

7-24-2022

Transient analysis of faults in the distribution network with inverter interfaced distributed generator

Yajun WEI

Jining Power Supply Company State Grid, Shandong Electric Power Company, Jining 272000 , China

Kaican LI

Jining Power Supply Company State Grid, Shandong Electric Power Company, Jining 272000 , China

Zhen DONG

Jining Power Supply Company State Grid, Shandong Electric Power Company, Jining 272000 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

WEI, Yajun; LI, Kaican; and DONG, Zhen (2022) "Transient analysis of faults in the distribution network with inverter interfaced distributed generator," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 37: Iss. 3, Article 12.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.012

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss3/12>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

含逆变型分布式电源的配电网故障暂态分析

魏亚军, 李开灿, 董 振

(国网山东省电力公司济宁供电公司, 山东 济宁 272000)

摘 要:大规模分布式电源的接入给配电网运行可靠性带来挑战,导致传统电网故障诊断方法难以满足含分布式电源配电网安全运行要求。首先从提高配电网综合可靠性目标出发,分析含逆变型分布式电源的配电网因控制器的快速响应导致其故障电流变化大的问题;然后针对传统故障分析方法进行扩展,使得在配电网故障分析中能够准确计算来自分布式电源的故障电流和电网检测的电流的有效值;最后通过 IEEE 标准配电网上的算例分析,证明该方法在不同故障情况下计算故障电流的准确性。研究成果为提高配电网运行稳定性、可靠性及全面提升配电网自动化水平提供参考依据。

关 键 词:逆变型分布式电源;故障暂态电流;配电网;双闭环控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.012

中图分类号:TM771

文章编号:1673-9140(2022)03-0102-07

Transient analysis of faults in the distribution networks with inverter interfaced distributed generator

WEI Yajun, LI Kaican, DONG Zhen

(Jining Power Supply Company State Grid, Shandong Electric Power Company, Jining 272000, China)

Abstract: The access of large-scale distributed generators will impact the reliability of the distribution networks, which might be out of range by the traditional fault diagnosis methods. In the distribution networks with inverter interface distributed generator (IIDG), the fault current will change significantly due to the fast response of controllers. Therefore, in order to improve the comprehensive reliability, this paper extends the traditional fault analysis method, so that the root mean square (RMS) of fault current from the IIDG and the grid detection current can be calculated accurately for fault analysis. Through the simulation in the IEEE standard distribution networks, the accuracy of the proposed method under different fault conditions is proved. This method can be applied for improving the stability, the reliability of distribution network operations, and the automation level of distribution networks.

Key words: inverter interfaced distributed generator; fault transient current; distribution networks; double closed loop control

分布式发电技术的发展使得越来越多的分布式电源(distributed generator, DG)并入配电网并向电网供电。然而大量分布式电源接入到配电网后,

给配电网的故障诊断带来了诸多不利的影响,分布式电源的接入改变了配电网的运行状态。分布式电源既可以对外供电,也可以在电网电能充足时进行

收稿日期:2020-11-05;修回日期:2021-03-19

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(5206061800AT)

通信作者:魏亚军(1987-),男,硕士,高级工程师,主要从事电网故障诊断研究;E-mail:diy007_z@163.com

充电储能,这就使得配电网潮流具有双向性。由于风电、光伏等一次能源的出力具有较大随机性,导致配电网潮流也具有较大随机性,从而改变配电网的调度和控制。

为促进分布式电源与配电网的互连,国家已经制定相关的标准^[1-2],规范分布式电源对电网运行的影响评估,特别关注对馈线负荷供电占 10% 以上的分布式电源^[3-4]。当电网发生故障时,分布式电源产生的电流可能对配电网馈线的保护产生较大影响^[5-7]。大规模的分布式电源可以改变短路电流大小,引起保护装置误动。故障电流受分布式电源影响,也可能使重合闸安装处的电流超过其最大开断电流极限,影响其动稳定性和热稳定性^[8]。故障电流也会影响熔断器动作,使其提前熔断,进而导致重合闸熔丝失配,大大影响馈线的可靠性^[9]。

为解决上述问题,在传统故障分析方法的基础上,首先,本文针对含逆变型分布式电源的配电网建立故障分析模型以评估分布式电源在次暂态(故障后第 1 周期)和暂态(3~10 周期)期间对故障的影响;然后,提出新型配电网故障分析方法,能够准确计算来自分布式电源的故障电流和电网检测的电流的均方根值;最后,通过 IEEE 标准配电网上的算例分析,证明该方法在不同故障情况下计算故障电流的准确性。

1 含 IIDG 的配电网故障计算模型

在传统的配电网中,变电站是唯一的电源。由于变电站通常远离大型发电机组,在配电网发生故障时,系统很难检测出故障电流初始的次暂态分量,因此,故障电流通常由稳态值来近似^[10]。如图 1 所示, E_s 为变电站通过戴维南定理等效为电压源, Z_s 是系统阻抗, Z_{l1} 、 Z_{l2} 分别为线路 L_1 和 L_2 的阻抗,线路的正负序阻抗相等,其零序阻抗分别为 $3Z_{l1}$ 和 $3Z_{l2}$, Z_T 为变压器阻抗。在序电压和序电流的边界条件约束下,图 1 中节点 3 发生单相接地故障时的复合序网络如图 2 所示。

图 2 中,IIDG 的端电压可以表示为

$$\dot{U}_{DG}^+ = \frac{\dot{E}_s(Z_s + Z_{L_1} + 2Z_{L_2} + Z_{S0})}{2Z_s + 2Z_{L_1} + 2Z_{L_2} + Z_{S0}} - \frac{\dot{I}^-(Z_s + Z_{L_1})^2}{2Z_s + 2Z_{L_1} + 2Z_{L_2} + Z_{S0}} + \dot{I}^+[Z_T + \frac{(Z_s + Z_{L_1} + 2Z_{L_2} + Z_{S0})(Z_s + Z_{L_1})}{2Z_s + 2Z_{L_1} + 2Z_{L_2} + Z_{S0}}] \quad (1)$$

$$\dot{U}_{DG}^- = \dot{E}_s - \dot{U}_{DG}^+ +$$

$$(\dot{I}_i^- + \dot{I}_i^+)(Z_s + Z_{L_1} + Z_T) \quad (2)$$

其中, $Z_{S0} = Z_T(Z_s + 3Z_{L_1})/(Z_s + 3Z_{L_1} + Z_T) + 3Z_{L_2}$ 。IIDG 的输出电流与端电压可以描述为

$$\begin{cases} \dot{I}_i = \dot{I}_i^+ + \dot{I}_i^- \\ \dot{U}_{DG} = \dot{U}_{DG}^+ + \dot{U}_{DG}^- \end{cases} \quad (3)$$

由于 IIDG 的输出电流与端电压之间存在非线性耦合关系,而该耦合关系依赖于 IIDG 的电流控制策略,因此需要采用迭代法来求解该约束^[11]。首先,假设 IIDG 形成孤岛得到故障后的初始端电压;然后,根据 IIDG 的初始电压和电流控制策略,得到短路电流的序分量;最后,将其代入式(1)、(2)来更新终端电压直到收敛。

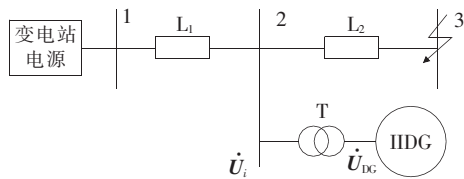


图 1 含 IIDG 的配电网系统

Figure 1 A distribution network with IIDG

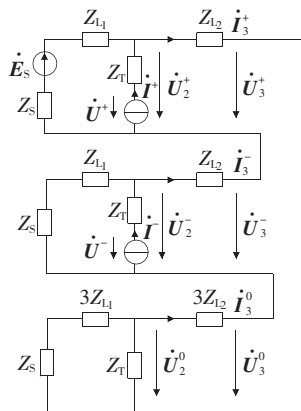


图 2 当节点 3 发生单相接地短路故障时的复合序网络

Figure 2 A compound sequence network when a single-phase short-to-ground fault occurs at node 3

逆变型分布式电源的输出暂态特性主要取决于控制器,目前主要控制方式采用双闭环控制策略。逆变型分布式电源的双闭环控制原理如图 3 所示,分为电流内环和电压外环,均采用 PI 控制器。内环用于控制电流,外环调节功率输出。在双闭环控制策略中,控制器通过调节分布式电源输出端电压的幅值和相位,来控制有功和无功功率输出,并快速为内环电流控制提供电流基准值^[12]。目前常用的控制系统中,通常只考虑 IIDG 电压正序分量作参考,同时消除负序分量,将 IIDG 等值为正序电源模型。

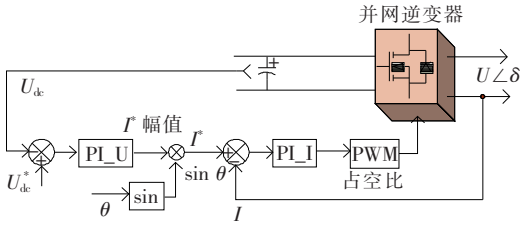
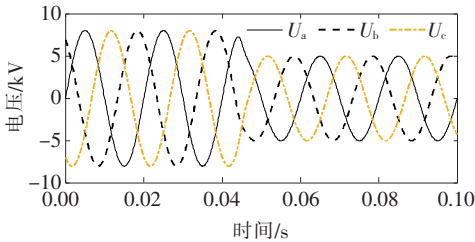


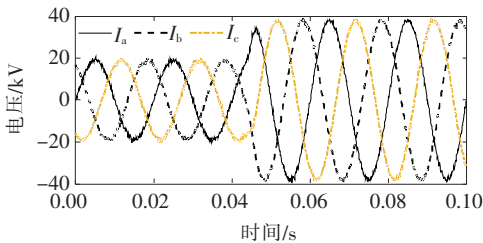
图 3 2 种控制方案下故障分析的 IIDG 表示法

Figure 3 The IIDG representation of fault analysis under two control schemes

通过仿真含逆变型分布式电源的配电网,来分析电网发生故障时的故障特性。馈线末端故障时,逆变型分布式电源在双闭环控制下电流和电压波形如图 4 所示。故障后电流增加缓慢,并且缓慢下降到稳态值,主要因为外部功率控制回路的响应速度较慢。如果不使用外部功率控制回路,只用内环电流控制则响应较快^[13]。



(a) IIDG 端电压曲线



(b) 双闭环控制方案下的电流曲线

图 4 IIDG 在控制方案下故障响应

Figure 4 IIDG waveforms when responds to fault under control schemes

当电网发生故障时, IIDG 的电流高很多,特别是在过渡期间(前 5~10 个周期)。但是 IIDG 的电流一般不超过逆变器所能承受的最大电流,通常为额定电流的 2 倍。IIDG 通常配备保护方案,当电流达到最大极限时将逆变器断开^[14]。因此,故障分析需要考虑这种故障限制。本文主要研究具有双闭环控制方案的 IIDG,提出适用于含 IIDG 的配电网故障分析方法。IIDG 有功功率和无功功率用 P^* 和 Q^* 表示,考虑到动态无功功率的需求和逆变器容量约束,并且 IIDG 在电网故障后应优先提供无功支持,得到 Q_i^* 和 P_i^* 计算公式分别为

$$Q_i^* = m_i \left[Q_{i0}^* + K_{qi} \sqrt{S_{ni}^2 - Q_{i0}^{*2}} \left(1 - \frac{\dot{U}_{DGi}^+}{U_{ni}} \right) \right], \quad 0 < Q_i^* < S_{ni} \quad (4)$$

$$P_i^* =$$

$$\begin{cases} m_i P_{i0}^*, P_{i0}^* \in [0, \sqrt{S_{ni}^2 - Q_{i0}^{*2}}] \\ m_i \sqrt{S_{ni}^2 - Q_{i0}^{*2}}, P_{i0}^* \notin [0, \sqrt{S_{ni}^2 - Q_{i0}^{*2}}] \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、(5)中 S_{ni} 、 U_{ni} 、 I_{ni} 分别为额定容量、电压和电流; K_{qi} 为无功控制系数; P_{i0}^* 、 Q_{i0}^* 分别为正常运行时的有功功率和无功功率; m_i 为故障后逆变器的容量系数,其计算公式为

$$m_i = \sqrt{\dot{U}_{DGi}^+ + \dot{U}_{DGi}^-} I_{maxi} / (U_{ni} I_{ni}) \quad (6)$$

式中 $\dot{U}_{DGi}^+$ 、 $\dot{U}_{DGi}^-$ 分别为 IIDG 端电压的正负序分量; I_{maxi} 为最大允许电流。由式(3)~(5)可以得到 IIDG 的短路电流和电压之间的关系,系统的无功功率的能力可由 K_{qi} 决定。

定义 η_i 和 δ_i 为第 i 个 IIDG 的正负序电流控制系数,则短路电流序分量为

$$\dot{I}_i^+ = \frac{P_i^* \dot{U}_{DGi}^+ + Q_i^* \dot{U}_{DGi}^-}{U_{DGi}^+ + \eta_i U_{DGi}^-} = \frac{(P_i^* + Q_i^* e^{-j\pi/2}) \dot{U}_{DGi}^+}{\dot{U}_{DGi}^+ + \eta_i \dot{U}_{DGi}^-} \quad (7)$$

$$\dot{I}_i^- = \frac{\eta_i (P_i^* \dot{U}_{DGi}^- + Q_i^* \delta_i \dot{U}_{DGi}^+)}{\dot{U}_{DGi}^- + \eta_i \dot{U}_{DGi}^+} = \frac{\eta_i (P_i^* + Q_i^* \delta_i e^{j\pi/2}) \dot{U}_{DGi}^-}{\dot{U}_{DGi}^- + \eta_i \dot{U}_{DGi}^+} \quad (8)$$

含 IIDG 的配电网短路电流和端电压相互作

用,如式(7)、(8)所示,IIDG 短路电流也受端电压的影响。考虑 IIDG 双闭环控制,电网短路电流可采用式(4)~(8)计算,通过迭代方式有效求解。

2 配电网故障暂态电流计算模型

图 4(b)的电流曲线可以分为 2 个过程,即第 1 周期电流峰值期间为次暂态过程,5~10 周期为暂态过程;在故障的前几个周期中,IIDG 的初始电流发生瞬变。因此,需要适合含 IIDG 的故障模型分析逆变器的故障响应并获取峰值电流,通过估计峰值电流的大小来确定保护装置承受的最大限值^[15],估计故障电流是否能够使保护装置动作断开 IIDG。此外,如果 IIDG 未能及时切除并一直提供故障电流,还需要估计在前 5~10 个周期的暂态期间,IIDG 故障电流对负荷侧电气设备的影响。本文所提方法的目标就是分析次暂态和暂态过程期间 IIDG 的动态响应,并获取故障的暂态特征。

2.1 IIDG 故障次暂态过程分析

图 4(a)所示故障导致馈线上的电压迅速下降,但是在次暂态期间几乎保持不变。电压下降导致 IIDG 的故障电流增加,逆变器参与控制降低电流。当电压变化不大时,可以使用传统故障分析方法,即通过稳态模型来估计峰值电流。

功率分布曲线如图 5(a)所示,在此期间 IIDG 功率输出变化没有电流变化快,主要因为测量的有功功率是平均功率,而控制器在初始的半周期中不改变逆变器电压,如图 5(b)所示。IIDG 在其电流达到峰值的初始半周期电压保持恒定。因此,IIDG 的次暂态峰值电流算法步骤如下。

1)计算故障前配电网的节点电压为

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{DGi} - j(Z_L + Z_T) \cdot \dot{I}_i \quad (9)$$

式中 $\dot{U}_{DGi}$ 为逆变器输出端电压; Z_L 为逆变器输出滤波等效阻抗; Z_T 为变压器等效阻抗; $\dot{I}_i$ 为分布式电源输出电流。

2)通过 $\dot{U}_i$ 计算支路电流。

3)计算每个 IIDG 的峰值电流为

$$I_{\text{peak-DG}} = \frac{\dot{U}_{DGi} - \dot{U}_i}{Z_L + Z_T} \quad (10)$$

式中 $\dot{U}_i$ 为上一步计算的 IIDG 并网处的母线电压。如果 IIDG 的峰值电流 $I_{\text{peak-DG}}$ 大于 2 倍的分布式电源输出电流 $\dot{I}_i$,则 IIDG 超过电流保护限值,在电流达到峰值之前跳闸。

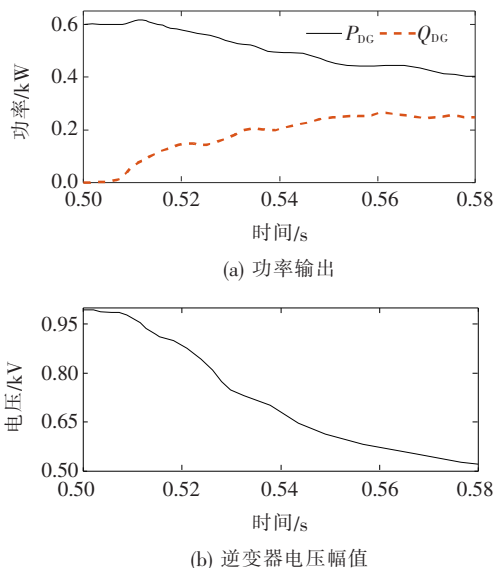


图 5 第 1 个周期内的 IIDG 功率和逆变器电压曲线

Figure 5 IIDG power and inverter voltage curves in the first cycle

2.2 IIDG 故障暂态过程分析

如果 IIDG 在次暂态过程的峰值电流的保护限制,IIDG 不会被切除并继续向电网供电。如图 4(b)所示,通过控制器调节,电流在初始峰值之后减小。为了获取当前故障信息,将配电网和 IIDG 考虑为 2 个互相耦合的系统。每个系统由独立的动态方程组来表示,并以 IIDG 输出端电压 $\dot{U}_{DGi}^1$ 作为耦合变量反映相互作用,进而得到配电网和 IIDG 的状态方程。

配电网状态方程为

$$\dot{U}_f = f(\dot{U}_i, \dot{U}_{DGi}^1) \quad (11)$$

其中, $\dot{U}_f$ 为母线电压状态变量, $\dot{U}_f = (U, \delta)$ 。

IIDG 状态方程为

$$\dot{U}_{DGi} = f_{DGi}(\dot{I}_{DGi}, S_{DGi}) \quad (12)$$

式中 S_{DGi} 为分布式电源的视在功率。

1)配网等值模型。

首先,本文设定 IIDG 输出电压 U_{DGi}^1 近似为常

数,通过式(1)~(8)计算获得相应的稳态值,即

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}_{(S)} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}_{(S)} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}_{(S)}$$

(13)

在更新节点电压后计算相应稳态电流 $\dot{I}_{ss-DGi}$ 和 IIDG 的功率 P_{ss-DGi} 、 Q_{ss-DGi} ,即

$$\dot{I}_{ss-DGi} = \frac{(\dot{U}_{DG_i} - \dot{U}_i)}{j(Z_L + Z_T)}$$

(14)

$$P_{ss-DGi} + jQ_{ss-DGi} = \dot{U}_{DG_i} (\dot{I}_{ss-DGi})^*$$

(15)

故障发生后,逆变器的功率变化曲线如图 6 所示, P_{DG} 、 Q_{DG} 均以指数形式从初始状态变为新的稳态,具有相同的时间常数 τ_{DG} 。因此, $S_i = (\dot{I}_{DG_i}, P_{DG_i}, Q_{DG_i})$ 的变化可近似为

$$S(t) = S_n + (S_{ss,n+1} - S_n)(1 - e^{-t/\tau_{DG}})$$

(16)

由此可用一阶模型近似在 IIDG 节点处的响应情况,通过计算在故障期间馈线模型中 IIDG 以外的戴维南等效阻抗 $Z_f = R_f + jX_f$,并确定电路的相应时间常数,对 S 的变化进行更新。

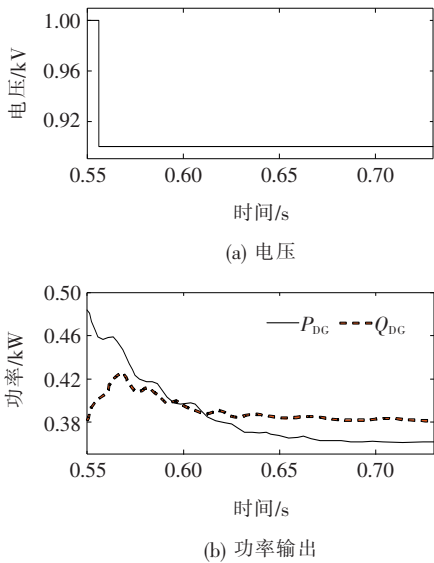


图 6 逆变器响应变化曲线

Figure 6 Curves of inverter response variations

2)IIDG 控制模型。

在目前采用的 IIDG 控制器中通常应用的 PI 控制,因此可将其表示为传递函数,即

$$G(s) = x_p + \frac{x_i}{s}$$

(17)

对控制器进行离散化,得到离散化控制器模型为

$$F(x+1) = F(x) + (x_p + \frac{x_i T}{2})y^{n+1} + (-x_p + \frac{x_i T}{2})y^n$$

(18)

式中 y 、 F 分别为控制器输入和输出; T 为时间步长。有功功率和无功功率误差作为给定 2 个 PI 控制器的输入,即实际功率与参考功率的差值。

3 仿真测试

为了测试所提出的故障分析方法的正确性,在 IEEE 34 节点馈线模型上进行了仿真,IEEE 34 节点模型如图 7 所示。

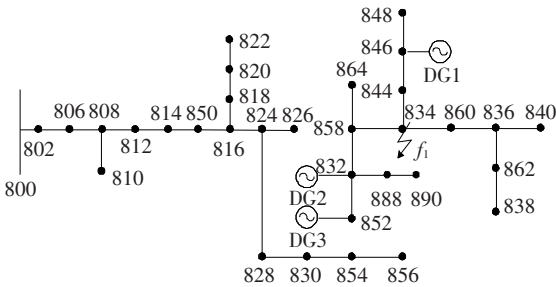


图 7 IEEE 34 节点模型

Figure 7 IEEE 34 node model

IIDG 的容量为 $600 \text{ kV} \cdot \text{A}$,输出电压为 380 V ,并通过 Δ/Y 变压器连接到电网,阻抗为 3% ,负荷以等效阻抗表示并集中在每段馈线末端,取 $U_{DG} = 1 \text{ p. u.}$,通过计算相应的 IIDG 电流来获得戴维南等效阻抗,以此估计相应的时间常数。

$$\tau_{DG} = \frac{Z_f/\omega}{R_f}$$

(19)

本文以馈线末端的三相平衡故障为例计算 IIDG 在次暂态和暂态过程的故障电流。首先计算在系统发生故障前的 DG 节点电压,给定 DG 功率输出,通过潮流计算确定节点电压和电流,并利用式(9)计算确定 U_{DG} ,以初始误差 $x_P = 0$ 、 $x_Q = 0$ 做为控制器输入计算 I_{DG} 在第 1 个周期中的峰值电流,进而计算配电网馈线响应。以 $U_{DG1} = U_{DG1}(t_1)$ 计算获得新的稳态节点电压 U_{ss} ,并利用式(14)~(15)计算当前馈线的电流和功率值,以此估计 t_1 时

刻的 IIDG 电流值为

$$I_{DG1} = I_{DG1} + (I_{ss-DG1} - I_{DG1})(1 - e^{-t/\tau_{DG1}}) \quad (20)$$

通过 P_{DG} 、 Q_{DG} 计算控制器的输入误差估计 DG 电压 U_{DG1} ,并在 $t_2 \sim t_n$ 中迭代计算对结果进行更新。

3.1 IIDG 三相对称故障分析

当节点 846 发生三相短路故障,采用本文所提方法获得的 IIDG1 电压和电流计算结果,如图 8 所示。结果表明:计算估计值与仿真测试电压非常接近,计算估计的故障电流能够很好地跟踪测试值,计算的峰值 RMS 电流为 $I_{peak-DG} = 21.5 \text{ A}$ 。计算的 IIDG1 暂态电流曲线比实际曲线更平滑,计算值在大约 6 个周期(100 ms)后非常接近测试值。本文所述方法可以准确地估计 IIDG 故障电流。

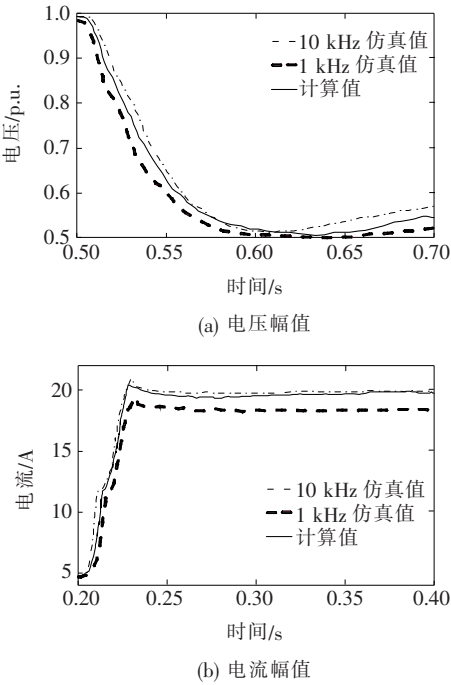


图 8 IIDG 逆变器电压电流(案例 1)
Figure 8 IIDG inverter voltage and current in (Case 1)

3.2 IIDG 三相不对称故障分析

假定节点 846 发生单相接地故障。图 9 比较了 IIDG 在故障相的计算估计故障电流与仿真值,计算估计的故障电流可以跟随仿真测试值。因此,IIDG 估计的第 1 个周期峰值电流为 $I_{peak-DG} = 28.2 \text{ A}$,与仿真的峰值电流非常接近。由图 9 可知,计算估计的电流值跟踪性能与三相对称故障情况下的跟踪性能大致相同。

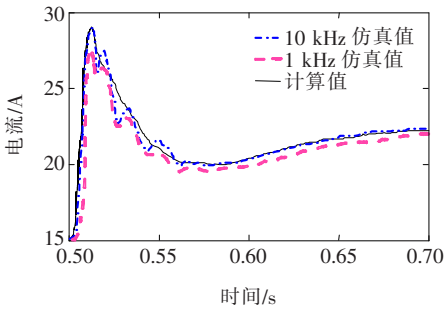


图 9 IIDG 故障电流曲线(案例 2)
Figure 9 Fault current curve for IIDG in (Case 2)

3.3 多 IIDG 故障分析

当 IEEE 34 节点模型上分布多个 IIDG 时,节点 834 发生单相对接地故障,测试节点位于 IIDG1 的电网侧。图 10 比较了 IIDG2 的故障相的计算故障电流与测试值。由图 10 可知,计算的故障电流与测试值差距较小。IIDG 的第 1 个周期峰值 RMS 电流估计为 $I_{peak-DG} = 35.8 \text{ A}$,与仿真获得的峰值电流相近,由此体现了文本所提计算方法能够较为准确的对故障状态变量的计算。

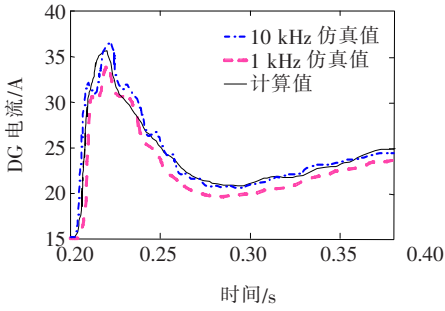


图 10 IIDG2 故障电流曲线
Figure 10 Fault current curves for IIDG2

为了验证本文所提方法的正确性,计算不同故障位置下 IIDG1 的故障电流峰值,并与文献[15]中使用的方法对比。如表 1 所示,本文采用方法得到的短路电流可取得更小的误差。

表 1 不同方法计算结果对比

Table 1 Comparison between proposed nd reference method						
短路节点	本文结果			文献[15]结果		
	计算/A	仿真/A	误差/%	计算/A	仿真/A	误差/%
834	28.1	28.5	1.4	27.7	28.5	2.8
832	36.2	36.7	1.3	35.2	36.7	4.1
852	39.7	40.2	1.2	39.5	40.2	1.7
860	22.6	23.2	2.6	22.4	23.2	3.4

4 结语

本文对含分布式电源的配电网次暂态和暂态故障电流计算方法进行了研究。在传统的故障分析方法基础上,提出了一种在故障期间获取 IIDG 故障特征的方法。所提方法给出了来自 IIDG 的故障电流和保护装置处的故障电流的 RMS 曲线,从而可以估计暂态期间的峰值电流和电流瞬变值。基于配电网模型的仿真测试结果表明,所提出的方法可以准确地计算平衡和非平衡故障条件下的故障电流,该方法同样适用于多台 IIDG 接入电网的情况。

参考文献:

[1] 谢维兵,刘敏,周晓霞,等.含电压逆变型分布式电源配电网的短路计算[J].重庆大学学报,2017,40(2):70-79.
XIE Weibing, LIU Min, ZHOU Xiaoxia, et al. Short-circuit current calculation of inverter interfaced distributed generator based on voltage control in distribution network[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(2):70-79.

[2] 李振坤,周伟杰,钱啸,等.有源配电网孤岛恢复供电及黑启动策略研究[J].电工技术学报,2015,30(21):67-75.
LI Zhenkun, ZHOU Weijie, QIAN Xiao, et al. Distribution network restoration and black start based on distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21):67-75.

[3] 张健,李天慧,马刚,等.基于智能负载的光伏并网电压和频率稳定方法研究[J].智慧电力,2020,48(10):52-57.
ZHANG Jian, LI Tianhui, MA Gang, et al. Voltage and frequency stabilization method for grid-connected photovoltaic system based on smart load[J]. Smart Power, 2020, 48(10):52-57.

[4] ZHANG C, WANG JD, HUANG J, et al. Detection and classification of short-circuit faults in distribution networks based on fortescue approach and softmax regression[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 118:105812.

[5] 郇能灵,冯希科.分布式电源对配电网自动重合闸的影响研究[J].电力科学与技术学报,2010,25(1):21-26.
TAI Nengling, FENG Xike. Distributed generation im-

pact to distribution network's auto-reclosing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(1): 21-26.

[6] 徐萌,邹贵彬,高磊,等.含逆变型分布式电源的配电网正序阻抗纵联保护[J].电力系统自动化,2017,41(12): 93-99.
XU Meng, ZHOU Guibin, GAO Lei, et al. Pilot protection of positive sequence impedance for distribution network with inverter-based distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):93-99.

[7] 何国庆,王伟胜,刘纯,等.分布式电源并网技术标准研究[J].中国电力,2020,53(4):1-12+176.
HE Guoqing, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Study on technical standard of distributed resources grid integration[J]. Electric Power, 2020, 53(4):1-12+176.

[8] 黄景光,陈波,林湘宁,等.基于乌鸦搜索算法的孤岛微网多目标优化调度[J].高压电器,2020,56(1):162-168.
HUANG Jingguang, CHEN Bo, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimization scheduling of islanded microgrid based on crow search algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):162-168.

[9] 潘晓杰,徐友平,朱成亮,等.基于深度学习的多输入特征融合的暂态电压稳定性评估方法[J].电网与清洁能源,2021,37(2):79-84.
PAN Xiaojie, XU Youping, ZHU Chengliang, et al. Transient voltage stability evaluation method based on multi-input feature fusion of deep learning[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(2):79-84.

[10] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Active and reactive power strategies with peak current limitation for distributed generation inverters during unbalanced grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3):1515-1525.

[11] 洪树斌,范春菊,陈实,等.PQ控制策略下多逆变型电源的故障等值方法[J].电网技术,2018,42(4):1101-1109.
HONG Shubin, FAN Chunju, CHEN Shi, et al. Research on fault equivalence method for multiple inverter-interfaced distributed generation based on PQ control strategy[J]. Power System Technology, 2018, 42(4):1101-1109.

- tion and deep learning for image classification[J]. Electronics Letters, 2015, 51(1): 40-42.
- [16] 宋智威,熊成林,黄路,等. 基于牛顿插值的单相整流器功率前馈无差拍控制[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3623-3629.
- SONG Zhiwei, XIONG Chenglin, HUANG Lu, et al. Power feedback-forward and deadbeat control of single-phase rectifier based on newton interpolation[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3623-3629.
- [17] 盛立程,曾喆昭,李莎. 基于代数多项式模型的用电量预测研究[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 34-40.
- SHENG Lizeng, ZENG Zhezha, LI Sha. Research on electricity consumption prediction with the algebraic polynomial model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 34-40.
- [18] BEZA M, BONGIORNO M. Application of recursive least squares algorithm with variable forgetting factor for frequency component estimation in a generic input signal[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1168-1176.
- [19] 尹良震,李奇,洪志湖,等. PEMFC 发电系统 FFRLS 在线辨识和实时最优温度广义预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3223-3235+3378.
- YIN Liangzhen, LI Qi, HONG Zhihu, et al. FFRLS on-line identification and real-time optimal temperature generalized predictive control method of PEMFC power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3223-3235+3378.
- [20] 范忠,史明明,张宸宇,等. 基于三点筛选法与偏最小二乘法的系统谐波阻抗估计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(17): 34-38.
- FAN Zhong, SHI Mingming, ZHANG Chenyu, et al. Estimation of system harmonic impedance based on three-point screening and partial least squares[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(17): 34-38.
- [21] 荀倩,王培良,李祖欣,等. 基于递推最小二乘法的永磁伺服系统参数辨识[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 161-169.
- XUN Qian, WANG Peiliang, LI Zuxin, et al. PMSM parameters identification based on recursive least square method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 161-169.
-
- (上接第 108 页 Continued from page 108)
- [12] 刘幸蔚,李永丽. 逆变型电源 T 接电网后对纵差保护的影响及准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1595-1600.
- LIU Xingwei, LI Yongli. Effect of IIDG connected to grid as a teed line on longitudinal differential protection and maximum penetration capacity[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1595-1600.
- [13] 黄河,朱磊,高松,等. 提升分布式电源消纳的配网快速遍历重构方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 166-172.
- HUANG He, ZHU Lei, GAO Song, et al. Reconfiguration method of distribution system for increasing the penetration of distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 166-172.
- [14] 郭小强,邬伟扬,漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 22-28+19.
- GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 22-28+19.
- [15] 韩伟,刘素梅,肖超,等. 计及发电单元故障特性差异的光伏电站短路电流计算模型[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 129-135.
- HAN Wei, LIU Sumei, XIAO Chao, et al. Steady short-circuit calculation model for a photovoltaic station considering different generation units' fault characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 129-135.