

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231643

## 考虑不可测 T 接负荷的配电网虚拟三端电流差动保护

梁伟宸<sup>1</sup>, 王泽众<sup>2</sup>, 周成瀚<sup>3</sup>, 王亚娟<sup>1</sup>, 李维宇<sup>1</sup>, 邹贵彬<sup>3</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054;  
3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 采用电流差动保护可解决高比例分布式电源接入配电网引起的馈线保护问题。然而当馈线内存在不可测 T 接负荷分支时, 差动保护只能利用被保护线路两端的数据构造判据, 性能受到影响。为解决该问题, 首先分析了不可测 T 接负荷对传统两端电流差动保护的影响。在此基础上, 提出了一种虚拟三端电流差动保护方法。该方法将被保护线路内部的不可测 T 接分支等效为一个虚拟支路, 利用故障前后线路两端的电压、电流数据估算该虚拟支路的电流相量, 并与馈线两端的电流相量一起构成三端电流差动保护判据。仿真结果表明, 该方法在无需 T 接负荷测量数据的前提下能够满足配电网在不同场景下的保护需求, 相比传统的电流差动保护具有更高的可靠性与灵敏性。

**关键词:** 电流差动保护; 配电网; 不可测 T 接负荷; 虚拟支路; 分布式电源

### Virtual three-terminal current differential protection for distribution networks considering unmeasurable T-connected loads

LIANG Weichen<sup>1</sup>, WANG Zezhong<sup>2</sup>, ZHOU Chenghan<sup>3</sup>, WANG Yajuan<sup>1</sup>, LI Weiyu<sup>1</sup>, ZOU Guibin<sup>3</sup>

(1. Electric Power Science Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China;  
2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China; 3. School of Electrical Engineering,  
Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Using current differential protection can solve the feeder protection issue caused by the connection of a high proportion of distributed generations to the distribution network. However, when there are unmeasurable T-connected load branches in the feeder, differential protection can only use the data from both terminals of the protected line to construct criteria. This affects its performance. To address this issue, the impact of unmeasurable T-connected loads on traditional two-terminal current differential protection is analyzed first, and then a virtual three-terminal current differential protection method is proposed. This method equates the unmeasurable T-connected branches inside the protected line to a virtual branch, estimates the current phasor of the virtual branch using voltage and current data at both terminals of the line before and after a fault, and finally forms a three-terminal current differential protection criterion together with the current phasors at both terminals of the feeder. The simulation results show that this method can meet the protection requirements of distribution networks in different scenarios without the need for T-connected load measurement data and has higher reliability and sensitivity than traditional current differential protection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077124).

**Key words:** current differential protection; distribution network; unmeasurable T-connected load; virtual branch; distributed generation

## 0 引言

随着双碳目标的提出以及整县光伏方案的推进,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52077124); 国网冀北电力有限公司科技项目资助(52018K230001)

越来越多的分布式电源(distributed generation, DG)就地接入配电网, 使其演变为有源网络。有源配电网中负荷电流和故障电流的方向与幅值均存在较大的不确定性, 导致传统的馈线三段式电流保护难以整定配合<sup>[1-3]</sup>。电流差动保护受 DG 接入影响较小且具有绝对的选择性, 目前已在对供电可靠性要求较高

的配电网馈线中得到应用<sup>[4-5]</sup>。随着 5G 通信<sup>[6-9]</sup>和低成本数据自同步<sup>[10-11]</sup>技术的发展,配电网差动保护在业内正在受到越来越多的关注。

为了使差动保护方案更加适应含DG接入的配电网,文献[12]提出了基于正序故障分量电流幅相关系的纵联差动保护方法,文献[13]利用派克变换构造了有源配电网的直流电流差动保护原理,文献[14]基于拟功率定理提出了一种抗同步误差能力较强的多端纵联差动保护方法。然而,上述方法均未考虑不可测T接负荷分支的影响。架空线形式的配电网馈线中可能存在大量T接负荷分布在线路的不同位置,由于这类负荷重要程度较低且单一负荷容量较小,通常不具备测量单元。在含不可测T接负荷的配电网馈线中,只能利用被保护区段两端的测量数据构造差动保护判据,然后通过增大制动系数的方式防止正常运行或区外故障时保护误动<sup>[15-16]</sup>。但设置较大的制动系数会影响差动保护在区内故障时的灵敏性。

针对不可测T接负荷对电流差动保护的影响,文献[17]在自适应电流差动保护的基础上,增加了基于方向阻抗继电器的辅助判据以防止区外故障误动;文献[18]提出了一种考虑不可测分支的电流幅值差动保护判据,但在DG渗透率较高时可能失效;文献[19]利用负序电流提出了一种配电网线路纵联保护判据,但只适用于不对称故障;文献[20]提出了一种高频阻抗差动保护,在原理上不受T接负荷分支的影响,但当配电网线路较短或运行场景变化时特征频段难以选取;文献[21]提出了一种利用逆变型DG注入谐波实现的电流差动保护方案,但需要先对配电网中的逆变型DG进行改造。

综上所述,当配电网馈线内存在不可测T接负荷时,只能利用被保护线路两端的测量数据构造纵联差动保护,现有的方法均存在一定的局限性。对此,本文提出了一种虚拟第三端电流差动保护方法,将被保护馈线内的全部T接负荷分支等效为一个虚拟的第三支路,利用故障前后线路两端的电压、电流数据估算该虚拟支路的电流相量,并与馈线两端的电流相量一起构成三段电流差动保护判据。在含有不可测T接负荷的配电网中,该方法无须为了防止保护误动而设置过高的制动系数,相比传统的两端电流差动保护具有更高的可靠性与灵敏性。

## 1 不可测 T 接负荷对电流差动保护的影响

以图1所示的简单配电网线路为例分析不可测T接负荷对电流差动保护的影响,在本文中电流的参考正方向为从母线或T接负荷流向线路。

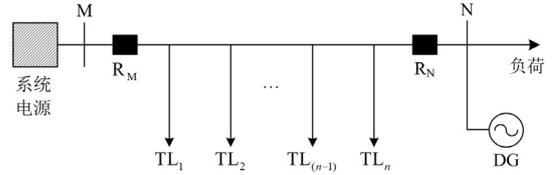


图1 含有不可测 T 接负荷的配电网线路

Fig. 1 Distribution line with unmeasurable T-connected loads

图1中:  $T_{L1}, T_{L2}, \dots, T_{L(n-1)}, T_{Ln}$  分别为位于不同位置的 T 接负荷;  $R_M$  和  $R_N$  为部署在被保护线路 MN 两端的差动保护装置。

在现有的配电网馈线纵联差动保护中,许多方案采用正序分量构造保护判据<sup>[12, 16-18]</sup>,一方面是因为配电网差动保护主要针对三相及两相故障,采用三相重合闸无须故障选相,正序分量能够反映各种类型的故障且相比分相差动保护可减少三分之二的通信量;另一方面是配电网中的逆变类DG多采用消除负序的控制策略,仅输出正序电流,在正序网络中进行故障分析更为简便<sup>[22]</sup>。因此,本文以正序分量为基础进行故障分析并提出新的保护原理。对于图1所示的含多个T接负荷的线路,正常运行时其正序等值网络如图2所示。

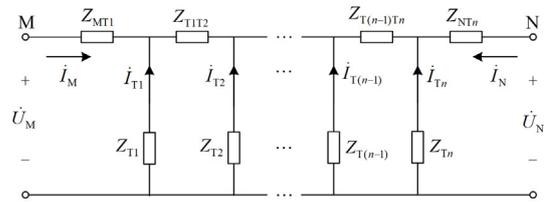


图2 含多个 T 接负荷线路的正序等值网络

Fig. 2 Positive sequence equivalent network of the line with multiple T-connected loads

图2中:  $\dot{U}_M$  和  $\dot{U}_N$  表示线路 MN 两端的正序电压相量;  $\dot{I}_M$  和  $\dot{I}_N$  表示线路 MN 两端的正序电流相量;  $Z_{T1}, Z_{T2}, \dots, Z_{Tn}$  表示各个 T 接负荷的正序等值阻抗;  $Z_{MT1}, Z_{T1T2}, \dots, Z_{NTn}$  表示各段线路的正序阻抗;  $\dot{I}_{T1}, \dot{I}_{T2}, \dots, \dot{I}_{Tn}$  表示流经各个 T 接负荷的正序电流相量。

由于 T 接负荷的数据无法测量,传统的电流差动保护只能利用被保护线路两端的电流相量构造保护判据。以最常见的带制动特性的差动保护判据为例<sup>[23]</sup>,差动电流  $I_{dif}$ 、制动电流  $I_{res}$  和保护动作条件分别如式(1)一式(3)所示。

$$I_{dif} = \left| \dot{I}_M + \dot{I}_N \right| \quad (1)$$

$$I_{res} = K_{res} \cdot \left| \dot{I}_M - \dot{I}_N \right| \quad (2)$$

$$I_{\text{dif}} > I_{\text{res}} \quad (3)$$

式中,  $K_{\text{res}}$  为制动系数。

电流差动保护应优先确保正常运行和区外故障时保护不误动<sup>[21]</sup>。若被保护线路内部不存在 T 接负荷, 未发生区内故障时线路中流过穿越性电流, 两端电流相量之和近似为 0, 电流差动保护可靠不误动; 然而, 若存在 T 接负荷, 两端电流相量之和不再为 0, 而是等于流入各 T 接负荷分支的电流相量和, 如式(4)所示。

$$|\dot{i}_M + \dot{i}_N| = |\sum \dot{i}_T| \quad (4)$$

式中,  $\sum \dot{i}_T$  为各 T 接负荷分支的电流相量和。

为了防止保护误动, 在含有不可测 T 接负荷的配电网线路中, 基于两端电流的差动保护须设置较大的制动系数。单位圆幅相图可用来表示电流差动保护的動作特性, 以该图为例说明 T 接负荷的影响, 如图 3 所示。

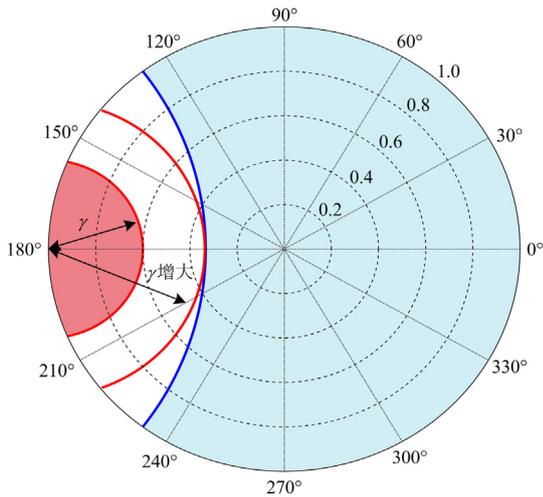


图 3 传统电流差动保护的幅相关系图

Fig. 3 Amplitude-phase relationship diagram of traditional current differential protection

图 3 中, 任何工况下线路两端电流相量的关系均可用单位圆内的一个点体现, 该点在极坐标中的角度对应两端电流的相位差, 该点到圆心的距离为两端电流幅值比  $\rho$ , 假设在线路 MN 中 M 端的电流幅值最大, 则  $\rho = |\dot{i}_N|/|\dot{i}_M|$ 。

图 3 中浅蓝色区域为  $K_{\text{res}} = 0.5$  时传统两端电流差动保护的動作区域。若不存在 T 接负荷, 未发生区内故障时在幅相图中对应的点位于  $-1 \angle 180^\circ$  附近, 远离動作区域保护不会误动。若考虑 T 接负荷, 未发生区内故障时在幅相图中的对应位置也会偏离  $-1 \angle 180^\circ$ , 根据文献[14]的分析, 未发生区内故障

时在幅相图中的对应位置位于以  $-1 \angle 180^\circ$  为圆心、以  $\gamma = |\sum \dot{i}_T|/|\dot{i}_M|$  为半径的区域内, 即图中的红色区域。为防止误动, 差动保护的動作区域应避开红色区域, 然而随着  $|\sum \dot{i}_T|$  的增大, 红色区域也会增大, 当红色区域接近動作区域时, 必须增大  $K_{\text{res}}$  以使差动保护的動作边界右移。

文献[14]认为 T 接负荷的容量有限, 红色区域不会无限增大, 只需要按照躲开最大 T 接负荷容量时的边界进行整定即可。然而, 有源配电网中负荷电流的分布十分复杂, 即使线路内 T 接负荷的最大容量较小, 当下游的负荷较小或者 DG 出力较大时, T 接负荷中仍会流过较大的负荷电流, 导致红色区域较大。为了便于分析, 将图 1 中馈线 MN 内部的 T 接负荷等效为一个负荷分支, 正常运行时其正序等值网络如图 4 所示。

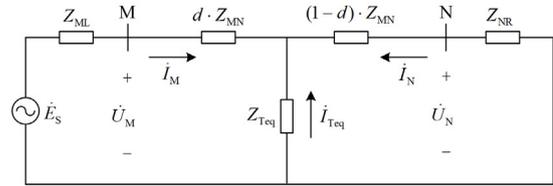


图 4 T 接负荷等效后正常运行时的正序等值网络

Fig. 4 Positive sequence equivalent network during normal operation after T-connected loads are equivalent

图 4 中:  $Z_{MN}$  为线路 MN 的正序阻抗;  $Z_{ML}$  和  $Z_{NR}$  分别为母线 M 左侧和母线 N 右侧的正序等值阻抗;  $Z_{Teq}$  为等效 T 接负荷的正序阻抗;  $i_{Teq}$  为流经等效 T 接负荷的正序电流相量, 其值等于式(4)中的  $\sum \dot{i}_T$ ;  $d$  为等效 T 接负荷的位置系数, 其值等于等效 T 接负荷到母线 M 的距离与线路 MN 长度的比值。

需要说明的是, 图 4 中线路末端的 DG 也被等效在  $Z_{NR}$  中, 可理解为  $Z_{NR}$  是线路末端负荷减去 DG 供电后剩余部分的等值阻抗。由图 4 可知,  $i_N$ 、 $i_{Teq}$  与  $i_M$  的关系可表示为

$$\dot{i}_N = -\dot{i}_M \cdot \frac{Z_{Teq}}{Z_{Teq} + (1-d) \cdot Z_{MN} + Z_{NR}} \quad (5)$$

$$\dot{i}_{Teq} = -\dot{i}_M \cdot \frac{(1-d) \cdot Z_{MN} + Z_{NR}}{Z_{Teq} + (1-d) \cdot Z_{MN} + Z_{NR}} \quad (6)$$

由式(6)可知, 当  $Z_{NR}$  较大时,  $i_{Teq}$  ( $\sum \dot{i}_T$ ) 的幅值接近  $i_M$ , 图 3 中的红色区域靠近单位圆的圆心, 传统电流差动保护的制动系数取值需接近甚至大于 1 才能防止保护误动, 这将严重影响区内故障时保护的動作性能。



障时差动电流的计算结果接近于 0, 可以设置一个相对较小的制动阈值  $K_{res,t}$ , 以保证故障区段可以被准确地识别。本文采用最大模值制动的方式构造虚拟三端电流差动保护的制动电流, 如式(15)所示。

$$I_{res} = K_{res,t} \cdot \max(|\dot{I}_M|, |\dot{I}_N|, |\dot{I}_{Teq}|) \quad (15)$$

### 2.3 所提方法的应用场景

所提虚拟三端电流差动保护的最大优势在于仅利用线路两端的测量数据即可实现接近多端电流差动保护的效果, 不受 T 接负荷容量的影响。因此, 该方法最适用的应用场景为含有大量不可测 T 接负荷分支的配电网馈线, 如图 6 中的馈线段  $B_4B_5$ 。该馈线内含有多处 T 接负荷( $TL_1$ 、 $TL_2$ 、 $TL_3$ ), 若在线路两端的保护装置  $R_7$ 、 $R_8$  中配置传统的两端电流差动保护, 则可能出现第 1 节中分析的制动系数难以整定以及保护误动、拒动等问题, 而本文所提方法不受影响。

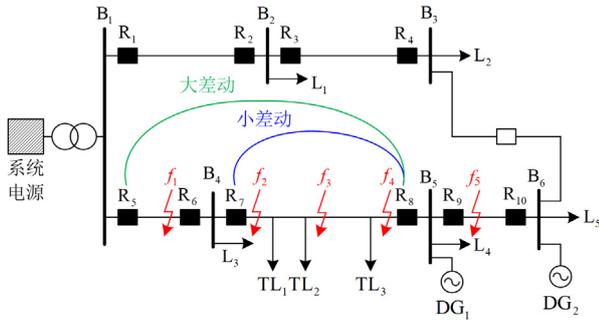


图 6 含 T 接负荷的配电网模型

Fig. 6 Distribution network model with T-connected loads

本文所提方法需要被保护线路两端的电压信息, 而当前中压配电网馈线中难以保证每个节点均配有全相电压互感器。在配电网中, 变电站出口母线和直接接入中压线路的大容量 DG 所在的母线通常具有全相电压测量能力。针对这种场景, 所提方法可采用“大差动”的方式进行配置, 如在图 6 中的保护装置  $R_5$ 、 $R_8$  之间配置虚拟三端电流差动保护, 以馈线段  $B_1B_5$  作为被保护线路。此时接入母线  $B_4$  处的负荷  $L_3$  也被当作 T 接负荷。虽然内部 T 接负荷的容量增加, 但由于所提方法在原理上不受 T 接负荷容量的影响, 仍能够正确动作。

## 3 仿真分析

利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建如图 6 所示的中压配电网模型, 验证所提方法的有效性。该模型中系统变压器电压为 110 kV/10.5 kV, 中性点不接地。模型中  $DG_1$ 、 $DG_2$  的容量分别为 1 MW 和 4 MW, 均为 PQ 控制的逆变型 DG, 且具

备国标要求的低电压穿越能力<sup>[25]</sup>。图 6 中:  $L_1$ — $L_5$  为接入母线的负荷;  $TL_1$ — $TL_3$  为馈线内部的 T 接负荷, 负荷参数如表 1 所示, 本文中负荷模型均采用恒阻抗模型;  $R_1$ — $R_{10}$  为差动保护装置。本节主要以  $R_7$ 、 $R_8$  之间的馈线段  $B_4B_5$  为研究对象, 在第 3.3 节分析“大差动”配置方式时以  $R_5$ 、 $R_8$  之间的馈线段  $B_1B_5$  为研究对象。馈线的正序阻抗为  $(0.27 + j0.352) \Omega/\text{km}$ , 馈线段  $B_4B_5$  的长度为 5 km, 其余馈线段长度均为 2 km; 故障点  $f_1$  位于馈线段  $B_1B_4$ , 且距母线  $B_4$  的距离为 10 m, 故障点  $f_5$  位于馈线段  $B_5B_6$ , 且距母线  $B_5$  的距离为 10 m, 故障点  $f_2$ — $f_4$  位于馈线段  $B_4B_5$  中, 且故障位置系数  $d_f$  分别为 0.05、0.5 和 0.95。

表 1 仿真模型中的负荷参数

Table 1 Load parameters in the simulation model

参数	数值
$L_1$ 、 $TL_2$ 、 $TL_3$ 的容量/MVA	1
$L_2$ 、 $TL_1$ 的容量/MVA	2
$L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 的容量/MVA	3
$L_1$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $TL_1$ 、 $TL_2$ 、 $TL_3$ 的功率因数	0.9
$L_2$ 、 $L_3$ 的功率因数	0.95

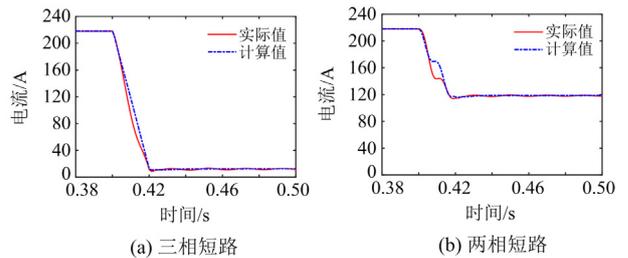
### 3.1 虚拟支路电流的估算精度

所提方法以估算出的虚拟支路电流相量  $\dot{I}_{Teq}$  代替实际各 T 接负荷分支的电流相量和  $\sum \dot{I}_T$ 。为描述虚拟支路电流的计算精度, 定义其误差为

$$I_{error} = |\dot{I}_{Teq} - \sum \dot{I}_T| \quad (16)$$

在  $f_1$ — $f_5$  点分别设置金属性三相短路(ABC)、两相短路(AB)、经  $1 \Omega$  和  $10 \Omega$  过渡电阻的两相接地短路( $ABg1 \Omega$ 、 $ABg10 \Omega$ ), 区外和区内故障点分别以  $f_1$  和  $f_3$  为例, 绘制虚拟支路电流计算值与 T 接分支电流实际值的变化曲线, 如图 7、图 8 所示。

在图 7、图 8 中故障均发生于 0.4 s。在本文中采用全周傅氏算法计算相量, 在故障时刻 20 ms 后计算相量的数据窗完全滚动至故障发生后, 因此之后的计算结果趋于稳定。由图 7 可以看出, 区外故障时无论发生何种类型故障, 虚拟支路电流的计算



(a) 三相短路

(b) 两相短路

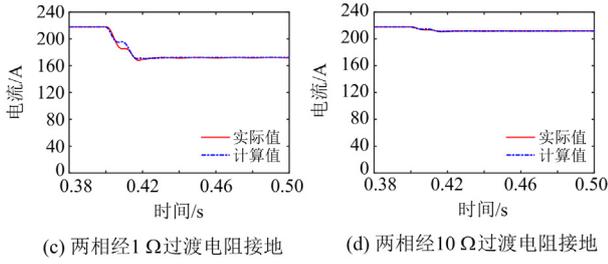


图 7 发生区外故障时虚拟支路电流的计算结果

Fig. 7 Calculation results of virtual branch current when external faults occur

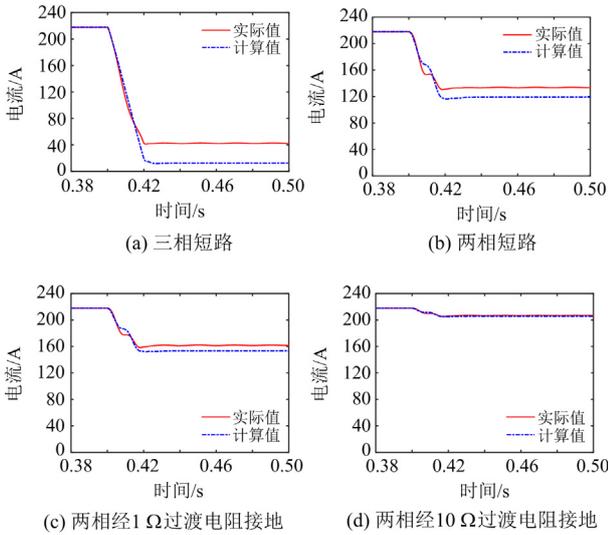


图 8 发生区内故障时虚拟支路电流的计算结果

Fig. 8 Calculation results of virtual branch current when internal faults occur

值均与实际值十分接近。由图 8 可以看出，区内故障发生时虚拟支路电流的计算精度相对较低，在金属性三相短路时误差最大。当故障点位于其他位置时也存在相同的情况，不同故障点发生不同类型故障时虚拟支路电流的计算结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出，在发生不同情况的区外故障时虚拟支路电流的计算误差均很小，最大误差不超过 2 A，与理论分析一致；发生区内故障时计算误差相对较大，当  $f_2$  点发生三相短路时的误差最大，为 75.04 A；当过渡电阻的阻值增大时，由于流入故障支路的电流减小，流入 T 接负荷的电流增大，但此时虚拟支路电流的计算精度更高。

### 3.2 所提方法与电流差动保护的对比

根据理论分析与 3.1 节的计算结果可知，所提方法在区外故障时的虚拟支路电流计算精度较高，可设置较小的制动系数，在本文中  $K_{res.t}$  的默认取值为 0.2。为验证所提方法在含不可测 T 接负荷线路

中的先进性，采用式(1)一式(3)代表的传统电流差动保护方法作为对比，传统方法中的制动系数  $K_{res}$  取 0.5。在不同故障点设置 3.1 节中提到的各种类型故障，所提方法与传统电流差动保护方法的仿真结果如表 3 所示。

表 2 虚拟支路电流计算结果

Table 2 Calculation results of virtual branch current

故障点	故障类型	$I_{T_{eq}}/A$	$\sum I_T/A$	$I_{error}/A$
$f_1$	ABC	12.23 $\angle$ 45.05°	10.83 $\angle$ 39.17°	1.83
	AB	118.67 $\angle$ 60.26°	116.94 $\angle$ 60.24°	1.72
	ABg1 $\Omega$	172.33 $\angle$ 53.09°	171.39 $\angle$ 53.01°	0.97
	ABg10 $\Omega$	211.79 $\angle$ 59.25°	211.55 $\angle$ 59.20°	0.29
$f_2$	ABC	67.57 $\angle$ -102.01°	8.37 $\angle$ 49.57°	75.04
	AB	81.22 $\angle$ 52.26°	115.84 $\angle$ 60.29°	37.00
	ABg1 $\Omega$	150.63 $\angle$ 48.23°	164.64 $\angle$ 53.79°	20.72
	ABg10 $\Omega$	207.65 $\angle$ 58.29°	209.48 $\angle$ 59.15°	3.62
$f_3$	ABC	12.56 $\angle$ 43.31°	41.97 $\angle$ 64.92°	30.64
	AB	119.01 $\angle$ 58.10°	133.20 $\angle$ 60.24°	14.94
	ABg1 $\Omega$	153.50 $\angle$ 52.49°	161.05 $\angle$ 54.89°	10.01
	ABg10 $\Omega$	205.80 $\angle$ 58.02°	206.80 $\angle$ 58.56°	2.20
$f_4$	ABC	36.77 $\angle$ 59.39°	86.44 $\angle$ 63.78°	49.86
	AB	131.80 $\angle$ 58.10°	155.60 $\angle$ 60.27°	24.41
	ABg1 $\Omega$	155.16 $\angle$ 53.83°	171.01 $\angle$ 57.01°	18.25
	ABg10 $\Omega$	204.12 $\angle$ 57.63°	207.08 $\angle$ 58.74°	4.95
$f_5$	ABC	94.35 $\angle$ 59.88°	96.19 $\angle$ 59.89°	1.84
	AB	160.01 $\angle$ 59.14°	160.59 $\angle$ 59.19°	0.59
	ABg1 $\Omega$	174.74 $\angle$ 56.78°	174.70 $\angle$ 56.87°	0.25
	ABg10 $\Omega$	207.83 $\angle$ 58.80°	207.60 $\angle$ 58.80°	0.23

由表 3 可以看出，对于所提的虚拟三端电流差动保护，在各种情况下区外故障时差动电流均很小，与理论分析一致，制动电流均至少大于动作电流的 10 倍，保护可靠不会误动作；在区内故障时差动电流很大，远大于制动电流，保护能够灵敏动作。尽管表 2 中的计算结果表明区内发生三相短路时虚拟支路电流的计算误差相对较大，但由于此时线路两端的故障电流幅值更大，虚拟支路电流的误差并不影响保护动作的正确性。

对于传统电流差动保护，尽管本节中选取的制动系数  $K_{res}$  能够保证区内故障时保护均能正确动作，但其灵敏性低于所提的虚拟三端电流差动保护。最重要的是当区外  $f_1$  点发生经 1  $\Omega$  或 10  $\Omega$  过渡电阻的两相接地短路时，保护将会误动。其中当过渡电阻为 1  $\Omega$  时差动电流已大于制动电流的 2 倍，考虑互感器测量误差等因素，传统电流差动保护的  $K_{res}$  至少要设置为 1.2 才能满足保护不误动。然而，若将  $K_{res}$  的值由 0.5 提高至 1.2(相当于表 3 中传统电流差动保护的  $I_{res}$  均乘以 2.4)，区内  $f_2$  点发生的全部

表 3 所提方法与传统电流差动保护方法的仿真结果

Table 3 Simulation results of the proposed method and the traditional current differential protection method

故障点	故障类型	$i_M/A$	$i_N/A$	$i_{Teq}/A$	虚拟三端电流差动保护			传统两端电流差动保护		
					$I_{dif}/A$	$I_{res}/A$	动作?	$I_{dif}/A$	$I_{res}/A$	动作?
$f_1$	ABC	290.72∠29.87°	301.40∠-149.80°	12.23∠45.05°	1.81	60.28	×	10.82	296.06	×
	AB	64.11∠46.30°	179.80∠-124.66°	118.67∠60.26°	1.73	35.96	×	116.93	121.66	×
	ABg1 Ω	121.48∠-169.43°	115.82∠-81.86°	172.33∠53.09°	0.97	34.47	×	171.36	82.12	√
	ABg10 Ω	227.22∠-140.08°	75.21∠-28.55°	211.79∠59.25°	0.27	45.44	×	211.53	132.12	√
$f_2$	ABC	4698.62∠-137.03°	305.58∠-150.08°	67.57∠-102.01°	5051.71	939.72	√	4996.76	2200.70	√
	AB	2430.04∠-135.88°	181.73∠-125.36°	81.22∠52.26°	2528.50	486.02	√	2608.97	1125.80	√
	ABg1 Ω	1471.12∠-119.01°	119.50∠-89.51°	150.63∠48.23°	1431.23	294.23	√	1576.26	684.19	√
	ABg10 Ω	443.32∠-117.41°	76.90∠-32.50°	207.65∠58.29°	259.97	88.66	√	456.61	221.59	√
$f_3$	ABC	2629.52∠-140.67°	317.02∠-149.08°	41.97∠64.92°	2930.98	525.91	√	2943.50	1158.20	√
	AB	1392.30∠-138.32°	186.37∠-126.11°	119.01∠58.10°	1460.34	278.47	√	1574.98	605.40	√
	ABg1 Ω	1047.54∠-126.26°	137.43∠-101.05°	153.50∠52.49°	1020.30	209.51	√	1173.35	462.53	√
	ABg10 Ω	412.97∠-120.85°	84.60∠-41.24°	205.80∠58.02°	239.00	82.60	√	436.26	203.16	√
$f_4$	ABC	1848.66∠-141.65°	329.30∠-147.46°	36.77∠59.39°	2142.46	369.73	√	2176.53	760.71	√
	AB	1000.49∠-138.10°	191.24∠-126.76°	131.80∠58.10°	1061.43	200.10	√	1188.59	406.93	√
	ABg1 Ω	826.98∠-126.16°	150.24∠-107.04°	155.16∠53.83°	812.66	165.40	√	967.81	345.06	√
	ABg10 Ω	388.91∠-122.93°	91.69∠-49.47°	204.12∠57.63°	227.73	77.78	√	424.23	186.65	√
$f_5$	ABC	1727.07∠-139.29°	1636.58∠39.60°	94.35∠59.88°	1.84	345.42	×	96.19	1681.80	×
	AB	941.40∠-135.66°	787.29∠41.34°	160.01∠59.14°	0.60	188.28	×	160.57	864.05	×
	ABg1 Ω	785.07∠-127.90°	611.18∠50.73°	174.74∠56.78°	0.35	157.01	×	174.67	698.08	×
	ABg10 Ω	381.73∠-122.96°	174.39∠54.91°	207.83∠58.80°	0.28	76.35	×	207.57	278.02	×

故障案例以及  $f_3$ 、 $f_4$  点中经 10 Ω 过渡电阻的两相接地故障均会出现保护拒动的情况。

综上所述, 在含有不可测 T 接负荷的配电网线路中, 传统电流差动保护若选择较为常规的制动系数取值, 则容易导致区外故障时误动作; 而为避免误动选择保守的制动系数取值, 将会导致区内故障时保护灵敏度下降甚至拒动。由于能够较为精确地估算出区内 T 接负荷的电流和, 所提虚拟三端电流差动保护方法仅利用线路两端的数据即可实现接近多端电流差动保护的效果, 在区内和区外故障时均具有更好的性能。

### 3.3 同步误差对所提方法的影响

电流差动类保护依赖数据的同步比较, 本文所提的虚拟三端电流差动保护也不例外。由于配电网中大多不具备往返时延对称的通信通道, 无法使用输电线路中成熟应用的乒乓算法进行同步。全球导航卫星系统可为配电网差动保护装置提供高精度的授时信号, 目前基于北斗授时的差动保护装置已能够将同步误差限制在 40 ns 以内<sup>[26]</sup>。考虑到卫星信号稳定性不足的问题, 文献[27]提出了一种基于参考相量的数据自同步方法, 能够适应大量 T 接分支接入的配电网馈线, 最大同步误差小于 0.3 ms, 可作为卫星信号不稳定时的后备同步方式。考虑一定的裕度, 本文将两端数据的最大同步误差设置为 0.5 ms。在表 3 所示的案例中加入 0.5 ms 的同步误

差后, 虚拟支路电流的计算误差以及所提方法的计算结果如表 4 所示。由于考虑了较大的同步误差, 在表 4 中将所提方法的制动系数  $K_{res,t}$  上调至 0.5。

表 4 加入 0.5 ms 同步误差后所提方法的计算结果

Table 4 Calculation results of the proposed method with 0.5 ms synchronization error being added

故障点	故障类型	$I_{error}/A$	$I_{dif}/A$	$I_{res}/A$	动作?
$f_1$	ABC	47.70	81.20	150.42	×
	AB	36.38	52.69	89.96	×
	ABg1 Ω	22.66	26.49	95.47	×
	ABg10 Ω	11.38	4.52	113.61	×
$f_2$	ABC	417.67	5320.76	2349.30	√
	AB	195.89	2663.99	1215.04	√
	ABg1 Ω	107.77	1508.71	735.57	√
	ABg10 Ω	15.39	275.63	221.66	√
$f_3$	ABC	204.11	3063.52	1314.76	√
	AB	89.32	1526.67	696.17	√
	ABg1 Ω	60.50	1067.57	523.77	√
	ABg10 Ω	10.29	252.08	206.49	√
$f_4$	ABC	159.30	2225.04	924.33	√
	AB	67.04	1101.03	500.25	√
	ABg1 Ω	49.91	844.04	413.39	√
	ABg10 Ω	9.66	238.35	194.45	√
$f_5$	ABC	240.78	436.82	863.55	×
	AB	107.80	205.81	470.70	×
	ABg1 Ω	81.84	160.50	392.54	×
	ABg10 Ω	18.14	45.18	190.87	×

对比表 4 和表 2 中数据可以看出, 加入 0.5 ms 同步误差后, 首先会对虚拟支路电流的计算精度造成影响。区内故障时, 虚拟支路电流的计算误差不再接近于 0, 特别是当被保护区段下游的  $f_5$  点发生金属性三相短路时, 最大计算误差高达 240.78 A; 区内故障时虚拟支路电流的计算精度也有所下降, 当被保护区段内靠近首端的  $f_2$  点发生金属性三相短路时, 最大计算误差可达 417.67 A。

由表 4 中的计算结果可以看出, 存在 0.5 ms 同步误差时, 通过设置合适的制动系数, 所提方法仍然能够正确识别区内外故障。然而, 通过对比表 3 中的计算结果可以看出, 在加入同步误差后, 区外故障时保护可靠不误动的能力以及区内故障时灵敏动作的能力均有所降低。因此, 尽管加入 0.5 ms 同步误差后所提方法仍然能够正确动作, 但保护的性受到了一定程度的影响, 在具备条件时应选用精度较高的数据同步方法以提高该方法的性能。

### 3.4 “大差动”配置下所提方法的有效性

为验证所提方法在“大差动”配置下的有效性, 以馈线段  $B_1B_5$  作为被保护区段, 利用  $R_5$  和  $R_8$  的测量数据实现虚拟三端电流差动保护。在不同故障点设置不同类型的故障时, 所提方法的虚拟支路电流估算误差、差动电流和制动电流的仿真结果如表 5 所示。

表 5 “大差动”配置下所提方法的仿真结果

Table 5 Simulation results of the proposed method with “large difference”

故障点	故障类型	$I_{\text{error}}/\text{A}$	$I_{\text{dif}}/\text{A}$	$I_{\text{res}}/\text{A}$	动作?
$f_1$	ABC	124.63	6242.17	1170.94	✓
	AB	61.31	3115.71	615.70	✓
	ABg1 $\Omega$	32.28	1642.77	364.98	✓
	ABg10 $\Omega$	5.19	270.26	124.51	✓
$f_2$	ABC	90.41	5046.62	944.98	✓
	AB	44.54	2526.02	504.41	✓
	ABg1 $\Omega$	24.98	1429.71	320.80	✓
	ABg10 $\Omega$	4.42	259.74	121.21	✓
$f_3$	ABC	81.65	2963.93	541.85	✓
	AB	40.16	1476.64	302.20	✓
	ABg1 $\Omega$	27.62	1031.58	237.64	✓
	ABg10 $\Omega$	6.34	241.73	115.05	✓
$f_4$	ABC	116.96	2192.85	389.88	✓
	AB	57.46	1086.26	226.20	✓
	ABg1 $\Omega$	43.54	831.73	194.39	✓
	ABg10 $\Omega$	12.06	233.09	110.24	✓
$f_5$	ABC	13.07	13.14	366.94	×
	AB	6.02	6.11	215.32	×
	ABg1 $\Omega$	4.59	4.71	186.44	×
	ABg10 $\Omega$	1.24	1.29	108.78	×

由表 5 可以看出, 尽管“大差动”配置下被保护线路内 T 接负荷的容量增加, 所提方法仍然能够正确区分区内外故障, 具有较高的可靠性与灵敏性。

## 4 结论

针对在含 T 接负荷的配电网馈线中传统电流差动保护性能下降的问题, 本文提出了一种虚拟三端电流差动保护方法。该方法利用故障前后线路两端的电压、电流数据估算出流入等效虚拟支路的电流相量, 并与馈线两端的电流相量一起构成三端电流差动保护判据。通过理论分析与仿真验证, 可得出以下结论:

1) 在区外故障时, 所提方法计算出的等效 T 接支路电流与实际馈线内全部 T 接负荷电流之和近似相等, 三端电流相量相加后得到的差动电流接近于 0, 保护可靠不误动。

2) 在区内故障时, 计算出的等效支路电流与实际馈线内 T 接负荷电流之和的误差相对较大, 但在数值上远小于两端的故障电流, 所提方法仍然能够正确动作且具有较高的灵敏性。

3) 所提方法不受 T 接负荷容量的影响, 当馈线中缺少测量单元或差动保护装置时, 可通过“大差动”配置的方式减少对硬件数量的依赖, 在含不可测 T 接负荷的配电网中具有更好的经济性。

## 参考文献

- [1] 韦明杰, 王聪博, 余越, 等. 适用高比例分布式光伏接入的配电网多级保护优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 55-65.  
WEI Mingjie, WANG Congbo, YU Yue, et al. Optimal configuration scheme of multi-staged protection in distribution network for integration of high proportion of distributed photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 55-65.
- [2] 杜庆秀, 刘益青, 薛嘉慧, 等. 基于逆变型分布式电源阻抗特征的有源配电网线路保护[J]. 山东电力技术, 2023, 50(7): 1-12.  
DU Qingxiu, LIU Yiqing, XUE Jiahui, et al. Line protection for active distribution network based on impedance characteristics of inverter interfaced distributed generation[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(7): 1-12.
- [3] 黄强, 李宽, 丁敬明, 等. 含分布式光伏接入的有源配电网故障区段定位新方法[J]. 山东电力技术, 2023, 50(11): 68-74.

- HUANG Qiang, LI Kuan, DING Jingming, et al. A novel fault section location method of active distribution network with the integration of distributed photovoltaic[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(11): 68-74.
- [4] 娄为, 沈冰, 裘愉涛, 等. 钻石型配电网的保护与自愈策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 161-168.
- LOU Wei, SHEN Bing, QIU Yutao, et al. Protection and self-healing strategy analysis of a diamond type distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 161-168.
- [5] 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.
- [6] 高维良, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 用作配电网差动保护通道的可行性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 1-7.
- GAO Weiliang, GAO Houlei, XU Bin, et al. Feasibility analysis of adopting 5G in differential protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 1-7.
- [7] 濮宏飞, 吴通华, 姚刚, 等. 基于 5G 通信的有源配电网线路差动保护实用化方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 117-124.
- PU Hongfei, WU Tonghua, YAO Gang, et al. Practical scheme of line differential protection for active distribution network based on 5G communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 117-124.
- [8] 黄杨, 朱雨, 何明, 等. 基于 5G 的配电网线路差动保护时间同步算法[J]. 供用电, 2022, 39(12): 11-16, 44.
- HUANG Yang, ZHU Yu, HE Ming, et al. Time synchronization algorithm of distribution network line differential protection based on 5G[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(12): 11-16, 44.
- [9] 张运驰. 有源配电网 5G 通信分布式故障自愈技术[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [10] 周成瀚, 邹贵彬, 张烁, 等. 基于参考相量的配电网差动保护故障自同步方法[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3753-3767.
- ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, ZHANG Shuo, et al. Fault self-synchronization for differential protection in distribution networks based on reference phasor[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3753-3767.
- [11] ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, ZHANG Shuo, et al. Mathematical morphology-based fault data self-synchronization method for differential protection in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2607-2620.
- [12] 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.
- [13] ZANG Lindong, ZOU Guibin, ZHOU Chenghan, et al. A  $d$ -axis based current differential protection scheme for an active distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(2): 338-348.
- [14] 袁通, 高厚磊, 彭放, 等. 免疫同步误差的有源配电网多端纵联保护方法[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4847-4861.
- YUAN Tong, GAO Houlei, PENG Fang, et al. Multiterminal pilot protection for active distribution networks immune to synchronization error[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4847-4861.
- [15] 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.
- [16] 徐萌, 邹贵彬, 高磊, 等. 含逆变型分布式电源的配电网正序阻抗纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 93-99.
- XU Meng, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Pilot protection of positive sequence impedance for distribution network with inverter-based distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 93-99.
- [17] 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.

- [18] 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 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): 76-84.
- [19] 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.
- [20] 晁晨翔, 郑晓冬, 高飘, 等. 含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6968-6979.  
CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. High frequency impedance differential protection with high proportion of photovoltaic power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6968-6979.
- [21] 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 generation based on injection of harmonic signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 120-128.
- [22] 李娟. 有源配电网电流差动保护原理与实现技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [23] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [24] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [25] 中国电力科学研究院, 中国科学院电工研究所, 国网电力科学研究院. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [26] 张建雨, 姜睿智, 李俊刚, 等. 基于 5G 通信的配电网差动保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 17-23.  
ZHANG Jianyu, JIANG Ruizhi, LI Jungang, et al. Research on differential protection of a distribution network based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 17-23.
- [27] ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, ZHENG Maoran, et al. Reference phasor-based data self-synchronization scheme for line current differential protection in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(2): 1466-1480.

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-04-23

作者简介:

梁伟宸(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网保护与控制; E-mail: liangweichenheng@163.com

王泽众(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网运行与控制; E-mail: 181926120@qq.com

周成瀚(1994—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为有源配电网保护。E-mail: zhouchenghan@139.com

(编辑 周金梅)