

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.007

基于 DIgSILENT 的分布式光伏系统 对配电网线路保护的影响

许琴

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 随着分布式电源的不断渗入, 传统的单电源辐射型网络变成双端甚至多端网络, 系统的潮流方向及短路电流分布也会发生变化, 这将对配电网中采取速断和过电流保护原理的保护装置的灵敏度、可靠性以及上下级线路的保护配合带来一定的影响。为此, 首先搭建了基于 DIgSILENT 的分布式光伏系统和具体的配电网的仿真模型, 然后在此基础上, 定量分析了光伏系统接入位置及容量的不同对配电网短路电流和线路保护产生的影响, 并提出不同的解决建议和策略。

关键词: 光伏系统; 配电网; 短路电流; 线路保护

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)S1-0031-05

Research on the Influence of Distributed Photovoltaic System on Distribution Network Protection Using DIgSILENT

XU Qin

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the continuous inflow of distributed generation, the traditional single-power radiation network becomes a two-terminal or even multi-terminal network which will change power flow and short-circuit current distribution to affect reliability and sensitivity of the relay protection device based on quick-break and over-current principle and the coordinate of upper and lower line protection device. Firstly, Distributed PV systems and the concrete distribution network simulation model were established using DIgSILENT in this paper, then the influence of different location access to power grid and different PV systems capacity on short circuit current and line protection of distribution network were quantitatively analyzed. In the end, different solutions and strategies were proposed to solve the problem.

Key words: PV system; distribution network; short-circuit current; line protection

近年来利用太阳能的光伏发电技术的研究与应用迅速增长。根据中国《2007 年可再生能源中长期规划》, 预计到 2020 年已安装的光伏发电容量将达到 18 GW。随着光伏发电行业的迅速发展, 国家能源局预计未来光伏发电容量将扩大 10 倍, 最高至 200 GW。大量光伏发电提升了太阳能资源的利用,

但光伏发电也给电网规划设计、电能质量、继电保护及运行带来新的挑战^[1-3]。特别是光伏发电并网后, 传统的单电源辐射型网络变成双端甚至多端网络, 系统的潮流方向及短路电流分布也会发生变化, 这将对配电网中采取速断和过电流的保护造成一定的影响^[1-5]。为此, 国内外有大量学者开展了光伏发电并网对配电网的影响。文献[6]利用 DIgSILENT/PowerFactory 仿真平台上搭建了国际大电网会议(CIGRE)认为适合进行分布式发电接入配电网特性研究的典型配电网结构, 对分布式光伏接入后配电网谐波、电压波动和闪变的影响进行了分

收稿日期: 2017-08-29

作者简介: 许琴(1987), 女, 江西九江人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护工作(e-mail)406537892@qq.com。

析。对线路保护的影响没有进行分析。文献[7]基于PSCAD研究分布式电源并入配电网后,在线路不同位置发生短路故障时, DG对短路电流产生的助增、汲流和反方向电流影响。文献[8-10]定性分析分布式电源接入配电网对过电流保护及反时限过电流保护的影响。文献[11]定性讨论在满足继电保护可靠动作的前提下,配电网(distribution network, DN)允许接入的分布式电源的最大功率(容量)。

为此,本文充分利用DIGSILENT/Power Factory仿真软件在系统级仿真方面的突出优势,从系统角度通过理论与仿真分析相结合的方法,定量分析分布式光伏并网发电系统对配电网继电保护的影响。

1 光伏发电系统模型

1.1 光伏阵列模型

光伏阵列由大量的光伏电池进行串并联得到。在考虑光伏阵列的建模时,可以先建立光伏阵列的最小单元—光伏电池的模型,在得到光伏电池的模型以后,进行串并联等效就可以得到光伏阵列的模型。

光伏电池的等效电路如图1所示,包括直流电流源、二极管、并联等效电阻 R_{sh} 和串联等效电阻 R_s , R_{sh} 与电池对地的泄漏电流成反比, R_s 表示电池中对电流的阻碍作用,其值取决于PN结深度、半导体材料的纯度等。

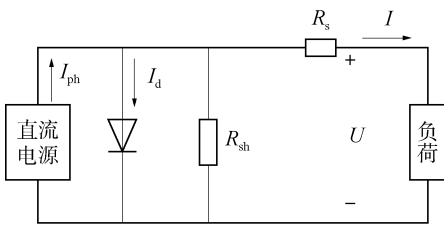


图1 光伏电池的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of photovoltaic cells

光伏电池的输出电流表达为:

$$I = I_{ph} - I_d \left[e^{\frac{q(U+IR_s)}{AKT}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

由式1可知,光伏电池的输出电流为光能产生的电流减去二极管电流和旁路漏电流,式中 T 表示电池工作温度; q 表示电子电量; A 表示无量纲的任意曲线的拟合常数, $1 \leq A \leq 2$,当光伏电池输出高电压时 $A=1$,当光伏电池输出低电压时 $A=2$; k 表

示波尔兹曼常数; I_{ph} 和 I_d 分别表示光生电流和流过PN结的反向饱和漏电流,二者均随环境变化而变化,二者的值均需要根据具体的光照强度和环境温度来确定。

上述动态模型主要应用于光伏电池的理论分析中,因为其基于光伏电池的物理原理,所以比较复杂,而且式(1)中的 R_s 、 R_{sh} 和 A 等参数与光照强度和电池温度有关,确定十分困难,不利于工程应用。为了解决此问题,给出了改进后的光伏电池动态模型,以便于工程的应用。在前述光伏电池 $U-I$ 特性基础上,改进后的模型有两点近似:一是认为 R_{sh} 无穷大,即忽略 $(U + IR_s)/R_{sh}$ 项;二是根据通常情况下 R_s 远小于二极管正向导通电阻,认为 R_s 趋近于0。定义在开路状态下有 $I=0$, $U=U_{oc}$;在最大功率点有 $I=I_m$, $U=U_m$,由此可得到 $U-I$ 的简化方程:

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{U}{C_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

在式2中有:

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}\right) \quad (3)$$

$$C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

将短路电流 I_{sc} 、开路电压 U_{oc} 、最大功率点电流 I_m 和最大功率点电压 U_m 代入式3和式4中,可以得到中间变量 C_1 和 C_2 ,再代入式2中即可确定 $U-I$ 曲线。这4个参数由生产厂家提供,但它们的值受到光照强度或环境温度的变化的影响,需要进行修正,其修正方法如下:

$$\Delta T = T - T_{ref}$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1$$

$$I'_{sc} = \frac{I_{sc} S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T)$$

$$U'_{oc} = U_{oc} (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S)$$

$$I'_m = \frac{I_m S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T)$$

$$U'_m = U_m (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S) \quad (5)$$

式中: $I'_{sc}/U'_{oc}/I'_m/U'_m$ 分别为 $I_{sc}/U_{oc}/I_m/U_m$ 在不同环境下的修正值; T 和 S 分别为光伏电池的温度和光照强度; T_{ref} 和 S_{ref} 分别为标准电池温度和标准光照强度,其值分别为 25°C 和 1000 MW/m^2 ; a 、 b 、 c 均为常数,其典型的一组值为 $a=0.0025\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

$b=0.5$; $c=2.88 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

1.2 光伏发电系统逆变器的建模

根据逆变器功率变换的级数，可以将其分为单级式逆变器和多级式逆变器。相对于单级式逆变器，多级式逆变器不但包含了逆变环节，还多了一个直流变换环节，多级式逆变器的功率点控制由直流变换环节完成，逆变及并网过程由逆变环节控制^[12]。多级式逆变器的设计虽然相对简单，但是环节较多，系统体积较大，成本较高，转换效率较低^[12]。单级式逆变器在实现并网的过程中只有一个能量变换环节，只存在 1 级逆变结构，故转换效率较高，拓扑结构简单。因此，本次建模中采用单级式逆变器。

1.3 DIgSILENT 中光伏发电系统的建模

1.3.1 光伏发电系统电路层面的建模

总体上来看，在 DIgSILENT 中，可以把光伏微电源看作一种 Static generator，采用 $d-q$ 可控电流源模型描述，据此建立 Static generator 模型。

在潮流计算中，对光伏电源可以采用定功率因数 (Power Factor) 控制，因为潮流计算时并不需要考虑光伏电源内部的相关参数，所以可以直接把光伏电源简化等效为 PQ 节点。

在暂态计算中，光伏电源的建模主要分为三个部分，分别是光伏阵列、逆变器和交流并网环节，在 DIgSILENT 中，Static generator 已经包含了这三个部分，可以直接连到交流母线。

1.3.2 最大功率点跟踪控制 (MPPT) 算法

MPPT 算法有很多种。在这些算法中，比较常用的主要是导纳增量法和扰动观察法。导纳增量法计算精确度较高，但算法复杂，硬件成本高，计算耗时长。相比之下，扰动观察法仅需每隔一定的时间产生一个扰动电压使电压变化同时检测功率变化的方向，如果功率减小则反向扰动，否则同向继续扰动。算法较简单，易实现，监测参数少，同时不需要知道太阳能电池的特性曲线。但扰动观察法的缺点是输出功率会在最大功率点附近反复震荡。为此，本文采用较小的步长，而且规定在电压变化时，若功率的变化在一个较小的范围内，则不进行扰动，这样就可以解决扰动观察法无法稳定在最大功率点的问题。

本文采用的是扰动观察法，并采用较小的步长。

2 含光伏发电系统的电网短路故障仿真分析

考虑到传统配电网均是单辐射型网络且 10 kV 网络不会有电源接入，因此配电网的线路保护主要采用速断和过电流两种保护方式。但随着光伏电源的接入，将会影响故障电流的大小甚至改变故障电流的方向，从而对保护的范围和灵敏度以及相邻线路之间保护装置的相互配合带来影响。下面以一个配电网的算例来分析分布式光伏对电网短路电流及线路保护的影响。

2.1 仿真系统图

本文采用典型的配电网作为算例，在 DIgSILENT 建立仿真模型，如图 2 所示。系统侧变压器容量按 20 MVA 考虑。

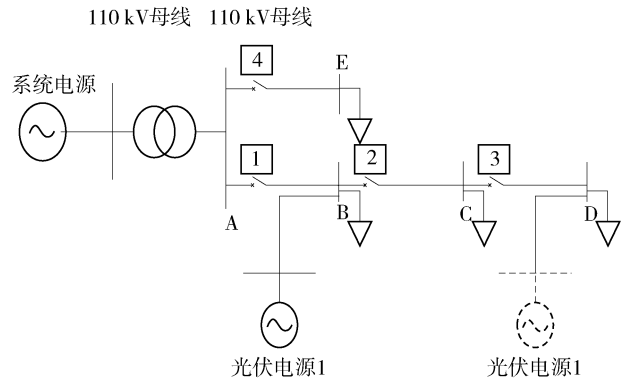


图 2 仿真网络示意图

Fig. 2 Simulation network diagram

2.2 光伏发电系统接入位置及容量的不同对短路电流计算

2.2.1 对图 2 中未接入光伏电源的配电网进行短路电流计算

对在节点 B、C、D、E 分别发生三相短路故障后流过该节点和保护装置的短路电流进行计算。计算结果如表 1 所示。

表 1 未接入光伏时短路电流计算结果

Tab. 1 The short-circuit current calculation result when the

PV is not connected

kA

短路节点名称	短路点的短路电流	流过保护装置的电流			
		1	2	3	4
B	10.454	10.454	0	0	0.116
C	6.369	6.441	6.369	0	0.145
D	4.863	4.993	4.900	4.863	0.153
E	11.659	0.289	0.194	0.098	11.658

2.2.2 接入不同位置的光伏发电系统短路计算

依次在配电网节点 B、D、E 接入额定容量为 6 MW 的光伏系统后,对在节点 B、C、D 和 E 发生三相短路故障后流过节点和保护的短路电流进行计算,计算结果如表 2 所示。

表 2 接入光伏时短路电流计算结果

Tab. 2 The short-circuit current calculation result when the PV is connected kA

光伏系统接入点	短路节点名称	短路点的短路电流	流过保护装置的电流			
			1	2	3	4
B	B	10.699	10.452	0	0	0.115
	C	6.528	6.307	6.528	0	0.145
	D	4.986	4.820	5.022	4.986	0.152
	E	11.697	-0.163	0.191	0.096	11.697
D	B	10.692	10.452	-0.343	-0.347	0.115
	C	6.656	6.438	6.370	-0.351	0.144
	D	5.158	4.989	4.900	4.867	0.152
	E	11.700	-0.156	-0.199	-0.271	11.700
E	B	10.483	10.483	0	0	-0.254
	C	6.387	6.458	6.387	0	-0.217
	D	4.877	5.007	4.914	4.877	-0.206
	E	11.839	0.287	0.193	0.097	11.657

注:负号“-”表示流向母线 A 的方向。

2.2.3 接入不同容量的光伏发电系统短路计算

依次在节点 B 接入额定容量为 12 MW、24 MW 的光伏系统,对在节点 C 发生三相短路故障后的短路电流进行计算,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同的光伏容量接入到节点 B 的短路电流计算

Tab. 3 Short circuit current on different PV capacity access to Node B kA

光伏系统容量	短路点的短路电流	流过保护装置的电流	
		1	2
0 MW	6.376	6.477	6.376
12 MW	6.675	6.195	6.675
24 MW	6.924	5.993	6.924

3 光伏并网对继电保护的影响

3.1 光伏系统位置对电流保护的影响

由表 1 和表 2 可知,当节点 B 接入光伏系统时,光伏系统在保护 1 的下流和保护 2 的上流,若此时节点 B 发生短路故障时,短路节点 B 的短路电流有所增加,但通过保护 1 的电流与未接入光伏一

致,且通过保护 2 和 3 的电流为零,因此对保护 1 的保护范围不会产生影响,且保护 2 和 3 也不会误动作;若此时节点 C 发生短路故障时,短路节点 C 和保护 2 的短路电流由于光伏系统的助增作用有所增加,同时保护 1 由于光伏系统的抑制作用导致故障电流减小,通过保护 3 的电流的为零,因此,保护装置的保护范围 1(作为保护 2 的远后备保护)减小,保护装置 2 的保护范围扩大,甚至可能延伸至下一级线路,保护装置 3 无影响;另外,无论光伏系统接入到节点 B 还是节点 D 时,仅对光伏所连接的这条支路有影响,而对相邻线路影响较小。

当节点 E 接入光伏系统时,由于光伏系统的助增作用,导致节点 E 的短路电流增加,但对保护 4 的故障电流影响较小,保护 4 的范围不受影响。

由此可见,当光伏系统在保护的上游,故障点在保护下游时,由于光伏系统对短路电流的助增作用,会增大电流速断保护的灵敏度,但也会导致在下一级线路故障时上一级保护失去选择性。

3.2 光伏系统容量对电流保护的影响

由表 1 和表 3 可知,当光伏系统接入在保护 1 的下流和保护 2 的上流时,随着光伏容量的增大,保护 1 感受到的故障电流逐渐减小,保护 2 感受到的故障电流逐渐增大。随着光伏系统的容量不断增大,向短路点提供很大的短路电流超过系统侧提供的短路电流,导致故障电流反向,若保护装置 1 没有判别方向的功能,可能会导致保护装置 1 误动作。另外,随着光伏系统的容量不断增大,流入光伏系统下游保护的电流持续增加,提高了装置 2 的速断保护灵敏度同时扩大了保护范围,若容量没有加以限制随着保护距离的不断增大,保护延伸至下一级线路,可能会引起误动作。

4 结论

通过仿真分析,光伏系统接入的位置或容量的不同对系统的短路电流将会产生不同的影响。首选建议将光伏系统接入到单链式线路的末端。如果不可以的话,建议在光伏系统接入到电网的前期规划阶段,搭建实际的网架结构,对光伏的不同容量及不同接入点进行仿真分析对比,在保证经济性和可靠性的基础上,提出最优的光伏接入方案和光伏接入容量供参考。

另外,针对由于光伏系统接入不可避免导致不

能满足保护的灵敏性、选择性要求, 可考虑:

1) 采用反应两端电气量比较的光纤纵联差动保护。

2) 广域保护控制系统。目前广域保护控制系统可采取两种方案, 一种是设置一个集中控制主站, 其他站点获取的测量信息均通过通信网络传送上去, 在主站通过比较相邻站点的电气量, 来判断故障点的位置; 另一种就是分布式智能控制系统, 它是基于智能终端间对等交换实时数据。

参考文献:

- [1] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 24-30.
ZHANG B H, YIN X G. Relay protection in electric power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 24-30.
- [2] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案 [J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.
XU X Y, HUANG Y H, LIU C, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits [J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.
- [3] 裴玮, 盛鹏, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.
PEI W, SHENG K, KONG L, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157.
- [4] 张俊芳, 姚强, 杭银丽. 分布式电源对配电网谐波分布影响的研究 [J]. 电气应用, 2011, 30(18): 61-65.
ZHANG J F, YAO Q, HANG Y L. Impact of distributed power on harmonic distribution in distribution network [J]. Electro-technical Application, 2011, 30(18): 61-65.
- [5] 翟文杰, 李建泉, 吴小云, 等. 分布式光伏发电对配电网保护的影响 [J]. 大功率变流技术, 2013(5): 21-26.
ZHAI W J, LI J Q, WU X Y, et al. Impact of distributed photovoltaic generation on relay in distribution network [J]. High Power Converter Technology, 2013(5): 21-26.
- [6] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI H F, WANG C, YE J L, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [7] 冯希科, 邵能灵, 宋凯. DG 容量对配电网电流保护的影响及对策研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 156-160.
FENG X K, TAI N L, SONG K. Research on the impact of DG capacity on the distribution network current protection and countermeasure [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 156-160.
- [8] 陶顺, 郭静, 肖湘宁. 基于电流保护原理的 DG 准入容量与并网位置分析 [J]. 电网技术, 2012, 36(1): 156-165.
TAO S, GUO J, XIAO X N. Analysis on allowed penetration level of distributed generation and its grid-connected position based on principles of current protection [J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 156-165.
- [9] 李季英, 刘玉. 分布式电源接入配电网对反时限过电流保护的影响 [J]. 广东电力, 2014, 27(12): 30-34.
LI J Y, LIU Y. Impact on inverse-time over-current protection by distributed power source connecting to power distribution network [J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(12): 30-34.
- [10] 郭煜华, 姜军, 范春菊, 等. 改进的配电网反时限过电流保护 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 45-50.
GUO Y H, JIANG J, FAN C J, et al. Improved inverse-time over-current protection for distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 45-50.
- [11] 王江海, 邵能灵, 宋凯, 等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 37-43.
WANG J H, TAI N L, SONG K, et al. Penetration level permission of for DG in distributed network considering relay protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43.
- [12] 张峥. 具有 MPPT 功能的单级式光伏并网发电系统仿真分析 [J]. 黑龙江电力, 2011, 33(6): 467-472.
ZHANG Z. Simulation analysis of single stage grid-connected photovoltaic system with MPPT function [J]. Heilongjiang Electric Power, 2011, 33(6): 467-472.

(责任编辑 高春萌)