

# 采用重复脉冲法诊断发电机转子绕组匝间短路故障

贾志东<sup>1</sup>, 陈海<sup>1</sup>, 张征平<sup>2</sup>, 夏英来<sup>1</sup>, 关志成<sup>1</sup>, 姚森敬<sup>3</sup>

(1. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 广东电网公司电力科学研究院, 广州 510000;  
3. 深圳供电局有限公司, 深圳 518000)

**摘要:** 重复脉冲法(repetitive surge oscilloscope, RSO)是用于诊断发电机转子绕组匝间短路的试验技术。为此, 介绍了重复脉冲法的基本原理, 讨论了脉冲信号在电机转子绕组内的传播过程。依据传播特性, 建立了反映该传播过程的分布参数电路模型并采用时域有限差分法求解得出绕组内部的暂态波形曲线, 分析了该算法的稳定性。然后基于该模型讨论了注入信号的上升沿时间和转子绕组的故障特征对匝间短路故障诊断精度的影响。研究结果表明: 重复脉冲法适于对转子绕组进行跟踪分析, 其诊断结果的影响因素主要包括匝间短路故障位置和注入信号的上升沿时间, 可通过缩短注入信号的上升沿时间来提高诊断精度。

**关键词:** 转子绕组; 匝间短路; 重复脉冲法(RSO); 波过程; 时域有限差分法(FDTD); 上升沿时间

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.11.021

**文章编号:** 1003-6520(2012)11-2927-07

## Inter-turn Short Faults Dignosis on Rotor Windings of Generator Using Repetive Surge Oscilloscope

JIA Zhidong<sup>1</sup>, CHEN Hai<sup>1</sup>, ZHANG Zhengping<sup>2</sup>, XIA Yinglai<sup>1</sup>, GUAN Zhicheng<sup>1</sup>, YAO Senjing<sup>3</sup>

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;  
2. Guangdong Electric Power Research Institute, Guangzhou 510000, China;  
3. Shenzhen Power Supply Bureau Limited, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** RSO(repetitive surge oscilloscope) is a technique which is applied in the detection of inter-turn shorts in generator rotors. We introduce the basic principle of RSO, and discuss the propagation of the pulse signal in the rotor windings. According to the property of the propagation, a distribution parameter circuit model which can reflect the propagation of the signal is established, the finite difference time domain (FDTD) method is used to obtain the waveform of the rotor windings, and the stability of the algorithm is analyzed. Moreover, influences of rising time of the injected signal are discussed, and the influences of fault signature in rotor windings are also discussed. The conclusion can be drawn as follows: RSO is suitable for follow-up analysis, the influential factors of the diagnosis include the location of the inter-turn shorts and the rising time of injected signal. The diagnostic accuracy can be improved by shortening the rising time.

**Key words:** rotor winding; inter-turn shorts; repetitive surge oscilloscope(RSO); wave process; finite difference time domain(FDTD); rising time

## 0 引言

转子绕组的匝间短路故障是影响发电机正常运行的主要因素之一。如果匝间短路故障不能被及时发现, 发电机长期运行下去, 容易造成短路点绝缘烧损接地、线棒过热变形甚至进一步发展造成转子烧损事故<sup>[1-6]</sup>。因此, 准确诊断转子绕组匝间短路故障具有重要意义。

为了及时发现转子绕组的匝间短路故障, 目前主要的诊断方法有直流电阻法、匝间压降法、交流阻抗法、气隙波形法、重复脉冲法(repetitive surge oscilloscope, RSO)等。其中, 重复脉冲法的试验操作简单且能够用于发现早期的匝间短路故障, 灵敏度高, 能够对尽早发现并排除发电机转子绕组的匝间短路故

障起到一定的作用, 具有很高的实际操作价值<sup>[6-8]</sup>。

为了研究重复脉冲法中由故障引起的动态学特征, 更有效地掌握和提取故障信号, 根据重复脉冲法的试验原理, 首先需要建立转子绕组的传输线模型。30多年来, 国内外针对转子绕组的传输模型主要有简单导体对地传导模型和考虑线圈参数变化的多导体传输线模型<sup>[9-12]</sup>。

本文基于转子绕组的绝缘结构, 在忽略转子绕组间耦合关系的基础上, 建立了转子绕组线圈的分布参数电路模型<sup>[13-16]</sup>且采用时域有限差分法进行求解<sup>[17-23]</sup>, 对重复脉冲法中转子绕组内的暂态波过程进行了分析, 并讨论了注入信号的波形特征和匝间短路故障信息对重复脉冲法诊断结果的影响, 并依此给出了重复脉冲法试验中需要注意的问题。

## 1 重复脉冲法的原理

重复脉冲法采用波传播理论,利用1个低压脉冲信号注入电机转子绕组,通过监测并分析信号注入点处的响应特性曲线来判断转子绕组中是否存在匝间短路故障及故障严重程度。若监测测得与正常回路无阻抗突变时不同的响应特性曲线,说明转子绕组中存在匝间短路故障,故障位置及其严重程度由2个响应特性曲线相结合得到的特征曲线的平展程度和突起位置反映,由人工神经网络进行数据处理分析。重复脉冲法的试验接线图如图1所示。

## 2 转子绕组匝间短路的仿真模型

重复脉冲法要求注入转子绕组的信号具有陡峭的上升沿,试验中典型的上升沿时间  $t_{rise} < 4 \mu\text{s}$ <sup>[5]</sup>,对应的等效上限频率满足下式

$$f_u = \frac{1}{\pi t_{rise}} \quad (1)$$

式中:  $t_{rise}$  为上升沿时间,  $\mu\text{s}$ ;  $f_u$  为等效上限频率,  $\text{MHz}$ 。

由式(1)可知,陡峭的上升沿内含有大量高频分量,其对应的等效上限频率可达数  $\text{MHz}$  以上。因此,为了分析前沿陡峭的注入信号在转子绕组内的暂态波过程,需要建立一个高频等效电路模型。

电机转子绕组的结构如图2所示,主要由裸扁铜排、匝间绝缘、对地绝缘和引出线等部分组成,一般每极下共有8个线圈,每个线圈由位于槽内的直线部分和位于端部的圆弧、圆角部分组成。电机转子绕组分布参数包括:自感和自阻;匝间互感和匝间电容;对地电容和电导。在高频下,由于每匝导体上的传导电流产生的磁力线在铁芯上缺少共同的磁通回路且导体表面涡流对磁力线具有屏蔽作用,故可以忽略不同槽内线圈间的电磁耦合,认为匝间互感和匝间电容可以忽略不计。另外,随着集肤效应造成的损耗和涡流损耗的增加,需要考虑线圈电阻和电导的影响。

为了简化分析,略去绕组内的互感及匝间电容的影响并假设槽内部分和端部的各参数相等且均匀分布,因此,可得转子绕组的等效电路如图3所示,即可以看成是1根有损传输线。图中,  $R$ 、 $L$ 、 $C$ 、 $G$  分别表示绕组线圈的单位长电阻、电感、电容、电导。

## 3 转子绕组匝间短路的理论分析

### 3.1 转子绕组的响应特性曲线

重复脉冲法试验的简化模型如图4所示。其

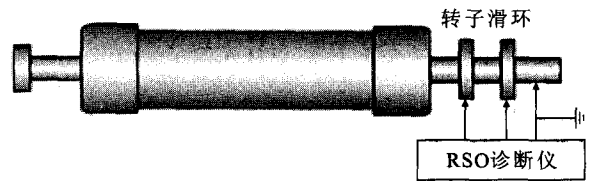


图1 RSO试验接线图

Fig. 1 Wiring of RSO

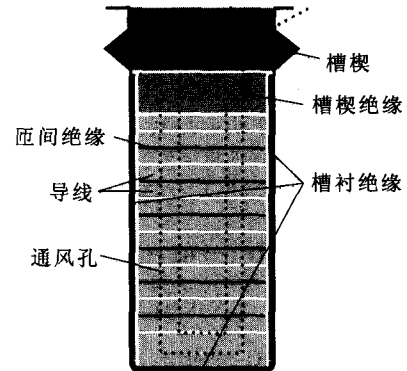


图2 转子绕组的结构

Fig. 2 Structure of rotor windings

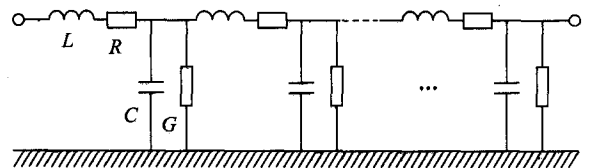


图3 转子绕组分布参数等效电路

Fig. 3 Rotor windings' equivalent circuit with distributed parameter

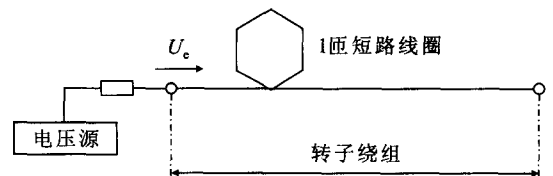


图4 RSO试验的简化模型

Fig. 4 Simple model of the RSO test

中,匝间短路点可以看成4条具有相同波阻抗的传输线的连接点。

由图4所示,当信号由电压源经过时间  $t$  到达短路故障点时,将产生反行波如下式

$$U_b = \left( \frac{Z/3 - Z}{Z/3 + Z} \right) U_e = -\frac{U_e}{2} \quad (2)$$

式中:  $U_e$  为信号注入端的前行波电压;  $U_b$  为反行波电压;  $Z$  为绕组线圈的波阻抗。因此,当末端短路时,由重复脉冲法得到的响应特性曲线如图5所示。

图5中,  $T$ 为信号在转子绕组上的传播时间;  $2t$ 表示注入信号由信号注入点到达故障位置再回到信号注入点的传播时间;  $n$ 代表了匝间短路的匝数。畸变处的面积表征了匝间短路故障的严重程度。

### 3.2 损耗的影响

信号沿转子绕组传播时, 由于导体损耗和介质损耗等的影响, 行波内包含的高频分量会在传播过程中出现较大幅度的衰减, 因此, 在重复脉冲法试验中, 不但伴随着沿线行波幅值的下降, 而且其上升沿中包含的高频分量会随着传输距离的增加而不断地衰减, 进而造成绕组内行波上升沿时间不断地增大。

## 4 转子绕组匝间短路的有限元分析法

将转子绕组进行  $M$  等分离散, 得到  $M$  个有限长单元及  $2M$  个节点。其中, 每个节点处的电压  $u$ 、电流  $i$  均由前行波和反行波组成, 它们的叠加决定了该点的电压和电流值; 每个节点处的前行波和反行波均根据波传播理论及 Kirchhoff 定律共同决定。  $R$ 、 $L$ 、 $G$ 、 $C$  是绕组线圈的单位长电阻、电感、电导、电容。故得到有限长单元的等效电路如图6所示。

该单元满足传输线电报方程

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t}. \end{cases} \quad (3)$$

假设重复脉冲法试验中, 始端阻抗匹配、末端开路, 对每个有限长单元的等效电路列写方程, 并对方程中的  $\partial u/\partial x$ 、 $\partial i/\partial x$  进行差分离散处理。得到  $M$  个差分方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial i_{2m}}{\partial t} = \frac{u_{2m} - u_{2m+1}}{Lh} - \frac{Ri_{2m}}{L}; \\ \frac{\partial u_{2m+1}}{\partial t} = \frac{i_{2m} - i_{2m+1}}{Ch} - \frac{Gu_{2m+1}}{C}; \\ \frac{\partial i'_{2m}}{\partial t} = \frac{u'_{2m+1} - u'_{2m}}{Lh} - \frac{Ri'_{2m}}{L}; \\ \frac{\partial u'_{2m+1}}{\partial t} = \frac{i'_{2m+1} - i'_{2m}}{Ch} - \frac{Gu_{2m+1}}{C}. \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $h=l/M$  为空间离散步长;  $l$  为转子绕组的长度;  $u_{2m}(i_{2m})$ 、 $u'_{2m}(i'_{2m})$  表示局部节点处的前行波和反行波;  $u_{2m+1}(i_{2m+1})$ 、 $u'_{2m+1}(i'_{2m+1})$  为待求量;  $u_{2m}$ 、 $u'_{2m}$ 、 $i_{2m+1}$  和  $i'_{2m+1}$  利用 Kirchhoff 定律及电路特征与待求量进行转换;  $m=1, 2, \dots, M$ 。

将始端、末端的约束条件代入方程得到  $4M$  阶的线性状态方程组

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{f}. \quad (5)$$

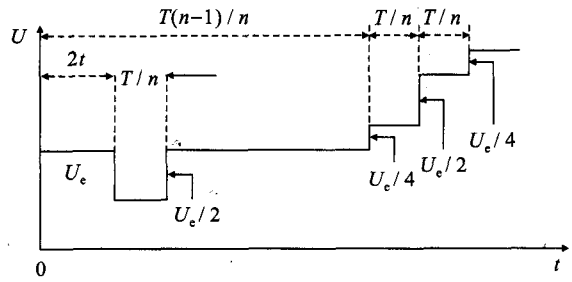


图5 信号注入端的响应特性曲线

Fig. 5 Response curve in the point where signal injected

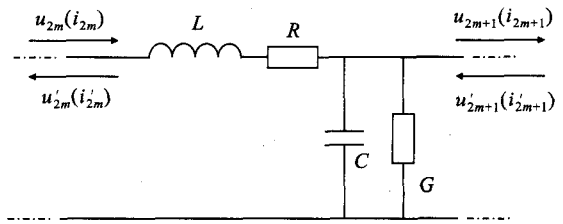


图6 转子绕组分布参数等效模型

Fig. 6 Distributed parameter equivalent model of rotor windings

式中:  $F$  为  $4M \times 4M$  阶常数矩阵

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11} & \mathbf{F}_{12} \\ \mathbf{F}_{21} & \mathbf{F}_{22} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{X} = [u_3, u_5, \dots, u_{2M+1}, i_2, i_4, \dots, i_{2M}, u'_3, u'_5, \dots, u'_{2M+1}, i'_2, i'_4, \dots, i'_{2M+1}]^T;$$

$$\mathbf{f} = [0, 0, \dots, \frac{U_c}{Lh}, 0, \dots, 0]_{1 \times 4M}^T.$$

当转子绕组内不存在匝间短路时, 矩阵  $F$  直接由式(1)决定, 其中:

$$\mathbf{F}_{12} = \mathbf{F}_{21} = \mathbf{0};$$

$$\mathbf{F}_{11} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{F}_{22} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{G}{C} & \dots & 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{Gh} & \frac{1}{Gh} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & -\frac{G}{C} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{Gh} \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{1}{2Ch} - \frac{G}{C} & \dots & 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{Gh} \\ \hline \frac{1}{Lh} & \dots & 0 & 0 & \dots & -\frac{R}{L} & \dots & \dots & 0 \\ -\frac{1}{Lh} & \dots & 0 & 0 & \dots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & -\frac{1}{Lh} & \frac{1}{Lh} & \dots & 0 & \dots & \dots & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$

当转子绕组内存在匝间短路时, 矩阵  $F$  由式(4)

和式(6)共同决定。

$$\begin{cases} u_{2k} = \frac{1}{2}u_{2k-1} + \frac{1}{2}u_{2j-1} + \frac{1}{2}u'_{2j} - \frac{1}{2}u'_{2k}; \\ u_{2j} = \frac{1}{2}u_{2k-1} + \frac{1}{2}u_{2j-1} + \frac{1}{2}u'_{2k} - \frac{1}{2}u'_{2j}; \\ i'_{2k-1} = \frac{1}{2}i'_{2j-1} - \frac{1}{2}i'_{2k-1} + \frac{1}{2}i'_{2k} + \frac{1}{2}i'_{2j}; \\ i'_{2j-1} = \frac{1}{2}i'_{2k-1} - \frac{1}{2}i'_{2j-1} + \frac{1}{2}i'_{2k} + \frac{1}{2}i'_{2j}. \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中假设第  $k$  个有限长单元的前端和第  $j$  个有限长单元的前端相连,转子绕组发生匝间短路故障。

令  $dx/dt = (x_{i+1} - x_i)/dt$ ,对式(5)应用隐式欧拉法进行求解得

$$x_{i+1} = (I - dtF)^{-1}(x_i + dtf). \quad (7)$$

式中  $I$  为单位矩阵。式(7)为对转子绕组匝间短路故障进行暂态模拟的计算公式。其中,隐式欧拉法的绝对稳定区域如式(8)所示,即在复平面上,绝对稳定区域是以 1 为圆心的单位圆的外域。式(8)表达式为

$$|1 - \Delta\lambda| > 1. \quad (8)$$

式中: $\Delta$  为时间离散步长; $\lambda$  为  $F$  的任意特征值。通过分析,无论转子绕组线圈内是否存在匝间短路故障,其对应的矩阵  $F$  均满足式(8),其仿真结果如图 7 所示,其中,Re 为实轴,Im 为虚轴。

根据图 7,在转子绕组匝间短路故障的模拟过程中,该算法无条件稳定,时间步长的选取无限制条件。因此该算法可以根据实际情况任意选取能够反映转子绕组匝间短路故障的时间步长,适于对转子绕组进行匝间短路的模拟。

### 5 RSO 波形分析

重复脉冲法在诊断转子绕组匝间短路故障时具有很高的灵敏度和诊断精度。然而在试验中,往往会忽略对诊断精度影响因素以及试验注意事项的认识和研究。因此,利用有限元分析法,对重复脉冲法得到的响应特性曲线进行模拟仿真,仿真结果与以往的经验相符,并提出了上升沿时间在重复脉冲法中的重要性。不仅验证了有限元分析法的有效性,同时也为进一步地试验和理论分析提供了依据。

该仿真模型具备如下几点要求:转子绕组的波阻抗与信号注入端的输入阻抗相匹配;转子绕组末端开路及注入信号在转子绕组内的波传播时间为  $20 \mu\text{s}$ 。令注入信号的电压幅值为  $5 \text{ V}$ ,上升沿时间为  $100 \text{ ns}$ 。其仿真得到的响应特性曲线如图 8 所示。

#### 5.1 RSO 波形特征

当注入信号的电压幅值为  $5 \text{ V}$ ,上升沿时间为  $5$

万方数据

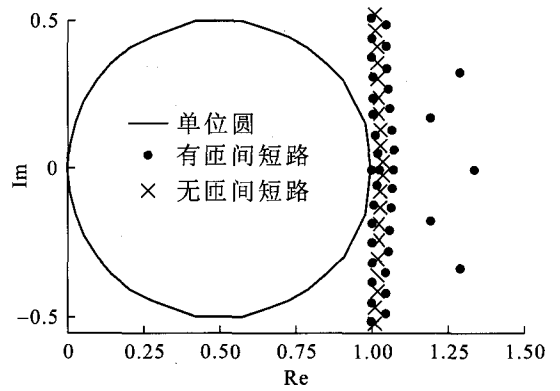


图 7 稳定性分析

Fig. 7 Stability analysis

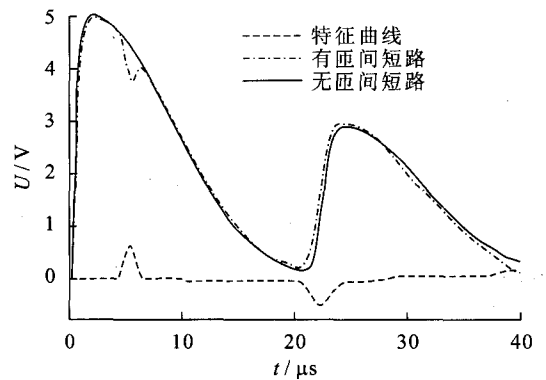


图 8 上升沿时间 100 ns 时的响应特性曲线

Fig. 8 Response curve when rising time is 100 ns

$\mu\text{s}$  时,其仿真得到的响应特性曲线如图 9 所示。

根据图 8、9 可知,当转子绕组内存在匝间短路故障时,信号注入端的响应特性曲线与无故障时的存在区别,2 者结合得到的特征曲线存在明显的畸变峰值;当注入信号的上升沿时间增大时,若匝间短路故障发生在比较靠近信号注入端的位置,故障信息将会被上升沿掩盖。

当具有不同上升沿的注入信号输入具有相同短路故障的转子绕组时,其特征曲线如图 10 所示。如图 10 所示,上升沿越陡峭,畸变峰值越大,但表示故障严重程度的畸变面积的大小保持不变。

#### 5.2 上升沿与信息提取

当波形不同但具有相同上升沿时间的注入信号输入转子绕组时,它们反映相同匝间短路故障的特征曲线基本一致,如图 11 所示,即匝间短路的故障信息由注入信号的上升沿部分提取。

#### 5.3 故障位置的影响

对存在严重程度相同的匝间短路故障且仅故障发生位置不一致的转子绕组进行模拟,在注入信号的作用下,特征曲线如图 12 所示。图中,故障位置 1

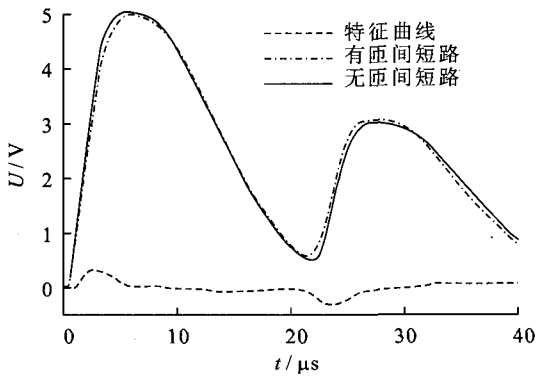


图9 上升沿时间 5 μs 时的响应特性曲线  
Fig. 9 Response curve when rising time is 5 μs

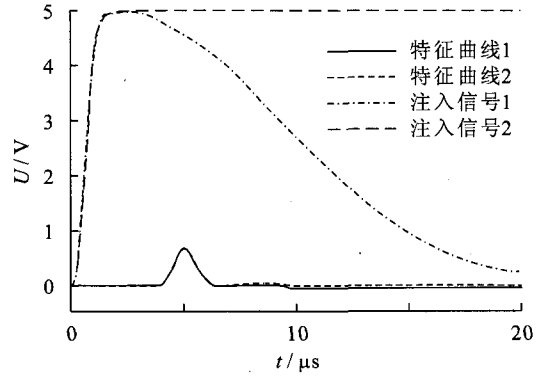


图11 不同信号的特征曲线  
Fig. 11 Characteristic curves of different signals

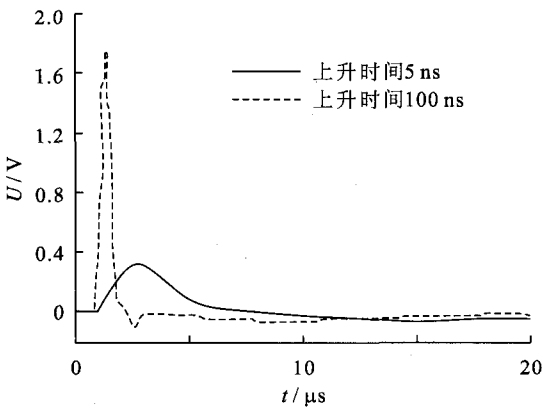


图10 畸变峰值变化情况  
Fig. 10 Changes of the distortion peak

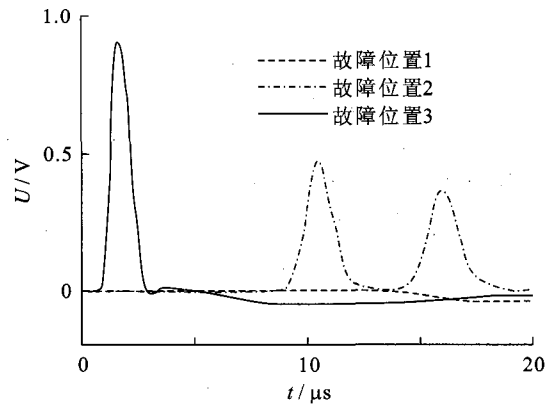


图12 故障位置不同时的特征曲线  
Fig. 12 Curves when fault location is different

离注入点最远,故障位置 2 其次,故障位置 3 最近。此时,当故障位置远离信号注入点时,特征曲线中的畸变峰值减小,畸变所处范围增大,反映故障严重程度的畸变面积减小。

#### 5.4 多匝故障时的波形特征

当转子绕组内存在多处匝间短路时,以存在 2 处匝间短路故障为例,若匝间短路的故障位置相距较远,信号注入端的特征曲线如图 13 所示,特征曲线在 20 μs 前存在 2 处波形畸变,与匝间短路的故障数量相同,即特征曲线可反映匝间短路的故障数量。

当 2 个匝间短路的故障位置相距较近时,测得的特征曲线如图 14 所示,其反映匝间短路故障的畸变波形相互叠加,此时,难以通过对特征曲线的直观分析对故障信息进行初步判断。

若 2 个匝间短路的故障位置继续接近,故障信息覆盖的问题将进一步增强,存在此问题的特征曲线如图 15 所示,此时,已经无法根据特征曲线的波形特征初步判断转子绕组内的匝间短路故障信息。

因此,当短路故障点的位置比较接近时,由于存万方数据

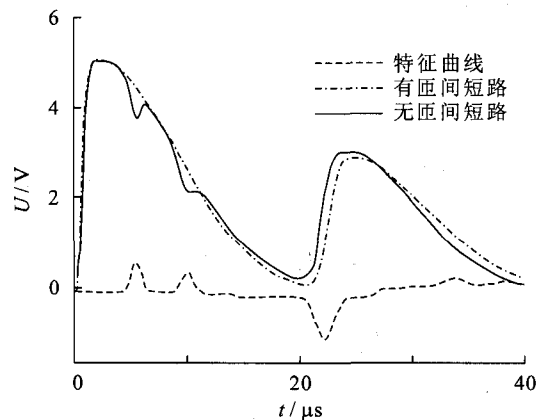


图13 存在两路匝间短路的特征曲线  
Fig. 13 Curves when two inter-turn shorts exist

在 2 个畸变波形相互叠加甚至覆盖的情况,容易引起误判断。

以图 14 所示的故障情况为例,当注入信号的上升沿时间减小,由于注入信号高频分量的增加,特征曲线中故障信息相互覆盖的问题将会减弱,如图 16 所示。

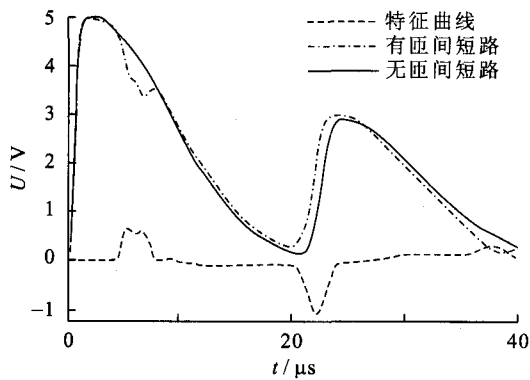


图 14 短路故障点比较接近时的响应曲线

Fig. 14 Curves when two inter-turn shorts is close

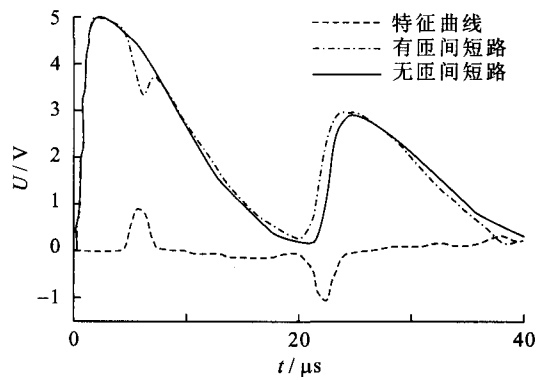


图 15 短路故障信息覆盖的响应曲线

Fig. 15 Response curves when the fault information is covered

## 6 结论

本文采用分布参数电路模型对转子绕组线圈的匝间短路故障进行建模,并利用时域有限差分法对其进行了仿真分析。结合对重复脉冲法的理论分析,基于该模型,研究了重复脉冲法中的波形特征,讨论了上升沿时间和匝间短路的故障位置对试验结果的影响,为重复脉冲法的理论分析提供了算法上的支持。通过算法分析并结合以往试验经验,得到如下结论:

1)重复脉冲试验法操作简单,适于转子绕组匝间短路故障的长期跟踪,且每次试验中注入信号的波形特征应始终保持一致。

2)根据特征曲线判断转子绕组的匝间短路故障,不能凭借以往经验作出判断,需要利用专家系统进行有效分析。

3)在特征信号中,转子绕组内远离信号注入端的故障信息,与靠近信号注入端的相同故障情况相比,畸变峰值减小、畸变所处范围增大且畸变面积减小,容易造成诊断误差。

4)转子绕组内的故障信息主要由注入信号的上升沿获取。

5)随着注入信号上升沿时间的增大,表征故障特征信息的畸变峰值减小,畸变所处范围增大,容易对故障信息的获取造成不利影响。特别是当转子绕组内存在多个相邻的匝间短路故障时,较大的上升沿时间容易造成特征信号的相互覆盖,影响采用特征波形对短路故障点的分析判断。因此,通过减小注入信号的上升沿时间,能够提高重复脉冲法的诊断精度,对多匝情形下的短路问题可以在一定程度上避免覆盖问题的出现。因此,在试验中应尽量选取上升沿时间小的注入信号进行试验。

## 参考文献 References

[1] 张征平,刘石,姚森敬,等. 大型发电机转子故障分析与诊断

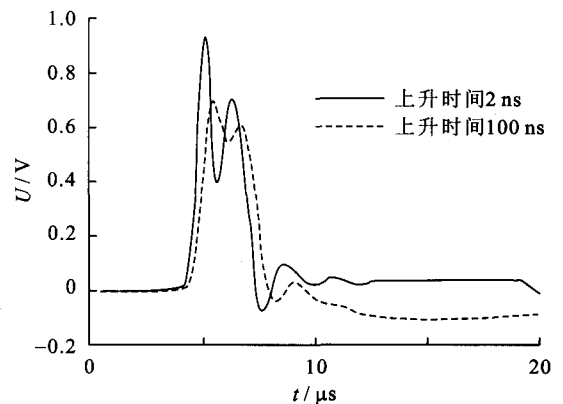


图 16 上升沿时间对响应曲线的影响

Fig. 16 Influence of the rising time on response curves

[M]. 北京:中国电力出版社, 2011.

ZHANG Zhengping, LIU Shi, YAO Senjing, et al. Fault analysis and diagnosis of large-scale generator rotor [M]. Beijing, China; China Electric Power Press, 2011.

[2] 范天明. 基于重复脉冲法的汽轮发电机转子绕组匝间短路探测 [D]. 北京:华北电力大学, 2007.

FAN Tianming. The testing of turbogenerator rotor winding interturnshortcircuit fault based on repetitive surge oscilloscope [D]. Beijing, China; North China Electric Power University, 2007.

[3] 马宏忠,李训铭,王刘芳. 高压异步电机转子绕组故障诊断系统的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 31-33.

MA Hongzhong, LI Xunming, WANG Liufang. Development of the diagnosis system of rotor winding faults in high voltage induction motors[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 31-33.

[4] 李晓明,刘东明. 大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的测试与分析[J]. 大电机技术, 2003(3): 7-11.

LI Xiaoming, LIU Dongming. Measurement and assessment of inter-turn short-circuit fault in the rotor of large turbogenerator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2003(3): 7-11.

[5] 武玉才,李和明,李永刚,等. 在线检测发电机转子绕组匝间短路的新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2698-2703.

WU Yucai, LI Heming, LI Yonggang, et al. New on-line diagnosis method for generator rotor winding inter-turn short circuit

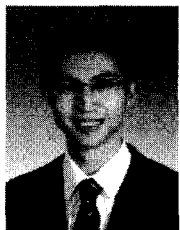
- [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2698-2703.
- [6] Isidor Kerszenbaum, Clyde Maughan. Utilization of repetitive surge oscillograph (RSO) in the detection of rotor shorted-turns in large turbine-driven generators[C]// 2011 Electrical Insulation Conference. Maryland, USA: [s. n.], 2011: 398-401.
- [7] 刘庆河. 汽轮发电机转子绕组匝间短路的检测方法[J]. 大电机技术, 2004(4): 13-16.  
LIU Qinghe. Detecting methods about the fault of interturn short circuit in rotor windings of turbogenerator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2004(4): 13-16.
- [8] 向成, 刘志强. 大型发电机转子绕组 RSO 试验分析和探讨[J]. 大电机技术, 2008(1): 16-20.  
XIANG Cheng, LIU Zhiqiang. Study on RSO experiment for rotor winding of large turbogenerator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2008(1): 16-20.
- [9] 倪勤, 盛明娟, 郑冬东. 大型汽轮发电机转子绕组匝间绝缘诊断新技术 RSO 重复脉冲法[J]. 安徽电力, 2007, 24(1): 59-65.  
NI Qin, SHENG Mingjun, ZHENG Dongdong. A new diagnosis method of large steam turbine generator rotor inter turn insulation RSO repetitive impulse[J]. Anhui Electric Power, 2007, 24(1): 59-65.
- [10] 袁振亚. 检测发电机转子匝间短路的 RSO 实验技术及其应用分析[J]. 电气技术, 2010(4): 25-27.  
YUAN Zhenya. The introduce and analyse of RSO (the recurrent surge oscillograph) technique[J]. Electrical Engineering, 2010(4): 25-27.
- [11] El-Sharkawi M A, Marks R J, Seho Oh, et al. Localization of winding shorts using fuzzified neural networks [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(1): 140-146.
- [12] Wood J W, Eng C, Hindmarch R T. Rotor winding short detection[J]. IEE Proceedings, 1986, 133(3): 181-189.
- [13] Lupo G, Petracca C. Multiconductor transmission line analysis of steep-front surges in machine windings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(3): 467-478.
- [14] 佟来生, 温凤香, 吴广宁, 等. 变频牵引电机定子绕组暂态电压分布的计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 1-3.  
TONG Laisheng, WEN Fengxiang, WU Guangning, et al. Calculation of transient voltage distribution in windings of inverter-fed traction motor[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 1-3.
- [15] 佟来生, 吴广宁, 林同光, 等. 变频牵引电机定子绕组内部电压分布特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 134-138.  
TONG Laisheng, WU Guangning, LIN Tongguang, et al. Study on voltage distribution in windings of inverter-fed traction motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 134-138.
- [16] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高电压工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
LIANG Xidong, CHEN Changyu, ZHOU Yuanxiang. High voltage engineering[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2003.
- [17] 邹文康, 关永超, 宋盛义, 等. 基于波过程的传输线模拟方法[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(9): 1571-1574.
- ZOU Wenkang, GUAN Yongchao, SONG Shengyi, et al. Transmission line simulation method based on wave process[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(9): 1571-1574.
- [18] 赵进全, 马西奎, 邱关源. 变电站空载母线波过程的精细积分计算方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 15(3): 52-55.  
ZHAO Jinquan, MA Xikui, QIU Guanyuan. Precise-integration computation method for the wave processes of buses without load in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 15(3): 52-55.
- [19] 赵进全, 马西奎, 邱关源. 精细积分法在电报方程求解中的应用[J]. 计算力学学报. 1998, 15(3): 344-346.  
ZHAO Jinquan, MA Xikui, QIU Guanyuan. Application of the precise integration method in the solution of telegraph equation[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1998, 15(3): 344-346.
- [20] 张希. 有损均匀传输线数值解的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.  
ZHANG Xi. Research on lossy and uniform transmission line numerical solution[D]. Chongqing, China: College of Electrical Engineering Chongqing University, 2003.
- [21] 薛毅, 耿美英. 数值分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2003.  
XUE Yi, GENG Meiyang. Analysis of mathematical[M]. Beijing, China: Beijing University of Technology Press, 2003.
- [22] 刘磊, 崔翔, 齐磊. 时域有限元法求解传输线瞬态波过程[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 112-118.  
LIU Lei, CUI Xiang, QI Lei. Transients analysis of transmission line by time domain finite element method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 112-118.
- [23] Tang Y F. Analysis of steep-fronted voltage distribution and turn insulation failure in inverter-fed form-wound AC motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(5): 1088-1091.



JIA Zhidong  
Ph. D., Professor

贾志东

1966—, 男, 博士, 教授, 博导  
长期从事高电压外绝缘及电工新技术等方面的研究, 内容包括外绝缘防污闪技术、绝缘子覆冰问题, 大型电机主绝缘老化等  
电话: (0755) 26036080  
E-mail: jiazd@sz.tsinghua.edu.cn



CHEN Hai

陈海

1988—, 男, 硕士生  
2010年毕业于清华大学, 获工学学士学位, 目前就读于清华大学电机系攻读硕士学位。研究方向为高电压与绝缘技术  
E-mail: michaelch914@gmail.com

收稿日期 2012-04-17 修回日期 2012-10-08 编辑 卫李静

作者: 贾志东, 陈海, 张征平, 夏英来, 关志成, 姚森敬  
作者单位: 贾志东, 陈海, 夏英来, 关志成(清华大学深圳研究生院, 深圳, 518055), 张征平(广东电网公司电力科学研究院, 广州, 510000), 姚森敬(深圳供电局有限公司, 深圳, 518000)  
刊名: 高电压技术 ISTIC EI PKU  
英文刊名: High Voltage Engineering  
年, 卷(期): 2012, 38(11)

## 参考文献(23条)

1. 张征平;刘石;姚森敬 [大型发电机转子故障分析与诊断](#) 2011
2. 范天明 [基于重复脉冲法的汽轮发电机转子绕组匝间短路探测](#) 2007
3. 马宏忠;李训铭;王刘芳 [高压异步电机转子绕组故障诊断系统的研究](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2004(04)
4. 李晓明;刘东明 [大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的测试与分析](#)[期刊论文]-[大电机技术](#) 2003(03)
5. 武玉才;李和明;李永刚 [在线检测发电机转子绕组匝间短路的新方法](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2009(11)
6. Isidor Kerszenbaum;Clyde Maughan [Utilization of repetitive surge oscillograph\(RSO\) in the detection of rotor shorted-turns in large turbine-driven generators](#) 2011
7. 刘庆河 [汽轮发电机转子绕组匝间短路的检测方法](#)[期刊论文]-[大电机技术](#) 2004(04)
8. 向成;刘志强 [大型发电机转子绕组RSO试验分析和探讨](#)[期刊论文]-[大电机技术](#) 2008(01)
9. 倪勤;盛明瑁;郑冬东 [大型汽轮发电机转子绕组匝间绝缘诊断新技术RSO重复脉冲法](#) 2007(01)
10. 袁振亚 [检测发电机转子匝间短路的RSO实验技术及其应用分析](#)[期刊论文]-[电气技术](#) 2010(04)
11. EI-Sharkawi M A;Marks R J;Seho Oh [Localization of winding shorts using fuzzifiedneural networks](#) 1995(01)
12. Wood J W;Eng C;Hindmarch R T [Rotorwinding short detec-tion](#) 1986(a)
13. Lupo G;Petraca C [Multiconductor transmission line analysis of steep-front surges in machine windings](#) 2002(03)
14. 佟来生;温风香;吴广宁 [变频牵引电机定子绕组暂态电压分布的计算](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2006(02)
15. 佟来生;吴广宁;林同光 [变频牵引电机定子绕组内部电压分布特性的研究](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2006(12)
16. 梁曦东;陈昌渔;周远翔 [高电压工程](#) 2003
17. 邹文康;关永超;宋盛义 [基于波过程的传输线模拟方法](#)[期刊论文]-[强激光与粒子束](#) 2007(09)
18. 赵进全;马西奎;邱关源 [变电站空载母线波过程的精细积分计算方法](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2002(03)
19. 赵进全;马西奎;邱关源 [精细积分法在电报方程求解中的应用](#)[期刊论文]-[计算力学学报](#) 1998(03)
20. 张希 [有损均匀传输线数值解的研究](#)[学位论文] 2003
21. 薛毅;耿美英 [数值分析](#) 2003
22. 刘磊;崔翔;齐磊 [时域有限元法求解传输线瞬态波过程](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2008(03)
23. Tang Y F [Analysis of steep-fronted voltage distributionand turn insulation failure in inverter-fed form-wound AC motor](#) 1998(05)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gdyjs201211022.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gdyjs201211022.aspx)