

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181162

# 分布式光伏对线路自动重合闸的影响分析

胡雪凯<sup>1</sup>, 张乾<sup>2</sup>, 胡文平<sup>1</sup>, 孟良<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 国网河北省电力有限公司检修分公司, 河北 石家庄 050070)

**摘要:** 为研究分布式光伏对线路自动重合闸的影响, 从重合闸动作过程中分布式光伏锁相环的动态特性出发, 分析了逆变器在重合闸动作过程中的暂态过程以及分布式光伏输出特性。然后根据光伏容量与本地负荷的不同匹配程度以及不同故障位置, 分别讨论了光伏接入对于重合闸的影响。最后给出了考虑分布式光伏接入的重合闸配置方式。建议在重合闸时间整定上考虑孤岛保护动作及断路器完全断开的时间。

**关键词:** 分布式光伏; 重合闸; 锁相环; 防孤岛保护; 整定时间

## Analysis of the influence of distributed photovoltaic on automatic reclosing

HU Xuekai<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>2</sup>, HU Wenping<sup>1</sup>, MENG Liang<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Maintenance Branch, Shijiazhuang 050070, China)

**Abstract:** In order to study the influence of distributed photovoltaic on the automatic reclosing of the line, this paper analyzes the transient process and distributed photovoltaic output characteristics of the inverter during the reclosing action from the dynamic characteristics of the distributed PV phase-locked loop during the reclosing operation. Then according to the different matching degree of PV capacity and local load and different fault locations, the effects of PV access on reclosing are discussed respectively. Finally, the reclosing configuration method considering distributed PV access is given. The island protection action and the time when the circuit breaker is completely disconnected are considered in the reclosing time setting.

This work is supported by National Science and Technology Support Program of China (No. 2015BAA09B01).

**Key words:** distributed photovoltaic; reclosing; phase-locked loop; anti-island protection; setting time

## 0 引言

随着能源和环境问题的日益严峻, 迫切需要改变能源结构。分布式光伏具有污染少、可靠性及能源利用效率高、安装地点灵活等多方面优点, 近年来呈现出爆发式增长, 给配网的安全稳定运行带来了巨大挑战<sup>[1-6]</sup>。

由于光伏电源接入后大量电力电子技术的采用, 使得配电系统故障特征发生根本变化, 导致光伏电源接入后的故障电流特征以及故障计算模型不明确<sup>[7-12]</sup>。新能源电源所在线路发生故障、其保护动作跳闸后, 如果电源未能解列以躲开重合闸, 则可能造成故障线路非同期重合闸, 会引起设备受损、

故障线路无法及时恢复运行, 增加了用户的停电时间, 降低了配电系统运行可靠性<sup>[13-17]</sup>。因此, 有必要研究分布式光伏接入后对线路自动重合闸造成的影响, 以及考虑分布式光伏接入的重合闸配置方式。

## 1 重合闸动作过程中分布式光伏锁相环的动态特性

并网逆变器有效控制分布式光伏基于电网电压定向的控制策略, 将三相 abc 静止坐标转换为两相 dq 旋转坐标, 需要输入电网电压相位信号。而相位信号的获得, 依赖的正是锁相环(Phase Locked Loop, PLL)技术。因此, PLL 的正确计算是逆变器有效控制的重要基础。经典的 PLL 方法有基于单同步坐标系的锁相环(SSRF-SPLL), 在三相平衡时可以无差输出电网电压相位信号, 但在故障时由于三相不对

称存在相位误差。在此基础上提出了基于二阶广域广义定义积分的锁相环(SOGI-SPLL), 将正负序分离, 提取电压正序分量得到电网故障时正序电压相位信息<sup>[18-22]</sup>。配网中发生各种类型的短路故障时, 均是三相跳闸、三相合闸, 所以分析重合闸时不必考虑故障类型, 本文讨论对象选择为 SSRF-SPLL。分布式接入点端电压通过  $dq$  变换, 将静止坐标系下三相机端电压  $U_{ga}$ 、 $U_{gb}$ 、 $U_{gc}$  转换为同步旋转坐标系下的  $d$ 、 $q$  轴电压  $U_{gd}$ 、 $U_{gq}$ 。

PLL 原理图如图 1 所示。PLL 构建了一个旋转坐标系, 初始时其旋转速度被拖动到正常电网频率所对应的额定转速, 此时机端电压矢量相对该旋转坐标系的转速就相对接近, 投影到该旋转坐标系下的各轴分量已变为低频率成分, 通过一定的定向逻辑即可使构建的旋转坐标系跟随机端电压矢量, 获得相位信息。

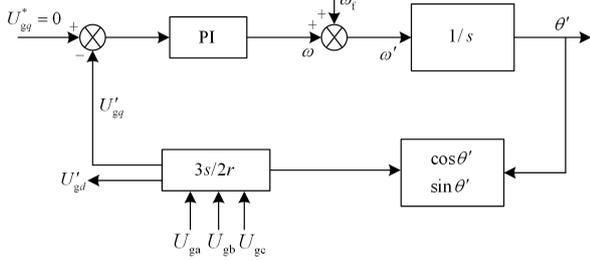


图 1 PLL 原理图

Fig. 1 PLL schematic

工况条件下, 分布式接入点三相端电压可表示为

$$\begin{bmatrix} U_{ga} \\ U_{gb} \\ U_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_g \cos \theta \\ U_g \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ U_g \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为 a 相电压实际相位;  $U_g$  为端电压幅值。

经过派克变换之后, 可以获得静止坐标系下端电压的  $d$  轴、 $q$  轴分量。经计算,  $d$ 、 $q$  轴分量分别为

$$\begin{bmatrix} U_{gd} \\ U_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_g \cos(\theta - \theta') \\ U_g \sin(\theta - \theta') \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\theta'$  为计算转换的  $d$  轴相位, 即输出的同步信号。

由此, 可以将 PLL 模型简化为如图 2 所示。当系统达到稳定时,  $\theta' = \theta$ 。锁相环输出同步信号完全等同于电网电压相位, 则

$$\begin{cases} U'_{gd} = U_g \\ U'_{gq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

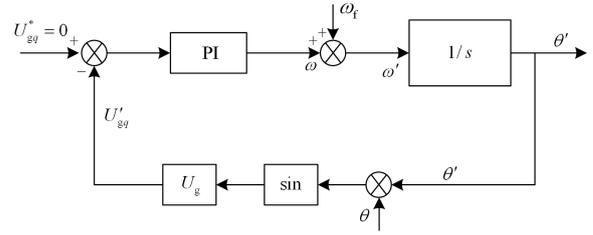


图 2 PLL 简化模型原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the PLL simplified model

在故障发生时, 分布式光伏和本地负荷形成暂时独立运行系统, 分布式光伏的电压和电流的相角由此时的电网结构及分布式光伏自身决定, 实际电压相位信号随 PLL 获得相位信号同时发生突变, 不会造成暂时明显的锁相误差。但在重合闸动作过程中, 并网点的电压相位立即与系统电压相位同步, 而 PLL 获取信号难以迅速跟随变化。因此, 在重合过程中 PLL 控制会出现暂时相角差, 存在一个暂时动态过程。

当分布式光伏容量与本地负荷匹配条件下, 故障切除后暂时脱网条件下的分布式输出频率和电压保持幅值不变。根据电网在重合的瞬间电网电压相位的突变程度, 以下将通过电压矢量图(图 3)对 PLL 的动态过程及影响进行讨论。

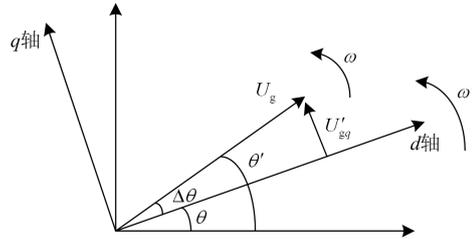
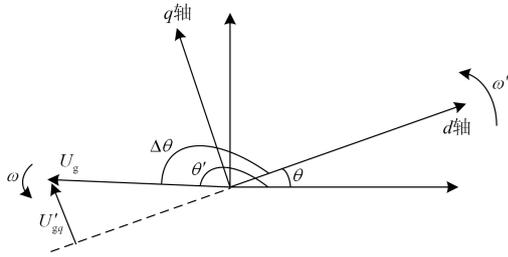


图 3  $\Delta\theta \in (-90^\circ, 90^\circ)$  时 PLL 动态过程电压相位矢量图

Fig. 3 PLL dynamic process voltage phase vector when  $\Delta\theta \in (-90^\circ, 90^\circ)$

当电压幅值保持不变时,  $U_g$  以工频 50 Hz、角速度  $\omega$  旋转,  $d$  轴以  $\omega' = \omega$  同步旋转。  $U'_{gq}$  的正负可以用来反映电压相位的关系。如图 4 所示, 当某一时刻  $U_g$  的相位从  $\theta$  突变为  $\theta'$ , 而控制信号  $d$  轴来不及变化, 仍保持为  $\theta$ , 此时,  $U_g$  超前于  $d$  轴相位  $\Delta\theta$ 。此时  $U'_{gq}$  大于零, 应将旋转坐标系转速  $\omega'$  加速, 直到  $U'_{gq} = 0$  时完成锁相。同理, 当  $U_g$  落后于  $d$  轴相位  $\Delta\theta$ , 此时  $U'_{gq}$  小于零, 旋转坐标系  $\omega'$  减速, 直至完成锁相。

图 4  $\Delta\theta \in (90^\circ, 270^\circ)$  时 PLL 动态过程电压相位矢量图Fig. 4 PLL dynamic process voltage phase vector when  $\Delta\theta \in (90^\circ, 270^\circ)$ 

如图 4 所示, 当重合时相位突变量  $\Delta\theta \in (90^\circ, 270^\circ)$ ,  $U'_{gg}$  反而随着  $\Delta\theta$  的增大而减小, 此时虽然跟踪相位误差很大, 但通过 PI 调节器的调节量却很小。最极端的情况是  $\Delta\theta$  突变为  $180^\circ$  时,  $U'_{gg} = 0$ , PI 调节器的调节量为零, 此时无法正确锁相。

由以上分析可知, 锁相环动态性能存在的缺陷使得分布式光伏逆变器在重合闸动作过程中的暂态过程中是不可控的。此时, 锁相环坐标系与实际坐标系存在的同步误差, 使锁相环测得准确的同步信号需要一定的调节时间, 且受输入电压相位突变程度的影响。

## 2 重合闸动作过程中分布式光伏输出特性

当 PLL 没有立即检测出并网点电压的突变相位, 此时 PLL 输出的同步信号  $\theta'$  与并网点实际相位  $\theta$  存在暂态同步误差  $\Delta\theta$ 。

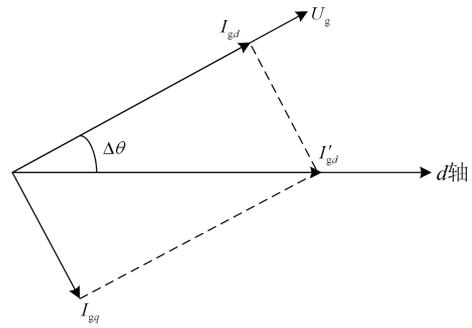
根据 PLL 经典控制参数, 开环截止频率为十几到二十赫兹。而电流内环控制的开环截止频率为 100~200 Hz, 比 PLL 调节要快得多, 有功、无功的反馈信号  $I'_{gd}$ 、 $I'_{gq}$  可以快速跟踪上电流内环参考值  $I^*_{gd}$ 、 $I^*_{gq}$ 。但是, 只有在  $\Delta\theta = 0$  时反馈信号才与实际输出电流一致, 电流环才能实现对输出电流的有效控制。由于重合过程中  $\Delta\theta$  的存在,  $I'_{gd}$ 、 $I'_{gq}$  并不能代替实际的有功、无功电流  $I_{gd}$  和  $I_{gq}$ 。

下面将详细讨论重合闸动作过程中, 当系统相位超前于控制信号  $d$  轴, 存在  $\Delta\theta$  时, 分布式光伏实际输出电流及功率情况。当存在  $\Delta\theta$ , PLL 暂态非正确锁相时:

(1)  $\Delta\theta \in (0^\circ \sim 90^\circ)$ , 见图 5。

如图 5 所示, 由于相位突变, 虽然输出电流同步信号  $I'_{gd} = I^*_{gd}$ , 但并不等同于有功电流  $I_{gd}$ 。实际的  $d$  轴输出电流为

$$I_{gd} = I'_{gd} \cos \Delta\theta \quad (4)$$

图 5  $\Delta\theta < 90^\circ$  时分布式输出电流相位矢量图Fig. 5 Distributed output current phase vector when  $\Delta\theta < 90^\circ$ 

可以看出, 实际输出的有功电流小于同步信号, 即  $I_{gd} < I'_{gd}$ 。同时, 虽然输出电流  $q$  轴同步信号为零, 实际上也存在无功输出, 其实际  $q$  轴电流为

$$I_{gq} = I'_{gd} \sin \Delta\theta \quad (5)$$

此时有功输出为

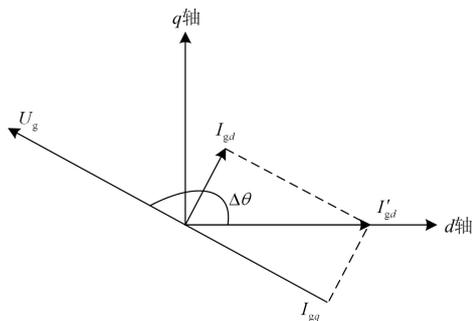
$$P = \frac{3}{2} U_g I'_{gd} \cos \Delta\theta \quad (6)$$

而正常工况条件下, 分布式光伏处于最大功率点附近, 其最大稳定输出功率为

$$P_{\max} = \frac{3}{2} U_g I_g^* \quad (7)$$

可以看出, 由于暂时的非正确锁相, 分布式光伏无法保持在最大功率点附近输出, 即  $P < P_{\max}$ 。且  $\Delta\theta$  越大, 偏离最大功率点程度越深, 输出功率越小。

(2)  $\Delta\theta \in (90^\circ \sim 180^\circ)$ , 见图 6。

图 6  $\Delta\theta > 90^\circ$  时分布式输出电流相位矢量图Fig. 6 Distributed output current phase vector when  $\Delta\theta > 90^\circ$ 

如图 6 所示, 当相位差大于  $90^\circ$  时, 实际输出的有功电流表现为负值, 即

$$I_{gd} = I'_{gd} \cos \Delta\theta < 0 \quad (8)$$

实际输出的无功电流为

$$I_{gq} = I'_{gd} \sin \Delta\theta \quad (9)$$

此时分布式光伏有功输出为

$$P = \frac{3}{2} U_g I'_{gd} \cos \Delta \theta < 0 \quad (10)$$

这种情况下输入电网的有功功率也为负值, 方向从电网回流到分布式光伏。由于分布式光伏板本身无法吸收能量, 因此直流侧母线电容上将堆积能量, 可能引起分布式光伏自身运行的不安全, 或造成分布式光伏本体保护动作。同时由于此时  $\Delta \theta$  较大, PI 调节能力更差不利于分布式光伏输出维持在最大功率点附近, 非常不利于分布式光伏的正常运行。当  $\Delta \theta = 180^\circ$  时,  $I_{gd} = -I'_{gd}$ , 达到极端情况。系统相位落后于控制信号  $d$  轴时,  $\Delta \theta$  对分布式光伏实际输出电流及功率影响的具体分析与上述过程一致, 在此不再赘述。

因此, 由于重合过程中 PLL 没有立即检测出并网点电压的突变相位, 在锁相环动态过程中, 实际输出电流不同于反馈信号输出电流, 甚至可能出现功率倒送。输出功率无法稳定在最大功率点附近, 从而使得电流内环参考值发生波动。

分布式逆变器直流侧的拓扑结构如图 7 所示。从直流侧输出电流、电压看, 分布式光伏输出功率为

$$P_{DG} = I_{dc} E_{dc} = (I_{DG} - C \frac{dU_{DG}}{dt}) U_{DG} \quad (11)$$

式中:  $E_{dc}$  为直流侧电容电压(即逆变器电压外环输入电压);  $I_{dc}$  为分布式逆变器输入电流;  $C$  为直流侧电容;  $I_{DG}$ 、 $U_{DG}$  分别为分布式光伏输出电流和电压。

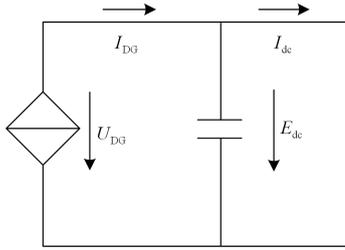


图 7 分布式系统直流侧等效示意图

Fig. 7 DC system equivalent diagram of distributed system

稳态时, 直流电容相当于开路分布式阵列输出功率近似等于分布式光伏输出功率。但是, 在暂态过程中, 直流侧电容吸收或发出能量。

从分布式逆变器出口处交流电流、电压看, 分布式光伏输出功率为

$$P_{DG} = \frac{3}{2} U_g I'_{gd} \cos \Delta \theta \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可得逆变器的输入电压为相角差  $\Delta \theta$  的函数:

$$(I_{DG} - C \frac{dU_{DG}}{dt}) U_{DG} = \frac{3}{2} U_g I'_{gd} \cos \Delta \theta \quad (13)$$

因此, 由于相位突变使得分布式输出功率  $P_{DG}$  偏离最大功率点, 导致逆变器的输入电流  $I_{dc}$  下降、电压  $E_{dc}$  抬升, 偏离正常工作条件下的参考值。根据电压外环控制方程, 电压外环的传递函数可表示为

$$I'_{gd} = (U_{gd}^* - E_{dc}) (k_{up} + \frac{k_{ui}}{s}) \quad (14)$$

在暂态过程中, 电压外环输出值(即电流内环输入参考值)会随着电压  $E_{dc}$  的抬升而抬升, 同样存在一个暂态过程。又根据电流内环控制方程, 可以得到电流内环输出信号的  $d$ 、 $q$  轴电流分别为

$$\begin{cases} I'_{gd} = -\frac{(I_{gd}^* - I'_{gd})(k_{ip} + k_{ii}/s)}{R + sL} \\ I'_{gq} = -\frac{(I_{gq}^* - I'_{gq})(k_{ip} + k_{ii}/s)}{R + sL} \end{cases} \quad (15)$$

联立电压外环、电流内环方程式, 可解得

$$I'_{gd} = H_{cl}(s) \cdot I_{gd}^* = H_{cl}(s) \cdot (U_{gd}^* - E_{dc}) (k_{up} + \frac{k_{ui}}{s}) \quad (16)$$

当外环输入值明显增大, 存在一个明显的暂态过程。考虑到逆变器电力电子器件的限幅要求, 对于电流内环的参考值  $I_{gd}^*$  (电压外环输出值) 有限幅要求, 当电压外环输入  $E_{dc}$  偏离程度较深, 外环 PI 调节器饱和, 此时, 电流内环  $d$  轴信号的输出值为 1.2 倍工况电流, 即

$$I'_{gd} = 1.2 I_{gd.N} \quad (17)$$

式中,  $I_{gd.N}$  表示工况电流。

可以得到电流内环  $d$  轴输出电流信号为

$$I'_{gd} = \begin{cases} I_{gd}^* & I'_{gd} < I_{gd.N} \\ 1.2 I_{gd.N} & I'_{gd} \geq I_{gd.N} \end{cases} \quad (18)$$

其中, 内环参考值非稳定值, 而是随着功率偏移程度变化而变化的动态值, 其变化范围为正常工作条件下的额定值到 1.2 倍额定值之间,  $I_{gd}^* \in (I_{gd.N}, 1.2 I_{gd.N})$ 。

综上, 重合闸动作过程中, 实际输出的有功电流为

$$I_{gd} = I'_{gd} \cdot \cos \Delta \theta = \begin{cases} I_{gd}^* \cdot \cos \Delta \theta, & I'_{gd} < I_{gd.N} \\ 1.2 I_{gd.N} \cdot \cos \Delta \theta, & I'_{gd} \geq I_{gd.N} \end{cases} \quad (19)$$

### 3 配电线路自动重合闸动作适应性分析

考虑正常工况条件下光伏容量与本地负荷的匹配程度不同, 根据光伏对本地负荷的平衡能力以及故障位置, 分别讨论光伏接入对于重合闸的影响。

(1) 分布式光伏电源并网联路线故障

如图 8 所示, 10 kV 侧光伏电源并网联络线发生故障时, 保护 3 动作, 系统侧断路器 B3 跳开。如果光伏电源侧配有防孤岛保护装置, 故障后防孤岛保护拒动或者由于光伏容量与本地负荷匹配度较高导致孤岛保护动作时间晚于重合闸动作时间, 此时重合闸不会成功。由于分布式光伏并网断路器 B4 没有跳闸, 故障没有得到有效隔离, 光伏电源得以继续给故障点提供短路电流, 大多数情况下故障电弧不会熄灭, 可能存在电弧重燃的潜在威胁, 也可能使瞬时故障发展为永久性故障。

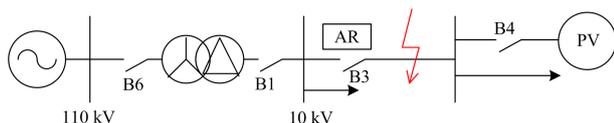


图 8 含光伏接入的配电网重合闸示意图

Fig. 8 Schematic diagram of reconfiguration of distribution network with photovoltaic access

因此, 系统侧重合闸不可在分布式光伏电源与瞬时故障点未隔离时就进行重合, 应保证含光伏接入双侧电源线路故障后两侧都跳闸后才能启动重合闸。如图 9 所示, 对于分布式光伏侧配有保护的条件下, 10 kV 侧光伏电源并网联络线发生故障时, 故障时联络线两侧保护正确动作使得 B3 和 B5 跳开, 联络线失去电压。此时如果先对分布式光伏侧重合闸, 可能由于功率严重失衡导致配网失去稳定性。因此, 一般先使得近系统侧保护 3 检无压重合, 再使得光伏侧保护 5 检同期或非同期重合。此时还需要考虑分布式光伏的运行能力和输出特性对光伏侧重合闸的影响。

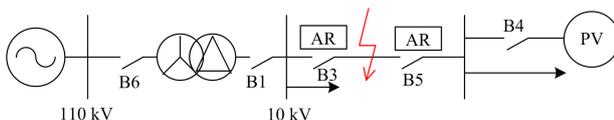


图 9 含光伏接入的配电网双侧重合闸示意图

Fig. 9 Schematic diagram of double-side reclosing of distribution network with photovoltaic access

当两侧断路器 B3、B5 均跳闸, 系统侧重合闸检定线路无压后重合成功。如果采用检同期重合闸, 当暂时离网运行的光伏电源输出功率与本地负荷匹配度过低, 功率差额过大, 此时难以满足检同期重合闸条件, 并失去系统频率和电压的稳定性。防孤岛保护检测到频率和电压的变化在 2 s 内动作, 光伏电源退出运行。此时光伏侧保护 5 侧重合闸检同期不会成功, 最终导致重合闸失败。

如果采用非同期重合闸, 当暂时离网运行的光伏电源输出功率与负荷匹配度较高, 或者防孤岛保护拒动, 重合闸动作后光伏输出电流存在波动。但由于光伏逆变器自身的限流作用, 无论重合时两侧电源是否同步, 并网电流受光伏输出限制。但是, 如果光伏离网运行期间, 受容量和负荷匹配条件影响与系统相角差  $\Delta\theta$  拉大, 光伏会在重合后受 PLL 动态特性影响失去输出功率的稳定性, 至少会造成光伏逆变器本身的损坏。

#### (2) 分布式光伏电源接入线路的相邻线路故障

若与分布式光伏接入同一母线的相邻线路馈线发生故障, 该线路保护动作于跳闸后, 光伏与故障有效隔离, 故障电流消失, 电弧熄灭。此时由于光伏与主系统电源仍然相连, 相角保持同步。当故障为瞬时性故障时, 相邻线路重合成功, 不会出现非同期重合闸。当为永久性故障时, 重合不成功, 相邻线路再有选择性地动作跳闸。由此可知, 相邻线路系统侧重合闸动作方式和传统配网相同, 不受分布式光伏接入的影响。

根据以上分析, 在相邻线路发生短路故障时, 分布式光伏能够正确与故障隔离, 不会影响重合闸的正确动作。而在光伏并网联络线本线路发生短路故障时, 需要考虑分布式光伏的影响, 保证光伏及时与故障隔离, 并根据光伏容量对本地负荷的平衡能力制定重合闸的配置方式, 避免  $\Delta\theta$  拉大后非同期重合闸对光伏并网逆变器的影响, 保证瞬时性故障后线路重合闸的重合成功。

## 4 考虑分布式光伏接入的重合闸配置方式

当分布式光伏电源相对于本地负荷来说输出功率较低, 即输出功率小于本地负荷平均最大功率需求的 30% 时, 光伏暂时离网与本地负荷匹配的可能性几乎为零。另外, 由于分布式光伏并网采用最大功率跟踪控制策略, 在暂时离网运行时难以保持有功和无功的平衡。无功、有功差额导致了系统频率偏移和电压偏移, 绝大多数情况下光伏的防孤岛保护会在 2 s 内动作跳开。此时, 称光伏对本地负荷不具有平衡能力。

对于不具有对本地负荷平衡能力的分布式光伏电源, 在故障后提供的电流仍然小于正常工况条件下的 1.2 倍工况光伏输出电流, 无法提供足够的短路电流。同时考虑成本因素, 一般不在联络线分布式光伏侧加装保护及重合闸。另一方面, 该类光伏在线路故障后由于光伏输出功率与本地负荷功率需

求差额较大,无法维持暂时离网的运行状态,可以通过防孤岛保护的配合,使得光伏电源退出运行。此时,并网联络线的重合闸可按照光伏退出运行考虑,并考虑与防孤岛保护的配合。

如图 8 所示,当并网联络线发生故障时,系统保护 3 动作于跳闸。同时光伏电源输出失去平衡,防孤岛保护动作。此时主系统保护 3 和重合闸方式均按照符合性质考虑,不考虑光伏接入的影响,通过不检重合方式提高供电可靠性。此时,重合闸配置的断路器动作和重合动作的时间和必须大于光伏防孤岛保护的配合时间,在保证分布式光伏跳离后恢复供电。如图 10 所示,重合闸动作时限除了要考虑系统保护动作时间以及故障点灭弧和去游离时间,还需要考虑分布式光伏的防孤岛保护动作时间。根据分布式光伏的电压响应时间要求,目前一般规定防孤岛保护动作时间不超过 2 s。

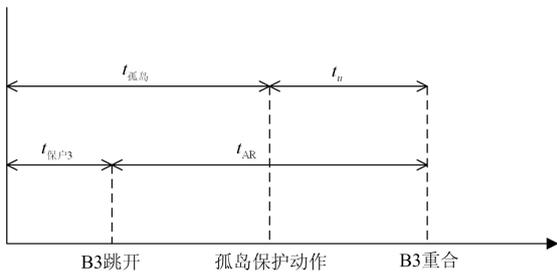


图 10 重合闸动作时限配合示意图

Fig. 10 Reclosing action time limit coordination diagram

重合装置的动作时间应整定为

$$t_{AR} = t_{\text{孤岛}} - t_{\text{保护3}} + t_u \quad (20)$$

式中:  $t_{\text{孤岛}}$  为孤岛保护最大动作时间;  $t_{\text{保护3}}$  为保护 3 电流速断保护动作时间与断路器动作时间之和;  $t_u$  为故障点电弧熄灭时间、绝缘强度的恢复时间以及裕度时间之和。

随着分布式光伏电源输出功率的相对增加,功率匹配的可能性随之增加。此时光伏对本地负荷具有平衡能力。此时应避免非计划性孤岛运行时非同期重合闸对光伏逆变器的影响。

对于对本地负荷具有平衡能力的分布式光伏电源,与本地负荷功率匹配的可能性增加。为了有效隔离故障,应在联络线两侧设置保护,在故障后分别跳开系统侧和分布式光伏侧电源。

如图 9 所示,当并网联络线发生故障时,线路两侧无延时由方向电流速断保护动作,使得断路器 B3 和 B5 跳闸。系统侧保护 3 建议采用“检线路无压”方式重合闸,光伏侧保护 5 建议采用“检线路

有压母线无压”方式重合闸,保证分布式光伏电源跳离线路后恢复供电。

系统侧保护 3 处重合闸配置的具体方案为:重合闸启动检测到线路电压,当未满足线路无压条件,说明分布式光伏电源未正确跳开,重合闸闭锁退出。否则,当满足检无压条件时,重合闸动作,若故障为瞬时性故障,重合成功。若故障为永久性故障,重合不成功,保护再次动作于跳闸,重合闸闭锁退出。

系统侧保护 3 处重合装置的动作时间应整定为

$$t_{AR3} = t_{\text{保护5}} - t_{\text{保护3}} + t_u \quad (21)$$

式中,  $t_{\text{保护5}}$  为光伏侧方向电流速断保护动作与断路器 B5 动作的时间和。

系统侧保护 3 处重合闸不成功,保护 5 不再进行重合闸动作。当保护 3 重合闸成功,分布式光伏侧保护 5 处重合闸配置的具体方案为:光伏侧检测到联络线线路有压,而光伏侧母线检测到母线无压。当满足检无压线路有压的条件时,重合闸动作,若故障为瞬时性故障,重合成功。若故障为永久性故障,重合不成功,保护再次动作于跳闸,重合闸闭锁退出。

当分布式光伏由于与本地负荷匹配度较高发生概率极低的孤岛运行时,光伏侧由于检测到母线有压,重合闸不会动作。因此,该种方式可以有效避免重合闸过程中非同期重合闸后 PLL 动态过程对光伏逆变器本身的损坏。

光伏侧保护 5 处重合装置的动作时间应整定为

$$t_{AR5} = \max \{ (t_{\text{保护3}} - t_{\text{保护5}} + t_u), t_{\text{孤岛}} \} \quad (22)$$

## 5 结论

对于线路自动重合闸的动作适应性问题,首先分析了重合闸动作过程中由于同步误差信号的存在,使得有功和无功电流反馈信号与实际的有功和无功电流存在误差,电流环的调节作用虽能使电流的反馈信号快速跟随指令信号改变,但实际的有功和无功电流由于受到同步误差信号的影响而不受控制,致使暂态过程中变换器注入电网的功率偏离最大功率点,极端情况下可能发生功率回流,使得直流侧电容电压急剧升高,从而使得电流内环参考值发生波动。由于逆变器自身的限流作用,分布式输出暂态电流最大不超过逆变器幅值限制上限。由于分布式电源有燃弧的可能,建议在重合闸时间整定上考虑孤岛保护动作及断路器完全断开的时间。

## 参考文献

- [1] 沈鑫,曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 346-351.

- SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.
- [2] 周杨珺, 高立克, 欧阳健娜. 基于改进微分进化算法的配电网故障定位计算分析方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 56-60, 65.
- ZHOU Yangjun, GAO Like, OUYANG Jianna. Calculation and analysis method for distribution network fault location based on improved differential evolution algorithm[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 56-60, 65.
- [3] PERALTA R A V, LEITE J B, MANTOVANIA J R S. automatic restoration of large-scale distribution on networks with distributed generators, voltage control devices and heating loads[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 176: 1-13.
- [4] 陈雪, 黄伟, 叶琳浩, 等. 基于多源数据的配电网规划辅助决策系统研究[J]. 广东电力, 2017, 30(1): 53-58.
- CHEN Xue, HUANG Wei, YE Linhao, et al. Study on auxiliary decision system for power distribution network planning based on multi-source data[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(1): 53-58.
- [5] 蒋愈勇, 雷金勇, 董旭柱, 等. 基于 DIGSILENT 的配电网大规模光伏接入影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(7): 35-41.
- JIANG Yuyong, LEI Jinyong, DONG Xuzhu, et al. Analysis on impacts of integration of large-scale photovoltaic to distribution systems via DIGSILENT[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(7): 35-41.
- [6] 李文勋, 车延博, 洪潮, 等. 考虑输电损耗和新能源波动的 VSC-MTDC 下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 220-226.
- LI Wenxun, CHE Yanbo, HONG Chao, et al. VSC-MTDC droop control strategy considering transmission loss and renewable energy fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 220-226.
- [7] SALMAN S, AI Xin, WU Zhouyang. Design of a P-&-O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200 W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [8] 张伟, 吕睿博, 阎有朋. 基于不平衡电容注入的配电网小电流接地故障定位方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 66-71, 87.
- ZHANG Wei, LÜ RuiBo, YAN Youpeng. Small current earth fault location method for distribution network based on unbalanced capacitance injection[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 66-71, 87.
- [9] 陈彬. 基于稳态特征的配电网小电流接地故障定位方法[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 116-120.
- CHEN Bin. Grounding fault location method for small current of power distribution network based on steady-state characteristic[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10): 116-120.
- [10] 陈炜亮. 分布式电源的故障特性及其微电网保护原理[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- CHEN Weiliang. Fault characteristics of distributed generators and microgrid protection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [11] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变器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. Method of 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.
- [12] 张笛, 曾怡达. 浅谈太阳能微电网并网逆变环节的建模与仿真[J]. 中国科技信息, 2014(11): 31-32.
- ZHANG Di, ZENG Yida. Elementary introduction to modeling and simulation of inverted link in solar microgrid[J]. China Science and Technology Information, 2014(11): 31-32.
- [13] 李兆伟, 贺静波, 方勇杰, 等. 计及暂态稳定约束的电厂送出系统重合闸时间整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 116-120.
- LI Zhaowei, HE Jingbo, FANG Yongjie, et al. Research on the method to set reclosing time of power plant transmission system considering transient stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 116-120.
- [14] 王曦冉, 章敏捷, 邓敏, 等. 基于动态安全域的最优时间紧急控制策略算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 71-77.
- WANG Xiran, ZHANG Minjie, DENG Min, et al. Optimal emergency control strategy algorithm of ideal time based on dynamic security region[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 71-77.

- [15] 梁振锋, 崔若巍, 杨宁宁, 等. 三相不对称输电线路单相自适应重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 31-36.  
LIANG Zhenfeng, CUI Ruowei, YANG Ningning, et al. Study on single-phase adaptive reclosure of the asymmetrical three-phase transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 31-36.
- [16] CHENG Lin, WAN Yuxiang, TIAN Liting, et al. Evaluating energy supply service reliability for commercial air conditioning loads from the distribution network aspect[J]. Applied Energy, 2019, 253: 1-12.
- [17] 李育强, 宋国兵, 王维庆, 等. 基于参数识别光伏接入配网永久性故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 1-7.  
LI Yuqiang, SONG Guobing, WANG Weiqing, et al. Permanent fault identification method based on parameter identification for photovoltaic access to distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 1-7.
- [18] GOLESTAN S, FREIJEDO F D, GUERRERO J M. A systematic approach to design high-order phase-locked loops[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 2885-2890.
- [19] 何宇, 漆汉宏, 邓超, 等. 一种嵌入重复控制内模的三相锁相环的设计与实现[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 83-91.  
HE Yu, QI Hanhong, DENG Chao, et al. A novel three-phase phase-locked loop method based on internal model of repetitive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 83-91.
- [20] 王宝诚, 伞国成, 郭小强, 等. 分布式发电系统电网同步锁相技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 50-55.  
WANG Baocheng, SAN Guocheng, GUO Xiaoqiang, et al. Grid synchronization and PLL for distributed power generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 50-55.
- [21] 裴喜平, 郝晓弘, 陈伟. 基于模型参考自适应算法的三相锁相环系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 196-204.  
PEI Xiping, HAO Xiaohong, CHEN Wei. A novel three-phase phase-locked-loop system based on model reference adaptive algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 196-204.
- [22] 龚锦霞, 解大, 张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 94-99.  
GONG Jinxia, XIE Da, ZHANG Yanchi. Principle and performance of the three-phase digital phase-locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 94-99.

---

收稿日期: 2018-09-09

作者简介:

胡雪凯(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统计算分析、新能源并网检测分析; E-mail: 719872361@qq.com

张乾(1990—), 女, 学士, 工程师, 主要研究方向为高压电气试验;

胡文平(1968—), 男, 博士, 教授级工程师, 主要研究方向为电力系统计算分析、电力系统调度控制。

(编辑 魏小丽)