

# 基于混联等效电路的变压器油纸绝缘局部受潮研究

林智勇<sup>1,2</sup>, 彭铭理<sup>1,2</sup>, 邓东平<sup>3</sup>, 李荣华<sup>1,2</sup>, 黄国泰<sup>4</sup>

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门市高端电力装备及智能控制重点实验室(厦门理工学院), 福建 厦门 361024; 3. 国网漳平市供电公司, 福建 漳平 364400; 4. 福建省电力物资有限公司, 福建 福州 350003)

**摘要:**针对现有扩展德拜等效电路在变压器油纸绝缘界面极化研究中的局限性,本研究应用混联极化支路构建混联等效电路模型,结合粒子群算法进行等效电路参数辨识,构建准确反映变压器绝缘老化的混联等效电路。仿真分析混联模型与扩展德拜模型等效电路中时间常数支路参数变化对回复电压极化谱的影响规律,研究混联支路与变压器油纸绝缘受潮机理的内在联系。研究表明:混联等效电路比扩展德拜等效电路能更加有效表征油纸界面极化特性和因变压器局部受潮而产生的回复电压极化谱局部波峰,而且混联支路平均时间常数与回复电压极化谱次时间常数具有良好的函数关系式,是研究变压器绝缘局部受潮的有效途径,为变压器油纸绝缘局部受潮研究提供新思路。

**关键词:**混联电路; 回复电压; 主时间常数; 局部波峰; 局部受潮

**中图分类号:**TM411 **文献标志码:**A

**引用格式:**林智勇, 彭铭理, 邓东平, 等. 基于混联等效电路的变压器油纸绝缘局部受潮研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2026, 56(1): 158-168.

LIN Zhiyong, PENG Mingcheng, DENG Dongping, et al. Research on localized moisture of transformer oil paper insulation based on hybrid equivalent circuit[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1): 158-168.

## Research on localized moisture of transformer oil paper insulation based on hybrid equivalent circuit

LIN Zhiyong<sup>1,2</sup>, PENG Mingcheng<sup>1,2</sup>, DENG Dongping<sup>3</sup>, LI Ronghua<sup>1,2</sup>, HUANG Guotai<sup>4</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian, China; 2. Xiamen Key Laboratory of Frontier Electric Power Equipment and Intelligent Control, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian, China; 3. State Grid Zhangping Electric Power Supply Company, Zhangping 364400, Fujian, China; 4. Fujian Provincial Electric Power Materials Co., Ltd., Fuzhou 350003, Fujian, China)

**Abstract:** Considered the limitations of existing extended Debye equivalent circuit in polarization research of transformer oil paper insulation interface, this paper built a hybrid equivalent circuit model, combined with particle swarm optimization algorithm for equivalent circuit parameter identification, and constructed a hybrid equivalent circuit that accurately reflected transformer insulation aging. The paper analyzed the influence of variation of middle time constant branch parameters in the equivalent circuit of the hybrid model and the extended Debye model on the return voltage polarization spectrum. Furthermore, the relationship between the hybrid branch and the dampening mechanism of oil-paper insulation in the transformer was studied. The results indicated that: compared with the extended Debye equivalent circuit, the hybrid equivalent circuit was more effective in characterizing the interface polarization characteristics of oil-paper, and the hybrid equivalent circuit could more effectively reflected the local peak of the recovery voltage polarization spectrum caused by local moisture of the transformer. Moreover, the average time constant of the hybrid branch had a good functional relationship with the sub-time constant of return voltage polarization spectrum, which was an effective way to studied local dampness of transformer insulation, and it could provide a new idea for the research on the local dampness of transformer insulation.

**Keywords:** hybrid circuit; recovery voltage; main time constant; local peak; local dampness

## 0 引言

油浸式变压器随着运行年限的增加,其绝缘性能会逐渐劣化<sup>[1]</sup>。绝缘油和绝缘纸是构成变压器绝缘系统的主要介质,而水分既是绝缘介质老化的主要产物,也是绝缘介质老化的催化剂<sup>[2]</sup>。因此,准确评估变压器油纸绝缘受潮状态对于保障变压器安全稳定运行具有重要工意义<sup>[3]</sup>。

利用回复电压特征量构建等效电路模型是目前用于分析变压器绝缘系统老化状态的重要手段<sup>[4-5]</sup>。其中,最常见的模型有扩展德拜等效电路模型、XY等效电路模型和混联等效电路模型等。文献[6]基于扩展德拜电路模型研究了回复电压极化谱与变压器油、纸中含水率关系;文献[7]通过德拜等效电路对不同工况下的绝缘样品进行试验,分析主时间常数与变压器绝缘状态的关系;文献[8]研究绝缘纸板中含水率与XY等效模型介质损耗因数之间的关系,提出绝缘纸板含水率与损耗因数之间的迭代拟合算法。这些研究成果对诊断变压器绝缘介质老化状态有指导意义,但扩展德拜、XY等效电路模型主要适用于单一均匀介质的极化弛豫过程。由于变压器在老化过程中产生很多老化产物,变压器内部不再属于单一均匀介质,此类研究对复杂界面极化的分析具有一定的局限性。邹阳等在文献[9]中应用混联等效电路表征油纸绝缘介质极化响应特性,结合混联支路数研究绝缘老化状况;文献[10]通过辨识简化后的混联电路参数,并结合实际测量回复电压极化谱,证实混联电路能更好地表征油纸绝缘介质极化响应特性。这些研究成果主要定性分析改变串联极化支路参数对变压器油纸绝缘介质老化的影响,没有深入分析混联支路的独特性,特别是回复电压极化谱与混联支路、局部受潮的内在联系。

结合上述研究的不足,本研究运用回复电压特征量构建混联电路模型,通过分析界面极化响应对回复电压极化谱的影响情况,验证混联等效电路分析绝缘介质界面极化的优越性,再研究混联支路对含有局部峰值的回复电压极化谱的影响机理,为后续变压器局部受潮评估提供理论支撑和分析途径。

## 1 混联等效电路模型

### 1.1 回复电压测试原理

回复电压测试过程可分为充电、放电、测量和松弛4个步骤<sup>[11]</sup>,如图1所示。图1中 $U_0$ 为外加直流电压, $U_{\max}$ 为最大回复电压, $s_r$ 为回复电压初始斜率, $t_c$ 为充电时间、 $t_d$ 为放电时间, $t_{\text{peak}}$ 为回复电压值对应的峰值时间。

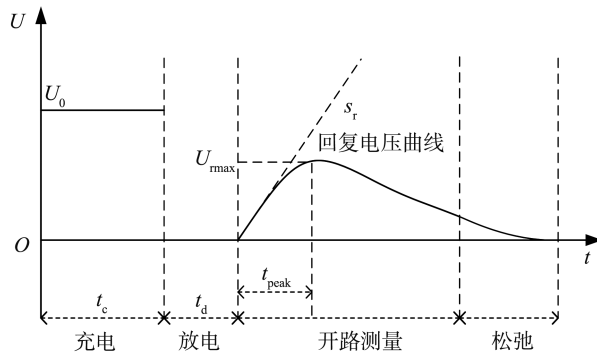


图1 回复电压测量曲线

Fig.1 Response voltage measurement curve

首先在两端加2 kV的直流电压 $U_0$ 后充电,此时内部的绝缘介质发生极化,绝缘端出现电荷;充电结束后开始放电,短接变压器绝缘端,此时内部介质发生去极化反应,两端的束缚电荷逐渐变为自由电荷<sup>[12]</sup>;在放电结束后停止短接开始测量,未完全极化的残余电荷在两端会形成回复电压<sup>[13]</sup>,此时的测量曲线称为回复电压曲线。

### 1.2 混联等效电路结构

扩展德拜模型由多条不同的极化电阻与极化电容串联构成的支路组成<sup>[14]</sup>,时间常数  $\tau_i$  代表绝缘介质内部极化反应的快慢,可表示为  $\tau_i = R_{pi}C_{pi}$ ,其中  $R_{pi}$  为极化电阻,  $C_{pi}$  为极化电容,  $i = 1, 2, \dots, n$  代表极化支路序号。

随着变压器老化,绝缘产物会增多,绝缘介质中不再是单一均匀介质的偶极矩转向变化,还有更复杂的界面极化反应<sup>[15]</sup>。因此,本研究在扩展德拜模型上进行改进,添加混联极化支路表征界面极化反应。不同类型的极化支路如图2所示,其中电阻电容串联极化支路(下文均简称 RC 串联极化支路)。图2中  $R_{j1}$ 、 $C_{j1}$  表示绝缘油介质的界面极化电阻和界面极化电容;  $R_{j2}$ 、 $C_{j2}$  表示绝缘纸介质的界面极化电阻和界面极化电容,混联极化支路的时间常数  $\tau_j$  由这两种介质等效参数共同决定,即  $\tau_j = \frac{R_{j1} \cdot R_{j2}}{R_{j1} + R_{j2}} (C_{j1} + C_{j2})$ ,最后建立如图3所示的混联等效电路模型。图3中  $R_g$  为绝缘电阻,  $C_g$  为几何电容;  $R_{pi}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 为串联支路的极化电阻,  $C_{pi}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 为串联极化支路的极化电容;  $R_{j(2k)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N-1, N$ ) 为混联支路的界面极化电阻,  $C_{j(2k)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N-1, N$ ) 为混联支路的界面极化电容。

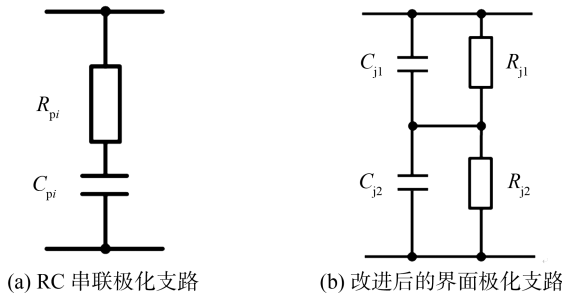


图2 不同类型的极化支路  
Fig.2 Different types of polarization branches

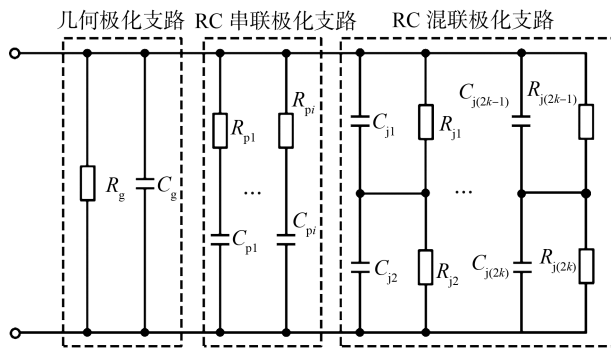


图3 混联等效电路模型  
Fig.3 Model of hybrid equivalent circuit

混联等效电路参数需要通过回复电压特征量结合粒子群算法进行辨识,因此混联等效电路能够表征变压器绝缘介质极化弛豫响应和绝缘状态,且随着变压器绝缘状态变差,水分、酸等极性老化产物增多,电导率增大,使得极化电阻减小、极化电容增大<sup>[16]</sup>,所以可利用混联等效电路参数分析回复电压极化谱的变化规律,从而研究混联等效电路参数与变压器绝缘老化的内在联系。

## 2 油纸绝缘混联等效电路参数辨识

### 2.1 等效电路数学模型

由电路的叠加定理可知,均匀介质极化支路在测试起点极化电容电压  $U_{cpi}(0)$  的表达式为

$$U_{cpi}(0) = U_0 \left( e^{-\frac{t_d}{R_{pi}C_{pi}}} - e^{-\frac{t_c + t_d}{R_{pi}C_{pi}}} \right), \tag{1}$$

式中  $e$  为指数函数。

界面极化支路在测试起点时的极化电容电压  $U_1(0)$  和  $U_2(0)$  可写为

$$\begin{cases} U_1(0) = \left[ \frac{C_{j2}R_{j2} - C_{j1}R_{j1}}{(C_{j1} + C_{j2})(R_{j1} + R_{j2})} \right] U_0(1 - e^{-\frac{t_c}{\tau_{j1}}}) e^{-\frac{t_d}{\tau_{j1}}} \\ -U_2(0) = \left[ \frac{C_{j1}R_{j1} - C_{j2}R_{j2}}{(C_{j1} + C_{j2})(R_{j1} + R_{j2})} \right] U_0(1 - e^{-\frac{t_c}{\tau_{j1}}}) e^{-\frac{t_d}{\tau_{j1}}} \end{cases} \quad (2)$$

以此类推可得图 3 中各个等效电路参数的求解方程为

$$\sum_{i=1}^n \frac{U_{cpi}(0)}{R_{pi}} (e^{\frac{-t_d}{R_{pi}C_{pi}}} - e^{\frac{-(t_c+t_d)}{R_{pi}C_{pi}}}) = C_g S_r |_{t=0} + \sum_{k=1}^N \frac{C_{j(2k-1)} \cdot C_{j(2k)}}{C_{j(2k-1)} + C_{j(2k)}} S_r |_{t=0} - \sum_{k=1}^N \left( \frac{C_{j(2k-1)}}{R_{j(2k)}} - \frac{C_{j(2k)}}{R_{j(2k-1)}} \right) \frac{U_{C(2k-1)}(0)}{C_{j(2k-1)} + C_{j(2k)}} \quad (3)$$

式中,  $S_r$  为测试起点回复电压初始斜率。

通过回复电压测试,获取多组初始斜率等回复电压特征量数据组,结合式(3)构建目标函数  $F(X)$  为

$$F(X) = \min \left\{ \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{i=1}^n \frac{U_{cpi}(0)}{R_{pi}} (e^{\frac{-t_d}{R_{pi}C_{pi}}} - e^{\frac{-(t_c+t_d)}{R_{pi}C_{pi}}}) - C_g S_r |_{t=0} - \sum_{k=1}^N \frac{C_{j(2k-1)} C_{j(2k)}}{C_{j(2k-1)} + C_{j(2k)}} S_r |_{t=0} + \sum_{k=1}^N \left( \frac{C_{j(2k-1)}}{R_{j(2k)}} - \frac{C_{j(2k)}}{R_{j(2k-1)}} \right) \frac{U_{C(2k-1)}(0)}{C_{j(2k-1)} + C_{j(2k)}} \right]^2 \right\} \quad (4)$$

对于求解参数  $R_g$ ,在均匀介质极化支路中,由基尔霍夫电压定律、基尔霍夫电流定律得到  $U_{cpi}(0)$  与极化电压的拉普拉斯变换形式  $U_{ri}(s)$  的网络函数为

$$\frac{U_{ri}(s)}{U_{cpi}(0)} = \frac{R_g C_{pi}}{(sR_{pi} C_{pi} + 1)}$$

$$\left[ sC_g R_g + 1 + \sum_{i=1}^n \frac{sR_g C_{pi}}{sR_{pi} C_{pi} + 1} + R_g \sum_{k=1}^N \frac{(sR_{j(2k-1)} C_{j(2k-1)} + 1)(sR_{j(2k)} C_{j(2k)} + 1)}{(sR_{j(2k-1)} R_{j(2k)} C_{j(2k)} + R_{j(2k-1)}) + (sR_{j(2k-1)} R_{j(2k)} C_{j(2k-1)} + R_{j(2k)})} \right]^{-1} \quad (5)$$

在混联极化支路中,  $U_{cjk}(0)$  与  $U_{jk}(s)$  的网络函数为

$$\frac{U_{jk}(s)}{U_{cjk}(0)} = \frac{R_g C_{j(2k)} R_{j(2k)} [1 + sR_{j(2k-1)} C_{j(2k-1)}]}{sR_{j(2k-1)} R_{j(2k)} (C_{j(2k-1)} + C_{j(2k)}) + R_{j(2k-1)} + R_{j(2k)}}$$

$$\left[ sC_g R_g + 1 + \sum_{i=1}^n \frac{sR_g C_{pi}}{sR_{pi} C_{pi} + 1} + R_g \sum_{k=1}^N \frac{(sR_{j(2k-1)} C_{j(2k-1)} + 1)(sR_{j(2k)} C_{j(2k)} + 1)}{(sR_{j(2k-1)} R_{j(2k)} C_{j(2k)} + R_{j(2k-1)}) + (sR_{j(2k-1)} R_{j(2k)} C_{j(2k-1)} + R_{j(2k)})} \right]^{-1} \quad (6)$$

式中,  $U_{jk}(s)$  为界面极化电压的拉普拉斯变换形式,  $U_{cjk}(0)$  为混联极化支路在测试起点极化电容的电压。

将式(5)、(6)经过拉式逆变换后,得到对应的均匀介质极化电压  $U_{ri}(t)$  和界面极化电压  $U_{jk}(t)$  的时域表达式为

$$\begin{cases} U_{ri}(t) = A_i(t) U_{cpi}; i = 1, 2, \dots, n \\ U_{jk}(t) = B_k(t) U_{cjk}; k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $A_i(t)$  为串联极化支路的衰减系数,  $B_k(t)$  为混联极化支路的衰减系数。

由电路叠加定理得混联电路的回复电压为

$$U_r(t) = \sum_{i=1}^n U_{ri}(t) + \sum_{k=1}^N U_{jk}(t) \quad (8)$$

此时,辨识绝缘电阻  $R_g$  的目标函数  $G(X)$  为

$$G(X) = \min \left\{ \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m [U_r(t_{peak}) - U_{rmax}]^2 \right\} \quad (9)$$

式中,  $m$  为回复电压测量循环的次数,  $U_r(t_{peak})$ 、 $U_{rmax}$  分别为最大回复电压的计算值和实测值。

## 2.2 粒子群算法

根据以上数学模型,结合粒子群算法对混联等效电路参数进行辨识。粒子群算法因为算法简便,收敛

速度快,搜索能力强而备受关注<sup>[17]</sup>,其流程如图4所示。本研究根据群体的局部最优位置  $p_{\text{best}}$  和全局最优位置  $g_{\text{best}}$  两个极值,结合粒子群速度  $v_{lq}$  和粒子群位置  $x_{lq}$  不断更新搜寻速度和粒子位置<sup>[18-19]</sup>。

粒子群速度为

$$v_{lq}^{z+1} = v_{lq}^z + c_1 r_1^z (p_{\text{best}} - x_{lq}^z) + c_2 r_2^z (g_{\text{best}} - x_{lq}^z), \quad (10)$$

粒子群位置公式为

$$x_{lq}^{z+1} = x_{lq}^z + v_{lq}^{z+1}, \quad (11)$$

式中,  $v_{lq}^z$  是第  $l$  个粒子在第  $z$  次迭代中第  $q$  维的速度,  $x_{lq}^z$  是第  $l$  个粒子在第  $z$  次迭代中第  $q$  维的当前位置,  $c_1$  和  $c_2$  为加速系数,  $r_1^z$  和  $r_2^z$  为介于  $[0, 1]$  之间的随机数。每次迭代过程中,粒子的位置和速度会限制在  $[x_{\min}, x_{\max}]$ 、 $[v_{\min}, v_{\max}]$  范围内。

### 2.3 混联等效电路可靠性

为了深入探讨混联电路模型的实用性以及与变压器绝缘受潮的内在联系,本研究使用一台退役的变压器 T1 (240 MVA/220 kV) 作为研究对象进行分析,其中绝缘电阻为 334.04 GΩ, 几何电容为 20.39 nF。采用回复电压测试仪 RVM5461 进行测试并获取对应的回复电压特征量,结合式(5)~(9)求解变压器 T1 等效电路参数,计算结果如表1所示。

根据表1中的等效电路参数,结合式(8)回复电压公式,分别构建基于扩展德拜等效电路模型和混联等效电路模型的回复电压极化谱。并将二者与该台变压器实测回复电压极化谱作对比,结果如图5所示。

表1 变压器 T1 等效电路参数

| Table 1 Equivalent circuit parameters of transformer T1 |      |             |             |            |
|---|------|-------------|-------------|------------|
| 类型  | 支路序号 | 极化电阻/<br>GΩ | 极化电容/<br>nF | 时间常数/<br>s |
| 串联极化支路  | 1    | 0.13        | 0.32        | 0.04       |
|   | 2    | 0.86        | 0.39        | 0.28       |
|   | 3    | 5.69        | 0.55        | 3.15       |
|   | 4    | 39.90       | 1.28        | 51.17      |
| 混联极化支路  | 5    | 38.66       | 96.79       | 962.70     |
|   | 6    | 6.11        | 85.72       |            |
|   | 7    | 0.01        | 491.03      | 2.89       |
|   |      | 0.12        | 16.88       |            |
|   |      | 8.12        | 88.21       | 325.19     |
|   |      | 2.20        | 99.84       |            |

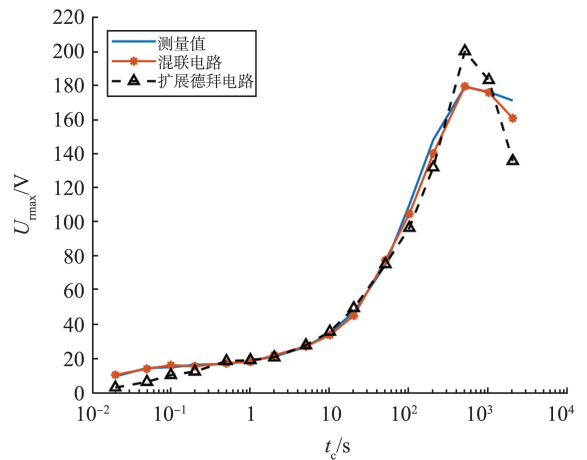


图5 变压器 T1 回复电压极化谱对比图  
Fig.5 Comparison diagram of return voltage polarization spectrum of transformer T1

从图5可以看出,基于混联等效电路参数计算获得的回复电压极化谱更贴近实测的回复电压极化谱。为更准确验证基于混联等效电路构建的回复电压极化谱的准确性,本研究通过建立重合度  $P$  判断回复电压计算值与测量值重合的准确度,重合度公式为

$$P = 1 - \frac{\sum U_{\text{rmax}}}{\sum U_{\text{rmax}}^*} \frac{|U_{\text{rmax}}^* - U_{\text{rmax}}|}{U_{\text{rmax}}}, \quad (12)$$

式中,  $U_{\text{rmax}}$  为回复电压极化谱实测值,  $U_{\text{rmax}}^*$  为回复电压极化谱计算值。

通过计算可知,基于混联等效电路参数计算获得的回复电压极化谱与实测回复电压极化谱重合度  $P = 96.62\%$ , 而基于扩展德拜电路参数计算获得的回复电压极化谱重合度  $P = 88.01\%$ , 由此可知,混联等效电路

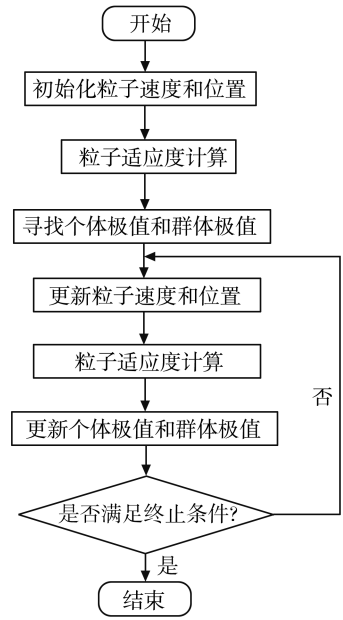


图4 粒子群算法流程图  
Fig.4 Particle swarm optimization algorithm flowchart

参数能够更准确地反映回复电压极化谱。

### 3 油纸绝缘混联等效电路与绝缘老化分析

#### 3.1 等效电路与油纸界面极化关系

当变压器绝缘受潮时,含水率相应增加,导致绝缘系统加速老化。现选取另一台退役的变压器 T2(120 MVA/220 kV)为研究对象,其中混联电路模型的绝缘电阻为 1.72 GΩ、几何电容为 121.34 nF;扩展德拜模型的绝缘电阻为 1.51 GΩ、几何电容为 78.89 nF。采用上文所提方法辨识变压器 T2 两种等效电路参数,辨识结果如表 2 所示。根据表 2 数据,构建两种电路模型对应的回复电压极化谱,二者与极化谱实测值对比情况如图 6 所示。

表 2 变压器 T2 混联等效电路参数  
Table 2 parameters of hybrid equivalent circuit of transformer T2

| 类型     | 支路序号 | 混联模型     |           |           | 扩展德拜模型  |           |             |
|--------|------|----------|-----------|-----------|---------|-----------|-------------|
|        |      | 极化电阻/GΩ  | 极化电容/nF   | 时间常数/s    | 极化电阻/GΩ | 极化电容/nF   | 时间常数/s      |
| 串联极化支路 | 1    | 0.110 0  | 4.740 0   | 0.510 0   | 0.090 0 | 2.580 0   | 0.250 0     |
|        | 2    | 0.340 0  | 5.530 0   | 1.860 0   | 0.270 0 | 4.630 0   | 1.230 0     |
|        | 3    | 0.480 0  | 27.710 0  | 13.420 0  | 0.740 0 | 310.090 0 | 224.590 0   |
|        | 4    | 0.650 0  | 145.330 0 | 94.680 0  | 2.550 0 | 473.960 0 | 1 210.870 0 |
| 混联极化支路 | 5    | 27.660 0 | 74.040 0  | 394.130 0 | 0.680 0 | 11.810 0  | 8.050 0     |
|        | 6    | 3.310 0  | 59.350 0  | 0.060 0   | 0.610 0 | 67.930 0  | 41.510 0    |
|        | 7    | 0.000 3  | 203.330 0 | 672.340 0 | 0.610 0 | 67.930 0  | 41.510 0    |
|        | 8    | 66.870 0 | 5.780 0   | 0.060 0   | 0.610 0 | 67.930 0  | 41.510 0    |
|        | 9    | 22.430 0 | 85.430 0  | 672.340 0 | 0.610 0 | 67.930 0  | 41.510 0    |
|        |      | 3.770 0  | 122.840 0 |           |         |           |             |

注:变压器 T2 的扩展德拜模型没有第 7 条支路。

由图 6 可知,基于混联等效电路构建的极化谱峰值电压和对应的主时间常数分别为 334.16 V、100 s;基于扩展德拜等效电路构建的极化谱峰值电压和对应的主时间常数分别为 325.64 V、200 s。这是由于随着变压器受潮程度加重,含水率增加,加剧绝缘介质的老化,糠醛、酸、水等介电常数大的老化产物充斥在油纸界面<sup>[20]</sup>。这些老化产物,一方面加快油纸界面极化过程,使得回复电压极化谱较早出现最大值,即主时间常数变小;另一方面使得油纸界面极化反应更剧烈,使得开路测量过程的剩余电荷增多,导致回复电压极化谱峰值电压增大。所以,含有更准确表征油纸界面极化特性的混联等效电路所构建回复电压极化谱主时间常数比基于扩展德拜等效电路构建的回复电压极化谱主时间常数小。进一步验证了混联等效电路模型中的混联支路比扩展德拜等效电路模型的 RC 串联极化支路更能表征油纸界面极化特性。

#### 3.2 等效电路与油纸绝缘局部受潮关系

当变压器绝缘系统内部发生局部受潮时,容易在短充电时间下(10 s 以内)回复电压极化谱发生局部波峰<sup>[21]</sup>。而扩展德拜等效电路模型的中时间常数支路和混联等效电路模型的混联极化支路参数主要反映了短充电时间下回复电压极化谱(主要是回复电压极化谱中端部分)。为了说明混联极化支路参数反映变压器局部受潮情况,现选用发生绝缘介质局部受潮的变压器 T3(750 MVA/220 kV,绝缘局部轻微受潮)进行

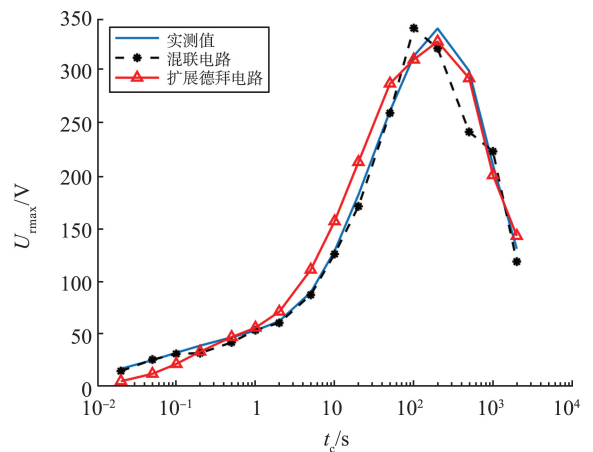


图 6 变压器 T2 三种回复电压极化谱  
Fig.6 Three return voltage polarization spectrums of transformer T2

验证。其中混联电路模型的绝缘电阻为 205.32 GΩ,几何电容为 48.89 nF;扩展德拜模型的绝缘电阻为 209.32 GΩ,几何电容为 48.85 nF。根据上文所提方法辨识变压器 T3 两种等效电路模型参数,辨识结果如表 3 所示。

表 3 变压器 T3 混联等效电路参数  
Table 3 parameters of hybrid equivalent circuit of transformer T3

| 类型     | 支路序号    | 混联模型      |           |             | 扩展德拜模型    |         |            |
|--------|---------|-----------|-----------|-------------|-----------|---------|------------|
|        |         | 极化电阻/GΩ   | 极化电容/nF   | 时间常数/s      | 极化电阻/GΩ   | 极化电容/nF | 时间常数/s     |
| 串联极化支路 | 1       | 0.450 0   | 0.032 0   | 0.014 0     | 0.470 0   | 0.630 0 | 0.290 0    |
|        | 2       | 0.540 0   | 0.550 0   | 0.300 0     | 183.970 0 | 9.460 0 | 1739.560 0 |
|        | 3       | 1.790 0   | 0.820 0   | 1.460 0     | 0.550 0   | 0.050 0 | 0.030 0    |
|        | 4       | 22.530 0  | 0.620 0   | 13.850 0    | 142.460 0 | 1.680 0 | 239.030 0  |
| 混联极化支路 | 5       | 12.660 0  | 106.040 0 | 1 702.720 0 | 1.590 0   | 0.800 0 | 1.260 0    |
|        | 6       | 13.110 0  | 158.350 0 |             |           |         |            |
|        | 7       | 0.000 3   | 275.030 0 | 0.083 0     | 20.030 0  | 0.600 0 | 12.040 0   |
|        |         | 66.910 0  | 2.380 0   |             |           |         |            |
|        |         | 20.430 0  | 88.430 0  |             |           |         |            |
| 7      | 5.270 0 | 127.840 0 | 906.170 0 |             |           |         |            |

注:变压器 T3 的扩展德拜模型没有第 7 条支路。

根据表 3 所示的两种等效电路模型的参数,构建对应的回复电压极化谱,二者与极化谱实测对比情况如图 7 所示。

由图 7 可得,对于绝缘局部受潮而含有小波峰的变压器 T3,基于混联等效电路模型辨识获得的回复电压极化谱比基于扩展德拜等效电路模型辨识获得的回复电压极化谱更加贴近实测值,说明混联等效电路模型对局部受潮变压器老化诊断具有优越性。

为进一步验证混联等效电路模型比扩展德拜等效电路模型更适合研究变压器局部受潮情况,现通过改变变压器 T3 两种电路模型的中时间常数支路(混联模型的支路 5、6、7 和扩展德拜模型的支路 5、6 参数,仿真分析其对回复电压极化谱的影响规律。仿真结果如图 8、9 所示。

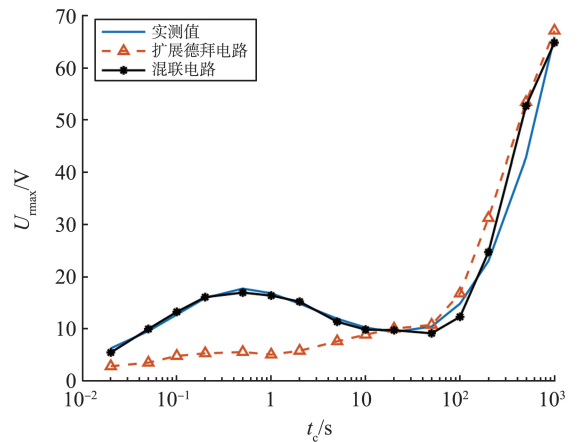


图 7 变压器 T3 三种回复电压极化谱  
Fig.7 Three return voltage polarization spectrums of transformer T3

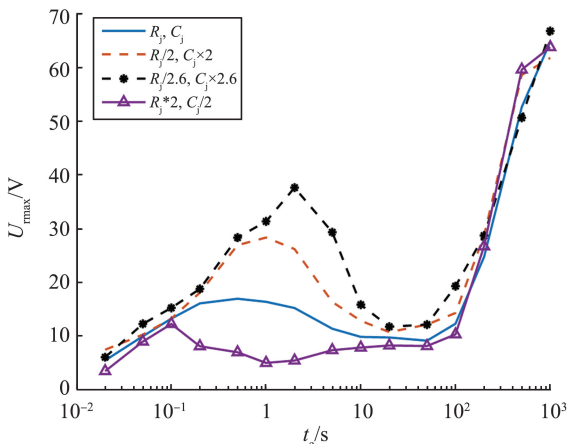


图 8 改变混联电路参数对极化谱的影响  
Fig.8 The effect of changing parameters of hybrid circuit on the polarization spectrum

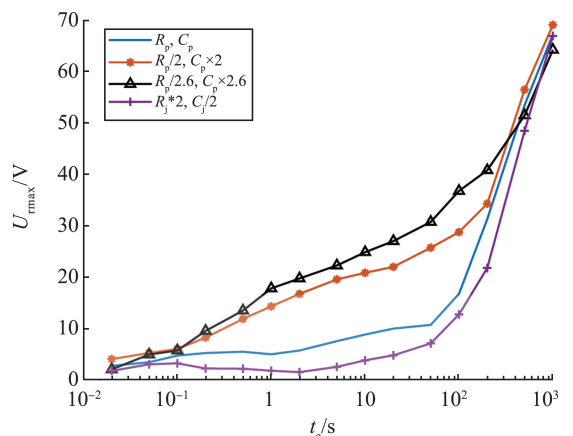


图 9 改变扩展德拜电路参数对极化谱的影响  
Fig.9 The effect of changing parameters of extended Debye circuit on the polarization spectrum

由图 8、9 对比可知,改变中时间常数支路参数对回复电压极化谱的影响主要集中在中间部分,且两种电路模型中间部分极化谱均随着老化程度加深(即极化电阻变小,极化电容变大)而增大。但混联模型中随着老化程度加深,极化谱均存在局部波峰,而扩展德拜模型中的极化谱没有局部波峰。因此,在变压器绝缘局部受潮的过程中,采用混联等效电路模型比采用扩展德拜等效电路更能有效反映极化谱局部波峰、更加有效表征油纸界面极化特性,从而更加准确诊断变压器绝缘局部受潮情况<sup>[22]</sup>。

### 3.3 变压器实例对比验证

为进一步验证上文混联界面极化支路对变压器局部受潮仿真分析的可靠性,现对另一台已经退役的变压器 T4(500 MVA/220 kV,绝缘局部受潮严重)进行分析。其中变压器 T4 的绝缘电阻为 0.008 5 GΩ,几何电容为 71.34 nF。运用本研究所提参数辨识方法进行混联等效电路参数辨识,结果如表 4 所示。与变压器 T3 进行等效电路参数与回复电压极化谱比较,结果如图 10 所示。

表 4 变压器 T4 混联等效电路参数  
Table 4 parameters of hybrid equivalent circuit of Transformer T4

| 类型     | 支路序号 | 混联模型    |         |           | 扩展德拜模型  |         |           |
|--------|------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
|        |      | 极化电阻/GΩ | 极化电容/nF | 时间常数/s    | 极化电阻/GΩ | 极化电容/nF | 时间常数/s    |
| 串联极化支路 | 1    | 0.450   | 0.032   | 0.014     | 0.013   | 213.960 | 2.780     |
|        | 2    | 0.540   | 0.550   | 0.300     | 0.065   | 1.930   | 0.150     |
|        | 3    | 1.790   | 0.820   | 1.460     | 1.470   | 3.110   | 4.570     |
|        | 4    | 22.530  | 0.620   | 13.850    | 13.030  | 5.570   | 72.580    |
| 混联极化支路 | 5    | 12.660  | 106.040 | 1 702.720 | 7.060   | 113.140 | 1 020.920 |
|        |      | 13.110  | 158.350 |           | 5.910   | 203.150 |           |
|        | 6    | 0.030   | 275.030 | 0.083     | 0.005   | 379.080 | 19.800    |
|        |      | 66.910  | 2.380   |           | 9.200   | 4.010   |           |
|        | 7    | 20.430  | 88.430  | 906.170   | 10.840  | 90.370  | 266.760   |
|        |      | 5.270   | 127.840 |           | 1.210   | 157.260 |           |

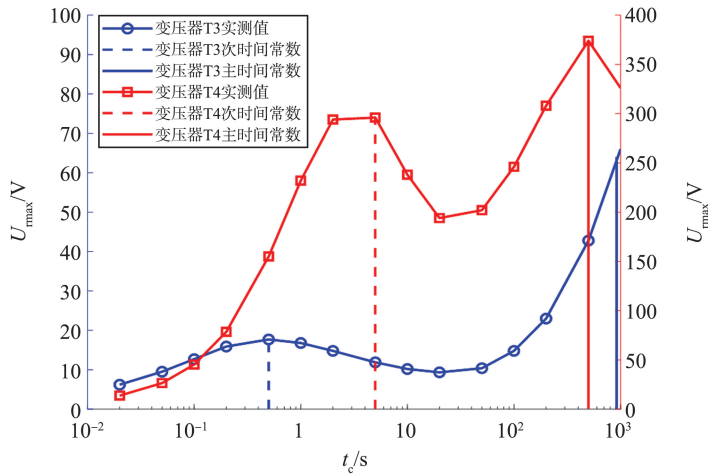


图 10 回复电压极化谱对比图

Fig.10 Comparison diagram of the return voltage polarization spectra

为有别于回复电压极化谱最大值所对应的主时间常数,定义回复电压极化谱局部峰值对应的充电时间为次时间常数。由表 4 可知,绝缘局部受潮严重的变压器 T4 与绝缘局部受潮轻微的变压器 T3 相比,其各极化支路(包括混联支路)的极化电阻比变压器 T3 小,极化电容比变压器 T3 大。由图 10 可知,变压器 T4 与变压器 T3 相比,其回复电压极化谱整体比变压器 T3 高,主时间常数比变压器 T3 小;局部波峰峰值比变压器 T3 大,对应的次时间常数亦比变压器 T3 大。综上所述,两台局部受潮变压器的实例分析结果与上文的理论与仿真分析结果一致。

### 3.4 次时间常数与变压器含水率关系

为进一步研究次时间常数与变压器含水率的内在联系,本研究对四台不同老化程度的变压器进行对比

分析,结果如表5所示。

表5 4台变压器信息  
Table 5 Information of the four transformers

| 变压器 | 电压等级/kV | 容量/MVA | 纸中含水率/% | 次时间常数/s |
|-----|---------|--------|---------|---------|
| T3  | 220     | 750    | 1.27    | 2.0     |
| T4  | 220     | 500    | 4.23    | 500.0   |
| T5  | 220     | 500    | 2.53    | 200.0   |
| T6  | 220     | 750    | 0.95    | 0.5     |

为了进一步探究次时间常数与变压器含水率二者之间的关系,本研究根据表5数据应用最小二乘法进行拟合(拟合优度  $R^2=0.951$ ),拟合曲线情况如图11所示。

$$y = 1.31e^{0.0024t_s}, \quad (13)$$

式中,  $t_s$  为回复电压极化谱次时间常数,  $y$  为变压器含水率。

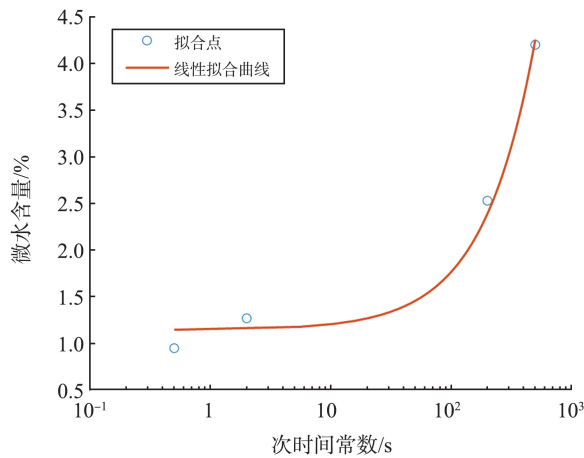


图11 次时间常数与变压器含水率的拟合结果

Fig.11 The fitting results of sub time constant and transformer micro water content

由式(13)的拟合结果可知,次时间常数与变压器微水含量具有良好的函数关系。由图11可知,次时间常数随着变压器局部受潮程度加重而增大,即次时间常数随着变压器微水含量增大而增大。可以考虑将次时间常数作为变压器油纸绝缘系统局部受潮的老化特征量以及后续基于多维老化特征量定量分析变压器含水率的重要参考依据。

## 4 结论

本研究采用混联等效电路模型中的混联支路研究变压器油纸界面极化特性,通过仿真分析混联支路模型参数和扩展德拜支路模型参数对回复电压极化谱中间部分、局部波峰的影响规律,并结合油纸界面老化机理分析其原因,研究混联等效电路模型在油纸绝缘复杂老化诊断方面的优越性,得出以下结论。

(1) 扩展德拜等效电路由于极化支路结构单一,对复杂的油纸界面极化研究具有一定的局限性。混联等效电路特有的混联支路能够准确反映油纸界面极化。

(2) 变压器油纸绝缘受潮能够引起油纸界面极化加剧,特别是局部受潮严重时,回复电压极化谱中间部分会发生局部波峰现象。混联支路特有的支路结构能够准确反映极化谱局部波峰,为研究多波峰等不规则回复电压极化谱提供技术支撑。

(3) 次时间常数与变压器含水率具有良好的函数关系式,可以采用次时间常数作为表征变压器局部受潮状态的特征量,为后续深入研究变压器微水含量定量评估方法提供重要参考依据。

### 参考文献:

[1] ZHAO M Q, ZHANG B, LI J F, et al. Molecular dynamics study on the diffusion behavior of water molecules and the

- dielectric constant of vegetable/mineral oil blends[J]. *Molecules*, 2023, 28(3): 1067.
- [2] 林朝明, 林超群, 叶晨欣, 等. 油纸绝缘混联模型含水率定量评估参数的提取及研究[J]. *绝缘材料*, 2022, 55(5): 115-122.  
LIN Chaoming, LIN Chaoqun, YE Chenxin, et al. Extraction and research of water content quantitative evaluation parameters in hybrid model for oil-paper insulation[J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(5): 115-122.
- [3] 杜伯学, 姜金鹏. 换流变压器油纸绝缘水分对局部放电行为的影响综述[J]. *高电压技术*, 2021, 47(8): 2932-2945.  
DU Boxue, JIANG Jinpeng. Research progress on influence of water content of oil-paper insulation on partial discharge of converter transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(8): 2932-2945.
- [4] LIAO R J, LIU J F, YANG L J, et al. Quantitative analysis of insulation condition of oil-paper insulation based on frequency domain spectroscopy[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(1): 322-334.
- [5] SETAYESHMEHR A, FOFANA I, EICHLER C, et al. Dielectric spectroscopic measurements on transformer oil-paper insulation under controlled laboratory conditions[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(4): 1100-1111.
- [6] 尹小兵, 郝长金, 黎成林, 等. 基于回复电压法的变压器绝缘纸水分及绝缘状态研究[J]. *高压电器*, 2017, 53(11): 152-158.  
YIN Xiaobing, HAO Changjin, LI Chenglin, et al. Research on moisture content and insulation state of oil-paper for transformer based on return voltage measurement[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(11): 152-158.
- [7] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2004, 11(1): 144-154.
- [8] 张明泽, 刘骥, 齐朋帅, 等. 基于介电响应技术的变压器油纸绝缘含水率数值评估方法[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(18): 4397-4407.  
ZHANG Mingze, LIU Ji, QI Pengshuai, et al. Numerical evaluation method for moisture content of transformer oil-paper insulation based on dielectric response technique [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(18): 4397-4407.
- [9] 邹阳, 李安娜, 蔡金锭. 混联等效电路在油纸绝缘老化诊断的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(3): 383-389.  
ZOU Yang, LI Anna, CAI Jinding. Application of parallel-series equivalent circuit in aging diagnosis for oil-paper insulation [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2015, 29(3): 383-389.
- [10] 李安娜, 蔡金锭. 油纸绝缘系统混联等效电路及参数辨识的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(9): 2130-2136.  
LI Anna, CAI Jinding. Study on parallel-series equivalent circuit and parameters identification of oil-paper insulation system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(9): 2130-2136.
- [11] 傅泽坤. 基于 mRMR 方法的油浸式变压器介电响应特征量优选理论及绝缘状态研究[D]. 福州: 福州大学, 2020: 11-38.  
FU Zekun. Optimization theory of dielectric response characteristics and insulation state of oil immersed transformer based on mRMR method[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020: 11-38.
- [12] 曾光. 变压器德拜模型的 RVM 法分析及粒子群优化算法研究[J]. *自动化仪表*, 2020, 41(5): 58-64.  
ZENG Guang. Analysis of RVM method and study of particle swarm optimization algorithm for Debye model in transformer [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2020, 41(5): 58-64.
- [13] 张涛, 钟婷婷, 张斌, 等. 评估变压器油纸绝缘受潮的电压响应方法研究[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(9): 38-42.  
ZHANG Tao, ZHONG Tingting, ZHANG Bin, et al. Study on voltage response method for evaluating moisture status of transformer oil-paper insulation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(9): 38-42.
- [14] 余浩, 黄彦钦, 尹钧毅, 等. 基于介电响应特性的油浸式电力变压器绝缘状态评估研究进展[J]. *电气工程学报*, 2020, 15(4): 1-17.  
YU Hao, HUANG Yanqin, YIN Junyi, et al. Review progress on insulation condition assessment of oil immersed power transformer based on dielectric response characteristics[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2020, 15(4): 1-17.
- [15] LIU J F, FAN X H, ZHANG Y Y, et al. Temperature correction to dielectric modulus and activation energy prediction of oil-immersed cellulose insulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(3): 956-963.
- [16] 马万里, 田付强, 熊雯雯, 等. 环氧树脂/氮化硼微纳米复合材料的导热与电气绝缘性能研究[J]. *绝缘材料*, 2019, 52(7): 36-42.

- MA Wanli, TIAN Fuqiang, XIONG Wenwen, et al. Thermal conductivity and electrical insulation properties of epoxy/BN micro and nano composites[J]. *Insulating Materials*, 2019, 52(7): 36-42.
- [17] 雷茂杰, 许坦奇, 孟凡英. 基于自适应粒子群算法的 MPPT 控制策略[J]. *电源技术*, 2021, 45(8): 1036-1039.  
LEI Maojie, XU Tanqi, MENG Fanying. MPPT control strategy based on adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(8): 1036-1039.
- [18] 石延辉, 杨洋, 廖毅, 等. 基于改进粒子群算法优化 SVM 的变压器故障诊断[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56(10): 1238-1244.  
SHI Yanhui, YANG Yi, LIAO Yi, et al. Transformer fault diagnosis based on improved particle swarm optimization SVM [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023, 56(10): 1238-1244.
- [19] 程声烽, 程小华, 杨露. 基于改进粒子群算法的小波神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(19): 37-42.  
CHENG Shengfeng, CHENG Xiaohua, YANG Lu. Application of wavelet neural network with improved particle swarm optimization algorithm in power transformer fault diagnosis[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(19): 37-42.
- [20] 邹阳. 变压器油纸绝缘弛豫响应特性建模及老化诊断研究[D]. 福州: 福州大学, 2019: 39-64.  
ZOU Yang. Modeling and aging diagnosis of transformer oil paper insulation relaxation response characteristics[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2019: 39-64.
- [21] 江修波, 张涛, 黄彦婕. 变压器油纸绝缘极化谱的仿真研究[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(2): 31-35.  
JIANG Xiubo, ZHANG Tao, HUANG Yanjie. Simulation of transformer insulation polarization spectrum[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(2): 31-35.
- [22] 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, 2014: 54-80.  
ZHANG Tao. Research on diagnosis of oil-paper insulation condition in transformer based on return voltage characteristic quantities[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014: 54-80.

(编辑:熊小原)

(上接第 157 页)

- LI Hongzhao, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, et al. Risk state early warning of the surface deformation of shallow buried subway station[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2023, 53(6): 82-91.
- [21] 尤勇, 孟云龙, 吴景涛, 等. 基于鲸鱼优化算法-支持向量回归的汽车运动状态估计[J]. *中国机械工程*, 2024, 35(6): 973-981.  
YOU Yong, MENG Yunlong, WU Jingtao, et al. Vehicle motion state estimation based on WOA-SVR[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(6): 973-981.
- [22] 汤明, 王汉昌, 何世明, 等. 基于 PCA-BP 算法的机械钻速预测研究[J]. *石油机械*, 2023, 51(10): 23-31.  
TANG Ming, WANG Hanchang, HE Shiming, et al. Prediction for rate of penetration based on PCA-BP algorithm[J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(10): 23-31.
- [23] 杨文锋, 林德惠, 曹宇, 等. 基于 PCA-SVM 的飞机蒙皮激光分层除漆 LIBS 在线监测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(12): 3891-3898.  
YANG Wenfeng, LIN Dehui, CAO Yu, et al. Study on LIBS online monitoring of aircraft skin laser layered paint removal based on PCA-SVM[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(12): 3891-3898.
- [24] 何珂, 杨顺新, 郜勇刚. 基于 PCA-RF 组合模型的隧道交通事故持续时间预测[J]. *交通信息与安全*, 2019, 37(5): 26-32.  
HE Ke, YANG Shunxin, GAO Yonggang. Prediction of traffic incident duration in tunnels based on a PCA-RF combined model[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2019, 37(5): 26-32.
- [25] 孙鸿昌, 周风余, 单明珠, 等. 基于模式划分的空调能耗混合填补方法[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2022, 52(1): 9-18.  
SUN Hongchang, ZHOU Fengyu, SHAN Mingzhu, et al. Mode division based hybrid filling method of air conditioning energy consumption[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2022, 52(1): 9-18.

(编辑:管昕昉)