

分布式光伏逆变器对配网继电保护的影响

智能配电网的重要特征之一是能够友好接入高渗透率的分布式电源，分布式光伏发电在配电网的大量接入对现有继电保护的影响值得研究。基于Matlab/Simulink以及DIgSILENT仿真软件建立了三相单级光伏并网系统的详细模型。通过某30 kW光伏逆变器出口三相短路试验，对一个光伏发电渗透率为20%的实际配电网仿真研究分布式光伏逆变器对短路电流的贡献，进而研究对配电网继电保护的影响。研究表明，由于光伏逆变器电流内环采用了限幅环节，光伏发电提供的短路电流在1.2倍的额定电流以内，在渗透率较低（小于20%）的情况下，对继电保护的影响很小，不需要改变配电网现有继电保护配置，不需要修改定值。

张 剑/合肥工业大学电气与自动化工程学院
袁晓冬/江苏省电力公司电力科学研究院

随着分布式光伏发电在配电网的大量接入，对配电网的运行、控制及保护都产生一定的影响。本文在分析国内外相关文献的基础上，通过对实际逆变器短路试验的实测数据分析以及一个含有光伏并网逆变器（20%变压器额定容量）的配电网进行短路仿真分析，研究分布式光伏并网逆变器对继电保护的影响。

文献[1]指出分布式电源接入后接入点下游短路电流增大，上游短路电流减小。文献[2]指出，仅由经逆变器接口的分布式电源组成的微网并网后，在限流器正常工作的情况下，对配电网故障线路的短路电流影响很小。文献[3]指出，光伏电源提供的短路电流主要和光伏电源的容量及接入位置有关。文献[4]指出基于同步发电机与基于逆变器的分布式

电源对继电保护具有较大的影响，其逆变器的控制方式是恒有功恒交流侧电压控制方式，而且没有考虑逆变器电流内环的限幅环节，但是实际光伏逆变器采用的都是恒定功率因数为1且恒定直流侧电压的控制方式。大部分文献只是指出光伏发电对继电保护可能存在影响，但是并没有给出定量的分析结果，结论模棱两可，不明确。本项目的关键点是电网侧短路时，分布式光伏逆变器给系统各支路提供了多大的短路电流。本文结合实际光伏逆变器短路试验及仿真分析，定量分析光伏逆变器对短路电流的影响，进而分析对继电保护的影响，并得到了初步结论。

三相单级光伏并网系统的模型

三相单级光伏并网系统的示意图如图1所示^[5]，一次系统元件主要包括光伏阵列、缓冲电容器、逆变器、升压变压器、耦合电感和滤波器等。二次系统元件主要包括最大功率点追踪器MPPT、交直流侧电压、电流的测量元件、锁相环PLL、电压控制器、电流控制器、abc-dq0的变换与反变换元件、PWM及门极驱动元件等。

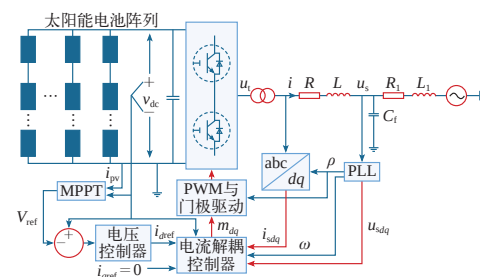


图1 三相单级光伏并网系统示意图

国家自然科学基金：基于V2G的主动配电网电压协调优化控制（5150070099）。



张 剑/讲师

关键词/Keywords

电力系统 ·
分布式发电 ·
三相单级光伏并网系统 ·
短路电流 ·
继电保护 ·

1. 光伏阵列的模型

光伏阵列的模型是一个电流受电压控制的受控直流电流源，其等效电路如图2所示。其电流—电压特性方程为^[5-10]

$$i_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{kTA} \frac{u_{pv}}{n_s} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中， i_{pv} 为光伏阵列发出的直流电流； u_{pv} 为光伏阵列等效PN节电压； I_0 为PN节的反向饱和电流； q 为电子电荷量，取 1.602×10^{-19} C； k 为波尔兹曼常数，取 1.38×10^{-23} J/K； T 为PN节的温度，K； A 为理想因子； n_s 为光伏阵列中太阳能电池组件的串联个数； n_p 为光伏阵列串数； I_{ph} 为单个电池组件的短路电流，与光照强度及PN节温度的关系式为

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_T(T - T_r)] \frac{G}{G_n} \quad (2)$$

式中， T_r 为参考温度； I_{sc} 为单个太阳能电池组件在参考温度与参考光照强度下的短路电流值； k_T 为温度系数； G 为光照强度； G_n 为标准测试条件下的光照强度， W/m^2 。

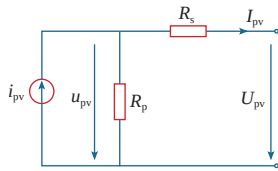


图2 光伏阵列模型

由于光伏电池板厂家一般不提供PN节的反向饱和电流 I_0 ，但是可以通过电池板开路电压 V_{oc} 计算得到，计算公式为

$$I_0 = \frac{I_{sc} + k_T(T - T_r) \frac{G}{G_n}}{\exp \left\{ [V_{oc} + k_v(T - T_r) \frac{q}{kTAn_s}] \right\} - 1} \quad (3)$$

由图2可得光伏阵列端口的电压电流关系如(4)所示。对于任意 U_{pv} ，可以采用牛顿拉夫逊方法迭代解得 I_{pv} ，即

$$I_{pv} = n_p [I_{sc} + k_T(T - T_r)] \frac{G}{G_n} - n_p I_0 \left\{ \exp \left[\left(U_{pv} + R_s I_{pv} \right) \frac{q}{kTAn_s} \right] - 1 \right\} - \frac{U_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (4)$$

2. MPPT的模型

为了使光伏阵列发出最大有功功率，通常通过MPPT动态跟踪光伏阵列的电压，MPPT输出电压提供给电压控制器，通过电压控制器使缓冲电容器电压稳定在不同光照水平下最大功率点所对应的电压。MPPT算法主要有扰动观察法及电导增量法^[12-14]。本文MPPT采用扰动观察法。

3. 控制系统的模型

三相单级光伏并网系统的控制系统主要由一个电压外环控制器以及一个电流内环控制器组成。MPPT主要用于输出电压控制器的参考电压 V_{ref} 。 V_{ref} 的值只受光照强度 G 及PN节温度 T 的影响。电压外环用于控制电容器的电压，使其稳定在最大功率点对应的电压。电流内环的作用是使得逆变器注入系统的电流为正弦以及实现单位功率因数控制。为了避免电力电子器件由于过电流而损坏，电流内环采用了限幅环节。根据国家电网公司企业技术标准Q/GDW 617—2011《光伏电站接入电网技术规定》，当逆变器输出电流超过120%额定电流时，逆变器自动保护，关闭输出，即电流限幅于1.2倍额定电流。整个电流内环的传递函数框图如图3所示^[7]，电压外环传递函数框图如图4所示^[5]。

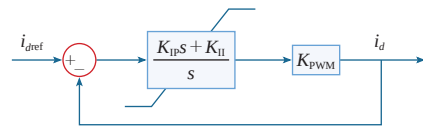


图3 电流内环的传递函数框图

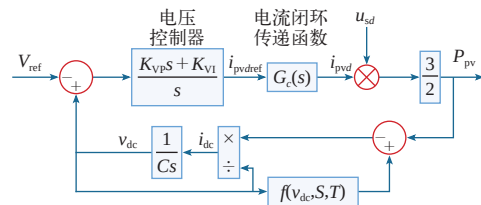


图4 三相单级光伏并网系统传递函数框图

仿真算例

1. Matlab/Simulink仿真算例

仿真系统的接线图如图5所示，光伏发电有功 $P = 12$ MW，有功负荷 $P = 12$ MW，无功负荷 $Q =$

0 Mvar。线路L1、L2和L3的长度分别为2 km、2 km和0.5 km。变压器的额定容量为60 MV·A，短路阻抗标幺值为0.3，系统侧短路容量为800 MV·A。三相短路点为L2线路末端，如图5中的f点所示。本算例中，没有对逆变器施加电流限幅环节。

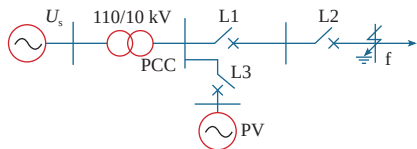


图5 仿真系统接线图

f点三相短路时，光伏接入点（PCC点）上、下游的A相短路电流瞬时值分别如图6、图7所示，稳态有效值如下表所示。由图6、图7及下表可以看出，光伏系统接入前后接入点上、下游短路电流变化很小。

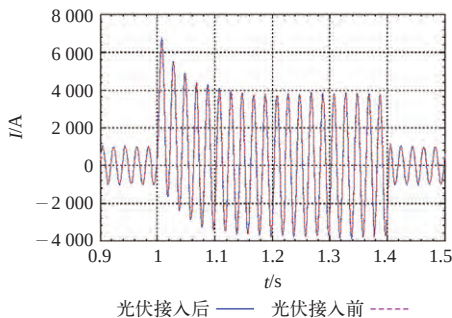


图6 光伏接入点下游短路电流波形（A相）

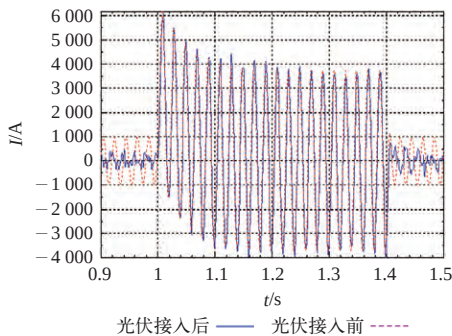


图7 光伏接入点上游短路电流波形（A相）

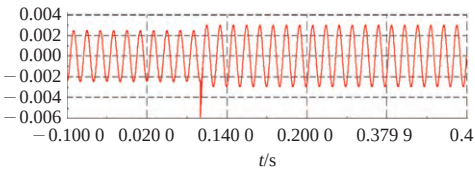
表 光伏系统接入前后的短路电流

光伏接入前	光伏接入后
上游短路电流2 650 A	上游短路电流2 646 A
下游短路电流2 650 A	上游短路电流2 686 A

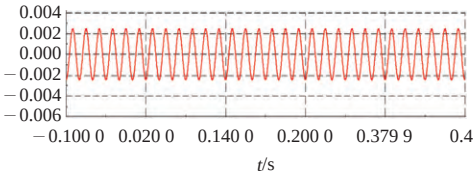
2. DIgSILENT仿真算例

在DIgSILENT中建立的光伏逆变器电流内环

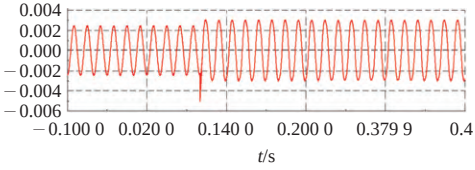
采用了限幅环节，限幅为1.2倍的额定电流。光伏逆变器出口短路仿真电流波形如图8所示。由图8可以看出，在三相、两相相间短路瞬间将产生一个电流尖峰，持续时间很短，为几毫秒；由于电流限幅的存在，稳态短路电流为1.2倍的额定电流。对于单相接地、两相接地故障，由于配电网中性点不接地，所以短路电流等于额定电流。



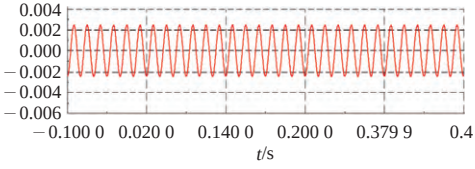
(a) 光伏逆变器出口A相短路电流标幺值（三相短路）



(b) 光伏逆变器出口A相短路电流标幺值（单相接地）



(c) 光伏逆变器出口AB相间短路电流标幺值（两相短路）



(d) 光伏逆变器出口AB相接地短路电流标幺值（两相接地）

图8 DIgSILENT仿真电流波形

实际光伏逆变器短路试验

对合肥阳光电源30 kW光伏逆变器出口三相短路试验实测的电压、电流波形如图9所示。由图9可以看出，光伏逆变器出口短路电流约为稳态短路电流的1.5倍（之所以是1.5倍而不是1.2倍是因为逆变器生产时间较早，符合2009版《光伏电站接入电网技术规定》，不符合2011版）。短路瞬间产生一个4倍左右的高频电流尖峰，持续时间为几毫秒。采用电压暂降分析仪使得光伏逆变器出口电压降至额定电压的20%，实测电压电流波形如图10所示（图10下半部分为电压波形，上半部分为

电流波形), 由于光伏逆变器注入系统的电流谐波含量较高, 所以电流波形不光滑。由图10可以看出, 短路电流较稳态电流有所减小。

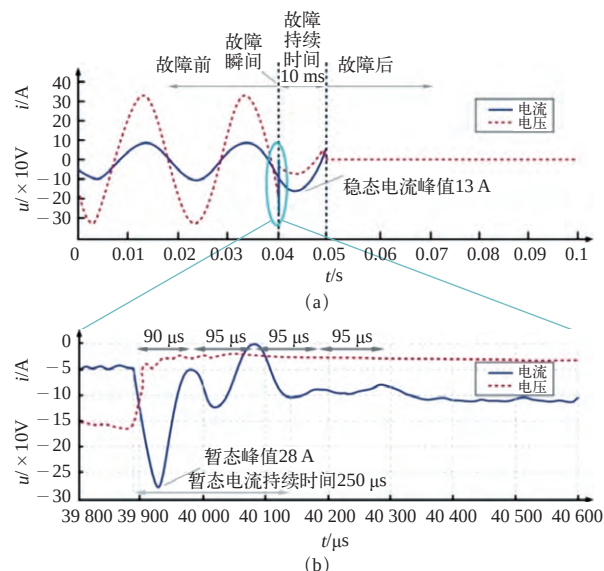


图9 光伏逆变器出口三相短路实测波形

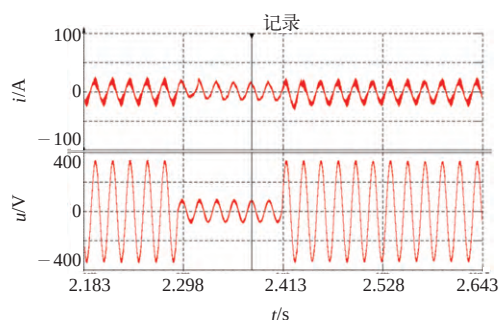


图10 电压跌落至20%时光伏逆变器出口实测电压、电流波形

对短路瞬间尖峰电流产生机理的分析

光伏逆变器中集成了LC滤波器。在线路发生三相短路故障时, 滤波电容 C_f 经过故障线路对地形成放电通道, 其放电电流的特征为高频、衰减的。图11为基于Matlab/Simulink仿真得到的波形特征, 可以看出与实测波形图9相似。仿真发现, 去除滤波电容, 只采用耦合电感滤波时, 尖峰电流不复存在; 在DigSILENT中的仿真也表明当去除滤波电容时, 尖峰电流并不明显, 当加大滤波电容时, 尖峰电流显著变大, 从而证明了尖峰电流主要是由滤波电容放电所引起。

由于短路瞬间电流尖峰为高频分量, 持续时

间很短, 只有几毫秒, 一般会被计算机保护装置中的前置低通滤波器滤除, 计算机保护中的数字滤波算法也能滤除一部分干扰, 因此对继电保护性能没有影响。

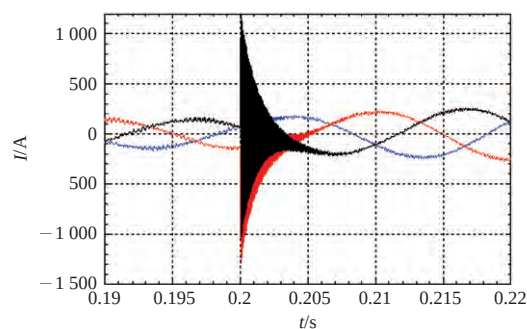


图11 尖峰电流波形

结束语

本文建立了三相单级光伏并网系统的详细模型。通过仿真算例与对一个30 kW光伏逆变器实际三相及单相短路试验, 研究分布式光伏逆变器对短路电流的贡献, 进而研究其对继电保护的影响。研究表明: 由于光伏逆变器电流内环采用了限幅环节, 三相短路电流在1.2倍的额定电流以内, 在渗透率较低的情况下(小于20%), 对继电保护的影响很小, 不需要更改配电网保护配置, 不需要修改保护定值。

参考文献

- [1] 孙景钉, 李永丽, 李盛伟, 等. 含分布式电源配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 81-89.
- [2] 韩奕. 分布式电源及微网接入对配电网继电保护的影响分析[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.
- [3] 张泽云. 含光伏电源的配电网保护研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [4] Natthaphob Nimpitiwan, Gerald Thomas Heydt, Raja Ayyanar, et al. Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distribution generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 634-641.

- [5] 张剑, 孙元章. 三相单级光伏并网系统对配网侧负荷建模的影响 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (2) : 73-78.
- [6] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Marco Liserre, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (5) : 1398-1409.
- [7] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] Amirnaser Yazdani, Prajna Paramita Dash. A control methodology and characterization of dynamics for a photovoltaic (PV) system interfaced with a distribution network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (3) : 1538-1551.
- [9] Michael E Ropp, Sigifredo Gonzalez. Development of a Matlab/Simulink model of a single phase grid connected photovoltaic system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23 (3) : 195-202.
- [10] Seu Kim, Jin Hong Jeon, Chang Hee Cho, et al. Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis solar energy [J]. 2009, 83 (5) : 664-678.
- [11] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (5) : 1198-1208.
- [12] 梁宏晖. 小功率光伏发电及最大功率跟踪控制的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [13] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Yong Kang. A variable step size INC MPPT method for PV systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (7) : 2622-2628.
- [14] Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng. A single-stage three-phase grid-connected photovoltaic system with Modified MPPT method and reactive power compensation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (4) : 881-886.

(收稿日期: 2015-02-10) EA

(上接第71页)

参考文献

- [1] 吴琦. 小波分析法在配电网谐振接地系统故障选线的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [2] 张慧芬, 张帆, 潘贞存. 基于注入信号法的配电网单相接地故障自动定位算法 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (6) : 19-43.
- [3] 孙霞. 配电网单相接地故障选线方法研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2007.
- [4] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005 (4) .
- [5] 唐晓初. 小波分析及其应用 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006.
- [6] 季涛. 基于暂态行波的配电线路故障测距研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [7] 林圣, 梅俊涛, 陈双, 等. 基于暂态行波时频特征的输电线路故障检测与选相方法 [J]. 电网技术, 2012, 36 (7) : 48-53.

(收稿日期: 2014-09-04) EA