

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231050

含换流器型分布式电源配电网的不对称短路电流计算方法

杨杉¹, 喻希¹, 罗朝旭¹, 张晓彤²

(1. 湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 西安交通大学电力设备
电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了满足配电网不对称短路计算的通用性要求, 针对换流器型分布式电源(inverter based distributed generation, IBDG)不对称短路特征的多样性, 研究含 IBDG 配电网的不对称短路电流计算方法。该方法从通用计算模型出发, 根据 IBDG 不对称短路的正负序电流控制原理及在不同控制目标下的短路电流输出特性, 结合低电压穿越和限流控制对 IBDG 输出不对称短路电流的具体要求, 建立一种通用的、适用于多种控制目标的 IBDG 不对称短路正负序等效模型。基于该模型建立含 IBDG 配电网通用的不对称短路等效电路和计算方程, 得到一种适用于多种 IBDG 控制目标的、配电网任意节点发生任意不对称短路的短路电流通用计算流程。最后, 在一个配电网算例中对所提计算方法进行验证, 结果表明了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 配电网; 不对称短路电流计算; 换流器型分布式电源; 控制原理; 通用计算

Asymmetric short-circuit current calculation of a distribution network with inverter-based distributed generation

YANG Shan¹, YU Xi¹, LUO Zhaoxu¹, ZHANG Xiaotong²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To meet the general requirements for asymmetric short-circuit calculation in distribution networks, a study is conducted on the calculation method with inverter-based distributed generation (IBDG), considering the diverse characteristics of asymmetrical short-circuits caused by IBDG. This method establishes a universal model that is applicable to the equivalent of IBDG asymmetric short-circuit positive and negative sequences with various control objectives. The establishment of this model is based on the principle of positive and negative sequence current control with IBDG asymmetric short-circuit and the short-circuit current output characteristics with different control objectives, as well as the specific requirements of low voltage ride-through and current limiting control for IBDG output asymmetric short-circuit current. Based on this model, a universal asymmetric short-circuit equivalent circuit and calculation equation are established, and a general calculation process for short-circuit current occurring at any node of the distribution network with any asymmetric short-circuit for multiple IBDG control objectives is obtained. Finally, the proposed method is verified in a distribution network example, and the results show that the proposed method is correct and effective.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207205).

Key words: distribution network; asymmetric short-circuit current calculation; inverter based distributed generation; control principle; general-purpose computation

0 引言

为满足“碳达峰”、“碳中和”的内在要求, 加

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207205); 湖南省教育厅科学研究项目资助(22C0308)

快构建服务于“双碳”的新型电力系统是做好“双碳”工作的重要保障。新型电力系统在实现“双碳”目标的过程中, 为确保可再生能源充分利用, 多采用“清洁低碳”和“灵活可控”的电源形式^[1-3]。因此, 以电力电子变换器为并网接口的换流器型分布式电源(inverter based distributed generation, IBDG)

已成为新型电力系统重要且主流的供电电源^[4-6]。

配电网作为新型电力系统的重要组成部分, 在 IBDG 的广泛参与之下, 对配电网短路电流的计算有更高的要求。一方面, 不对称短路计算的必要性在逐步增强。实际中配电网大多数短路属于不对称短路, 有必要分析不对称短路条件下配电网的运行情况, 并根据不对称短路电流具体数值指导配电网电气设备选型。另一方面, 不对称短路计算的正确性越发重要。由于 IBDG 数量和容量不断增加, 其短路电流输出会对配电网的不对称短路电流分布造成较大影响, 受影响后的实际短路电流需要得到正确的定量计算。因此, 不断拓展含 IBDG 的短路电流计算理论, 研究含 IBDG 配电网的不对称短路电流计算方法具有重要的现实意义。

目前已有一些研究成果对含 IBDG 配电网的不对称短路电流进行了计算。文献[7]基于 IBDG 在短路前后输出功率不变的假设进行短路建模。文献[8]研究的不对称短路电流计算方法仅适用于 IBDG 运行于 PV 控制模式, 忽略了 IBDG 常规 PQ 控制模式。文献[9]在计算不对称短路电流的过程中, 假设 IBDG 输出的有功功率维持在短路前水平, 而输出的无功功率与 IBDG 并网点电压相关。文献[10]基于配电网发生不对称短路时锁相环能快速、准确地锁定正序电压相位, 将 IBDG 处理为一个仅输出正序电流的恒定电流源。文献[11]在不对称短路计算过程中, 虽然只考虑 IBDG 输出的正序短路分量, 但已将 IBDG 处理为压控电流源。以上计算方法都存在 IBDG 不对称短路计算模型较为理想的缺点: 1) 仅以某一种控制目标建立功率模型或者电流模型, 对 IBDG 的不对称短路模型进行等效; 2) 均假设 IBDG 在不对称短路时采用对称控制方式, 所建模型仅包含正序分量。

在不对称短路时, IBDG 的控制策略会更加复杂, 在以消除输出功率波动分量为控制目标时, 负序电流会参与 IBDG 的控制调节, 并影响配电网的不对称短路电流分布^[12]。此时, 短路电流计算需要考虑到负序电流。文献[13-14]考虑到不对称短路发生时配电网电压跌落期间 IBDG 的主动负序电压支撑作用, 将 IBDG 提供的负序短路电流视为压控电流源, 并研究了相应的含负序电流注入的不对称短路电流计算方法。虽然这些方法考虑到 IBDG 可能存在负序电流输出的情况, 但计算过程的实用性较差, 无法满足 IBDG 运行于不同控制目标下配电网的不对称短路计算需求。

本文研究为配电网提供了一种通用的、计及 IBDG 负序电流输出的不对称短路电流计算方法。

一方面, 从等效模型的角度, 结合 IBDG 低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)^[15-16]和限流特性, 建立不同控制目标下 IBDG 的正负序短路电流通用等效模型。另一方面, 从计算方法的角度, 将 IBDG 不对称短路通用等效模型与配电网的通用等效电路结合, 形成通用的不对称短路电流计算流程。

本文从等效模型的建立出发, 根据 IBDG 在配电网发生不对称短路时控制目标的不同, 分析 IBDG 在不对称控制方式下的正负序电流输出原理, 并基于 IBDG 的 LVRT 和限流特性, 提出一种 IBDG 的不对称短路通用等效模型。基于所提模型的正负序输出特性, 建立含 IBDG 配电网的序分量通用等效电路, 并提出一种基于迭代法的不对称短路通用求解方法, 实现对任意短路类型、任意短路位置、任意控制目标的不对称短路电流通用计算。最后在一个 4 节点配电网算例中对所提方法进行了验证。

1 IBDG 的不对称短路模型

本文通过分析配电网不对称短路时 IBDG 的控制原理, 建立更为实际、通用的 IBDG 不对称短路等效模型。

通用模型建立需要考虑的因素有 3 点: 1) 为减少 IBDG 输出功率的波动, IBDG 会对负序电流进行控制^[17-19]; 2) 为确保配电网的稳定运行, IBDG 在不对称短路期间会进入 LVRT 控制^[20-22]; 3) 为避免 IBDG 换流器因过电流损坏, IBDG 会利用限流控制约束最大输出电流^[23]。

1.1 IBDG 的不对称短路控制原理

当发生不对称短路时, 配电网会存在负序分量, 并影响 IBDG 的控制。此时, IBDG 可以采用正负序 dq 旋转坐标系下的双电流控制方式。即将三相电压和电流的正、负序分量分别对应应在正、负序 dq 旋转坐标系下, 以实现 IBDG 并网电流正负序分量的单独控制^[24-26]。IBDG 在正负序同步旋转坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_d^+ = e_d^+ + Ri_d^+ + L \frac{di_d^+}{dt} - \omega Li_q^+ \\ u_q^+ = e_q^+ + Ri_q^+ + L \frac{di_q^+}{dt} + \omega Li_d^+ \\ u_d^- = e_d^- + Ri_d^- + L \frac{di_d^-}{dt} + \omega Li_q^- \\ u_q^- = e_q^- + Ri_q^- + L \frac{di_q^-}{dt} - \omega Li_d^- \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d^+ 、 e_d^+ 和 i_d^+ 分别为换流器交流侧端口输出电

压、并网点电压和并网电流在 d 轴方向上的分量, r 为“+”代表正序分量, r 为“-”代表负序分量; u_q^r 、 e_q^r 和 i_q^r 分别为换流器交流侧端口输出电压、并网点电压和并网电流在 q 轴方向上的分量; R 为等值电阻; L 为滤波电感; ω 为电网角频率。

基于正负序分量独立控制的 IBDG 输出的瞬时有功功率 P_g 和无功功率 Q_g 的表达式为

$$\begin{cases} P_g = P_{g0} + P_{gc2} \cos(2\omega t) + P_{gs2} \sin(2\omega t) \\ Q_g = Q_{g0} + Q_{gc2} \cos(2\omega t) + Q_{gs2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{g0} = \frac{3}{2}(e_d^+ i_d^+ + e_q^+ i_q^+ + e_d^- i_d^- + e_q^- i_q^-) \\ P_{gc2} = \frac{3}{2}(e_d^+ i_d^- + e_q^+ i_q^- + e_d^- i_d^+ + e_q^- i_q^+) \\ P_{gs2} = \frac{3}{2}(e_d^+ i_q^- - e_q^+ i_d^- - e_d^- i_q^+ + e_q^- i_d^+) \\ Q_{g0} = \frac{3}{2}(e_q^+ i_d^+ - e_d^+ i_q^+ + e_q^- i_d^- - e_d^- i_q^-) \\ Q_{gc2} = \frac{3}{2}(e_q^- i_d^+ - e_d^- i_q^+ + e_q^+ i_d^- - e_d^+ i_q^-) \\ Q_{gs2} = \frac{3}{2}(e_d^+ i_d^- + e_q^+ i_q^- - e_d^- i_d^+ + e_q^- i_q^+) \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{g0} 和 Q_{g0} 分别为 IBDG 输出有功功率和无功功率的参考值; P_{gc2} 和 P_{gs2} 分别为有功二倍频波动余弦和正弦分量幅值; Q_{gc2} 和 Q_{gs2} 分别为无功二倍频波动余弦和正弦分量幅值。

从式(1)一式(3)可以看出, 在电网电压不对称的情况下, 通过控制换流器并网电流在 d 轴和 q 轴方向上的正、负序分量, 就可以控制输出功率。换流器的不对称控制原理如图 1 所示。图中, i_d^{r*} 和 i_q^{r*} 分别是并网电流 d 轴和 q 轴方向上的正负序分量参考值。

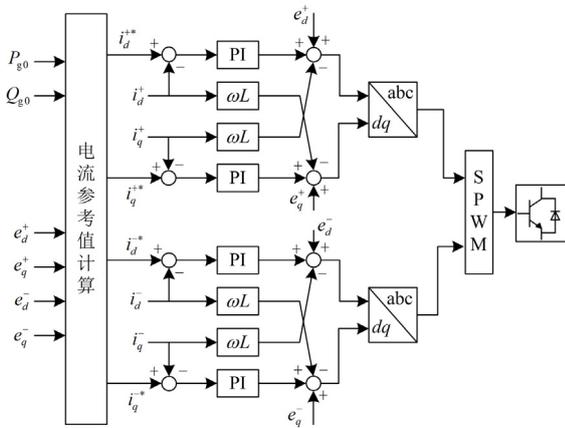


图 1 换流器的不对称控制原理图

Fig. 1 Asymmetric control principle diagram of inverter

1.2 IBDG 的不对称短路输出特性

利用锁相环将正、负序电压投影在 d 轴, 可知式(3)中, $e_d^+ = U^+$, $e_d^- = U^-$, $e_q^+ = 0$, $e_q^- = 0$ 。其中, U^+ 和 U^- 分别为电网电压正、负序分量的幅值。

由式(2)和式(3)可以看出, IBDG 基于不同的运行需求, 主要有 3 种控制目标^[22]。每种控制目标下, IBDG 并网的正、负序输出电流可根据式(3)计算。

第 1 种: 以输出对称的三相电流为目标。即 IBDG 不输出负序电流, IBDG 并网电流值为

$$\begin{cases} i_d^+ = \frac{2}{3} \frac{P_{g0}}{U^+} \\ i_q^+ = -\frac{2}{3} \frac{Q_{g0}}{U^+} \\ i_d^- = i_q^- = 0 \end{cases} \quad (4)$$

第 2 种: 以输出恒定无功功率为目标。即消除 IBDG 输出无功功率二倍频波动, IBDG 并网电流值为

$$\begin{cases} i_d^+ = \frac{2}{3} (P_{g0} U^+ / D_2) \\ i_q^+ = \frac{2}{3} (-Q_{g0} U^+ / D_1) \\ i_d^- = \frac{2}{3} (P_{g0} U^- / D_2) \\ i_q^- = \frac{2}{3} (Q_{g0} U^- / D_1) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $D_1 = (U^+)^2 - (U^-)^2$; $D_2 = (U^+)^2 + (U^-)^2$ 。

第 3 种: 以输出恒定有功功率为目标。即消除 IBDG 输出有功功率二倍频波动, IBDG 并网电流值为

$$\begin{cases} i_d^+ = \frac{2}{3} (P_{g0} U^+ / D_1) \\ i_q^+ = \frac{2}{3} (-Q_{g0} U^+ / D_2) \\ i_d^- = \frac{2}{3} (-P_{g0} U^- / D_1) \\ i_q^- = \frac{2}{3} (-Q_{g0} U^- / D_2) \end{cases} \quad (6)$$

对式(4)一式(6)进行 dq - abc 变换, 可以分别得到第 1 种、第 2 种、第 3 种控制目标下, IBDG 输出的三相电流幅值 I_1 、 I_2 、 I_3 , 其计算表达式如式(7)一式(9)所示。

$$I_1 = \frac{2}{3U^+} \sqrt{(P_{g0})^2 + (Q_{g0})^2} \quad (7)$$

$$I_2 = A \sqrt{P_{g0}^2 D_1^2 + Q_{g0}^2 D_2^2} \quad (8)$$

$$I_3 = A\sqrt{P_{g0}^2 D_2^2 - Q_{g0}^2 D_1^2} \quad (9)$$

式中, $A = \frac{2}{3(U^+ - U^-)D_2}$ 。

由式(7)一式(9)可以看出, IBDG 输出电流幅值主要与并网点电压和有功、无功功率控制目标有关。

1.3 IBDG 不对称短路等效模型的建立

基于 IBDG 不对称短路的控制原理和控制目标, 分析不对称短路等效模型的建立原则和方法。

1.3.1 IBDG 不对称短路等效模型的建立原则

一方面, 模型建立与限流状态有关。IBDG 并网点电压下降越大, 其输出电流越高。为避免因电压下降过多产生过流现象, IBDG 并网换流器会采用限流控制约束其输出短路电流, 即要求 IBDG 最大输出电流不超过允许值 I_{MAX} (I_{MAX} 通常为其额定电流的 1.2~1.5 倍)。因此, 限流前后 IBDG 输出短路电流是不同的, 在处理 IBDG 的不对称短路计算模型时需要分未限流和已限流两种情况。

在不同的控制目标下, 选择式(7)一式(9)中对应公式计算三相电流幅值, 并根据式(10)判断 IBDG 的限流情况, 若满足式(10), 则判断 IBDG 处于限流状态。

$$I_1 > I_{MAX} \text{ or } I_2 > I_{MAX} \text{ or } I_3 > I_{MAX} \quad (10)$$

另一方面, 模型建立与 LVRT 要求有关。根据 IBDG 的 LVRT 规范, 要求 IBDG 在配电网发生不对称短路时输出一定的正序无功功率对电网电压进行支撑。因此, 根据 LVRT 要求, IBDG 输出的正序无功电流 i_q^+ 的表达式为

$$i_q^+ = K_V(U^* - U^+)I_N \quad (11)$$

式中: K_V 为 IBDG 输出正序无功电流的电压调节系数; U^* 为正序电压比较基准值; I_N 为 IBDG 额定电流标幺值。

1.3.2 IBDG 未限流的正负序电流计算

1) 正序电流 i_d^+ 、 i_q^+ 的计算

因有功功率参考值 P_{g0} 仍可按短路前输出, 即 P_{g0} 已知, i_d^+ 可基于不同的控制目标, 分别代入式(4)一式(6)中的 i_d^+ 表达式进行计算。 i_q^+ 直接根据式(11)的 LVRT 方程进行计算。

2) 负序电流 i_d^- 、 i_q^- 的计算

对于第 1 种控制目标, 负序电流为 0。对于第 2、第 3 种控制目标, 负序电流需要根据无功功率参考值 Q_{g0} 确定。将 i_q^+ 分别代入式(5)和式(6)中 i_q^+ 的表达式, 可以得到第 2、第 3 种控制目标的 Q_{g0} , 分别如式(12)和式(13)所示。

$$Q_{g0} = \frac{3}{2U^+} K_V(U^* - U^+)I_N D_1 \quad (12)$$

$$Q_{g0} = \frac{3}{2U^+} K_V(U^* - U^+)I_N D_2 \quad (13)$$

将计算所得的 Q_{g0} 代入式(5)和式(6)中 i_d^- 、 i_q^- 的表达式进行计算, 可得到 i_d^- 、 i_q^- 。

1.3.3 IBDG 已限流的正负序电流计算

1) 正序电流 i_d^+ 、 i_q^+ 的计算

因输出的有功功率在限流状态下会受到限制, 造成 IBDG 不能按照 P_{g0} 输出, i_d^+ 需重新计算。 i_q^+ 仍根据式(11)的 LVRT 方程计算。

对于第 1 种控制目标, i_d^+ 的计算表达式为

$$i_d^+ = \sqrt{(I_{MAX})^2 - (i_q^+)^2} \quad (14)$$

对于第 2、第 3 种控制目标, 将式(12)和式(13)分别代入式(8)和式(9), 可求得限功率运行下的 P_{g0} 分别为

$$P_{g0} = \sqrt{\frac{9I_{MAX}^2 D_2^2}{4(U^+ + U^-)^2} - \frac{Q_{g0} D_2^2}{D_1^2}} \quad (15)$$

$$P_{g0} = \sqrt{\frac{9I_{MAX}^2 (U^+ - U^-)^2}{4} - \frac{Q_{g0} D_1^2}{D_2^2}} \quad (16)$$

计算所得的 P_{g0} 代入式(5)和式(6)中 i_d^+ 的表达式进行计算, 可得到 i_d^+ 。

2) 负序电流 i_d^- 、 i_q^- 的计算

i_d^- 、 i_q^- 的计算方法与未限流情况相同。

1.3.4 IBDG 不对称短路的通用等效模型

在配电网发生不对称短路的情况下, IBDG 基于不同的控制目标和不同的限流状态, 可以计算出 i_d^+ 、 i_d^- 、 i_q^+ 、 i_q^- , 进而可以获得 IBDG 输出的正、负序短路电流 \dot{I}_{DG}^+ 和 \dot{I}_{DG}^- , 其计算表达式为

$$\begin{cases} \dot{I}_{DG}^r = I^r \angle \varphi^r \\ I^r = \sqrt{(i_d^r)^2 + (i_q^r)^2} \\ \varphi^r = \arctan\left(\frac{i_q^r}{i_d^r}\right) + \arg(\dot{U}_{DG}^r) \end{cases} \quad (17)$$

式中: I^r 和 φ^r 分别为 IBDG 并网点电流 \dot{I}_{DG}^r 的幅值和相位; $\arg(\cdot)$ 为角度公式; \dot{U}_{DG}^r 为 IBDG 并网点电压。

因此, IBDG 不对称短路的通用等效模型表示如图 2 所示。

从图 2 可以看到, IBDG 的通用不对称短路等效模型是以电流源的形式表示, 根据不同控制目标和是否限流两种情况, 选择对应计算表达式即可, 可

满足多种运行需求的含 IBDG 的配电网不对称短路电流计算。

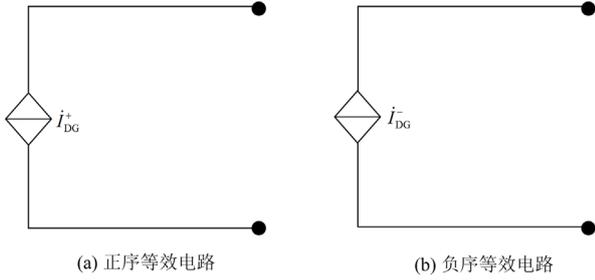


图 2 IBDG 不对称短路的通用等效模型

Fig. 2 General equivalent model of IBDG in asymmetric short-circuit

2 配电网不对称短路电流通用计算方法

为实现配电网不对称短路电流计算方法的通用性，将 IBDG 的不对称短路通用等效模型与配电网通用短路等效电路结合，建立通用计算方程，实现对任意配电网不对称短路电流的计算。

2.1 配电网不对称短路的通用等效电路

对于含有 IBDG 的配电网，当配电网任意节点 k 发生不对称短路时，将图 2 所示 IBDG 的不对称短路通用等效模型与配电网不对称通用等效电路结合，形成通用的含 IBDG 配电网的不对称短路通用等效电路，如图 3 所示。

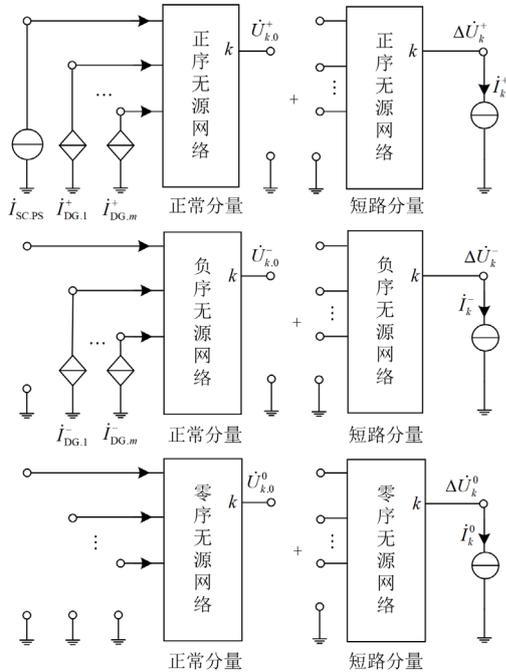


图 3 含 IBDG 配电网的不对称短路通用等效电路

Fig. 3 General equivalent circuit of distribution network with IBDG during asymmetric fault

图 3 中， $i_{DG,m}^+$ 和 $i_{DG,m}^-$ 分别为第 m 个 IBDG 注入短路电流的正序和负序分量，其基于不同的控制目标，根据式(17)计算； $\dot{U}_{k,0}^+$ 、 $\dot{U}_{k,0}^-$ 和 $\dot{U}_{k,0}^0$ 分别为短路点 k 的正序、负序和零序电压的正常分量； $\Delta\dot{U}_k^+$ 、 $\Delta\dot{U}_k^-$ 和 $\Delta\dot{U}_k^0$ 分别为短路点 k 的正序、负序和零序电压的故障分量； i_k^+ 、 i_k^- 、 i_k^0 分别为短路电流的正序、负序和零序分量； $i_{SC.PS}$ 为系统电源的短路电流。

需要说明的是，当 IBDG 按第 1 种控制目标输出时，负序电流为 0，而当 IBDG 按第 2 和第 3 种控制目标输出时，IBDG 会输出一定的负序电流。因此，为保证不对称短路电流计算的通用性，若无需负序电流输出，只需要将电流值处理为 0 即可。

2.2 配电网不对称短路的通用计算方程

根据图 3 所示配电网的不对称通用等效电路，针对其正序、负序和零序网络，可以建立方程组，如式(18)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{U}_f^+ = \mathbf{Z}^+ \mathbf{I}^+ - \dot{i}_k^+ \mathbf{Z}_k^+ \\ \mathbf{U}_f^- = \mathbf{Z}^- \mathbf{I}^- - \dot{i}_k^- \mathbf{Z}_k^- \\ \mathbf{U}_f^0 = -\dot{i}_k^0 \mathbf{Z}_k^0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\mathbf{I}^+ = [i_{SC.PS} \ \dots \ i_{DG,1}^+ \ \dots \ i_{DG,m}^+]^T \quad (19)$$

$$\mathbf{I}^- = [0 \ \dots \ 0 \ \dot{i}_{DG,1}^- \ \dots \ \dot{i}_{DG,m}^-]^T \quad (20)$$

式中： \mathbf{U}_f^+ 、 \mathbf{U}_f^- 、 \mathbf{U}_f^0 分别为正序、负序和零序节点电压向量； \mathbf{Z}^+ 和 \mathbf{Z}^- 分别为网络的正序和负序节点阻抗矩阵； \mathbf{I}^+ 为正序分量网络系统电源和 IBDG 的注入电流； \mathbf{I}^- 为负序分量网络 IBDG 的注入电流； \mathbf{Z}_k^+ 、 \mathbf{Z}_k^- 、 \mathbf{Z}_k^0 分别为正序、负序和零序节点阻抗矩阵中与短路点 k 相关的列向量。

根据式(18)一式(20)可以看出，待求的短路点三序电流使得方程组(18)的未知数个数大于方程个数。因此，还需要根据不同短路类型的具体特征建立 3 个边界方程。

由于 IBDG 的接入，配电网的负序分量网络存在负序电流源，需对过去序分量下的边界方程进行改进。改进后的单相接地短路、两相相间短路和两相接地短路的边界方程分别如式(21)一式(23)所示。

$$i_k^+ = i_k^- = i_k^0 = \frac{\dot{U}_{k,0}^+ + \dot{U}_{k,0}^-}{Z_{kk}^+ + Z_{kk}^- + Z_{kk}^0} \quad (21)$$

$$i_k^+ = -i_k^- = \frac{\dot{U}_{k,0}^+ - \dot{U}_{k,0}^-}{Z_{kk}^+ + Z_{kk}^-} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_k^+ = \frac{Z_{kk}^0 \dot{U}_{k,0}^+ + Z_{kk}^- \dot{U}_{k,0}^+ - Z_{kk}^0 \dot{U}_{k,0}^-}{Z_{kk}^0 Z_{kk}^+ + Z_{kk}^- Z_{kk}^+ + Z_{kk}^- Z_{kk}^0} \\ \dot{I}_k^- = \frac{Z_{kk}^+ \dot{U}_{k,0}^- + Z_{kk}^0 \dot{U}_{k,0}^- - Z_{kk}^0 \dot{U}_{k,0}^+}{Z_{kk}^0 Z_{kk}^+ + Z_{kk}^- Z_{kk}^+ + Z_{kk}^- Z_{kk}^0} \\ \dot{I}_k^0 = -\frac{Z_{kk}^- \dot{U}_{k,0}^+ + Z_{kk}^+ \dot{U}_{k,0}^-}{Z_{kk}^0 Z_{kk}^+ + Z_{kk}^- Z_{kk}^+ + Z_{kk}^- Z_{kk}^0} \end{cases} \quad (23)$$

式中, Z_{kk}^+ 、 Z_{kk}^- 、 Z_{kk}^0 分别为正序、负序和零序节点阻抗矩阵中的第 k 行第 k 列元素。

在配电网含有 IBDG 的情况下, 联立式(18)和各边界方程, 便可实现对任意的不对称短路电流进行计算, 计算方程通用简洁。

此外, 根据式(17)可以看到, 当配电网含有 IBDG 时, 由于 IBDG 的正序和负序输出电流与并网点电压值有关, 配电网的不对称短路电流不能仅通过一次计算实现, 而需要通过多次迭代计算。因此, 还需进一步设计基于迭代的不对称短路电流计算通用流程。

2.3 不对称短路电流通用计算流程

含 IBDG 配电网的不对称短路电流计算流程主要由参数输入、计算和结果输出 3 个环节组成。每一个环节应尽可能考虑全面, 以保证计算方法的通用性。

对于参数输入环节, 需提供的输入参数如下。

- 1) 配电网参数: 线路的三序阻抗值、系统电源电抗值。
- 2) IBDG 参数: 容量、最大允许电流值 I_{MAX} 、控制目标类型和低电压穿越参数(K_V 、 U^*)。
- 3) 短路参数: 短路类型、短路点位置和相位。
- 4) 迭代初值参数: 各节点电压初值为标么值 1, 且只有正序分量; 各 IBDG 初始输出电流为 0。

对于计算环节, 计算所涉及到的关键步骤如下。

- 1) 边界方程的选择。根据不同短路类型在式(21)一式(23)中选择对应的边界方程与式(18)一式(20)联立, 可得对应短路情况下短路点的短路电流三序值和各节点电压三序值。

2) IBDG 输出短路电流计算方程的选择。对于 IBDG 常见的 3 种控制目标, 已限流和未限流情况分别选择对应的正负序电流计算方程。

3) IBDG 限流状态的判断。选择式(7)一式(9)中对应公式计算三相电流幅值, 并根据式(10)判断 IBDG 的限流情况, 根据式(17)求得各 IBDG 的正、负序输出电流值。

4) 收敛条件的判断。若前后两次计算所得的 IBDG 并网点正序和负序电压差的绝对值足够小,

则达到收敛要求。

对于结果输出环节, 所有的计算结果需要转化为相分量的形式再输出, 包括短路点的三相短路电流值和各节点电压的三相值。

含 IBDG 配电网的不对称短路电流计算流程如图 4 所示。

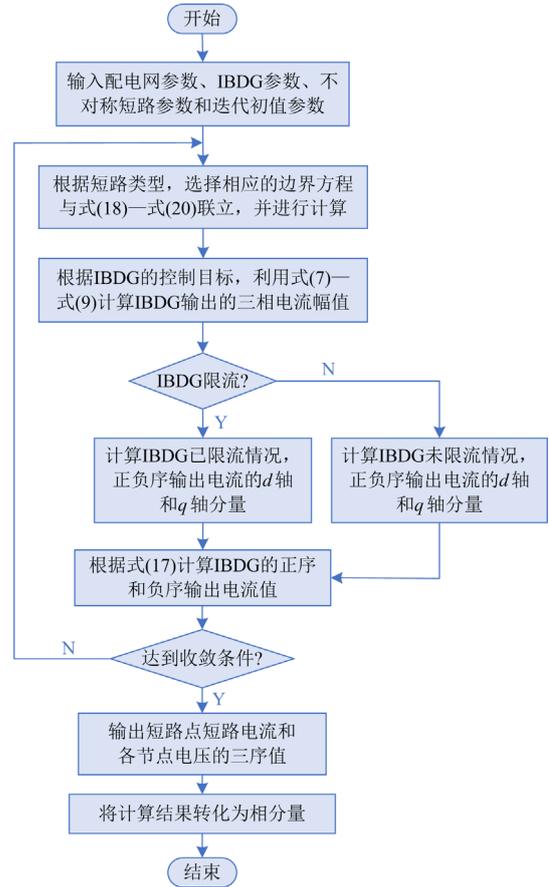


图 4 含 IBDG 配电网的不对称短路计算流程图

Fig. 4 Flow chart of asymmetrical short circuit calculation of distribution network with IBDG

3 算例分析

本文采用一个 4 节点配电网作为测试算例, 该算例结构如图 5 所示。

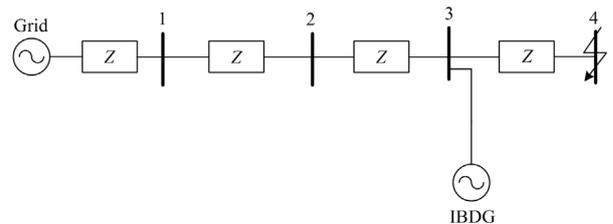


图 5 配电网结构图

Fig. 5 Diagram of distribution network

该配电网由节点 1 并入系统,系统电抗为 1Ω , 且属于中性点不接地系统。系统电源通过 10 kV 馈线电缆向配网供电,线路 1-2、2-3、3-4 的长度分别为 2 km、2 km、5 km,线路的正负序阻抗和零序阻抗分别为: $0.132 + j0.429 \Omega/\text{km}$, $0.396 + j1.287 \Omega/\text{km}$ 。配电网节点 3 接有一台 0.5 MW 的 IBDG,其最大短路电流允许值 I_{MAX} 为其额定电流的 1.2 倍, LVRT 参数分别为: $K_V = 2$, $U^* = 1 \text{ p.u.}$ 。计算采用的基准功率为 1 MVA,基准电压为 10 kV。

本文计算当节点 4 发生三相不对称短路时,IBDG 分别在 3 种控制目标下,配电网的短路电流值、IBDG 的输出电流值和各节点电压值。其中,单相接地短路的短路相为 A 相,两相相间短路和两相接地短路的短路相为 BC 相。

3.1 第 1 种控制目标

当 IBDG 运行于第 1 种控制目标时,具体计算结果如表 1 所示。

表 1 配电网不对称短路计算结果(目标 1)

Table 1 Calculation results of asymmetric fault in distribution network (target 1)

		节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	
单相接地	电压幅值/p.u.	A 相	0.0054	0.0027	0	0
		B 相	1.7361	1.7356	1.7350	1.7350
		C 相	1.7310	1.7330	1.7350	1.7350
短路	电流幅值/p.u.	短路点		IBDG 输出		
		A 相	≈0	0.3328		
		B 相	0	0.3328		
		C 相	0	0.3328		
两相间	电压幅值/p.u.	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	
		A 相	1.0024	1.0056	1.0088	1.0088
		B 相	0.8863	0.7650	0.6570	0.5044
		C 相	0.8372	0.7203	0.6208	0.5044
短路	电流幅值/p.u.	短路点		IBDG 输出		
		A 相	0	0.5297		
		B 相	19.2416	0.5297		
		C 相	19.2416	0.5297		
两相接地	电压幅值/p.u.	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	
		A 相	1.5068	1.5100	1.5132	1.5132
		B 相	0.6983	0.5454	0.3926	0
		C 相	0.7045	0.5485	0.3926	0
短路	电流幅值/p.u.	短路点		IBDG 输出		
		A 相	0	0.5297		
		B 相	19.2416	0.5297		
		C 相	19.2416	0.5297		

从表 1 的计算结果可以看出,当配电网节点 4 发生三相不对称短路时,运行于控制目标 1 下的

IBDG 输出三相对称的短路电流,且都在最大限值以内,IBDG 没有进入限流状态。

3.2 第 2 种控制目标

当 IBDG 运行于第 2 种控制目标时,具体计算结果如表 2 所示。

表 2 配电网不对称短路计算结果(目标 2)

Table 2 Calculation results of asymmetric fault in distribution network (target 2)

		节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	
单相接地	电压幅值/p.u.	A 相	0.0054	0.0027	0	0
		B 相	1.7359	1.7353	1.7347	1.7347
		C 相	1.7307	1.7327	1.7347	1.7347
短路	电流幅值/p.u.	短路点		IBDG 输出		
		A 相	≈0	0.3328		
		B 相	0	0.3328		
		C 相	0	0.3328		
两相间	电压幅值/p.u.	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	
		A 相	1.0015	1.0039	1.0063	1.0063
		B 相	0.8868	0.7660	0.6585	0.5031
		C 相	0.8368	0.7188	0.6180	0.5031
短路	电流幅值/p.u.	短路点		IBDG 输出		
		A 相	0	0.4887		
		B 相	19.2742	0.2871		
		C 相	19.2742	0.5728		
两相接地	电压幅值/p.u.	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	
		A 相	1.5046	1.5070	1.5094	1.5094
		B 相	0.6985	0.5459	0.3932	0
		C 相	0.7052	0.5492	0.3932	0
短路	电流幅值/p.u.	短路点		IBDG 输出		
		A 相	0	0.4887		
		B 相	19.2742	0.2871		
		C 相	19.2742	0.5728		

从表 2 的计算结果可以看出,当 IBDG 运行于第 2 种控制目标,且配电网发生两相相间短路和两相接地短路时,IBDG 因负序电流控制,没有输出三相对称的短路电流。说明本文方法能够对考虑 IBDG 负序电流输出的配电网短路电流进行计算。此外,在发生两相相间短路和两相接地短路时,IBDG 进入了限流状态,IBDG 运行于限有功功率($P = 0.3189 \text{ p.u.}$)的模式,以确保 IBDG 输出的短路电流小于其最大允许值。

3.3 第 3 种控制目标

当 IBDG 运行于第 3 种控制目标时,具体计算结果如表 3 所示。

从表 3 的计算结果可以看出,与第 2 种控制目标相同,当发生两相相间短路和两相接地短路时,

IBDG 因负序电流控制, 没有输出三相对称的短路电流。同样说明本文方法能够对考虑 IBDG 负序电流输出的配电网短路电流进行计算。此外, 在发生两相相间短路和两相接地短路时, IBDG 进入了限流状态, IBDG 运行于限有功功率 ($P = 0.4269 \text{ p.u.}$) 的模式, 以确保 IBDG 输出的短路电流小于其最大允许值。

表 3 配电网不对称短路计算结果(目标 3)

Table 3 Calculation results of asymmetric fault in distribution network (target 3)

		节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	
单相 接地 短路	电压 幅值/ p.u.	A 相	0.0054	0.0027	0	0
		B 相	1.7359	1.7353	1.7347	1.7347
		C 相	1.7307	1.7327	1.7347	1.7347
		短路点		IBDG 输出		
两相 相间 短路	电流 幅值/ p.u.	A 相	≈ 0			0.3328
		B 相	0			0.3328
		C 相	0			0.3328
		节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	
两相 接地 短路	电压 幅值/ p.u.	A 相	1.0034	1.0069	1.0104	1.0104
		B 相	0.8854	0.7633	0.6548	0.5052
		C 相	0.8381	0.7220	0.6232	0.5052
		短路点		IBDG 输出		
单相 接地 短路	电流 幅值/ p.u.	A 相	0			0.4365
		B 相	19.1948			0.5928
		C 相	19.1948			0.3252
		节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	
两相 相间 短路	电压 幅值/ p.u.	A 相	1.5086	1.5121	1.5156	1.5094
		B 相	0.7001	0.5459	0.3916	0
		C 相	0.7020	0.5468	0.3916	0
		短路点		IBDG 输出		
单相 接地 短路	电流 幅值/ p.u.	A 相	0			0.4365
		B 相	19.1948			0.5928
		C 相	19.1948			0.3252

3.4 结果分析与对比

1) 限流状态对计算结果的影响

根据表 1—表 3 的计算结果可知, 只有在 IBDG 运行于第 2 种和第 3 种控制目标, 且配电网发生两相相间短路和两相接地短路时, IBDG 会进入限流状态, 若不考虑 IBDG 限流, 在两种控制目标下, IBDG 输出的三相短路电流的计算结果如表 4 所示。

从表 4 可以看到, 当 IBDG 运行于控制目标 2 时, C 相电流超过了 IBDG 的最大电流允许值 (0.6 p.u.); 当 IBDG 运行于控制目标 3 时, B 相电流超过了 IBDG 的最大电流允许值 (0.6 p.u.)。说明本文所提方法能够在计算过程中考虑到 IBDG 的限流情况, 并完成短路电流计算。

表 4 IBDG 输出的三相不对称短路电流

Table 4 Three-phase asymmetric fault calculation results of IBDG

电流 幅值/ p.u.	第 2 种控制目标		第 3 种控制目标
	A 相	0.5646	0.5079
B 相	0.3058	0.8249	
C 相	0.6201	0.5359	

2) 不同短路类型对计算结果的影响

对于单相短路而言, 从表 1—表 3 的计算结果可以发现, 3 种控制目标下单相接地短路的短路计算结果非常接近。这是因为, IBDG 运行于控制目标 2 和 3 时, 其负序电流输出与其并网点电压的负序分量有关, 而在单相接地短路情况下, 配电网的负序电压值非常小, 导致 IBDG 几乎不输出负序电流。这与控制目标 1 下, IBDG 的电流输出相同。

对于两相相间短路和两相接地短路而言, 从表 1—表 3 的计算结果可以发现, IBDG 运行于相同的控制目标下, 两相相间和两相接地短路的短路点短路电流计算值相同。这是因为, 本算例配电网属于中性点不接地系统, 其零序阻抗值非常大, 造成两相接地短路时的零序网络几乎无电流通过。因此, 零序电流可以忽略不计, 也就导致两种短路类型下的短路电流计算结果近似相同。

4 结论

本文研究了含有 IBDG 配电网的不对称短路电流计算方法, 通过理论分析与算例验证, 得出如下结论。

1) 当配电网发生不对称短路时, 若 IBDG 以输出恒定的有功或者无功功率为控制目标, IBDG 会输出一定的负序电流, 并对配电网的短路电流分布造成影响。配电网的不对称短路计算需要考虑到 IBDG 的负序电流输出。

2) IBDG 的不对称短路等效模型需要结合多种控制目标、LVRT 控制和限流控制的特点, 将不对称短路模型统一化处理, 形成通用的 IBDG 不对称短路等效模型, 以满足多种运行需求的配电网短路电流计算。

3) 为实现含 IBDG 的配电网不对称短路电流的通用计算, 不仅要 IBDG 的通用等效模型与配电网通用不对称等效电路结合, 还需要修改序分量下的不对称短路边界方程, 进而形成对任意短路类型、任意短路位置、任意控制目标的通用计算流程。

参考文献

- [1] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报,

- 2017, 37(1): 9-20.
- LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [2] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 176-187.
- ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [3] 朱灿元, 杨超, 李舒涛, 等. 考虑清洁能源与储能的分分布式数据中心低碳调度策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 16-23.
- ZHU Canyuan, YANG Chao, LI Shutao, et al. Low-carbon scheduling strategy for distributed data centers considering clean energy and energy storage[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 16-23.
- [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] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
- SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [6] 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.
- [7] 王成山, 孙晓倩. 含分布式电源配电网短路计算的改进方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 36(23): 54-58.
- WANG Chengshan, SUN Xiaoqian. An improved short circuit calculation method for distribution network with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 36(23): 54-58.
- [8] REIZ C, LEITE J B. Short-circuit calculation in unbalanced three-phase power distribution systems with distributed generation[C] // 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America), September 15-18, 2019, Gramado, Brazil: 1-6.
- [9] STREZOSKI L, PRICA M, LOPARO K A. Generalized Δ -circuit concept for integration of distributed generators in online short-circuit calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(4): 3237-3245.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 常仲学, 杨忠礼, 宋国兵, 等. 正负双序独立控制策略下的逆变型分布式电源不对称故障电流分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 44-51.
- CHANG Zhongxue, YANG Zhongli, SONG Guobing, et al. Analysis on asymmetric fault current characteristics of inverter interfaced distributed generator under positive-sequence and negative-sequence current respective control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 44-51.
- [13] JIA Jundi, YANG Guangya, NIELSEN A H. Fault analysis method considering dual-sequence current control of VSCs under unbalanced faults[J]. Energies, 2018, 11(7): 1660.
- [14] 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.
- [15] 丁一凡, 季亮, 常潇, 等. 不对称电压跌落下虚拟同步机改进低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 76-85.
- DING Yifan, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Improved low voltage ride-through control strategy of a virtual synchronous generator during unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 76-85.
- [16] 翁华, 朱维骏, 张旭, 等. 含换流器型电源电力系统的

- 短路计算方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 16-23.
- WENG Hua, ZHU Weijun, ZHANG Xu, et al. Short-circuit current calculation method for power system with converter-interfaced generator[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 16-23.
- [17] 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.
- [18] 周念成, 叶玲, 王强钢, 等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49.
- ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetric short-circuit current calculation for inverter interfaced distributed generators with negative sequence current injection integrated in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 41-49.
- [19] JUNYENT-FERRE A, GOMIS-BELLMUNT O, GREEN T C, et al. Current control reference calculation issues for the operation of renewable source grid interface VSCs under unbalanced voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3744-3753.
- [20] 张长久, 鄢小波, 谢小英. 基于 GB/T33593 标准的 DG 低电压穿越输出特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 76-83.
- ZHANG Changjiu, WU Xiaobo, XIE Xiaoying. Research on low voltage ride through of DG characteristics based on GB/T33593 standard[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 76-83.
- [21] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A R I. Asymmetrical ride-through and grid support in converter-interfaced DG units under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(2): 1130-1141.
- [22] 谭爱国, 吴颖颖, 王传启, 等. 基于保障低压穿越能力的风电机组撬棒自适应投切策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 98-109.
- TAN Aiguo, WU Yingying, WANG Chuanqi, et al. Adaptive switching strategy for a wind turbine crowbar based on the guarantee of low voltage ride-through capability[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 98-109.
- [23] 唐欣, 海帆, 湛若水. 直流配电网中送端换流器的故障限流控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3424-3429.
- TANG Xin, HAI Fan, ZHAN Ruoshui. Fault current limiting control strategy of feeder converter in DC distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3424-3429.
- [24] REYES M, RODRIGUEZ P, VAZQUEZ S, et al. Enhanced decoupled double synchronous reference frame current controller for unbalanced grid-voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3934-3943.
- [25] KABIRI R, HOLMES D G, MCGRATH B P. Control of active and reactive power ripple to mitigate unbalanced grid voltages[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1660-1668.
- [26] 谭骞, 徐永海, 黄浩, 等. 不对称电压暂降情况下光伏逆变器输出电流峰值的控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 601-608.
- TAN Qian, XU Yonghai, HUANG Hao, et al. A control strategy for peak output current of PV inverter under unbalanced voltage sags[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 601-608.

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-11-27

作者简介:

杨 杉(1986—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为新型电力系统的运行计算与状态分析、安全性分析与威胁检测等; E-mail: 54803510@qq.com

喻 希(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障分析、电力系统故障恢复等; E-mail: 3134469721@qq.com

罗朝旭(1987—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新型电力系统运行与控制、电能质量分析与控制等。E-mail: 14011@hut.edu.cn

(编辑 周金梅)