

基于时域谱线特征量的变压器油纸绝缘诊断

贺德华¹, 蔡金锭¹, 蔡 嘉²

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;

2. 国网福建省电力有限公司物资分公司, 福建 福州 350003)

摘要: 针对应用介电响应理论评估油纸绝缘老化状态存在的不足, 提出一种新的变压器油纸绝缘诊断方法。对变压器的回复电压微分谱线进行解谱, 分析时域微分子谱线的数量和弛豫时间常数比 K_r 与绝缘老化状态间的关系, 从而实现变压器油纸绝缘状态诊断。对多台变压器的测试数据进行统计和分析, 得出结论: 回复电压时域微分谱线的子谱线数随绝缘状态发生改变, 油纸绝缘老化越严重, 分解的子谱线数量越多; K_r 能准确判断绝缘油相对于绝缘纸的老化状态。

关键词: 变压器; 油纸绝缘; 时域微分解谱; 弛豫响应; 回复电压; 绝缘诊断

中图分类号: TM 855; TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.018

0 引言

电力变压器是电力系统中的关键设备之一, 其运行可靠性对整个电网的安全可靠运行具有十分重要的意义^[1]。油纸绝缘系统是电力变压器中最主要的绝缘, 因此对变压器的绝缘老化状态进行有效评估具有巨大的经济价值和社会意义^[2-3]。

回复电压法以时域介电响应理论为基础获取变压器油纸绝缘系统的老化状态等信息^[4-5]。文献[6-7]研究了不同老化程度的变压器对回复电压特征量的影响情况, 结果表明变压器的绝缘状态越差, 则回复电压极化谱的主时间常数越小; 文献[8-9]通过对油纸绝缘试样进行实验室加速老化试验, 发现回复电压初始斜率主要受老化时间影响; 文献[10]研究了绝缘纸聚合度对回复电压极化谱特征量的影响规律, 得出绝缘纸聚合度与主时间常数的函数关系式, 但其正确性需进一步深入研究。

基于回复电压的变压器绝缘诊断方法还存在一些不足: 只能通过比较相同型号变压器的特征量进行诊断, 但对于不同型号的变压器甚至同一变压器的不同测试接线方式得到的特征量都不相同, 难以对绝缘状态做出正确的诊断; 难以区分判断绝缘纸和绝缘油的老化状态, 只能对油纸绝缘做出整体判断, 从而难以指导电力企业的检修工作; 为了得到诊断变压器的特征量, 存在测试占用变压器的时间较长等问题。

针对应用介电响应理论评估油纸绝缘老化存在的不足, 本文提出一种新的诊断方法。对变压器的回复电压曲线进行微分解谱分析, 寻找出与绝缘

状态对应的 2 个特征量: 回复电压的时域微分子谱线的数量和弛豫时间常数比 K_r , 通过分析这 2 个特征量和绝缘老化状态间的内在联系和规律, 可对绝缘状态做出准确的诊断。通过解析多台变压器回复电压曲线的弛豫响应信息, 验证了本文所提方法的合理性和有效性。

1 回复电压曲线的绝缘诊断理论分析

在非均匀体系中, 特别是在低频变化的电场中的非均匀体系中, 界面极化对弛豫的贡献一般远大于偶极极化对弛豫的贡献, 界面极化的弛豫强度远大于偶极极化的弛豫强度, 因而弛豫机制大多源于界面极化^[11]。界面极化是指在非均匀介质系统中, 当 2 种介质的介电常数和电导率不同时, 在 2 种介质的界面上积聚电荷, 使得介质中的自由电荷不均匀分布, 因而产生宏观偶极矩的现象^[12-13]。根据 Maxwell-Wagner 界面极化概念的理论分析, 对于含有 m 个组成相的非均匀体系, 若满足式(1), 即所有弛豫机构的弛豫时间常数 $\tau_i = \varepsilon_i \rho_i$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 都不相等, 则体系将出现 $m - 1$ 个弛豫。虽然这是 Maxwell-Wagner 界面理论对平面层状多相体系得出的结论, 但 Hanai 等通过一系列的实验实例归纳出非均匀体系也具有相同的规律^[11]。

$$\rho_1 \varepsilon_1 \neq \rho_2 \varepsilon_2 \neq \dots \neq \rho_i \varepsilon_i \neq \dots \neq \rho_m \varepsilon_m \quad (1)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, m$; ρ_i 为电阻率; ε_i 为介电常数。

多相非均匀体系的介电弛豫可以用 $m - 1$ 个弛豫响应函数的累加来描述 m 相体系的介电弛豫响应。在随机弛豫过程中^[14], 各个弛豫行为遵循 Debye 弛豫响应, 油纸绝缘的回复电压响应函数可表示为:

$$u_r(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-t/\tau_i} \quad (2)$$

其中, A_i 为第 i 个弛豫机构在总弛豫中的贡献; τ_i 为弛豫响应时间常数; $n = m - 1$ 为弛豫叠加个数。多

收稿日期: 2016-06-21; 修回日期: 2017-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174117)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61174117)

相非均匀体系中的介电弛豫行为由体系材料、结构组成等决定,弛豫个数和各弛豫的贡献随着体系内的组成相数目、材料介电性、结构的不同而改变。

油纸绝缘系统是主要由纤维素、半纤维素、木质素和多种碳氢化合物构成的非均匀体系,由于绝缘系统中各物质的介电常数、电导率、结构、比重等各不相同,所以存在多种弛豫时间常数不同的弛豫响应。变压器在运行中受到热老化、电老化、机械力以及受潮等影响,其绝缘系统逐步老化,纤维素、半纤维素等大分子发生降解,聚合度降低,老化产物也随之增多,绝缘系统中的物质组成、比例和结构等都发生复杂的改变,绝缘电介质中的各介电弛豫行为也将发生改变。上述改变为电气测量诊断绝缘老化提供了依据。

在回复电压测量阶段,介电弛豫响应共同作用形成的回复电压变化相对缓慢,界面极化远大于其他机制的极化,回复电压曲线中包含了绝缘介质材料丰富的弛豫响应信息,可由回复电压曲线解析出各种弛豫响应信息,找出各弛豫响应信息与绝缘老化相对应的规律,就可为变压器绝缘老化状态提供一种诊断途径。

2 回复电压曲线微分解谱法

理论上,电力变压器油纸绝缘系统中的弛豫项较多,运用数学计算直接求取各弛豫响应函数比较困难,特别是求取比重较小的弛豫响应。因此,本文采用分解解析的方法来求取贡献较大的弛豫项。利用不同时间常数的弛豫项对曲线末端贡献不同的原理,在末端开始逐一分解。本文采用的回复电压曲线时域微分解谱法既可准确求出主要的各弛豫响应函数,又可减少在分解过程中时间常数不同的弛豫项之间的相互影响。

2.1 回复电压时域微分解谱法的原理分析

对回复电压式(2)进行微分处理并乘以对应的时间 t ,得到回复电压时域微分谱线函数如式(3)所示。

$$u_d(t) = -t \frac{du_r}{dt} = \sum_{j=1}^n A_j \frac{t}{\tau_j} e^{-t/\tau_j} = \sum_{j=1}^n \phi_j(t) \quad (3)$$

定义 $\phi_j(t)$ 为时域微分子谱线,时域微分谱线是由多条子谱线叠加组成的曲线。现以时间常数相差3倍的2条子谱线 $\phi_1(t) = 30te^{-t/3.33}$ 和 $\phi_2(t) = 10te^{-t/10}$ 为例进行对比分析,2条子谱线的关系见图1。当在曲线末端 $t=30$ s时, $\phi_1(30) = 0.73\% \phi_2(30)$,说明曲线 $\phi_1(t)$ 末端对两子谱线之和的比重非常小,因此两子谱线末端叠加的值约等于时间常数大的子谱线的值。同理对于由多条子谱线叠加的谱线,

谱线末端的值约等于时间常数最大的子谱线对应的值。因此,可从回复电压时域微分谱线末端开始逐一分解求出各子谱线。

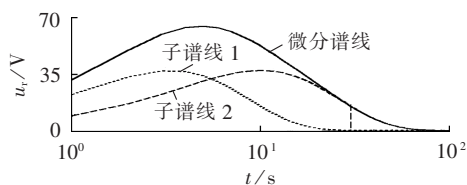


图1 时域微分谱线及其2条子谱线

Fig.1 Time-domain differential spectral curve and its two sub-curves

2.2 回复电压曲线微分解谱法

根据微分解谱法的原理分析,解谱过程的具体步骤如下。

a. 将测试获取的回复电压曲线 $u_r(t)$ 进行滤波消除干扰后,进行微分处理再乘以对应的时间 t ,得到回复电压时域微分谱线 $u_d(t)$ 。

b. 由于时间常数小的子谱线在末端对微分谱线的贡献值非常小,可忽略不计。可从回复电压时域微分谱线末端取2个点 $A(t_1, u_d(t_1))$ 、 $B(t_2, u_d(t_2))$,则有:

$$\begin{cases} u_d(t_1) - A_1 \frac{t_1}{\tau_1} e^{-t_1/\tau_1} = 0 \\ u_d(t_2) - A_1 \frac{t_2}{\tau_1} e^{-t_2/\tau_1} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

求解式(4)即可求出回复电压时域微分谱线中时间常数最大的子谱线 $u_{d1}(t)$ 的参数 A_1 和 τ_1 。

c. 将回复电压微分谱线 $u_d(t)$ 减去步骤b求出的子谱线 $u_{d1}(t)$ 得到剩余谱线 $u_{d10}(t)$,用剩余谱线代替回复电压时域微分谱线 $u_d(t)$,如图2所示。

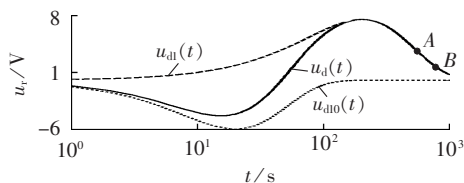


图2 回复电压微分谱线解谱示意图

Fig.2 Schematic diagram of recovery voltage differential spectral curve unfolding

d. 若剩余谱线峰值小于设定的阈值,则停止分解;否则重复步骤b和c,可依次解析出各子谱线。解谱过程中可以依次求解出与充放电时间对应的 (A_1, τ_1) 、 (A_2, τ_2) 、 $\dots$ 、 (A_n, τ_n) ,其中 A_j ($j=1, 2, \dots, n$)为与充电、放电时间有关的量。

3 变压器绝缘老化状态评估分析

为了研究不同绝缘老化情况下回复电压时域微分谱线的变化规律,现对50台不同规格型号变压器的回复电压进行微分解谱分析,解谱过程中,本文

设定的终止分解条件是:阈值为回复电压时域微分谱线峰值的 1%。

3.1 子谱线数与绝缘老化状态的规律

以变压器绝缘油中的糠醛含量作为绝缘老化程度的判断标准,对 50 台不同绝缘状态变压器的回复电压解谱得出的子谱线数与绝缘状态对应的关系如表 1 所示。

表 1 子谱线数与绝缘状态的对应关系

Table 1 Relationship between sub-curve quantity and insulation state

绝缘状态	糠醛含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	变压器台数	子谱线数/条
绝缘良好	≤ 0.21	13	6
绝缘水平一般	$0.25 \sim 0.81$	26	7
绝缘老化严重	≥ 1.02	11	8

由于篇幅有限,现以其中最具代表性的 9 台变压器为例,对其诊断过程进行具体阐述。变压器的基本信息如表 2 所示。

表 2 变压器的基本信息

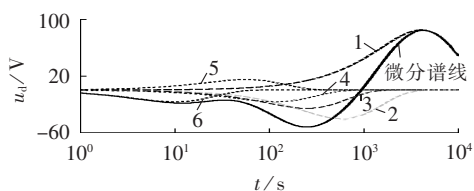
Table 2 Basic information of transformers

变压器	型号	容量/ ($\text{kV} \cdot \text{A}$)	运行年限	糠醛含量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
T ₁	SFSE10-220	180 000	新投入	0.081
T ₂	SZ10-110	50 000	5 a	0.182
T ₃	SFPS-220	180 000	8 a(换油后)	0.004
T ₄	SFPS-220	180 000	8 a(换油前)	0.360
T ₅	SFL-110	50 000	14 a	0.530
T ₆	SFP9-220	240 000	16 a(检修后)	0.016
T ₇	SFP9-220	240 000	16 a(检修前)	1.892
T ₈	SF08-110	31 500	已退役	4.127
T ₉	SFZ-110	31 500	已退役	3.221

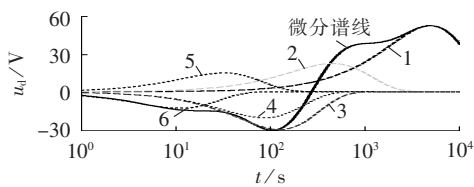
T₁ 和 T₂ 都是新投入运行不久的变压器,两者的整体绝缘水平状态良好,T₃ 为检修更换绝缘油后的变压器,T₆ 为更换了绕组和油纸绝缘的变压器,这 4 台变压器油中的糠醛含量都比较低,绝缘水平整体良好。对这 4 台变压器的回复电压曲线进行微分解谱,微分谱线和得到的子谱线如图 3 所示(4 台变压器的时域微分谱线都可以分解为 6 条子谱线,图中数字 1、2、…、6 代表 6 条子谱线)。

变压器 T₄ 和 T₅ 的糠醛含量低于 0.81 mg/L ,绝缘水平整体一般,两者的时域微分谱线和分解出的子谱线如图 4 所示(图中数字 1、2、…、7 代表 7 条子谱线)。可以看出,这 2 台变压器的时域微分谱线可以分解的子谱线数为 7 条。T₄ 和 T₃ 为同一台变压器换油前后的不同状态,更换绝缘油前分解的子谱线数要多于更换绝缘油之后的子谱线数 6 条。

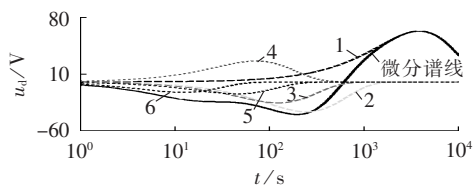
T₇、T₈、T₉ 为绝缘老化严重的变压器,内部糠醛含量超过 1.02 mg/L ,3 台变压器的时域微分谱线和分解出的子谱线如图 5 所示(三者的时域微分谱线都可以分解为 8 条子谱线,图中数字 1、2、…、8 代



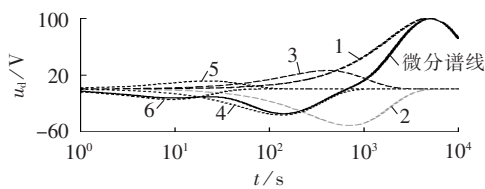
(a) 变压器 T₁



(b) 变压器 T₂



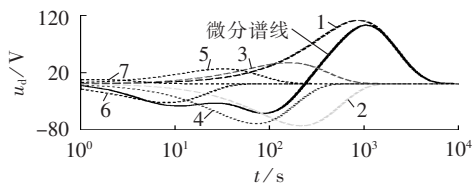
(c) 变压器 T₃



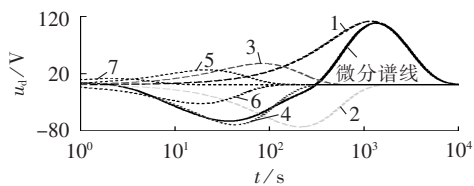
(d) 变压器 T₆

图 3 绝缘状态良好的变压器的回复电压微分谱线和子谱线

Fig.3 Recovery voltage differential spectral curve and sub-curves for transformers with good insulation



(a) 变压器 T₄



(b) 变压器 T₅

图 4 绝缘状态一般的变压器的回复电压微分谱线和子谱线

Fig.4 Recovery voltage differential spectral curve and sub-curves for transformers with general insulation

表 8 条子谱线)。T₇ 和 T₆ 为同一台变压器在检修前后的不同状态,因设计原因,绕组和绝缘老化严重,检修前时域微分谱线分解的子谱线比检修后分解的子谱线数量多。T₈、T₉ 为绝缘老化严重并已经

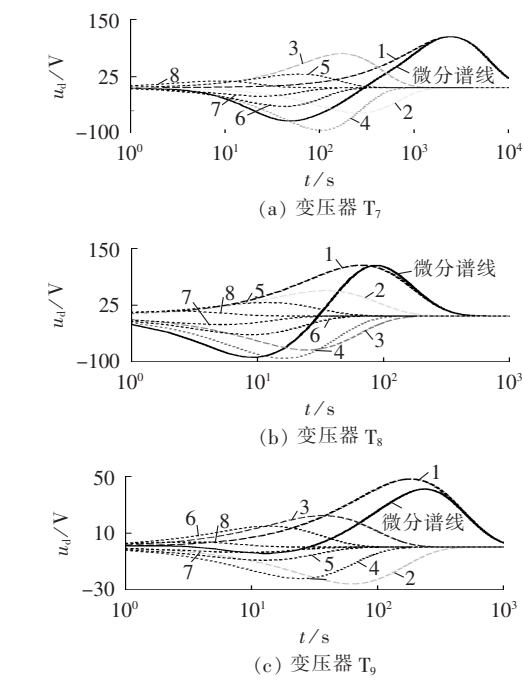


图 5 绝缘老化严重的变压器的回复电压微分谱线和子谱线

Fig.5 Recovery voltage differential spectral curve and sub-curves for transformers with seriously-aged insulation

退出运行的变压器。

在老化过程中,绝缘纸中纤维素、半纤维素等大分子发生降解,分子量减小,聚合度降低,并产生各种老化产物,绝缘材料中各物质比例发生改变。此外,产生的老化产物中水、酸、醇、酮等物质为强极性分子或者介电常数大的物质,对绝缘的介电弛豫有非常大的影响,其会使一些弛豫贡献明显增大,需要更多的弛豫项来反映绝缘的弛豫过程,因此分解出的子谱线也随之增多。综合上述分析以及表 1 中对 50 台变压器回复电压子谱线的统计表明,利用子谱线的数量可准确判断油纸绝缘整体状况,且对变压器的诊断分析具有普遍性,不受变压器规格等参数的影响。绝缘状态良好的变压器,其回复电压曲线的时域微分谱线可分解为 6 条子谱线;绝缘水平一般的变压器,其子谱线数为 7 条;而绝缘老化严重的变压器,其回复电压曲线的时域微分谱线可分解为 8 条子谱线;表明子谱线数越多,绝缘老化越严重。

3.2 时间常数比 K_τ 与老化状态的规律

变压器绝缘老化主要分为绝缘纸老化和绝缘油劣化。绝缘纸老化主要受热、电等因素影响;而绝缘油相对稳定,其老化速度一般慢于绝缘纸的老化,绝缘油劣化主要受受潮、污染等因素影响。绝缘纸老化到一定程度,变压器只能退出运行,而针对绝缘油劣化,一般采取虑油、换油等检修措施。为了给电力变压器的检修提供决策参考,需要寻找能反映

相对老化状态的特征量,判断绝缘纸和绝缘油的绝缘状态,并做出相应的检修和预防措施。在油纸绝缘系统中,大时间常数的弛豫响应主要反映固体绝缘的老化状态,小时间常数的弛豫响应主要反映油的老化状态。通过解谱后发现:相同规格而绝缘状态不同的变压器的各子谱线的时间常数差别较大,而绝缘油各子谱线的时间常数变化相对较小,且老化越严重,最大时间常数和最小时间常数都减小。因此,本文考虑采用时间常数比 K_τ 来反映油和纸的相对老化状态:

$$K_\tau = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\min}} \times 10^{-2} \tag{5}$$

其中, $\tau_{\max}$ 为微分解谱得到的子谱线中最大的时间常数; $\tau_{\min}$ 为子谱线中最小的时间常数。微分解谱得出的时间常数比 K_τ 与绝缘状态对应的关系如表 3 所示。

表 3 时间常数比 K_τ 与绝缘状态的对应关系		
Table 3 Relationship between K_τ and insulation state		
绝缘状态	变压器台数	K_τ
绝缘油劣化异常	6	[6.523,9.281]
油纸老化正常	31	[3.136,5.818]
绝缘纸老化异常	13	[0.214,2.963]

从表 3 可看出,当绝缘油劣化状态比绝缘纸老化状态严重时, $K_\tau \in [6.523, 9.281]$; 当油纸绝缘老化程度相对正常时, $K_\tau \in [3.136, 5.818]$; 当绝缘纸的老化程度相对绝缘油劣化严重时, $K_\tau \in [0.214, 2.963]$ 。当绝缘油和绝缘纸老化时,表征绝缘油和绝缘纸老化状态的时间常数的变化速度不同步, K_τ 较大意味着 $\tau_{\min}$ 减小相对明显,表征了绝缘油的劣化程度相对绝缘纸老化程度严重; K_τ 较小意味着 $\tau_{\max}$ 减小相对明显,表征了绝缘纸老化程度相对绝缘油劣化程度严重; $K_\tau \in [3.136, 5.818]$ 时,意味着油和纸的老化程度保持在一个相对正常的老化速度范围内,符合变压器正常运行时的油纸绝缘相对老化状态的规律。

对表 2 中的 9 台典型变压器的回复电压曲线进行微分解谱得到的各弛豫响应参数和诊断结果如表 4 所示。

T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_5 和 T_6 为绝缘状态正常或检修更换油纸绝缘的变压器,它们的时间常数比 K_τ 在 [3.136, 5.818] 范围内,表明油和纸的相对老化状态在一个比较正常的范围内。 T_4 和 T_3 是同一台变压器换油前后的不同状态,换油前油中的水含量达到 6.6 mg/L,远高于换油后的水含量 0.01 mg/L。由分析结果可知,换油前时间常数比 K_τ 的值为 8.163,表明相对绝缘纸老化程度,绝缘油劣化比较严重;换油后子谱线数量减少,绝缘状态整体得到改善,时间常数比 K_τ 减小,可推断出换油后的绝缘油状态要优于换油前的

表 4 弛豫响应参数和绝缘诊断结果
Table 4 Relaxation response parameters and insulation diagnosis results

变压器	实际运行情况		分析诊断结果									
	运行年限	绝缘状态	回复电压子谱线时间常数/s								K_{τ}	诊断结果
			τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	τ_8		
T_1	刚投入	良好	4 101	602.5	254.8	119.3	57.94	10.28	—	—	3.989	正常
T_2	5 a	较好	4 894	452.6	114.8	86.57	41.73	11.05	—	—	4.429	正常
T_3	8 a(换油后)	较好	3 846	246.5	123.4	71.45	45.20	11.38	—	—	3.380	正常
T_4	8 a(换油前)	一般	874.2	214.7	161.5	71.76	32.01	8.335	1.071	—	8.163	油劣化异常
T_5	14 a	一般	1 207	217.3	86.34	44.57	23.13	19.33	2.242	—	5.388	正常
T_6	16 a(检修后)	较好	4 856	702.9	416.7	137.4	21.31	9.329	—	—	5.205	正常
T_7	16 a(检修前)	绕组设计缺陷	2 409	260.7	173.4	104.5	62.13	42.68	24.78	8.728	2.759	纸老化严重
T_8	已退役	老化严重	67.26	35.23	24.93	16.60	12.98	9.094	5.149	2.181	0.308	纸老化严重
T_9	已退役	老化严重	180.9	61.95	37.25	24.35	14.16	12.57	9.095	3.148	0.574	纸老化严重

绝缘油状态,与实际情况相符合。

T_7 、 T_8 、 T_9 的回复电压曲线解谱分解得到的子谱线比正常运行变压器的回复电压曲线解谱得到的子谱线多,时间常数比 K_{τ} 非常小,可推断出这 3 台变压器的绝缘整体状态老化严重,且绝缘纸老化相对更严重。 T_7 和 T_6 为同一台变压器在检修前后的不同状态,通过微分解谱可知, T_7 的回复电压曲线解谱出的子谱线比 T_6 的回复电压曲线解谱得到的子谱线多,时间常数比 K_{τ} 为 2.759,比较小,推断出检修前绝缘老化严重,特别是绝缘纸的老化更严重。实际情况是变压器 T_7 存在设计缺陷,绝缘纸严重老化,需更换绕组和油纸绝缘。 T_8 、 T_9 这 2 台变压器由于老化严重且退出运行,分析结果与实际情况符合。

由以上分析可知,由于绝缘纸和绝缘油老化速度不同步,表征绝缘纸和绝缘油老化的大时间常数 $\tau_{\max}$ 和小时间常数 $\tau_{\min}$ 的变化率也不同步,通过时间常数比 K_{τ} 可反映油纸绝缘老化的不同步状态。结合表 3 中 50 台变压器子谱线时间常数比 K_{τ} 的统计表明可知:时间常数比 K_{τ} 可以作为判断绝缘油和绝缘纸相对老化状态的一个特征量,具有较高的准确性。

4 结论

本文从电介质弛豫理论分析出发,提出了一种对回复电压曲线进行微分解谱分析的新方法,分解出不同弛豫响应时间常数的子谱线,并对多台变压器测试数据进行统计和分析,得出如下结论。

a. 油纸绝缘老化越严重,回复电压曲线微分解谱得到的子谱线数量越多。绝缘状态良好的变压器的回复电压曲线可以分解出 6 条子谱线,绝缘状态一般的变压器的回复电压曲线可以分解出 7 条子谱线,绝缘老化严重的变压器的回复电压曲线可以分解出 8 条子谱线。

b. 特征量时间常数比 K_{τ} 能反映油和纸的绝缘

老化相对状态。当绝缘油相对绝缘纸老化严重时, $K_{\tau} \in [6.523, 9.281]$;当绝缘纸老化相对比较严重时, $K_{\tau} \in [0.214, 2.963]$;当绝缘油和绝缘纸老化在一个相对正常状态时, $K_{\tau} \in [3.136, 5.818]$ 。

c. 本文提出的回复电压曲线时域微分解谱分析的方法能对变压器的整体状态进行判断,并能区分油老化与纸老化,且不受变压器结构、规格的影响,测试占用变压器时间短,是一种简单、有效的绝缘老化诊断新方法。

参考文献:

[1] 陈伟根,杜杰,凌云,等. 基于能量-小波矩特征分析的油纸绝缘气隙放电过程划分[J]. 仪器仪表学报,2013,35(5):1062-1069.
CHEN Weigen,DU Jie,LING Yun,et al. Air-gap discharge process partition in oil-paper insulation based on energy-wavelet moment feature analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2013,35(5):1062-1069.

[2] 郑海平,孙才新,李俭,等. 诊断电力变压器故障的一种灰色关联度分析模式及方法[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):106-109.
ZHENG Haiping,SUN Caixin,LI Jian,et al. A model and method of degree of grey incidence analysis on transformer fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(10):106-109.

[3] 郑君亮,江修波,蔡金铨. 变压器油纸绝缘等效电路参数辨识及绝缘状态对参数的影响分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):168-172.
ZHENG Junliang,JIANG Xiubo,CAI Jinding. Parameter identification for equivalent circuit of transformer oil-paper insulation and effect of insulation condition on parameters[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8):168-172.

[4] 张涛. 基于回复电压特征量的变压器油纸绝缘状态诊断研究[D]. 福州:福州大学,2010.
ZHANG Tao. Research on diagnosis of oil-paper insulation condition in transformer based on return voltage characteristic quantities[D]. Fuzhou:Fuzhou University,2010.

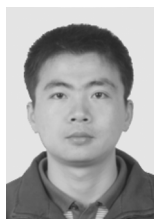
[5] 李军浩,司文荣,姚秀,等. 油纸绝缘变压器老化状态评估的极化/去极化电流技术研究[J]. 仪器仪表学报,2009,30(12):2605-2611.
LI Junhao,SI Wenrong,YAO Xiu,et al. Study of polarization and depolarization current measurements for assessment of aging state of oil-paper insulated transformers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2009,30(12):2605-2611.

- [6] OSVATH P,ZAHN H. Polarisation spectrum analysis for diagnosis of oil/paper insulation systems[C]//Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Pittsburgh,PA,USA:IEEE,1994:155-161.
- [7] SAHA T K,YAO Z T,LE T T,et al. Investigation of interfacial polarization spectra parameters for accelerated aged oil-paper insulation and its correlation with molecular weights and furan compounds[J]. Large High Voltage Electric System,2000,15(201):1-6.
- [8] BASHIR N,AHMAD H. Diagnosis of XLPE cable using the recovery voltage measurement method[C]//2007 Student Conference on Research and Development. Selangor,Malaysia:IEEE,2007:1-4.
- [9] 廖瑞金,孙会刚,袁泉,等. 采用回复电压法分析油纸绝缘老化特征量[J]. 高电压技术,2011,37(1):136-142.
LIAO Ruijin,SUN Huigang,YUAN Quan,et al. Analysis of oil-paper insulation aging characteristics using recovery voltage method[J]. High Voltage Engineering,2011,37(1):136-142.
- [10] ASCHENBRENNER V,UEIK T. The possibilities and limits of estimation of ageing degree of paper-oil insulation in power transformers by recovery voltage method[C]//Eighth International Conference on Dielectric Materials,Measurements and Applications,2000. Edinburgh,UK:IEEE,2000:335-340.
- [11] 赵孔双. 介电谱方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008:6.
- [12] 黄云程,蔡金铨,卢晋怡. 油纸绝缘变压器新型混合极化电路模型及其参数计算[J]. 电工技术学报,2016,31(17):170-177.
HUANG Yuncheng,CAI Jinding,LU Jinyi. New mixed polarization

circuit model and parameters identification of oil-paper insulation transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(17):170-177.

- [13] 李功新,江修波,蔡金铨,等. 采用微分去极化电流法解析变压器油纸绝缘的介质响应函数[J]. 高电压技术,2012,38(8):1930-1936.
LI Gongxin,JIANG Xiubo,CAI Jinding,et al. Dielectric response function for transformer oil-paper insulation solved by the method of differential depolarization current[J]. High Voltage Engineering,2012,38(8):1930-1936.
- [14] 李景德,曹万强,李向前,等. 时域介电谱方法及其应用[J]. 物理学报,1996,45(7):1225-1231.
LI Jingde,CAO Wanqiang,LI Xiangqian,et al. Time domain dielectric spectroscopy method and its application[J]. Acta Physica Sinica,1996,45(7):1225-1231.

作者简介:



贺德华

贺德华(1983—),男,湖南韶山人,博士研究生,主要研究方向为电气设备故障诊断(E-mail:153367542@qq.com);

蔡金铨(1954—),男,福建晋江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统故障诊断(E-mail:cjd@fzu.edu.cn);

蔡嘉(1983—),男,福建晋江人,工程师,硕士,主要研究方向为电气设备应用和管理(E-mail:304727268@qq.com)。

Transformer oil-paper insulation diagnosis based on time-domain spectral curve characteristic parameters

HE Dehua¹,CAI Jinding¹,CAI Jia²

(1. College of Electrical Engineering and Automation,Fuzhou University,Fuzhou 350108,China;

2. State Grid Fujian Electric Power Materials Company,Fuzhou 350003,China)

Abstract: Aiming at the insufficiency of oil-paper insulation aging state evaluation by the dielectric response theory,a method for diagnosing the oil-paper insulation of transformer is proposed. The differential spectral curve of transformer recovery voltage is unfolded,and the relationship between sub-curve quantity and insulation aging state as well as the relationship between relaxation time constant ratio K_τ and insulation aging state are analyzed for the diagnosis of transformer oil-paper insulation aging state. The test data of multiple transformers are analyzed and conclusions are obtained:the time-domain sub-curve quantity of recovery voltage differential spectral curve changes according to the oil-paper insulation state,the more serious the oil-paper insulation aging state is,the bigger the sub-curve quantity is;and K_τ can be used to diagnose the relative aging state of insulation oil to insulation paper.

Key words: power transformers; oil-paper insulation; time-domain differential unfolding; relaxation response; recovery voltage; insulation diagnosis