

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.07.014

基于故障录波数据的串联电抗器故障特征分析及反演模型研究

王坚俊¹, 姚 晖¹, 张 波¹, 邹 晖¹, 齐 浩², 陈 锋²

(1. 国网浙江省电力有限公司检修分公司, 杭州 310000; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 文中以干式空心串联电抗器为研究对象,通过分析电抗器匝间短路故障过程中的电气参数变化规律,提出了基于录波数据时频域分析的串抗匝间短路故障特征及反演模型求解方法。文中通过研究电弧黑盒理论的 Mayr 电弧模型,建立了电抗器匝间电弧性短路故障模型,并进一步建立了基于时变参数的三相并联电容器串联电抗器匝间短路故障反演模型;通过分析反演求解过程中存在的奇异点问题,提出了基于谱配点法的故障串抗等效电感参数的反演求解算法,并建立了串联电抗器匝间短路故障的反演模型。根据反演解释分析了电抗器匝间电弧性短路过程中的电流谐波故障特征,并验证了电抗器匝间短路故障模型及诊断方法的有效性和正确性。

关键词: 串联电抗器; 匝间短路; 时变参数; 参数反演

Fault Characteristics Analysis and Research of Inversion Model of Series Reactor Based on Fault Recording Data

WANG Jianjun¹, YAO Hui¹, ZHANG Bo¹, ZOU Hui¹, QI Hao², CHEN Feng²

(1. Maintenance Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, the dry-type air core series reactor is taken as the research object. The method of characteristic analysis and inversion model solution of inter-turn short circuit fault of series reactor based on transient analysis of recorded data is proposed by analyzing the variation of electrical parameters in the process of inter-turn short circuit fault of reactor. In this paper, the model of inter-turn arc short circuit fault of reactor is set up by studying Mayr arc model of arc black box theory and the inversion model of inter-turn short circuit of three-phase shunt capacitor series reactor based on time-varying parameters is set up further. By analyzing the singular points in the inversion solution process, an inversion solution algorithm of equivalent inductance parameters of fault series reactance based on spectral collocation method is proposed. The inversion model of inter-turn short circuit fault of series reactor is set up. The current harmonic fault characteristics in the process of inter-turn arc short circuit of reactor are analyzed in accordance with the inversion interpretation. The effectiveness and correctness of the fault model and diagnosis method of the inter-turn fault model of reactor are verified.

Key words: series reactor; inter-turn short circuit; time varying parameters; parameter inversion

0 引言

串联电抗器(串抗)主要用于抑制谐波和合闸涌流,限制操作过电压,减小投切电容对电网的冲

击。近年来串抗故障率不断上升,由其故障引起的火灾事故将会严重影响电力系统安全运行。国内外大量资料 and 实际运行经验表明:干式空心电抗器匝间绝缘发生短路故障是造成其烧毁的主要原

收稿日期:2025-01-20; 修回日期:2025-03-22

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211MR200008)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.(5211MR200008).

因。具体来说,电抗器在长期运行过程中,其绕组匝间绝缘层会逐渐老化,在绝缘体中的局部区域发生放电^[1-3]。随着时间的增长,间歇性局部放电会逐渐演变成持续电弧放电,最终导致局部绝缘击穿电抗器发生匝间短路^[4-5]。由于串抗故障后其电抗值下降,导致并联电容器串联电抗器支路电流不增反降,因此用于检测电容器故障的继电保护根本无法检测到串抗故障的存在。目前,国内外还没有专门针对串抗的匝间短路故障保护措施,绝大多数串抗均处在无保护运行状态。因此,分析串抗故障及典型缺陷的发展机理,对及时准确地发现和排除故障具有重要意义。

为了实现故障诊断,电抗器匝间短路在线检测方法逐渐成为新的研究热点^[6-7]。目前主要有:①阻抗检测法^[8-10]。根据电抗器不同位置发生匝间短路故障时电抗器电磁参数、分布电流、电阻值和电抗值的变化规律,基于阻抗变化值或相电压电流相位角偏移变化量来监测电抗器匝间短路故障。②探测线圈检测法^[11-16]。由于电抗器匝间短路故障时短路线圈中电流将产生反向磁场,不仅降低其内部总磁通,而且会破坏空间磁场对称性。因此,利用安装在电抗器上下两端的探测线圈检测其磁通量差值,可用于检测匝间短路故障。③不平衡磁通测量法^[17-20]。当变电站中电抗器的布置方式为品字形时,由于一组电抗器的A、B、C相额定电抗值相等且端电压初相角分别相差 120° ,则其中一台电抗器发生匝间短路故障时,在3台品字形布置电抗器的对称中心处,合成磁通将不再等于0,不平衡磁通测量装置即据此发现故障。④测温检测法^[21-25]。干式空心电抗器匝间短路故障时,短路线圈中的短路电流通常会显著增加电抗器损耗,并导致其异常发热,当热点温升超过温度传感器或热成像故障预警装置中设定的阈值,预警装置将发出报警信号,用于提醒及时切除故障电抗器组。⑤烟感检测法^[26]。根据烟感消防系统机理,当干式空心电抗器因过热而燃烧,烟感探测器便会检测到由此而产生的烟气,据此来达到检测的目的。综上所述,现有的电抗器匝间短路检测方法均以电抗器故障前后的状态变化量设定阈值作为检测依据,不仅存在实时性差,精确度低等故障误报和漏报问题,而且易受到环境干扰因素的影响,因此具有一定的局限性。如当采用不平衡磁通测量法时,电抗器易受到各类电气设备的电磁干扰影响,会造成不平衡磁通测量型故障预警装置误报警或故障漏报。此外,电抗器匝间短路仿真或实验模型均为稳态模型,缺乏根据实际案

例及故障录波数据研究匝间短路故障发展过程的分析方法。

文中以干式空心串联电抗器为研究对象,通过分析电抗器匝间短路故障的发展过程,及其故障过程中电抗器电气参数的变化规律,提出了基于时变参数的电抗器匝间短路故障模型,进而建立了基于故障录波数据的串联电抗器匝间短路故障的反演模型。针对反演求解过程中存在的奇异点问题,提出了基于谱配点法的反演求解算法,通过反演解析分析了电抗器匝间电弧性短路过程中的电流谐波故障特征。

1 基于时变参数的电抗器匝间短路故障模型

1.1 电抗器匝间短路故障时变参数模型

在干式空心电抗器长期运行过程中,当绕组匝间绝缘局部劣化严重时,易造成绝缘薄弱部位击穿,进而逐渐形成匝间电弧放电,在匝间电压的周期激励下,将产生电弧周期性“熄灭—重燃”现象,将其称为匝间电弧性短路^[27-28]。此时,在交变磁场作用下短路线圈中感应出反向短路电流,而巨大的短路电流导致短路点温度急剧上升并造成局部铝导线熔化,从而形成金属熔接短路故障。随着短路线圈中电流持续发热,匝间短路范围迅速扩大,最终在短时间内将电抗器烧毁。为了便于分析,将干式空心电抗器简化为单层空心螺线管,其正常工况和匝间短路故障模型见图1。

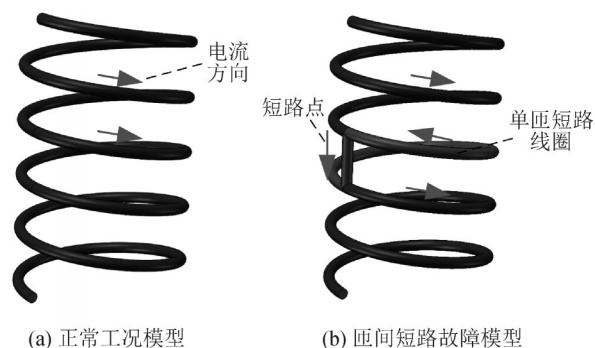


图1 干式空心电抗器简化模型

Fig. 1 Coil turn current of dry type air core reactor

当干式空心电抗器发生匝间短路故障时,其短路线圈可作为二次侧绕组,而电抗器则等效为二次侧短路的变压器模型^[29],其等效模型见图2。

图2中: U 表示电抗器两端的电压; I_1 、 I_2 分别为一、二次侧的电流; R_1 、 R_2 分别为一、二次侧的电阻; L_1 、 L_2 分别为一、二次侧的电感; M 则为一、二次侧之间的互感。在正弦稳态电路中,其电路方程可表示为

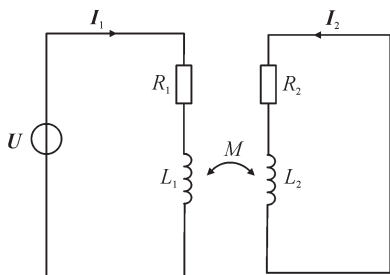


图2 等效变压器模型

Fig. 2 Equivalent transformer model

$$\begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & j\omega M \\ j\omega M & R_2 + j\omega L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

该方程组由一、二次侧两个方程联立组成,其通过互感 M 相互耦合。化简后可得一次侧电路方程为

$$\left[(R_1 + j\omega L_1) + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + j\omega L_2} \right] I_1 = U \quad (2)$$

则其一次侧等效阻抗为

$$Z_1 = (R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}) + j\omega(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}) \quad (3)$$

其虚部,即电抗器等效电感可表示为

$$L_{eq} = L_1 - \frac{M^2}{L_2} \left[\frac{1}{1 + (R_2/\omega L_2)^2} \right] \quad (4)$$

干式空心电抗器匝间电弧放电是一个十分复杂的过程,大体可分为起弧、燃弧、熄弧3个阶段。在匝间电压的周期激励下,电弧放电过程呈现周期性,电弧电阻 R_{arc} 也不再是定值。通常,表示电弧外部电气特性的经典黑盒模型包括 Cassie 电弧模型和 Mayr 电弧模型。其中, Cassie 电弧模型假设电弧的能量及其损耗速率均与气体通道横截面的变化正相关,电弧的能量损耗主要是由气流及其相关的弧柱变化引起。而 Mayr 电弧模型则把电极间隙里损耗的热量当成一个定值,忽略热对流的影响,电弧弧柱的功率主要损耗在对外辐射和热传导上^[30-31]。综上所述,二者的主要区别在于所假设的电弧主要散热方式不同。由于电弧性匝间短路故障发生于电抗器匝间绝缘的微小气隙中,其故障电弧散热方式以热传导为主,因此根据电弧黑盒理论的 Mayr 电弧模型^[32],电弧电阻 $R_{arc}(t)$ 可表示为时间的周期函数^[33-34]。由于电弧电流在一个周期内两次经过零点,该电弧亦熄灭并重燃两次,且设 $R_{arc}(-t) = R_{arc}(t)$,则 $R_{arc}(t)$ 是周期为 0.01 s 的偶函数,见图3。

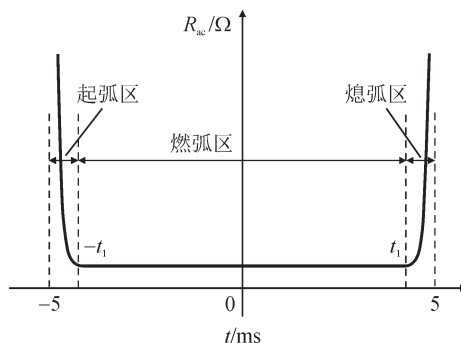


图3 电弧电阻变化曲线

Fig. 3 Equivalent transformer model

由图1可以看出,在短路点处的电弧放电通道是串联在短路线圈中,则短路线圈电阻 $R_2(t) = R_{arc}(t) + R_s$, R_s 为短路线圈导线电阻。由于电弧电阻 $R_{arc}(t)$ 具有周期性,则短路线圈电阻 $R_2(t)$ 也是周期为 0.01 s 的偶函数。

在式(4)右边仅短路线圈电阻 $R_2(t)$ 为时变参数,即电抗器等效电感 L_{eq} 可表示为 $R_2(t)$ 的函数,则 L_{eq} 的傅里叶级数展开式为

$$L_{eq} = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos 200n\pi t \quad (5)$$

式(5)中, a_0 、 a_n 为常数。

由式(5)可以看出,当电抗器发生电弧性匝间短路故障时,其等效电感的频谱特征信息中不仅含有直流分量,而且还包含 100、200 Hz 等分量。

1.2 故障串抗的电感参数反演模型

基于串抗匝间短路故障过程中的录波数据,建立故障串抗电感参数反演模型。

三相并联电容器串联电抗器多采用中性点不接地的星形接法,其等效电路见图4。

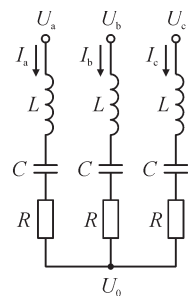


图4 串抗支路等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of series reactor branch

正常工况下的电路方程可表示为

$$\begin{cases} L_a \frac{d^2 i_a}{dt^2} + R \frac{di_a}{dt} + \frac{1}{C} i_a = \frac{du_a}{dt} - \frac{du_0}{dt} \\ L_b \frac{d^2 i_b}{dt^2} + R \frac{di_b}{dt} + \frac{1}{C} i_b = \frac{du_b}{dt} - \frac{du_0}{dt} \\ L_c \frac{d^2 i_c}{dt^2} + R \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} i_c = \frac{du_c}{dt} - \frac{du_0}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: L_a 、 L_b 、 L_c 为 A、B、C 相串联电抗器的电感参数; R 为串抗支路的等效电阻; C 为并联电容器的电容参数; u_0 为中性点电压; u_a 、 u_b 、 u_c 为 A、B、C 相串抗支路相电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为 A、B、C 相串抗支路相电流。

不失一般性,假设 A 相串抗发生匝间短路故障,代入故障串抗的时变等效电感 $\tilde{L}_a$ 的关系式 $\frac{du_{1a}}{dt} = i_a \frac{d^2 \tilde{L}_a}{dt^2} + 2 \frac{di_a}{dt} \frac{d\tilde{L}_a}{dt} + \frac{d^2 i_a}{dt^2} \tilde{L}_a$, 其中 u_{1a} 为 A 相串抗的电压。则故障相电路方程转化为

$$\frac{du_a}{dt} - \frac{du_0}{dt} = i_a \frac{d^2 \tilde{L}_a}{dt^2} + 2 \frac{di_a}{dt} \frac{d\tilde{L}_a}{dt} + \frac{d^2 i_a}{dt^2} \tilde{L}_a + \frac{di_a}{dt} R + \frac{i_a}{C} \quad (7)$$

式(7)中,中性点电压的一阶导 du_0/dt 可根据 B 相或 C 相的电流电压录波数据求出,以 B 相为例,可得

$$\frac{du_0}{dt} = \frac{du_b}{dt} - L_b \frac{d^2 i_b}{dt^2} - R \frac{di_b}{dt} - \frac{1}{C} i_b \quad (8)$$

当串抗故障录波数据 u_a 、 i_a 及额定参数 R 、 C 、 L_b 已知时,即可根据式(7)反演求解故障串抗的等效电感参数 $\tilde{L}_a$ 。

当 B 相或 C 相串抗发生匝间短路故障时,其等效电感的求解方法同理。

2 基于录波数据和谱配点法的反演算法

2.1 奇异值问题

通常,电力系统中的 CT 和 PT 录波数据为离散数据,采样频率为 3 200 Hz,因此在进行反演求解时需采用微分方程的数值解法。而故障串抗的等效电感参数反演模型的初值问题可表示为

$$\frac{d^2 \tilde{L}_a}{dt^2} + f_1 \frac{d\tilde{L}_a}{dt} + f_2 \tilde{L}_a = f_3 \quad (9)$$

式(9)中:

$$f_1 = 2 \frac{di_a}{dt} \frac{1}{i_a} \quad (10)$$

$$f_2 = \frac{d^2 i_a}{dt^2} \frac{1}{i_a} \quad (11)$$

$$f_3 = \left(\frac{du_a}{dt} - \frac{du_0}{dt} - \frac{di_a}{dt} R - \frac{i_a}{C} \right) \frac{1}{i_a} \quad (12)$$

在式(9)中,代入新的变量 $L_1 = \tilde{L}_a$, $L_2 = \tilde{L}'_a$, 其可转换为一阶微分方程组,即

$$\begin{cases} L'_1 = L_2 \\ L'_2 = f_3 - f_2 L_2 - f_1 L_1 \end{cases} \quad (13)$$

采用显式欧拉公式求解该初值问题,可得

$$\begin{cases} L_1(t_{i+1}) = L_1(t_i) + hL_2(t_i) \\ L_2(t_{i+1}) = L_2(t_i) + h[f_1(t_i) - f_2(t_i)L_2(t_i) - f_3(t_i)L_1(t_i)] \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中, h 为采样步长。

当电流 i_a 为正弦交流电,其导数 di_a/dt 为余弦函数。则在 f_2 表达式(11)中,当电流 i_a 过零时,而其电流导数则取非零值,则两者比值 f_2 趋于无穷大。此时,采用显式欧拉公式计算电流过零点时,将会引入误差,导致计算结果严重偏离实际值。与欧拉法类似,龙格库塔法、亚当斯显式法等数值算法都存在奇异点问题。

以 35 kV/12% 并联电容器串联电抗器为例,额定参数见表 1。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter setting

参数	数值
额定相电压/kV	20.20
串联电抗器/mH	11.40
并联电容器/ μ F	110.18
等效电阻/ Ω	0.30

将三相额定电流和电压数据代入式(14)中,计算出的电感参数见图 5。

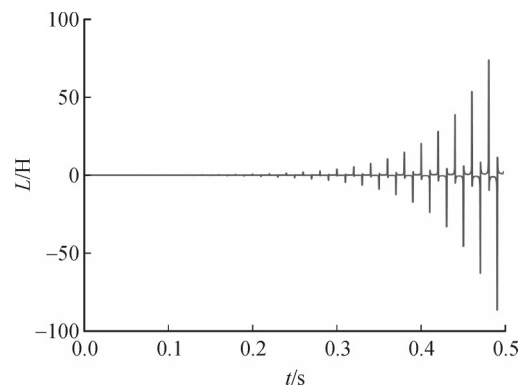


图 5 欧拉法反演结果

Fig. 5 Euler inversion results

由反演计算结果可以看出,采用欧拉法求解电感参数时,在每个电流过零点处均存在误差累积,其计算结果随时间逐渐发散。

2.2 反演算法

文中采用谱配点法^[35]求解式(7)。谱配点法通过将待求电感 $\tilde{L}_a$ 近似地展开为拉格朗日插值多项式 $L(t)$, 并进一步求其一、二阶导展开式 $L'(t)$ 、 $L''(t)$ 。将 $L(t)$ 、 $L'(t)$ 和 $L''(t)$ 代入式(7)中,可将其转化为待求电感 $\tilde{L}_a$ 的线性方程组,从而避免了奇异点问题的出现。该方法以勒让德(Legendre)配置点作为插值节点^[36]。

由于故障相电流 i_a 数据中存在周期性的过零点,在求解该问题前,需根据电流过零时刻将自变

量 t 区间划分为一系列子区间, 进而在各个子区间内进行数值求解。假设 $t \in [t_{\text{init}}, t_{\text{term}}]$ 区间内电流 i_a 有 n 个过零点 $z_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 则求解区间可划分为 $n+1$ 子区间 $[t_{\text{init}}, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_n, t_{\text{term}}]$, 其表达式为

$$t_1 = \frac{z_1 - t_{\text{init}}}{2} \quad i = 1 \quad (15)$$

$$t_i = \frac{z_i - z_{i-1}}{2} \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (16)$$

$$t_n = \frac{t_{\text{term}} - z_n}{2} \quad i = n \quad (17)$$

在该 $n+1$ 子区间内可根据勒让德多项式分别设置 $k+1$ 个插值节点。其中, k 阶勒让德多项式可表示为

$$p_k(\tau) = \frac{(-1)^k}{2^k k!} \frac{d^k}{d\tau^k} [(\tau^2 - 1)^k] \quad k = 0, 1, \dots \quad (18)$$

设 $\tau_j \in [-1, 1], j = 0, \dots, k$ 是 $P_k'(\tau) = 0$ 的根, 此时, 需要将 $\tau_j \in [-1, 1]$ 区间映射到 $T_j \in [t_i, t_{i+1}]$, 其映射关系为

$$T_j = \frac{t_{i+1} - t_i}{2} \tau_j + \frac{t_{i+1} + t_i}{2} \quad (19)$$

设在各子区间的配置点 T_j 上的待求电感值为 y_j , 则利用拉格朗日插值多项式, 其在各子区间内可表示待求电感 $L(t)$ 为

$$L(t) = \sum_{j=0}^k y_j l_j(t) \quad (20)$$

其基函数 $l_j(t)$ 可表示为

$$l_j(t) = \frac{(t - T_0) \cdots (t - T_{j-1})(t - T_{j+1}) \cdots (t - T_k)}{(T_j - T_0) \cdots (T_j - T_{j-1})(T_j - T_{j+1}) \cdots (T_j - T_k)} \quad (21)$$

对式(20)求一阶导, $L'(t)$ 可表示为

$$L'(t) = \sum_{j=0}^k y_j l_j'(t) = \sum_{j=0}^k y_j d_{lj} \quad (22)$$

设一阶微分矩阵为 $D = (d_{lj})_{(k+1) \times (k+1)}$, 元素 d_{lj} 表示第 j 个基函数的一阶导在插值点 t_{l-1} 处的值, 有^[37]

$$d_{lj} = \begin{cases} \frac{p_k(t_l)}{(t_l - t_j)p_k(t_j)} & l \neq j \\ -\frac{k(k+1)}{4} & l = j = 0 \\ \frac{k(k+1)}{4} & l = j = k \\ 0 & l = j \quad (l, j = 1, 2, \dots, k-1) \end{cases} \quad (23)$$

进一步求二阶导 $L''(t)$, 可得

$$L''(x) = \sum_{j=0}^k y_j l_j''(x) = \sum_{j=0}^k y_j \tilde{d}_{lj} \quad (24)$$

设二阶微分矩阵为 $\tilde{D} = (\tilde{d}_{lj})_{(k+1) \times (k+1)}$, 元素 $\tilde{d}_{lj}$ 表示第 j 个基函数的二阶导在插值点 t_{l-1} 处的值, 有

$$\tilde{D} = D^2 \quad (25)$$

利用式(23)、(25)即可快速求得 $L(x)$ 一阶与二阶

微分矩阵, 其既易于编程又便于计算。将 $L(x)$, $L'(x)$, $L''(x)$ 的插值多项式代入式(7)中, 即可将其转化为待求展开系数 $y_0, y_1, \dots, y_k$ 的线性方程组, 即

$$\begin{cases} f_4(t_0) \sum_{j=0}^k \tilde{D}_{0j} y_j + f_5(t_0) \sum_{j=0}^k D_{0j} y_j + f_6(t_0) y_0 = f_7(t_0) \\ f_4(t_1) \sum_{j=0}^k \tilde{D}_{1j} y_j + f_5(t_1) \sum_{j=0}^k D_{1j} y_j + f_6(t_1) y_1 = f_7(t_1) \\ \vdots \\ f_4(t_k) \sum_{j=0}^k \tilde{D}_{kj} y_j + f_5(t_k) \sum_{j=0}^k D_{kj} y_j + f_6(t_k) y_k = f_7(t_k) \end{cases} \quad (26)$$

$$\text{式(26)中: } f_4 = i_a; \quad f_5 = 2 \frac{di_a}{dt}; \quad f_6 = \frac{d^2 i_a}{dt^2};$$

$f_7 = \frac{du_a}{dt} - \frac{du_a}{dt} - \frac{di_a}{dt} R - \frac{i_a}{C}$ 。联立求解式(26)得各插值点处的电感值。

文中提出基于谱配点法的串抗匝间短路故障电感参数的反演算法流程为: ①根据故障相电流数据的过零点时刻划分求解子区间; ②在各子区间内根据勒让德多项式设置插值节点, 采用区间映射获得各个区间内的插值节点, 并分别构造 $k+1$ 次拉格朗日插值基函数 $l_0, l_1, \dots, l_k$; ③构造待求电感 L 的 k 次插值多项式 $L(t)$; ④对 $L(t)$ 求导得到 $L'(t)$ 、 $L''(t)$; ⑤将 $L(t)$ 、 $L'(t)$ 、 $L''(t)$ 代入式(7), 将其转化为待求电感参数的线性方程组, 并联合求解。

3 反演模型验证与故障特征分析

3.1 反演模型验证

为验证文中提出的故障串抗等效电感参数反演算法的有效性, 以 35 kV/12% 并联电容器串联电抗器为例, 其额定参数见表 1。

根据正常工况下的录波数据, 将三相电流和电压数据代入基于谱配点法的反演算法中, 计算出的电感参数值见图 6。

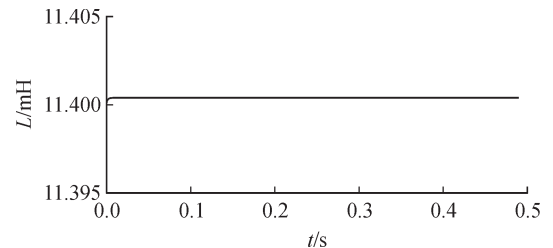


图 6 谱配点法反演结果

Fig. 6 Inversion results of spectral collocation method

对比图 5、6 可知, 基于谱配点法的反演算法避免了欧拉法中的奇异点问题, 反演结果不随时间发散。此外, 电感参数反演结果的相对误差小于 0.001%, 其与串抗额定值基本一致。

以一起 35 kV/12% 的 B 相串抗匝间短路故障为例,其并联电容器和串联电抗器的额定参数见表 1。根据故障过程的录波数据,采用基于谱配点法的反演算法求解 B 相故障串抗的等效电感参数,其时变电感值见图 7,而其傅里叶分解的频谱信息见图 8。

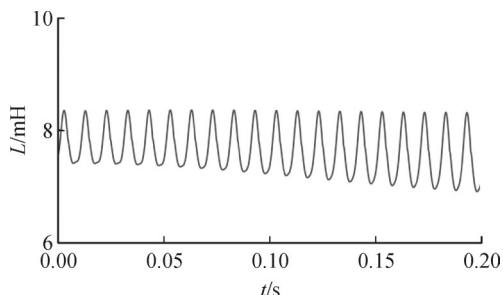


图7 反演计算得到的故障串抗电感波形

Fig. 7 The waveform of fault series reactance inductor obtained by inversion calculation

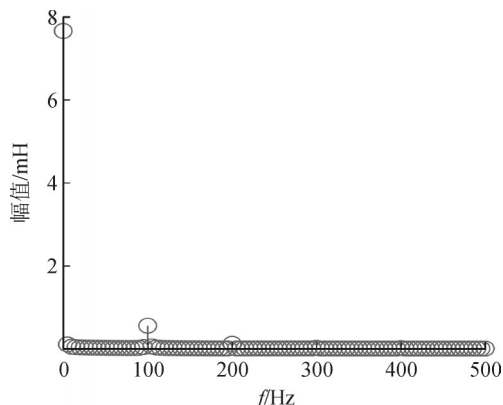


图8 反演计算得到的故障串抗电感频谱

Fig. 8 The spectrum of fault series reactance inductor obtained by inversion calculation

由图 7 可以看出,在该起事故中,通过故障录波数据计算出的故障串抗电感参数存在周期性振荡。而在图 8 中,电感值的频谱信息中除含有直流分量外,还包含一定比例的 100、200 Hz 分量,该实验结果与文中 1.1 节的理论分析结论一致。

3.2 故障特征分析

根据正常工况和串抗匝间短路故障的录波数据,分别对其电压和电流数据做傅里叶分解,其谐波频谱分量见图 9-12。对比正常工况和串抗故障时的电压电流录波数据的频谱信息可以看出,两种工况下的电压谐波频谱图 9、11 相比,其谐波含量未出现明显变化;同时,在图 11 中,图 11(b)中的谐波含量与其余两相电压数据图 11(a)、(c)相比亦未出现明显差别;但是, B 相故障串抗的电流数据图 12(b)中, 3、5 次谐波含量出现激增,此时,在其余两相电流数据图 12(a)、(c)中的 3、5 谐波含量约等于故障相的 1/2。

由以上分析可以看出,串抗在发生匝间短路故障过程中,在匝间电压的周期激励下,将出现电弧周期性“熄灭—重燃”现象,同时电抗器也在正常工况与匝间短路故障状态之间周期性转换,此时,故障串抗相当于一个谐波源,在串抗电感参数值的动态变化过程中,在故障相支路电流中激发出特定频次的谐波分量。

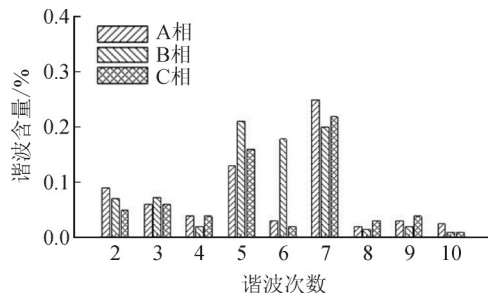


图9 正常工况下三相电压数据的谐波含量

Fig. 9 Harmonic content of three phase voltage data under normal conditions

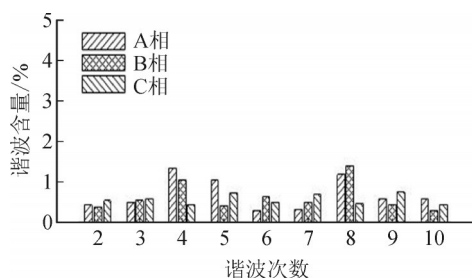


图10 正常工况下三相电流数据的谐波含量

Fig. 10 Harmonic content of three phase current data under normal conditions

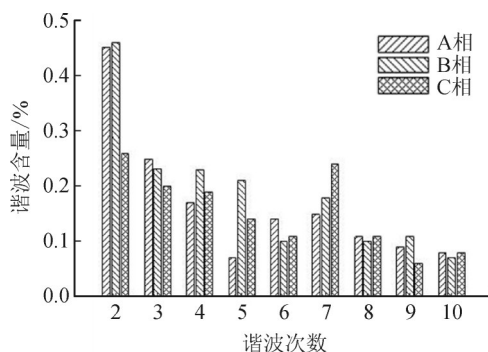


图11 B相串抗故障时三相电压数据的谐波含量

Fig. 11 Harmonic content of three phase voltage data in B-phase series reactance fault

4 结论

文中提出了基于故障录波数据的串抗故障特征分析及反演模型求解算法,具体来说,文中做了以下 3 方面工作。

1)提出了基于谱配点法的故障串抗等效电感参数反演算法,在基于故障录波数据的串抗匝间短路

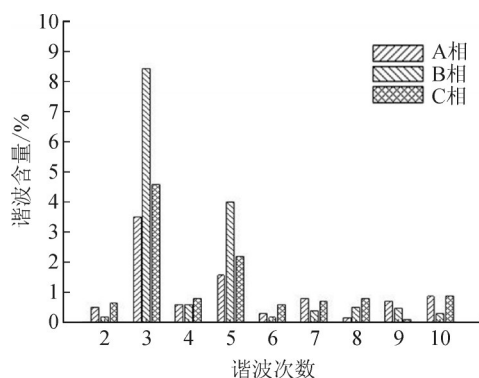


图12 B相串抗故障时三相电流数据的谐波含量

Fig. 12 Harmonic content of three phase current data in B-phase series reactance fault

故障模型中,采用该反演算法可准确求出串抗时变电感参数。

2)在深入分析串抗匝间短路故障过程的基础上,揭示其等效电感存在周期性振荡的物理机理,理论分析和实验验证了其时变电感参数频谱信息中除包含直流分量外,还含有一定比例的100、200 Hz分量。

3)分析并研究串抗的匝间短路故障特征,即故障串抗相当于一个谐波源,在故障相电流中将会发出具有3、5次谐波分量的显著故障特征。

参考文献:

- [1] 姜志鹏. 干式空心电抗器多物理场分析及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
JIANG Zhipeng. Multi-physics analysis and application research of dry-type air-core reactor[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [2] 梁基重, 李国栋, 李 帅, 等. 干式空心电抗器股间短路故障仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6): 22-29.
LIANG Jizhong, LI Guodong, LI Shuai, et al. Study on simulation of strand-to-strand short circuit fault for dry-type air core reactor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43 (6): 22-29.
- [3] 范茜勉. 电抗器匝间短路的影响及检测方法[D]. 北京: 华北水利水电大学, 2016.
FAN Qianmian. The influence of reactor turn-to-turn short circuit and its detection method[D]. Beijing: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.
- [4] 李阳林, 万军彪, 黄 瑛. 10 kV 干式空心串联电抗器故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 58-61.
LI Yanglin, WAN Junbiao, HUANG Ying. Fault analysis on 10 kV dry-type air-core series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3): 58-61.
- [5] 尹 晶, 郭慧浩, 林海丹, 等. 干式空心电抗器包封绝缘裂纹图像识别方法的设计与实现[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43 (6): 30-37.
YIN Jing, GUO Huihao, LIN Haidan, et al. Design and implementa-

tion of image recognition method for encapsulation crack of dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(6): 30-37.

- [6] 林其友, 刘全峰, 梁艺超, 等. 空心电抗器匝间短路故障监测方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(5): 96-100.
LIN Qiyu, LIU Quanfeng, LIANG Yichao, et al. Research of monitoring method for interturn short circuit fault of air-core reactor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36 (5): 96-100.
- [7] 贾跟卯, 金山樱, 骆福权, 等. 基于3次谐波电流监测相控电抗器匝间短路的方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6): 38-44.
JIA Genmao, JIN Shanying, LUO Fuquan, et al. Method of monitoring inter-turn short circuit for thyristor controlled reactor based on 3rd harmonic current[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(6): 38-44.
- [8] 张庆莹. 基于阻抗变化量的干式空心电抗器匝间短路监测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
ZHANG Qingying. Research on inter-turn short circuit monitoring method of dry air-core reactor based on impedance variation[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [9] 龙玉琨, 王 贺. 一起10 kV 变压器绕组匝间短路引起的系统接地报警故障分析[J]. 变压器, 2023, 60(10): 72-75.
LONG Yujun, WANG He. Analysis of a 10 kV transformer winding inter-turn short circuit fault[J]. Transformer, 2023, 60(10): 72-75.
- [10] 孙 翔, 何文林, 詹江杨, 等. 电力变压器绕组变形检测与诊断技术的现状与发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1207-1220.
SUN Xiang, HE Wenlin, ZHAN Jiangyang, et al. Current status and development of test and diagnostic technique of transformer winding deformation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1207-1220.
- [11] 蒋云飞, 杨宣访, 张 超. 发电机转子绕组匝间短路故障检测[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(6): 40-45.
JIANG Yunfei, YANG Xuanfang, ZHANG Chao. Survey of detecting methods about inter-turn short circuit fault in rotor windings of generator[J]. Electric Machines & Control Application, 2011, 38(6): 40-45.
- [12] 邵卫超, 孙士涛, 袁 博, 等. 抽水蓄能发电电动机转子匝间短路的重复脉冲法诊断研究[J]. 大电机技术, 2022(1): 13-20.
SHAO Weichao, SUN Shitao, YI Bo, et al. Study on the diagnosis for inter-turn short-circuit of pumped storage generator-motor rotor by repetitive surge oscilloscope method[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2022(1): 13-20.
- [13] 张秀群. 干式空心电抗器匝间短路故障的空间磁场分布研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
ZHANG Xiuqun. Analysis on spatial magnetic field distribution of dry-type air-core reactor inter-turn short-circuit fault[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [14] 李天辉, 夏彦卫, 臧 谦, 等. 发电机转子匝间短路故障电磁场数值分析研究[J]. 大电机技术, 2023(5): 7-12.
LI Tianhui, XIA Yanwei, ZANG Qian, et al. Electromagnetic field study on rotor winding inter-turn short circuit fault of generator based on numerical analysis[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(5): 7-12.

- [15] 梁正波,康 博,赵彦珍.干式半芯电抗器匝间短路故障在线检测方法研究[C]//2009年全国电工理论与新技术年会(CTATEE'09).杭州:中国电机工程学会理论电工专业委员会,中国电工技术学会理论电工专业委员会,浙江大学,2009:148-151.
LIANG Zhengbo, KANG Bo, ZHAO Yanzhen. Research on on-line detection method of dry-type half-core reactor inter-turn short circuit fault[C]//National Electrical Theory and New Technology Annual Conference (CTATEE'09). Hangzhou: Theoretical Electrical Engineering Committee of the Chinese Society of Electrical Engineering, Theoretical Electrical Engineering Committee of the Chinese Electrotechnical Society, Zhejiang University, 2009: 148-151.
- [16] 徐俊元,胡 磊,王晓剑,等.基于PCC-SVM的发电机转子匝间短路在线监测法[J].大电机技术,2023(6):35-41.
XU Junyuan, HU Lei, WANG Xiaojian, et al. An On-line monitoring method for inter-turn short circuit fault of generator rotor winding based on PCC-SVM[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(6): 35-41.
- [17] 杨国斌,钱 江,陈军潮,等.探讨干式电抗器匝间短路故障与漏磁场的关系[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(2):60-63.
YANG Guobin, QIAN Jiang, CHEN Junchao, et al. Discussion on the relation between inter-turn short circuit fault and leakage magnetic field of dry type reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(2): 60-63.
- [18] 周 超,王 伟,魏超政.计及断股角度的高压输电导线钢芯漏磁场矢量计算与分布规律研究[J].电力科学与技术学报,2023,38(3):205-215.
ZHOU Chao, WANG Wei, WEI Chaozheng. Research on vector calculation and distribution of steel core magnetic flux leakage in high voltage transmission conductor considering broken strand angle[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 205-215.
- [19] 齐伟强,陈柏超,董健鹏,等.铁心电抗器匝间短路的空间磁场分布[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(1):86-91.
QI Weiqiang, CHEN Baichao, DONG Jianpeng, et al. Spatial magnetic field distribution on inter-turn short circuit fault of iron core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 86-91.
- [20] 刘家骥.油浸式变压器漏磁场及绕组短路振动分析[J].变压器,2023,60(8):13-18.
LIU Jiaji. Analysis of leakage magnetic field and windings vibration of oil-immersed transformers[J]. Transformer, 2023, 60(8): 13-18.
- [21] 郭小兵,束洪春,朱 涛,等.FBG无线测温系统在干式空心电抗器监测中的应用[J].传感器与微系统,2016,35(6):149-150.
GUO Xiaobing, SHU Hongchun, ZHU Tao, et al. Application of FBG wireless temperature measurement system in monitoring of dry type air-core reactor[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2016, 35(6): 149-150.
- [22] 裴运军,林良顺,胡 泰.一种改良型干式空心电抗器的无线测温装置设计[J].电网与清洁能源,2016,32(10):79-82.
PEI Yunjun, LIN Liangshun, HU Tai. Design of wireless temperature measurement device based on an improved dry type air core reactor[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2016, 32(10): 79-82.
- [23] 王 梓,刘 溟,邹建明,等.基于TVOC检测的干式空心电抗器过热故障诊断方法[J].高电压技术,2017,43(11):3756-3762.
WANG Zi, LIU Ming, ZOU Jianming, et al. Diagnostic method of dry-type air-core reactors overheating fault based on monitoring TVOC[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3756-3762.
- [24] 代晓丰,陈泽涛,刘秦铭,等.基于红外传感的配电房变压器高温过热故障识别研究[J].电网与清洁能源,2022,38(9):73-79.
DAI Xiaofeng, CHEN Zetao, LIU Qinming, et al. Research on identification of transformer overheating faults in the distribution room based on infrared temperature measurement technology[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 73-79.
- [25] 王 南,李 东,周志强,等.一起500 kV高压电抗器内部过热故障案例分析[J].变压器,2022,59(2):72-80.
WANG Nan, LI Dong, ZHOU Zhiqiang, et al. Case analysis of a 500 kV HV reactor internal overheating fault[J]. Transformer, 2022, 59(2): 72-80.
- [26] 吴彦霖,谭向宇,马 仪,等.电场分布以及匝数偏差暂态电力对干式空心并联电抗器影响的研究[J].高压电器,2016,52(10):99-107.
WU Yanlin, TAN Xiangyu, MA Yi, et al. Study of the influence of electric field distribution and turns deviation transient electrodynamic force on dry-type air-core shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 99-107.
- [27] 李文杰,许国龙,罗光鸿.干式空心电抗器故障类型及成因研究[J].电力设备管理,2020(8):63-64.
LI Wenjie, XU Guolong, LUO Guanghong. Research on fault types and causes of dry-type air-core reactor[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(8): 63-64.
- [28] 郭 哲,郭志广,贾跟卯,等.空心并联电抗器匝间故障三阶段特性分析及综合保护方法[J].电力系统自动化,2020,44(8):149-156.
GUO Zhe, GUO Zhiguang, JIA Genmao, et al. Three-stage characteristic analysis on inter-turn fault and comprehensive protection method for air-core shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 149-156.
- [29] 宋冬冬,程 林,林志法,等.电弧热等离子体建模、仿真及应用综述[J].高电压技术,2018,44(3):932-943.
SONG Dongdong, CHENG Lin, LIN Zhifa, et al. Review of arc thermal plasma modeling, simulation and application[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 932-943.
- [30] 杨明波,龙 毅,樊三军,等.基于组合Mayr和Cassie电弧模型的弧光接地故障仿真及分析[J].电测与仪表,2019,56(10):8-13.
YANG Mingbo, LONG Yi, FAN Sanjun, et al. Simulation and analysis of arc grounding fault based on combined Mayr and Cassie arc models[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(10): 8-13.
- [31] 王仁甫.电弧现象模型的发展[J].高压电器,1991,27(4):39-46.
WANG Renfu. The development of model of arc phenomenon[J]. High Voltage Apparatus, 1991, 27(4): 39-46.
- [32] 王启龙,王博文,管红立,等.低压交流串联故障电弧模型及实验[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(2):26-29.
WANG Qilong, WANG Bowen, GUAN Hongli, et al. Model and

- study on deep embedded clustering and its improved methods based on node daily load curve[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 130-137.
- [14] 孙梧雨, 龚俊, 袁霞, 等. 针对国产数据记录系统的高可靠嵌入式软件设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(2): 68-71.
- SUN Wuyu, GONG Jun, YUAN Xia, et al. Design of highly reliable embedded software for domestic data recording system[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(2): 68-71.
- [15] 王浩, 吴根平, 刘志宏, 等. 多总线数据转换系统的设计与实现[J]. 测控技术, 2020, 39(10): 83-86.
- WANG Hao, WU Genping, LIU Zhihong, et al. Design and implementation of multi-bus data conversion system[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(10): 83-86.
- [16] 邵龙. 多总线结构MHAL路由方法[J]. 电讯技术, 2020, 60(10): 1228-1232.
- SHAO Long. MHAL routing approach for multi-bus architecture[J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(10): 1228-1232.
- [17] 姚龙辉, 张凯龙, 周兴社, 等. 工业网络化服务软件的关键构造技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(12): 3390-3392.
- YAO Longhui, ZHANG Kailong, ZHOU Xingshe, et al. Research on key construction technology of networked service software for industrial equipments[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(12): 3390-3392.
- [18] 薛光辉, 王凡, 于浩, 等. 基于恒定应力加速寿命试验的SF₆气体密度表可靠性研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 194-202.
- XUE Guanghui, WANG Yifan, YU Hao, et al. Reliability study of SF₆ gas density meter based on constant stress accelerated life test[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 61(6): 194-202.
- [19] 于惟坤, 朱若源, 陈旭, 等. 基于双尺度相似性和改进DBSCAN算法的低压配电台区相序识别方法[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 74-88.
- YU Weikun, ZHU Ruoyuan, CHEN Xu, et al. Phase sequence identification method for low-voltage distribution stations area based on dual-scale similarity and improved DBSCAN algorithm[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 74-88.
- [20] 王科, 张福雷, 严彩忠. 驱动器集成多种工业实时总线的方法[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(11): 3-5.
- WANG Ke, ZHANG Fulei, YAN Caizhong. A method of drivers integrate multiple real-time industrial buses[J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(11): 3-5.
- 李志刚(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为六氟化硫气体及设备监督与管理、高电压技术以及带电检测(E-mail: leezg04@163.com)。
- 赵鹏辉(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为特高压电磁环境检测技术(通信作者)(E-mail: zhaophl@buaa.edu.cn)。
-
- (上接第122页)
- experiment of low-voltage AC series fault arc[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(2): 26-29.
- [33] 孟涛, 林莘, 徐建源. 分段电弧模型下VFTO的计算与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 69-73.
- MENG Tao, LIN Xin, XU Jianyuan. Calculation of very fast transient over-voltage on the condition of segmental arcing model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 69-73.
- [34] 林莘, 王娜, 徐建源. 动态电弧模型下特快速瞬态过电压特性的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 157-164.
- LIN Xin, WANG Na, XU Jianyuan. Calculation and analysis of very fast transient over-voltage characteristic on the condition of dynamic arcing model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 157-164.
- [35] 王天军. 一类线性奇异边值问题的谱配置方法[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 75-78.
- WANG Tianjun. Spectral collocation method for a kind of linear singular boundary value problems[J]. Journal of Henan University of Science & Technology(Natural Science), 2013, 34(6): 75-78.
- [36] 张强, 刘林. 关于勒让德多项式的算法问题[J]. 紫金山天文台台刊, 1996(4): 15-39.
- ZHANG Qiang, LIU Lin. The problem on the algorithm of legendre polynomial[J]. Publications of Purple Mountain Observatory, 1996(4): 15-39.
- [37] 殷艳红. 一类奇异边值问题的Legendre谱配点方法[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
- YIN Yanhong. Legendre spectral collocation method for a kind of singular boundary value problems[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014.
- 王坚俊(1973—), 男, 高级工程师, 从事500 kV及以上变电设备管理工作(E-mail: smileroger@163.com)。
- 姚晖(1975—), 男, 高级工程师, 从事500 kV及以上变电设备管理工作。
- 张波(1983—), 男, 高级工程师, 从事无功设备运行及管理工作。
- 邹晖(1981—), 男, 高级工程师, 从事500 kV及以上变电设备运维检修管理工作。
- 齐浩(1996—), 男, 硕士研究生, 从事电力设备在线监测、串联电抗器匝间保护技术工作(通信作者)(E-mail: xianyunx@163.com)。
- 陈锋(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力设备的优化设计与特性分析。