光学电流互感器对线路差动保护的影响

顾黄晶,张沛超
(上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘要: 基于 Matlab/Simulink 和ATP,建立了电网模型、电磁型电流互感器、光学电流互感器以及线路纵联差动保护的仿真模型。引入了一套保护系统测量单元和决策单元的评测指标。对于同一线路差动保护,在相同故障条件情况下,分别安装电磁式电流互感器和光学电流互感器进行了对比仿真。以评测指标为基准,定量分析了光学互感器对线路差动保护的影响。结果表明,光学电流互感器能降低保护测量单元的稳态误差,加速保护动作,减小误动、拒动情况的发生,从而有效提高了线路差动保护的可靠性和快速性。但光学电流互感器却易导致测量单元产生较大的过冲量,其抑制直流分量的能力也较差,这将给保护带来潜在的误动可能性。

关键词: 光学电流互感器; 线路差动保护; 评测指标; 仿真
中图分类号: TM 773 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-6047(2007)05-0061-04

0 引言

输电线路电流差动保护具有原理简单、运行可靠、动作快速准确且不需要与相邻线路进行配合等诸多优点,是线路保护发展的主流方向之一。而电流互感器(TA)的饱和问题一直是阻碍保护可靠性提高的重要原因。尤其对于电流差动保护而言,其实现原理决定了它对电流互感器的要求将更为严格。

为了克服 TA 饱和的影响,人们曾提出过很多方法,如谐波比法[1]、小波法[2]、差分法[3]等。但是这些方法都着眼于如何在最短的时间内准确判断 TA 的饱和状态,没能从根本上解决这一问题。随着光电子、光纤通信和数字信号处理技术的发展,光学电流互感器 OCT(Optical Current Transducer)的应用成为可能。光学互感器作为一种新型的电流变换元件,具有许多传统的电磁式电流互感器所不可比拟的优越性,例如测量范围大、频率响应宽、无饱和和磁滞现象、无易燃易爆危险、绝缘性能好以及二次无开路高压等[4]。

目前,光学互感器的实际应用还相当有限。虽然文献[5-7]就光学互感器对继电保护的影响作了系统的、定性的分析,但保护性能究竟能改善到何种程度尚缺乏定量的研究。在此建立了光学电流互感器的仿真模型,并引入了一套保护系统定量评测指标,然后以线路纵联差动保护为例,对光学互感器对保护系统的影响作了详细的仿真分析。

收稿日期:2006-09-27;修回日期:2006-12-18

1 仿真模型

1.1 电网模型

采用 IEEE PES 保护专委会 PSRC(Power System Relaying Committee)推荐的 EMTP 参考电网模型[8],如图 1 所示。该模型是一个三机系统,包含 4 条

Influence of SVC on power system frequency stability

WU Qi,LIN Li,MU Dao-huai,CHEN Jin
(Chongqing University,Chongqing 400044,China)

Abstract: The simulation model of power systems is established with Matlab,in which the induction motor model and static constant impedance model are included as loads. The SVC(Static Var Compensator) adopts the first-order linear practical model,and its influence on system frequency, such as the compensating capacity,operating time and control strategy,are simulated and analyzed for two disturbances:one of parallel lines breaks off permanently;system load increases sharply. For the former condition,SVC can stabilize the frequency at rating value when the motor load takes a small proportion. For the latter condition,SVC brings negative impact on frequency stability. The more reactive power SVC outputs,the worse the frequency quality becomes. When the frequency adjustment capability of system is poor and the output of SVC is very large,the collapse of frequency will be accelerated. So the frequency feedback should be introduced into SVC control system,and the output of SVC should be reduced to a reasonable value when the monitored frequency is under a fixed value.

Key words: power system; static var compensator; frequency

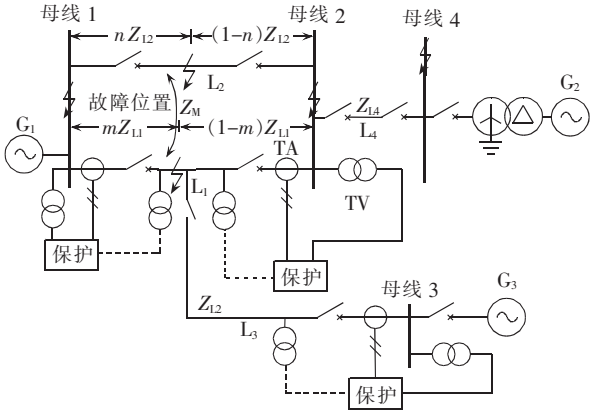

图1 PSRC EMTP参考模型

Fig.1 PSRC EMTP reference model

500 kV输电线路,其中有一对双回线,以及T型支接线路。4条线路皆采用分布参数模型。

1.2 电流互感器模型

1.2.1 光学电流互感器模型

利用理想变压器T、终端电阻R_{sh}以及无源低通滤波器建立光学电流互感器的仿真模型,如图2所示。其中理想变压器T用以模拟光学互感器的线性传变特性;终端电阻R_{sh}用以将二次电流I_{sr}转变为电压信号;低通滤波器用以模拟光学互感器系统的实际带宽。为提高滤波效果,此处采用了六阶滤波器,根据文献[9],其截止频率设计为6 kHz。

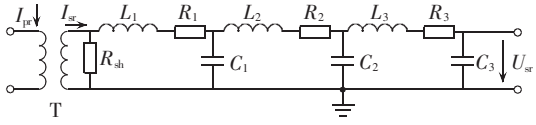

图2 光学电流互感器模型

Fig.2 Model of OCT

1.2.2 电磁型电流互感器模型

电磁型电流互感器模型如图3所示。由于传统的电磁型电流互感器存在铁芯,因此不同TA的性能主要取决于励磁回路的特性和二次侧负载的大小。在此选取3个典型的TA,其磁滞曲线和二次负载都各不相同,其负载分别取2.3+j0.175 Ω(TA_1)、4.3+j0.175 Ω(TA_2)、8.3+j0.175 Ω(TA_3)[10]。

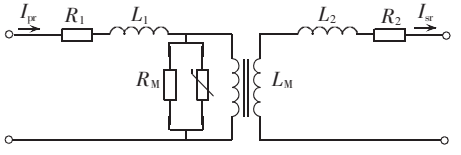

图3 电磁型电流互感器模型

Fig.3 Model of electro-magnetic current transducer

1.3 保护系统建模

基于Simulink[11]建立了输电线路分相电流差动保护的仿真模型,如图4所示。由图可见,线路两侧的电流采样值先经过滤波、采样、FFT等处理,然后利用通道传到对侧,并计算出差动电流和制动电流,最后利用下述动作判据方程确定保护动作情况[12]:

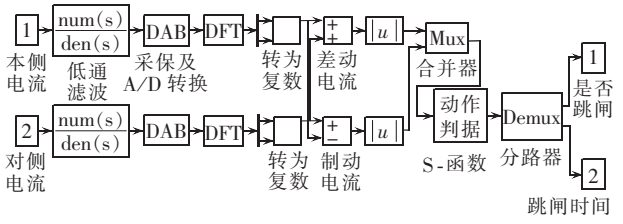

图4 线路差动保护仿真模型

Fig.4 Simulation model of line differential protection

$$\begin{aligned}&|\boldsymbol{I}_m+\boldsymbol{I}_n|>I_{dz}\\&|\boldsymbol{I}_m+\boldsymbol{I}_n|>K(|\boldsymbol{I}_m-\boldsymbol{I}_n|)\end{aligned}\tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{I}_m$、$\boldsymbol{I}_n$为线路两侧电流,以从母线流向线路为正方向;I_{dz}为动作电流;K为制动系数。上述动作判据利用Simulink的S-函数编写。

2 保护系统评测指标

为了定量分析电流互感器对差动保护的影响,分别从测量单元和决策单元2个方面建立了一套较为全面的保护系统评测指标。

2.1 测量单元评测指标

根据文献[13],从时域和频域2个方面建立了测量单元的5个评测指标。

时域响应指标:稳定时间$t_{2\%}$、过冲量$\Delta_{y\%}$和稳态误差$\Delta_{e\%}$。其含义如图5所示[13]。其中,

$$\Delta_{y\%}=\frac{y_{max}-y_\infty}{y_\infty}\times100\%\tag{2}$$

$$\Delta_{e\%}=\frac{y_a-y_\infty}{y_\infty}\times100\%\tag{3}$$

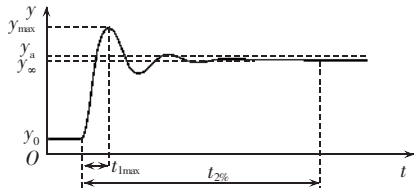

图5 测量单元评测指标

Fig.5 Evaluation indices of measurement unit

根据定义,上述指标越小,则测量单元的性能就越好,互感器对测量单元的影响也越小。

频域响应指标:直流分量增益FR_{DC}和综合指标F。其中,

$$FR_{DC}=\frac{Y_{actual}(0)}{Y_{actual}(50)}\tag{4}$$

$$F=\frac{1}{f_2-f_1}\int_{f_1}^{f_2}|FR_{ideal(f)}-FR_{actual(f)}|\,df\tag{5}$$

上式中,$Y_{actual}(0)$、$Y_{actual}(50)$分别对应频率0 Hz和50 Hz的频域响应;FR为(f_1,f_2)范围内的频率响应。

根据定义,FR_{DC}越小,则互感器抑制直流分量的能力越好;F越小,则互感器的频域响应越好。

2.2 决策单元评测指标

参考文献[14],在决策单元引入了3个指标:误动率P_0、拒动率P_1以及平均跳闸时间t(表1同)。显然,上述指标越小,则决策单元的性能越高。

由上可见，上述 8 个指标并非用于直接评价电流互感器在时域和频域的响应精度，而是将其置于保护系统中，通过计算保护测量单元和决策单元的性能指标，从而定量地分析电流互感器对保护系统的影响。

3　线路差动保护性能仿真测试

在采用相同的电网模型、故障条件及差动保护模型的前提下，在系统中分别采用 3 种电磁型电流互感器及光学电流互感器，并得出了上述评价指标。

3.1　测量单元评测指标

以三相接地短路为例，故障发生在线路 L_1 近母线 I 侧 5 % 的位置，过渡电阻为 0，注入角为 75°。图 6 给出了在同等条件下各 TA 的二次侧电流波形。由图可直观看出，TA_3 最容易饱和，TA_2 次之，TA_1 最接近于光学电流互感器，也即其饱和程度最低。

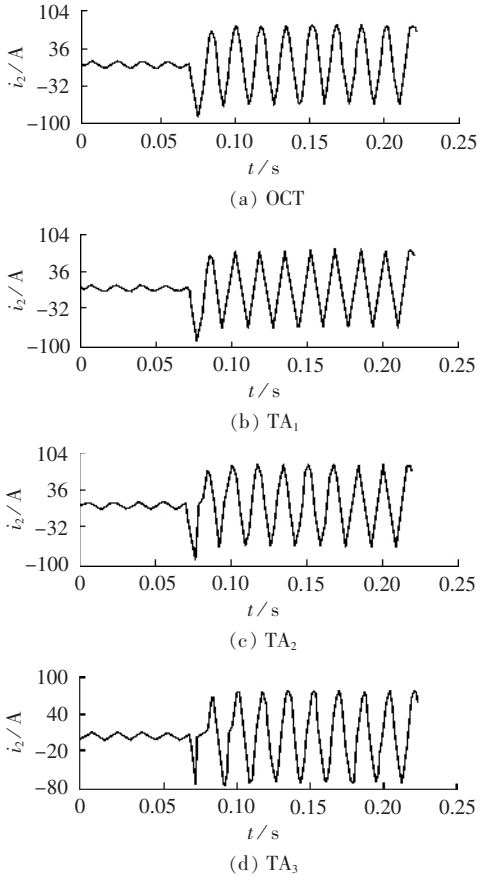

图 6　各电流互感器二次侧电流

Fig.6 Secondary currents of different CTs

图 7 给出了以上故障情况下各 TA 所对应的测量单元评测指标。

3.2　决策单元评测指标

首先计算线路 L_1 区内故障时的拒动率和平均跳闸时间。以 AG 故障为例，故障位置在距线路始端 1 %～15 %之间随机选取，接地电阻为 0，注入角为 75°，共产生 500 组故障；其次计算区外故障时的误动率，故障位置在线路 L_4 的 1 %～99 % 之间随机选取，同样产生了 500 组故障。得到的结果见表 1。区内故障时的平均跳闸时间见图 8。

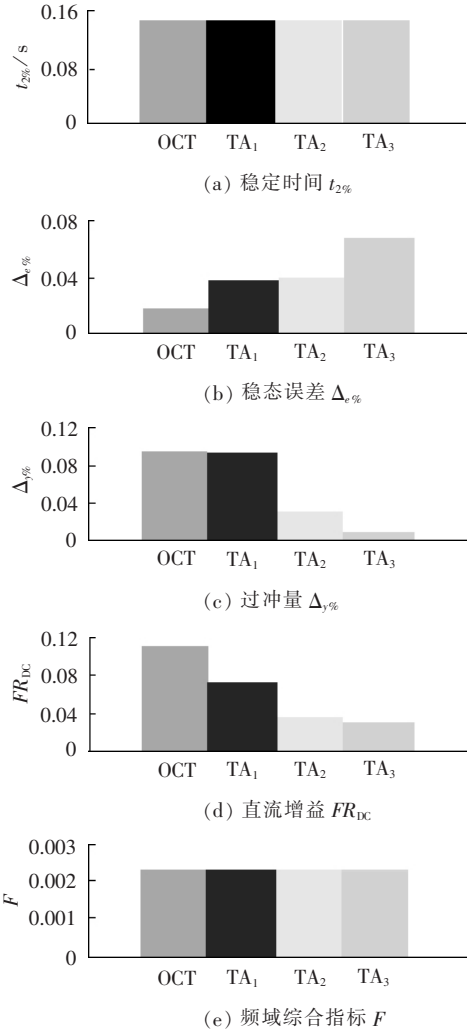

图 7　测量单元评测指标

Fig.7 Evaluation indices of measurement unit

表 1　决策单元评测指标，AG 故障

Tab.1 Evaluation indices of decision-making unit, AG fault

TA 类型	故障数	P_1/%	P_0/%
TA_1	500	0	0
TA_2	500	0	4
TA_3	500	0	6
OCT	500	0	0

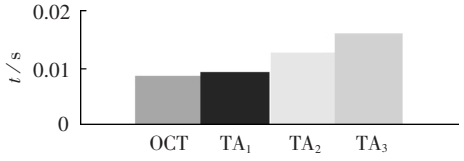

图 8　500 组 AG 故障平均跳闸时间

Fig.8 Average trip time for 500 AG faults

3.3　仿真结果分析

a. 电流互感器特性对稳定时间 $t_{2\%}$ 和频域综合性能 F 的影响几乎可以忽略；

b. 电流互感器饱和程度越深，相应的过冲量 $\Delta_{y\%}$ 就越小，其中 OCT 的过冲量最大，TA_3 最小；

c. 电流互感器饱和程度越深，稳态误差 $\Delta_{e\%}$ 越大，其中 OCT 的稳态误差明显小于电磁型电流互感

器,TA_3 误差最大;

d. 电流互感器饱和程度越深,抑制直流分量能力越好(即 FR_{DC} 越小),其中 OCT 的直流增益最大,而 TA_3 的最小;

e. 电流互感器饱和对保护动作的正确性和快速性都有一定程度的影响,在所测试的算例中,采用 OCT 的系统全部正确动作,且区内故障时保护动作速度最快。

4 结论

基于 Matlab 和 ATP,建立了光学电流互感器的模型以及保护系统的评测指标,以线路差动保护为例,对电磁式电流互感器和光学电流互感器进行了对比仿真。

定量分析表明,光学电流互感器有效提高了线路差动保护的可靠性和快速性。但对于保护测量单元,光学电流互感器虽然可以明显降低稳态误差,但却易导致测量单元产生较大的过冲量,其抑制直流分量的能力也较差。这将给保护带来潜在的误动可能性。因此,应注意设计具有良好暂态稳定性的保护算法,并注重对保护系统的暂态测试。

参考文献:

[1] 王志鸿,郑玉平,贺家李. 通过计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力系统及其自动化学报,2000,12(5):19-24.
WANG Zhi-hong,ZHENG Yu-ping,HE Jia-li. An algorithm to distinguish current transformer's saturation by calculating the harmonics ratio of branch current[J]. Proceedings of the EPSA,2000,12(5):19-24.

[2] 曹豫宁,李永丽,张兴华. 基于小波变换的电流互感器饱和实时检测新判据[J]. 电力系统自动化,2001,25(10):27-30.
CAO Yu-ning,LI Yong-li,ZHANG Xing-hua. A new on-line criteria for current transformer saturation based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(10):27-30.

[3] 张新刚,王泽忠,徐春丽,等. 差分法判定电流互感器饱和的改进措施[J]. 华北电力大学学报,2005,32(5):1-6.
ZHANG Xin-gang,WANG Ze-zhong,XU Chun-li,et al. Improvements for CT saturation discrimination with difference method [J]. Journal of North China Electric Power University,2005,32(5):1-6.

[4] 于艳莉. 超高压线路电流差动保护原理的研究[D]. 北京:华北电力大学,2004.
YU Yan-li. Research on current differential protection principles in UHV transmission lines[D]. Beijing:North China Electric Power University,2004.

[5] 李海涛. 电流互感器饱和对差动保护的影响及解决方案[D]. 北京:华北电力大学,2004.
LI Hai-tao. Affect of current transducer saturation to differential protection and its solution[D]. Beijing:North China Electric Power University,2004.

[6] 刘青,王增平,徐岩,等. 光学电流互感器对继电保护系统的影响研究[J]. 电网技术,2005,29(1):11-14.
LIU Qing,WANG Zeng-ping,XU Yan,et al. Research on the influence of optical current transducer on protective relaying system[J]. Power System Technology,2005,29(1):11-14.

[7] 滕林,刘万顺,李贵存,等. 光学电流传感器及其在继电保护中的应用[J]. 电网技术,2002,26(1):31-33.
TENG Lin,LIU Wan-shun,LI Gui-cun,et al. Optical current transducer and its application in protective relaying [J]. Power System Technology,2002,26(1):31-33.

[8] IEEE Power System Relaying Committee. EMTP reference models for transmission line relay testing[EB/OL]. [2006-08-20]. http://www.pes-psrc.org/.

[9] NxtPhase T & D Corporation. NxtPhase optical voltage & current sensor[EB/OL]. [2006-08-20]. http://www.nxtphase.com/.

[10] American National Standards Institute. ANSI/IEEE C57.13-1993 IEEE standard requirements for instruments transformers [S]. New York:IEEE,1993.

[11] 程刚,张沛超. 基于 Matlab 和 ATP 的微机距离保护动态仿真[J]. 继电器,2006,34(22):5-8.
CHENG Gang,ZHANG Pei-chao. Dynamic simulation of microprocessor-based distance protection based on Matlab and ATP [J]. Relay,2006,34(22):5-8.

[12] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,1995.

[13] KEZUNOVIC M,KASZTENNY B. Design optimization and performance evaluation of the relaying algorithms,relays and protective systems using advanced testing tools[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(4):1129-1135.

[14] UDREN E A,UPP J A,MICHEL G L,et al. Proposed statistical performance measures for microprocessor-based transmission-line protective relays. Part I:explanation of the statistics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1997,12(1):134-143.

(**责任编辑:** 李 玲)

作者简介:

顾黄晶(1982-),女,浙江诸暨人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:ducky2001@sjtu.edu.cn);

张沛超(1970-),男,江苏连云港人,副教授,博士,从事电力系统及其自动化的教学和研究工作(**E-mail**:pczhang@sjtu.edu.cn)。

Influence of optical current transducer on line differential protection

GU Huang-jing,ZHANG Pei-chao

(Shanghai Jiaotong University,Shanghai 200240,China)

Abstract: Based on Matlab / Simulink and ATP, simulation models of power network, electro-magnetic current transducer, OCT(Optical Current Transducer) and line longitudinal differential protection are established, which adopts a set of evaluation indices for the measuring and decision-making units of protective system. For the same fault and same differential protective system, OCT and electro-magnetic current transducers are installed respectively to carry out a comparative simulation. The influence of OCT on line differential protective system is quantitatively analyzed using the adopted indices. Simulation results show that, OCT can decrease the steady-state error of measurement unit and improve the speediness and reliability of line differential protection effectively. However, it causes measurement unit generating relatively big overshoot and has poor DC component restraint capability, which may lead to a improper trip of protective system.

Key words: optical current transducer; line differential protection; evaluation indices; simulation