

风光储微电网低电压穿越协同优化方法研究

邹贵鹏

中电投新疆能源化工集团哈密有限公司，新疆 哈密 839000

DOI:10.61369/EPTSM.2025080002

摘要：新能源发电在电力系统中的占比不断增加，风光储微电网的低电压穿越能力成为保证系统稳定运行的关键因素。目前，极端天气、电网故障等因素容易导致电压骤降，如果微电网不能有效实现低电压穿越，会导致风光发电单元脱网、造成清洁能源的浪费，还会产生连锁故障，影响用户供电可靠性，甚至危及大电网的安全稳定运行。开展风光储微电网低电压穿越协同优化方法研究，可以提高微电网应对电压扰动的能力，促进新能源高效利用，保障关键负荷的连续供电，对于推动新型电力系统的构建，实现“双碳”目标具有重要的理论意义和工程应用价值。

关键词：风光储微电网；低电压穿越；协同优化；新能源发电厂

Research on Collaborative Optimization Method of Low Voltage Crossing in Photovoltaic, Wind and Storage Microgrid

Zou Guipeng

Hami Limited Company of Energy Group of China Power Investment Corporation, Hami, Xinjiang 839000

Abstract : The proportion of new energy power generation in the power system continues to increase, and the low-voltage ride-through capability of wind-solar-storage microgrids has become a key factor in ensuring stable system operation. Currently, factors such as extreme weather and grid faults can easily lead to voltage dips. If microgrids cannot effectively achieve low-voltage ride-through, it will result in the disconnection of wind and solar power generation units from the grid, leading to waste of clean energy. Additionally, it can trigger cascading failures, affecting the reliability of power supply to users and even endangering the safe and stable operation of the main power grid. Conducting research on collaborative optimization methods for low-voltage ride-through in wind-solar-storage microgrids can enhance the microgrid's ability to cope with voltage disturbances, promote efficient utilization of new energy, and ensure continuous power supply to critical loads. This research holds significant theoretical importance and engineering application value for advancing the construction of new-type power systems and achieving the "dual carbon" goals.

Keywords : wind-solar-storage microgrid; low-voltage ride-through; collaborative optimization; new energy power generation

在“双碳”目标推动下，风能、太阳能等可再生能源被大规模开发利用，风光储微电网由于其灵活的能源配置特性，成为分布式能源接入电网的主要形式。与光伏或风能独立供电系统相比，风光互补系统能更好适应环境变化，再具有储能调节功能，风能、太阳能和电池微电网可更好利用清洁能源，满足系统用电需求。助力降低碳排放，提升能源供应稳定性与灵活性，为“双碳”目标实现提供有力支撑。

一、风光储微电网低电压穿越协同优化的意义

(一) 保障电网安全稳定运行

电力系统中，新能源发电比例不断上升，风光储微电网成为电网的重要部分。电网发生电压跌落故障时，如果风光储微电网缺少有效的低电压穿越协同优化手段，风机、光伏逆变器等设备就会由于过流、过压等情况导致保护动作而脱网。众多新能源发电设备集体脱网会造成电网有功功率急剧减少、频率大幅波动，

甚至造成连锁故障，危害电网整体安全稳定。通过协同优化风光储微电网的低电压穿越能力，可以保证电网电压跌落期间，新能源发电设备维持并网，不断向电网输送有功功率，从而给电网故障恢复给予支撑，削减电网事故风险，保障电网安全稳定运行^[1]。

(二) 提升新能源发电消纳水平

新能源发电具有间歇性、波动性特点，风光储微电网利用储能系统进行充放电调节，可以在一定程度上平抑风光发电输出的

波动，提高新能源发电的可控性。但是，低电压穿越能力不足会限制风光储微电网的并网范围，当电网电压发生短暂跌落时，即使故障持续时间较短，微电网也无法完成低电压穿越，仍需要脱网运行。这样不仅会造成新能源发电量的浪费，也会增加电网对新能源发电接纳的担忧。开展风光储微电网低电压穿越协同优化研究，可以增强微电网在复杂电网工况下的适应性，减少由于电压问题导致的脱网现象，增加新能源发电设备的有效运行时间，提高新能源发电的消纳水平，推动新能源资源的充分利用。

(三) 提升新能源发电厂的经济效益

对于新能源发电厂来说，发电设备的持续稳定运行是保证其经济效益的重要基础。风光储微电网若存在低电压穿越能力不足的问题而频繁脱网，则一方面会导致发电量的减少，从而造成发电厂收入下降；另一方面，频繁启停设备会增加机械损耗和电气损耗，缩短设备的使用寿命，增大维护成本。一些地区电网对新能源发电厂的低电压穿越性能有明确规定，若无法达到标准，发电厂可能会被处以罚款或者限制并网容量等处罚，这也会损害其经济效益。经过低电压穿越协同优化，可以降低风光储微电网脱网的概率，延长设备的使用寿命，削减维护成本，并且免除由于无法满足电网要求而带来的额外支出，明显提升新能源发电厂的经济效益^[2]。

二、风光储微电网低电压穿越协同优化的难点

(一) 多设备特性差异加大协同控制难度

风光储微电网包含风机、光伏发电、储能系统等众多设备，各设备的工作原理、控制策略以及低电压穿越特性存在明显差别。风机的低电压穿越依靠变流器控制及 crowbar 电路保护，其响应速度受机械惯性、变流器开关频率等因素制约；光伏逆变器的低电压穿越则通过改变调制策略、注入无功功率等途径达成，对电压跌落的敏感程度较高；储能系统可以迅速充放电调节功率，不过受储能介质类型、充放电倍率所限，其功率输出水平存有差别。在低电压穿越进程中，须要调控这些特性迥然不同的设备，做到功率互补与保护协作，防止因设备之间控制不同步引发的过流冲击、电压振荡等状况，而多设备特性的差异性极大地加大了协同控制的难度。

(二) 电压跌落工况复杂性提升优化难度

电网电压跌落的工况是多样的，也是不确定的，电压跌落幅度、电压跌落持续时间、电压跌落类型（对称电压跌落、不对称电压跌落）等参数都会影响风光储微电网的低电压穿越过程。例如，对称电压跌落时，各相电压同步下降，设备要承受较大有功功率缺额；不对称电压跌落会生成负序分量，造成设备出现负序电流，加大设备发热和损耗。而且，电压跌落还会引发电网频率波动、谐波污染等复杂情况，使低电压穿越的不确定性增多。风光储微电网低电压穿越协同优化要应对不同的电压跌落工况，保证在各种复杂状况下都能稳定穿越，但由于工况参数变化无常，不能制定统一的优化方案，必须针对不同工况实施精准控制，这无疑加大了优化设计的难度^[3]。

(三) 控制策略与系统稳定性平衡的挑战

控制策略的优化设计要在快速响应和系统稳定之间找到平衡。在应对电压跌落时，要尽快改变各个设备的控制参数，像风机变流器的调制比、光伏逆变器的无功功率、储能系统的充放电功率等，从而马上制止过流并保持直流母线电压平稳。不过，控制策略的快速反应也许会给系统带来暂态振荡，要是控制参数设置不合理，很可能会导致整个系统不稳定。比如，储能系统迅速改变功率会令到微电网产生冲击，风机 crowbar 电路接入和断开的时候如果不合适，就会使得电流突变，进而影响到变流器寿命。怎样在控制策略迅速响应的情况下，依然让系统维持稳定，这是风光储微电网低电压穿越协同优化面临的大难题。

三、风光储微电网低电压穿越协同优化的策略

(一) 分层控制架构下的协同控制策略研究

构建底层设备控制、把中层协调控制同上层系统优化结合成的分层控制结构，做到各层信息交流和相互协作配合的目的。底层对风机、光伏逆变器、储能变流器设计专用低电压穿越控制算法，保证每个设备的基本穿越能力；中层随时获取每个设备的运行状况和电网电压跌落数值，采用多个设备一起控制模型来动态分配功率调节的任务；上层联系电网调度需求、新能源发电预估数据，改良中层协调控制参数范围，达成设备调控、协调调度和系统改良的有机结合^[4]。

某大型风光储互补新能源发电厂，电网电压跌落至额定电压60%的故障里，凭借分层控制架构顺利穿越。底层设备中，风机采用改良型转子侧变流器控制算法，故障出现后0.02秒之内迅速调整转子励磁电流，免除了风机脱网状况；光伏逆变器依靠直流侧电容电压稳定控制，把直流母线电压波动范围限制在5%以内，从而保证光伏阵列持续发电。中层协调控制单元即时收集到全网200多台风机、50组光伏逆变器的运行数据，以及电网电压跌落幅度、跌落持续时间等参数，借助多设备协同控制模型，把功率调节任务动态分配给不同设备，先让响应速度较快的储能变流器担负40%的功率调节量，剩下的部分按照风机和光伏逆变器3:3的比例分摊。上层系统根据日前新能源发电预测数据及电网调度下发的功率控制指令，提前将中层协调控制的功率调节阈值优化至额定功率的±15%，整个控制过程中设备控制、协调调度、系统优化有机衔接，故障期间电厂总出力波动不大于8%，完成低电压穿越。

(二) 无功功率协同注入的电压支撑策略研究

利用各个设备的无功功率调节能力来制定协同注入策略，给电网提供电压支撑。分析各个设备的无功功率输出特性，明确调节范围以及响应速度，光伏逆变器可以通过调制策略连续输出无功功率，风机能够将一部分有功调节能力转换成无功输出，储能系统响应速度快，可以灵活地注入无功。建立无功功率协同分配模型，根据电压跌落幅度以及持续时间来确定各个设备的注入比例；设计动态调节机制，实时监测电压恢复情况，调整无功注入量，防止电压过冲。

某风光储新能源发电厂在夏季用电高峰期，电网电压跌落至额定电压55%的故障时，依靠无功功率协同注入策略向电网供应了有效的电压支撑。电厂首先精确剖析了各个设备的无功功率输出情况，光伏逆变器利用SPWM调制策略，可达成0~100kvar范围内的连续无功功率输出，响应时间不超过0.01秒；风机凭借双馈感应发电机的定子侧变流器控制，可把15%的有功调节能力转变成无功输出，单台风机最大无功输出达80kvar；储能系统采取双向变流器设计，无功响应速度达到0.005秒，而且可依循电网需求灵活改变无功注入的方向与大小。故障出现之后，无功功率协同分配模型按照电压跌落程度和预计持续时长，来决定各个设备无功注入比例，储能系统承担50%，光伏逆变器承担30%，风机承担20%。在动态调节机制之下，系统随时观察电网电压恢复状况，当电压回升到额定电压80%的时候，储能系统无功注入量由2000kvar降到1200kvar，光伏逆变器由1200kvar降到800kvar，风机无功注入量维持800kvar不变，从而防止了电压过冲现象，最后促使电网电压在1.2秒之内回升到95%以上。

（三）储能系统灵活调控下的功率平衡策略

依靠储能系统有功功率充放调节能力来制订功率平衡策略，从而维持系统的功率平衡。创建起电压跌落期间的功率需求预测模型，结合相关的参数来预估有功调节量，当风光设备要降低功率的时候，储能就会把释放出来的功率填补上去，如果伴随着频率下降，储能会加大有功输出以支撑频率回升；设计出储能充放电功率限制及保护机制，联系到微电网运行状态来改善充放电时间，保证电压跌落时储能具有足够的调节能力^[5]。

某北方风光储新能源发电厂在冬季寒潮期间，电网故障造成电压跌落，同时有功功率缺额，依靠储能系统灵活调控的功率平衡策略维持系统稳定。电厂提前建立电压跌落期间功率需求预测模型，结合实时风速、光照强度以及电网电压跌落幅度等参数，预测出故障期间需要补充的有功调节量为30MW。当电网故障发生时，风光设备因低电压保护需降低25%有功出力，储能系统立即按照功率平衡策略释放功率，在0.03秒内由浮充状态切换为放电状态，输出20MW有功功率，弥补大部分功率缺额。随后系统检测到电网频率下降了0.2Hz，储能系统继续增大5MW有功输出，有力支撑电网频率回升。储能系统的充放电功率限制与保护功能发挥效果，联合微电网当前运行情况，把放电功率控制在额定功率的50%以内，防止储能过度放电，按照故障前的充放电计

划，决定在故障恢复后的30分钟内，利用风光发电的多余电量给储能补能，从而保证后续如果再次出现电压跌落，储能仍然有足够的调节能力。

（四）控制参数动态优化下的系统稳定性策略

给出控制参数动态优化策略，解决快速响应与系统稳定性之间的矛盾。形成微电网低电压穿越暂态模型，分析不同工况下的暂态特性，找出影响稳定的关键控制参数；设计动态优化算法，以暂态振荡最小化、电压恢复时间最短化为目标，融合实时系统数据，通过自适应控制、模型预测控制等方法调整关键参数；创建参数约束条件，保证参数处在设备安全范围内，达成快速响应和系统稳定性的平衡。

某山地风光储新能源发电厂由于地形复杂导致风电出力不稳定，在电网发生电压跌落故障时往往会出现快速响应与系统稳定性之间的矛盾，利用控制参数动态优化策略来解决这个问题。电厂首先建立微电网低电压穿越的暂态模型，分析在不同工况下微电网低电压穿越的暂态特性，确定风机转子侧变流器PI调节器参数、光伏逆变器直流侧电压控制参数以及储能变流器电流环控制参数等参数是影响系统稳定性的主要参数。在一次电压跌落到额定电压40%的故障中，利用动态优化算法以暂态振荡最小化、电压恢复时间最短化为目标，基于实时系统数据，利用自适应控制的方法对参数进行实时调整，将风机转子侧变流器K_p由0.8调整到1.2，T_i由0.05s调整到0.03s，光伏逆变器直流侧电压控制K_p由1.0调整到1.5，储能变流器电流环K_p由0.6调整到0.9。同时算法严格遵守参数约束条件，使参数处于设备安全范围之内。这次故障中系统暂态振荡的幅度由原来的15%降到了5%，电压恢复时间也由原来的1.5秒缩短到了0.8秒，做到了快速响应和系统稳定之间的平衡。

四、结语

风光储微电网低电压穿越协同优化技术的不断研发和应用，既是破解新能源发电的波动性、间歇性与电网电压稳定性的矛盾的重要抓手，也是建设新型电力系统的重要意义所在。从安全角度来说，它可以避免电压跌落导致风光机组脱网事故，守住电网运行的“安全防线”；从消纳角度来说，它可以提升风光资源的消纳率，减少弃风弃光，助力能源结构清洁低碳转型。

参考文献

- [1] 刘姝,赵闯,邹文广,李东泽,王日呈.基于 MILP 的园区微电网风光储协调优化配置 [J].东北电力技术,2024,45(12):5~10.
- [2] 谢菁,吴政声,万航羽,支刚.微电网风光储容量优化配置 [J].云南电力技术,2024,52(04):19~24.
- [3] 操凌皓,魏立明.考虑风光出力不确定性的风光储微电网系统智能协调控制策略 [J].技术与市场,2024,31(02):1~7.
- [4] 王雅雯.基于需求侧响应的风光储微电网经济优化研究 [J].广东电力,2023,36(09):10~16.
- [5] 徐阳旭,彭学林,张梦.考虑柔性负荷的风光储微电网多时间尺度优化调度 [J].电工材料,2023,(04):67~70+76.