分布式光伏对配电网保护与自动化的影响及对策措施

郭　亮，李升健，邓才波，蔡木良，刘　洋

（国网江西省电力有限公司电力科学研究院，江西 南昌 330096）

摘　要：江西省分布式光伏大量接入配电网后，配电网从无源向有源方向演变，改变了配电网乃至上级电网正常运行潮流和故障电流。文中总结了江西地区配电网保护配置及自动化应用情况，重点分析了分布式光伏大规模接入对配电网保护配置、配电自动化等的影响，并提出了低成本、实用化应对解决措施。

关键词：分布式光伏；配电自动化；分级保护配置；有源配电网

中图分类号：TM 615　TM 77　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-348X(2025)01-0001-06

0　引言

随着国家一系列新型电力系统建设政策的推出和落地，分布式光伏得到了快速发展。据国家能源局统计，截至2024年9月底，全国分布式光伏接入容量达3.42亿kW，其中江西地区为1135.6万kW[1]，分布式光伏用户达27.9万个。大规模分布式光伏接入配电网后，改变了传统配电网正常运行潮流和故障电流，降低配电网继电保护和配电自动化控制策略准确性。

目前，业界全面分析了分布式光伏接入对配电网继电保护及配电自动化等方面造成的影响，详细分析了对三段式电流保护、反时限电流保护、重合闸等的不利影响[2-6]，为解决分布式光伏并网所带来的继电保护问题，业界提出了系列新型保护方法；文献[7]提出了一种适用于含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护方法，通过比较故障时动作高频阻抗和制动高频阻抗的关系，判别区内外故障；文献[8]提出了一种基于光学电流互感器的有源配电网相差保护方案，通过光学电流互感器的相位差动保护，避免了温度和光源变化对光学电流互感器的影响；文献[9]根据分布式光伏接入配网后的结构和电流变化的特点，提出了一种综合比较电流幅值和电流相位关系的电流型保护方案；文献[10]采取差动保护的方案，利用Hausdorff距离算法，分析故障电流波形的相似度，实现对线路的保护；文献[11-12]在考虑继电保护影响的条件下，提出了提高分布式光伏接入配电网容量方案；文献[13]提出并采用了一种电压因子修正的方案，提高反时限电流保护的快速性；文献[14]提出了适应于光伏助增作用的I段保护复合判据，以及可克服光伏汲出作用的保护配合策略，进一步分析了其有效边界对光伏接入约束的要求，并在此基础上，提出了多级保护配置及与自动装置的配合方案。

以上方法或需要更换新型保护装置，或修改已有保护装置的软件算法，或对光伏接入容量有边界要求，适用范围有限，需要新增大量投资，无法快速有效地应对现有问题。针对以上问题，文中以江西配电网为例，分析了分布式光伏接入对现有配电网保护及配电自动化策略的影响，基于分级保护配置现状，提出了实用性强、投入成本低的应对策略。

1　江西配电网保护与配电自动化配置简况

1.1　短路故障保护配置

按照《国网江西省电力有限公司（以下简称江西公司）配电网继电保护管理指导意见》（赣电调〔2018〕711号）的要求，江西公司配电网短路故障保护普遍

收稿日期：2025-02-05

基金项目：江西省重点研发计划（含高比例分布式电源的有源配电网智能管控与故障自愈技术研究，2022BBE51013）。

作者简介：郭亮（1986），男，硕士，教授级高级工程师，从事配电网继电保护、配电自动化技术研究。

采用基于电流保护的分级保护配置方式，简述如下。

1）架空线路

过流保护：根据阻抗分布选择或安装分级开关（见图1）。站内开关设置三段式过流保护，线路上分级开关设置两段式过流保护。

重合闸：应投尽投，重合闸时间为2.6 s。

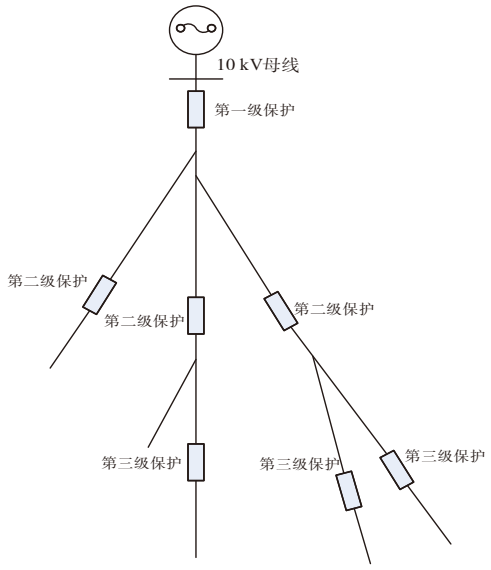

图1　分级保护配置示意图

2）电缆线路

过流保护：环进环出不设保护，分支开关全部作为第二级保护（见图2）。

重合闸：设备可靠且设置了分级保护的投入。

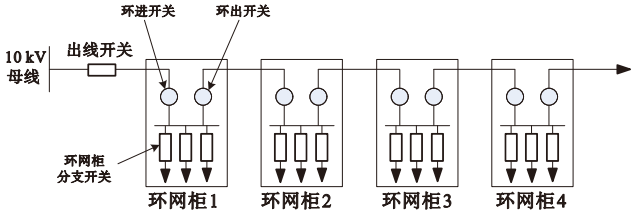

图2　电缆线路分级保护示意图

3）分支及配变保护

分支线或配变前端设置分支断路器。一般设置两段式保护（也可设置一段式保护），与上级分级保护配合。过流I段：时间0，电流定值不大于上级，且不小于励磁涌流；过流II段：电流和时间均小于上级，且不小于下游配变额定电流。

分支线或配变前端设置快速熔断器。根据熔断器时间-电流曲线选择熔丝，按照以下要求配置：（1）后侧负荷额定电流下不熔断；（2）合闸励磁涌流下100 ms内不熔断；（3）上级末段保护电流下熔断时间小于时间定值，即故障时在末段定值动作之前，熔丝已熔断。

1.2　单相接地故障保护配置

按照《国网江西省电力有限公司10 kV配电网单相接地故障处理技术指导意见（试行）》（赣电技委会〔2024〕4号），江西配电网单相接地故障采用差异化配置策略，简述如下。

1）稳态零序保护法。适应场所：10 kV中性点不接地变电站（主要是35 kV变电站）出线。

配置方式：小分支（电缆线路小于500 m或架空线路小于30 km）开关投零序保护，定值一般取2~3 A/15 s。上下级配合：可结合变电站小电流选线装置选线结果研判故障，线路开关上下级配合通过延时（时间级差3～5 s）实现。

2）暂态法（零序电流电压波形提取、分析、判别方法）。适应场所：10 kV中性点经消弧线圈接地的配电网（大部分110 kV、220 kV变电站馈线）。

配置方式：利用一二次融合设备的单相接地故障判别功能，实现单相接地故障判别与隔离。

在具体算法上，以上两种保护都需要通过零序电压启动。

1.3　配电自动化应用现状

江西公司所属11家地市公司均已建成新一代配电自动化主站，采用N+N模式（即I区主站和III区主站均部署在地市主站）。江西公司馈线自动化以集中型馈线自动化为主，就地型馈线自动化为辅，馈线自动化功能需要电压失压信号启动。

2　分布式光伏故障特征及影响分析

2.1　分布式光伏电源特性

分布式光伏电源发出的直流电通过光伏逆变器转换为交流电接入交流电网，如图3所示。光伏逆变器是一种电力电子电源转换装置，由逆变桥、LC滤波等器件组成。其故障电流受电力电子设备耐受过流能力和控制策略影响，幅值受限、相角受控，其短路电流受不同控制参数及控制策略影响，无法提供持续且稳定的工频分量，幅值受限且呈现强非线性，同时分布式新光伏接入配电网，潮流双向流动且变化范围大，拓扑结构变化复杂。

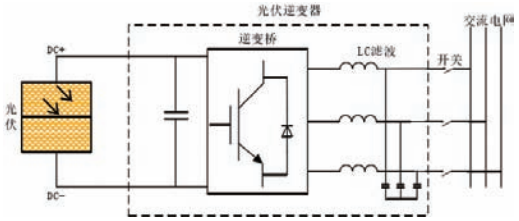

图3　分布式光伏并网电路示意图

按照GB/T 33593—2017《分布式电源并网技术要求》的规定，分布式光伏并网逆变器应具备电压保护、频率保护和防孤岛保护。其中电压保护功能要求：当并网点电压在表1范围内时，应在相应时间内停止向电网送电；频率保护性能要求：当并网点频率超出49.5~50.2 Hz运行范围时，应在0.2 s内停止向电网送电；防孤岛保护要求：应具备快速监测孤岛且立即断开与电网连接的能力，防孤岛保护动作时间不大于2 s。

表1　分布式光伏电压保护功能要求

并网点电压	要求
$U<50\%U_N$	最大分闸时间不超过0.2 s
$50\%U_N\leqslant U<85\%U_N$	最大分闸时间不超过2.0 s
$85\%U_N\leqslant U\leqslant 110\%U_N$	连续运行
$110\%U_N<U\leqslant 135\%U_N$	最大分闸时间不超过2.0 s
$135\%U_N\leqslant U$	最大分闸时间不超过0.2 s

注1：UN为分布式电源并网点的电网额定电压。

注2：最大分闸时间是指异常状态发生到电源停止向电网送电时间。

2.2　分布式光伏对中压配电网单相接地故障的影响

分布式光伏电源由配电网400 V低压侧接入，在10 kV线路发生接地故障时，由于中压不接地系统（或经消弧线圈接地），中低压零序回路隔离，因此可以忽略分布式光伏对中压配电网接地故障的零序电流的影响。

配电网是小电流接地系统，在发生接地故障时，分布式光伏通过配电变压器升压接至10 kV线路，据统计，江西省配电变压器联结组别主要有两类：DYn11型及YYn0型，绕组接线方式如图4所示。

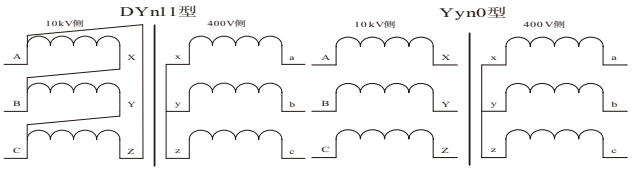

图4　不同联结组别配变绕组结构

经过理论分析和仿真测试，可知在10 kV发生接地故障时，经Dyn11配变并网的分布式光伏，提供的零序电流在配变高压绕阻三角形接线的闭合回路内流通，不会流入10 kV侧线路，因此分布式光伏不会影响Dyn11配变10 kV侧线路单相接地故障零序电流。

经YYn0型配变并网的分布式光伏产生的零序电流通过Yg流入大地，因10 kV侧中性点是非有效接地系统，配变高低压侧的零序回路是隔离状态，因此分布式电源接入不会对YYn0型配变10 kV侧的零序电流产生影响。

但理论分析及试验表明，分布式光伏并网容量、位置、光伏出力波动性及并网高次谐波对接地故障的零序电压产生影响，零序电压的各类时频域特征受到了不同程度的影响，零序电压幅值总体呈增大趋势[15]。

2.3　分布式光伏对中压短路故障电流大小和方向的影响

分布式光伏电源接入配电网后，在发生短路故障时，分布式光伏逆转特性决定其短路电流一般小于容量对应电流的1.5倍[16]。容量为5 MW的分布式光伏的额定电流290 A，短路故障发生时产生的故障电流约400 A，由于江西公司配电网保护CT变比主要为400/5或更大，最末端保护过流定值一般不低于CT一次值，因此，一般认为，若同母线所含分布式光伏电源总容量在5 MW以下，在故障时发出的故障电流不会大于过流III段，无法启动保护，对保护的影响可以忽略。

当容量大于5MW时，按照故障点与分布式光伏相对位置的各类情形如图5—8所示。

1）含分布式光伏的本线路故障

（1）故障点在分布式光伏上游，对分级保护没有影响

参考图5，由于故障点在分布式光伏电源上游，其上游故障电流由主网单独提供，故障电流大小不受分布式光伏的影响，始端保护按照原有定值动作；故障点与分布式光伏之间若有保护，可能也会动作，但由于上游保护已经动作，该保护动作与始端保护动作是等效的，因此，此时分布式光伏对分级保护没有实质影响。

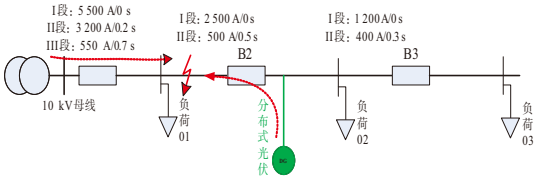

图5　故障点在分布式光伏电源上游

（2）故障点位于分布式光伏下游，但上游有多级保护，使分级保护的保护范围缩小，动作时间延长，但实质上不影响保护动作。

参考图6，当故障点在分布式光伏电源下游时，

由于分布式光伏对所在位置电压有支撑作用，将削弱分布式光伏上游保护感受到的故障电流，缩小上游保护的保护范围，启动的保护段后延，动作时间延长。以图6所示定值为例，原有配置实现了三级保护，假设未受分布式光伏影响的故障点电流为2 800 A，分布式光伏接入后故障电流降低为2 200 A，则上游始端保护III段和B2保护II段将启动，但B2保护的II段将先动作，此时不影响分级保护配合，只是动作的保护段数发生了变化。

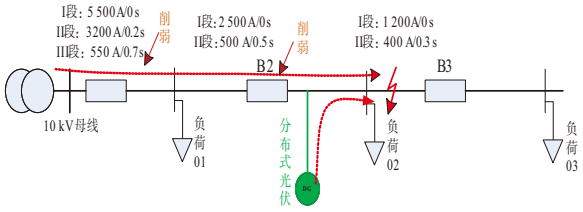

图6　故障点在分布式光伏电源下游

（3）故障点在分布式光伏下游，故障点与光伏之间的保护灵敏性增加，保护范围增大。

对下游保护感受的故障电流有助增作用，使保护灵敏性增强、保护范围扩大，如果下游只有一级保护（见图7），实质上不影响各级保护的有序动作。

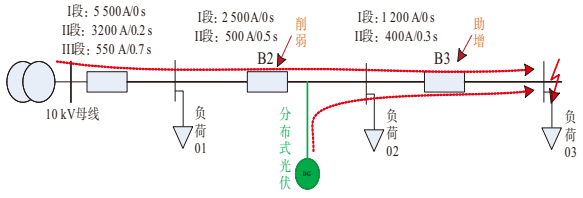

图7　故障点在分布式光伏下游一级保护后侧

若下游保护有多级保护（见图8），且其保护范围扩大了，将有可能使分级保护失配。以该图所示定值为例，原有配置实现了三级保护，假设未受分布式光伏影响的故障点电流为1500 A，分布式光伏接入后故障电流增大到1900 A，则分布式光伏电源下游的B2保护I段和B3保护的I段将同时启动，使B2和B3同时动作，扩大故障停电范围。因此在分布式电源的下游应避免出现多级保护。

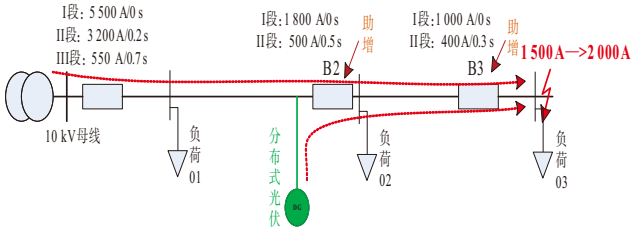

图8　故障点在分布式光伏下游两级保护后侧

2）含分布式光伏线路的相邻线路故障

相邻线路故障时，含分布式光伏线路上游保护会流过反向电流，故障线路在故障点上游部分流过的故障电流会增加。

如图9所示，在含分布式光伏电源的线路上，分布式光伏上游的B2保护会感受到分布式光伏提供的故障电流，若分布式光伏提供的电流大于上游保护末段电流定值，有可能导致保护误动作；受分布式光伏的影响，相邻故障线路上，故障点上游的保护感受的电流增大，扩大了保护范围。

由于线路采用分级保护配置，出线开关保护设置了三段式保护，若通过合理设置分布式光伏的位置和保护整定定值，确保含分布式光伏与主网电源之间只有一级保护，且过流II段定值大于该线路倒送故障电流，则使非故障线路倒送电流仅启动过流III段；同时，故障线路站内出线开关合理设置保护定值，使引起保护启动的故障启动I段或II段保护（仅启动III段保护的故障一般为过负荷，此时含分布式光伏的线路倒送电流可以忽略），确保II段动作，则非故障线路保护动作前，故障已被切除，不会影响非故障线路。

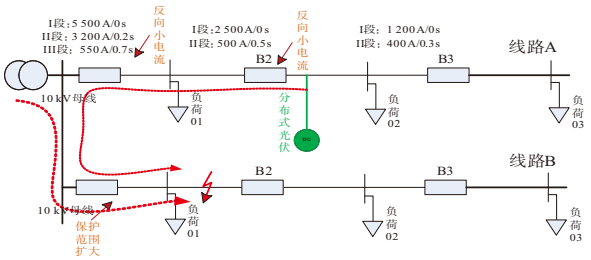

图9　故障点在分布式光伏相邻线路上

线路的故障点与主网电源之间有多级保护，可能因其他线路分布式光伏的影响，引起保护的范围扩大，导致分级保护失配，此时应计算其他非故障线路分布式光伏总容量；在整定定值时，考虑分布式光伏可能造成的最大影响，避免在中末端故障时，因过流I段保护范围扩大，导致I段保护动作全线停电。

2.4　分布式光伏对配电自动化的影响

动作逻辑方面：若并网设备可靠，分布式光伏在故障后2 s内应切除；若未及时切除，分布式光伏长时间故障输出电流，有可能将造成馈线自动化动作失败。

监测方面：分布式光伏并网后，并网开关接入配电自动化主站，主站侧和终端侧需要配置额外的信号

量，如并网开关状态、相关电气量等。

2.5 分布式光伏对重合闸的影响

故障时，分布式光伏将向故障点持续提供短路电流，造成故障点无法熄弧、重合闸失败；同时，分布式光伏孤岛运行后将失步，为避免重合失败，以及分布式光伏非同期合闸，目前采用在重合前切除分布式光伏电源的方法（见图10—11）。

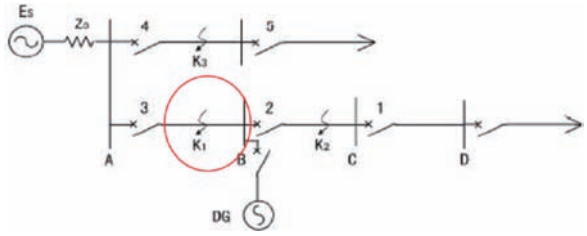

图10 分布式新能源机组接入配电网示意图

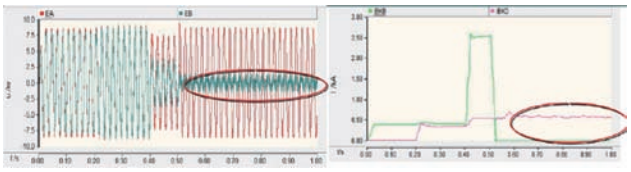

图11 K1故障后分布式新能源对故障点的电压支撑和短路电流（新能源占比25%）

2.6 分布式光伏对备自投的影响

分布式光伏对电压有支撑作用，在故障后，会对备自投动作产生影响。参考图12，分布式新能源接入10 kV I母变压器T1发生故障，跳开QF4后，导致母线电压未跌落至0.2 pu以下，QF6备自投失败（备自投检测母线电压低于0.2 pu时动作）。

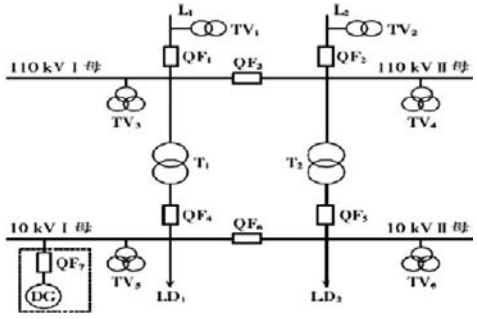

图12 接入分布式光伏的10 kV备自投示意图

3 应对措施

根据以上分析，分布式光伏不影响单相接地故障零序电流，对零序电压会有增大的趋势，对于依据零序电压大小启动的零序保护或暂态法保护，会增加其灵敏性，对故障研判不会产生影响。

分布式光伏对备自投、重合闸、配电自动化的影响均通过故障存续期间，分布式光伏支撑电压产生。在故障情况下，分布式光伏电源本身将因电压保护或防孤岛保护而脱网，故障存在的时间不会超过2 s。因此，只要接入的分布式光伏电源保护性能满足国家标准要求，且备自投、重合闸、配电自动化的反应时间超过2 s（实际目前江西地区配电网备自投时间为6~9 s，重合闸时间2.6 s，缓动型主站集中式馈线自动化启动时间大于4 s，均大于2 s），在常规设置下，分布式光伏对备自投、重合闸、配电自动化的影响可以忽略。

因此，下面主要分析分布式光伏对短路故障的影响，基于上节的分析，在分级保护配置的基础上，可以低成本地解决分布式光伏的大部分影响。

3.1 对策1：控制分级保护数量、优化分布式光伏接入位置

为提升分级保护对分布式光伏的适应性，对含分布式光伏线路配置应采用两级保护配置方式；且分布式光伏接入位置应位于站内保护与第二级保护之间的线路上，如图13所示。

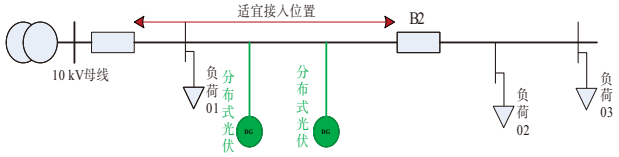

图13 优化分布式光伏接入位置示意图

3.2 对策2：忽略小容量分布式光伏

在分布式光伏接入对保护的影响因素中，应考虑同母线的配电网所接入的所有分布式光伏。

若同母线其他线路分布式电源总容量对应额定电流的1.5倍，小于本线路第二级保护II段电流定值，则可以忽略其影响；否则，需调整定值整定。

3.3 对策3：含分布式光伏线路分级保护定值整定

含分布式光伏线路保护定值整定需要解决两个问题：

1）相邻线路故障时，III段保护动作，避免倒送引起误动作；

2）该线路故障时，与相邻线路形成配合，防止相邻线路分布式光伏电源保护失配。需对出线开关保护定值做如下调整：

（1）过流II段定值在分级保护配置要求的基础

上，取大于本线路光伏容量对应电流的1.5倍即$I_{光伏}$，同时小于本线路末端最小短路电流，与其他线路分布式光伏总容量对应电流的1.5倍之和。

（2）第一级保护过流I段定值在规定标准的前提下，在分级保护定值“$I段_Z$”基础上，加上其他线路分布式光伏总容量对应的电流的1.5倍，即$I_{光伏总}$之和（见图14）。

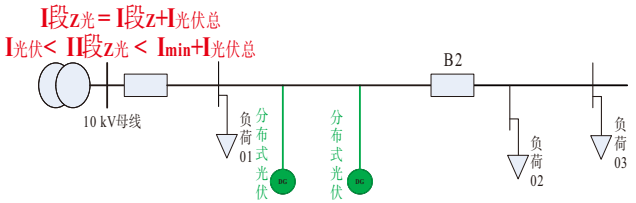

图14　调整含分布式光伏线路过流I段定值示意图

3.4 对策4：不含分布式光伏线路分级保护定值整定

不含分布式光伏线路保护定值整定需要解决一个问题：该线路故障时，防止相邻线路分布式光伏电源引起保护失配。只需对出线开关保护定值做如下调整：在具有保护范围的前提下，过流I段定值在分级保护定值“$I段_Z$”与其他线路分布式光伏总容量对应的电流的1.5倍即$I_{光伏总}$之和。

3.5　对策5：分级保护调整超过极限时，采用新型装置或保护模式

1）当分布式光伏接入位置不在第一、二级保护之间，或无法按照以上方式配置分级保护时，可采用带方向的过流保护，在感受到正方向故障电流时开关才跳闸，反方向故障电流时开关不动作；2）当分布式光伏集中在一个区域且由同一个并网开关并网时，站内开关和并网开关可采用光纤差动保护，差动保护的门槛定值取CT变比的一次额定电流值，站内开关设置无速断的过流保护作为后备保护。

4　结语

文中分析了分布式光伏大规模接入对配电网继电保护及配电自动化等方面带来的影响，并提出了对策措施。分析表明，分布式光伏对江西地区配电网保护与自动化的影响，在接入的分布式光伏电源保护性能满足国家标准，且备自投、重合闸、集中式馈线自动化在常规设置情况下，可忽略分布式光伏的不利影响。

需重点关注超过一定容量（如5 MW以上）的分布式光伏对短路故障的影响，且通过对已有分级保护进行适当改进，可以解决含分布式配电网保护配置难题，采用五个应对策略：1）控制分级数量、合理设置分布式光伏接入位置；2）忽略小容量影响，一般情况下，同母线分布式光伏接入容量在5 MW以下时，可以忽略其影响；3）含分布式光伏线路通过合理整定出线开关过流I段和过流II段保护电流定值，解决相邻线路故障时引起本线路误动作，以及本线路故障时相邻线路分布式光伏电源引起保护失配的问题；4）不含分布式光伏线路通过合理整定出线开关过流I段，防止相邻线路分布式光伏电源引起本线路分级保护失配；5）只有当以上措施均失效的情况下，才考虑配置方向保护、差动保护等新技术。

以上措施在考虑配电网保护与自动化配置实际的情况下，实现了低成本的应对，解决大部分线路问题，只有在少量极端情况下，才考虑增加投资配置新设备去解决。

参考文献：

[1] 国家能源局.2024年前三季度光伏发电建设情况[EB/OL].[2024-11-01]. https://www. nea. gov. cn/ 2024-11/01/c_1310787081.htm.

[2] 陈茜，白晶，陈小月，等.分布式光伏并网对配电网的影响综述[J].科学技术与工程，2024，24(27)：11491-11504.

[3] 贺思林，莫文慧，龙雪梅，等.分布式光伏接入对继电保护影响仿真分析[J].湖南电力，2022，42(3)：92-98.

[4] 黄伟，董旭柱，雷金勇，等.大容量分布式光伏并网对配电网综合影响分析[J].电力系统及其自动化学报，2016，28(11)：44-49.

[5] 高研，毕锐，杨为，等.分布式发电对配电网继电保护的影响[J].电网与清洁能源，2009，25(4)：20-23.

[6] 孙鸣，余娟，邓博.分布式发电对配电网线路保护影响的分析[J].电网技术，2009，33(8)：104-107.

[7] 晁晨栩，郑晓冬，高飘，等.含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护[J].中国电机工程学报，2021，41(20)：6968-6979.

[8] 刘世明，赵永森，王波，等.基于光学电流互感器的有源配电网相差保护方案[J].电力系统自动化，2022，46(22)：173-181.

[9] 林霞，陆于平，王联合.分布式发电条件下的新型电流保护方案[J].电力系统自动化，2008(20)：50-56. （下转第12页）

4 结语

在分布式光伏快速接入的背景下，文中探讨了光伏接入对线路电压越限、光伏倒送影响的机理与模式，并针对多类影响因素提出了相对应的改善措施与方法，包括配电变压器调档、逆变器出力控制、分布式储能配置与台区柔性直流互济、合理优化低压网架、优化用户负荷时间分布，最后例举了光伏出力控制和分布式储能充放电的台区实际治理应用案例，有助于电力运维、管理人员理解光伏电压越限原理，并高效开展光伏台区电压越限治理工作，助力新型配电系统转型升级，进一步提升配电网新能源接纳能力。

参考文献：

[1] 国家能源局.《2024年前三季度光伏发电建设情况》[Z]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/01/c_1310787081.htm.

[2] 江西省能源局.《关于进一步推进屋顶分布式光伏健康有序发展的通知》(赣能新能字〔2023〕142号)[Z].2023.

[3] 余昆，唐修明，陈星莺，等.高比例分布式光伏接入的配电网过电压责任分摊方法[J].中国电机工程学报，2023，43(24)：9535-9546.

[4] 孙文文，何国庆，刘纯，等.含高渗透率分布式光伏的配电网电压越限解决方法研究综述[J].现代电力，2024，41(2)：302-309.

[5] 梁志峰，康重庆，隋凌峰，等.含高比例分布式光伏的主配网运行风险评估与防控策略研究[J].清华大学学报(自然科学版)，2024，64(11)：1964-1978.

[6] 张轶炫，田志曈，杨博超，等.考虑动态增容受限的光伏反向过载台区滚动优化策略研究[J].高电压技术，2024，50(12)：5563-5573.

[7] 赵冬梅，任耀宇，程雪婷.低压配电网分布式光伏接纳能力分析[J].现代电力，2021，38(4)：392-403.

[8] 于雨彤，王灿，李勇，等.高比例光伏接入的配电网多层级反向重过载风险评估[J].高电压技术，2024，50(10)：4540-4549.

[9] 高志民.农村家庭电气火灾原因浅析[J].家电检修技术，2011(14)：52-53.

[10] 张元星.浅谈过电压火灾[J].消防技术与产品信息，2007(1)：49-50.

[11] 杨宇，文福拴，周星龙，等.高光伏渗透率配电系统电压协同控制研究综述[J].电力自动化设备，2023，43(10)：48-58.

[12] 陈浈斐，马程，葛磊蛟，等.分布式光伏接入下智能配电网的集中式混合储能选址定容优化方法[J/OL].电网技术，1-16[2025-02-07].https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1409.

[13] 陈浈斐，马程，葛磊蛟，等.分布式光伏接入下智能配电网的集中式混合储能选址定容优化方法[J/OL].电网技术，1-16[2025-01-17].https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1409.

[14] 唐巍，张起铭，张璐，等.新型配电系统多层级交直流互联理念、关键技术与发展方向[J].电力系统自动化，2023，47(6)：2-17.

[15] 刘海涛，董新洲，熊雄，等.基于低压柔直的末端电网能源互联与能量微循环系统[J].电力系统自动化，2023，47(6)：40-47.

[16] 张明泽，栾文鹏，艾欣，等.基于边缘计算的低压配电网健康状态评价方法[J].电测与仪表，2024，61(5)：91-97.

(上接第6页)

[10] 谢民，王同文，徐靖东，等.分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J].电力系统保护与控制，2019，47(19)：78-84.

[11] 王江海，郜能灵，宋凯，等.考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J].中国电机工程学报，2010，30(22)：37-43.

[12] 孙苗苗，王慧，朱晓荣.光伏电站接入对配电网电流保护的影响研究[J].电测与仪表，2017，54(17)：29-34.

[13] 李斌，袁越.光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J].电力自动化设备，2013，33(4)：12-17.

[14] 韦明杰，王聪博，余越，等.适用高比例分布式光伏接入的配电网多级保护优化配置方案[J].电力系统及其自动化，2023，47(22)：55-65.

[15] 龙国华，李琼，鄢文清，等.分布式光伏接入对配电网接地故障影响分析及其故障辨识研究[J/OL].电磁避雷器，[2024-10-22].

[16] 国家电网有限公司.继电保护整定计算用新能源场站建模导则：Q/GDW 12207—2022. [S].北京：中国电力出版社，2022.