

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.243001

基于故障相相间电流的有源配电网新型电流差动保护方法

王洋¹, 赵若阳¹, 李大勇¹, 黄家凯², 金尧², 郑邳彦³, 陈晓龙³

(1. 国网天津市电力公司, 天津 300010; 2. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300392;
3. 智能配用电装备与系统全国重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 为解决分布式电源(distributed generator, DG)接入配电网导致传统保护难以适用的问题, 基于故障相相间电流, 提出一种适用于有源配电网的新型电流差动保护方法。首先, 考虑不同类型 DG 在低电压穿越期间的控制策略, 分析了 DG 以 T 形接入和专线接入两种形式接入配电网的故障特性, 揭示线路两侧保护装置量测的相电流和故障相相间电流随故障位置变化的规律。其次, 根据区内外故障时故障特性差异, 利用线路两侧保护装置量测的故障相相间电流信息构造新型电流差动保护判据。在此基础上, 改进动作量和制动量计算方式, 使二者降低通信同步性要求。最后, 基于 PSCAD 仿真平台搭建了 10 kV 有源配电网模型, 验证了所提方法的可靠性和有效性。仿真结果表明, 该方法简单易行, 在不同 DG 容量、不同故障位置和不同故障类型的工况下, 相较于传统基于正序电流的电流差动保护方法受到 DG 输出影响更小。

关键词: 分布式电源; 电流差动保护; 有源配电网

A new current differential protection method for active distribution networks based on fault-phase interline currents

WANG Yang¹, ZHAO Ruoyang¹, LI Dayong¹, HUANG Jiakai², JIN Yao², ZHENG Zhiyan³, CHEN Xiaolong³

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300392, China; 3. State Key Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To address the challenge that traditional protection schemes become unsuitable after distributed generators (DGs) are integrated into distribution networks, a novel current differential protection method is proposed for active distribution networks based on fault-phase interline current. First, considering the control strategies of various DGs during low-voltage ride-through, the fault characteristics of both T-connected and bus-connected DGs are analyzed. The variation patterns of phase currents and fault-phase interline currents measured by protection devices on both ends of the line are revealed with respect to fault location. Second, a new current differential protection criterion is constructed using the interline current information from both line terminals, leveraging the distinction between internal and external faults. On this basis, the calculation methods of the operating and restraining quantities are improved to reduce dependency on communication synchronization. Finally, a 10 kV active distribution network model built in PSCAD validates the reliability and effectiveness of the proposed method. Simulation results demonstrate that the method is simple and practical, and compared with traditional positive-sequence current-based differential protection methods, it is less affected by DG outputs under different DG capacities, fault locations, and fault types.

This work is supported by the National Key Research and Development Program for Smart Grid (No. 2024ZD0800800).

Key words: distributed generator; current differential protection; active distribution network

0 引言

当前, 随着“双碳”战略的进一步推进, 以光

伏为主的分布式电源(distributed generator, DG)大量接入配电网中, 在实现绿色、安全、可靠供电的同时, 也给配电网的保护配置带来新的挑战^[1-2]。发生故障后 DG 产生的助增、外汲作用可能导致传统的三段式过电流保护发生误动、拒动, 保护的可靠性、选择性难以保证^[3-6]。

基金项目: 智能电网国家科技重大专项资助(2024ZD0800800);
国网天津市电力公司科技项目资助(电科-研发 2024-02)

为了应对 DG 并网给配电网保护带来的影响,国内外学者对有源配电网保护展开了研究。文献[7-9]提出了基于本地信息的自适应保护方法,无需与远方通信,设备投资少,动作速度快,可以有效应对 DG 接入产生的影响。但文献[9]利用拟合方式估计保护装置量测电流幅值,所得到的整定值不够精确,进而可能导致保护有误动风险。文献[10]基于保护装置本地量测的电压和电流信息实现了多套自适应保护定值的整定,并且在整定过程中考虑了 DG 输出带来的影响。但是仅利用本地信息构成保护判据进行故障识别时,本地电压信息和电流信息在不同故障位置受到的 DG 影响不同,使得多套定值保护范围可能出现重叠。

在城市配电网中,配电网线路长度较短,线路分支复杂,同时还存在配电网线路自动重构导致线路拓扑变化的情况。在更加复杂的拓扑和 DG 接入的情况下,基于本地信息的自适应保护方法所利用的信息较少,可能存在自适应速断保护不具有保护范围、自适应限时速断保护不满足灵敏性要求的情况。因此,此类方法正确判断故障的可靠性不足,此时借助通信的电流差动保护方法能够充分利用线路两侧信息进行区内外故障辨识。文献[11-14]分析了线路中出现不可预测分支对配电网故障电流的影响,利用线路两侧保护装置量测的电流幅值和相位信息设计新型电流差动保护判据,有效克服了线路中存在不可预测分支的影响。文献[15-16]分析了 DG 并入母线的配电网故障特性,引入了新的补偿系数到差动保护判据中,提高了分布式电源接入配电网母线后的保护可靠性,但增加补偿系数的整定方式较为繁琐,进而导致保护判据的构成复杂,不易实施。在部分配电网中, DG 以 T 型接入的方式并入线路,给电流差动保护带来了更多影响。文献[17-18]结合 T 型接入逆变型分布式电源不同工况下的输出特性,通过故障条件下线路两侧保护装置量测信息计算值与实际值的差异构造新型电流差动保护判据,实现了对线路全长的保护。但是所使用的保护方法均无法克服纵联电流差动保护方法对数据严格同步的依赖。

针对 DG 以 T 型接入或专线接入的形式接入后的有源配电网拓扑结构,本文对传统电流差动保护方法进行改进,利用线路两侧保护装置量测的故障相相间电流构造新的差动保护动作量和制动量,以此减小 DG 并网给电流差动保护动作带来的影响。并且通过将动作量和制动量转化为幅值和相位的形式改进差动保护判据表达式,降低差动保护方法对通信条件和同步性的要求。在 DG 接入的配电网线

路中,当 DG 以 T 型接入的方式接入线路时,故障相相间电流相较于正序电流所受 DG 接入的影响更小;当 DG 接入保护装置所在线路下游母线(即专线接入)时,正序电流依然会受到 DG 影响,而故障相相间电流能够不受到 DG 影响。因此,该方法相较于传统基于正序电流的电流差动保护方法受到 DG 影响更小,具有更高的可靠性、灵敏性。

1 有源配电网故障特性分析

1.1 DG 控制策略

根据国家标准 GB/T19964—2012《光伏发电站接入电力系统技术规定》,大容量 DG 并网需具备低电压穿越能力,即在电力系统事故或者扰动引起的并网点电压跌落情况下,在一定的电压跌落范围和时间间隔内, DG 需要能够保证不脱网连续运行^[17]。因此, DG 在进行低电压穿越期间需要具有一定的无功支撑能力,并且此时 DG 存在负序抑制策略,即 DG 仅存在于正序网络中,不存在于负序网络中,其所输出的电流应该实时跟踪并网点正序电压变化。在工程实际中, DG 输出电流满足式(1)和式(2)。

$$I_{sq} = \begin{cases} 0 & (U_s/U_N > 0.9) \\ 2(0.9 - \frac{U_s}{U_N})I_N & (0.3 < U_s/U_N \leq 0.9) \\ 1.2I_N & (U_s/U_N \leq 0.3) \end{cases} \quad (1)$$

$$I_{sd} = \begin{cases} P_N/(3U_s) & (U_s/U_N > 0.9) \\ 0 & (U_s/U_N \leq 0.9) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{sq} 为 DG 输出的无功电流; I_{sd} 为 DG 输出的有功电流; P_N 为 DG 并网容量; U_s 为 DG 并网点正序电压幅值; U_N 为系统的额定相电压幅值; I_N 为 DG 的额定电流。

同时,也存在一部分 DG 在低电压穿越时同时输出有功和无功电流,其输出的无功电流 I_{sq} 同式(1)一致,有功电流 I_{sd} 随 DG 并网点正序电压幅值 U_s 和系统的额定相电压幅值 U_N 变化规律如式(3)所示^[18-20]。

$$I_{sd} = \begin{cases} P_N/(3U_s) & (U_s/U_N > 0.9) \\ \min \left[\begin{array}{l} P_N/(3U_s), \\ \sqrt{(1.2I_N)^2 - I_{sq}^2} \end{array} \right] & (0.3 < U_s/U_N \leq 0.9) \\ 0 & (U_s/U_N \leq 0.3) \end{cases} \quad (3)$$

本文将有源配电网故障特性分为两种情况进行进一步分析,其中一种为 DG 以 T 型接入的方式接入被保护线路内部,另一种情况则是 DG 接入被保

护线路下游区域。

1.2 DG 接入点位于被保护线路内部

如图 1 所示, 简单城市配电网线路中, 在馈线首端和馈线末端各配置一个保护装置, 分别为 CB_1 和 CB_2 , DG 以 T 型接入的方式接入线路 AC 中, 其并网节点为点 B。以下将分析 f_1 、 f_2 、 f_3 分别发生短路故障时保护装置的量测电流。

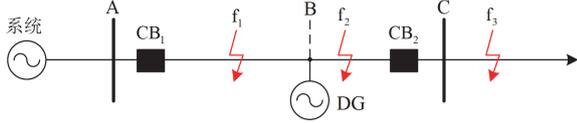


图 1 DG 接入被保护线路中的有源配电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DG access to an active distribution network in a protected line

根据标准《3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》(DL/T 584—2017)所规定, 在短路电流计算过程中可“不计线路电容电流和负荷电流的影响”“不计故障点的相间电阻和接地电阻”, 因此在本文的故障特性分析中忽略了故障情况下负荷阻抗的影响。

1) f_1 处发生故障的故障特性

当 DG 接入点上游 f_1 处发生两相相间短路故障时, 系统正序网络和负序网络在故障点处并联。而此时为了保证三相电流对称, 缓解换流器性能变差、器件过热的问題, DG 的网侧变流器通常存在负序抑制策略^[21-23], 保证其仅存在于正序网络中, 系统复合序网图如图 2 所示。

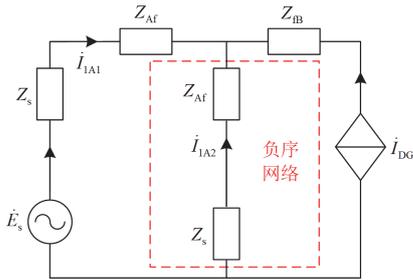


图 2 f_1 发生故障时复合序网图

Fig. 2 Composite sequence diagram when a fault occurs at f_1

图 2 中: \dot{E}_s 表示系统电源电势; Z_s 表示系统阻抗; Z_{Af} 、 Z_{Bf} 分别表示点 A 至故障点和故障点至点 B 的线路阻抗, 同时也等于线路正序阻抗和负序阻抗; \dot{I}_{DG} 表示 DG 输出的正序电流; \dot{I}_{A1} 、 \dot{I}_{A2} 分别表示保护 CB_1 量测的 A 相正序、负序电流。由图 2 可得, CB_1 量测的 A 相正、负序电流表达式如式(4)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{A1} = [\dot{E}_s - \dot{I}_{DG}(Z_s + Z_{Af})] / (Z_s + Z_{Af}) \\ \dot{I}_{A2} = -[\dot{E}_s + \dot{I}_{DG}(Z_s + Z_{Af})] / (Z_s + Z_{Af}) \end{cases} \quad (4)$$

从保护装置 CB_1 量测电流相分量与序分量的关系可得保护装置 CB_1 量测的相电流和故障相相间电流, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{1A} = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{DG} \\ \dot{I}_{1B} = a^2 \dot{I}_{A1} + a \dot{I}_{A2} = \frac{1}{2} \dot{I}_{DG} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\dot{E}_s}{Z_s + Z_{Af}} \right) \\ \dot{I}_{1C} = a \dot{I}_{A1} + a^2 \dot{I}_{A2} = \frac{1}{2} \dot{I}_{DG} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\dot{E}_s}{Z_s + Z_{Af}} \right) \\ \dot{I}_{1BC} = -j\sqrt{3} \dot{E}_s / (Z_s + Z_{Af}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: \dot{I}_{1A} 、 \dot{I}_{1B} 、 \dot{I}_{1C} 分别表示 A、B、C 相电流; \dot{I}_{1BC} 表示 BC 相间电流; $a = -(1 - j\sqrt{3})/2$ 为算子。

若 DG 接入点上游 f_1 处发生三相短路故障, 在复合序网图中表示为负序网络线路阻抗为 0, 保护装置 CB_1 量测的 BC 相间电流表达式如式(6)所示, 其幅值与 BC 两相相间短路故障时的幅值相同。

$$\dot{I}_{1BC} = -j\sqrt{3} \dot{E}_s / (Z_s + Z_{Af}) \quad (6)$$

2) f_2 处发生故障的故障特性

当 DG 接入点下游 f_2 处发生两相相间短路故障时, 系统复合序网图如图 3 所示。

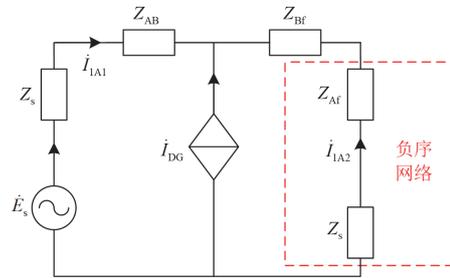


图 3 f_2 发生故障时复合序网图

Fig. 3 Composite sequence diagram when a fault occurs at f_2

保护装置 CB_1 量测的电流如式(7)所示。

$$\dot{I}_{1BC} = j\sqrt{3}(-\dot{E}_s + \dot{I}_{DG} Z_{Bf}) / (Z_s + Z_{AB} + Z_{Bf}) \quad (7)$$

式中: Z_{AB} 表示点 A 至点 B 的线路阻抗; Z_{Bf} 表示点 B 至故障点的线路阻抗。

若在 DG 接入点下游 f_2 处发生三相短路故障, CB_1 量测的 BC 相间电流幅值与 BC 两相相间短路故障时幅值相同。

此时, 不论发生 BC 两相相间短路故障还是三相短路故障, 保护 CB_2 量测的各相电流均为 0。

3) f_3 处发生故障的故障特性

当被保护线路 AB 下游 f_3 处发生两相相间短路故障时, 系统复合序网图如图 4 所示。

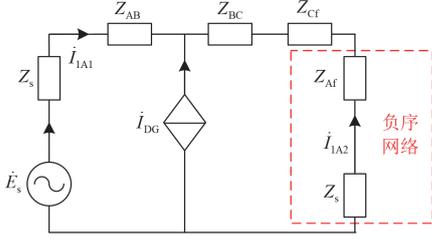


图 4 f_3 发生故障时复合序网图

Fig. 4 Composite sequence diagram when a fault occurs at f_3

保护装置 CB_1 量测的电流如式(8)所示。

$$\dot{I}_{1BC} = j\sqrt{3} \frac{-\dot{E}_s + \dot{I}_{DG}(Z_{BC} + Z_{Cf})}{Z_s + Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{Cf}} \quad (8)$$

式中: Z_{BC} 表示点 B 至点 C 的线路阻抗; Z_{Cf} 表示点 C 至故障点的线路阻抗。

此时, 保护装置 CB_2 的量测电流如式(9)所示。

$$\dot{I}_{2BC} = j\sqrt{3} \frac{\dot{E}_s + \dot{I}_{DG}(Z_s + Z_{AB})}{Z_s + Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{Cf}} \quad (9)$$

若被保护线路 AB 下游 f_3 处发生三相短路故障, CB_1 量测的 BC 相间电流与 BC 两相相间短路故障时幅值相同, 其表达式如式(8)和式(9)所示。

综上所述, 当 DG 接入被保护线路内部时, 线路两侧的 BC 相间电流矢量和如式(10)所示。所得结论依据的基础原理是基尔霍夫电流定律, 因此结论不会因为线路参数的不对称而受影响。

$$\dot{I}_{1BC} + \dot{I}_{2BC} = \begin{cases} -j\sqrt{3}\dot{E}_s/(Z_s + Z_{Af}) & (\text{DG上游故障}) \\ j\sqrt{3} \frac{\dot{E}_s - \dot{I}_{DG}Z_{Bf}}{Z_s + Z_{AB} + Z_{Bf}} & (\text{DG下游故障}) \\ j\sqrt{3}\dot{I}_{DG} & (\text{区外故障}) \end{cases} \quad (10)$$

1.3 DG 接入点位于被保护线路外部

如图 5 所示, 此时被保护线路为线路 AB, DG 接入点为母线 B, 以下将分析 f_4 、 f_5 分别发生短路故障时保护装置的量测电流。

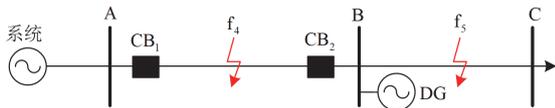


图 5 DG 接入被保护线路下游的有源配电网示意图

Fig. 5 Schematic diagram of DG access to an active distribution network of the protected line downstream

1) f_4 处发生故障的故障特性

当被保护线路内 f_4 处发生两相相间短路故障

时, 系统复合序网图与 f_1 处发生故障时的复合序网图相同。同理可得, CB_1 量测的 BC 相间电流如式(11)所示。

$$\dot{I}_{1BC} = -j\sqrt{3}\dot{E}_s/(Z_s + Z_{Af}) \quad (11)$$

此时, CB_2 量测的 BC 相间电流如式(12)所示。

$$\dot{I}_{2BC} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{DG} \quad (12)$$

若被保护线路内 f_4 处发生三相短路故障, CB_1 和 CB_2 量测的 BC 相间电流表达式与式(11)和式(12)相同, 其幅值均与 BC 两相相间短路故障时幅值相同。

2) f_5 处发生故障的故障特性

当被保护线路外 f_5 处发生 BC 两相相间短路故障时, 复合序网图与 f_2 处发生故障时复合序网图相同。同理可得, CB_1 量测的 BC 相间电流如式(13)所示。

$$\dot{I}_{1BC} = j\sqrt{3}(-\dot{E}_s + \dot{I}_{DG}Z_{Bf})/(Z_s + Z_{AB} + Z_{Bf}) \quad (13)$$

此时, CB_2 量测的 BC 相间电流如式(14)所示。

$$\dot{I}_{2BC} = j\sqrt{3}(\dot{E}_s - \dot{I}_{DG}Z_{Bf})/(Z_s + Z_{AB} + Z_{Bf}) \quad (14)$$

若在被保护线路外 f_5 处发生三相短路故障, 在复合序网图中表示为负序网络线路阻抗为 0, CB_1 和 CB_2 量测的 BC 相间电流与 BC 两相相间短路故障时幅值相同, 其表达式如式(13)和式(14)所示。

综上所述, 当 DG 接入被保护线路外部时, 线路两侧保护量测的 BC 相间电流矢量和表示为

$$\dot{I}_{1BC} + \dot{I}_{2BC} = \begin{cases} -j\sqrt{3} \frac{\dot{E}_s + \dot{I}_{DG}(Z_s + Z_{Af})}{Z_s + Z_{Af}} & (\text{区内故障}) \\ 0 & (\text{区外故障}) \end{cases} \quad (15)$$

2 差动保护判据的设置

通常差动保护的判据需要设置动作电流 I_d 和制动电流 I_{res} , 利用区内故障时动作电流大于制动电流、区外故障时动作电流小于制动电流的特性完成保护的整定, 因此, 保护的判据设置方式如式(16)所示。

$$I_d > I_{res} \quad (16)$$

根据前文所述的故障特性, 在有源配电网中, 动作判据中动作电流设置可采用线路两侧保护装置量测的故障相相间电流构造线路差动保护判据, 以发生 BC 两相相间短路故障为例, 其表达式为

$$I_d = |\dot{I}_{1BC} + \dot{I}_{2BC}| \quad (17)$$

动作判据中制动电流 I_{res} 的常用构造方式包括固定阈值制动量、比率制动量和标积制动量, 其中比率制动量 I_{res_ratio} 和标积制动量 $I_{res_product}$ 有着更优

良的制动特性, 其表达形式如式(18)所示。

$$\begin{cases} I_{\text{res_ratio}} = K_1 | \dot{I}_{1\text{BC}} - \dot{I}_{2\text{BC}} | / 2 \\ I_{\text{res_product}} = \text{Re} \sqrt{-K_2 I_{1\text{BC}} I_{2\text{BC}} \cos \theta_{12}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: K_1 、 K_2 分别为比率制动系数和标积制动系数; θ_{12} 表示线路两侧故障相相间电流相位差。

文献[24]通过分析标积制动原理与比率制动原理之间的对应关系图, 明确了在满足式(19)的前提下, 当发生区内故障时, 关系图中标积制动量相比于比率制动量距离动作边界更远, 所以使用标积制动原理的保护在区内故障时将更灵敏; 当发生区外故障时, 理想情况下, 两种制动量在关系图中处于同一位置, 即两种制动量在发生区外故障时制动效果相同。

$$K_2 = 4K_1^2 / (4 - K_1^2) \quad (19)$$

下面将以发生 BC 两相相间故障为例, 对不同故障位置下由故障相相间电流构成的动作电流与传统基于正序电流的动作电流进行对比, 同时对两种制动电流的制动效果进行比较分析。

2.1 DG 接入点位于被保护线路内部

1) f_1 处发生故障时的动作电流与制动电流

当 f_1 处发生 BC 两相相间短路故障时, 由传统正序电流与 BC 相间电流构成的动作电流如式(20)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} + \dot{I}_{21} = [\dot{E}_s - \dot{I}_{\text{DG}}(Z_s + Z_{\text{Af}})] / (2Z_s + 2Z_{\text{Af}}) \\ \dot{I}_{1\text{BC}} + \dot{I}_{2\text{BC}} = -j\sqrt{3}\dot{E}_s / (Z_s + Z_{\text{Af}}) \end{cases} \quad (20)$$

式中: \dot{I}_{11} 、 \dot{I}_{21} 分别表示 CB_1 、 CB_2 量测的正序电流。

由式(20)可见, 使用 BC 相间电流构成的动作电流不会受到 DG 输出的影响, 而传统基于正序电流的差动保护方法会受到 DG 输出的影响。

此时制动电流的两种构造方式如式(21)所示。

$$\begin{cases} I_{\text{res_ratio}} = \sqrt{3}K_1 E_s / (2Z_s + 2Z_{\text{Af}}) \\ I_{\text{res_product}} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)可见, 在理想条件下, 标积制动量在 DG 接入被保护线路中, DG 上游发生区内故障时的制动效果更好。

2) f_2 处发生故障时的动作电流与制动电流

当 f_2 处发生 BC 两相相间短路故障时, 由传统正序电流与 BC 相间电流构成的动作电流如式(22)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} + \dot{I}_{21} = \frac{\dot{E}_s - \dot{I}_{\text{DG}}(Z_s + Z_{\text{AB}} + 2Z_{\text{Bf}})}{2(Z_s + Z_{\text{AB}} + Z_{\text{Bf}})} \\ \dot{I}_{1\text{BC}} + \dot{I}_{2\text{BC}} = j\sqrt{3} \frac{-\dot{E}_s + \dot{I}_{\text{DG}} Z_{\text{Bf}}}{Z_s + Z_{\text{AB}} + Z_{\text{Bf}}} \end{cases} \quad (22)$$

由式(22)可见, 由于系统阻抗 Z_s 值远大于线路阻抗 Z_{AB} 和 Z_{Bf} , 在同样的 DG 出力条件下, $\dot{I}_{\text{DG}}(Z_s +$

$Z_{\text{AB}} + 2Z_{\text{Bf}})$ 幅值会远大于 $\dot{I}_{\text{DG}} Z_{\text{Bf}}$ 幅值, 所以相较于传统基于正序电流的差动保护方法, 利用 BC 相间电流构成动作电流受到 DG 的影响更小。

此时制动电流的两种构造方式如式(23)所示。

$$\begin{cases} I_{\text{res_ratio}} = \frac{\sqrt{3}K_1(-\dot{E}_s + \dot{I}_{\text{DG}} Z_{\text{Bf}})}{2(Z_s + Z_{\text{AB}} + Z_{\text{Bf}})} \\ I_{\text{res_product}} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

由式(23)可见, 在理想条件下, 标积制动量在 DG 接入被保护线路中, DG 上游发生区内故障时的制动效果更好。

3) f_3 处发生故障时的动作电流与制动电流

当 f_3 处发生 BC 两相相间短路故障时, 由传统正序电流与 BC 相间电流构成的动作电流如式(24)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} + \dot{I}_{21} = \dot{I}_{\text{DG}} \\ \dot{I}_{1\text{BC}} + \dot{I}_{2\text{BC}} = j\sqrt{3}\dot{I}_{\text{DG}} \end{cases} \quad (24)$$

由式(24)可见, 在发生区外故障时, 两种动作电流的值相似。

BC 相间制动电流的两种构造方式如式(25)所示。

$$\begin{cases} I_{\text{res_ratio}} = \sqrt{3} \frac{K_1}{2} \left| \frac{2\dot{E}_s + \dot{I}_{\text{DG}}(Z_s + Z_{\text{AB}} - Z_{\text{BC}} - Z_{\text{Cf}})}{Z_s + Z_{\text{AB}} + Z_{\text{BC}} + Z_{\text{Cf}}} \right| \\ I_{\text{res_product}} = \frac{\text{Re} \sqrt{3K_2[-\dot{E}_s + \dot{I}_{\text{DG}}(Z_{\text{BC}} + Z_{\text{Cf}})] \times [\dot{E}_s + \dot{I}_{\text{DG}}(Z_s + Z_{\text{AB}})] \cos \theta_{12}}}{|Z_s + Z_{\text{AB}} + Z_{\text{BC}} + Z_{\text{Cf}}|} \end{cases} \quad (25)$$

由式(25)可见, 当且仅当线路两侧的 BC 相间电流幅值相等时, 制动效果难以通过公式进行直接比较。根据文献[24], 当发生区外故障, 两类制动系数满足式(29)时, 两类制动量制动效果相同。

4) f_4 处发生故障时的动作电流与制动电流

当 f_4 处发生 BC 两相相间短路故障时, 将由传统正序电流构成的动作电流与 BC 相间电流构成的动作电流进行比较。

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} + \dot{I}_{21} = [\dot{E}_s + \dot{I}_{\text{DG}}(Z_s + Z_{\text{Af}})] / (Z_s + Z_{\text{Af}}) \\ \dot{I}_{1\text{BC}} + \dot{I}_{2\text{BC}} = -j\sqrt{3} \frac{\dot{E}_s + \dot{I}_{\text{DG}}(Z_s + Z_{\text{Af}})}{Z_s + Z_{\text{Af}}} \end{cases} \quad (26)$$

由式(26)可见, 两种动作电流受到接入到被保护线路外的 DG 的影响相同。

BC 相间制动电流的两种构造方式为

$$\begin{cases} I_{\text{res_ratio}} = \sqrt{3}K_1 \left| \frac{-\dot{E}_s + \dot{I}_{\text{DG}}(Z_s + Z_{\text{Af}})}{2(Z_s + Z_{\text{Af}})} \right| \\ I_{\text{res_product}} = \text{Re} \sqrt{-3K_2 \frac{\dot{E}_s \cdot \dot{I}_{\text{DG}}}{Z_s + Z_{\text{Af}}} \cos \theta_{12}} \end{cases} \quad (27)$$

由式(27)可见,当且仅当线路两侧的 BC 相间电流幅值相等时,两种制动量的制动效果相同,通常标积制动量的效果会更佳。

5) f_5 处发生故障时的动作电流与制动电流

当 f_5 处发生 BC 两相相间短路故障时,将由传统正序电流构成的动作电流与 BC 相间电流构成的动作电流相比较。

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} + \dot{I}_{21} = 0 \\ \dot{I}_{1BC} + \dot{I}_{2BC} = 0 \end{cases} \quad (28)$$

由式(28)可见,此时两种动作电流均不受 DG 出力的影响。

BC 相间制动电流的两种构造方式如式(29)所示。

$$\begin{cases} I_{res_ratio} = \sqrt{3}K_1 \left| \dot{E}_s - \dot{I}_{DG} Z_{Bf} \right| / \left| Z_s + Z_{AB} + Z_{Bf} \right| \\ I_{res_product} = \operatorname{Re} \left(\sqrt{3}K_2 \left| \frac{\dot{E}_s - \dot{I}_{DG} Z_{Bf}}{Z_s + Z_{AB} + Z_{Bf}} \right| \right) \end{cases} \quad (29)$$

由式(29)可见,此时两类制动系数满足式(19)时,两类制动量制动效果相当。

2.2 结合工程实际的动作电流判据设计

1) 判据设计方法改进

在动作判据的设计过程中,需要利用动作电流的幅值,而本文所采用的方法中动作电流的幅值可表示为

$$\begin{aligned} \left| \dot{I}_{1BC} + \dot{I}_{2BC} \right| &= \sqrt{I_{1BC}^2 + I_{2BC}^2 + 2I_{1BC}I_{2BC} \cos \theta_{12}} \leq \\ \left| I_{1BC} - I_{2BC} \right| + 2\sqrt{I_{1BC}I_{2BC}} \cos \frac{\theta_{12}}{2} &\leq \\ \sqrt{\left| I_{1BC}^2 - I_{2BC}^2 \right|} + \sqrt{2\left| I_{1BC}^2 + I_{2BC}^2 \right|} \cos \frac{\theta_{12}}{2} & \end{aligned} \quad (30)$$

式中: I_{1BC} 和 I_{2BC} 分别为 \dot{I}_{1BC} 和 \dot{I}_{2BC} 的幅值。

为了降低差动保护通信的同步性要求,减少通信可靠性给保护带来的影响,本文首先将线路两侧保护量测相电流通过故障相选相和相量作差得到故障相相间电流。在此基础上,将动作电流的计算方式从相间电流相量直接求和的形式改为由相间电流幅值和相位进行表征的形式,从而降低保护方法对通信条件的要求。可以根据式(30)对差动保护动作判据进行改进,改进后的表达式为

$$I_d = \sqrt{\left| I_{1BC}^2 - I_{2BC}^2 \right|} + K_{rel} \sqrt{I_{1BC}^2 + I_{2BC}^2} \cos \frac{\theta_{12}}{2} \quad (31)$$

式中: K_{rel} 为动作系数,表示相位因子在动作电流中所占的比重,为了保证所构造的动作电流在发生区内故障时的灵敏度, K_{rel} 的取值需要大于 $\sqrt{2}$ 。

为了更加直观地分析线路两侧幅值比和相位差对动作电流和制动电流产生的影响,引入电流幅值比 ρ , 其表达式为

$$\rho = \min(I_{1BC}, I_{2BC}) / \max(I_{1BC}, I_{2BC}) \quad (32)$$

当制动量分别采用比率制动量和标积制动量表示时,电流差动保护动作判据分别如式(33)和式(34)所示。

$$\left[\begin{array}{l} \sqrt{1-\rho^2} + \\ K_{rel} \sqrt{1+\rho^2} \cos \frac{\theta_{12}}{2} \end{array} \right] > \frac{K_1}{2} \sqrt{1+\rho^2 - 2\rho \cos \theta_{12}} \quad (33)$$

$$\left[\begin{array}{l} \sqrt{1-\rho^2} + \\ K_{rel} \sqrt{1+\rho^2} \cos \frac{\theta_{12}}{2} \end{array} \right] > \operatorname{Re} \sqrt{-K_2 \rho \cos \theta_{12}} \quad (34)$$

根据式(33)和式(34),绘制了两种制动量分别与动作量配合时在不同幅值比和相位差之间的制动效果图,分别如图6和图7所示。

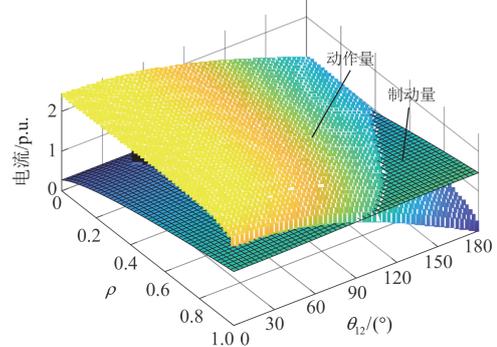


图6 比率制动量与动作量比较图

Fig. 6 Comparison of ratio momentum and action

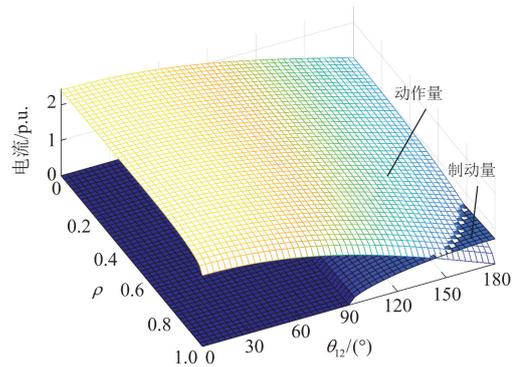


图7 标积制动量与动作量比较图

Fig. 7 Comparison of product braking momentum and action

综上所述,在区外故障的制动量特性层面,相位差 θ_{12} 接近 180° , 幅值比 ρ 接近 1, 两种制动量均显著大于动作电流,能够避免保护误动作。在区内故障时,一方面,在出现“弱馈”现象时,一侧电流幅值近乎为 0, 则标积制动量保持为 0, 并且与动

作电流之间存在较大的差距,有助于区内故障下保护正确动作;另一方面,在相位差 $\theta_{12} < 90^\circ$ 时,从标积制动特性表达式可知,标积制动量也保持为0,同样有助于提高区内故障时保护动作的可靠性^[25]。因此,本文选择标积制动量作为有源配电网新型电流差动保护判据的制动量。

2) 相位获取方法

在有源配电网发生相间短路故障时,由于DG的并网容量并不确定,因此当DG并网容量较小时,可能会发生“弱馈”现象,此时故障分量幅值较小,直接测量方式难以保证准确性。因此采用故障前、后的相间电流相量差来代替相间电流的故障分量进行相位差的计算。

线路两侧保护装置获取相位 θ_1 、 θ_2 的计算方法为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arg(\dot{I}_{1BC} - \dot{I}_{1BCpre}) - \arg(\dot{I}_{1BCpre}) \\ \theta_2 = \arg(\dot{I}_{2BC} - \dot{I}_{2BCpre}) - \arg(\dot{I}_{2BCpre}) \end{cases} \quad (35)$$

式中: \dot{I}_{1BCpre} 和 \dot{I}_{2BCpre} 分别为故障前线路首端和末端保护装置量测的BC相间电流稳态值相量。

由式(35)计算得到的相位可以完全由保护装置本地进行计算,由于故障前线路两侧保护量测电流相位近乎反相,因此在计算相位差时需要补偿 180° ,最终线路两侧保护装置进一步通过通信交换本地的相位信息,可得到相位差 θ_{12} 的表达式为

$$\theta_{12} = |\theta_1 - \theta_2 + 180^\circ| \quad (36)$$

当数据同步和延迟时,单侧保护按照本文所提方法计算得到的相量图如图8所示。图8中: \dot{I}_1 、 \dot{I}_{1pre} 分别为 0° 同步误差时(即数据同步)故障前后保护装置量测的电流稳态相量值; \dot{I}'_1 、 \dot{I}'_{1pre} 分别为 90° 同步误差时(即存在延时)故障前后保护量测的电流稳态相量值。

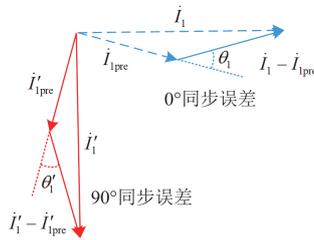


图8 数据同步和延迟时故障相相间短路电流相量图

Fig. 8 Phase diagram of short-circuit currents between faulted phases during data synchronization and delays

由图8可知,由本文所提方法计算出的相位在无延时情况下得到的 θ_1 与在有延时情况下得到的 θ'_1 数值上相等。因此,本文所提方法在避免“弱

馈”现象的同时也能消除同步误差。

3) 启动条件

另外,保护的启动方式按照正序电流突变量躲开能够准确计算相位的最小电流幅值来整定,避免系统正常运行情况下保护发生误动作,其整定方式如式(37)所示。

$$|I_1 - I_{1pre}| > K_3 I_{set} \quad (37)$$

式中: I_1 为保护量测的正序电流幅值; I_{1pre} 为故障前保护量测的正序电流稳态幅值; K_3 为可靠系数,取值大于1; I_{set} 为能够准确计算相位的最小电流幅值,典型值为 1 A ^[25-26]。

3 仿真算例验证

利用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC搭建如图1和图5所示的有源配电网线路模型,验证所提保护方法的合理性。模型中系统电压为 10.5 kV ,系统阻抗为 $j0.942\ \Omega$,图1所示模型中线路AB阻抗为 $Z_{AB} = (2.0295 + j2.2456)\ \Omega$,线路BC阻抗为 $Z_{BC} = (3.0783 + j3.7727)\ \Omega$,线路差动保护判据的动作系数 K_{rel} 和制动系数 K_2 分别设置为1.42和1。

3.1 DG接入点位于被保护线路内部仿真结果

搭建如图1所示有源配电网线路模型,表1、表2所示仿真结果分别为在DG接入点上游 f_1 、DG接入点下游 f_2 处设置BC两相相间短路故障,文献[27]分析表明两相相间短路故障时,DG工作状态为中间态。对低电压穿越时仅输出无功功率的DG和有功功率、无功功率均输出的DG分别进行了研究,分析保护对不同DG并网容量的适用性。故障位置系数为故障点到保护的线路阻抗与保护所在线路的阻抗之比,则确定 f_1 、 f_2 的故障位置系数分别为0.5,即 f_1 、 f_2 分别位于线路AB、BC的中点。

表3所示仿真结果为被保护线路下游 f_3 处设置BC两相相间短路故障,保护装置在不同DG下的适用性。

从表1—表3可以看出,当发生区内两相相间短路故障时,无论是基于故障相相间电流或是正序电流,采用本文所提方法计算得到的动作电流和制动电流都能保证保护正确动作。但是从保护灵敏度的角度出发,相较于基于正序电流的 θ_{12} ,基于相间电流的 θ_{12} 值更加接近 0° ,幅值比 ρ 也更加接近0,表明故障相相间电流受到DG影响更小。因此,结合图8可知,基于相间电流计算的动作电流和制动电流差距更显著,因此使用故障相相间电流构建电流差动保护判据使保护在区内故障拒动的可能性更小。

表 1 f_1 处(区内)发生故障的仿真结果

Table 1 Simulation results of a fault at f_1 (fault in the zone)

DG 并网 容量/MW	故障时 DG 实际输出功率		电流类型	保护 1 量测 电流/A	保护 2 量测 电流/A	幅值比 ρ	$\theta_{12}/(^{\circ})$	I_d/A	I_{res}/A	保护动 作情况
	P/MW	$Q/Mvar$								
0	0	0	相间电流	4562.18	0	0	28.6	10 814.1	0	动作
			正序电流	1391.25	84.82	0.06	-28.8	3297.9	0	动作
2.50	0	1.00	相间电流	4562.00	8.86	0	31.57	10 770.4	0	动作
			正序电流	1349.28	91.56	0.07	34.25	3174.0	0	动作
5.00	0	2.00	相间电流	4562.00	27.85	0.01	46.59	10 487.7	0	动作
			正序电流	1319.81	96.75	0.07	68.85	2860.0	0	动作
2.50	1.17	0.90	相间电流	4554.07	13.59	0	29.66	10 780.0	0	动作
			正序电流	1322.90	96.61	0.07	33.45	3115.9	0	动作
5.00	2.79	1.70	相间电流	4554.45	27.35	0.01	30.26	10 772.2	0	动作
			正序电流	1272.37	106.96	0.08	29.83	3012.8	0	动作

表 2 f_2 处(区内)发生故障的仿真结果

Table 2 Simulation results of a fault at f_2 (fault in the zone)

DG 并网 容量/MW	故障时 DG 实际输出功率		电流类型	保护 1 量测 电流/A	保护 2 量测 电流/A	幅值比 ρ	$\theta_{12}/(^{\circ})$	I_d/A	I_{res}/A	保护动 作情况
	P/MW	$Q/Mvar$								
0	0	0	相间电流	1692.31	0	0	21.60	4043.2	0	动作
			正序电流	568.96	84.85	0.15	-21.96	1361.2	0	动作
2.50	0	0.77	相间电流	1661.50	0	0	17.53	3983.8	0	动作
			正序电流	540.55	87.61	0.16	14.14	1301.9	0	动作
5.00	0	1.47	相间电流	1636.83	0	0	91.87	3246.8	0	动作
			正序电流	519.57	89.83	0.17	97.31	1004.4	77.0	动作
2.50	1.98	0.61	相间电流	1595.40	0.00	0	21.02	3813.8	0	动作
			正序电流	480.93	91.94	0.19	20.24	1153.7	0	动作
5.00	4.27	1.00	相间电流	1527.11	0.00	0	21.24	3649.8	0	动作
			正序电流	431.34	97.03	0.22	19.42	1036.6	0	动作

表 3 f_3 处(区外)发生故障的仿真结果

Table 3 Simulation results of a fault at f_3 (out-of-zone fault)

DG 并网 容量/MW	故障时 DG 实际输出功率		电流类型	保护 1 量测 电流/A	保护 2 量测 电流/A	幅值比 ρ	$\theta_{12}/(^{\circ})$	I_d/A	I_{res}/A	保护动 作情况	I_{res}/I_d
	P/MW	$Q/Mvar$									
0	0	0	相间电流	1206.58	1206.56	1.00	-179.88	9.4	1206.6	不动作	128.36
			正序电流	428.83	428.82	1.00	179.40	7.5	428.8	不动作	57.17
2.50	0	0.57	相间电流	1177.18	1232.18	0.96	-165.39	670.5	1184.7	不动作	1.77
			正序电流	408.94	438.82	0.93	153.64	352.5	401.0	不动作	1.14
5.00	0	1.05	相间电流	1153.08	1253.27	0.92	161.80	872.0	1171.7	不动作	1.34
			正序电流	390.88	446.74	0.87	29.14	1028.8	0	误动作	0
2.50	2.32	0.36	相间电流	1089.97	1288.96	0.85	179.83	691.6	1185.3	不动作	1.71
			正序电流	346.18	459.20	0.75	179.97	301.9	398.7	不动作	1.32
5.00	4.86	0.48	相间电流	1028.24	1355.64	0.76	177.23	941.6	1180.0	不动作	1.25
			正序电流	324.66	482.45	0.67	-175.88	396.4	395.3	误动作	1.00

当发生区外两相相间短路故障时, 由于保护装置量测的正序电流受到 DG 影响更大, 计算得到的相位差相较于无 DG 接入时偏移更加严重, 使计算得到的动作电流在数值上更加接近甚至超过制动电流, 导致基于正序电流的差动保护方法会出现两次

误动作的情况, 此时基于正序电流的电流差动保护的误动率达到 40%。而基于故障相相间电流的差动保护方法均能正确判断为区外故障。

根据表 3 可知, 以制动电流与动作电流之比 I_{res}/I_d 表征差动保护在发生区外故障时防误动能力,

则 5 种情况下基于相间电流的电流差动保护的 I_{res}/I_d 分别为 128.36、1.77、1.34、1.71 和 1.25, 对应的基于正序电流的电流差动保护的 I_{res}/I_d 分别为 57.17、1.14、0、1.32 和 1.00。这表明基于相间电流的差动保护的区外故障防误动能力更强, 验证了本文所提方法相较于传统正序电流差动保护方法的优越性。

3.2 DG 接入点位于被保护线路外部仿真结果

搭建如图 5 所示有源配电网线路模型图, 图 5 中线路 AB 阻抗为 $Z_{AB} = (2.0295 + j2.2456)\Omega$, 线路 BC 阻抗为 $Z_{BC} = (3.0783 + j3.7727)\Omega$, 表 4 所示仿真结果为在 f_4 处设置 BC 两相相间短路故障, 保护在不同 DG 工作状态下的适用性。同 f_1 、 f_2 一致, f_4 的

表 4 f_4 处(区内)发生故障的仿真结果

Table 4 Simulation results of a fault at f_4 (fault in the zone)

DG 并网 容量/MW	故障时 DG 实际输出功率		电流类型	保护 1 量测 电流/A	保护 2 量测 电流/A	幅值比 ρ	$\theta_{12}/(^{\circ})$	I_d/A	I_{res}/A	保护动 作情况
	P/MW	Q/Mvar								
0	0	0	相间电流	4562.50	0	0	28.68	10 813.8	0	动作
			正序电流	1391.12	84.83	0.06	28.21	3300.1	0	动作
2.50	0	1.00	相间电流	4562.11	188.18	0.04	28.86	10 811.8	0	动作
			正序电流	1348.67	96.16	0.07	-57.03	3025.4	0	动作
5.00	0	2.00	相间电流	4562.33	349.64	0.08	54.62	10 298.6	0	动作
			正序电流	1317.35	174.06	0.13	-78.29	2763.2	0	动作
2.50	1.17	0.90	相间电流	4554.43	287.89	0.06	8.28	10 982.3	0	动作
			正序电流	1323.44	69.06	0.05	5.87	3193.4	0	动作
5.00	2.78	1.70	相间电流	4554.56	580.73	0.13	5.48	11 003.2	0	动作
			正序电流	1273.44	224.41	0.18	9.41	3076.0	0	动作

表 5 f_5 处(区外)发生故障的仿真结果

Table 5 Simulation results of a fault at f_5 (out-of-zone fault)

DG 并网 容量/MW	故障时 DG 实际输出功率		电流类型	保护 1 量测 电流/A	保护 2 量测 电流/A	幅值比 ρ	$\theta_{12}/(^{\circ})$	I_d/A	I_{res}/A	保护动 作情况	I_{res}/I_d
	P/MW	Q/Mvar									
0	0	0	相间电流	1674.54	1674.52	1.00	-179.99	8.3	1674.5	不动作	201.75
			正序电流	563.05	563.04	1.00	-179.73	6.0	398.1	不动作	66.35
2.50	0	0.77	相间电流	1642.49	1642.47	1.00	-180.00	8.1	1642.5	不动作	202.78
			正序电流	535.41	535.39	1.00	-179.93	5.3	378.6	不动作	71.43
5.00	0	1.46	相间电流	1618.01	1617.99	1.00	179.99	8.4	1618.0	不动作	192.62
			正序电流	513.72	513.71	1.00	179.22	10.2	363.2	不动作	35.61
2.50	2.00	0.60	相间电流	1576.17	1576.15	1.00	179.96	7.9	1576.2	不动作	199.52
			正序电流	477.48	477.47	1.00	179.94	3.1	337.6	不动作	108.90
5.00	4.30	0.98	相间电流	1507.09	1507.08	1.00	179.99	5.5	1507.1	不动作	274.02
			正序电流	426.31	426.31	1.00	179.99	3.0	301.5	不动作	100.50

当发生区内故障时, 基于故障相相间电流计算的动作电流和制动电流之比 I_d/I_{res} 较基于正序电流计算的 I_d/I_{res} 更大, 表明使用故障相相间电流时保护动作灵敏度更高; 当发生区外故障时, 基于故障相相间电流计算的制动电流和动作电流之比 I_{res}/I_d 较基于正序电流计算的 I_{res}/I_d 更大, 保护在区外故障时

故障位置系数为 0.5, 即 f_4 位于线路 AB 中点。

表 5 所示为在 f_5 处设置 BC 两相相间短路故障的仿真结果。 f_5 的故障位置系数为 0.5, 即 f_5 位于线路 AB 中点。

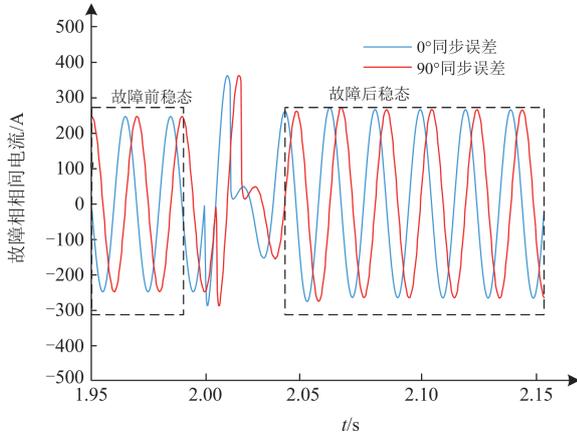
由表 4 和表 5 可知, 当 DG 接入点位于保护所在线路外的母线上时, 从保护灵敏度的角度出发, 基于相间电流的 θ_{12} 比基于正序电流的 θ_{12} 在 f_4 处发生故障时更加接近于 0° , 且幅值比 ρ 更接近于 0, 基于相间电流的 θ_{12} 比基于正序电流的 θ_{12} 在 f_5 处发生故障时更加接近于 $\pm 180^{\circ}$, 且幅值比更接近于 1, 因此故障相相间电流所受 DG 影响更小, 具有更高的判断灵敏度, 更加有利于保护对故障位置的判断。

防误动能力更强。因此, 使用故障相相间电流计算电流差动保护的动作电流和制动电流能获得更优的灵敏度。

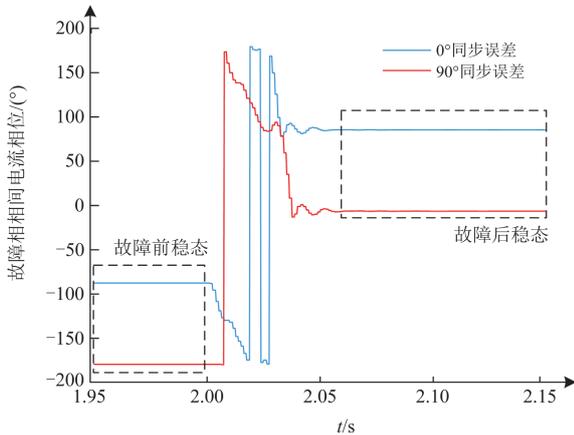
3.3 数据同步性仿真验证

为验证本文所提方法的耐同步误差性, 当 f_4 处在 2.0 s 发生两相相间短路故障后, 保护 2 量测信息

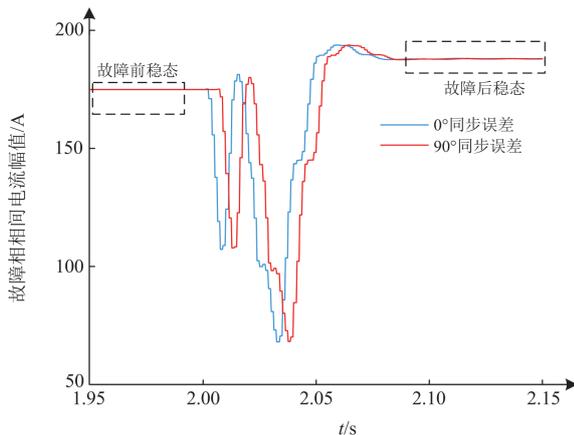
如图 9 所示。图 9 中的波形是在 DG 并网容量为 2.5 MW 情况下, 0°同步误差和 90°同步误差时故障前后保护装置量测的电流信息。



(a) 量测电流波形



(b) 量测电流相位



(c) 量测电流幅值

图 9 量测元件加入延时前后所量测电气量信息对比图

Fig. 9 Comparison of electrical measurement information before and after adding delay time to the measurement element

由图 9 可知, 量测电流幅值稳态值在有延时和无延时的情况下保持一致, 但是相位值存在较大误差。将相位值代入式(35)中计算得到的 θ_2 数据如表 6 所示。表中 I_{2BCpre} 表示故障前保护装置 2 量测的 BC 相间电流幅值。

表 6 量测元件加入延时前后所量测电气量信息对比

Table 6 Comparison of electrical measurement information before and after adding delay time to measurement elements

DG 并网容量/MW	延时	I_{2BCpre}/A	I_{2BC}/A	$\arg(\dot{I}_{2BCpre})/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$
0	无延时	293.39	0	0	180.00
	有延时	293.31	0	0	180.00
2.50	无延时	174.95	187.92	85.39	176.33
	有延时	174.91	188.00	-6.42	176.32
5.00	无延时	281.12	349.65	81.41	200.65
	有延时	281.10	349.56	-10.39	200.65

由图 9 和表 6 可知, 传统方法应用故障后 \dot{I}_{2BC} 的相位, 会因数据不同步而造成较大误差。而按照本文所提方法, 利用保护装置量测的本地信息计算得到的相位 θ_2 能够在有延时和无延时的情况下均保持不变, 验证了所提方法具有数据同步性要求低的特点。

4 结论

针对传统保护方法在面对大量 DG 接入配电网导致传统保护可靠性降低的问题, 本文提出一种基于线路故障相相间电流的改进型电流差动保护方法。通过理论分析和仿真验证, 得到如下结论。

1) 本文所提方法采用故障相相间电流构造保护动作判据, 相较于正序电流, 受到 DG 影响更小, 提升了电流差动保护在有源配电网中的适用性。

2) 本文所提方法的动作判据设置过程中将线路两侧保护装置量测的电流信息拆分为幅值和相位分别利用, 且本文方法利用故障前、后电流稳态量计算相位差, 降低了保护对通信同步性的要求。

3) 仿真结果表明, 本文所提方法能够有效应对不同故障位置、不同 DG 出力的应用场景, 具有较高可靠性和灵敏性。

参考文献

[1] 惠慧, 李蕊, 朱逸楠, 等. 含高比例分布式光伏的配电网多目标概率规划方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 2-10.
HUI Hui, LI Rui, ZHU Yidi, et al. Multi-objective probabilistic planning method for distribution network with high proportion of distributed photovoltaic[J]. Electrical

- Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 2-10.
- [2] 马启鹏, 郝正航, 张裕, 等. 含高渗透率分布式光伏配电网的网络分区与电压协调控制[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 93-102, 108.
MA Qipeng, HAO Zhenghang, ZHANG Yu, et al. Network partition and voltage coordination control of distributed pv power distribution network with high permeability[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 93-102, 108.
- [3] 白晋川, 李肖博, 姚浩, 等. 基于 FIMD 和 SVM 的高压输电线路保护方案[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 107-112.
BAI Jinchuan, LI Xiaobo, YAO Hao, et al. Protection scheme of high voltage transmission line based on FIMD and SVM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 107-112.
- [4] 刘琦, 褚旭, 付乐天, 等. 面向新能源电力系统的交流输电线路保护新方案[J]. 智慧电力, 2025, 53(7): 76-83.
LIU Qi, CHU Xu, FU Letian, et al. A novel protection scheme for AC transmission lines in renewable energy power systems[J]. Smart Power, 2025, 53(7): 76-83.
- [5] 桂小智, 蒙天赐, 潘本仁, 等. 基于综合阻抗的光伏发电并网联络线纵联保护[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(8): 139-144, 154.
GUI Xiaozhi, MENG Tianci, PAN Benren, et al. The pilot protection of grid connection lines for photovoltaic power generation based on integrated impedance[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(8): 139-144, 154.
- [6] 周石金, 何晋, 杨凡, 等. 基于改进电流相差保护的微电网保护方案[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 132-137.
ZHOU Shijin, HE Jin, YANG Fan, et al. Micro-grid protection scheme based on improved current phase difference protection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 132-137.
- [7] 赵建文, 张鸿波, 胡雨佳. 含 T 接逆变型分布式电源配电网的自适应距离保护[J]. 可再生能源, 2024, 42(1): 64-70.
ZHAO Jianwen, ZHANG Hongbo, HU Yujia. Adaptive distance protection for distributed generation distribution network with T-connected inverter interfaced distributed generation[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(1): 64-70.
- [8] 祁言嘉, 王宝华. 含逆变型分布式电源的配电网自适应电流保护[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7151-7158.
QI Yanjia, WANG Baohua. Adaptive current protection for distribution network with inverter interfaced distributed generation[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 7151-7158.
- [9] 罗国敏, 赵祎薇, 吴梦宇, 等. 适应高比例新能源接入的配电网改进型自适应电流保护方法[J]. 供用电, 2024, 41(9): 12-23.
LUO Guomin, ZHAO Yiwei, WU Mengyu, et al. Improved adaptive current protection method suitable for distribution network adapted to high proportion of new energy source accessed[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(9): 12-23.
- [10] SU Shi, LI Yuan, HE Xuehao, et al. Adaptive current protection for three-phase short-circuit faults in active distribution networks[J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(51): 4621-4637.
- [11] 梁伟宸, 王泽众, 周成瀚, 等. 考虑不可测 T 接负荷的配电网虚拟三端电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 81-89.
LIANG Weichen, WANG Zezhong, ZHOU Chenghan, et al. Virtual three-terminal current differential protection for distribution networks considering unmeasurable T-connected loads[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 81-89.
- [12] 罗国敏, 谭颖婕, 吴梦宇, 等. 考虑电压跌落差异的有源配电网功率差动保护[J]. 电工技术学报, 2025, 40(4): 1287-1306.
LUO Guomin, TAN Yingjie, WU Mengyu, et al. Power differential protection for active distribution networks considering voltage drop differences[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(4): 1287-1306.
- [13] 韩笑, 孙杰, 蒋剑涛, 等. 考虑不可测负荷分支接入的配电网自适应差动保护[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 12-17.
HAN Xiao, SUN Jie, JIANG Jiantao, et al. Adaptive differential protection for distribution network considering unmeasurable load branch[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 12-17.
- [14] 张雪松, 马啸, 章雷其, 等. 有源配电网含不可测分支线路新型电流幅值差动保护判据[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 76-81.
ZHANG Xuesong, MA Xiao, ZHANG Leiqi, et al. Novel current amplitude differential protection criterion for line with unmeasurable branch in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 76-81.
- [15] 李潇雨, 何晋, 孙琮岳, 等. 含逆变型分布式电源的配电网新型纵联保护[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(12): 276-283.
LI Xiaoyu, HE Jin, SUN Congyue, et al. Novel pilot protection for distribution networks with inverter interfaced distributed generation[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(12): 276-283.
- [16] 梁莹玉, 卢正杰. 基于补偿系数的有源配电网自适应电流差动保护[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2268-2275.
LIANG Yingyu, LU Zhengjie. Adaptive differential

protection principle based on compensation coefficient for active distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2268-2275.

[17] 刘幸蔚, 李永丽, 陈晓龙, 等. 逆变型分布式电源 T 接线后纵联差动保护的改进方案[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1257-1264.

LIU Xingwei, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. An improved scheme of longitudinal differential protection for teed lines with inverter-based distributed generations[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1257-1264.

[18] 戴志辉, 何静远, 王文卓, 等. 适用于逆变型分布式电源 T 接的配电网线路纵联保护方案[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 88-94.

DAI Zhihui, HE Jingyuan, WANG Wenzhuo, et al. Line pilot protection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generation in T-connection mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 88-94.

[19] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[20] 罗国敏, 吴梦宇, 谭颖婕, 等. 考虑高比例逆变型分布式电源接入的阻抗差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 75-87.

LUO Guomin, WU Mengyu, TAN Yingjie, et al. Impedance differential protection for integration of a high proportion of inverter-based distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 75-87.

[21] 欧奕昊, 姜彤, 张一航, 等. 考虑变流器无功调节特性的含高比例分布式光伏配电网电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 105-118.

OU Yihao, JIANG Tong, ZHANG Yihang, et al. Voltage regulation method for a distribution network with high-penetration of distributed photovoltaic energy considering a converter's reactive power regulation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 105-118.

[22] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.

[23] 杨国生, 王润良, 王聪博, 等. 基于负序抑制策略特性的新能源送出线路距离保护原理[J/OL]. 电网技术: 1-13[2025-06-09]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2410.tm.20250606.1610.004>

YANG Guosheng, WANG Runliang, WANG Congbo, et al. Distance protection principle for renewable energy transmission lines based on negative sequence suppression strategy characteristics[J/OL]. Power System Technology: 1-13[2025-06-09]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2410.tm.20250606.1610.004>

[24] 陆于平, 李玉海, 李鹏, 等. 差动保护灵敏度与启动电流、制动系数和原理之间的关系[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 51-55.

LU Yuping, LI Yuhai, LI Peng, et al. Discussion on relationship of pick-up current restrained factor and principles to the differential protection sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 51-55.

[25] 袁姝. 含逆变电源花瓣式配电网接地故障分析及保护方案研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.

[26] 杨帆, 金鑫, 沈煜, 等. 基于零序导纳变化的灵活接地系统接地故障方向判别算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 88-97.

YANG Fan, JIN Xin, SHEN Yu, et al. Discrimination algorithm of grounding fault direction based on variation of zero-sequence admittance in flexible grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 88-97.

[27] 谭会征. 逆变型分布式电源的建模及其对配电网故障特性的影响分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.

收稿日期: 2024-10-21; 修回日期: 2025-08-16

作者简介:

王洋(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: 18722198566@126.com

赵若阳(1994—), 女, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护定值整定; E-mail: 731507032@qq.com

郑邳彦(2001—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: zhengzhiyan@tju.edu.cn

(编辑 许威)