

光伏电站接入对送出线路继电保护的影响

张东明¹ 连婷¹ 王东¹ 贾中义¹ 任华¹ 王海云²

(1. 国网新疆电力公司巴州供电公司, 新疆 库尔勒 841000;

2. 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 针对大量光伏电站接入电网, 重点从光伏电站的电源特性对现有继电保护的動作特性方面展开研究。在综合稳定程序(PSASP)中建立了光伏电站系统暂态模型以及送出线路模型, 分析了光伏电站发电系统的故障电流特征。在此基础上分析了光伏电站发电系统对送出线路光伏侧继电保护動作特性的影响, 并提出了相应的保护配置建议。为分析和预测在现有大系统中增加光伏发电系统后对电网的影响等提供了有力的技术支持。

关键词: 光伏电站; 电源特性; 送出线路; 继电保护

Abstract: For a large number of photovoltaic (PV) power stations connected to power grid, the action features of the current relay protection are mainly studied as viewed from the characteristics of power supply of PV power station. The transient model of PV power station system and the model of transmission lines are established in the comprehensive stability program (PSASP), and the fault current characteristics of PV power generating system are analyzed. On this basis, the influence of PV power generating system on the action features of relay protection in PV side of transmission lines is analyzed, and some suggestions for the corresponding relay protection allocation are proposed, which provides a strong technical support for analyzing and predicting the impact on power grid after increasing PV power generating system in the existing system.

Key words: photovoltaic power station; characteristics of power supply; transmission lines; relay protection

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)06-0001-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.06.001

0 引言

随着光伏(photovoltaic, PV)发电系统大规模并入电网, 其对电网的安全稳定运行造成不可忽略的影响, 因此光伏并网发电系统在自身故障期间的保护措施, 成为电网安全运行的关键因素之一。光伏受到不同日照条件以及不同温度条件的影响, 输出功率存在间歇性和波动性, 对光伏送出线路继电保护造成误动、拒动或者灵敏度下降等问题。由于光伏电站的故障电流受到光伏逆变器低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)控制的限制, 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特性产生严重影响。国内外很多学者研究了光伏发电系统的暂态模型及其故障特性, 并有一定的认识, 但很少有人分析与研究光伏故障特性对送出线路继电保

护的影响。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。

因此, 分析光伏发电系统送出线路继电保护的動作性能以及送出线路故障特性对电流差动保护、距离保护等典型保护的影响, 分析现有保护配置存在的问题, 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 系统建模与分析

1.1 光伏发电系统模型

根据中国光伏发展现状, 中小型屋顶光伏电站多采用两级式光伏发电系统, 而对于大型沙漠光伏电站, 单级式光伏发电系统以其结构简单、成本低等诸多优点成为大型光伏电站的首选, 应用广泛。

下面主要针对单级式光伏发电的结构特点, 分别对光伏阵列、功率变换器、并网连接转换等部分进行建模, 并实现最大功率跟踪控制、逆变器并网控制等功能, 能够很好地反映实际光伏发电系统的机电

暂态特性。单级式光伏发电系统模型的总体结构图如图1所示。

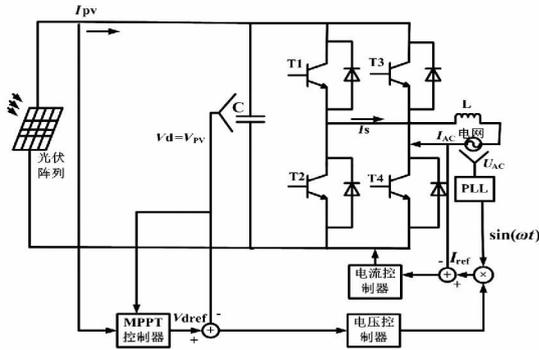


图1 单级式光伏发电系统模型结构图

此模型通过输入任意时刻的光照强度和实际温度值,能够准确地模拟出此情况下的光伏阵列输出功率、端口电压、输出电流以及整个光伏发电系统的并网电流、电压和功率等,为分析和预测在现有大系统中增加光伏发电系统后对电网的影响等提供了有力的技术支持。此模型具有普遍适用性,对于目前中国大型光伏发电系统所采用的单级式不可逆光伏发电形式,可以很好地进行仿真模拟。

1.2 送出线路故障特性分析

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,即故障期间电流不会显著增大,这会对依靠电流大小阈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2为某110kV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。

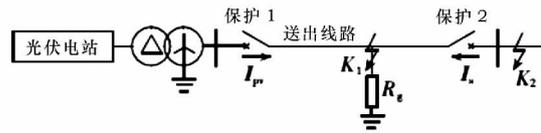


图2 光伏电站送出线路故障示意图

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

$$N = |I_s / I_{pv}|$$

θ 与光伏逆变器的LVRT控制方式和故障严重程度密切相关。

1) 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 θ 越小。

2) 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_{pv} 的相位越超前 θ 越大。

3) 故障后 I_{pv} 的相位变化要经历一个暂态过程,导致 θ 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, θ 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 N 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 N 越大,一般至少为20~30,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_s ,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

$$\begin{cases} U_m = U_k + U_g = U_k + (U'_g + U''_g) \\ U_k = I_{PV} Z_k \\ U''_g = I_S R_g \\ U'_g = I_{PV} R_g \end{cases}$$

从而得出 $U''_g = N \cdot U'_g$ 。由于 N 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。

2 光伏送出线路保护动作特性仿真分析

2.1 电流差动保护仿真分析

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动作情况

故障位置	过渡电阻/ Ω	动作情况			
		AG	BC	BCG	ABC
区内故障	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	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

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。

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, 故光伏电站的

接入降低了电流差动保护的灵敏度。

2.2 距离保护仿真分析

由表 2 和表 3 可知, 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 0.5Ω 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动作区外。当过渡电阻为 5Ω 时, 系统侧的测量阻抗在某些类型的故障下也偏移到了动作区外。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 6.105Ω 的情况下仍可耐受几欧姆的过渡电阻。

表 2 区内故障时送出线路光伏侧距离 I 段动作情况

过渡电阻/ Ω	故障类型	测量阻抗/ Ω	测量阻抗角/ $(^\circ)$	动作情况
0	AG	2.944	67.8	动作
	BC	3.057	70.5	动作
	BCG	3.024	71.8	动作
0.5	AG	3.616	48.2	动作
	BC	5.056	-22.9	拒动
	BCG	4.280	60	动作
5	AG	14.06	10	拒动
	BC	53.07	-23.6	拒动
	BCG	15.83	56.9	拒动

表 3 区内故障时送出线路系统侧距离 I 段动作情况

过渡电阻/ Ω	故障类型	测量阻抗/ Ω	测量阻抗角/ $(^\circ)$	动作情况
0	AG	3.004	69.2	动作
	BC	3.066	71	动作
	BCG	3.066	70.9	动作
0.5	AG	3.203	64.2	动作
	BC	3.154	66.7	拒动
	BCG	3.26	64.8	动作
5	AG	5.775	30.2	拒动
	BC	4.65	39.3	拒动
	BCG	6.44	35.8	拒动

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。

3 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光伏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:对于接地故障,仍采用现有的零序电流保护。从图 2 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。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動作时间相配合。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。

4 结 论

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:

- 1) 光伏电源特性使光伏送出侧电流保护在区内故障时不可用。
- 2) 光伏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。
- 3) 光伏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。
- 4) 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] 刘幸蔚,李永丽. 逆变电源 T 接电网后对纵差保护的影响及准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1596 - 1599.

[2] 刘健,林涛,同向前,等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2080 - 2085.

[3] 杨杉,同向前,刘健,等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1977 - 1982.

[4] 余琼,余胜,李晓晖. 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.

[5] 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.

[6] 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.

作者简介:

张东明(1987), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

王海云(1973), 副教授、硕士研究生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网技术。(收稿日期: 2016 - 08 - 16)

国家电网公司面向社会各界征集新技术

国家电网公司贯彻落实国家创新驱动发展战略, 致力于推动电力新技术在电网建设、生产、运营中的推广应用工作。现诚邀社会各界通过新技术征集平台(国家电网公司电子商务平台 <http://ecp.sgcc.com.cn>) 开展新技术申报工作。