

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181325

含分布式电源配电网通用故障电流计算方法

董张卓¹, 刘魁², 张倍倍¹

(1. 西安石油大学电子工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对含分布式电源的配电网故障电流计算通用性差或计算量大的问题, 提出一种通用、计算量小的故障电流计算方法。将分布式电源分为机组并网与逆变器并网两类激励源, 考虑低电压穿越要求, 给出分布式电源的故障特性。在此基础上, 根据叠加定理, 将线性故障配电网分为不同激励源作用下的两部分, 对两类激励源作用下的配电网分别进行故障电流分量计算, 叠加求得总故障电流。计算过程中, 对逆变器并网激励源产生的故障电流分量采用迭代算法进行求解。编制了所提的算法程序, 计算实际配电网的短路电流。计算结果表明, 所提通用故障电流计算方法正确、有效。

关键词: 分布式电源; 低电压穿越; 故障电流计算; 逆变器并网; 叠加定理

A general fault current calculation method for distribution network with distributed generation

DONG Zhangzhuo¹, LIU Kui², ZHANG Beibei¹

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: A general method of fault current calculation with reduced computation is proposed for distribution network with Distributed Generation (DG), with regard to the issue of poor generality or intensive computation in fault current calculation. The DGs are divided into two types, which are generator-connected and inverter-connected. Considering the low voltage traversal requirements, the fault characteristics of the DGs are calculated. On this basis, according to the superposition theorem, the linear fault distribution network is divided into two parts under different excitation sources. The fault currents of the distribution networks under two kinds of excitation sources are calculated respectively, and the total fault current is obtained by superposition. During the calculation process, the fault current component generated by inverter-connected excitation source is solved by iterative algorithm. The method is programmed and the actual example is solved. The calculation results show that the method is correct and effective.

This work is Natural Science Basic Program of Shaanxi Province (No. 2015JM5211).

Key words: distributed generation; low voltage ride through (LVRT); fault current calculation; inverter grid connection; superposition theorem

0 引言

用于传统配电网的各种计算模型及分析方法不再适用于含有分布式电源的配电网^[1-4]。作为配电网分析的重要计算方法之一的故障电流计算是保护整定、电气设备动稳定、热稳定校验的依据^[5-7]。为此, 对分布式电源故障特性及含分布式电源配电网的故障电流计算方法进行研究具有极为重要的理论和实践意义。

分布式电源接入配电网的形式分为机组并网和逆变器并网。机组并网分布式电源的故障特性主要取决于并网电机的特性, 可以将其等效为电压源串联阻抗的形式^[8-9]。

对逆变器并网的分布式电源的故障特性已进行了初步研究。逆变器并网分布式电源响应外部故障时, 其电气特征具有非线性特点^[9-12], 逆变器输出特性主要取决于逆变器的控制方式。由于逆变器直流侧的储能元件隔离了电源侧与逆变器侧, 逆变器的外部故障特性不必考虑源侧的动态特性。文献[10-11]研究了逆变器并网分布式电源的非线性特

基金项目: 陕西省自然科学基金项目资助(2015JM5211)

性,将分布式电源等效为电压源串联受控阻抗,串联阻抗随外部电压、电流的变化而变化。这种模型在求解过程中,需不断对节点阻抗矩阵进行修正,计算量较大。文献[9]将逆变器并网分布式电源等效为受控电流源,根据不同的外部故障形式分别建模,通过序分量下的迭代运算对故障电流进行求解,方法通用性差。文献[12]将分布式电源等效为可变虚拟内电势串联滤波电抗,利用节点电压方程对故障网络节点电压进行求解,在求解过程中将滤波电抗并入系统节点导纳矩阵,虚拟内电势与滤波电抗之比等效为注入电流。此模型不适用分布式电源恒电流输出阶段与脱网运行阶段。

针对已有方法通用性差或计算量大的问题,提出一种适用于含分布式电源配电网通用故障电流计算方法。该方法将机组并网和逆变器并网电源作为两类激励源,作用于含有故障的线性配电网,根据叠加定理,分别计算不同激励源下的故障分量。采用迭代算法对逆变器并网分布式电源产生的故障电流进行计算。该方法避免了在计算过程中对机组并网电源的反复迭代计算,同时避免了在迭代过程中对节点阻抗矩阵的修改,减少了计算量,降低了计算复杂度。最后通过算例验证了所提方法的正确性与有效性。

限于篇幅,不失一般性,在以下描述中,矩阵计算限于原理性描述。

1 配电网故障时分布式电源模型

逆变器并网分布式电源对故障电流的影响取决于分布式电源的运行控制方式。目前逆变器并网分布式电源的控制方式大多为PQ控制方式^[9,13]。不失一般性,对PQ控制方式下的逆变器并网分布式电源进行讨论。

逆变器并网分布式电源响应系统故障时,考虑其低电压穿越时的状态,根据并网节点电压可将逆变器输出特性分为以下两种状态^[9,12-17]。

(1) 恒功率输出状态。当并网节点电压大于额定电压的90%时,逆变器保持输出功率不变^[14-17]。逆变器在此运行策略下发生故障后,由于分布式电源接入点电压的下降,会使分布式电源输出的故障电流增大。

此时分布式电源逆变器采用正序电压分量控制^[18],输出的故障电流始终为三相对称电流。因此当系统发生不对称故障时,首先使用对称分量法计算出分布式电源端口正序电压分量,然后用此正序电压分量计算分布式电源输出电流。下面给出此控制方式下电压和电流的计算方法。

假设在配电网节点*i*接入逆变器并网分布式电源,如图1所示,分布式电源端口相电压为 \dot{U}_i ,注入电网电流为 \dot{I}_i 。其中 $\dot{U}_i = [\dot{U}_{i.a}, \dot{U}_{i.b}, \dot{U}_{i.c}]^T$, $\dot{I}_i = [\dot{I}_{i.a}, \dot{I}_{i.b}, \dot{I}_{i.c}]^T$ 。

通过 \dot{U}_i 可以求出节点*i*序分量电压值

$$\dot{U}_{i.012} = \mathbf{S}^{-1} \dot{U}_i \quad (1)$$

式中: $\dot{U}_{i.012} = [\dot{U}_{i.0}, \dot{U}_{i.+}, \dot{U}_{i.-}]^T$ 为端口电压序分量; \mathbf{S} 为对称分量变换矩阵。

求出端口电流正序分量

$$\dot{I}_{i.+} = \hat{\mathbf{S}}_N / 3\hat{U}_{i.+} \quad (2)$$

式中: $\hat{\mathbf{S}}_N$ 为分布式电源输出功率的共轭; $\hat{U}_{i.+}$ 为端口正序电压 $\dot{U}_{i.+}$ 的共轭。

通过式(3)可得到端口电流:

$$\dot{I}_i = \mathbf{S}[0, \dot{I}_{i.+}, 0]^T \quad (3)$$

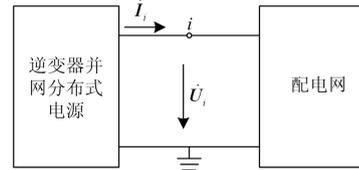


图1 分布式电源接入配电网端口图

Fig. 1 Diagram of distribution network with DG

(2) 电压支撑输出状态。当并网节点电压小于额定电压的90%时,逆变器工作在电压支撑模式下^[14-17]。当配电网发生故障后,尽可能保证分布式电源有功功率输出值不变,并增加分布式电源无功电流输出,达到支撑并网节点电压的目的。如果分布式电源输出电流大于额定电流1.2~1.5倍时,逆变器启动限流措施,将电流控制在限定值范围内。分布式电源的无功电流输出值为

$$\begin{cases} I_{i.q} = 1.5 \times (0.9 - U_{i.+}) I_{i.N} & 0.9 \geq U_{i.+} > 0.2 \\ I_{i.q} = 1.05 \times I_{i.N} & U_{i.+} \leq 0.2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_{i.q}$ 为逆变器输出的无功电流; $I_{i.N}$ 为逆变器输出额定电流。

考虑有功功率及分布式电源电流的输出限值,有功电流输出值为

$$I_{i.p} = \min\left(\frac{P_{i.N}}{3U_{i.+}}, \sqrt{(1.2I_{i.N})^2 - I_{i.q}^2}\right) \quad (5)$$

式中: $I_{i.p}$ 为分布式电源输出的有功电流; $P_{i.N}$ 为分布式电源输出的有功功率。

式(4)、式(5)中的有功电流、无功电流与并网节点电压相量图如图2所示。图2中 θ 角为并网节点电压向量与参考向量的夹角。有功电流为分布式电源

输出电流在并网节点电压上的投影值, 无功电流滞后有功电流 90° 。因此分布式电源输出电流为

$$\dot{I}_{i,+} = (I_{i,p} \cos \theta + I_{i,q} \sin \theta) + j (I_{i,p} \sin \theta - I_{i,q} \cos \theta) \quad (6)$$

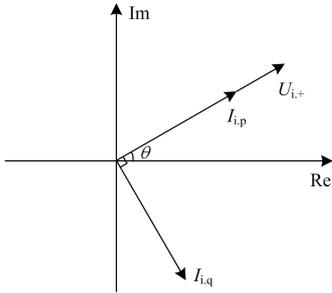


图 2 分布式电源端口电压电流相量图

Fig. 2 Diagram of port voltage and current vector in the DG

2 故障计算时配电网模型

2.1 分布式电源模型

在故障发生瞬间, 根据磁链守恒原理^[8-9,19], 机组并网分布式电源可等效为次暂态电势串联次暂态电抗的形式, 如图 3 所示。逆变器并网分布式电源, 将恒功率模式下的分布式电源等效为如图 4(a)所示的电流源, 电流由式(1)一式(3)计算得到; 电压支撑模式下的分布式电源等效为如图 4(b)所示的复合控制电流源, 电流由式(4)一式(6)计算得到。

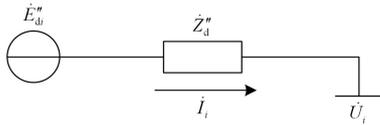


图 3 机组并网分布式电源模型

Fig. 3 Model of DG with electrical machinery

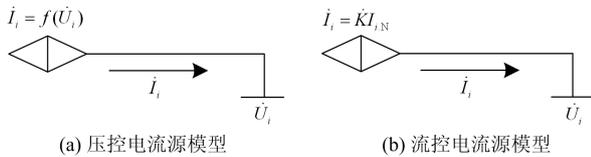


图 4 逆变器并网分布式电源模型

Fig. 4 Model of DG with inverter

2.2 配电网故障模型

在进行潮流计算与故障稳态电流计算时, 认为配电网是线性网络^[19-20]。在故障电流计算过程中, 可忽略负载或将其等效为阻抗; 上级电网等效为电压源串联阻抗; 分布式电源等效为图 3 与图 4 中所示的模型。

含分布式电源配电网故障计算的等值模型如图 5 所示。其中机组并网分布式电源个数为 l , 逆

变器并网分布式电源个数为 m 。

图 5 中上级电源等值为电压源 \dot{E}_s 串联阻抗 Z_s , 机组并网分布式电源等效为次暂态电势 \dot{E}_{di}'' 串联阻抗 $Z_{di}'' (i=1,2,\dots,l)$ 。逆变器并网分布式电源等效为电流源 $\dot{I}_{DGj} (j=1,2,\dots,m)$, 根据逆变器并网端口电压情况, 如果其运行在恒功率方式下, 电流大小由式(1)一式(3)确定; 如果其运行在电压支撑状态下, 电流大小由式(4)一式(6)确定。故障发生在节点 p 与 q 之间。

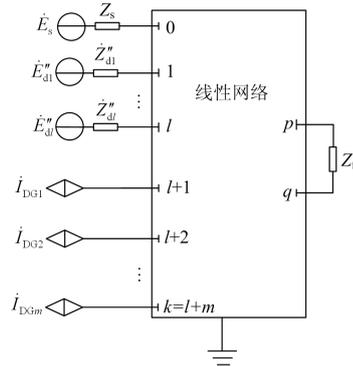


图 5 配电网故障计算网络等值图

Fig. 5 Network equivalent diagram for fault calculation in distribution network

2.3 分布式电源参数计算

根据同步机与异步机的运行特性可知, 系统发生故障时, 可认为故障前后电机的次暂态电势保持不变。逆变器并网分布式电源的输出电流由并网节点的电压决定。通过潮流计算得到的节点电压, 可以推算出电机的次暂态电势以及故障前逆变器并网分布式电源的输出电流。配电网发生故障前系统等值电路示意图如图 6 所示。

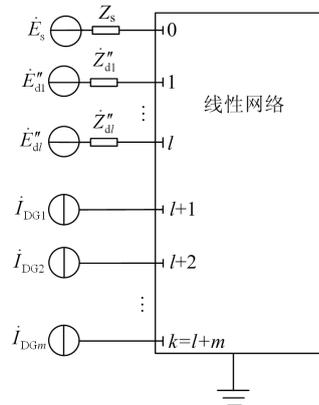


图 6 配电网正常运行状态等值图

Fig. 6 Network equivalent diagram for normal operating condition in distribution network

3 通用故障电流计算方法

3.1 电网通用故障电流计算方法

文献[20]中给出了一种与传统算法有明显区别的电网通用故障电流计算方法。该方法使用故障前网络的节点导纳矩阵,对于不同的故障类型,只需要生成规模极小的故障修正网络节点导纳矩阵 Y'_F 便可计算得到故障电流。

任何故障都可以看作是网络结构的变更。将故障后的网络分为故障元件组成的故障网络和非故障元件组成的健康网络,故障网络用矩阵 Y_f 表示,其发生故障前用矩阵 y 表示;健康网络在故障端口的诺顿等值为矩阵 Y_{eq} (包含机组和系统导纳)。在等值健康网络和故障网络端口并入导纳矩阵 y 和 $-y$,故障后网络如图 7(a)所示。将等值健康网络 Y_{eq} 和矩阵 y 并联,构成等值故障前网络 Y'_{eq} , I_{eq} 为故障前网络在故障端口的诺顿等效电流; $-y$ 与 Y_f 并联构成修正故障网络 Y'_F , 则 $Y'_{eq} = Y_{eq} + y$, $Y'_F = Y_f - y$, 图 7(a)电路变为如图 7(b)所示电路。由图 7(b)所示的电路可以计算出故障元件处故障电流向量 I_F 。计算出 I_F 后,用替代定理将 Y'_F 用 $-I_F$ 替代,可得图 7(c)电路。

图 7(c)中,根据叠加定理,故障后网络的节点电压是由故障前网络电源电流 I_{eq} 和故障电流 $-I_F$ 作用在故障前网络上电压结果的叠加。故障前电网节点电压 \dot{U} 可由潮流计算得到。故障电压分量 \dot{U}_F 由 $-I_F$ 作用在故障前网络得到。故障后节点电压 $\dot{U}_d = \dot{U} + \dot{U}_F$ 。由 \dot{U}_d 可计算得到各支路的故障电流。

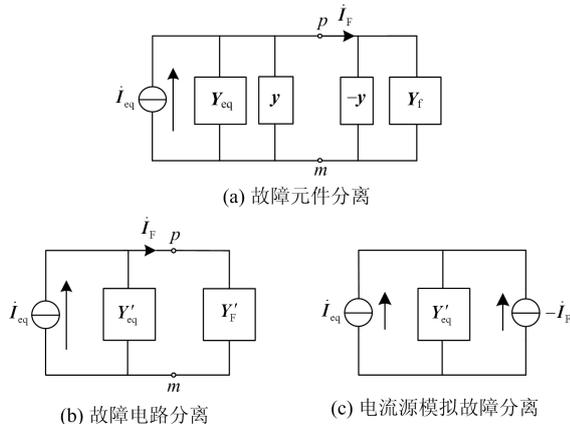


图 7 故障计算原理图

Fig. 7 Diagram of fault calculation principle

图 7(c)中序分量下的故障元件处电流 I_F 为

$$I_F = Y'_F (Y'_{eq} + Y'_F)^{-1} I_{eq} \quad (7)$$

故障后电网的节点电压序分量 \dot{U}_d 为

$$\dot{U}_d = \dot{U} + \dot{U}_F = \dot{U} - Z I_F \quad (8)$$

式中, Z 为故障前网络节点阻抗矩阵中故障节点对应列所组成的矩阵。

由故障后电网的节点电压 \dot{U}_d 即可计算出配电网各处故障电流。

3.2 含分布式电源的配电网通用故障电流计算方法

当故障发生时,由于逆变器并网分布式电源输出电流与并网端口电压的关系表现为非线性函数;3.1 节中的方法不能适用于含逆变器并网分布式电源配电网的故障电流计算。为此,以 3.1 节中的方法为基础,提出一种适用于含分布式电源的配电网通用故障电流计算方法。

含分布式电源配电网的故障等值电路如图 5 所示。配电网为线性网络,根据叠加定理,按分布式电源类型的不同,将故障后配电网分为如图 8 所示的两部分。第一部分为机组并网分布式电源与上级网络等效电源作用于配电网,如图 8(a)所示;第二部分为逆变器并网分布式电源作用于配电网,如图 8(b)所示。对两部分网络分别进行故障电流计算。将两部分网络计算得到的节点电压、故障电流分量叠加,可得到线性网络的节点电压、故障电流。

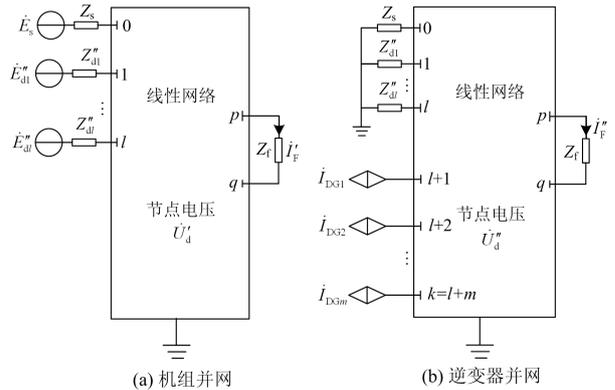


图 8 故障系统等效原理图

Fig. 8 Network equivalent diagram for fault system

3.2.1 分布式电源初始状态确定

对故障前配电网进行潮流计算可得到故障前配电网的节点电压 $\dot{U}_i (i=1,2,\dots,l)$, 由节点电压 \dot{U}_i 可求得故障前配电网中机组并网分布式电源的次暂态电压 \dot{E}''_{di} 与逆变器并网分布式电源的输出电流 I_{DGi} 。

$$\dot{E}''_{di} = \dot{U}_i + \hat{S}_{Ni} Z''_{di} / 3 \hat{U}_i \quad (9)$$

$$I_{DGi} = \hat{S}_{Ni} / 3 \hat{U}_i \quad (10)$$

式中: S_{Ni} 为分布式电源输出的功率; Z''_{di} 为机组并

网的分布式电源的次暂态电抗。

3.2.2 机组并网电源故障电流分量计算

机组并网故障电流分量计算原理等值图如图8(a)所示。采用3.1节中的方法对此故障电流分量进行计算。具体计算步骤如下。

(1) 已知故障前网络节点阻抗矩阵中机组并网节点对应列所组成的矩阵 \mathbf{Z}_1 , 电源电压向量为 \mathbf{E}_d'' (包含上级网络等效电源), 电压源串联阻抗矩阵为 \mathbf{Z}_d'' , 可求得电压源作用在故障前配电网的节点电压 \dot{U}' 。

$$\dot{U}' = \mathbf{Z}_1 \mathbf{Z}_d''^{-1} \mathbf{E}_d'' \quad (11)$$

(2) 在故障端口对故障前配电网进行诺顿等效得到故障端口等效节点导纳矩阵 \mathbf{Y}_{eq}' , 由 \dot{U}' 可得到故障端口诺顿等效电流向量 \dot{I}_{eq}' , 根据故障元件参数与故障类型得到修正故障网络节点导纳矩阵 \mathbf{Y}_F' , 进而求得故障元件处故障电流 \dot{I}_F' 。

$$\dot{I}_F' = \mathbf{Y}_F' (\mathbf{Y}_{eq}' + \mathbf{Y}_F')^{-1} \dot{I}_{eq}' \quad (12)$$

(3) 通过步骤(1)中求得的故障前配电网节点电压 \dot{U}' 与步骤(2)中求得的故障电流 \dot{I}_F' , 计算出故障后配电网节点电压 \dot{U}_d' 。

$$\dot{U}_d' = \dot{U}' - \mathbf{Z}_1 \dot{I}_F' \quad (13)$$

3.2.3 逆变器并网电源故障电流分量计算

逆变器并网部分故障电流分量计算等值原理图如图8(b)所示。由于逆变器输出电流取决于并网节点电压, 而节点电压为第一部分电源、第二部分电源共同作用于线性故障配电网的结果, 逆变器输出电流和节点电压相互耦合且存在非线性关系, 因此, 采用迭代算法对逆变器并网部分故障电流分量进行计算。计算步骤如下。

(1) 已知第 k 次计算得到的网络节点电压 $\dot{U}_d^{(k)}$, 按式(1)~式(6), 可求得第 $k+1$ 次逆变器输出电流 $\dot{I}_{DG}^{(k+1)}$ 。

$$\dot{I}_{DG}^{(k+1)} = f(\dot{U}_d^{(k)}) \quad (14)$$

(2) 已知第 $k+1$ 次逆变器输出电流 $\dot{I}_{DG}^{(k+1)}$, 采用3.1节中该方法对此激励下的故障电压分量进行求解。

逆变器输出电流 $\dot{I}_{DG}^{(k+1)}$ 作用在故障前网络节点阻抗矩阵中逆变器并网节点对应列所组成的矩阵 \mathbf{Z}_2 上的节点电压 $\dot{U}''^{(k+1)}$ 为

$$\dot{U}''^{(k+1)} = \mathbf{Z}_2 \dot{I}_{DG}^{(k+1)} \quad (15)$$

由 $\dot{U}''^{(k+1)}$ 可得到无故障网络端口诺顿等效电流向量 $\dot{I}_{eq}''^{(k+1)}$, 求得故障元件处故障电流 $\dot{I}_F''^{(k+1)}$ 。

$$\dot{I}_F''^{(k+1)} = \mathbf{Y}_F'' (\mathbf{Y}_{eq}'' + \mathbf{Y}_F'')^{-1} \dot{I}_{eq}''^{(k+1)} \quad (16)$$

通过式(15)求得的故障前网络节点电压 $\dot{U}''^{(k+1)}$

与式(16)求得的故障电流 $\dot{I}_F''^{(k+1)}$, 计算出故障后网络节点电压 $\dot{U}_d''^{(k+1)}$ 。

$$\dot{U}_d''^{(k+1)} = \dot{U}''^{(k+1)} - \mathbf{Z}_1 \dot{I}_F''^{(k+1)} \quad (17)$$

(3) 利用求得的机组并网故障电压分量 \dot{U}_d' 与 $\dot{U}_d''^{(k+1)}$ 可得到系统故障电压 $\dot{U}_d^{(k+1)}$ 。

$$\dot{U}_d^{(k+1)} = \dot{U}_d' + \dot{U}_d''^{(k+1)} \quad (18)$$

(4) 判断 $\|\dot{U}_d^{(k+1)} - \dot{U}_d^{(k)}\|_\infty < \varepsilon$ (ε 为给定收敛精度, 可取值 10^{-5} 或 10^{-6}) 是否成立, 若不成立, $k=k+1$, 返回步骤(1)继续下一次迭代; 若成立, 完成计算。

3.2.4 统一故障电流求解流程

故障电流计算分为三个步骤, 初始化过程、机组并网电源故障电流分量计算和逆变器并网电源故障电流分量迭代计算。该算法的整体流程图如图9所示。

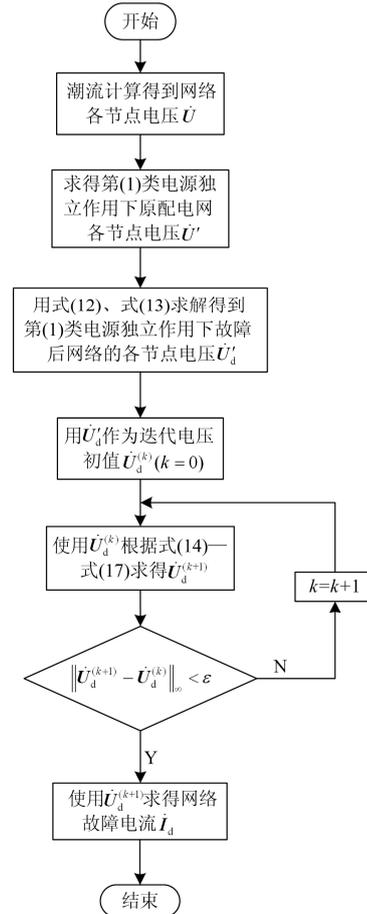


图9 算法流程框图

Fig. 9 Flow of algorithm

(1) 对故障前配电网进行潮流计算, 得到故障前的网络节点电压 \dot{U} , 进而根据式(9)求出机组并网分布式电源的次暂态电压 \mathbf{E}_d'' 。

(2) 由式(11)求出第一部分电源独立作用下故障前配电网中各节点的电压 \dot{U}' 。

(3) 在故障端口对故障前配电网进行诺顿等效, 由式(12)、式(13)求出第一部分电源独立作用下故障后网络的各节点电压 \dot{U}'_d 。

(4) 将第一部分电源独立作用下故障后网络的节点电压 \dot{U}'_d 作为迭代电压初值 $\dot{U}_d^{(k)}$ (k 为迭代次数, $k=0,1,2,\dots$)。

(5) 以 $\dot{U}_d^{(k)}$ 为故障后配电网节点电压, 根据式(1)~式(6)求得第(2)类电源的输出电流 $\dot{I}_{DG}^{(k+1)}$ 。

(6) 由式(15)求得 $\dot{I}_{DG}^{(k+1)}$ 独立作用下故障前配电网中各节点的电压 $\dot{U}''^{(k+1)}$ 。

(7) 由式(16)、式(17)求出第二部分电源独立作用下故障后配电网的各节点电压 $\dot{U}_d''^{(k+1)}$ 。

(8) \dot{U}'_d 与 $\dot{U}_d''^{(k+1)}$ 叠加得到 $\dot{U}_d^{(k+1)}$, 判断是否满足式 $\|\dot{U}_d^{(k+1)} - \dot{U}_d^{(k)}\|_\infty < \varepsilon$, 若不满足, 令 $k=k+1$, 跳转到步骤(5); 若满足, 跳转到步骤(9)。

(9) 由节点电压计算得到配电网各支路故障电流 \dot{I}_d 。

4 算例

为了对提出的方法的正确性和有效性进行验证, 在 VS2013 平台下用 VC++ 编制了提出的通用故障电流计算方法程序。以图 10 所示的某市 35 kV 高压局部配电网为例, 考虑我国中高压配电网一般为中性点非有效接地系统, 计算当线路 L3 末端发生三相短路和两相短路时的短路电流。同时, 对算法性能进行验证。

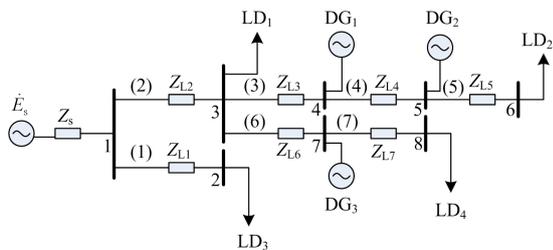


图 10 某市 35 kV 高压配电网
Fig. 10 35 kV HV distribution network

图中 E_s 为上级等效电源, Z_s 为上级系统等效阻抗; $Z_{L_i} (i=1,2,\dots,8)$ 为线路阻抗; $LD_i (i=1,2,\dots,4)$ 为负载; DG_1 与 DG_2 为逆变器并网分布式电源, DG_3 为机组并网分布式电源。表 1、表 2 为配电网参数。支路电流参考方向从编号小的节点流向编号大的节点。

表 1 配电网电源负载数据

Table 1 Electric source and load data of distribution network

名称	数值	名称	数值
E_s/kV	38	LD_4/kVA	5030+j1650
LD_1/kVA	820+j320	DG_1/kVA	-2150-j1040
LD_2/kVA	2020+j660	DG_2/kVA	-2460-j1620
LD_3/kVA	5050+j1660	DG_3/kVA	-2100-j1050

表 2 配电网阻抗数据

Table 2 Impedance data of distribution network

名称	零序/ Ω	正序/ Ω	负序/ Ω
Z_s	1.203+j4.296	0.401+j1.432	0.401+j1.432
Z_{L1}	0.185+j0.353	0.062+j0.117	0.062+j0.117
Z_{L2}	2.166+j3.865	0.722+j1.288	0.722+j1.288
Z_{L3}	1.485+j1.913	0.495+j0.638	0.495+j0.638
Z_{L4}	0.900+j2.025	0.300+j0.675	0.300+j0.675
Z_{L5}	7.417+j9.522	2.472+j3.184	2.472+j3.184
Z_{L6}	1.287+j1.575	0.429+j0.553	0.429+j0.553
Z_{L7}	3.098+j2.081	1.033+j0.694	1.033+j0.694

4.1 三相短路计算

图 10 所示配电网节点 4 发生三相短路, 短路点过渡电阻为 0.005Ω , 收敛精度取 $\varepsilon=10^{-6}$ 。用所编制的程序进行短路计算, 经过 10 次迭代, 算法迭代误差为 8.1×10^{-7} 。结果如表 3—表 5 所示。

表 3 三相短路各节点电压值

Table 3 Node voltage when three-phase short circuit occurs

节点 编号	A 相	
	电压/kV	相角/(°)
(1)	13.446	-36.782
(2)	13.441	-36.802
(3)	4.869	-42.681
(4)	0.030	-95.412
(5)	0.073	-88.462
(6)	0.073	-88.655
(7)	4.992	-43.072
(8)	4.970	-43.1428

表 4 三相短路各支路电流值

Table 4 Branch current when three-phase short circuit occurs

支路 编号	A 相	
	电流/A	相角/(°)
(1)	49.735	-54.903
(2)	5 834.850	-94.183
(3)	6 010.290	-94.568
(4)	58.261	30.389
(5)	0.110	-108.016
(6)	182.393	69.668
(7)	18.431	-61.293

表 5 三相短路各分布式电源输出电流值

Table 5 Current of DG when three-phase short circuit occurs

分布式电源输出电流	电流(A 相)/A	相角(A 相)/(°)
DG ₁	47.278	-156.457
DG ₂	58.308	-149.525

对计算结果进行分析, 逆变器的输出电流与并网节点电压符合式(1)一式(6)的生成规则; 对网络中各节点进行 KCL 验证, 相对误差最大值为 0.202%。

4.2 两相短路计算

图 10 所示配电网节点 4 的 B、C 相发生相间短路, 短路点过渡电阻为 0.01Ω , 收敛精度 $\varepsilon = 10^{-6}$ 。用编制的程序进行短路计算, 经过 3 次迭代, 算法迭代误差为 3.1×10^{-7} 。结果如表 6—表 8 所示。

表 6 两相短路各节点电压值

Table 6 Node voltage when two-phase short circuit occurs

编号	A 相		B 相		C 相	
	电压/kV	相角/(°)	电压/kV	相角/(°)	电压/kV	相角/(°)
(1)	21.961	-30.627	15.123	99.386	16.850	-167.201
(2)	21.953	-30.647	15.118	99.366	16.844	-167.221
(3)	22.016	-31.035	10.951	126.751	12.578	168.185
(4)	22.061	-31.210	10.983	148.669	11.078	148.912
(5)	22.084	-31.302	10.980	148.400	11.105	148.995
(6)	21.975	-31.492	10.925	148.209	11.050	148.804
(7)	21.991	-31.084	10.935	126.105	12.644	168.509
(8)	21.894	-31.155	10.887	126.034	12.588	168.437

表 7 两相短路各支路电流值

Table 7 Branch current when two-phase short circuit occurs

编号	A 相		B 相		C 相	
	电流/A	相角/(°)	电流/A	相角/(°)	电流/A	相角/(°)
(1)	81.217	-48.789	55.959	81.239	62.303	174.666
(2)	112.204	17.568	4 997.980	-4.348	5 102.250	176.123
(3)	100.336	40.650	5 166.590	-4.889	5 237.360	175.895
(4)	57.309	25.790	70.135	168.549	42.469	-66.201
(5)	32.560	-49.592	16.185	130.113	16.375	130.702
(6)	43.806	-45.366	177.882	156.745	138.284	-16.408
(7)	81.263	-49.311	40.406	107.898	46.712	150.267

表 8 两相短路各分布式电源输出电流值

Table 8 Current of DG when two-phase short circuit occurs

分布式电源输出电流	电流(A 相)/A	相角(A 相)/(°)
DG ₁	47.278	-121.32
DG ₂	58.308	-121.489

对计算结果进行分析, 逆变器的输出电流与并网节点电压符合式(1)一式(6)的生成规则; 对网络中各节点进行 KCL 验证, 相对误差最大值为 0.312%。

4.3 算法性能验证

在图 10 中所示配电网中, 通过调整分布式电

源接入点位置和容量, 在相同的收敛精度下 ($\varepsilon = 10^{-6}$), 计算在节点 3 发生三相短路时的短路电流, 算法的收敛情况如表 9 所示。

从表 9 中的算例 1、2、3、5 可以看出, 当电源容量相同, 迭代次数随分布式电源接入点的变化而变化。当逆变器并网分布式电源位于短路点上游时, 迭代次数最少, 这种情况下分布式电源并网节点电压主要来源于上级电源的支撑; 当逆变器并网分布式电源位于短路点下游时, 迭代次数最多。

从表 9 中算例 5、6、7、8 可以看出, 当接入点相同, 迭代次数随分布式电源容量的增大而增加。

从表 9 中算例 4、7 可以看出, 当逆变器并网分布式电源位于短路点下游, 若逆变器并网节点或其下游存在机组并网分布式电源, 迭代次数会降低。这种变化得益于机组并网分布式电源对逆变器并网节点电压的支撑。

不失一般性, 通过上述算例的验证可知, 该算法针对不同的短路故障都可以很好地收敛。

表 9 三相短路迭代结果

Table 9 Iterative result when three-phase short circuit occurs

编号	DG ₁ (逆变器)		DG ₂ (逆变器)		DG ₃ (机组)		迭代次数
	并网 点	容量/ kVA	并网 点	容量/ kVA	并网 点	容量/ kVA	
(1)	1	2150+ j1040	5	2460+ j1620	7	2100+ j1050	4
(2)	4	2150+ j1040	7	2460+ j1620	5	2100+ j1050	3
(3)	1	2150+ j1040	2	2460+ j1620	5	2100+ j1050	1
(4)	4	3000+ j1500	5	3500+ j1000	5	2100+ j1050	6
(5)	4	2150+ j1040	5	2460+ j1620	7	2100+ j1050	22
(6)	4	2500+ j1200	5	3000+ j700	7	2100+ j1050	25
(7)	4	3000+ j1500	5	3500+ j1000	7	2100+ j1050	30
(8)	4	3500+ j200	5	4000+ j1500	7	2100+ j1050	37

5 结论

对含分布式电源的配电网故障电流计算方法进行了研究。根据逆变器并网分布式电源的控制特性将其等效为受控电流源, 提出了一种通用故障电流计算方法。该方法具有以下特点:

(1) 该算法为通用方法, 能适合于不同故障类型的故障电流计算。

(2) 该算法依据配电网为线性网络, 采用叠加原理, 将分布式电源分为机组并网电源和逆变器并网电源, 分别计算不同激励源下的故障电流分量, 有

效减小计算量, 并解决了逆变器并网电流和电压的耦合问题。

(3) 该算法收敛性随分布式电源接入点位置和接入点的容量变化而变化, 能可靠收敛。

参考文献

[1] 蒲天骄, 刘克文, 陈乃仕, 等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3511-3521.
PU Tianjiao, LIU Kewen, CHEN Naishi, et al. Design of ADN based urban energy internet architecture and its technological issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3511-3521.

[2] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.

[3] WU Shuanghui. An adaptive limited wide area differential protection for power grid with micro-sources[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 220-228. DOI: 10.1186/s41601-017-0052-2.

[4] GIRGT A, BRAHMA S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system[C] // IEEE PES Conference on Power Engineering, July 11-13, 2001 Hahfax, Canada: 115-119.

[5] PHILIP P B, ROBERT W DE M. Determining the impact of distributed generation on power systems, part 1 radial distribution systems[C] // Power Engineering Society Summer Meeting, March 23, 2009, Seattle, United States: 1645-1656.

[6] KAUHANIEMI K, KUMPULAINEN L. Impact of distributed generation on the protection of distribution networks[C] // 2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, 5-8 April, 2004, Amsterdam, Netherlands: 315-318.

[7] 王丙东, 蔡蕾, 董旭, 等. 中性点不接地系统非对称短路故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 149-153.
WANG Bingdong, CAI Lei, DONG Xu, et al. A comprehensive analysis for asymmetrical short-circuit fault of electric power system with neutral-point unground[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 149-153.

[8] 傅旭. 含分布式电源的配电网故障分析的解耦相分离法[J]. 电力自动设备, 2009, 29(6): 19-23.
FU Xu. Decoupling phase domain method for fault analysis of distribution system with distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 19-23.

[9] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变器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.

[10] PRADHAN A K, GEZA J. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 206-213.

[11] 曾德辉, 王刚, 郭静梅, 等. 含逆变器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.
ZENG Dehui, WANG Gang, GUO Jingwei, et al. Adaptive current protection scheme for distribution network with inverter interfaced distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 71-76.

[12] 张林利, 彭克, 苏建军, 等. 含逆变器分布式电源的配电网故障分析通用计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(7): 75-80.
ZHANG Linli, PENG Ke, SU Jianjun, et al. Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(7): 75-80.

[13] 李练兵. 光伏发电并网逆变技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.

[14] 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. Short-circuit current calculation method of DFIGWT considering entire LVRT process[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 1-9.

[15] 光伏电站接入电力系统技术: GB/T 19964—2012[S].

[16] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S].

[17] 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 1480—2015[S].

[18] 杨超颖, 王金浩, 杨赞磊, 等. 不对称故障条件下并网光伏逆变器峰值电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 103-111.
YANG Chaoying, WANG Jinhao, YANG Yunlei, et al. Control strategy to suppress peak current for grid-connected photovoltaic inverter under unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 103-111.

[19] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

[20] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

收稿日期: 2018-10-24; 修回日期: 2018-12-10

作者简介:

董张卓(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为配电网和配电网自动化技术等; E-mail: dongzxxa@qq.com

刘 魁(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化运行; E-mail: 534241338@qq.com

张倍倍(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网运行分析. E-mail: 974447053@qq.com

(编辑 张爱琴)