

高比例分布式光伏接入对配电网保护影响 试验验证

李 宽^{1,3}, 黄 强^{1,3}, 范荣奇², 李玉敦^{1,3}, 王安宁², 刘 萌^{1,3}, 孙运涛^{1,3}

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001;
3. 山东省智能电网技术创新中心, 山东 济南 250002)

摘要: 为响应国家“双碳”发展战略, 当前电网已形成以绿色能源为主体的新能源体系架构, 大量风机、光伏并网, 给传统电网继电保护带来前所未有的挑战, 尤其是分布式光伏的接入对传统配电网保护的助增、外汲影响目前大多停留在理论分析阶段, 未见有相关试验论证。通过选取两个分布式光伏并网的 10 kV 配电网典型场景, 开展人工短路试验, 通过试验录波数据分析, 完成了分布式光伏暂态过程中低穿电流特性的分析, 量化论证了分布式光伏接入对配电网保护的影响, 针对后续开展分布式光伏并网对保护适应性边界的探寻具有理论指导意义。

关键词: 分布式光伏; 继电保护; 配电网; 助增影响; 外汲影响

Experimental verification of the impact of high proportion distributed photovoltaic access on distribution network protection

LI Kuan^{1,3}, HUANG Qiang^{1,3}, FAN Rongqi², LI Yudun^{1,3}, WANG Anning², LIU Meng^{1,3}, SUN Yuntao^{1,3}

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China;
2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China;
3. Shandong Smart Grid Technology Innovation Center, Jinan 250002, China)

Abstract: In response to the national “double carbon” development strategy, the current power grid has formed a new energy system architecture with green energy as the main body, and a large number of fans and photovoltaics have been connected to the grid, bringing unprecedented challenges to the traditional power grid relay protection. Especially, the impact of distributed photovoltaic access on the protection of the traditional distribution network is mostly stuck in the theoretical analysis stage. And have no relevant experimental evidence has been found. In this paper, the project team selected two typical 10kV distribution network scenarios of distributed PV connected to the grid to carry out artificial short circuit tests. Through the analysis of test wave recording data, the analysis of low penetration current characteristics in the distributed PV transient process was completed, and the impact of distributed PV access on distribution network protection was quantitatively demonstrated. The research results of this paper have theoretical guiding significance for the follow-up exploration of the adaptive boundary of protection for distributed photovoltaic grid-connection.

Key words: distributed photovoltaic; relay protection; distribution network; enhanced effect; swabbing effect

国网山东省电力公司科技项目资助 (高密度、高比例电力电子化区域电网仿真建模及控保协同技术研究 52062623000W)

0 引言

大规模分布式光伏接入,对传统继电保护产生的影响日渐增大,给传统电网交流继电保护带来前所未有的挑战^[1-7]。尤其是分布式光伏爆发式增长,电网物理形态和平衡模式都发生了重大转变^[8]。

与传统火电相比,10 kV分布式光伏接入场站点多面广,容量较大(单厂站为3~6 MW),且分布式光伏在系统故障暂态过程中提供的短路电流具有相角可控、幅值受限的特点(与火电机组暂态期间只发出无功电流有本质区别),大规模分布式光伏的接入,会改变传统配电网故障期间短路电流特性,对配电网保护的影响主要有三类^[9-10]:一是助增效应使保护安装处短路电流增大,造成保护可靠系数降低,存在越级跳闸风险;二是外汲效应使保护安装处短路电流减小,造成保护灵敏系数降低,存在拒动作风险;三是反向效应使保护安装处流过反向故障电流,可能造成无方向元件保护误动作,严重影响优质供电能力。

针对新能源并网后对传统电网的冲击开展研究,文献[11]提出一种基于分布式光伏集群协同优化的配电网电压控制策略;文献[12]提出一种直流配电网网架结构与高比例分布式光伏多目标协同优化方法;文献[13]以节点电压越限和线路潮流越限为风险评估指标,建立配电网运行风险评估模型,给出配电网风险评估具体实现步骤,提出针对性的风险应对措施;文献[14]针对配电网中分布式光伏逆变器最优潮流追踪问题提出一种时变、线性化优化模型;文献[15]提出一种基于MOPSO的含分布式光伏电源配电网故障区段定位方法。相关专家学者针对分布式光伏并网后对潮流越限、电压和频率控制等影响做了大量工作,但在分布式光伏接入后对传统配电网继电保护影响方面研究较少,尤其是对于分布式光伏接入后对电网的助增、外汲影响未见明确的试验验证相关报道。

为明确分布式光伏对传统配电网保护影响机理,本文研究小组基于两个10 kV分布式光伏并

网场景开展了人工短路试验,通过试验现场实际录波开展相位和幅值分析,量化论证了分布式光伏接入对配电网保护的影响,针对后续开展分布式光伏并网对保护适应性边界的探寻具有理论指导意义。

1 基本原理

分布式光伏对配电网保护的影响主要包括外汲、助增作用。分布式光伏并网点下游配电线路发生短路故障时,分布式光伏短路电流部分流向系统,造成出线开关处短路电流减小,此时分布式光伏体现为外汲作用。非故障线路分布式光伏向故障线路提供故障电流,增大故障线路流经的电流,此时分布式光伏体现为助增作用。

1.1 分布式光伏外汲作用

分布式光伏外汲作用原理如图1所示。图1中,分布式光伏接在本线路上,远离母线侧发生短路故障时,光伏流向保护1的短路电流 ΔI_{PV} 计算式为

$$\Delta I_{PV} = \frac{Z_{L2}}{Z_S + Z_{L1} + Z_{L2}} I_{PV} \quad (1)$$

式中, I_{PV} 为线路上所接光伏发出的全部短路电流; Z_S 、 Z_{L1} 和 Z_{L2} 分别为母线短路阻抗、光伏接入点与母线之间的等效阻抗、光伏接入点与故障点之间的等效阻抗。

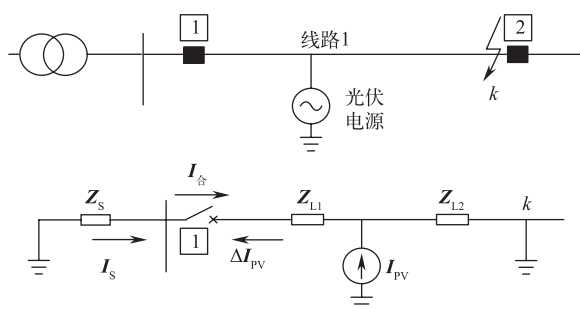


图1 分布式光伏外汲作用原理图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed photovoltaic swabbing action

流经保护1的合电流计算式为

$$I_{\Sigma} = \Delta I_{PV} + I_S \quad (2)$$

式中, I_S 为系统流入故障点的电流; I_{Σ} 为系统和分布式光伏提供的合电流。

电流相量图如图2所示。

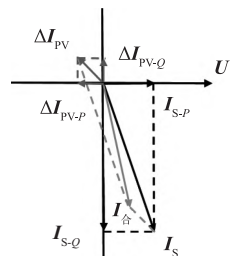


图2 分布式光伏外汲作用电流相量图

Fig. 2 Current phasor diagram of distributed PV swabbing action

图2中, ΔI_{PV-P} 和 ΔI_{PV-Q} 分别为光伏流向保护1的短路电流的有功和无功分量; I_{S-P} 和 I_{S-Q} 分别为系统流向保护1的短路电流的有功和无功分量。

与系统侧提供的短路电流相比, 考虑到光伏装机容量、输出功率和系统侧分流等因素的影响, ΔI_{PV} 的幅值要比 I_S 小。

由式(2)和图2可知, 如果分布式光伏接在近母线处, 线路末端短路, 则分布式光伏的短路电流几乎全部流向系统, 引起保护1处合电流减小, 进而降低了保护灵敏度。

图3为不同故障情况下的电流相位图, 受故障类型及故障位置的影响, 系统侧提供短路电流主要以无功电流为主, 因此系统侧电流 I_S 滞后于 U 的相位在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化。当故障点距离分布式光伏较远时, 光伏逆变器出口正序电压大于0.9(pu), 此时未进入低穿控制环节, 光伏主要输出有功电流; 当故障点距离分布式光伏较近时, 光伏逆变器出口正序电压小于0.2(pu), 此时进入低穿环节, 光伏主要输出无功电流, 因此光伏电流分流至系统侧的 ΔI_{PV} 超前于 U 的相位在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内变化。

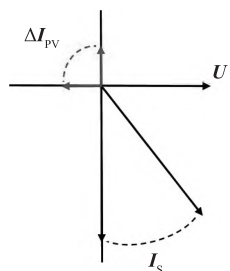


图3 电流相位变化图

Fig. 3 Current phase variation diagram

由图3可知, 光伏电流分流至系统侧的 ΔI_{PV} 超前于 I_S 的相位在 $135^\circ \sim 270^\circ$ 范围内变化。若光伏未进入低穿控制环节, 光伏主要输出有功电流, 此时外汲现象不明显; 若光伏进入深度低穿状态, 光伏主要输出无功电流, 此时外汲现象较为明显。

在取极端情况下, 系统侧提供短路电流以无功电流为主, 光伏输出有功电流和无功电流的外汲效果如图4所示。

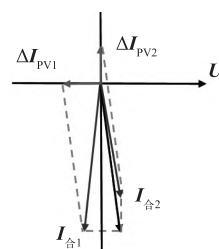


图4 不同情况下外汲效果图

Fig. 4 Swabbing effect diagram under different conditions

图4中, ΔI_{PV1} 和 ΔI_{PV2} 分别为分布式光伏只输出有功电流和无功电流时分流至系统侧的电流, $\Delta I_{合1}$ 和 $\Delta I_{合2}$ 分别为分布式光伏只输出有功电流和无功电流时由于外汲影响产生的合电流。由图4可知, 分布式光伏只输出无功时, 相较于只输出有功外汲现象更为明显。

1.2 分布式光伏助增作用

分布式光伏助增作用原理如图5所示。图5中, 线路1上发生短路故障时, 线路1外部的分布式光伏提供的短路电流有一部分流向故障点, 对保护1处短路电流有所助增。此时分布式光伏流经保护1的短路电流 ΔI_{PV} 表达式为

$$\Delta I_{PV} = \frac{Z_S}{Z_S + Z_L} I_{PV} \quad (3)$$

式中, I_{PV} 为线路外分布式光伏流入母线的短路电流; Z_S 为母线短路阻抗; Z_L 为线路1的阻抗。

分布式光伏助增作用电流相量图如图6所示。图6中, ΔI_{PV-P} 和 ΔI_{PV-Q} 分别为光伏流向保护1的短路电流的有功和无功分量; I_{S-P} 和 I_{S-Q} 分别为系统流向保护1的短路电流的有功和无功分量。

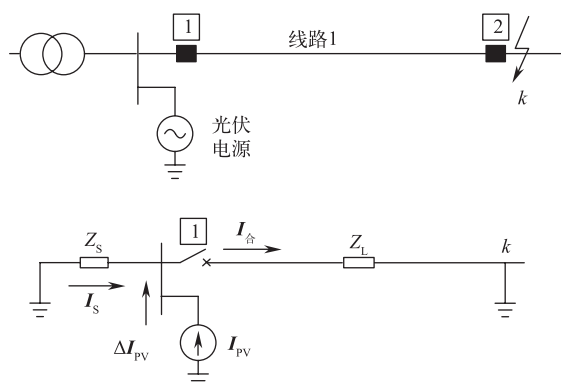


图5 分布式光伏助增作用原理图

Fig. 5 Schematic diagram of distributed photovoltaic enhanced effect

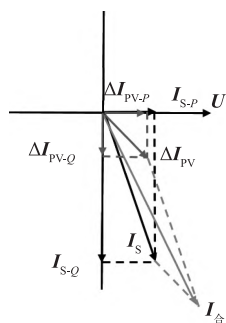


图6 分布式光伏助增作用电流相量图

Fig. 6 Current phasor diagram of distributed PV enhanced effect

由式(2)和图6可知,线路靠近母线处短路时,线路外分布式光伏短路电流几乎全部流入故障点,增大了流入保护1的电流。而线路末端短路时,若线路阻抗远大于系统阻抗,则线路外分布式光伏短路电流绝大部分流向系统,对保护1处短路电流影响较小。

图7为不同故障情况下的电流相位图,受故障类型及故障位置的影响,系统侧提供短路电流主要以无功电流为主,因此系统侧电流 I_s 滞后于 U 的相位在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化。当故障点位于线路末端时,同母线光伏逆变器出口正序电压大于0.9(pu),此时未进入低穿控制环节,光伏主要输出有功电流;当故障点靠近母线侧时,同母线光伏逆变器出口正序电压小于0.2(pu),此时进入低穿环节,光伏主要输出无功电流,因此光伏电流分流至故障点的 ΔI_{PV} 滞后于 U 的相位在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化。

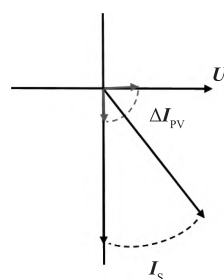


图7 电流相位变化图

Fig. 7 Current phase variation diagram

由图7可知,光伏电流分流至故障点的 ΔI_{PV} 超前于 I_s 的相位在 $-45^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化。若同母线光伏未进入低穿控制环节,光伏主要输出有功电流,此时助增现象不明显;若同母线光伏进入深度低穿状态,主要输出无功电流,此时助增现象较为明显。

在取极端情况下,系统侧提供短路电流以无功电流为主,光伏输出有功电流和无功电流的助增效果如图8所示。

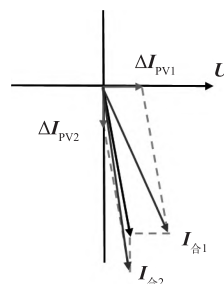


图8 不同情况下助增效果图

Fig. 8 Enhanced effect diagram under different conditions

图8中, ΔI_{PV1} 和 ΔI_{PV2} 分别为分布式光伏只输出有功电流和无功电流时分流至故障点侧的电流; $\Delta I_{合1}$ 和 $\Delta I_{合2}$ 分别为分布式光伏只输出有功电流和无功电流时由于助增影响产生的合电流。由图8知,分布式光伏只输出无功时,相较于只输出有功助增现象更为明显。

2 现场试验验证

2.1 外汲作用试验验证

为验证外汲作用,在某地区35 kV变电站的10 kV出线末端设置相间短路故障。短路试验期间,35 kV变电站运行方式为1#主变压器

(10 MV·A) 单主变压器运行, 2[#]主变压器转为热备用, 1[#]母线与2[#]母线并列运行, 如图9所

示。35 kV变电站10 kV母线的短路阻抗为: 大方式为1.379 67 Ω , 小方式为1.406 82 Ω 。

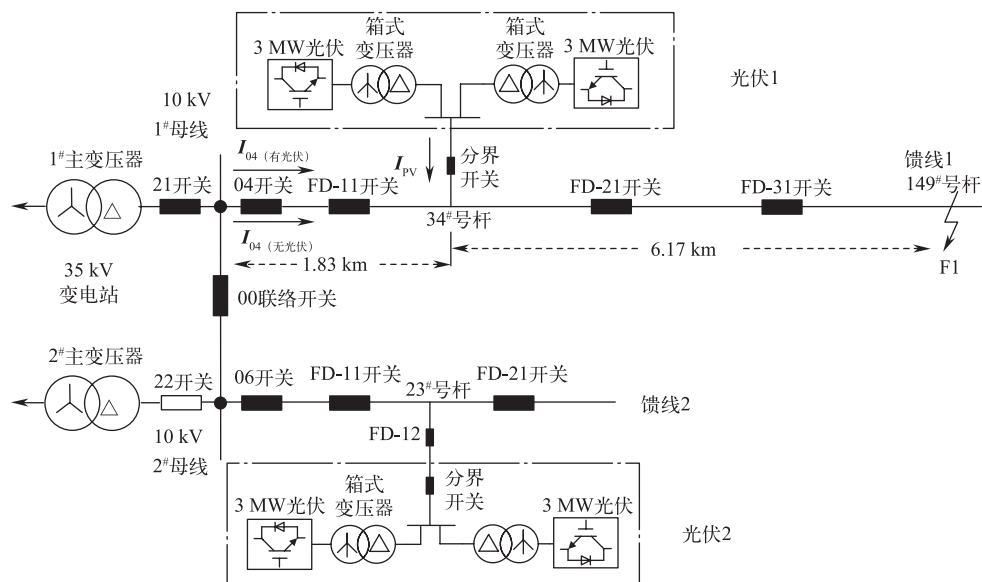


图9 外汲作用试验验证故障拓扑图

Fig. 9 Swabbing effect test verifies the fault topology

故障点设置在馈线1末端149[#]号杆处, 设置AC相间短路故障。分别在光伏1投入、退出时设置短路故障, 暂态期间光伏1出口处的电压和电流录波如图10所示(前三个通道为三相电压, 后三个录波通道为三相电流)。

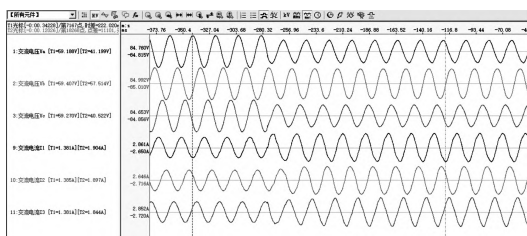


图10 分布式光伏出口处电压和电流录波图

Fig. 10 Voltage and current recording diagram at the distributed photovoltaic outlet

各侧短路电流见表1。现场试验前, 分布式光伏运行电流为138.1 A, 短路故障时分布式光伏输出电流为190.1 A。光伏1投入、退出时馈线1的04开关流过的短路电流分别为1 263.30 A、1 394.88 A, 有光伏时短路电流减小131.6 A (占光伏短路电流的69.2%), 出线开关短路电流减

少10.4%, 保护灵敏系数降低10% (灵敏性评估方法: 131.6/电流整定值)。

表1 馈线1末端故障验证外汲作用时的短路电流

Tab. 1 The fault at the end of feeder 1 verifies the short circuit current during swabbing

	二次值 /A	电流比	一次值 /A
馈线1出线处短路电流(光伏1投入)	7.896	800 : 5	1 263.30
馈线1出线处短路电流(光伏1退出)	8.718	800 : 5	1 394.88
光伏短路电流	1.901	500 : 5	190.10
光伏故障前电流	1.381	500 : 5	138.10

故障前后电流相角见表2。

表2 故障前后电流相角

Tab. 2 Current phase angle before and after fault

	故障前 (度) <U, I>		故障期间 (度) <U, I>	
	馈线1	光伏1	馈线1	光伏1
无光伏	37	-	70	-
有光伏	144	0	75	21

参考图1的电流方向的电流相量图如图11所示。

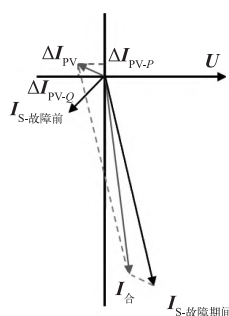


图 11 电流相量图

Fig. 11 Vector current diagram

图 11 中, $I_{S-故障前}$ 为光伏并网期间馈线 1 出线处稳态电流 (滞后于电压约 144°) , 由此可知, 系统侧向馈线 1 提供无功电流, 同时因分布式光伏出力问题向系统侧输出有功电流。 $I_{S-故障期间}$ 为光伏并网期间故障时刻系统向馈线 1 提供的电流 (可近似等于无光伏并网时系统向馈线 1 提供的短路电流, 滞后于电压约 70°) 。 ΔI_{PV} 为故障期间光伏侧提供电流中流向系统侧的部分, 分布式光伏输出的以有功电流为主 (滞后于电压约 21°) 。 $I_{合}$ 为光伏并网期间故障时刻馈线 1 出线处的电流 (滞后于电压约 75°) 。

经分析, 无光伏并网时, 系统侧向馈线 1 提供的以有功电流为主 (滞后于电压约 37°) , 故障期间, 受系统阻抗影响, 系统侧向故障点提供主要以无功电流为主 (滞后于电压约 70°) 。有光伏并网时, 稳态运行的分布式光伏主要提供有功电流 (滞后于电压约 0°) , 故障期间输出的以有功电流为主 (滞后于电压约 21°) 。根据故障期间系统、分布式光伏提供的短路电流幅值和相位分析可知, 由于分布式光伏的接入使流经双农线的电流变小, 产生了外汲影响 (此时馈线 1 出线的 U 超前 I 相角为 75°) , 与 1.1 节的理论分析结果相一致。

2.2 助增作用试验验证

为验证助增作用, 在某地区 110 kV 变电站 10 kV 馈线 #34-06 号杆设置 BC 相间短路故障, 如图 12 所示。短路试验期间, 110 kV 变电站运行方式为乙主变压器单台运行, 甲主变压器转为热备用, 甲、乙母线并列运行。此时 110 kV 变电站 10 kV 母线的短路阻抗为 0.7775Ω 。

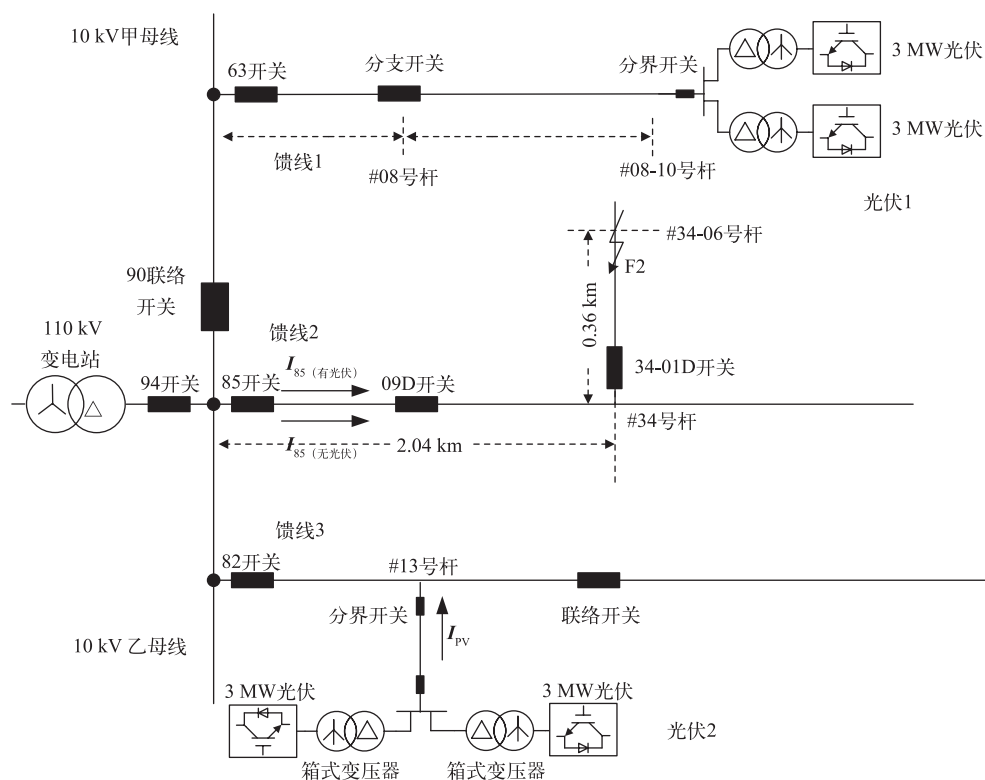


图 12 助增作用试验验证故障拓扑图

Fig. 12 Enhanced effect test verifies the fault topology

光伏2投入、退出时分别设置一次短路故障，暂态期间光伏2出口处的电压和电流录波如图13所示（前三个通道为三相电压，后三个通道为三相电流）。

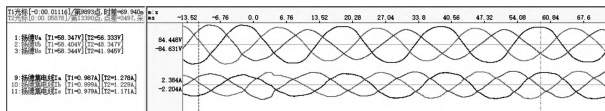


图 13 分布式光伏出口处电压和电流录波图

Fig. 13 Voltage and current recording diagram at the distributed photovoltaic outlet

馈线2的#34-06号杆故障验证助增作用时的短路电流见表3，光伏2故障前电流为98.8 A，故障时为122.6A。光伏1故障前电流为156 A，故障时为68.2 A。对比光伏投入、退出时馈线2的85开关处短路电流可见，由于故障点距离母线较远（2.04 km），线路外分布式光伏的助增作用不是很明显，光伏投入后短路电流增加70.8 A（占光伏短路电流的37.1%），出线开关短路电流增加2.35%，出线开关的保护可靠性降低2.3%（可靠性评估方法 $(k_{\text{可靠系数}} - k_{\text{可靠系数}} I_{\text{无光伏}} + I_{\text{有光伏}}) / k_{\text{可靠系数}}$ ，可靠系数为1.3）。

表 3 馈线 2 故障验证助增作用时的短路电流

Tab. 3 The short circuit current of feeder 2 fault verification with boost action

	二次值 /A	电流比	一次值 /A
馈线 2 出线处短路电流（光伏 2 投入）	25.667	600:5	3 080.04
馈线 2 出线处短路电流（光伏 2 退出）	25.077	600:5	3 009.24
光伏 2 短路电流	1.226	500:5	122.6
光伏 1 短路电流	1.137	300:5	68.2

故障前后电流相角见表4。

表 4 故障前后电流相角

Tab. 4 Current phase Angle before and after fault

	故障前（度）<U, I>		故障期间（度）<U, I>	
	馈线 2	光伏 2	馈线 2	光伏 2
无光伏	20	-	46	-
有光伏	26	0	45	22

参考图5的电流方向的电流相量如图14所示。

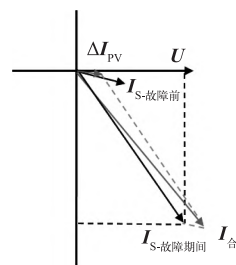


图 14 电流相量图

Fig. 14 Vector current diagram

图14中， $I_{S-故障前}$ 为光伏2并网期间馈线2出线处稳态电流（滞后于电压约 26° ）。由此可知，系统侧向馈线2提供无功电流和有功电流。 $I_{S-故障期间}$ 为光伏2并网期间故障时刻系统向馈线2提供的电流（可近似等于无光伏并网时系统和光伏1共同向馈线2提供的短路电流，滞后于电压约 46° ）。 ΔI_{PV} 为故障期间光伏2提供电流中流向故障点的部分，以有功电流为主（滞后于电压约 22° ）。 $\Delta I_{合}$ 为光伏2并网期间故障时刻馈线2出线处的电流（滞后于电压约 45° ）。

经分析，光伏2脱网时，系统侧向馈线2提供的以有功电流为主（滞后于电压约 20° ）。光伏2并网时，稳态期间分布式光伏主要提供有功电流（滞后于电压约 0° ），故障期间输出电流以有功电流为主（滞后于电压约 22° ）。根据故障期间系统、分布式光伏提供的短路电流幅值和相位分析可知，由于分布式光伏的接入使流经馈线2的电流变大，产生了助增影响（馈线2的U超前I为 45° ），与1.2节的理论分析结果相一致。

3 保护影响边界及应对措施

3.1 保护影响边界

为对配电网整定计算提供指导数据，考虑分布式光伏幅值相位在极限情况下，即暂态过程中短路电流输出为最大短路电流限幅值，且仅输出无功功率，给出保护影响边界。

(1) 外汲影响

分布式光伏外汲作用主要影响馈线出口过电流保护III段的灵敏性。

考虑过电流保护III段灵敏度计算电流定值，

具体公式为

$$I_{zd}^{III} = I_{zd(pu)}^{III} \times \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (4)$$

式中, $I_{zd(pu)}^{III} = I_{pu}^{III} / k_{LM}$; $I_{pu}^{III} = U_{pu} / X_{pu}^{III}$; I_{pu}^{III} 为流过保护装置的短路电流标么值; U_{pu} 为电压标么值, 一般取1; X_{pu}^{III} 为从线路末端往电网侧看去的等效阻抗; k_{LM} 为灵敏度系数; $I_{zd(pu)}^{III}$ 为流过保护装置电流定值标么值; I_{zd}^{III} 为流过保护装置电流定值有名值, 单位为kA; S 为基准容量, 一般取值100 MV·A或1 000 MV·A; U 为计算网络电压的有名值, 单位为kV。

考虑极端情况下, 当前馈线分布式光伏提供的短路电流为

$$I_{pv}^{III} < \left(I_{pu}^{III} \times \frac{S}{\sqrt{3}U} - I_{zd}^{III} \right) / k_{pv} \quad (5)$$

式中, k_{pv} 为分布式光伏可暂态期间提供的短路电流与额定电流的倍数; I_{pv}^{III} 为分布式光伏可提供的短路电流, 单位为kA。

分布式光伏对保护影响的接入边界为

$$S_{pv}^{III} = \sqrt{3} I_{pv}^{III} U \quad (6)$$

式中, S_{pv}^{III} 为当前馈线分布式光伏最大可接入容量, 单位为MW。

(2) 助增影响

分布式光伏助增作用主要影响馈线出口过电流保护I段的可靠性。

考虑过电流保护I段可靠性计算电流定值, 具体公式为

$$I_{zd}^I = I_{zd(pu)}^I \times \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (7)$$

式中, $I_{zd(pu)}^I = I_{pu}^I k_{KC}$, $I_{pu}^I = U_{pu} / X_{pu}^I$, I_{pu}^I 为流过保护装置的短路电流标么值; U_{pu} 为电压标么值, 一般取1; X_{pu}^I 为从母线看向系统的等效阻抗(标么值); k_{KC} 为可靠系数; $I_{zd(pu)}^I$ 为流过保护装置电流定值标么值; I_{zd}^I 为流过保护装置电流定值有名值, 单位为kA; S 为基准容量, 一般取值100 MV·A或1 000 MV·A; U 为计算网络电压有名值, 单位为kV。

考虑极端情况下, 当前母线分布式光伏提供的短路电流为

$$I_{pv}^I < \left(I_{zd}^I - I_{pu}^I \times \frac{S}{\sqrt{3}U} \right) / k_{pv} \quad (8)$$

式中, k_{pv} 为分布式光伏可暂态期间提供的短路电流与额定电流的倍数; I_{pv}^I 为分布式光伏可提供的短路电流。

即分布式光伏对保护影响的接入边界为

$$S_{pv}^I = \sqrt{3} I_{pv}^I U \quad (9)$$

式中, S_{pv}^I 为当前母线分布式光伏最大可接入容量, 单位为MW。

3.2 应对措施

1) 为应对大规模分布式光伏接入后对配电网产生的助增和外汲影响, 须在分布式光伏接入达到一定比例后, 提高过电流I段定值(增大可靠系数)或降低过电流III段定值(增大灵敏度)。

2) 为确保传统继电保护适应性, 在保护定值无可调整区间时, 可采用带方向的过电流保护或暂态原理的新型保护装置, 亦可在在此基础上评估分布式光伏可接入容量的边界, 并进行合理规划。

4 结束语

分布式光伏接入会影响保护安装处短路电流水平, 影响大小与系统强弱、光伏容量及接入位置、故障点位置等因素有关。

外汲效应主要影响出线保护的过电流III段, 同线路接入分布式光伏越多, 接入位置离母线越近, 系统阻抗越小, 故障点离母线越远, 外汲效应越明显。

助增效应主要影响出线保护的过电流III段, 同母线其他线路接入分布式光伏越多, 系统阻抗越大, 故障点离母线越近, 助增效应越明显。

参考文献

- [1] 章建华, 林山青, 余兵, 等. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [2] 李付存, 张岩, 于丹文, 等. 高比例新能源接入下谐波电能计量方法研究[J]. 山东电力技术,

- 2022, 49(3): 52-58.
- [3] 吕晓, 刘益青, 郭浩, 等. 光伏场站送出线路采样值差动保护的谐波影响分析及改进[J]. 山东电力技术, 2021, 48(3): 18-26.
- [4] 宋健, 许喆, 翟爽, 等. 分布式电源接入配电网的继电保护研究[J]. 山东电力技术, 2018, 45(10): 27-31.
- [5] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
- [6] 刘素梅, 毕天姝, 王晓阳, 等. 具有不对称故障穿越能力逆变型新能源电源故障电流特性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 66-73.
- [7] 潘垣, 尹项根, 胡家兵, 等. 论基于柔直电网的西部风光能源集中开发与外送[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3621-3629.
- [8] 孙建军, 王灿, 陈业伟, 等. 新型配电网运行韧性综述与展望[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(9): 919-929.
- [9] 吴璐子, 缪希仁, 庄胜斌, 等. 含分布式电源配电网故障检测与定位研究综述[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 751-759.
- [10] 王宁, 韩国栋, 高厚磊, 等. 有源配电网电流差动保护判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 14-23.
- [11] 徐衍会, 崔瑞顺, 刘江东, 等. 基于分布式光伏集群协同优化的配电网电压控制策略[J]. 现代电力, 2023, 40(2): 143-152.
- [12] 刘飞, 熊晓琪, 查鹏程, 等. 直流配电网网架结构与分布式光伏多目标协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3754-3765.
- [13] 乐健, 朱江峰, 孙旻, 等. 大规模分布式光伏接入的配网风险评估及应对措施研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 28-33.
- [14] 李克强, 韩学山, 李华东, 等. 配网中光伏逆变器最优潮流追踪的分布式算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 711-720, 950.
- [15] 吴凡, 赵晋泉, 朱斌, 等. 基于MOPSO的含分布式光伏配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 46-53.

作者简介

李宽（1988—），男，博士，高级工程师，研究方向为交直流继电保护、电力系统稳定与控制。

黄强（1990—），男，博士，工程师，研究方向为交直流继电保护、电力系统稳定与控制。

（收稿日期：2023-07-11）