

线路电子式互感器渐变性故障诊断方法

王尉军, 殷 慧

(中国南方电网贵阳供电局, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 目前对于电子式互感器渐变性故障在线诊断的研究较少。针对线路电子式互感器, 从元件物理温度特性出发, 构建线路电子式互感器电流电压漂移偏差故障和变比偏差故障数学模型。利用线路光纤差动保护装置采集的双端6个电流量及本端4个电压量, 建立了线路电子式互感器渐变性故障诊断判据, 通过将保护装置输出的电流电压值进行纵向及横向比较分析, 能够快速准确地查找出故障互感器。该方法无附加硬件设备, 在电子式互感器不停电、不脱网的条件下, 可在现有保护装置上实现电子式互感器故障的在线诊断, 通过 Matlab 仿真验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 电子式互感器; 渐变性故障; 保护装置; 诊断判据; 差动保护

中图分类号: TM45

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)01-0136-05

0 引言

随着贵州数字化变电站的逐步推广, 电子式互感器以其结构紧凑、精度高、体积小、动态范围大和不存在磁饱和等优点, 在改造站或新建站中得到广泛应用^[1-4]。电子式互感器作为继电保护和自动化装置电流电压的测量元件, 其可靠稳定运行尤为重要^[5-7]。

由于户外型电子式互感器长期运行在高温及强电磁干扰的复杂环境中, 使其光电器件的特性及传感单元中部分元件的性能劣化, 引发互感器出现故障, 导致输出信号异常^[8-10]。电子式互感器的故障类型通常按照故障程度可以分为突变性故障和渐变性故障2类^[11], 其中渐变性故障又包括2类: 漂移偏差故障和变比偏差故障。目前, 国内外对电子式互感器2类故障诊断研究还较少, 文献[12]提出了基于小波电子式互感器突变性故障诊断方法, 而对于电子式互感器发生渐变性故障的研究, 目前只有少数学者对其故障诊断做过探索^[13], 需要更多的学者结合实际进行广泛的研究。

线路光纤差动保护装置采集双端A、B、C三相电流、线路A相电压和母线A、B、C三相电压, 这给电子式互感器故障诊断提供了数据参考量。因此, 文中从元件物理温度特性出发, 构建电子式互感器电流电压漂移偏差故障和变比偏差故障数学模型。针对线路电子式电流互感器, 根据双端线路在数字化建设和改造过程中双端互感器类型不同, 分成2种情况: 一种双端分别为电磁式互感器与电子式互感器; 另一种两侧均为电子式互感器。利用光纤差

动保护采集的双端6个电流量, 根据双端互感器类型不同, 分别建立电子式电流互感器渐变性故障诊断判据, 将双端保护装置输出电流进行纵向及横向比较分析, 能够快速查找出故障互感器。针对电子式电压互感器, 根据本端保护装置采集的4个电压量, 建立电子式电压互感器渐变性故障诊断判据, 将本端保护装置输出的4个电压量进行横向比较分析, 即可确定出现故障的线路或母线电压互感器。该方法无需增加另外的硬件设备, 充分利用现有的保护装置, 实现电子式互感器故障的在线诊断, 通过仿真验证了该方法的有效性。

1 电子式互感器渐变性故障数学模型

1.1 漂移偏差故障

电子式互感器的传感器易受光强度或温度的影响, 导致内部磁光材料性能变差使测量值随时间发生线性变化的故障, 定义为漂移偏差故障^[14-15], 其表示形式为:

$$f_i = b(t - t_s) \quad (1)$$

式中: b 为常数; t_s 为故障的起始时刻; t 为故障发生后的任意一时刻。由此可以看出, 漂移偏差故障采样值表现为一个逐渐增加的变化量, 与正常电流、电压的偏差有效值表现形式同采样值一样。

1.2 变比偏差故障

由于电子式互感器磁光材料受光强度或温度的影响, 导致变比发生突变, 使互感器输出值发生畸变, 称之为变比故障^[16], 其表示形式为:

$$f_i = kA \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中: k 为常数; A 为实际值幅值; t 为采样时刻; ω 为实际值角频率; φ 为实际值初始相位。由此可以

看出,变比偏差故障采样值表现为与正常电流、电压同频率的正弦波,与正常电流、电压的偏差有效值表现为一个常量。

在正常情况下,测量值只能无限逼近一次侧真实值,始终存在一定的偏差,这种偏差由两部分组成:一部分是自由噪声,主要由传感器内部的 $1/f$ 噪声和热噪声及外部噪声组成^[17-18];另一部分是系统偏差,是由测量设备的精确度来决定的。保护装置内部已经对自由噪声和系统偏差进行了处理,因此只需考虑漂移偏差故障和变比偏差故障,电子式互感器故障数学模型表示如下:

$$I_t = I \sin(\omega t + \varphi) + f_t \quad (3)$$

$$U_t = U \sin(\omega t + \varphi) + f_t \quad (4)$$

式中: I_t , U_t 分别为电流、电压测量值; I , U 分别为电流、电压实际值幅值; f_t 为渐变性故障偏差。对于漂移偏差和变比偏差故障,分别对应式(1)或(2)的函数形式。

2 线路电子式互感器渐变性故障诊断原理

对于线路电子式互感器渐变性故障,假设:(1)不会有 2 个以上互感器同时发生故障;(2)电网运行正常,未发生一次系统故障或扰动;(3)电流电压三相平衡。

2.1 电子式电流互感器诊断判据

在改造或新建的双端线路中,都具有光纤差动保护功能,文中以线路光纤差动保护通道作为双端交换电流信息的通道,保护装置输出的双端 A、B、C 相 6 个电流信息量作为电子式电流互感器渐变性故障诊断判据的数据参考量。

在变电站数字化建设和改造中,会出现双端线路一端是常规电磁式电流互感器,对端是电子式电流互感器的情况。因此,文中根据线路双端互感器的类型不同,将电子式电流互感器渐变性故障诊断判据分为 2 种。

2.1.1 双端分别为电磁式电流互感器与电子式电流互感器

现场运行证明,电磁式电流互感器在精度和稳定性方面已经完全满足电网要求,因此,此类诊断判据以电磁式电流互感器保护输出电流为基准,将两端电流互感器保护输出的同相电流进行纵向比较,若两者电流之差大于阈值,则认定电子式电流互感器存在渐变性故障。

假定线路本端为电子式电流互感器,保护输出的三相电流二次值分别为 I_{a1} , I_{b1} , I_{c1} ,对端为电磁式电流互感器,保护输出的三相电流二次值分别为

I_{a2} , I_{b2} , I_{c2} ,则诊断判据用公式表示为:

$$|I_{i1} - I_{i2}| > \Delta I \quad \text{纵向比较} \quad (5)$$

$$t > T_{zd} \quad (6)$$

式中: i 取值为 a, b, c; I_{i1} 为线路本端保护输出的某相电流二次值; I_{i2} 为线路对端保护输出的同相电流二次值; ΔI 为阈值,不能大于该线路差动保护启动定值,根据现场情况进行设定; T_{zd} 为整定时间。

当同时满足式(5)、(6)时,则认定该相电子式电流互感器发生渐变性故障。

2.1.2 双端均为电子式电流互感器

将两端电子式电流互感器保护输出的同相电流进行纵向比较,若两者电流之差大于阈值,则认定该相电子式互感器存在渐变性故障,然后分别在再将该相电流与其他两相电流进行横向比较,超过设定阈值的互感器则为故障互感器。诊断判据用公式表示为:

$$|I_{i1} - I_{i2}| > \Delta I \quad \text{纵向比较} \quad (7)$$

$$|I_{i1} - I_{j1}| > \Delta I \quad \text{横向比较} \quad (8)$$

$$t > T_{zd} \quad (9)$$

式中: i, j 取值为 a, b, c, $i \neq j$; I_{j1} 为线路本端不同于 I_{i1} 的其他相电流二次值。

当同时满足式(7)、(8)、(9)时,则认定该相电子式电流互感器发生渐变性故障。

2.2 电子式电压互感器诊断判据

线路保护装置采集线路 A 相电压和母线 A、B、C 三相电压共有 4 个电压信息量,具备诊断 2 个电子式电压互感器同时发生故障情况的条件。另外,对端电压由于线路电压降的原因,对于本端电压互感器诊断已经没有参考意义,故电子式电压互感器渐变性故障诊断无需对端电压量。

因此,此类诊断判据将保护装置输出的线路 A 相电压与母线 A 相电压进行比较,若两者电压之差大于阈值,则认定线路 A 相或母线 A 相电子式电压互感器存在渐变性故障,然后分别与母线的其他两相进行比较,超过设定阈值的互感器则为故障互感器。

同理,当将保护装置输出的母线 B 相与母线 A 相电压进行比较出现异常,则认定母线 B 相或母线 A 相电子式电压互感器存在渐变性故障,在分别与线路 A 相电压、C 相电压进行比较,即可确定故障互感器。诊断判据用公式表示为:

$$|U_{la1} - U_{i1}| > \Delta U \quad \text{横向比较} \quad (10)$$

$$|U_{i1} - U_{j1}| > \Delta U \quad \text{横向比较} \quad (11)$$

$$t > T_{zd} \quad (12)$$

式中: U_{la1} 为本端保护输出线路 A 相电压二次值;

U_{i1} 为线路本端保护输出某相电压二次值; U_{j1} 为线路本端不同于 U_{i1} 的其他相电压二次值; ΔU 为阈值, 根据同期压差定值进行设定, 可设定为 5.77 V。

当同时满足式 (10)、(12) 时, 则认定线路 A 相电子式电压互感器发生渐变型故障; 当母线某相满足 (11)、(12) 时, 再判定是否满足 (10) 式, 如满足, 则认定母线该相电子式电压互感器出现渐变型故障。

从 2.1、2.2 可以看出, 判据中的电流、电压均为保护装置输出的有效值, 无论是漂移偏差故障还是变比偏差故障, 都可通过各自诊断判据来确定故障互感器。另外, 可通过 2 种故障的偏差有效值的表现形式来确定是漂移偏差故障还是变比偏差故障: 当故障相与对端同相或同端其他相的偏差有效值表现为逐渐增加的变化量时, 可以确定发生漂移偏差故障; 当故障相与对端同相或同端其他相的偏差有效值表现为一个常量时, 可以确定发生变比偏差故障。

3 仿真分析

文中针对某 220 kV 双端线路, 双端均为电子式互感器, 采用光纤差动保护, 分别对电流互感器发生漂移偏差故障和电压互感器发生变比偏差故障进行仿真。设 $I_i = 240\sin\omega t$ A, $U_i = 127\sin\omega t$ kV, 漂移偏差故障模型: $f_i = 0.4(t - t_s)$, 变比偏差故障模型: $f_i = 23\sin(\omega t + \varphi)$, CT 变比为 1200/5, 电压二次额定值为 57.74 V; 假设该线路差动保护启动定值为 0.5 A, 因此, 可设定 $\Delta I = 0.1$ A, $\Delta U = 5.77$ V, $T_{zd} = 0.04$ s, 采样周期为 0.02 s, 每个周期采样 24 点。用 Matlab 进行仿真如图 1、2 所示。

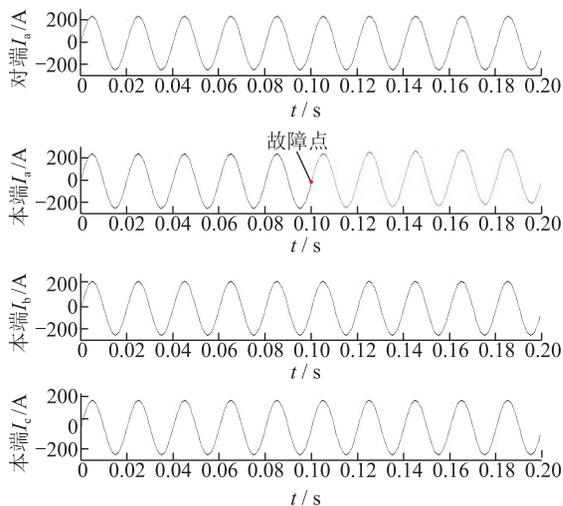


图 1 漂移偏差故障波形

Fig.1 Waveform of drift bias fault

为了更加清晰地分析故障结果, 将仿真图 1 中

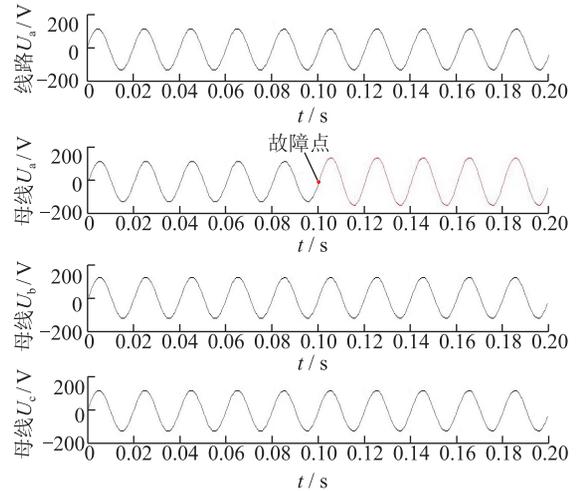


图 2 变比偏差故障波形

Fig.2 Waveform of transformer bias fault

电流采样值换算成保护装置输出的有效值, 取其中的 4 个极大值点进行换算, 结果如表 1 所示。

表 1 保护装置电流有效值

Tab. 1 Current effective value of protection

采样时间 t/s	本端互感器有效值/A			对端互感器有效值/A		
	I_a	I_b	I_c	I_a	I_b	I_c
0.105	1.059	0.995	0.996	0.997	0.998	0.995
0.125	1.109	0.996	0.998	0.996	0.999	0.996
0.146	1.156	0.998	0.995	0.998	0.997	0.999
0.166	1.196	0.997	0.999	0.998	0.996	0.998

将表 1 中电流有效值根据电子式电流互感器故障诊断判据 (7)、(8) 进行偏差有效值计算对比, 结果如表 2 所示。

表 2 漂移偏差故障仿真结果对比表

Tab. 2 A comparison table of the simulation results for drift bias fault

采样时间 t/s	纵向差流/A			本端横向差流/A		
	$ \Delta I_a $	$ \Delta I_b $	$ \Delta I_c $	$ I_a - I_b $	$ I_a - I_c $	$ I_b - I_c $
0.105	0.062	0.003	0.001	0.064	0.063	0.001
0.125	0.113	0.003	0.002	0.113	0.111	0.002
0.146	0.158	0.001	0.004	0.158	0.161	0.003
0.166	0.198	0.001	0.001	0.199	0.197	0.002

从表 2 可以看出, 当本端 A 相电流与对端 A 相电流进行纵向比较大于 ΔI 时, 无法确定是本端 A 相还是对端 A 相电子式电流互感器发生漂移偏差故障, 再通过与本端 B、C 相电流进行横向比较, 结果同样大于 ΔI , 时间满足式 (9), 且故障相与其他相差流表现为逐渐增大, 能够快速确定是本端 A 相电子式电流互感器出现漂移偏差故障。

同理可得电子式电压互感器保护装置输出有效值, 如表 3 所示。

表 3 保护装置电压有效值

Tab. 3 Voltage effective value of protection

采样时间 t/s	线路电压 有效值 U_a/V	母线电压有效值/V		
		U_a	U_b	U_c
0.105	57.734	63.722	57.732	57.735
0.125	57.736	63.726	57.738	57.734
0.146	57.743	63.728	57.745	57.742
0.166	57.746	63.734	57.743	57.748

将表 3 中电压有效值根据电子式电流互感器故障诊断判据(10)、(11)进行偏差有效值计算对比,如表 4 所示。

表 4 变比偏差故障仿真结果对比表

Tab. 4 A comparison table of the simulation results for transformer bias fault

采样时间 t/s	线路电压 有效值/V $ \Delta U_a $	母线相与相电压差值/V		
		$ U_a - U_b $	$ U_a - U_c $	$ U_b - U_c $
0.105	5.988	5.990	5.987	0.003
0.125	5.990	5.988	5.992	0.004
0.146	5.985	5.983	5.986	0.003
0.166	5.988	5.991	5.986	0.005

从表 4 可以看出,当母线 A 相电压与线路 A 相电压进行比较大于 ΔU 时,可判断其中之一发生故障,再与母线 B、C 两相进行横向比较,结果同样大于 ΔU ,时间满足式(12),且故障相与其他相差值可视为常量,即可确定 A 相母线电压互感器出现变比偏差故障。

4 结语

线路光纤差动保护装置采集的双端 6 个电流量及本端 4 个电压量为电流电压分析比较提供了便利条件,文中针对线路电子式互感器,构建电流电压漂移偏差故障和变比偏差故障数学模型,建立电子式互感器渐变性故障诊断判据。利用线路光纤差动保护装置采集的电流电压量,将保护装置输出电流电压值进行纵向及横向比较分析实现电子式互感器渐变性故障在线诊断。仿真结果表明,该方法不受网络运行方式变化的影响,充分利用现有设备,可在电子式互感器不停电的条件下,实现在线监测和故障诊断。

参考文献:

- [1] JEFFREY D B, NICOLAS A F, FARNOOSH R. A new hybrid current sensor for high-voltage applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 32-38.
- [2] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 94-98.
LI Jiuhu, ZHENG Yuping, GU Shidong, et al. The application

of electronic current transformer in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 94-98.

- [3] 肖智宏. 电力系统中光学互感器的研究与评述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 148-154.
XIAO Zhihong. Study and comment of the optical transformers in power system [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 148-154.
- [4] 丁宁,刘志雄,仲伟. 电子式互感器在发电厂厂用电系统中的应用[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(6): 26-29.
DING Ning, LIU Zhixiong, ZHONG Wei. Application of electronic instrument transformer in electrical auxiliary system of power plant[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(6): 26-29.
- [5] 赵勇,孔圣立,罗强,等. 电子式电流互感器暂态传变延时测试技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 125-130.
ZHAO Yong, KONG Shengli, LUO Qiang, et al. Research on testing technology of ECT transmission delay time in transient state[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 125-130.
- [6] 易斌,潘峰,林国营,等. 电子式互感器校验技术综述[J]. 广东电力, 2016, 29(2): 1-8.
YI Bin, PAN Feng, LIN Guoying, et al. Summary on calibration technology for electronic transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(2): 1-8.
- [7] 卜强生,王建国,袁宇波,等. 电子式互感器极性校验系统的设计与应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(5): 32-35.
BU Qiangsheng, WANG Jianming, YUAN Yubo, et al. Research and application of the polarity verification system of electronic transformers[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(5): 32-35.
- [8] 程含渺,徐晴,纪峰,等. 一种用于电子式互感器相位补偿的数字移相方法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 13-18.
CHENG Hanmiao, XU Qing, JI Feng, et al. A digital phase-shift method for phase compensation of electronic instrument transformers [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 13-18.
- [9] 郭椰艳,游大海. 新型电子式电流互感器测量精度分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 27-29.
Guo Chenyan, You Dahai. Analysis of measurement precision of electronic current transducer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 27-29.
- [10] 王鹏,张贵新,朱小梅,等. 基于故障模式与后果分析及故障树法的电子式电流互感器可靠性分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 15-20.
WANG Peng, ZHANG Guixin, ZHU Xiaomei, et al. Analysis on reliability of electronic current transformer based on failure modes, effects analysis and fault tree analysis[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 15-20.
- [11] 周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京:清华大学出版社, 2000(6): 24-26.
ZHOU Huadong, YE Yinzong. Modern fault diagnosis and

- fault-tolerant control [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2000(6):24-26.
- [12] 熊小伏,何宁,于军,等. 基于小波的数字化变电站电子式互感器突变性故障诊断方法[J]. 电网技术,2010,34(7):181-185.
XIONG Xiaofu, HE Ning, YU Jun, et al. Diagnosis of abrupt-changing fault of electronic instrument transformer in digital substation based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010,34(7):181-185.
- [13] 王洪彬,唐昆明,徐瑞林,等. 数字化变电站电子式互感器渐变性故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(24):53-58.
WANG Hongbin, TANG Kunming, XU Ruilin, et al. Diagnosis of soft fault of electronic transformer in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24):53-58.
- [14] 杨云雨. 基于小波神经网络的空调系统传感器故障诊断[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2008.
YANG Yunyu. Wavelet neural network based sensor FDD method in HVAC systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [15] 王涛,张宁,刘琳,等. 有源电子式互感器故障诊断技术的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(18):74-79.
WANG Tao, ZHANG Ning, LIU Lin, et al. Research and application of electronic transformer fault diagnosis [J]. Power System Protection and Control, 2015,43(18):74-79.
- [16] 杨雪东. 基于小波-分形理论电子式互感器故障诊断方法研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2012.
YANG Xuedong. A study of electronic transformer fault diagnosis based on wavelet-fractal theory [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [17] 王鹏,张贵新,李莲子,等. 电子式互感器误差分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2007,47(7):1105-1108.
WANG Peng, ZHANG Guixin, LI Lianzi, et al. Error analysis of electronic instrument transformers[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2007, 47(7):1105-1108.
- [18] 刘竹琴,白泽生. 传感器电路的噪声及其抗干扰技术研究[J]. 现代电子技术,2011,34(14):161-165.
LIU Zhuqin, BAI Zesheng. Research on noise and anti-jamming technology of sensor circuit [J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(14):161-165.

作者简介:



王尉军

王尉军(1982—),男,硕士,工程师,从事电力系统保护及自动化管理工作(E-mail: wwj_marix@163.com);

殷慧(1988—),女,本科,助理工程师,从事电力系统保护运维工作(E-mail: 811459290@qq.com)。

Diagnosis Method of Soft Fault of Line Electronic Transformer

WANG Weijun, YIN Hui

(China Southern Power Grid Guiyang Power Supply Bureau, Guiyang 550002, China)

Abstract: At present, the research on on-line diagnosis of electronic transformer soft fault is rarely seen. Aiming at line electronic transformer, the current and voltage models of the drift bias fault and transformer bias fault is established based on the physical temperature characteristics of components. The double terminal six current and single terminal four voltage of line fiber differential protection are used to set up the electronic transformer soft fault diagnosis criterions, the output current and voltage of double protection device are compared with vertical and horizontal to find the fault electronic transformer. The method could realize on-line fault diagnosis of electronic transformer on existing protection under the condition of no additional hardware and ECT without power failure and online. Matlab simulation result shows that the method is corrected and validated.

Key words: electronic transformer; soft fault; protection device; diagnosis criterion; differential protection

(编辑 钱悦)