

DOI: 10.7667/PSPC170994

# 逆变型分布式电源的灵活正负序电流控制方法与等值序网模型

陈琪蕾, 范忻蓉, 张沛超, 范春菊

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 逆变型分布式电源的控制方法对电网有显著影响, 但现有方法难以兼顾逆变型分布式电源在故障穿越、继电保护以及故障分析等方面的要求。提出了一种逆变型分布式电源的灵活正负序电流控制方法, 在电网发生不对称故障时向电网中注入正序和负序无功电流。在此基础上建立了逆变型分布式电源在故障状态下的等值序网模型。仿真结果表明, 所提方法能够增强逆变型分布式电源的故障穿越能力, 在电网发生不对称故障时保留电流的序分量特征。

**关键词:** 逆变型分布式电源; 故障穿越; 负序电流; 等值模型

## Flexible positive and negative sequence current control strategy and equivalent sequence network model of inverter interfaced distributed generation

CHEN Qilei, FAN Xinrong, ZHANG Peichao, FAN Chunju

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The Inverter Interfaced Distributed Generation (IIDG) control strategy affects the power system significantly. However, the current strategies are difficult to take into account the requirements of fault ride-through, relay protection, and fault analysis. This paper proposes a flexible positive and negative sequence current control strategy of IIDG to inject positive and negative sequence reactive current into the grid under asymmetrical fault conditions. Based on this strategy, the equivalent sequence network model of IIDG is proposed. Simulation results show that the proposed strategy can improve the fault ride-through capability of IIDG, and can keep the sequence component characteristics of fault current under asymmetrical fault conditions.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903201).

**Key words:** inverter interfaced distributed generation; fault ride-through; negative sequence current; equivalent model

## 0 引言

光伏、风电等逆变型分布式电源 (Inverter Interfaced Distributed Generation, IIDG) 大量接入电网将会对电网的安全稳定运行产生重要影响<sup>[1]</sup>。为了防止电网故障期间 IIDG 大规模脱网给电网带来严重的不良影响, 并网规程<sup>[2-3]</sup>要求 IIDG 在一定的电压跌落范围和时间间隔内, 能够保证不脱网连续运行, 甚至向电网注入额外的无功功率, 以支撑电网电压并实现故障穿越。为此, IIDG 的故障穿越控

制策略成为重要的研究课题。

配电网一般采取中性点不直接接地方式, 在故障时可以不计零序分量的影响, 仅需考虑正序和负序分量。根据对负序电流控制方法的不同, 现有的 IIDG 控制策略可以分为两类: 抑制负序电流和主动注入负序电流。文献[4-7]对前者进行了研究, 这种控制策略能够降低电流谐波, 提高电能质量, 但存在以下问题: 1) 抑制负序电流会进一步降低 IIDG 的短路电流水平<sup>[8]</sup>, 从而影响继电保护的灵敏度; 2) 仅向系统中注入正序电流容易导致健全相电压过高<sup>[8]</sup>, 对电气设备造成损害; 3) 该控制策略会使不对称故障中不含负序电流分量, 这与基于同步发

电机的故障特征相距甚远, 从而影响现有的很多保护原理<sup>[9-10]</sup>。而另一类控制策略则通过向系统中注入负序电流, 在一定程度上避免了上述现象的发生。文献[8]提出根据电网故障情况对负序分量进行主动控制, 但没有给出可行的控制方法。文献[11]基于直驱型风力电机提出了故障情况下在注入正序电流的同时, 注入与电网负序电压成比例的负序电流的控制策略, 但没有给出确定比例系数的方法, 缺乏实用性。文献[12]提出了含负序电流注入的控制策略, 但其负序分量调节系数需预先给定, 不具有自适用性。文献[13-14]提出了以相电压控制为目标的正、负序无功电流灵活控制策略, 但难以建立对应的等值模型, 使得故障分析和计算变得很困难。

对故障穿越过程中 IIDG 的故障特征进行分析是继电保护研究的基础, 而 IIDG 的故障特征与其控制策略紧密相关。文献[4,11-12,15-16]基于特定控制策略建立了对应的 IIDG 等值序网模型, 但其采用的控制策略均存在一定的局限性。文献[17]建立了 IIDG 的各序通用等值模型, 但该模型没有与具体控制策略相结合, 不利于进行故障分析。

针对上述问题, 本文提出了一种 IIDG 的灵活正负序电流控制方法。与已有方法相比, 本方法兼顾了如下三个方面的需求: 1) 能够更好地支撑并网母线的电压; 2) 能够在电网发生不对称故障时保留电流的序分量特征, 有利于保护识别故障; 3) 易于建立 IIDG 的等值序网模型, 便于进行故障分析。为简化分析, 本文仅考虑在故障期间向电网注入无功电流, 以增强 IIDG 电压调节能力。但本文方法能够推广到同时注入有功电流的情况。

## 1 IIDG 的灵活正负序电流控制方法

### 1.1 含 IIDG 接入的等效电网阻抗模型

利用文献[18-22]提出的电网阻抗检测技术, 从公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)看去, 可以将 IIDG 所接入的主电网视为图 1 所示的等效电网阻抗模型。图 1 中,  $U$  为 PCC 处电压,  $U_g$  为电网等效电压源电压,  $Z_g$  为电网等效阻抗。为简化分析, 假设电网等效阻抗为纯感性阻抗<sup>[13]</sup>。

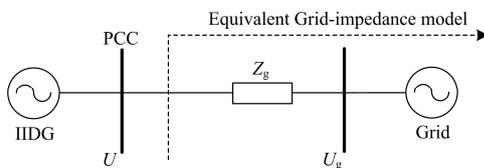


图 1 接入 IIDG 的等效电网阻抗模型

Fig. 1 Equivalent grid-impedance model with IIDG

正、负序网络中的电压、电流关系为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} U_1 = U_{g1} + Z_{g1}I_1 \\ U_2 = U_{g2} - Z_{g2}I_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_1$ 、 $U_2$  分别为 PCC 处正、负序电压的标幺值;  $I_1$ 、 $I_2$  分别为 IIDG 注入电网中的正、负序无功电流的标幺值;  $U_{g1}$ 、 $U_{g2}$  分别为电网等效电压源正、负序电压标幺值;  $Z_{g1}$ 、 $Z_{g2}$  分别为电网等效正、负序阻抗标幺值, 一般视为相等。以上变量皆为幅值。

当电网发生不对称故障时, 系统不但会发生正序电压的跌落, 还会产生负序电压。由式(1)可知, 故障期间, 通过向系统中注入正序无功电流  $I_1$ , 可以增大 PCC 处的正序电压  $U_1$ , 实现电压支撑的目标; 而通过向系统中注入负序无功电流  $I_2$ , 可以减小 PCC 处负序电压  $U_2$ , 从而降低三相电压的不平衡度, 避免出现健全相电压越限的情况, 保障电力设备安全运行, 从而进一步支撑 PCC 处电压。

### 1.2 灵活正负序电流控制策略

由上述分析可知, 在电网故障期间, IIDG 向电网中注入正序和负序无功电流, 可以改善 PCC 处电压特性, 提高故障穿越能力。

在故障穿越期间, IIDG 向电网中注入的正序无功电流应与正序电压的跌落相关。考虑到故障穿越的要求, 并忽略电压跌落死区的影响, 向电网中注入的正序无功电流应满足:

$$I_1 = k_1(1 - U_1) \quad (2)$$

式中,  $k_1$  为正序电流控制系数。

同样, 在故障穿越期间 IIDG 向电网中注入的负序无功电流应与负序电压相关, 应满足:

$$I_2 = k_2 U_2 \quad (3)$$

式中,  $k_2$  为负序电流控制系数。

式(2)和式(3)组成了灵活正负序电流控制策略, 变量同样以标幺值形式进行表达。式(2)表明, 当电压跌落, 即  $U_1 < 1$  时, IIDG 向电网中注入正序无功电流。由式(3)可知, 当三相电压不平衡, 即  $U_2 > 0$  时, IIDG 向电网中注入负序无功电流。通过调节正、负序电流控制系数, 可以实现对注入电网中的正、负序无功电流的灵活控制。

### 1.3 控制策略的优化方法

为了在不对称故障时, 能够同时改善 PCC 处各相电压幅值, 需尽量提高  $U_1$  并降低  $U_2$ 。为此, 本文利用式(4)的优化目标确定最优控制系数。

$$\min f(k_1, k_2) = U_2 - U_1 \quad (4)$$

考虑到逆变器的容量约束及 PCC 处电压上限

约束, 上述优化问题的约束条件为

$$I_a, I_b, I_c \leq I_{\max} \quad (5)$$

$$U_a, U_b, U_c \leq U_{\max} \quad (6)$$

式中:  $I_{\max}$  为变流器相电流上限标幺值;  $U_{\max}$  为 PCC 处相电压上限标幺值;  $I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c$  分别为三相电流、电压的幅值标幺值, 其表达式如式(7)所示。

由式(1)一式(3)可得

$$\begin{cases} U_1 = \frac{U_{g1} + k_1 Z_{g1}}{1 + k_1 Z_{g1}} \\ U_2 = \frac{U_{g2}}{1 + k_2 Z_{g2}} \\ I_1 = \frac{k_1 (1 - U_{g1})}{1 + k_1 Z_{g1}} \\ I_2 = \frac{k_1 U_{g1}}{1 + k_2 Z_{g2}} \end{cases} \quad (7)$$

由瞬时功率理论可以得到相电流、电压幅值与序电流、电压幅值之间的关系<sup>[13]</sup>为

$$\begin{cases} I_a^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \varphi_1 \\ I_b^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos (\varphi_1 - 2\pi/3) \\ I_c^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos (\varphi_1 + 2\pi/3) \\ U_a^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos \varphi \\ U_b^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos (\varphi - 2\pi/3) \\ U_c^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos (\varphi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\varphi$  为 PCC 处正、负序电压相角差,  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ;  $\varphi_1$  为 PCC 处正、负序电流相角差,  $\varphi_1 = \pi - \varphi$ 。

对于上述小规模有约束非线性优化问题, 序列二次规划方法是最为有效的方法之一<sup>[23-24]</sup>, 因此本文采用该方法进行求解。

在故障发生后, IIDG 的控制原理如图 2 所示。通过正负序分量分离<sup>[25]</sup>和电网阻抗检测技术, 计算控制系统中所需的各故障量; 然后由式(4)一式(8)组成的优化问题得到最优控制系数  $k_1, k_2$ ; 并利用控制系数和电压正负序分量计算正负序电流参考值<sup>[13-14]</sup>; 最后通过坐标变换、电流前馈解耦控制等环节得到控制参数, 对逆变器进行矢量控制。

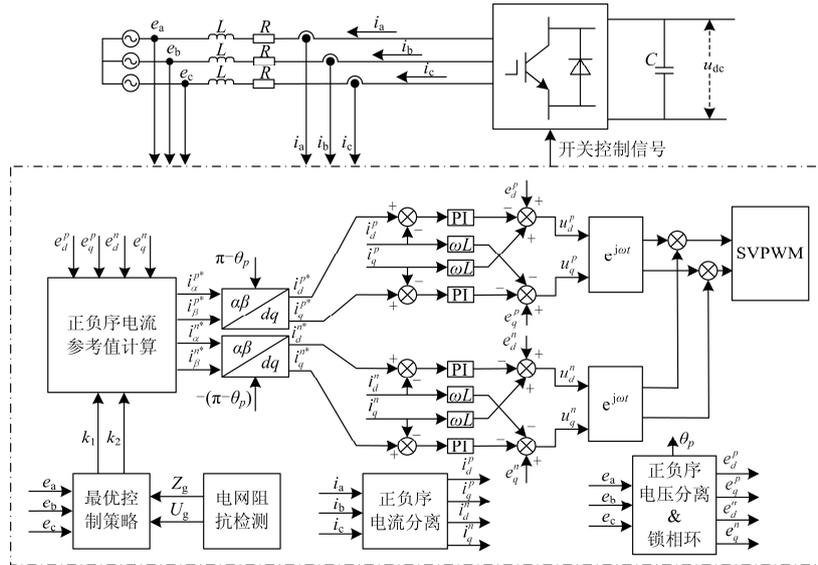


图 2 灵活正负序电流控制方法

Fig. 2 Flexible positive and negative sequence current control strategy

## 2 IIDG 的等值序网模型

基于以上提出的灵活正负序电流控制方法, 可以方便地建立对应的 IIDG 等值序网模型。

将式(2)和式(3)写为相量形式为

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = jk_1 (1 - |\dot{U}_1|) e^{j\varphi_1} \\ \dot{I}_2 = -jk_2 |\dot{U}_2| e^{j\varphi_2} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  分别为 PCC 处正、负序电压相量标幺值,  $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\varphi_1}$ ,  $\dot{U}_2 = U_2 e^{j\varphi_2}$ 。

式(9)对应的 IIDG 的正、负序等值模型如图 3 所示。图 3 中,  $x_1, x_2$  为 IIDG 的正、负序等效阻抗。

从图 3 可以看出, 在正序等值模型中, IIDG 等效为一个电流源和一个阻抗的并联, 且电流源和阻抗的大小均与正序电流控制系数  $k_1$  相关; 在负序等

值模型中, IIDG 等效为一个阻抗, 其值与负序电流控制系数  $k_2$  相关。在改变  $k_1$ 、 $k_2$  时, IIDG 会表现出不同特性。当  $k_1=0$  时, IIDG 正序等效阻抗无穷大, 电流为零, 即抑制正序电流; 当  $k_2=0$  时, IIDG 负序等效阻抗无穷大, 电流为零, 即抑制负序电流; 当  $k_1$  很大时, IIDG 正序电源内阻接近零; 当  $k_2$  很大时, IIDG 负序电源内阻接近零; 当  $k_1=k_2$  时, IIDG 正、负序等效阻抗大小相等, 即正、负序网络中电源内阻对称。

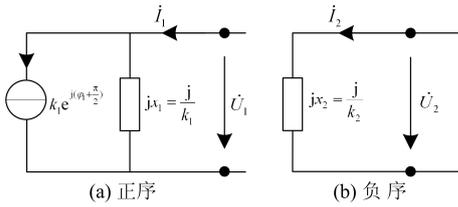


图 3 IIDG 正、负序等值模型

Fig. 3 Positive and negative sequence equivalent model of IIDG

图 3 中 IIDG 等值序网模型较为简单, 便于沿用传统的对称分量法进行电网故障分析。这在一定程度上简化了故障电流计算过程, 对含 IIDG 配电网继电保护的研究和设计有积极意义。

### 3 仿真验证

为验证本文控制方法的有效性, 利用 Matlab/Simulink 搭建了如图 4 所示的仿真系统, 并基于 Matlab 求解最优控制策略。仿真系统中, 变压器变比为 121/10.5 kV; 电网侧母线 A 电压为 10.5 kV; IIDG 额定容量为 2 MVA; 单位长度线路参数为:  $r_1=r_2=0.19 \Omega/\text{km}$ ,  $x_1=x_2=0.39 \Omega/\text{km}$ 。在故障发生前 IIDG 额定运行, 向电网输出 2 MW 有功功率。当  $t=0.05 \text{ s}$  时, 在 F 处发生 BC 相相间短路故障, 过渡电阻为  $8 \Omega$ , 线路 AF、FB 长度分别为 2.6 km 和 6 km。仿真中, 取  $U_{\max}=1.05 \text{ p.u.}$ ,  $U_{\min}=0.85 \text{ p.u.}$ ,  $I_{\max}=1.5 \text{ p.u.}$ 。

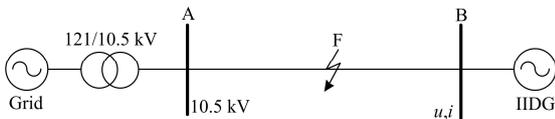


图 4 含 IIDG 接入的电网

Fig. 4 Power system with IIDG

仿真实验对以下三种情形进行对比分析: 1) 仅向电网中注入正序无功电流; 2) 仅向电网中注入负序无功电流; 3) 灵活正负序电流控制。

图 5 给出了三种情形下的电压幅值变化曲线。

从图中可以看出, 在故障发生后, 仅向电网中注入正序无功电流能够在一定程度上实现电压支撑的目的, 但三相电压不平衡度较高, 若继续增大正序无功电流, 容易导致健全相电压过高, 从而无法进一步支撑并网母线的电压。仅向电网中注入负序无功电流虽然能降低 PCC 处三相电压的不平衡度, 但电压水平较低, 无法实现电压支撑的目标。而利用本文提出的方法向电网中注入一定的正、负序无功电流, 能够在提升 PCC 处电压的同时, 降低三相电压不平衡度, 增强 IIDG 的故障穿越能力。

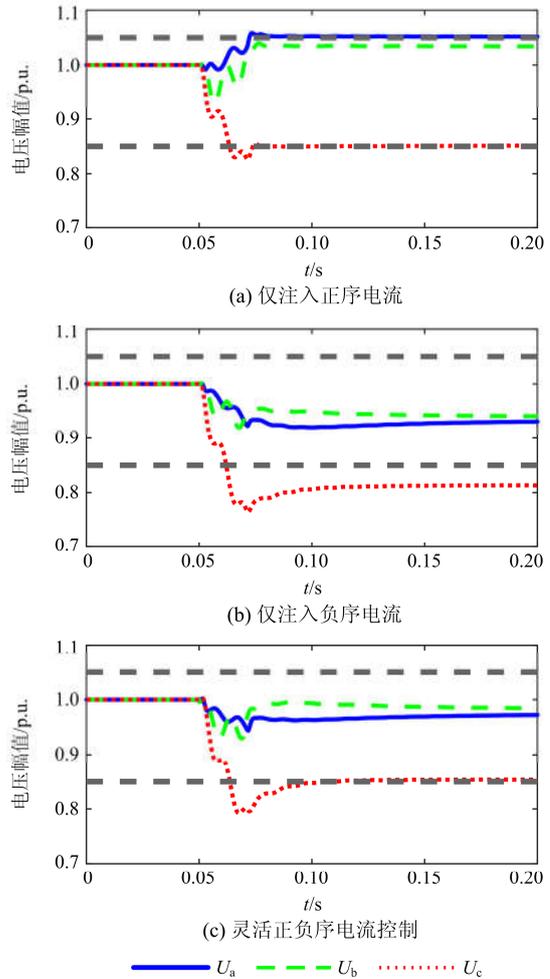


图 5 不同情形下的电压幅值变化曲线

Fig. 5 Voltage amplitudes with different situations

图 6 为上述三种情形下的故障电流变化曲线。取故障达到稳态之后一个周波的数据, 对故障电流的序分量进行分析, 结果如表 1 所示。可以看到, 在采用灵活正负序电流控制方法时, 电流中含有较大的正序和负序电流分量。这使得 IIDG 与同步发电机的故障序电流特征具有相似性。

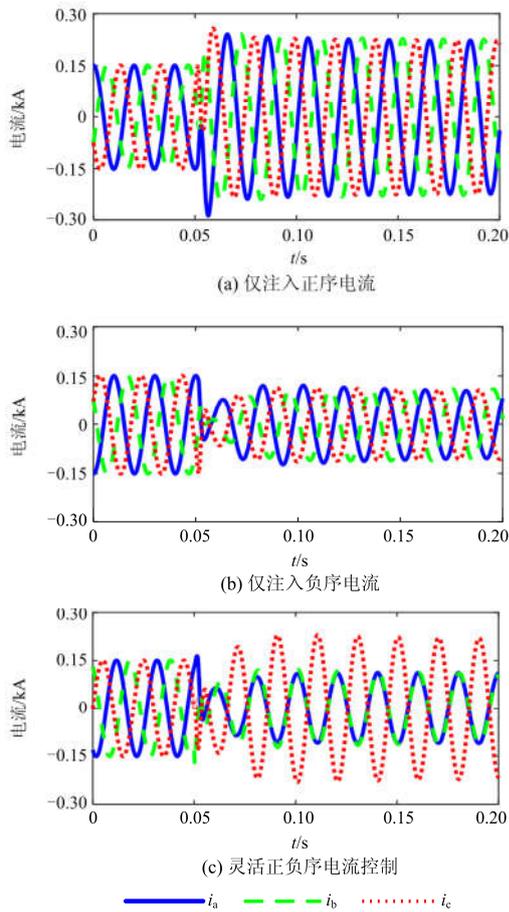


图 6 不同情形下的故障电流变化曲线

Fig. 6 Fault currents with different situations

表 1 故障电流中的正、负序分量

Table 1 Positive and negative sequence of fault currents

情形	正序幅值/kA	负序幅值/kA	正负序幅值比
仅注入正序电流	0.477	0.004	119.250
仅注入负序电流	0.004	0.232	0.017
灵活正负序电流控制	0.242	0.232	1.043

## 4 结论

本文提出了一种 IIDG 的灵活正负序电流控制方法, 该方法兼顾了故障穿越、继电保护以及故障分析等方面的要求, 具有如下特点:

1) 在电网发生不对称故障时, 控制 IIDG 同时向电网注入正序和负序无功电流, 能够降低 PCC 处的三相电压不平衡度, 从而更好支撑电网电压、增强 IIDG 的故障穿越能力。

2) 能够在电网发生不对称故障时保留电流的序分量特征。由于常规保护原理都是基于同步发电机的故障特征, 上述特点有利于提高常规保护在含高渗透率 IIDG 电网中的故障判别能力。

3) 基于本文的控制策略, 易于建立 IIDG 的等值序网模型, 便于沿用传统的对称分量法进行电网故障计算以及分析继电保护的動作行为。

## 参考文献

- [1] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [2] 国家电网公司. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. State Grid Corporation of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2012[S].
- [3] 国家电网公司. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. State Grid Corporation of China. Technical requirements for connecting wind farm to power system: GB/T 19963—2011[S].
- [4] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74. KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [5] 朱晓荣, 刘世鹏, 张海宁, 等. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器滑模直接电压/功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 133-140. ZHU Xiaorong, LIU Shipeng, ZHANG Haining, et al. Sliding mode control based direct voltage/power control strategy for PV grid connected inverter under unbalanced grid voltage[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 133-140.
- [6] 张润坤, 王宝华. 含低电压穿越型光伏电源配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 137-142. ZHANG Runkun, WANG Baohua. An adaptive positive-sequence current instantaneous trip protection for distribution network with PV[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 137-142.
- [7] 朱晓荣, 刘世鹏, 张海宁, 等. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器滑模直接电压/功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 133-140. ZHU Xiaorong, LIU Shipeng, ZHANG Haining, et al. Sliding mode control based direct voltage/power control strategy for PV grid connected inverter under unbalanced grid voltage[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 133-140.
- [8] BOEMER J C, RAWN B G, GIBESCU M, et al. Contribution of negative-sequence controlled distributed generation to power system stability under unbalanced

- faults: a discussion paper[C] // 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), October 14-17, 2012, Berlin, Germany: 1-8.
- [9] 姜晨, 高亮. 基于负序功率方向比较与聚类算法的改进继电保护算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 92-98.  
JIANG Chen, GAO Liang. Study on an improved relaying protection method based on negative-sequence power direction comparison and cluster algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 92-98.
- [10] 金恩淑, 汪有成, 王红艳, 等. 基于负序功率方向比较原理的广域继电保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 1-6.  
JIN Enshu, WANG Youcheng, WANG Hongyan, et al. A wide-area relaying protection algorithm based on negative sequence power direction comparison principle[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 1-6.
- [11] ERLICH I, NEUMANN T, SHEWAREGA F, et al. Wind turbine negative sequence current control and its effect on power system protection[C] // Power and Energy Society General Meeting (PES), July 21-25, 2013, Vancouver, Canada: 1-5.
- [12] 周念成, 叶玲, 王强钢, 等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49.  
ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetric short-circuit current calculation for inverter interfaced distributed generators with negative sequence current injection integrated in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 41-49.
- [13] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Reactive power control for distributed generation power plants to comply with voltage limits during grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6224-6234.
- [14] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Flexible voltage support control for three-phase distributed generation inverters under grid fault[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1429-1441.
- [15] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.  
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [16] 尹项根, 张哲, 肖繁, 等. 分布式电源短路计算模型及电网故障计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 1-9.  
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, XIAO Fan, et al. Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 1-9.
- [17] KAMH M Z, IRAVANI R. A unified three-phase power-flow analysis model for electronically coupled distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 899-909.
- [18] ASIMINOAEI L, TEODORESCU R, BLAABJERG F, et al. Implementation and test of an online embedded grid impedance estimation technique for PV inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1136-1144.
- [19] MOALLEM A, YAZDANI D, BAKHSHAI A, et al. Frequency domain identification of the utility grid parameters for distributed power generation systems[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, March 6-11, 2011, Fort Worth, USA: 965-969.
- [20] TIMBUS A V, TEODORESCU R, RODRIGUEZ P. Grid impedance identification based on active power variations and grid voltage control[C] // Industry Applications Conference, 2007, 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE, September 23-27, 2007, New Orleans, USA: 949-954.
- [21] COBRECES S, BUENO E J, PIZARRO D, et al. Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(9): 3112-3121.
- [22] HOFFMANN N, FUCHS F W. Minimal invasive equivalent grid impedance estimation in inductive-resistive power networks using extended Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 631-641.
- [23] NOCEDAL J, WRIGHT S J. Sequential quadratic programming[M]. New York: Springer New York, 2006.
- [24] 胡清洁. 求解约束优化问题的序列二次规划方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.  
HU Qingjie. The study of sequential quadratic programming algorithms for solving constrained optimization[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [25] 刘其辉, 蔚芳, 王志明, 等. 不对称电网故障时风电网侧变流器控制的数/模拟真[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 33-38.  
LIU Qihui, YU Fang, WANG Zhiming, et al. Physical/digital simulation of grid-side converter control during unbalanced grid faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 33-38.

收稿日期: 2017-07-04; 修回日期: 2017-09-30

作者简介:

陈琪蕾(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式新能源控制与保护; E-mail: 5628830cql@sjtu.edu.cn

范忻蓉(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为智能配电网新型保护原理; E-mail: fanvan32@sjtu.edu.cn

张沛超(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护和控制、智能变电站。E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn

(编辑 周金梅)