

基于聚合电流的高比例分布式电源接入配电网 短路故障计算与分析

赵舒心^{1,2}, 肖仕武¹, 梁伟宸³

(1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 中航光电科技股份有限公司, 河南 洛阳 471003; 3. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045)

摘要: 分布式电源数量多、接入点分散, 故障期间输出特性取决于其低电压穿越控制策略, 导致推导配电网短路故障电流、电压解析表达式困难, 也难以解释故障电流电压变化机理和变化规律。针对这些难点问题, 提出了一种基于聚合电流的高比例分布式电源接入配电网短路故障计算与分析方法。首先, 该方法根据分布式电源并网位置对测量支路短路电流的不同影响, 将分布式电源按照位置分类并聚合, 利用道路矩阵形成节点阻抗矩阵进而确定聚合位置。然后, 推导基于聚合短路电流的短路故障电流、电压计算的解析表达式。进一步, 根据聚合短路电流和解析表达式从机理上分析分布式电源接入对故障电流、电压的影响, 探讨故障电流、电压随聚合短路电流的变化规律。最后, 通过算例验证了所提故障计算与分析方法的正确性。

关键词: 分布式电源; 故障分析方法; 聚合短路电流; 故障规律

Calculation and analysis of short-circuit fault of distribution network with high proportion distributed generators based on aggregated current

ZHAO Shuxin^{1,2}, XIAO Shiwu¹, LIANG Weichen³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. AVIC Jonhon Optron Technology Co., Ltd., Luoyang 471003, China; 3. State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: The large number and dispersed access points of distributed generators (DGs), and the output characteristics during faults depending on their low voltage ride through control strategy, make it difficult to derive analytical expressions of fault current and voltage in the distribution network, as well as explain the mechanism and law of fault current and voltage changes. In order to solve these problems, a short-circuit fault calculation and analysis method of distribution network with high proportion DGs based on aggregated current is proposed. First, DGs are classified and aggregated based on their locations, considering their different influence on the branch short-circuit current. A nodal impedance matrix is then formed by a path matrix to determine the aggregation location. Next, the analytical expressions of short-circuit fault current and voltage calculation based on the aggregated short-circuit current are derived. Furthermore, based on the aggregated short-circuit current and analytical expressions, the impact of DGs connection on fault current and voltage is analyzed from a mechanistic perspective, exploring the variation patterns of fault current and voltage with respect to aggregated short-circuit current. Finally, case studies verify the correctness of the proposed fault calculation and analysis method.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1600200).

Key words: distributed generation; fault analysis method; aggregated short-circuit current; fault law

0 引言

我国大力发展可再生能源, 构建以新能源为主

体的电力系统^[1-3]。随着接入配电网的分布式新能源占比不断增高, 电网故障特性将主要由新能源电源决定^[4-7]。由于新能源数量多、接入点分散, 输出故障电流受其低电压穿越控制策略影响, 给配电网短路电流计算和故障分析带来了困难。配电网故障分析与故障特征规律是研究继电保护与控制技术的基

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1600200);
国网冀北公司项目资助(52018K230001)

础, 研究新能源接入配电网的故障分析方法和故障特征规律具有重要的理论和工程意义^[8-9]。

大部分分布式新能源电源通过逆变器接入配电网, 这类新能源被称为逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generation, IIDG)。当前 IIDG 接入配电网的故障分析大多将分布式电源等值为正序压控电流源, 由于低电压穿越控制策略的非线性, 需要迭代计算。建立及求解电路方程的方法主要有 3 种: 1) 结合故障复合序网列写回路电流方程, 建立电压电流关系式, 进而求解故障电流电压^[10-12]; 另外两种方法都是基于节点电压方程进行分析, 分别是 2) 针对故障网络直接采用对称分量法分析^[13-14], 建立考虑故障边界条件的正负零序网络节点电压方程, 迭代求解故障电流电压; 3) 将故障网络分解为故障分量网络和正常网络, 再采用对称分量法求解^[15-16]。此外, 还有少数文献基于分布式电源的相分量等值模型和电网相分量节点导纳矩阵进行故障分析, 但由于三相之间有耦合关系, 该方法计算复杂^[17]。随着分布式电源渗透率的增加和电网规模的扩大, 常用的全局不动点迭代法计算时间长、收敛性差甚至不收敛。针对该问题, 当前主要应对方法是将电网分区, 采用局部迭代以提高运算速度^[18-19], 或者采用收敛性更好的新型迭代算法^[20]。

目前有关分布式电源接入电网下故障计算的研究大都采用数值迭代法, 虽然计算准确, 但是无法从机理上解释电网电流、电压的变化的原因和规律, 只有少数研究分析了分布式电源接入下配电网的故障规律^[21-22]。文献[21]通过仿真总结了 IIDG 接入位置和容量对电网电压和短路电流的影响, 但是无法从机理上解释该规律; 文献[22]通过短路计算结果数据总结了短路电流随系统参数和 IIDG 容量变化的规律, 但是针对相间短路的规律分析缺乏理论支撑。因此, 从机理上分析影响短路电流、电压的因素以及总结短路电流、电压的规律特性是当前亟待解决的重要理论问题。

在当前的研究中, 高比例分布式新能源电源接入电网的故障分析仍存在以下难点问题:

1) 大量的分布式电源接入电网, 接入位置分散, 难以用解析表达式建立多分布式电源的短路电流计算模型;

2) 从机理上解释多分布式电源接入下短路电流、电压变化机理和故障特征规律困难。

针对这些问题, 本文首先将 IIDG 等值为正序压控电流源, 将所有 IIDG 按照其与测量电流支路的位置关系聚合为两个 IIDG, 并结合道路矩阵确定聚合位置, 简化故障分析网络; 进一步提出聚合短

路电流的定义, 将其用于故障电流、电压的计算, 推导含 IIDG 电网的故障电流、电压的解析表达式; 在此基础上, 解释 IIDG 影响故障电流、电压的机理, 采用聚合短路电流指标量化评价 IIDG 接入对配电网的影响, 探讨故障电流、电压的变化规律。最后, 在含分布式电源的配电网中验证所提的聚合方法和应用聚合短路电流进行故障计算与分析的正确性, 验证并展示故障电流、电压随聚合短路电流变化的规律。

1 高比例分布式电源接入配电网聚合方法

1.1 通用聚合方法和聚合短路电流

在国标规定的低穿控制策略^[23-24]下, IIDG 等效为正序压控电流源, 其输出的正序电流与机端并网点正序电压相位差在 $-90^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 范围内变化, 即

$$\begin{cases} \dot{I}_{DG} = k_N I_N \angle \theta(\dot{U}^+) + 0^{\circ} & U_{pcc} > 0.9 \\ \dot{I}_{DG} = k_f I_N \angle \theta(\dot{U}^+) + \theta & 0.2 \leq U_{pcc} \leq 0.9 \\ \dot{I}_{DG} = k_{lim} I_N \angle \theta(\dot{U}^+) - 90^{\circ} & U_{pcc} < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{I}_{DG} 为 IIDG 的输出短路电流; I_N 为 IIDG 额定电流; $\theta(\dot{U}^+)$ 为并网点正序电压的相位; $\theta = \arctg(-i_q/i_d)$ 为正序电流与正序电压之间的相位差角; k_N 为故障前 IIDG 输出电流标幺值; k_f 为故障期间 IIDG 输出电流标幺值, 其在 k_N 与限流系数 k_{lim} 之间; U_{pcc} 为公共连接点电压。

图 1 是 IEEE 33 节点配电网结构图, 33 节点中含有 22 个 IIDG, 配电网通过节点 1 接入外部交流电网。本文将继电保护的电流测量装置所在的支路确定为电流测量支路, 以下简称为测量支路, 图 1 的测量支路为节点 5 和 6 的连接支路。

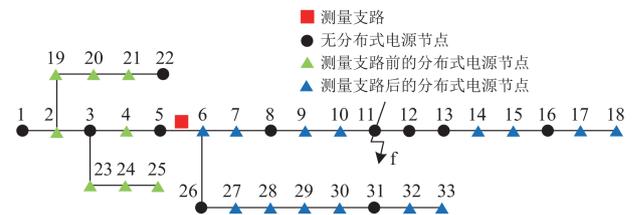


图 1 IEEE 33 节点配电网结构图

Fig. 1 IEEE 33-node distribution network diagram

当节点 11 发生相间短路故障时, 通过数值迭代计算^[20]得到各 IIDG 的输出短路电流, 由于每个 IIDG 并网点电压跌落程度的差异, 其输出的短路电流各不相同。分析 IIDG 对故障电流的影响机理时, 需要分析每个 IIDG 在电流支路的作用效果, 特别是当大量的 IIDG 分散接入电网时, 故障网络复杂,

故障分析困难。

当 f 处发生相间短路故障，此时 f 处接入负序网并呈现阻抗特性。求流过测量支路的故障正序电流时，由于 IIDG 接入位置不同，各 IIDG 对流过测量支路的正序电流的分流方向不同：支路前的 IIDG 提供的分流方向为正，即与外部交流电源系统提供的短路电流方向相同；支路后的 IIDG 提供的分流方向为负，即与外部交流电源系统提供的短路电流方向相反。在含高比例 IIDG 配电网的故障分析中，可以按照 IIDG 对测量支路短路电流的作用效果，对 IIDG 进行聚合。

通用的聚合方法是：将测量支路前、测量支路后且故障点前、故障点后的 IIDG 并网点分别当成一个端口，将同一个端口内的多个 IIDG 聚合成一个 IIDG，聚合 IIDG 的输出电流为聚合前各 IIDG 输出电流的相量和，并对端口内部的节点做变换：保留两端节点，消去其他节点，增加一个聚合 IIDG 的并网点 J 。

将分布式电源按上述方法聚合后，图 1 的多分布式电源接入的配电网等值为图 2 所示的 3 个分布式电源接入的配电网， J_1 、 J_{21} 、 J_{22} 分别为测量支路前的 IIDG、测量支路后且故障点前的 IIDG 和故障点后的 IIDG 的聚合位置。

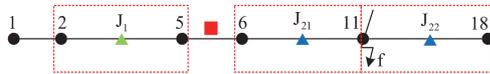


图 2 含 3 个聚合分布式电源的配电网

Fig. 2 Distribution network with three aggregated IIDGs

故障分析时，一般忽略负荷支路，认为故障点后的 IIDG 并网点均为故障点 f 。此时，测量支路后且故障点前的端口与故障点后的端口可以视为一个端口，即测量支路后的端口。因此，可以将测量支路前、测量支路后的 IIDG 并网点分别当成一个端口进行聚合，把所有 IIDG 聚合为两个 IIDG，一个接入测量支路前，代替该支路前所有的 IIDG；一个接入测量支路后，代替该支路后所有 IIDG，将含多 IIDG 的故障网络简化为含两个 IIDG 的故障网络。聚合后的等值网络如图 3 所示， J_1 、 J_2 分别为测量支路前、测量支路后 IIDG 的聚合位置。

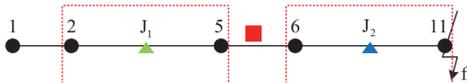


图 3 含 2 个聚合分布式电源的配电网

Fig. 3 Distribution network with two aggregated IIDGs

定义聚合后 IIDG 的输出短路电流为聚合短路电流，测量支路前的聚合短路电流 $\dot{I}_{DG,J1}$ 为测量支路

前所有 IIDG 输出短路电流的相量和；测量支路后的聚合短路电流 $\dot{I}_{DG,J2}$ 为测量支路后所有 IIDG 输出短路电流的相量和。

1.2 基于道路矩阵确定聚合位置

设定聚合短路电流为范围内所有 IIDG 输出短路电流的相量和，在高比例分布式电源聚合的过程中，确定聚合位置是极为关键的一步。聚合原则是聚合端口对外部电网的电流不变，聚合前、后端口的两侧端点电压不变，根据聚合原则确定聚合位置。因此，首先需要确定节点阻抗矩阵。通过节点导纳矩阵求逆得到的节点阻抗矩阵表达式复杂，难以推导出聚合位置的解析表达式，而基于道路的网络进行分析，利用道路-支路矩阵和回路-支路关联矩阵可以直接形成节点阻抗矩阵的表达式，进而推导出聚合位置。

节点的道路是指节点沿树到根所经过的路径上的支路的集合，可用道路-支路关联矩阵(简称道路矩阵) T 描述。假定根节点是外部交流电源接入点，道路的方向是从电源点指向各个节点，道路的方向与各树枝支路的方向相同。如果支路 j 在道路 i 上，则 T 的第 i 行第 j 列的元素为 1，反之为 0。

根据网络的拓扑约束和支路特性约束，得到网络的节点电压方程^[25]为

$$\dot{U}_N = Tz_b(T^T - B^T Z_L^{-1} Bz_b T^T) \dot{I}_N \quad (2)$$

式中： \dot{I}_N 为节点注入电流矩阵； \dot{U}_N 为节点电压矩阵； B 为回路-支路关联矩阵； z_b 为支路阻抗矩阵； Z_L 为回路阻抗矩阵， $Z_L = Bz_b B^T$ 。

有环路的网络的节点阻抗矩阵为

$$Z = Tz_b T^T - Tz_b B^T Z_L^{-1} Bz_b T^T \quad (3)$$

对于没有回路的辐射型网络，节点阻抗矩阵为

$$Z = Tz_b T^T \quad (4)$$

确定聚合位置时，需要针对聚合端口内部的网络分析，并计及端口外部的交流电源和分布式电源对端口内部网络的影响，本文将聚合端口外部的交流电源和聚合端口外部的分布式电源对端口内部网络的作用效果用注入电流等效，端口左端的注入电流设为 \dot{I}_{d1} ，端口右端的注入电流设为 \dot{I}_{d2} 。

确定聚合位置的步骤如下：

1) 假定根节点是外部交流电源接入点，根节点的编号最小设为 0，支路的编号取两端节点编号的较大者，根据聚合端口内部网络列写支路阻抗矩阵、道路矩阵和回路矩阵，通过式(3)或式(4)计算得到节点阻抗矩阵；

2) 列写节点电流方程，得到聚合端口的两端节点电压的表达式；

3) 根据聚合前、后端口的两端节点电压不变, 确定等式关系, 该等式是关于聚合位置 J 的函数方程, 解方程确定聚合位置。

具体地, 针对图 4 所示的端口说明利用道路矩阵确定节点阻抗和聚合位置 J 的方法。

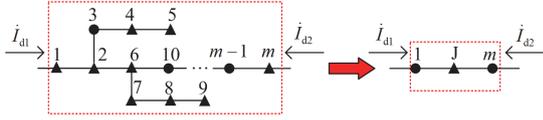


图 4 分布式电源的聚合示意图

Fig. 4 Aggregation diagram of IIDG

聚合前端口网络的道路矩阵 T 为

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & m \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ m \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

式中: 矩阵左边数字为节点(道路)编号; 上方数字为支路编号。

聚合前端口网络的支路阻抗矩阵为

$$z_b = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & m \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ m \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_x & & & & \\ & Z_{2-1} & & & \\ & & Z_{3-2} & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & Z_{m-(m-1)} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

式中: Z_x 为节点 1 和根节点之间的支路阻抗; $Z_{m-(m-1)}$ 表示节点 m 到节点 $m-1$ 之间的支路阻抗。

聚合前端口内部节点阻抗矩阵的表达式为

$$Z_1 = T z_b T^T = \begin{bmatrix} Z_x & Z_x & Z_x & \cdots & Z_x \\ Z_x & Z_{2-1} + Z_x & Z_{2-1} + Z_x & \cdots & Z_{2-1} + Z_x \\ Z_x & Z_{2-1} + Z_x & Z_{3-1} + Z_x & \cdots & Z_{2-1} + Z_x \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_x & Z_{2-1} + Z_x & Z_{2-1} + Z_x & \cdots & Z_{m-1} + Z_x \end{bmatrix} \quad (7)$$

同理, 聚合后端口内部的节点阻抗矩阵为

$$Z_2 = \begin{bmatrix} Z_x & Z_x & Z_x \\ Z_x & Z_{J-1} + Z_x & Z_{J-1} + Z_x \\ Z_x & Z_{J-1} + Z_x & Z_{m-1} + Z_x \end{bmatrix} \quad (8)$$

对聚合前、后端口内部节点, 分别列写节点电流方程为

$$[\dot{U}_1 \ \dot{U}_2 \ \cdots \ \dot{U}_m]^T = Z_1 [i_1 \ i_2 \ \cdots \ i_m]^T \quad (9)$$

$$[\dot{U}_1 \ \dot{U}_J \ U_m]^T = Z_2 [i_{d1} \ i_{DG,J} \ i_{d2}]^T \quad (10)$$

式中: $i_1 = i_{DG1} + i_{d1}$, $i_m = i_{DGm} + i_{d2}$, i_{DGm} 为接入节点 m 的 IIDG 的输出电流, $i_j = i_{DGj}$, $j = 2, 3, \dots, m-1$ 。

聚合前、后端口的两侧端点 1 和 m 的电压应保持不变, 结合式(9)和式(10), 得到辐射型配电网中 IIDG 的聚合点 J 到端点 1 的阻抗 Z_{J-1} , 如式(11)所示。

$$Z_{J-1} = \frac{\sum_{i=1}^m (i_{DG,i} Z_{p_i-1})}{i_{DG,J}} \quad (11)$$

式中: $i_{DG,i}$ 为接入节点 i 上的 IIDG 的输出短路电流, 若该节点为无 IIDG 接入节点, 则对应的电流为 0; p_i 为第 i 个 IIDG 在主故障线路上的并网节点。

对于辐射型配电网, 可以直接通过式(11)确定聚合位置; 如果考虑负荷阻抗或配电网中含有环网, 则通过式(3)确定节点阻抗矩阵, 进而根据聚合前、后端口电压相等确定聚合位置。

从理论上讲, 利用端口等值和道路矩阵将多个 IIDG 聚合为两个 IIDG 的方法是严谨的, 无论高比例配电路中的 IIDG 采用何种低电压穿越控制策略、并网节点电压跌落到何种程度, 都可以采用端口等值的思想将所有 IIDG 聚合为两个 IIDG。

聚合短路电流采用 IIDG 输出电流的相量和, 不仅计及了 IIDG 控制策略和并网位置不同导致的各 IIDG 输出电流相位的差异, 还考虑了两类 IIDG 对配电网测量支路短路电流不同的影响。因此, 采用聚合短路电流不仅可以实现 IIDG 接入高比例配电网下短路电流、电压的精确计算, 还可以用于评价 IIDG 接入对短路电流、电压的影响及分析故障特征规律。

2 基于聚合短路电流的短路故障计算

2.1 三相短路故障计算

将 IIDG 聚合后, 不仅可以按照聚合后的等效网络求得支路电流, 还可以求得聚合端口外其他节点的电压。

设配电网中共有 n 个 IIDG, 前 h 个 IIDG 的并网节点在测量支路前, 其他 $(n-h)$ 个 IIDG 在测量支路后。并网节点在测量支路后的 IIDG 中, 前 s 个 IIDG 在故障点前, $(n-h-s)$ 个 IIDG 在故障点后。发生三相短路故障时, IIDG 聚合后等效网络如图 5 所示。

流过测量支路的电流可以通过叠加原理分为两部分: 一是外部交流电源单独作用时的电流, IIDG 等效为开路; 二是聚合 IIDG 单独作用时的电流, 外部系统等效为短路。将二者叠加得到流过测量支路的三相短路电流, 表达式如式(12)所示。

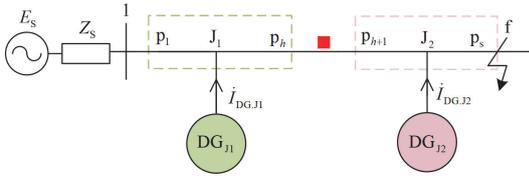


图 5 三相短路时的等效网络

Fig. 5 Equivalent network of three-phase short circuit

$$\dot{i} = \dot{i}_{s0} + K_{J1} \dot{i}_{DG,J1} - K_{J2} \dot{i}_{DG,J2} \quad (12)$$

式中： \dot{i}_{s0} 为外部交流电源单独作用、IIDG 不接入时流过测量支路的三相短路电流； $\dot{i}_{DG,J1}$ 、 $\dot{i}_{DG,J2}$ 是聚合短路电流，分别为测量支路前所有 IIDG 输出短路电流的相量和、测量支路后所有 IIDG 输出短路电流的相量和； K_{J1} 、 K_{J2} 分别为三相短路时位于测量支路前、后聚合 IIDG 向测量支路的分流系数。

$$K_{J1} = \frac{Z_s + Z_{1-J1}}{Z_\Sigma}, K_{J2} = \frac{Z_{J2-f}}{Z_\Sigma} \quad (13)$$

式中： Z_s 为外部电源等值阻抗； Z_{1-J1} 为节点 1 到节点 J_1 的阻抗； Z_{J2-f} 为节点 J_2 到故障点 f 的阻抗； Z_Σ 为总阻抗。

设 y 为 p_h 和 p_{h+1} 之间的某个节点，则节点 y 的三相短路电压的表达式为

$$\dot{U}_y = \dot{i}_{s0} Z_{y-f} + K_{J1} \dot{i}_{DG,J1} Z_{y-f} + K_{J2} \dot{i}_{DG,J2} (Z_s + Z_{1-y}) \quad (14)$$

通过式(12)、式(14)，测量支路前的 IIDG 对三相短路电流起到助增作用，测量支路后的 IIDG 对三相短路电流起到削弱作用；所有 IIDG 都对三相短路节点电压起到支撑作用。

2.2 相间短路故障计算

相间短路时，IIDG 作为正序电流源包含在正序网络中，在负序网络中作断开处理，IIDG 按照其并网位置与正序测量支路的相对位置关系进行聚合，相间短路时要考虑到故障点后的 IIDG，并认为其并网点为故障点，聚合后的复合序网如图 6 所示。

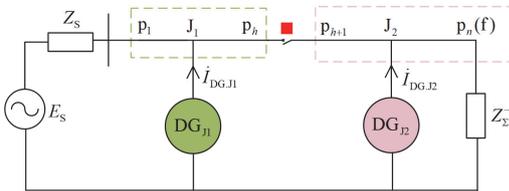


图 6 相间短路时的等效复合序网

Fig. 6 Equivalent composite sequence network of two-phase short circuit

发生 BC 相间短路时，测量支路的正序、负序电流 i^+ 、 i^- 的表达式分别如式(15)和式(16)所示。

$$\dot{i}^+ = \dot{i}_{s0}^+ + K_{J11} \dot{i}_{DG,J1} - K_{J21} \dot{i}_{DG,J2} \quad (15)$$

$$\dot{i}^- = \dot{i}_{s0}^- - K_{J11} \dot{i}_{DG,J1} - K_{J22} \dot{i}_{DG,J2} \quad (16)$$

式中： $K_{J11} = \frac{Z_s + Z_{1-J1}}{2Z_\Sigma}$ ， $K_{J21} = \frac{Z_\Sigma + Z_{J2-f}}{2Z_\Sigma}$ ， $K_{J22} = \frac{Z_s + Z_{1-J2}}{2Z_\Sigma}$ ； \dot{i}_{s0}^+ 、 \dot{i}_{s0}^- 分别为外部交流电源单独作用、

IIDG 不接入时流过的正序、负序相间短路电流；令正、负序网的总阻抗相等，即 $Z_\Sigma^+ = Z_\Sigma^-$ ； K_{J11} 为相间短路时位于测量支路前的聚合 IIDG 在该支路的分流系数，正序和负序分流系数相等； K_{J21} 、 K_{J22} 分别为相间短路时位于测量支路后的聚合 IIDG 在该支路的正序、负序分流系数，且满足： $K_{J21} + K_{J22} = 1$ 。

根据对称分量法，推导得到测量支路相电流的解析表达式为

$$\dot{i}_A = \dot{i}^+ + \dot{i}^- = -\dot{i}_{DG,J2} \quad (17)$$

$$\dot{i}_B = -j\sqrt{3} \left\{ \dot{i}_{s0}^+ + K_{J11} \dot{i}_{DG,J1} + \left[j\frac{1}{2\sqrt{3}} - \left(K_{J21} - \frac{1}{2} \right) \right] \dot{i}_{DG,J2} \right\} \quad (18)$$

$$\dot{i}_C = j\sqrt{3} \left\{ \dot{i}_{s0}^+ + K_{J11} \dot{i}_{DG,J1} - \left[j\frac{1}{2\sqrt{3}} + \left(K_{J21} - \frac{1}{2} \right) \right] \dot{i}_{DG,J2} \right\} \quad (19)$$

节点 y 的正序、负序电压的表达式分别为

$$\dot{U}_y^+ = (Z_\Sigma^- + Z_{y-f}) \left(\dot{i}_{s0}^+ + K_{J11} \dot{i}_{DG,J1} + \frac{Z_s + Z_{1-y}}{Z_\Sigma^- + Z_{y-f}} K_{J21} \dot{i}_{DG,J2} \right) \quad (20)$$

$$\dot{U}_y^- = (Z_s + Z_{1-y}) (\dot{i}_{s0}^- + K_{J11} \dot{i}_{DG,J1} + K_{J22} \dot{i}_{DG,J2}) \quad (21)$$

同理，由正序电压、负序电压分量合成得到节点 y 的非故障相电压 $\dot{U}_{y,A}$ 和故障相电压 $\dot{U}_{y,B}$ 、 $\dot{U}_{y,C}$ 的表达式分别为

$$\dot{U}_{y,A} = 2Z_\Sigma^- \left(\dot{i}_{s0}^+ + K_{J11} \dot{i}_{DG,J1} + \frac{Z_s + Z_{1-y}}{2Z_\Sigma^-} \dot{i}_{DG,J2} \right) \quad (22)$$

$$\dot{U}_{y,B} = - \left(Z_\Sigma^- + j\sqrt{3}Z_{y-f} \right) \left\{ \dot{i}_{s0}^+ + K_{J11} \dot{i}_{DG,J1} + \frac{Z_s + Z_{1-y}}{Z_\Sigma^- + j\sqrt{3}Z_{y-f}} \times \left[\frac{1}{2} + j\sqrt{3} \left(K_{J21} - \frac{1}{2} \right) \right] \dot{i}_{DG,J2} \right\} \quad (23)$$

$$\dot{U}_{y,C} = - \left(Z_\Sigma^- - j\sqrt{3}Z_{y-f} \right) \left\{ \dot{i}_{s0}^+ + K_{J11} \dot{i}_{DG,J1} + \frac{Z_s + Z_{1-y}}{Z_\Sigma^- - j\sqrt{3}Z_{y-f}} \times \left[\frac{1}{2} - j\sqrt{3} \left(K_{J21} - \frac{1}{2} \right) \right] \dot{i}_{DG,J2} \right\} \quad (24)$$

由式(15)一式(24)，测量支路前、后的 IIDG 分

别对相间短路正序电流起到助增和削弱作用；测量支路前后的 IIDG 均对相间短路负序电流起到助增作用，对相间短路时的节点电压起到助增作用。

因此，对 IIDG 聚合能够更加直观地反映不同位置的 IIDG 对电流、电压的作用效果，采用聚合短路电流能够量化分析 IIDG 对电流、电压的影响。

3 基于聚合短路电流的分布式电源接入对故障电流电压的影响机理和故障规律分析

IIDG 接入对故障电流、电压的具体影响取决于有无 IIDG 接入下故障电流或电压的变化量值，该值与聚合短路电流密切相关。因此，可以用聚合短路电流评价 IIDG 接入对故障电流和电压的影响。

测量支路电流和节点电压都由 3 部分组成：外部交流电源、聚合短路电流 $I_{DG,J1}$ 和 $I_{DG,J2}$ 分别单独作用下的电流和电压。电流、电压随聚合短路电流的变化规律关键在于这 3 部分的大小和相位关系。

3.1 分布式电源对故障电流的影响机理和故障规律分析

由于 IIDG 对三相短路与相间短路的正序电流电压影响机理基本一致，下面结合式(15)一式(24)和相量图分析 BC 相间短路时 IIDG 对短路电流、电压的影响机理和故障规律。假设电压跌落严重、 $I_{DG,J1} = I_{DG,J2}$ 、聚合短路电流的相位均为 -90° 、 I_{s0}^+ 的相位为 -50° ，以下相量图均在该条件下分析，其他情况分析方法相同。

与无 IIDG 接入相比， $I_{DG,J1}$ 、 $I_{DG,J2}$ 分别使正序电流增大和减小，当二者共同作用时，正序电流增大还是减小取决于两类聚合短路电流和分流系数的相对大小和相位，如图 7(a)所示。负序电流分析同理， $I_{DG,J1}$ 、 $I_{DG,J2}$ 单独作用和共同作用均使负序电流增大，如图 7(b)所示。相电流由正、负序电流合成，由于 IIDG 接入使得正序电流增大或减小、负序电流增大，且正、负序电流间的相位关系发生较大变化，对比无 IIDG 电网，含 IIDG 电网的故障相电流可能出现均增大、均减小、一相增大另一相减小这 3 种情况，还会产生非故障相电流，且非故障

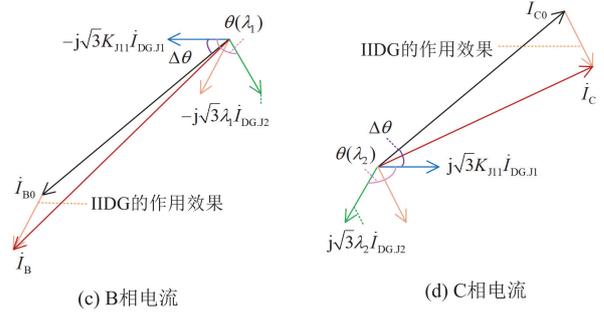
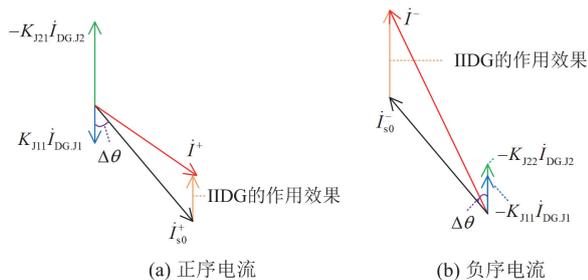


图 7 聚合短路电流影响短路电流的机理

Fig. 7 Mechanism of the influence of aggregated short-circuit current on short circuit current

相电流在特殊情况下可能大于故障相电流。因此，在评判电流保护适用性时，要同时考虑到故障相与非故障相电流的大小。

IIDG 影响故障相电流的机理也可直接通过故障相电流的解析表达式分析。设 $\lambda_1 = j\frac{1}{2\sqrt{3}} - \left(K_{J21} - \frac{1}{2}\right)$ ，

$\lambda_2 = -j\frac{1}{2\sqrt{3}} - \left(K_{J21} - \frac{1}{2}\right)$ 。故障相电流的表达式变形为式(25)、式(26)。图 7(c)和图 7(d)为根据解析表达式绘制的 $\theta(\lambda_1) = 120^\circ$ 时 IIDG 影响故障相电流的机理图。当前条件下，IIDG 接入使得故障 B 相电流增大、C 相电流减小，但是如果 λ_1 、 λ_2 和聚合短路电流变化，还会出现两相均增大和两相均减小的情况。

$$i_B = i_{B0} - j\sqrt{3}K_{J11}I_{DG,J1} - j\sqrt{3}\lambda_1 I_{DG,J2} \quad (25)$$

$$i_C = i_{C0} + j\sqrt{3}K_{J11}I_{DG,J1} + j\sqrt{3}\lambda_2 I_{DG,J2} \quad (26)$$

由相量图和式(15)可知，正序电流随 $I_{DG,J1}$ 变化的规律与相量 $I_{s0}^+ - K_{J21}I_{DG,J2}$ 和 $K_{J11}I_{DG,J1}$ 夹角的补角有关。若补角为锐角，则正序电流随 $I_{DG,J1}$ 增大而先减小再增大，否则随 $I_{DG,J1}$ 增大而增大。正序电流随 $I_{DG,J2}$ 变化规律的分析方法同上。因此，当 $I_{DG,J2}$ 不变时，正序电流随 $I_{DG,J1}$ 增大而增大或先减小再增大(当 $I_{DG,J2}$ 较大时)；当 $I_{DG,J1}$ 不变， $I_{DG,J2}$ 增大时，正序电流先减小再增大。

同理，分析得到故障相电流的变化规律：故障相电流随 $I_{DG,J1}$ 增大而增大或先减小再增大(当 $I_{DG,J2}$ 很大时)，随 $I_{DG,J2}$ 增大而增大或先减小再增大，具体规律取决于 $\lambda_1 I_{DG,J2}$ 、 $\lambda_2 I_{DG,J2}$ 的相位。

由式(16)、式(17)可知，负序电流的大小随 $I_{DG,J1}$ 、 $I_{DG,J2}$ 增大而增大，非故障相电流仅与电流测量支路后的 IIDG 的输出电流有关，仅随 $I_{DG,J2}$ 增大而增大。

3.2 分布式电源对故障电压的影响机理和故障规律分析

由图 8 可知, $I_{DG,J1}$ 和 $I_{DG,J2}$ 对节点正、负序电压均起到助增作用。IIDG 接入使正、负序电压均增大且二者间的相位关系与无 IIDG 相比变化很小, 所以 IIDG 接入在支撑故障相电压的同时, 也抬升了非故障相电压。当 IIDG 不接入时, 非故障相电压一般较高, 接近额定电压。因此, IIDG 接入配电网容易导致非故障相电压越限。

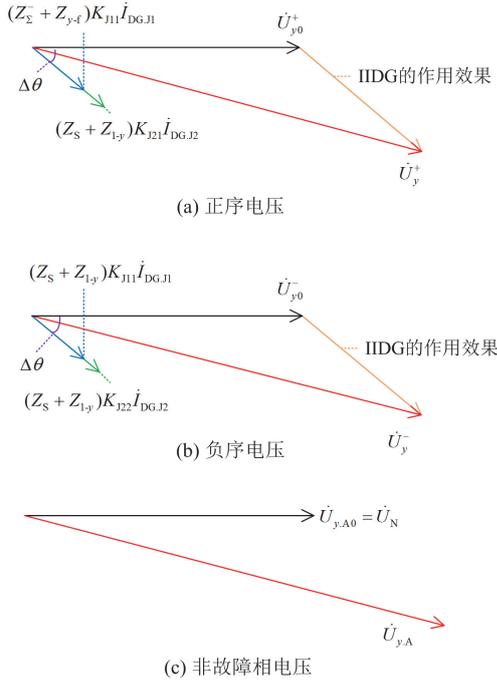


图 8 聚合短路电流影响短路电压的机理

Fig. 8 Mechanism of the influence of aggregated short-circuit current on short-circuit voltage

由式(20)~式(24)以及相量图可知, IIDG 接入电网各节点的正、负序及相电压均随 $I_{DG,J1}$ 、 $I_{DG,J2}$ 的增大而增大。

电压不平衡度(voltage unbalance factor, VUF)用于描述电力系统中三相不平衡的程度, 是量化电压不平衡度使用最广泛的指标, 定义为

$$\varepsilon_{VUF} = \frac{U^-}{U^+} \times 100\% \quad (27)$$

式中: U^+ 为三相电压的正序分量方均根值; U^- 为三相电压的负序分量方均根值。

根据式(20)、式(21), 与无 IIDG 电网相比, IIDG 接入下电网电压的不平衡度变大。

故障电流、电压不仅受到两类聚合短路电流相对大小的影响, 还受 I_{s0}^+ 和聚合短路电流的相位差即

$\Delta\theta$ 的影响, $\Delta\theta$ 与 IIDG 控制策略、并网点电压跌落程度、线路参数等因素有关。在国标控制策略下, IIDG 输出电流在以并网点正序电压相位为参考下的 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 范围内变化, 那么 $\Delta\theta$ 的取值范围为 $\theta(I_{s0}^+) - \theta(U^+) \sim \theta(I_{s0}^+) - \theta(U^+) + 90^\circ$ 。当 $\Delta\theta = 0^\circ$, 即 IIDG 的聚合短路电流与外部交流电源单独作用下相间短路正序电流的相位一致时, IIDG 对正序、负序及相电压的支撑效果达到最大。

综上分析, 结合解析表达式和相量图, 基于聚合短路电流既能够实现 IIDG 接入对故障电流、电压影响的机理分析和量化评价, 又能分析故障电流、电压随聚合短路电流变化的规律。随着 IIDG 容量的增大, 聚合短路电流会增大, IIDG 对故障电流电压的影响增大, 甚至大于外部交流电源的影响, 配电网的故障特性将主要由 IIDG 决定。

4 算例验证

本节验证了所提聚合方法和采用聚合短路电流进行故障计算的可行性和准确性, 并绘制了电流、电压、电压不平衡度随聚合短路电流变化的曲面图, 展示了故障特征规律。

图 9 为某实际 IIDG 接入的 10 kV 配电网。其外部电源等值阻抗为 $Z_s = j4 \Omega$, 线路参数为 $(0.27 + j0.39) \Omega/\text{km}$, 各段线路长度已在图中标注(单位为 km)。

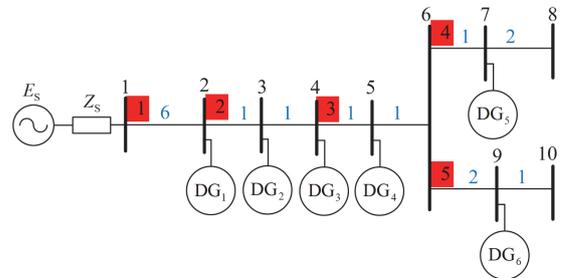


图 9 多分布式电源接入的配电网

Fig. 9 A distribution network with multiple IIDGs

4.1 基于聚合短路电流的故障电流电压计算验证

取 IIDG1—IIDG6 的容量分别为 2 MW、1 MW、2 MW、1 MW、2 MW、1 MW, 令母线 6 发生 BC 相间短路, 对比验证提出的基于聚合短路电流的故障电流、电压计算方法的正确性。

假设 IIDG 低穿控制策略已知, 首先采用数值迭代的方法求出 IIDG 输出电流的大小和相位, 然后对 IIDG 聚合, 求出分流系数和聚合短路电流, 如表 1 所示, 将其代入故障电流电压的解析表达式求出短路电流和节点电压, 部分计算结果如表 2 所示。

表 1 相间短路时的分流系数和聚合短路电流

Table 1 Ratio of shunt coefficient and aggregated short-circuit current when two-phase short circuit occurs

	K_{J11}	K_{J21}	K_{J22}	$I_{DG,J1}/kA$	$I_{DG,J2}/kA$
测量支路 2	0.392∠4.54°	0.531∠-0.95°	0.469∠1.08°	0.132∠-102.24°	0.462∠-102.99°
测量支路 3	0.419∠3.16°	0.507∠-0.22°	0.493∠0.22°	0.330∠-102.65°	0.264∠-103.05°

表 2 相间短路时的支路电流和节点电压

Table 2 Branch current and node voltage when two-phase short circuit occurs

	I_2^*/kA	I_3^*/kA	$I_2^-, I_3^-/kA$	U_2^*/kV	U_3^*/kV	U_4^*/kV	U_4^-/kV
迭代计算	0.231∠-42.72°	0.371∠-70.27°	0.610∠96.19°	5.696∠-12.24°	3.993∠-8.15°	5.472∠-13.02°	4.540∠-10.69°
解析表达式计算	0.231∠-42.74°	0.371∠-70.27°	0.610∠96.18°	5.695∠-12.24°	3.994∠-8.15°	5.472∠-13.02°	4.540∠-10.69°

表 2 将利用上述解析表达式计算的结果和计算机迭代计算^[20]的结果进行了比较, 忽略舍入误差, 利用上述解析表达式计算的结果与计算机迭代结果完全一致, 证明本文所提的聚合方法和应用聚合短路电流进行故障计算的准确性。

针对图 1 所示 IEEE 33 节点配电网也进行计算

表 3 IEEE 33 节点配电网相间短路时的分流系数和聚合短路电流

Table 3 Ratio of shunt coefficient and aggregated short-circuit current when two-phase short circuit occurs in IEEE 33-node network

	K_{J11}	K_{J21}	K_{J22}	$I_{DG,J1}/kA$	$I_{DG,J2}/kA$
测量支路 1	0.074∠42.93°	0.760∠7.02°	0.263∠-20.72°	0.110∠1.42°	0.456∠-39.01°
测量支路 2	0.089∠28.77°	0.688∠6.88°	0.328∠-14.56°	0.242∠-0.41°	0.360∠-51.77°

表 4 IEEE 33 节点配电网相间短路时的支路电流和节点电压

Table 4 Branch current and node voltage when two-phase short circuit occurs in IEEE 33-node network

	I_1^+/kA	I_2^+/kA	$I_1^-, I_2^-/kA$	U_3^+/kV	U_3^-/kV	U_5^+/kV	U_5^-/kV
迭代计算	0.097∠-74.67°	0.186∠-32.00°	0.538∠134.93°	5.934∠1.33°	0.768∠20.70°	5.792∠1.54°	1.154∠6.52°
解析表达式计算	0.096∠-75.07°	0.184∠-31.87°	0.541∠135.09°	5.936∠1.33°	0.770∠20.82°	5.795∠1.54°	1.160∠6.65°

本文提出的故障计算方法在图 9 所示的实际配电网和 IEEE 33 节点配电网中得到了有效验证。

4.2 聚合短路电流变化情况下配电网故障规律验证

母线 6 发生 BC 相间短路时, 改变 IIDG1—IIDG6 的容量来改变 $I_{DG,J1}$ 、 $I_{DG,J2}$, 计算不同聚合短路电流下流过支路 2-3 的序、相电流, 节点 2 的序、相电压及电压不平衡度, 它们随聚合短路电流幅值变化的规律如图 10—图 15 所示, 该规律与理论分析结果一致。

图 10 是正序电流随聚合短路电流变化图。当 $I_{DG,J2}$ 较小时, 正序电流随 $I_{DG,J1}$ 增大而增大; 当 $I_{DG,J2}$ 较大时, 正序电流随 $I_{DG,J1}$ 增大而先减小后增大; 正序电流随 $I_{DG,J2}$ 增大而先减小后增大。

在图 11—图 13 中, 非故障相 A 的相电流随 $I_{DG,J2}$ 增大而增大, 不受 $I_{DG,J1}$ 影响; 故障相 B 的相电流总体上随两类聚合短路电流增大而增大; 故障相 C 的相电流随 $I_{DG,J1}$ 增大而增大, 随 $I_{DG,J2}$ 增大而减小。

验证, 测量支路 1 为节点 2 和 3 的连接支路, 测量支路 2 为节点 5 和 6 的连接支路, 各分布式电源的额定容量均设置为 0.5 MW, 令节点 11 发生 BC 相间短路故障, 计算得到的分流系数和聚合短路电流如表 3 所示, 对比结果如表 4 所示。

图 14 中, 非故障相 A 的相电压随两类聚合短路电流增大而增大, 如果不约束 IIDG 输出电流大小, 非故障相电压会越限。

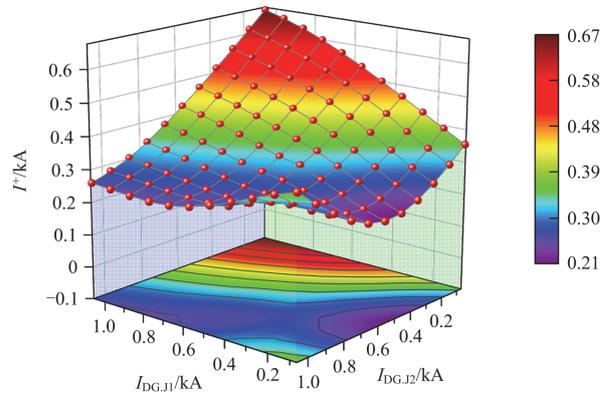


图 10 支路正序电流随聚合短路电流变化图

Fig. 10 Diagram of branch positive sequence current varying with aggregated short-circuit current

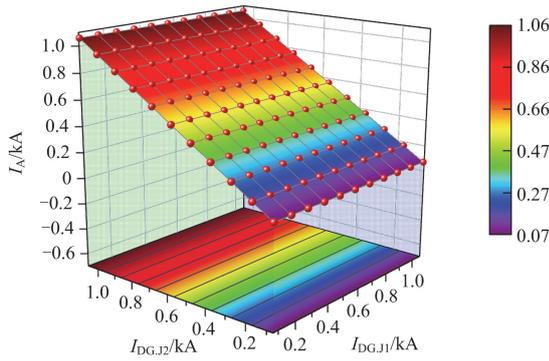


图 11 支路 A 相电流随聚合短路电流变化图

Fig. 11 Diagram of branch A phase current varying with aggregated short-circuit current

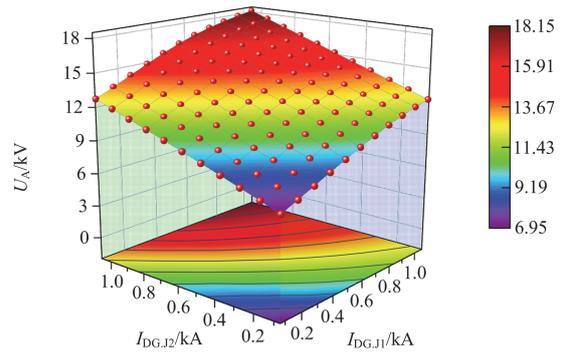


图 14 节点 2 的 A 相电压随聚合短路电流变化图

Fig. 14 Diagram of A phase voltage variation of bus 2 with aggregated short-circuit current

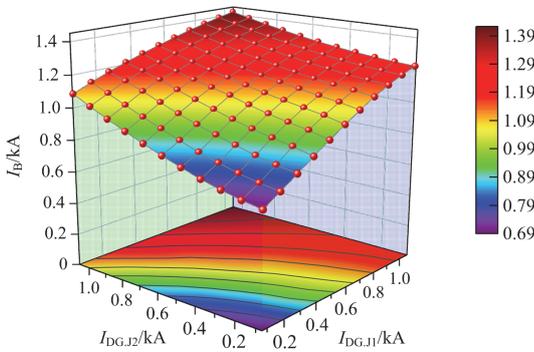


图 12 支路 B 相电流随聚合短路电流变化图

Fig. 12 Diagram of branch B phase current varying with aggregated short-circuit current

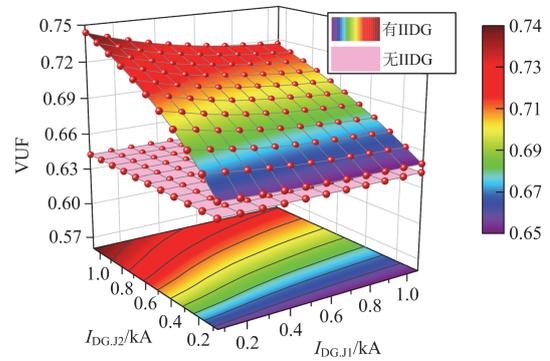


图 15 节点 2 的电压不平衡度随聚合短路电流变化图

Fig. 15 Diagram of VUF variation of bus 2 with aggregated short-circuit current

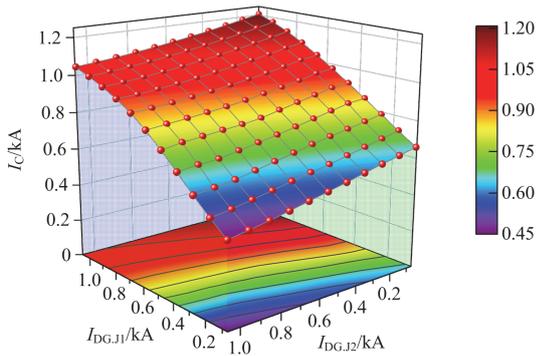


图 13 支路 C 相电流随聚合短路电流变化图

Fig. 13 Diagram of branch C phase current varying with aggregated short-circuit current

图 15 是电压不平衡度的变化规律。相比无 IIDG 电网, IIDG 接入会使得电压不平衡度增大, 而且当电压测点前后均有 IIDG 接入时, 电压不平衡度随 $I_{DG,J1}$ 增大而减小, 随 $I_{DG,J2}$ 增大而增大。

5 结论

针对高比例分布式电源接入配电网在短路故障计算与分析中的问题, 本文提出了分布式电源的聚合方法, 给出了两类聚合短路电流的定义, 并将其应用到故障电流电压的计算和影响分析中。

1) 本文根据分布式电源接入位置不同对正序短路电流影响不同的规律, 基于端口内的节点变换和道路矩阵提出了一种分布式电源的聚合方法, 既能简化故障分析的网络, 又直观地反映了 IIDG 对电流、电压的影响。

2) 本文所提出的聚合短路电流考虑了各 IIDG 输出电流相位差异和并网位置不同对故障电流、电压的影响, 基于该聚合短路电流能够根据解析表达式直接计算分布式电源接入下电网发生对称及不对称短路故障时各支路电流和各节点电压, 准确且效率高。

3) 基于聚合短路电流的故障分析方法不仅能从机理上解释和定量评价 IIDG 接入对故障电流电压

的影响, 还能从理论上分析含高比例分布式电源配电网故障支路电流和节点电压的变化规律, 为配电网继电保护与自动化故障处理技术的研究提供指导。

参考文献

- [1] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [2] 马伟明. 关于电工学科前沿技术发展的若干思考[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4627-4636.
MA Weiming. Thoughts on the development of frontier technology in electrical engineering[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4627-4636.
- [3] 程杉, 傅桐, 李洋洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1-12.
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [4] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [5] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 1-13.
- [6] 韦明杰, 王聪博, 余越, 等. 适用高比例分布式光伏接入的配电网多级保护优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 55-65.
WEI Mingjie, WANG Congbo, YU Yue, et al. Optimal configuration scheme of multi-staged protection in distribution network for integration of high proportion of distributed photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 55-65.
- [7] 张伟骏, 李智诚, 陈大玮, 等. 配网侧分布式储能系统的随机优化配置和选址方法[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 125-135.
ZHANG Weijun, LI Zhicheng, CHEN Dawei, et al. Stochastic optimal configuration and site selection method of grid-side distributed energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 125-135.
- [8] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [9] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 184-192.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Key issues of fault analysis on distribution system with high-density distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 184-192.
- [10] 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, 13.
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, 13.
- [11] 吴争荣, 王钢, 李海锋, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [12] 焦彦军, 梁宵, 蒋晨阳. 计及LVRT控制策略的光伏电站并网配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 92-99.
JIAO Yanjun, LIANG Xiao, JIANG Chenyang. Failure analysis method in distribution network considering LVRT control strategy of grid-connected photovoltaic station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 92-99.
- [13] 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.
- [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. 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.
- [15] 杨杉, 同向前, 刘健, 等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1977-1982.
YANG Shan, TONG Xiangqian, LIU Jian, et al. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1977-1982.
- [16] WANG Q, ZHOU N, YE L. Fault analysis for distribution networks with current-controlled three-phase inverter-interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1532-1542.
- [17] 刘慧媛, 肖繁, 张哲, 等. 新能源电源接入不平衡配电网的短路计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 177-186.
LIU Huiyuan, XIAO Fan, ZHANG Zhe, et al. Short-circuit calculation method for unbalanced distribution network with integration of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 177-186.
- [18] 贾科, 侯来运, 毕天姝, 等. 基于故障区域局部迭代的工程实用化新能源短路电流计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 151-158.
JIA Ke, HOU Laiyun, BI Tianshu, et al. Practical engineering calculation of short-circuit current for renewable energy based on local iteration of fault area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 151-158.
- [19] 吴成国, 肖仕武, 朱健. 含负序电压支撑分布式电源的电网分区短路电流计算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1159-1169.
WU Chengguo, XIAO Shiwu, ZHU Jian. Calculation method of power grid partition short-circuit current with negative sequence voltage supported distributed generation[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1159-1169.
- [20] 吴成国, 肖仕武. 高比例分布式电源接入电网短路电流的拟牛顿迭代计算方法[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4581-4591.
WU Chengguo, XIAO Shiwu. Quasi-newton iterative calculation method for short circuit current of high proportion distributed generation connected to power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4581-4591.
- [21] 彭生江, 陆军, 张中丹, 等. 光伏接入对电网的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 157-164.
PENG Shengjiang, LU Jun, ZHANG Zhongdan, et al. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 157-164.
- [22] 谭会征, 李永丽, 陈晓龙, 等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 31-37, 52.
TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31-37, 52.
- [23] 中国国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [25] 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: 2024-05-30; 修回日期: 2024-08-07

作者简介:

赵舒心(2000—), 女, 硕士, 研究方向为新能源电力系统故障分析与继电保护; E-mail: zhaoshuxin0202@126.com

肖仕武(1974—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统故障分析与继电保护、电力系统分析与控制; E-mail: xsw@ncepu.edu.cn

梁伟宸(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能配电网。E-mail: liangweichenheng@163.com

(编辑 石晋美)