

光伏逆变器低电压穿越与电网保护配合机制

宋兴丽

中国能源建设集团黑龙江省电力设计院有限公司，黑龙江哈尔滨，150000；

摘要：光伏逆变器低电压穿越与电网保护配合机制对保障光伏发电稳定接入电网至关重要。探讨两者配合机制，分析低电压穿越原理及电网保护要求，研究配合中存在的问题，如动作时序冲突等。提出优化策略，包括改进控制算法、协调保护参数等，以提升光伏系统与电网的兼容性和稳定性，促进光伏发电大规模应用。

关键词：光伏逆变器；低电压穿越；电网保护；配合机制

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.035

引言

随着光伏发电规模不断扩大，光伏逆变器低电压穿越能力成为保障电网安全稳定运行的关键。当电网发生故障电压跌落时，逆变器需具备低电压穿越能力维持并网。同时，电网保护装置要准确动作切除故障。研究两者配合机制，能有效解决光伏接入带来的新问题，提高电网对新能源的接纳能力。

1 低电压穿越与电网保护基础

1.1 光伏逆变器低电压穿越原理

光伏逆变器低电压穿越原理是指当电网发生故障导致并网点电压跌落时，逆变器在规定的电压跌落范围和持续时间内，能够保持与电网的连接并持续向电网输送有功功率和适量无功功率，待电网电压恢复后逐步恢复正常运行状态的技术机理。逆变器通过实时监测并网点的电压幅值和频率变化，当检测到电压低于设定阈值时，立即启动低电压穿越控制模式。该模式下逆变器会调整自身的控制策略，优先保证直流侧电压稳定，避免因电压跌落导致直流侧过电压或过电流损坏设备。同时通过无功功率调节环节向电网注入无功功率，为电网电压的恢复提供支撑。在电压跌落期间，逆变器需严格控制输出电流的幅值和相位，避免产生过大的冲击电流影响电网稳定。当电网电压恢复至正常范围后，逆变器会按照预设的恢复策略逐步增加有功功率输出，平稳过渡至正常运行状态，整个过程需满足电网对低电压穿越的响应时间和动作特性要求。

1.2 电网保护基本要求与类型

电网保护的基本要求是在电网发生故障或异常运行状态时，能够快速准确地识别故障类型和范围，通过切除故障元件或发出预警信号，防止故障扩大，保障电

网安全稳定运行和供电可靠性。基本要求包括选择性、速动性、灵敏性和可靠性。选择性要求保护装置仅动作于故障元件，不影响非故障区域的正常运行。速动性要求保护装置尽快动作切除故障，减少故障对电网设备的损坏和对供电质量的影响。灵敏性要求保护装置对最小故障电流也能可靠动作。可靠性要求保护装置在应该动作时可靠动作，不该动作时不误动作。电网保护类型按保护范围可分为：主保护、后备保护和辅助保护。主保护是针对被保护元件设置的主要保护装置，能快速切除保护区内的故障。后备保护是当主保护未动作或动作失败时，用于切除故障的保护装置。辅助保护是为补充主保护和后备保护的性能或提高保护的可靠性而设置的保护装置，各类保护装置通过协同工作构建起电网的安全防护体系。

2 配合机制现状分析

2.1 现有配合方式及特点

现有光伏逆变器低电压穿越与电网保护的配合方式主要基于故障检测信息共享和动作时序协调两大核心构建。在故障检测阶段，逆变器的低电压检测模块与电网保护装置通过通信网络实现部分信息交互，电网保护装置将故障初步定位信息传递给逆变器，逆变器结合自身检测到的电压信息调整低电压穿越策略。动作时序协调方面，采用“保护优先”的基本原则，当电网发生故障时，电网保护装置先进行故障识别和判断，若故障属于瞬时性故障且逆变器低电压穿越能力可覆盖，保护装置不立即动作，给予逆变器低电压穿越的响应时间。若故障为永久性故障且超出逆变器低电压穿越能力，保护装置快速动作切除故障线路，同时逆变器检测到电压持续跌落至退出阈值后，主动与电网解列。现有配合方式的特点是具备基础的信息交互能力，能够满足简单故

障场景下的配合需求。动作逻辑相对固定，主要依赖预设的阈值和时序参数进行协调，在结构简单的配电网中应用效果较为稳定，能够基本平衡逆变器低电压穿越性能与电网保护的动作要求。

2.2 存在的主要问题与挑战

现有配合机制存在的主要问题与挑战集中在信息交互不充分、动作时序协调矛盾和复杂场景适应性不足三个方面。信息交互方面，逆变器与电网保护装置之间的信息传递多为单向或半双向，逆变器无法及时获取完整的故障类型、故障位置等关键信息，只能依据自身检测的电压数据调整策略，容易导致策略制定的片面性。动作时序协调方面，当电网电压跌落时，逆变器低电压穿越的启动时间与电网保护装置的动作时间可能出现冲突。若保护装置动作过快，会切断仍具备低电压穿越能力的逆变器，造成不必要的电源切除。若保护装置动作过慢，当逆变器无法承受长时间电压跌落而解列前，故障可能已扩大，影响电网稳定。复杂场景适应性方面，随着光伏渗透率提升，电网结构日趋复杂，多逆变器并列运行时，各逆变器的低电压穿越特性存在差异，会导致电网保护装置检测到的故障电流特性发生变化，影响保护装置的动作准确性。极端故障情况下，现有配合方式难以实现精准协调，易引发连锁故障。

3 影响配合的因素

3.1 电网故障类型与特征

电网故障类型与特征是影响光伏逆变器低电压穿越与电网保护配合机制的关键因素。不同故障类型会导致并网点电压跌落的幅值、相位和持续时间呈现不同特征，直接决定逆变器低电压穿越策略的选择和电网保护装置的动作逻辑。单相接地故障发生时，故障相电压大幅跌落，非故障相电压略有升高，电压跌落呈现不对称性，逆变器需采用不对称低电压穿越控制策略，同时电网保护装置需准确识别接地故障类型，避免误动作。三相短路故障发生时，三相电压同时大幅跌落，属于对称电压跌落，逆变器可采用常规对称低电压穿越控制策略，此时电网故障电流幅值较大，保护装置动作速度要求更高。故障持续时间也会产生重要影响，瞬时性故障持续时间短，逆变器通过低电压穿越即可恢复正常运行，电网保护装置无需动作。永久性故障持续时间长，超出逆变器低电压穿越能力范围后，必须依赖保护装置快速切除故障，若故障特征判断不准确，会直接导致配合机制

失效。

3.2 逆变器控制策略差异

逆变器控制策略差异对配合机制的影响体现在低电压穿越响应特性和输出特性的不同，进而导致与电网保护装置的协调效果存在差异。逆变器常用的低电压穿越控制策略主要包括恒功率控制、恒电流控制和下垂控制等。采用恒功率控制策略的逆变器，在电压跌落时会尽量维持有功功率输出，同时注入无功功率支撑电压，这种方式会使逆变器输出电流较大，可能导致电网保护装置检测到的故障电流增大，易引发保护装置误动作。采用恒电流控制策略的逆变器，会将输出电流限制在额定值以内，避免过电流损坏设备，这种方式虽能保障逆变器安全，但注入电网的无功功率不足，可能导致电压恢复速度变慢，延长保护装置的动作等待时间。采用下垂控制策略的逆变器，会根据电压跌落幅值调整有功和无功功率输出比例，电压跌落越严重，无功输出比例越高。

3.3 保护装置动作特性

保护装置动作特性直接决定其与光伏逆变器低电压穿越配合的协调性，主要体现在动作阈值设定、动作时间延迟和故障识别精度三个方面。动作阈值设定是核心影响因素，保护装置的电压动作阈值需与逆变器低电压穿越的电压耐受范围相匹配。若保护装置的低电压动作阈值高于逆变器低电压穿越的启动阈值，会导致保护装置先于逆变器启动低电压穿越而动作，切断逆变器供电。若保护装置的动作阈值过低，会使保护装置动作延迟，逆变器需承受更长时间的低电压冲击，超出其耐受能力后会自行解列，此时保护装置再动作已无法避免故障扩大。动作时间延迟方面，保护装置的固有动作延迟时间需与逆变器低电压穿越的响应时间相协调。合理的动作延迟能为逆变器提供足够的低电压穿越响应时间，避免不必要的切除。故障识别精度方面，保护装置对故障类型、故障范围的识别准确性至关重要。

4 优化配合的策略

4.1 改进逆变器控制算法

改进逆变器控制算法是优化配合机制的核心手段，通过提升逆变器对电网故障的感知能力和响应灵活性实现更精准协调。传统控制算法多依赖固定阈值触发响应，改进后的算法需融入多源信息融合技术，整合并网

点电压、电流数据与电网保护装置传递的故障初步信息，构建更全面的故障判断模型。算法应强化无功功率动态调节能力，根据故障导致的电压跌落幅值动态调整无功注入比例，在保障逆变器自身安全的前提下最大化提供电压支撑。同时优化有功功率恢复策略，避免电压恢复时因有功功率突增对电网造成二次冲击。引入自适应控制逻辑尤为关键，算法可通过实时学习不同故障场景下的配合效果，动态调整控制参数，使逆变器在单相接地、三相短路等不同故障类型下均能匹配电网保护动作时序。改进后的控制算法还需简化响应链路，缩短从故障检测到策略执行的延迟，确保与电网保护装置的动作节奏保持同步，提升复杂故障场景下的配合稳定性。

4.2 协调保护装置参数设置

协调保护装置参数设置需以逆变器低电压穿越特性为核心依据，通过参数优化实现两者动作时序的精准匹配。首先需建立保护装置参数与逆变器低电压穿越指标的关联模型，明确电压动作阈值、动作延迟时间等参数与逆变器耐受范围、响应时间的对应关系。针对不同型号逆变器的控制策略差异，采用差异化参数配置方案，避免统一参数导致的配合矛盾。在电压动作阈值设置上，需低于逆变器低电压穿越启动阈值且高于其退出阈值，为逆变器预留充足的响应时间，同时防止故障扩大。动作延迟时间应根据逆变器低电压穿越持续能力设定，确保瞬时性故障时保护装置不盲目动作，永久性故障时能及时切除。此外需强化保护装置的信息交互能力，通过升级通信模块实现与逆变器的双向数据传输，使参数可根据实时故障信息动态调整。参数设置完成后需通过联合仿真和现场试验验证效果，针对试验中出现的配合偏差持续优化参数，提升保护装置与逆变器在不同运行场景下的配合适应性。

5 发展趋势与展望

5.1 新技术在配合机制中的应用

新技术的融入为配合机制升级提供重要支撑，推动其从静态协调向动态智能方向转变。人工智能技术的应用可实现故障场景的精准预判，通过训练深度学习模型挖掘历史故障数据、运行数据与配合效果的关联规律，提前识别潜在配合风险并制定应对策略。物联网技术能构建更全面的信息感知网络，在逆变器、保护装置及电网关键节点部署感知终端，实现故障信息、运行状态的实时采集与共享，解决传统配合中信息交互不充分的问

题。区块链技术可提升信息传输的安全性和可信度，确保逆变器与保护装置之间的数据传递不被篡改，为配合决策提供可靠依据。数字孪生技术通过构建电网与逆变器的虚拟映射模型，可模拟不同故障场景下的配合过程，提前发现参数设置和控制策略的不合理之处，减少现场试验成本。

5.2 未来配合机制的发展方向

未来配合机制将朝着全局协同化、控制智能化、标准统一化的方向发展。全局协同化强调突破单设备、单区域的配合局限，构建覆盖整个电网的协同体系，实现多逆变器、多保护装置之间的联动协调，应对分布式光伏大规模接入带来的复杂故障场景。控制智能化体现在决策过程的自主优化能力，配合系统可根据实时运行状态和故障信息自主调整控制策略和保护参数，无需人工干预即可实现最优配合效果。标准统一化是解决不同厂家设备配合矛盾的关键，需建立统一的信息交互协议、参数配置规范和性能评估标准，确保不同型号的逆变器与保护装置能够无缝对接。同时未来配合机制将更注重经济性与安全性的平衡，在保障电网安全稳定的前提下，通过优化配合策略减少不必要的逆变器解列，提升光伏能源利用率。

6 结束语

光伏逆变器低电压穿越与电网保护配合机制的研究具有重要现实意义。通过深入分析现状、影响因素，提出优化策略，可提高两者配合的有效性。随着技术发展，新方法和手段将不断涌现，进一步完善配合机制，为光伏发电与电网的和谐发展提供有力支撑，推动能源结构绿色转型。

参考文献

- [1] 孙伟, 赵磊, 刘勇. 光伏逆变器低电压穿越能力测试与控制策略研究[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 147-154.
- [2] 李明, 王浩, 陈强. 光伏发电系统低电压穿越性能分析及技术优化[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1202-1210.
- [3] 周伟, 黄琳, 张晨. 新型逆变器低电压穿越技术与实验验证[J]. 电力电子技术, 2023, 57(1): 89-97.
- [4] 李宇泽, 周念成, 侯健生, 等. 计及光伏发电低电压穿越不确定性的主动配电网短路电流概率评估[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 564-576.