



通道不对称时延对继电保护可靠性影响的量化分析

高会生, 沈青

(华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 数字通道的不对称时延对线路电流差动保护具有不利的影响, 其影响机理复杂、后果严重, 有必要采用有效的方法对其进行分析, 以提高继电保护的可靠性。首先, 分析了线路电流差动的工作原理和动作判据; 然后, 针对不对称时延对继电保护可靠性的影响, 确定了不同故障条件下的量化分析方法; 最后, 通过实例验证了该方法的可行性和正确性。研究表明, 不对称时延对继电保护可靠性的影响与故障条件有显著相关性, 这一结论对继电保护可靠性评估和通道优化具有工程参考价值。

关键词: 线路电流差动保护; 继电保护通道; 不对称时延; 继电保护可靠性; 仿真分析

中图分类号: TM773

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019016

Quantitative analysis of the influence of asymmetric channel delay on relay protection's reliability

GAO Huisheng, SHEN Qing

Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Abstract: The asymmetric delay of digital channels has negative effects on line current differential protection in a complex mechanism. Hence, it's necessary to use effective methods to improve the reliability of relay protection. Firstly, the operation principle and criterion of line current differential protection were analyzed. Then, the influence of asymmetric delay on the reliability of relay protection was analyzed, and the quantitative analysis method of the influence under different fault conditions was determined. Finally, the feasibility and correctness of the method were verified. The results show that effects of asymmetric delay on reliability of relay protection have a significant correlation with fault conditions. This conclusion has practical value in reliability evaluation and channel optimization of relay protection.

Key words: line current differential protection, relay protection channel, asymmetric delay, reliability of relay protection, simulation analysis

1 引言

线路电流差动保护操作简单、选相能力

强, 是 220 kV 及以上电压等级输电线路必须配置的主保护^[1]。线路电流差动保护要求数据传输通道准确无误地传送保护信号, 尤其要求传输通道

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2019-01-09

基金项目: 国家电网公司科技项目 (No.xx71-16-004)

Foundation Item: Science and Technology Funding Project of State Grid Corporation of China (No.xx71-16-004)



图 2 中 T_{d1} 为 N 发送到 M 的通道时延, T_{d2} 为 M 发送到 N 的通道时延, T 为采样周期。当 T_{d1} 与 T_{d2} 相等时, 通道时延的估计值 $T_d = \frac{T_{d1} + T_{d2}}{2} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2}$ 。通过调整采样时刻使采样时间差 ΔT 为零, 即可实现同步。当 T_{d1} 与 T_{d2} 不相等时, 就会产生不对称时延, 表示为 $t_{asy} = |T_{d1} - T_{d2}|$, 导致无法调整至同步。两侧装置采样时刻的校准误差 $\Delta T = \left| \frac{T_{d1} - T_{d2}}{2} \right|$ 。假设线路电流为 50 Hz 正弦量, t_{asy} 造成的采样角度误差为:

$$\theta = \frac{\Delta T}{20 \text{ ms}} \cdot 360^\circ = \frac{t_{asy}}{2 \cdot 20 \text{ ms}} \cdot 360^\circ = t_{asy} \cdot 9^\circ \quad (2)$$

其中, t_{asy} 单位为 ms。理论上, 要保证通道的收发不一致时延不会造成保护误动作^[5], 需满足:

$$k > \tan \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

设 M、N 侧电流为频率相同的正弦电流。当系统参数确定后, 两侧电流的幅值、初相不再发生变化。 t_{asy} 引起采样角度误差, 影响后的制动电流为:

$$I_{res} = \sqrt{\frac{A_M^2 + A_N^2 - 2A_M A_N \cos(\varphi_M - \varphi_N + \theta)}{2}} \quad (4)$$

差动电流为:

$$I_{cd} = \sqrt{\frac{A_M^2 + A_N^2 + 2A_M A_N \cos(\varphi_M - \varphi_N + \theta)}{2}} \quad (5)$$

其中, A_M 与 A_N 为两侧电流幅值, φ_M 与 φ_N 分别为电流初始相位。将 t_{asy} 对差动保护的影响映射到比率制动特性图上, 得到继电保护可靠性受 t_{asy} 的影响关系, 如图 3 所示。

图 3 中 a、b、c、d、e、f 所示不同轨迹代表不同故障条件下 t_{asy} 对平面坐标的影响。在 t_{asy} 影响下, 区内故障坐标点移动轨迹 a 没有穿越保护判据, 意味着没有发生拒动; 而 b 却穿越了保护判据, 发生拒动。同理, 区外故障坐标点移动轨迹 c 在 t_{asy} 影响下穿越了保护判据, 发生了误动;

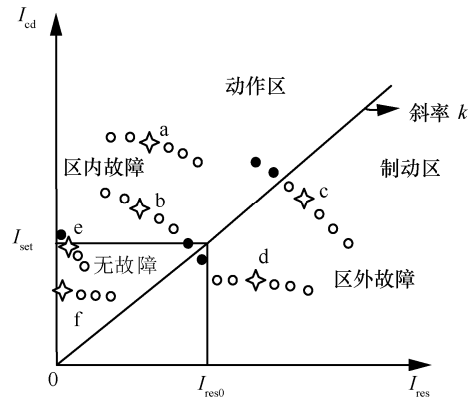


图 3 保护动作与不对称时延、故障条件的关系

而 d 没有发生误动。无故障时, 轨迹 e 在 t_{asy} 影响下穿越了保护判据, 发生了误动; 而 f 没有误动。可以看出, 继电保护可靠性受 t_{asy} 的影响, 而且影响程度与给定故障条件有关。

另一方面, 继电保护可靠性是保证系统正常动作的前提条件, 分为安全性 (security) 和可依赖性 (dependability) 两种属性。可依赖性要求在规定的保护范围内发生了应该动作的故障时, 保护不拒动; 安全性要求在任何保护不应动作的情况下, 保护不误动^[8]。设可靠性 p_{rel} 表示为:

$$p_{rel} = 1 - p_{wro} \quad (6)$$

其中, p_{wro} 为不正确动作概率。不正确动作包括无故障和区外故障状态下的误动以及区内故障状态下的拒动, 如图 3 中 e、b、c 3 类轨迹。受 t_{asy} 影响后的工作点与原始工作点之间的距离大于原始工作点与折线之间的距离时, 即认为保护出现了不正确动作。不正确动作概率 p_{wro} 表示为:

$$p_{wro} = \int_{l_0}^{l_{max}} f(l) dl \quad (7)$$

其中, l_0 为原始工作点与折线之间的距离, l_{max} 为所有工作点与折线距离中的最大值, $f(l)$ 为距离的概率密度函数。由于式 (7) 难以用解析法求解, 因此, 本文先通过分析各状态下的不正确动作 (误动和拒动) 概率, 进而得到 t_{asy} 对线路电流差动保护可靠性影响的量化分析结果。

4 仿真方法描述

从上述分析可知,通道 t_{asy} 会影响线路电流差动保护的動作,并可能引起误动或拒动; p_{wro} 与故障条件有紧密的关系。为了量化分析 t_{asy} 对 p_{rel} 的影响程度以及故障条件与该影响的相关性,本文设计了如下仿真方法。数值仿真算法流程如图 4 所示。

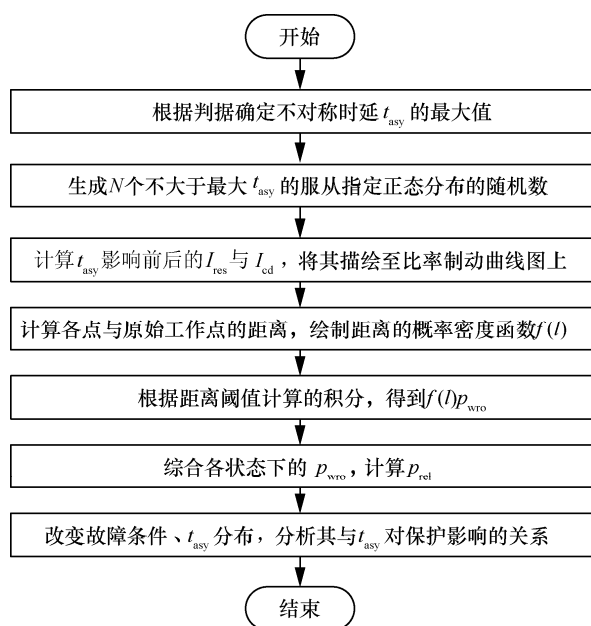


图 4 数值仿真算法流程

步骤 1 确定不对称时延阈值

根据 t_{asy} 造成的采样角度误差 θ 与保护判据之间的关系,确定线路电流差动保护能耐受的最大 t_{asy} 。

步骤 2 生成随机不对称时延

不失一般性,设 t_{asy} 服从正态分布。根据分布参数,仿真算法产生 N 个服从指定正态分布,且小于或等于最大 t_{asy} 的随机数。

步骤 3 计算差动、制动电流

计算步骤 1 中产生的每一个不对称时延影响后的差动电流和制动电流,并将 t_{asy} 影响前与影响后的差动、制动电流均描绘在比率特性曲线图上。

步骤 4 计算差动保护可靠性

绘制各点与折线距离的概率密度曲线,根据距离阈值 l_0 计算 p_{wro} ,综合各场景 p_{wro} 计算差动

保护的 p_{rel} 。

步骤 5 分析故障条件与影响关系

改变故障条件,重复上述步骤,观察可靠性变化情况,分析故障条件与 t_{asy} 对保护 p_{rel} 影响的关系。

通过综合分析 t_{asy} 对保护 p_{rel} 影响大小以及不同故障条件下 t_{asy} 对保护 p_{rel} 的影响程度,可以估算线路电流差动保护系统的最低可靠性,确定能保证系统可靠动作的最大 t_{asy} ,完善现有研究已有的结论。

5 算例分析

5.1 仿真参数设置

本文采用 PSCAD X4 和 MATLAB R2015b 两种工具完成仿真实验,产生 100 万个随机时延,研究 t_{asy} 对差动保护动作 p_{rel} 的影响。仿真模型如图 1 所示。本文采用 PSCAD 搭建了 200 km 长的 500 kV 系统仿真模型。表 1 为输电线路仿真参数设置及相关说明。

表 1 输电线路仿真参数

序号	名称	符号	参数值	单位
1	正序电阻	r_1	0.019 58	Ω/km
2	正序电感	l_1	0.819 2	mH/km
3	正序电容	c_1	0.035 5	$\mu\text{F}/\text{km}$
4	零序电阻	r_0	0.182 8	Ω/km
5	零序电感	l_0	2.74	mH/km
6	零序电容	c_0	0.028 9	$\mu\text{F}/\text{km}$

因为单相接地短路故障发生概率最高^[9],所以本文重点对此类故障进行仿真模拟。 F_1 为最左端仿真点,对应 $L=10$ km; F_2 为线路中点; F_3 为最右端仿真点,对应 $L=190$ km; F_4 为靠近 N 侧母线的区外故障。此外,设 500 kV 电压等级需考虑的最高过渡电阻为 300 Ω 。本文采用判据为 $I_{cd} \geq 0.86 + 0.7I_{res}$,电流单位为 kA,据此得到 t_{asy} 不应大于 7.77 ms。以下仿真与计算是在假设故障已经发生的情况下进行的,不考虑故障本身发生



的概率。

5.2 结果分析

5.2.1 区内故障受不对称时延的影响

图5为区内故障状态下工作点受 t_{asy} 的影响情况。 R_f 为故障接地电阻,图5中空心圆点为原始工作点。图5中a、b、c、d 4条轨迹的故障位置相同,接地电阻不同;d、e两条轨迹的接地电阻相同,故障位置不同。

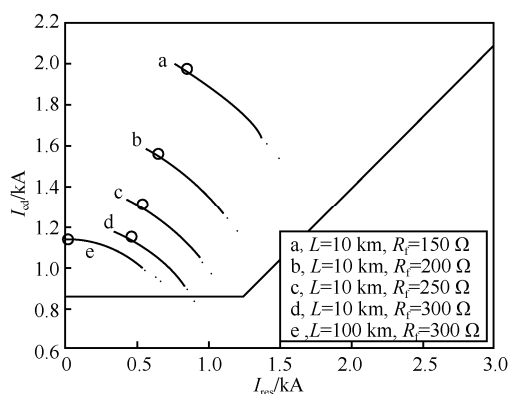


图5 不对称时延对区内故障工作点的影响

比较5条轨迹可以看出,随着 L 的增大, I_{res} 明显变小,在线路的中点发生故障时 I_{res} 达到最小值;而随着 R_f 的增大, I_{res} 与 I_{cd} 均变小,工作点逐渐靠近比率特性曲线,受 t_{asy} 影响后的点越容易出现不正确动作。分别计算各点与折线间的距离,并绘制距离概率密度函数 $f(l)$ 。图6绘制了 R_f 为 $300\ \Omega$, L 为 10 km 、 30 km 、 50 km 、 100 km 时的 $f(l)$ 。

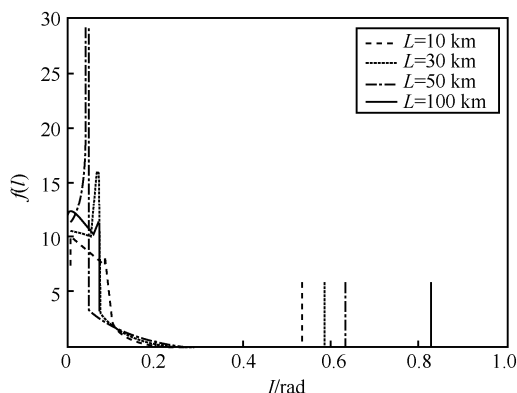


图6 距离概率密度函数

由于 t_{asy} 影响后的点轨迹呈弧形,经计算验证后,各段圆弧均可以用圆的函数来表示,因此用弧长来表示距离更合理。根据绘制的 $f(l)$ 以及距离阈值,可由式(7)计算拒动概率,其他故障条件下的拒动概率计算方法也是如此。表2列出了不同故障条件下拒动概率的计算结果。

表2 不同故障条件下的拒动概率

L/km	R_f/Ω	l_0/rad	p_{wto}
10	300	0.53	0.000 001
30	300	0.58	0.000 000 8
50	300	0.63	0
100	300	0.82	0
10	250	0.76	0
10	200	0.95	0
10	150	1.18	0
10	100	2.66	0
10	50	2.74	0
10	0	4.83	0

表2显示同一 R_f 下, L 越大,原始工作点与折线之间的距离 l_0 越大,拒动概率越小;而同一故障点处, R_f 越大, l_0 越小,拒动概率越大,与图5的仿真结果一致。此外,还可以看到故障位置对工作点的影响程度大于接地电阻的影响程度,这与线路自身的参数有一定关系。

5.2.2 无故障与区外故障受不对称时延的影响

无故障与区外故障两种仿真情形下, t_{asy} 与区内故障时产生的随机数相同。图7为无故障与区外故障时,不同 R_f 下 t_{asy} 对工作点的影响情况。

轨迹e为无故障时的情况,可以看到无故障时所有点均处于制动区,不存在误动可能。轨迹a至d为区外故障时的情况, R_f 增大, I_{res} 明显减小,轨迹越平缓。同理,根据距离绘制 $f(l)$,计算误动概率。根据计算得到的误动概率,图8描绘了区外故障时误动概率与 R_f 的关系。

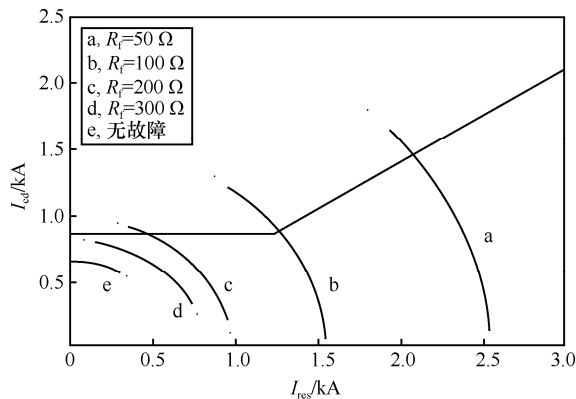


图7 不对称时延对无故障、区外故障工作点的影响

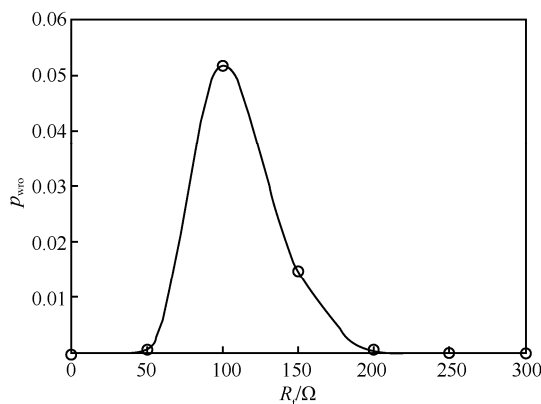


图8 不对称时延对无故障、区外故障工作点的影响

图8显示 p_{wro} 并非随着 R_f 的变化而单调改变,在本文采取的判据以及产生的 t_{asy} 情况下, R_f 为 $100\ \Omega$ 左右时 p_{wro} 达到最大值。根据该曲线可以估测不同接地电阻下的误动概率。

5.2.3 差动保护可靠性的计算

由前述的仿真结果可知,无故障时受不对称时延影响的误动概率接近于0;区内故障时在 $L=10\text{ km}$ 、 $R_f=300\ \Omega$ 时拒动概率最大;区外故障时在 $R_f=100\ \Omega$ 时误动的概率最大。根据式(6)计算不对称时延影响下的差动保护可靠性为:

$$p_{rel} = 1 - \frac{0.000\ 001 + 0.0519 + 0}{3} = 0.982\ 7 \quad (8)$$

其余故障条件下的可靠性计算方法与式(8)相同。计算得到的可靠性代表的是在本文仿真参数下,不对称时延影响后的差动保护最小可靠性,其他情况下的可靠性均大于该值。

6 结束语

为了定量分析数据通道不对称时延给线路电流差动保护可靠性带来的影响,本文通过软件仿真的方法分析了不同故障条件下不对称时延对拒动概率、误动概率的影响,各故障条件下均进行了100万次的仿真。不对称时延影响了电流差动保护的同步效果,导致差动电流与制动电流出现相位偏差,进而引起潜在的保护不正确动作。经仿真发现,不对称时延不仅会影响线路电流差动保护的可靠性,且与不同的故障条件有显著的相关性。本文将故障位置、接地电阻作为变量,在给定的动作判据下,只要不对称时延始终小于能保证保护不误动的最大值,则可得出以下结论。

(1) 区内故障时接地电阻越大,拒动概率越大,在满足接地电阻不大于 $300\ \Omega$ 时,不对称时延导致的拒动概率很小;区外故障时接地电阻为 $100\ \Omega$ 左右时误动概率最大;无故障时差动电流与制动电流均很小,不对称时延不足以造成误动。

(2) 在本文设置的各故障条件中,不对称时延影响后线路电流差动保护的最小可靠性为0.982 7,通过采取措施减小不对称时延,可以有效提高系统同等情况下的可靠性。此外,合理改变保护判据中的整定值也可以降低不对称时延对保护可靠性的影响程度。

上述结论可为实际工程评估通道不对称时延影响下的差动保护可靠性提供一定参考价值,下一步的研究工作是改变判据、故障类型、不对称时延分布等因素,建立更完善的不对称时延与继电保护可靠性关系的模型。

参考文献:

- [1] 邓翔天,袁荣湘,肖振锋,等.基于瞬时功率理论的输电线路分相电流差动保护[J].电力自动化设备,2014,34(11):82-88.
- DENG X T, YUAN R X, XIAO Z F, et al. Split-phase differential current protection based on instantaneous power theory for



- power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 82-88.
- [2] 滕玲, 丁慧霞, 刘革, 等. 光纤复用保护通道传输时延差指标研究[J]. 电信科学, 2010, 26(10): 102-106.
TENG L, DING H X, LIU G, et al. Research on transmission delay difference of optical multiplexing protection channel[J]. Telecommunications Science, 2010, 26(10): 102-106.
- [3] 刘国军, 武晓宇, 李建岐, 等. 分组传送网承载电力多业务的隔离性与关联性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 140-146.
LIU G J, WU X Y, LI J Q, et al. Isolation and association and analysis on bearing electric power multi-service through packet transport network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 140-146.
- [4] 高会生, 汪洋. PTN 业务随机时延对差动保护同步性能的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 165-171.
GAO H S, WANG Y. Effect of PTN service random delay on synchronization performance on current differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 165-171.
- [5] 冯顺, 张孝顺, 曲欣, 等. 通道延时不一致对区外故障差动保护的影响[J]. 电工技术, 2017, 38(4): 17-18.
FENG S, ZHANG X S, QU X, et al. Influence of channel delay inconsistency on differential protection external fault[J]. Electric Engineering, 2017, 38(4): 17-18.
- [6] WU Y, LI M, TANG Y, et al. Reliability analysis models for differential protection considering communication delays and errors[J]. Energies, 2015, 8(4): 2454-2472.
- [7] BLAIR S M, BOOTH C D, VALCK B D, et al. Modelling and analysis of asymmetrical latency in packet-based networks for current differential protection application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1185-1193.
- [8] IEEE. IEEE guide for power system protective relay applications over digital communication channels: StdC37.236-2013[S]. 2013.
- [9] GUO T, MILANOVIC J V. Probabilistic framework for assessing the accuracy of data mining tool for online prediction of transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 29(1): 377-385.

[作者简介]



高会生 (1963-), 男, 博士, 华北电力大学电子与通信工程系教授, 主要研究方向为通信网监测系统、网络管理和可靠性评估等。



沈青 (1994-), 女, 华北电力大学电子与通信工程系硕士生, 主要研究方向为电力通信网。