

基于端口频域特性的水轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断

孙士涛¹, 雷雨¹, 卢毅¹, 宋鹏¹, 郝国文², 张杰¹, 狄洪伟³, 朱守舵⁴, 梅军⁴

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

2. 国网新源控股有限公司, 北京 100053;

3. 国网新源控股有限公司北京十三陵蓄能电厂, 北京 102200;

4. 北京华科同和科技有限公司, 北京 100045)

摘要: 包含抽蓄发电机在内的大型水轮发电机转子为具有多匝长绕组的显极式转子, 传统的基于交流阻抗测量的绕组匝间短路故障诊断方法存在灵敏性和便捷性等方面的不足。基于多导体传输线理论建立了显极式转子绕组的端口频域特性模型, 通过仿真分析提出了故障判别和定位方法。最后通过真机转子的故障模拟和测试对诊断方法的有效性进行了验证。仿真和试验结果表明, 所提方法能够在无需断开磁极间电气连接的测量条件下实现绕组匝间短路故障的诊断和定位。

关键词: 频域特性; 水轮发电机; 转子绕组; 匝间短路; 故障诊断

中图分类号: TM312 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)04-0077-08

doi: 10.12177/emca.2023.018

Fault Diagnosis of Rotor Winding Inter-Turn Short Circuit of Hydro-Generator Based on Port Frequency Domain Characteristic

SUN Shitao¹, LEI Yu¹, LU Yi¹, SONG Peng¹, HAO Guowen², ZHANG Jie¹, DI Hongwei³,
ZHU Shouduo⁴, MEI Jun⁴

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China;

2. State Grid Xinyuan Group Co., Ltd., Beijing 100053, China;

3. Beijing Shisanling Pumped Storage Power Station, State Grid Xinyuan Group Co., Ltd.,
Beijing 102200, China;

4. Beijing Huaketonghe Technology Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: The rotor of large hydro-generator, including the pump storage generator, is an explicit-pole rotor with multi-turn and long winding. The traditional fault diagnosing method of winding inter-turn short circuit based on AC impedance measurement has shortcomings in sensitivity and convenience. Based on the theory of multi-conductor transmission line, the port frequency domain characteristic model of the explicit-pole rotor winding is established, and the fault diagnosing and locating methods are proposed through the simulation analysis. Finally, the validity of the diagnosis method is verified by the fault simulation and test of the real rotor. The simulation and test results show that the proposed method can realize the diagnosis and location of winding inter-turn short circuit fault without disconnecting the electrical connection between magnetic poles.

Key words: frequency domain characteristic; hydro-generator; rotor winding; inter-turn short circuit; fault diagnosis

收稿日期: 2022-11-18; 收到修改稿日期: 2023-01-29

作者简介: 孙士涛(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机运行与故障诊断。

0 引言

目前水力发电在我国电力能源供应中具有较高的比例^[1],其中抽蓄发电电动机、水轮发电机等大型同步发电机在电力供应、电力系统调节等方面发挥着重要作用,其设备绝缘可靠性至关重要。在频繁起停、巨大的离心力和热应力、不良的制造工艺^[2]、变化的现场安装^[3]因素综合作用下,大型水轮发电机显极式转子(磁极)绕组匝间短路故障发生概率较高。轻微的匝间短路,例如仅某磁极绕组的一匝短路,在运行中的故障特征微弱,往往难以进行早期诊断,导致故障进一步发展,最终会造成多匝短路,引起磁极绕组过热,机组磁力不平衡导致振动增大,甚至引起转子一点、两点接地^[4],导致非计划停机。因此,通过较为灵敏的方法及时检测转子绕组匝间短路故障对于保障机组绝缘可靠性十分必要。

目前,相比于隐极式转子绕组,显极式转子绕组的匝间短路故障诊断手段较少,离线检测手段主要依赖于交流阻抗方法^[5]。交流阻抗方法在不断开磁极间电气连接的条件下进行绕组整体阻抗测量时,由于磁极数较多、灵敏度较差,一般需分磁极单独进行测量,各磁极间相互比较,但在实际测量中至少需要拆卸机组上挡风板,检测便捷性较差,且在测量时故障磁极会对相邻磁极造成阻抗值干扰,影响诊断效果。文献[6]采用时域脉冲原理对抽蓄发电电动机的转子绕组匝间短路故障诊断进行了仿真研究,并提出了脉冲优化的方法。在线诊断方面,在火电机组上广泛应用的探测线圈法^[7]由于磁极结构的不同以及需要在定子铁心安装传感器等因素目前尚未大量应用于水电机组,且该方法的灵敏度易受不同运行工况下主磁通变化的影响。文献[8]采用多回路理论进行了转子绕组匝间短路故障诊断建模,认为转子匝间短路会导致定子支路中产生随短路匝数增多而增加的分数次谐波环流,但在转子匝间短路程度较小时,该方法相关特征幅值不明显,易被基波掩盖。其余采用基于振动^[9-12]、轴电压特性^[13]的分析方法由于特征量的影响因素较多,故障指向性并不强。

综上,本文提出了一种基于端口频率特性的

离线诊断方法,以某抽蓄发电电动机转子为研究对象,通过建模仿真分析了其频域特性,提出了故障的诊断和定位方法。最后在真实机组转子上进行故障模拟和测试,验证了该方法的有效性。

1 基本原理

转子绕组的频域特性测试示意图如图1所示。通过阻抗分析仪等具备扫频功能的电桥仪器扫描得到阻抗频谱。当绕组内部存在匝间短路故障时,阻抗频谱会出现变化,且不同磁极发生故障,即故障位置不同时,频谱变化情况不同,以此特征来诊断故障。该种方式能够反映绕组状态的变化,但实现趋势跟踪需要在新磁极安装完成后,采集初始状态下的频谱数据作为比较基准。

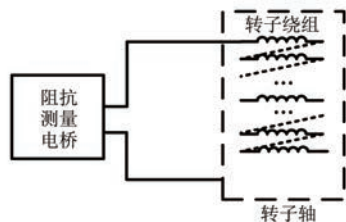


图1 转子绕组的频域特性测试示意图

以上频域特性诊断方法具备以下优点。

(1) 理论上,通过离散分频扫描的方式能够保证在一定的频率范围内施加恒定的能量激励,并且激励信号频率在1 kHz以上。此时转子等效为分布参数传输线,本质上是基于故障点对行波的反射原理进行诊断,因此,该方法的诊断灵敏度高。

(2) 由于采用阻抗测量原理,该方法能够得到绕组的固有特性,在保证测试仪器准确度以及测试规范性的情况下,该方法不受激励形式、人为操作等因素的影响,更加适合作为一种标准化的测试手段,且更加适用于绕组健康状态的跟踪和趋势分析。

(3) 该方法基于绕组端口整体测试,仅需断开励磁回路,在集电环上即可进行,无需任何拆装工作,可以做到随停随检,且测试电压一般在5 V以内,单次最长测量时间一般小于10 s,在便捷性、快速性上明显优于传统交流阻抗方法。

2 诊断模型

针对第1节中所述的基本原理,建立转子绕

组的频域特性解析模型。根据解析模型可以得到不同故障性质及转子结构等因素影响下频域特性的一般规律。

水轮发电机转子绕组剖面图如图 2 所示,绕组铜线与极身、极顶、极底之间存在对地绝缘,相邻导体之间存在匝间绝缘,因此,在高频信号作用下,其为一个多匝耦合的传输线系统。与汽轮发电机等的隐极式转子相比,水轮发电机转子绕组外露,长度更长,匝数更多,匝间绝缘更薄。

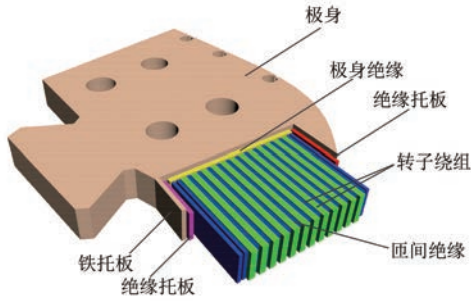


图 2 水轮发电机转子绕组剖面图

本文根据多导体传输线 (MTL) 理论^[14]建立了转子绕组的分布参数模型以及故障模型,采用矩阵对角化思想将多匝耦合的传输线解耦为相互独立的单根传输线,并施加边界条件,将多根传输线相连,从而得到了端口的频域阻抗特性。

2.1 MTL 理论及二端口函数

对于由 $j+1$ 根导体组成的均匀介质 MTL 系统,当取任意导体为参考地时,其矩阵形式的二阶常微分方程为

$$\frac{d^2}{dz^2} \hat{V}(z) = \hat{Z} \hat{Y} \hat{V} \quad (1)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \hat{I}(z) = \hat{Y} \hat{Z} \hat{I} \quad (2)$$

式中: $\hat{V}(z)$ 、 $\hat{I}(z)$ 为 $j \times 1$ 列向量,列元素为各导体相对参考地的电压及导体内流经的电流; z 为导体沿长度的位置坐标; $\hat{Z}$ 、 $\hat{Y}$ 分别为 $j \times j$ 单位长度阻抗矩阵和导纳矩阵。

$$\mathbf{C}_k = \begin{bmatrix} c_0 + c_{in} + c_{top} & -c_{in} & 0 & \cdots & 0 \\ -c_{in} & c_0 + 2c_{in} & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & -c_{in} \\ 0 & \cdots & 0 & -c_{in} & c_0 + c_{in} + c_{bot} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{C}_k$ 为 k 号磁极绕组的电容矩阵; c_0 、 c_{in} 、 c_{top} 、

$\hat{Z}$ 、 $\hat{Y}$ 的表达式为

$$\hat{Z} = \mathbf{R} + j\omega \mathbf{L} \quad (3)$$

$$\hat{Y} = \mathbf{G} + j\omega \mathbf{C} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为包含 $j \times j$ 阶单位长度的电阻矩阵; $\mathbf{L}$ 为电感矩阵; $\mathbf{G}$ 为电导矩阵; $\mathbf{C}$ 为电容矩阵; ω 为角频率。

对式 (1) 和式 (2) 利用变量变换进行对角化处理,可以得到其电压、电流通解:

$$\hat{V}(z) = \hat{\mathbf{Z}}_c \hat{\mathbf{T}}_1 (e^{-\hat{\gamma} z} \hat{I}_m^+ + e^{\hat{\gamma} z} \hat{I}_m^-) \quad (5)$$

$$\hat{I}(z) = \hat{\mathbf{T}}_1 (e^{-\hat{\gamma} z} \hat{I}_m^+ - e^{\hat{\gamma} z} \hat{I}_m^-) \quad (6)$$

式中: $\hat{\mathbf{Z}}_c$ 为特征阻抗矩阵; $\hat{\mathbf{T}}_1$ 为电流变换向量; $\hat{\gamma}$ 为 $\hat{\mathbf{Y}}\hat{\mathbf{Z}}$ 的对角化阵; $\hat{I}_m^+$ 、 $\hat{I}_m^-$ 为变换后的模电流。

设传输线长度为 l , 分别令式 (5) 和式 (6) 中 $z=0$ (传输线始端位置) 和 $z=l$ (传输线末端位置), 联立消去 $\hat{I}_m^+$ 、 $\hat{I}_m^-$, 可得传输线始末两端电压电流的链参数方程:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}(l) \\ \hat{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\Phi}_{11}(l) & \hat{\Phi}_{12}(l) \\ \hat{\Phi}_{21}(l) & \hat{\Phi}_{22}(l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}(0) \\ \hat{I}(0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\hat{V}(0)$ 、 $\hat{I}(0)$ 分别为传输线始端的电压、电流向量; $\hat{V}(l)$ 、 $\hat{I}(l)$ 分别为 l 处传输线末端的电压、电流向量; $\hat{\Phi}_{11}(l)$ 、 $\hat{\Phi}_{12}(l)$ 、 $\hat{\Phi}_{21}(l)$ 、 $\hat{\Phi}_{22}(l)$ 分别为反映传输线始末端电压、电流传递特性的分块矩阵, 称为链参数矩阵。

将式 (7) 整理成端口电流与端口电压的关系, 可以得出如下所示的传输线导纳参数方程, 即端口导纳特性方程:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}(0) \\ -\hat{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_{11} & \hat{Y}_{12} \\ \hat{Y}_{21} & \hat{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}(0) \\ \hat{V}(l) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\hat{Y}_{11} = -\hat{\Phi}_{12}^{-1}(l) \hat{\Phi}_{11}(l)$; $\hat{Y}_{12} = \hat{\Phi}_{12}^{-1}(l)$; $\hat{Y}_{21} = \hat{\Phi}_{22}(l) \hat{\Phi}_{12}^{-1}(l) \hat{\Phi}_{11}(l) - \hat{\Phi}_{21}(l)$; $\hat{Y}_{22} = -\hat{\Phi}_{22}(l) \hat{\Phi}_{12}^{-1}(l)$ 。

2.2 转子绕组传输线方程的建立

设转子绕组总匝数为 n , 磁极数为 N 。首先, 建立转子绕组单位长度的电容分布参数矩阵如下:

顶、对极底的单位长度电容。

根据式(9)可以得到整个转子绕组电容矩阵 C_{slot} :

$$C_{\text{slot}} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & C_i & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & C_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

进一步根据均匀介质中电感、电容、电导参数的关系得到绕组的电感矩阵 L_{slot} 、电导矩阵 G_{slot} :

$$L_{\text{slot}} = \mu_0 \varepsilon C_{\text{slot}}^{-1} \quad (11)$$

$$G_{\text{slot}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} C_{\text{slot}} \quad (12)$$

式中: μ_0 为绝缘介质的导磁系数; ε 为绝缘介质的介电常数; σ 为体现绝缘介质传导和极化效应的有效电导率, 其为频率 ω 的函数。

然后, 建立转子绕组单位长度的电阻分布参数矩阵, 其为 $n \times n$ 对角矩阵, 如下所示:

$$R_{\text{slot}} = \begin{bmatrix} r & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: r 为绕组单位长度电阻。

将以上获得的全部参数矩阵代入式(3)和式(4), 可得出传输线方程式(7)中的链参数矩阵:

$$\hat{\Phi}(l_i) = \begin{bmatrix} \hat{\Phi}_{11}(l_i) & \hat{\Phi}_{12}(l_i) \\ \hat{\Phi}_{21}(l_i) & \hat{\Phi}_{22}(l_i) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: l_i 为单匝转子绕组等效周长。

转子绕组中, 各导体首尾依次串联, 因此式(8)中第 n 匝导体末端的电压、电流即为第 $n+1$ 匝导体始端的电压、电流, 即施加了边界条件, 最后可以推导得到转子绕组各匝电压、电流关系为

$$\begin{bmatrix} V_s(1) \\ V_s(2) \\ \vdots \\ V_s(n) \\ V_r(n) \end{bmatrix} = \hat{T} \begin{bmatrix} I_s(1) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -I_r(n) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $\hat{T} = (\hat{M}Y_b \hat{M}')^{-1}$; $\hat{Y}_b = \begin{bmatrix} \hat{Y}_{11} & \hat{Y}_{12} \\ \hat{Y}_{21} & \hat{Y}_{22} \end{bmatrix}$; $\hat{M}$ 为将导纳矩阵转换为阻抗矩阵的变换矩阵; $I_s(n)$ 、 $V_s(n)$

($n=1, 2, \dots, n$) 分别为转子绕组第 n 匝首端电流、电压; $I_r(n)$ 、 $V_r(n)$ 分别为转子绕组第 n 匝末端电流、电压。

由于转子绕组对外呈现二端口性质, 仅关心始末匝的解, 因此经过简化得到转子绕组的二端口方程为

$$\begin{bmatrix} V_s(1) \\ V_r(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{1L} \\ Z_{L1} & Z_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s(1) \\ -I_r(n) \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, $Z_{11} = \hat{T}(1, 1)$, $Z_{1L} = \hat{T}(1, n+1)$, $Z_{L1} = \hat{T}(n+1, 1)$, $Z_{LL} = \hat{T}(n+1, n+1)$, 即得到了绕组的端口频域阻抗。

另外, 设 $\hat{\Phi}_e$ 为 $n \times n$ 单位阵, 故障点位于第 m 匝与 $m+1$ 匝之间, 故障点位置为 l_f , 将故障点看作集中参数的二端口, 仅需令 $\hat{\Phi}_e(m, m+1) = -g$, $\hat{\Phi}_e(m+1, m) = -g$, 即可得到故障点链参数矩阵 $\hat{\Phi}_s$, 其中 g 为匝间短路故障点电导, 从而实现故障点设置, 包括不同的短路位置、短路匝数和短路电阻等。

故障状态总的链参数矩阵 $\hat{\Phi}_f$ 为

$$\hat{\Phi}_f = \hat{\Phi}(l_f) \hat{\Phi}_s \hat{\Phi}(l_i - l_f) \quad (17)$$

式(15)给出了转子绕组的二端口特性, 这对于实际测试是十分重要的。当转子末端开路时, $I_r(n) = 0$, 则 $V_s(1) = Z_{11} I_s(1)$, Z_{11} 即为始端的输入阻抗, 同样地, Z_{LL} 为末端的输入阻抗。MTL 模型是以传输信号角频率 ω 为参量的, 因此 Z_{11} 、 Z_{LL} 也是频率 ω 的函数, 即频域阻抗。

3 诊断方法

以北京某抽蓄电站发电电动机显极式转子(以下简称 A 转子)为对象, 基于上述模型编写程序进行仿真, 程序编写流程图如图 3 所示。

通过程序计算得到的正常及短路时的仿真阻抗频谱如图 4 所示, 频率范围为 5~200 kHz, 频率间隔为 1 kHz。其中“1-27 短路”代表 1 号磁极第 27 与 28 匝发生匝间短路, 依此类推。近端指的是离故障点电气距离较近的端口。A 转子仿真参数如表 1 所示。

由图 4 可以看出, 转子端口频域特性有以下特点。

(1) 阻抗频谱呈现一定的振荡特征, 其高频段存在峰值, 如图 4(a) 中圆形标记所示, 峰值横坐

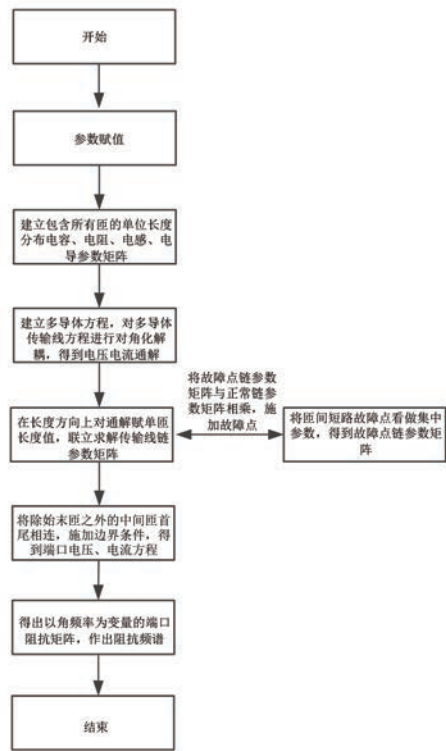


图3 程序编写流程图

表1 A 转子仿真参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
磁极等效周长/m	6.685	匝间绝缘厚度/mm	0.25
绕组厚度/mm	7.1	槽衬绝缘等效厚度/mm	3
绕组宽度/mm	119.5	磁极数	12
每极绕组匝数	29	匝间绝缘形式	浸胶 Nomex 纸

标为 f_h , 其纵坐标为 Z_h 。 f_h 之后阻抗频谱逐渐衰减, 趋于平缓。定义 f_z 为转子绕组阻抗频谱截止频率, 其满足:

$$\begin{cases} Z(f_z) = 0.707Z_h \\ f_z > f_h \end{cases} \quad (18)$$

式中: $Z(f_z)$ 为 f_z 处的阻抗幅值。

由式(18)可知该仿真中 f_z 为 147 kHz。

(2) 不同磁极发生匝间短路故障时, 相对于正常绕组, 谱线发生不同幅度的波动, 其主要差异体现在中高频段(仿真中为 40 kHz~ f_z 之间), 除此之外的其他频段差异不大, 故障诊断中应重点分析该频段。其中, 不同磁极发生匝间短路时, 阻

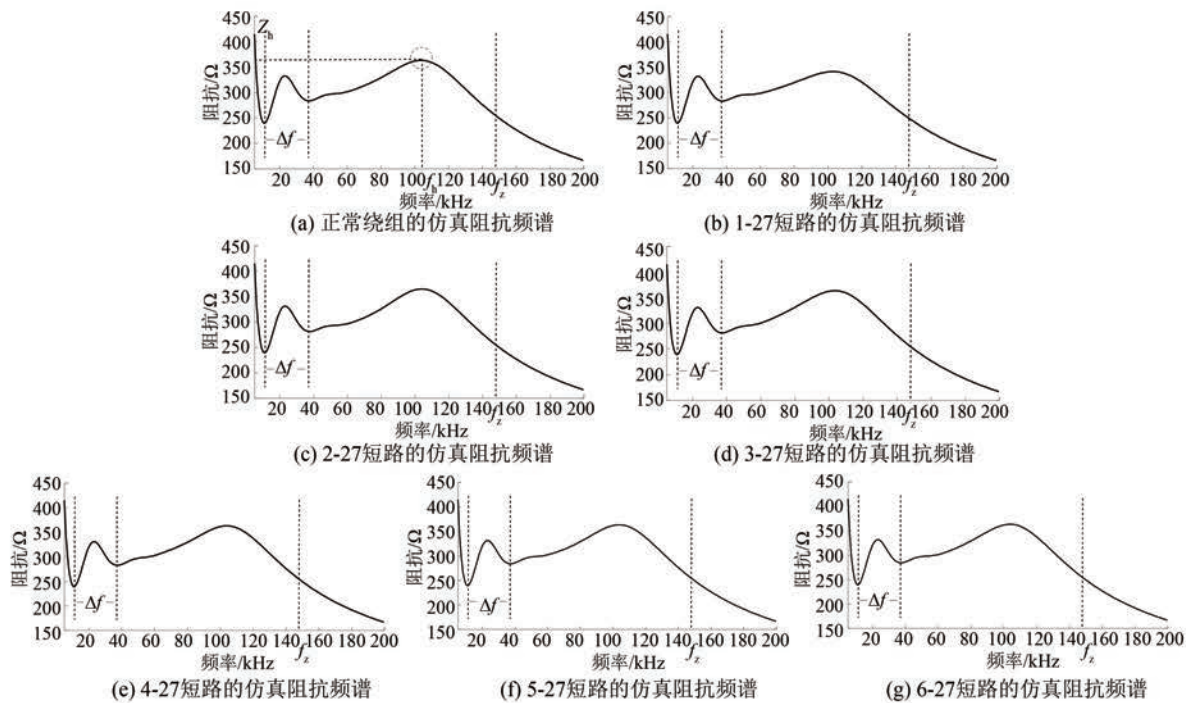


图4 正常及短路时的仿真阻抗频谱

抗频谱存在一个共同的低频振荡周波频段 Δf , 其表征了绕组对本端口阻抗频谱的影响, 该例中 Δf 为 26 kHz。

(3) 当短路位置逐渐远离近端口而靠近绕组磁极中心时(例如 6 号磁极短路), 差异的幅度逐渐减小, 说明故障点距离端口越近对端口特性的

影响越大。

为有效提取频谱差异特征,本文提出了反映故障阻抗与正常阻抗间相对变化的增益频谱,如下所示:

$$G(f) = 20\ln\left[\frac{Z_f(f)}{Z_n(f)}\right] \quad (19)$$

式中: f 为频谱中各离散频率点; $Z_f(f)$ 为故障绕组阻抗幅值频谱; $Z_n(f)$ 为正常绕组阻抗幅值频谱; $G(f)$ 为故障绕组相对于正常绕组的增益频谱。

根据式(19),得到仿真中各磁极发生短路时的增益频谱如图5所示。

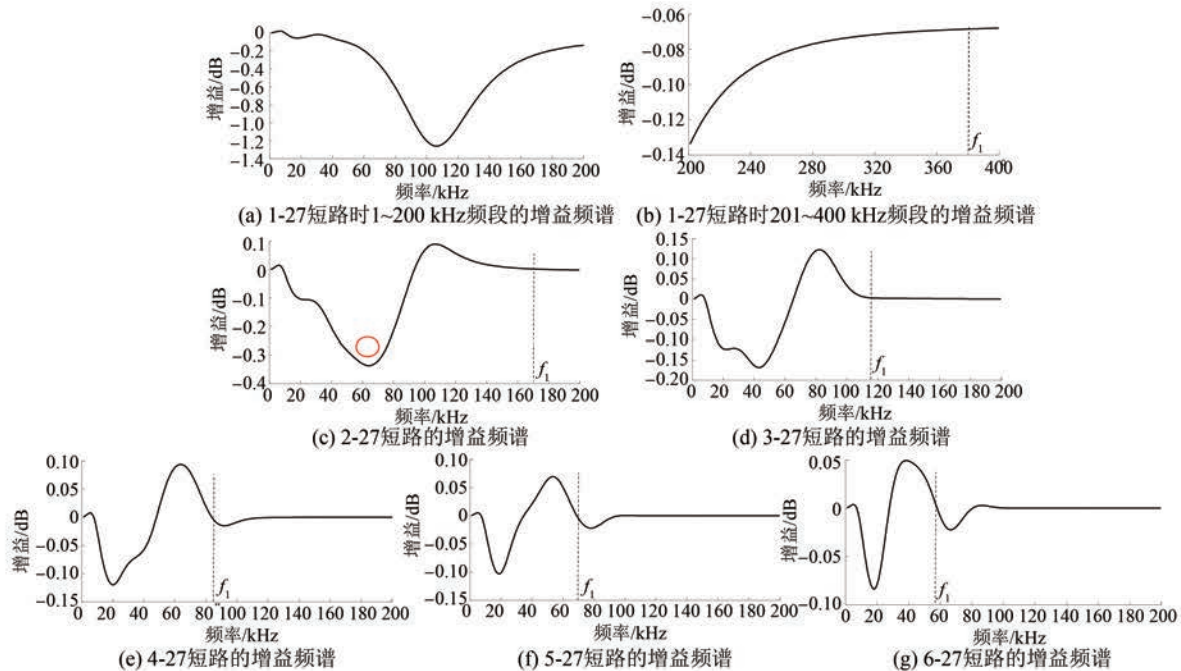


图5 仿真中各磁极发生短路时的增益频谱

根据图5中的增益频谱,可以得出以下规律。

(1) 各磁极发生匝间短路时故障特征集中体现为在 f_z 之前增益频谱存在波动。对于1号磁极而言,其主要体现为负向波动,对于其余磁极而言,正向波动与负向波动交替。 f_z 之后,增益频谱趋向0。而当绕组不存在故障时,由式(19)可知,增益频谱应为0 dB的直线,但由于频率、阻抗等参数的测量误差、高阻性缺陷(并未直接形成金属性短路)等因素,设定阈值来判断金属性短路故障是否明确存在是符合实际工程需要的。本文提出以增益频谱 f_z 之前最大负向峰值 G_n 为故障诊断阈值,其单位为dB,如图5(c)中圆形标记所示。由式(19)可知,短路匝数越多,绕组阻抗相对于正常状态下的绕组阻抗比例越小,则其负向峰值绝对值越大。

由于水电机组定制性较强,不同机组的极数、匝数、绝缘设计差异较大,制定统一的诊断阈值较为困难,以自身为基准进行纵向比较更为合理。因此可以在磁极现场组装完成后,采取人工短路

的方法测取阻抗频谱等故障基础数据,形成故障图谱库,获得以自身特性为基准的增益频谱故障诊断阈值,后续机组运行全生命周期中均可以此为基础阈值进行诊断。

对于显极式转子而言,人工短路的实施比较方便,主要是因其的绝缘显露,较易触及,同时人工短路点设置不会影响绕组的匝间绝缘,通过喷涂绝缘漆等方式可以恢复绕组正常绝缘状态。

(2) 在故障由1号磁极远离近端口至6号磁极的过程中,增益频谱的波动频宽 f_1 (如图5中虚竖线所示)逐渐减小,表明了故障点对本端口阻抗频谱的影响效应, f_1 与故障点位置相关。

由上述分析可知, Δf 、 f_1 分别代表绕组对本端口位置、故障点位置对本端口频谱的影响,蕴含绕组全长、故障点距离本端口长度的位置信息,因此本文提出以下故障位置计算方法:

$$R_f = \frac{\Delta f}{f_1} \quad (20)$$

式中: R_f 为故障点距本端口的长度占绕组全长的

百分比。

由式(20)计算得到的仿真中各磁极短路时的定位结果如表 2 所示。

表 2 仿真中各磁极短路时的定位结果

短路磁极号	$\Delta f/\text{kHz}$	f_1/kHz	$R_t/\%$	R_t (理论值)/%	定位误差/%
1	26	380	6.8	7.5	-0.7
2	26	171	15.2	15.8	-0.6
3	26	116	22.4	24.1	-1.7
4	26	84	31.0	32.5	-1.5
5	26	69	37.7	40.8	-3.1
6	26	58	44.8	49.1	-4.3

可以看出,该方法最大定位误差出现在大号磁极,即靠近磁极中心位置处,为-4.3%,小号磁极发生故障时定位误差相对较小,其原因简要分析如下。

(1) 一定频段的频域阻抗频谱在时域上可等效为陡脉冲激励。时域上,故障点导致转子绕组传输线阻抗突变产生反射效应,体现在频域上则是增益频谱的一种波动效应;而故障点位置的不同会导致时域上反射信号传输时间不同,体现在频域上则是增益频谱的波动周期不同。故障点离测量端口越远,反射信号到达测量端口的时间越长,对应频域上的增益频谱波动周期越短。式(20)正是利用了时、频域的映射关系进行定位。

(2) 采用式(20)进行定位的前提是假设一个包含一定频宽的陡脉冲信号在转子绕组 MTL 上的传播速度恒定,但实际上由于 MTL 多匝之间的耦合,随着传输距离的加大,陡脉冲信号的高频成分不断衰减,导致其传播速度发生变化,此时,式(20)反映的是一种平均效应。故障点位置靠近大号磁极意味着故障反射信号传播距离较大,传播速度的改变导致时域上的反射时间随传输距离的线性度变差, f_1 的误差增加,此时采用式(20)进行定位的误差相对较大。

4 应用及验证

采用本文提出的频域特性诊断方法在 A 转子上进行了应用和测试,A 转子实体如图 6 所示。

测试时,该发电电动机处于 A 级检修,并更换了全新的磁极,因此可以认为该绕组无匝间短



图 6 A 转子实体图

路。为验证本文方法的有效性,采用人工短路方式模拟不同磁极发生的匝间短路,采用 HIOKI 公司的阻抗分析仪测量绕组端口阻抗频谱,然后按照所提方法对故障进行诊断和定位。测试时,转子位于机坑外。因现场条件所限,仅模拟 1、2、3、6 号磁极短路故障。正常及短路时的实测阻抗频谱如图 7 所示。

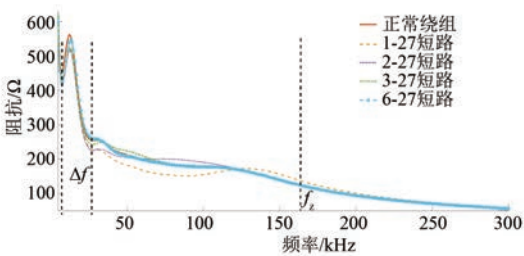


图 7 正常及短路时的实测阻抗频谱

由图 7 可见,与仿真相比,真机转子的阻抗频谱高频段的峰值较为平坦,本文第 3 节中所述关于 f_z 、 Δf 以及故障主要差异频段的规律与仿真结果较为一致,其中 f_z 为 164 kHz, Δf 为 19 kHz。

按照式(19)计算得到各磁极发生短路时的实测增益频谱如图 8 所示。由图 8 可见,各磁极发生匝间短路时,实测增益频谱在 f_z 之前,存在波动特征,其与仿真结论一致,从而验证了本文所提基于频域特性的故障诊断方法的有效性。

根据该转子尺寸数据得到各磁极人工短路点位置,如表 3 所示,绕组全长为 2 333.6 m。

表 3 各磁极人工短路点位置

短路磁极号	1	2	3	6
实际位置(以测量端口为起点)/m	179.0	373.4	567.9	1 150.7

根据表 3 计算得到 R_t 的实际值,同时根据式(20)得到 R_t 的计算值,得到实测中各磁极人工短路时的定位结果如表 4 所示。

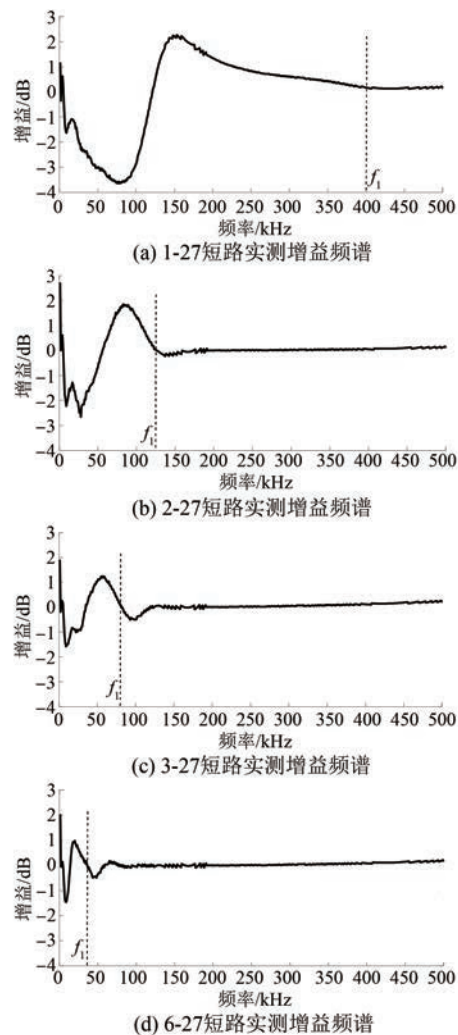


图 8 各磁极发生短路时的实测增益频谱

表 4 实测中各磁极人工短路时的定位结果

短路磁极号	$\Delta f/\text{kHz}$	f_1/kHz	$R_t/\%$	R_t (实际值)/%	定位误差/%
1	19	400	4.8	7.7	-2.9
2	19	126	15.1	16.0	-0.9
3	19	82	23.2	24.3	-1.1
6	19	36	52.8	49.3	3.5

由表 4 可以看出,最大定位误差绝对值为 3.5%,出现在 6 号磁极,即靠近绕组中心位置,整体定位结果与仿真一致性较高,同时与实际故障点位置误差较小,证明了所提故障定位方法的正确性和工程实用性。

5 结 语

本文提出了一种基于端口频域阻抗特性的转

子绕组匝间短路故障诊断方法,通过采用 MTL 理论建模、仿真以及实际真机的验证性应用,得出以下结论。

(1) 基于 MTL 理论的端口频域阻抗模型能够反映绕组在不同状态下的阻抗频谱特征,同时能够为故障诊断、特性模拟等定性分析提供理论基础。

(2) 本文提出的增益频谱法能够有效地突出故障在频域上的特征,以增益频谱截止频率前的波动作为故障特征更加直观、有效。

(3) 结合绕组阻抗频谱低频振荡周波频段 Δf 以及增益频谱波动频宽 f_1 的故障定位方法简单有效,误差较小。

(4) 基于端口频域特性的诊断方法能够在不断开磁极间电气连接条件下,灵敏、便捷地实现微小的匝间短路故障的诊断。

【参 考 文 献】

[1] 国家水电可持续发展研究中心. 全球水电行业年度发展报告 2017[M]. 北京:中国水利水电出版社,2017.

[2] 孙国彬,宋继平. 390 MW 发电机转子故障分析与处理[J]. 上海大中型电机, 2014(1):67.

[3] 刘云. 水轮发电机故障处理与检修[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.

[4] 陈铁华,赵万清,郭岩. 水轮发电机原理及运行[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.

[5] 电力行业电机标准化技术委员会. 旋转电机预防性试验规程: DL/T1768—2017[S]. 北京:中国电力出版社,2018.

[6] 邵卫超,孙士涛,宸博,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.

[7] ALBRIGHT D R. Inter-turn short circuit detector for turbine generator rotor windings[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems. 1971, 90(2):478.

[8] 石薇. 水轮发电机转子绕组匝间短路故障研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.

[9] 武玉才,马倩倩,蔡波冲,等. 水轮发电机转子绕组匝间短路故障的新型在线诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2018,22(11): 19.

[10] 马倩倩. 水轮发电机转子绕组匝间短路故障特征与检测方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.

(下转第 90 页)