

某海上风电场 #1 主变低压侧零序电流越限问题的分析处理

陈杰

山东国华时代投资发展有限公司, 山东 济南 250001

DOI:10.61369/EPTSM.2025110031

摘要 : 为解决某 501.5MW 海上风电场 #1 主变低压侧零序电流越限问题, 保障风电场安全稳定运行, 通过故障录波数据分析、现场勘查及理论验证相结合的方法开展专项研究, 发现主变低压侧单芯电缆屏蔽层回流线安装不规范, 屏蔽层绝缘层被柜体钢板磨损破损, 形成两点接地并产生环流。提出问题整改方案并进行验证, 同时, 针对海上风电设备安装空间受限、隐蔽工程质量管控难度大等问题, 提出强化过程管控与验收标准的长效措施, 为同类海上风电场零序电流异常问题处理提供参考。

关键词 : 海上风电场; 零序电流越限; 电缆屏蔽层; 两点接地; 安装工艺

Analysis and Treatment of Zero-sequence Current Exceeding Limit on Low-voltage Side of #1 Main Transformer in Offshore Wind Farm

Chen Jie

GUOHUA ENERGY INVESTMENT CO.,LTD. Ltd., Jinan, Shandong 250001

Abstract : To address the issue of zero-sequence current exceeding limits on the low-voltage side of the #1 main transformer at a certain 501.5MW offshore wind farm and ensure the safe and stable operation of the wind farm, a special study was conducted through a combination of fault recording data analysis, on-site investigation, and theoretical verification. The study found that the installation of the return line for the single-core cable shielding layer on the low-voltage side of the main transformer was non-compliant, and the insulation layer of the shielding layer was worn and damaged by the cabinet steel plate, forming two ground points and generating circulating current. A rectification plan was proposed and verified. Additionally, in response to the challenges of limited installation space and the difficulty in quality control for concealed works in offshore wind power equipment, long-term measures were proposed to strengthen process control and acceptance standards, providing a reference for handling zero-sequence current anomalies at similar offshore wind farms.

Keywords : offshore wind farm; zero-sequence current limit; cable shielding layer; two-point grounding; installation process

引言

海上风电作为我国能源结构转型战略中的关键清洁能源形式, 凭借其年平均风速高、发电小时数长、不占用宝贵土地资源且对周边环境影响可控等显著优势, 近年来实现了跨越式发展, 本文研究的某 501.5MW 海上风电场配套建设 1 座 220kV 海上升压站, 采用 59 台上海电气 EW230-8.5 型风电机组, 16 条 35kV 集电海缆将风电电能汇集至升压站后, 经 #1、#2 主变 (线变组接线) 升压至 220kV, 再通过 2 回 220kV 海缆接入陆上集控中心并网。2023 年 6 月全容量投运后, 运维人员发现 #1 主变低压侧故障录波频繁触发零序电流越限告警 (告警阈值 0.1A), 最大采样值达 0.148A, 为正常支路的 4.35 倍。若不及时排查故障原因, 可能导致 35kV 系统接地故障时保护拒动, 引发电缆绝缘损坏、相间短路等严重事故。因此, 开展零序电流越限问题的分析与处理研究, 具有重要的工程实践意义。

一、故障分析

(一) 设备接线与保护配置

#1主变低压侧接入35kV母线I段,采用单芯电缆供电,电缆屏蔽层通过回流线实现接地。35kV母线进线柜内安装零序电流互感器(变比100:1),仅接入故障录波系统,用于监测零序电流异常;主变低压侧35kV系统接地故障总后备保护由1#接地兼站用变零序保护承担, #1主变低压侧零序保护未投入运行,该配置符合《DL/T 5155-2016 220kV-750kV变电站设计技术规程》中关于接地保护的要求^[1]。

(二) 零序电流数据检测与分析

为明确故障特征,分别对故障支路与正常支路的外接零序电流、自产零序电流进行分析,数据采集为机组大负荷运行时段(有功功率450MW以上)的故障录波数据。

1. 外接零序电流分析

外接零序电流由零序电流互感器直接采集,反映互感器一次侧的零序电流分量。检测结果显示:故障支路(35kV进线302B)外接零序电流最大采样值0.148A(第3067采样点),远超0.1A的告警阈值;正常支路(35kV进线302A)外接零序电流最大采样值仅0.034A,故障支路电流约为正常支路的4.35倍。这一差异表明故障支路存在额外的零序电流分量,排除了系统正常不平衡电流的影响。

2. 自产零序电流分析

自产零序电流通过三相电流合成计算($I_0=(I_b+I_c)/3$),反映系统实际的零序电流状态。检测结果显示:故障支路自产零序电流为 $0.001A \angle 96.07^\circ$,正常支路自产零序电流为 $0.001A \angle 106.38^\circ$ (图1、图2),均处于电力系统正常运行时的不平衡电流范围。自产零序电流正常,说明35kV系统三相电流相位与幅值无接地故障特征的畸变,进一步指向零序电流互感器安装工艺或本体故障。

	实部	虚部	向量
<input checked="" type="checkbox"/> I.	-0.307A	-0.143A	$0.339A \angle 204.88^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> I.	-0.000A	-0.000A	$0.000A \angle 216.40^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> I.	-0.000A	0.001A	$0.001A \angle 96.07^\circ$

图1 故障支路自产零序电流

	实部	虚部	向量
<input checked="" type="checkbox"/> I.	-0.464A	-0.252A	$0.528A \angle 208.52^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> I.	-0.000A	-0.000A	$0.000A \angle 260.77^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> I ₀	0.000A	0.001A	$0.001A \angle 106.38^\circ$

图2 正常支路零序电流

(三) 零序电流越限对保护系统的影响评估

1. 对主变保护的直接影响

由于#1主变低压侧零序电流互感器仅接入故障录波系统,未接入主变保护回路,因此零序电流越限仅触发告警信号,不会改变主变保护的动作逻辑,不存在保护误动风险,短期内不会影响主变与风电场的安全运行。

2. 对35kV集电线路保护的潜在风险

现场勘查发现,该风电场16条35kV集电海缆接入开关柜的

安装工艺与故障支路一致,均采用“电缆屏蔽层回流线穿零序电流互感器”的方式。若回流线回穿错误或绝缘破损问题普遍存在,当35kV集电线路发生单相接地故障时,零序电流互感器将无法准确采集故障电流,导致接地变零序保护拒动。此时,故障电流持续存在,可能引发电缆屏蔽层过热、绝缘击穿,进而发展为相间短路,造成集电线路停运,影响风电场发电效益。

二、故障原因定位与现场处理

(一) 故障点现场排查

在年度停电检修窗口期,运维人员对35kV母线进线柜开展检查,排查过程如下:

1. 打开进线柜后柜门,发现电缆屏蔽层回流线存在重复穿过零序电流互感器的安装缺陷。但根据电磁感应原理,若仅存在回流线回穿错误,回流线电流产生的磁场与电缆芯线电流磁场抵消,不会导致零序电流互感器误测,因此判断存在其他故障点;

2. 断开回流线接地端,采用2500V摇表遥测回流线绝缘电阻,结果显示接地电阻为0Ω(正常应≥10MΩ),表明回流线存在接地短路;

3. 沿回流线敷设路径检查,发现回流线在回穿进线柜处(柜体钢板边缘)绝缘层被锋利的钢板割破,金属屏蔽层直接与柜体(接地)接触,形成“回流线接地端-柜体”的两点接地,产生环流。

(二) 故障机理分析

单芯电缆运行时,电缆芯线电流会在屏蔽层产生感应电压,若屏蔽层不接地或接地不良,感应电压可能击穿绝缘;根据《GB50217 电力工程电缆设计标准》“35kV及以下单芯电力电缆金属套单点直接接地,且有增强护层绝缘保护需要时,可在线路未接地的终端设置护层电压限制器”^[2]。本案案例中电缆屏蔽层采用“一端接地+另一端经保护器接地”,故障机理如下:

1. 回流线重复穿过零序电流互感器,导致回流线电流(与芯线电流方向相反)在互感器内产生反向磁场,干扰互感器正常测量;

2. 回流线绝缘层破损后,屏蔽层通过破损点与柜体接地,形成“回流线接地端”与“柜体破损点”的两点接地,两点间存在电位差,产生环流;

3. 环流穿过零序电流互感器,与电缆芯线电流的磁场叠加,导致互感器采集的零序电流增大,最终触发越限告警。

(三) 故障整改实施

依据《GB50169-2016 电气安装工程接地装置施工及验收规范》4.10.5条款:“当电缆穿过零序电流互感器时,其金属护层和接地线应对地绝缘且不得穿过互感器接地;当金属护层接地线随电缆芯线穿过互感器时,接地线应穿回互感器后接地”^[3],制定整改方案并实施:

1. 调整回流线敷设路径:将重复穿过零序电流互感器的回流线移出互感器检测范围,确保回流线仅沿柜体外侧敷设,避免干扰互感器测量;

2. 修复绝缘破损处：使用绝缘胶带缠绕割伤处，并采用热缩绝缘套管密封，同时在回流线与柜体钢板接触处加装3mm厚防磨橡胶垫，防止绝缘层再次磨损；

3. 全面排查整改：对海上升压站16条35kV集电线路开关柜逐一检查，发现2处类似回流线回穿缺陷，同步完成整改。

整改后，机组大负荷运行时，#1主变低压侧故障支路接零序电流最大采样值降至0.028A，符合正常运行要求，故障告警消除。

三、问题反思与长效管控措施

（一）问题根源分析

本次故障暴露出海上风电场建设与运维中的2项关键问题：

1. 施工空间受限导致工艺缺陷：施工空间受限是海上风电紧凑型设备安装的突出痛点。该风电场采用的充气式35kV开关柜，宽度仅0.6m，电缆接线空间极其狭小，电缆屏蔽层回流线的敷设操作难度较大。施工人员为缩短安装时间，简化了敷设流程，未严格按照标准施工，将回流线随电缆芯线一同穿过零序电流互感器，导致安装工艺缺陷。此外，开关柜柜体的钢板边缘未进行倒角处理，存在锋利毛刺，施工人员在敷设回流线时未采取有效的防磨保护措施，进一步加剧了绝缘层的磨损风险。

2. 隐蔽工程质量管控不足：电缆屏蔽层回流线的敷设和绝缘保护属于隐蔽工程，其施工质量无法通过后期的外观检查完全验证，必须依靠过程管控和专项检测。但在本项目的施工过程中，隐蔽工程的质量管控存在明显漏洞：一是施工单位未建立专项的隐蔽工程验收制度，仅将其纳入常规工序验收，验收内容不全面，未包含回流线的敷设路径核查和绝缘电阻检测；二是监理单位的现场监督不到位，监理人员仅在施工完成后进行了外观检查，未对施工过程进行全程旁站监督，未能及时发现回流线回穿互感器的错误操作；

（二）长效管控措施

为防范同类问题再次发生，结合海上风电设备运行特点，制定以下管控措施：

1. 强化施工过程质量管控

（1）优化施工方案：针对紧凑型开关柜，组织设计、施工、设备厂家开展技术交底，制定“电缆敷设-回流线安装-绝缘检测”的专项施工方案，明确回流线敷设路径、绝缘保护措施及验收标准；

（2）推行全过程影像记录：对隐蔽工程关键工序（如电缆穿

互感器、回流线接地）实施“工序验收+影像留存”管理，施工人员每完成1道工序，需拍摄3张以上关键部位照片（含尺寸标注），经监理单位审核通过后方可进入下一道工序；

2. 加强人员技术培训

（1）施工人员培训：针对海上风电紧凑型设备安装要求，开展“规范解读+实操培训”，重点讲解《GB50169-2016》中电缆接地相关条款，通过模拟开关柜实操考核，确保施工人员掌握正确操作方法；

（2）运维人员培训：组织运维人员学习零序电流异常故障案例，开展“故障数据分析-现场排查-整改实施”的模拟演练，提升运维人员故障处置能力。

四、结论

本文通过对某海上风电场#1主变低压侧零序电流越限问题的分析，得出以下结论：

1. 故障的直接原因是35kV电缆屏蔽层回流线存在双重安装缺陷：一是回流线重复穿过零序电流互感器，导致其电流磁场与电缆芯线磁场相互干扰；二是回流线绝缘层被柜体钢板磨损破损，形成“回流线接地端-柜体”的两点接地，产生环流。该环流穿过零序电流互感器后，与芯线电流磁场叠加，导致互感器采集的零序电流增大，最终触发越限告警。故障性质为安装工艺缺陷，与系统接地故障无关，这一结论通过自产零序电流正常性验证和互感器本体试验得到了充分证实。依据规范要求调整回流线敷设路径、修复绝缘破损处后，故障支路零序电流恢复正常，验证了整改方案的有效性；

2. 依据《GB50169-2016》制定的整改方案具有显著有效性。通过调整回流线敷设路径（移出零序电流互感器检测范围）、修复绝缘破损处（热缩绝缘套管密封+防磨橡胶垫保护）、全面排查同类缺陷等措施，故障支路的零序电流从整改前的0.148A降至0.028A，恢复至正常水平，且经3个月跟踪监测未出现复发情况。整改过程中采用的“外观检查-绝缘测试-负荷验证-长期跟踪”的四步验证法，为同类故障的整改提供了可借鉴的实施范式。

3. 海上风电场紧凑型设备安装需强化施工过程管控与隐蔽工程验收，运维阶段需完善零序电流监测体系，才能保障设备长期安全稳定运行。

后续研究可结合海上高盐雾环境特点，开展电缆屏蔽层绝缘老化规律研究，为制定更精准的运维策略提供支撑。

参考文献

- [1] DL/T 5155-2016, 220kV-750kV变电站设计技术规程 [S]. 北京：中国电力出版社，2016.
 [2] GB 50217-2018, 电力工程电缆设计标准 [S]. 北京：中国计划出版社，2018.
 [3] GB 50169-2016, 电气安装工程接地装置施工及验收规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2016.