

# 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究

张海玉<sup>1,2</sup>, 刘闯<sup>3</sup>, 晁勤<sup>1</sup>, 希望·阿布都瓦依提<sup>1</sup>, 李育强<sup>1</sup>, 刘清贵<sup>1</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830013; 3. 国网新疆电力公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

**摘要:** 具有低压穿越能力(Low voltage ride-through, LVRT)的光伏电站接入电网给保护带来一系列挑战。首先基于光伏电站的结构对光伏系统 LVRT 能力要求及反孤岛保护检测时间限制两个标准进行了介绍与分析, 并基于 PSCAD/EMTDC 仿真分析了具有 LVRT 的光电站故障特性。其次从光伏电站接入配电网和输电网两个角度, 在总结了具有 LVRT 能力的光伏电站故障特性基础上, 归纳提出了配电网电流三段保护、重合闸、熔断器等受光伏电站的影响问题。深入分析了光伏电站 LVRT 能力与逆变器直流侧保护、反孤岛保护, 输电网主变保护与线路纵差和距离保护等协调配合问题。最后, 提出相应的整定原则或改进措施。

**关键词:** 光伏; LVRT; 故障特性; 配电网; 输电网; 继电保护

## Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability

ZHANG Haiyu<sup>1,2</sup>, LIU Chuang<sup>3</sup>, CHAO Qin<sup>1</sup>, XI Wang<sup>1</sup>, LI Yuqiang<sup>1</sup>, LIU Qinggui<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute of Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830013, China; 3. Changji Power Supply Company of State Grid, Changji 831100, China)

**Abstract:** The connection of the photovoltaic power plants which have capability of low voltage ride-through (LVRT) brings the grid protection a series of challenge. Firstly, the requirements of PV's LVRT capability and the time limit of anti-islanding protection detection which the current standards asked are researched in detail based on the structure of photovoltaic power plants. Secondly, the failure characteristics of photovoltaic power plant with the ability of LVRT are studied based on PSCAD/EMTDC. Thirdly, based on the failure characteristics of the photovoltaic power plant, the impact of PV power plant's LVRT ability on the current three sections protection, reclosing, fuses is studied in-depth when it joins in the distribution network and transmission network; the cooperation problems of PV power plant's LVRT ability with the DC-side protection of PV's inverter, anti-islanding protection, main transformer protection, line longitudinal differential and distance protection are analyzed deeply. Finally, the corresponding setting principle and improvement measures are put forward.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51367016 and No. 51367017).

**Key words:** photovoltaic; LVRT; failure characteristics; distribution network; transmission grid; relay

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0053-08

## 0 引言

近年来,随着光伏发电(Photovoltaic, PV)并网容量的不断增加, PV 发电给电网带来一系列问题。PV 发电容量较小时,光电运行对电网继电保护的影响可不予考虑。当 PV 发电容量在系统中所占比例较大时, PV 发电对电网的安全稳定影响变得不

容忽视<sup>[1-4]</sup>,电网继电保护在配置与整定时必须考虑 PV 电站的影响。

现有关于并网 PV 系统故障特性的研究均是将 PV 等效为一个恒流源或常规电源。实际中当所接电网故障时,基于逆变器的并网 PV 电站的短路电流的幅值和持续时间有别于传统电源<sup>[5-6]</sup>。目前,小容量的 PV 电站在电网故障时自动脱离电网,当并网容量达到一定规模时,如仍自动脱网将导致电网频率波动,给电网的安全稳定带来严重影响。为适

应高穿透功率的 PV 发电并网运行，同时保证电网的安全稳定，世界各国对光电并网的要求越来越严格。其中要求 PV 电站必须具有一定的 LVRT 能力<sup>[7]</sup>。同时，PV 电站还要求具有反孤岛保护的能力。在上述情况下，并网 PV 系统的故障特性及对接入电网继电保护的影响需要深入研究。

本文基于并网光伏电站的结构介绍了国内外 PV 系统 LVRT 能力要求及反孤岛保护检测时间限制；从 PV 系统的故障特性出发深入分析了 PV 电站接入配电网时，其 LVRT 能力对电流三段式保护、重合闸、熔断器等的影响；研究了 PV 电站接入输电网时，其 LVRT 能力与逆变器直流侧保护、反孤岛保护、主变保护及线路保护等协调及配合关系，提出相关改进措施，并对以后的研究方向进行了展望。

### 1 PV 电站结构及相关并网技术要求

#### 1.1 并网 PV 电站结构

我国 PV 电站主要有两类：一是分布式发电分散式接入，所发电能以就地消纳为主，主要接入配电网；二是集中式发电，所发电能以异地消纳为主，主要接入电压等级较高的输电线路。目前已并网发电的大中型 PV 电站均为不含储能的不可调度式发电系统，多采用单级(DC/AC)并网逆变结构，如图 1。

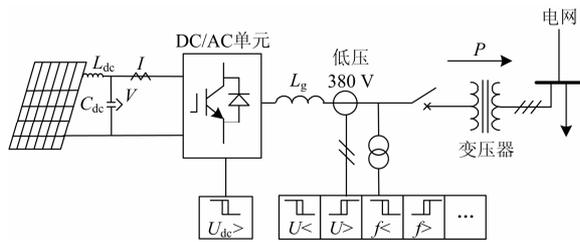


图 1 单级型 PV 系统结构及保护配置

Fig. 1 Protection configuration of single-stage type PV system

基于换流器并网的三相 PV 系统由 PV 阵列、逆变器及交流电路组成。其中，交流电路由滤波器和变压器组成。逆变器是整个并网 PV 系统的核心。为了逆变器的安全，PV 系统配置多种保护，动作于逆变器出口低压(380 V)断路器。图 1 所示，其保护配置主要有<sup>[8]</sup>：逆变器直流侧过压保护、过热保护；逆变器输出交流侧过/欠压保护、过/欠频保护、短路保护和防孤岛保护等。随着 PV 并网技术的发展，现场中还要求 PV 系统并网逆变器在电网故障时具有一定的 LVRT 能力。目前，PV 电站 LVRT 能力和反孤岛保护问题已成为制约其发展的瓶颈问题。

#### 1.2 并网 PV 电站 LVRT 能力要求

目前，针对光伏 LVRT 方面尚未出台相关国标。

PV 电站按其接入的电压等级分别为 0.38 kV、10~35 kV、66 kV，而定义为小型、中型、大型 PV 电站。图 2 所示为光伏系统并网国家标准 GB/T19964-2012<sup>[9]</sup>中对大中型 PV 电站 LVRT 的要求，如图 2。

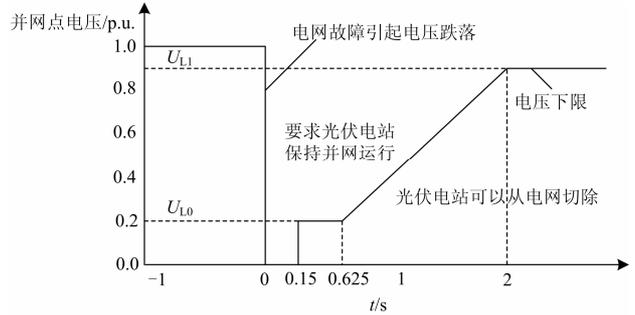


图 2 我国对并网光伏电站故障时 LVRT 能力要求

Fig. 2 LVRT requirement of grid-connected PV system

要求规定：①光伏电站的并网逆变器必须能在并网点(升压变高压侧母线)电压下降至 0% 标称电压时，保持至少不脱网运行 0.15 s，且并网点电压跌落至曲线 1 以下时，光伏电站可以从电网中切除；②光伏电站能够在故障发生期间电压跌落后 2 s 内恢复到标称电压的 90%。

#### 1.3 并网 PV 电站反孤岛保护能力要求

常见的孤岛检测主要有被动式和主动式。被动式即基于检测 PV 系统并网处电压、频率、相位等信息来进行判断；主动式通过对并网逆变器的控制信号(电流、频率、相位、功率等)加入一定的扰动，然后基于逆变器输出结果来判断是否孤岛。基于这两种方式的孤岛检测的相关研究已很多，但目前国内并未对孤岛检测的时间作明确规定。

针对 PV 反孤岛检测方面国标亦未给出相关规定。表 1 给出了 IEEE2000-929<sup>[10]</sup>标准对孤岛检测时间的要求，其中的电压等级和频率已转换为国内标准的 380 V/50 Hz， $T_{max}$  为最大跳闸时间。

表 1 孤岛检测时间限制

区域	PCC 点处电压和频率	$T_{max}/s$
A1	$V > 137\%$	0.03
A2	$V < 50\%$ 或 $f < 49.4 \text{ Hz}$ 或 $f > 50.5 \text{ Hz}$	0.12
A3	$50\% \leq V \leq 88\%$ 、 $110\% \leq V \leq 137\%$ 且 $49.4 \text{ Hz} \leq f \leq 50.5 \text{ Hz}$	2
A4	$88\% \leq V \leq 110\%$ 且 $49.4 \text{ Hz} \leq f \leq 50.5 \text{ Hz}$	正常运行

## 2 并网 PV 电站故障特性

### 2.1 仿真系统介绍

本文基于 PSCAD/EMTDC 搭建了并网光伏电站仿真系统，如图 3 所示。将容量为 10 MW 的光伏

电站通过输电线路接入无穷大系统。光伏系统逆变器出口电压为 400 V, 通过升压变升至 35 kV, 再通过输电线路接入 220 kV 电网。本文主要针对有无 LVRT 能力时故障特性进行分析, 采用基于超级电容器(SC)的 LVRT 方案。

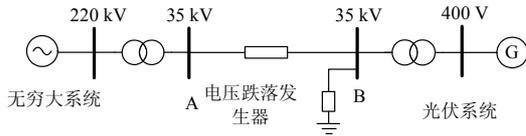


图 3 含光伏电站的电网仿真结构

Fig. 3 System structure containing PV plant

### 2.2 PV 电站故障特性

仿真时光电站在标准运行工况下( $S=1 \text{ kW/m}^2$ ,  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ )稳定运行, 3 s时B点电压跌落至0%标称电压, 跌落时间为0.15 s。系统中PV电站自身保护有电压越限保护、过流保护(大于1.1 p.u., 延时5 s)、直流电压越限保护(大于1.6 p.u., 延时0.1 s)、过/欠频保护等。故障时并网点电压、光电逆变器直流侧电压分别如图4(a)、图4(b)所示, 其中在得到图4(b)时直流电压越限保护不投入, 其他情况逆变器保护均投入; 当PV电站无LVRT能力和有LVRT能力时, 母线B处测得电流分别如图4(c)、图4(d)所示。

由图4(a)、图4(b)得并网点电压跌落至0%时, 投超级电容器的PV逆变器直流侧电压升高至1.8 p.u., 而投入超级电容器后直流电压在正常运行和故障时均保持在额定值。图4(c)得电压跌落至0%期间无LVRT能力光电站为保护逆变器直流侧电容不被击穿, 过压保护在故障后0.1 s动作将逆变器切除, 光电无法向故障点提供持续故障电流。由图4(d)得电压跌落期间具有LVRT能力的光电站逆变器能够保持不间断并网运行, 可提供持续的故障电流。

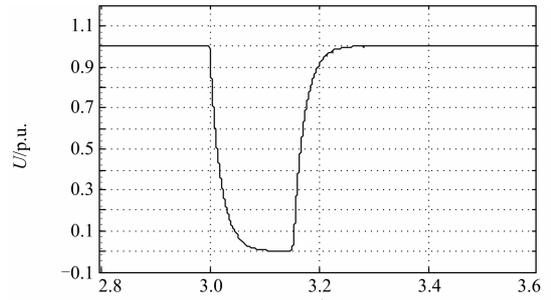
另外, PV电站除了故障时会出现直流侧电压过高问题, 逆变器内电力电子装置的热过载能力也很低。目前为了保护逆变器在故障时不被损坏, 通常做法是限制逆变器输出电流以使逆变器内元件不被过电压击穿, 同时使故障期间过电流产生的热量在其可以承受的范围内, 即逆变型电源在电网故障时对故障点短路电流的贡献不可能很大。如表2所示,

表 2 不同类型电源短路电流注入能力

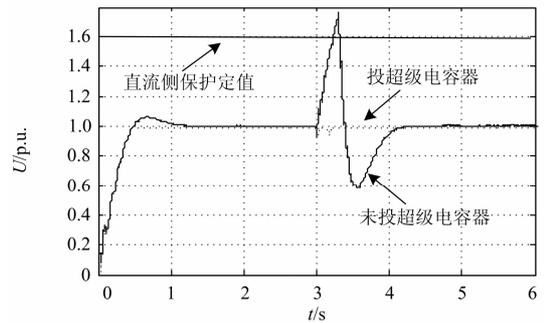
Table 2 Short-circuit current injection capability of different

types of power source

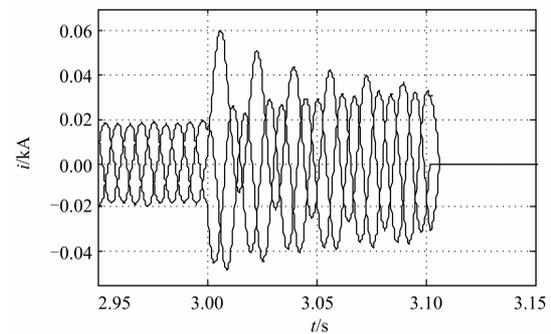
电源类型	故障电流注入能力
逆变型电源	100%~400%, 时间由逆变器保护及控制系统决定
同步电机	500%~1000%, 期间渐渐衰减至200%~400%
感应电机	500%~1000%, 在0.2 s内渐渐衰减至可忽略



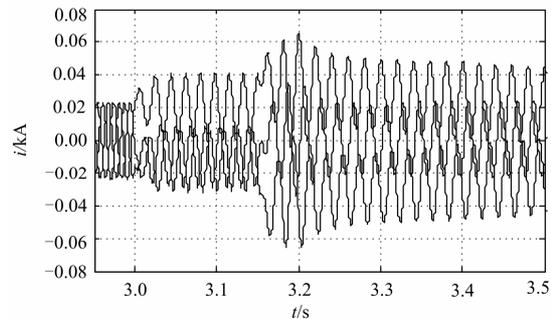
(a) 并网点电压



(b) 光伏电站逆变器直流侧电压



(c) 不具有LVRT能力时并网点电流



(d) 具有LVRT能力时并网点电流

图 4 故障时光伏电站动态特性曲线

Fig. 4 Dynamic curve of failure characteristics of photovoltaic power plant

相对于其他类型分布式电源, 并网PV系统的故障电流注入能力有限且取决于逆变器控制装置<sup>[11-13]</sup>。

综上, 具有 LVRT 的 PV 系统接入电网时, 在电网故障期间将对故障点提供持续的幅值有限的短路电流, 无 LVRT 能力光电站故障特性由变流器保护模块的限值决定, 在电压跌落较大时不能提供持

续电流。

### 3 PV 从配电网侧接入时对保护影响

对于分别接入 10~35 kV、380 V 系统的中小型 PV 电站，其所发电能以就地消纳为主。具有 LVRT 能力的 PV 电站的接入使配电网由传统的单电源变为双端甚至多端网络，改变了系统中故障电流的分布，将对配电网中电流保护、重合闸、熔断器等性能产生极大影响。

#### 3.1 对阶段式电流保护的影响

35 kV 及以下电压等级的配电网主馈线保护多以三段式电流保护为主保护，图5为PV电站接入典型配电网。配电网故障时，由于PV相对于保护位置不同，对故障电流有助增或反向电流作用，流过保护的短路电流可能增大或减小。同时，PV短路电流随运行工况的变化而变化，将给三段式电流带来严重影响，主要如下<sup>[14]</sup>所述。

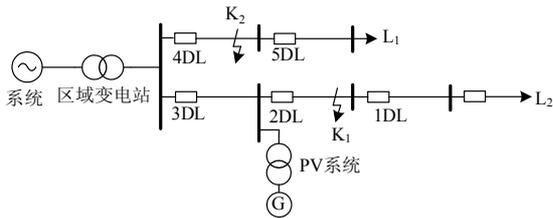


图5 PV电站接入典型配电网示意图

Fig. 5 Diagram of PV grid on power distribution system

##### 1) 致使本线路保护灵敏度降低及拒动

如图5，PV系统从中端某母线上并网，保护2DL、1DL的定值一般按配网最大运行方式，即PV系统满发时整定。若K1点故障时，PV系统由于光照、温度、云层遮挡等因素出力减少或停运，则2DL处短路电流必将随PV系统出力较少而减少。进而导致保护2DL处速断保护范围减小，灵敏度降低，严重时则会拒动。

##### 2) 致使上游瞬时速断保护误动作并失去选择性

图5中，当短路故障发生在K2处，PV系统向短路点提供短路电流，当PV达到一定容量时且3DL无方向元件，则3DL误动，保护失去选择性。同时保护4DL范围延长，灵敏度提高，使其与保护5DL无法配合。

针对并网 PV 系统功率随机变化特性，研究较多的是基于通信对配电网分区的保护方案，各区域由具有通信和检同期功能的快速响应断路器连接。文献[15]提出配电网内所有电源均配置高精度同步相量测量装置(PMU)，主网与配网连接处装设可具有通信功能且可实现大量数据运算的保护测控智能

装置。当故障发生时，智能测控装置据各 PMU 参数，快速实现故障的辨识和定位，进而跳开相应区域断路器，故障清除后再检同期重合。随着智能电网技术的发展上述方法将是未来含 PV 的配电网保护发展的趋势。

#### 3.2 对重合闸的影响

##### 3.2.1 PV反孤岛保护对重合闸的影响

目前，小型 PV 电站为防孤岛现象带来的危害要求其必须具有防孤岛保护能力。据现场经验可知，配电网中线路断路器的开断时间为分闸时间  $t_o$  和燃弧时间  $t_a$  之和，一般为 0.1~0.2 s。断路器的重合时间为合闸时间  $t_c$  与预击穿时间  $t_{ps}$  之差，一般为 0.5~1.5 s，从保护动作到重合闸重合成功一般最快需要 0.6 s，配置有重合闸的配电网如图 6。

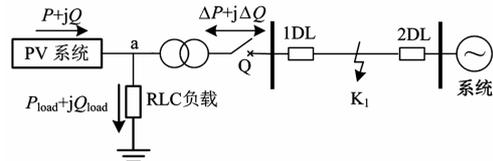


图6 配置有重合闸的配电网示意图

Fig. 6 Diagram of PV grid on power distribution system with reclosing devices

图6中，出口线路按双电源配置电流保护并配备有三相自动重合闸。当K1发生故障时若1DL、2DL能正确跳闸，PV系统功率与RLC负荷功率平衡，且a点电压和频率位于1.3节中的区域A4，则PV与负荷将孤岛运行。此时，若PV孤岛保护动作时间小于1DL断路器动作至重合的时间( $t_o+t_a+t_c-t_{ps}$ )即1DL处重合闸重合之前孤岛保护已将PV切除，则重合成功；若大于该时间，则可能出现1DL非同期重合闸。

由以上分析的，小型PV电站出口线路重合闸配置原则为重合时间与断路器动作时间之和必须大于PV电站孤岛保护的的动作时间，否则必须采用具有检同期功能重合闸。

##### 3.2.2 PV 的 LVRT 对重合闸的影响

当 PV 具有 LVRT 能力时，系统侧线路保护因故障跳开后，PV 电站将在电网电压跌落期间保持并网运行，其对重合闸的性能将产生很大影响。图6中，K1点故障时，系统侧和PV侧同时向K1提供电流，由于系统侧短路电流较大，2DL能正常动作。而PV为逆变器型电源且短路电流易受温度、光照等影响，其故障电流幅值非常有限。若短路电流未达1DL电流定值，则1DL将不动作，PV电站在其最低LVRT时间段内继续向短路点提供短路电流，故障并未有效清除。

为保证供电可靠性, 配网重合闸时间最快为0.6 s。由PV电站LVRT要求得故障时PV切除时间随并网点电压的跌落程度不同, 可能在0~3 s间任一点, 具有不确定性。若PV电站切除时间大于0.6 s, 则其LVRT能力对重合闸无影响。若切除时间小于0.6 s, 则PV系统产生以下潜在威胁: 1)重合时PV电站与系统相角差可能很大, 系统侧重合闸非同期重合使PV逆变器烧坏或电网设备损坏; 2)在失去系统侧电压后, 并网PV系统继续对短路点提供电流, 阻碍了电弧的熄灭, 使瞬时故障变成永久性故障。

故障时 PV 电站 LVRT 运行期间, 本侧保护如何根据有限短路电流实现故障判别并在对侧重合闸动作之前将故障清除是解决 LVRT 对重合闸影响问题的关键。当线路三相短路时, PV 电站短路特性与其输出功率存在一定关系, 文献[16]研究得 PV 电站输出功率变化量与保护处的短路电流变化量成正比关系, 提出了本侧电流保护的定值依靠通信装置随 PV 电站出力、短路电流大小而动态变化的保护方案。

### 3.3 对重合器与熔断器配合的影响

配电网分支线路一般采用重合器(Recloser, R)与熔断器(Fuse, FU)配合的保护方案。R 和 FU 的开断具有双时性和反时限特点, 二者均按一快一慢原则整定。

图 7 为配电网线路配置熔断器和重合器示意图,  $I_R$  与  $I_F$  分别为流过 R 和 FU 的故障电流。当配电系统中不接任何 PV 系统时, FU 与 R 间配合曲线如图 8 所示,  $I_M$  为 R 与 F 间的配合裕度。具体动作原则为: 当分支线路熔断器 FU 的下游故障且满足  $I_{fmin} \leq I_R \leq I_{fmax}$  时, 首先由 R 在 FU 熔断前快速分闸, 然后重合。若为瞬时故障则 R 重合成功; 若为永久故障则 R 重合失败且产生故障冲击电流, 此时相同故障电流下 R 慢速分断时间大于 FU 的熔断时间, FU 熔断来实现故障切除。

当 PV 系统接入配电网分支线路, 图 7 所示本文分别从位置 1、2、3 接入时讨论 R 与 F 的配合问题。

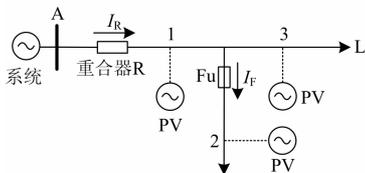


图 7 配置熔断器的配电网分支线路  
Fig. 7 Distribution branch lines with fuse

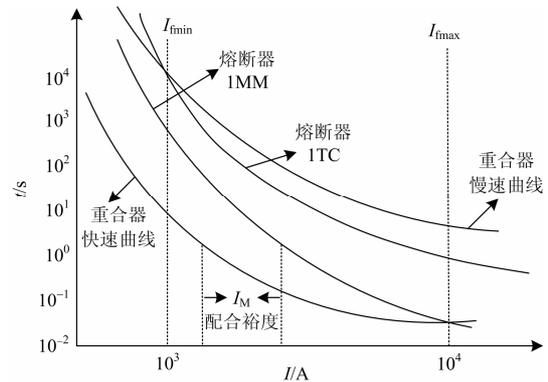


图 8 重合器 R 与熔断器 FU 配合曲线  
Fig. 8 Coordinate curve of the fuse and recloser

1) PV 从位置 1 处并网时, FU 下游发生故障, PV 助增作用使  $I_F$  增大, 同时  $I_R$  减小。如果  $I_F > I_{fmax}$ , 由图 8 可得 FU 的熔断时间小于 R 的快速分闸时间, FU 在重合器分断前熔断, 这是不允许的。如果  $I_F < I_{fmax}$ , 此时若  $I_F - I_R > I_M$ , FU 在 R 分断前熔断; 若  $I_F - I_R < I_M$ , R 在 FU 熔断前分断, 然后重合, 若为瞬时故障则 R 重合成功; 若为永久故障则 R 重合失败, FU 熔断以清除故障。此时若 FU 因为其他原因不能熔断时, 则 R 按慢速曲线分断并将 R 的合闸闭锁。

2) PV 从位置 2 处并网时, FU 与 PV 并网点间线路短路时, 若为金属性短路则 PV 的接入对  $I_F$  大小无影响, 即 PV 的接入不影响 FU 与 R 的配合; 若为经过渡电阻接地短路, 则  $I_F$  和  $I_R$  会减小, R 的分断和重合时间被延长。

3) PV 从位置 3 处并网时, FU 下游发生故障, 在光伏短路电流的作用下  $I_F$  增大且  $I_R$  减小, 分析结果同 1) 相似。当 R 与 PV 之间发生短路时, 若金属性短路则不影响 FU 与 R 间的配合, 若经过渡电阻则 R 的分断和重合时间被延长。当位置 3 下游故障时,  $I_R$  减小, R 的分断和重合时间被延长。当 R 上游故障时,  $I_F = 0$ , R 将会分断, 在两次非同期后闭锁合闸。

## 4 PV 从输电网侧接入时对保护的影响

大型 PV 电站一般接入输电网, 国网企标和国标中要求大型 PV 电站必须具有 LVRT 能力, 大型 PV 电站的 LVRT 能力对其逆变器直流侧保护、反孤岛保护、升压变保护、外送线路保护的影响问题如下。

### 4.1 LVRT 对直流侧保护的影响

传统 PV 电站直流侧装有欠/过压保护。当外部发生故障或并网点电压跌落时, 并网逆变器的输出功率将受到限制, 能量积聚在并网逆变器直流侧,

导致直流侧电压迅速升高。不具备LVRT能力的并网逆变器，在电压过高时直流侧过压保护瞬时动作，逆变器在0.1 s内脱网。

然而，具有LVRT能力的并网逆变器在电压跌落一定程度时不能脱网，这就要求故障时既要保持逆变器不脱网运行，又不能损坏逆变器。因此，PV电站LVRT对逆变器直流侧保护提出了更高的要求。光伏逆变器直流侧卸荷电路如图9。

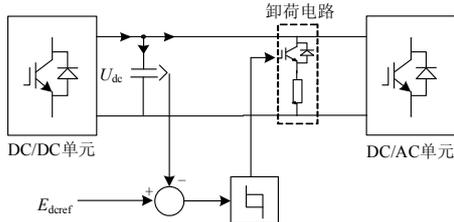


图9 光伏逆变器直流侧卸荷电路示意图  
Fig. 9 Unloading circuit of the inverter DC side

图9中具有LVRT能力的直流侧保护由IGBT控制电路、卸荷电路等组成，以直流侧电压 $U_{dc}$ 为投入卸荷电路的判断条件，通过IGBT来控制其导通与关断。当 $U_{dc}$ 大于电压上限时，不发出切机指令，而是投入卸荷电路，吸收直流侧积聚的能量；当 $U_{dc}$ 低于电压下限时，卸荷电路退出运行，使直流侧电压稳定在一定范围，从而实现LVRT。对传统PV电站进行LVRT改造时，需要将直流侧欠/过压保护更换为由IGBT控制的卸荷电路。

#### 4.2 LVRT对反孤岛保护的影响

当并网点电压跌落时，反孤岛保护要求并网点电压 $V < 50\%$ 时其最大动作时间为0.12 s，这与图2中国网LVRT标准中并网点电压跌落至20%时PV电站不脱网运行0.625 s的要求相矛盾。

大型并网PV电站发电一般外送，现场运行中不可能遇到孤岛情况，国家标准GB/T19964-2012中不要求大型PV电站具有孤岛检测的能力，但必须符合LVRT的要求。但是，对于同时具有上述两种功能的逆变器，其LVRT和反孤岛保护在数值和时间上应相互配合，其协调配合关系有待深入研究。同时，我国在制定PV系统国标时必须充分考虑PV系统反孤岛保护时间与LVRT能力的配合。

#### 4.3 LVRT对主变保护的影响

PV电站主变保护一般配备有电流纵差保护。不具有LVRT的PV电站，故障时其迅速脱网，相当于单电源系统，其对主变保护没有影响。当具有LVRT能力后，此时含PV电站的系统为双电源系统。PV电站主变纵差保护如图10所示。

图10中，当区内发生故障，两侧短路电流分别

为PV侧短路电流 $I_p$ 和网侧短路电流 $I_s$ ，但PV电站短路电流随逆变器类型(单级型或多级型)、故障时逆变器控制策略、运行工况等因素变化而变化是区别于系统侧短路电流的，流入二次侧差动继电器的电流 $I'_s + I'_w \neq 2I_s$ 是变化量；同理，区外故障时二次侧继电器感受到的电流为 $I'_s - I'_w \neq 0$ ，主变差动保护的動作性能将会受到很大影响。针对具有LVRT能力的PV电站主变差动保护的适应性有待进一步研究。

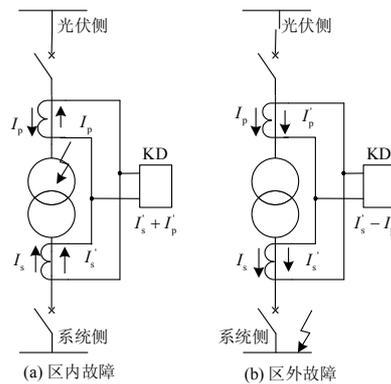


图10 PV电站主变纵差保护示意图  
Fig. 10 Differential protection principle of PV main transformer

#### 4.4 LVRT对送出线路保护影响

##### 4.4.1 LVRT对线路光纤纵差保护影响

大型PV电站一般接入66 kV或更高电压等级的输电线路，线路主保护一般采用光纤纵差保护，并配备三段式距离后备保护。

当PV电站送出线路以外系统侧发生故障时，电网保护可以在PV电站最低LVRT时间内(1 s)清除故障，从而保证PV电站并网运行。当PV电站送出线路发生故障时，同主变差动保护一样，流入差动继电器的电流并不为零，送出线的电流纵差保护可能误动。

##### 4.4.2 LVRT对线路距离保护的影响

高压输电线路短路一般都不是金属性的，而是在短路点存在过渡电阻，图11所示PV系统出口高压线路经过渡电阻短路。

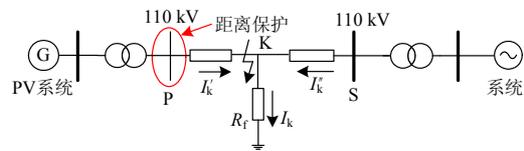


图11 输电线路经过渡电阻短路示意图  
Fig. 11 Schematic circuit of transmission lines ground fault via transition resistance

具有 LVRT 能力的 PV 系统在电网故障时, 可以提供一定幅值的持续短路电流。当 K 点发生经过渡电阻接地的故障时, 系统侧电源和本侧 PV 电站对过渡电阻有助增电流作用, 过渡电阻  $R_f$  随倾斜角的不同将呈现电抗性或电容性, 光电侧距离保护的测量阻抗  $Z_F$  将随过渡电阻的容抗性变化而减小或增大。可使距离保护保护范围缩短或引起保护装置的超范围动作<sup>[17]</sup>。过渡电阻对保护测量阻抗影响及改进措施如图 12, 图 12(a)  $R_f$  呈现容性, 测量阻抗  $Z_F$  进入保护的動作范围引起保护误动; 图 12(b)  $R_f$  呈现感性, 使  $Z_F$  在保护范围之外即保护拒动。

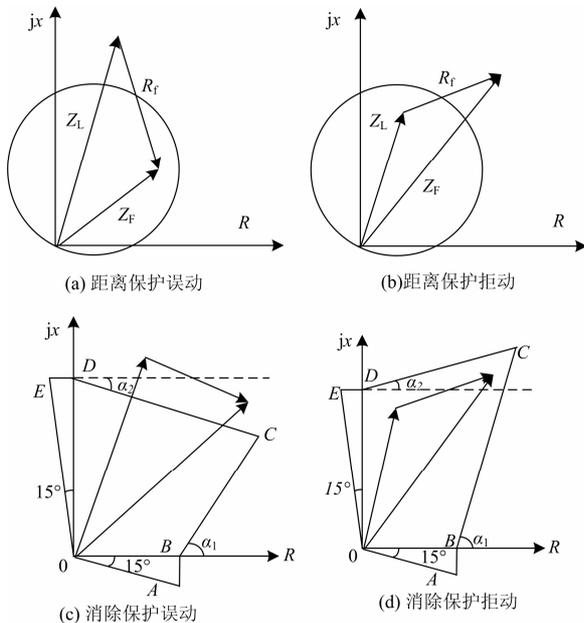


图 12 过渡电阻对保护测量阻抗的影响及改进  
Fig. 12 Impact on the transition resistance on measurement resistance and improvement

针对消除过渡电阻对距离保护测量阻抗的影响问题, 目前研究较多的是基于人工神经网络 (Artificial Neural Networks, ANN) 的倾斜角自适应距离保护。如图 12(c)、图 12(d), 多边形阻抗继电器的 BC 边可在  $R$  轴方向独立移动以适应大小不同的过渡电阻, 通常  $\alpha_1$  取  $45^\circ \sim 60^\circ$ 。倾斜角  $\alpha_2$  的选取应避免在输电线路末端发生短路时保护误动和拒动。当故障发生时将保护测得的电压、电流等参数输入已训练好的具有快速计算能力 ANN 模型, 经实时计算得到倾斜角  $\alpha_2$ , 继而使继电器 DC 边以图中阻抗整定值为轴心通过旋转  $\alpha_2$  来克服过渡电阻影响。

## 5 结论

针对 PV 并网的相关标准, 分析了具有 LVRT

的光电站故障时电流特性, 并基于 PV 故障特性深入研究了具备 LVRT 的 PV 系统分别接入配电网和输电网时, 光伏电站 LVRT 特性、反孤岛保护等对 PV 自身保护及电网继电保护的影响和应注意的问题。主要结论如下:

(1) 具有 LVRT 的 PV 系统接入电网时, 故障期间将对故障点提供持续的短路电流, 无 LVRT 能力光伏电站故障特性由变流器保护模块的限值决定, 在电压跌落较大时不能提供持续电流。

(2) 具有 LVRT 能力 PV 系统从配电网侧接入时: ①将会致使阶段式电流保护拒动或误动; ②故障期间, PV 系统反孤岛检测可能导致线路对侧重合闸装置非同期重合, 现场中必须合理配置出口线路保护的重合闸动作时间, 使其大于孤岛保护时间; ③具有 LVRT 功能光伏电站, 故障时可能会出现对侧重合闸重合于故障的情况; ④分支线路重合器与熔断器将会出现无法配合的问题, 或使重合器重合延时。

(3) 具有 LVRT 能力 PV 系统从输电网侧接入时: ①对同时具有 LVRT 和孤岛保护的逆变器, LVRT 时间与反孤岛保护时间要求是相互矛盾的; ②PV 为逆变器型电源且短路电流易受温度、光照等影响, 可能使线路或主变电流纵差保护区内故障时拒动, 区外故障误动; ③两侧电源电流相角差的存在, 距离保护将会拒动或误动。

光伏电站接入后, 出力具有波动性和间歇性特点, 且故障时只能提供有限的故障电流。光伏并网有关保护方面应该重视如何根据 PV 故障特性提高 PV 接入电网后原有保护的适应能力及 PV 自身低电压穿越与网侧保护、重合闸在时间上的协调匹配等研究问题。

## 参考文献

- [1] RAVINDRA H, FARUQUE M O, MCLAREN P, et al. Impact of PV on distribution protection system[C] // North American Power Symposium (NAPS), 2012.
- [2] 盛四清, 侯磊, 范辉, 等. 光伏电站接入孤立电网的动态建模与稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 126-131.  
SHENG Siqing, HOU Lei, FAN Hui, et al. Dynamic modeling and stability analysis of photovoltaic power station access to isolated grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 126-131.
- [3] 徐瑞东, 陈昊, 胡义华, 等. 基于高斯过程的光伏阵列故障定位[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 249-256.  
XU Ruidong, HAO Chen, HU Yihua, et al. Research on fault localization of PV array based on Gaussian process[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2013, 28(6): 249-256.
- [4] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223.  
YANG Ming, ZHOU Lin, ZHANG Dongxia, et al. Analysis of network stability of large-scale photovoltaic power plants considering the impact of impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223.
- [5] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.  
CHEN Quan, LI Lingdong, WANG Qunjing, et al. Research on modeling and simulation of photovoltaic grid-connected systems and the voltage stability of distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [6] 胡文翠, 王明渝, 钱坤, 等. LCL 型并网逆变器电流控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 123-128.  
HU Wencui, WANG Mingyu, QIAN Kun, et al. Design of current controller of LCL-type grid inverter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 123-128.
- [7] 梁海峰, 冯燕闯, 刘子兴, 等. 基于无差拍控制的光伏电站低电压穿越技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 110-115.  
LIANG Haifeng, FENG Yanchuang, LIU Zixing, et al. Research on LVRT technology of deadbeat control of photovoltaic power plants[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 110-115.
- [8] 赵杰, 张艳霞, 宣文博, 等. 分布式电源中逆变器的故障特征和保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 83-87.  
ZHAO Jie, ZHANG Yanxia, XUAN Wenbo, et al. Fault characteristics of inverter in distributed Power and protection programs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 83-87.
- [9] GB/T19964-2012 光伏电站接入电力系统技术规定[S]. GB/T19964-2012 technical requirements of photovoltaic power station access to power system[S].
- [10] IEEE Std 929-2000 IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems[S].
- [11] 胡成志, 卢继平, 胡利华, 等. 分布式电源对配电网继电保护影响的分析[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(8): 36-39.  
HU Chengzhi, LU Jiping, HU Lihua, et al. Analysis of the impact of distributed power on distribution network for the protection[J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(8): 36-39.
- [12] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 75-79.  
YANG Guohua, YAO Qi. Research on influence simulation of grid photovoltaic power line protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 75-79.
- [13] 韩奕, 张东霞. 含逆变型分布式电源的微网故障特征分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 147-152.  
HAN Yi, ZHANG Dongxia. Research on fault feature of micro-inverter type distributed power network[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 147-152.
- [14] 王希舟, 陈鑫, 罗龙, 等. 分布式发电与配电网保护协调性研究[J]. 继电器, 2006, 34(3): 15-19.  
WANG Xizhou, CHEN Xin, LUO Long, et al. Studies of coordination of distributed generation and distribution network protection[J]. Relay, 2006, 34(3): 15-19.
- [15] 李乃永, 梁军, 赵义术, 等. 考虑分布式电源随机性的配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 33-38.  
LI Naiyong, LIANG Jun, ZHAO Yishu, et al. Protection program of distribution network considering the randomness of distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 33-38.
- [16] 余琼, 余胜, 李晓晖, 等. 含分布式电源的配网自适应保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 110-115.  
YU Qiong, YU Sheng, LI Xiaohui, et al. Adaptive protection solutions of distribution network with distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 110-115.
- [17] 张晶晶, 曹锐. 距离保护特性元件躲过渡电阻能力分析研究[J]. 继电器, 2004, 32(6): 17-19, 26.  
ZHANG Jingjing, CAO Rui. Analysis of the ability to hide the transition resistance of distance protection element[J]. Relay, 2004, 32(6): 17-19, 26.

收稿日期: 2014-04-23

作者简介:

张海玉(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源及其并网技术; E-mail: 651797912@qq.com

晁勤(1959-), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究。