

光伏电站多逆变器并网系统输出谐波研究

张战彬¹, 翟红霞¹, 徐华博¹, 赵辉¹, 赵丽霞²

(1. 国网河北省电力公司邢台供电分公司, 河北 邢台 054001; 2. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对多台逆变器并联在同一公共连接点接入电网引起的谐波问题进行了研究。建立了多逆变器光伏并网系统的单台和多台逆变器小信号等效模型。推导出逆变器、PWM 开关谐波源和电网的等效阻抗传递函数, 通过 Bode 图分析逆变器、PWM 开关谐波源的等效输出阻抗幅频特性和相频特性。应用 Matlab/Simulink 对 35 kV 光伏电站多逆变器并网系统在不同工况下进行谐波分析。仿真结果表明: 并网逆变器台数越多, PCC 处电流谐波畸变率越大, 但主要为低次谐波, 高次谐波含量较少, 验证了建立的小信号模型的有效性。

关键词: 光伏电站; 逆变器并网; 小信号模型; 谐波分析; 频域分析

Study on output harmonic of multi-inverter grid-connected in photovoltaic plant

ZHANG Zhanbin¹, ZHAI Hongxia¹, XU Huabo¹, ZHAO Hui¹, ZHAO Lixia²

(1. Xingtai Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Company, Xingtai 054001, China;

2. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The harmonic problem caused by the multi-inverters grid-connected to the power grid in point of common coupling is studied. Small-signal circuit model for single inverter and multi-inverters is established. The equivalent impedance of transfer function of the inverter, PWM switching harmonic source and power grid are derived. The equivalent output impedance of amplitude-frequency characteristic and phase frequency characteristics of the inverter and PWM switching harmonic source are analyzed by Bode diagram. The harmonic of 35 kV photovoltaic power station multi-inverters grid-connected system under the different conditions is analyzed in Matlab/Simulink. The simulation results show that if the grid-connected inverters are more, the current harmonic distortion rate of PCC will be greater. It mainly contains low-order harmonic but less high harmonic. The effectiveness of small-signal circuit model is verified.

Key words: photovoltaic plant; inverter grid-connected; small signal model; harmonic analysis; frequency domain analysis

0 引言

逆变器作为光伏发电的并网接口以及交直流变换的主要枢纽, 其输出电流中常常含有较多谐波^[1-4]。大中型光伏电站多逆变器在并联工作模式下输出的谐波满足叠加原理, 因此即使单台逆变器输出的谐波较小, 多个谐波源的叠加也可能放大谐波畸变, 使输出的总谐波超过允许值, 进而影响电网电能质量。此外, 多个谐波源还可能在配电网内激发高次谐波的功率谐振^[5-7]。

文献[8]提出光伏电站动态谐波域模型, 并以青海光伏电站为例, 采集实际谐波数据, 验证光伏电站在不同辐照和组件温度下的谐波含量。文献[9]讨论了光伏并网逆变器的小信号等效电路模型和谐波谐振问题, 但未考虑多台逆变器在不同地域不同光

照时对系统谐波的影响。文献[10-11]概述了光伏谐波谐振产生的机理, 并针对光伏逆变器 LCL 滤波建立阻抗模型, 考虑了逆变器的死区效应, 分析了单台和多台逆变器的谐波谐振现象。文献[12]基于三相四线制系统提出一种新的控制策略来提高 PCC 处的电能质量, 分析了三相不平衡以及谐波问题, 但未分析多逆变器并网情况下输出谐波特性。

光伏并网系统中多台逆变器通常并联在 PCC 处, 分析其输出电流谐波特性对于光伏系统安全可靠运行具有一定的现实意义。本文建立了考虑 LCL 光伏逆变器电流环控制、PWM 开关谐波源和电网阻抗特性的逆变器小信号等效模型, 推导出多逆变器并网系统的输出阻抗传递函数, 通过 Bode 图分析逆变器、PWM 开关谐波源的等效输出阻抗幅频特性和相频特性。基于上述模型, 应用 Matlab/

Simulink 研究光伏电站多逆变器并网时 PCC 处输出谐波。仿真结果证明了小信号等效模型的有效性。

1 光伏电站逆变器并网拓扑结构

光伏并网的基本原理框图如图 1 所示, 光伏电池板在一定的外界温度与辐照条件下, 将光能转化为电能, 采用最大功率点追踪控制确保光伏电池板利用率达到最大化, 然后经由逆变器将光伏产生的直流电压转换为交流电压, 逆变器控制回路检测电网电压与直流侧电压达到并网要求后, 实现并网。

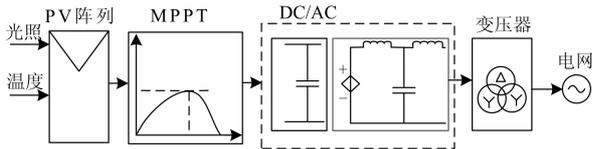


图 1 光伏电站的基本原理框图

Fig. 1 Basic principle diagram of PV power station

光伏电池随温度、辐照度变化的 V-I、V-P 曲线图如图 2 所示。

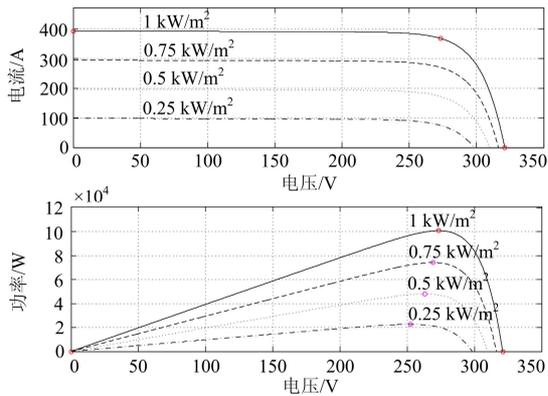


图 2 光伏电池的 V-I、V-P 曲线图

Fig. 2 The V - I and V - P chart of PV cells

光伏电站多逆变器并网的拓扑结构如图 3 所示。图中, PV 为光伏电池板, L_{n-1} 、 C_{n-1} 、 L_{n-2} 分别是逆变器侧电感、滤波电容以及网侧电感。各台逆变器通过 LCL 滤波后并入 35 kV 电网。

2 光伏并网逆变器的小信号等效电路模型

2.1 单台逆变器小信号等效电路

单台逆变器小信号等效模型如图 4 所示。电网用理想电压源 $E(s)$ 串联等效电网阻抗 $Z_E(s)$ 表示, 并网电流源型逆变器用电流源 $I(s)$ 并联其输出等效阻抗 $Z_i(s)$ 表示, PWM 开关谐波源用谐波电压源 $U_w(s)$ 串联其等效输出阻抗 $Z_w(s)$ 表示。

基于图 4 的等效模型, 可得到单台逆变器的输出电流 $I_g(s)$ 为

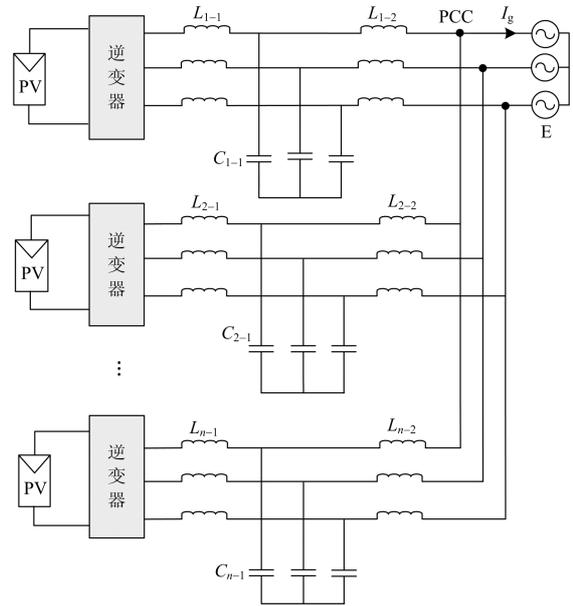


图 3 光伏电站多逆变器并网拓扑结构图

Fig. 3 Multiple grid-connected inverters topology structure in PV plant

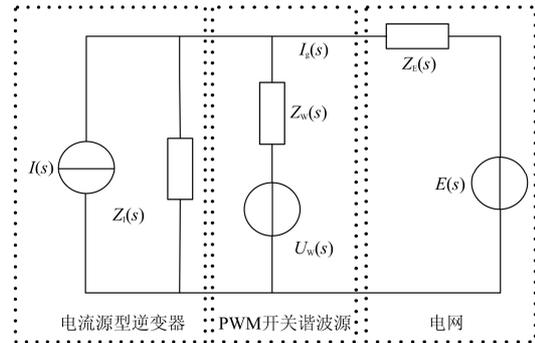


图 4 单台逆变器的小信号等效电路图

Fig. 4 Small-signal circuit model for single inverter

$$I_g(s) = B_{ii}I(s) + B_{iu}U_w(s) + B_{ie}E(s) \quad (1)$$

式中,

$$B_{ii}(s) = Z_w Z_i / (Z_w Z_i + Z_E Z_i + Z_E Z_w) \quad (2)$$

$$B_{iu}(s) = Z_i / (Z_w Z_i + Z_E Z_i + Z_E Z_w) \quad (3)$$

$$B_{ie}(s) = Z_w + Z_i / (Z_w Z_i + Z_E Z_i + Z_E Z_w) \quad (4)$$

图 5 为旋转 dq 坐标系下 LCL 逆变器电流环控制框图。

图 5 中输出电流 $I_g(s)$ 满足

$$I_g(s) = \{ [PI(s)G_D(s)]I(s) + U_w(s) - [s^2 L_1 C_1 + s C_1 PI(s)G_D(s) - G_D(s) + 1] \cdot E(s) \} / [s^3 L_1 \cdot C_1 (L_2 + L_g) + s^2 C_1 (L_2 + L_g) PI(s)G_D(s) + s (L_1 + L_2 + L_g) - s G_D(s) + PI(s)G_D(s)] \quad (5)$$

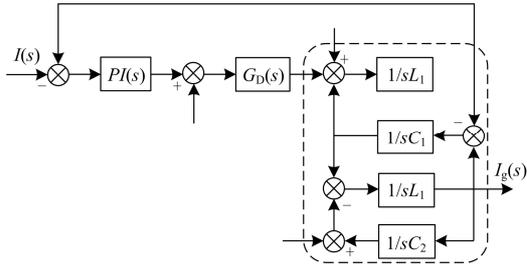


图 5 旋转坐标下 LCL 并网逆变器电流环控制图
Fig. 5 Control block of current loop in LCL inverters under rotation frame

式中: $PI(s)$ 是电流环调节器传递函数; $G_D(s)$ 为系统采样、计算、传输的延迟环节。

由式(1)~式(5)联立求解, 可得单台逆变器小信号模型中各阻抗的传递函数:

$$Z_W(s) = B_{ii}(s)/B_{iu}(s) = PI(s)G_D(s) \quad (6)$$

$$Z_1(s) = [-B_{ii}(s)]/[B_{iu}(s) + B_{ie}(s)] = \frac{PI(s)G_D(s)}{[s^2L_1C_1 + sC_1G_D(s) - G_D(s)]} \quad (7)$$

$$Z_E(s) = \frac{B_{ii}(s) - 1}{B_{ie}(s)} = [s^3L_1C_1L_2 + s^2(L_2 + L_g)C_1 \cdot G_D(s)PI(s) + s(L_1 + L_2 + L_g) - sL_gG_D(s)] / [s^2L_1C_1 + sC_1PI(s)G_D(s) + 1 - G_D(s)] \quad (8)$$

图 6 为单台逆变器的阻抗 Bode 图, 在输出阻抗一定的情况下, 逆变器的输出电流仅与自身指令电流、自身 PWM 谐波电压以及电网电压相关。

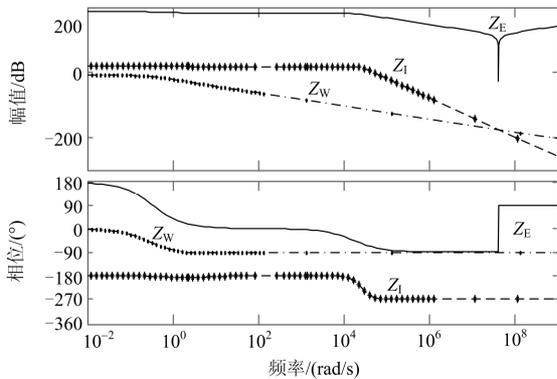


图 6 单台逆变器阻抗 bode 图
Fig. 6 Impedance bode diagram of single inverter

2.2 多台逆变器小信号等效电路

图 7 是多台逆变器并联的小信号等效模型, 在 PCC 点处并网。

由于光伏电站的多台逆变器接入同一个并网点, 其型号和控制参数均相同, 满足

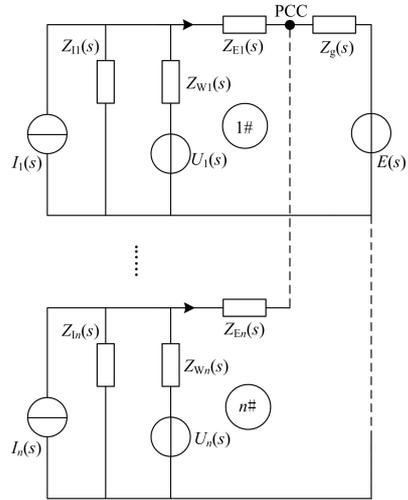


图 7 多逆变器并联小信号的等效电路图

Fig. 7 Small-signal circuit model for multi-paralleled inverters

$$\begin{cases} L_{1-1} = L_{2-1} = \dots = L_{n-1} = L_1 \\ C_{1-1} = C_{2-1} = \dots = C_{n-1} = C_1 \\ L_{2-1} = L_{2-2} = \dots = L_{n-2} = L_2 \\ PI_1(s) = PI_2(s) = \dots = PI_n(s) \\ G_{D-1}(s) = G_{D-2}(s) = \dots = G_{D-n}(s) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得

$$\begin{cases} Z_W = Z_{W1} = \dots = Z_{Wn} \\ Z_1 = Z_{11} = \dots = Z_{1n} \\ Z'_E = Z'_{E1} = \dots = Z'_{En} \end{cases} \quad (10)$$

多逆变器光伏并网系统小信号等效模型中电网等效阻抗 Z_E 、逆变器等效输出阻抗 Z_1 和 PWM 开关谐波源等效阻抗 Z_W 分别为

$$\begin{cases} Z_E(s) = Z'_{E1}(s) // Z'_{E2}(s) // \dots // Z'_{En}(s) // Z_g(s) \\ Z_1 = Z_{11} // Z_{12} // \dots // Z_{1n} \\ Z_W = Z_{W1} // Z_{W2} // \dots // Z_{Wn} \end{cases} \quad (11)$$

多台逆变器同时并网时等效阻抗的 Bode 图如图 8 所示, 在高频段, 逆变器等效输出阻抗 Z_1 和 PWM 开关谐波源等效阻抗 Z_W 迅速减小, 二者均远小于电网等效阻抗 Z_E , 高次谐波电流流入电网较少, 因此逆变器输出谐波主要为低次谐波。

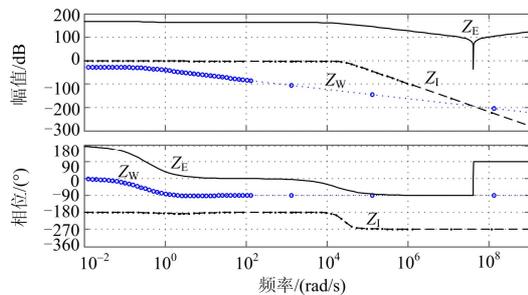


图 8 10 台逆变器阻抗 bode 图

Fig. 8 Impedance bode diagram of ten inverters

3 多逆变器光伏并网系统输出谐波特性研究

本文应用 Matlab/Simulink 对光伏并网系统接入 35 kV 电网(如图 3 所示)PCC 处谐波电流波形进行研究。仿真中光伏逆变器采用小信号等效模型进行建模, 当光照强度变化时, 不同台数并网逆变器 PCC 处电流波形如图 9 所示。

对图 9 所示逆变器输出电流进行谐波分析, 可得逆变器台数变化对于三相并网电流谐波的影响, 随着逆变器台数的增加, 电流谐波含量越大, 如图 10 所示。图 10 中列出了各个时间段的电流谐波含量, 在 0.5 h、1.7 h 和 2 h 处, 并网逆变器台数越多, 电流谐波越大, 谐波畸变率越大。

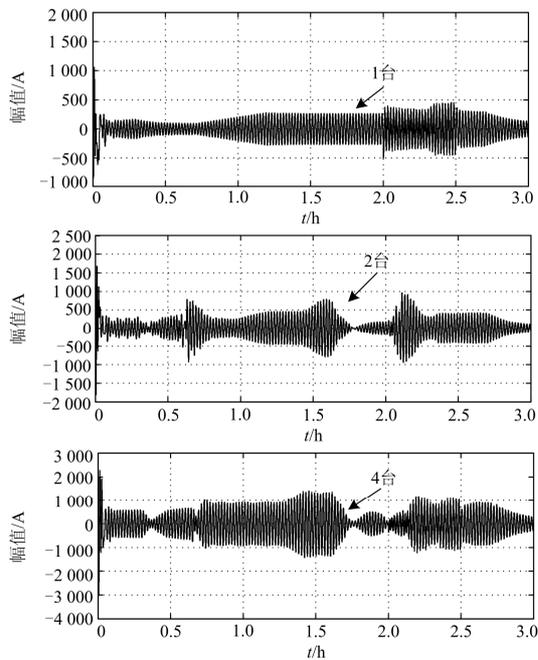


图 9 逆变器台数变化对应的电流波形图

Fig. 9 Current figure corresponding to the number of inverters changes

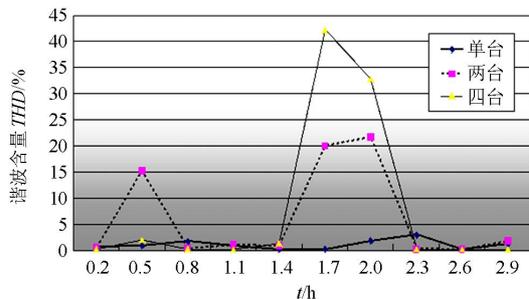


图 10 不同逆变器台数情况下输出电流谐波 THD

Fig. 10 Current harmonic THD with various number of inverters

从图 10 中选取一个时刻, 可得到不同逆变器台数时输出电流的各次谐波含量, 如图 11 所示。从图中可以看出, 逆变器台数越多, 输出电流的各次谐波有效值就越大, 但谐波主要为低次谐波, 高次谐波含量较少。

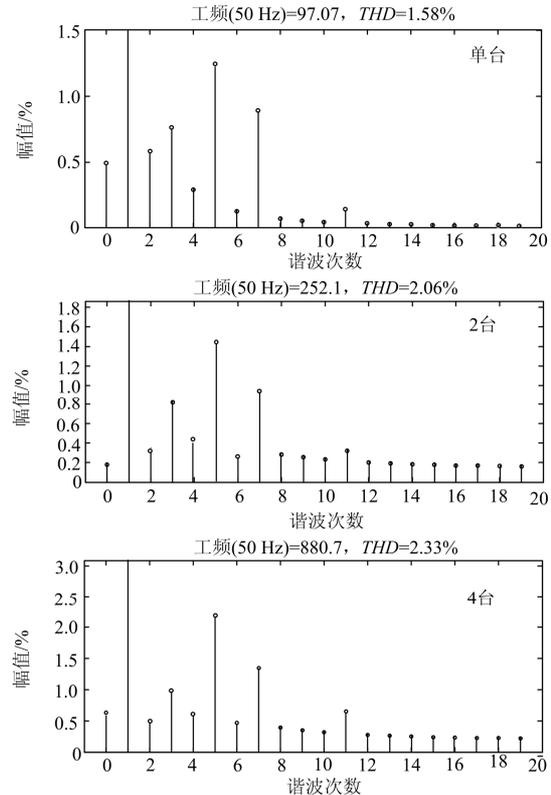


图 11 逆变器某时刻电流谐波含量

Fig. 11 Change of inverters current harmonic at some time

4 结论

本文针对光伏电站多逆变器并网系统 PCC 处输出谐波问题进行了研究, 建立了包括 LCL 光伏并网逆变器电流环控制、PWM 开关谐波特性和电网的多逆变器并网系统小信号等效模型, 推导出逆变器输出电流和阻抗的传递函数, 并绘出阻抗 Bode 图。仿真结果表明, 并网逆变器台数越多, PCC 处电流谐波畸变率越大, 但主要为低次谐波, 高次谐波含量较少, 验证了小信号模型的有效性。

参考文献

- [1] 韩莹, 陈维荣, 李奇, 等. 分布式电源并网逆变器谐波抑制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 1-6.
- HAN Ying, CHEN Weirong, LI Qi, et al. Harmonic suppression methods for grid-connected inverter of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2014, 26(9): 1-6.

- [2] 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.
- [3] 王亮, 王志新, 陆斌锋, 等. 基于LCL滤波器的单相光伏并网逆变控制器设计[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 114-118.
WANG Liang, WANG Zhixin, LU Binpeng, et al. Design of the controller of the single phase PV grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(12): 114-118.
- [4] 陈晟. 电能质量与供电可靠性关系分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 99-103.
CHEN Sheng. Analysis of relationship between power quality and power supply reliability[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 99-103.
- [5] 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 Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, 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.
- [6] 雷亚雄, 李建文, 李永刚. 基于准PR调节器电流双闭环LCL三相并网逆变器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 44-50.
LEI Yaxiong, LI Jianwen, LI Yonggang. Control strategy of three-phase LCL grid-connected inverter based on quasi-PR adjuster[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 44-50.
- [7] ZHANG S, JIANG S, LU X, et al. Resonance issues and damping techniques for grid-connected inverters with long transmission cable[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 110-120.
- [8] 谢宁, 罗安, 陈燕东, 等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 10-16.
XIE Ning, LUO An, CHEN Yandong, et al. Large photovoltaic power station dynamic model and harmonic characteristic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 10-16.
- [9] 张兴, 余畅舟, 刘芳, 等. 光伏并网多逆变器并联建模及谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 336-345.
ZHANG Xing, YU Changzhou, LIU Fang, et al. Modeling and resonance analysis of multi-paralleled grid-tied inverters in PV systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 336-345.
- [10] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71.
XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71.
- [11] 黄挚雄, 徐保友, 沈玲菲, 等. LCL并网逆变器新型电流双闭环控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 1-5.
HUANG Zhixiong, XU Baoyou, SHEN Lingfei, et al. New current double closed loop control strategy of LCL grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 1-5.
- [12] MUKHTIAR S, VINOD K, AMBRISH C, et al. Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 308-314.

收稿日期: 2015-08-14

作者简介:

张战彬(1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网及其电能质量; E-mail: xtzhangzhanbin@aliyun.com

翟红霞(1975-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网; E-mail: zhai.hongxia@nc.sgcc.com.cn

徐华博(1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为分布式光伏并网。E-mail: xu.huabo@nc.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)