

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250655

T接暂态电流对有源配电网差动保护的影响与解决方法

林浩然¹, 孔维娜¹, 褚福亮¹, 袁通², 杨明耀¹, 高厚磊²

(1. 国网山东省电力公司济宁供电公司, 山东 济宁 272000; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为应对分布式电源接入带来的保护问题, 电流差动保护已开始应用于有源配电网。在配电网馈线区段中, 常有T接变压器或感应电动机类型的负荷分支, 其产生的非故障暂态电流可能导致电流差动保护误动。针对该问题, 分析了T接暂态电流可能引起差动保护误动的多个场景。在此基础上, 结合暂态电流波形特点, 提出了一种基于差动电流正序分量衰减特征的闭锁方案。该方案采用傅里叶算法提取电流基波幅值, 通过正序电流幅值衰减率区分故障差流和非故障暂态差流。仿真结果和现场数据验证表明, 所提方案能够在不降低差动保护灵敏度的前提下, 有效规避T接变压器或感应电机引起的保护误动风险。

关键词: T接负荷分支; 暂态电流; 闭锁方案; 电流差动保护; 有源配电网

Impact of T-connected transient currents on current differential protection in active distribution networks and its mitigation method

LIN Haoran¹, KONG Weina¹, CHU Fuliang¹, YUAN Tong², YANG Mingyao¹, GAO Houlei²

(1. Jining Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Jining 272000, China;
2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To address protection issues arising from distributed generation integration, current differential protection has been increasingly applied in active distribution networks. In distribution feeder sections, T-connected load branches, such as transformers or induction motors, are commonly present. The non-fault transient currents generated by these branches may lead to the maloperation of current differential protection. Focusing on this problem, this paper analyzes multiple scenarios where T-connected transient currents may cause differential protection maloperation. Based on the characteristics of transient current waveforms, a blocking scheme based on the attenuation characteristics of the positive-sequence component of the differential current is proposed. This scheme employs the Fourier algorithm to extract the fundamental current amplitude and distinguishes fault differential currents from non-fault transient differential currents according to the attenuation rate of the positive-sequence current amplitude. Simulation results and field data verification demonstrate that the proposed scheme can effectively avoid the risk of protection maloperation caused by T-connected transformers or induction motors without compromising the sensitivity of current differential protection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277109).

Key words: T-connected load branch; transient current; blocking scheme; current differential protection; active distribution network

0 引言

随着分布式电源(distributed generation, DG)的高比例接入, 传统辐射状配电网变成了有源网络, 潮流和故障电流双向流动, 三段式电流保护面临重大挑战^[1-3]。为提高供电可靠性, 具有绝对选择性的

电流差动保护被引入到有源配电网^[4-7], 其几乎不受系统运行方式及DG影响。然而与输电网拓扑不同, 配电网拓扑结构复杂, 一个配电网通常包含多条馈线, 每个馈线分为几个区段, 区段内可能包含T接负荷。我国中压配电网, 尤其在架空线路中T接负荷非常普遍, 这增加了双端差动保护设计难度。

为解决含T接负荷区段保护在技术、经济性和适应性方面的难题, 一些学者提出了新型保护原理。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277109)

文献[8-11]分别利用电流幅值、负序电流相位差、高频阻抗、拟功率等电气量特征构造新型纵联保护原理；文献[12]通过对 T 接分支进行补偿，改进了电流差动保护方案；文献[13]采用逆变型 DG 谐波注入的方式设计保护原理。以上方法为解决含 T 接分支线路保护问题提供了新思路，但均未考虑 T 接变压器及感应电动机(induction motor, IM)的影响。事实上，T 接变压器及 IM 在配电网中非常常见。对于 10 kV 配电线路，T 接分支一般通过降压变压器给民用或厂用负荷供电，随着用电需求增加，变压器容量也在大幅增加，当 T 接处的开关发生变位时，由于铁芯饱和，变压器可能产生励磁涌流，从而可能触发现有保护方案发生误动^[14]。同时，无论空调、电梯等民用 IM 还是钢铁、煤矿企业中的大型高压电动机均可能接入配电网中^[15]，与常规无源负荷不同，IM 在其端电压骤降或骤增后会作为电源向系统注入幅值可观的暂态电流^[16]，本文称为助增电流，该电流同样可能引起现有方案的失效。一种看似可行的方法是通过时限配合躲过暂态电流影响，然而暂态电流衰减时间达到了上百毫秒甚至秒级，该方式必然会增加动作时间，导致保护性能下降。

针对这一问题，本文首先分析得出可能引起差动保护误动的多个场景，在此基础上设计基于差动电流正序分量的保护闭锁方法，形成一套增强型差动保护方案，基于 PSCAD/EMTDC 的仿真结果和现场录波数据验证了所提方案的有效性。

1 T 接暂态电流对双端差动保护的影响

现有技术方案很少关注 T 接变压器或 IM 带来的影响，然而实际现场中数值可观的励磁涌流及助增电流可能会引起现有差动保护方案失效。下面通过案例归纳分析 T 接暂态电流对差动保护的影响，式(1)为电流差动保护常见判据。

$$\begin{cases} I_{\text{diff-}\phi} = |I_{M-\phi} + I_{N-\phi}| \\ I_{\text{res-}\phi} = |I_{M-\phi}| + |I_{N-\phi}| \\ I_{\text{diff-}\phi} \geq K_{\text{res}} I_{\text{res-}\phi} \\ I_{\text{diff-}\phi} \geq I_{\text{thd}} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $I_{M-\phi}$ 、 $I_{N-\phi}$ 分别为线路 M、N 两侧电流相量， $\phi = \{A,B,C\}$ ，电流互感器方向为由母线指向线路； $I_{\text{diff-}\phi}$ 为差动电流，又称动作量； $I_{\text{res-}\phi}$ 和 K_{res} 分别为制动电流和制动系数，其乘积为制动量，其中 K_{res} 取 0.5； I_{thd} 为门槛值。当含 T 接负荷线路应用电流差动保护时，门槛值 I_{thd} 的整定需重新考虑，对于含 T 接分支线路，在正常运行和区外故障情况下，差动

电流等于 T 接分支上的电流之和。为了确保安全， I_{thd} 需躲过 T 接分支电流的最大值，即可以根据式(2)进行整定。

$$I_{\text{thd}} = K_{\text{rel}} \times \sum |i_{L_t}| \quad (2)$$

式中： K_{rel} 为可靠系数； i_{L_t} 表示 T 接分支的电流。在本文研究中 K_{rel} 取值 1.5。通过上述整定原则，可保证电流差动保护在含 T 接负荷线路上可靠运行。

1.1 T 接变压器励磁涌流的影响

在 10 kV 配电线路中，T 接分支通常通过变压器向负荷供电。开关位置的变化(例如闭合断路器或清除区外故障)可能导致 T 接分支处的变压器饱和，从而产生显著的涌流。在配电网中，这类变压器涌流可达到额定值的 25 倍^[15]，这一影响不可忽视。为说明 T 接变压器励磁涌流对差动保护的影响，在 PSCAD 中搭建如图 1 所示的简单配电网区段模型，对案例 A 进行仿真。

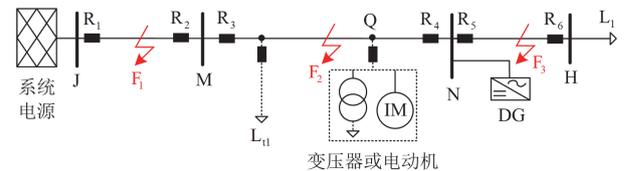


图 1 含 T 接变压器/IM 的区段模型

Fig. 1 Protected section with T-connected transformers or IMs

案例 A: Q 处接入一容量为 2.5 MVA 的变压器，在 $t = 2.92$ s 时点 F_3 处发生 ABC 金属性故障，在 $t = 3.02$ s 时故障被 R_5 、 R_6 处断路器切除。

在案例 A 场景下，基于 R_3 、 R_4 计算的差动电流波形如图 2 所示。可以观察到在故障清除后，T 接分支处变压器的涌流包含在差动电流中。在这一非区内故障事件中，差动电流显著增加。A 相电流差动保护的动作为 0.37 kA，制动量为 0.21 kA。如果遵循式(1)保护判据，保护会误动。对于空载变压器合闸的情况，其结果与案例 A 类似。

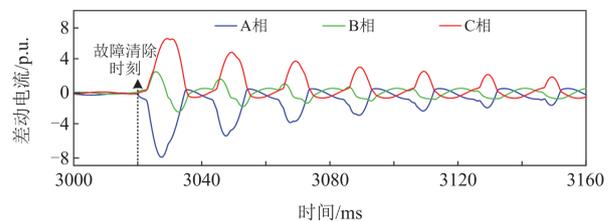


图 2 区段 MN 计算的三相差动电流

Fig. 2 Calculated three-phase differential current of section MN

1.2 T 接感应电动机助增电流的影响

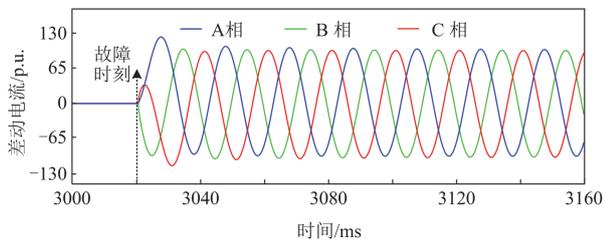
根据感应电动机的等效模型，产生助增电流的场景可分为两类^[16-17]：1) 开关位置变化引起的助增

电流, 包括感应电动机启动和区外故障清除; 2) 低阻故障引起的助增电流。需要注意的是, 在高阻故障条件下, 由于压降不足, 感应电动机无法产生助增电流^[17]。与变压器励磁涌流类似, 由开关位置变化引起的 T 接感应电动机助增电流也会导致差动电流增加。由于篇幅限制, 此处不再赘述。低阻故障引起的助增电流对电流差动保护的影响将通过案例 B 和案例 C 进行说明。

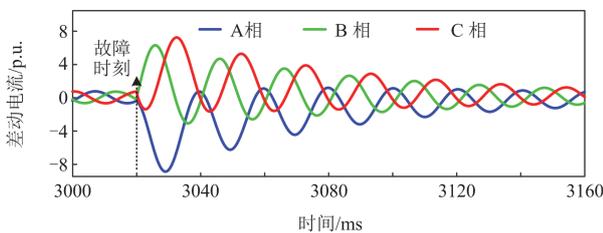
案例 B: Q 处接入一组 2 MW 的 IM, 点 F₁ 处在 $t = 3.02$ s 时发生 ABC 金属性故障。

案例 C: Q 处接入一组 2 MW 的 IM, 点 F₂ 处在 $t = 3.02$ s 时发生 ABC 金属性故障。

图 3 描绘了案例 B 情况下区段 JM 和 MN 的差动电流波形。从图 3(a) 可以看出, 故障后区段 JM 的差动电流幅值非常高, 且略有衰减。这是因为区段 JM 所计算的差动电流中同时包含了系统提供的故障电流和 IM 产生的助增电流, 且系统提供的故障电流占主导地位。因此, 虽然助增电流在衰减, 但总体差动电流的衰减并不明显, 该区段保护能可靠动作。从图 3(b) 可以看出, 故障后所计算的区段 MN 的差动电流是额定值的数倍, 助增电流占主导地位, 并呈现出明显的衰减特征, 区段 MN A 相的动作量为 0.34 kA, 制动量为 0.28 kA, 遵循式(1)中保护判据, 电流差动保护将误动。



(a) 区段 JM 所计算的差动电流



(b) 区段 MN 所计算的差动电流

图 3 案例 B 下的仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms for Case B

图 4 为案例 C 中区段 MN 所计算的三相差动电流波形, 其中三相差动电流幅值较大, 无明显衰减特征。这是因为在低电阻条件下, 点 F₂ 处的故障电

阻远小于系统中其他支路的电阻, IM 在 Q 点产生的助增电流直接馈送到故障点, 几乎不包含在差动电流中。

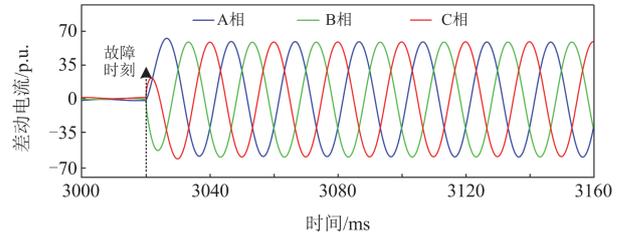


图 4 案例 C 下区段 MN 的差动电流波形

Fig. 4 Differential current waveforms of MN section for Case C

2 防误动差动保护方案设计

根据第 1 节可知, 某些条件下变压器和 IM 产生的暂态电流可能引起差动保护的误动作。具体为, 对于非区内故障, T 接暂态电流可能包含在所计算的差动电流中, 引起差动电流增大, 保护误动。而对于区内故障, 差动电流中系统提供的故障电流占据主导, T 接暂态电流占比较小, 保护能够动作。结合图 2—图 4 仿真波形可以看出, T 接暂态电流具有明显的衰减特征, 由系统电源提供的故障电流并未出现明显衰减, 因此, 可利用电流波形的衰减特性来区分内部故障和非内部故障。

另外, 变压器空载投入或 IM 直接启动场景一般发生在配电网停电检修或长时间停电后的供电恢复中。借鉴现有的技术方案^[18], 该场景下两侧保护装置可通过遥控方式短时间内选择较高的门槛值, 等系统稳定运行后再采用较低门槛值, 该方案通过时间和定值协调保证保护的安全性, 因此在下文分析中该场景不再考虑。

2.1 暂态电流波形特点

1) 励磁涌流

励磁涌流特性受多种因素影响, 包括剩磁、合闸时间和铁芯类型。当变压器合闸时, 磁通 $\psi(t)$ 的表达式^[19]为

$$\psi(t) = -\psi_m \cos(\omega t + \beta) + (\psi_r + \psi_m \cos \beta) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

式中: ψ_m 为稳态磁通幅值; ω 为角频率; β 为合闸角, 即开关闭合时刻的电源电压相位; ψ_r 为剩磁; τ 为变压器时间常数。

如式(3)所示, $\psi(t)$ 包含稳态磁通和衰减的直流分量。直流分量的持续衰减是引起励磁涌流衰减的主要原因, 而励磁回路中电阻的存在导致磁通的直流分量必然衰减^[20]。此外, 饱和区与线性区之间斜率的显著差异导致励磁涌流中存在各种谐波分量,

如直流分量、基频分量和二次谐波等。随着磁通直流分量的持续衰减，励磁涌流中的所有谐波逐渐衰减至 0^[20]。

2) 助增电流

不同场景下的助增电流已有许多研究。例如，当鼠笼式/绕线式感应电动机在其端部发生三相短路故障时，感应电动机的输出电流 $i_M(t)$ 可以用式(4)表示^[21]。

$$i_M(t) = U_m \left(\frac{1}{X'} - \frac{1}{X_s + X_m} \right) e^{-\frac{t}{T'}} \cos(\omega t + \alpha) + \frac{U_m}{X'} \cos(\alpha) e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (4)$$

式中： U_m 为故障前电压幅值； X' 表示感应电动机的暂态电抗； X_s 表示定子漏抗； X_m 表示励磁电抗； T' 表示暂态时间常数，与转子电阻相关； α 表示初始故障角，取值范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ； T_s 表示稳态时间常数。

由式(4)并结合图 3(b)所示的仿真波形可以看出，在三相金属性短路故障下，感应电动机输出的助增电流包括衰减的直流分量和衰减的基频分量。对于经一定过渡电阻的故障，助增电流还包括稳态的基频分量^[16]。式(4)是对称故障下相电流的表达式。当发生不对称故障时，感应电动机输出的正序故障电流也包含稳态基频分量和衰减的基频分量^[22]。对于区外故障清除后的电压恢复过程，由于感应电动机的速度变化不大，助增电流的推导与故障情况类似，包括衰减的直流分量、衰减的基频分量和稳态的基频分量。

2.2 非区内故障暂态差流识别方法

故障发生后，电流由负荷电流和故障电流共同组成。忽略谐波影响，式(5)为故障电流 $i_f(t)$ 表达式。

$$i_f(t) = I_m \sin(\omega t - \alpha) + I_m \sin(\alpha) e^{-\frac{t}{\tau_f}} \quad (5)$$

式中： I_m 表示故障电流幅值； τ_f 表示直流分量的时间常数。

正序分量存在于所有场景中。由 2.1 节可知，励磁涌流和助增电流的正序分量是衰减的，这与式(5)所描述的故障电流有显著差异。因此，正序分量是否衰减可以作为区分故障电流和暂态电流的指标。为此，定义 ρ 为正序电流幅值衰减率，如式(6)所示。

$$\rho = \frac{|I_1(t) - I_1(t-T)|}{I_1(t-T)} \times 100\% \quad (6)$$

暂态电流识别判据如式(7)所示。

$$\rho > \rho_{set} \quad (7)$$

式中： $I_1(t)$ 和 $I_1(t-T)$ 为正序电流幅值， $I_1(t-T)$ 为

$I_1(t)$ 的前一周波； ρ_{set} 为电流衰减率阈值。当 $\rho \leq \rho_{set}$ 时，保护识别为故障电流，差动保护不闭锁；当 $\rho > \rho_{set}$ 时，保护识别为励磁涌流或助增电流，差动保护闭锁。

目前相量估计算法有多种^[23-24]，但离散傅里叶变换算法简单，满足电网继电保护的精度需求，在实际现场中被广泛应用，因此本文选用该算法进行相电流基波计算，并合成正序分量。理论上故障电流的正序电流幅值衰减率为 0，考虑一定的安全裕度，本文设定 ρ_{set} 为 10%。

影响暂态电流特性的因素复杂多样，难以全部涵盖，其中配电网时间常数对衰减特性及本文所提闭锁方法效果的影响最为显著。附录 A 以励磁涌流为例，分析了典型时间常数下配电网中暂态电流衰减率的范围，验证了所设定 10% 门槛值的合理性。

2.3 差动保护整体方案

结合 2.2 节的非区内故障暂态差流识别方法，电流差动保护整体方案如图 5 所示。线路两侧实时采集电流信息，检测到扰动(故障、励磁涌流或助增电流)后保护启动，两侧通过通信链路进行数据交换，保护装置获取对侧数据后依次进行差动保护动作判断和闭锁判断，只有当满足差动保护判据动作条件且未闭锁时保护跳闸。

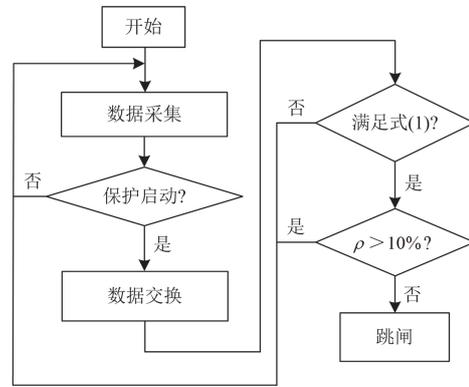


图 5 电流差动保护整体方案

Fig. 5 Current differential protection overall scheme

为应对多事件并发场景，比如变压器合闸故障，具体闭锁策略为：保护启动后，首先基于前两个周波数据计算正序电流幅值衰减率，若衰减率大于 10%，则保护进入闭锁状态。在闭锁 100 ms 后，重新检测正序电流幅值衰减率及电流差动保护计算结果，若仍满足闭锁条件，则继续闭锁；此过程循环直至闭锁判据不满足或保护复归，从而完成此次保护启动的全程判断。

本文所提闭锁策略避免了过于频繁的实时检

测, 在实现复杂度和可靠性之间取得了平衡, 尤其能够有效应对暂态电流与故障电流叠加的特殊场景, 具有实现简单、对通信实时性要求较低的优点。当然, 必须承认, 该策略在复杂场景时保护动作时间会有所延长。但考虑到配电网对故障隔离的时间要求相对宽松, 所提出的方案仍可满足实际运行需求。

需要说明的是, 有源配电网中针对不同工况优化差动保护判据本身是一个重要研究方向, 已有不少文献提出了相应的改进方法以增强其适应性^[5,12]。本文所提出的闭锁策略与具体采用的差动保护判据相对独立, 因此在实际应用中, 可将本方案与现有文献中针对有源配电网的改进判据相结合, 从而在复杂工况下提升差动保护的整体性能。

3 基于 PSCAD/EMTDC 仿真验证

为验证所提方案的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 6 所示的 10 kV 有源配电网仿真模型, 中性点为不接地系统, 仿真频率为 6.4 kHz。在图 6 中, 系统变压器变比为 110 kV/10 kV, 额定容量为 50 MVA, DG_1 — DG_3 均为逆变类电源, 最大输出电流为 1.5 倍额定电流, 控制策略为常规 PQ 控制, 具有低电压穿越能力。B 和 T 分别为母线和变压器。变压器 T_1 — T_3 的容量均为 2.5 MVA, 变比为 10 kV/0.4 kV, 联结方式均为 Dyn11。 L_{T1} — L_{T3} 为变压器下游负荷。 f 为故障位置, 具体设置见下文描述。系统及线路参数分别见表 1 和表 2。图中共有 5 个保护区段: B_0B_{11} 、 $B_{11}B_{12}$ 、 $B_{12}B_{13}$ 、 B_0B_{21} 和 $B_{21}B_{22}$, 所有区段均配置双端电流差动保护。

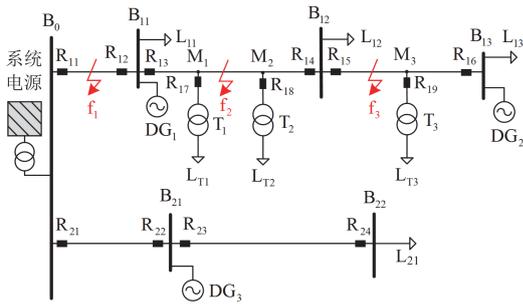


图 6 10 kV 配电网仿真模型

Fig. 6 10 kV distribution network model

表 1 仿真系统参数

Table 1 Simulated system parameters

参数	数值	参数	数值
DG_1 , DG_2 容量	2 MW	L_{13} , L_{21} 容量	3 MVA
DG_3 容量	1 MW	L_{11} , L_{12} , L_{T3} 容量	1 MVA

表 2 线路参数

Table 2 Feeder parameters

参数	数值
B_0B_{11} , $B_{11}B_{12}$, B_0B_{21} 的长度/km	2
$B_{12}B_{13}$ 的长度/km	1
$B_{21}B_{22}$ 的长度/km	4
正序阻抗/(Ω /km)	0.125+j0.095
零序阻抗/(Ω /km)	0.76+j1.32

3.1 故障条件下方案验证

1) 故障位置及过渡电阻影响

下面通过案例 1 验证所提差动保护方案在区外故障下的可靠性及区内故障下的灵敏度, 案例 1 的仿真结果见表 3。

表 3 案例 1 下区段 $B_{11}B_{12}$ 的仿真结果(以 A 相为例)

Table 3 Simulation results of section $B_{11}B_{12}$ for Case 1

(taking phase A for example)

故障点	过渡电阻/ Ω	$I_{diff_A}/$ kA	$K_{res}I_{res_A}/$ kA	$I_{thd}/$ kA	$\rho/\%$	是否 跳闸
f_1	2	0.01	0.29	0.173	0.31	否
	10	0.11	0.27	0.173	0.47	否
	30	0.12	0.26	0.173	0.49	否
f_2	2	2.11	0.79	0.173	0.77	是
	10	0.62	0.15	0.173	0.20	是
	30	0.29	0.13	0.173	0.61	是
f_3	2	0.08	1.61	0.173	0.61	否
	10	0.10	0.27	0.173	0.87	否
	30	0.11	0.12	0.173	0.22	否

案例 1: L_{T1} 和 L_{T2} 采用 RL 负荷, 容量均为 1 MVA, 以 $B_{11}B_{12}$ 为被保护区段, 当 $t = 7$ s 时在 f_1 — f_3 设置 ABC 三相短路, 故障点 f_1 — f_3 分别位于 B_0B_{11} 、 M_1M_2 、 $B_{12}B_{13}$ 的中点, 过渡电阻取 2、10 和 30 Ω 。

f_1 和 f_3 对于 $B_{11}B_{12}$ 来说为区外故障, f_2 对于 $B_{11}B_{12}$ 来说为区内故障。由表 3 可以看出, 区外故障时, 过渡电阻越大, 差动电流越大, 但均在所设定阈值以下, 保护可靠不动作。与此同时正序差动电流幅值衰减率小于 1%, 远低于 10%, 保护不闭锁, 但因未满足差动保护判据, 保护不发出跳闸信号。区内故障时, 动作量大于制动量和所设定的阈值, 且正序电流幅值衰减率 ρ 小于 10%, 因此保护正确跳闸。

2) 故障时刻影响

通过案例 2 验证所提方案在不同故障时刻下的可行性, 仿真结果见表 4。

案例 2: L_{T1} 和 L_{T2} 采用 RL 负荷, 容量均为 1.5 MVA, 以 $B_{11}B_{12}$ 为被保护区段, 在 t 时刻发生 AB 相间故障, 故障点设在 f_2 处, 位于 M_1M_2 中点,

过渡电阻取 0.01Ω 。在 $7000 \sim 7009 \text{ ms}$ 范围内，以 1 ms 为间隔设置故障时刻，共进行了 10 次仿真。

表 4 案例 2 下区段 $B_{11}B_{12}$ 的仿真结果(以 A 相为例)

Table 4 Simulation results of section $B_{11}B_{12}$ for Case 2 (taking phase A for example)

故障时刻/ms	$I_{\text{diff}_A}/\text{kA}$	$K_{\text{res}}I_{\text{res}_A}/\text{kA}$	I_{thd}/kA	$\rho/\%$	是否跳闸
7000	5.37	2.71	0.26	0.32	否
7001	5.15	2.60	0.26	0.34	否
7002	4.78	2.42	0.26	0.49	否
7003	4.39	2.22	0.26	0.82	是
7004	4.10	2.08	0.26	0.23	是
7005	4.08	2.06	0.26	0.24	是
7006	4.40	2.22	0.26	0.36	否
7007	4.78	2.41	0.26	0.42	否
7008	5.18	2.61	0.26	0.39	否
7009	5.38	2.71	0.26	0.99	否

由表 4 可以看出，在不同故障时刻下发生区内故障时，差动电流均大于制动电流及门槛值，保护能正确动作，且正序电流衰减率 ρ 均低于 10% 闭锁门槛，保护可靠不闭锁。 ρ 随故障时刻的变化略有波动，主要源于衰减直流分量大小不同所引起的算法误差，但仍远低于所设门槛。

3) 系统参数影响

系统等效阻抗是影响故障电流衰减特性的关键因素。为验证所提方案在不同系统阻抗下的适应性，对案例 3 进行仿真，仿真结果见表 5。

表 5 案例 3 下区段 $B_{12}B_{13}$ 的仿真结果(以 A 相为例)

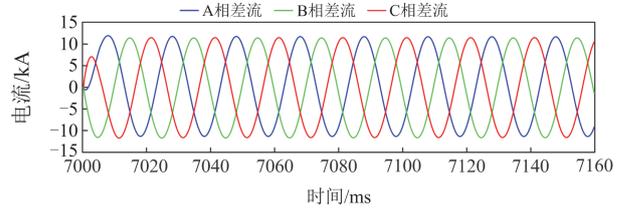
Table 5 Simulation results of section $B_{12}B_{13}$ for Case 3 (taking phase A for example)

系统阻抗/ Ω	$I_{\text{diff}_A}/\text{kA}$	$K_{\text{res}}I_{\text{res}_A}/\text{kA}$	I_{thd}/kA	$\rho/\%$	是否跳闸
0.022j	8.19	3.95	0.086	0.36	是
0.44j	6.35	3.02	0.086	0.95	是
1.1j	4.59	2.09	0.086	1.08	是
2.2j	3.07	1.47	0.086	2.68	是

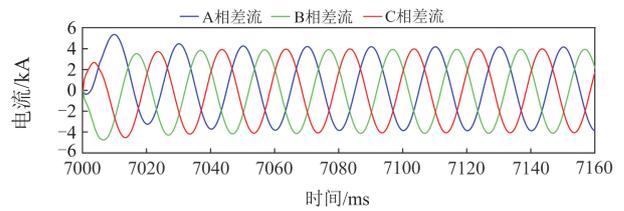
案例 3: L_{T3} 采用 RL 负荷模型，通过调整变压器参数使系统阻抗等值为 $0.022j$ 、 $0.44j$ 、 $1.1j$ 、 $2.2j \Omega$ ，不同系统参数下设置在 f_3 处发生 ABC 三相经 1Ω 短路故障， $B_{12}B_{13}$ 为被保护区段。

由表 5 可以看出，不同系统阻抗下，正序电流幅值衰减率有所波动，但均远低于 10% 的闭锁门槛，保护均能可靠动作。图 7 给出了系统阻抗为 $0.022j \Omega$ 和 $2.2j \Omega$ 时的电流波形。结果表明，系统阻抗较小时，衰减直流分量衰减较快，且差动电流幅值较大，有利于所提闭锁方法的可靠闭锁；当系统阻抗较大时，图 7(b) 中显示出较为明显的衰减直流特征，但

本文基于工频量计算衰减率，受直流衰减影响较小，主要误差体现在相量计算精度方面。当系统阻抗为 $2.2j \Omega$ 时，仿真计算的正序电流衰减率为 2.68%，远小于门槛值 10%，不影响保护正确动作。



(a) 系统阻抗为 $0.022j \Omega$



(b) 系统阻抗为 $2.2j \Omega$

图 7 案例 3 的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform for Case 3

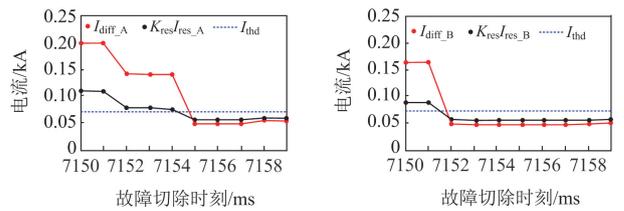
3.2 励磁涌流条件下方案验证

为考察变压器励磁涌流条件下所提方案的有效性，对案例 4 进行仿真。

案例 4: T_1 和 T_2 下游分别接入 0 MVA 和 1 MVA 的负荷， f_3 处发生 ABC 三相金属性故障， R_{15} 和 R_{16} 在故障后 150 ms 跳开切除故障。在 $7000 \sim 7009 \text{ ms}$ 范围内，以 1 ms 为间隔设置故障时刻，共进行了 10 次仿真。 T_2 处变压器三相剩磁设置为 $(0.2, 0, 0.1 \text{ p.u.})$ 。

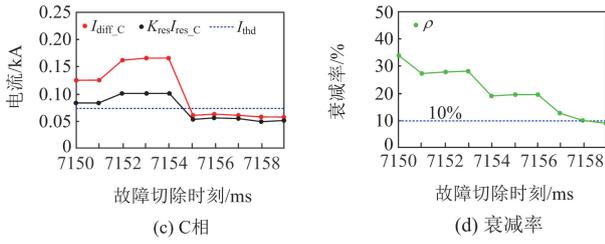
仿真中， T_2 接在母线 B_{12} 附近， f_3 设置在距离母线 100 m 处，保证变压器与故障点较短的电气距离，有助于在故障切除时产生较大的励磁涌流。图 8(a)~图 8(c) 为故障切除后 ABC 三相的动作用量及制动量，图 8(d) 为正序分量幅值衰减率。

由图 8 可以看出，故障切除后，差动保护动作量可能会大于制动量和整定门槛值，存在误动风险。原因在于，故障切除后 T_2 产生的励磁涌流流经 R_{13} 和 R_{14} ，被计入在差动电流中，较大的励磁涌流使得保护误动。励磁涌流的大小与故障切除角(故障切除时刻)、剩磁等因素相关。图 8 中，动作量和制动



(a) A相

(b) B相

图 8 案例 4 情形下区段 B₁₁B₁₂ 的仿真结果Fig. 8 Simulation results of section B₁₁B₁₂ for Case 4

量随故障切除角的不同而不断变化, 根据本文设定条件, 部分情况下差动保护会误动。但由于正序分量衰减率在对应故障切除时刻下大于 10%, 因此保护被闭锁, 不会发出跳闸信号。

3.3 助增电流条件下仿真验证

为全面考察 T 接 IM 助增电流对所提方案的影响, 分别设置案例 5—案例 9 进行仿真验证。为使效果明显, 案例 5—案例 9 中故障点与 IM 接入点相距 100 m。案例 5—案例 8 仿真中电动机参数参考 IEEE Task Force 推荐的大型工业电动机, 具体参数见附录 B 表 B1。

1) 区外故障

在区外故障下, 所提方案应可靠闭锁, 下面通过案例 5 进行验证。

案例 5: T₁ 下游接入 0.5 MVA 的 RL 负荷, M₂ 处接入一组 2 MW IM, 设定 f₁、f₃ 处发生金属性短路故障。

案例 6: M₁、M₂ 处共接入 2 MVA 负荷, 包括 RL 负荷及 IM, f₁ 处发生故障。设置故障类型为 ABC 三相故障, 过渡电阻为 0.01 Ω, IM 占比分别为 25%、50%、75% 和 100%。

在案例 5 情形下, 区段 B₁₁B₁₂ 的仿真结果见表 6。可以看出, 发生区外金属性短路故障时, IM 产生的助增电流将会导致差动电流大于整定门槛值, 当故障点位于 IM 下游(f₃)时, 故障后流过 R₁₃、R₁₄ 的电流较大, 由此计算的制动量较大, R₁₃、R₁₄ 不会跳闸。当故障点位于 IM 上游(f₁)时, 故障后流过 R₁₃、R₁₄ 的电流较小, 此时满足差动保护动作条件, 但在不同故障类型下的差动电流正序分量衰减率均在 10% 以上, 保护被闭锁。根据所设计保护逻辑, R₁₃、R₁₄ 同样不跳闸。

在案例 6 情形下, 区段 B₁₁B₁₂ 的仿真结果见表 7。数据表明, 随着 IM 占比的升高, 故障后差动电流越大, 当占比大于 50% 时, 差动保护动作量大于制动量及门槛值, 若不采取闭锁措施, 将引起差动保护的误动。然而, 在此过程中, 正序差动电流的

衰减率始终保持在 20% 以上, 因此本文所提闭锁方案能够可靠动作, 有效防止保护误跳闸。

表 6 案例 5 情形下区段 B₁₁B₁₂ 的仿真结果 (以 A 相为例)

Table 6 Simulation results of section B₁₁B₁₂ for case 5 (taking phase A for example)

故障点	故障类型	I_{diff_A}/kA	$K_{res}I_{res_A}/kA$	I_{thd}/kA	$\rho/\%$	是否跳闸
f ₁	AC	0.28	0.14	0.217	23.0	否
	ABC	0.36	0.24	0.217	27.3	否
f ₃	AB	0.27	3.94	0.217	23.4	否
	ABC	0.32	4.54	0.217	26.7	否

表 7 案例 6 情形下区段 B₁₁B₁₂ 的仿真结果 (以 A 相为例)

Table 7 Simulation results of section B₁₁B₁₂ for case 6 (taking phase A for example)

IM 占比/%	I_{diff_A}/kA	$K_{res}I_{res_A}/kA$	I_{thd}/kA	$\rho/\%$	是否跳闸
25	0.098	0.132	0.173	26.4	否
50	0.20	0.175	0.173	25.8	否
75	0.274	0.201	0.173	27.4	否
100	0.365	0.236	0.173	28.3	否

2) 区内故障

为验证区内故障时所提方案的有效性, 对案例 7 和案例 8 进行仿真。

案例 7: T₁ 下游接入 1 MVA 的 RL 负荷, M₂ 处接入一组 2 MW 的 IM。f₂ 处发生 ABC 三相故障, 过渡电阻分别取 0.01、1、5 和 10 Ω。

案例 8: T₁ 下游接入 1 MVA 的 RL 负荷, M₂ 处接入一组 2 MW 的 IM。f₁ 处发生 ABC 三相金属性故障。

案例 7 情形下区段 B₁₁B₁₂ 的仿真结果见表 8。可以看出区段 B₁₁B₁₂ 处的差动保护均能识别为区内故障且不被闭锁, R₁₃、R₁₄ 正确跳闸。图 9 为过渡电阻为 0.01 Ω 时的仿真波形, 呈现为故障电流特征, 差动电流正序分量幅值衰减率为 2.08%, 远小于 10%。对于区内高阻故障, IM 因端口电压轻微降落, 不产生助增电流, 当过渡电阻为 10 Ω 时, 衰减率仅为 0.85%, 保护不被闭锁。

表 8 案例 7 情形下区段 B₁₁B₁₂ 的仿真结果 (以 A 相为例)

Table 8 Simulation results of section B₁₁B₁₂ for Case 6 (taking phase A for example)

过渡电阻/Ω	I_{diff_A}/kA	$K_{res}I_{res_A}/kA$	I_{thd}/kA	$\rho/\%$	是否跳闸
0.01	7.93	3.1	0.26	2.08	是
1	3.84	1.51	0.26	1.38	是
5	1.087	0.442	0.26	0.84	是
10	0.614	0.261	0.26	0.85	是

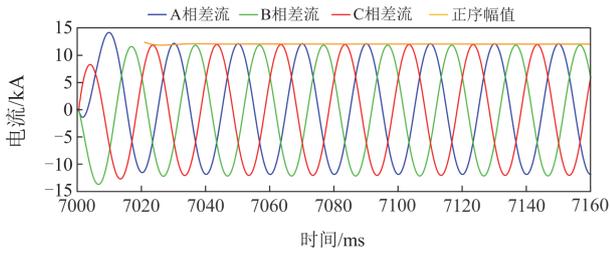


图9 过渡电阻为 0.01 Ω 时仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms when the fault resistance is 0.01 Ω

案例 8 情形下区段 B₀B₁₁ 的仿真结果见表 9。可以看出,在不同故障类型下 R₁₁、R₁₂ 处计算动作量大于制动量和门槛值,差动保护正确动作,但由于差动电流中故障电流占比很大,由此所计算的差动电流正序分量幅值衰减率较小,仿真中利用前两个周波所计算的衰减率均小于 2%,因此差动保护不会被闭锁。

表 9 案例 8 情形下区段 B₀B₁₁ 仿真结果 (以 A 相为例)

Table 9 Simulation results of section B₀B₁₁ for Case 8 (taking phase A for example)

故障类型	I_{diff_A}/kA	$K_{res}I_{res_A}/kA$	I_{thd}/kA	$\rho/\%$	是否跳闸
AC	6.47	2.27	0.06	0.36	是
ABG	7.56	2.99	0.06	0.43	是
ABC	8.30	2.79	0.06	1.53	是

3) 外部故障切除

为充分评估方案的工程适用性,进一步采用 IEEE Task Force 推荐的 7 种典型 IM 参数进行仿真验证。以下通过案例 9 具体说明。

案例 9: T₁ 下游接入 1 MVA 的 RL 负荷, T₂ 处接入一组 2 MW 的 IM, IM 参数分别采用 IEEE Task Force 推荐的 7 种电机参数,具体参数见附录 B 表 B1。f₃ 处发生 ABC 三相金属性故障,故障发生 150 ms 后切除。

表 10 给出了 7 种不同类型电机的仿真结果。结果表明,故障切除后不同类型的 IM 均产生较大的助增电流,导致差动电流超过制动电流及门槛值,可能被误判为区内故障。然而,所有情形下正序电流幅值的衰减率均大于 10%,满足闭锁条件,因此保护均能可靠闭锁,不发生误动。不同电机类型的衰减特性存在差异,例如水泵或厂用电类电机衰减率为 18.32%,而空调类电机衰减率高达 94.52%,均明显区别于故障电流特征,说明本文所提闭锁判据具有良好的适应性。

综上所述,本文系统考虑了电机类型、电机占比、接入位置和区内外故障等多种实际因素,通过

全面仿真验证了所提方案在实际工程中的可行性。

表 10 案例 9 情形下区段 B₁₁B₁₂ 的仿真结果 (以 A 相为例)

Table 10 Simulation results of section B₁₁B₁₂ for Case 9 (taking phase A for example)

IM 类型	I_{diff_A}/kA	$K_{res}I_{res_A}/kA$	I_{thd}/kA	$\rho/\%$	是否跳闸
小型工业电机	0.51	0.30	0.26	28.55	否
大型工业电机	0.59	0.34	0.26	25.36	否
水泵或厂用电	0.38	0.23	0.26	18.32	否
民用综合电机	0.30	0.19	0.26	67.90	否
工业综合电机	0.33	0.10	0.26	68.73	否
空调综合电机	0.37	0.22	0.26	94.52	否

4 励磁涌流现场录波验证

图 10 展示了某条 10 kV 线路在配电变压器 (10 kV/0.4 kV, 1600 kVA) 合闸产生励磁涌流时的电压及电流波形,录波装置完整捕捉了涌流发生前 5 个周波及涌流持续 9 个周波的动态过程,电流互感器变比为 600:5,电压互感器变比为 100:1,录波包含 8 个通道,自上而下依次为: A 相电流、B 相电流、C 相电流、零序电流、A 相电压、B 相电压、C 相电压及零序电压。由波形分析可知,三相电流呈现显著的非对称性与间断角特征,且其幅值随时间呈指数型衰减。为进一步量化衰减特性,对电流正序分量幅值进行提取,如图 11 所示,可以看出励磁涌流持续时间为 100~280 ms,共 180 ms。

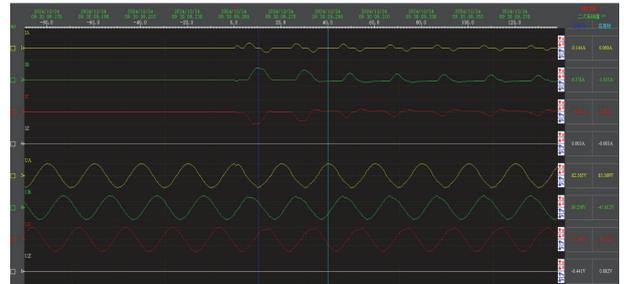


图 10 现场励磁涌流波形

Fig. 10 Field inrush current waveform

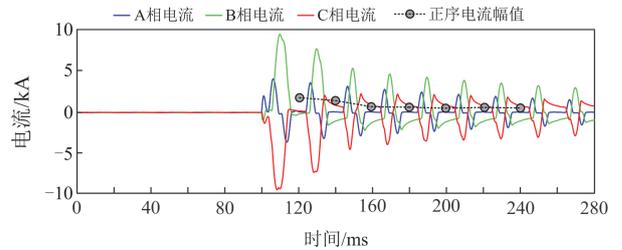


图 11 三相电流及其正序电流幅值波形

Fig. 11 Waveforms of three-phase current and its positive sequence current amplitude

根据 2.3 节闭锁策略, 保护将在此期间进行两次衰减率计算, 计算结果见表 11。

表 11 现场案例的计算结果

Table 11 Calculation results for the real case

计算次数	相别	$I_{dir,A}/$ kA	$K_{res}I_{res,A}/$ kA	$I_{thd}/$ kA	$\rho/\%$	是否 跳闸
第一次计算	A	1.58	0.79	1.15	29.82	否
	B	3.48	1.74	1.15		
	C	3.41	1.71	1.15		
第二次计算	A	0.43	0.21	1.15	11.14	否
	B	1.09	0.54	1.15		
	C	1.01	0.50	1.15		

由表 11 可以看出, 对于第一次计算, 虽然差动电流大于制动电流和门槛值, 但因衰减率(29.82%)远高于 10%, 保护被正确闭锁; 100 ms 后进行第二次计算, 此时涌流已显著衰减, 差动电流已低于门槛值, 且衰减率降至 11.14%, 仍高于闭锁门槛, 因此保护仍被闭锁, 不会误动。

此外需说明, 表 11 中差动门槛值 I_{thd} 是按单台 1600 kVA 变压器整定, 但现场实际接有 3 台变压器, 容量分别为 1600、800、100 kVA, 总容量为 2500 kVA。若按实际总容量整定, 差动保护门槛值应更高, 第二次计算时差动电流更不可能动作, 进一步保证了防误动的可靠性。基于现场实测数据的分析结果充分验证了所提闭锁方法的有效性及工程实用性。

5 结论

针对 T 接负荷分支导致双端差动保护性能下降甚至误动这一问题, 本文结合仿真结果分析了 T 接变压器及 IM 不同情形下双端差动保护的适应性, 并提出基于差动电流正序分量衰减特征的闭锁方案。该方案采用全周波傅里叶算法计算相量幅值, 算法简单, 易于实现。仿真结果及现场录波数据表明, 所提方案在不同工况下均能正确可靠判断, 避免了保护因非区内故障事件误动, 拓宽了差动保护应用场景。

附录 A

图 A1 为励磁涌流的产生过程, 其中 ψ_s 为饱和磁通。

根据图 A1 和式(3), 可以观察到磁通 $\psi(t)$ 的峰值包络 ψ_{max} , 由式(A1)给出。

$$\psi_{max} = \psi_m + (\psi_r + \psi_m \cos \beta) e^{-\frac{t}{\tau_r}} \quad (A1)$$

式中: τ_r 通常在 0.5~5 个周期之间^[25]。

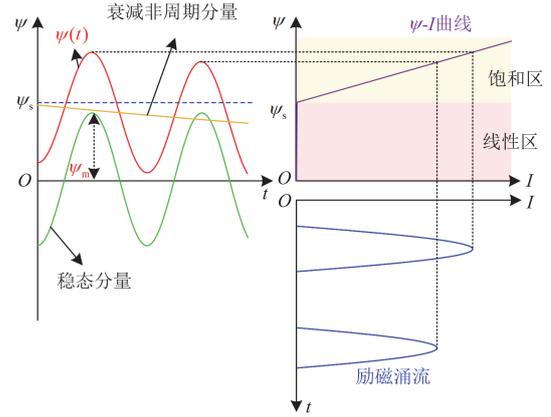


图 A1 励磁涌流产生过程

Fig. A1 Generation process of inrush current

进一步, 位于饱和区域的峰值包络 ψ_{max_sat} 由式(A2)给出。

$$\psi_{max_sat} = \psi_m + (\psi_r + \psi_m \cos \beta) e^{-\frac{t}{\tau_r}} - \psi_s \quad (A2)$$

考虑到 ψ_s 和 ψ_m 的数值相近, 可以推导出式(A3)。

$$\psi_{max_sat} \approx (\psi_r + \psi_m \cos \beta) e^{-\frac{t}{\tau_r}} \quad (A3)$$

基于图 A1 和式(A3), 励磁涌流的峰值包络 I_{max_inrush} 可以表示为式(A4)。

$$I_{max_inrush} = \frac{(\psi_r + \psi_m \cos \beta) e^{-\frac{t}{\tau_r}}}{K_{sat}} \quad (A4)$$

式中: K_{sat} 为图 A1 饱和区域的 $\psi - I$ 曲线斜率。进一步地, 正序励磁涌流幅值 I_p 的表达式为

$$I_p = K_p \cdot \frac{(\psi_r + \psi_m \cos \beta) e^{-\frac{t}{\tau_r}}}{K_{sat}} \quad (A5)$$

式中: K_p 为励磁涌流峰值包络与正序分量幅值相关联的系数。

将式(A5)代入衰减率表达式, 可以得到式(A6)。

$$\rho = \frac{(1 - e^{-\frac{T}{\tau_r}})}{e^{-\frac{T}{\tau_r}}} \times 100\% \quad (A6)$$

式中: T 为工频周期(20 ms)。

据此计算, 励磁涌流衰减率的理论范围约为 22.1%~638.9%。高于本文所设 10% 的门槛值, 表明该整定值在当前配电系统常见时间常数范围内具有适用性。

综上, 尽管暂态电流特性受多因素影响, 本文所提 10% 的衰减门槛在多数典型场景下能够有效识别暂态过程。在实际工程应用中, 还可结合具体网

络的负荷特性、测量误差及可靠性需求对该门檻值进行适应性调整。

附录 B

表 B1 IEEE Task Force 推荐感应电机参数^[26]

Table B1 IEEE Task Force recommended induction motor parameters

感应电机类型	R_s	X_s	X_m	R_r	X_r	p.u.
小型工业电机	0.031	0.100	3.20	0.018	0.180	
大型工业电机	0.013	0.067	3.80	0.009	0.170	
水泵	0.013	0.140	2.40	0.009	0.120	
厂用电	0.013	0.140	2.40	0.009	0.120	
民用综合电机	0.077	0.107	2.22	0.079	0.098	
工业综合电机	0.035	0.094	2.80	0.048	0.163	
空调综合电机	0.064	0.091	2.23	0.059	0.071	

表 B1 中, R_s 、 R_r 和 X_r 分别表示定子电抗、转子电阻和转子漏抗。

参考文献

- [1] 栾琨, 戴志辉, 史琛. 应对 10 kV 配电网电流保护失配问题的整定优化方案[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 155-166.
LUAN Kun, DAI Zhihui, SHI Chen. A setting optimization scheme to address current protection mismatch in a 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 155-166.
- [2] 樊群才, 胡筋, 廖艳萍, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的分布式电源接入配电网继电保护的整定优化研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 74-79.
FAN Qunca, HU Jia, LIAO Yanping, et al. Research on relay protection setting optimization of distribution network connected with distributed power supply based on improved whale optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 74-79.
- [3] 邓祥力, 葛慧宁, 廖玥琳, 等. 基于多源数据交互的高渗透率主动配电网保护策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 101-111.
DENG Xiangli, GE Huining, LIAO Yuelin, et al. Active distribution network protection strategy based on multi-source data interaction under high permeability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 101-111.
- [4] 高厚磊, 李娟, 朱国防, 等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 40-44.
GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 40-44.
- [5] 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.
- [6] 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): 81-90.
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): 81-90.
- [7] 史艳刚, 朱海勇, 陆立文, 等. 低频输电系统控制对差动保护影响及优化策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(3): 160-169.
SHI Yangang, ZHU Haiyong, LU Liwen, et al. Influence of low-frequency transmission system control on differential protection and optimization strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 160-169.
- [8] 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): 76-84.
ZHANG Xuesong, MA Xiao, ZHANG Lei, 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): 76-84.
- [9] 肖澍昱, 林湘宁, 魏繁荣, 等. 面向含不可测分支配电网线路不对称故障可靠辨识的负序电流比相保护判据[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2435-2447.
XIAO Shuyu, LIN Xiangning, WEI Fanrong, et al. Phase comparison protection of negative sequence current for distribution lines with unmeasurable branches[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2435-2447.
- [10] ZHENG Xiaodong, CHAO Chenxu, WENG Yang, et al. High-frequency fault analysis-based pilot protection scheme for a distribution network with high photovoltaic penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 302-314.
- [11] YUAN Tong, GAO Houlei, PENG Fang, et al. Adaptive quasi-power differential protection scheme for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(1): 324-339.
- [12] 王钢, 冯婧桐, 李杰. 含逆变型分布式电源和分支负

- 荷的配电网自适应电流差动保护[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2593-2602.
- WANG Gang, FENG Jingtong, LI Jie. Adaptive current differential protection for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators and branch loads[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2593-2602.
- [13] 李海锋, 张正刚, 梁远升, 等. 基于谐波信号注入的含逆变型分布式电源配电网电流差动保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 120-128.
- LI Haifeng, ZHANG Zhenggang, LIANG Yuansheng, et al. Current differential protection for distribution network with inverter-interfaced distributed generators based on injection of harmonic signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 120-128.
- [14] 陈春, 曹伯仲, 曹一家, 等. 高比例分布式电源接入下基于变分模态分解的励磁涌流辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 94-104.
- CHEN Chun, CAO Bozhong, CAO Yijia, et al. Identification of inrush current based on variational modal decomposition under a high proportion of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 94-104.
- [15] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [16] LIN Xiangning, MA Xiao, WANG Zixuan, et al. A novel current amplitude differential protection for active distribution network considering the source-effect of IM-type unmeasurable load branches[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 129.
- [17] 王子璇. 有源配电网新型电流幅值差动保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [18] 厂用电继电保护整定计算导则: DL/T 1502—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [19] WANG Ying, LI Shunyi, XIAO Xianyong. Estimation method of voltage sag frequency considering transformer energization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3404-3413.
- [20] DUAN Jiandong, ZHAO Xiaoni, ZHU Darui, et al. Detection of inrush current in distribution network based on the attenuation factor of current fundamental[C] // CICED, 2016, Xi'an, China: 1-5.
- [21] TLEIS N D. Modelling of ac rotating machines[M] // Power Systems Modelling and Fault Analysis, 2008, Oxford: Newnes: 301-396.
- [22] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1610-1618.
- [23] YU Haotian, JIN Zongshuai, ZHANG Hengxu, et al. A phasor estimation algorithm robust to decaying DC component[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 860-870.
- [24] YUAN Tong, GAO Houlei, PENG Fang, et al. Scheme to prevent maloperation of current differential protection due to non-internal-fault events in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2025, 16(2): 1019-1036.
- [25] JAFARPISHEH B, MADANI S M, SHAHRTASH S M. A new DFT-based phasor estimation algorithm using high-frequency modulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(6): 2416-2423.
- [26] Standard load models for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1302-1313.

收稿日期: 2025-06-17; 修回日期: 2025-10-20

作者简介:

林浩然(1987—), 男, 硕士, 副高级工程师, 研究方向为配电网保护与运行管理;

孔维娜(1986—), 女, 硕士, 副高级工程师, 研究方向为配电网保护与运行管理;

褚福亮(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网二次运检。

(编辑 张颖)