

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

郑君亮, 江修波, 蔡金锭

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 通过回复电压特征量的测量值, 利用果蝇算法求解出变压器油纸绝缘等效电路参数。将所求参数代入仿真模型得到回复电压极化谱, 其与测量值拟合很好, 验证了所求参数的正确性。根据电压等级、容量的大小, 将 7 台变压器分成 3 组, 计算出各变压器的油纸绝缘等效电路参数, 并分析了绝缘状态对等效电路参数的影响。分析结果表明, 绝缘状态较好的变压器的绝缘电阻、极化电阻和最大时间常数, 要大于绝缘状态较差的变压器的绝缘电阻、极化电阻和最大时间常数。

关键词: 变压器; 变压器绝缘; 油纸绝缘; 模型; 回复电压; 果蝇算法; 参数辨识; 绝缘

中图分类号: TM 411

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.026

0 引言

电力变压器的安全运行直接影响着供电的安全性和可靠性, 对使用年限较长的变压器的绝缘老化情况进行有效合理的评估, 不仅可以减少变压器事故, 而且还能降低更换变压器的成本^[1-2]。介质响应法是近年来国内外常用的一种新的无损诊断方法。介质响应法可以有效诊断电力变压器油纸绝缘状态的特征量, 进而准确地判断绝缘所处的状态, 保证变压器运行的可靠性, 延长老旧变压器的使用寿命。它通过外加电压获得电力变压器绝缘状态, 根据外加电压的性质, 介质响应法分为时域介质响应法和频域介质响应法^[3-5]。其中时域介质响应法包括回复电压法(RVM)和极化/去极化电流(PDC)法。本文通过回复电压法测出的特征量, 利用果蝇智能算法, 求解变压器油纸绝缘等效电路的参数; 将实际测量的变压器进行分组, 分别求解出它们的等效电路参数; 最后将这些参数进行比较, 得出不同绝缘老化状态对等效电路参数的影响。

1 油纸绝缘等效电路及其参数识别

利用介质响应法分析变压器油纸绝缘常用的等效电路是基于拓展德拜模型的等效电路^[6-7], 如图 1 中的虚线框部分所示, 它由多条 RC 串联支路组成, 反映了变压器油纸绝缘介质不同的松弛极化过程; 其中 R_g 为绝缘电阻, 反映油纸组合绝缘的电导情况; C_g 为几何电容; R_{pi} 和 C_{pi} 分别为各极化支路的极化电阻和极化电容, 代表了油纸绝缘系统的不同弛豫特性。

回复电压的测量过程如下: 当开关 K 闭合到 S_1

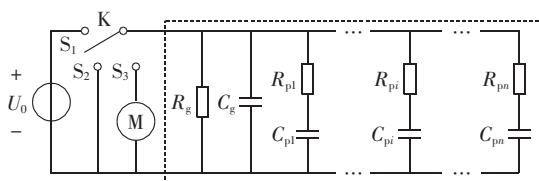


图 1 油纸绝缘等效电路及回复电压测量

Fig.1 Equivalent circuit and recovery voltage test of oil-paper insulation

时, 直流电压源 U_0 对绝缘介质进行充电, 绝缘介质被极化, 充电时间为 t_c ; 将开关 K 闭合到 S_2 , 对绝缘介质进行放电, 绝缘介质发生去极化, 放电时间为 t_d ; 将开关 K 闭合到 S_3 , 开始进行回复电压特征量的测量^[8]。回复电压特征量包括^[9]: 回复电压最大值 U_{max} ; 到达最大值的时间 t_p ; 回复电压的初始斜率 dU_r/dt 。根据不同的充电时间 t_c , 可以测出一系列不同的回复电压特征量。根据这些特征量可以求出等效电路的参数。

在回复电压特征量测量阶段, 即开关 K 闭合到 S_3 时, 根据基尔霍夫定律, 可对图 1 的介质响应等效电路建立如下方程:

$$C_g \frac{dU_r(t)}{dt} + \frac{U_r(t)}{R_g} + \sum_{i=1}^n \frac{U_r(t)}{R_{pi}} - \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} [e^{-(t+t_d)/\tau_i} - e^{-(t+t_c+t_d)/\tau_i}] = 0 \quad (1)$$

当 $t=0$ 时, $U_r(t)=0$, 可将上述方程简化为:

$$\left. \frac{dU_r}{dt} \right|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} [e^{-t_d/\tau_i} - e^{-(t_c+t_d)/\tau_i}] \right\} = 0 \quad (2)$$

其中, $\left. \frac{dU_r}{dt} \right|_{t=0}$ 为回复电压的初始斜率; $\tau_i = R_{pi} C_{pi}$ 。

式(2)中含有 $2n+1$ 个未知数, 将至少 $2n+1$ 组充电时间下的回复电压特征量的测量值代入方程(2), 得到一个方程组。再构建目标函数式(3), 把方程组转化成函数的最优化问题, 采用果蝇算法, 求解

出各支路的 R_{pi} 、 C_{pi} 、 C_{go}

$$F(X)=\min \left\{ \frac{1}{2n+1} \sum_{j=1}^{2n+1} \left\{ \left. \frac{dU_{vj}}{dt} \right|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \times \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left[e^{-t_{ij}/\tau_i} - e^{-(t_{ij}+t_{qj})/\tau_i} \right] \right\} \right\}^2 \right\} \quad (3)$$

然后,将它们代入回复电压式(4),即可求出绝缘电阻 R_{go}

$$U_r(t)=U_0\sum_{i=1}^n A_i(t)(1-e^{-t_c/\tau_i})e^{-t_d/\tau_i} \quad (4)$$
$$A_i(t)=\sum_{j=1}^{n+1} K_{ij}e^{p_jt}$$

其中, $i=1,2,\cdots,n$; K_{ij} 为由参数 R_g 、 C_g 、 R_{pi} 和 C_{pi} 组合的结果^[10]。

2 果蝇算法

智能优化算法要解决的一般是最优化问题,发展至今主要有免疫算法、遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、鱼群算法、果蝇算法等^[11]。文献^[12]对几种智能算法进行了比较,比较结果如表 1 所示^[12]。从表 1 可以得出果蝇算法具有计算量较小、算法简单、寻优精度较高的优点。所以,本文采用果蝇算法来求最优解。

表 1 各种算法比较

Table 1 Comparison among different algorithms

算法	计算量	复杂度	精度
免疫算法	很大	很复杂	很高
遗传算法	较大	很复杂	较低
蚁群算法	中等	较复杂	较高
粒子群算法	中等	较简单	很低
鱼群算法	较大	较复杂	较高
果蝇算法	较小	较简单	较高

果蝇算法是由台湾学者潘文超提出的一种新的优化算法^[13-14],它是基于果蝇觅食行为推演出的寻优算法。果蝇本身在感官知觉上优于其他物种,尤其在嗅觉与视觉上。果蝇的嗅觉器官能很好地搜集漂浮在空气中的各种气味,甚至能嗅到 40 km 以外的食物源,飞近食物位置后亦可使用敏锐的视觉发现食物与同伴聚集的位置,并且往该方向飞去。

利用果蝇算法计算等效电路参数的具体步骤如图 2 所示。

3 实测变压器等效电路参数计算及其与绝缘状态的关系

为了提高可比性,将实测变压器按电压等级和容量大小分成 3 组。根据实际测量的回复电压特征量,利用果蝇算法分别算出每台变压器绝缘等效电路的参数。用 MATLAB 搭建油纸绝缘等效电路模型^[15],并将计算得出的参数代入模型,仿真得出不同充电时

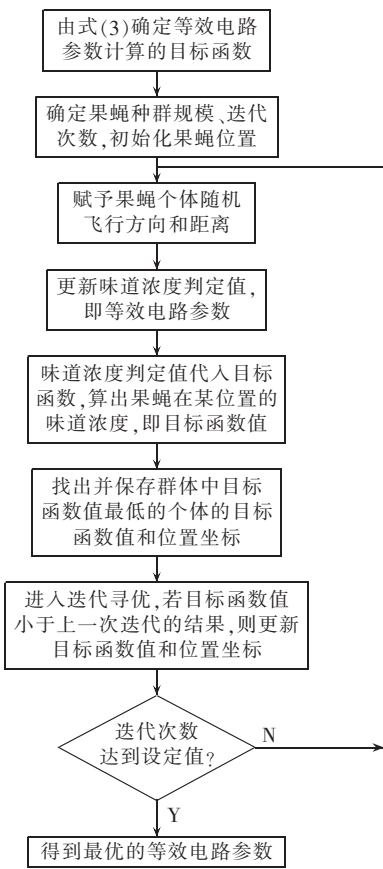


图 2 果蝇算法计算等效电路参数的流程
Fig.2 Flowchart of equivalent circuit parameter calculation by fruit flying algorithm

间 t_c 下的回复电压最大值,得到回复电压最大值随充电时间 t_c 变化的谱线,即回复电压极化谱。再将它和实际测量得到的回复电压极化谱相比较,验证参数计算是否准确。根据计算结果,分析不同绝缘状况对等效电路参数的影响。

3.1 检修前后变压器的参数计算及分析

3.1.1 参数计算

根据实际测量结果,利用果蝇算法,对第 1 组变压器(参数见表 2)进行等效电路参数计算,计算结果如表 3 所示。将计算得到的参数代入仿真模型中,仿真得到回复电压极化谱,仿真结果如图 3 所示。

3.1.2 分析

极化谱测量值和仿真值的拟合误差,用平均相对误差 e_r 来表示^[16]。

$$e_r=\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_m-x_s|}{x_m} \quad (5)$$

表 2 变压器 T₁、T₂、T₃ 的信息

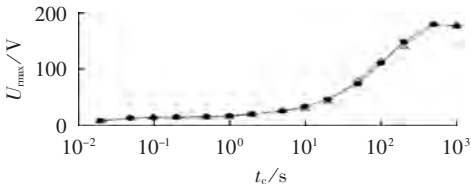
Table 2 Information of transformer T₁, T₂ and T₃

变压器	出厂时间	型号	电压等级/kV	容量/(MV·A)
T ₁ (检修前)	1993-09	SFP9-240000/220	220	240
T ₂ (检修后)	1993-09	SFP9-240000/220	220	240
T ₃	新投运	SFSE9-240000/220	220	240

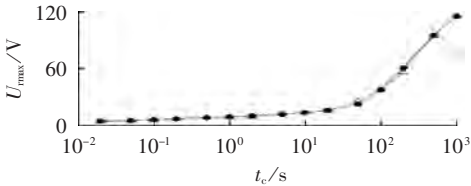
表 3 变压器 T₁、T₂、T₃ 参数计算值

Table 3 Calculated parameters of transformer T₁, T₂ and T₃

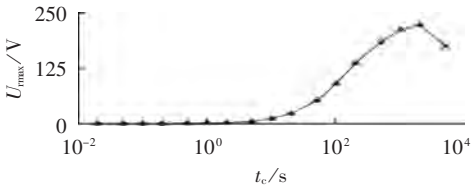
变压器	支路	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF	τ_i/s	$R_g/G\Omega$	C_g/nF
T ₁	1	0.1909	0.159 1	0.030 372	9.009 4	30.685 4
	2	0.251 8	0.320 3	0.080 652		
	3	0.796 9	0.417 5	0.332 706		
	4	3.841 7	1.108 2	4.257 372		
	5	14.996 0	6.114 8	91.700 600		
	6	14.186 0	46.953 0	666.106 300		
T ₂	1	0.233 4	0.102 3	0.023 874	21.125 4	35.090 4
	2	0.685 3	0.118 6	0.081 277		
	3	1.435 5	0.290 9	0.417 587		
	4	8.838 2	0.561 5	4.962 649		
	5	61.821 9	1.063 0	65.716 680		
	6	48.713 3	19.017 3	926.395 400		
T ₃	1	0.111 4	0.218 3	0.024 319	19.053 5	103.91
	2	1.382 1	0.246 6	0.340 826		
	3	7.606 8	0.267 9	2.037 862		
	4	14.937 7	12.120 5	181.052 400		
	5	16.441 9	31.157 7	512.291 800		
	6	17.790 5	137.587 8	2447.756 000		



(a) T₁ 仿真结果



(b) T₂ 仿真结果



(c) T₃ 仿真结果

—●— 测量值, ---△--- 计算值

图 3 T₁、T₂、T₃ 回复电压极化谱仿真值与测量值比较

Fig.3 Comparison between simulative and measured values of polarization spectrum for T₁, T₂ and T₃

其中, N 为测量值的个数; x_m 、 x_s 分别为测量值、仿真值。

根据上式, 得出 T₁、T₂、T₃ 的平均相对误差分别为 0.0510、0.0482、0.0485。

从图 3 看出, 仿真值和测量值拟合得很好, 而且仿真值与测量值的平均相对误差较小, 这也说明了仿真值与测量值拟合得很好, 验证了计算参数的正确性。

T₁ 和 T₂ 是同一台变压器, T₁ 是检修前的, T₂ 是检修后的, 且更换了绕组。从计算得出的参数可看

出, T₂ 的最大时间常数支路的时间常数(以下简称最大时间常数)相比 T₁ 有了较大的提高, 绝缘电阻和各支路的极化电阻相比于 T₁ 也有所提高。

T₃ 是新投运的变压器, 和 T₁、T₂ 具有相同的电压等级和容量。T₃ 的最大时间常数远大于检修后的 T₂, 但是各支路的极化电阻和 T₁ 相比并没有提高, 且 T₃ 的绝缘电阻和 T₂ 的绝缘电阻相差也不大。

3.2 同一型号变压器的参数计算及分析

3.2.1 参数计算

第 2 组变压器是 2 台同型号、不同出厂年份的变压器, 其具体的信息列于表 4, 其等效电路参数计算结果如表 5 所示, 仿真结果如图 4 所示。

表 4 变压器 T₄、T₅ 信息

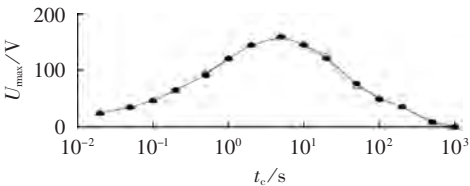
Table 4 Information of transformer T₄ and T₅

变压器	出厂时间	型号	电压等级/kV	容量/(kV·A)
T ₄	1995-08	sp-250/10	10	250
T ₅	2000-12	sp-250/10	10	250

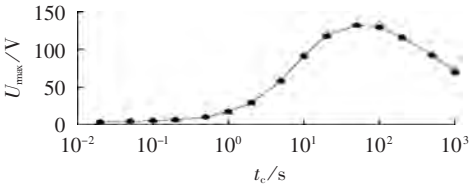
表 5 变压器 T₄、T₅ 的参数计算结果

Table 5 Calculated parameters of transformer T₄ and T₅

变压器	支路	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF	τ_i/s	$R_g/G\Omega$	C_g/nF
T ₄	1	0.031 5	0.656 5	0.020 680	0.584 5	33.113 2
	2	0.102 5	1.016 8	0.104 220		
	3	0.161 2	3.418 9	0.551 127		
	4	0.297 8	9.353 9	2.785 591		
	5	0.791 9	16.067 0	12.723 620		
	6	4.361 2	19.944 0	86.981 520		
T ₅	1	0.241 8	0.072 3	0.017 480	1.666	24.217 3
	2	0.663 7	0.129 4	0.085 880		
	3	2.479 5	0.226 7	0.562 103		
	4	2.904 9	5.058 2	14.693 570		
	5	4.374 8	16.357 5	71.560 790		
	6	8.820 2	56.539 3	498.687 900		



(a) T₄ 仿真结果



(b) T₅ 仿真结果

—●— 测量值, ---△--- 计算值

图 4 T₄、T₅ 回复电压极化谱仿真值与测量值比较

Fig.4 Comparison between simulative and measured values of polarization spectrum for T₄ and T₅

3.2.2 分析

T₄、T₅ 的平均相对误差分别为 0.0336 和 0.0305。

从图 4 看出,仿真值和测量值拟合得很好,而且仿真值与测量值的平均相对误差较小,这也说明了仿真值与测量值拟合得很好,验证了计算参数的正确性。

T₄、T₅ 是同型号的变压器,T₄ 比 T₅ 多运行了 5 a 的时间,其绝缘状态要差于 T₅。从计算出的参数可以看出,T₅ 的绝缘电阻、最大时间常数、各支路的极化电阻均大于 T₄ 的相应参数。

所以,对于同型号的变压器,可根据绝缘电阻、最大时间常数和各支路的极化电阻来比较绝缘状态。

3.3 同电压等级、容量变压器的参数计算及分析

3.3.1 参数计算

第 3 组变压器是 2 台同电压等级、容量,不同出厂时间的变压器,其具体的信息列于表 6,其等效电路参数计算结果如表 7 所示,仿真结果如图 5 所示。

表 6 变压器 T₆、T₇ 信息
Table 6 Information of transformer T₆ and T₇

变压器	出厂时间	型号	电压等级/kV	容量/(MV·A)
T ₆	1993-10	SF08-31500/110	110	31.5
T ₇	2002-01	SZg-31500/110	110	31.5

表 7 变压器 T₆、T₇ 的参数计算结果
Table 7 Calculated parameters of transformer T₆ and T₇

变压器	支路	R _{pi} /GΩ	C _{pi} /nF	τ _i /s	R _g /GΩ	C _g /nF
T ₆	1	0.0359	0.8034	0.028842	2.5607	172.707
	2	0.3538	0.8504	0.300872		
	3	1.0148	2.3472	2.381939		
	4	15.6680	1.1429	17.907300		
	5	13.3640	5.5355	73.979190		
	6	8.1742	68.3800	558.953400		
T ₇	1	0.0147	3.4241	0.050334	2.0790	141.474
	2	0.0575	8.1908	0.470971		
	3	0.2760	15.2320	4.204225		
	4	0.4287	88.9730	38.143030		
	5	0.6079	345.4700	210.014900		
	6	2.4489	444.8700	1089.447000		

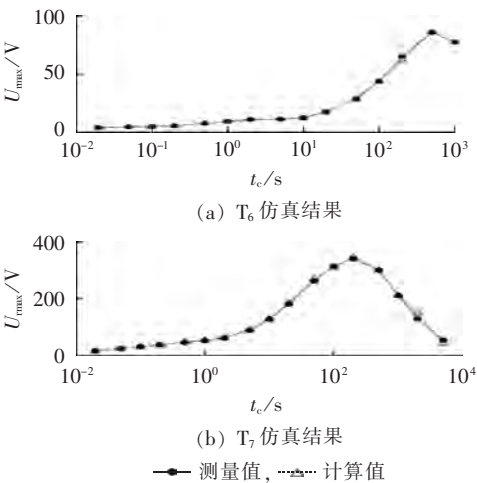


图 5 T₆、T₇ 回复电压极化谱仿真值与测量值比较
Fig.5 Comparison between simulative and measured values of polarization spectrum for T₆ and T₇

3.3.2 分析

T₆、T₇ 的平均相对误差分别为 0.0387 和 0.0462。从变压器按运行时间看出,T₇ 的绝缘状态要优于 T₆ 的绝缘状态。从参数的计算结果可以看出,T₇ 的最大时间常数明显大于 T₆ 的最大时间常数。但是,T₇ 的绝缘电阻和各支路的极化电阻却要小于 T₆ 的相应参数。

所以,对于同电压等级、容量,不同型号的变压器,可以根据最大时间常数来比较绝缘状态的好坏,而不能通过绝缘电阻及各支路的极化电阻来比较绝缘状态的好坏。

4 结语

本文利用果蝇智能算法对 7 台变压器进行了等效电路参数的计算,并且将这些变压器按照电压等级和容量大小分成了 3 组,研究了不同绝缘状态对等效电路参数的影响。

果蝇智能算法能有效地求解出油纸绝缘等效电路的参数。通过对计算结果的比较分析,可以得出绝缘电阻和各支路的极化电阻适用于比较同一型号变压器绝缘状态的好坏。绝缘状态较好的变压器的绝缘电阻和极化电阻,要大于绝缘状态较差的变压器的绝缘电阻和对应支路的极化电阻。最大时间常数可以用于比较同电压等级、同容量变压器的绝缘状态,而不仅局限于同一型号的变压器。且绝缘状态较好变压器的最大时间常数,要大于绝缘状态较差变压器的最大时间常数。

参考文献:

[1] 杨利水,杨旭,徐岩. 电力变压器内部故障的非线性仿真模型[J]. 电网技术,2009,33(20):183-188.
YANG Lishui,YANG Xu,XU Yan. A nonlinear model to calculate post-internal fault parameters of power transformer[J]. Power System Technology,2009,33(20):183-188.
[2] 廖瑞金,郑含博,杨丽君,等. 基于集对分析方法的电力变压器绝缘状态评估策略[J]. 电力系统自动化,2010,34(21):55-60.
LIAO Ruijin,ZHENG Hanbo,YANG Lijun,et al. A power transformer insulation condition assessment method based on set pair analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(21):55-60.
[3] SAHA T K. Review of time domain polarization measurements for assessing insulation condition in aged transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(4):1293-1301.
[4] 向彬. 电力变压器油纸绝缘老化微观机理及热特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
XIANG Bin. Aging micro-mechanism and thermal characteristic of oil-paper insulation in power transformers[D]. Chongqing: Chongqing University,2008.
[5] 王世强,张冠军,魏建林,等. 纸板的老化状态对其 PDC 特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(34):177-183.
WANG Shiqiang,ZHANG Guanjin,WEI Jianlin,et al. Experimental

- study of the aged states effects on pressboard PDC characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 177-183.
- [6] ASHKEZARI A D, MA Hui, SAHA T K, et al. Investigation of non-linearity in dielectric response measurements for transformer insulation diagnosis[C]//Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT). Perth, WA, Australia: IEEE, 2011: 1-7.
- [7] 魏建林, 王世强, 吴凤娇, 等. 变压器绝缘老化引起预试电气绝缘参数变化的仿真研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1618-1623.
- WEI Jianlin, WANG Shiqiang, WU Fengjiao, et al. Simulation on variation of electrical insulation parameters in predictive test caused by insulation aging of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1618-1623.
- [8] 廖瑞金, 孙会刚, 袁泉, 等. 采用回电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.
- [9] 张涛, 蔡金铤. 应用极化谱分析油纸变压器绝缘纸板水分含量的研究[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(4): 46-49.
- ZHANG Tao, CAI Jinding. Research on moisture content analysis of insulation pressboard in oil-paper transformer using polarization spectrum[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(4): 46-49.
- [10] SAHA T K, PURKAIT P, MTILLER F. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 149-157.
- [11] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 162-177.
- [12] 吴小文, 李擎. 果蝇算法和 5 种群智能算法的寻优性能研究[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(4): 17-20.
- WU Xiaowen, LI Qing. Research of optimizing performance of fruit fly optimization algorithm and five kinds of intelligent algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(4): 17-20.
- [13] 潘文超. 果蝇最佳化演算法——最新演化式计算技术[M]. 台湾: 沧海书局, 2011.
- [14] PAN Wentsao. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 26(1): 69-74.
- [15] 于群, 曹娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 28-52.
- [16] 王林. 基于时域介电响应法的变压器油纸绝缘水分含量研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- WANG Lin. Analysis of moisture content in oil-paper insulation using time domain dielectric response method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

作者简介:



郑君亮

郑君亮(1989—), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 研究方向为电力变压器油纸绝缘老化诊断 (E-mail: dayin0591@qq.com);

江修波(1960—), 男, 福建福清人, 教授, 从事电力系统运行、电气设备检测以及电力变压器绝缘老化测试研究;

蔡金铤(1954—), 男, 福建晋江人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 从事人工智能

技术在电力工程和电力电子故障诊断领域的应用研究。

Parameter identification for equivalent circuit of transformer oil-paper insulation and effect of insulation condition on parameters

ZHENG Junliang, JIANG Xiubo, CAI Jinding

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Based on the eigenvalue measurements of return voltage, the fruit flying algorithm is adopted to calculate the equivalent circuit parameters of transformer oil-paper insulation, which are then applied in the simulation model to obtain the polarization spectrum of return voltage. It fits the measurements very well, verifying the correctness of calculated parameters. Seven transformers are divided into three groups according to their voltage level and capacity, their equivalent circuit parameters of oil-paper insulation are calculated and the effect of insulation condition on the parameters is analyzed. The analytical results show that, the transformer with better insulation has bigger insulation resistance, polarization resistance and maximum time constant.

Key words: electric transformers; electric transformer insulation; oil-paper insulation; models; return voltage; fruit fly algorithm; parameter identification; insulation