[光伏]

基于LVRT的分布式光伏并网系统的继电保护

文/杨鹏杰，徐宇，李磊
云南电网有限责任公司昆明供电局

围绕两级三相式光伏并网发电系统进行深入研究，探讨基于LVRT的光伏并网系统的继电保护配置方案。在分析两级三相式光伏并网发电结构和最大功率跟踪控制技术的基础上，建立光伏并网逆变器双闭环控制模型。仿真数据表明，考虑LVRT能力后，分布式光伏接入电网系统，整定值满足继电保护的要求，未出现误动、拒动情况。

随着科技的快速发展以及对可再生能源需求的逐渐增大，光伏发电作为一种清洁、可持续的能源形式，成为能源结构转型的关键部分。然而，分布式光伏的大量并网，对电网产生了较大的影响，尤其是对于线路的继电保护，带来一定的安全隐患。如何在保证光伏电源的高效稳定运行的同时，保障电网的稳定和安全，成为光伏发电的重要研究方向。具备低电压穿越（LVRT）能力的光伏发电系统可以在电网电压短暂下降时继续运行，不仅可以提高电网的容错性，也有利于增强电力系统的稳定性。

李有荣等人对光伏接入电网后，保护设备无法准确动作进行了分析，强调保护设备的动作时限问题。贺思林等人对光伏接入对配电网继电保护中的影响进行了仿真分析，并提出了改进措施。本文结合两级三相式光伏并网发电系统，探讨基于LVRT的光伏并网系统的继电保护，研究分布式光伏接入对配电网馈线保护的影响，并提出基于 LVRT的分布式光伏并网系统的自适应电流保护方案，进而通过算例验证方案的有效性和可行性，有助于推动电力系统的可持续发展。

两级三相式光伏并网发电系统

1. 两级三相式光伏并网发电结构

两级三相式光伏并网发电系统主要由光伏阵列、DC-DC变换器、DC-AC逆变器、滤波电路以及MPPT 最大功率跟踪控制系统组成。DC-DC升压转换器对电能进行升压处理，提高电压级别以适应逆变器的要求。DC-AC逆变器将升压后的直流电转换为交流电，并以适当的电压和频率并入电网。系统结构如图1所示。

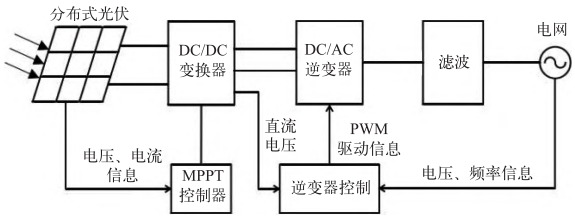

图1　分布式光伏并网系统结构

2. 光伏并网逆变器双闭环控制策略

在光伏并网系统中，为了保证并网的稳定和安全，通常采用双闭环控制策略对逆变器进行控制，包括外环电压控制器和内环电流控制器。电压控制器负责维持DC侧电压的稳定，通过调整电流参考值来抵抗电网电压的波动。电流控制器则根据电流参考值和实际电流之间的差值，调整逆变器的开关状态，使得逆变器输出电流跟随参考电流。

电流内环的控制结构如图2所示，电压外环的结构图如图3所示。

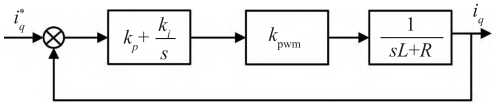

图2　电流内环的控制结构

内环电流控制通过监测逆变器输出电流与设定值之间的差异，并采用电流控制回路来调整开关器件的工作状态，以保持电流的稳定性和准确性。

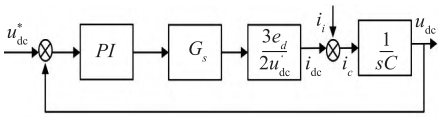

图3　电压外环的控制结构

外环电压控制根据逆变器输出电压与设定值之间的差异，并通过调整电流控制回路的设定值来控制逆变器输出电压，使其与电网电压保持一致。

双闭环控制策略能够提供良好的稳定性和动态性能，使光伏并网逆变器能够快速响应电网变化，并保持输出电流和电压的稳定性。

基于LVRT的光伏并网系统继电保护

1. 光伏电源接入对配电网馈线保护的影响

光伏电源接入配电网后，由于具有双向功率流动特性，会改变配电网的功率流动方向，并网点可能出现反向功率流动，即电流从并网点流向电网，使得传统的保护设备无法正确判断故障。此外，具有LVRT能力的光伏电源在电网发生故障时，会尽可能维持其输出，继续向电网注入电流，会给配电网馈线的故障检测和隔离带来困扰，使得保护设备误动或拒动，甚至影响到故障的清除。

2. 故障情况下光伏逆变器 LVRT 控制

系统无故障情况下，逆变器通过电压电流双闭环控制方案，输出有功电流。系统发生故障时，光伏逆变器 LVRT控制的关键是逆变器不因为过电流保护而退出运行。系统电压跌落，逆变器须结合电压情况输出无功电流，为电网提供一定的无功功率支撑，完成分布式光伏的 LVRT过程。

当10%＜ΔU＜50%时，逆变器提供的无功电流为

$$i_q^* = 2\Delta U I_N \tag{1}$$

式中，ΔU为系统电压跌落量；I_N为额定电流。

当50%＜ΔU＜ 90%时，逆变器提供的无功电流为

$$i_q^* = I_N \tag{2}$$

3. 基于LVRT光伏并网的自适应电流保护

含分布式光伏系统的简化配电网结构如图4所示。

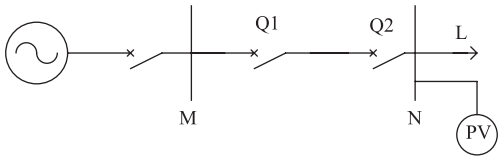

图4　光伏并网的简化配电线路结构

当分布式光伏系统接入时，保护侧等值阻抗为

$$Z_{pv}^{'} = \frac{U_N - \Delta E_{pv}}{I_N} \tag{3}$$

式中，U_N为母线处的系统电压；ΔE_{pv}为分布式光伏接入引起的电压变化量；I_N为母线处的线路电流。

与未接入分布式光伏相比，等值阻抗的形式出现了ΔE_{pv}项。由于等值阻抗的形式变化，配电网的继电保护方案也发生变化。硬件层面，在分布式光伏接入点前端配置断路器和保护设备，保证故障出现在上游时，设备能够切除故障，同时分布式光伏仍然可以向下游供电。另外，供电线路上配置数据采集单元，结合先进的通信技术，对故障进行准确判断。系统整定值方面，根据故障点的不同位置进行方案匹配。

（1）上游发生两相短路的整定方案

分布式光伏上游发生两相短路故障时，会形成双侧电源网络系统，配电网的等效电路如图5所示。

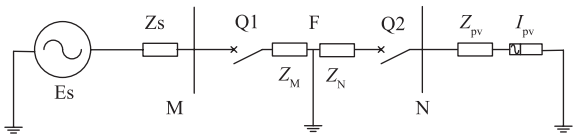

图5　光伏上游两相短路故障的等效电路

Q1处保护设备的电流整定值为

$$I_{Q1.set} = \frac{K_{rel} U_{Q1}}{Z_s + 2Z_L} \tag{4}$$

Q2 处保护设备的电流整定值为

$$I_{Q2.set} = \frac{K_{rel}(2U_{Q2} - E_s)}{Z_s + 2Z_L} \tag{5}$$

式中，K_{rel}为可靠性系数，取值1.1～1.4；U_{Q1}、U_{Q2}分别为Q1、Q2处保护设备的正序电压；Z_s为系统等效阻抗；Z_L为被保护线路的阻抗；E_s为系统电势。

发生故障时，保护设备可以利用正序电压对电流进行实时整定，具有自适应性。由于故障电流比分布式光伏输出的电流大得多，保护范围受到分布式光伏容量的影响较小。

（2）下游发生两相短路的整定方案

分布式光伏下游发生两相短路故障时，系统含有负荷电流，对故障短路的影响较大，配电网的等效电路如图6所示。

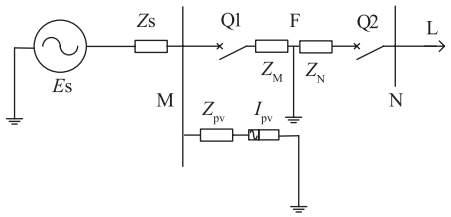

图6　光伏下游两相短路故障的等效电路

计及负荷电流分量，将测得的两相短路电流值归算至故障处的三相短路电流，增加整定设备灵敏性。为保证选择性，Q1处保护设备的电流整定值为

$$I_{set}=\frac{K_{rel}\cdot U_Q}{Z_s+Z_Q+2Z_L} \tag{6}$$

式中，U_Q为Q处保护设备的正序电压；Z_Q为分布式光伏与Q之间的线路阻抗；其他符号含义同上。

（3）相邻馈线发生两相短路的整定方案

相邻馈线发生两相短路故障时，配电网的等效电路如图7所示。

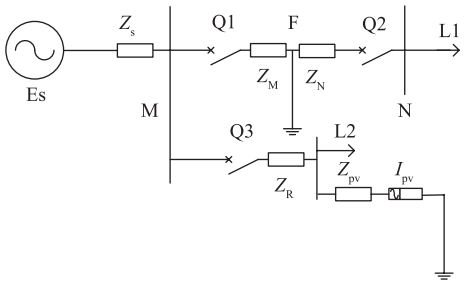

图7　相邻馈线两相短路故障的等效电路

Q1处保护设备的电流整定值为

$$I_{set}=\frac{K_{rel}\,U_{Q1}}{Z_s+2Z_L} \tag{7}$$

符号含义同上。

（4）三相短路的整定方案

线路发生三相短路故障时，流经保护设备的正序电压即为相电压，流经保护设备的正序电流即为相电流。为了满足选择性，保护设备的电流整定值为

$$I_{set}=\frac{K_{rel}U}{Z_L} \tag{8}$$

式中，U为相电压；其他符号含义同上。

算例分析

通过Simulink软件搭建具有LVRT能力的分布式光伏并网系统结构如图8所示。系统电压等级为10 kV，线路单位长度阻抗为0.4 Ω/km，设定各段线路长度均为10 km。可靠度系数K_{rel}取1.2。光伏容量取1.0 MW。

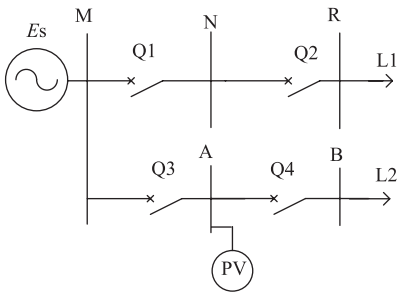

图8　分布式光伏并网系统结构

（1）当分布式光伏上游、下游、相邻馈线发生三相短路故障时，仿真结果见表1。

表1　三相短路故障仿真数据

故障点位置	Q1处保护设备		Q3处保护设备		Q4处保护设备	
	整定值/A	短路电流/A	整定值/A	短路电流/A	整定值/A	短路电流/A
光伏上游	2 297	4 803	2 287	4 723	685	1 436
光伏下游	2 332	2 786	2 348	2 486	1 065	1 143
相邻线路	2 354	1 983	2 356	1 978	1 215	1 032

根据表1可知，分布式光伏上游、下游和相邻馈线发生三相短路故障时，根据光伏容量和故障位置的变化，Q1、Q3和Q4的保护设备整定值能够自适应变化，每个保护装置都能在其保护范围内有效切除故障，未出现拒动、误动的情况。

（2）当分布式光伏上游、下游、相邻馈线发生AB相间故障时，仿真结果见表2。

表2　相间短路故障仿真数据

故障点位置	Q1处保护设备		Q3处保护设备		Q4处保护设备	
	整定值/A	短路电流/A	整定值/A	短路电流/A	整定值/A	短路电流/A
光伏上游	2 167	2 877	2 155	2 738	725	1 071
光伏下游	2 215	1 737	2 176	1 574	857	948
相邻线路	2 241	1 491	2 245	1 341	875	834

通过表2可以看出，不同地点发生相间短路故障，各处保护设备均未发生误动。

Q3处的保护设备的电流整定值随着故障状态的改变而改变。未接入光伏，其保护范围是70%；接入分布式光伏后，保护范围略有降低。此外，Q1、Q 4 处的保护设备的电流整定值都能够根据光伏运行情况与故障位置点的改变来自适应改变整定值，其保护范围分别为 61%和83%。

结束语

具备LVRT能力的光伏发电系统可在电网电压短暂下降时继续运行，增强电力系统的安全性和稳定性。本文主要围绕两级三相式光伏并网发电系统进行深入研究，探讨基于LVRT的光伏并网系统的继电保护。得出以下结论：

1）分析两级三相式光伏并网发电结构和最大功率跟踪控制技术，搭建双闭环控制模型。双闭环控制使光伏并网逆变器能够快速响应电网变化，保持稳定的电流和电压输出。

2）研究故障情况下光伏逆变器 LVRT 控制策略，电网 PCC 点电压下降时，通过发出有功和无功电流指令，系统电压快速回升，保证 LVRT 过程。

3）针对分布式光伏上游、下游和相邻馈线发生相间短路及三相短路故障的情况 ，分别配置电流保护方案，并通过算例进行仿真分析。数据表明，整定值满足继电保护的要求，未出现误动、拒动情况，验证了继电保护方案的可靠性。**EA**

（收稿日期：2023-07-13）

参考文献

[1] 王瑞．光伏发电并网对配电网电流和继电保护的影响[J]．光源与照明，2023，(4)：111-113．

[2] 李有荣，潘嘉琪，夏志乐，等．分布光伏并网在配网继电保护中的影响作用分析[J]．自动化技术与应用，2023，42(6)：54-57+145．

[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] 俞洲彬，方志豪．含高比例分布式光伏的中低压配电网继电保护方法研究[J]．电工技术，2023，(5)：61-68．

[5] 孙轶超，赵青春，黄涛，等．一种计及低电压穿越的有源配电网继电保护方案[J]．电测与仪表，2022，59(6)：76-82．

[6] 刘洪金，杨炳元，梁佳宇，等．一种提升LVRT能力的DFIG控制策略及故障特征分析[J]．太阳能学报，2021，42(4)：445-453．

[7] 范佳，张佳杰，陈方舟，等．分布式光伏接入电网的影响分析与实用化解决方案[J]．电力与能源，2022，43(4)：332-336．