

DOI: 10.7667/PSPC161644

大规模光伏电站中箱式变电站对光伏组件的影响分析

路染妮¹, 王钰洁², 杜先君³

(1. 西安航空职业技术学院, 陕西 西安 710089; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;
3. 兰州理工大学电信学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 随着全球能源紧缺, 大规模光伏电站越来越成为新能源发电的重要形式之一。大规模光伏发电常采用箱式变电站作为将光伏逆变器出口的低压交流电升为高压电的升压设备。分析了箱式变电站中普遍使用的双分裂绕组变压器对光伏电池的影响。提出了通过减小光伏电池对地电压波动来减小对地回路电流的结论。并得出双分裂变压器两个低压侧绕组存在耦合, 引起光伏逆变器低压绕组中心点电压同步波动, 从而电池组件产生噪音的结论。最后通过仿真验证上述理论分析的可行性和有效性。

关键词: 光伏发电; 箱式变电站; 光伏逆变器; 回路电流; 组件噪音

Effects analysis of box-type substation on photovoltaic modules in large-scale photovoltaic power station

LU Ranni¹, WANG Yujie², DU Xianjun³

(1. Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Because of the vast shortage of global energy, the large-scale photovoltaic (PV) power generation has become one of the important new energy generations. Large-scale PV power generation often uses box-type substation as boosting device of raising the low-voltage alternating current of PV inverter outlet to high-voltage current. The impact of box-type substation double split-winding transformer commonly used in box-type substation on PV modules is analyzed. The conclusion that decreasing PV battery ground-to-ground voltage fluctuations can reduce the ground loop current is researched. It researches that there is a coupling relationship between the windings of two low-voltage sides of double split transformer, which causes the central point voltage synchronous fluctuations of PV inverter low-voltage windings, thereby results in battery modules noise. Finally, the feasibility and effectiveness of the above theoretical analysis are verified by simulation.

This work is supported by Natural Science Foundation of Gansu Province (No. 1506RJZA104).

Key words: PV power generation; box-type substation; PV inverter; loop current; modules noise

0 引言

光伏发电已成为发电系统的重要组成部分^[1-3], 其中大规模并网光伏发电系统随着光伏电站更好的消纳能力^[4]取得蓬勃的发展, 成为科研院所和各高等院校研究的热点^[5-7]。大规模光伏电站系统一般情况下根据设计的装机容量由若干子方阵组成^[8]。每500 kWp 光伏电池^[9]汇流设备^[10]与一台500 kW 逆

变器构成一个光伏发电单元, 每个光伏发电单元经1台并网逆变器将直流电转换为低压交流电, 两个光伏发电单元经1台1000 kVA 升压变压器, 将逆变器输出的交流电升压至35 kV^[11-12]。其结构图如图1所示。

箱式变电站由于其运行灵活、操作方便、维修少、性能等优点作为光伏发电系统中的重要设备。工程上普遍选用双分裂绕组变压器。两台并网逆变器共同连接至变压器的低压侧, 即双分裂绕组变压器低压侧。

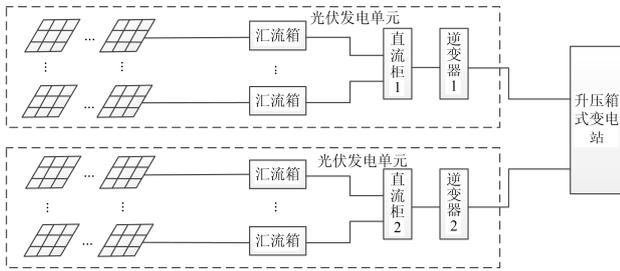


图 1 大规模光伏电站结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large-scale PV power substation

文献[13-17]概述了光伏并网发电系统中电能质量调节功能的发展背景与研究意义，总结了光伏并网系统对电网电能质量的影响。文献[18]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。文献[19]提出一种基于电压定向矢量控制的低电压穿越控制策略，可以在电压跌落时

保持并网运行，并补偿一定的无功功率以恢复并网电压，实现低电压穿越。文献多研究光伏系统对网侧^[20]的影响而少有研究变压器对逆变器侧的影响。而实际中当两台逆变器调制波信号不同步或者母线电压不一致时，光伏电池对地会产生较大电压波动并且增大对地回路电流。过大的对地回路电流不仅会降低整个光伏系统的发电效率而且会威胁到系统的安全运行。同时，双分裂变压器低压侧两个绕组并未互相连通，且低压侧绕组之间有寄生电容。该寄生电容对于绕组间的高频成分形成通路，对并网逆变器的工作有影响。

1 并网逆变器共用箱变漏电流分析

1.1 原理分析

两台逆变器共用箱式变电站电路原理图如图 2 所示。

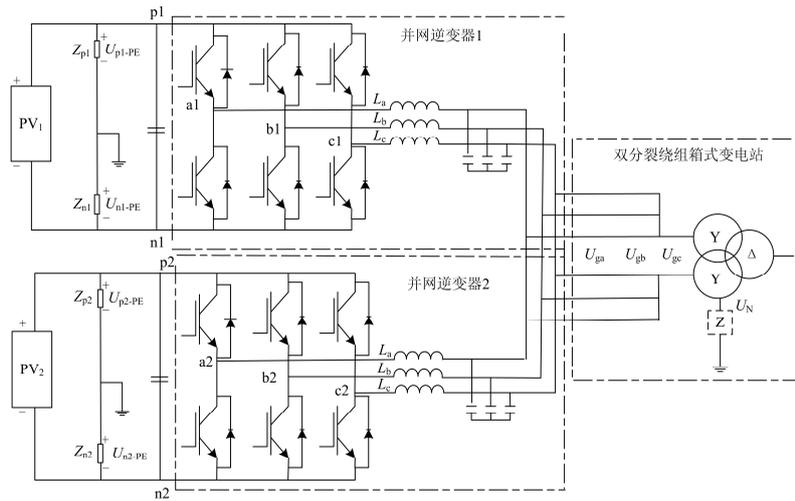


图 2 两台逆变器共用箱式变电站电路原理图

Fig. 2 Circuit principle diagram of two inverters sharing box-type substation

光伏电池的寄生电容不可避免^[21]，它与电池板面积、材料、框架、环境及安装方式等有关，寄生电容与大地形成回路，等效为 Z_p 、 Z_n 。升压变压器的低压侧绕组呈电压源特性，等效为 U_{ga} 、 U_{gb} 、 U_{gc} ，变压器中性点不接地，但是存在较大的对地等效阻抗，如 Z 所示。 U_N 为变压器中性点对地电压。分析可知，对地电压满足以下公式：

$$U_{p1-PE} = U_{PV1} \left(1 - \frac{S_{a1} + S_{b1} + S_{c1}}{3} \right) + U_{N-PE} \quad (1)$$

$$U_{n1-PE} = -U_{PV1} \left(\frac{S_{a1} + S_{b1} + S_{c1}}{3} \right) + U_{N-PE} \quad (2)$$

$$U_{p2-PE} = U_{PV2} \left(1 - \frac{S_{a2} + S_{b2} + S_{c2}}{3} \right) + U_{N-PE} \quad (3)$$

$$U_{n2-PE} = -U_{PV1} \left(\frac{S_{a2} + S_{b2} + S_{c2}}{3} \right) + U_{N-PE} \quad (4)$$

从以上公式可以看出， U_{n1-PE} 与 U_{n2-PE} 受两台逆变器的开关函数 S_{a1} 、 S_{b1} 、 S_{c1} 、 S_{a2} 、 S_{b2} 、 S_{c2} 的影响。则有

$$U_{n1-PE} - U_{n2-PE} = U_{PV2} \frac{S_{a2} + S_{b2} + S_{c2}}{3} - U_{PV1} \frac{S_{a1} + S_{b1} + S_{c1}}{3} \quad (5)$$

两台逆变器直流侧对大地和箱变低压侧与大地的电流方程为

$$\frac{U_{p1-PE}}{Z_{p1}} + \frac{U_{n1-PE}}{Z_{n1}} + \frac{U_{p2-PE}}{Z_{p2}} + \frac{U_{n2-PE}}{Z_{n2}} + \frac{U_{N-PE}}{Z} = 0 \quad (6)$$

为便于分析, 假设 $Z_{p1}=Z_{n1}=Z_1$, $Z_{p2}=Z_{n2}=Z_2$, 则式(6)可化简为

$$\frac{U_{PV1} + 2U_{n1-PE}}{Z_1} + \frac{U_{PV2} + 2U_{n2-PE}}{Z_2} + \frac{U_{N-PE}}{Z} = 0 \quad (7)$$

把式(5)代入式(7)可得

$$\frac{U_{PV1} + 2U_{n1-PE}}{Z_1} + \frac{\frac{2}{3}(S_{a2} + S_{b2} + S_{c2})U_{PV2} - \frac{2}{3}(S_{a1} + S_{b1} + S_{c1})U_{PV1}}{Z_2} + \frac{U_{N-PE}}{Z} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{U_{N-PE}}{Z} = 0$$

$$U_{n1-PE} \left(\frac{2}{Z_1} + \frac{2}{Z_2} \right) = \frac{U_{PV1}}{Z_1} - \frac{U_{PV2}}{Z_2} + \frac{\frac{2}{3}(S_{a2} + S_{b2} + S_{c2})U_{PV2} - \frac{2}{3}(S_{a1} + S_{b1} + S_{c1})U_{PV1}}{Z_2} - \frac{U_{N-PE}}{Z} \quad (9)$$

$\frac{U_{PV1}}{Z_1} - \frac{U_{PV2}}{Z_2}$ 为直流成分, 其影响不大; $\frac{U_{N-PE}}{Z}$

较小, 可以忽略不计; $\left[\frac{2}{3}(S_{a2} + S_{b2} + S_{c2})U_{PV2} - \frac{2}{3}(S_{a1} + S_{b1} + S_{c1})U_{PV1} \right] / Z_2$ 为高频波动成分, 占主导地位。若将两台逆变器调制波的载波信号进行同步, 即可近似实现:

$$S_{a2} + S_{b2} + S_{c2} = S_{a1} + S_{b1} + S_{c1} \quad (10)$$

同时, 通过阵列参数匹配亦可近似实现:

$$U_{PV1} = U_{PV2}$$

1.2 仿真验证

仿真条件: $Z_{p1}=Z_{n1}=Z_{p2}=Z_{n2}=Z_2=10 \mu\text{F}$ 。

1) 逆变器 1 的母线电压为 700 V, 逆变器 2 的母线电压为 600 V, 载波不同步; 图 3 为其直流对地电流。

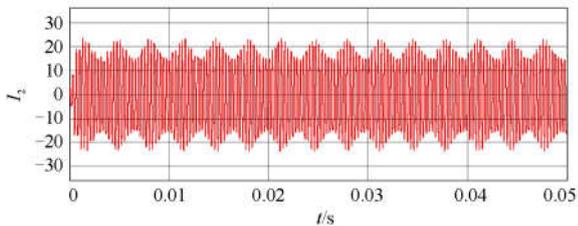


图 3 逆变器 1 直流对地电流

Fig. 3 Direct current to ground of inverter 1

2) 逆变器 1 的母线电压为 600 V, 逆变器 2 的母线电压为 600 V, 载波不同步; 其直流对地电流如图 4 所示。

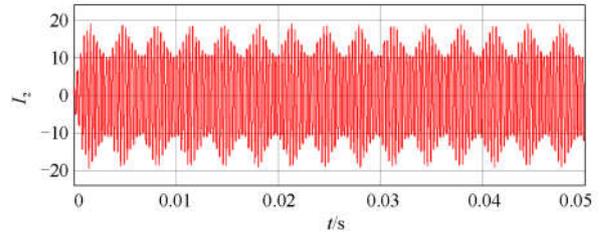


图 4 逆变器 1 直流对地电流

Fig. 4 Direct current to ground of inverter 1

3) 逆变器 1 的母线电压为 700 V, 逆变器 2 的母线电压为 600 V, 载波同步; 其直流对地电流如图 5 所示。

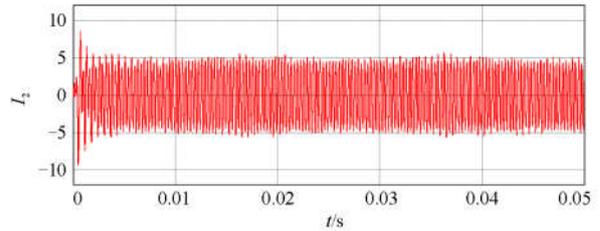


图 5 逆变器 1 直流对地电流

Fig. 5 Direct current to ground of inverter 1

4) 逆变器 1 的母线电压为 600 V, 逆变器 2 的母线电压为 600 V, 载波同步; 其直流对地电流如图 6 所示。

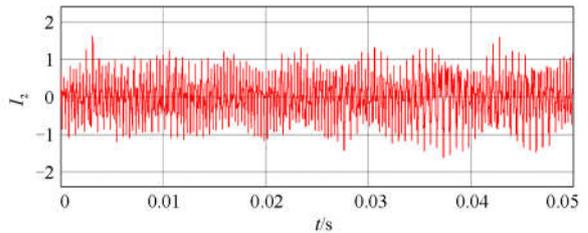


图 6 逆变器 1 直流对地电流

Fig. 6 Direct current to ground of inverter 1

通过上述仿真结果可知, 可实现两台逆变器载波信号同步和 PV 阵列电压的匹配, 来减小 PV 对地电压波动, 从而减小对地回路电流。

2 箱式变电站对组件噪音的影响分析

光伏电站中箱式变电站通常采用双分裂绕组变压器。从图 7 可以看出, 变压器存在等效分布电容, 只要有这两个分布电容及交流源的存在, 那么环路内必将会有电流流过。一旦电站建成, 这两个电容的参数就已经固定, 基本上是无法改变的。其等效图如图 8 所示。

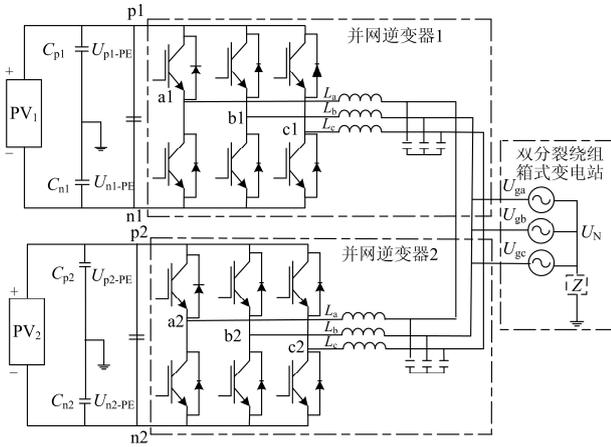


图 7 两台逆变器共用箱式变电站电路原理图

Fig. 7 Circuit principle diagram of two inverters sharing box-type substation

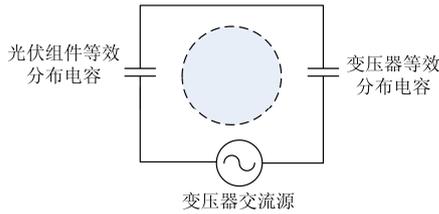


图 8 电容等效示意图

Fig. 8 Schematic diagram of capacitance equivalent

电池组件的分布电容类似平行板电容器，当电池组件中有交流电流流过时，电容的两个极板受电场力的作用下会产生微小的相对运动，会产生发声的现象，即产生噪音。其原理如图 9 所示。

电容两边交变的电荷使极板发生微服形变

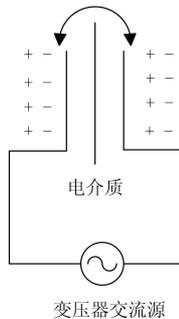


图 9 组件发声原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of PV module voice principle

光伏组件的寄生电容是不可避免的，它和电池板的面积、材料、框架、环境和安装方式等有关。寄生电容与大地形成回路。设三相桥臂的开关函数分别为 S_a 、 S_b 、 S_c ；则逆变桥臂中点电压为

$$U_{an} = U_{PV} S_a \quad (11)$$

$$U_{ap} = U_{PV} (1 - S_a) \quad (12)$$

$$U_{bn} = U_{PV} S_b \quad (13)$$

$$U_{bp} = U_{PV} (1 - S_b) \quad (14)$$

$$U_{cn} = U_{PV} S_c \quad (15)$$

$$U_{cp} = U_{PV} (1 - S_c) \quad (16)$$

PV 电池板正极对地到各相回路、负极对地到各相回路电压方程为

$$U_{cn} = U_{an} - U_{La} - U_{ga} - U_N \quad (17)$$

$$U_{cp} = U_{ap} + U_{La} + U_{ga} + U_N \quad (18)$$

$$U_{cn} = U_{an} - U_{La} - U_{ga} - U_N \quad (19)$$

$$U_{cp} = U_{ap} + U_{La} + U_{ga} + U_N \quad (20)$$

$$U_{cn} = U_{an} - U_{La} - U_{ga} - U_N \quad (21)$$

联立上式，对称系统中：

$$U_{La} + U_{Lb} + U_{Lc} + U_{ga} + U_{gb} + U_{gc} = 0 \quad (22)$$

即使电网不对称或逆变器参数不对称，则 $U_{La} + U_{Lb} + U_{Lc} + U_{ga} + U_{gb} + U_{gc}$ 为工频成分，对共模电压变化影响不大。因此，上式简化为

$$U_{cp} = \frac{U_{ap} + U_{bp} + U_{cp}}{3} + U_N \quad (23)$$

$$U_{cn} = \frac{U_{an} + U_{bn} + U_{cn}}{3} - U_N \quad (24)$$

把式(12)、式(14)和式(16)代入式(23)和式(24)可得

$$U_{cp} = U_{PV} \left(1 - \frac{S_a + S_b + S_c}{3}\right) + U_N \quad (25)$$

$$U_{cn} = U_{PV} \frac{S_a + S_b + S_c}{3} - U_N \quad (26)$$

在上述光伏系统里 Z 为无穷大，近似认为无漏电回路，因此 U_{cp} 与 U_{cn} 自然分压到 $1/2 U_{PV}$ ，由此推导出

$$U_N = \frac{1}{2} U_{PV} - U_{PV} \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \quad (27)$$

S_a 、 S_b 、 S_c 分别可取值 0 或 1，由此可推出，随着开关管状态的变化， U_N 以开关管开关频率的 6 倍频进行波动。

如图 7 所示，当逆变器 1 启动后， U_N 存在高频波动，由于双分裂变压器两个低压侧绕组存在耦合，引起逆变器 2 的低压绕组中心点电压同步波动，由于该波动对于三相为共模信号，因此并未影响到逆变器 2 网侧线电压，但是每一相对地均存在高次波动，当逆变器 2 并网接触器闭合后，变压器中性点电压波动通过开关管体内二极管不可控整流到逆变器 2 的直流侧。

以逆变器 2 的 a 相为例, 仿真结果如图 10。

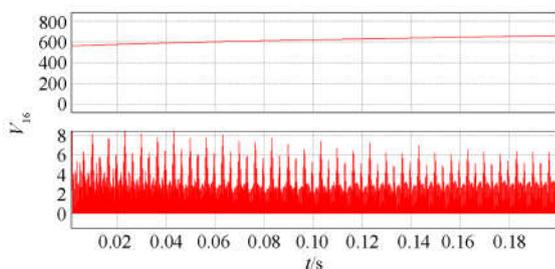


图 10 逆变器 2 母线充电电压升高

Fig. 10 Bus charging voltage rising of inverter 2

桥臂中点对大地电压的正最大值经过 a 相上桥臂的二极管向 C_p 充电, 负向最大值经过 a 相下桥臂的二极管向 C_n 充电。所以, 通过图 10 仿真结果可见, 当不加保护, 逆变器 1 通过变压器的寄生参数可将逆变器 2 的母线充电电压升高。

3 结论

本文研究了光伏发电系统中常用的箱式变电站中双分裂绕组变压器对光伏组件的影响, 得出如下结论:

1) 通过理论分析可知, 两台逆变器母线电压不一致或者载波信号不同步, 光伏电池会产生较大对地电压波动及对地回路电流。

2) 通过仿真验证, 当母线电压不一致且载波不同步, 对地回路电流高达 20 V; 母线电压一致且载波同步对地回路电流可减小至 1 V。

3) 双分裂绕组变压器存在等效分布电容, 环路内必将会有电流流过。本文分析了由于双分裂绕组变压器两个低压侧绕组存在耦合, 引起逆变器低压绕组中心点电压同步波动, 使电池组件产生发声现象的原理, 并通过仿真验证其正确性。

参考文献

[1] 廖志凌, 阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 46-52.
LIAO Zhiling, RUAN Xinbo. Energy management control strategy for stand-alone photovoltaic power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 46-52.

[2] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 101-107.
ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107.

[3] 杨德州, 王利平, 张军, 等. 大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析-光伏电站专题[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 104-110.
YANG Dezhou, WANG Liping, ZHANG Jun, et al. Modelling of the large-scale distributed power supply and the analysis of corresponding grid-connected characteristics-photovoltaic plant thematic[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 104-110.

[4] 欧阳聪, 刘明波. 考虑网络传输约束的并网光伏发电消纳容量计算[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 17-23.
OUYANG Cong, LIU Mingbo. Computing of accommodation capacity of grid-integrated photovoltaic generation considering network's transmission constraints[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 17-23.

[5] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 109-111.

[6] 盛四清, 侯磊, 范辉, 等. 光伏电站接入孤立电网的动态建模与稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 127-131.
SHENG Siqing, HOU Lei, FAN Hui, et al. Analysis on dynamic modeling and stability of isolated grid with photovoltaic station connected[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 127-131.

[7] 张浙波, 刘建政, 梅红明. 两级式三相光伏并网发电系统无功补偿特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 242-246.
ZHANG Zhebo, LIU Jianzheng, MEI Hongming. Study of reactive power compensation characteristics on a three phase double-stage grid-connected photovoltaic power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 242-246.

[8] 周林, 任伟, 廖波, 等. 并网型光伏电站无功电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 168-174.
ZHOU Lin, REN Wei, LIAO Bo, et al. Reactive power and voltage control for grid-connected PV power plants [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 168-174.

[9] 徐鹏飞, 马高峰, 高金辉. 微元步长自适应增量电导法实现 MPPT 的控制[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 59-62.
XU Pengfei, MA Gaofeng, GAO Jinhui. Infinitesimal step adaptive incremental conductance method MPPT control[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 59-62.

- [10] 郭再泉. 并网光伏电站汇流箱组串电流的节能控制[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 107-111.
GUO Zaiquan. Energy saving control of the set-of-string current of the junction box of the grid connected photovoltaic power station[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 107-111.
- [11] 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.
- [12] ALONSO M C, RUIZ J M, CHENLO F. Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(3): 329-340.
- [13] 黄冬冬, 吴在军, 窦晓波, 等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 107-112.
HUANG Dongdong, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A power quality composite control strategy based on large-scale grid-connected photovoltaic power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 107-112.
- [14] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 70-74.
YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, et al. A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regulatory systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 70-74.
- [15] 周林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.
ZHOU Lin, ZENG Yi, GUO Ke, et al. Development of photovoltaic grid-connected system with power quality regulatory function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 137-145.
- [16] SHIH F Y, CHEN D Y, WU Y P, et al. A procedure for designing EMI filters for AC line applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(1): 17-18.
- [17] 秦鹏, 崔国柱, 郭昌林, 等. 光伏接入对配电网电能质量的影响及最大接入容量分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 145-150.
QIN Peng, CUI Guozhu, GUO Changlin, et al. Impact of distributed photovoltaic generation on power quality in distribution network and analysis of maximum integration capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 145-150.
- [18] 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): 71-75.
XI Wei, ZHANG Zhe, CHEN Wei, et al. Research on fault characteristics of the PV inverter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 71-75.
- [19] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [20] 高金辉, 张兰杰. 一种配电网 zbus 潮流算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 42-45.
GAO Jinhui, ZHANG Lanjie. A power flow algorithm for distribution network zbus[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(1): 42-45.
- [21] 崔文峰, 胡森军, 李武华, 等. 基于有源钳位的无变压器型单相光伏并网逆变器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 26-32.
CUI Wenfeng, HU Senjun, LI Wuhua, et al. An active voltage clamp transformerless inverter for single-phase photovoltaic grid-connected systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 26-32.

收稿日期: 2016-10-02; 修回日期: 2017-01-16

作者简介:

路染妮(1980—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为新能源发电技术; E-mail: 29433404@qq.com

王钰洁(1984—), 女, 通信作者, 博士在读, 研究方向为新能源发电技术与电器开关技术。E-mail: wangyujie0628@126.com

(编辑 周金梅)