

新能源风光并网电气自动化故障处理

管祥

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司, 贵州 毕节 551700

DOI:10.61369/EPTSM.2026070017

摘 要 : 新能源风光并网系统的电气自动化故障处理是保障电网安全稳定运行的关键环节。本文系统分析风电机组、光伏阵列及并网点典型故障特征, 提出基于多源数据融合的故障辨识方法, 并构建涵盖实时监测、特征提取、智能诊断的故障检测体系。在故障隔离与系统重构方面, 优化保护配合策略与自动隔离机制, 实现非故障区域快速重构。针对恢复控制, 探讨有功/无功紧急调控、高低电压穿越及黑启动技术。最后, 结合故障录波、专家系统与人工智能决策, 形成完整的故障信息管理链路, 为提升新能源并网智能化运维水平提供理论支撑。

关 键 词 : 新能源并网; 电气自动化; 故障处理; 故障隔离; 恢复控制; 智能决策

Fault Handling in Electrical Automation for the Integration of New Energy Sources Such as Wind and Solar Power into the Grid

Guan Xiang

Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd., State Power Investment Group, Bijie, Guizhou 551700

Abstract : The handling of electrical automation faults in new energy wind and solar grid-connected systems is a crucial factor in ensuring the safe and stable operation of power grids. This paper conducts a systematic analysis of the typical fault characteristics of wind turbines, photovoltaic arrays, and grid connection points, proposes a fault identification method based on the integration of multiple data sources, and develops a fault detection system that includes real-time monitoring, feature extraction, and intelligent diagnosis. In terms of fault isolation and system reconstruction, optimization of protection strategies and automatic isolation mechanisms is achieved to enable rapid reconstruction of non-faulty areas. Regarding restoration control, methods for emergency regulation of active and reactive power, operation under high and low voltages, and black-start techniques are discussed. Finally, by combining fault recording, expert systems, and artificial intelligence-based decision-making, a comprehensive fault information management framework is established, providing theoretical support for improving the intelligent operation and maintenance of new energy grid connections.

Keywords : new energy grid connection; electrical automation; fault handling; fault isolation; restoration control; intelligent decision-making

引言

伴随着“双碳”战略不断深入,“双碳”目标下风能、太阳能等新能源发电装机规模不断扩大,风电、光伏等新能源发电的并网电气自动化系统可靠性的好坏直接影响到整个电力系统安全稳定运行。但是由于风光资源是间歇性的、不稳定的,并且电力电子设备很多,所以并网系统电气故障种类繁多、变化快,传统的故障处理方式不能达到快速隔离和自我修复的目的。因此需要从故障分析、检测、隔离、恢复以及智能决策这五个方面来创建起一套完整的自动化故障处理技术体系。本文以工程实际为基础,从典型的故障机理入手,对实时监测和特征提取的方法进行了系统的阐述,然后研究了故障隔离重构、恢复控制以及智能管理等各个方面的问题,目的在于给新能源并网自动化故障处理提供一个综合的技术参考。

一、风光并网系统典型故障分析

(一) 风电机组常见电气故障

风电机组运行环境恶劣,它的电气系统经常受到电网侧干扰

以及机组内部的异常影响。变流器功率开关器件过流、过压、短路等故障最常见,造成机组脱网或者减额运行。齿轮箱发电机轴承磨损引起电气振动和谐波异常,时间久了就会造成转子绕组接地或者相间短路。另外,在电网电压突然下降的时候,如果机组

的低电压穿越能力不够好，就会使 Crowbar 电路频繁地工作起来，甚至会造成变流器直流母线电容被烧毁。由于风速突然变化引起转矩振荡，再经由电气传动系统传到并网电流上，就形成了次同步振荡的风险，严重的话还会导致变压器绕组绝缘被破坏。需要依靠振动和电气参数一起做诊断。

（二）光伏阵列及逆变器故障

光伏阵列长时间处在户外环境中，组件热斑、PID 效应以及接线盒烧毁这些直流侧问题时常出现，它们会表现出 IV 曲线的异常情况以及功率输出明显缩减的现象，并且这些故障点常常隐藏起来，只有借助红外成像以及电参数对比的方法才能准确找到它们。逆变器属于交直流变换的关键部分，它的 IGBT 模块老化、驱动信号异常以及滤波电容容量衰减都会造成输出电流谐波超标或者过零畸变，从而影响到并网电能的质量。多台逆变器并联运行的时候，谐振风险增大，容易造成环流过大而导致熔断器烧毁。直流侧对地绝缘阻抗降低会引起漏电保护动作，使逆变器频繁起停，要依靠环境温湿度数据一起发出警报。

（三）并网点电压与频率扰动故障

并网点是风光系统和电网耦合的薄弱点，大功率波动或者电网短路故障都会造成电压暂态跌落或者骤升，严重的时候会引发低电压或者高电压穿越失败。频率扰动大多是由电网有功功率不平衡造成的，比如突然的负荷投切或者是常规机组跳闸等都会使并网点的频率偏离额定值，从而使得风光机组被迫解列。另外，在弱电网中阻抗特性发生变化会引起电压谐波增大、闪变超标，从而引起锁相环失步，进而影响到系统的稳定性。该类扰动故障具有传播速度快、影响范围大的特点，需要依靠快速时频分析及暂态稳定判据来准确识别。

二、故障检测与特征提取

（一）电气量实时监测技术

实现故障快速检测的前提就是对电压、电流、频率、功率因数这些电气量做高精度的实时监测。目前普遍使用同步相量测量单元和合并单元共同完成数据采集，并用 IEC 61850 规约来保证亚毫秒级的数据同步，使得暂态过程可以被全部捕捉到。对于大容量风光场站来说，采用分层分布式监测结构可以有效地减轻数据传输的压力，在就地层进行预处理，在站控层做出综合判断。另外，根据自适应采样率调节方法，在系统处于稳定状态的时候减小采样频率来节省资源，在检测到异常波动之后立刻提高到高频采集，以此达到数据连续性和故障细节分辨能力兼得的目的，给后面的特征提取工作打下坚实的基础。

（二）故障特征信号提取方法

原始电气信号里包含很多噪声以及正常的波动，需要借助时频域联合分析手段来剔除有效的故障特性。短时傅里叶变换、小波包分解一般用来获取电压暂降、谐波瞬变和电流突变的时频局部信息，希尔伯特-黄变换可以自适应地将非线性非平稳信号分解为固有模态函数，从中得到故障调制分量。逆变器开关管开路故障可以用三相电流的直流分量以及特定次谐波幅值的变化来

判断，并且并网谐振可以用阻抗频谱分析来识别谐振峰值频率偏移。另外，用形态学滤波做信号降噪，可以提高微弱故障前兆的检测灵敏度，不会出现过早动作或者漏报的情况。

（三）基于多源数据的故障辨识

单一的电气量很难分辨出不同的故障类型，需要把气象数据、设备的状态监测数据以及保护的動作序列等多种信息结合起来才能做出判断。用 D-S 证据理论或者贝叶斯网络来对各种信源的可信度加以加权融合之后，可以明显改善对于故障种类及位置的判定精确程度。将逆变器直流侧电压波动、交流侧电流畸变和光照突变的信息结合起来可以区分出是电网扰动还是设备内部故障。并且依靠历史故障库创建起来的相似度匹配算法，可以迅速给出候选故障案例，帮助运维人员缩减判断时间。多源融合策略对于数据同步性、通信可靠性的要求较高，要设计出相应的容错机制来应对缺少数据或者延迟的情况。

三、故障隔离与系统重构

（一）快速保护动作与断路器配合

故障出现之后，保护装置要在几个周波之内作出判断，并且促使断路器去切断故障，这就需要对保护定值以及开关的動作时间有着很高的要求。风光并网系统一般会用到纵联电流差动保护加方向比较保护的方式，来适应多端供电的拓扑结构，并且依靠光纤通道来传递高速跳闸信号。为了保证选择性，需要协调上游汇集线路保护和下游馈线保护的时间级差，防止越级跳闸造成停电范围扩大。对于逆变器内部短路，依靠快速熔断器和固态断路器共同工作来达到微秒级的切断目的。定期做保护传动试验、断路器机械特性试验，使動作可靠、灭弧能力符合恶劣环境的要求。

（二）故障区域自动隔离策略

确定了故障区段之后，用智能开关设备加网络化保护来完成自动隔离。使用基于 GOOSE 通信的分布式母线保护以及区域联锁逻辑，当发现故障电流方向出现改变的时候，会自行判定出故障范围，并发出分闸命令，把故障控制在最小的拓扑区域内。对于风电场集电线路来说，依靠馈线终端单元的故障指示器同分段器协作，可以达成无主站状况下就地执行隔离决定的目的，大幅度缩减对于通信主干的依靠程度。光伏场站大多采用汇流箱智能脱扣和逆变器交流侧快速关断联合的方式，使直流侧和交流侧同时被切断，从而有效地阻止故障向隔离边界以外的地方扩散到主网中去。

（三）非故障区域并网重构

故障切除之后，应该尽快使非故障区的风光机组重新并网，从而减小发电损失。重构策略依靠实时拓扑识别以及剩余容量评定，用合环检同期的办法，经由智能重合闸或者联络开关依次合闸，把已经解列的清洁子阵再接入到系统当中。对于含有储能或者柔性直流互联的场站，可以利用虚拟同步机技术来给系统提供暂态支持，使得重构过程中电压相位差变得平缓。在进行时序重构的时候要考虑各个机组的恢复优先级，先恢复对电网支撑能力较强的机组，用逐步加载的方式来防止出现二次冲击的情况发生，并且还要对所提出的重构方案做实时仿真的安全检验。

四、自动化恢复控制技术

（一）风光有功/无功紧急调控

故障恢复期间要对风光的输出功率做紧急再分配来保证功率平衡。有功调节主要是用变桨距、转矩控制快速减载或者增发，但是由于机械惯性的影响，它的响应速度比电力电子调节慢得多。无功调节是利用逆变器或者 SVG 装置在几秒钟的时间内产生容性或者感性的无功，使并网点电压迅速恢复。协调控制策略一般会使用下垂特性曲线，根据并网点电压偏差自适应地调节无功输出，并且限制有功的变化速率来防止频率二次波动。当通信正常的时候可以接受调度中心下发的最佳功率指令，从而达到场站级协同优化的目的。

（二）低电压与高电压穿越控制

低电压穿越要求并网逆变器在电压跌落的时候不脱网并且可以给电网提供动态无功支持，一般用正负序分离控制来抑制负序电流，配合直流侧卸荷电路维持母线电压。高电压穿越要迅速吸收多余的无功或者限制有功输出，防止直流母线电压过高，它的控制难点就是电压突然升高时变流器调制比受到限制，需要采用动态电压恢复器或者串联阻抗调节来加以配合。实际工程当中要依照并网点电压跌落的深浅以及延续时长制订出多段式的穿越曲线，而且还要定期做穿越能力试验，保证设备符合最新的电网规程标准。

（三）黑启动与孤岛恢复并网

风光场站全站失压的时候，依靠储能或者小型燃气机组充当黑启动电源，先创建起场站内部母线电压及频率的基准，之后再依次启动光伏逆变器以及风电机组，从而达到自启动的目的。在孤岛运行状态之下，主网恢复供电以后要经过检同期并网，这时必须精确调节孤岛内相位和幅值，防止并网冲击。用基于 PLL 的预同步控制方法，配合快速断路器的捕捉同期功能，在半个工频周期内就可以实现并网。另外还要制订出孤岛运行和主网恢复的切换程序，规定各个阶段之间的通信确认办法，保证黑启动过程的安全、有条不紊。

五、故障信息管理与智能决策

（一）故障录波与数据远传

故障录波装置可以保存故障发生前、后几个周波的全部波形，是事后分析以及保护动作评价的重要资料。现代录波器可以

实现高采样率、长时间录波，并且有故障触发自动存档的功能，还可以把录波文件用 IEC 61850-90 或者 104 规约传送到调度端和运维中心。为了减小传输带宽的压力，可以对录波数据做压缩和关键特征提取的工作，先传送故障标志以及动作时序，完整的波形则按照需要来调取。另外创建一个故障数据索引库，可以方便地对以前出现过的故障进行查询，并且能够找到与当前故障相类似的故障。

（二）故障诊断专家系统

专家系统把领域知识同推理规则结合起来，用规则库去匹配故障现象和原因。其核心就是创建一个包含设备参数、保护动作逻辑、环境因素和运行工况的综合知识图谱，用正向或者反向推理引擎来得出诊断结论。当检测到变流器过流并且伴随有谐波增加的时候，可以认为是由于开关管短路或者是驱动问题所造成的。为了提高规则覆盖率，需要对新的故障案例进行定期的知识库更新工作，并且还要加入不确定推理来解决由于信息不准确而产生的问题。目前专家系统已经和在线仿真平台相融合，可以将诊断结果以可视化的形式进行推演。

（三）基于人工智能的辅助决策

伴随着深度学习的发展，以卷积神经网络、长短期记忆网络为基础的故障分类以及定位模型也被应用到风光并网系统当中。这类模型可以直接从原始时域波形或者频谱图中自动提取出高层特征，不需要人工选择特征造成偏差，并且可以做多标签分类来处理复合故障情况。强化学习可以用来改进故障恢复方案，在离线环境下产生接近最佳动作序列。实际运用的时候，AI 决策要同人工干预构成闭环，设定置信度门槛，把低置信度的结果转交专家去复核，并且模型还要定时开展增量训练，好应对新的故障类型。

六、结语

新能源风光并网电气自动化故障处理属于包含故障分析、检测提取、隔离重构、恢复控制以及信息决策等诸多环节的综合性工程。本文对各种典型的故障机理进行了系统的整理，突出了多源数据融合和快速保护配合的意义，并且探究了紧急调控、穿越控制以及智能决策这些先进的技术对于改善故障处理效率起到的重要作用。伴随着数字孪生、边缘智能等技术的发展，风光并网故障处理会越来越精确、自适应、协同化，给高比例新能源接入下电网的安全提供更好的技术支持。

参考文献

- [1] 周强, 郑小娜. 电气自动化与电气工程的协同应用与优化路径探析 [J]. 中国金属通报, 2026, (4): 140-142.
- [2] 李树宁. 电气自动化技术在新能源并网中的应用 [J]. 光源与照明, 2026, (3): 160-162.
- [3] 范彦扬. 新能源并网中电气自动化技术对电力系统稳定性的影响研究 [J]. 电气应用, 2025, 44 (11): 83-88.
- [4] 刘岩, 王冬, 马凯琳, 等. 基于改进模型预测控制的新能源电力系统 AGC 控制策略 [J]. 能源与环境, 2025, 47 (11): 315-324.
- [5] 彭丽江, 陈英启, 程咏斌, 等. 电能质量与新型储能一体化在新能源并网中的应用 [J]. 电气时代, 2025, (10): 165-169+173.