

基于不同检测方法的高压电流互感器误差比较与分析

刘 刚¹,熊小伏¹,廖瑞金¹,郝 建¹,刘 鹏²

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司计量中心,四川 成都 610045)

摘要:目前对高压电流互感器的误差检测有多种方法,但缺乏对各检测方法所得误差结果差异性和准确性的比较分析。采用单相检测法检测电流互感器误差、考虑电压对电流互感器误差的影响计算电流误差的综合绝对值、额定电压下检测电流互感器误差 3 种检测方法分别对高压电流互感器的误差开展检测和比较分析,并对其差异原因进行了理论分析。结果表明,电压会使电流互感器的比差和角差向负方向偏移,当电流较小(特别是 20% 额定电流以下)时,电压对电流误差影响较大,随着电流增大,其影响逐渐减小直至可以忽略;低压下测得的电流互感器误差在电流较小时不够准确,电流误差的综合绝对值远大于在高压下直接测得的电流误差,对高压电流互感器的误差检测宜采用在额定电压状态下直接测量的方式。

关键词:检测方法;电流互感器;误差分析;泄漏电流;电流误差的综合绝对值

中图分类号:TM 452

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.016

0 引言

电流互感器良好误差特性即其传变信号的准确性对保证电网的安全稳定运行和电能装置的准确计量具有重要意义^[1],在电流互感器投运前,必须对其传变特性即误差性能进行检测。

目前对高压电流互感器开展误差检测通常采用单相检测法,依据 IEC 61869-2—2012《互感器 第 2 部分:电流互感器的补充技术要求》^[2]和 JJG 1021—2007《电力互感器》^[3]等标准开展,检测时仅对高压电流互感器施加电流,即在低压下开展误差检测,由于实际运行时电流互感器一次侧处于高压状态,将有高压产生的电容电流(也称泄漏电流)从电流互感器的一次绕组流向二次绕组,该泄漏电流将影响电流互感器的误差,单相检测法没有考虑高电压所产生的泄漏电流对电流互感器误差的影响,检测结果不能准确反映电流互感器在实际运行中的真实计量性能^[4]。为考虑高电压所产生的泄漏电流对电流互感器误差的影响,IEC 61869-4—2013《互感器 第 4 部分:组合互感器》^[5]和 GB/T 20840.4—2015《互感器 第 4 部分:组合互感器的补充技术要求》^[6]等标准提出了计算电流误差的综合绝对值,即将电压对电流互感器误差影响的绝对值分别与电压互感器无励磁时电流互感器在额定负荷及 25% 额定负荷、5% (或 1%) 额定电流下测得的误差绝对值相加得到电流误差的综合绝对值,并以该值作为判断电流误差特性的依据,但是电流误差的综合绝对值所反映的并不是电流互感器在实际运行状态下的真实误差,而是电流互感器误差的最大可能范围。根据 IEC 关于仪表和测量装置的基本原则:“所有仪表和测量装置的误差都必须进行实际的测量,未经测量,

仅是以其他测量中计算得到的和引用电压、电流和功率因数组合的误差,不能作为评价装置基本误差的依据^[7]”,说明电流互感器的误差应在实际高压运行状态下直接测量。

目前,对高压电流互感器在不同检测方法下的误差开展了初步研究。文献[8-9]通过建立外部电场对电流互感器误差影响的模型并开展研究,结果表明一定条件下外部电场将对电流互感器误差产生较大的影响。文献[10-13]对 10 kV 及 35 kV 组合互感器在低压状态下、额定高压状态下开展电流互感器误差检测,低压状态下检测合格的电流互感器在额定高压状态下检测时,其 1% 额定电流、5% 额定电流误差相差较大,甚至超出误差限值,随着电流增加,2 种状态下所测得的差值减小,说明 2 种方法检测结果确实存在差异。文献[14-15]对组合互感器研究发现,电压互感器励磁对电流互感器误差的影响主要集中体现在 20% 额定电流以下,而随着一次电流的逐渐增大,其影响逐渐变小直至可忽略不计。

综上,初步试验发现高压电流互感器在低压下的误差与其处于高压运行状态的真实误差存在差异,但是缺乏在不同检测方法下所得误差的差异性和准确性的比较分析。本文以应用于 10 kV 输电系统的三相三元件组合互感器为研究对象,分别采用单相检测法检测电流互感器误差、考虑电压对电流互感器误差的影响计算电流误差的综合绝对值、额定电压下检测电流互感器误差 3 种检测方法对其电流互感器开展误差试验和分析,为高压电流互感器的设计、制造和检测提供有意义的参考。

1 试验

1.1 试验设备

主要试验设备参数如表 1 所示,被试互感器的

额定运行电压为 10 kV。其他辅助试验设备包括电流负载箱、升流器、升压器、调压器等。

表 1 主要试验设备参数

Table 1 Parameters of key testing devices

设备类型	设备名称	电流变比	准确度等级
被试设备	三相三元件组合互感器	100 A:5 A	0.2 S
标准设备	高压标准电流互感器	(0~200) A:5 A	0.05 S
校验设备	互感器校验仪	—	1

试验中的高压标准电流互感器采用多层屏蔽方式特殊设计定制,经国家权威检定机构测试,额定电压下该高压标准电流互感器的泄漏电流可忽略,额定电压下该高压标准电流互感器的误差满足国家检定规程 JJG 313—2010《测量用电流互感器检定规程》^[16]对 0.05 S 级标准电流互感器的误差限值要求,不会影响高压下被试电流互感器的误差;互感器校验仪采用目前通用的互感器校验仪,即基于测差原理且输入为模拟信号,该校验仪经国家权威检定机构测试合格;其他试验设备也均经过检测,满足相关标准的规定。

1.2 试验原理

采用单相检测法对电流互感器在低压下的误差检测依据 JJG 1021—2007《电力互感器检定规程》执行;计算电流误差的综合绝对值依据 IEC 61869-4—2013《互感器 第 4 部分:组合互感器的补充技术要求》执行,为与额定电压下直接测得的电流互感器误差进行比较,对 100%额定电压下电流互感器的泄漏电流也进行测试,并计算该电压下电流误差的综合绝对值;采用在额定电压下直接检测电流互感器误差的试验原理如图 1 所示。

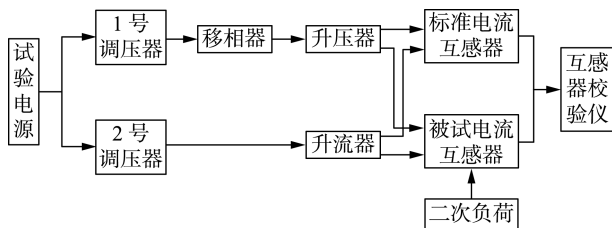


图 1 误差试验原理图

Fig.1 Principle diagram of error test

1 号调压器和 2 号调压器接入同一电源,通过移相器对电压相位进行调节,以实现电流互感器上的电流和电压间的相位可调。被试电源分别经过 1 号调压器、移相器、升压器和 2 号调压器、升流器获得一次电压和一次电流,将一次电流串联在高压标准电流互感器和被试电流互感器的一次侧,一次电压并联在高压标准电流互感器和被试电流互感器的一次侧,高压标准电流互感器和被试电流互感器的二次侧信号接入互感器校验仪进行误差检测。试验中,首先将一次电压升到额定值,然后再将电流升至规定的值,并检测该电流值下的误差。实际中负荷的功率因数通常为 0.95 以上,试验中一次侧功率因

数为 0.98;温度为 20 °C ± 2 °C;湿度约为 85%。

2 试验结果与分析

2.1 单相检测法试验结果

依据 JJG 1021—2007《电力互感器检定规程》对该三相三元件组合互感器中的电流互感器开展误差检测,结果如图 2 所示。可见,额定负荷和下限负荷下,电流互感器的比差随着电流增加先迅速增加,当电流达到一定值后,比差增加趋势趋于平缓;额定负荷和下限负荷下,电流互感器的角差随着电流增加而减小,且在电流较小时角差减小较快,当电流达到一定值后,角差减小趋势变缓,此变化趋势与其他在低压下测得的电流互感器误差趋势相同。在电流变化范围内,电流互感器比差的变化值最大约为 0.08%,角差的变化值最大约为 8',相对于 0.2 S 级电流互感器的误差限值而言,变化较小。

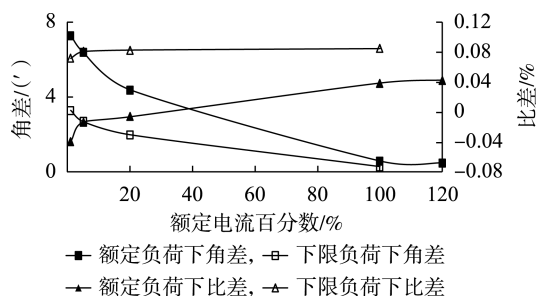


图 2 单相检测法下电流互感器的误差

Fig.2 Error of current transformer tested by single-phase testing method

2.2 电流误差的综合绝对值计算结果

2.2.1 计算方法

IEC 61869-4—2013 对组合互感器中电流互感器误差的检测规定为:首先在电压互感器不励磁时,测得电流互感器的比差 ε_i 和角差 δ_i ;然后将 120% 额定电压施加到电压互感器的端子上(此端子与不通电流的电流互感器的一个端子直接相连),该电压在电流互感器中产生电容电流,它由电流互感器二次端子间所接电阻 R 的电压降 U_i 测得。

因此,电流互感器比差的变化量(按 5% 额定电流)为:

$$\pm \Delta \varepsilon_i = \frac{U_i}{R \times 0.05 I_{sr}} \times 100\% \quad (1)$$

其中, R 为电阻 (Ω); U_i 为电压降 (V); I_{sr} 为额定二次电流 (A)。

角差的变化量为:

$$\pm \Delta \delta_i = \Delta \varepsilon_i \times 34.4 (') \quad (2)$$

将电流互感器比差变化量 $\pm \Delta \varepsilon_i$ 和角差变化量 $\pm \Delta \delta_i$ 的绝对值与低压下在 5% 额定电流及规定二次负荷范围内所得比差 ε_i 和角差 δ_i 的绝对值分别相加,则所得值为:

$$\pm \varepsilon'_i = |\varepsilon_i| + |\Delta \varepsilon_i|, \pm \delta'_i = |\delta_i| + |\Delta \delta_i| \quad (3)$$

其中, ε'_i 为电流互感器比差的综合绝对值; δ'_i 为电流互感器角差的综合绝对值。

2.2.2 计算结果

依据 IEC 61869-4—2013 的规定,当电流互感器的二次电流为 5 A 时,取样电阻 $R=4\ \Omega$ 。对电流互感器一次侧分别施加 120% 额定电压和 100% 额定电压(以下简称额定电压)且其二次绕组的 S_1 和 S_2 分别接地时,测得电阻 R 上的最大电压降分别为 1.31 mV 和 1.08 mV(S_1 和 S_2 分别接地时电阻 R 上的电压降相差不到 0.1 mV),根据式(1)—(3)可得 5% 额定电流时,被试电流互感器电流误差的综合绝对值如表 2 所示。

表 2 被试电流互感器电流误差的综合绝对值

Table 2 Absolute value of variations of current error of tested current transformer

类型	额定负荷下的误差		下限负荷下的误差	
	比差/%	角差/(')	比差/%	角差/(')
低压下的电流误差	-0.013	6.40	0.081	2.70
120%额定电压下电流误差最大可能变化量	0.131	4.51	0.131	4.51
额定电压下电流误差最大可能变化量	0.108	3.71	0.108	3.71
120%额定电压下电流误差的综合绝对值	0.144	10.91	0.212	7.21
额定电压下电流误差的综合绝对值	0.121	10.11	0.189	6.41

可见,5%额定电流下,120%额定电压对电流互感器误差的影响量即电流误差最大可能变化量远大于低压下测得的电流误差,导致计算得到的电流误差的综合绝对值远大于低压下测得的电流误差。因此,对高压电流互感器进行误差检测时,必须考虑一次高压所产生的泄漏电流对其误差的影响。

2.3 额定电压下直接检测结果

根据图 1 的试验原理在额定电压下直接检测该电流互感器的误差,得到该电流互感器在额定负荷和下限负荷下的比差和角差如图 3 所示。

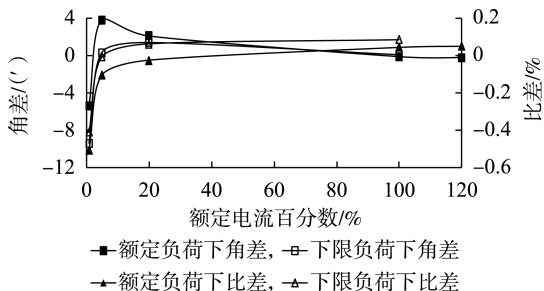


图 3 额定电压下的电流误差

Fig.3 Current error tested at rated voltage

从图 3 可知,额定负荷和下限负荷下,当电流较小(20%额定电流以下)时,电流互感器的比差和角差均呈现随电流增大而迅速增加,其中比差增加约

0.5%,角差增加约 10',相对于 0.2 S 级电流互感器的误差限值,如此大的变化量必须引起高度重视;当电流较大(20%额定电流以上)时,比差和角差变化较小,其中比差变化量约为 0.05%,角差变化量约为 2'。

2.4 不同方法检测结果的对比分析

2.4.1 单相检测法检测结果与额定电压下直接检测结果的对比

由于电流误差的综合绝对值仅计算 5% 额定电流下的值,为对比分析电流互感器误差在 1% ~ 120% 额定电流范围内的变化情况,对电流互感器分别在单相检测法和额定电压下直接测得的误差进行对比分析。且由前文的分析可知,额定负荷和下限负荷下,电流互感器误差变化具有相似性,因此,以额定负荷下电流互感器的误差为例进行分析。

额定负荷下,电流互感器分别在单相检测法和额定电压下直接测得的误差对比如图 4 所示。

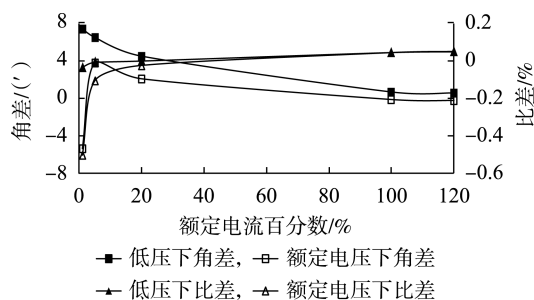


图 4 低压下与额定电压下检测结果的比较

Fig.4 Comparison of current errors tested at rated primary voltage and low voltage

可以看出,电流较小时,单相检测法和高压下直接测得的比差和角差差值较大,随着电流增加,差值逐渐减小,当电流增加到 60% 额定电流以上时,差值可忽略,说明二者的差异主要体现在电流较小的情况下,即高压所产生的泄漏电流主要影响电流较小时的电流误差,且从图中可以看出,泄漏电流使电流误差向负方向偏移。

2.4.2 3 种检测方法检测结果的比较

在 5% 额定电流下,对电流互感器分别在 3 种检测方法下的误差进行对比分析,如表 3 所示(为实现不同方法得到误差结果的可比性,此处选取 100% 额定电压下电流误差的综合绝对值进行比较)。

表 3 3 种检测方法下的电流互感器误差对比

Table 3 Comparison of error of current transformer among three testing methods

检测方法	额定负荷下的误差		下限负荷下的误差	
	比差/%	角差/(')	比差/%	角差/(')
单相检测法下的电流误差	-0.013	6.40	0.081	2.70
额定电压下电流误差的综合绝对值	0.121	10.11	0.189	6.41
额定电压下检测的电流误差	-0.107	3.70	-0.016	0.20

从表 3 可以看出,高压下直接检测的电流误差值最小,单相检测法下的电流误差值居中,而计算得到的电流误差的综合绝对值最大。这是因为泄漏电流使电流误差向负方向偏移,导致高压下直接检测的电流误差值最小;而电流误差的综合绝对值是单相检测法下的电流误差绝对值与电压对电流误差影响量的绝对值相加,从而造成电流误差的综合绝对值最大。

计算所得电流误差的综合绝对值远大于高压下直接测得的误差。因此,根据电流误差的综合绝对值可能导致对电流互感器计量性能合格与否的误判。

3 原因分析

电流互感器处于高压状态下的电流示意图如图 5 所示,图中, I_1 为电流互感器的一次电流; I_2 为不考虑泄漏电流影响时电流互感器的二次电流; I_3 为电流互感器从极性端 S_1 流出的泄漏电流; I_4 为电流互感器从非极性端 S_2 流出的泄漏电流。此时处于高压的一次绕组与处于低压的二次绕组间形成较大的电势差,则将有泄漏电流从电流互感器的一次绕组流入二次绕组,从而影响电流互感器的误差。

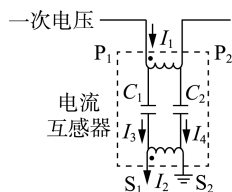


图 5 电流互感器处于高压状态下的电流示意图

Fig.5 Current of current transformer at high voltage

一次绕组与二次绕组间的分布电容可用电容 C_1 和 C_2 等效,其中流经电容 C_1 的泄漏电流 I_3 从极性端 S_1 流出,流经电容 C_2 的泄漏电流 I_4 从非极性端 S_2 流出,由于现场运行时通常 S_2 接地,则 I_4 流入大地,不会对电流互感器的误差产生影响,而 I_3 与 I_2 一起作为电能表或互感器校验仪的输入信号,因此 I_3 将对电流互感器的误差产生影响。

由电流互感器误差计算公式 $\varepsilon = (KI_2 - I_1) / I_1 \times 100\%$,可得电流互感器在高压状态下的实际误差为:

$$\varepsilon' = [K(I_2 + I_3) - I_1] / I_1 \times 100\% \quad (4)$$

其中, K 为电流互感器电流变比。

在理想情况下,假设该电流互感器一次电流为 I_1 时,二次电流为 I_0 ,则有 $I_1 = KI_0$,式(4)可写为:

$$\varepsilon' = \left(\frac{I_2 - I_0}{I_0} + \frac{I_3}{I_0} \right) \times 100\% = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \quad (5)$$

可见,电流互感器处于高压状态下的误差由两部分组成,即在低压下测得的误差 ε_0 和由于电流互感器一次绕组处于高压而产生的泄漏电流引起的附加误差 $\Delta\varepsilon$ 。 $\Delta\varepsilon$ 的表达式为:

$$\Delta\varepsilon = I_3 / I_0 \times 100\% \quad (6)$$

由于实际运行时,电流互感器所处的一次电压基本不变,所以高压所产生的泄漏电流引起的附加误差 $\Delta\varepsilon$ 会随着电流互感器二次电流的增大而减小。由于泄漏电流呈容性^[17],故泄漏电流使电流误差向负方向偏移。

根据绝对值不等式,且泄漏电流使电流互感器误差向负方向偏移,即 $\Delta\varepsilon$ 为负,可得:

$$\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon = \varepsilon' < \varepsilon_0 < \varepsilon'_i = |\varepsilon_0| + |\Delta\varepsilon| \quad (7)$$

从式(7)可知,电流互感器在高压状态下检测的误差小于在低压状态下检测的误差,而电流误差的综合绝对值最大,该结论与试验结果一致。

因泄漏电流对电流互感器的影响主要体现在电流较小时,选取 1%、5% 和 20% 额定电流时的电流互感器误差数据并计算泄漏阻抗,结果如表 4 所示。

表 4 计算得到的泄漏阻抗

Table 4 Calculated leakage impedance

额定电流 百分数/%	泄漏阻抗/ Ω		
	额定负荷下	下限负荷下	平均值
1	2.450×10^7	2.366×10^7	
5	2.453×10^7	2.363×10^7	
20	2.497×10^7	2.383×10^7	
平均值	2.467×10^7	2.370×10^7	2.418×10^7

计算得到额定负荷下和下限负荷下的泄漏阻抗平均值相差 3.9%。依据 IEC 61869-4—2013 检测被试电流互感器电阻 R 上的压降,并计算得到泄漏阻抗为 $2.308 \times 10^7 \Omega$,与表 4 中泄漏阻抗值相差约为 4.5%,二者结果较吻合,证明了以上分析的正确性。

4 泄漏电流对电流误差的影响分析

若一次侧功率因数按 0.98(感性)计算,此时一次电压超前一次电流约 11.5° ,对于运行于 10 kV 电压等级的电流互感器,其一次侧处于相电压 $10 \text{ kV} / \sqrt{3}$,根据泄漏阻抗计算得到运行时的泄漏电流为 $I_3 = 10 \text{ kV} / \sqrt{3} / (2.3 \times 10^7 \Omega) \approx 0.25 \text{ mA}$;试验中的电流互感器在理想情况下的二次电流为 5 A,则可计算出泄漏电流对电流互感器误差的影响量如表 5 所示。

表 5 泄漏电流对电流误差的影响

Table 5 Influence of leakage current on current error

额定电流 百分数/%	比差影 响量/%	角差影 响量/($^\circ$)	比差限 值/%	角差限 值/($^\circ$)
1	-0.500	-17.026	0.75	30
5	-0.100	-3.403	0.35	15
20	-0.025	-0.851	0.20	10
100	-0.005	-0.170	0.20	10
120	-0.004	-0.141	0.20	10

可见,当电流较小时,泄漏电流对电流互感器误差的影响较大;电流增加,泄漏电流对电流互感器误差的影响减小,当电流升至 20% 额定电流时,泄漏电

流对电流比差的影响量约为0.02%,等于0.2 S级电流互感器的化整单位,可以认为此时泄漏电流对电流比差的影响量可忽略。

为降低泄漏电流对电流互感器误差的干扰,建议在一次绕组与二次绕组间增加屏蔽层并接地,实现将泄漏电流引入大地,从而降低高压产生的泄漏电流对电流互感器误差的影响,使电流互感器能更加准确地传变信号。

5 结论

本文分别采用单相检测法检测、考虑电压影响并计算电流互感器电流误差的综合绝对值、额定电压下直接检测3种检测方法对高压电流互感器开展误差检测,并对结果进行对比分析,得到如下结论。

a. 高压产生的泄漏电流将使电流互感器的比差和角差向负方向偏移,且泄漏电流对电流互感器误差的影响主要体现在20%额定电流以下;对高压电流互感器进行误差检测时,应考虑泄漏电流对其误差的影响。

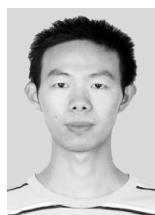
b. 电流互感器在高压状态下检测的误差小于在低压状态下检测的误差,而电流误差的综合绝对值最大;且考虑电压对电流误差的影响后计算得到电流误差的综合绝对值远大于在高压下直接测得的电流误差,依据电流误差的综合绝对值可能导致对电流互感器计量性能合格与否的误判,对高压电流互感器的误差检测宜采用在额定电压下直接测量的方式开展。

下一步将继续深入研究高电压对电流误差的影响效果。

参考文献:

- [1] 郭一飞,高厚磊. 直流偏磁对电流互感器暂态传变特性的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):126-131.
- GUO Yifei, GAO Houlei. Effect of DC bias on transient transferring characteristics of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 126-131.
- [2] IEC. Instrument transformers-part 2: additional requirements for current transformers; IEC 61869-2—2012[S]. [S.I.]; IEC, 2012.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 电力互感器检定规程: JJG 1021—2007[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [4] SO E, ARSENEAU R, BENNETT D, et al. A current-comparator-based system for calibrating high-voltage current transformers under actual operating conditions[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(7): 2449-2454.
- [5] IEC. Instrument transformers-part 4: additional requirements for combined transformers; IEC 61869-4—2013[S]. [S.I.]; IEC, 2013.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. 互感器 第4部分: 组合互感器的补充技术要求: GB/T 20840.4—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [7] IEC. Testing equipment for electrical energy meters; IEC 60736—1982[S]. [S.I.]; IEC, 1982.
- [8] 刘钢, 付志红, 侯兴哲, 等. 外部恒定磁场对电流互感器传变特性影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 100-104.
- LIU Gang, FU Zhihong, HOU Xingzhe, et al. Impact of external constant magnetic field on transfer characteristics of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 100-104.
- [9] LESNIEWSKA E, LISOWIEC A. Influence of the external magnetic field on operation of the new technology current-to-voltage transducers[C]//IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM). Berlin, Germany: IEEE, 2014: 2239-2245.
- [10] YANG H Y. Research on three-phase calibration method of HV three-phase combined transformer and its implementation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 568(570): 1191-1195.
- [11] 蒋卫, 杨华云, 江波. 高压三相组合互感器三相检定方法及其实现研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(7): 46-49.
- JIANG Wei, YANG Huayun, JIANG Bo. Research on three-phase calibration method of HV three-phase combined transformer and its implementation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(7): 46-49.
- [12] 张能, 廖慧敏, 吴永云, 等. 三相组合互感器检定装置研究[J]. 自动化与仪表, 2012, 32(4): 41-43.
- ZHANG Neng, LIAO Huimin, WU Yongyun, et al. Study of three-phase transformer test equipment combinations[J]. Automation and Instrumentation, 2012, 32(4): 41-43.
- [13] 蔚晓明, 赵园, 马斌. 三相电压互感器校验装置的研制[J]. 山西电力, 2010, 30(2): 30-32.
- YU Xiaoming, ZHAO Yuan, MA Bin. The development of testing device for three-phase voltage transformer[J]. Shanxi Electric Power, 2010, 30(2): 30-32.
- [14] 冯凌, 侯兴哲, 周华勇. 三相高压计量箱误差影响量探讨[J]. 电测与仪表, 2010, 47(12): 41-46.
- FENG Ling, HOU Xingzhe, ZHOU Huayong. Discussion of added error for three-phase combined instrument transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(12): 41-46.
- [15] LESNIEWSKA E, KOSZMIDER A. Influence of the interaction of voltage and current parts of a combined instrument transformer on its measurement properties[J]. IEE Proceedings—Science, Measurement and Technology, 2004, 151(4): 229-234.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 测量用电流互感器检定规程: JJG 313—2010[S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [17] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 三相组合互感器: JB/T 10432—2004[S]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

作者简介:



刘刚

刘刚(1983—),男,四川广安人,博士研究生,主要从事电气设备计量性能和高电压测试技术的研究工作(E-mail: lg400044400044@163.com);

熊小伏(1962—),男,四川南充人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统保护、运行及控制(E-mail: cqxxf@vip.sina.com);

廖瑞金(1963—),男,四川遂宁人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断研究和高压测试技术工作(E-mail: rjliao@cqu.edu.cn)。

(下转第113页 continued on page 113)

for real-time generation scheduling and its application[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3187-3192.

- [13] 张彦涛,任景,孙晓强,等. 基于广义联络线网省协调的两阶段实时发电计划模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 128-133.
ZHANG Yantao, REN Jing, SUN Xiaoqiang, et al. Two-stage real-time generation scheduling model based on coordination of regional and provincial power grid generalized tie-line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 128-133.
- [14] 陈浩,李战鹰. 广东电网调峰分析[J]. 广东电力, 2001, 14(2): 6-8.
CHEN Hao, LI Zhanying. Analysis of peak shaving of Guangdong Province[J]. Guangdong Electric Power, 2001, 14(2): 6-8.
- [15] 牛逸宁,艾欣,刘晓. 广东电网调峰特性分析[J]. 广东电力, 2012, 25(10): 1-4.
NIU Yining, AI Xin, LIU Xiao. Analysis on peak shaving characteristic of Guangdong Power Grid[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(10): 1-4.

作者简介:



董超

董超(1988—),男,湖北黄石人,高级工程师,硕士,主要研究方向为智能电网调度运行、电力现货市场设计与运行(E-mail: dcedward1205@163.com);

张彦涛(1983—),男,河南漯河人,工程师,硕士,主要研究方向为最优化技术、电力系统运行和优化(E-mail: zhangyantao@sgepri.sgcc.com.cn);

刘嘉宁(1974—),男,广东江门人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为智能电网调度运行;

吴炳祥(1983—),男,福建泉州人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统运行和优化。

Real-time generation scheduling model and its application considering deep peak regulation of thermal power units

DONG Chao^{1,2}, ZHANG Yantao^{3,4}, LIU Jianing¹, WU Bingxiang^{3,4}

(1. Electric Power Dispatching & Control Center of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510600, China;

2. Key Laboratory of Safety, Economic Operation and Market Operation of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510600, China;

3. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

4. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: The demand of peak regulation is gradually growing along with the access of large-scale renewable energy and the gradual increase of electricity peak-valley difference, while the power source for peak regulation is insufficient due to the unreasonable power source structure in China, which causes difficulties in peak regulation of power grid. The deep peak regulation ability of thermal power units is deeply excavated, and their operation characteristics are analyzed. On the basis of conventional optimization model, the constraints such as operation time in stationary segment of deep peak regulation output and minimum deep peak regulation time are introduced, the conventional constraints such as maximum and minimum unit output and ramping are improved, and an optimal real-time generation scheduling model with the consideration of deep peak regulation of thermal power units is built. The practical operation data of Guangdong Power Grid is used for case analysis, and the results meet the requirement of practical power grid operation.

Key words: thermal power units; real-time generation scheduling; deep peak regulation; minimum deep peak regulation time; smoothness

(上接第 107 页 continued from page 107)

Error comparison and analysis of high-voltage current transformer based on different testing methods

LIU Gang¹, XIONG Xiaofu¹, LIAO Ruijin¹, HAO Jian¹, LIU Kun²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Corporation Metering Center, Chengdu 610045, China)

Abstract: There are various methods to test the error of high-voltage current transformer, however, there is little analysis on the difference and accuracy among testing results of these methods. The error of high-voltage current transformer is tested and compared with single-phase testing, absolute value calculation of the current error considering the influence of voltage and current error testing under rated voltage. And the reason of their differences is analyzed. The results show that voltage has a negative influence on ratio error and phase displacement of current transformer, and its effect is mainly predominant at currents less than 20% of rated current. The larger the current is, the smaller the influence will be, and the influence decreases gradually until it can be neglected with the increase of current. The current errors tested at low voltage are inaccurate at low current, and the absolute value of the variations of current error is much larger than the results tested at high voltage, as a result, the current error of high-voltage current transformer should be tested directly at rated primary voltage.

Key words: testing method; current transformer; error analysis; leakage current; absolute value of the variations of current error