

考虑高比例逆变型分布式电源接入的阻抗差动保护

罗国敏¹, 吴梦宇¹, 谭颖婕¹, 赵祎薇¹, 和敬涵¹, 张衡²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 国网北京市电力公司检修分公司, 北京 100073)

摘要: 目前配电网具备的通信基础设施难以应对高数据同步的需求, 且兆瓦级分布式电源(distributed generator, DG)主要采用 T 接方式并网, 影响了差动保护的灵敏性和可靠性。为解决上述问题, 提出了一种考虑高比例逆变型分布式电源接入的阻抗差动保护。首先, 考虑分布式电源在低电压穿越期间的故障输出特性, 挖掘区内外故障时故障分量阻抗动作量和制动量关系的显著差异, 构建了故障分量阻抗差动保护判据。其次, 由于电压跌落严重时故障分量特征不显著, 构建了适用于高电压跌落的正序阻抗比幅判据。两者相互配合, 实现保护的可靠性。最后, 在 Matlab/Simulink 中建立实际配电网模型, 验证了该保护方法的有效性和可靠性。相较于传统电流差动保护, 该方法减少了对数据同步的需求, 提高了过渡电阻的耐受能力, 适用于分布式电源高渗透率的场景。

关键词: 配电网; 分布式电源; 阻抗差动保护; CT 饱和

Impedance differential protection for integration of a high proportion of inverter-based distributed generation

LUO Guomin¹, WU Mengyu¹, TAN Yingjie¹, ZHAO Yiwei¹, HE Jinghan¹, ZHANG Heng²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company Maintenance Branch, Beijing 100073, China)

Abstract: At present, the communication infrastructure available in distribution networks makes it difficult to cope with the demand for high data synchronization, and megawatt-level distributed generators (DGs) are mainly connected to the network using the T-connection method. This affects the sensitivity and reliability of differential protection. To solve these problems, this paper proposes an impedance differential protection considering the integration of a high proportion of inverter-based distributed generation. First, a fault component impedance differential protection criterion is constructed by considering the fault output characteristics of DGs during low-voltage ride-through, and the significant differences in the fault component impedance action and braking quantities during external and internal faults are identified. Next, because of the lack of distinct fault component characteristics during severe voltage dips, a positive-sequence impedance ratio magnitude criterion is introduced, specifically designed for high-voltage dips. These two criteria work together to ensure the reliability of the protection system. Finally, a practical distribution network model is established in Matlab/Simulink to verify the effectiveness and reliability of the proposed protection method. Compared with traditional current differential protection, the proposed method alleviates the need for data synchronization, improves the tolerance to transition resistance, and is suitable for scenarios with high penetration of DG.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U23B6007).

Key words: distribution network; distributed generator (DG); impedance differential protection; CT saturation

0 引言

随着分布式电源(distributed generator, DG)大规模并网, 传统的配电网已演变为多源、潮流双向的新型配电网。此外, 逆变型分布式电源不同于传统

电源, 其出力的随机性和波动性以及故障时输出特性的非线性均导致短路电流大小存在不确定性^[1-3]。传统配电网保护面临巨大挑战, 而随着配电网量测信息的全面普及以及通信技术的发展, 距离保护和差动保护已成为当前的研究热点。

对距离保护的改进思路主要集中在增强距离保护的方向性和提升 DG 接入的适应性上。文献[4]对

逆变型 DG 接入电网后的分析发现,在电网故障期间,受 DG 控制策略的制约,可能导致距离保护误动作。而文献[5]提出了一种自适应距离保护,该方法根据故障前系统状态计算新的整定值,降低 DG 接入对保护的影响,但缺少对控制策略变化影响因素的分析。此外,文献[6]则针对故障后 DG 引起的阻抗幅值和相角的变化,重新构建测量阻抗表达式,使距离保护能够适应 DG 在不同电压跌落下无功支撑的变化。文献[7-8]改进了传统的方向元件以适应 DG 接入引起的故障特性变化。这些方法有效解决了 DG 接入引发的保护灵敏度下降的问题,然而,在高比例 DG 接入后,保护整定计算与延时方面仍然面临极大挑战。

相较而言,差动保护以其优良的动作特性和绝对的选择性在配电网中得到了应用^[9-11]。文献[12-13]利用正序电流故障分量构造具有制动特性的电流差动保护,有效地解决了有源配电网的弱馈问题,但在高阻故障或含有不可测负荷分支的情况下,保护灵敏度降低。文献[14]提出了一种基于序分量的电流差动保护,通过引入差动系数提高传统差动保护的灵敏度,但没有考虑不可测负荷分支的影响。文献[15]利用线路两侧正序电流故障分量在内部和外部故障时的幅值和相位特征来构建保护判据,具有自适应制动阈值,但需要严格的数据同步。目前配电网具备的通信基础设施难以应对高数据同步的需求。基于通道的数据同步方法在原理上无法适应 5G 差动保护的要求;而基于卫星的数据同步方法在原理上可行,但考虑到经济性和可靠性等因素,无法在配电网中大规模推广^[16-17]。

为缓解数据同步压力,部分研究利用标量信息实现了差动保护,如阻抗差动原理^[18-20]、电流幅值比较原理^[21-22]、故障分量相位比较原理^[23-24]和功率差动原理^[25-26],改善了保护性能。文献[18-20]分别利用正序阻抗、综合阻抗和高频阻抗作为特征量构造保护判据,降低了对通信同步的严格要求,但在高比例 DG 接入情况下的适应性有待提高。文献[21-24]提出了基于电流幅值和故障电流相位的差动保护原理,但在复杂配电网中的性能有待提升。文献[25-26]提出了基于能量守恒的有功功率差动保护,但在近端金属性故障时存在保护死区。目前在含有多个 DG 的配电网中,配网保护主要受到两方面的限制:1)大量以 T 接方式并入的 DG 和负荷分支导致故障前后一直存在不平衡量,严重影响了差动保护的性能;2)DG 故障后的控制策略对输出电流的幅值和相角有较大影响,使得测量阻抗发生变化,传统基于测量阻抗的距离保护和差动保护难以

适应这一情况。

此外,为了适应 DG 多点、分散和密集的连接,部分研究提出了使用基于多端信息交换的保护,以实现可靠的保护动作^[27-30]。然而,为了满足这类保护的通信需求,目前的配电网还需要进行大量的投资和改造。按照我国配电网目前的发展趋势,这在短期内难以实现。

为了解决上述问题,本文考虑了现有配电网结构、通信基础设施、DG 故障特性和渗透率等因素,提出了考虑高比例逆变型分布式电源接入的阻抗差动保护方法。在分析电网故障后 DG 输出特性的基础上,研究了含 T 接分支的配电线路在发生区内外故障时双端阻抗的特性关系,构建了带有制动量的故障分量阻抗差动保护判据;为了解决电压跌落严重时故障分量特征不显著的问题,又构建了适用于高电压跌落的正序阻抗比幅判据,两者相互配合。在 Matlab/Simulink 平台上建立了高比例 DG 接入的配电网模型,进行了仿真验证。结果表明,与电流差动保护类似,本文提出的保护方案具有绝对选择性和可靠性,且对数据同步的要求大大降低,更适合现有配电网的通信基础设施,不受高渗透率和 DG 故障特征的影响。

1 逆变型电源故障等效模型

1.1 DG 故障输出特性

根据 DG 并网标准,并网接入的 DG 在低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)期间输出电流应满足式(1)。

$$\begin{cases} I_q = 0; I_d = 2P_{(0)} / 3k_u U_{PCC(0)} & k_u > 0.9 \\ I_q = K_{sup} (0.9 - k_u) I_{DGN}; \\ I_d = \min \left\{ I_{DGN}, \sqrt{(K_{max} I_{DGN})^2 - I_q^2} \right\} & 0.2 < k_u \leq 0.9 \\ I_q = K_{max} I_{DGN}; I_d = 0 & k_u \leq 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_d 、 I_q 分别为 DG 输出电流的 d 、 q 轴分量; $P_{(0)}$ 为故障前 DG 捕获的功率; k_u 为并网点电压标幺值; $U_{PCC(0)}$ 为故障前并网点电压; K_{sup} 为无功补偿系数,有 $K_{sup} \geq 1.5$; I_{DGN} 为 DG 输出的额定电流; K_{max} 为最大允许过流系数,规定 DG 输出的最大电流,有 $K_{max} \geq 1.05$ 。

由于分布式电源暂态过程较快且不影响其稳态输出,可以忽略其内部控制策略切换时的暂态过程,在分析故障时 DG 输出电流情况时,直接采用 LVRT

的等效模型。

1.2 DG 故障分量等效模型

本文基于故障分量提出阻抗差动保护, 下面将对 DG 输出电流的故障分量进行分析, 建立 DG 等值阻抗模型。通常将同步旋转的 d 轴定向于 DG 的并网点电压上。DG 输出电流 I_{DG} 与并网点电压 U_{PCC} 的故障分量之间的关系如图 1 所示。图中: $I_{DG(0)}$ 和 $I_{DG(1)}$ 分别为 DG 故障前后的输出电流; $U_{PCC(0)}$ 和 $U_{PCC(1)}$ 为 DG 故障前后的并网点电压; $I_{d(0)}$ 、 $I_{q(0)}$ 、 $I_{d(1)}$ 、 $I_{q(1)}$ 分别为 DG 故障前后输出电流的 d 、 q 轴分量; ΔU_{PCC} 和 ΔI_{DG} 分别为 DG 并网点电压和输出电流的故障分量; ΔI_d 和 ΔI_q 分别为 DG 输出 d 、 q 轴电流的故障分量; $\delta_{(0)}$ 和 $\delta_{(1)}$ 分别为 DG 故障前后并网点电压滞后于参考点的角度。

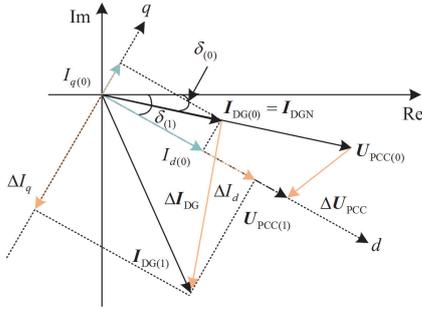


图 1 DG 输出电流与并网点电压相量关系图

Fig. 1 Phasor relationship between DG output current and grid-connected voltage

通过图 1 可以得到逆变型电源 d 、 q 轴电压和电流的故障分量。

$$\begin{cases} \Delta U_d = (k_u - \cos(\delta_{(1)} - \delta_{(0)}))U_{PCC(0)} \\ \Delta U_q = -U_{PCC(0)} \sin(\delta_{(1)} - \delta_{(0)}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta I_d = \min\left(I_{DGN}, \sqrt{(K_{\max} I_{DGN})^2 - I_q^2}\right) - I_{DGN} \cos(\delta_{(1)} - \delta_{(0)}) \\ \Delta I_q = (K_{\sup}(0.9 - k_u) - \sin(\delta_{(1)} - \delta_{(0)}))I_{DGN} \end{cases} \quad (3)$$

结合式(2)和式(3), 可得 DG 并网点电压与输出电流的故障分量如式(4)和式(5)所示。

$$\begin{cases} |\Delta U_{PCC}| = \sqrt{\Delta U_d^2 + \Delta U_q^2} \\ \varphi_U = \arg(\Delta U_d + j\Delta U_q) - \delta_{(1)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} |\Delta I_{DG}| = \sqrt{\Delta I_d^2 + \Delta I_q^2} \\ \varphi_I = \arg(\Delta I_d + j\Delta I_q) - \delta_{(1)} \end{cases} \quad (5)$$

式中, φ_U 和 φ_I 分别为 DG 并网点电压与输出电流故障分量的相位。

将 DG 并网点电压与输出电流故障分量的比值定义为 DG 的等值阻抗 Z_{DG} , 如式(6)所示。

$$Z_{DG} = -\frac{\Delta U_{PCC}}{\Delta I_{DG}} \quad (6)$$

将式(4)和式(5)代入式(6), 考虑接入系统的单个分布式电源容量为 2 MW, 过载能力为 1.2 p.u.。可得 DG 等值阻抗的幅值和相角范围为

$$\begin{cases} |Z_{DG}| \in [23, 200] \Omega \\ \arg(Z_{DG}) \in [-180^\circ, 180^\circ] \end{cases} \quad (7)$$

与同步发电机正序阻抗为感性不同, DG 等值阻抗角可在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 范围内变化, 幅值受故障条件影响, 呈大幅度波动, 但其值始终远大于线路阻抗。

2 有源配电网正序阻抗分布特征

本节以图 2 所示的有源配电网模型为例, 研究区内外故障发生时正序阻抗故障分量的特征。其中, MN 为保护区域, 假设 M 侧为上游 Up, N 侧为下游 Lo, DG1—DG5 为 PQ 控制的分布式电源; QF0—QF10 为断路器; F、I、J、M、N 和 E 为母线; f_1 、 f_2 和 f_3 为故障点。

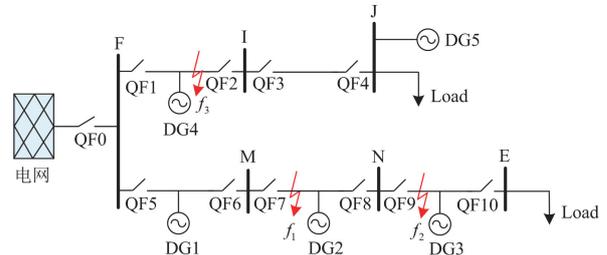


图 2 含多 DG 接入的有源配电网模型

Fig. 2 Active distribution network model with multiple DG

2.1 正序阻抗故障分量

1) 区内故障

当发生区内故障 f_1 时, 其正序故障附加网络如图 3 所示。其中, Z_1 和 Z_2 分别为 DG1 并网点到系统电源和 Up 的线路阻抗, Z_3 和 Z_4 分别为 DG2 并网点到 Up 和 Lo 的线路阻抗, Z_5 为 DG3 并网点到 Lo 点的线路阻抗; α 为故障点占线路百分数, 取值在 0~1 之间; Z_{L1} 为下游负荷的等效正序阻抗; Z_S 为系统等效正序阻抗; R_f 为过渡电阻; ΔI_{DG1} 、 ΔI_{DG2} 和 ΔI_{DG3} 为故障前后 DG 输出电流的变化量; ΔI_{Up} 和 ΔI_{Lo} 分别为上游和下游电流的正序故障分量; $-U_{f1}$ 和 $-I_{f1}$ 分别为故障附加电动势和故障附加电流。

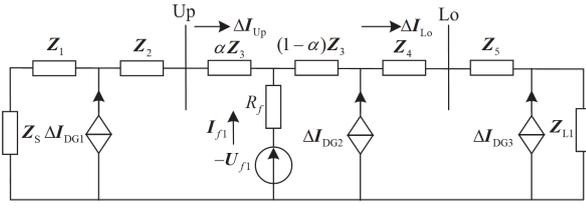


图3 区内故障 f_1 正序故障附加网络

Fig. 3 Internal fault f_1 positive sequence fault additional network

采用电压电流的正序故障分量来计算两端正序阻抗故障分量 ΔZ ，如式(8)所示。

$$\Delta Z = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (8)$$

式中， ΔU 和 ΔI 分别为电压和电流的正序故障分量。

阻抗差动保护中线路两端的阻抗多为母线背侧等值阻抗，规定上、下游电流方向如图3中箭头所示，则上、下游正序阻抗故障分量均为系统侧等值阻抗，由图3可得上、下游正序阻抗故障分量 ΔZ_{Up} 和 ΔZ_{Lo} 如式(9)所示。

$$\begin{cases} \Delta Z_{Up} = -Z_2 + \left(\frac{\Delta I_{DG1}}{I_{f1} - \Delta I_{DG2} - \Delta I_{DG3}} - 1 \right) (Z_s + Z_1) \\ \Delta Z_{Lo} = -Z_4 + \left(\frac{\Delta I_{DG2}}{-\Delta I_{DG3}} - 1 \right) (1 - \alpha) Z_3 + \\ \left(\frac{-I_{f1} + \Delta I_{DG2}}{-\Delta I_{DG3}} - 1 \right) (\alpha Z_3 + Z_2) + \\ \left(\frac{-I_{f1} + \Delta I_{DG1} + \Delta I_{DG2}}{-\Delta I_{DG3}} - 1 \right) (Z_s + Z_1) \end{cases} \quad (9)$$

定义故障分量阻抗动作量和制动量分别为 $|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}|$ 和 $|\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}|$ 。

为简化分析，令 $|I_{f1}| = a|\Delta I_{DG}|$ ，则 $|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}|$ 和 $|\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}|$ 分别如式(10)和式(11)所示。

$$|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| = \left| \frac{-Z_4 + (a\alpha - 2)Z_3 + (a-1)Z_2 + (a-1)(a-3)(Z_s + Z_1)}{a-2} \right| \quad (10)$$

$$|\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}| = \left| \frac{-Z_4 + (a\alpha - 2)Z_3 + (a-3)Z_2 + (a-3)^2(Z_s + Z_1)}{a-2} \right| \quad (11)$$

由于 a 的取值未知，无法判断故障分量阻抗动作量和制动量的大小关系。附录A中对故障分量阻抗与 a 的关系做详细分析。得到结论：当 $a > a_0$ 时，区内故障满足 $|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| > |\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}|$ 。

2) 区外故障

当发生区外下游故障 f_2 时，其正序故障附加网络如图4所示。

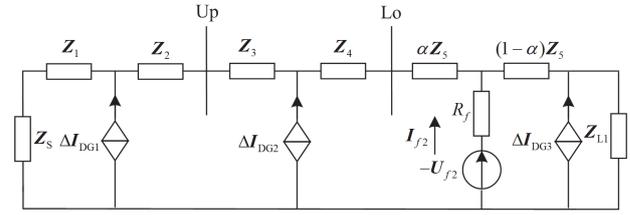


图4 区外故障 f_2 正序故障附加网络

Fig. 4 External fault f_2 positive sequence fault additional network

由图4可得，上、下游正序阻抗故障分量 ΔZ_{Up} 和 ΔZ_{Lo} 如式(12)所示。

$$\begin{cases} \Delta Z_{Up} = -Z_2 + \left(\frac{\Delta I_{DG1}}{I_{f2} - \Delta I_{DG2} - \Delta I_{DG3}} - 1 \right) (Z_s + Z_1) \\ \Delta Z_{Lo} = -Z_4 + \left(\frac{\Delta I_{DG2}}{I_{f2} - \Delta I_{DG3}} - 1 \right) (Z_3 + Z_2) + \\ \left(\frac{\Delta I_{DG1} + \Delta I_{DG2}}{I_{f2} - \Delta I_{DG3}} - 1 \right) (Z_s + Z_1) \end{cases} \quad (12)$$

同理，假设 $|I_{f2}| = b|\Delta I_{DG}|$ ，发生区外故障时故障分量阻抗动作量和制动量分别如式(13)和式(14)所示。

$$|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| = \left| \frac{-Z_4 - \frac{b-2}{b-1}Z_3 + \frac{1}{b-1}Z_2 - \frac{(b-3)(Z_s + Z_1)}{(b-2)(b-1)}}{(b-3)(b-1)} \right| \quad (13)$$

$$|\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}| = \left| \frac{-Z_4 - \frac{b-2}{b-1}Z_3 - \frac{2b-3}{b-1}Z_2 - \frac{(b-3)(2b-3)(Z_s + Z_1)}{(b-1)(b-2)}}{(b-1)(b-2)} \right| \quad (14)$$

同样地，由附录A可得到结论：当 $b > b_0$ 时，区外故障满足 $|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| < |\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}|$ 。

3) 相邻馈线故障

当发生相邻馈线故障 f_3 时，其正序故障附加网络如图5所示。

发生相邻馈线故障时，由于电源电压的钳位，可以认为 $\Delta I_{DG3} \approx \Delta I_{DG2} \approx 0$ 。上、下游正序阻抗故障分量 ΔZ_{Up} 和 ΔZ_{Lo} 如式(15)所示。

$$\begin{cases} \Delta Z_{Up} = Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_{L1} \\ \Delta Z_{Lo} = Z_5 + Z_{L1} \end{cases} \quad (15)$$

故障分量阻抗动作量和制动量分别如式(16)和式(17)所示。

$$|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| = |Z_3 + Z_4| \quad (16)$$

$$|\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}| = |2Z_3 + 2Z_4 + Z_5 + Z_{L1}| \quad (17)$$

由式(16)和式(17)可得 $|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| < |\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}|$ 。

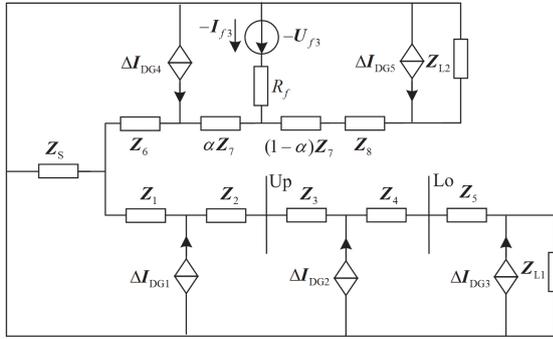


图5 相邻馈线故障 f_3 正序故障附加网络

Fig. 5 Adjacent feeder fault f_3 positive sequence fault additional network

综上所述, 当发生区内外故障时, 由于故障分量阻抗动作量和制动量中含有未知变量 a 和 b , 无法判断其大小关系; 而发生相邻馈线故障时满足 $|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| < |\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}|$ 。

2.2 故障分量电流比幅特征

为进一步确定区内、外故障分量阻抗动作量和制动量大小关系, 需知道 a 和 b 取值, 即分析故障附加电源和 DG 提供短路电流的比幅特征。本节将从故障点电压出发, 求解不同电压跌落程度下 DG 与故障附加电源提供短路电流的最小比值, 用以构建故障分量阻抗保护判据。

首先, 求解故障后过渡电阻 R_f 与故障点电压的关系。图 6(a)所示为区内 f_1 故障的正序网络, 以故障点为端口进行戴维南等效后, 得到图 6(b)。其中, U_1 为 f_1 故障后的故障点电压。DG 的故障电流特性与传统同步发电机相比存在很大不同。由于采用逆变器接口, 惯性时间常数很小, 从而可忽略 DG 输出故障电流中的暂态分量, 即可近似认为电网故障情况下 DG 交流侧输出电流中不含衰减直流分量和基频自由分量, DG 直接进入故障稳态运行, 而故障稳态后 DG 向故障点提供稳定的电流, 分析时可将 DG 视为压控恒流源。

根据图 6(a), 考虑到负荷阻抗远远大于线路阻抗, 从过渡电阻两端看出去的等值阻抗 Z_{eq1} 和端口电压 E_{eq1} 分别如式(18)和式(19)所示。

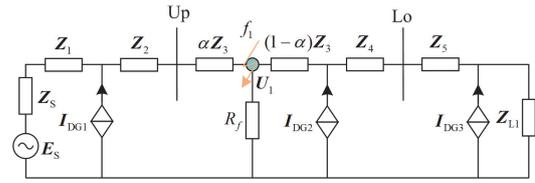
$$Z_{eq1} = Z_S + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3 \quad (18)$$

$$E_{eq1} = E_S + I_{DG1}(Z_S + Z_1) + (I_{DG2} + I_{DG3})(Z_S + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3) \quad (19)$$

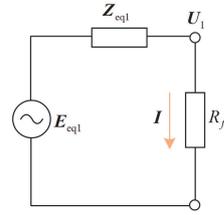
根据图 6(b), 结合分压关系, 等效后 R_f 如式(20)所示。

$$R_f = Z_{eq1} \frac{U_1}{E_{eq1} - U_1} \quad (20)$$

由式(20)可知, 过渡电阻随故障点电压变化而变化, 考虑电压跌落程度从 0~1 变化, 可涵盖各种故障情况。



(a) f_1 故障后系统正序网络



(b) 戴维南等效图

图6 故障后系统正序网络及其戴维南等效图

Fig. 6 Positive sequence networks of post-fault systems and Davignan equivalence diagram

其次, 求解正序故障附加网络中的故障附加电流。由上述分析可知, 需求解 DG 与故障附加电源提供短路电流的最小比值, 才能得到区内、外故障下故障分量阻抗制动量与动作量的关系。区内故障时故障附加电流可由附录 A 式(A4)表示, 由式(A4)可知, DG 故障输出电流对故障附加电源处的短路电流起助增作用, 即故障附加电源单独作用时的 $|I_f|$ 取得最小值, 可采用故障附加电源单独作用时提供的短路电流进行近似分析, 若在此情况下得到的比幅特征满足上述结论, 则实际情况也满足。

区内故障时, 故障附加电源单独作用时提供的短路电流为

$$I_{f1} = -U_{f1} / \left(Z_S + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3 + \frac{Z_{eq1} U_1}{E_{eq1} - U_1} \right) \quad (21)$$

区外故障表达式同区内故障, 只是等值阻抗和等值电源取值不同, 将不同故障下的故障附加电流化简为统一形式, 如式(22)所示。

$$I_{fi} = -U_{fi} / \left(Z_{eqi} + \frac{Z_{eqi} U_{i(1)}}{E_{eqi} - U_{i(1)}} \right) \quad (22)$$

式中, i 取 1 和 2, 分别表示区内、外故障。

将式(22)中电压量统一转化为故障点电压标幺值 u , 并取其模值, 可以得到 $|I_f|$ 与 u 的函数 $f(u)$ 。

$$f(u) = |I_f(u)| = \left[\left(\frac{|E_{eq}|}{U_B} - u \right) U_B^2 \right] / \left(|Z_{eq}| |E_{eq}| \right) = Au + B \quad (23)$$

式中: U_B 为基准电压; $A = -U_B^2 / (|Z_{eq}| |E_{eq}|)$; $B = U_B / |Z_{eq}|$ 。由 $B = -A |E_{eq}| / U_B$ 且 $|E_{eq}| / U_B > 1$ 可知, $A + B > 0$ 成立。

$|\Delta I_{DG}|$ 与并网点电压的关系如式(24)所示。

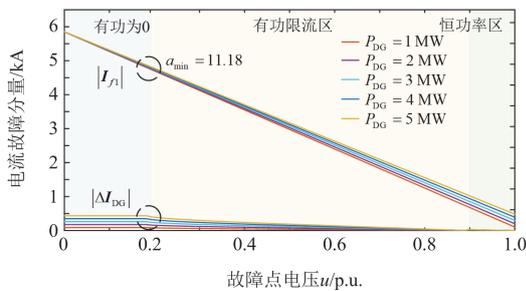
$$|\Delta I_{DG}(k_u)| = \begin{cases} (1/k_u - 1)I_{DGN} & k_u > 0.9 \\ K_{max}(0.9 - k_u)I_{DGN} & \alpha_1 < k_u \leq 0.9 \\ \sqrt{1 + K_{max}^2 - 2\sqrt{K_{max}^2 - K_{sup}^2}(0.9 - k_u)^2} I_{DGN} & 0.2 < k_u \leq \alpha_1 \\ \sqrt{1 + K_{max}^2} I_{DGN} & k_u \leq 0.2 \end{cases} \quad (24)$$

式中, α_1 为 DG 达到电流限幅时的电压标幺值。

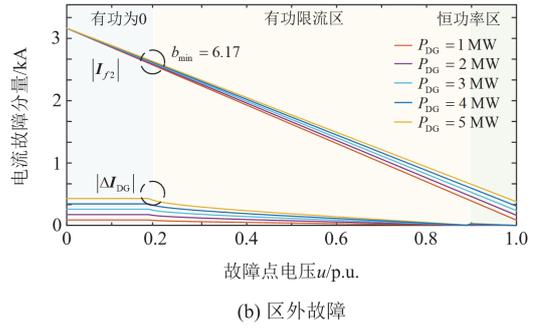
电网发生故障后, DG 会提供无功支撑电压, 因此 DG 并网点电压大于或等于故障点电压。由第 1 节可知, $|\Delta I_{DG}|$ 随着电压跌落程度的增加而增大。在计算 $|I_f|$ 与 $|\Delta I_{DG}|$ 的最小比值时, 可近似将 DG 并网点电压的值取为故障点电压。

考虑 DG 不同出力情况, 模拟区内 f_1 、区外 f_2 发生三相短路, 结合 DG 输出特性和 I_f 关系式, 可得图 7 所示关系图。从图 7 可以看出, 当 $u < 0.2$, $|I_f|$ 单调递减, $|\Delta I_{DG}|$ 为常数, 则 a 单调递减; 当 $0.2 < u < 1$ 时, $|I_f|$ 和 $|\Delta I_{DG}|$ 均单调递减, 而由式(23)、式(24)易知 $|I_f|$ 的变化幅度小于 $|\Delta I_{DG}|$, 则 a 单调递增。因此, 在 $u = 0.2$ 处 a 有最小值。

综合上述分析, 可以得到: 发生区内故障时, $|I_f|$ 与 $|\Delta I_{DG}|$ 的最小比值 a_{min} 大于临界点 a_0 , 满足



(a) 区内故障



(b) 区外故障

图 7 DG 电流故障分量与故障附加电源电流关系

Fig. 7 Relationship between DG current fault component and fault additional power source current

$|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| > |\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}|$; 发生区外故障时, $|I_f|$ 与 $|\Delta I_{DG}|$ 的最小比值 b_{min} 大于临界点 b_0 , 满足 $|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| < |\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}|$ 。其实质是区内故障时两侧所计算的阻抗故障分量相位相差较小, 区外故障时两侧所计算的阻抗故障分量相位接近反向, 可以基于该特征构建保护判据, 识别区内外故障。

由于分析故障分量电流比幅时仅考虑了 DG 输出电流幅值的影响, 而其相位也会对上、下游正序阻抗故障分量产生一定影响, 下面将采用 DG 等值阻抗模型分析 DG 相位对两端阻抗的影响。

2.3 DG 相位对故障分量阻抗的影响

1) 区内故障

由 1.2 节分析可知 DG 等值阻抗模值远远大于线路阻抗, 所以其对上游正序阻抗故障分量的相位影响不大; 而随着 R_f 的减小, DG3 电压跌落严重, 其阻抗模值和相角变化范围都比较大, 所以会影响下游正序阻抗故障分量的相位和模值大小, 且对两者相位差影响较大。

2) 区外故障

随着 R_f 的减小, DG1 和 DG2 电压跌落严重, 其阻抗模值和相角变化范围都比较大, 但由于模值远远大于线路阻抗, 所以对上下游正序阻抗故障分量的相位影响不大。

3) 相邻馈线故障

当相邻馈线发生故障时, DG2 和 DG3 电压跌落程度相近, 可近似认为 $Z_{DG2} \approx Z_{DG3}$, 且其模值远远大于线路阻抗, DG 的接入会改变上下游正序阻抗故障分量的模值大小和相位, 但对两者相位差影响较小。

综上所述, 发生区内故障时, DG 阻抗角对上下游正序阻抗故障分量相位差影响较大, 而故障时 DG 输出的 I_q 随电压跌落程度的增大而增大, 对

Z_{DG} 的相位影响也越大, 可能会导致 2.2 节结论不成立, 发生区外和相邻馈线故障时, DG 阻抗角不影响上述结论。为解决区内故障在电压跌落严重时阻抗故障分量相位特征不明显的问题, 需进一步挖掘系统正序阻抗特征以识别高电压跌落故障。

2.4 正序阻抗比幅特征

本节将对不同故障下线路的阻抗特性进行分析, 并提出适用于高电压跌落故障的正序阻抗比幅判据。

以图 2 所示的配电网为例, 发生区内、外故障时保护两端的正序阻抗如附录 B 式(B1)和式(B2)所示。考虑负荷阻抗远大于线路和系统阻抗, 同时假设电压跌落较深, 则区内故障时两端正序阻抗为

$$\begin{cases} Z_{Up} \approx \alpha Z_3 + R_f \\ Z_{Lo} = Z_5 + Z_{DG3} // Z_{L1} \end{cases} \quad (25)$$

式中: Z_{Up} 为保护上游正序阻抗; Z_{Lo} 为保护下游正序阻抗; Z_{DG3} 为 DG3 等值阻抗。

区外故障时两端正序阻抗为

$$\begin{cases} Z_{Up} = Z_3 + Z_{DG2} // (Z_4 + Z_{Lo}) \\ Z_{Lo} \approx \alpha Z_5 + R_f \end{cases} \quad (26)$$

式中, Z_{DG2} 为 DG2 等值阻抗。

相邻馈线故障时两端正序阻抗为

$$\begin{cases} Z_{Up} = Z_3 + Z_{DG2} // (Z_4 + Z_{Lo}) \\ Z_{Lo} \approx Z_5 + Z_{DG3} // Z_{L1} \end{cases} \quad (27)$$

相邻馈线故障时, 故障点下游和上游的正序阻抗幅值比满足:

$$\frac{|Z_{Lo}|}{|Z_{Up}|} \leq 1 + \frac{|Z_{Lo}|}{|Z_{DG2}|} \quad (28)$$

由式(25)一式(28)可以得出结论: 当发生高电压跌落的区外故障时, 故障点下游和上游的正序阻抗幅值比小于 1; 当发生高电压跌落的区内故障时, 故障点下游和上游的正序阻抗幅值比远大于 1; 当发生高电压跌落的相邻馈线故障时, 故障点下游和上游的正序阻抗幅值比接近于 1; 可以基于该特征构建保护判据, 识别区内外故障。

3 阻抗差动保护方案

由上节分析可知, 区内外故障时故障分量阻抗动作量和制动量的关系有显著差异, 基于此, 构建了故障分量阻抗差动保护判据, 但在发生区内故障且电压跌落程度严重时, 保护判据可能会有死区, 因此, 又构建了适用高电压跌落的正序阻抗比幅判据, 两者相互配合, 共同构成阻抗差动保护方案。

3.1 保护判据

启动判据: 正常运行时, 系统两端电流变化很小; 故障时, 系统两端电流变化量较大, 可利用这一特征构造启动判据。为避免系统电流波动导致保护频繁启动, 通过对离散化后的电流变化量进行积分构造启动判据。当满足式(29)时, 保护启动。

$$I(t) = \sum_{m=n_t}^{n_t+T/2} [i(m) - i(m-T/2)] > I_{set} \quad (29)$$

式中: $I(t)$ 为一段时间内电流变化量的累加; $T/2$ 为积分窗口的时间; $i(m)$ 为电流的采样值; I_{set} 为启动判据的门槛值。

启动判据的整定必须能够消除区内负荷瞬间变化及电流波动所造成的影响。以两端测量电流的突变量作为启动判据, 如式(30)所示。

$$I_{set} > \Delta I \quad (30)$$

式中, ΔI 为保护区域内电流变化最大的幅值门槛, 实际中可根据抗过渡电阻能力和可靠性要求调整。

基于上述故障分量阻抗动作量和制动量存在的明显“差异”, 可以构成保护判据, 其表达式为

$$|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| > k |\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}| \quad (31)$$

式中, k 为计及数据测量误差的可靠系数, 选取 k 为 0.9; 计及异常数据影响, 当 Up 侧和 Lo 侧故障分量阻抗 ΔZ_{Up} 、 ΔZ_{Lo} 特征持续 0.05 s 满足式(31), 认为可能存在故障, 此时保护动作。

根据保护两端正序阻抗幅值差异, 构建适用于高电压跌落故障的正序阻抗比幅判据。

$$\frac{|Z_{Lo}|}{|Z_{Up}|} > Z_{set} \quad (32)$$

式中, Z_{set} 为阻抗比幅判据整定值。考虑到正常运行及相邻馈线故障时, $|Z_{Lo}|$ 略大于 $|Z_{Up}|$ 的情况, 整定需躲过该值, 即整定值 $Z_{set} > 1 + |Z_{Lo}|/|Z_{DG2}|$, 实际可根据负荷和 DG 容量进行调整, 本文选取 Z_{set} 为 1.8。

3.2 保护流程

为实现所提原理, 阻抗差动保护方案如图 8 所示。

1) 参数获取: 获取保护区域内的线路参数, 计算保护整定值;

2) 启动判据: 采用一段时间内电流变化量的累加作为启动判据, 即 $I(t) > I_{set}$ 。当启动判据满足时, 识别为故障发生时刻, 并记录故障发生时刻前后 2 个周波的电气信息;

3) 故障分量阻抗差动判据: 通过测量装置获取线路两端电压和电流相量, 计算出阻抗故障分量动

作量和制动量，判断阻抗差动判据是否成立，若成立则保护动作，否则进入下一步；

4) 正序阻抗比幅判据：计算保护装置正序阻抗，判断正序阻抗比幅判据是否成立，若成立则保护动作，否则保护不动作。

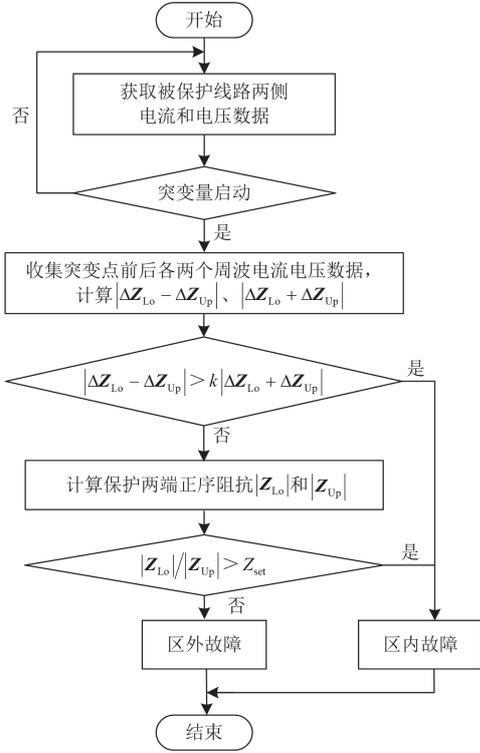


图 8 保护方案流程图

Fig. 8 Protection program flowchart

4 仿真验证

为了验证阻抗差动保护的有效性和可靠性，选取含有 3 条馈线的 IEEE 14 节点 10 kV 配电网，如图 9 所示，在 Matlab/Simulink 平台上搭建仿真模型，

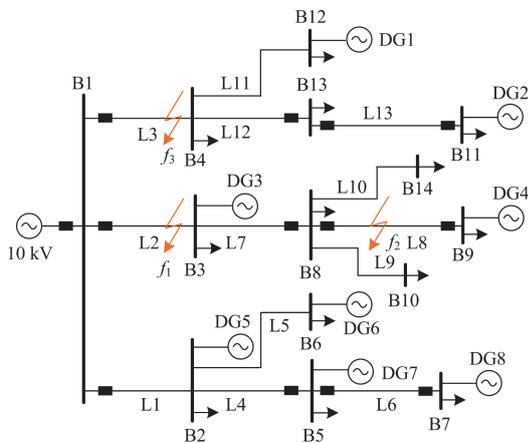


图 9 含分布式电源接入的 IEEE 14 节点配电网拓扑

Fig. 9 IEEE 14 node distribution network with DG

仿真系统中性点采用小电阻接地，验证保护方案在不同故障类型、过渡电阻、DG 渗透率以及 CT 饱和下的动作性能。

4.1 不同故障类型

本节以图 9 所示线路 B1、B8 为例，假设线路两端为上游 Up 和下游 Lo，验证了含 T 接 DG 和负荷线路在区内 f_1 、区外 f_2 和相邻馈线 f_3 分别发生两相短路、三相短路、两相短路接地情况下保护的動作特性，过渡电阻为 1Ω ，DG 渗透率为 40% 时的動作特性如表 1 所示。

表 1 不同故障类型测试结果

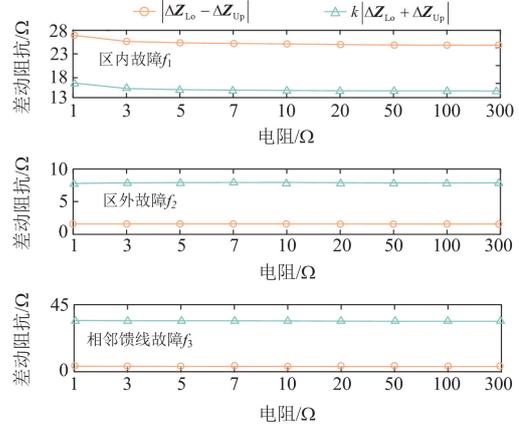
Table 1 Test results for different fault types

故障位置	故障类型	$ \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} $	$k \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} $	$ Z_{Lo} / Z_{Up} $	故障识别
f_1	AB	23.77	15.58	4.39	区内
	ABC	25.79	17.15	12.34	区内
	ABG	24.12	15.83	6.38	区内
f_2	AB	1.75	7.32	0.76	区外
	ABC	1.77	7.44	0.49	区外
	ABG	1.76	7.36	0.68	区外
f_3	AB	1.56	36.47	0.92	区外
	ABC	1.93	38.22	0.89	区外
	ABG	1.64	36.90	0.91	区外

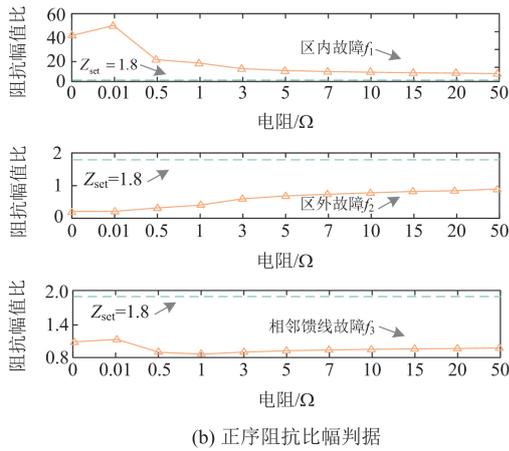
4.2 不同过渡电阻

过渡电阻是影响阻抗差动保护灵敏性的主要因素，图 10 展示了发生区内、区外和相邻线路故障时，不同过渡电阻对保护的影响。

由图 10(a) 可得，对于故障分量正序阻抗差动保护，随着过渡电阻从 1Ω 变化到 300Ω ，区内故障始终满足式(31)，保护可靠动作，区外故障保护可靠不动作，证明故障分量阻抗差动判据具备高过渡电阻的耐受能力。由图 10(b) 可得，对于正序阻抗比幅判据，随着过渡电阻从 0Ω 变化到 50Ω ，区内故障正序阻抗幅值比逐渐减小，但始终大于整定值，保护可靠动作；区外和相邻馈线故障时，保护判据值



(a) 故障分量正序阻抗差动判据



(b) 正序阻抗幅判据

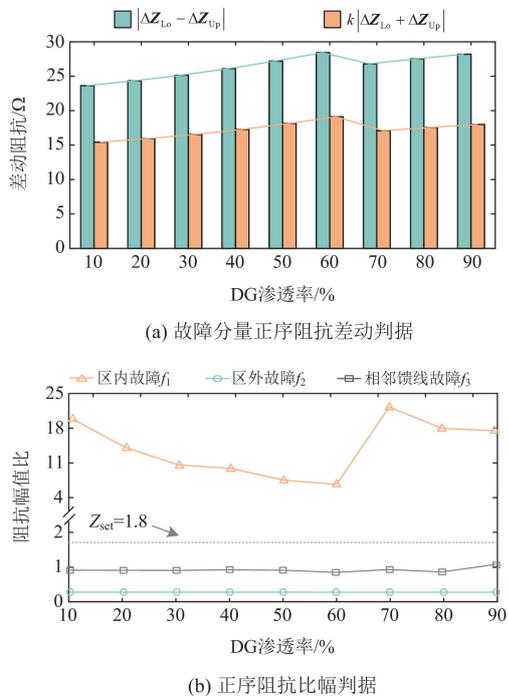
图 10 不同过渡电阻保护仿真结果

Fig. 10 Simulation results of different transition resistance

一直处于整定值之下, 且仍具有一定的裕度, 证明阻抗幅判据在低过渡电阻时具有更高的灵敏度。

4.3 不同 DG 渗透率

随着电网的发展, DG 渗透率不断增加。为验证不同 DG 渗透率下保护的性能, 逐步增加区内 DG 的接入容量, 使 DG 渗透率在 10%~90% 之间变化。区内 f_1 发生三相短路故障, 过渡电阻为 1Ω , 故障分量正序阻抗差动保护动作特性如图 11(a) 所示; 区内 f_1 、区外 f_2 和相邻线路 f_3 发生三相短路故障, 过渡电阻为 0.1Ω , 正序阻抗幅值比如图 11(b) 所示。



(a) 故障分量正序阻抗差动判据

(b) 正序阻抗幅判据

图 11 DG 渗透率对保护动作特性的影响

Fig. 11 Effect of DG permeability on protection action characteristics

由图 11(a) 可知, 在不同渗透率下, 区内故障始终满足 $|\Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up}| > k|\Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up}|$, 保护均能正确动作, 即所提保护能够适应不同 DG 渗透率的场景; 由图 11(b) 可知, 在不同渗透率下, 区内故障正序阻抗幅值比始终大于整定值, 区外和相邻馈线故障时, 阻抗幅值比一直处于整定值之下, 保护能正确识别区内外故障。

4.4 CT 饱和

在 Up 侧模拟 CT 饱和, 设置三相故障, a 相电流互感器饱和。设置 CT 饱和深度为 3 ms、5 ms。表 2 展示了存在 CT 饱和时, 不同位置故障时保护的動作特性。

表 2 Up 侧 CT 饱和和仿真结果

Table 2 Up-side CT saturation simulation results

故障位置	饱和深度	角度变化	$ \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} $	$k \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} $	故障识别
f_1	3 ms	15°	32.89	11.37	区内
		30°	32.29	12.68	区内
	5 ms	15°	39.76	5.93	区内
		30°	38.93	9.39	区内
f_2	3 ms	15°	4.941	13.10	区外
		30°	5.768	12.83	区外
	5 ms	15°	11.31	18.90	区外
		30°	11.94	18.57	区外
f_3	3 ms	15°	44.54	78.17	区外
		30°	46.84	77.07	区外
	5 ms	15°	88.2	117.54	区外
		30°	90.17	116.28	区外

表 2 所示的不同饱和深度下的仿真结果表明, CT 饱和会改变测量阻抗的幅值和角度, 随着 CT 饱和的加剧, 测量阻抗故障分量的变化也逐渐增大。但无论饱和深度如何, 区内故障均满足式(31), 区外故障不满足式(31), 保护能可靠动作。

综上所述, 阻抗差动保护方案对数据同步的要求大大降低, 更适合现有配电网的通信基础设施, 能有效耐受不同过渡电阻和不同 DG 渗透率。

5 结论

本文考虑现有配电网结构、通信基础、DG 故障特性和渗透率, 提出一种考虑高比例逆变型分布式电源接入的阻抗差动保护。

1) 差动阻抗和制动阻抗比值基本围绕某一固定值, 小范围随机波动, 基本不受分布式电源占比的影响, 能适用于高比例分布式电源的接入。

2) 正序阻抗幅判据弥补了在电压跌落严重时 DG 阻抗角对两端故障分量阻抗的影响, 提高了

保护的灵敏性和可靠性。

3) 能够可靠识别区内、区外故障，具有较强的抗过渡电阻能力，且适用于线路存在不可测负荷分支的情况。

4) 所提方法为双端保护，只需使用两端的量测数据，无需为 T 接分支增加额外的量测装置，且 CT 饱和时保护判据仍然成立，对配电网保护可靠性的提升具有工程实用意义。

附录 A

由于 $|I_f|$ 与 $|\Delta I_{DG}|$ 的比值未知，无法判断不同故障下故障分量阻抗制动量与动作量的特征关系。现就不同故障下 $|I_f|$ 与 $|\Delta I_{DG}|$ 的比值对抗阻特征的影响进行详细分析。

为了获取区内故障时故障分量阻抗制动量与动作量的幅值关系，取其模的平方并作差，如式(A1)所示。

$$\begin{aligned} & \left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right|^2 - \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|^2 = \\ & (-2R_4 + 2(a\alpha - 2)R_3 + 2(a-2)R_2 + 2(a-3)(R_s + R_1)) \cdot \\ & \left(2R_2 + \left(2 - \frac{2}{a-2} \right) (R_s + R_1) \right) + (-2X_4 + \\ & 2(a\alpha - 2)X_3 + 2(a-2)X_2 + 2(a-3)(X_s + X_1)) \cdot \\ & \left(2X_2 + \left(2 - \frac{2}{a-2} \right) (X_s + X_1) \right) \end{aligned} \quad (A1)$$

式中， a 为区内故障 $|I_f|$ 与 $|\Delta I_{DG}|$ 的比值。

将 $\left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right|^2 - \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|^2$ 的实部构建为与 a 相关的函数 $\zeta(a)$ ，如式(A2)所示。

$$\zeta(a) = (Da - E) \cdot \left(-\frac{2}{a-2} F + G \right) \quad (A2)$$

式中： $D = 2\alpha R_3 + 2R_2 + 2(R_s + R_1)$ ； $E = 2R_4 + 4R_3 + 4R_2 + 6(R_s + R_1)$ ； $F = (R_s + R_1)$ ； $G = 2R_2 + 2(R_s + R_1)$ 。

对 $\zeta(a)$ 求导，可得式(A3)。

$$\xi'(a) = \frac{4DF - 2EF}{(a-2)^2} + DG \quad (A3)$$

令 $\xi'(a) = 0$ ，可得到极值点 $a_{t0} = 2 + \sqrt{\frac{2EF - 4DF}{DG}}$ 。按照同样的方法计算得到虚部的极值点 a_{x0} ，并取 $a_0 = \min\{a_{t0}, a_{x0}\}$ 。当 $a > a_0$ 时， $\xi'(a) > 0$ ， $\left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right|^2 - \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|^2$ 单调递增且在 a_0 处有最小值。因此，需获得 a 的最小值 a_{\min} ，才能判断 $\left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right|^2 - \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|^2$ 的最小值与

零的关系。若 $a_{\min} > a_0$ 且在 a_{\min} 处有 $\left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right|^2 - \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|^2 > 0$ ，则发生区内故障时均有 $\left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right| > \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|$ 。

同理可以得到，当 $b > b_0$ 时， $\left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right|^2 - \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|^2 < 0$ 均成立。因此，当 $b_{\min} > b_0$ 时，发生区外故障时均有 $\left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right| < \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|$ 。

综合上述分析，可以得到：发生区内故障时， $a_{\min} > a_0$ ，则故障分量阻抗特征关系存在 $\left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right| > \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|$ ；发生区外故障时，若 $b_{\min} > b_0$ ，则 $\left| \Delta Z_{Lo} - \Delta Z_{Up} \right| < \left| \Delta Z_{Lo} + \Delta Z_{Up} \right|$ 成立。因此，需求解 $|I_f|$ 与 $|\Delta I_{DG}|$ 的最小比值，才能得到区内外故障下故障分量阻抗制动量与动作量的关系。

由图 3 可得，区内故障时，故障附加电源处的短路电流为

$$\begin{aligned} -I_{f1} = & -\frac{U_{f1}}{\left[\frac{R_f + (Z_s + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3) //}{((1-\alpha)Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_{L1})} \right]} - \\ & \frac{\Delta I_{DG1}(Z_s + Z_1)}{\left[\frac{Z_s + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3 + R_f //}{((1-\alpha)Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_{L1})} \right]} \cdot \\ & \frac{(1-\alpha)Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_{L1}}{R_f + (1-\alpha)Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_{L1}} - \\ & \frac{\Delta I_{DG2}(Z_4 + Z_5 + Z_{L1})}{\left[\frac{(Z_s + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3) // R_f +}{(1-\alpha)Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_{L1}} \right]} \cdot \\ & \frac{Z_s + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3}{R_f + Z_s + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3} - \\ & \frac{\Delta I_{DG3}Z_{L1}}{\left[\frac{(Z_s + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3) // R_f +}{(1-\alpha)Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_{L1}} \right]} \cdot \\ & \frac{Z_s + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3}{R_f + Z_s + Z_1 + Z_2 + \alpha Z_3} \end{aligned} \quad (A4)$$

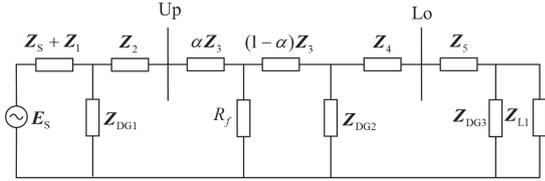
附录 B

图 B1 为故障后系统正序网络。其中， Z_{DG1} — Z_{DG5} 为 DG1—DG5 的等值阻抗。由图 B1(a)可得区内故障时两端正序阻抗如式(B1)所示。

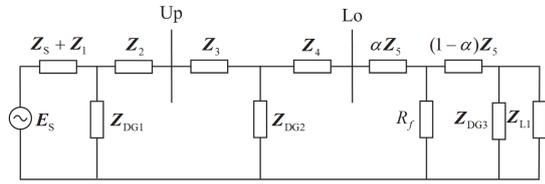
$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{Up} = \alpha \mathbf{Z}_3 + R_f // ((1-\alpha)\mathbf{Z}_3 + \mathbf{Z}_{DG2} // (\mathbf{Z}_4 + \mathbf{Z}_{Lo})) \\ \mathbf{Z}_{Lo} = \mathbf{Z}_5 + \mathbf{Z}_{DG3} // \mathbf{Z}_{L1} \end{cases} \quad (\text{B1})$$

由图 B1(b)可得区外故障时线路两端正序阻抗如式(B2)所示。

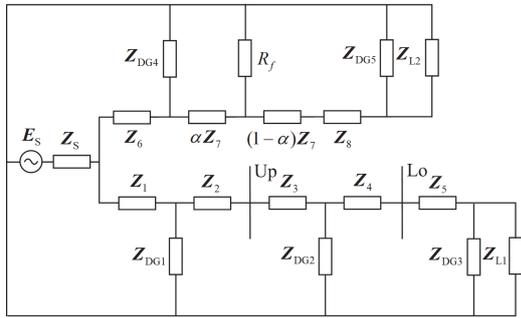
$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{Up} = \mathbf{Z}_3 + \mathbf{Z}_{DG2} // (\mathbf{Z}_4 + \mathbf{Z}_{Lo}) \\ \mathbf{Z}_{Lo} = \alpha \mathbf{Z}_5 + R_f // ((1-\alpha)\mathbf{Z}_5 + \mathbf{Z}_{DG2} // \mathbf{Z}_{L1}) \end{cases} \quad (\text{B2})$$



(a) 区内故障



(b) 区外故障



(c) 相邻馈线故障

图 B1 故障后系统正序网络

Fig. B1 Positive sequence networks of post-fault systems

附录 C

将本文所提保护方法与常用的电流差动保护对比, 常用的电流差动保护包括电流相量差动保护和电流采样值差动保护。

电流相量差动保护动作方程为

$$\begin{cases} |\mathbf{I}_{Up} + \mathbf{I}_{Lo}| > I_{zd} \\ |\mathbf{I}_{Up} + \mathbf{I}_{Lo}| > k_1 |\mathbf{I}_{Up} - \mathbf{I}_{Lo}| \end{cases} \quad (\text{C1})$$

式中: \mathbf{I}_{Up} 和 \mathbf{I}_{Lo} 分别为上、下游的正序电流; I_{zd} 为差动保护启动值; k_1 为制动系数, 一般取 0~1, 本节取 0.5。

电流采样值差动保护动作方程为

$$\begin{cases} |i_{Up}(t) + i_{Lo}(t)| > i_0 \\ |i_{Up}(t) + i_{Lo}(t)| > k_2 |i_{Up}(t) - i_{Lo}(t)| \end{cases} \quad (\text{C2})$$

式中: $i_{Up}(t)$ 和 $i_{Lo}(t)$ 分别为 t 时刻上、下游的瞬时电流; i_0 为采样值差动的启动值, 一般设置为 $0.05 I_n$; k_2 为制动系数, 一般设定为 0.2~0.3, 本节取 0.25, 每个周期采 24 个点, 保护启动后连续 20 个点中有 16 个满足动作方程, 此时保护动作。

将本文所提保护方法与上述两种保护对比, 设置 DG 渗透率从 10%到 90%变化, 区内(f_1)发生两相短路接地故障, 过渡电阻分别为 1Ω 和 20Ω , 仿真结果如图 C1 和图 C2 所示。

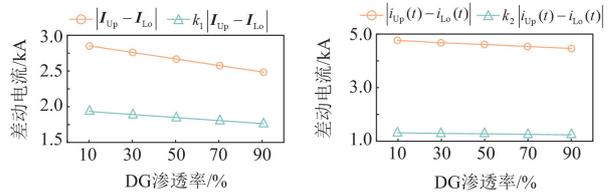

 图 C1 过渡电阻 1Ω 时两种差动保护方法的动作特性

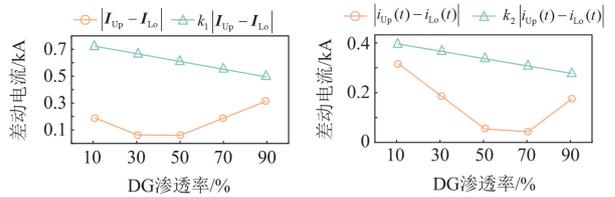
 Fig. C1 Action characteristics of two differential protection methods when the transition resistance is 1Ω

 图 C2 过渡电阻 20Ω 时两种差动保护方法的动作特性

 Fig. C2 Action characteristics of two differential protection methods when the transition resistance is 20Ω

从图 C1 和图 C2 可见: 在过渡电阻较小时, 两种电流差动保护均能正确识别区内外故障, 且受 DG 渗透率影响较小, 当过渡电阻较大时, 随着 DG 渗透率的增加, 动作电流呈现先减小后增大的趋势, 但都小于制动电流, 保护会发生拒动。而本文所提阻抗差动保护方案不受 DG 高渗透率和高过渡电阻的影响。因此, 本文所提阻抗差动保护方案更适用于含高比例分布式电源接入的场景。

附录 D

表 D1 线路及负荷参数

Table D1 Line and load parameters

参数	数值
线路阻抗/ (Ω/km)	$0.2 + j0.117$
L1-L13/km	4
母线 B 至电源距离/km	0.5
总负荷/MW	12.5

表 D2 DG 参数取值
Table D2 DG parameter value

参数	馈线 1	馈线 2	馈线 3
	上的 DG	上的 DG	上的 DG
并网额定电压/kV	10	10	10
额定容量/MW	0.8	0.5	0.6
最大过流系数 K_{max}	1.2	1.2	1.2

参考文献

- [1] 杨杉, 喻希, 罗朝旭, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 44-53.
YANG Shan, YU Xi, LUO Zhaoxu, et al. Asymmetric short-circuit current calculation of a distribution network with inverter-based distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 44-53.
- [2] MOHAMMAD G, SAEED L. Sparsity-based short-circuit analysis of power distribution systems with inverter interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4857-4868.
- [3] XU D, XU J, QIAN C, et al. A pseudo-measurement modelling strategy for active distribution networks considering uncertainty of DGs[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(5): 1-15.
- [4] JIA Ke, YANG Zhe, FANG Yu, et al. Influence of inverter-interfaced renewable energy generators on directional relay and an improved scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11843-11855.
- [5] 陈晓乾, 秦文萍, 杨乐, 等. 逆变式电源接入下的配电网自适应距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 27-38.
CHEN Xiaojian, QIN Wenping, YANG Le, et al. Adaptive distance protection scheme for a distribution network given access of inverter power supply[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 27-38.
- [6] HOOSHYAR A, AZZOUZ A M, EL-SAADANY F E. Distance protection of lines emanating from full-scale converter-interfaced renewable energy power plants—part II: solution description and evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1781-1791.
- [7] 洪丰, 吴通华, 郑玉平, 等. 柔性直流送出系统交流线路的自适应距离保护方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 25-32.
HONG Feng, WU Tonghua, ZHENG Yuping, et al. Adaptive distance protection method for AC lines connected with flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 25-32.
- [8] 黄涛, 赵青春, 谢华, 等. UPFC 接入对线路变化量方向元件的影响[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 85-91.
HUANG Tao, ZHAO Qingchun, XIE Hua, et al. Impact of UPFC on transmission line variation direction elements[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 85-91.
- [9] 李振兴, 王扬馥, 望周丽, 等. 通信限制下多 DG 接入配网的新型电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 80-89.
LI Zhenxing, WANG Yangze, WANG Zhouli, et al. A novel current differential protection for multiple DGs accessing a distribution network with a communication limitation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 80-89.
- [10] 魏东辉, 于舜尧, 房俊龙. 基于综合序电流的含光伏电源配电网纵联保护方案[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 185-192.
WEI Donghui, YU Shun Yao, FANG Junlong. Pilot protection scheme based on integrated sequence current for distribution network with photovoltaic[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(7): 185-192.
- [11] 王宁, 韩国栋, 高厚磊, 等. 有源配电网电流差动保护判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 14-23.
WANG Ning, HAN Guodong, GAO Houlei, et al. The current differential protection criterion of active distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 14-23.
- [12] GAO Houlei, LI Juan, XU Bingyin. Principle and implementation of current differential protection in distribution networks with high penetration of DGs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 565-574.
- [13] 于成澳, 高湛军, 刘朝, 等. 基于自适应制动补偿系数的有源配电网电流纵联差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 1-14.
YU Cheng'ao, GAO Zhanjun, LIU Zhao, et al. A current longitudinal differential protection method based on adaptive braking compensation coefficient for active distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 1-14.
- [14] CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Sequence-component-based current differential protection for transmission lines connected with IIGs[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(12): 3086-3096.
- [15] 周成瀚, 邹贵彬, 杜肖功, 等. 基于正序电流故障分量的有源配电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390.
ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. A pilot protection method based on positive sequence fault component current for active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390.
- [16] 王元上, 袁至, 王维庆. 提升抗时延抖动和数据异常性能的配电网故障自同步 5G 差动保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 139-147.

- WANG Yuanshang, YUAN Zhi, WANG Weiqing. Self-synchronising 5G differential protection scheme for distribution network faults with improved resistance to delay jitter and data anomalies[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 139-147.
- [17] 向珉江, 袁通, 苏善诚, 等. 基于 5G 授时的配网差动保护数据同步方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 8-15.
- XIANG Minjiang, YUAN Tong, SU Shancheng, et al. 5G timing base data synchronization scheme for differential protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 8-15.
- [18] CHEN Guobin, LIU Yiqing, YANG Qifan. Impedance differential protection for active distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 25-36.
- [19] SHARMA K N, SAMANTARAY R S. PMU assisted integrated impedance angle-based microgrid protection scheme[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 183-193.
- [20] JIA Ke, BI Tianshu, REN Zhefeng, et al. High frequency impedance based fault location in distribution system with DGs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 807-816.
- [21] 高岩, 李永丽, 陈晓龙, 等. 基于电流幅值比的有源配电网自适应差动保护原理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 1-7.
- GAO Yan, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Adaptive differential protection principle for active distribution network based on current amplitude ratio[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 1-7.
- [22] 朱妍, 陆于平. 含 DG 配网充分式优选制综合电流幅值差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 68-74.
- ZHU Yan, LU Yuping. Sufficient optimized comprehensive current amplitude differential protection for distribution network with distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 68-74.
- [23] 邓祥力, 陈兴霖. 基于电流故障分量时频矩阵相角差的换流变差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 44-53.
- DENG Xiangli, CHEN Xinglin. Converter transformer differential protection based on the phase angle difference of the time-frequency matrix of a current fault component[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 44-53.
- [24] 顾乔根, 张晓宇, 吕航, 等. 基于故障负序分量的低频变压器快速差动保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 184-192.
- GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, LÜ Hang, et al. Fast differential protection of low-frequency transformer based on fault negative sequence component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 184-192.
- [25] 陈少宇, 黄文焘, 邵能灵, 等. 多端柔性直流配电网高频功率相关性纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 150-159.
- CHEN Shaoyu, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Pilot protection method for multi-terminal flexible DC distribution network based on correlation of high-frequency power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 150-159.
- [26] 童晓阳, 连文超, 滕予非. 有限 PMU 下采用差动有功功率抗过渡电阻的广域后备保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2335-2347, 2543.
- TONG Xiaoyang, LIAN Wenchao, TENG Yufei. The wide-area backup protection based on differential active power against transition resistance using limited PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2335-2347, 2543.
- [27] 郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰. 基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 31-42.
- GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie. Pilot protection method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 31-42.
- [28] HAN Bowen, LI Haifeng, WANG Gang, et al. A virtual multi-terminal current differential protection scheme for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5418-5431.
- [29] 徐晓春, 李奔, 谈浩, 等. 基于同步相量的多端电流差动保护[J]. 电气技术, 2021, 22(11): 88-92.
- XU Xiaochun, LI Ben, TAN Hao, et al. A new multi-terminal line differential relay scheme based on synchronous phasor[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(11): 88-92.
- [30] 陈建平, 桑林卫, 吴在军, 等. 基于幅相关系的有源配电网多端差动保护方案[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 71-77.
- CHEN Jianping, SANG Linwei, WU Zaijun, et al. Multi-terminal differential protection scheme for active distribution network based on amplitude-phase relationship[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 71-77.

收稿日期: 2024-05-10; 修回日期: 2024-09-15

作者简介:

罗国敏(1983—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为配电网保护、故障定位、人工智能等; E-mail: gmluo@bjtu.edu.cn

吴梦宇(2000—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网保护; E-mail: 22121529@bjtu.edu.cn

谭颖婕(1994—), 女, 博士研究生, 研究方向为配电网保护。E-mail: 22110451@bjtu.edu.cn

(编辑 石晋美)