

DOI: 10.7667/PSPC151938

基于关键因子和辨识技术的光伏并网系统短路电流建模

张尧^{1,2}, 晁勤¹, 李育强¹, 王一波¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要: 为了提高光伏并网系统短路时光伏系统输出短路电流计算准确性, 提出以电压跌落程度 n 和光伏并网逆变器输出有功 p 及电网电压正序分量 u^+ 三个特征量为关键因子, 分析推导三个关键因子与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 的关系。采用光伏并网逆变器输出对称三相正弦交流电流为控制目标的电压功率控制策略, 基于系统辨识技术, 建立光伏并网逆变器输出短路电流模型并辨识其相关参数。运用求和算法, 获得近似的光伏并网发电系统输出短路电流模型。基于 MATLAB 编程软件验证了所建模型的正确性。同时与 PSCAD/EMTDC 搭建的恒功率控制仿真模型对比分析论证了该模型能较准确反映光伏并网发电系统输出短路电流的大小。

关键词: 电网短路; 光伏并网逆变器; 关键因子; 电压功率控制; 系统辨识; 短路电流模型

Modeling of short circuit current for photovoltaic connected-grid system based on the key factors and identification technology

ZHANG Yao^{1,2}, CHAO Qin¹, LI Yuqiang¹, WANG Yibo¹

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830091, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of the calculation of photovoltaic system short circuit current, this paper proposes that voltage drop degree, the output active of photovoltaic connected-grid inverter, and the positive sequence component of the grid voltage are the key factors, and the relationship between the three key factors and the peak value of the output current of PV connected-grid inverter is analyzed. The voltage power control strategy for the control objective of the output symmetrical three-phase sinusoidal AC current of photovoltaic connected-grid inverter is adopted. The output current model of the PV connected-grid inverter is established and the relevant parameters are identified based on system identification technology. Using the sum algorithm, the output short circuit current model of photovoltaic connected-grid system is obtained. The built model can be verified by MATLAB programming software. At the same time, compared with the constant power control simulation model built by PSCAD/EMTDC, the model can accurately reflect the output short circuit current of PV grid connected power generation system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51367017) and International S & T Cooperation Program of China (No. 2013DFG61520).

Key words: grid fault; PV grid-connected inverter; key factor; voltage power control; system identification; fault current model

0 引言

随着光伏发电市场占有率逐年增加, 大规模光伏系统接入电力系统, 光伏系统和电网间的相互影响日益凸显。一方面, 电网短路时, 对光伏系统的输出产生影响。另一方面, 光伏系统输出短路电流

将对其接入电网线路保护及稳定性产生影响, 而电网短路时光伏并网发电系统输出短路电流随运行参数变化不能准确计算。因此构建电网短路时光伏并网发电系统输出短路电流模型, 是分布式电源接入电力系统分析、仿真、控制方法等方面的研究与设计的前提, 并且能够更好地研究光伏发电接入配电网后由短路故障产生的一系列暂态影响问题。

光伏并网逆变器是光伏系统实现并网发电的核心装置。目前关于光伏并网逆变器的研究主要集中在

基金项目: 国家自然科学基金资助(51367017); 科技部国家国际科技合作专项资助(2013DFG61520)

在光伏并网逆变器数学模型^[1-4], 逆变器拓扑结构, 逆变器控制策略^[5-13]三方面。文献[1]研究了电网正常情况下光伏并网逆变器的模型, 将提出的 wiener 模型与不同天气条件下的实测数据进行比较, 得出该模型能适应不同天气条件的变化, 但是得出的模型并不适用于电网短路时的情况。逆变器的数学模型与其采用的控制策略紧密相连, 文献[5-7]均研究了在电网电压跌落时, 光伏并网逆变器的控制策略。文献[5]只考虑电网电压对称跌落的控制策略, 在实际应用中具有一定局限性。文献[6]提出了光伏并网逆变器在电网电压不对称跌落时减小峰值电流的控制策略。该控制策略能将最大峰值电流从 189%减小到 140%, 但是也将电流谐波从 3%增大到 26%, 这对电网造成一定的污染。文献[7]以光伏并网逆变器输出恒定有功为控制目标, 通过公式推导了光伏并网逆变器输出电流峰值的表达式, 但输出电流峰值较大且不对称。文献[8]以光伏并网逆变器输出对称的三相正弦交流电流为控制目标, 进行了控制策略研究, 但未建立光伏并网逆变器输出短路电流模型。本文认为当电网不对称短路时, 以光伏并网逆变器输出对称的三相正弦交流电流, 其峰值不超过一定值为控制目标, 更有利于光伏并网系统实际运行控制需要且易于实现。

综上所述, 本文提出当光伏并网点短路时, 以光伏并网逆变器输出对称的三相正弦交流电流为控制目标, 以电压跌落程度 n 和光伏并网逆变器输出有功 p 及电网电压正序分量 u^+ 三个特征量为关键因子, 分析推导三个关键因子与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 的关系, 基于系统辨识技术, 建立光伏并网逆变器输出短路电流模型并辨识其相关参数, 通过对比仿真验证了本文所建模型的正确性。

1 基于光伏并网系统输出对称三相短路电流的电压功率控制策略

某光伏电站接入 10 kV 电网如图 1, 其光伏并网逆变器结构如图 2, 光伏阵列输出通过两级式光伏并网逆变器并网。两级式光伏并网逆变器由前级 DC/DC 升压环节和后级 DC/AC 逆变环节组成。后级 DC/AC 逆变环节输出经过滤波器和隔离变压器连接到三相电网。

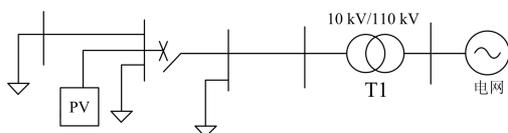


图 1 光伏系统接入 10 kV 电网示意图

Fig. 1 Diagram of 10 kV grid-connected photovoltaic system

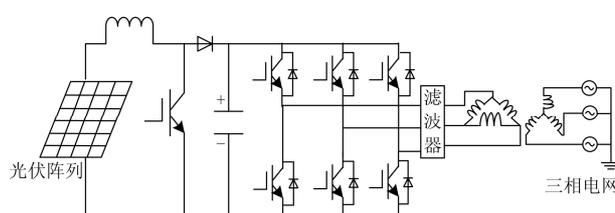


图 2 光伏并网逆变器结构

Fig. 2 PV grid-connected inverter structure

为了保证光伏并网逆变器在电网正常时和电网短路时都能高效稳定工作, 需对其进行切换控制。

当电网正常时, 网侧无短路故障发生, 并网逆变器的控制目标主要是实现最大功率跟踪控制, 所以需要实时采样光伏阵列输出电压 u_{pv} 和光伏阵列输出电流 i_{pv} , 依据最大功率点跟踪算法计算得到最大功率点参考电压 u_{ref} , 采用电压电流双环控制策略实现最大功率跟踪控制。电网正常时的控制策略与文献[5]电网电压正常时的控制框图相同, 在此不再重复。

当光伏并网点短路时, 电网电压跌落, 光伏并网逆变器的控制目标是输出对称的三相电流, 电流峰值不超过一定的范围, 否则有可能使光伏并网发电系统因过电流保护而切出电网, 无法对电网起到支持作用。因此采用电压功率控制策略。图 3 为电网短路时基于光伏并网系统三相短路电流对称输出的电压功率控制框图。利用序分量滤波器, 将采样的电网电压分解成电网电压正序分量 u^+ 和电网电压负序分量 u^- , 与采样的光伏并网逆变器的输出有功 p 共同确定 d 轴和 q 轴电流给定值, 再与采样的短路电流 i_d 、 i_q 相加后输入 PID 调节器, 达到对称的短路电流快速调节的目的。

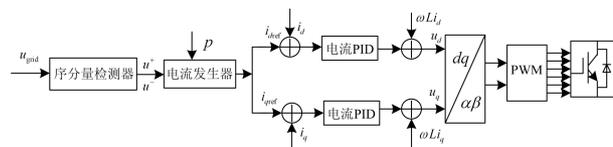


图 3 电网短路时的控制框图

Fig. 3 Control diagram of grid fault

2 基于光伏并网系统输出对称三相短路电流的模型构建及参数辨识

2.1 关键因子确定与短路电流关系

本文根据文献[8]在光伏并网逆变器输出对称三相短路电流的平衡正序控制策略下的短路波形, 分析可知: 在电网短路时影响光伏并网逆变器输出短路电流峰值大小有三个关键因子, 即电网电压跌落程度 n , 光伏并网逆变器的输出有功 p , 电网电压

正序分量 u^+ 。因此分析这三个关键因子与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 间的关系对光伏并网系统短路电流模型构建至关重要。

确定这三个关键因子与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 间的关系, 本文采用高阶非线性函数建模方法, 因此其模型阶次依据残差特性判定。即将模型阶次的判定问题归结为当 n_1 增加到 n_2 时目标函数 $J(n_2)$ 较 $J(n_1)$ 下降是否显著的问题: 如果目标函数 $J(n_2)$ 较 $J(n_1)$ 下降不显著, 那么判定系统阶次为 n_1 。如果目标函数 $J(n_2)$ 较 $J(n_1)$ 下降显著, 那么继续增加系统阶次至 n_3 , 再次判断, 直至目标函数下降不显著为止。

2.1.1 电网电压正序分量 u^+ 与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 的关系

当电网电压正常时, $u_{\text{grid}} = u^+ = u_N$, 此时光伏并网逆变器的输出电流峰值为额定运行情况下的电流峰值。当电网电压跌落时, 由于系统是三相三线制, 故不考虑零序分量的影响。 $u_{\text{grid}} = u^+ + u^-$, 当跌落程度越大时, u^+ 越小, 光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 越大, 比额定运行情况下的电流峰值大很多。当三个关键因子中的 n 与 p 两参数固定, 分析推导电网电压正序分量 u^+ 与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 的单值对应关系, 得出随 u^+ 减小, I_{\max} 呈增大趋势, 为反比关系, 但不呈线性关系。

可用高阶非线性函数表征, 但根据残差特性判定, 二阶以上反函数并没有比二阶反函数的拟合性更好, 因此模型的阶次拟定为二阶, 建立表达式如式(1)。

$$I_{\max} = \frac{1}{au^{+2} + bu^+ + c} \quad (1)$$

但根据残差特性判定, 二阶反函数并没有比一阶反函数残差平方和更小。

故电网电压正序分量 u^+ 与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 之间的函数关系近似确定为式(2)。

$$I_{\max} = \frac{k}{u^+} \quad (2)$$

计算电网电压的正序分量 u^+ 和负序分量 u^- 的方法很多, 有对称分量法、延时消除法、旋转坐标变换法等, 前两种方法原理简单, 但对谐波较为敏感, 第三种方法运算量较大。文献[10]提出基于复数滤波器的正序/负序分量计算方法, 对谐波不敏感、便于实现、运算量小。因此本文采用该方法。

2.1.2 电压跌落程度 n 与光伏并网逆变器输出短路电流峰值 I_{\max} 的关系

当电网短路时, 电网电压跌落程度 n 越大, u^-

越大, u^+ 越小, 即

$$n = \frac{u^-}{u^+} \quad (3)$$

n 的取值范围在 0~1 之间。当 $n=0$ 时, 表明为正常运行, 电流峰值是额定电流峰值。当 $n=1$ 时, 电网电压跌落程度最严重, 取电流峰值限值是额定电流峰值的 1.8 倍。

因此固定 p 与 u^+ 两参数, 电流峰值的大小与此时电网电压跌落程度 n 有直接关系, 即随着 n 的增大, 光伏并网逆变器的输出电流峰值 I_{\max} 也在增大, 但不是呈线性关系。

可用高阶非线性函数表征, 但根据残差特性判定, 三阶以上函数并没有比三阶函数的拟合性更好, 因此 n 与 I_{\max} 的单值对应关系模型的阶次拟定为三阶, 建立表达式如式(4)。

$$I_{\max} = an^3 + bn^2 + cn + d \quad (4)$$

根据残差特性判定三阶函数并没有比二阶函数残差平方和更小, 而二阶函数远远比一阶函数 $I_{\max} = kn$ 残差平方和更小。

故电压跌落程度 n 与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 之间的函数关系近似确定为式(5)。

$$I_{\max} = an^2 + bn + c \quad (5)$$

2.1.3 光伏并网逆变器输出有功 p 与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 的关系

当光伏并网逆变器输出有功 $p=0$ 时, 光伏并网逆变器输入电流 $I_{\text{pv}}=0$, 光伏并网逆变器直流侧电压 $u_{\text{dc}} \neq 0$, 且基本为定值, 光伏并网逆变器的输出电流峰值为 0。当光伏并网逆变器输出有功 p 增大时, I_{pv} 也增大, $u_{\text{dc}} \neq 0$, 仍基本为定值, 此时光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 也增大。

因此固定 n 与 u^+ 两参数, 确定光伏并网逆变器输出有功 p 与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 的单值对应关系, 得出随 p 增大, I_{\max} 也增大, 为正比关系, 但不呈线性关系。

可用高阶非线性函数表征, 但根据残差特性判定, 二阶以上函数并没有比二阶函数的拟合性更好, 因此 p 与 I_{\max} 的单值对应关系模型的阶次拟定为二阶, 建立表达式如式(6)。

$$I_{\max} = ap^2 + bp + c \quad (6)$$

根据残差特性判定二阶函数并没有比一阶函数残差平方和更小。

故光伏并网逆变器输出有功 p 与光伏并网逆变器输出电流峰值 I_{\max} 之间的函数关系近似确定为

$$I_{\max} = kp \quad (7)$$

2.2 模型构建

将电压跌落程度 n , 光伏并网逆变器输出有功 p , 电网电压正序分量 u^+ 三个变量固定其中两个, 确定第三个量与 I_{\max} 的单值对应关系, 是一种近似简化确定模型结构的方法。综合式(2)、式(5)、式(7), 光伏并网逆变器输出短路电流峰值模型确定为式(8)。

$$I_{\max} = \frac{kp(an^2 + bn + c)}{u^+} \quad (8)$$

光伏并网逆变器输出短路电流瞬时模型为式(9)。

$$I = \frac{kp(an^2 + bn + c)}{u^+} \sin(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

2.3 参数辨识

将文献[8]光伏并网逆变器仿真输出有功 p 和计算数据电网电压正序分量 u^+ 和电网短路时电压跌落程度 n 代入公式(8), 可以得到 k, a, b, c 四个未知参数。

经过计算获得: $k = \frac{2}{3}, a=1, b=2, c=-1$ 。

假如由 m 伏逆变器并联组成光伏发电系统, 采用叠加原理确定光伏并网发电系统的短路电流的表达式。那么光伏并网发电系统的短路电流瞬时表达式为式(10)。

$$I_{\text{总}} = \frac{\sum_{i=1}^m k_i p_i (a_i n^2 + b_i n + c_i)}{u^+} \sin(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

光伏并网发电系统的短路电流峰值表达式为式(11)。

$$I_{\max \text{总}} = \frac{\sum_{i=1}^m k_i p_i (a_i n^2 + b_i n + c_i)}{u^+} \quad (11)$$

3 本文构建光伏并网系统短路电流模型准确度评估方法

对本文构建的光伏并网系统短路电流模型准确度进行评估, 需根据式(8)或式(11)计算光伏并网逆变器的输出短路电流峰值 I_{\max} 或 $I_{\max \text{总}}$ 。

同时对文献[8]光伏并网逆变器输出短路电流仿真波形进行离散采样, 采样值为 $I(1), I(2), I(3), \dots, I(N)$, N 为采样次数。经快速傅里叶变换后得实部 I_S 和虚部 I_C , 见式(12)和式(13)。

$$I_S = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N I(k) \sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right) \quad (12)$$

$$I_C = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N I(k) \cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right) \quad (13)$$

求出实部 I_S 和虚部 I_C , 即可求出短路后正弦电流峰值为

$$I'_{\max} = \sqrt{I_S^2 + I_C^2} \quad (14)$$

公式(14)中 I'_{\max} 为文献[8]光伏并网发电系统输出峰值, 公式(11)中 $I_{\max \text{总}}$ 为本文提出的光伏并网发电系统模型计算输出。

求取文献[8]仿真输出与本文模型计算输出的拟合度, 如式(15), 即

$$f = \left(1 - \frac{\left| I'_{\max} - I_{\max \text{总}} \right|}{\left| I'_{\max} - \bar{I}_{\max} \right|} \right) \times 100 \quad (15)$$

所得拟合度数值越大, 表明系统辨识模型精确度越高, 因此式(15)可检验本文所建模型的准确性。

4 仿真实验

为了验证本文所建模型的准确性, 采用 PSCAD/EMTDC 软件搭建了电网短路时控制目标为输出对称三相电流的光伏并网发电系统短路电流仿真模型, 采用 MATLAB 编程实现了电网短路时控制目标为输出对称三相电流且最大峰值限值为 1.25 倍额定电流的光伏并网发电系统短路电流模型(简称本文计算模型), 与文献[8]光伏并网发电系统仿真输出短路电流波形(简称文献[8]仿真模型), 进行了拟合度评估。

设光伏阵列输出最大功率为 0.5 MW, $U_m = 603 \text{ V}$, $I_m = 818.6 \text{ A}$, $U_{oc} = 757 \text{ V}$, $I_{sc} = 893.8 \text{ A}$, 逆变器直流侧电容为 80 000 μF , 隔离变压器变比为 380 V/10 kV。电网短路时光伏逆变器 PI 调节器的比例系数 P 和积分系数 I 分别为 0.15 和 0.1。

4.1 构建模型仿真实验

在 0.02 s 时光伏发电系统并网点发生单相接地短路, 电网电压波形曲线如图 4 所示。按输出对称三相电流为控制目标的三相短路电流输出波形如图 5 所示。

由图 4 和图 5 可以得出:

1) 在电网发生单相故障时, 电网三相电压是不对称的, 而光伏并网逆变器控制目标采用对称三相电流控制, 光伏并网逆变器输出短路电流的大小及波形是三相对称的, 表明基于输出对称三相电流控制目标所建模型正确。

2) 当电网短路时, 光伏并网发电系统按输出对称三相电流控制所输出的短路电流峰值小, 是故障前电流峰值的 1.25 倍。有利于光伏并网系统低电压穿越性能提高。

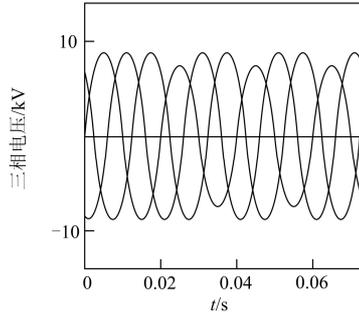


图 4 单相短路时电网电压波形图

Fig. 4 Grid voltage waveform when single phase fault

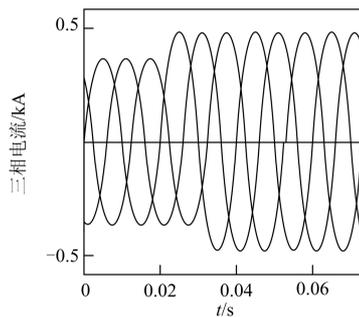


图 5 按输出对称三相控制的光伏并网逆变器输出短路电流

Fig. 5 Output short-circuit current of photovoltaic grid-connected inverter controlled by output symmetrical three phase current

4.2 拟合度评估

表 1 给出了电网三相短路电压跌落 40% 本文计算模型与文献[8]仿真模型对比结果及拟合度 f 。表 2 给出了电网单相短路电压跌落 30% 时本文计算模型与文献[8]仿真模型对比结果及拟合度 f 。

表 1 $n=40\%$ 时本文计算模型与文献[8]仿真模型对比结果及拟合度 f

Table 1 Contrast results and fitting degree between this paper computational model and simulation model when $n=40\%$

p/MW	$I_{\text{max总}}/\text{kA}$	$I'_{\text{max}}/\text{kA}$	f
0.5	42.8	44.6	95.8
0.4	35.3	36.9	95.4
0.3	28.7	30.1	95.1
0.2	19.1	20.3	93.8
0.1	12.9	13.8	93.1

表 2 $n=30\%$ 时本文计算模型与文献[8]仿真模型对比结果及拟合度 f

Table 2 Contrast results and fitting degree between this paper computational model and simulation model when $n=30\%$

p/MW	$I_{\text{max总}}/\text{kA}$	$I'_{\text{max}}/\text{kA}$	f
0.5	35.5	36.5	97.2
0.4	28.4	29.3	96.8
0.3	21.3	22.1	96.2
0.2	14.6	15.3	95.2
0.1	7.1	7.7	91.8

通过表 1 和表 2 两种模型比较结果可得如下结论:

1) 电网三相短路时, 文献[8]仿真模型与本文计算模型输出电流之间的差距比单相短路时大, 说明 n 与 I_{max} 之间的函数关系还需要大量数据进一步拟合, 这是今后继续研究的工作。

2) 电网单相短路时, 文献[8]仿真模型与本文计算模型输出电流最大拟合度达 97.2, 电网三相短路时, 文献[8]仿真模型与本文计算模型输出电流最大拟合度达 95.8, 表明本文计算模型正确。

3) 从模型需要的已知量, 计算的复杂程度来说, 本文提出的模型原理简单, 便于实现, 运算量小。

5 结论

本文基于电压跌落程度 n 和光伏并网逆变器输出有功 p 及电网电压正序分量 u^+ 三个关键因子和系统辨识技术, 建立了以输出对称三相电流为控制目标的光伏并网逆变器输出短路电流模型。利用 Matlab 编程软件验证了所建模型的正确性, 并与恒功率控制仿真模型对比, 得出按输出对称三相电流控制目标建模优于按输出恒定有功控制目标建模。

参考文献

[1] 郑伟, 熊小伏. 基于 Wiener 模型的光伏并网逆变器模型辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 18-26.
ZHENG Wei, XIONG Xiaofu. A model identification method for photovoltaic grid-connected inverters based on the wiener model[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 18-26.

[2] 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.

- [3] 习伟, 张哲, 陈卫, 等. 光伏逆变器短路特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 70-75.
XI Wei, ZHANG Zhe, CHEN Wei, et al. Research on fault characteristic of the PV inverter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 70-75.
- [4] 庄慧敏, 巨辉, 肖建. 高渗透率逆变型分布式发电对电力系统暂态稳定和电压稳定的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 84-89.
ZHUANG Huimin, JU Hui, XIAO Jian. Impacts of inverter interfaced distributed generation with high penetration level on power system transient and voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 84-89.
- [5] 郑飞, 张军军, 丁明昌. 基于 RTDS 的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 1-6.
ZHENG Fei, ZHANG Junjun, DING Mingchang. Modeling and control strategy of low voltage ride through the photovoltaic power generation system based on RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 1-6.
- [6] MIRET J, CASTILLA M, CAMACHO A, et al. Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4262-4271.
- [7] 谭骞, 徐永海, 黄浩, 等. 不对称电压暂降情况下光伏逆变器输出电流峰值的控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 601-608.
TAN Qian, XU Yonghai, HUANG Hao, et al. A control strategy for peak output current of PV inverter under unbalanced voltage sags[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 601-608.
- [8] RODRIGUEZ P, TIMBUS A V, TEODORESCU R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 2583-2592.
- [9] CASTILLA M, MIRET J, SOSA J L, et al. Grid-fault control scheme for three-phase photovoltaic inverters with adjustable power quality characteristics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 25(12): 2930-2940.
- [10] 李威辰, 陈桂鹏, 崔文峰, 等. 模块化光伏并网逆变器的线性功率控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 157-165.
LI Weichen, CHEN Guipeng, CUI Wenfeng, et al. Linear power control for modular photovoltaic grid-connected inverter system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 157-165.
- [11] 姜卫东, 吴志清, 李王敏, 等. 电网不对称时抑制负序电流并网逆变器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 76-84.
JIANG Weidong, WU Zhiqing, LI Wangmin, et al. Control strategy of suppressing negative sequence current of grid-connected inverter based on asymmetric grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 76-84.
- [12] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223.
YANG Ming, ZHOU Lin, ZHANG Dongxia, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic power plants for the effect of grid impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223.
- [13] 康忠健, 肖阳. 含分布式电源的配电网自适应保护算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 29(2): 1-4.
KANG Zhongjian, XIAO Yang. Adaptive protection algorithm research of distribution network containing distributed power[J]. Power Grid and Clean Energy, 2014, 29(2): 1-4.

收稿日期: 2015-11-03; 修回日期: 2016-01-28

作者简介:

张尧(1982-), 女, 博士研究生, 从事继电保护及新能源方面的研究。E-mail: 479510278@qq.com

(编辑 张爱琴)