

双馈风机低电压穿越对继电保护的影响分析

党琳

(国家能源(山东)新能源有限公司, 山东 济南 250098)

摘要 双馈感应发电机(DFIG)由于具备变速恒频特性,在电力领域中应用广泛。然而,在电网在运行过程中,如果出现电压跌落现象,通过双馈感应发电机特有的低电压穿越控制策略,可使故障电流呈现和传统同步发电机截然不同的幅值、相位与谐波特征。本文以联合动力(UnitedPower)UP2000-115型双馈风力发电机组为研究对象,分析该发电机在电网对称以及不对称故障下电磁暂态过程、LVRT控制机理,结合其特性制定针对性策略,以期为满足电网系统运行可靠性要求提供参考。

关键词 双馈风机; 低电压穿越; 联合动力UP2000-115; 继电保护; 故障电流特性

中图分类号: TM774

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.002

0 引言

随着我国风电事业的高速发展,各地正有序推进大型风电设施布局建设,以此满足我国能源多样化的发展需求。然而风电大规模并网后,会对原有电网的运行稳定性与可靠性造成冲击,其中最突出的问题是风力发电机组在电网故障期间的响应特性,及其对继电保护系统产生的影响。传统电网系统所使用的继电保护器,是以同步发电机为模型进行设计和应用的,完全适配传统电网的运行需求。同步发电机在短路故障瞬间可提供额定电流6倍~8倍的冲击电流,且衰减时间常数较长,故障特征十分明显,保护装置能够快速识别故障并触发对应动作。当前主流的双馈感应发电机通过背靠背变流器与电网连接,其定子与电网直接耦合,转子则通过变流器实现励磁。这类发电机接入电网后,一旦出现电网电压跌落的情况,若未采取有效处置措施,就会引发过电压、过电流问题,对电机本体乃至整个电网的运行安全造成严重损害^[1]。因此,现代风电机组必须具备低电压穿越(LVRT)能力,确保在电网电压跌落期间不会出现脱网问题,助力电网电压尽快恢复至正常水平。随着风电行业的不断发展,将LVRT控制策略引入电网设计体系后,会改变双馈感应发电机(DFIG)的故障输出特性。此时故障输出电流不再受电机电磁惯性的主导影响,其特性主要由变流器控制算法和硬件保护电路决定。

1 研究对象概况

本文选取联合动力(UnitedPower)生产的UP2000-115型双馈风力发电机组作为研究对象,是目前我国风力发电中广泛应用的机型之一,额定功率为2.0 MW,

叶轮直径115 m,主要使用在低风速、中风速区域。UP2000-115采用交流励磁双馈技术,其定子直接和电网连接,转子利用双向PWM变流器励磁。在该系统保护方案设计环节,LVRT方案使用主动撬棒+转子侧变流器精细化控制策略,需在该方案设计阶段分析电网运行复杂特性,确定继电保护装置类型、定值计算、事故分析等,从而保证设计方案达到电网运行可靠性要求。

2 联合动力UP2000-115机型结构与LVRT控制机理

2.1 UP2000-115机型电气结构特点

联合动力UP2000-115机组在设计环节,需确保异步发电机转子侧变流器、网侧变流器、直流母线电容、撬棒保护电路合理设计,从而使风力发电系统运行稳定性。第一,发电机本体。通过绕线式转子结构设计,转子绕组利用滑环和变流器连接,定子绕组连接到690 V机端变压器低压侧。第二,变流器系统。转子侧变流器的作用是使发电机转矩和无功功率处于规定范围内,进而实现风能最大限度的追踪;网侧变流器的作用是保持直流母线电压稳定,且使控制网侧功率因数处于最佳范围内。通过上述两种结构设计,能使直流母线电容解耦。第三,撬棒电路。撬棒电路是该风力发电机组实现LVRT的重要硬件,其作用是将转子绕组两端连接,并利用晶闸管或IGBT串联电阻形成。如果系统检测发现存在过电流或直流母线电压超出标准,则撬棒电路能快速导通,短接转子绕组,并使DFIG暂态转变为类似于鼠笼式异步电动机运行状态,进而及时吸收剩余能量,确保变换器处于规定范围内^[2]。

作者简介: 党琳(1985-),女,本科,工程师,研究方向:电气工程、新能源发电技术研究与应用。

2.2 低电压穿越 (LVRT) 控制策略

根据国家标准《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T 19963), UP2000-115 设计分阶段的 LVRT 控制逻辑: 第一, 故障检测与撬棒电路投入阶段。风力发电机组在运行过程中, 若发现电网跌落幅度超过设计阈值, 控制系统会立即检测到转子电流激增。若系统运行环节存在转子侧变流器过载现象, 系统会在毫秒之间快速触发撬棒电路投入。这时转子侧电流直接被旁路, 不会对转子电流进行控制。而发电机进入撬棒电路状态后, 其等效电路变为转子串电阻的异步电机, 能使保护系统正常运行, 确保故障电流在规定范围内。第二, 无功支撑与控制恢复阶段。随着撬棒电路逐步投入, 电网系统内的转子能量逐步消耗, 使直流母线电压基本保持稳定状态。在系统运行阶段, 如果发现转子电流回落到安全范围, 则控制系统会切除撬棒电路, 重新接管转子侧变流器控制权。在 LVRT 控制系统运行阶段, UP2000-115 系统控制目标是将最大功率跟踪切换为电压支撑。根据电网运行需求, 该机组投入使用阶段先发出无功电流, 从而保证并网点电压处于规定范围内。这时故障电流主要通过转子侧变流器电流参数指令控制, 保证其幅值不超过变流器最大允许值, 一般为额定电流的 1.2 倍~1.5 倍^[3]。第三, 电网恢复与正常运行阶段。在电网故障逐步恢复后, 其处于正常运行状态, 机组无功输出减少, 且最终达到 MPPT 的状态。

3 低电压穿越对各类继电保护的影响分析

风电场集成电路一般使用 35 kV 电压等级, 在电力系统汇集完成后, 将其升压到 110 kV 和 220 kV 并网。

3.1 对电流速断保护的影响

在风力发电机组运行时, 对于电流速断保护来说, 其主要根据故障电流幅值进行故障判定。第一, 灵敏度降低甚至拒动。在以往风力发电系统运行中, 由于近端短路电流较大, 速断保护能完成可靠动作, 但在 UP2000-115 参与 LVRT 时, 变流器限流作用使故障电流被限制在 1.2 倍~1.5 倍额定电流。若该系统依然采用传统整定方式进行故障分析, 其定值高于风机提供的最大短路电流, 造成其在发生故障时存在拒动现象^[4]。第二, 保护范围严重缩窄。因为故障电流不再随着电气距离线性衰减, 电流幅值判据也会存在失效现象。而原本能覆盖整个线路的速断保护装置, 实际保护范围缩短到线路端部的 10%~20%, 无法满足快速故障切除要求。第三, 电流速断保护动作可靠性下降, 易出现误动隐患。UP2000-115 参与低电压穿越时, 变流器的限流控制并非恒定, 会随低电压持续时间、故障类型发生动态变化, 导致故障电流幅值波动较大, 甚至

出现非故障时段电流瞬时升高的情况。若保护装置未针对性调整整定策略, 仅依据固定幅值判据, 可能将正常运行中的瞬时电流波动误判为故障, 触发不必要的保护动作, 影响风电厂及电力系统的稳定运行。同时, 保护动作时限难以匹配实际故障需求。传统电流速断保护多采用无时限或短时限动作方式, 以实现故障快速切除, 但低电压穿越场景下, 故障电流被钳位后, 其持续时间会因变流器控制策略、故障清除进度发生变化。若仍沿用原有动作时限, 要么因时限过短导致误动, 要么因未能及时响应故障, 无法配合低电压穿越期间的系统控制要求, 进一步加剧保护与系统运行的不协调, 需结合低电压穿越特性重新优化动作时限与整定逻辑。

3.2 对距离保护的影响

在双馈风机继电保护设计中, 距离保护采用测量阻抗来判断故障位置。第一, 测量阻抗轨迹畸变。在 LVRT 系统控制中, 若电网电压快速跌落, 则电流受控且发生相位变化。在这种情况下, 通过测量阻抗不再落在预期的阻抗圆内, 或存在大幅偏移旋转。第二, 在撬棒电路投入使用后, 电机呈现感性特征, 阻抗轨迹直接偏移到第三象限, 这造成其判断为反向故障。第三, 转子侧变流器控制发出大量无功后, 电流相位滞后电压接近 90°, 此时测量电抗分量增加, 造成保护范围伸长或缩短。第四, 振荡闭锁误动。UP2000-115 在故障发生以及撬棒电路投入使用中, 其系统电气量存在振荡现象。若此时距离保护的振荡闭锁单元判定为系统振荡, 则进行闭锁保护, 进而导致故障处理存在延误现象^[5]。

3.3 对零序电流保护的影响

对于小电流接地系统来说, 其对零序电流保护的影响如下: 第一, 零序电流幅值不足。DFIG 定子绕组一般采用三角形接法或变压器隔离方式, 其系统内未设置有零序电路。而在单相接地中, 经过故障线路的零序电流一般为全系统电容电流。UP2000-115 的 LVRT 主要是进行正负序分量控制, 对于零序分量未有较大贡献。如果风力发电机组安装规模较大, 电容电流增加, 会导致非故障线路零序电流超过整定值, 在保护装置中存在误跳闸或选线错误。第二, 方向元件失效。风机电流控制器存在较高复杂性, 在系统发生故障问题后, 零序电流出现紊乱情况, 导致元件判断错误而越级跳闸。

3.4 对变压器差动保护的影响

风力发电机组升压变压器高压侧和电网直接连接, 低压侧则连接风机。第一, 不平衡电流增加。在 LVRT 系统控制环节, 风机侧电流存在大量谐波以及非周期性分量, 而电网侧电流则相对正弦。这种情况下两侧

电流波形有较大差异,进而出现明显差流引发保护误动。第二,制动特性失效。在以往差动保护中,其利用二次谐波方式制动,这能防止励磁涌流误动。而在UP2000-115故障输出期间,其存在高次谐波,无法满足制动条件,进而引发故障时制动或误动。

4 保护配置优化与应对策略

4.1 改进电流保护整定原则

第一,降低定值门槛。通过对风机系统电流情况进行分析,重新校核电流速断保护器定值。在该定值设定后,在故障引发不平衡电流或最大负荷电流情况下,确保保护定值能提高系统控制灵敏度。第二,引入电压闭锁。通过低电压闭锁电流方案,只有系统运行阶段监测电压低于设定值,再开放电流保护,进而实现整个系统故障精准控制。第三,优化保护动作时限与逻辑,结合UP2000-115低电压穿越特性,采用分级时限整定模式。针对不同故障类型、低电压严重程度,设定差异化动作时限,避免因单一时限导致误动或拒动。同时,融入故障电流波形识别功能,区分低电压穿越期间的限流电流与正常故障电流,进一步提升保护动作的精准度。

4.2 优化距离保护算法

第一,自适应阻抗圆。通过研发逆变型电源特性距离保护算法,结合电网电压跌落幅度和电流相特征,根据需求动态化调整阻抗圆形状与位置。第二,工频分量提取优化。在风电系统设计中,利用改进傅里叶算法或小波变换算法,能实现非工频分量和谐波滤波能力提升,其主要利用基波正序分量实现阻抗计算,以防存在测量偏差。第三,取消或放宽振荡闭锁。通过对风机运行特征进行分析,考虑到其瞬时电能变化情况,采取缩短振荡闭锁开放时间的方式,也可使用基于故障分量的开放逻辑,有效预防因为长期闭锁导致的系统故障。

4.3 强化差动保护性能

第一,谐波制动策略调整。通过对风机故障电流特性进行分析,在系统设计环节采取调整差动保护方式,通过谐波制动系数调节,从而防止系统误制动。第二,波形识别技术。在风力发电机组设计时,应用基于波形相关性分析的判别方法,能精准区别励磁涌流、外部故障穿越电流以及内部故障电流,使继电保护装置动作准确。

4.4 应用广域信息与通信保护

第一,光纤纵差保护。对于风力发电机组的重要集电线路,优先选择使用光纤电流差动保护装置。该

差动保护装置以基尔霍夫电流定律为根本,不会受电源特性、系统振荡、过渡电阻影响,以满足双馈风机继电保护动作精度要求。第二,利用风机内部信息。通过和风机主控系统通信,及时掌握风机LVRT状态标志位,保护装置结合状态量自适应切换保护逻辑或定值组。

4.5 针对UP2000-115的专项建议

通过对UP2000-115采用主动撬棒电路技术,根据系统设计要求,作出如下保护定值整定:化撬棒投入/切除阈值,按机端电压 $0.2\text{ pu} \sim 0.3\text{ pu}$ 投入、 $0.8\text{ pu} \sim 0.9\text{ pu}$ 切除设置;细化无功支撑指令,按低电压深度以 $0.9\text{ pu} \sim 1.1\text{ pu}$ 额定无功闭环输出;精准整定限流环PI参数,将电流限幅控制在 $1.2\text{ 倍} \sim 1.5\text{ 倍}$ 额定电流以内。第一,分段整定。因为撬棒电路投入前后电流有所差异,第二段则利用低电压闭锁过流覆盖远端故障。第二,关注负序保护。因为不同风机型号的故障电流,其负序电流有明显特征,可采取负序电流保护方式,将其作为相间短路的后备保护,能提升不对称故障识别灵敏度。

5 结束语

双馈风机作为我国目前重要的风力发电机组,本文选择UP2000-115型发电机组进行分析,其采用成熟的LVRT技术,能实现电网故障期间的顺利并网,提高风电系统运行可靠性。而在该风机运行中,选择适宜的继电保护装置,能满足风力发电机组运行可靠性要求。未来研究需不断增加双馈风机低电压保护方案的创新,打破传统保护模式的局限,积极引入在线自动化、智能控制技术,实现保护参数的实时动态调整、故障的精准识别与快速响应,规避低电压工况下的设备损坏风险,提升整个系统的运行稳定性。

参考文献:

- [1] 刘洪波,于汉清.含双馈风机接入的电力系统送端暂态稳定性研究[J].电气自动化,2024,46(01):14-19.
- [2] 杨伟伟,王硕禾,陈金,等.基于低电压穿越的风电场集电线路短路电流研究[J].济南大学学报(自然科学版),2020,34(04):410-416.
- [3] 刘书玉,刘毅力,董哲.适用于双馈风电场集电线路保护的LVRT保护动作判据[J].可再生能源,2022,40(07):938-944.
- [4] 孙吕祎,胡佳彤.不同风机类型和容量对继电保护的影响分析[J].电工技术,2024(S2):16-17,20.
- [5] 汪文东.基于双馈风电机组低穿特性的风电场集电线路继电保护整定研究[J].电力设备管理,2025(02):132-134.