

汽轮发电机励磁绕组匝间短路多回路数学模型

李和明, 侯纪勇, 李俊卿, 王红宇, 许国瑞

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Multi-loop Mathematical Model of Turbine Generator With Field Winding Inter-turn Short Circuits Fault

LI Heming, HOU Jiyong, LI Junqing, WANG Hongyu, XU Guorui

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: In order to analyze the fault feature of the field winding inter-turn short circuits, this paper proposed multi-loop mathematical model of turbine generator with field winding inter-turn short circuits fault considering eddy effect of the solid rotor. The inductance related to the field windings was given, the normal and the short circuits fault operation conditions of generator under no load had been simulated based on the model, which was verified by the simulation and the experiment results. A summary of fault features were obtained, such as, the harmonics circumfluence of stator parallel branches emerges and the field current increases gradually to a new constant value under the constant field voltage after the field windings short fault. The model and results provide the theoretic basis for fault analysis and fault diagnosis of turbine generator with field winding inter-turn short circuits.

KEY WORDS: multi-loop mathematical model; field windings inter-turn short circuits; simulation; turbine generator

摘要: 为了分析汽轮发电机励磁绕组匝间短路故障机理, 建立考虑转子铁心涡流影响的汽轮发电机空载时励磁绕组匝间短路多回路数学模型。用气隙磁导法推导了与汽轮发电机励磁绕组有关的单个线圈间电感系数的计算公式。采用该模型对空载时有励磁绕组匝间短路故障 2 种工况分别进行仿真, 得到了励磁电流、定子并联支路环流、定子电压仿真波形。通过仿真研究还得到励磁绕组匝间短路后的 2 个故障特征: 在外加恒定励磁电压的情况下, 励磁电流逐渐增大到

另一个稳定值; 定子并联支路间出现了环流。通过实验验证了所建多回路数学模型的正确性。为汽轮发电机励磁绕组匝间短路故障检测和诊断提供参考。

关键词: 多回路数学模型; 励磁绕组匝间短路; 仿真; 汽轮发电机

0 引言

励磁绕组匝间短路故障是汽轮发电机的常见故障, 发电机长期带故障运行会造成设备损失, 严重威胁机组安全运行^[1-3]。研究励磁绕组匝间短路故障的实时监测、检测和诊断有经济意义。

目前对绕组故障机理的研究方法主要有定性理论分析、实验研究以及数值仿真等^[4-7], 这些方法均已获得了有益的研究成果。采用定性理论分析可以获得定性的故障特征; 实验研究大多针对模型机, 不易体现出大型机组固有的特点; 数值仿真可以以实际机组为研究对象^[8-11], 模拟电机的多种故障, 获得故障特征量的大小, 且可以大幅降低费用, 特别适用于研究大型汽轮发电机组。

本文建立了空载时汽轮发电机励磁绕组匝间短路多回路数学模型。以一台汽轮发电机故障模拟机作为研究对象, 利用所建立的数学模型对绕组正常和励磁绕组匝间短路故障进行仿真, 并与实验结果进行比较。

1 汽轮发电机励磁绕组匝间短路多回路数学模型

1.1 回路选取

1.1.1 定子绕组回路

应用多回路理论的前提是回路的选取^[12-13], 所选回路的数量决定了数学模型的阶数。回路的选取

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060079007); 河北省自然科学基金项目(08B005, E2010001705); 华北电力大学博士研究生创新资助计划-拔尖博士培育计划基金(XM0016)。

Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (20060079007); Project Supported by Hebei Provincial Natural Science Foundation of China (08B005, E2010001705); Project Supported by Ph.D. Graduate Innovative Funding Schemes of North China Electric Power University-cultivate Top-notch Graduate Program (XM0016).

既要满足能仿真出故障后特征量的瞬变规律，又要尽量减少回路数。

空载时汽轮发电机励磁绕组发生匝间短路后，气隙磁场将不对称，在定子绕组各支路中感应的电势也不再平衡。如图 1 所示，设定子每相 2 个并联支路，a、b、c 相各支路间将出现环流，其回路的选取如图 1 所示。图中：实线箭头表示定子支路电流的正方向；虚线箭头表示定子回路电流的正方向；①—③表示回路序号。设定子每相绕组并联支路数为 m ，则定子共有 $3(m-1)$ 个回路。

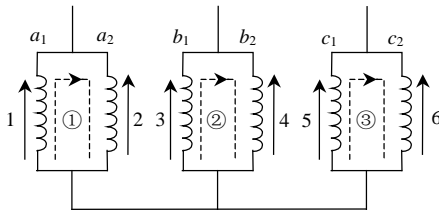


图 1 定子绕组回路

Fig. 1 Loops of stator winding

1.1.2 励磁绕组回路

励磁绕组匝间短路后回路的选取如图 2 所示，励磁绕组的回路数 $n=2$ ，即图 2 中①、②回路。图中： E_{fd} 为外加励磁电源电压； R_{fkk} 为短路点的接触电阻。

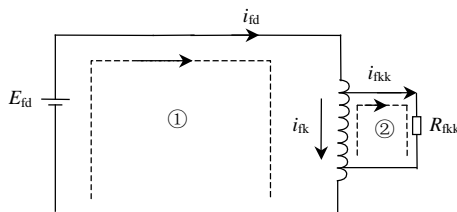


图 2 励磁绕组匝间短路时的回路

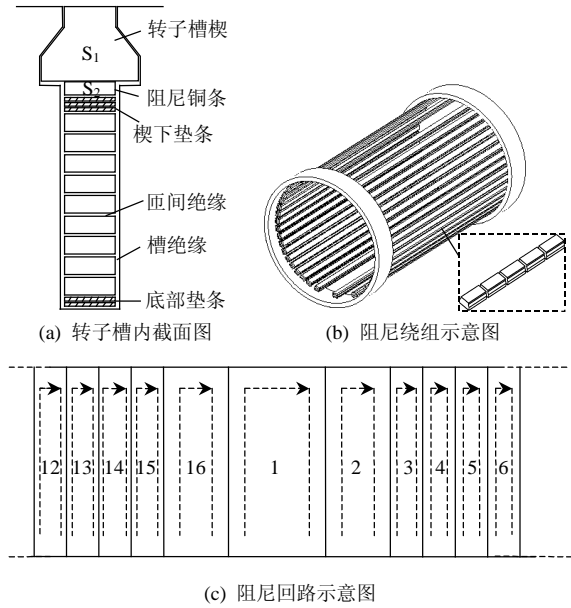
Fig. 2 Loops of field winding with inter-turn short circuit

1.1.3 阻尼回路

汽轮发电机转子的阻尼系统是由各槽内放置的铝合金槽楔(对应图 3 中 S_1 区域)与阻尼铜条(对应图 3 中 S_2 区域)在端部通过梳齿环与护环连接在一起共同构成的笼形结构^[14]，如图 3(a)、(b)所示。本文依据阻尼条的实际连接情况，按图 3(c)所示的方式选择阻尼回路。以大齿处 2 个阻尼条及其间的端环组成的回路为第 1 号回路，然后顺转子转向依次编号，则阻尼绕组有 $2pn_c$ 个回路，其中 p 为电机极对数， n_c 为每极下的阻尼条数。

1.1.4 转子铁心涡流的影响

汽轮发电机转子铁心为实心体结构。当电机处于绕组不对称状态时，实心转子中将有涡流产生，此涡流在转子表面经转子齿到槽楔和护环形成涡



(c) 阻尼回路示意图

图 3 阻尼回路

Fig. 3 Damper loop

流回路^[14]，这对电机参数尤其是阻尼参数有较大影响，但对于结构和材料均确定的转子，其涡流效应一定^[12-16]，且可用相应参数来表示。

本文在参考文献[12, 14]的基础上，结合阻尼回路的选取，将此涡流效应等效为 $2pn_c$ 个阻尼漏感系数，对应于所选取的 $2pn_c$ 个阻尼回路。

1.2 励磁绕组匝间短路多回路数学模型

1.2.1 电压和磁链方程

电机中各电磁量的正方向规定为对所有回路正值电流产生正值磁链的方向。定子侧电压和电流的正方向按发电机惯例，转子侧按电动机惯例。在上述正方向下，对图 1 所示定子各支路列写电压方程、磁链方程，其中任意支路 Q 的方程为

$$U_Q = -D\psi_Q - i_Q R_Q \quad (1)$$

$$\psi_Q = \sum_{S=1}^{3m} M_{QS} i_S + \sum_{g=1}^{2pn_c} M_{Qg} i_g + M_{Qfd} i_{fd} + M_{Qfk} i_{fk} \quad (2)$$

式中： D 为微分算子； U_Q 、 ψ_Q 、 R_Q 分别为 Q 支路的电压、磁链、电阻； i_S 为定子 S 支路电流； i_g 为阻尼 g 回路电流； M_{QS} 为定子 Q 支路与 S 支路间的互感系数； M_{Qg} 为定子 Q 支路与阻尼 g 回路间的互感系数； M_{Qfd} 为定子 Q 支路与除去故障部分后正常励磁回路间的互感系数； M_{Qfk} 为定子 Q 支路与故障励磁部分回路间的互感系数。

对图 2 中各励磁回路列写电压、磁链方程。

励磁绕组回路①的电压、磁链方程为

$$0 = D\psi_{fd} + D\psi_{fk} + i_{fd} R_{fd} + i_{fk} R_{fk} - E_{fd} \quad (3)$$

$$\psi_{fd} = \sum_{S=1}^{3m} M_{Sfd} i_S + L_{fd} i_{fd} + \sum_{g=1}^{2pnc} M_{fdg} i_g + M_{fdfk} i_{fk} \quad (4)$$

式中： ψ_{fd} 为除去故障部分后正常励磁绕组的磁链； ψ_{fk} 为励磁绕组故障部分的磁链； R_{fd} 为除去故障部分后正常励磁绕组的电阻； R_{fk} 为故障部分励磁绕组的电阻； M_{Sfd} 为定子 S 支路与除去故障部分后正常励磁绕组回路间的互感系数； L_{fd} 为除去故障部分后正常励磁绕组的总自感系数； M_{fdg} 为除去故障部分后正常励磁回路与阻尼 g 回路间的互感系数； M_{fdfk} 为除去故障部分后正常励磁绕组回路与励磁绕组故障部分回路间的互感系数。

励磁绕组回路②的电压、磁链方程为

$$0 = -D\psi_{fk} - i_{fk} R_{fk} + i_{fkk} R_{fkk} \quad (5)$$

$$\psi_{fk} = \sum_{S=1}^{3m} M_{Sfk} i_S + L_{fk} i_{fk} + \sum_{g=1}^{2pnc} M_{fkg} i_g + M_{fdfk} i_{fd} \quad (6)$$

式中： M_{Sfk} 为定子 S 支路与故障励磁绕组回路间的互感系数； L_{fk} 为励磁绕组故障部分的自感系数； M_{fkg} 为励磁绕组故障部分与阻尼 g 回路间的互感系数。

图3(c)所示的任一阻尼 g 回路的电压、磁链方程为

$$0 = D\psi_g + i_g R_g - R_c (i_{g-1} + i_{g+1}) \quad (7)$$

$$\psi_g = \sum_{S=1}^{3m} M_{Sg} i_S + L_{fgk} i_{fk} + M_{fdg} i_{fd} + \sum_{g'=1}^{2pnc} M_{g'g} i_{g'} \quad (8)$$

式中： ψ_g 为阻尼 g 回路磁链； R_g 为阻尼回路 g 电阻； R_c 为每根阻尼条电阻； M_{Sg} 为定子 S 支路与阻尼 g 回路间的互感系数； $M_{g'g}$ 为阻尼 g' 回路与 g 回路间的互感系数。

当汽轮发电机存在励磁绕组匝间短路时，定转子绕组共形成了 $3(m-1)+n+2pnc$ 个回路。

1.2.2 多回路数学模型的形成

将电压、磁链方程(1)~(8)写成矩阵形式：

$$U = D\psi + RI \quad (9)$$

$$\psi = MI \quad (10)$$

其中，

$$U = [U_1, \dots, U_{3m}, E_{fd}, 0, \dots, 0]^T$$

$$I = [i_1, \dots, i_{3m}, i_{fd}, i_{fkk}, i_1, \dots, i_g, \dots, i_{2pnc}]^T$$

$$\psi = [\psi_1, \dots, \psi_{3m}, \psi_{fd}, \psi_{fk}, \psi_1, \dots, \psi_g, \dots, \psi_{2pnc}]^T$$

式中： U 、 I 、 ψ 分别为定、转子的电压、电流、磁链矩阵； R 为定、转子电阻矩阵； M 为时变互感系数矩阵，包括定子各支路绕组间的互感系数、定子各支路绕组与励磁绕组回路间的互感系数、定子各支路绕组与各阻尼绕组回路间的互感系数、励磁绕

组回路与阻尼绕组回路间的互感系数及各回路的自感系数。

由方程(9)和(10)可得到定子支路方程和转子回路方程，通过支路对回路的转换矩阵 T 可以得到以各回路电流为状态变量的状态方程。 T 为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将 T 左乘式(9)得到

$$TU = T(DM)I + TM(DI) + TRI \quad (12)$$

定子支路电流、转子回路电流与定转子回路电流 I' 满足：

$$I = T^T I' \quad (13)$$

由式(12)~(13)得

$$TU = T(DM)T^T I' + TMT^T(DI') + TRT^T I' \quad (14)$$

式(14)可简写为

$$U' = M'(DI') + R'I' \quad (15)$$

式中： $U' = TU$ ； $M' = TMT^T$ ； $R' = T(DM)T^T + TRT^T$ 。

式(15)即是以各回路电流为状态变量的励磁绕组匝间短路多回路数学模型，可以用于绕组正常和不同程度匝间短路故障运行工况的仿真。利用4阶龙格-库塔法求解式(15)即可得到定、转子各回路电流。

2 参数 M 的计算

2.1 与励磁绕组无关的气隙电感系数的计算

求解方程(15)之前，必须准确计算模型中的时变系数矩阵 M 。计算时认为汽轮发电机各处气隙均匀，单位面积的气隙磁导为

$$\lambda_\delta = \lambda_0 / 2 = \mu_0 / \delta' \quad (16)$$

式中： λ_0 为气隙磁导； μ_0 为空气磁导率； δ' 为等效气隙长度。

如图4所示，建立坐标系，转子空间纵坐标设在第1个磁极中心线 d 轴上(发电机共有 $2p$ 极，令 $n=1,2,3,\dots,2p$ ，且各磁极沿坐标轴正方向依次排列)，表示磁动势 F ，定子线圈 AA' 的中心轴线 a 轴在0时刻与 d 轴重合；横坐标设在转子外表面，表示沿气隙圆周方向的空间位置，用电角度表示。

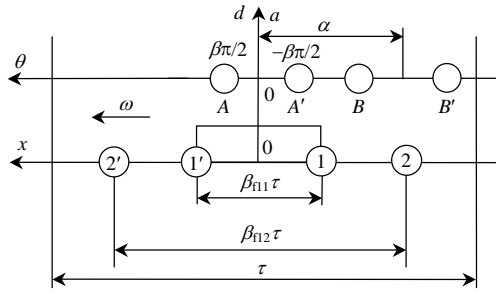


图 4 汽轮发电机励磁回路及定转子坐标系

Fig. 4 Turbine generator field loop and coordinate system

汽轮发电机时变系数 M 中的定子各支路绕组间互感、阻尼回路各自感及其间互感、定子各支路绕组与各阻尼绕组间互感系数可参考文献[12]中凸极电机相应计算公式，结合汽轮发电机的具体结构，适当调整得到相应单个线圈间电感系数的公式计算，然后叠加获得。调整后单个线圈间电感系数的计算公式如下。

定子线圈 AA' 与线圈 BB' 的气隙互感为

$$M_{AB} = \frac{2w_k^2 \tau l}{p\pi^2} \lambda_0 \sum_k \frac{1}{k^2} \sin\left(\frac{k\beta\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k\beta\pi}{2}\right) \cos(k\alpha) \quad (17)$$

式中： $k=1/p, 2/p, 3/p, \dots$ ； w_k 为定子线圈匝数； l 为定子铁心长； p 为极对数； β 为定子线圈短距比； α 为线圈 BB' 落后线圈 AA' 的电角度，当 $\alpha=0^\circ$ 时式(17)即为定子单个线圈的自感。

阻尼第 i 个与第 j 个回路间的气隙互感为

$$M_{ij} = \frac{2w_r^2 \tau l}{p\pi^2} \lambda_0 \sum_k \frac{1}{k^2} \sin\left(\frac{k\beta_i\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k\beta_j\pi}{2}\right) \cos[k(\alpha_i - \alpha_j)] \quad (18)$$

式中： w_r 为阻尼绕组匝数； β_i, β_j 分别为第 i, j 个阻尼回路绕组的短距比； α_i, α_j 为阻尼绕组第 i, j 个回路的中心线与转子 d 轴中心线间的电角度。

定子线圈 AA' 与阻尼绕组第 j 个回路间的气隙互感为

$$M_{Aj} = \frac{2w_k w_r \tau l}{p\pi^2} \lambda_0 \sum_k \frac{1}{k^2} \sin\left(\frac{k\beta\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k\beta_j\pi}{2}\right) \cos[k(\gamma + \alpha_j)] \quad (19)$$

式中 γ 为转子 d 轴顺转子转向领先定子 a 轴线的电角度。

2.2 与励磁绕组有关的气隙电感系数的计算

与励磁绕组有关的单个线圈间电感系数，包括任意 2 个同心式励磁线圈间的互感、单个励磁线圈与单个定子线圈间的互感、单个励磁线圈与阻尼回路间的互感。

计算励磁绕组匝间短路故障部分的自感及其

与其它绕组的互感系数需要推导出单个线圈间的参数计算公式。本文在计算与励磁绕组有关的电感系数时，先用气隙磁导法推导了与之相关的单个线圈间的电感系数计算公式，然后根据除去故障部分后的正常励磁和故障励磁部分的实际连接情况，叠加计算得到各回路电感系数。

对第 n 极下的第 i 个同心式励磁线圈通直流电流 i_{fd} 时产生的矩形波磁动势，在 $[-p\pi, p\pi]$ 区间进行傅里叶分解，可得

$$F_{ini}(x) = \sum_k F_{kni} \cos\{k[x - (n-1)\pi]\}, \quad k = \frac{1}{p}, \frac{2}{p}, \frac{3}{p}, \dots$$

$$\text{式中 } F_{kni} = (-1)^{n-1} \frac{2}{kp\pi} w_{ini} i_{fd} \sin\left(\frac{k\beta_{ini}\pi}{2}\right).$$

根据气隙磁导法^[12]，推导出与励磁绕组有关的气隙电感系数，具体公式如下。

第 n 极下的第 i 个同心式励磁线圈与第 m 极下的第 j 个同心式励磁线圈间的互感为

$$M_{ini,mj} = (-1)^{n+m} \frac{2w_{ini} w_{imj} \tau l}{p\pi^2} \lambda_0 \sum_k \frac{1}{k^2} \sin\left(\frac{k\beta_{ini}\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k\beta_{imj}\pi}{2}\right) \cos[k(m-n)\pi] \quad (20)$$

式中： w_{ini} 为第 n 极下的第 i 个同心式励磁线圈的匝数； β_{ini} 为第 n 极下的第 i 个励磁线圈的短距比。

第 n 极下的第 i 个同心式励磁线圈与第 j 个阻尼回路间的互感为

$$M_{ini,dj} = (-1)^{n-1} \frac{2w_{ini} w_r \tau l}{p\pi^2} \lambda_0 \sum_k \frac{1}{k^2} \sin\left(\frac{k\beta_{ini}\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k\beta_j\pi}{2}\right) \cos[k\alpha_j - k(n-1)\pi] \quad (21)$$

第 n 极下的第 i 个同心式励磁线圈与定子 AA' 线圈间的互感为

$$M_{ini,aj} = (-1)^{n-1} \frac{2w_{ini} w_k \tau l}{p\pi^2} \lambda_0 \sum_k \frac{1}{k^2} \sin\left(\frac{k\beta_{ini}\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k\beta\pi}{2}\right) \cos[k\gamma + k(n-1)\pi] \quad (22)$$

2.3 漏电感系数的计算

漏感系数在励磁绕组匝间短路故障仿真中起关键作用，如果不计及阻尼漏感则参数矩阵 M 奇异，将导致仿真不收敛。在多回路数学模型中需要计算出各回路对应的漏感系数，漏磁场包括端部漏磁场、槽漏磁场和谐波漏磁场，由于气隙电感系数计算中计及了各次谐波漏磁场的效应，故在计算漏感系数时只需考虑端部漏磁场和槽漏磁场引起的电感系数。具体计算步骤是，先计算出各线圈的漏

感系数,然后根据各线圈的漏感系数和连接情况叠加得到各回路的漏感系数。各线圈的漏感系数计算方法分别论述如下。

定子各线圈的端漏电感系数采用离散方式计算,将通电的线圈端部分成若干电流元,按毕奥—萨伐尔定理计算该电流产生的磁场,端部每点的磁场都是各电流元在该点产生磁场的叠加,从而得到各线圈端部的磁链和相应的电感系数,计算中采用铁磁镜像和气隙电流的概念^[12];定子各槽内的上层线圈槽漏自感系数,下层线圈槽漏自感系数,上下层线圈间的槽漏互感系数公式分别为

$$L_a = (N_s / 2)^2 \mu_0 l \lambda_a \quad (23)$$

$$L_b = (N_s / 2)^2 \mu_0 l \lambda_b \quad (24)$$

$$M_{ab} = M_{ba} = (N_s / 2)^2 \mu_0 l \lambda_{ab} \quad (25)$$

式中: N_s 为一个槽内导体串联根数; λ_a , λ_b , λ_{ab} 分别为相应于上层、下层、上下层线圈边的比磁导^[17]。

励磁线圈端漏电感系数计算公式为

$$L = 2\mu_0 [N^2 / (pq)] l \lambda_s \quad (26)$$

式中 λ_s 为励磁槽的槽漏比磁导^[18]。各励磁线圈的槽漏电感系数可认为是单层绕组的槽漏感系数^[17]。

阻尼的端漏感系数可认为是每段端环引起的电感系数^[12]; 阻尼的槽漏感系数可认为是转子槽内穿过槽楔以上部分漏磁场引起的电感系数^[17]。

3 仿真及实验研究

3.1 样机参数

为了验证数学模型的正确性,本文以一台汽轮发电机模拟机为对象,对空载时绕组正常和励磁绕组不同程度匝间短路工况分别进行了仿真和实验研究。根据上述数学模型,选取该模拟机的定转子回路数为 21 个。

模拟机每相有 2 条并联支路,其基本参数如表 1 所示。

表 1 模拟机基本参数
Tab. 1 Main parameters

参数	数值
额定电压 U_N/V	400
额定功率 P_N/W	6000
极对数 p	1
频率 f_N/Hz	50
额定负载时励磁电流 I_N/A	4.95
空载励磁电流 I_0/A	1.55

3.2 空载时绕组正常工况仿真及实验研究

绕组正常空载时的励磁电流、a 相定子电压仿真与实验结果如图 5、6 所示。由图 5 可以看出,由

于实验时由整流电源提供外加励磁电压,获得的励磁电流中含有谐波。由图 5、6 可知,仿真和实验结果基本吻合,验证了本文所建数学模型和参数计算的正确性。

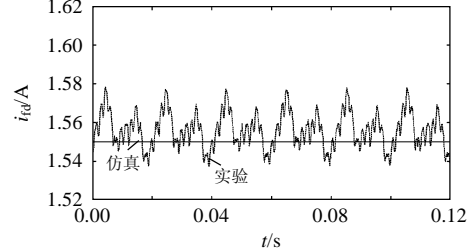


图 5 正常空载时励磁电流

Fig. 5 No-load field currents with normal conditions

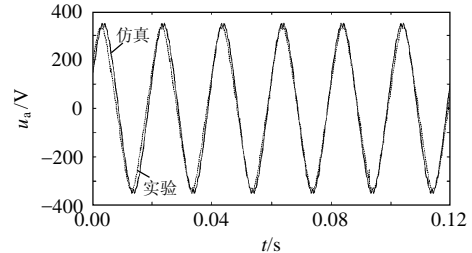


图 6 正常空载时 a 相电压

Fig. 6 No-load phase a voltage with normal conditions

3.3 励磁绕组匝间短路故障工况仿真及实验研究

对空载时励磁绕组匝间短路工况进行仿真和实验研究,设定 $t=0s$ 时刻发生完全匝间短路,短路程度分别为励磁绕组的 3%、6%、12%、15%。实验时外加励磁电压由整流电源提供,仿真时设定励磁电压为 13.2 V。

短路接触电阻 $R_{rk}=0$, 短路程度为 15% 时,实验与仿真结果如图 7—9 所示。图 7 为空载时励磁绕组匝间短路后,励磁电流的实验和仿真波形。由图 7 可知,励磁绕组匝间短路后,励磁电流具有逐渐增大到另一个稳定值的故障特征,且含有谐波分量。实验波形由于由整流电源和短路后磁场不平衡 2 个因素作用产生谐波分量,而仿真波形只有磁场不平衡因素作用产生谐波分量,故图 7 中的实验和仿真波形所含有的谐波分量存在差异。

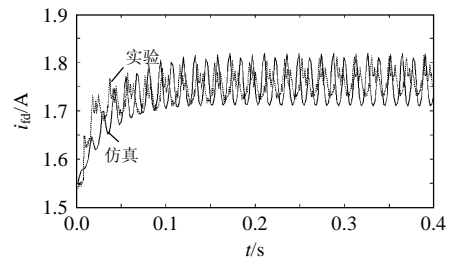


图 7 短路程度为 15% 时的空载励磁电流

Fig. 7 No-load field current with 15% short circuits degree

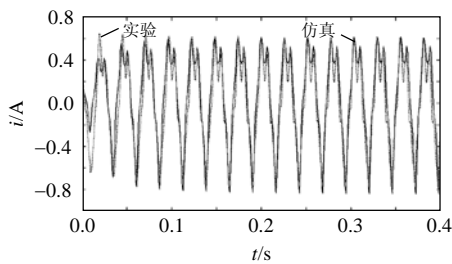


图 8 短路程度为 15%时的空载 a 相并联支路环流
Fig. 8 No-load phase a parallel branches circumfluence with 15% short circuits degree

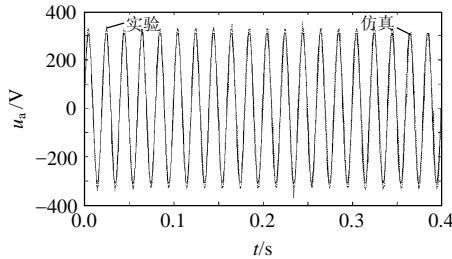


图 9 短路程度为 15%时的空载 a 相电压
Fig. 9 No-load phase a voltage with 15% short circuits degree

励磁绕组匝间短路后实验和仿真结果显示，在定子并联支路间出现了谐波环流，a 相并联支路间环流的实验与仿真波形如图 8 所示，此环流主要是由于转子匝间短路后励磁磁场不平衡产生的，图 8 表明实验与仿真结果基本吻合。此环流的出现与文献[19-20]的理论分析一致，由于模拟机与仿真的差异，使实验波形环流峰值稍大。

图 9 为励磁绕组匝间短路后的定子 a 相电压，由图 9 可知，实验与仿真波形一致，且轻度匝间短路对定子电压的影响不明显。图 7—9 验证了所建模型的正确性。

短路接触电阻 $R_{fkk}=0.5R_{fd}=4.258 \Omega$ ，短路程度为 6%时，仿真结果如图 10、11 所示，图 10、11 表明：励磁绕组发生非金属性短路时，励磁电流和定子并联支路环流的变化与发生 15%金属性短路时变化趋势相同；所建多回路模型能计算出小程度、非金属性绕组短路时的各工况。

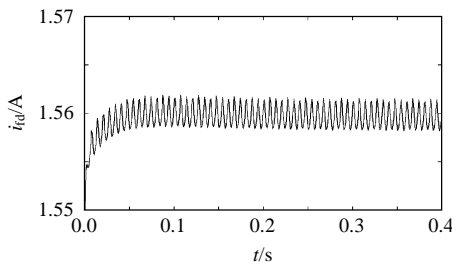


图 10 短路程度为 6%时的空载励磁电流
Fig. 10 No-load field current with 6% short circuits degree

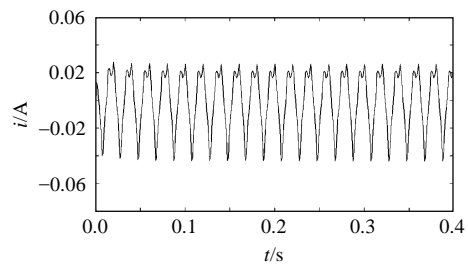


图 11 短路程度为 6%时的空载 a 相并联支路环流
Fig. 11 No-load phase a parallel branches circumfluence with 6% short circuits degree

4 结论

1) 建立了汽轮发电机空载时励磁绕组匝间短路多回路数学模型，合理考虑了转子铁心涡流的影响，适用于绕组正常和励磁绕组匝间短路故障仿真，实验结果验证了数学模型的正确性。

2) 推导了与汽轮发电机励磁绕组有关单个线圈间电感系数的计算公式。

3) 通过仿真与实验研究，获得了励磁绕组匝间短路后的 2 个故障特征：在外加恒定励磁电压的情况下，励磁电流逐渐增大到另一个稳定值；定子并联支路间出现了环流。

致 谢

本文中参数计算方面的研究受到了清华大学孙宇光老师的指导，特此表示感谢。

参考文献

- [1] 李伟清. 汽轮发电机故障检查分析及预防[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 80-81.
Li Weiqing. The analysis and prevention of turbine-generator fault[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 80-81(in Chinese).
- [2] 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 turbine generator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2003(3): 7-11(in Chinese).
- [3] 唐芳轩, 许艳霞. 秦山第二核电站发电机转子匝间短路故障的诊断与处理[J]. 电力设备, 2005(6): 67-69.
Tang Fangxuan, Xu Yanxia. Diagnosis and treatment of turn-to-turn short circuit fault for generator rotor in QinShan No.2 nuclear power station[J]. Electrical Equipment, 2005(6): 67-69(in Chinese).
- [4] 李永刚, 李和明, 赵华. 汽轮发电机转子匝间短路故障诊断新判据[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 112-116, 169.
Li Yonggang, Li Heming, Zhao Hua. The new criterion on inter turn short-circuit fault diagnose of steam turbine generator rotor windings [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 112-116, 169(in Chinese).
- [5] 万书亭, 李和明, 李永刚, 等. 同步发电机转子匝间短路故障时励磁电流谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 64-67.
Wan Shuting, Li Heming, Li Yonggang, et al. Analysis of generator

- excitation current harmonics on rotor winding inter turn short circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 64-67(in Chinese).
- [6] 李永刚, 李和明, 赵华, 等. 基于定子线圈探测的转子匝间短路故障识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 107-112.
Li Yonggang, Li Heming, Zhao Hua, et al. Fault identification method of rotor inter turn short-circuit using stator winding detection [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 107-112(in Chinese).
- [7] 孙宇光, 王祥珩, 桂林, 等. 同步发电机励磁绕组匝间短路的仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 5-10.
Sun Yuguang, Wang Xiangheng, Gui Lin, et al. Simulation research on inter-turn short circuits of field windings in synchronous machines [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(2): 5-10(in Chinese).
- [8] 许伯强, 王祥珩, 毕大强, 等. 基于多回路-有限元耦合数学模型的同步发电机定子单相接地故障保护方案校验方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 84-89.
Xu Boqiang, Wang Xiangheng, Bi Daqiang, et al. Protection scheme checkout of stator ground fault in synchronous generators based on MLM-FEM coupled mathematical model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 84-89(in Chinese).
- [9] 毕大强, 王祥珩, 桂林, 等. 基于零序电压故障暂态分量的发电机定子单相接地保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 39-44.
Bi Daqiang, Wang Xiangheng, Gui Lin, et al. Protection scheme based on the fault transient component of zero-sequence voltage under the stator ground fault of generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 39-44(in Chinese).
- [10] Reichmeider P P, Gross C A, Querrey D, et al. Internal faults in synchronous machines Part I: The machine model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(4): 376-379.
- [11] Reichmeider P P, Gross C A, Querrey D, et al. Internal faults in synchronous machines Part II: Model performance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(4): 380-383.
- [12] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 1-36, 421-452.
Gao Jingde, Wang Xiangheng, Li Fahai. Analysis of AC machines and their systems[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 1-36, 421-452 (in Chinese).
- [13] 王祥珩, 孙宇光, 桂林, 等. 大型水轮发电机多回路模型的合理简化[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 63-67.
Wang Xiangheng, Sun Yuguang, Gui Lin, et al. Reasonable simplification of the multi-loop model of the large hydro-generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 63-67(in Chinese).
- [14] 汪耕, 李希明. 大型汽轮发电机设计、制造与运行[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 325-328.
Wang Geng, Li Ximing. The design, manufacture and operation of the large turbine-generator[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000: 325-328(in Chinese).
- [15] Wang Xiangheng, Chen Songlin, Wang Weijian, et al. A Study of armature winding internal faults and protection schemes for turbogenerators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(3): 625-631.
- [16] Kulig T S, Buckley G W, Lambrecht D, et al. A new approach to determine transient generator winding and damper currents in case of internal and external faults and abnormal operation-III Results [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1990, 5(1): 70-78.
- [17] 陈世坤. 电机设计(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 65-67.
Chen Shikun. Machine design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1982: 65-67(in Chinese).
- [18] 大电机研究所. 汽轮发电机电磁计算公式[M]. 北京: 机械工业出版社, 1965: 28-63.
Large Machine Institute. Electromagnetic calculation of turbine generator[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1965: 28-63(in Chinese).
- [19] 万书亭. 发电机绕组与偏心故障交叉特征分析及其检测方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2005: 13-14.
Wan Shuting. Research on intersecional characteristic and diagnosis method of generator winding and eccentric fault[D]. Baoding: North China Electric power University, 2005: 13-14(in Chinese).
- [20] 李和明, 万书亭, 李永刚. 基于定子绕组并联支路环流特性的发电机故障识别方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 75-78, 107.
Li Heming, Wan Shuting, Li Yonggang. Generator fault diagnosis based on the circulating current in stator winding parallel branches [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 75-78, 107(in Chinese).



李和明

收稿日期: 2010-08-10.

作者简介:

李和明(1957), 男, 教授, 博士生导师, 从事交流电机及其系统的分析与控制以及在线监测和故障诊断研究, liheming57@263.net;

侯纪勇(1983), 男, 博士研究生, 从事同步发电机建模及其在故障监测诊断中的应用研究, alex83@126.com;

李俊卿(1967), 女, 教授, 硕士生导师, 从事交流电机及其系统分析、电机在线监测和故障诊断研究;

王红宇(1971), 男, 博士后, 从事电机温度场分析计算及状态监测等方面的研究。

(编辑 李婧妍)