

# 含分布式电源配电网的相间短路故障分析

吴争荣, 王钢, 李海锋, 潘国清, 高翔

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510000)

## Analysis on the Distribution Network With Distributed Generators Under Phase-to-phase Short-circuit Faults

WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, PAN Guoqing, GAO Xiang

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510000, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** The fault current of the distributed generators(DG) with voltage source converter (VSC) is determined by its control scheme. However, the traditional equivalent model for DGs didn't distinguish the DGs from common source. Thus, the effect of control scheme was neglected and this caused significant limitations on fault analysis of distribution network with DGs, especially in the case of unsymmetrical fault analysis. For this reason, this paper analyzed the control scheme and fault characteristics under phase-to-phase short-circuit faults, then put forward a voltage control current source equivalent model for DGs under positive sequence control. Based on this, the equations between the positive, negative sequence voltages of the point of common coupling (PCC) and DGs' currents were built. The solving equations for the positive voltage of PCC were built under different phase-to-phase short-circuits. Thus, the precise method for fault analysis under phase-to-phase short-circuit faults was obtained. A 10kV distribution network case was built in DIgSILENT and the proposed method was verified to be correct.

**KEY WORDS:** distributed generator (DG); distribution network; equivalent model; control scheme for fault ride-through; analysis of phase-to-phase short-circuit faults

**摘要:** 以电压源换流器为接口的分布式电源(distributed generator, DG)的故障电流完全由其控制策略决定, 其传统的等值模型通常与常规电源类似, 而忽视了控制策略的影

响, 造成含 DG 配电网故障分析存在局限性, 尤其对于非对称故障情况。为此, 首先对 DG 的相间短路故障穿越控制特性进行分析, 针对正序分量控制的 DG 提出了压控电流源等值模型; 在此基础上, 通过建立 DG 输出电流与公共连接点(point of common coupling, PCC)正、负序电压之间的关系方程式, 推导出不同的相间短路故障条件下 PCC 正序电压的求解方程组, 从而建立含 DG 配电网相间短路故障分析精确模型。基于 DIgSILENT 建立含 DG 配电网模型, 仿真结果验证了该故障分析方法的正确性。

**关键词:** 分布式电源; 配电网; 等值模型; 故障穿越控制; 相间短路故障分析

## 0 引言

近年来, 由于电压源换流器(voltage source converter, VSC)具有良好的控制功能与电压转换功能, 因此以其作为并网接口的分布式电源技术发展迅速<sup>[1-2]</sup>。然而, 该类分布式电源(distributed generator, DG)对电网的电压变化反应敏感且暂态过程短<sup>[3-5]</sup>, 所引发的问题也越来越多。其中, DG 接入后的故障暂态特性及其对配电网的影响是最值得关注的问题之一。对于主要采用非有效接地方式的配电网而言, 传统上均将其故障分为相间故障和接地故障, 其特点及相应的故障分析方法也有所不同。相比而言, 相间故障所造成的影响更为严重, 因而也更值得重点关注。

目前, 针对 DG 引发的问题, 国内外学者进行了大量的研究。尤其针对电网电压不对称时如何改善 DG 输出特性的问题, 许多学者提出了在控制策略中消除负序电压分量影响的方法<sup>[6-15]</sup>。而针对 DG 的故障暂态特性及其对配电网的影响问题, 也有一些文献进行过相关的研究, 但研究的内容仅限于对称故障的情况, 提出的 DG 等值模型也只适用于对

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB219704); 粤港关键领域重点突破项目(2009A091300011); 广东省教育部产学研结合重点/重大项目(2011A090200127, 2011A090200074); 广东省自然科学基金(S2012010008355)。

The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB219704); The Crucial Field and Key Break-through Project in "Guangdong-Hong Kong" (2009A091300011); Guangdong Special Fund Project of Industry, University and Research Institute Collaboration (2011A090200127, 2011A090200074); Guangdong Nature Science Foundation (S2012010008355)。

称故障分析<sup>[16-17]</sup>。事实上，DG 的不对称故障特性恰恰是含 DG 配电网相间故障特性分析的难点与重点。

在 DG 等值模型研究方面，文献[18]提出的基于内阻变化的电压源等值模型，考虑了可再生能源 DG 输出的故障电流受故障前 DG 出力大小的影响，但该等值模型的参数并不能从实际的运行条件中计算，降低了其在工程上的应用价值。更需指出的是，在电流型控制方式下，DG 输出的故障电流呈电流源特性，与电压源特性差异较大，现有的等值模型显然不能适用。

新的并网规定要求 DG 在故障穿越过程中优先输出无功、支撑系统电压，通常要求 DG 输出的无功电流大小与 PCC 电压的跌落量成比例，这必然造成 DG 故障电流大小和相位随不同的故障条件而变化。然而，现有的 DG 等值模型只能区别在不同故障条件下 DG 故障电流的大小，却无法反映相位上的差异，这势必会降低含 DG 的配电网故障分析的准确性。

为此，本文首先分析 DG 在正常运行及相间短路故障时的控制方式与输出特性，从而建立在相间短路故障条件下的 DG 等值模型；其次，基于 DG 等值模型建立含 DG 配电网稳态及相间短路故障分析模型；再次，推导出故障时 DG 输出电流与公共联接点(point of common connection, PCC)电压之间的求解方程组，最终实现含 DG 配电网相间短路故障分析方法的建立；最后，基于 DIgSILENT 建立含 DG 的 10kV 配电网仿真模型，验证本文所提的故障分析方法。

## 1 DG 的控制及特性

VSC 的控制方式分为电流型控制和电压型控制<sup>[19]</sup>。由于电流型控制方式能对 DG 输出电流进行直接控制，因而应用最为普遍。在 Park 坐标系下，若将逆变器交流侧电压矢量定向于  $d$  轴，则正常运行时 DG 控制方程可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{out}} = U_d I_d \\ Q_{\text{out}} = U_d I_q \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P_{\text{out}}$ 、 $Q_{\text{out}}$  分别为 DG 输出的有功功率与无功功率； $U_d$  为 PCC 电压  $U_{\text{PCC}}$  的  $d$  轴分量； $I_d$ 、 $I_q$  分别为 DG 电流的  $d$  轴与  $q$  轴分量。

式(1)表明，DG 输出的电流完全由其功率值决定，其中  $P_{\text{out}}$  为 DG 捕捉的最大外界功率，而  $Q_{\text{out}}$

可直接给定或由控制目标确定。例如，DG 若按固定功率因数控制， $Q_{\text{out}}$  则由  $P_{\text{out}}$  和功率因数共同决定。由式(1)可知，在正常运行时，通过调节  $I_d$ 、 $I_q$  与其参考电流  $I_{d_{\text{ref}}}$ 、 $I_{q_{\text{ref}}}$  一致，就能实现对 DG 输出功率的控制。

在系统故障时，根据德国故障穿越控制要求，可建立如下控制方程<sup>[19]</sup>：

$$\begin{cases} I_{q_{\text{ref},f}}^* = I_{q(0)} + K_q \frac{\Delta U}{U_n} \\ I_{d_{\text{ref},f}}^* = (K_p + \frac{K_I}{sT_d})(P_{\text{ref},f} - P_{\text{out},f}) \\ \Delta U = U_{\text{PCC}} - U_{\text{PCC},f} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $U_n$ 、 $U_{\text{PCC}}$ 、 $U_{\text{PCC},f}$  分别为用作参考的系统额定电压、系统正常与故障时的 PCC 电压； $\Delta U$  为故障时  $U_{\text{PCC}}$  的变化量； $I_{q_{\text{ref},f}}^*$ 、 $I_{d_{\text{ref},f}}^*$  分别为系统故障时 DG 的无功电流及有功电流指令； $I_{q(0)}$  为故障前 DG 输出的无功电流； $K_q$  为无功支持曲线的斜率； $K_p$ 、 $K_I$  分别为 PI 控制环节的比例系数； $T_d$  为 PI 控制的时间常数； $P_{\text{ref},f}$ 、 $P_{\text{out},f}$  分别为故障时的有功功率参考值与 DG 输出的有功功率。

在相间短路故障条件下，系统电压可分解为正序与负序分量。由于负序分量在 DG 输出的有功功率、无功功率与控制量  $I_d$ 、 $I_q$  中将产生 2 倍频分量，若采用常规的控制策略，DG 输出的电流中不仅包含负序分量，还包含大量的谐波分量。因此为了改善 DG 的输出特性，许多文献已提出了多种改进控制策略。其中，正序分量控制是最常用的控制策略。在正序分量控制策略中，控制系统只采用  $U_{\text{PCC}}$  正序分量作为参考，同时滤除  $U_{\text{PCC}}$  负序分量在功率中产生的倍频分量。于是，在正序分量控制方式下，式(2)中的  $P_{\text{out},f}$  与  $\Delta U$  可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{out},f} = U_{\text{PCC},f}^+ I_{\text{DG},f} \\ \Delta U = U_{\text{PCC}} - U_{\text{PCC},f}^+ \end{cases} \quad (3)$$

式中： $U_{\text{PCC},f}^+$  为  $U_{\text{PCC},f}$  的正序分量； $I_{\text{DG},f}$  为 DG 输出的故障电流。

在配电网中，故障切除的时间通常小于 1 s，而风力及太阳能等类型的清洁能源，其能量变化具有一定的惯性，因此在故障前后较短时间内 DG 捕捉的能量几乎保持不变。换而言之，DG 的有功功率参考值在故障前后不发生变化，于是可得到如下方程式：

$$P_{\text{ref},f} = P_{\text{ref}} \quad (4)$$

式中  $P_{ref}$  为正常运行时 DG 的有功功率参考值。

因此, 当不对称故障发生时, 控制器将按式(2)中的  $I_{q.ref.f}^*$ 、 $I_{d.ref.f}^*$  调节有功电流参考值  $I_{d.ref.f}$  和无功电流参考值  $I_{q.ref.f}$  至稳态值, VSC 在脉宽调制控制的作用下调节输出电流与参考电流保持一致, 即

$$\begin{cases} I_{q.f} = I_{q.ref.f} \\ I_{d.f} = I_{d.ref.f} \\ I_{DG.f} = \sqrt{I_{d.f}^2 + I_{q.f}^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $I_{q.f}$ 、 $I_{d.f}$ 、 $I_{DG.f}$  分别为故障时 DG 输出的无功电流、有功电流及电流幅值。

然而, 由于 VSC 容量的限制,  $I_{d.ref.f}$  和  $I_{q.ref.f}$  的大小并不能任意增大, 通常在控制环节的末级采用边界方程对其进行限幅。在边界方程的约束下,  $I_{d.ref.f}$  和  $I_{q.ref.f}$  可由下式表示:

$$\begin{cases} I_{q.ref.f} = I_{q(0)} + K_q \frac{\Delta U}{U_n} \\ I_{d.ref.f} = \frac{P_{ref.f}}{U_{PCC.f}^+} \\ I_{d.ref.f} \leq I_{max} - I_{q.ref.f} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $I_{max}$  为逆变器的最大允许电流, 其值通常为 DG 额定电流的 2 倍<sup>[20]</sup>。

式(6)表明, 故障时  $I_{q.ref.f}$  处于优先控制, 其大小完全由 PCC 电压的跌落量与  $K_q$  决定, 而  $I_{d.ref.f}$  只有在逆变器输出电流未达到控制边界时才由  $P_{ref.f}$  与  $U_{PCC.f}^+$  的商决定, 否则其值由下式决定:

$$I_{d.ref.f} = I_{max} - I_{q.ref.f} \quad (7)$$

由式(3)—(7)可知, 在不对称故障条件下, 采用正序分量控制的 DG, 其输出的故障电流由故障前 DG 的出力及  $U_{PCC.f}^+$  的大小决定。因此, DG 可以等效成由  $U_{PCC}$  正序电压控制的电流源。

对于传统的故障穿越方式, DG 不含无功支持功能, 只需将式(6)第 1 式中的  $K_q$  设为零即可, 即 DG 在故障时只输出有功电流。

## 2 含 DG 配电网相间短路故障分析

在传统的故障分析中, 系统电源输出的故障电流完全由其暂态电势与次暂态电抗决定, 与其故障前的出力及控制策略无关, 然而, 由第 1 节中的分析可知, DG 输出的故障电流不仅与其故障前的出力有关, 还与故障穿越控制策略有关。因此, 在含 DG 的配电网故障分析过程中, 不能简单地将 DG 按传统的电源等值。为此, 本节将采用计及非

对称故障穿越控制策略的压控电流源等值模型, 详细讨论含 DG 配电网相间短路故障分析方法。

对称分量法是电力系统非对称故障分析与计算的主要方法, 该方法利用系统正序、负序和零序等值网络所构成的复合序网, 先计算各节点电压及各支路电流的序分量, 再计算其三相值。在含 DG 的配电网中, 采用正序分量控制的 DG, 其输出的故障电流只包含正序分量, 因此, 在相间短路故障分析时, DG 只包含在正序网络中。

图 1 所示为典型的含 DG 配电网系统,  $\dot{E}_s$  为系统等值电势,  $Z_s$ 、 $Z_{L1}$ 、 $Z_{L2}$  分别为系统等值阻抗、PCC 上游线路 L1 阻抗、PCC 下游线路 L2 阻抗,  $\beta Z_{L2}$  为 PCC 点至故障点  $f$  的等值阻抗, 其中  $0 \leq \beta \leq 1$ 。

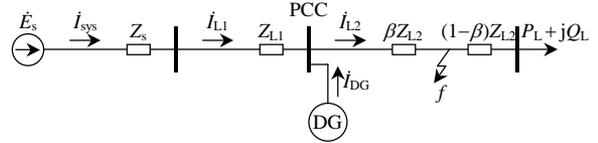


图 1 含 DG 配电网系统接线图

Fig. 1 Single diagram of distribution network with DG

图 1 所示配电网在正常运行时, 各支路电流与各节点电压关系如下:

$$\begin{cases} \dot{E}_s - \dot{I}_{L1}(Z_s + Z_{L1}) = \dot{U}_{PCC} \\ \dot{U}_{PCC} = (\dot{I}_{L1} + \dot{I}_{DG})(Z_{L2} + Z_{Load}) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\dot{I}_{sys}$ 、 $\dot{I}_{L1}$ 、 $\dot{I}_{DG}$  分别为正常运行时系统提供的电流、DG 上游线路 L1 电流、DG 输出的电流;  $Z_{Load}$  为负荷  $P_L + jQ_L$  的等值阻抗。

当图 1 所示配电网线路 L2 的  $f$  点发生相间短路时, 可建立由对称分量表示的边界方程:

$$\begin{cases} \dot{I}_{L2.f}^+ + \dot{I}_{L2.f}^- = 0 \\ \dot{U}_f^+ = \dot{U}_f^- \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\dot{I}_{L2.f}^+$ 、 $\dot{I}_{L2.f}^-$  分别为流过线路 L2 的正、负序电流;  $\dot{U}_f^+$ 、 $\dot{U}_f^-$  分别为故障点的正、负序电压。

正、负序分量网络分别如图 2、3 所示。

图 2、3 中:  $\dot{I}_{L2.f}^+$ 、 $\dot{I}_{L2.f}^-$  分别为故障时 PCC 点

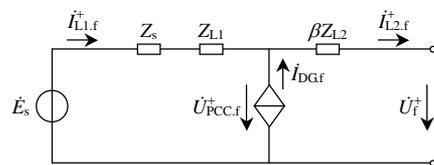


图 2 正序分量网络

Fig. 2 Positive sequence component network

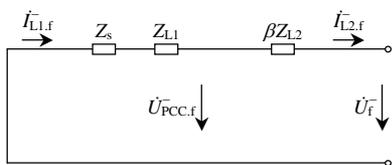
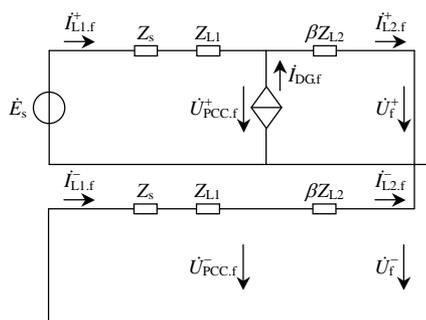


图 3 负序分量网络

Fig. 3 Negative sequence component network

上流支路 L1 正、负序电流； $U_{PCC,f}^-$  为 PCC 点负序电压。

由式(9)可得  $f$  点发生相间短路时的复合序网，如图 4 所示。

图 4  $f$  点发生相间短路时的复合序网Fig. 4 Complex sequence network when a phase-to-phase short circuit fault occurs at the point of  $f$ 

由图 4 可得 DG 接入后各节点电压与各支路电流的关系：

$$\begin{cases} \dot{E}_s - \dot{I}_{L1,f}^+ (Z_s + Z_{L1}) = \dot{U}_{PCC,f}^+ \\ \dot{U}_{PCC,f}^+ = \dot{I}_{L2,f}^+ (2\beta Z_{L2} + Z_s + Z_{L1}) \\ \dot{I}_{L2,f}^+ = \dot{I}_{L1,f}^+ + \dot{I}_{DG,f} \\ \dot{U}_{PCC,f}^- = -\dot{I}_{L1,f}^- (Z_s + Z_{L1}) \\ \dot{I}_{L2,f}^- = \dot{I}_{L1,f}^- \end{cases} \quad (10)$$

由第 1 节中的分析可知，受故障前 DG 的出力大小及故障严重程度的影响，式(10)中  $\dot{I}_{DG,f}$  的大小存在是否达到控制边界的问题。因此，在相间故障分析时需考虑以下 2 种不同情况下  $\dot{I}_{DG,f}$  的大小。

1) DG 输出电流未达到控制边界时。

由式(6)、(8)—(10)可得：

$$\dot{U}_{PCC,f}^+ = \left[ \frac{\dot{E}_s - \dot{U}_{PCC,f}^+}{Z_s + Z_{L1}} + \frac{U_{PCC} I_{d(0)}}{U_{PCC,f}^+} - j(I_{q(0)} + K_q \frac{\Delta U}{U_n}) \right] \cdot (2\beta Z_{L2} + Z_s + Z_{L1}) \quad (11)$$

2) DG 输出电流达到控制边界时。

由式(6)—(10)可得：

$$\dot{U}_{PCC,f}^+ = \left[ \frac{\dot{E}_s - \dot{U}_{PCC,f}^+}{Z_s + Z_{L1}} + I_{\max} - (I_{q(0)} + K_q \frac{\Delta U}{U_n}) - j(I_{q(0)} + K_q \frac{\Delta U}{U_n}) \right] (2\beta Z_{L2} + Z_s + Z_{L1}) \quad (12)$$

式(11)、(12)中，若以  $\dot{U}_{PCC,f}^+$  电压相位为基准，则  $\dot{U}_{PCC,f}^+ = U_{PCC,f} \angle 0^\circ$ ， $\dot{E}_s = E_s (\cos \alpha + j \sin \alpha)$ ，式(11)、(12)可分别分解为式(13)、(14)。

$$\begin{cases} a(U_{PCC,f}^+)^2 + eU_{PCC,f}^+ - c = E_s U_{PCC,f}^+ \cos \alpha \\ b(U_{PCC,f}^+)^2 + fU_{PCC,f}^+ - d = E_s U_{PCC,f}^+ \sin \alpha \end{cases} \quad (13)$$

式中： $a + jb = [1/(2\beta Z_{L2} + Z_s + Z_{L1}) + 1/(Z_s + Z_{L1}) - jk_q/U_n](Z_s + Z_{L1})$ ； $c + jd = U_{PCC} I_{d(0)}(Z_s + Z_{L1})$ ； $e + jf = j(I_{q(0)} + k_q U_{PCC}/U_n)(Z_s + Z_{L1})$ 。

$$\begin{cases} U_{PCC,f}^+ (a - \frac{K_q}{U_n}) - c E_s \cos \alpha + d E_s \sin \alpha = \\ I_{\max} - (I_{q(0)} + K_q \frac{U_{PCC}}{U_n}) \\ U_{PCC,f}^+ (b - \frac{K_q}{U_n}) - d E_s \cos \alpha - c E_s \sin \alpha = \\ -(I_{q(0)} + K_q \frac{U_{PCC}}{U_n}) \end{cases} \quad (14)$$

式中： $a + jb = 1/(2\beta Z_{L2} + Z_s + Z_{L1}) + 1/(Z_s + Z_{L1})$ ； $c + jd = 1/(Z_s + Z_{L1})$ 。

式(13)、(14)中，除  $\alpha$ 、 $U_{PCC,f}^+$  为未知量外，其他均为已知量，显然 2 个方程组都可解。

同时，由式(10)可得  $U_{PCC,f}^-$  与  $U_{PCC,f}^+$  的关系：

$$U_{PCC,f}^- = U_{PCC,f}^+ \frac{Z_s + Z_{L1}}{2\beta Z_{L2} + Z_s + Z_{L1}} \quad (15)$$

若按传统的控制策略，DG 在故障穿越时不含无功支持功能，则式(11)、(12)中  $K_q$  为零。那么，由式(11)与(12)同样可计算  $\dot{I}_{DG,f}$  的大小。

以上配电网相间短路故障分析方法在计算 DG 输出的故障电流过程中，计及其控制策略的影响，针对 DG 输出是否达到控制边界问题，提出了计算  $\dot{U}_{PCC,f}^+$  的方法。在实际的故障分析过程中，首先按 DG 输出未达到控制边界计算  $\dot{U}_{PCC,f}^+$ ，然后对 DG 电流是否达到控制边界进行判断，选择与其对应的计算方式进行故障分析。

### 3 算例验证

为了验证含 DG 配电网相间短路故障分析方法，本文在 DIgSILENT 下建立如图 1 所示的 10kV 配电网仿真模型。控制系统中：常数  $K_q$  取值为 2；配电网供电设备容量为 40 MVA；DG 的接入容量为 4 MW；L2 负荷为 2 + j0.2 MVA；线路阻抗参数如表 1 所示。

故障前，DG 按额定容量输出有功功率，无功

表1 仿真系统参数

Tab. 1 Parameters for simulation system

$Z_s/\Omega$	$Z_{L1}/\Omega$	$Z_{L2}/\Omega$
$j1.3$	$1.18+j3.56$	$0.59+j1.78$

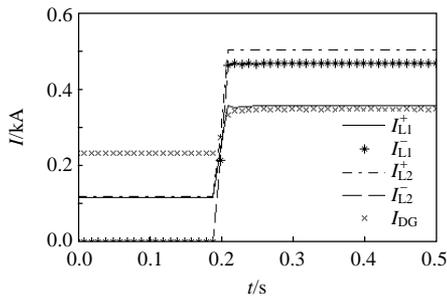
功率输出为零。配电网各节点电压及各支路电流计算结果如表2所示。以下分析结果皆以电源电势作为基准相位，电流参考方向如图1所示。

图5与图6及表3、4分别为在不同地点发生相间金属性短路故障、DG含无功支持故障穿越控制时的仿真波形以及对应的计算结果与仿真结果；同时，表3、4还示出了传统不含无功支持故障穿越控制时的计算结果与仿真结果。算例选取的2处故障点分别位于L2线路的末端( $\beta=1$ )和70%处( $\beta=0.7$ )，分别对应于在含无功支持能力的故障穿越控制下，DG输出电流未达到控制边界和达到控

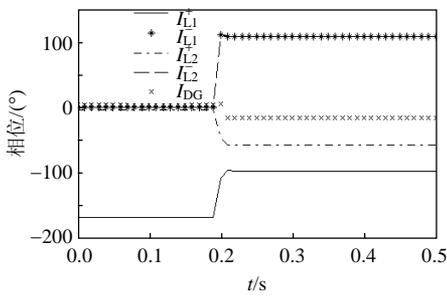
表2 稳态时配电网各节点电压及各支路电流

Tab. 2 Node voltage and feeder current of distribution network during steady state

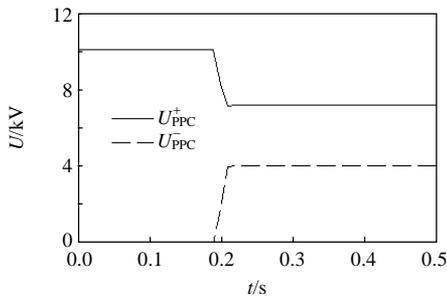
$\dot{U}_{PCC}/kV$	$\dot{I}_{DG}/kA$	$\dot{I}_{L1}/kA$	$\dot{I}_{L2}/kA$
$10.1 \angle 4.2^\circ$	$0.23 \angle 4.2^\circ$	$0.116 \angle -168^\circ$	$0.117 \angle -3.3^\circ$



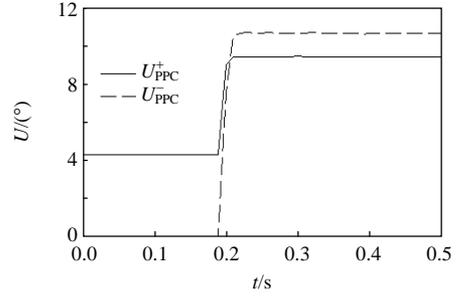
(a) 支路电流幅值



(b) 支路电流相位



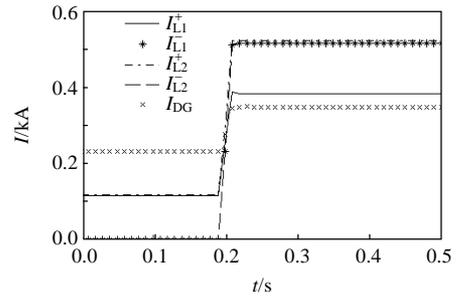
(c) PCC 正负序电压幅值



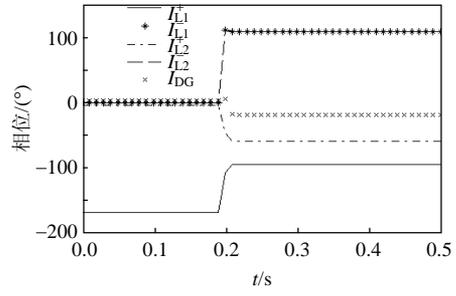
(d) PCC 正负序电压相位

图5 故障发生在L2线路末端时的仿真波形

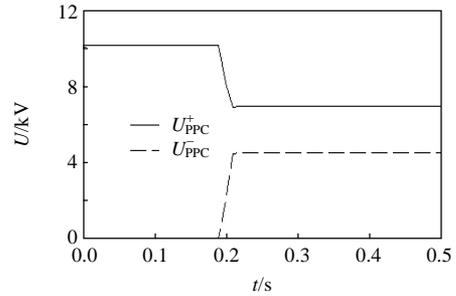
Fig. 5 Simulation curves when a fault occurs at the end of the line L2



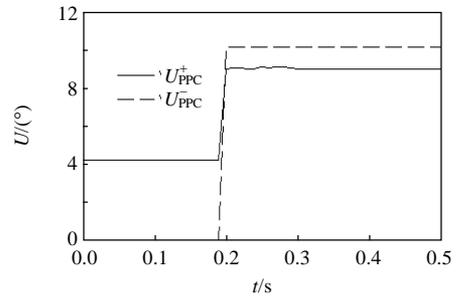
(a) 支路电流幅值



(b) 支路电流相位



(c) PCC 正负序电压幅值



(d) PCC 正负序电压相位

图6 故障发生在L2线路70%处的仿真波形

Fig. 6 Simulation curves when a fault occurs at 70% of the line L2

表 3 故障发生在 L2 线路的末端时的故障分析结果

Tab. 3 Fault analysis when a fault occurs at the end of the line L2

变量	$\dot{U}_{PCC.f}^+ / \text{kV}$	$\dot{U}_{PCC.f}^- / \text{kV}$	$\dot{i}_{DG.f} / \text{kA}$	$\dot{i}_{L1.f}^+ / \text{kA}$	$\dot{i}_{L1.f}^- / \text{kA}$	$\dot{i}_{L2.f}^+ / \text{kA}$	$\dot{i}_{L2.f}^- / \text{kA}$
含无功支持穿越控制计算结果	$6.92 \angle 11.4^\circ$	$4.54 \angle 13^\circ$	$0.34 \angle -15.2^\circ$	$0.39 \angle -104.8^\circ$	$0.52 \angle 116.6^\circ$	$0.52 \angle -63.4^\circ$	$0.52 \angle 116.6^\circ$
含无功支持穿越控制仿真结果	$7.01 \angle 9.1^\circ$	$4.63 \angle 10.2^\circ$	$0.35 \angle -15.6^\circ$	$0.41 \angle -102.5^\circ$	$0.57 \angle 113.9^\circ$	$0.59 \angle -63.2^\circ$	$0.57 \angle 113.9^\circ$
传统控制计算结果	$6.30 \angle 15.8^\circ$	$4.12 \angle 18^\circ$	$0.36 \angle 15.8^\circ$	$0.52 \angle -99.4^\circ$	$0.48 \angle 121.7^\circ$	$0.48 \angle -58.3^\circ$	$0.48 \angle 121.7^\circ$
传统控制仿真结果	$6.20 \angle 11.6^\circ$	$3.99 \angle 11^\circ$	$0.38 \angle 11.6^\circ$	$0.49 \angle -97^\circ$	$0.46 \angle 114.6^\circ$	$0.51 \angle -53^\circ$	$0.46 \angle 114.6^\circ$

表 4 故障发生在 L2 线路的 70% 处时的故障分析结果

Tab. 4 Fault analysis when a fault occurs at 70% of the line L2

变量	$\dot{U}_{PCC.f}^+ / \text{kV}$	$\dot{U}_{PCC.f}^- / \text{kV}$	$\dot{i}_{DG.f} / \text{kA}$	$\dot{i}_{L1.f}^+ / \text{kA}$	$\dot{i}_{L1.f}^- / \text{kA}$	$\dot{i}_{L2.f}^+ / \text{kA}$	$\dot{i}_{L2.f}^- / \text{kA}$
含无功支持穿越控制计算结果	$6.92 \angle 11.4^\circ$	$4.54 \angle 13^\circ$	$0.34 \angle -15.2^\circ$	$0.39 \angle -104.8^\circ$	$0.52 \angle 116.6^\circ$	$0.52 \angle -63.4^\circ$	$0.52 \angle 116.6^\circ$
含无功支持穿越控制仿真结果	$7.01 \angle 9.1^\circ$	$4.63 \angle 10.2^\circ$	$0.35 \angle -15.6^\circ$	$0.41 \angle -102.5^\circ$	$0.57 \angle 113.9^\circ$	$0.59 \angle -63.2^\circ$	$0.57 \angle 113.9^\circ$
传统控制计算结果	$6.30 \angle 15.8^\circ$	$4.12 \angle 18^\circ$	$0.36 \angle 15.8^\circ$	$0.51 \angle -99.4^\circ$	$0.48 \angle 121.7^\circ$	$0.48 \angle -58.3^\circ$	$0.48 \angle 121.7^\circ$
传统控制仿真结果	$6.20 \angle 11.6^\circ$	$3.99 \angle 11^\circ$	$0.38 \angle 11.6^\circ$	$0.49 \angle -97^\circ$	$0.46 \angle 114.6^\circ$	$0.51 \angle -53^\circ$	$0.46 \angle 114.6^\circ$

制边界 2 种情况。2 处故障发生的时刻都为 0.2 s。

比较表 2—4 中的数据可知：故障时， $\dot{i}_{DG.f}$ 、 $\dot{i}_{L1.f}^+$ 、 $\dot{i}_{L2.f}^+$  相对正常运行时的值增大，而  $\dot{U}_{PCC.f}^+$  低于正常运行值；在正序分量控制下，DG 输出的故障电流只含正序分量，不含负序分量，PCC 上下游线路流过的负序电流完全相等；采用本文提出的相间短路故障分析方法计算结果与仿真结果基本一致。

将表 3、4 中的含无功支持功能与传统不含无功支持功能控制策略的结果进行比较可知：含无功支持时， $\dot{U}_{PCC.f}^+$  与  $\dot{i}_{DG.f}$  夹角相对正常运行时的  $\dot{U}_{PCC}$  与  $\dot{i}_{DG}$  夹角明显增大，而不含无功支持时其夹角却保持不变；故障点相同时，相对不含无功支持的情况，含无功支持时使  $\dot{U}_{PCC.f}^+$  较高， $\dot{i}_{L1.f}^+$  较小，其结果表明含无功支持对 PCC 电压有支撑作用，能减少上游支路故障电流。

## 4 结论

由于在相间短路故障条件下，DG 的输出特性完全由其控制策略决定，而目前含 DG 配电网相间短路故障分析中均未计及 DG 的故障穿越控制策略，因此故障分析结果精确性不足。为此，本文在建立计及控制特性的压控电流源 DG 等值模型的基础上，提出了精确的含 DG 配电网相间短路故障分析方法。基于 DIgSILENT 的仿真结果表明：所提的压控电流源 DG 等值模型能准确反映采用正序分量控制时的 DG 输出故障电流的特性；在相间短路故障分析中，采用本文提出的 PCC 电压计算方法，能正确反映 DG 电流与 PCC 电压的关系，进而实现相间短路故障下的配电网故障准确分析。

## 参考文献

- [1] Kroposki B, Pink C, DeBlasio R. Benefits of power electronic interfaces for distributed energy systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 901-908.
- [2] Morren J. Grid support by power electronic converters of distributed generation units[J]. 2006. <http://repository.tu-delft.nl/assets/uuid>.
- [3] Simon R W. Performance of Inverter Interfaced Distributed Generation[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Atlanta, GA, United states: IEEE PES, 2001: 945-950.
- [4] Ramtharan G, Arulampalam A, Ekanayake J B. Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(4): 426-438.
- [5] Timbus A V, Rodriguez P, Teodorescu R, et al. Control strategies for distributed power generation systems operating on faulty grid[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2006, 2: 1601-1607.
- [6] Chong N, Li Ran, Bumby J. Unbalanced grid fault ride through control for a wind turbine inverter[C]//Industry Applications Conference. New Orleans, LA, US: IEEE, 2007, 2: 154-164.
- [7] Wang F, Duarte J. L., Hendrix M A M. Design and analysis of active power control strategies for distributed generation inverters under unbalanced grid faults[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(8): 905-916.
- [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(5): 2583-2592.
- [9] Gabe I J, Pinheiro H. Impact of unbalance voltage dips on the behavior of voltage source inverters[C]//Power Electronics Conference. Brazilian: IEEE, 2009: 956-963.
- [10] Rioual P, Pouliquen H, Louis J-P. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(3): 495-502.
- [11] de Camargo R F, Pinheiro H. Synchronization method for three-phase PWM Converters under unbalanced and distorted grid[J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 2006, 153(5): 763-772.
- [12] Wang Zhan, Nian Heng, Hu Jiabing. Enhanced control strategies of permanent magnet synchronous wind power generation system under unbalanced grid voltage conditions[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China: IEEE Power & Energy Society, 2010: 1-4.
- [13] Muljadi E, Yildirim D, Batan T, et al. Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation[C]//IEEE Industry Applications Conference. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 1999, 2: 1359-1365.
- [14] 章玮, 王宏胜, 任远, 等. 不对称电网电压条件下三相并网型逆变器的控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 103-110.
- Zhang Wei, Wang Hongsheng, Ren Yuan, et al. Investigation on control of three-phase grid-connected inverters under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 103-110(in Chinese).
- [15] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 52-58.
- Yuan Xufeng, Cheng Shijie, Wen Jinyu. An improved method of instantaneous symmetrical compnents and its detection for positive and negative sequence current[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 52-58(in Chinese).
- [16] Mesut E B, Ismail E-M. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1757-1764.
- [17] Cornelis A P, Graovac M, Timothy C G, et al. Fault response of grid-connected inverter dominated networks[C]//Power and Energy Society General Meeting. Minnesota, USA: IEEE PES, 2010: 1-8 .
- [18] 孙景钉, 李永丽, 李胜伟, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 71-76.
- Sun Jingliao, Li Yongli, Li Shengwei, et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution network with inverter interfaced DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 71-76(in Chinese).
- [19] Troeste E. New German grid codes for connecting PV systems to the medium voltage power grid[J]. 2008. <http://www.concentrating-pv.org>.
- [20] Charkraborty S, Kroposki B, Kramer W. Advanced power electronic interfaces for distributed energy systems[R]. Technical Report, NREL/TP-550-44313, 2008.



吴争荣

收稿日期: 2012-06-15。

作者简介:

吴争荣(1978), 男, 博士研究生, 研究方向为含分布式电源的智能配电网保护, wzrhn@163.com;

王钢(1966), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护控制与自动化、规划与可靠性、高压直流输电技术, wg\_scut@263.net;

李海锋(1976), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护控制与自动化、高压直流输电技术;

潘国清(1989), 男, 硕士研究生, 研究方向为微网技术;

高翔(1988), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源控制技术。

(责任编辑 刘浩芳)