$ 以内。同时，引入风速预测模块，基于机器学习算法预测未来10分钟风速，提前调整变流器控制参数，使功率波动抑制率提升40%，有效减少了对电网的冲击，提高了系统在宽风速范围内的适应性和稳定性<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 故障穿越能力提升

电网故障时，变流器的故障穿越能力直接关系到风力发电系统的稳定运行。开发基于卸荷电路与crowbar电路的复合LVRT方案是提升故障穿越能力的有效举措。当电压暂降时，优先触发卸荷电路（IGBT串联电阻）消耗直流母线多余能量，防止母线电压过高。当母线电压超压1.2倍额定值时，启动crowbar电路短路发电机转子，限制故障电流。该方案使变流器在电压跌落至20%pu时能够维持并网625ms，且故障电流抑制在1.2倍额定值以内，有效保障了系统在故障期间的持续运行。对于三相不平衡故障，采用负序电流补偿控制。通过SOGI分离正序与负序电压分量，计算负序电流指令并注入电网，负序电流抑制率达90%，直流母线电压二次脉动幅值从15%降至3%，显著改善了故障期间的电能质量。在故障恢复阶段，采用软并网控制，通过梯度调节并网电流幅值与相位，将冲击电流抑制在1.5倍额定值以下，避免保护跳闸。某现场试验显示，优化后的变流器LVRT测试通过率100%，充分证明该方案在提升故障穿越能力方面的有效性。

#### 3.4 电能质量改善

电能质量是衡量变流器并网性能的重要指标，为改善电能质量，采用混合式滤波方案是行之有效的方法。在LCL滤波器基础上增设有源电力滤波器（APF），APF通过检测电网谐波电流，注入等值反向谐波电流，使总谐波畸变率从7.8%降至2.8%，有效减少了谐波对电网的污染。针对宽频带谐波问题，优化IGBT开关频率（10-15kHz自适应调整），并结合随机PWM技术打散谐波频谱，使高频谐波含量降低60%，进一步改善了电能质量。电压闪变是影响电能质量的另一因素，采用“功率平滑+无功补偿”协同控制可有效抑制电压闪变。通过超级电容储能系统吸收高频功率波动（0.1-10Hz），功率平滑度提升75%；变流器动态无功响应速度优化至5ms，电压波动幅度从 $\pm 5\%$ 降至 $\pm 2\%$ 。采用基于下垂特性的无功功率分

配策略,在多台变流器并联运行时,能够将无功分配误差控制在5%以内,避免了环流加剧电能质量问题,全面提升变流器并网的电能质量。

#### 4 并网适应性仿真与实验验证

##### 4.1 仿真模型搭建

基于MATLAB/Simulink搭建1.5MW直驱风电系统仿真模型,包含PMSG(额定电压690V,额定转速18r/min)、两电平变流器、LCL滤波器(电感2mH,电容10 $\mu$ F)、电网模型(短路比1.5-5.0可调)及故障仿真模块。控制策略采用VSM+PR复合控制,LVRT采用复合保护策略,仿真步长设为1e-6s,涵盖正常运行、弱电网、电压跌落、谐波干扰等场景。

设置3组对比模型:模型1为传统控制变流器,模型2为仅优化控制策略的变流器,模型3为“控制优化+拓扑升级”的优化变流器,对比分析并网适应性指标<sup>[4]</sup>。

##### 4.2 仿真结果分析

###### 4.2.1 弱电网适应性结果

SCR = 1.5的弱电网下,模型1出现20Hz次同步振荡,有功功率波动 $\pm 200$ kW;模型2振荡幅值降至 $\pm 50$ kW;模型3无明显振荡,有功功率波动 $\leq \pm 20$ kW,稳定裕度提升40%。电压跌落至0.9pu时,模型3无功功率响应时间15ms,注入无功150kvar,电压恢复速度较模型1快30%。

###### 4.2.2 故障穿越结果

电压跌落至0.2pu时,模型1触发保护脱网;模型2成功穿越但故障后功率冲击达2250kW;模型3穿越成功,功率冲击控制在1800kW以内,恢复时间180ms。电压升至1.2pu时,模型1模块过压损坏;模型3通过功率调节使母线电压稳定在1100V以内,无保护动作。

###### 4.2.3 电能质量结果

额定运行时,模型1THD = 8.5%,模型3THD = 2.8%;注入5次谐波背景时,模型1谐波放大至12%,模型3通过主动滤波抑制至3.2%。三相不平衡度10%时,模型3

负序电流含量从12%降至1.8%,电能质量显著改善。

##### 4.3 实验平台与测试

搭建10kW直驱风电变流器实验平台,PMSG额定功率12kW,变流器采用三电平拓扑,控制核心为TMS320F28335DSP。实验平台模拟弱电网(SCR = 1.8)、电压跌落(0.2pu, 2s)、谐波干扰(5次谐波, 10%)等场景,测试优化变流器的并网适应性。弱电网测试中,变流器输出有功功率波动 $\pm 0.5$ kW,无振荡现象;LVRT测试中,成功穿越电压跌落,故障期间注入1kvar无功,恢复时间190ms;电能质量测试中,THD = 2.7%,负序电流含量 = 1.7%,与仿真结果误差 $\leq 5\%$ ,验证了关键技术的有效性。

##### 结束语

直驱风力发电变流器并网适应性研究意义重大。通过深入剖析并网适配性瓶颈,针对性地提出控制策略优化、宽风速范围适应性设计等关键技术,并借助仿真与实验验证,证实了优化方案的有效性。这些成果不仅提升了变流器在复杂电网环境下的稳定运行能力,还为直驱风力发电系统的广泛应用提供了坚实支撑。未来,随着技术的不断进步,直驱风电变流器并网适应性将进一步提升,推动风力发电事业迈向新高度。

##### 参考文献

- [1]周晨阳,沈艳霞.基于小波分析的二重三相电压型逆变器开路故障诊断[J].电机与控制学报,2020,24(09):65-75+94.
- [2]孟鹏.直驱永磁同步风力发电系统并网运行控制策略研究[J].国外电子测量技术,2020,39(09):25-30.
- [3]黄正军,刘泉,郝育新.永磁同步直驱风力发电机结构改进研究[J].机械科学与技术,2025,44(8):1301-1307.
- [4]邹应冬,段志强,王峰军,等.半直驱风力发电机永磁体涡流损耗研究[J].微特电机,2025,53(3):38-42.