

考虑不可测负荷分支接入的配电网自适应差动保护^{*}

韩笑 孙杰 蒋剑涛 王凡

(南京工程学院电力工程学院 南京 211167)

摘要: 为降低不可测负荷分支接入对配电网保护的影响,提出一种基于线路两侧电流相似性的差动保护方案。首先,分析了含不可测负荷分支的有源配电网在不同故障位置下线路两侧电流特征。在此基础上,利用欧式距离对线路两侧电流的相似性进行计算,以此实现制动系数随故障位置自适应地修改。利用 PSCAD 仿真软件对本方案进行验证,结果表明在不同容量的不可测负荷分支接入下,本文方案中的制动系数在区内故障时减小为 0,区外故障时增大为 0.87,确保电流差动保护能够正确动作,避免了不可测负荷分支对配电网保护的影响。

关键词: 配电网;差动保护;不可测分支;自适应保护

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Adaptive differential protection for distribution network
considering unmeasurable load branch

Han Xiao Sun Jie Jiang Jiantao Wang Fan

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The access of unmeasurable load branch had an impact on the protection of distribution network. So this paper designed a differential protection scheme based on the similarity of bilateral currents. The current characteristic of active distribution network with unmeasurable load branches in different fault places was analyzed. On this basis, Euclidean distance was used to measure the similarity of the currents on both sides, so that the braking coefficient can be modified adaptively with the fault location. It used PSCAD to verify the scheme, and the results show that when different unmeasured load branches accessed, the braking coefficient would decrease to 0 in case of in zone fault or increase to 0.87 in case of out of zone fault, so as to realize that the current differential protection could operate correctly. Therefore, the influence of unmeasured load branches on distribution network protection is avoided.

Keywords: distribution network; differential protection; unmeasurable branches; adaptive protection

0 引言

为了实现“碳达峰、碳中和”行动目标,电网中投入大量分布式电源,使传统配电网变为有源配电网,潮流方向复杂难以确定,传统阶段式电流保护无法进行有效保护^[1-6]。配电网急需性能更加强大、可靠性更高的新型保护。

目前,针对含分布式电源的配电网继电保护研究主要可分为两个方向。一是在原有电流保护的基础上加以改进。文献[7]构建了分布式电源(distributed generation, DG)接入后的故障等效网络,精确计算故障电流并修改保护定值。文献[8-9]考虑了 DG 接入对阶段式电流保护的影响,利用智能设备获取配网及线路信息,对保护定值进行在线计算与调整。文献[10]分析了 DG 及储能接入后保护

拒动/误动的原因,利用强跟踪滤波器算法实时计算系统等值阻抗,再自适应调整保护定值。该类方案大多需要系统全局信息,对配电网通讯及数据处理要求较高。二是将输电网电流差动保护的方法引入配电网。文献[11]利用正序故障分量构成电流差动保护,给出了适应性动作判据。文献[12-13]利用两端电流幅值信息构成差动保护,降低了对数据同步性的要求。文献[14-15]考虑了不可测分支接入对电流差动保护的影响,利用故障前后两侧电流幅值之差构建电流差动保护。该类利用电流幅值信息的构成的保护虽然降低了对数据同步性要求,但容易出现保护误动与拒动,需要其他信息进行补充判断。

因此,针对目前研究不足,本文讨论了含不可测负荷分支线路两端的电流特征,基于不同故障类型下线路两端电

收稿日期:2021-06-18

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51277052)、江苏省高校科研重大项目(19KJA510012)、江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX20_0719)资助

流之间的相似性,提出了一种自适应差动保护原理。利用欧式距离描述线路两侧电流的相似性,以此对差动保护的制动系数进行自适应调整。通过 PSCAD 仿真软件,验证了本文所提方案。

1 含不可测负荷分支线路的电流特征

1.1 正常运行

含不可测负荷分支配电网拓扑结构如图 1 所示。图中线路 MN 中某处接有一条不可测负荷分支 L_{br} , 其接入位置未知,分支的电流、电压信息也无法测量。N 母线接有分布式电源,暂不考虑其控制特性。图 2 所示为相应的配电网等效电路。 E_M 、 E_N 、 Z_M 、 Z_N 为线路 MN 上下游系统等值电势和阻抗,电势可近似为相等,阻抗大小关系与 DG 渗透率有关。 Z_B 为不可测分支等效阻抗。 Z_1 、 Z_2 为线路等值阻抗; I_M 、 I_N 为两侧电流。

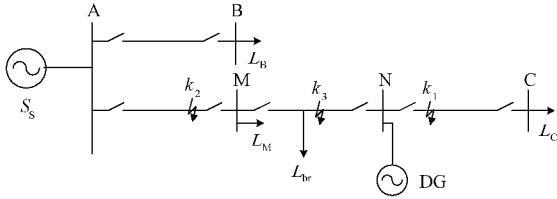


图 1 含不可测分支配电网示意图

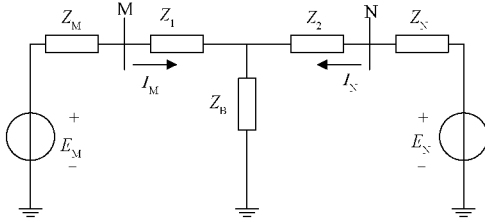


图 2 图 1 等值阻抗图

由于负荷分支的接入, M 侧将有一部分电流流入负荷分支,造成了正常运行时 M、N 两侧电流不平衡,即 $I_B = I_M + I_N \neq 0$ 。如图 3 所示,某个时刻线路 MN 接入了一条分支,两侧差流不再为 0。

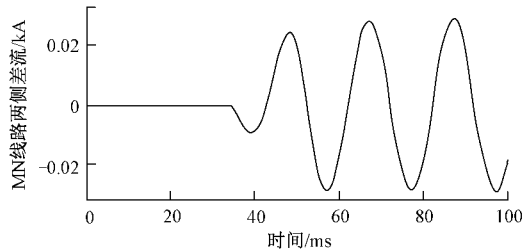


图 3 M、N 两侧差流示意图

1.2 区外故障时两侧电流特征

线路 MN 下游 N 母线出口处发生故障时, M、N 侧感受到由 M 侧等效电源发出的短路电流,如图 4 所示。M 侧电流可表示为:

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{E}_M}{Z_M + Z_1 + Z_B // Z_2} - \frac{\dot{U}_f}{Z_2 + Z_B // (Z_M + Z_1)} \cdot \frac{Z_B}{Z_B + Z_M + Z_1} \quad (1)$$

由于不可测分支等效阻抗 Z_B 一般远大于配电网线路阻抗,因此 $\dot{I}_M$ 可近似为:

$$\dot{I}_M \approx \frac{\dot{E}_M - \dot{U}_f}{(Z_M + Z_1) + Z_2} \quad (2)$$

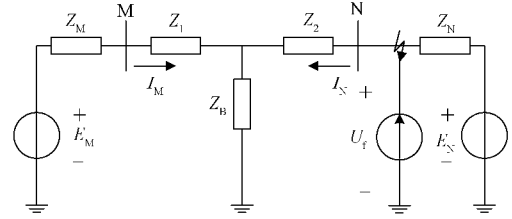


图 4 区外下游故障等效电路

同理, N 侧电流也可近似为:

$$\dot{I}_N \approx \frac{\dot{U}_f - \dot{E}_M}{Z_2 + (Z_M + Z_1)} \quad (3)$$

此时, M、N 两侧电流大小近似相等,相位相反,因此两侧电流相似性较高。当线路 MN 上游 M 母线处发生故障时,可得到相类似的结论。

由于区外故障的存在,导致不可测负荷分支的对地电压下降,不可测分支电流与 M、N 侧的电流关系仍然满足,但相较于正常运行状况时电流减小,反应在 M、N 侧电流上即为 $|I_M + I_N|$ 相较于正常运行时减小。

1.3 区内故障时两侧电流特征

区内不可测分支下游故障时, M、N 侧等效电源 E_M 、 E_N 均向故障点提供短路电流,如图 5 所示在 Z_2 的 α 处发生故障。M、N 侧电流可表示为:

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{E}_M - \dot{U}_f}{(Z_M + Z_1) + Z_B // \alpha Z_2} \approx \frac{\dot{E}_M - \dot{U}_f}{(Z_M + Z_1) + \alpha Z_2} \quad (4)$$

$$\dot{I}_N = \frac{\dot{E}_N - \dot{U}_f}{Z_N + (1 - \alpha) Z_2} \quad (5)$$

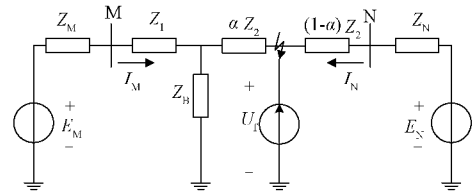


图 5 区内故障等效电路

根据相关规程规定,原则上分布式电源的渗透率不得高于 $25\%^{[16]}$,则 M、N 侧等效负荷有 $Z_N \geq 4Z_M$; 而 $\dot{E}_M \approx \dot{E}_N$, 因此 M 侧电流相较于 N 侧电流大得多。实际上,由于分布式电源的电压支撑能力较弱,导致 $\dot{E}_M > \dot{E}_N$, 因此 N 侧电流变得更小,仍满足 M 侧电流大于 N 侧电流。

2 自适应差动保护判据设计

2.1 方案原理

通过以上分析过程, M、N 两侧电流在有不可测负荷分支接入时, 正常运行与区外故障下相似, 而区内故障下相差较大。利用此规律, 可通过计算两侧电流曲线的相似性来判别区内或区外故障。常用的比较曲线相似性的方法有计算曲线的欧式距离、余弦距离等, 本文采用欧式距离来计算。欧式距离能够衡量两个向量 $\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{b}$ 之间的距离, 其表达式为:

$$d_{\text{Euclidean}} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (a_k - b_k)^2} \quad (6)$$

其中, n 为向量 $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{b}$ 的变量个数。

为计算线路 MN 两侧电流间的欧式距离, 将采样时间窗定为 20 ms, 即计算两侧一个周期时间内电流的相似性。在无不可测负荷分支接入, 且正常运行的情况下, M、N 两侧电流大小相同, 方向相反, 此时 $\dot{\mathbf{I}}_M$ 与 $-\dot{\mathbf{I}}_N$ 的欧式距离为 0。接入不可测负荷分支后, 两侧电流存在一定差值, 但由于负荷较小、对应等值阻抗较大, 流过不可测负荷分支的电流较小, 因此在正常运行及区外故障下, $\dot{\mathbf{I}}_M$ 与 $-\dot{\mathbf{I}}_N$ 仍近似相等, 其欧式距离较小。区内故障时, 两侧电流存在较大差异, 其欧式距离也急剧变大。借助此差别, 可构建自适应差动保护判据。

2.2 保护判据

本文所提自适应差动保护判据表达式为:

$$\begin{cases} I_d = |\dot{\mathbf{I}}_M + \dot{\mathbf{I}}_N| \\ I_r = |\dot{\mathbf{I}}_M - \dot{\mathbf{I}}_N| \\ I_d > K(d(\dot{\mathbf{I}}_M, -\dot{\mathbf{I}}_N)) I_r + I_{\text{set}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, I_d 为差动电流; I_r 为制动电流; $K(d(\dot{\mathbf{I}}_M, -\dot{\mathbf{I}}_N))$ 为基于两侧电流欧式距离的自适应制动系数; I_{set} 为防止误动的门槛值。

传统电流差动保护的制动系数为 0.3~0.9 范围内的固定值。实际应用中, 当区外故障时, 两侧电流的欧式距离较小, 为降低保护误动的可能性, 应提高制动系数; 区内故障时两侧电流的欧式距离较大, 为提高保护的灵敏性, 应降低制动系数。因此, 自适应制动系数的设定也应满足以上要求。利用高斯核函数, 可构建关于欧式距离的函数作为制动系数的整定值。高斯核函数的输出与输入的关系如图 6 所示, 其表达式为:

$$K(x_i) = e^{-\frac{x_i^2}{2}} \quad (8)$$

为了使制动系数保持在常规模范围内, 需要对两侧电流的欧式距离进行调整, 除以一个设定值 d_{set} 后再计算制动系数, 保证在正常运行时, 制动系数在 0.6 左右。该设定值可选择在接入不可测负荷分支后, 两侧电流的欧式距离。自适应制动系数的表达式为:

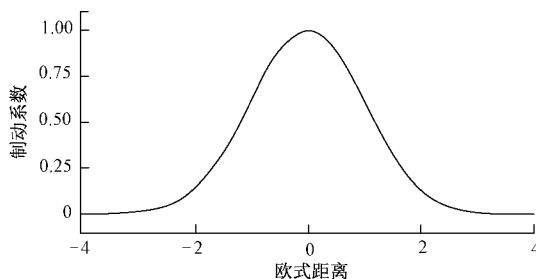


图 6 高斯核函数特性示意

$$\begin{cases} K(d_i) = e^{-\frac{d_i^2}{2}} \\ D_i = \frac{d_i}{d_{\text{set}}} \end{cases} \quad (9)$$

因此可画出自适应差动保护的動作特性曲线, 如图 7 所示。相比于传统电流差动保护, 本文所提差动保护方案中制动系数可随故障位置自适应整定。区外故障时增大, 而区内故障时减小为 0, 此时差动电流只需大于门槛值保护即可动作。

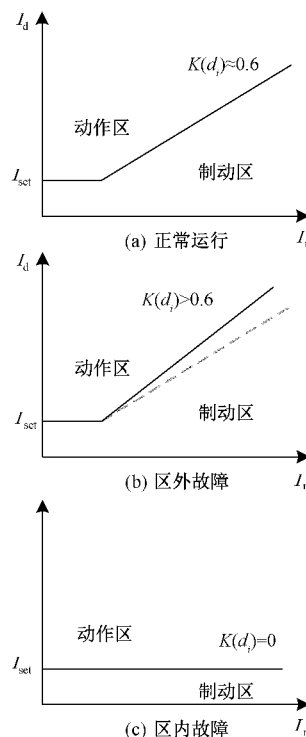


图 7 自适应差动保护动作区示意图

2.3 保护工作流程

针对含有不可测负荷分支线路及分布式电源的配电网, 采用自适应差动保护, 根据保护区内两侧电流的相关性, 修改制动系数, 避免保护误动、拒动等问题。自适应差动保护整定流程图如图 8 所示, 主要步骤如下。

1) 采集线路两侧一个周波的电流数据, 并通过智能终端上传至变电主站或分布式主站。

2) 利用两侧电流信息根据式(6)计算欧式距离 d , 并判断出是区内故障还是区外故障。

3) 利用欧式距离 d 及故障位置判定结果, 根据式(9)自适应调整制动系数 $K(d_i)$ 。

4) 比较差动电流与制动电流大小, 若满足式(7)条件, 则保护动作。否则返回步骤 1)。

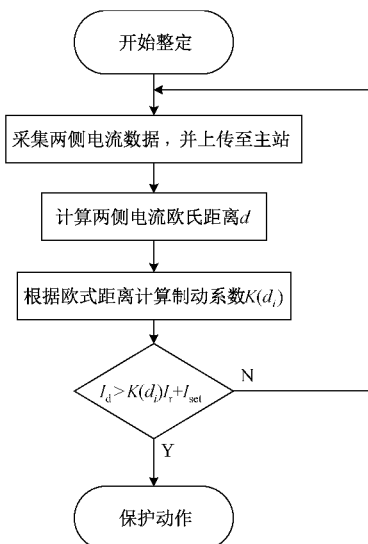


图 8 保护方案流程图

3 算例分析

为了验证本文所提保护方案, 进行如下分析。模拟含不可测分支接入的配电网在不同位置发生不同类型故障, 求取保护方案中自适应制动系数的数值, 并记录保护的动作情况。利用 PSCAD 仿真软件, 搭建图 1 所示 10 kV 配电网模型, 以线路 MN 作为保护区。线路 AB、AM、MN、NC 的长度分别为 2、2、4、2 km, 单位长度参数为 $z = 0.14 + j0.38 \Omega/\text{km}$ 。在母线 N 处接入逆变型分布式电源 DG, 容量为 1.5 MVA。线路负荷 L_B 、 L_M 均为 1.5 MVA, L_{br} 与 L_C 之和为 3 MVA, 功率因数为 0.85。假设不可测负荷分支接于线路 MN 的中点处。

3.1 自适应制动系数验证

分别模拟正常运行、区外与区内故障, 对自适应制动系数的正确性进行验证。在正常运行期间, 由于不可测负荷分支的接入, 两侧电流的欧式距离变为 0.098, 以此值作为 d_{set} 并将其带入式(9), 可得此时的制动系数为 0.6 左右, 其制动曲线随时间的变化如图 9(a)所示。

若运行至 0.05 s, 区外下游发生故障时, 两侧电流相较于正常时相似度更高, 欧式距离为 0.052, 带入式(9)可得此时制动系数为 0.87 左右, 其制动曲线随时间的变化如图 9(b)所示。区外上游发生故障时, 可得到相近结果, 不再展示。

若运行至 0.05 s, 区内发生故障时, 两侧电流的差异性

增大, 欧式距离大于 8, 此时的制动系数为 0, 其制动曲线随时间的变化如图 9(c)所示。

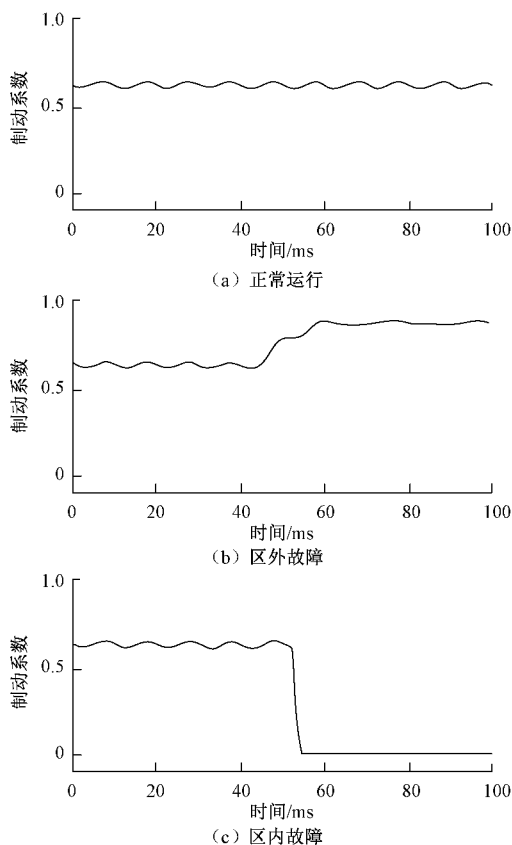


图 9 各运行状况下制动系数变化曲线

经过上述分析可知, 本文所提自适应制动系数能够随故障发生位置的改变而自适应做出改变。在正常运行时, 制动系数保持不变; 发生区外故障, 制动系数增大, 确保保护不会动作; 在区内发生故障时, 制动系数减小至 0, 确保保护可靠动作。

3.2 区外故障下保护动作情况

区外故障包含两种情形, 区外下游即 k_1 点发生故障或区外上游即 k_2 点发生故障。考虑不可测负荷分支容量未知, 通过不断改变不可测负荷分支容量占本线路总容量的占比, 来模拟不同容量负荷的影响, 区外下游(k_1 点)、上游(k_2 点)发生故障时, 流过线路两侧 M、N 的电流幅值及保护动作情况如表 1、2 所示。

表 1 区外下游故障电流幅值及保护动作情况

L_{br} 占比/%	I_M / A	I_N / A	I_d / I_r	K	动作
20	3 073.37	3 069.38	0.000 8	0.98	否
40	3 074.72	3 066.74	0.001 6	0.93	否
60	3 076.10	3 064.14	0.002 4	0.86	否
80	3 077.44	3 061.51	0.003 2	0.78	否
100	3 078.79	3 058.91	0.004 1	0.70	否

表 2 区外上游故障电流幅值及保护动作情况

L_{br} 占比/%	I_M/A	I_N/A	I_d/I_r	K	动作
20	178.74	178.78	0.004 7	0.99	否
40	171.48	171.55	0.009 4	0.99	否
60	171.28	171.38	0.014 1	0.98	否
80	171.22	171.50	0.018 8	0.97	否
100	170.93	171.10	0.023 5	0.96	否

由上述两表可知,在 k_1 点发生故障时,无论不可测负荷分支的容量如何,本线路 M、N 侧电流幅值相差不大且相位相近,相似度较高,而此时的制动系数也较大,因此保护都能够可靠躲过,不会发生误动。

而在 k_2 点发生故障时,M、N 侧电流均由 N 侧的等值电源提供。由于逆变型 DG 存在故障限流控制措施^[17],因此相较于区外下游故障时电流较小。两侧电流关系与区外下游故障时类似,保护不会误动。

3.3 区内故障下保护动作情况

假设在线路 MN 的 75% 处 k_3 点发生短路故障,通过改变故障类型、故障过渡电阻 R_g 大小及不可测负荷分支容量占比,对保护的有效性进行验证。三相短路和单相接地短路时,两侧的电流及保护动作情况如表 3、4 所示。

表 3 区内三相短路电流幅值及保护动作情况

L_{br} 占比/%	R_g/Ω	I_M/A	I_N/A	I_d/I_r	K	动作
20	0	3 684.26	146.39	1.038 1	0	是
	10	1 650.44	118.35	1.149 4	0	是
	50	386.99	80.83	1.450 2	0	是
40	0	3 684.81	144.48	1.013 1	0	是
	10	1 652.42	126.42	1.162 5	0	是
	50	387.72	90.01	1.551 4	0	是
60	0	3 868.11	152.21	0.952 6	0	是
	10	1 654.35	134.85	1.175 7	0	是
	50	288.34	100.19	1.660 4	0	是
80	0	3 687.80	162.31	0.922 6	0	是
	10	166.12	143.71	1.189 2	0	是
	50	388.83	111.29	1.780 7	0	是
100	0	3 689.66	164.43	0.914 9	0	是
	10	1 657.92	152.88	1.202 9	0	是
	50	389.24	122.93	1.912 3	0	是

由表 3、4 可知,不考虑过渡电阻情况下,当发生线路区内故障时,无论不可测负荷分支容量如何,线路两侧的电流均相差较大。而考虑过渡电阻时,会使流过线路 MN 两侧的短路电流的幅值减小,过渡电阻越大,两侧电流幅值越接近。但由于两侧电流存在相角差,差动电流与制动电流之比增大,而由于两侧电流相似性较差,制动系数保持为 0,很容易满足式(7)所示保护判据,保护能够可靠动作。

表 4 区内单相接地短路电流幅值及保护动作情况

L_{br} 占比/%	R_g/Ω	I_M/A	I_N/A	I_d/I_r	K	动作
20	0	3 632.88	186.72	1.035 2	0	是
	10	656.62	85.71	1.240 1	0	是
	50	106.25	76.49	2.086 4	0	是
40	0	3 633.41	186.31	1.035 2	0	是
	10	657.70	92.87	1.285 8	0	是
	50	106.68	85.29	2.581 8	0	是
60	0	3 634.11	185.96	1.035 1	0	是
	10	658.67	101.32	1.333 6	0	是
	50	107.07	95.36	3.174 4	0	是
80	0	3 634.87	185.22	1.035 0	0	是
	10	659.49	110.82	1.384 0	0	是
	50	107.38	106.46	3.802 2	0	是
100	0	3 635.56	184.54	1.035 0	0	是
	10	660.26	121.00	1.436 4	0	是
	50	107.66	118.32	4.333 0	0	是

3.4 保护性能分析

传统电流差动保护采取定制制动系数策略,无论故障发生在何处,制动系数保持不变。本文保护方案中的制动系数可随故障点位置的不同而自适应改变,区外故障时增大制动系数,以减小保护动作区,区内故障时将制动系数设置为 0,扩大保护动作区。

考虑到区内经过渡电阻短路时,线路两侧的短路电流幅值将减小,但仍存在相角差。因此动作判据的差动值与制动值采用两侧电流相量进行计算,差动值与制动值之比较大,而此时的制动系数为 0,能够确保保护位于动作区。而在部分电流差动保护中,只使用两侧电流的幅值计算差动值与制动值,导致两者比值较小,而制动系数不变,有可能造成保护位于制动区,无法快速、可靠动作。

综上所述,本文所提保护方案不受故障条件、过渡电阻的影响,在存在不可测负荷分支接入配电网时能够正确反应,提高保护的可靠性与灵敏性。

4 结 论

不可测负荷分支的接入存在造成有源配电网差动保护误动的风险。本文考虑了不可测负荷分支的接入对含有分布式电源的配电网的影响,分析线路两侧电流特征,提出了一种基于两侧电流相似性的自适应电流差动保护。依据线路两侧电流的欧式距离,自适应设置相应的制动系数,根据故障位置进行保护判据的调整,在区内故障时扩大保护动作区,区外故障时减小动作区,提升了保护性能。通过 PSCAD 软件对本文所提保护原理进行了仿真,仿真结果验证了本方案。如何加强本方案与配电网后备保护的配合,进一步完善保护判据,并降低保护对于数据传输的要求,将是日后研究工作中的重点内容。

参考文献

- [1] 高岩,李永丽,陈晓龙,等.基于电流幅值比的有源配电网自适应差动保护原理[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(2):1-7.
- [2] 刘煜,王俊江,焦青,等.含分布式电源的配电网故障定位改进矩阵算法[J].科学技术与工程,2019,19(34):186-190.
- [3] 李业谱,王晓娟,周博.分布式电源对配电网影响分析[J].电工材料,2020(5):56-58.
- [4] 彭明智,杜鹏,朱仲贤.基于神经元自适应 PI 算法的微电网控制策略研究[J].电子测量技术,2020,43(1):80-84.
- [5] 许加柱,贾龙涛,李畅,等.考虑分布式电源相关性的配电网概率潮流计算[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(5):106-112.
- [6] 窦小晶,薛钊,叶日新,等.10 kV 分布式电源并网对配电网继电保护的影响分析[J].智慧电力,2019,47(12):117-122.
- [7] 叶斌,王祺,代磊,等.适应分布式电源接入的配电网过流保护整定策略[J].智慧电力,2018,46(6):74-80.
- [8] 黄景光,丁婧,郑淑文,等.高渗透率微网自适应电流保护方法研究[J].电力科学与技术学报,2017,32(1):37-42.
- [9] 王训哲,曹昂,盛逸标.分布式电源对配电网电流保护的影响[J].电测与仪表,2017,54(18):37-41,78.
- [10] 李正红,安振华,李捷,等.含分布式电源与储能配电网的自适应电流保护策略[J].电子测量技术,2020,43(5):71-75.
- [11] 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.
- [12] 马帅,武志刚,高厚磊,等.适配高渗透率 DG 接入配电网的幅值比较式保护[J].电力系统保护与控制,2019,47(4):43-50.
- [13] 许偲轩,陆于平.适用于含分布式电源配电网的纵联保护方案[J].电力系统自动化,2015,39(9):113-118,155.
- [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):76-84.
- [15] 和敬涵,李文立,张大海,等.基于节点分支电流幅值的含 DG 配网差动保护原理[J].电网技术,2018,42(11):3601-3609.
- [16] 朱妍,陆于平.含 DG 配网充分式优选制综合电流幅值差动保护[J].中国电机工程学报,2018,38(S1):68-74.
- [17] 郭文明,牟龙华.考虑灵活控制策略及电流限幅的逆变型分布式电源故障模型[J].中国电机工程学报,2015,35(24):6359-6367.

作者简介

韩笑,硕士,教授,主要研究方向为电力系统继电保护、故障检测、配网自动化等。

E-mail:839343896@qq.com

孙杰,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。

E-mail:839343896@qq.com

蒋剑涛,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。

E-mail:544871531@qq.com

王凡,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。

E-mail:923022956@qq.com