

中压系统保护用电流互感器参数选择方法

袁季修¹, 盛和乐¹, 秦应力², 沙玉洲³, 安作平³,

冀有党², 陶惠良², 李 和¹, 何赞峰¹

(1. 国电华北电力设计院工程有限公司, 北京 100011;

2. 北京四方继保自动化有限公司, 北京 100085;

3. 大连第一互感器厂, 辽宁 大连 116200)

摘要: 通过实际试验和理论分析, 阐明了电流互感器严重饱和时的特性。在通过互感器电流达到准确限值电流后继续增大, 二次电流虽然不能与一次电流成比例变化, 但其值(含有效值、平均值及由傅氏算法求出的基波值)却还是呈上升趋势。电流保护的整定值如小于电流互感器准确限值电流时能可靠动作, 当一次电流继续增大, 保护仍能可靠动作。故可按保护最大整定值确定电流保护用的电流互感器准确限值系数, 以代替按短路电流选择电流互感器参数, 解决长期困扰的因中压系统短路电流过大而选择电流互感器参数困难的问题。此外, 还对饱和电流严重畸变时微机保护不同采样率所受影响进行了试验分析, 提出在采样率较低时, 应对过饱和系数有所限制, 使在保护定值不超过电流互感器准确限值时, 可保证在电流互感器过饱和情况下保护动作要求, 并留有足够裕度。

关键词: 电流互感器; 准确限值电流; 饱和; 电流保护; 整定; 采样率

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)02-0001-05

0 引言

通常的保护用电流互感器参数选择方法, 是在故障时通过互感器的最大短路电流不应超过其准确限值电流, 在该电流下互感器的复合误差不超过规定值^[1-2]。

随着电力系统不断扩大和大机组的增多, 发电厂厂用电和变电所中压(3~10 kV、35 kV)系统短路电流越来越大, 而有的馈线工作电流却不大。例如, 600 MW 发电机组的厂用电系统, 馈线最小负荷不过数十安培, 而短路电流可能达 40~50 kA。电流互感器额定一次电流通常按负荷电流选择, 以便于测量和保护整定。这样确定的互感器在短路时需要承受数百倍至千倍的短路电流, 可能产生严重饱和而影响其性能。为解决此问题, 一个可能办法是选择额定电流远大于负荷电流且具有较高准确限值系数的电流互感器, 以保证在大短路电流下不致饱和, 例如一台 6 kV、200 kW 的电动机, 额定电流 21.38 A, 为避免饱和需选择变比为 2 500/5, 准确限值系数 $K_{alf}=20$ 的电流互感器, 此时实际二次电流仅约为互感器额定值的 1%, 难以实现保护整定及保证测量误差。另一途径是详细分析电流互感器的饱和特性及饱和程度对保护动作特性的影响, 探求合理的互感器选择方法。为此, 由国电华北电力设计院工程有限公司、北京四方继保自动化有限公司和大连第一互感器厂三方先后在大连第一互感器厂高压试验基地和

国家变压器质量监督检验中心, 对现有电流互感器和微机保护装置进行不同短路电流、不同整定值下的系列试验, 探求电流互感器在饱和时的输出和复合误差特性, 以及与保护动作行为之间的关系, 找出规律, 提出合理、可行的选择保护用电流互感器参数的方法。

1 试验概况^[3]

1.1 试验方案及试验结果举例

试验电流互感器采用工程实际应用的定型产品 LZZBJ9-10, 变比 100/5, 10P, 准确限值系数 $K_{alf}=10$, 二次额定输出 15 V·A(0.6 Ω), 二次绕组电阻 0.066 Ω。

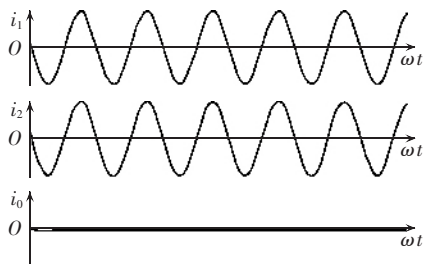
试验继电器采用电磁型和微机保护, 电磁型继电器为 DL-12/100 型, 微机保护为四方公司生产的低压保护 CSL216E。保护整定值二次电流为 $I_{set}=65$ A(一次电流为 1 300 A)。

试验时二次带额定负荷, 功率因数为 $\lambda=\cos\varphi=1$ 或 0.5。试验时互感器一次施加电流从 880 A(8.8 倍额定电流)到 13 000 A(130 倍额定电流), 试验数据、计算数据及继电保护动作情况如表 1 所示, 表中 I_1 、 I_2' 分别为实际一次、二次电流值, I_2 为换算到一次侧的电流值, I_0 为差电流(励磁电流); 序号 1~12 为互感器二次带额定负荷, $\lambda=1$ 时数据; 序号 13、14 为互感器二次带额定负荷, $\lambda=0.5$ 时数据; 表中“×”表示不动作, “√”表示动作。

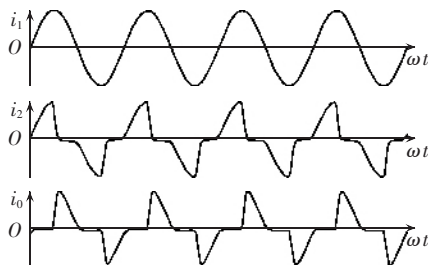
图 1、2 分别为电流互感器的二次负荷功率因数 $\lambda=1$ 和 0.5 时的各电流试验波形。

表 1 试验结果表
Tab.1 Test results

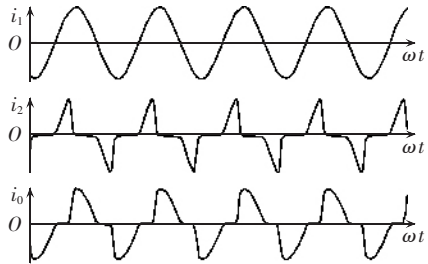
序号	实际试验电流			复合误差 $\varepsilon_c/\%$	过饱和系数 $K_s=I_1/K_{sat}I_n$	继电保护动作情况		
	I_1/A	I_0/A	$I_2(I_2')/A$			电磁型保护	微机型保护	电子式互感器及保护
1	884	15.6	872(43.6)	1.76	0.884	×	×	×
2	1 284	40.1	1 266(63.3)	3.15	1.284	×	×	×
3	2 312	1 392	1 714(85.7)	60.2	2.312	√	√	√
4	3 136	2 324	1 894(94.7)	74.1	3.136	√	√	√
6	4 602	3 918	2 116(105.8)	85.1	4.602	√	√	√
7	6 066	5 454	2 276(113.8)	89.9	6.066	√	√	√
9	7 566	6 992	2 380(119.0)	92.5	7.566	√	√	√
11	9 852	9 342	2 532(126.6)	94.8	9.852	√	√	√
12	13 032	12 576	2 700(135.0)	96.5	13.032	√	√	√
13	3 138	1 536	1 770(88.5)	48.9	3.00	√	√	√
14	4 590	2 832	1 940(97.0)	61.7	4.35	√	√	√



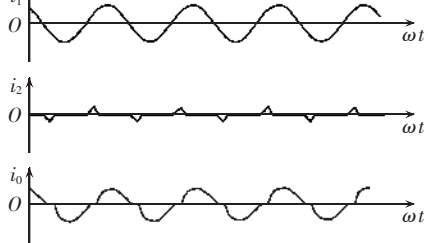
(a) 一次电流为 1 284 A 的波形



(b) 一次电流为 2 312 A 的波形



(c) 一次电流为 4 602 A 的波形



(d) 一次电流为 13 032 A 的波形

图 1 二次负荷功率因数为 1 时的试验波形图
Fig.1 Test waveforms with secondary load $\lambda=1$

1.2 试验结果分析

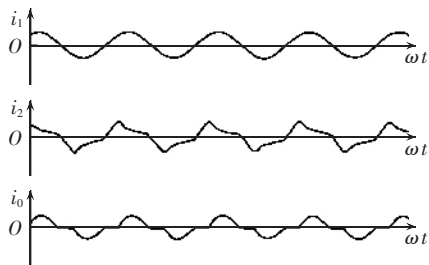
文中引用的数据一般是试验时的实时稳态数据。与短路起始的暂态数据可能有小的差别,但不

影响分析结论。由继电保护动作情况也可证明这一点。

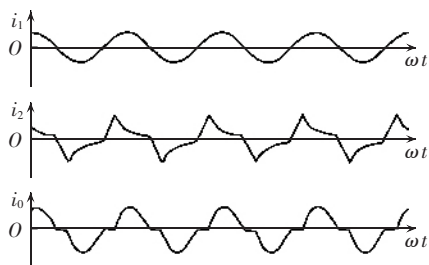
a. 负荷功率因数为 1 时的二次电流波形。在负荷功率因数 $\lambda=1$ 情况下,当铁芯未饱和时, i_2 与 i_1 同相位变化,当铁芯达到饱和值后,磁通不再变化,二次感应电动势为零,二次电流 i_2 迅速降到零,即电流半波的后面一部分被消灭,至下一个半波又重复此过程(参看图 1)。过饱和系数增大时,虽然起始饱和角减小,但二次电流有效值并不减小而是增大。

b. 负荷功率因数为 0.5 时的二次电流波形。在负荷功率因数 $\lambda=0.5$ 情况下,当未饱和时, i_2 与 i_1 基本同相位变化,当磁通达到饱和后,不再产生二次感应电动势,但由于二次回路有电感,电流不能突变, i_2 按回路时间常数逐渐衰减。至下一个半波又重复此过程(参见图 2)。随着过饱和系数增大,二次电流有效值是增加的。

c. 保护动作情况。微机保护和电磁型保护均在二次电流大于 65 A(一次电流 1 300 A)时可靠动作,符合预期要求。即使一次电流继续增大达到 13 000 A(过饱和系数 13),保护仍能可靠动作。



(a) 一次电流为 3 138 A 的波形



(b) 一次电流为 4 590 A 的波形

图 2 二次负荷功率因数为 0.5 时的试验波形图
Fig.2 Test waveforms with secondary load $\lambda=0.5$

2 电流互感器饱和时的特性分析

为进一步从理论上阐明不同过饱和系数时的二次电流波形及数值,以电流互感器理想励磁特性为基础加以分析。

2.1 电流互感器理想磁化特性

对于普通的晶粒取向硅钢片(本试验样品的铁芯材料为 $Z_{11}-0.35$),可以近似用理想磁化曲线分析,即当磁通未达到饱和磁通前,励磁电流为 0,一次电流通过额定变比变换后与二次电流完全相同。饱和后,铁芯磁通基本不变,二次感应电动势为 0,参见图 3(图中 B 为磁通密度, H 为磁动势)。

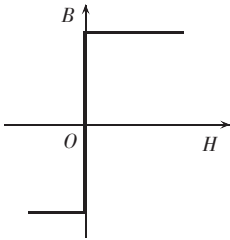


图 3 电流互感器理想励磁特性
Fig.3 Ideal excitation characteristics of CT

理想磁化特性的电流互感器带不同负荷在不同饱和系数下的电流波形分析详见文献[1],当负荷功率因数 $\lambda=1$ 时,理想的电流、电压和磁通变化如图 4 所示。实测试验所得波形(见图 1)与理论波形(见图 4)基本相符,说明使用理论波形分析电流互感器的饱和特性是可行的。

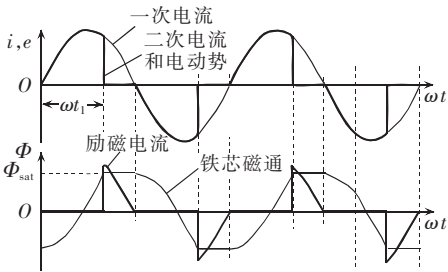


图 4 负荷为纯电阻时的电流和磁通变化
Fig.4 Variation of current and flux with pure resistive load

2.2 负荷为纯电阻,功率因数为 1 时

电流互感器的起始饱和角(切断角) ωt_1 与一次电流幅值有关,由互感器的稳态特性图 4 可求得,负荷为纯电阻时,互感器的起始饱和角(切断角) ωt_1 与不同过饱和系数 $K_s(K_s=I_{sc}/(K_{all}I_n), I_{sc}$ 为短路电流)有如下关系: $\cos \omega t_1=1-2/K_s^{[1]}$ 。过饱和系数愈大时,切断角愈小,但根据以下的分析,实际上二次电流不会因过饱和系数增大而减小。

负荷为纯电阻,不同过饱和系数 K_s 时二次电流理想波形如图 5 所示。

不同过饱和系数 K_s 时理想的相应二次电流值如表 2 及图 6(图中 1 为峰值,2 为有效值,3 为平均值,4 为基波值)所示^[3-4]。当 K_s 增大,切断角减小,但由于峰值增大,二次电流的有效值及峰值仍是增大的。二次电流平均值(即图 5 中不同 K_s 时的面积)也不会减小。微机保护通过傅氏变换求得的基波值也是增加的。

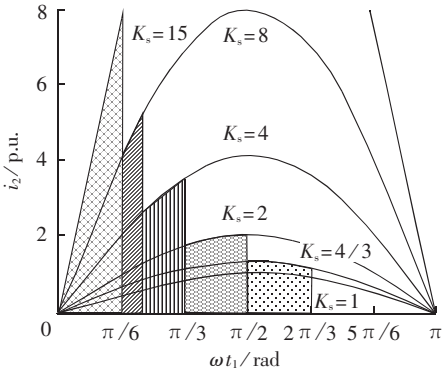


图 5 二次负荷为纯电阻时,不同过饱和系数下的二次电流波形

Fig.5 Secondary current waveforms with pure resistive load under different over saturation coefficients

表 2 二次负荷为电阻时不同饱和系数时起始饱和角及二次电流值

Tab.2 Initial saturation angles and secondary currents with resistive load under different over saturation coefficients

K_s	$\omega t_1/\text{rad}$	$I_2/\text{p.u.}$ (以 $K_s=1$ 为基准)			
		有效值	平均值	峰值	基波值
1	π	1	1	1	1
4/3	$2\pi/3$	1.20	1	1.33	1.119
2	$\pi/2$	1.41	1	2	1.185
4	$\pi/3$	1.77	1	3.46	1.234
8	0.23π	2.05	1	7.50	1.254
15	$\pi/6$	2.55	1	5.14	1.269
50	0.09π	3.35	1	14	1.270

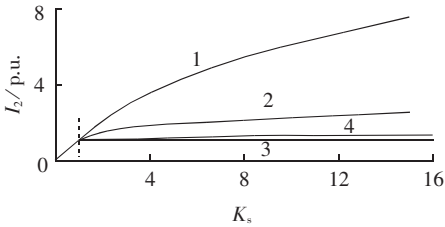


图 6 电阻负荷不同过饱和系数时二次电流值

Fig.6 Secondary currents with resistive load under different over saturation coefficients

2.3 负荷为纯电抗,功率因数为 0 时

可以求出:电流互感器每半波的未饱和部分 ωt ($\omega t=2\omega t_1$)与不同 K_s 的关系为 $\sin(\omega t/2)=1/K_s^{[3-4]}$ 。同样可求出不同 K_s 时的二次电流波形及电流值,二次电流值见表 3。当过饱和系数增大,切断角减小,但二次电流的有效值、平均值及基波值仍增大。

2.4 负荷为电阻加电感,功率因数不为 0 时

电流互感器实际负荷为阻感性,使用微机保护时,继电器负荷一般可忽略,可仅考虑二次电缆的电阻负荷。负荷功率因数不为 0 时的饱和波形见图 2,饱和时的有效值、平均值、峰值及经傅氏变换求得的基波值介于表 2 与表 3 的有关值之间,仍是随着一次电流增大而增加。

表 3 二次负荷为电抗时不同过饱和系数时未饱和部分及二次电流值

Tab.3 Non-saturated part and secondary currents with resistive load under different over saturation coefficients

K_s	$\omega t=2\omega t_1$ /rad	I_2 /p.u.(以 $K_s=1$ 为基准)			
		有效值	平均值	峰值	基波值
1	π	1	1	1	1
4/3	0.540π	1.32	1.17	1	1.14
2	0.333π	1.74	1.31	1	1.22
4	0.161π	2.14	1.44	1	1.26
8	0.080π	2.32	1.51	1	1.27
16	0.040π	2.41	1.57	1	1.27

3 电流互感器饱和对保护动作的影响

3.1 电流互感器饱和对保护的一般影响

以上的试验和分析结果表明,互感器饱和时对不同结构和性能的继电保护有着不同的影响。对于反应二次电流有效值或平均值的保护,如机电型或整流型继电保护,当互感器在饱和前二次电流能保证保护可靠动作,则一次电流继续增大导致互感器过饱和时,二次电流不会减少,能够保证保护可靠动作。

对于微机保护,饱和的影响则与其实现的原理及性能有关。如保护能正确反映电流波形有效值(波形能量)或平均值(波形面积),则与上述情况相同。即使保护反映电流基波分量,在严重过饱和时二次电流模拟量的基波分量也不会减少。但饱和二次电流已严重畸变,例如,出现很窄的尖波,通过采样求得的电流值则将受采样频率和实际采样起始时间的影响,后面将详细分析。本次试验用的保护采样频率是每周期 36 点。严重饱和时测得的电流略有波动,但均能保证保护可靠动作。

3.2 微机保护在互感器深度饱和时的性能

当电流因饱和而波形畸变时,微机保护的采样频率及采样起始点时间对结果有影响。

本次试验的样品是 100/5、10P10 电流互感器,额定准确限值电流 $K_{at}I_n=1\,000\text{ A}$,试验表明实际达到约 1 400 A 才开始饱和。使用不同采样频率求得的结果如图 7 所示(图中, I'_2 为采样二次电流, I'_1 为电流互感器一次电流)。

由图 7 的数据可得下述结果:

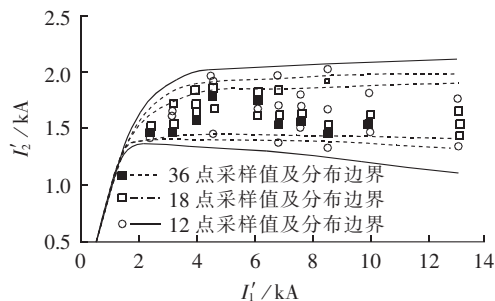


图 7 不同采样频率的采样值离散分布图

Fig.7 Distributions of sample value with different sampling rates

a. 当电流小于 1 300 A,即电流互感器未饱和时,在同一电流下不同采样频率的采样值基本相等,误差不大;

b. 当电流大于 2 312 A,即电流互感器饱和后,在同一电流下不同采样频率的采样值是离散的,这种离散是由于采样起始点不同引起的,具有随机性,但离散幅度具有规律,采样频率高则离散度小,采样频率低则离散度大;

c. 在本次试验条件下,不但是 36 点采样,即使 12 点采样,所有采样值均大于 1 300 A,说明如保护动作整定值小于 $K_{at}I_n=1\,000\text{ A}$,完全可以保证动作,本次试验时保护整定为 1 300 A(二次电流 65 A),保护均正确动作也证明了这一点;

d. 由试验结果可看出,在过饱和系数不很大(如 $K_s<6.5$)的情况下,采样频率低至每周期 12 点是完全可以保证保护动作的。

4 试验分析

a. 通过试验研究,给试验样品 100/5、10P10 电流互感器通过电流高达 130 倍额定电流(K_{at} 的 13 倍),导致电流互感器严重饱和,详尽测量了二次电流的波形及有效值变化情况。通过进一步分析,基本了解了电流互感器在过饱和状态下的特性。

b. 电流增大未达电流互感器饱和水平时,二次电流随一次电流变化,误差在规定范围内。当电流增大至电流互感器饱和后,复合误差严重增大,且二次电流波形将发生严重畸变,畸变情况与二次负荷特性有关。当负荷为纯电阻时,电流互感器饱和后二次电流迅速降低接近零,形成后部缺损的正弦波。当负荷中有电感时,饱和后二次电流不能快速变化,而是按回路时间常数衰减至零。

c. 随着过饱和系数增大,尽管二次电流波形畸变增大,但其有效值、平均值及由傅氏算法求出的电流基波值一般是增加的。对于反映电流有效值、平均值的继电保护(如机电型、整流型),如整定值不超过电流互感器准确限值电流($K_{at}\times I_n$),即在其饱和前能保证动作,则电流继续增大的过饱和情况下仍能保证保护可靠动作。

d. 对于微机保护一般是将电流采样值通过傅氏算法求取基波值,其值与采样频率、滤波参数等因素有关,本次试验的微机保护采样率为每周期 36 点,试验结果能保证保护可靠动作。当采样频率为每周期 12 点时,建议过饱和系数不超过 6.5。当采样频率为每周期 18 点时,建议过饱和系数不超过 13。这样在保护整定值不超过互感器准确限值时,可保证在互感器过饱和情况下保护动作要求,并留有足够裕度。如保护进一步采取措施,使其直接反映或近似反映二次电流有效值,则可不受采样频率的限制。

5 中压电流互感器选择计算及工程应用

5.1 准确限值系数及电流比选择原则

根据本次试验研究结果,可以确定电流保护用中压电流互感器的准确限值系数和额定电流比的选择及校验原则。

5.1.1 原则 1

按保证保护装置正确动作确定要求的电流互感器准确限值系数。

对于中压系统线路、变压器(如 6.3 kV、10 MV·A 以下)和电动机(如 6 kV、2 000 kW 以下),一般采用电流保护(包括电流速断及过电流保护)。

对于电流保护,以往某些规定要求在通过该回路区内故障最大短路电流时,电流互感器不应出现饱和,在短路电流很大情况下(例如 40~50 kA),电流互感器参数很难满足要求。

但本次试验表明,只要电流互感器准确限值电流($K_{\text{alf}} \times I_n$)大于保护最大整定电流(例如电流速断整定值),可保证保护正确动作,当短路电流进一步增大,即电流互感器出现饱和后,二次电流仍保持增大趋势,能保证保护装置可靠动作。因此,按保护最大定值确定电流互感器的准确限值系数,则一般电流互感器($K_{\text{alf}}=15\sim20$)即可满足要求。

5.1.2 原则 2

根据实际负荷修正确定要求的电流互感器准确限值系数。

对于中压互感器,一般情况下额定一次安匝较小、结构也较简单,其一次返回导体影响可忽略不计,则电流互感器准确限值系数与负荷的关系可以用二次极限感应电动势相等确定。

即

$$E_{\text{sl}}=E_{\text{sln}} \text{ 或 } I_{\text{sn}}K_{\text{alf}}'(R_{\text{ct}}+R_{\text{b}})=I_{\text{sn}}K_{\text{alf}}(R_{\text{ct}}+R_{\text{bn}})$$

由此得出:

$$K_{\text{alf}}'=\frac{K_{\text{alf}}(R_{\text{ct}}+R_{\text{bn}})}{R_{\text{ct}}+R_{\text{b}}}$$

式中 I_{sn} 为电流互感器额定二次电流; K_{alf}' 为在实际负荷下的准确限值系数; K_{alf} 为电流互感器的额定准确限值系数; R_{ct} 为电流互感器二次绕组电阻(Ω ,75℃); R_{b} 为实际负荷(Ω); R_{bn} 为电流互感器标定的额定负荷(Ω)。

一般工程中按实际负荷修正的准确限值系数 K_{alf}' 可取为额定值 K_{alf} 的 2 倍。

5.2 工程应用举例

综合上述试验分析表明,电流互感器的准确限值系数如按保护最大定值选定,一般电流互感器的参数即可满足要求,从根本上解决了某些中压系统短路电流很大、电流互感器参数不能适应的问题,有着很大的经济效益。

按此原则选定的电流互感器,完全满足一般反应有效值和平均值的继电保护在过饱和时可靠动作的需要。对于微机保护考虑到采样频率对采样计算结果有一定影响,建议每周期采样 12 点的保护,过饱和系数不超过 6.5;每周期采样 18 点的保护,过饱和系数不超过 13。如采样频率更高,则过饱和系数基本不受限制。

6 kV 出口短路电流设为 50 kA 或 31.5 kA。两者保护整定值接近,按保护整定值确定的 K_{alf} 相同,但过饱和系数不同。建议负荷回路的电流互感器适用参数如表 4 所示。

表 4 厂用负荷工程中互感器选用参数建议表^[3]
Tab.4 Recommended parameters of CT in auxiliary power project

负荷类型 及容量	最大额定 电流/A	互感器 变比	保护最大 定值/A	按保护定值 需要的 K_{alf}	互感器 选用的 K_{alf}	裕度 系数	$K_{\text{s,max}}$		建议二次 负荷/(V·A)
							A	B	
1 000~2 000 kV·A 变压器或相当的其他负荷	183.3	300/5 300/1	4 000	4 000÷ 300=13.4	20	1.5	8.4(4.2)	5.3(2.7)	15 5
315~800 kV·A 变压器或相当的其他负荷	73.3	200/5 200/1	2 200	2 200÷ 200=11	20	1.8	12.5(6.3)	7.9(4.0)	15 5

注:裕度系数为电流互感器选用的 K_{alf} 与按保护定值需要的 K_{alf} 之比; $K_{\text{s,max}}$ 为最大过饱和系数,A 表示短路电流为 50 kA 有关数据, B 表示 31.5 kA 有关数据;带括号的数据为考虑实际负荷修正系数为 2 时的数值。

6 结论

研究成果经中国电力工程顾问集团公司组织专家评审,主要评价为:本项目在国内、外第 1 次系统、完整地从事试验到理论对中压电流互感器在过饱和状态下的特性及对保护动作性能的影响进行了深入的研究,得出了电流互感器在过饱和状态下二次电流有效值、平均值及由傅氏算法求出的电流值是增加的结论,澄清了人们过去对电流互感器过饱和和特性认识上的某些误区。所介绍的中压电流互感器选择计算方法已在全国电力设计院及全国电力注册工程师培训班推广应用。

参考文献:

[1] 国家发展和改革委员会. DI/T 866-2004 电流互感器和电压互感器选择及计算导则[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
[2] 国家经济贸易委员会. DL/T 5153-2002 火力发电厂厂用电设计技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2002.
[3] 盛和乐,袁季修,秦应力,等. 中压电流互感器及继电保护装置联合试验研究报告[R]. 北京:国电华北电力设计院工程有限公司,北京四方继保自动化有限公司. 大连:大连第一互感器厂,2004.
[4] 袁季修,盛和乐,吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

(责任编辑:柏英武)

(下转第 15 页 continued on page 15)

作者简介:

袁季修(1929-),男,湖南隆回人,教授级高级工程师,长期从事电力系统继电保护和自动化设计及研究工作;
盛和乐(1935-),男,湖南长沙人,教授级高级工程师,长期从事发电厂及电力系统设计研究工作(E-mail:shenghl@ncpe.

com.cn);
秦应力(1951-),男,河北保定人,高级工程师,长期从事电力系统继电保护和自动化开发研究工作;
沙玉洲(1969-),男,辽宁大连人,工程师,从事电流互感器设计和制造工作;
安作平(1940-),男,湖南新化人,教授级高级工程师,长期从事电流互感器设计研究和制造工作。

Parameter selection of protective current transformer
for medium-voltage system

YUAN Ji-xiu¹,SHENG He-le¹,QIN Ying-li²,SHA Yu-zhou³,AN Zuo-ping³,
JI You-dang²,TAO Hui-liang²,LI He¹,HE Zan-feng¹
(1. North China Power Engineering Co.,Ltd., Beijing 100011,China;
2. Beijing Sifang Automation Co.,Ltd., Beijing 100085,China;
3. Dalian No.1 Instrument Transformer Works,Dalian 116200,China)

Abstract: Characteristics of CT(Current Transformer) in extreme saturation is illustrated by test and theoretical analysis. When the primary CT current exceeds accurate limit value,the secondary current is not proportional to it,but values such as virtual current,mean current and fundamental current calculated by Fourier algorithm are still on the increase. The current protection relay can operate properly when its setting value is less than the accurate limit current. When the primary current is continuously increasing, the relay can still properly act. Therefore the CT accurate limit coefficient can be determined by the maximal setting value of current relay,instead of the short-circuit current. Thus the difficulty in CT parameter selection due to the large short-circuit current in medium voltage system is settled. In addition,the effect of the extreme saturation current upon the different sampling rates of microprocessor protection is analyzed through experiments. For low sampling rate,the over saturation coefficient should be limited to ensure the proper operation of relay and remain enough margin when its setting value is not greater than the CT accurate limit value.

Key words: current transformer; accurate limit current; saturation; current protection; settings; sampling rate