

基于油色谱分析的变压器有载开关油渗漏 缺陷诊断方法创新研究

蒋福佑,袁 鹰

(四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘 要:变压器有载开关油渗漏导致变压器本体油中乙炔含量增长、超过注意值的现象时有发生,对判断设备缺陷带来困扰。国标中提出的 $C_2H_2/H_2 > 2$ 法,由于正常运行状态下变压器油中氢气浓度相比乙炔浓度要高,该判断方法适用范围受到限制。通过分析有载开关油中各气体组分特征,提出了比值法、曲线法、特征气体法和运行方式法等判断方法用于诊断有载开关油渗漏现象,并举例分析,结果表明比值法等方法对诊断变压器有载开关油渗漏具有较高的准确性。

关键词:有载开关;变压器油;乙炔;渗漏

Abstract: The oil leakage from on-load tap-changer (OLTC) of transformer occasionally occurs that causes the increment of acetylene content in the oil of transformer body over the alert value, resulting in a difficult position for determination of equipment defects. A method of $C_2H_2/H_2 > 2$ is put forward by the Chinese GB standard, however, the applicable scope of the method is often restricted since the concentration of hydrogen is comparably higher than that of acetylene in the transformer oil. Those methods for diagnosis of the oil leakage from on-load tap-changer, such as ratio method, curved method, characteristic gases method and operation mode method are presented by analyzing the characteristics of various components of gases in on-load tap-changer oil. And with the analysis by examples, the results prove that the higher accuracy may be obtained for the diagnosis of the oil leakage from on-load tap-changer of transformer with the ratio method etc.

Key words: on-load tap-changer; transformer oil; acetylene; leakage

中图分类号:TM406 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)03-0082-06

变压器有载开关油渗漏时有发生,由于有载调压操作产生的气体与放电故障特征相符,有载开关油渗漏至本体后,容易造成对主变压器本体故障的误判断,对此类情况要引起高度重视,避免不必要的重复停电和检修。对有载开关油渗漏的判断,国标中指出,在变压器主油箱中 $C_2H_2/H_2 > 2$,认为变压器存在有载开关油渗漏的迹象。但在实际生产工作中此判据实用性相当有限。力求在对有载开关油渗漏特征进行深入分析的基础上,对判别方法进行创新,希望对判断变压器有载开关油渗漏提供一些有益的帮助。

1 有载开关油渗漏的特征

由于变压器有载调压开关的运行方式比较固定,在调压过程中产生电弧放电,油中主要特征气体为乙炔和氢气,甲烷和乙烯为次要特征气体。大量

的实践案例表明,变压器有载开关油中乙炔一般占总烃的60%~80%。有载开关油渗漏的特征可以从两个方面来进行分析。

(1) 选择乙炔作为有载开关油渗漏的特征气体主要考虑两个方面的原因:①虽然有载开关油中的氢气含量一般情况下比乙炔更高,但是由于氢气的溶解系数小(50℃时,氢气在变压器油中的奥氏瓦尔特系数仅为0.06,氢的奥氏瓦尔特系数随着温度的升高而降低);另外变压器在正常运行中也会产生一定量的氢气(主油箱中),不容易发现其增长趋势,故不能作为特征气体。②其他烃类组分(CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6)尽管溶解系数较大,但是由于在变压器正常运行中也会产生一定的量,大多为几个到几十个 $\mu L/L$ 的浓度,故由有载开关油渗漏所带来的增长可能不易被察觉。由于正常运行的变压器,油中一般无乙炔,所以由有载开关油渗漏而造成变压器本体油中乙炔的增长表现非常明显。

(2) 乙炔作为有载开关油渗漏的特征气体,其增长方式有下列特征: 变压器本体油中的乙炔增长速度与有载开关的动作次数关系明显,与变压器负荷关系不明显,若有载开关油箱密封不良,当其动作时对油形成的强大推力往往导致在动作瞬间会发生很大的渗漏量,一般情况下动作越频繁乙炔的增长速度越快。有载开关不动作期间,油中乙炔一般保持一个相对比较恒定的增长速率;当有载开关存在渗漏时的变压器本体油中乙炔增长到一定的量后不再增长,但不能据此判断渗漏已自动消失。

2 有载开关油渗漏的判断技巧

2.1 油位观察法

一般情况下,由于本体的油位高于有载开关的油位,若有载开关与变压器本体存在渗漏,有载开关的油位会上升,或放出部分有载开关油,观察其油位是否缓慢上升,通过观察油位的变化可以粗略判断此类缺陷。

2.2 C₂H₂/H₂ 法

该法在国家标准《变压器油中溶解气体和判断导则》(GB/T 7252 - 2001)里提出,并有详细的叙述“主油箱中 C₂H₂/H₂ > 2,认为是有载调压污染的迹象”。由于正常运行的变压器油中都有一定量的氢,有的变压器油中氢气含量可以达到数十甚至上百 μL/L 的浓度,乙炔作为放电故障的特征气体,技术监督人员对其敏感性非常高,一般情况不可能等到乙炔的含量达到氢含量的两倍以上再做出判断。

2.3 比值法

当怀疑存在有载开关油渗漏后,同时采取变压器本体和有载开关油样,进行油色谱分析,分别计算

本体和有载油 C₂H₂/CH₄、C₂H₂/C₂H₄ 两组比值。采用 C₂H₂/CH₄、C₂H₂/C₂H₄ 这两组比值作为判断有载开关油渗漏判据的理论依据在于: ①根据质量守恒定律,从有载开关中渗漏(主要方式应是相互交换)至本体主油箱的油与有载开关缸体内的油中各气体组分含量一致,当有载开关油渗漏至本体主油箱后,各气体组分被极度稀释,但是各组分所占的比例是不变的(理想情况下,假设主变压器本体油中各气体组分的本底值可以确切得知),故可以通过计算主变压器本体油中各组分相互比值判断是否发生有载开关油渗漏。②有载开关油中乙炔为第一特征气体,一般占总烃的 60% ~ 80%,甲烷和乙烯也有较高的浓度,由于这 3 种气体都有比较高的稳定性,易于积累(氢气由于其容易逃逸的特性,不能作为比值特征气体),故选择这 3 种气体为特征气体。以第一特征气体为中心,计算两组比值,有助于判断有载开关油渗漏的问题。

在使用本法的时候,要根据实际情况,对各气体组分进行合理的修正,不能盲目套用比值。具体做法如下: (1) 有载开关油的两组比值可以用分析结果直接计算。(2) 一般情况下,主变压器本体油的两组比值不宜直接计算,应对各气体组分进行合理修正,设发现有载开关油渗漏前一次各气体组分含量测试值为 B,合理估算(假设气体组分浓度匀速增长)该变压器正常运行情况下油中各气体组分该时段内可能产生的含量为 C,本次试验数值为 A,设修正后的各气体组分含量为 X_i,则存在 X_i = A - B - C; 一般情况下,本体油在正常运行下各组分很低,可不估算 C,计算公式简化为 X_i = A - B。(3) 使用修正后的气体组分计算两组比值,初步判断是否发生渗漏。下面略举例说明。

例 1: 某 110 kV 主变压器的试验数据如表 1。

表 1 一例有载开关油渗漏的油色谱试验数据 (单位: μL/L)

油来源	检测时间	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	备注
本体油	2001.7.13	3.1	0.1	0	0	
本体油	2002.8.17	5.2	2.1	0.7	11.7	
有载油	2002.8.17	147.3	127.1	14.7	897.3	
本体油(修正后 A - B)		2.1	2.0	0.7	11.7	未考虑主变压器正常运行下产生甲烷和乙烯的数值(即 C 值)
		C ₂ H ₂ /CH ₄	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
计算比值	本体	5.6	5.9			
	有载开关	6.1	7.1			

表2 一例有载开关油渗漏的油色谱试验数据 (单位: $\mu\text{L/L}$)

油来源	试验时间	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
本体油	2005.11.24	551.3	2 899.0	6.0	1.7	1.1	0
本体油	2007.7.26	2 562.6	13 819.1	18.1	8.0	3.4	26.3
有载油	2007.7.26	273.1	3 249.1	1 893.5	2 400.4	134.5	24 239.2

备注: 本体油与有载油中 CO、CO₂ 浓度差别明显。

表3 有载开关油渗漏判断方法一览表

判断方法	方法简述	适用类型	备注
油位观察法	观察有载开关油位的变化	能明显观察到油位变化	部分变压器有载开关油位不易观察,有载开关放油需要停电
C ₂ H ₂ /H ₂ 法 (国标法)	主油箱中 C ₂ H ₂ /H ₂ > 2,认为是有载调压污染的迹象	C ₂ H ₂ 含量非常高才能满足 C ₂ H ₂ /H ₂ > 2	实用性不强
两比值法	分别计算本体(数值要进行修正)和有载油的 C ₂ H ₂ /CH ₄ 、C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ 两组比值,进行比较分析	乙炔较高(超过注意值较多),准确度较高	影响该方法准确度主要在于本体油各组分含量的修正
曲线法	在坐标平面分别做本体油(数值要进行修正)和有载油中4种烃类组分的曲线图,比较曲线的相似程度	乙炔较高(超过注意值较多),准确度较高	影响该方法准确度主要在于本体油各组分含量的修正
CO、CO ₂ 法	对比本体油和有载油中 CO、CO ₂ 含量	主要适用于变压器本体与有载开关油中 CO、CO ₂ 含量差别明显的情况	该方法仅能进行否定判断,即能判断不渗漏
运行方式法	通过控制负荷和增加有载动作次数,观察乙炔的增长速度是否恒定	该方法对有载开关油渗漏初期、乙炔含量比较低的情况适用	对渗漏初期比较有效

本例由于该主变压器投入运行刚1年,通过上述两组比值对照,考虑到仪器误差和未估算正常运行情况下产生的甲烷和乙烯的数值,是可以高度怀疑该主变压器存在有载开关油渗漏。

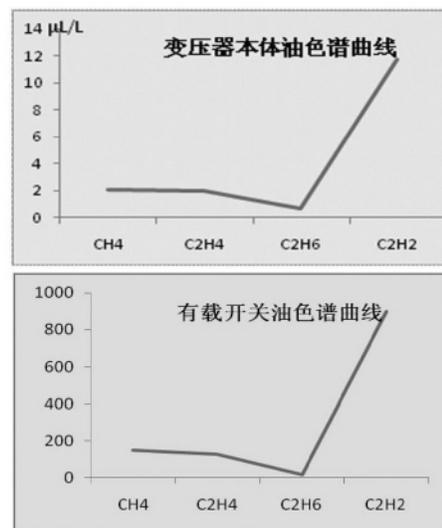
2.4 曲线法

该方法跟比值法有异曲同工之妙,操作的方法也基本一致,下面简单叙述曲线法的原理和使用技巧。

从有载开关中渗漏至本体主油箱的油与有载开关缸体内的油中各气体组分含量一致,当有载开关油渗漏至本体主油箱后,各气体组分被极度稀释,但是各组分所占的比例是不变的,故通过画各烃类组分的曲线图,观察有载开关油与本体油各气体组分曲线图的相似程度来初步判断是否发生有载开关油渗漏。

做法如下:(1)参考 C₂H₂/CH₄、C₂H₂/C₂H₄ 比值法对主变压器本体的油各气体组分进行修正,利用修正后的数值(可考虑放大数倍至数十倍,使得数值与有载油基本处在同一数量级)画出曲线图;(2)有载油可以直接使用(也可以考虑缩小数倍至数十倍)画出曲线图;(3)对比两曲线的相似程度(如果能把两条曲线做在同一坐标内更加有助于判断),作出判断。使用该方法同样要注意对本体数值进行修正,修正的准确度如何直接影响判断结果。

利用例1的数值做如下示范。通过观察两条曲线,容易发现两条曲线的走向非常一致,可以高度怀疑该设备存在有载开关油渗漏。



说明: 横坐标代表烃类各气体组分,纵坐标代表各气体组分含量;1为 CH₄;2为 C₂H₄;3为 C₂H₆;4为 C₂H₂

图1 各烃类组分曲线对比图

2.5 CO、CO₂法

本方法的适用范围比较窄,一般说来仅仅适用于有载开关油的 CO、CO₂ 含量比较低而主变压器本体 CO、CO₂ 含量又比较高的情况。某些情况下,通

过对比本体油和主变压器有载油中的 CO、CO₂ 有时候是非常容易判断是否存在有载开关油渗漏的。下面略举一例。

例 2: 某 110 kV 主变压器的试验数据如表 2。

通过观察主变压器本体油与有载开关油中 CO、CO₂ 含量,可以轻易判断该变压器未发生有载开关油渗漏。

2.6 运行方式法

变压器有载开关发生油渗漏与变压器放电、过热故障不同,一般跟变压器运行负荷没有直接关系,即一般不会因为改变变压器负荷而改变增长速度,而与有载开关动作频繁程度有密切的关系。

当怀疑发生有载开关油渗漏时,在使用其他几种判断方法判断可能存在有载开关油渗漏时,可以通过改变变压器的运行负荷来进一步判定是否存在有载开关油渗漏,该方法是一种非常有效而重要的验证和判断手段。在使用其他方法难于判断(如有载开关油渗漏发生的初期,由于乙炔含量可能很低,使用其他几种方法存在困难)时,可以通过改变变压器运行负荷和增加有载开关动作次数,及时进行油色谱分析,观察分析结果,来有效判断有载开关油渗漏。具体做法可以参考如下步骤:限制变压器负荷,在有条件的情况下,逐步降低变压器的运行负荷(可以逐步降低直至空载运行),保证有载分接开关的动作次数与日常运行基本保持一致,按照预定的周期进行色谱监督,观察乙炔增长趋势,直至空载运行依然维持原来的恒定增长速度,可以怀疑存在有载开关油渗漏。

3 有载开关油渗漏判断方法的选择

前面讲述了 6 种变压器有载开关油渗漏的判断

表 4 一例有载开关油渗漏的油色谱试验数据 (单位: μL/L)

油来源	试验时间	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	备注
本体油	2004.10.11	23.2	191.6	650.9	2.2	0.8	0.5	0	
本体油	2005.11.24	33.6	551.3	2 899.0	6.0	1.7	1.1	0	
本体油	2007.7.26	47.8	2 562.6	13 819.1	18.1	8.0	3.4	26.3	
有载油	2007.7.26	19 967.3	273.1	3 249.1	1 893.5	2 400.4	134.5	24 239.2	
本体油 (修正后)					6.3 ^[1]	5.0	1.4	26.3	此处考虑 C 值
计算 比值	本体 有载开关					C ₂ H ₂ /CH ₄ 4.535	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ 5.3		
						12.8	10.1		

注: 本体油修正值计算如下(以甲烷为例,后面部分将不再列详细步骤): $A = 18.1 \mu\text{l/l}$, $B = 6.0 \mu\text{l/l}$, $C = (6.0 - 2.2) / 13 \times 20 = 5.8 \mu\text{l/l}$, $X_{\text{CH}_4} = A - B - C = 6.3 \mu\text{l/l}$ 。

方法,其中任何一种技巧都不是万能的,都有其自身的缺陷,没有任何一种判断方法能做到完全准确。其中部分判断方法若使用不当,甚至可以得出截然不同的结果,故在使用这些判断方法的时候,一定要根据变压器的实际情况,谨慎选择判断方法,最好多种判断方法并举,相互配合验证。下面对有载开关油渗漏各判断方法进行归类说明,见表 3。

4 实例分析

下面通过几个实例来看看上述判断方法如何使用,每个实例都尽量提供多种判断方法,并进一步说明使用各判断方法的注意事项。

例 3: 某 110 kV 主变压器的试验数据如表 4。

例 4: 某 35 kV 调压变压器的试验数据如表 5。

该主变压器由于其他组分不高,且乙炔特征非常明显,怀疑该主变压器存在有载开关油渗漏的可能,故采取有载开关油样进行色谱分析。几种判断方法的对比:(1) C₂H₂/H₂ 法(国标法)显然无法对其进行判断,因为氢气的含量高于乙炔含量。(2) 比值法,容易发现本体油 C₂H₂/CH₄、C₂H₂/C₂H₄ 两组比值分别为 3.5、5.3,与有载油 C₂H₂/CH₄、C₂H₂/C₂H₄ 两组比值的 12.8、10.1 相差甚远,有载开关油渗漏的概率较小,设备内部存在放电故障的可能性较大。(3) 曲线法,参考例 1 可以画出曲线,可以发现两条曲线相似程度不高,也可以判断有载开关油渗漏的可能性不大(见图 2)。(4) CO、CO₂ 法:本体油与有载开关油中 CO、CO₂ 含量差别巨大,容易进行否定判断,即该变压器未发生有载开关油渗漏。该主变压器经吊罩检查未发现有关有载开关有渗漏痕迹,发现 110 kV 侧套管 C 相均压球有显著的放电痕迹。

表5 一例有载开关油渗漏的油色谱试验数据 (单位: $\mu\text{l/l}$)

油来源	试验时间	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	备注
本体油	2001.6.29	0	243.9	7 979.1	7.6	9.1	2.4	1.0	
本体油	2002.8.21	21.8	367.1	4 051.3	7.7	11.3	2.0	2.0	
本体油	2003.7.8	35.3	448.1	2 903.1	8.5	13.7	3.4	12.8	
有载油	2003.7.8	3 259.5	220.7	17 418.7	533.8	761.0	124.2	6 209.3	
本体油 (修正后)					0.8	2.410	1.4	10.8	此处不 考虑C值
计算 比值	本体 有载开关					C ₂ H ₂ /CH ₄	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄		
						13.5	4.510 8		
						11.6	8.2		

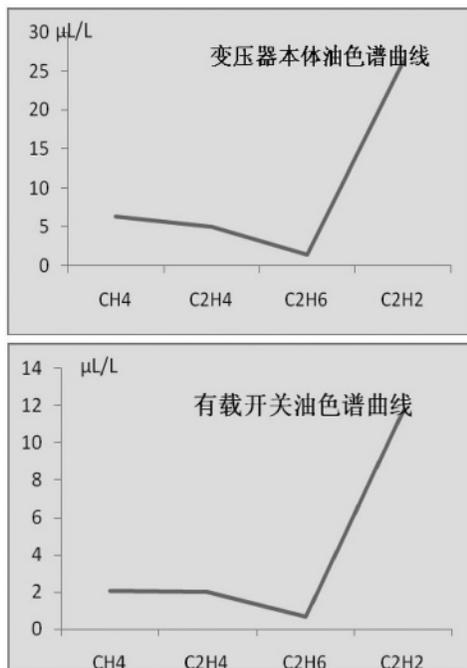


图2 各烃类组分曲线对比图

5 几个疑难问题的探讨

虽然变压器有载开关油渗漏导致变压器本体油中有乙炔不会危及设备安全运行,对其进行准确的判断对电网企业的安全生产有积极意义。虽然通过分析和总结,提出了几种创新的诊断方法,但是仍有许多疑难问题期待着同行们进行进一步的深化研究。

(1) 比值法和曲线法判别边界的确定需要进一步研究。变压器本体油与有载开关油的 C₂H₂/CH₄、C₂H₂/C₂H₄ 两组比值究竟差距多大范围内可做出肯定判断,差距大于何值可做出否定判定,需要更多的实践例证进行进一步的研究论证。同理,两条曲线多大的相似度可做出肯定判断,何时做否定判断?此外,数值修正公式中的 C 值计算假设各组

分是匀速增长,实际情况是变压器油中各组分非匀速增长,现实情况显然与理想假设存在一定差距。

(2) 是什么原因造成部分变压器发生有载开关油渗漏后,乙炔增长到一定的浓度后便不再增长、甚至出现下降趋势?这里对此做三点分析:①有载开关油中有大量的游离碳和杂质,或运行久远的设备油质老化而产生油泥等原因都可能造成对渗漏沙眼的堵塞,减少渗漏量,甚至消除渗漏;②有载开关油渗漏量达到一定的程度后,本体油中乙炔浓度达到了一定的高度,油中乙炔浓度越高,逃逸的趋势越大,当逃逸速度与渗漏速度达到平衡状态,表现出来便是乙炔不再增长;③绝缘纸在不同温度下对各气体组分的吸附能力不一致,变压器在不同负荷下运行油温不一致,溶解在变压器油中的乙炔与隐藏在绝缘材料中的乙炔之间随着油温的关系而表现出相互平衡的波动亦属于正常情况。上述三点原因仅是一个初浅逻辑分析,乙炔的产生与运行机理需要进一步进行实证研究。

(3) 对于有载开关油渗漏问题,所掌握的资料、案例还非常有限,比如对控制负荷,增加有载开关动作次数的判断方法还未实践过,也没有掌握有载开关动作次数对本体乙炔的影响有什么样线性关系,这都需要进一步积累经验。

(4) 虽然有载开关油渗漏造成的变压器本体油中乙炔含量高对设备的运行并不带来安全隐患,但由于长期的有载开关油渗漏造成变压器本体油中乙炔含量过高,从而容易掩盖本体的其他故障。大部分故障在发展初期,乙炔的增长速度都比较缓慢,一般仅为零点几到几个 $\mu\text{l/l}$,有载开关油渗漏带来较高浓度的乙炔污染,很容易延误发现真实故障的最佳时期,带来较大的安全隐患。鉴于有载开关油渗漏给设备的监督工作带来的困难,建议在不影响供电的情况下,及时安排检修,处理有载开关油渗

漏,对本体油进行彻底的脱气处理,投入运行后进行2~3个周期的色谱跟踪检测(监督周期可根据实际情况进行自行安排,如每月一次),以观察检修的效果并积累处理后油色谱本底值。

6 结 论

探讨了变压器有载开关油渗漏诊断技术,提供了一些创新的判断方法,也通过一些实例验证了这些判断方法的有效性。充油电气设备的故障复杂多

(上接第57页)

分量所衰减速度就相对越快,但其差别并不明显。

3.2.2 三相非故障

表3分别给出了合闸于不同线路长度L的非故障电流高低频能量比值结果。

从表3能够看出三相的电流高低频能量比值都随着线路的延长而减小,但均远远大于50。同时高频的衰减速度也随着线路的增长而增快。相应地也就与2.1中的合闸于非故障相所描述的频率特征符合了,同理,当输电线路增长到350 km时,整个判据随着自振频率的锐减而失效了。相应的能量比值结果列表如表3所示。

表3 不同线路长度的合闸于非故障线路的三相高低频电流能量比

线路长度 /km	K_a	K_b	K_c
15	1 640	9 000	1 000
50	1 083	7 482	754
150	924	5 230	386
300	400	1 190	189

4 结 语

根据输电线路在合闸于故障相和非故障相时其电流或电压中所包含的自振荡频率类型和含量的不同,采用对各相电流进行高低频率带通数字滤波来得出高低频电流能量比值与设定的域值的大小关系来作为主要的故障判据,能更加明显地得出相应的频率特性结论,并能更好地得出合闸于故障相的具体情况。所进行的仿真实验也更加有力地证明了该判据的有效性。但该方法在线路超过350 km时就

变,任何一种故障诊断技术都有其自身的局限性,并有着各自的适用范围,方法选择不当,易导致判断失误。所以,在诊断故障的时候,一定要根据设备的实际情况,谨慎选择判断方法,注意用多种方法相互配合验证,方可提高故障诊断的准确性。

参考文献

[1] GB/T 7252-2001,变压器油中溶解气体的分析和判断导则[s].

(收稿日期:2012-02-15)

无效了,所以距离问题有待深究。

参考文献

[1] 胡巨.超高压输电线路暂态电流保护的研究[D].北京:华北电力大学,2004:1-3.

[2] 何世恩,岳恒宇,夏经德.继电保护技术的发展与展望[J].甘肃电力技术,2010,5(2):15-18.

[3] Xu,Qingshan,Lai L L,Chen Jingen, et al. Novel and Comprehensive Countermeasures for Single Terminal Fault Location of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(15):21-25.

[4] 段建东,罗四倍,张保会.超高速保护中合闸于故障线路的识别方法[J].中国电机工程学报,2007,27(10):78-84.

[5] Bo Z. Q. A New Non-communication Protection Technique for Transmission lines[J]. IEEE Trans. on Power Delivery,1998,13(4):1073-1078.

[6] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985:121.

[7] Y. Y. Hong, Y. Y. Chen. Placement of Power Quality Monitors Using Enhanced Genetic Algorithm and Wavelet Transform[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2008,23(5):461-465.

[8] 陈皓.超高压输电线路暂态电流保护的研究[D].重庆:重庆大学,2001:16-17.

[9] 方达意.基于暂态电流小波能量谱的超高压输电线路故障类型识别[D].长沙:湖南大学,2009:14.

[10] 张保会,尹项根.电力系统继电保护[M].北京:中国电力出版社,2005:26.

作者简介:

黄霞(1986),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护与控制。

(收稿日期:2012-04-26)