

基于油纸绝缘变压器回复电压法的半峰周期极化谱分析

蔡超¹ 刘庆珍¹ 范映² 高浩¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108;
2. 国网福建省电力有限公司检修分公司, 福州 350013)

摘要 传统的回复电压特征量无法反映回复电压中后期的极化特性, 基于此, 本文提出一种能够有效反映回复电压法中后期弛豫特性的新型回复电压法特征量——半峰周期稳定时间。首先建立拓展 Debye 等效仿真模型, 绘制回复电压半峰周期极化谱, 从中提取特征量; 然后通过改变变压器等效模型电路参数分析对半峰周期极化谱的影响规律; 最后通过多台变压器实测数据验证本文推论。结果表明, 半峰周期稳定时间会随着油纸绝缘状态老化而延长, 其主要受到中、大时间常数支路的影响, 且对于不同规格型号的变压器具有普适性, 能够作为后续绝缘诊断的良好特征量。

关键词: 变压器; 油纸绝缘; 回复电压特征量; 半峰周期稳定时间

Half-peak periodic polarization spectrum analysis of oil-paper insulated transformer based on recovery voltage method

Cai Chao¹ Liu Qingzhen¹ Fan Ying² Gao Hao¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108;
2. Fujian Electric Power Co., Ltd, Maintenance Branch Company, Fuzhou 350013)

Abstract The traditional characteristic of recovery voltage can not reflect the polarization characteristics of recovery voltage in the middle and late stages. Based on this, a new characteristic of RVM, half-peak periodic stability time, which can effectively reflect the relaxation characteristics in the middle and late stages of RVM, is proposed in this paper. Firstly, an extended Debye equivalent simulation model is established to draw the half-peak periodic polarization spectrum of recovery voltage, from which the half-peak periodic polarization spectrum of recovery voltage is extracted. Then, the influence of circuit parameters of transformer equivalent model on half-peak periodic polarization spectrum is discussed. Finally, the inference is verified by the measured data of several transformers. The results show that the half-peak period stability time increases with the aging of oil-paper insulation, which is mainly affected by medium and large time constant branches. It is universal for transformers of different specifications and can be used as a good feature for subsequent insulation diagnosis.

Keywords: transformer; oil-paper insulation; recovery voltage method (RVM) feature; half peak period stability time

油浸式变压器绝缘系统的状态是决定变压器运行性能和使用寿命的重要因素, 因此, 对变压器油纸绝缘状态的准确诊断对于变压器的检修具有现实的工程意义^[1-3]。

回复电压法 (recovery voltage method, RVM)

是一种基于时域介电响应技术的、简便无损的绝缘诊断方法, 已被广泛应用到变电站现场油纸绝缘老化状态的评估中。利用 RVM 进行油纸绝缘诊断时, 首先对变压器进行实地测试和采集数据, 并研究等效电路实现弛豫仿真建模; 其次, 建立时域介电谱,

从中提取时域特征量，探索特征量与绝缘劣化程度间的内在联系；最后，将时域特征量作为评估判据进行老化状态诊断。其中，提取合适的特征量是关键内容之一，近几年，业内相关人士在这方面积累了很多研究成果。文献[4]仿真分析了不同绝缘状态下回复电压极化谱的变化规律，但缺少对实际运行变压器所进行的实验验证。文献[5]提出可将半峰值周期作为评估油纸绝缘状态的 RVM 新特征量，但对其变化规律未作深入分析。文献[6]基于等效电路分析各时间常数段 RVM 特征量的特性，但是忽略了变压器结构对特征量的影响。这些研究都证明回复电压法能够合理评估变压器绝缘老化的状况，但对于 RVM 特征量的提取与分析仍有待进一步探索。

鉴于现有研究的不足，本文基于 RVM 原理，建立拓展 Debye 等效电路进行弛豫仿真，并提取半峰周期 $t_{1/2}$ 和 RVM 新特征量——半峰周期稳定时间 t_s ，来分析绝缘状态变化对于 $t_{1/2}$ 和 t_s 变化规律的影响，最后利用现场 RVM 实测数据加以验证。实验结果证明， $t_{1/2}$ 和 t_s 能够作为利用 RVM 进行油纸绝缘老化诊断的有效特征量，这为后续综合诊断提供了新思路。

1 RVM 测量原理及等效电路模型

1.1 RVM 测量原理

回复电压测量法的单次测量过程是在先利用外加直流电压使变压器绝缘内部发生极化/去极化响应后，再开路测量回复电压。根据其测量原理，可将 RVM 单次测量周期分为 4 个阶段，即充电、放电、开路测量以及松弛过程。RVM 单次测量曲线如图 1 所示，可以从曲线前端部分提取初始斜率 S_r 、峰值时间 t_{peak} 作为 RVM 老化特征量^[7-8]。

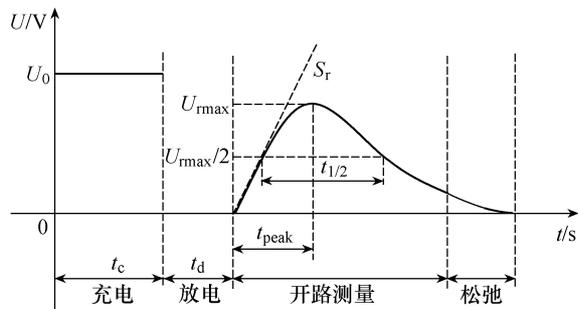


图 1 RVM 单次测量曲线

改变测量周期的充电时间 t_c ，同时提取每个周期的回复电压最大值 U_{rmax} ，重复多次，可绘制回复电压极化谱，从中提取 U_{rmax} 及主时间常数 t_{dcom} 作

为老化判据。然而，上述传统的回复电压特征量仅能反映 RVM 的前半段过程，而忽略了后半段的慢弛豫响应。

1.2 等效电路模型

油浸式变压器的油纸绝缘系统主要由纸板、油隙撑条等构成，其内部结构十分复杂。拓展 Debye 等效电路是目前最受认可的电路模型，它能够准确反映 RVM 测量中的弛豫过程，如图 2 所示。其中，极化支路等效由 n 条 C_{pi} 与 R_{pi} 的串联支路并联形成，用于模拟外加电场作用前后过程绝缘系统内部电介质的复合极化/去极化反应。另外，由绝缘电容 C_g 和绝缘电阻 R_g 构成几何支路， C_g 反映变压器介质基本特性，而 R_g 反映变压器电导情况，随绝缘劣化程度的积累，几何支路也会发生变化，但幅度较小。

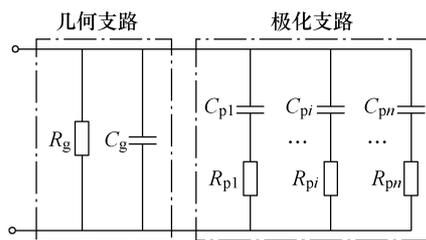


图 2 拓展 Debye 等效电路模型

2 RVM 半峰周期极化谱的提取

如图 1 所示，半峰周期 $t_{1/2}$ 是指 RVM 开路测量时，回复电压上升到半峰值大小开始直至重新下降到半峰值的时间段，即大于 $U_{rmax}/2$ 的时间区间。半峰周期 $t_{1/2}$ 能够表征 RVM 整体开路测量的继续去极化过程速率，弥补了传统 RVM 特征量携带信息中缺少对 RVM 后期描述的缺陷。

为更加深入分析半峰周期 $t_{1/2}$ 与油纸绝缘老化状态变化之间的关系，引出新特征量——半峰周期稳定时间 t_s 。本文借助文献[9]提供的一台变压器 T1 检修前后两种状态下的拓展 Debye 模型电路参数建立仿真模型，并进行回复电压法测试。变压器 T1 检修前后的等效电路参数见表 1。

仿真时，若保持充电电压 U_0 为 2000V，充放电时间比为 2:1，改变每个测量周期的充电时间 t_c ，提取每次测量过程中的半峰周期 $t_{1/2}$ ，则可绘制半峰周期极化谱，如图 3 所示。分析图 3 可知，半峰周期 $t_{1/2}$ 检修后的数值相比检修前在整个测量过程中均明显更大，这是因为变压器检修时进行更换绕组、滤油等处理，使其绝缘性能大幅提升。同时，由表 1 可见，检修后各支路极化电阻增大，极化电容

减小, 因此整体极化强度要更小, 极化速率更慢, 半峰周期 $t_{1/2}$ 更长。

表 1 变压器 T1 检修前后的等效电路参数

项目	型号	容量/MVA	电压等级	投运时间	
T1	SFP9-240/220	240	220kV	1993-09	
极化支路	检修前		检修后		
	R_{pi}	C_{pi}	R_{pi}	C_{pi}	
	1	0.1909	0.1591	0.2334	0.1023
	2	0.2518	0.3203	0.6853	0.1186
	3	0.7969	0.4175	1.4360	0.2909
	4	3.8420	1.1080	8.8380	0.5615
5	14.9900	6.1150	62.8300	1.0630	
6	14.1900	46.9500	48.7100	19.0200	
几何支路	R_g	C_g	R_g	C_g	
	9.009	30.690	21.130	35.090	

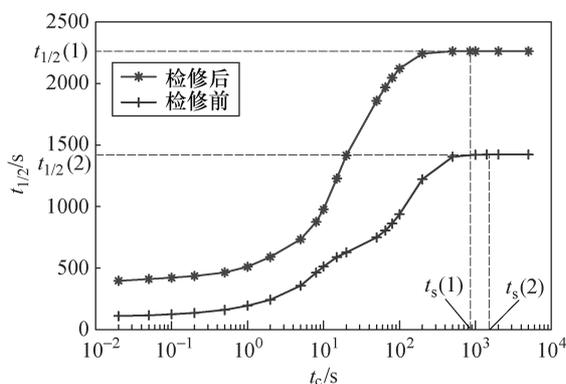


图 3 变压器 T1 半峰周期极化谱

观察变压器 T1 检修前后的半峰周期极化谱曲线的共同趋势可知: 随着充电时间 t_c 值的增加, 半峰周期曲线在短充电时间段 ($t_c < 10s$) 缓慢延长; 然后随着充电时间增加, 延长速率迅速加快; 最后曲线在长充电时间段 ($t_c > 100s$) 后开始逐渐趋于稳定。基于此, 本文提取使半峰周期首次达到稳定值的充电时间——半峰周期稳定时间 t_s 作为新 RVM 特征量。根据电介质原理可知, 由于变压器绝缘系统的老化产物增多, 将导致其内部极化现象达到饱和状态所需的充电时间更长, 因此绝缘老化越严重, 半峰周期稳定时间 t_s 值就越大。在实际情况下, 变压器 T1 检修前的 $t_s(2)=1413s$ 值远大于检修后的 $t_s(1)=848s$ 值, 证明了本文推论的正确性。

3 半峰周期极化谱的分析

现有研究表明, 等效电路模型的参数发生变化反映了油纸绝缘系统老化状态的变化。由前文第 1 节叙述可知, 变压器老化会导致半峰周期极化谱发

生相应变化。因此, 本文通过一台变压器 T2 低压侧绕组等效电路参数进行仿真实验, 每次实验仅改变其中一个电路参数, 控制其他参数不变, 从而研究改变等效电路参数对半峰周期极化谱的影响。变压器 T2 基本信息见表 2。

表 2 变压器 T2 基本信息

型号	容量/MVA	制造厂家	绝缘状况	含水率/%
SFL-50000/110	50	西安变压器厂	绝缘较好	1.6

3.1 几何支路对半峰周期极化谱的影响

变压器制造厂家、型号、绝缘等级等多样性决定了不同变压器存在不同的绝缘结构和规格, 也先天性地决定了拓展 Debye 模型的几何支路的参数大小。仿真实验时仅改变几何电容或几何电阻, 用以验证半峰周期 $t_{1/2}$ 和半峰周期稳定时间 t_s 的普适性。改变 R_g 和 C_g 对绘制半峰周期极化谱的影响分别如图 4、图 5 所示。

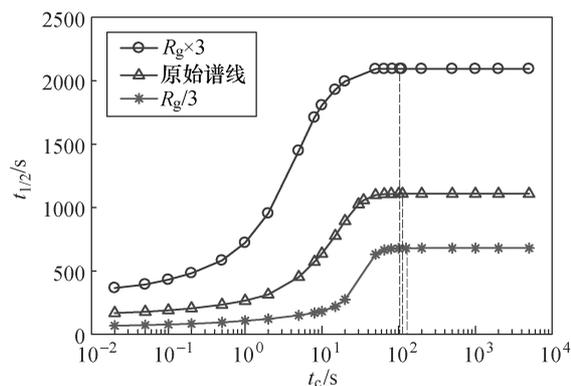


图 4 改变 R_g 对半峰周期极化谱的影响

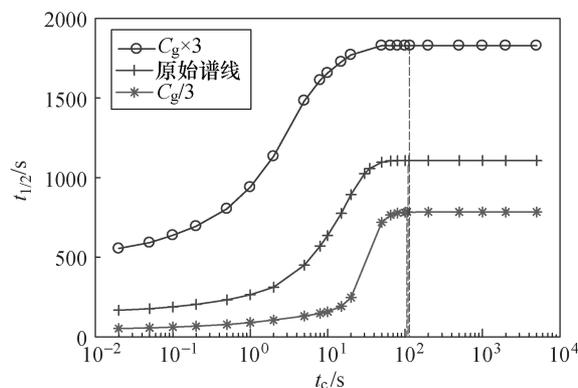


图 5 改变 C_g 对半峰周期极化谱的影响

分析图 4 可知, 当 R_g 改变时, 半峰周期 $t_{1/2}$ 与 R_g 的变化规律呈现良好的一致性。但随着 R_g 变化,

半峰周期稳定时间 t_s 变化较小。

同理，分析图 5 可知，随着 C_g 不断增大，半峰周期 $t_{1/2}$ 也不断增大，而半峰周期稳定时间 t_s 却保持较为稳定的状态。因此，当拓展到不同绝缘规格的变压器时，不能仅仅依据半峰周期 $t_{1/2}$ 来判断变压器的绝缘状况，半峰周期稳定时间具有较好的普适性。

3.2 极化支路参数对半峰周期极化谱的影响

拓展 Debye 模型的极化支路反应了变压器油纸绝缘的极化特性。当绝缘发生老化时，各极化支路中的极化电阻 R_p 减小， C_p 增大，整体的时间常数减小，同时绝缘老化会导致极化支路增多。

保持其他参数不变，将所有极化支路中的电阻乘以固定常数，绘制半峰周期极化谱，如图 6 所示。

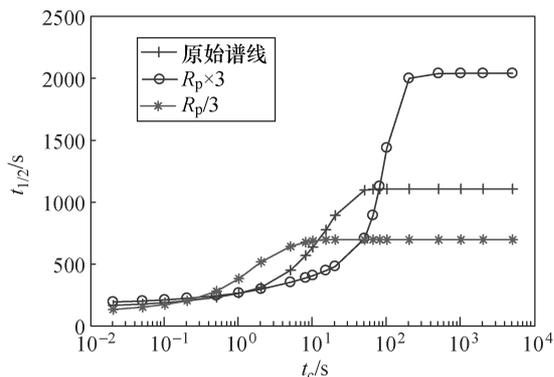


图 6 极化电阻对半峰周期极化谱的影响

分析图 6 可知，极化电阻 R_p 变化会对半峰周期极化谱造成较大影响：当极化电阻增大时，半峰周期曲线往右上方移动，即半峰周期和半峰周期稳定时间均延长，这是因为极化电阻的增大导致极化速率减慢，达到稳定的时间也推迟；相反，当极化电阻减小时，半峰周期曲线向左下方移动，即半峰周期和半峰周期稳定时间均缩短。

同理，研究极化电容 C_p 对于半峰周期极化谱的影响规律，如图 7 所示。由于极化电容增大对应

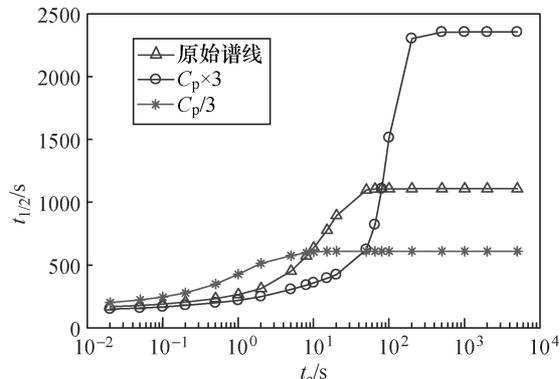


图 7 极化电容对半峰周期极化谱的影响

变压器内部的极性分子增多^[10]，因此在其他条件不变的情况下，增大极化电容将延长半峰周期，同时推迟使半峰周期达到饱和的充电时间——半峰周期稳定值。其变化规律与 R_p 类似，区别在于，极化电容的增大对应着绝缘情况劣化；相反，极化电阻的增大对应着绝缘更良好的变压器。

3.3 极化支路数对半峰周期极化谱的影响

现有研究将极化支路的时间常数分为小时间常数 ($\tau < 1s$)、中时间常数 ($1s < \tau < 100s$)、大时间常数 ($\tau > 1000s$) 3 类。鉴于绝缘老化可能导致极化支数增加^[11]，本文对变压器 T2 的拓展 Debye 模型分别增加 3 种支路进行仿真，绘制半峰周期极化谱，如图 8 所示。

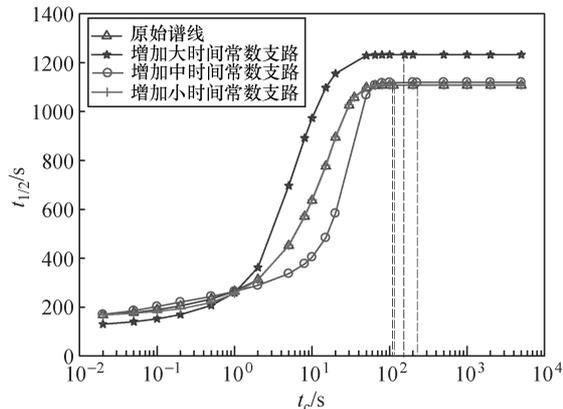


图 8 增加支路对半峰周期极化谱的影响

分析图 8 可知：①增加小支路数后的半峰周期曲线与原始曲线几乎重合，小支路数对于半峰周期极化谱几乎没有影响；②增加中时间常数支路主要影响半峰周期稳定时间 t_s ，对于半峰周期 $t_{1/2}$ 影响较小；③而增加大时间常数支路抬高了半峰周期曲线，并稍微推迟了半峰周期的稳定时间。由此证明，半峰周期极化谱能够反映 RVM 中后期的慢弛豫响应的变化。

当实际变压器老化时，极化电容增大比例要比极化电阻要小^[12]。基于此，本文设置极化电容增大 1.5 倍，极化电阻减小 2 倍，同时增加一条中时间常数支路来模拟极化电路的老化情况。其半峰周期极化谱如图 9 所示。可见，由于绝缘老化的影响，所以半峰周期减小，且稳定时间 t_s 后移，这与本文推论相符合。

4 实例验证

根据前文第 2 节分析，为验证半峰周期 $t_{1/2}$ ，以半峰周期稳定时间 t_s 作为 RVM 特征量的可行性和

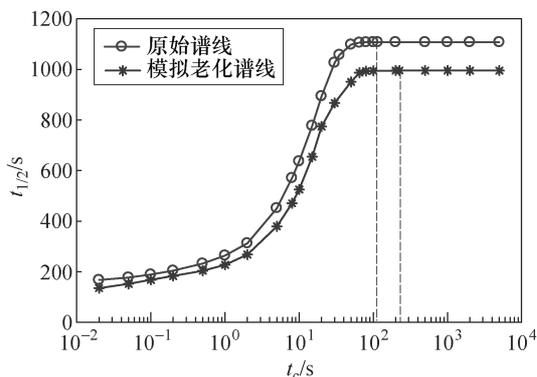


图9 模拟老化对半峰周期极化谱的影响

普适性。本文对 7 台不同老化状态的现场变压器 T3—T8 进行测试, 并根据其糠醛含量将其绝缘状况分为良好、较好、老化 3 个等级。T3—T8 变压器基本信息见表 3。T3—T8 变压器半峰周期极化谱的对比如图 10 所示。

可由图 10 依据半峰周期稳定时间对 3 个等级 7 台不同型号的变压器进行排序区分, 其中绝缘良好的 2 台变压器半峰周期稳定时间均小于 100s, 绝缘

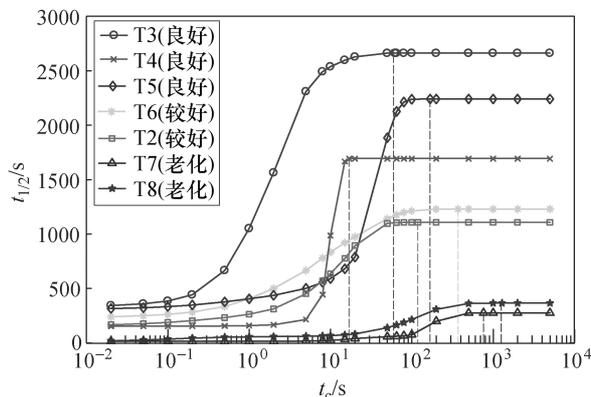


图10 T3—T8 台变压器半峰周期极化谱的对比

较好的 3 台变压器半峰周期稳定时间均在 100~400s, 绝缘较差的 2 台变压器半峰周期稳定时间均大于 800s, 这证明了半峰周期稳定时间作为 RVM 特征量的有效性和普适性。而将半峰周期大小作为诊断依据时, 虽然大体上可以说明变压器的绝缘状况, 但仍有 T3、T5 的半峰周期值反而比绝缘更好的 T4 更大的现象, 这说明半峰周期作为特征量与变压器型号、结构规格、绝缘等级有一定的关系。

表 3 T3—T8 变压器基本信息

变压器序号	型号	容量	制造厂家	使用年限	运行状态	绝缘状况
T3	SFSE9-240000/220	240MVA	常州东芝变压器厂	3 年	新投运	良好
T4	SFSZ10-180000/220	180MVA	衡阳变压器厂	1 年	新投运	良好
T5	SFPS-180000/220	180MVA	沈阳变压器厂	20 年	经大修	较好
T6	SFP9-240/220	240MVA	沈阳变压器厂	14 年	经检修	较好
T2	SFL-50000/110	50MVA	西安变压器厂	6 年	备用变压器	较好
T7	sp-250/10	250kVA	南通友邦变压器厂	7 年	已退役	老化
T8	s9-400/10	400kVA	福州变压器厂	12 年	已退役	老化

5 结论

传统的 RVM 特征量缺乏对 RVM 极化谱中后期曲线的解释, 无法完全反应 RVM 整个极化过程。本文提取新型 RVM 特征量——半峰周期稳定时间 t_s , 来探讨等效模型电路参数对于半峰周期极化谱的影响。根据本文分析可以得到以下结论:

1) 半峰周期能够有效表征某台变压器绝缘系统的老化信息, 在绝缘更好的情况下其半峰周期的值更大, 并随着绝缘老化半峰周期逐渐减小, 这与文献[5]的分析结果一致, 即与变压器型号、规格、绝缘等级存在一定关系。

2) 本文所提出的新特征量半峰周期稳定时间 t_s 与绝缘老化存在紧密联系, 绝缘老化会导致半峰周期稳定时间推移, 老化越严重, 稳定时间越长, 且

在不同绝缘结构的变压器中具有良好的普适性, 能够作为后期定性分析诊断变压器油纸绝缘状态的可靠依据。

参考文献

- [1] 蔡金锭, 刘永清, 蔡嘉. 油纸绝缘变压器极化等效电路分析及其老化评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 204-212.
- [2] 陈群静, 蔡金锭, 叶荣. 基于去极化电量的油纸绝缘变压器微水含量评估[J]. 电气技术, 2019, 20(3): 62-66.
- [3] 王岭, 蔡金锭. 基于去极化电量时域微分谱线时域特征量的变压器绝缘老化研究[J]. 电气技术, 2017, 18(6): 27-33.

(下转第 90 页)