

## 光伏电站弱电源特性对送出线路继电保护的影响

瞿继平<sup>1</sup>, 吴兴全<sup>1</sup>, 闫凯<sup>2</sup>, 张保会<sup>2</sup>

(1. 甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 光伏电站的弱电源特性会对送出线路现有继电保护的動作性能产生严重影响。研究了光伏发电系统的故障电流特征, 分析了弱电源特性对送出线路电流差动保护和距离保护動作性能的影响, 基于此指出现有保护配置存在的问题。利用 PSCAD 上搭建的光伏发电系统电磁暂态模型对理论分析进行仿真验证。理论分析和仿真验证结果都表明, 光伏电站弱电源特性会造成送出线路的光伏侧电流保护不能启动、差动电流保护灵敏度下降以及距离保护误动和拒动。最后给出了光伏电站送出线路保护配置的建议。

**关键词:** 光伏电站; 故障特征; 送出线路; 弱电源特性; 继电保护; 故障分析; 差动保护; 距离保护

**中图分类号:** TM 73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.023

## 0 引言

由于太阳能资源地理分布的差异性<sup>[1]</sup>, 大规模光伏发电集中接入电力系统是我国光伏并网的重要形式<sup>[2-3]</sup>。这种并网形式是通过专用的送出线路将大中型光伏电站接入电网中。人们对光伏系统的故障电流特性已有一定的认识<sup>[4-6]</sup>, 但仍未见针对光伏电站送出线路故障特性的研究, 针对风能、太阳能等新能源接入电网引起的电网特性问题的分析还有待进一步完善<sup>[7-12]</sup>。由于光伏电站的故障电流受到光伏逆变器低电压穿越(LVRT)控制的限制<sup>[13]</sup>, 且单个光伏电站的容量占所接入系统容量的比例很低, 光伏侧的故障电流受限是该线路不同于常规线路的最大特性, 该特性会对送出线路现有继电保护的動作性能产生严重影响。

光伏电站送出线路配备快速动作的主保护和线路两侧的后备保护。根据现行规定, 一般情况下, 专线电网接入公用电网的光伏电站宜配置光纤电流差动保护作为主保护<sup>[14]</sup>, 10 kV 和 35 kV 送出线路配置阶段式电流保护作为后备保护, 而 110 kV 送出线路的后备保护一般为距离保护和零序电流保护<sup>[15]</sup>。

目前尚未见到关于光伏电站送出线路继电保护的分析和研究。因此, 本文分析送出线路继电保护的動作性能, 考察现有保护配置是否存在问题, 并利用光伏发电系统电磁暂态模型进行仿真验证, 提出保护配置的建议, 具有一定的实际意义。

## 1 光伏送出系统故障特征分析

电网故障期间, 为保证光伏逆变器具备 LVRT 能力, 控制环节必须对电流进行限幅, 以保护电力电子开关器件不过流。限制故障时电流的大小一般不超过逆变器额定负载电流的 1.1 倍<sup>[16]</sup>, 即故障期间电流不会显著增大, 这会对依靠电流大小门槛值来识

别故障的保护造成严重的影响。当送出线路故障时, 流过光伏送出侧保护安装处的故障电流与故障前的正常电流接近, 故电流保护 I、II 段元件不能正常动作, 电流保护 III 段元件按常规方法整定也难以可靠动作, 而流过系统侧保护安装处的故障电流与光伏电源特性无关, 故系统侧电流保护可以正常动作。因此, 送出线路的光伏侧电流保护在区内故障时拒动, 而系统侧电流保护可以正常动作。

一般情况下, 光伏电站所接入系统的短路容量至少为光伏电站额定容量的 20~30 倍, 故送出线路故障时系统提供的短路电流一般至少为额定负荷电流的 20~30 倍。因此, 系统与光伏电站提供的故障电流大小相差悬殊, 光伏电站的弱电源特性十分显著。

图 1 为某 110 kV 光伏电站送出线路故障示意图, 保护 1 和保护 2 分别为光伏侧和系统侧的距离保护,  $R_g$  为过渡电阻,  $I_{pv}$  和  $I_s$  分别为光伏电站和系统提供的故障电流。

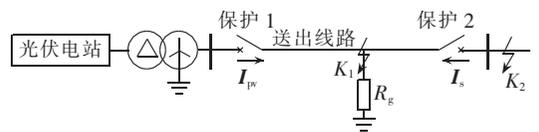


图 1 某 110 kV 光伏电站送出线路故障示意图  
Fig.1 Schematic diagram of outgoing transmission line fault of a 110 kV PV station

设  $I_s$  滞后  $I_{pv}$  的相位角  $\theta \in [-180^\circ, 180^\circ]$ , 两者倍数值  $M$  为:

$$M = \left| \frac{I_s}{I_{pv}} \right| \quad (1)$$

$\theta$  与光伏逆变器的 LVRT 控制方式和故障严重程度密切相关。

**a.** 当逆变器在故障期间发送无功(规程要求光伏电站在故障期间提供无功支撑)时, 一般有  $\theta < 0^\circ$ 。发送的无功功率越多,  $I_{pv}$  的无功电流分量越大, 则  $I_{pv}$  的相位越滞后,  $\theta$  越小。

b. 当逆变器在故障期间仅发送有功(实际运行的光伏电站在故障期间往往无功支撑能力不足)时,一般有 $\theta > 0^\circ$ 。这是由于光伏电站的送出变压器和各光伏发电单元的升压变压器都要消耗无功,而光伏电站的无功补偿装置(电容器、动态无功补偿装置等)受母线电压下降和装置响应速度不够快的影响,在故障期间补偿的无功功率不足,光伏电站要从外界吸收一定的无功。光伏电站从系统吸收的无功越多,则 $I_{pw}$ 的相位越超前, $\theta$ 越大。

c. 故障后 $I_{pw}$ 的相位变化要经历一个暂态过程,导致 $\theta$ 变化不定。这是由于逆变器的控制器中锁相环的响应有暂态过程。锁相环的作用是提取逆变器出口处的电压相位作为控制器的参考信号。故障越严重,锁相环的暂态响应波动越剧烈;当故障特别严重时,逆变器出口电压降得很低,锁相环的输入信号太小,其响应难以达到稳态, $\theta$ 在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 范围内变化。故障的严重程度受过渡电阻、故障点位置和故障类型的影响。

而 $M$ 约等于系统短路容量与光伏电站额定容量的比值。光伏电站容量占接入系统的容量比例越小,则 $M$ 越大,一般至少为 $20 \sim 30$ ,比一般线路大得多。

设光伏侧保护 1 的测量电压为 $U_m$ ,保护安装处到故障点的线路压降为 $U_k$ ,过渡电阻上的压降为 $U_g$ ,其中光伏侧和系统侧的故障电流在过渡电阻上产生的压降分别为 $U'_g$ 和 $U''_g$ ,则上述电压、电流之间的关系为:

$$\begin{cases} U_m = U_k + U_g = U_k + (U'_g + U''_g) \\ U_k = I_{pw} Z_k \\ U'_g = I_{pw} R_g \\ U''_g = I_s R_g \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)、(2)不难看出:

$$U''_g = M U'_g \quad (3)$$

其中, $U''_g$ 和 $U'_g$ 分别为 $U''_g$ 和 $U'_g$ 的幅值。由于 $M$ 很大,所以 $U''_g$ 比 $U'_g$ 大得多,因此,过渡电阻上的压降 $U_g$ 主要由系统故障电流 $I_s$ 产生的压降 $U''_g$ 形成,则光伏侧测量电压 $U_m$ 主要是过渡电阻上的电压。

特别强调,光伏电站的上述弱电源特性主要体现在非接地故障中。从图 1 可以看出,光伏电站本身在不接地方式下运行,零序网络仅包含送出变压器和送出线路。当送出线路发生接地故障时,光伏侧的零序阻抗是变压器的零序阻抗,与光伏电站无关,其大小远小于正、负序阻抗,因此零序电流较大,这使得两侧电流幅值比 $M$ 比不接地故障时小得多。

参考西北地区某 110 kV 光伏电站实际参数在 PSCAD/EMTDC 上搭建图 1 所示光伏送出系统的模型。该光伏电站电源接入容量为 50 MW,系统短路容量 $S_k = 1500 \text{ MV} \cdot \text{A}$ (取最小运行方式),送出线路长度 $L = 15 \text{ km}$ ,线路阻抗 $z_1 = 0.132 + j0.385 \Omega/\text{km}$ 。经计算,送出线路的额定负荷电流 $I_N = 262.4 \text{ A}$ 。

给定该光伏电站模型的逆变器 LVRT 控制策略为故障期间发送一定无功功率的方式,光伏电站出力为额定功率的 80%。当送出线路中点 $K_1$ 处发生过渡电阻为 $3 \Omega$ 的三相短路故障时, $I_{pw}$ 和 $I_s$ 的幅值分别为 245 A 和 5 204 A,得 $M = 21.2$ ,同时测得 $\theta$ 达到稳态后为 $-62.5^\circ$ 。而 $U_m$ 、 $U_k$ 、 $U_g$ 的幅值分别为 9.30 kV、0.15 kV 和 9.21 kV,由此可见, $U_k$ 幅值很小, $U_g$ 是 $U_m$ 的主要分量。A 相 $I_{pw}$ 和 $I_s$ 的瞬时值如图 2 所示。

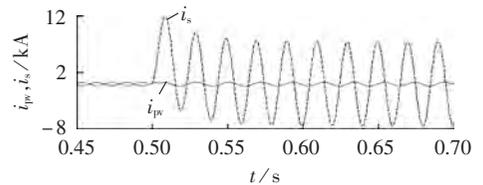


图 2 送出线路故障时光伏侧和系统侧的故障电流  
Fig.2 PV- and system-side faulty currents when fault occurs on outgoing transmission line

将光伏电站模型的逆变器 LVRT 控制策略改为故障期间发送定有功电流的方式,其他条件不变,故障期间 $I_{pw}$ 和 $I_s$ 的相角差 $\theta$ 变为 $105^\circ$ ,其变化范围比一般线路大得多。该故障条件下 2 种控制策略下 $\theta$ 的变化如图 3 所示。

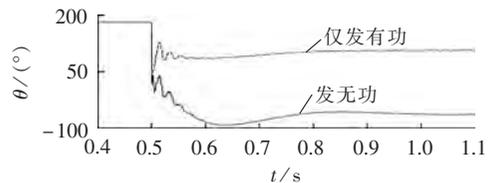


图 3 发无功和仅发有功时送出线路两侧故障电流相角差  
Fig.3 Faulty current phase difference between two sides of outgoing transmission line for generator with and without reactive power generation

将故障类型改为单相接地故障,其他条件不变,测得相应故障回路的两侧电流幅值比 $M = 5.9$ 。受零序电流的影响,与非接地故障时相比,单相接地故障下的 $M$ 要小得多。

## 2 光伏送出线路保护动作性能分析

### 2.1 电流差动保护

当光伏送出线路故障时,电流差动保护所采用的两端故障电流分别由光伏电站和系统提供。光伏电站送出线路配置的是分相电流差动保护,采用两端电流的相量和作为动作量,在理论上不受电源类型、过渡电阻和运行工况的影响,可瞬时切除区内故障。图 4 为电流差动保护的動作特性( $k$ 为斜率),动作方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} I_D > I_H \\ I_D > 0.6 I_B, \quad \frac{5}{3} I_H \leq I_B < 5 I_H \\ I_D > 0.8 I_B - I_H, \quad I_B \geq 5 I_H \end{cases} \quad (4)$$

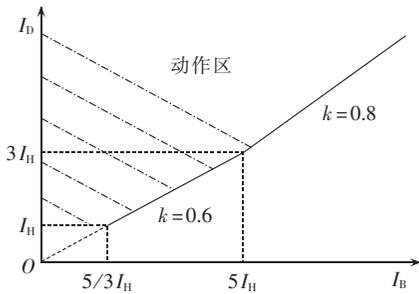


图 4 电流差动保护动作特性示意图

Fig.4 Operating characteristic diagram of current differential protection

其中,差动电流  $I_D = |I_{pv} + I_s|$ ; 制动电流  $I_B = |I_{pv} - I_s|$ ;  $I_H$  为最小启动电流。

当送出线路发生区内故障时,由于光伏电站的弱电源特性,系统侧故障电流幅值  $I_s$  远大于光伏侧故障电流幅值  $I_{pv}$ ,  $I_{pv}$  几乎可以忽略。送出线路的故障类似于单端电源线路故障,差动保护的灵敏度(差动电流与制动电流的比值)很低,故弱电源特性降低了电流差动保护的灵敏度。

## 2.2 距离保护

由于系统提供的故障电流远大于光伏电站提供的故障电流,下面分析故障位置不同时距离保护因过渡电阻影响可能产生的问题。

### a. 区内故障可能拒动。

区内故障时,距离保护因没有耐受过渡电阻能力而可能拒动。图 5 为送出线路中点  $K_1$  处(见图 1)发生区内相间故障时,光伏侧距离保护拒动的示意图。图中,  $Z_m$  为测量阻抗,  $Z_k$  为保护安装处点  $O_p$  到故障点  $K_1$  的线路阻抗,测量电流  $I_m = I_{pv}$ ; 实线圆为距离保护 I 段的方向圆动作特性,虚线圆为  $Z_m$  可能的取值组成的轨迹。各物理量的关系满足式(5)。

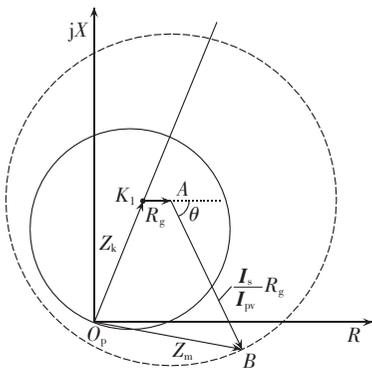


图 5 区内故障时光伏侧距离元件动作特性图

Fig.5 Operating characteristic chart of distance protection at PV side when in-zone fault occurs

$$Z_m = \frac{U_m}{I_m} = (Z_k + R_g) + \frac{I_s}{I_{pv}} R_g \quad (5)$$

由图 5 可知,当线路中点  $K_1$  处发生区内故障时,尽管过渡电阻  $R_g$  很小,但由于  $M(M = |I_s/I_{pv}|)$  很大,

故偏移矢量  $\vec{AB}$  的模值可能比故障线路阻抗的模值  $|Z_k|$  还要大,则测量阻抗  $Z_m$  可能落在动作区外,导致距离保护元件拒动。

此外,由于受故障条件和光伏逆变器 LVRT 控制方式的影响,光伏侧故障电流  $I_{pv}$  的相角不确定。因此,两侧故障电流的相角差  $\theta$  也不确定。测量阻抗  $Z_m$  落在以点 A 为圆心、 $MR_g$  为半径的圆轨迹上。

显然,一般线路的距离保护虽然也受到过渡电阻的影响,但由于  $M$  较小,  $\theta$  也较小且固定,  $Z_m$  的偏移一般不会过大,偏移方向较固定,可通过改善距离保护元件的动作特性来提高其耐受过渡电阻能力。然而,对于光伏电站送出线路,由于两侧故障电流的幅值比  $M$  很大、相角差  $\theta$  不确定,测量阻抗  $Z_m$  受过渡电阻的影响远比一般线路的距离保护要大。由图 5 可知,不论  $\theta$  的大小和变化情况,只要  $M$  较大,距离保护元件就极易在区内故障时拒动。

### b. 区外故障可能误动。

下级线路区外故障时,距离保护元件因没有耐受过渡电阻能力而可能误动。图 6 为送出线路下级出口  $K_2$  处(见图 1)发生区外相间故障时,光伏侧距离保护误动的示意图,图中各物理量含义与图 5 相同。

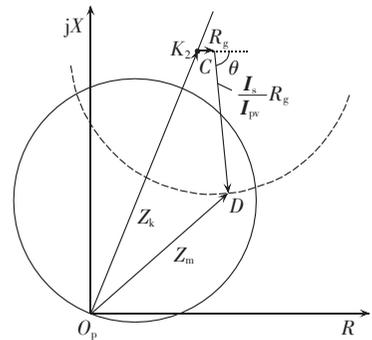


图 6 正方向区外故障时光伏侧距离元件动作特性图

Fig.6 Operating characteristic chart of distance protection at PV side when out-zone fault occurs in positive direction

由图 6 可知,当下级出口  $K_2$  处发生正方向区外故障时,尽管过渡电阻  $R_g$  很小,但由于系统侧与光伏侧故障电流的幅值比  $M$  很大且相角差  $\theta$  不确定,偏移矢量  $\vec{CD}$  的模值很大、方向不确定,测量阻抗  $Z_m$  落在以点 C 为圆心、 $MR_g$  为半径的圆轨迹上。测量阻抗  $Z_m$  很有可能落在动作区内,导致距离保护元件误动。

此外,系统侧距离保护在  $K_2$  处故障时也可能发生反方向故障的误动,参考图 6 便可作出其动作特性图,在此不再赘述。

由图 6 可知,距离保护元件在区外故障时的误动发生在  $\theta > 0^\circ$  时;当  $\theta < 0^\circ$ ,距离保护元件可能拒动,但不会误动。因此,距离保护元件误动发生在严重故障后的暂态过程中或逆变器在故障期间仅发送有功的条件下。

由以上分析可知,光伏电站送出线路距离保护在光伏侧极易发生拒动和误动,在系统侧极易发生反方向故障的误动。显然,这些误动和拒动均是由于距离保护的测距原理未考虑对端故障电流受过渡电阻的影响而造成的,一般均假设保护安装处电流与故障电流同相位,通过改进保护的動作区域提高耐受过渡电阻能力。而在光伏送出线路中,系统侧故障电流与光伏侧故障电流间较大的幅值比  $M$  与不确定的相角差  $\theta$  严重放大了原理性误差的影响,导致很小的过渡电阻也会造成距离元件的不正确动作。

c. 接地距离保护元件的耐受过渡电阻能力大于相间距离保护元件。

由第 1 节的分析可知,送出线路接地故障中的零序阻抗远小于正、负序阻抗,故零序电流成为故障电流的主要分量,缩小了两侧故障电流幅值的差距, $M$  比不接地故障时小得多。因此,接地故障时,测量阻抗因过渡电阻产生的偏移较小,接地距离保护元件比相间距离保护元件可耐受更大的过渡电阻。

综上所述,光伏电站提供的故障电流远小于系统提供的故障电流,导致送出线路距离保护耐受过渡电阻能力差,易发生误动与拒动。

### 3 仿真算例

用图 1 所示的模型对光伏电站送出线路的保护动作性能进行仿真验证。光伏侧和系统侧距离保护 I 段均为方向圆特性,定值均为线路阻抗的 85% ( $5.189 \angle 71.1^\circ \Omega$ )。设定图 1 中光伏电站模型的逆变器的 LVRT 控制策略为故障期间发送一定无功功率的方式。

送出线路电流差动保护的動作情况见表 1。在不同的故障类型和过渡电阻下,区内故障时均可靠动作,区外故障时均可靠不动作,动作的准确性完全不受光伏故障电流特性的影响。

表 1 送出线路电流差动保护動作情况  
Table 1 Action situation of current differential protection of outgoing transmission line

故障位置	过渡电阻/ $\Omega$	動作情况			
		AG	BC	BCG	ABC
区内故障( $K_1$ )	0	动作	动作	动作	动作
	50	动作	动作	动作	动作
	100	动作	动作	动作	动作
区外故障( $K_2$ )	0	不动作	不动作	不动作	不动作
	50	不动作	不动作	不动作	不动作
	100	不动作	不动作	不动作	不动作

然而,由于故障中  $I_s$  比  $I_{pw}$  大得多, $I_{pw}$  可忽略不计,则  $I_D \approx I_s$ 、 $I_B \approx I_s$ 。尽管电流差动保护可正确判断区内外故障,但由于光伏电站的弱电源特性,光伏侧故障电流很小,差动电流  $I_D$  与制动电流  $I_B$  接近,故差动保护的灵敏度降低。

表 2 和表 3 分别为送出线路中点  $K_1$  处故障时光伏侧和系统侧距离保护的動作情况。表 2、3 中,BCG 故障取 BG 回路测量阻抗,ABC 故障取 BC 回路测量阻抗;某些严重故障情况下测量阻抗没有稳态值,单下划线表示暂态过程中某一时刻对应的测量阻抗值,而其余测量阻抗均为稳态值;双下划线表示该動作结果不正确,后同。

表 2 区内故障时送出线路光伏侧距离 I 段動作情况  
Table 2 Zone-I action situation of distance protection at PV side of outgoing transmission line when in-zone fault occurs

过渡电阻/ $\Omega$	故障类型	测量阻抗幅值/ $\Omega$	测量阻抗相角/ $^\circ$	動作情况
0	AG	2.944	67.8	动作
	BC	3.057	70.5	动作
	BCG	3.024	71.8	动作
	ABC	3.026	71.7	动作
0.5	AG	3.616	48.2	动作
	BC	5.056	-22.9	<u>拒动</u>
	BCG	4.280	60.0	动作
	ABC	<u>4.382</u>	<u>-28.0</u>	<u>拒动</u>
5	AG	14.066	10.0	<u>拒动</u>
	BC	53.066	-23.6	<u>拒动</u>
	BCG	15.826	56.9	<u>拒动</u>
	ABC	35.893	59.9	<u>拒动</u>

表 3 区内故障时送出线路系统侧距离 I 段動作情况  
Table 3 Zone-I action situation of distance protection at system side of outgoing transmission line when in-zone fault occurs

过渡电阻/ $\Omega$	故障类型	测量阻抗幅值/ $\Omega$	测量阻抗相角/ $^\circ$	動作情况
0	AG	3.004	69.2	动作
	BC	3.066	71.0	动作
	BCG	3.066	70.9	动作
	ABC	3.066	70.9	动作
0.5	AG	3.203	64.2	动作
	BC	3.154	66.7	动作
	BCG	3.260	64.8	动作
	ABC	<u>3.118</u>	<u>68.1</u>	动作
5	AG	5.775	30.2	<u>拒动</u>
	BC	4.650	39.3	<u>拒动</u>
	BCG	6.440	35.8	<u>拒动</u>
	ABC	3.898	46.3	动作

由表 2 和表 3 知,当无过渡电阻时,测量阻抗准确反映了保护安装处到故障点  $K_1$  的线路阻抗  $Z_k$ ,两侧距离保护元件均正确动作。当过渡电阻为  $0.5 \Omega$  时,系统侧的测量阻抗几乎未发生偏移,而光伏侧测量阻抗偏移到了動作区外。当过渡电阻为  $5 \Omega$  时,系统侧的测量阻抗在某些类型的故障下也偏移到了動作区外。由此可见,光伏侧距离保护元件在区内故障时耐受过渡电阻能力极差,很小的过渡电阻便会引起很大的测量误差,造成保护拒动。系统侧的距离保护耐受过渡电阻能力较强,在送出线路全长阻抗只有  $6.105 \Omega$  的情况下仍可耐受几欧姆的过渡电阻。

由表 2 和表 3 还可以看出,光伏侧距离保护的耐受过渡电阻能力在接地故障时强于相间故障时,但仍然比系统侧距离保护弱。

需要指出,两相短路接地故障的 2 个接地回路比相间回路耐受过渡电阻能力强,原因是接地故障回路中主要分量为零序电流,两侧测量电流幅值比  $M$  较小。以表 2 中过渡电阻为  $0.5 \Omega$  的 BCG 故障为例, BG 和 CG 回路的保护可以动作,但 BC 回路的测量阻抗为  $11.546 \angle -22.4^\circ \Omega$ , BC 回路的保护显然拒动。

将光伏电站模型的逆变器 LVRT 策略改为故障期间发送定有功电流的方式,表 4 和表 5 分别为送出线路的下级出口  $K_2$  处故障时光伏侧和系统侧距离保护的动作情况。

表 4 区外故障时送出线路光伏侧距离 I 段动作情况  
Table 4 Zone-I action situation of distance protection at PV side of outgoing transmission line when out-zone fault occurs

过渡电阻/ $\Omega$	故障类型	测量阻抗幅值/ $\Omega$	测量阻抗相角/ $^\circ$	动作情况
0.3	AG	6.444	56.6	不动
	BC	1.462	82.8	误动
	BCG	7.753	66.6	不动
	ABC	3.635	95.9	误动
5	AG	25.705	-0.5	不动
	BC	71.345	-83.4	不动
	BCG	31.771	44.7	不动
	ABC	55.022	-50.7	不动

表 5 区外故障时送出线路系统侧距离 I 段动作情况  
Table 5 Zone-I action situation of distance protection at system side of outgoing transmission line when out-zone fault occurs

过渡电阻/ $\Omega$	故障类型	测量阻抗幅值/ $\Omega$	测量阻抗相角/ $^\circ$	动作情况
0.3	AG	1.643	165.7	不动
	BC	4.730	67.4	误动
	BCG	1.751	-130.0	不动
	ABC	3.494	70.4	误动
5	AG	24.487	165.7	不动
	BC	76.940	94.6	不动
	BCG	26.441	-141.2	不动
	ABC	54.963	128.2	不动

表 4 中,该故障对于光伏侧距离保护而言是正方向区外故障,但当过渡电阻为  $0.3 \Omega$  时,相间短路和三相短路故障的测量阻抗落在了动作区内,即发生了稳态超越。因此,光伏侧距离元件在正方向区外故障时耐受过渡电阻能力极差,极易发生稳态超越,引起误动。表 5 中,该故障对于系统侧距离保护而言是反方向区外故障,但当过渡电阻为  $0.3 \Omega$  时,相间短路和三相短路故障的测量阻抗却朝反方向增大,落在动作区内。因此,系统侧距离保护在反方向区外故障时耐受过渡电阻能力极差,极易发生反方向故障的误动。

需要特别指出的是,弱电源特性对距离保护元

件耐受过渡电阻能力的影响问题在光伏送出线路上表现得尤为突出,但其影响不仅仅限于光伏送出线路,而是涉及到所有的弱电源送出线路。一侧故障电流受限会极大地降低距离保护的耐受过渡电阻能力。

#### 4 保护配置建议

上述分析揭示了光伏电站送出线路现有保护受弱电源特性的影响性能下降的问题,需要改进保护配置方案,以满足送出线路安全运行的要求。

送出线路的主保护仍应采用电流差动保护。由于电流差动保护在光伏电站送出线路上可正确动作,故除了 110 kV 送出线路之外,现有规程要求在 10 kV 或 35 kV 的低压光伏电站送出线路上也要配备电流差动保护,以取代不能正确动作的电流保护和距离保护作为主保护。唯一需要注意的是,光伏电站故障特性降低了差动保护的灵敏度,因而应按单电源线路对送出线路差动保护进行整定。

送出线路的后备保护应重新配置如下。

a. 对于接地故障,仍采用现有的零序电流保护。从图 1 可以看出,零序网络仅包含送出变压器高压侧和送出线路,零序电流保护与光伏电站的电源特性无关,仍然可正确动作。

b. 对于相间故障,系统侧仍可采用电流保护,而光伏侧可考虑配置低电压保护。由于光伏电站为电网的弱电源端,当故障发生时,相应故障回路的电压显著降低。低电压保护的配置原则是:当送出线路发生区内故障时,应动作于跳闸;当电网或光伏电站内部故障时,应可靠不动作。低电压保护的时间整定值应能躲过系统中发生的区外故障。当系统中发生区外故障时,其动作延时应与下级线路后备保护的动作时间相配合。此外,光伏侧保护应加装方向元件,避免光伏电站集电线路或送出变压器故障时发生反方向误动。

#### 5 结论

本文就弱电源特性对光伏电站送出线路继电保护的影响进行了详细的分析和仿真验证,得出以下结论。

a. 弱电源特性使光伏送出侧电流保护在区内故障时不可用。

b. 弱电源特性不影响电流差动保护的正确动作,但降低了差动保护的灵敏度。

c. 弱电源特性使相间距离元件耐受过渡电阻能力极差,在实际中不可用;接地距离元件耐受过渡电阻能力也较差。

d. 建议光伏电站送出线路以电流分相差动保护作为主保护,零序电流保护作为接地故障的后备保护,低电压保护作为相间短路的后备保护。

## 参考文献:

- [1] 张保会. 分散式能源发电接入电力系统科学技术问题的研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(12):1-4.  
ZHANG Baohui. On connection of distributed energy generation to power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(12):1-4.
- [2] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京科学出版社,2006.
- [3] 王长贵. 光伏并网发电系统综述(上)[J]. 太阳能,2008(2):14-17.  
WANG Changgui. The review of the grid-connected photovoltaic power system(volume one)[J]. Solar Energy,2008(2):14-17.
- [4] 李斌,袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):10-17.  
LI Bin,YUAN Yue. Impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose,and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):10-17.
- [5] 温阳东,王欣. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器,2008,36(1):12-13.  
WEN Yangdong,WANG Xin. Effect of distributed generation on protection in distribution system[J]. Relay,2008,36(1):12-13.
- [6] 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.
- [7] 易映萍,芦开平,王林. 基于LCL滤波器的光伏并网逆变器控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(12):54-58.  
YI Yingping,LU Kaiping,WANG Lin. Control strategy of LCL-filter-based inverter for photovoltaic grid connection[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(12):54-58.
- [8] 王利平,杨德洲,张军. 大型光伏发电系统控制原理与并网特性研究[J]. 电力电子技术,2010,44(6):61-63.  
WANG Liping,YANG Dezhou,ZHANG Jun. Study of large-scale PV power system control principle and grid-connected characteristics[J]. Power Electronics,2010,44(6):61-63.
- [9] 陈贇. 风力发电和光伏发电并网问题研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.  
CHEN Yun. Researches on wind power and photovoltaic generation integration into power system[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2009.
- [10] 李冬辉,王鹤雄,朱晓丹,等. 光伏并网发电系统几个关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):208-214.  
LI Donghui,WANG Hexiong,ZHU Xiaodan,et al. Research on several critical problems of photovoltaic grid-connected generation system[J]. Power System Protection and Control,2010,38(21):208-214.
- [11] 汪海宁,苏建徽,丁明,等. 光伏并网功率调节系统[J]. 中国电机工程学报,2007,27(2):75-79.  
WANG Haining,SU Jianhui,DING Ming,et al. Photovoltaic grid power conditioning system[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(2):75-79.
- [12] 姚致清,张茜,刘喜梅. 基于PSCAD/EMTDC的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(17):77-81.  
YAO Zhiqing,ZHANG Qian,LIU Ximei. PSCAD/EMTDC-based three-phase photovoltaic grid power system simulation research[J]. Power System Protection and Control,2010,38(17):77-81.
- [13] 秦筱迪. 光伏系统LVRT能力检测技术及功率控制[R]. [报告地不详]:国网电力科学研究院,年份不详.
- [14] 国家电网公司. Q/GDW617—2011光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [15] 张保会,王进,李光辉,等. 具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):1-6.  
ZHANG Baohui,WANG Jin,LI Guanghui,et al. Cooperation of relay protection for grid-connected wind power with low-voltage ride-through capability[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):1-6.
- [16] 闫凯,张保会,瞿继平,等. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(1):1-8.  
YAN Kai,ZHANG Baohui,QU Jiping,et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control,2015,43(1):1-8.

## 作者简介:



瞿继平

瞿继平(1983—),男,甘肃兰州人,工程师,从事电力系统继电保护方面的研究;

吴兴全(1970—),男,甘肃永昌人,高级工程师,从事电力系统继电保护方面的研究;

闫凯(1989—),男,陕西延安人,硕士研究生,主要研究方向为新能源接入电力系统的保护与控制(E-mail:820015030@qq.com);

张保会(1953—),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究。

## Influence of PV station weak power feature on relay protection of outgoing transmission line

QU Jiping<sup>1</sup>, WU Xingquan<sup>1</sup>, YAN Kai<sup>2</sup>, ZHANG Baohui<sup>2</sup>

(1. Gansu Electric Power Design Institute, Lanzhou 730050, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Since the weak power feature of PV (PhotoVoltaic) power station has a serious impact on the operation performance of existing relay protections for outgoing transmission lines, the fault current characteristic of PV power generation system is studied and the influence of weak power feature on the differential current protection and distance protection of outgoing transmission lines is analyzed, based on which, the problems of present protection configuration are pointed out. The theoretical analysis is verified by the simulation based on the PV electromagnetic transient model built with PSCAD. Both the theoretical analysis and the simulative results show that, at the PV side of outgoing transmission lines, the weak power feature of PV power stations may cause the operation rejection of current protection, the improper operation of distance protection and the sensitivity fall of current differential protection. The protection configuration for the outgoing transmission lines of PV power station is suggested.

**Key words:** photovoltaic power station; fault feature; outgoing transmission lines; weak power feature; relay protection; failure analysis; differential protection; distance protection