

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.02.010

# 含电压逆变型分布式电源配电网的短路电流计算

谢维兵<sup>1</sup>, 刘敏<sup>1</sup>, 周晓霞<sup>1</sup>, 敬勇<sup>1</sup>, 叶玲<sup>2</sup>, 王强钢<sup>2</sup>, 周念成<sup>2</sup>

(1. 国网重庆市电力公司技能培训中心, 重庆 400044; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 分布式发电接入改变了配电网潮流和短路电流分布, 其提供的短路电流将对电网保护和重合闸动作产生影响。文中通过研究电压控制逆变型分布式电源(IIDG)的故障响应特性, 分析配电网不对称故障时 IIDG 三相平均功率与正负序网功率关系, 建立计及电压型 IIDG 对称控制特征的短路计算序分量模型。根据 IIDG 与配电网正负序网络的交互作用, 推导电压型 IIDG 的故障电流变化规律, 提出计算含电压型 IIDG 配电网短路电流的对称分量迭代算法。在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中建立电压型 IIDG 的电磁暂态模型, 仿真验证了该方法的正确性。

**关键词:** 逆变型分布式电源; 电压控制; 故障分析; 对称分量; 配电网

**中图分类号:** TM713; TM464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2017)02-070-10

## Short-circuit current calculation of inverter interfaced distributed generator based on voltage control in distribution network

XIE Weibing<sup>1</sup>, LIU Min<sup>1</sup>, ZHOU Xiaoxia<sup>1</sup>, JING Yong<sup>1</sup>, YE Ling<sup>2</sup>,  
WANG Qianggang<sup>2</sup>, ZHOU Niancheng<sup>2</sup>

(1. Power Supply Bureau Skills Training Center of Chongqing, Chongqing 400044, P.R.China;  
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, P.R.China)

**Abstract:** The distribution of power flow and short-circuit current is changed by the distributed generation embedded in distribution network, and its short-circuit current affects the operation of protection and reclosing devices. The fault response characteristics of voltage controlled inverter interfaced distributed generator (IIDG) were studied, and the relationship between IIDG three-phase power and power components in the positive and negative sequence networks under asymmetrical fault condition were also analyzed. Then a sequence component model of voltage controlled IIDG for short-circuit current calculation was established. The fault current change law and recursion formula were gained according to the interaction between the IIDG and the sequence networks, and consequently the iterative algorithm of symmetrical components for short-circuit current calculation of distribution network with voltage controlled IIDG was proposed. The correctness of the proposed method was verified by the electromagnetic transient model of voltage controlled IIDG in PSCAD/EMTDC simulation software.

**Keywords:** inverter interfaced distributed generator; voltage control; fault analysis; symmetrical component; distribution network

收稿日期: 2016-09-01

作者简介: 谢维兵(1970-), 男, 副教授, 主要从事电力系统的研究工作。

分布式发电接入改变了配电网潮流和短路电流分布<sup>[1-2]</sup>,其与电网保护重合闸存在不匹配问题<sup>[3]</sup>。逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generator, IIDG)以快速灵活的控制性能,在配电网分布式发电中应用广泛。并网运行 IIDG 通常采用恒功率控制,按内环跟踪电量的不同,可将 IIDG 控制器分成电压控制型和电流控制型<sup>[4]</sup>(简称电压型或电流型)。与同步发电机相比,IIDG 具有不同的故障特征<sup>[2]</sup>,对于电压型 IIDG 其在配电网短路后将出现典型的次暂态和暂态过程<sup>[5]</sup>。IIDG 接入配电网的故障分析是电网保护整定和稳定运行的基础,但采用 IEC60909 等标准的等值电压源法进行计算存在较大的误差<sup>[6]</sup>,因此,需要研究含电压型 IIDG 配电网故障电流的解析计算方法。

时域仿真是研究 IIDG 故障特性的常用方法<sup>[7]</sup>,但时域仿真耗时且难以得到解析解。文献[8]研究 IIDG 对配电网三相短路的故障电流稳态响应;文献[9]提出含 DG 配电网故障计算的叠加法,但没有考虑 IIDG 控制的动态过程。文献[10-11]认为电流型 IIDG 短路电流呈指数规律变化,仅根据配电网故障前后 IIDG 稳态电流计算其动态响应,无法确定故障电流越限时刻并且误差较大。电流型 IIDG 故障后的暂态冲击电流小,对配电网短路水平影响有限,文献[5]针对电压型 IIDG 的控制传递函数和故障中输出功率的变化,建立了 IIDG 短路计算的相分量模型。由于采用序分量法进行短路计算能够有效减小相分量法的复杂性和求解规模,而现有的 IIDG 控制策略中多采用对称控制<sup>[5,12]</sup>,因此,建立 IIDG 短路计算的序分量解析模型,更有利于 IIDG 控制方式与配电网故障分析方法的结合。

笔者研究了配电网故障时电压型 IIDG 的动态特性及其与正负序网络的交互作用关系,分析电压型 IIDG 的短路电流变化规律,建立了计及控制特性的电压型 IIDG 短路计算序分量模型,提出了含电压型 IIDG 配电网短路计算的对称分量迭代算法。在 PSCAD/EMTDC 中利用电压型 IIDG 电磁暂态模型进行动态仿真,验证了本文提出方法的正确性。

## 1 电压型 IIDG 序分量模型及故障分析

### 1.1 电压型 IIDG 短路计算序分量模型

配电网不同位置接入多台电压型 IIDG,如图 1(a)所示为仅在节点  $i$  接入电压型 IIDG,节点 1 为配电网与主网的连接点, $E_s$  和  $Z_s$  分别为主网电源电压和短路阻抗。由图 1 电压型 IIDG 控制结构可知,测量元件采集电压、电流信号计算 IIDG 输出功率测量值  $P_g$  和  $Q_g$ ,分别与功率设定值比较经 PI 调节得到 IIDG 内电势的相角  $\delta$  和幅值  $E_m$ ,再由锁相环和电压控制内环调节 IIDG 内电势<sup>[4]</sup>。对于电压型 IIDG 可将其等效成电压源接入配电网,从而可得图 2 所示的含电压型 IIDG 配电网等值电路。

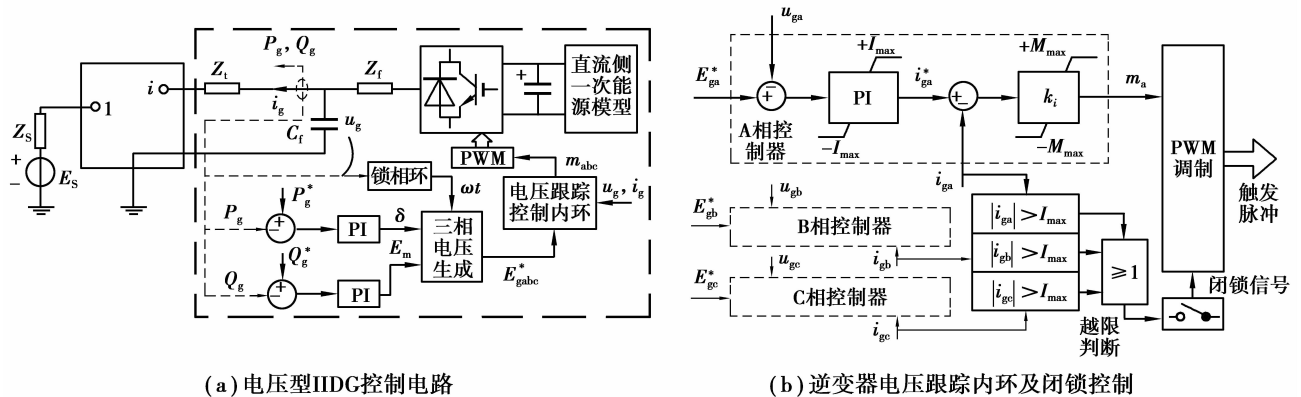


图 1 电压型 IIDG 控制模型

Fig.1 Control model of voltage controlled IIDG

含电压型 IIDG 配电网由 IIDG 物理电路、IIDG 控制系统和网络方程 3 部分构成闭环系统,图 2 中  $Z_i$ 、 $Z_f$  和  $C_f$  分别为升压变压器短路阻抗、IIDG 滤波阻抗和滤波电容, $E_g$ 、 $u_g$  和  $i_g$  分别为 IIDG 等值内电势、机端电

压和电流,短路电流计算时忽略滤波电容。配电网中一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地,研究中无需计及零序电压分量<sup>[13]</sup>,研究中将 IIDG 物理电路分解成与正负序网络对应的正负序分量模型。

电压型 IIDG 控制电路如图 1(a)所示,其采用功率外环电压内环的控制策略,配电网故障时先由 IIDG 端电压和电流的正序分量  $u_g^1$ 、 $u_g^1$  和  $i_g^1$ 、 $i_g^2$  得到三相功率,再经 PI 传递函数生成 IIDG 内电势设定值,根据电压对称控制可得序网中 IIDG 正序内电势幅值和相位(负序内电势为 0),代入正负序网即可计算 IIDG 短路电流序分量。逆变器的电压跟踪内环及闭锁控制框图如图 1(b),利用电压反馈比例调节外环使逆变器网侧电压跟踪参考值,再与电容电流测量值比较构成电容电流内环,经电流内环比例环节  $k_i$  后生成三相调制信号  $m_{abc}$ 。

此外,当 IIDG 故障电流中任一相电流超过热极限电流(一般为额定电流的 1.5~2 倍)时,根据图 1(b)的闭锁控制,IIDG 保护动作发出闭锁信号使变流器快速闭锁<sup>[14]</sup>,切除后无故障电流注入配电网<sup>[5]</sup>。笔者提出的 IIDG 故障电流对称分量法针对 IIDG 故障电流未超出电流限值的情况,故障过程中其电压内环仍可实现内电势的跟踪控制。

### 1.2 配电网不对称故障时 IIDG 三相功率

IIDG 三相瞬时功率由其端电压矢量  $\mathbf{u}_g = (u_{ga}, u_{gb}, u_{gc})$  和电流矢量  $\mathbf{i}_g = (i_{ga}, i_{gb}, i_{gc})$  决定<sup>[13]</sup>,即三相有功功率  $p_g = \mathbf{u}_g \cdot \mathbf{i}_g$  和无功功率  $q_g = |\mathbf{u}_g \times \mathbf{i}_g|$ 。当配电网不对称故障时有  $\mathbf{u}_g = \mathbf{u}_g^1 + \mathbf{u}_g^2$  和  $\mathbf{i}_g = \mathbf{i}_g^1 + \mathbf{i}_g^2$ ,且设  $u_g^1 = U_g^1 e^{j\theta_u^1} e^{j\omega t}$ 、 $i_g^1 = I_g^1 e^{j\theta_i^1} e^{j\omega t}$ 、 $u_g^2 = U_g^2 e^{j\theta_u^2} e^{-j\omega t}$ 、 $i_g^2 = I_g^2 e^{j\theta_i^2} e^{-j\omega t}$  则瞬时有功功率为

$$p_g = \mathbf{u}_g \cdot \mathbf{i}_g = U_g^1 I_g^1 \cos(\theta_u^1 - \theta_i^1) + U_g^2 I_g^2 \cos(\theta_u^2 - \theta_i^2) + U_g^1 I_g^2 \cdot \cos(2\omega t + \theta_u^1 - \theta_i^2) + U_g^2 I_g^1 \cos(-2\omega t + \theta_u^2 - \theta_i^1) = P_g^1 + P_g^2 + p_{2\omega}^{12} + p_{2\omega}^{21} \quad (1)$$

式中: $P_g^1$  和  $P_g^2$  为瞬时有功直流分量; $p_{2\omega}^{12}$  和  $p_{2\omega}^{21}$  为有功倍频分量,有功倍频分量在半周波的整数倍时间内的均值为 0。三相功率为瞬时有功的半周平均值为

$$P_g = U_g^1 I_g^1 \cos(\theta_u^1 - \theta_i^1) + U_g^2 I_g^2 \cos(\theta_u^2 - \theta_i^2) = P_g^1 + P_g^2 \quad (2)$$

由于序电压电流矢量外积  $\mathbf{u}_g^1 \times \mathbf{i}_g^1$  和  $\mathbf{u}_g^2 \times \mathbf{i}_g^2$  反向,可得三相无功功率平均值为

$$Q_g = |\mathbf{u}_g^1 \times \mathbf{i}_g^1 + \mathbf{u}_g^2 \times \mathbf{i}_g^2| = |\mathbf{u}_g^1 \times \mathbf{i}_g^1| - |\mathbf{u}_g^2 \times \mathbf{i}_g^2| = U_g^1 I_g^1 \sin(\theta_u^1 - \theta_i^1) - U_g^2 I_g^2 \sin(\theta_u^2 - \theta_i^2) = Q_g^1 - Q_g^2 \quad (3)$$

### 1.3 电压型 IIDG 稳态运行点及短路计算原理

假设图 2 中配电网含  $n$  个节点,并有  $m$  台电压型 IIDG 接入配电网。取节点 1 为主网等值电源点,节点 2 至  $(m+1)$  为电压型 IIDG 接入节点。对于第  $i$  台电压型 IIDG,节点  $i$  的戴维南等效电路如图 3 所示,其中等值电势为节点  $i$  的开路电压  $\dot{U}_{ioc}$ ,等值内阻抗即为节点  $i$  的自阻抗  $Z_{ii}$ ,节点  $i$  开路电压<sup>[15]</sup>为

$$\dot{U}_{ioc} = \sum_{j=1, j \neq i}^{m+1} Z_{ij} \dot{I}_j = Z_{i1} \dot{I}_{s1} + \sum_{j=2, j \neq i}^{m+1} Z_{ij} \dot{I}_{gj}, \quad i = 2, \dots, m+1, \quad (4)$$

式中  $\dot{I}_{s1} = \dot{E}_s / Z_s$  和  $\dot{I}_{gj}$  分别为电源点的诺顿等值电流和第  $j$  台 IIDG 注入电流。正常运行时并网 IIDG 采用恒功率控制,根据图 3 等效电路、式(4)和  $P_{gi} + jQ_{gi} = \dot{U}_{gi} \dot{I}_{gi}^*$  即可计算含  $m$  台 IIDG 配电网的稳态运行点。

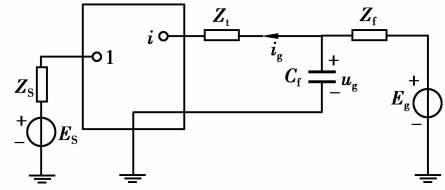


图 2 含电压型 IIDG 配电网等效电路  
Fig.2 Equivalent circuit of distribution network with a voltage controlled IIDG

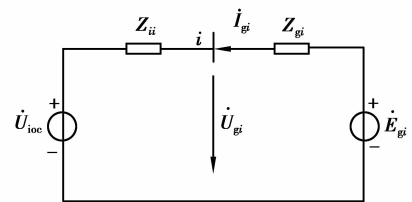


图 3 含  $m$  台电压型 IIDG 配电网的节点  $i$  戴维南等效电路  
Fig.3 Thevenin equivalent circuit of node  $i$  in distribution network with  $m$  sets of voltage controlled IIDG

以 IEEE-34 节点配电网接入 3 台电压型 IIDG 为例,配电馈线末端三相故障时各台 IIDG 端电压如图 4(a)所示,可见 IIDG 端电压跌落过程中未出现明显暂态电压分量,由于 PQ 控制的响应时间快于网络的固有衰减时间常数<sup>[16]</sup>,因此,暂态分量不明显,故障后 IIDG 等效电路的开路电压阶跃变化至故障稳态值。

图 4(b)给出了电压型 IIDG 对配电网三相短路的动态响应,短路后 IIDG 端电压跌落,其输出电流  $I_g$  出现峰值,之后逐渐衰减变化至稳态故障电流。电压型 IIDG 内电势由控制器和配电网共同决定(图 1),为实现 IIDG 控制与网络方程的解耦计算,设  $\Delta t$  时间间隔(取  $\Delta t=0.01$  s 计算电流有效值)内电势保持不变,即 IIDG 内电势随时间近似为阶跃变化规律。

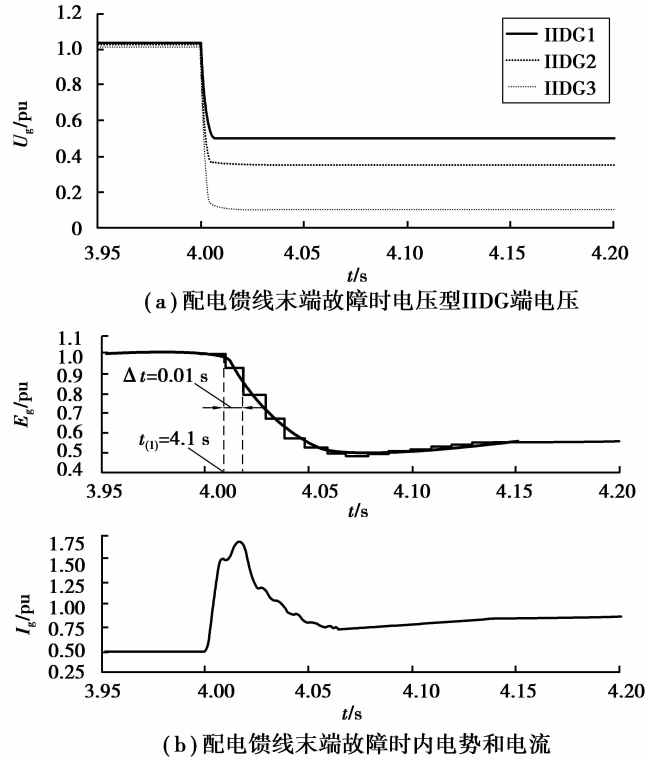


图 4 配电网三相故障时 IIDG 电压和电流

Fig.4 Voltage and current of IIDG when three-phase short-circuit occurs at distribution grid

由于电压型 IIDG 控制器的电流内环调节速率快于功率外环,使得图 4 中内电势在第 1 个  $\Delta t$  内与故障前基本一致。对于第  $i$  台电压型 IIDG,设故障后开路电压由  $\dot{U}_{ioc}$  变化至  $\dot{U}_{iocs}$ ,且各步长的 IIDG 内电势为  $\dot{E}_{gi(0)}, \dot{E}_{gi(1)}, \dots, \dot{E}_{gi(k)}, \dots$ 。含电压型 IIDG 配电网短路计算时,先由  $\dot{E}_{gi(1)} = \dot{E}_{gi(0)}$  计算第 1 个  $\Delta t$  内 IIDG 的故障峰值电流。在第 2 个  $\Delta t$  后 IIDG 的内电势依次发生阶跃变化,根据图 3 可计算第  $k$  个  $\Delta t$  内电压型 IIDG 故障输出电流的稳态正弦分量为

$$\dot{I}_{gi(k)s} = \frac{\dot{E}_{gi(k)} - \dot{U}_{iocs}}{Z_{ii} + Z_{gi}} = \frac{\dot{E}_{gi(k)} - \dot{U}_{iocs}}{Z_{ii} + Z_{gi}} = I_{gi(k)s} e^{j\theta_{is}} \quad (5)$$

若上式中稳态电流瞬时值满足余弦特性,当  $t=0$  时配电网发生故障,则第  $k$  个  $\Delta t$  内 IIDG 的故障电流响应为

$$i_{gi(k)}(t) = (I_{gi(k-1)} \cos \theta_i - I_{gi(k)s} \cos \theta_{is}) e^{-t/\tau_{gi}} + I_{gi(k)s} \cos(\omega t + \theta_{is}), \quad (6)$$

其中  $\tau_{gi}$  为第  $i$  台 IIDG 衰减时间常数,由网络参数可计算得到; $\theta_i, \theta_{is}$  分别为 IIDG 故障电流瞬时和稳态值的相角,由式(6)可得第  $k$  个  $\Delta t$  内 IIDG 故障电流的有效值为

$$I_{gi(k)}(t) = \sqrt{[(I_{gi(k-1)} \cos \theta_i - I_{gi(k)s} \cos \theta_{is}) e^{-t/\tau_{gi}}]^2 + (I_{gi(k)s})^2} \quad (7)$$

当  $\Delta t$  较小时  $I_{gi(k)}(t) \approx (I_{gi(k-1)} \cos \theta_i - I_{gi(k)s} \cos \theta_{is}) e^{-t/\tau_{gi}} + I_{gi(k)s}$ , 对于第  $i$  台电压型 IIDG, 其故障电流在每个  $\Delta t$  内均近似按时间常数  $\tau_{gi}$  呈指数衰减变化, 其在各  $\Delta t$  内 IIDG 的输出有功和无功功率亦近似呈现指数规律变化。

式(7)中取  $t = \Delta t$  时可得第  $k$  个  $\Delta t$  末端的 IIDG 故障电流  $I_{gi(k)}(\Delta t)$ , 如图 5 所示, 将其作为第  $k+1$  个步长的起始电流。再利用 IIDG 的控制策略更新其内电势, 结合网络方程计算第  $k+1$  个步长的稳态电流  $I_{gi(k+1)s}$ 。据此利用 IIDG 故障电流在  $\Delta t$  内指数衰减规律, 即可计算下一时刻的 IIDG 故障电流。

## 2 含电压型 IIDG 配网短路计算对称分量法

### 2.1 IIDG 故障电流初始值计算

利用 1.3 节方法和配电网原节点阻抗矩阵计算正常运行时各 IIDG 端电压  $\dot{U}_{gi(0)}$  和电流  $\dot{I}_{gi(0)}$ , 再由  $\dot{E}_{gi(0)} = \dot{U}_{gi(0)} + Z_{gi} \dot{I}_{gi(0)}$  可得电压型 IIDG 故障前的内电势。配电网短路后, 在原节点阻抗矩阵中追加 IIDG 正负序阻抗, 形成新的  $n \times n$  阶正负节点阻抗矩阵  $Z^1$  和  $Z^2$ , 可得配电网正常运行时各节点电压为

$$\dot{U}_{(0)} = Z^1 \dot{I}_{(0)} = Z^1 [\dot{I}_{s1}, \dot{I}_{2(0)}, \dots, \dot{I}_{m+1(0)}, 0, \dots, 0]^T, \quad (8)$$

其中  $\dot{I}_{i(0)} = \dot{E}_{gi(0)} / Z_{gi}$  为第  $i$  台电压型 IIDG 正序诺顿电路的等值电流。当配电网节点  $f$  发生不对称故障时, 以 a 相经阻抗  $z_f$  短路接地为例, 由于第 1 个迭代步长中  $\dot{E}_{gi(1)} = \dot{E}_{gi(0)}$ , 此时节点电压正常分量与故障前配电网节点电压相等  $\dot{U}_{o(1)} = \dot{U}_{(0)}$ , 则第 1 个步长的故障电流量为

$$\dot{I}_{f(1)}^1 = \dot{I}_{f(1)}^2 = \frac{\dot{U}_{f(0)}^1 + \dot{U}_{f(0)}^2}{Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2 + z_f}. \quad (9)$$

根据故障分析叠加原理, 计算正负序故障分量网络中各节点电压为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{(1)}^1 &= [Z_{1f}^1, \dots, Z_{if}^1, \dots, Z_{nf}^1]^T (-\dot{I}_{f(1)}^1), \\ \Delta \dot{U}_{(1)}^2 &= [Z_{1f}^2, \dots, Z_{if}^2, \dots, Z_{nf}^2]^T (-\dot{I}_{f(1)}^2). \end{aligned} \quad (10)$$

配电网正常运行时三相对称, 第 1 个迭代步长中网络无负序电压正常分量, 故障后各节点电压序分量为  $\dot{U}_{(1)}^1 = \dot{U}_{o(1)} + \Delta \dot{U}_{(1)}^1$  和  $\dot{U}_{(1)}^2 = \Delta \dot{U}_{(1)}^2$ , 则配电网中第  $i$  台电压型 IIDG 故障峰值电流的正负序分量为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{gi(1)}^2 &= \frac{\dot{E}_{gi(1)}^2 - \dot{U}_{i(1)}^2}{Z_{gi}^2} = \frac{0 - \dot{U}_{i(1)}^2}{Z_{gi}^2}, \\ \dot{I}_{gi(1)}^1 &= \frac{\dot{E}_{gi(1)}^1 - \dot{U}_{i(1)}^1}{Z_{gi}^1} = \frac{0 - \dot{U}_{i(1)}^1}{Z_{gi}^1}, \quad i = 2, \dots, m+1. \end{aligned} \quad (11)$$

### 2.2 电压型 IIDG 内电势序分量迭代计算

设图 1 功率外环 PI 传递函数为  $G_{pi}^P(s) = k_p^P + k_i^P/s$  和  $G_{pi}^Q(s) = k_p^Q + k_i^Q/s$ , 且第  $k-1$  个步长内 IIDG 电势的相角和幅值为  $\delta_{i(k-1)}$  和  $E_{mi(k-1)}$ 。由于功率偏差  $dP_g$  和  $dQ_g$  经 PI 调节后更新内电势相角和幅值, 则第  $i$  台 IIDG 内电势的相角和幅值递推公式为

$$\begin{aligned} \delta_{i(k)} &= \delta_{i(k-1)} + k_p^P (dP_{gi(k)} - dP_{gi(k-1)}) + \frac{k_i^P \Delta t}{2} \cdot (dP_{gi(k)} + dP_{gi(k-1)}), \quad i = 2, \dots, m+1, \\ E_{mi(k)} &= E_{mi(k-1)} + k_p^Q (dQ_{gi(k)} - dQ_{gi(k-1)}) + \frac{k_i^Q \Delta t}{2} \cdot (dQ_{gi(k)} + dQ_{gi(k-1)}), \quad i = 2, \dots, m+1, \end{aligned} \quad (12)$$

三相电压经对称分解得到电压型 IIDG 在正负序网电势  $\dot{E}_{gi(k)}^1 = E_{mi(k)}^1 e^{j\delta_{i(k)}^1}$  和  $\dot{E}_{gi(k)}^2 = E_{mi(k)}^2 e^{j\delta_{i(k)}^2}$ , 研究中电

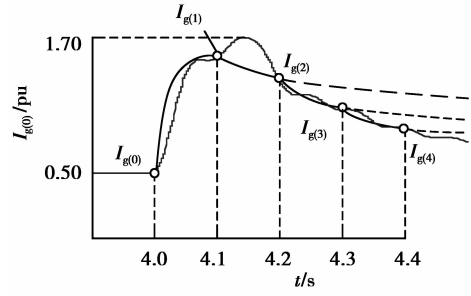


图 5 电压型 IIDG 故障电流变化规律

Fig.5 Fault current of voltage controlled IIDG

压型 IIDG 采用对称控制<sup>[5,12]</sup>,其三相电压仅包含正序分量即  $\dot{E}_{gi(k)}^1 = E_{mi(k)} e^{j\delta_{i(k)}}$  和  $\dot{E}_{gi(k)}^2 = 0$ 。

### 2.3 IIDG 故障电流序分量迭代计算

为计算电压型 IIDG 的故障稳态电流,若配电网故障时 IIDG 的内电势恒为  $\dot{E}_{gi(k)}^1$ ,根据式(8)-(10)可得故障网络节点稳态电压的正常分量  $\dot{U}_{o(k)s}^1$  和故障分量  $\Delta \dot{U}_{i(k)s}^1, \Delta \dot{U}_{i(k)s}^2$ 。由叠加原理计算第  $k$  个步长的故障稳态电压  $\dot{U}_{i(k)s}^1 = \dot{U}_{o(k)s}^1 + \Delta \dot{U}_{i(k)s}^1$  和  $\dot{U}_{i(k)s}^2 = \Delta \dot{U}_{i(k)s}^2$ ,从而得第  $k$  个步长中电压型 IIDG 的故障稳态电流和功率计算公式为

$$\dot{i}_{gi(k)s}^1 = \frac{\dot{E}_{gi(k)}^1 - \dot{U}_{i(k)s}^1}{Z_{gi}^1}, \dot{i}_{gi(k)s}^2 = \frac{0 - \dot{U}_{i(k)s}^2}{Z_{gi}^2},$$

$$\begin{bmatrix} P_{gi(k)s}^1 \\ P_{gi(k)s}^2 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} Q_{gi(k)s}^1 \\ Q_{gi(k)s}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{i(k)s}^1 (\dot{i}_{gi(k)s}^1)^* \\ \dot{U}_{i(k)s}^2 (\dot{i}_{gi(k)s}^2)^* \end{bmatrix}, i = 2, \dots, m+1. \quad (13)$$

由于第  $k-1$  次迭代过程的 IIDG 故障电流有效值  $I_{gi(k-1)}$ ,即为第  $k$  次迭代的故障电流起始值,则第  $k$  个步长 IIDG 的故障电流序分量有效值为

$$I_{gi(k)}^1 = I_{gi(k)s}^1 + (I_{gi(k-1)}^1 - I_{gi(k)s}^1) e^{-\Delta t / \tau_{gi}^1},$$

$$I_{gi(k)}^2 = I_{gi(k)s}^2 + (I_{gi(k-1)}^2 - I_{gi(k)s}^2) e^{-\Delta t / \tau_{gi}^2}, i = 2, \dots, m+1. \quad (14)$$

式中: $\tau_{gi}^1$  和  $\tau_{gi}^2$  分别为第  $i$  台 IIDG 的正序和负序电流衰减时间常数,第  $k$  个步长 IIDG 在正负序网的输出功率为

$$\begin{bmatrix} P_{gi(k)}^1 \\ Q_{gi(k)}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{gi(k)s}^1 \\ Q_{gi(k)s}^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{gi(k-1)}^1 - P_{gi(k)s}^1 \\ Q_{gi(k-1)}^1 - Q_{gi(k)s}^1 \end{bmatrix} e^{-\Delta t / \tau_{gi}^1}, \quad (15a)$$

$$\begin{bmatrix} P_{gi(k)}^2 \\ Q_{gi(k)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{gi(k)s}^2 \\ Q_{gi(k)s}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{gi(k-1)}^2 - P_{gi(k)s}^2 \\ Q_{gi(k-1)}^2 - Q_{gi(k)s}^2 \end{bmatrix} e^{-\Delta t / \tau_{gi}^2}, i = 2, \dots, m+1. \quad (15b)$$

### 2.4 含电压型 IIDG 配电网故障电流的计算步骤

利用电压型 IIDG 序分量模型与正负序网络的交互关系,可计算配电网发生不同类型故障时 IIDG 的故障电流响应。设配电网  $f$  节点发生短路故障,则电压型 IIDG 故障电流的计算步骤如下:

1) 形成原始配网正序和负序网络的  $n$  ( $n$  阶节点阻抗矩阵  $Z_0^1$  和  $Z_0^2$ ,其中节点编号:节点 1 为主网电源点,节点 2 至  $m+1$  为电压型 IIDG 接入节点。

2) 设  $m$  台电压型 IIDG 功率设定值为  $P_{gi}^* + jQ_{gi}^* = \dot{U}_{gi(0)} \dot{I}_{gi(0)}^*$ ,联立  $\dot{U}_{gi(0)} = \dot{U}_{ioc} + Z_{ii} \dot{I}_{gi(0)}$  和式(4),解方程得到  $m$  台电压型 IIDG 在输出功率为设定值时的故障前机端电压  $\dot{U}_{gi(0)}$  和电流  $\dot{I}_{gi(0)}$ ,计算  $m$  台电压型 IIDG 的故障前内电势  $\dot{E}_{gi(0)}$ 。

3) 利用  $Z_0^1$  和  $Z_0^2$  中节点 2 至  $m+1$  的自阻抗和电压型 IIDG 序分量模型的正负序阻抗,计算  $m$  台 IIDG 的正负序电流衰减时间常数  $\tau_{gi}^1$  和  $\tau_{gi}^2$ 。

4) 追加  $m$  台 IIDG 正负序阻抗,形成  $n \times n$  阶阻抗矩阵  $Z^1$  和  $Z^2$ ,根据式(8)-(11)计算第 1 个步长 IIDG 故障峰值电流  $\dot{I}_{gi(1)}^1$  和  $\dot{I}_{gi(1)}^2$ ,及其平均功率  $P_{gi(1)}$  和  $Q_{gi(1)}$ ,令  $\dot{I}_{gi(k-1)}^1 = \dot{I}_{gi(1)}^1, \dot{I}_{gi(k-1)}^2 = \dot{I}_{gi(1)}^2, P_{gi(k-1)} = P_{gi(1)}, Q_{gi(k-1)} = Q_{gi(1)}$ ,进入 5)。

5) 正常运行时  $m$  台电压型 IIDG 的  $PI$  环节初始功率偏差  $dP_{i(0)} = 0$  和  $dQ_{i(0)} = 0$ ,计算第  $k-1$  个步长 IIDG 功率偏差  $dP_{gi(k-1)}$  和  $dQ_{gi(k-1)}$ ,由式(12)计算第  $k$  个步长 IIDG 电势相角  $\delta_{i(k)}$  和幅值  $E_{mi(k)}$ ,进而得到 IIDG 正负序网等值电势  $\dot{E}_{gi(k)}^1$  和  $\dot{E}_{gi(k)}^2$ 。

6) 将  $m$  台 IIDG 的  $\dot{E}_{gi(k)}^1$  和  $\dot{E}_{gi(k)}^2$  代入故障正负序网,由叠加原理得到 IIDG 的稳态故障电压  $\dot{U}_{i(k)s}^1$  和

$\dot{U}_{i(k)s}^2$ , 利用式(13)计算 IIDG 故障稳态电流  $\dot{I}_{gi(k)s}^1$  和  $\dot{I}_{gi(k)s}^2$ , 以及故障稳态功率  $P_{gi(k)s}^1$ 、 $P_{gi(k)s}^2$ 、 $Q_{gi(k)s}^1$  和  $Q_{gi(k)s}^2$ 。

7) 根据式(14)得到  $m$  台 IIDG 故障电流  $\dot{I}_{gi(k)}^1$  和  $\dot{I}_{gi(k)}^2$ , 通过式(15)计算第  $k$  个步长 IIDG 的正负序网功率  $P_{gi(k)}^1$ 、 $P_{gi(k)}^2$ 、 $Q_{gi(k)}^1$  和  $Q_{gi(k)}^2$ , 并由式(2)和式(3)合成 IIDG 三相平均功率  $P_{gi(k)}$  和  $Q_{gi(k)}$ 。

8) 若迭代次数  $k \leq N$  (计算 IIDG 故障后 10 个周波的电流响应  $N=20$ ), 则  $k=k+1$  后转到 5); 否则故障分析结束, 输出  $m$  台 IIDG 故障电流有效值。

### 3 算例研究

采用提出的算法计算含单台 IIDG 配电网和 2 台 IIDG 的配电网算例发生对称和不对称类型故障时, 电压型 IIDG 的故障电流和内电势响应, 比较提出的含 IIDG 配电网短路计算对称分量算法与 PSCAD/EMTDC 软件中电压型 IIDG 电磁暂态模型的动态仿真结果。

#### 3.1 算例 1

如图 6 所示的含单台 IIDG 的辐射型配电网, 图中 1.5 MW 电压型 IIDG 的额定电压为 0.62 kV, 经升压变压器接入 10 kV 配网的节点 3。针对图 6 单机配电馈线结构, 分别研究节点 8 发生三相短路和两相短路的两种情况, 并分析配电网不对称故障时电压型 IIDG 的故障电流序分量变化规律。其中, 各 IIDG 参数如表 1 所示, 系统参数如表 2 所示。

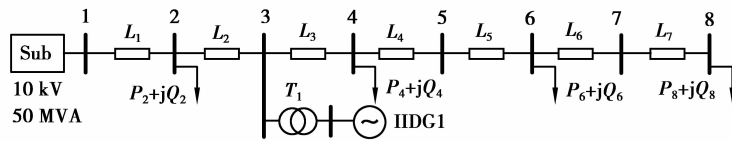


图 6 单台电压型 IIDG 接入配电网结构图

Fig.6 Single line diagram of distribution feeder integrating with a voltage controlled IIDG

表 1 IIDG 参数

Table 1 IIDG parameters

参数	$P_{g1}^*$ /MW	$Q_{g1}^*$ /MVar	$P_{g2}^*$ /MW	$Q_{g2}^*$ /MVar	$C_f$ /pu	$f$ /Hz	$S_n$ /kVA	$U_n$ /kV	$U_{den}$ /V	$Z_f$ /pu	$k_p^P, k_i^P$	$k_p^Q, k_i^Q$
数值	0.7	0	0.6	0.3	0.18	50	1.5	0.62	1 500	0.15+ j0.003	0.4、45.5	0.4、40

表 2 系统参数

Table 2 System parameters

项目	变电站				线路			变压器			负荷			
	$U_n$ /kV	$E_s$ /pu	$X/R$	$S_{短路}$ /MVA	$Z_L$ /(( $\Omega \cdot km^{-1}$ ))	$L_{1,3,5}$ /km	$L_{2,4,6,7}$ /km	$S_n$ /kVA	$V_I/V_{II}$ ( $Y_n/\Delta$ )/kV	$X_T$ /pu	$S_2$ /MVA	$S_4$ /MVA	$S_6$ /MVA	$S_8$ /MVA
数值	10	0.973	10	50	0.12+j0.3	0.2	0.3	2	0.62/10.5	0.05+ j0.01	0.38+ j0.14	0.48+ j0.28	0.65+ j0.17	0.95+ j0

图 7 和 8 分别为节点 8 三相短路时 IIDG1 故障电流和内电势, 馈线末端故障后电压型 IIDG 内电势基本不变而端电压大幅跌落, 使得 IIDG1 出现故障峰值电流。图 7 中 IIDG 电流在第 1 个步长的衰减速度最快 (称为次暂态故障电流), 之后 10 个周波内的电流缓慢衰减至稳态值 (称为暂态故障电流)。

采用本文算法得到的 IIDG1 故障电流峰值  $A$  和故障电流稳态值  $B$  分别为 1.72 pu 和 0.95 pu, 动态仿真

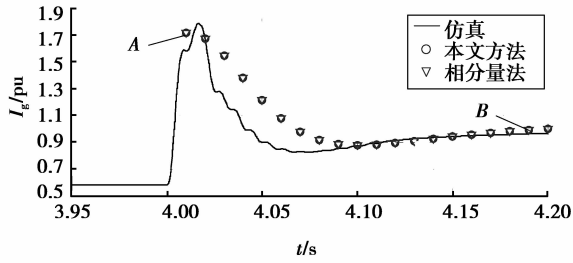


图 7 节点 8 三相短路时 IIDG1 故障电流变化  
Fig.7 Fault current of IIDG1 when three-phase short-circuit occurs at Bus 8

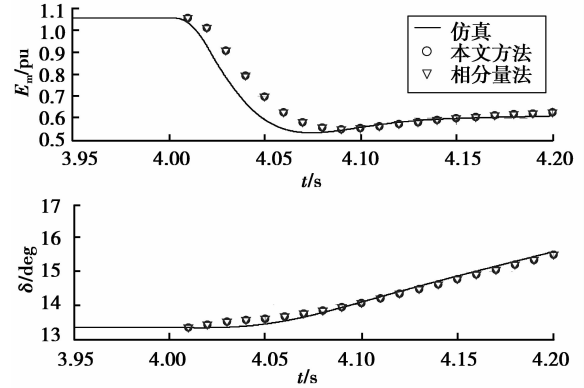


图 8 节点 8 三相短路时 IIDG1 内电势变化  
Fig.8 Electric potential of IIDG1 when three-phase short-circuit occurs at Bus 8

的结果为 1.78pu 和 0.96pu,即本文提出的算法与图 7 所示的仿真结果基本吻合。由图 7 和图 8 还可知配电网对称故障时,提出的对称分量迭代算法与文献[5]相分量法的计算结果相同。

图 9 是节点 8 发生 bc 两相短路时 IIDG1 的故障电流正负序分量,图中正序电流  $I_g^1$  的暂态过程变化较快,故障发生 5 个周波后即衰减至稳态值。两相短路时 IIDG1 的负序和正序峰值电流不同,负序电流  $I_g^2$  达到峰值后衰减至稳态值,其在每个步长内亦近似呈指数规律变化。利用本文的含电压型 IIDG 配网短路电流对称分量算法,可计算 IIDG1 的正序电流峰值  $A_1$  和稳态值  $B_1$  为 0.88 pu 和 0.50 pu,其负序电流峰值  $A_2$  和稳态值  $B_2$  为 0.75 pu 和 0.66 pu。

从图 9 可见,笔者提出的电压型 IIDG 短路电流对称分量法的计算结果仅负序峰值电流  $A_2$  低于仿真结果 0.06 pu,其余故障序电流特征值与动态仿真结果一致。图 10 为两相短路时故障点的负序电流,由于故障过程中 IIDG 控制的动态调节,故障点负序电流在故障瞬间也出现峰值电流  $A_{f2}$  为 24.8 pu,但相对于 IIDG 故障电流,故障点峰值电流  $A_{f2}$  和稳态电流  $B_{f2}$  相差较小。

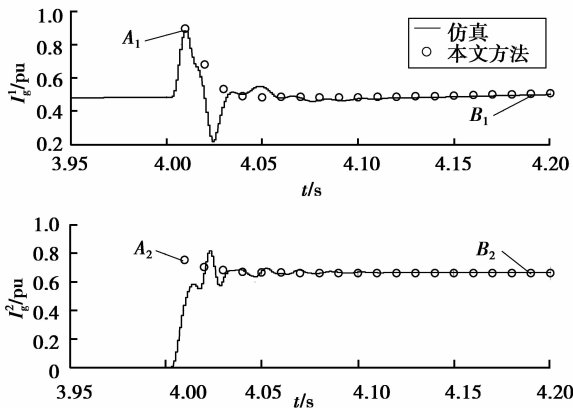


图 9 节点 8 两相短路时 IIDG1 故障序电流变化  
Fig.9 Fault current sequence component of IIDG1 when two-phase short-circuit occurs at Bus 8

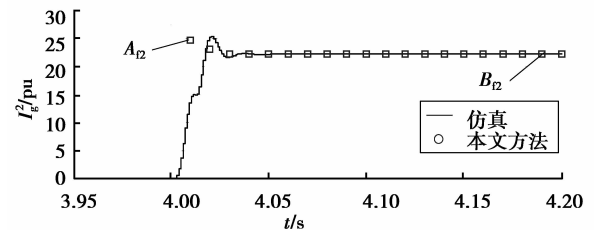


图 10 节点 8 两相短路时故障点负序电流变化  
Fig.10 Fault current negative sequence component of fault point when two-phase short-circuit occurs at Bus 8

对称分量和相分量算法计算 IIDG1 输出的 b 相故障电流和内电势如图 11 和图 12 所示。两种方法的故障电流稳态值相同,对于故障峰值电流,采用对称分量方法的结果为 1.51pu,更接近动态仿真结果(文献[5]算法电流峰值为 1.46 pu,动态仿真电流峰值为 1.61 pu)。由于文献[5]算法迭代中不能得到相电流的相位,无法计算不对称故障时的故障电流正负序分量,而本文提出的算法能够准确计算含电压型 IIDG 配电网的故障序电流以及各相故障电流。



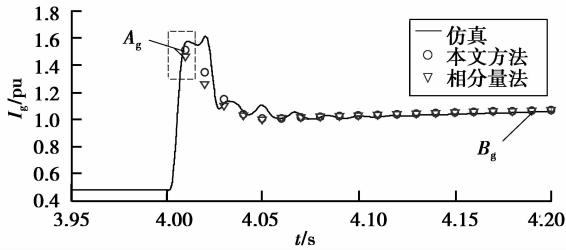


图 11 节点 8 两相短路时 IIDG1 故障 b 相电流变化  
Fig.11 b phase fault current of IIDG1 when two-phase short-circuit occurs at Bus 8

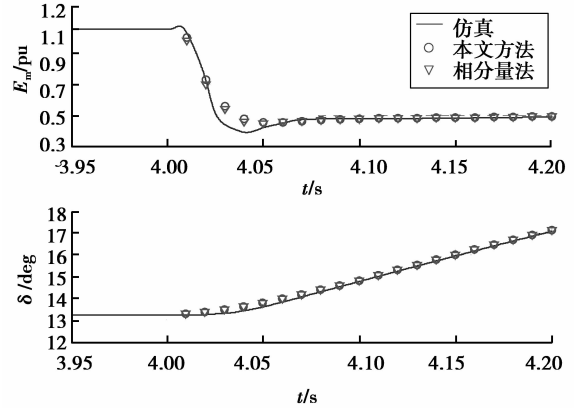


图 12 节点 8 两相短路时 IIDG1 内电势变化  
Fig.12 Electric potential of IIDG1 when two-phase short-circuit occurs at Bus 8

3.2 算例 2

算例 2 的配电网结构如图 13 所示,在算例 1 的基础上增加一台电压型 IIDG 接入配电网的节点 5(参数见表 1、表 2)。当节点 8 发生 bc 两相短路时,图 14 和图 15 分别为 IIDG1 和 IIDG2 的正负序故障电流响应,可见对于含多 IIDGs 配电网,本文算法能够准确计算电压型 IIDG 故障正负序电流。

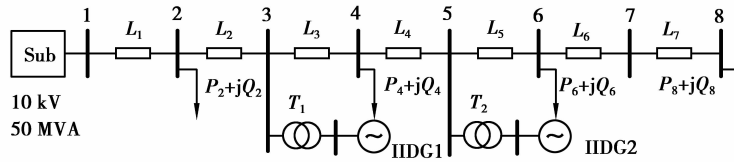


图 13 两台电压型 IIDGs 接入配电网结构图

Fig.13 Single line diagram of distribution feeder integrating with two voltage controlled IIDGs

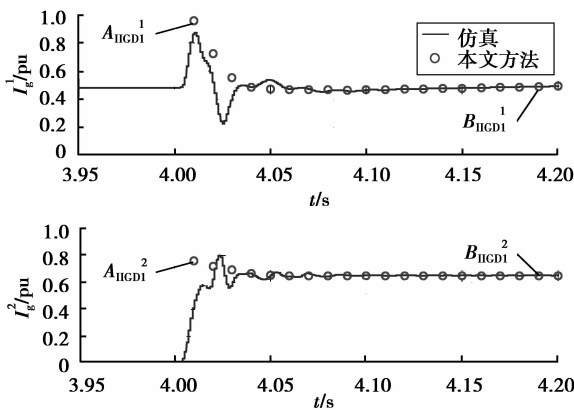


图 14 两机算例中两相短路时 IIDG1 故障序电流变化  
Fig.14 Fault current sequence component of IIDG1 when two-phase short-circuit occurs in two IIDGs system

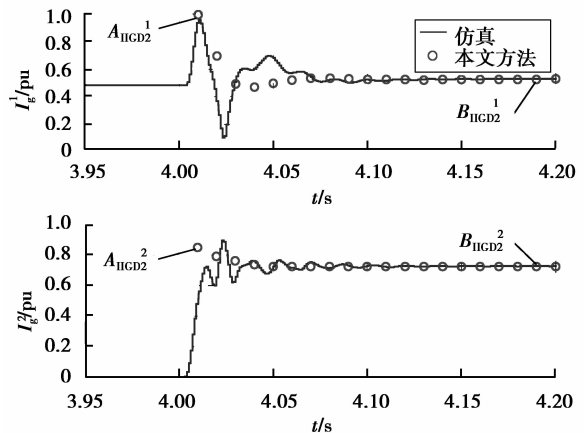


图 15 两机算例中两相短路时 IIDG2 故障序电流变化  
Fig.15 Fault current sequence component of IIDG2 when two-phase short-circuit occurs in two IIDGs system

两机算例中馈线末端故障时,由于 IIDG2 位于 IIDG1 的下游,与故障点的电气距离更近,两相短路后其故障正负序电流大于 IIDG1 的故障电流。当故障点逐渐向馈线上游移动时,IIDG2 的故障电流将首先出现超限,此时 IIDG2 自身保护动作,配电网中将仅有 IIDG1 向电网注入故障电流。

## 4 结 语

笔者研究了配电网不对称故障时电压型 IIDG 的短路计算序分量模型,分析含电压型 IIDG 配电网短路计算的原理,提出了计算电压型 IIDG 故障电流序分量的对称分量算法。通过 2 个测试算例,用 PSCAD/EMTDC 软件对算法进行验证,所提出方法能准确计算配电网发生不同类型故障时电压型 IIDG 的故障电流序分量和相分量,估计电压型 IIDG 故障正负序电流在暂态过程中的变化趋势。所提出的方法可以加入到传统配电网的短路电流计算中,同时也可计及 IIDG 的限流约束。

### 参考文献:

- [1] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):132-133.  
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 132-133. (in Chinese)
- [2] Nimpitiwan N, Heydt G T, Ayyanar R, et al. Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 634-641.
- [3] 谢昊,卢继平.重合闸在分布式发电条件下的应用分析[J].重庆大学学报(自然科学版),2007,30(2):30-33.  
XIE Hao, LU Jiping. Utility analysis of reclosing in the distributed generation system[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, 30(2): 30-33. (in Chinese)
- [4] Yazdani A, Iravani R. Voltage-sourced converters in power systems[M]. New Jersey: John Wiley and Sons Press, 2010.
- [5] Baran M E, El-Markaby I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1757-1764.
- [6] Boutsika T N, Papathanassiou S A. Short-circuit calculations in networks with distributed generation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1181-1191.
- [7] Pan Y, Ren W, Ray S, et al. Impact of inverter interfaced distributed generation on overcurrent protection in distribution systems[C]//Power Engineering and Automation Conference. [S.l.]: IEEE, 2011: 371-376.
- [8] Jin Q, Li Y L. A study on steady characters of inverter interfaced distributed generation in three phase symmetrical system[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Power System Technology. [S.l.]: IEEE, 2010: 1-7.
- [9] 王守相,江兴月,王成山.含分布式电源的配电网故障分析叠加法[J].电力系统自动化,2008,32(5):38-42.  
WANG Shouxiang, JIANG Xingyue, WANG Chengshan. A superposition method of fault analysis for distribution systems containing distributed generations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 38-42. (in Chinese).
- [10] Plet C A, Graovac M, Green T C, et al. Fault response of grid-connected inverter dominated networks[C]//Power and Energy Society General Meeting, Minnesota, United States. [S.l.]: IEEE, 2010: 1-8.
- [11] Brucoli M. Fault behaviour and fault detection in islanded inverter-only microgrids[J]. Applied Physics Letters, 2008, 54(14): 1353-1355.
- [12] Kamh M Z, Iravani R. Unbalanced model and power-flow analysis of microgrids and active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2851-2858.
- [13] 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.
- [14] Baran M E, Mahajan N R. Overcurrent protection on voltage-source-converter-based multiterminal dc distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 406-412.
- [15] 周念成,王强钢,王鹏,等.含多感应发电机配电网的暂态稳定研究[J].中国电机工程学报,2011,31(16):40-47.  
ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, WANG Peng, et al. Transient stability of distribution network with induction generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 40-47. (in Chinese)
- [16] Plet C A, Green T C. Fault response of inverter interfaced distributed generators in grid-connected applications[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 106(1): 21-28.