

# 光伏逆变器短路特性分析

习伟<sup>1</sup>, 张哲<sup>2</sup>, 陈卫<sup>2</sup>, 张兆云<sup>2</sup>, 刘念<sup>3</sup>

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室  
(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 通过理论分析、故障仿真和试验等方法, 系统研究了光伏逆变器的故障特性。阐述光伏逆变器的拓扑结构和双环控制原理, 建立光伏发电系统的仿真模型。仿真不同短路故障时光伏逆变器的输出特征, 分析影响光伏逆变器输出特征的主要因素, 给出了某光伏逆变器的试验数据。研究表明, 与传统同步电机电源相比, 光伏电源馈出的短路电流在其基本组成、衰减速率以及幅值特征等方面均存在较大差异, 将对微网保护性能带来直接影响。  
**关键词:** 分布式发电; 光伏; 逆变器; 短路特性

## Research on fault characteristic of the PV inverter

XI Wei<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>2</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>, ZHANG Zhaoyun<sup>2</sup>, LIU Nian<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, HUST, Wuhan 430074, China;  
3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Through theoretical analysis, simulation and experiments, the fault characteristics of PV inverter generator are mainly researched. The PV inverter topologies and double-loop control principle are described, a simulation model of PV inverter generator is established, the output characteristics after the different short circuit fault are simulated, the main factors are analyzed, and the test data of a PV inverter is given. Compared with the traditional synchronous generator, short circuit current of distributed generator is quite different in basic composition, decay, amplitude characteristics, etc.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177058 and No. 5127708).

**Key words:** DG; PV; inverter; fault characteristic

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0070-06

## 0 引言

电力系统中的电源, 传统意义是指并入电力系统的同步发电机。随着分布式发电技术的发展, 各种形式的发电装置并入电力系统, 特别是由电力电子元件构建的逆变型电源, 作为分布式电源的主要形式越来越多的应用于电力系统中, 成为了微电网中的主要电源<sup>[1-2]</sup>。逆变型分布式电源由于含有电力电子元件及控制系统, 因而故障时产生不同于传统电源的特性, 给系统分析和保护带来新的问题<sup>[3-6]</sup>。

按照分布式电源的并网方式, 分布式电源可以分为三类: 第一类分布式电源是通过旋转电机和变流器并联并网的电源, 主要是双馈风力发电系统;

第二类分布式电源是仅仅通过变流器并网的电源, 主要包括直驱风力发电系统、光伏发电系统、蓄电池、微型燃气轮机等; 第三类电源是仅仅通过旋转电机并网的电源, 主要为小型同步发电机, 常见的为快速响应的柴油发电机组, 即以柴油机为原动机, 拖动同步发电机发电的一种电源设备。每类设备都具有各自的故障特征。本文将通过理论分析、仿真分析和试验等三方面来分析以光伏逆变器为代表的第二类分布式电源的故障特征。

## 1 理论分析

光伏逆变器的典型拓扑结构如图1所示<sup>[7-8]</sup>。直流侧电压为 $U_{dc}$ ,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 为逆变器交流侧输出的三相电流,  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 为电网侧三相电压。

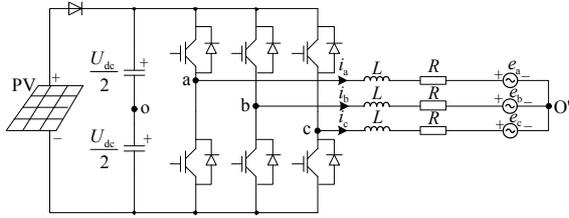


图 1 光伏逆变器典型拓扑结构

Fig. 1 A typical topology of the photovoltaic inverter

由图 1 可知

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

进一步分析来看, 逆变器数学模型经过派克变换和拉式变换后, 在  $dq$  坐标轴下可以表示为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lp + R & -\omega L \\ \omega L & Lp + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix}$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  为三相逆变器出口电压的  $d$ 、 $q$  分量;  $e_d$ 、 $e_q$  为电网电压的  $d$ 、 $q$  分量;  $i_d$ 、 $i_q$  为逆变器输出电流矢量的  $d$ 、 $q$  分量, 以流出逆变器方向为正;  $R$  和  $L$  为逆变器出口电阻和电感;  $p$  为微分算子。采用电网电压定向的  $dq$  分解法, 得到电网侧电压分量的表达式为

$$\begin{cases} e_d = e_{gm} \\ e_q = 0 \end{cases}$$

其中,  $e_{gm}$  为电网相电压幅值。有功功率和无功功率可以简单表达为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} u_d i_d \\ Q = -\frac{3}{2} u_d i_q \end{cases}$$

光伏逆变器主要的控制方法有 PI 控制、滞环控制、双闭环控制、空间矢量 PWM 控制、无差拍控制、重复控制、比例谐振控制等。在并网光伏逆变器中, 电流型控制方式的应用较为成熟, 一般采用双闭环控制<sup>[8]</sup>。在双闭环控制方式中, 电压调节器作为外环控制, 一方面控制逆变器直流侧输出电压  $U_{dc}$  跟踪电压给定值  $U_{dcref}$ ; 另一方面通过 PI 调节器得到有功输入电流分量的参考值  $i_d^*$  和无功电流分量的参考值  $i_q^*$ 。电流内环的作用主要是按电压外环输出的电流指令进行电流控制。

基于上述逆变器模型, 通过分别给定  $i_d$  和  $i_q$  来

实现有功和无功的解耦控制。当电流调节器采用 PI 调节器时,  $u_d$ 、 $u_q$  的控制方程为

$$\begin{cases} u_d = (K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_d^* - i_d) - \omega L i_q + e_d \\ u_q = (K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases}$$

式中:  $K_{ip}$ 、 $K_{il}$  为电流内环比例调节增益和积分调节增益;  $i_q^*$ 、 $i_d^*$  为  $i_q$ 、 $i_d$  电流指令值。图 2 为在同步旋转坐标系下电压外环和电流内环的控制框图。这样实现了  $d$ 、 $q$  轴变量的解耦, 可以分别控制逆变器输出的有功功率和无功功率。

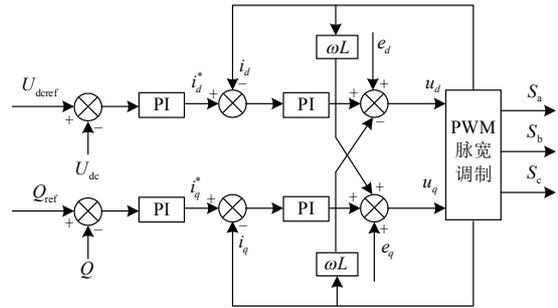


图 2 光伏逆变器的控制框图

Fig. 2 Control diagram of the PV inverter

通常情况下, 光伏发电系统的输出功率随着外部环境条件的变化而变化, 当光照强度、阵列工作温度发生变化时, MPPT 控制器随之调整逆变器输入电压而达到当前工况下的最佳工作点。因此, 逆变器的控制目标为直流端工作电压参考值  $U_{dcref}$  (一般为 MPPT 计算出结果) 和无功功率参考值  $Q_{ref}$  得出  $i_d^*$  和  $i_q^*$ , 然后作为电流内环的参考值。上述控制策略可以简化为图 3 的表示形式。

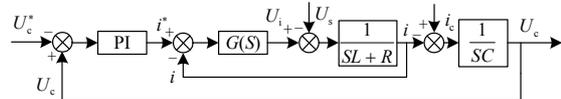


图 3 并网控制框图

Fig. 3 Simplified control diagram of the PV inverter

光伏系统的故障特性取决于逆变器的控制特性, 为了保证在电力系统发生短路时的短路电流不超过逆变器的限定值, 通常在逆变器控制回路中的电流内环加入饱和模块。当发生故障时, 内环参考电流将受到限制, 通过设置饱和模块的上限, 从而使故障电流限制在允许的范围内, 一般逆变器的短路电流限制在额定电流的 1.2~1.5 倍。

当饱和模块生效时, 双环控制系统的外环控制

失效,系统变为纯电流控制,控制系统如图 4 所示。

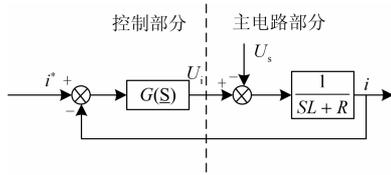


图 4 电流控制框图

Fig. 4 Current control diagram of the PV inverter

系统发生短路故障时,逆变器输出有两种情况。

(1) 饱和模块不生效

远端故障时,光伏发电系统的功率外环控制起决定性作用,有功电流增大,增大后的电流幅值在限幅门槛之内,因而此时的故障特性和负荷突然增加的响应一致,经过一个短暂的过渡过程,光伏发电系统达到新的稳态,此时输出功率仍然等于故障前的输出功率,光伏发电系统等效于一个等功率源。

(2) 饱和模块生效

近端故障时,由于端口电压降低,此时按照等功率源计算,为了保持功率恒定,将输出较大电流;如果输出电流超过了逆变器的限制,电压外环将失去作用,双环控制变成了纯电流控制。由于电流饱和和控制模块在很短的时间内便能够达到稳态值,在进入稳态后电网扰动电压消失,光伏系统的输出电流  $i$  与电流饱和模块的设定值  $i^*$  相等。

综上所述,故障发生后存在一个过渡过程,在这个过渡过程中,可能产生一定量的谐波,这个过渡过程时间的长短主要取决于光伏发电系统的直流侧电容大小、双环控制外环控制参数(主要是  $K_p$  参数)、直流侧输入功率等。

2 仿真分析

在理论分析的基础上对光伏逆变器进行仿真,利用 PSCAD 建立的并网逆变器主电路如图 6 所示。

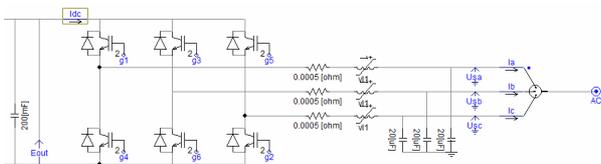


图 5 并网逆变器主电路

Fig. 5 Main circuit of the PV inverter

其中核心采用双环控制来实现 PQ 解耦控制,逻辑图如图 6 所示。

在搭建的光伏模型的基础上对光伏故障进行深入分析,具体的短路模型图如图 7 所示。利用建立的短路模型分别分析了影响故障特征的因素以及不

同类型故障时光伏逆变器故障特征。

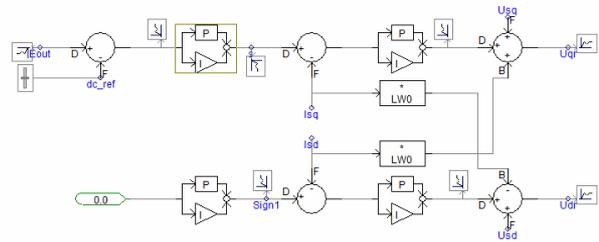


图 6 PQ 解耦控制

Fig. 6 PQ decoupling control the PV inverter

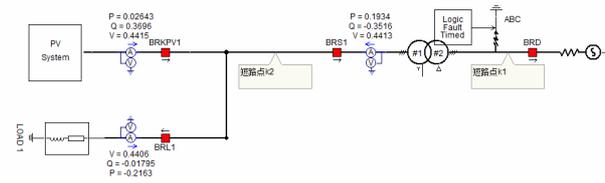


图 7 短路特性 PSCAD 仿真简图

Fig. 7 PSCAD simulation diagram of fault characteristics

2.1 不同类型故障时光伏逆变器故障特征

利用仿真模型分析了升压变高压侧三相故障、升压变低压侧三相故障、相间故障以及单相故障时的逆变器输出特征。故障前逆变器输出正序电流均为 0.276 kA, 无零序电流和负序电流。

(1) 升压变高压侧三相故障

在变压器高压侧发生三相故障, 低压侧电流电压波形如图 8 所示, 故障过程中存在 10 ms 的过渡过程。过渡过程结束之后, 电流和电压趋于稳定; 逆变器稳定后输出的正序电流是 0.544 kA, 功率方向是正方向。

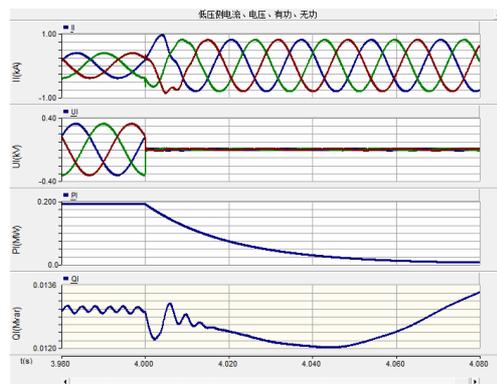


图 8 高压侧三相故障时低压侧电流电压波形

Fig. 8 Waveforms of high-side ABC fault

(2) 升压变低压侧三相故障

在变压器低压侧发生三相故障, 低压侧电流电压波形如图 9 所示, 故障过程中存在 10 ms 的过渡过程。过渡过程结束之后, 电流和电压趋于稳定; 逆变器稳定后输出的正序电流是 0.549 kA, 功率方

向是正方向, 故障电流和升压变高压侧三相故障基本相同。

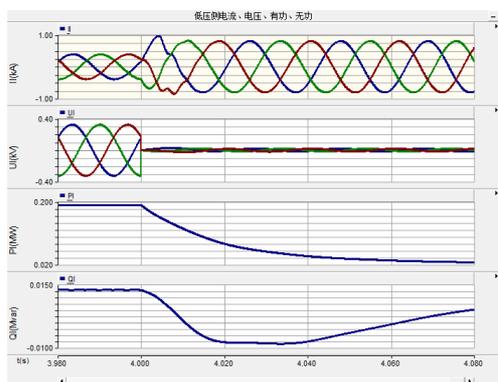


图 9 低压侧三相故障时低压侧电流电压波形  
Fig. 9 Waveforms of low-side ABC fault

### (3) 升压变低压侧 BC 两相故障

在变压器低压侧发生两相故障, 低压侧电流电压波形如图 10 所示, 故障过程中存在 10 ms 的过渡过程, 该段时间内基波幅值不稳定。过渡过程完毕之后, 电流和电压的基波幅值趋于稳定; 逆变器稳定后输出的正序电流是 0.560 kA, 功率方向是正方向, 故障电流和升压变高压侧三相故障基本相同; 非故障相电流和故障相电流幅值基本相同, 稳定后无零序分量和负序分量。

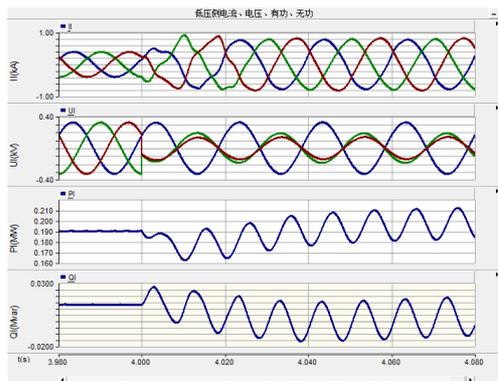


图 10 低压侧 BC 两相故障时低压侧电流电压波形  
Fig. 10 Waveforms of low-side BC fault

### (4) 低压侧单相故障

在变压器低压侧发生 A 相故障, 低压侧电流电压波形如图 11 所示, 故障过程中前 20 ms 电流基波幅值不稳定, 之后电流基波幅值基本稳定; 故障 100 ms 后逆变器稳定后输出的正序电流是 0.445 kA, 功率方向是正方向, 故障电流略小于升压变高压侧三相故障时的故障电流; 非故障相电流和故障相电流幅值基本相同, 稳定后无零序分量和负序分量。

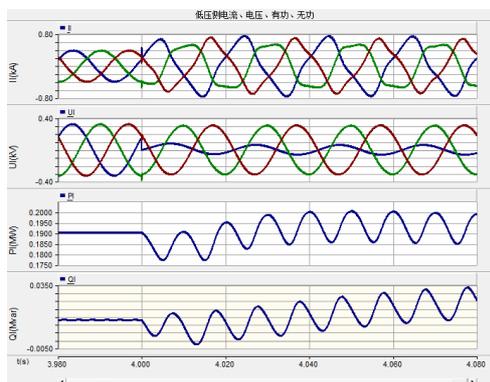


图 11 低压侧单相故障时低压侧电流电压波形  
Fig. 11 Waveforms of low-side AG fault

## 2.2 影响故障特征的因素

通过上节的分析可知, 光伏逆变器经过一个短暂过渡过程后, 最终输出的稳态电流取决于功率外环的限幅回路。由于逆变器的参数和运行工况的差异, 不同类型的逆变器的过渡过程有较大的差异。

本文以低压侧三相故障为例分析暂态过程的影响因素。仿真时双环控制的基本参数包括: 直流侧电容为 2  $\mu\text{F}$ ; 功率外环  $K_p=5$ 、 $K_i=1$ ; 光照强度为 2500 勒克斯; 故障前输出功率 190 kW; 峰值限制为 0.8 kA; 内环电流滤波时间为 2 ms。此时故障特征如图 13 所示, 故障后最高峰值 0.98 kA, 稳定后峰值 0.798 kA; 过渡过程大约 8 ms。

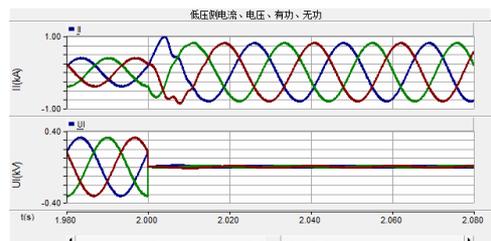


图 12 初始值情况下光伏逆变器输出  
Fig. 12 Waveforms of PV inverter output

### (1) 改变直流侧电容

直流侧电容增加到 20 mF, 故障特性如图 13 所示, 故障后最高峰值 0.798 kA, 稳定后峰值 0.798 kA; 过渡过程大约 10 ms。仿真表明, 直流侧电容的增加增大了过渡过程的时间, 减少了故障电流的峰值。

### (2) 改变功率外环参数

直流侧电容恢复到 2 mF, 外环参数改为  $K_p=0.5$ 、 $K_i=0.1$ , 故障特性如图 14 所示, 故障后最高峰值 0.87 kA, 稳定后峰值 0.798 kA; 过渡过程大约 15 ms。由于减小了外环的响应速度, 因而减少了控制系统的超调量; 同时增加了系统的反应时间。

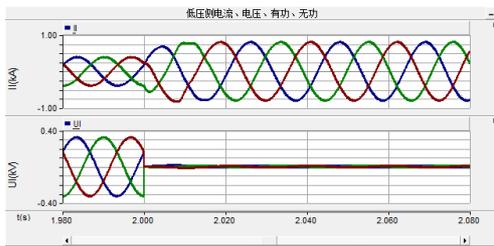


图 13 直流电容 20 mF 时光伏逆变器输出  
Fig. 13 Waveforms of PV inverter output

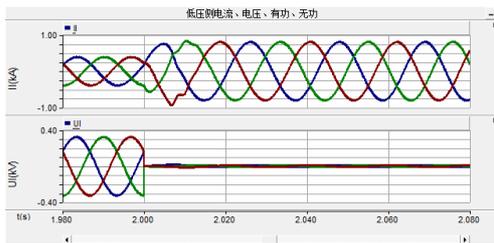


图 14 修改 Kp 后光伏逆变器输出  
Fig. 14 Waveforms of PV inverter output

(3) 改变光照强度

直流侧电容恢复到 2 mF，外环参数恢复为  $K_p=5$ 、 $K_i=1$ ，光照强度修改为 1000 勒克斯，故障特性如图 15 所示，故障后最高峰值 0.827 kA，稳定后峰值 0.798 kA；过渡过程大约 40 ms。

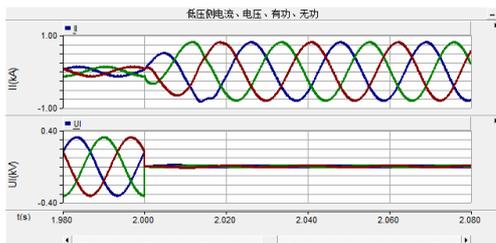


图 15 修改光照后光伏逆变器输出  
Fig. 15 Waveforms of PV inverter output

(4) 改变峰值限制

恢复到初始状态，将峰值限制改为 1.0 kA，故障特性如图 16 所示，故障后最高峰值 1.026 kA，稳

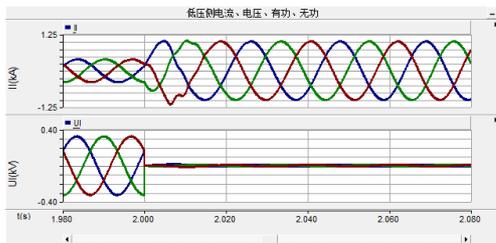


图 16 修改幅值限制后光伏逆变器输出  
Fig. 16 Waveforms of PV inverter output

定后峰值 0.798 kA；过渡过程大约 15 ms。此时故障后的稳态电流、最高峰值和响应时间明显增大。

综上所述：当峰值限制越大，则稳定后的输出电流越大；当直流侧电容越小，功率外环  $K_p$  越大，输入功率越大，过渡过程的时间越短，出现的峰值越大。

3 测试对比分析

在理论分析和仿真分析的基础上，选取了某主流厂家 500 kW 的逆变器进行了短路试验。选择某 500 kW 逆变器重载运行，三相短路导致逆变器并网电压跌落至 20% 额定。图 17 所示为某逆变器在短路瞬间 A 相电流的输出特性。

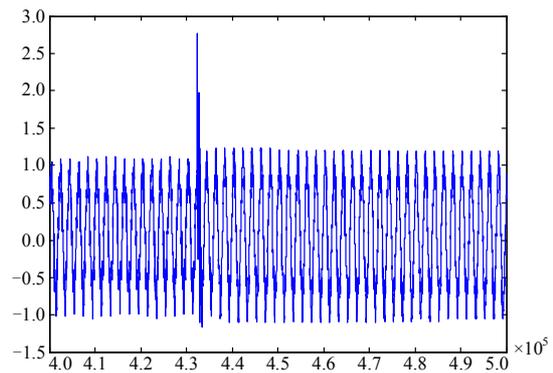


图 17 1#逆变器故障瞬间 A 相电流  
Fig. 17 Waveforms of PV inverter output

被测逆变器在短路瞬间最大峰值故障电流约为故障前稳态电流的 2.8 倍，持续时间大约为 2.5 ms，随后电流达到稳态值，约为故障前电流的 1.1 倍左右。实际逆变器的短路特性试验验证了理论分析和仿真模型的正确性。

4 总结

通过对各种故障类型的理论分析、仿真以及试验，可知光伏逆变器的故障特征主要包括：

- (1) 无论何种类型故障逆变器输出的功率方向能正确反映故障特征。
- (2) 故障过程中存在短时间过渡过程，该段时间内存在一定的谐波分量。
- (3) 过渡过程中的时间以及峰值影响因素较多，包括直流侧电容，功率外环参数，输入功率大小等。
- (4) 在电网对称和不对称故障情况下，逆变器分布式电源均只输出正序电流，而无负序或零序电流。故障过程中，无论是单相故障、两相故障或者三相故障，三相电流差别不大，无法通过电流选择故障相别。

(5) 由于逆变器中的限幅作用的影响, 无法通过电流大小区别故障发生的远近。

通常继电保护中短路电流的计算往往采用基波电流分量, 在快速保护中从算法启动到发送跳闸指令大概需要 20 ms, 约为 1 个周波的时间。因此, 该类系统提供的峰值故障电流和谐波电流对保护的影响可以忽略, 在短路电流计算分析时可以将光伏系统做适当的简化处理, 对于采用电压源型逆变器控制模式的光伏系统在短路电流计算时可以将其等效为正序电流源。

分析分布式电源的故障特征, 对于研究微电网的继电保护和控制系统是必不可少的一环。本文重点研究了以光伏为代表的直接逆变器并网类型电源的故障特征, 将为微电网的继电保护设备研发和新原理的研究提供足够的理论基础。

### 参考文献

- [1] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [2] 张纯江, 王晓寰, 薛海芬, 等. 微网中三相逆变器类功率下垂控制和并联系统小信号建模与分析[J]. 电工技术学报, 2012, 26(1): 32-39.  
ZHANG Chunjiang, WANG Xiaohuan, XUE Haifen, et al. A quasi-power droop control of three-phase inverters and small signal modeling and analysis of parallel system in micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 26(1): 32-39.
- [3] 周德佳, 赵争鸣, 袁立强, 等. 300 kW 光伏并网系统优化控制与稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 116-122.  
ZHOU Dejia, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Optimum control and stability analysis for a 300 kW photovoltaic grid-connected system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 116-122.
- [4] 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. Simulation study of the influence of photovoltaic power on line protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 75-79.
- [5] 刘伟, 彭冬, 卜广全, 等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 1-6.  
LIU Wei, PENG Dong, BU Guangquan, et al. A survey on system problems in smart distribution network with grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 1-6.
- [6] 周念成, 闫立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.  
ZHOU Niancheng, YAN Liwei, WANG Qianggang. Research on dynamic characteristic and integration of photovoltaic generation in microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 119-127.
- [7] 徐维. 并网光伏发电系统数学模型研究与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 17-21.  
XU Wei. Research and analysis on the mathematic model of GCPV generation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 17-21.
- [8] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52.  
LIU Dongran, CHEN Shuyong, MA Min, et al. A review on models for photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 47-52.

收稿日期: 2014-05-07; 修回日期: 2015-02-09

### 作者简介:

习伟(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事分布式新能源、变电站继电保护和自动化的研究工作; E-mail: xiwei@csg.cnm

张哲(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护和综合自动化;

陈卫(1970-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护和综合自动化。

(编辑 姜新丽)