

# 分布式光伏接入对 110 kV 主变中性点电压的影响分析

贾科<sup>1</sup>, 汪执雅<sup>1</sup>, 戴明<sup>1</sup>, 毕天姝<sup>1</sup>, 李晨曦<sup>1</sup>, 张弛<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;  
2. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:**110 kV 主变在非直接接地运行方式下, 当变压器低压侧存在分布式光伏接入时, 发生单相接地短路故障等情况可能会引起变压器中性点过电压问题, 对中性点的绝缘造成威胁。分析了发生故障后网络的故障特性、线路保护的动作情况以及中性点电压偏移问题; 在此基础上, 分析了线路保护动作后分布式光伏接入对中性点电压偏移问题可能造成的恶化, 并讨论了光伏容量和本地负荷的影响; 给出了含分布式光伏配电网 110 kV 主变加装间隙保护的相关建议。

**关键词:**分布式电源; 光伏发电; 中性点电压; 间隙保护; 有源配电网; 接地故障; 过电压

**中图分类号:**TM 615; TM 761

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.027

## 0 引言

分布式光伏电源通常经 10 kV 母线汇集后接入 110 kV 变电站。对于传统无源配电网而言, 当 110 kV 变电站的上级线路发生不对称接地故障后, 上级线路保护正确动作, 主变中性点的偏移电压消失, 不会带来绝缘威胁; 但当变压器低压侧存在分布式光伏接入时, 其持续提供的故障电流可能会进一步抬高主变中性点的偏移电压, 对中性点的绝缘造成威胁, 原有变压器中性点零序过电压保护及放电间隙的相关配置将受到影响<sup>[1-2]</sup>。现行大部分光伏不具备脱网运行的能力, 理论上应配置防孤岛保护并在 2 s 内检测非计划孤岛, 切除光伏电源<sup>[3-4]</sup>。但目前的防孤岛保护技术存在一定的动作死区, 匹配度较高时动作较慢。在线路保护动作后, 不论暂时离网运行的光伏电源是否处于稳定状态, 都有可能引起暂时中性点电压的抬高, 造成间隙击穿。

目前, 尚没有文献专门针对光伏电源接入对主变中性点电压抬升的问题进行研究。仅有的一些文献只是定性地指出: 当主变与分布式电源都采用非直接接地方式时, 单相接地故障主网保护动作后会产生过电压<sup>[5-6]</sup>。其中, 文献[5]分析了有源配电网不同接地方式的选择及对配电网的影响, 指出了可能面临的接地方式与故障电流、过电压转变问题; 文献[6]指出含旋转型分布式电源配电网系统发生接地故障时零序电压将产生一定程度的偏移。然而, 以上文献未能给出中性点电压的位移程度及其与本地负荷和分布式光伏容量的定量关系和内在机理,

没有明确给出边界条件, 难以适用于现场实际运行。

本文将基于最大功率点跟踪控制的分布式光伏电源的故障输出特性分析为基础, 重点研究含光伏的配电网在单相接地故障条件下, 线路保护动作前后 110 kV 主变中性点电压的偏移情况, 分析光伏容量及本地负荷大小对中性点电压的影响, 并提出中性点保护配置建议, 为将来规模化分布式电源接入配电网后中性点的保护配置提供参考。

## 1 并网联络线单相接地故障分析

分布式光伏电源一般通过逆变器并网, 通常采用电流型定功率控制, 逆变器的输出电压为并网点电压。通过调整输出电流控制, 从而使有功和无功达到设定值。

### 1.1 系统等效模型

110 kV 变电站的 10 kV 侧含光伏接入配电系统的结构如图 1 所示。110 kV 变电站经联络线 AB 并网, 主变高压侧采用中性点非直接接地的运行方式, 低压侧存在分布式光伏发电接入。并网联络线 AB 配置有电流保护, 其中在 A 侧配置保护 1, 在 B 侧配置保护 2。

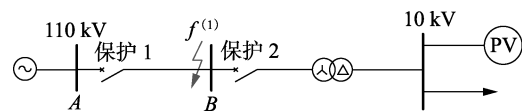


图 1 含分布式光伏接入的配电网接线图

Fig.1 Wiring diagram of distribution network with distributed photovoltaic generation

假设联络线 AB 发生单相接地故障  $f^{(1)}$ 。发生故障后, 光伏电源并网点的电压降低, 输出电流和发生故障前相比有所增大。但受电力电子装置限流要求等约束, 当并网点电压低于一定程度时, 逆变器输出的稳态短路电流将达到上限, 一般不会超过逆变器额定输出电流的 1.2 倍。当上级线路保护动作

收稿日期: 2017-10-16; 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2018YFB0904-104); 国家自然科学基金资助项目 (51725702, 51407067)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFB0904104) and the National Natural Science Foundation of China (51725702, 51407067)

后,只要光伏电源还能输出有功,光伏电流就仍存在。即使系统提供的电压消失,变流器仍然可以获得参考电压和相位,只不过此时的参考值由自身输出功率和本地负荷的关系决定。光伏电源在发生故障后和暂时离网运行条件下一般仍采用受控电流源模型<sup>[7-8]</sup>。

## 1.2 故障电流及保护动作分析

假设在并联网络线 AB 上发生如图 1 所示的 A 相单相接地故障  $f^{(1)}$ ,发生故障后的正、负、零序网络如图 2 所示。图中,  $E_S$  为 110 kV 中性点直接接地的电力网络等效主电源;  $Z_{AB}$ 、 $Z_l$  分别为并联网络线 AB、10 kV 配电网线路的等效阻抗;  $Z_T$  为 110 kV 变电站主变等效阻抗;  $Z_L$  为本地负荷等效阻抗; 下标 (1)、(2)、(0) 分别表示正序、负序、零序分量。

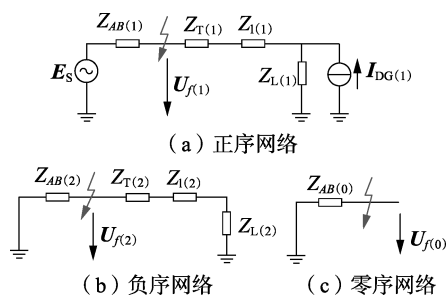


图 2 单相接地故障序网图

Fig.2 Sequence networks of single-phase grounding fault

可将采用正序控制策略的分布式光伏电源等效为仅输出正序电流的恒流源<sup>[5,9-10]</sup>。

根据单相接地故障的边界条件,得到复合序网如图 3 所示。当仅考虑系统侧电源作用时,故障点的正序故障电流为:

$$I'_{f(1)} = \frac{U_S}{Z_S} \frac{Z_{m(1)}}{Z_{m(1)} + Z_{AB(0)} + Z_{AB(2)} // Z_{m(2)}} = \frac{Z_{m(1)}}{Z_{AB(1)} [nZ_{AB(1)} + (n+2)Z_{m(1)}]} U_S \quad (1)$$

$$Z_{m(1)} = Z_{T(1)} + Z_{l(1)} + Z_{L(1)} \quad (2)$$

$$Z_{m(2)} = Z_{T(2)} + Z_{l(2)} + Z_{L(2)} \quad (3)$$

$$Z_S = \frac{nZ_{AB(1)}^3 + (2n+2)Z_{AB(1)}^2 Z_{m(1)} + (n+2)Z_{AB(1)} Z_{m(1)}^2}{(n+2)Z_{AB(1)} Z_{m(1)} + nZ_{AB(1)}^2 + Z_{m(1)}^2} \quad (4)$$

其中,  $U_S$  为故障点发生故障前的电压(近似等于  $E_S$ );  $Z_{m(1)}$ 、 $Z_{m(2)}$  分别为主变低压侧正序、负序等效阻抗,且有  $Z_{m(1)} = Z_{m(2)}$ ;  $Z_S$  为复合序网总阻抗的等效阻抗;并联网络线 AB 的正序、负序等效阻抗相等,即  $Z_{AB(1)} = Z_{AB(2)}$ ;考虑不同的输电线路类型,取线路零序阻抗为正序负序阻抗的  $n$  倍,即  $Z_{AB(0)} = nZ_{AB(1)}$ 。

由于 10 kV 侧线路与本地负荷阻抗归算至 110 kV 母线侧的等效阻抗值远大于主变高压侧联络线

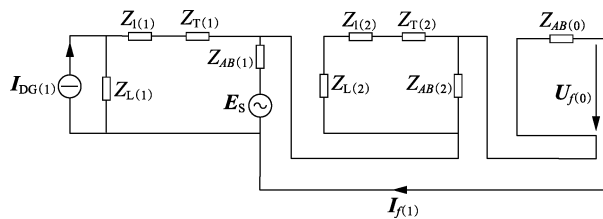


图 3 单相接地故障复合序网图

Fig.3 Compound sequence network of single-phase grounding fault

等效阻抗,即  $Z_{m(1)} \gg Z_{AB(1)}$ 。

则式(1)可简化为:

$$I'_{f(1)} \approx \frac{1}{(n+2)Z_{AB(1)}} U_S \quad (5)$$

由式(5)可以看出,发生故障后系统侧提供的电流明显增大,其幅值仅与高压侧联络线阻抗大小呈反比,与主变低压侧无关。

当仅考虑分布式光伏电源作用时,故障点正序故障电流为:

$$I''_{f(1)} \approx \frac{1}{n+2} I_{DG(1)} \quad (6)$$

由于归算后 10 kV 侧的等效阻抗较大,且由于光伏并网控制策略及电力电子装置电流限制等特点,使得分布式光伏电源提供的故障电流较小,相较于系统侧提供的故障电流可以忽略不计。

则故障点的故障电流为:

$$I_f = 3(I'_{f(1)} + I''_{f(1)}) \approx \frac{3}{n+2} \frac{U_S}{Z_{AB(1)}} \quad (7)$$

根据以上分析可知,故障点的故障电流主要由系统侧提供,不受分布式光伏电源接入的影响。联络线 A 侧的保护 1 能感受到明显的故障电流,可靠动作;联络线 B 侧的保护 2 无法检测到明显的故障电流,保护拒动。

## 1.3 发生故障后中性点电压偏移

由于变电站主变低压侧的零序网络无通路,主变中性点的零序电压与故障点零序电压相等。

零序电压为:

$$U_{f(0)} = -I'_{f(1)} Z_{AB(0)} \approx -\frac{n}{n+2} U_S \quad (8)$$

当三相电压平衡时,中性点电压为 0。当发生不对称故障时,中性点电压产生位移。不对称的三相电压可分解为三相对称的正序和负序分量以及幅值、方向相同的零序分量。则主变中性点偏移电压表现为故障点零序电压,即:

$$U_{N0} = -\frac{n}{n+2} U_S \quad (9)$$

中性点击穿电压一般为略高于工况条件下的系统相电压<sup>[11]</sup>。当发生单相接地故障时,中性点的电

压偏移是由主变三相绕组的压降不平衡引起的,不受低压侧影响。此时,故障特性与低压侧开路时联络线发生故障的情况近似相同。中性点电压为工况条件下系统相电压的  $n/(n+2)$ ,明显低于系统相电压,不会引起间隙击穿。

## 2 系统保护动作后主变中性点电压分析

当联络线 A 侧保护 1 的启动元件检测到故障电流,保护动作使含光伏的配电网与系统断开。此时分布式光伏和本地负荷短时间内脱网运行,网络中的能量全部由分布式光伏电源提供。

### 2.1 分布式光伏接入与主变中性点电压偏移

系统保护动作后的网络复合序网如图 4 所示。

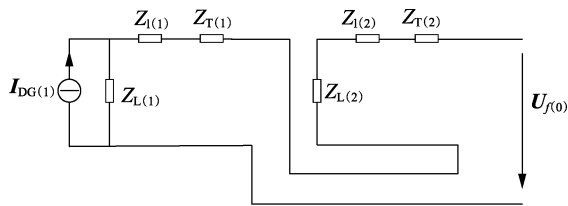


图 4 保护 1 动作后复合序网图

Fig.4 Compound sequence network after action of Protection 1

由图 4 可以看出,当线路保护 1 跳开后,由于零序网络无通路,故障点无故障电流。

此时,故障点的零序电压为:

$$U_{f(0)} = U_{N0} = Z_L I_{DG(1)} = E_{AN} \quad (10)$$

由于主变低压侧的光伏电源仅提供正序电流,在主变高压侧绕组感应的电势为三相平衡对称电势。值得注意的是,此时主变感应的三相电势大小与并网时不一定相同,是光伏实际输出功率和负荷需求的函数。在高压侧线路仍保持单相接地故障的条件下,由于三相线路参数不再对称,会导致中性点电压进一步抬升。

此时,各相对地电压发生变化,故障相电压为 0,非故障相为脱网时主变高压侧感应电势的  $\sqrt{3}$  倍,主变中性点电压变为故障相主变感应电势,大小由低压侧光伏电源在脱网时的输出及本地负荷决定,与主变高压侧无关。而光伏在暂时离网条件下提供的正序电流又受本地负荷大小的影响。由于零序无通路,过渡电阻不会对中性点电压偏移产生影响。当发生两相接地故障时,由于序网并联,主变中性点上的电压偏移程度将低于单相接地故障情况。

### 2.2 光伏容量及本地负荷对中性点电压偏移的影响

当分布式光伏并网运行时,光伏输出点电压始终为并网点电压。而当分布式光伏电源与电网断开时,输出功率与负荷功率之间的差异会引起系统电压及系统频率的明显变化<sup>[12-14]</sup>。

基于线路保护动作前、后光伏输出有功无法瞬时变化,光伏并网点电压的变化取决于负荷有功需

求和光伏输出有功功率不平衡程度。可根据瞬时功率关系变化,得到光伏短时脱网运行的电压为:

$$U_{DG} = \sqrt{\frac{P_{DG}}{P_L}} U_N \quad (11)$$

其中,  $U_{DG}$ 、 $U_N$  分别为光伏电源短时运行和并网运行的电压;  $P_{DG}$ 、 $P_L$  分别为光伏电源容量和负荷需求的有功。可以看出,当负荷有功需求大于光伏提供的功率时,电压下降,输出电流增大;当负荷有功需求小于光伏提供的功率时,电压抬高,输出电流减小。则此时光伏的输出电流为:

$$I_{DG} = P_{DG}/U_{DG} \quad (12)$$

考虑到光伏逆变器的限幅环节,当本地负荷过小,光伏输出电流达到极限时将不再继续增大,此时光伏输出电流为光伏输出电流上限  $I_{DG,max} = 1.2I_{DG,N}$ ,其中  $I_{DG,max}$  为光伏输出电流上限,  $I_{DG,N}$  为分布式光伏并网运行时的额定电流。

根据式(12)易得,使光伏输出电流  $I_{DG}$  达到边界  $I_{DG,max}$  的条件为  $P_L = 1.44P_{DG}$ 。

因此,当本地负荷较小时,满足:

$$P_L < 1.44P_{DG} \quad (13)$$

此时  $P_{DG}/P_L > 1/1.44$ , 光伏输出电流随着电压的抬升而降低,此时中性点电压为:

$$U_{N0} = I_{DG} Z_L = \sqrt{\frac{P_{DG}}{P_L}} U_N \quad (14)$$

当本地负荷较大时,满足:

$$P_L \geq 1.44P_{DG} \quad (15)$$

此时  $P_{DG}/P_L \leq 1/1.44$ , 光伏输出电流为稳态短路电流上限,则中性点电压为:

$$U_{N0} = 1.2I_{DG,N} Z_L = 1.2 \frac{P_{DG}}{P_L} U_N \quad (16)$$

以上分析说明:主变中性点的电压在保护跳开后还会进一步抬升,电压的偏移程度和光伏电源容量及本地负荷的匹配关系密切相关。当中性点偏移电压高于击穿电压时,将会造成间隙击穿。

### 2.3 中性点间隙保护配置建议

令  $k = P_{DG}/P_L$ , 表示断网后本地负荷和光伏容量的匹配程度。取光伏并网运行额定电压  $U_N$  为基准值,根据上述分析,可以得到中性点电压的标幺值与  $k$  的关系式为:

$$U_{N0} = \begin{cases} 1.2k & k < 0.694 \\ \sqrt{k} & k \geq 0.694 \end{cases} \quad (17)$$

式(17)表明,中性点电压在发生单相故障、线路保护跳开后的短暂时间内,是光伏输出有功功率和负荷需求有功功率之比  $k$  的函数。

根据式(17)得到如图 5 所示的中性点电压与  $k$

的对应关系(图中  $U_{N0}$  为标幺值)。同前文所述,中性点击穿电压取 66 kV (1.04 p.u., 以额定电压为基准值)。当  $k \geq 1.0816$  时,中性点电压超过击穿值,会危及主变绝缘安全。此时,要求 110 kV 变电站的主变加装中性点间隙保护。

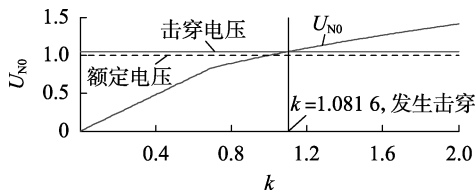


图 5 中性点电压与  $k$  的对应关系

Fig.5 Corresponding relationship between neutral point voltage and  $k$

分布式光伏一般配置有防孤岛保护,理论上能够检测非计划孤岛并在非计划孤岛状态下切除光伏发电系统。但是,孤岛保护要准确区分脱网与并网运行情况,采样窗长、动作速度慢,一般当线路保护 1 跳开 2 s 后才能跳开光伏电源。在孤岛保护动作前,主变中性点可能已经被击穿。此外,目前应用的防孤岛保护的孤岛检测和保护技术功能尚不完善,不能保证在非计划孤岛状态下所有光伏发电系统均能快速、可靠地动作。不能认为由于光伏逆变器具有防孤岛保护功能,就不会出现上述主变中性点过电压的状况。

根据国家标准相关规程要求<sup>[15-16]</sup>,在上述可能导致主变间隙击穿的情况下,需按要求对采用全绝缘的变压器装设零序过电压保护;对采用分级绝缘的变压器中性点装设放电间隙,及用于中性点直接接地、经放电间隙接地的 2 套零序过电流保护,并应增设零序过电压保护。并且在发生不对称故障后的 0.3~0.5 s 的时限内动作,断开变压器各侧断路器。

### 3 仿真验证

在 PSCAD 中建立如图 1 所示的 110 kV 变电站 10 kV 侧含分布式光伏并网系统。分布式光伏电源并网控制采用对称控制策略,通过 10 kV/260 V 并网变压器接入 10 kV 配电网。变电站主变的变比为 110 kV/10.5 kV,高压侧中性点采用非直接接地方式运行。考虑到联络线 AB 线路电纳的影响不大,忽略其影响,将联络线 AB 等效为短线路 RL 模型,其正、负、零序阻抗相等,即取  $n=1$ 。设置 0.2 s 时发生 A 相单相接地故障,故障点设置在联络线的点 B。0.3 s 时线路保护 1 动作,三相跳开。系统从发生故障到保护 1 动作后的故障点电流以及保护 1、保护 2 的检测电流如图 6 所示。

由图 6 可看出,发生故障后故障点会产生很大的接地电流;保护 1 检测到的电流波形与故障点电流基本重合,而保护 2 检测到的电流远小于故障电

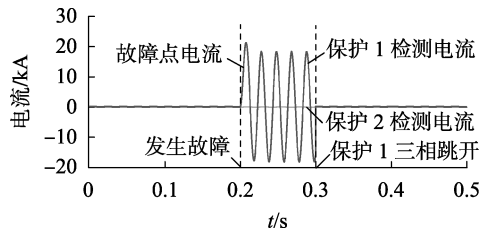


图 6 故障点电流和保护检测电流

Fig.6 Current at fault point and detection current of protections

流,忽略不计。这说明故障电流基本由系统侧提供。发生故障后,保护 1 正确动作,而保护 2 发生拒动。当保护 1 动作后,由于没有零序通路,故障电流消失。

系统主变三相电势以及中性点电压随着故障处理的不同阶段而发生变化。系统保护动作后,主变中性点偏移电压值受光伏输出功率与本地负荷的匹配程度影响。在本地负荷与分布式光伏输出功率匹配的条件下,不同阶段 110 kV 主变三相电势以及中性点电压的仿真结果分别如图 7 和图 8 所示。

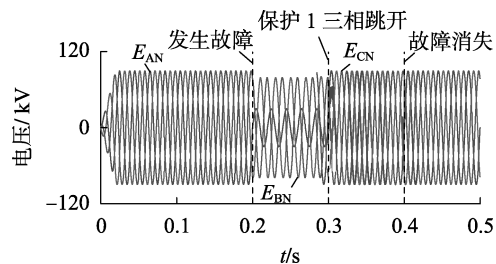


图 7 主变三相电势

Fig.7 Three-phase voltage of main transformer

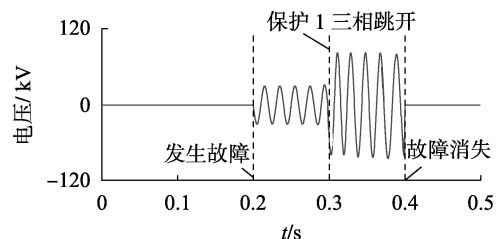


图 8 中性点电压

Fig.8 Neutral point voltage

由图 7、8 可以看出,在正常工况条件下系统三相对称,中性点电压为 0。当联络线 AB 靠近 110 kV 变电站出口处点 B 发生 A 相单相接地故障时,中性点电压发生偏移,此时中性点电压低于击穿电压。当保护 1 三相跳开之后,主变中性点电压幅值明显抬升,中性点偏移电压为相电压。本地负荷与分布式光伏输出功率不同匹配度条件下的 110 kV 主变故障相端电压、三相电势以及中性点电压的理论计算结果与仿真结果如表 1 所示。

由表 1 可知,发生故障后主变中性点的电压为 26.61 kV,约为工况时相电压 63.51 kV 的 1/3。由于

表 1 不同条件下 110 kV 主变中性点电压

Table 1 Neutral point voltage of 110 kV main transformer under different conditions

条件	点 B A 相电压		主变三相电势						中性点电压	
			A 相		B 相		C 相			
	理论值	仿真值	理论值	仿真值	理论值	仿真值	理论值	仿真值	理论值	仿真值
工况	63.51	63.56	63.51	63.53	63.51	63.55	63.51	63.52	0	0
发生故障后	0	0	21.17	21.65	56.01	55.97	56.01	56.41	21.17	26.61
保护动作后, $k=0.6$	0	0	45.73	46.24	45.73	46.02	45.73	45.88	45.73	45.59
保护动作后, $k=1$	0	0	63.51	63.93	63.51	63.87	63.51	64.01	63.51	63.93
保护动作后, $k=1.2$	0	0	69.57	69.02	69.57	70.21	69.57	69.84	69.57	69.02

采用 RL 模型 ( $n=1$ ), 理论计算时中性点电压应为工况相电压的  $1/3$ , 仿真结果与理论计算结果非常接近。该结论验证了理论分析发生故障后主变中性点电压偏移程度的推论如式(9)所示。因此, 仿真结果表明了主变中性点电压在发生故障后受电源不对称的影响产生电压偏移至工况相电压的  $1/3$ , 短时间内可以维持正常运行。从相分量上来看, 发生故障后由于单相短路系统 A 相电压为 0, 系统等效电源三相不平衡, 主变高压侧三相绕组的压降发生变化。经相分量的计算, 此时变压器高压侧 A 相电势幅值与中性点电压相同, 相位相反; B、C 相电势幅值为中性点电压的  $\sqrt{7}$  倍。根据所得中性点电压计算主变高压侧三相电势, 所得仿真结果与理论计算结果基本一致。

但在系统保护动作后, 中性点电压受线路参数不对称的影响, 电压偏移变化为低压侧分布式光伏持续提供的电流在主变上引起的压降。随着分布式光伏输出有功功率的增大或本地有功负荷的减小, 中性点电压会持续增大, 可能会超过间隙击穿电压。当光伏有功输出为本地有功功率需求的 60% 时, 主变中性点电压为 45.73 kV, 可以保证中性点绝缘安全; 当光伏有功输出与本地有功功率需求恰好匹配时, 主变中性点电压为工况下系统相电压; 当光伏有功输出为本地有功功率需求的 1.2 倍时, 主变中性点电压升高为 69.57 kV, 此时极有可能击穿间隙, 造成设备损害, 此时要求加装中性点间隙保护。需要说明的是, 中性点电压击穿值一般取为工况下系统相电压附近, 但不同型号变压器的耐压值略有不同, 需要根据实际情况确定导致击穿时的匹配度  $k$ 。

#### 4 结论

对于 10 kV 侧存在分布式光伏发电系统的 110 kV 变电站而言, 当主变中性点不接地时, 主变高压侧线路发生单相接地故障后, 由于光伏逆变器的限流以及等效阻抗关系, 故障电流主要由系统侧提供, 不受分布式光伏电源接入的影响。此时主变中性点电压约为系统工况相电压的  $n/(n+2)$ , 小于击穿电压。

近系统侧线路保护感受到明显的故障电流, 可

以正确动作; 而近主变侧线路保护无法检测到明显的故障电流, 保护拒动。这会引发中性点过电压偏移程度进一步变化, 其偏移程度为光伏容量与本地有功功率需求之比  $k$  的函数: 当匹配度  $k < 0.694$  时, 光伏输出电流达到上限, 此时中性点偏移电压为额定电压的  $1.2k$ ; 当匹配度  $k \geq 0.694$  时, 光伏输出电流随着电压的抬升而降低, 偏移电压为额定电压的  $\sqrt{k}$ 。即: 当接入光伏容量过大或本地负荷较轻时, 可能会使得偏移电压高于击穿值, 带来中性点绝缘击穿的风险。此外, 即使分布式光伏电源配置了防孤岛保护, 但由于其动作较慢且存在一定的动作死区, 仍需考虑主变中性点偏移导致间隙击穿的问题。

因此, 需根据分布式光伏电源的输出功率及本地负荷需求的关系, 求取发生单相接地故障可能产生的最大中性点电压。对于存在导致主变间隙击穿的含分布式光伏接入的变电站主变, 需按相关规程配置其间隙保护。

#### 参考文献:

- [1] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.  
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [2] 王继东, 张小静, 杜旭浩, 等. 光伏发电与风力发电的并网技术标准[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 1-7.  
WANG Jidong, ZHANG Xiaojing, DU Xuhao, et al. Standards of grid-connection technology for photovoltaic and wind power generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 1-7.
- [3] DULAU L I, ABRUDEAN M, BICA D. Effects of distributed generation on electric power systems[J]. Procedia Technology, 2014, 12(1): 681-686.
- [4] 王雪, 雷胜华, 胡文平, 等. 基于自适应负序电压正反馈的孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 36-42.  
WANG Xue, LEI Shenghua, HU Wenping, et al. Islanding detection based on adaptive positive feedback of negative-sequence voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 36-42.
- [5] 薛永端, 郭丽伟, 张林利, 等. 有源配电网中性点接地方式的选择问题[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 129-136.  
XUE Yongduan, GUO Liwei, ZHANG Linli, et al. Selection problems of neutral grounding mode in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 129-136.
- [6] DEBRUE F, GONZALEZ C, WIJNHOFEN T, et al. Influence of dis-

- tributed generation on the protection principles of a 70 kV/15 kV transformer in antenna; the zero-sequence overvoltage protection  $U_0 > [C]$  // IET International Conference on Developments in Power System Protection. Copenhagen, Denmark; IET, 2014; 48.
- [7] 吴争荣, 王钢, 李海锋, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.  
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distribution generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [8] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.  
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [9] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.  
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [10] PLET C A, BRUCOLI M, MCDONALD J D F, et al. Fault models of inverter-interfaced distributed generators; experimental verification and application to fault analysis[C] // Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA; IEEE, 2011; 1-8.
- [11] 刘为群, 吴小丹, 米高祥, 等. 基于无功扰动的三相光伏逆变器孤岛检测[J]. 电力电子技术, 2012, 46(7): 4-6.  
LIU Weiqun, WU Xiaodan, MI Gaoxiang, et al. Islanding detection method for PV three-phase grid-connected inverter based on dynamic reactive power disturbance[J]. Power Electronics, 2012, 46(7): 4-6.
- [12] 中华人民共和国电力工业部. 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 584—95[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [13] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭, 等. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 95-99.  
LIU Furong, KANG Yong, DUAN Shanxu, et al. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 95-99.
- [14] SHAHRIARI S A A, ABAPOUR M, YAZDIAN A, et al. Minimizing the impact of distributed generation on distribution protection system by solid state fault current limiter[C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans, LA, USA; IEEE, 2010; 1-7.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 继电保护和安全自动装置技术规程: GB/T 14285—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力装置的继电保护和自动装置设计规范: GB/T 50062—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.

#### 作者简介:



贾科

贾科(1986—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制、新型配电网故障定位与系统自我恢复(**E-mail**: ke.jia@ncepu.edu.cn);

汪执雅(1992—), 女, 安徽贵池人, 硕士研究生, 研究方向为新能源接入后系统保护与控制的配合(**E-mail**: wzy\_199211@sina.com);

戴明(1994—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网保护与控制(**E-mail**: daiming8682@163.com)。

## Influence of distributed PV integration on neutral point voltage of 110 kV main transformer

JIA Ke<sup>1</sup>, WANG Zhiya<sup>1</sup>, DAI Ming<sup>1</sup>, BI Tianshu<sup>1</sup>, LI Chenxi<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** When the 110 kV main transformer with distributed PV (PhotoVoltaic) integration at the low voltage side operates in the non-direct-grounding mode, the single-phase grounding fault may cause the problem of neutral point overvoltage for the transformer, which threatens the insulation of the neutral point. The fault characteristics of network, the action of line protection and the voltage deviation of neutral point after faults are analyzed, based on which, the possible deterioration of the neutral point voltage deviation caused by the integration of distributed PV after line protection action is analyzed, the influences of PV capacity and local load are discussed, and then the relevant suggestion of installing gap protection for the 110 kV main transformer in the distribution network integrated with distributed PV is given.

**Key words:** distributed power generation; photovoltaic generation; neutral point voltage; gap protection; active distribution network; grounding fault; overvoltage