

隐极同步发电机励磁绕组匝间短路的多回路电感参数计算

孙宇光, 郝亮亮, 王祥珩

(电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 为了对故障中各种电气量进行准确仿真分析以揭示隐极同步发电机励磁绕组匝间短路的故障机理, 需要准确计算电机的各种参数, 尤其是与发生匝间短路的励磁绕组有关的电感参数。从隐极同步电机分布式励磁绕组在各极下的单个同心式线圈出发, 应用气隙磁导的概念和谐波分析的方法计算与单个励磁线圈有关的电感参数, 并按照故障的励磁绕组的实际连接情况进行叠加, 得到了与励磁绕组各回路有关的多回路参数模型。该模型考虑了励磁绕组故障回路产生的各种谐波磁场的作用, 并通过具体算例间接说明了其合理性。将该参数模型用于励磁绕组匝间短路故障的多回路计算, 计算结果与样机实验吻合, 验证了参数模型的准确性。

关键词: 隐极同步发电机; 励磁绕组匝间短路; 多回路模型; 电感参数

0 引言

发电机励磁绕组匝间短路是一种常见的电气故障, 长期运行会导致励磁电流显著增加、发电机输出无功功率减小、机组振动加剧, 短路点处的局部过热还可能使故障演化为转子一点甚至两点接地故障, 损坏转子铁芯并可能引起转子大轴磁化, 严重情况还会烧伤轴颈和轴瓦, 给机组的安全运行带来巨大威胁^[1]。

目前对发电机励磁绕组匝间短路的研究, 主要通过实验检测^[1]和定性的理论分析^[2-4], 在实际应用中的检测结果还存在局限性。为了设计有效的转子匝间短路故障保护及检测方法, 需要准确计算故障后定、转子各种电气量的分布情况。由于一般的匝间短路会导致励磁绕组在各极下的结构差异, 破坏了发电机电气参数的对称性, 引起气隙磁场的畸变和定子相绕组内部的不平衡电流^[2-3], 派克方程法以及从相绕组出发的电机分析的传统方法不再适用。交流电机的多回路分析法^[5-12]按照电机定、转子绕组的实际连接情况分析各回路的电压和磁链关系, 不仅能够分析定子绕组内部故障^[5-10], 也能深入到转子绕组内部来分析定子所有分支及转子各回路的电流、电压分布情况^[11], 而且能够计及气隙磁场的各种谐波, 可应用于对发电机励磁绕组匝间短路故障的计算分析^[12]。

文献[12]建立了同步发电机励磁绕组匝间短路

故障的多回路数学模型, 并针对凸极同步电机励磁绕组的结构特点, 从每个极绕组出发, 用气隙磁导法^[8,13]先计算出与每个极绕组有关的电感, 再按照正常励磁回路和故障附加回路的实际连接情况, 将相关极绕组电感叠加得到凸极同步电机与励磁回路有关的电感, 将准确的参数模型代入多回路数学模型中, 利用数值算法实现了凸极同步发电机励磁绕组匝间短路故障的数字仿真。

不同于凸极同步电机的集中式励磁绕组, 隐极同步电机励磁绕组由分布的同心式线圈串联而成^[9]。为进一步实现隐极同步发电机励磁绕组匝间短路故障的仿真计算, 本文将建立隐极电机励磁绕组匝间短路情况下的转子绕组电感参数模型和定、转子绕组互感参数模型。

1 隐极同步电机转子匝间短路时与故障的励磁绕组有关的电感参数模型

由于转速较高, 汽轮发电机通常采用隐极式转子。以兰州电机厂制造的 A1553 样机为例, 其主要参数为: 额定功率 $P_N = 12 \text{ kW}$, 额定电压 $U_N = 400 \text{ V}$; 额定电流 $I_N = 21.7 \text{ A}$, 额定功率因数 $\cos \varphi_N = 0.8$, 额定转速为 $1\,000 \text{ r/min}$, 定子并联支路数 $a = 3$ 。该隐极同步发电机转子有 $2P = 6$ 个极 (见图 1 的 P1~P6), 励磁绕组所在径向槽的等分度数 $Z_2' = 54$, 但为使励磁磁动势空间分布接近正弦波, 每极中心部分少开了 3 个槽 (称为转子大齿), 实际励磁槽数为 $Z_2 = 36$ 。励磁绕组每极下的 6 个槽关于磁极中心线两两对称, 放置了 $q_t = 3$ 个同心式线圈 (以图 1 中第 1 极为例, 分别位于槽 1 和 1'、槽 2 和 2'、槽 3 和 3'), 每个线圈的串联匝数 $W_{tdh} =$

收稿日期: 2010-04-10; 修回日期: 2010-05-21。

国家自然科学基金资助项目(50807027); 已申请国家发明专利(申请号: 201010128929.4)。

41($h=1,2,3$), 3 个线圈串联形成每极下的所谓分布式励磁绕组。全部 $2P$ 个极下的绕组都串联起来构成整个励磁绕组, 其串联总匝数为 $2P \sum_{h=1}^{q_f} W_{fdh} = 738$ (本文只考虑励磁绕组并联支路数为 1 的情况)。此外, 转子表面还开了 54 个均匀分布的圆形阻尼槽。

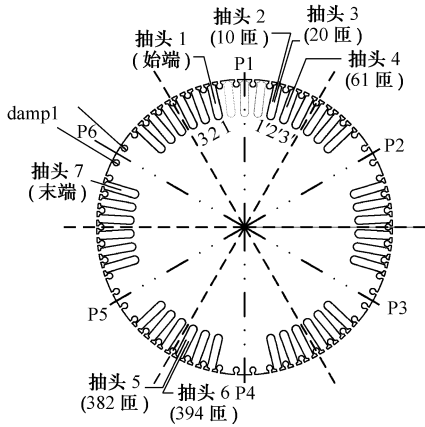


图 1 A1553 样机转子冲片及励磁绕组引出抽头
Fig. 1 Rotor lamination and field winding's taps of A1553 model machine

对于发生转子匝间短路的隐极同步电机, 需要从每极下的每个同心式励磁线圈出发, 推导与故障的分布式励磁绕组有关的电感计算公式。

1.1 励磁绕组单个同心式线圈产生的气隙磁场

励磁绕组各极下的每个同心式线圈单独产生的磁动势为分布在整个电机圆周、关于该极中心线对称的矩形波。如果将转子空间坐标 x (电角度) 的零点放在转子第 0 极 (即第 $2P$ 极) 中心线上, 那么励磁绕组第 n 极 ($n=1,2,\dots,2P$) 下第 h ($h=1,2,\dots,q_f$) 个同心式线圈通直流电流 i 后, 产生的矩形波磁动势周期为 $2P\pi$ (图 2 所示为 $n=1$ 的情况), 进行 Fourier 级数分解得:

$$F_{fd,n,h}(x) = \sum_{k=\frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \dots} F_{k,n,h} \cos k(x - n\pi) \quad (1)$$

其中 k 次谐波磁动势的幅值为:

$$F_{k,n,h} = (-1)^n \frac{2}{kP\pi} i \omega_{fd,n,h} \sin \frac{k\beta_{fdh}\pi}{2} \quad (2)$$

式中: $\omega_{fd,n,h}$ 为第 n 极下第 h 个同心式线圈的串联匝数; β_{fdh} 为该线圈的短距比。

隐极同步发电机气隙均匀, 不考虑齿谐波时气隙磁导为常数:

$$\lambda_{\delta}(x) = \frac{\mu_0}{\delta} \quad (3)$$

式中: δ 为考虑铁芯磁阻、齿槽效应等因素的等效气隙长度。

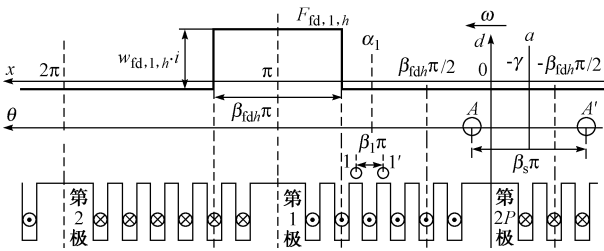


图 2 隐极同步电机第 1 极下第 h 个同心式线圈产生磁动势的空间分布及其对定子线圈和阻尼回路作用的示意图

Fig. 2 Effect of spatial-distributed MMF on the stator coil and damper loop produced by h^{th} concentric field coil in the 1st pole of non-salient-pole synchronous machine

根据式 (2)、式 (3), 励磁绕组第 n 极下第 h 个同心式线圈通直流电流 i 后, 产生气隙磁密的空间函数为:

$$B_{fd,n,h}(x) = F_{fd,n,h}(x) \lambda_{\delta}(x) = \frac{2}{P\pi} \frac{\mu_0}{\delta} i (-1)^n \omega_{fd,n,h} \cdot \sum_{k=\frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \dots} \frac{1}{k} \sin \frac{k\beta_{fdh}\pi}{2} \cos k(x - n\pi) \quad (4)$$

1.2 励磁绕组各同心式线圈的互 (自) 感

式 (4) 中的 $B_{fd,n,h}$ 在第 m ($m=1,2,\dots,2P$) 极下第 h_2 ($h_2=1,2,\dots,q_f$) 个励磁线圈内产生的磁链为:

$$\Psi_{fd\delta,(n,h),(m,h_2)} = (-1)^m \frac{\omega_{fd,m,h_2} \tau l}{\pi} \int_{\frac{\beta_{fdh_2}\pi}{2}}^{\frac{\beta_{fdh_2}\pi}{2} + m\pi} B_{fd,n,h}(x) dx \quad (5)$$

式中: τ 为发电机极距; l 为铁芯长度。

励磁绕组第 n 极下第 h 个线圈与第 m 极下第 h_2 个线圈之间的与气隙有关的互感为:

$$M_{fd\delta,(n,h),(m,h_2)} = \frac{\Psi_{fd\delta,(n,h),(m,h_2)}}{i} = (-1)^{m+n} \frac{4\mu_0}{\delta} \frac{\tau l}{P\pi^2} \omega_{fd,n,h} \omega_{fd,m,h_2} \cdot \sum_{k=\frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \dots} \frac{1}{k^2} \sin \frac{k\beta_{fdh}\pi}{2} \sin \frac{k\beta_{fdh_2}\pi}{2} \cos k(n-m)\pi \quad (6)$$

式中: k 为励磁绕组单个线圈产生的磁动势谐波次数, 包括各种分数和整数。

如果令 $m=n, h_2=h$, 式 (6) 即为励磁绕组第 n 极下第 h 个线圈的与气隙磁场有关的自感, 所以自感可以看成互感的特例。

1.3 励磁绕组各同心式线圈与阻尼回路的互感

假设阻尼回路 $11'$ 的短路比为 β_1 、中心线位于 α_1 (在转子空间坐标上, 见图 2), 那么式 (4) 中的 $B_{fd,n,h}$ 在这个阻尼回路内产生的磁链为:

$$\Psi_{fd\delta,(n,h),11'} = \frac{\omega_1 \tau l}{\pi} \int_{\alpha_1 - \frac{\beta_1\pi}{2}}^{\alpha_1 + \frac{\beta_1\pi}{2}} B_{fd,n,h}(x) dx \quad (7)$$

式中: ω_1 为阻尼回路 11' 的串联匝数, 通常 $\omega_1 = 1$ 。

阻尼回路 11' 与励磁绕组第 n 极下第 h 个线圈的互感为:

$$M_{fd,(n,h),11'} = \frac{\Psi_{fd\delta,(n,h),11'}}{i} = (-1)^n \frac{4\mu_0}{\delta} \frac{\tau l}{P\pi^2} \omega_1 \omega_{fd,n,h} \cdot \sum_{k=\frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \dots} \frac{1}{k^2} \sin \frac{k\beta_1 \pi}{2} \sin \frac{k\beta_{fdh} \pi}{2} \cdot \cos k(n\pi - \alpha_1) \quad (8)$$

1.4 励磁绕组各同心式线圈与定子单个线圈的互感

把定子空间坐标 θ (电角度) 的零点放在定子线圈 AA' 的轴线 a 上, 假设转子坐标轴 (图 2 中的 d) 领先定子坐标轴 (图 2 中的 a) γ 电角度, 那么式 (4) 中的 $B_{fd,n,h}$ 在 AA' 内产生的磁链为:

$$\Psi_{fd\delta,(n,h),AA'} = \frac{\omega_s \tau l}{\pi} \int_{-\gamma - \frac{\beta_s \pi}{2}}^{-\gamma + \frac{\beta_s \pi}{2}} B_{fd,n,h}(x) dx \quad (9)$$

式中: ω_s 和 β_s 分别为定子线圈 AA' 的串联匝数和短路比。

定子线圈 AA' 与励磁绕组第 n 极下第 h 个线圈的互感为:

$$M_{fd,(n,h),AA'} = \frac{\Psi_{fd\delta,(n,h),AA'}}{i} = (-1)^n \frac{4\mu_0}{\delta} \frac{\tau l}{P\pi^2} \omega_s \omega_{fd,n,h} \cdot \sum_{k=\frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \dots} \frac{1}{k^2} \sin \frac{k\beta_s \pi}{2} \sin \frac{k\beta_{fdh} \pi}{2} \cdot \cos k(n\pi + \gamma) \quad (10)$$

式中:

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \int_0^t \omega dt$$

γ_0 为 $t=0$ 时转子第 0 极 (即第 $2P$ 极) 中心线领先定子线圈 AA' 轴线的电角度, ω 为转子旋转的电角速度。

可见, 励磁绕组单个线圈与定子单个线圈之间的互感是时变量。如果转速 ω 保持为同步速 ω_0 , 即 $\gamma(t) = \gamma_0 + \omega_0 t$ 。从式 (10) 看到, 由于励磁绕组单个线圈产生的磁动势谐波次数 k 包括分数, 所以励磁绕组单个线圈与定子单个线圈之间的互感的周期为 $2P\pi$, 包括各种分数次时间谐波和整数次时间谐波。

1.5 励磁绕组的回路电感

在励磁绕组匝间短路多回路数学模型中, 需要计算励磁绕组正常回路 (见图 3 中对应电流为 i_f 的虚线) 和故障附加回路 (见图 3 中对应电流为 i_{fkL} 的虚线) 的电感, 包括与气隙磁场有关的电感和漏电感。

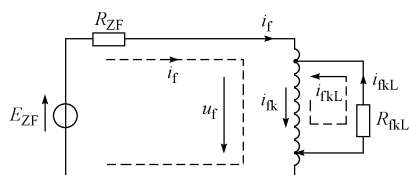


图 3 同步发电机发生匝间短路的励磁回路
Fig. 3 Loops of field windings with inter-turn short circuit in synchronous machine

在 1.2 节得到励磁绕组单个线圈与气隙有关的互感 $M_{fd,(n,h), (m,h_2)}$ 的基础上, 按照励磁绕组各回路的实际连接情况, 将相关的所有线圈电感叠加起来可计算出励磁各回路的电感。励磁绕组正常回路与故障附加回路之间的与气隙磁场有关的互感表达式为:

$$M_{f, f_{kL}, \delta} = \frac{4\mu_0}{\delta} \frac{\tau l}{P\pi^2} \sum_{n=1}^{2P} \sum_{m=1}^{2P} (-1)^{m+n} \cdot \sum_{h=1}^{q_f} \sum_{h_2=1}^{q_f} W_{fdh} \omega_{fk,m,h_2} \left\{ \sum_{k=\frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \dots} \frac{1}{k^2} \sin \frac{k\beta_{fdh} \pi}{2} \cdot \sin \frac{k\beta_{fdh_2} \pi}{2} \cos k(n-m)\pi \right\} \quad (11)$$

式中: W_{fdh} 为正常励磁绕组每极第 h 个同心式线圈的串联匝数; ω_{fk,m,h_2} 为励磁绕组短路匝 (见图 3) 所包含的第 m 极下第 h_2 个同心式线圈的串联匝数 ($m=1, 2, \dots, 2P; h, h_2=1, 2, \dots, q_f$), 如果短路匝不包含第 m 极绕组, $\omega_{fk,m,h_2} = 0$ 。

把式 (11) 中 W_{fdh} 换成 $\omega_{fk,n,h}$, 即得到气隙磁场产生的励磁绕组故障附加回路的自感; 而把 ω_{fk,m,h_2} 换成 W_{fdh_2} , 即为气隙磁场产生的励磁绕组正常回路的自感。

隐极同步发电机放在转子径向槽内的分布式励磁绕组, 其漏电感的计算类似于定子绕组^[8], 包括线圈边所在槽的槽漏磁场和端部漏磁场引起的电感。

不考虑磁场严重饱和时, 一般认为只有同槽的线圈才有槽漏电感。可先根据槽形尺寸计算出每 1 匝同心式线圈的槽漏自感 $L_{fdSh, 1 \text{ turn}}^{[14]}$ ($h=1, 2, \dots, q_f$), 然后按下式得到励磁绕组正常回路与故障附加回路之间的槽漏互感:

$$M_{f, f_{kL}, Sl} = \sum_{n=1}^{2P} \sum_{h=1}^{q_f} W_{fdh} \omega_{fk,n,h} L_{fdSh, 1 \text{ turn}} \quad (12)$$

把式 (12) 中 W_{fdh} 换成 $\omega_{fk,n,h}$, 即得到励磁绕组故障附加回路的槽漏自感; 而把 $\omega_{fk,n,h}$ 换成 W_{fdh} , 即为励磁绕组正常回路的槽漏自感。

励磁绕组端部漏磁场引起的电感的计算, 可参照定子绕组的处理方法^[6,8]。首先根据发电机的结构尺寸和励磁绕组端部的形状尺寸, 通过铁磁镜像

和等效气隙电流的概念,按毕奥-沙瓦定理,离散化计算线圈端部电流元产生的磁场,并积分得到单个同心式线圈的端部磁链,可得到励磁绕组第 n 极下 1 匝第 h 个线圈与第 m 极下 1 匝第 h_2 个线圈之间的端漏电感 $M_{\text{fdEl},(n,h),(m,h_2),1\text{turn}}$ (受篇幅所限,这里不列出具体的计算公式及推导过程)。然后根据励磁回路的实际连接情况,计算出励磁各回路的端漏电感。励磁绕组正常回路故障附加回路之间的端漏互感表达式为:

$$M_{f,\text{fkL},\text{El}} = \sum_{n=1}^{2P} \sum_{m=1}^{2P} (-1)^{m+n} \sum_{h=1}^{q_f} \sum_{h_2=1}^{q_f} W_{\text{fdh}} \omega_{\text{fk},m,h_2} \cdot M_{\text{fdEl},(n,h),(m,h_2),1\text{turn}} \quad (13)$$

根据式(11)~式(13),按下式计算励磁绕组正常回路故障附加回路之间的总的互感为:

$$M_{f,\text{fkL}} = M_{f,\text{fkL},\delta} + M_{f,\text{fkL},\text{Sl}} + M_{f,\text{fkL},\text{El}} \quad (14)$$

1.6 励磁绕组各回路与阻尼回路的互感

在 1.3 节得到励磁绕组单个线圈与阻尼回路互感 $M_{\text{fd},(n,h),11'}$ 的基础上,根据励磁回路的实际连接情况,可计算出励磁各回路与阻尼各回路的电感。励磁绕组故障附加回路与阻尼绕组任一回路 $11'$ 的互感为:

$$M_{\text{fkL},11'} = \frac{4\mu_0}{\delta} \frac{\omega_1 \tau l}{P \pi^2} \sum_{n=1}^{2P} \sum_{h=1}^{q_f} (-1)^n \omega_{\text{fk},n,h} \cdot \left\{ \sum_{k=\frac{1}{P},\frac{2}{P},\dots} \frac{1}{k^2} \sin \frac{k\beta_1 \pi}{2} \sin \frac{k\beta_{\text{fdh}} \pi}{2} \cdot \cos k(n\pi - \alpha_1) \right\} \quad (15)$$

1.7 励磁绕组各回路与定子回路的互感

在 1.4 节得到励磁绕组单个线圈与定子单个线圈互感 $M_{\text{fd},(n,h),\text{AA}'}$ 的基础上,根据励磁回路的实际连接情况,可计算出励磁各回路与定子单个线圈的电感。励磁绕组故障附加回路故障与定子任一线圈 AA' 的互感为:

$$M_{\text{fkL},\text{AA}'} = \frac{4\mu_0}{\delta} \frac{\omega_s \tau l}{P \pi^2} \sum_{k=\frac{1}{P},\frac{2}{P},\dots} \left\{ \frac{1}{k^2} \sin \frac{k\beta_s \pi}{2} \cdot \sum_{n=1}^{2P} \sum_{h=1}^{q_f} (-1)^n \omega_{\text{fk},n,h} \sin \frac{k\beta_{\text{fdh}} \pi}{2} \cdot \cos k(\gamma + n\pi) \right\} \quad (16)$$

式(16)中磁动势谐波次数 k 包括分数和各种奇、偶数,而且励磁绕组短路匝包含的各极下对应线圈的匝数一般不同,所有线圈的分数次和偶数次谐波磁动势不像正常励磁绕组那样能完全抵消^[12],所以励磁绕组故障附加回路故障与定子单个线圈之间的互感不仅包括基波及各种奇数次时间谐波,还包括各

种分数次和偶数次时间谐波。

在求出励磁回路与定子单个线圈互感的基础上,再根据定子绕组的连接情况,利用叠加的方法^[8-9],就可得到多回路数学模型中励磁回路与定子回路的电感。

另外,把式(15)和式(16)中 $\omega_{\text{fk},n,h}$ 换成 W_{fdh} ,也可得到励磁绕组正常回路故障与阻尼回路及定子线圈的互感。

2 电感系数计算结果的对比与分析

本文以 A1553 样机为例进行计算与分析。与一般电机不同的是,A1553 样机励磁绕组除了首、末端的 2 个抽头以外,还在内部另外引出了 5 个抽头,这 7 个抽头分别与 7 个滑环相连,滑环又通过电刷连到外部接线板的 7 个端子上,便于进行各抽头之间的匝间短路实验。励磁绕组各抽头的位置及相应匝数如图 1 所示。

根据 1.5 节和 1.6 节推导的公式,表 1 中计算了 A1553 样机励磁绕组 2 和 5 抽头匝间短路(短路匝数占励磁绕组总匝数的 50.4%)情况下励磁回路电感系数和励磁绕组与中心线位于第 0 极(即第 $2P$ 极)的 1 个阻尼回路 damp1(见图 1)之间的互感。对于励磁绕组的正常回路,还可文献[8]给出的公式计算相关的电感,其结果也列于表 1 中。

表 1 A1553 样机与励磁绕组有关的部分回路电感计算值

Table 1 Calculation results of loop inductance relating to the field winding of A1553 model machine

与气隙有关的电感	按本文参数模型的 计算结果/H	按文献[8]公式的 计算结果/H
$L_{f,\delta}$	1.049	1.037
$M_{f,\text{fkL},\delta}$	5.348×10^{-1}	
$L_{\text{fkL},\delta}$	4.912×10^{-1}	
$M_{f,\text{damp1}}$	2.781×10^{-4}	2.811×10^{-4}
$M_{\text{fkL},\text{damp1}}$	2.487×10^{-5}	

从表 1 可见,本文得到的励磁绕组正常回路的气隙自感及其与阻尼回路互感的计算值,与文献[8]的计算结果非常接近。而 $M_{\text{fkL},\text{damp1}}$ 的计算结果比较小,是因为励磁绕组 2 和 5 抽头匝间短路情况下的故障附加回路所包括的励磁线圈位于第 1~4 极,与位于第 6 极的阻尼回路 damp1 完全没有公共部分。

根据 1.7 节的公式计算出 A1553 样机励磁回路与定子绕组的电感,发现在这些时变量中,励磁绕组正常回路故障与定子同相 3 个分支的互感瞬时值都相等,图 4(a)只画出了其与定子三相第 1 分支电感的计算结果($M_{f,a1} = M_{f,a2} = M_{f,a3}$,B 相和 C 相类似)。从图 4(a)看到,励磁绕组正常回路故障与定子各分支互

感的周期都是 0.02 s,以时间基波为主,并且三相之间幅值相等,相位相差 120°。考虑到电机正常空载运行时三相电压幅值相等,相位相差 120°,并且定子各分支电流都为 0,相绕组内部没有环流,这个结果是合理的。按照文献[8]也计算出了这些参数,其结果与图 4(a)非常接近,限于篇幅这里不再列出。

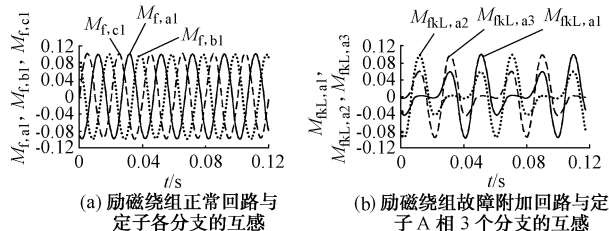


图 4 本文得到的 A1553 样机互感计算值随时间的变化曲线

Fig. 4 Calculation curves of the mutual inductances of A1553 model machine using the formula derived in this paper

图 4(b)画出了励磁绕组故障附加回路与定子 A 相 3 个分支的互感瞬时值,可以看到其周期为 0.06 s,包括分数次时间基波,并且 3 个分支的瞬时值不相等。按照这个计算结果,励磁绕组匝间短路时定子相绕组内会出现环流、并且包括分数次时间谐波。B 相、C 相各分支之间也有类似的关系。

3 仿真与实验

第 2 节通过几个计算实例说明了本文建立的隐极同步电机励磁绕组匝间短路情况下参数模型的合理性。为了进一步检验其正确性,本文在 A1553 样机上进行了单机空载工况下的励磁绕组匝间短路实验,并将上述参数模型代入反映励磁绕组匝间短路故障的多回路数学模型^[12]中进行了相应故障工况的数字仿真。图 5 为故障过渡过程的实验波形与仿真波形。

实验中故障发生在 $t = -0.028$ s, $t = -0.12$ s ~ -0.028 s 之间 A1553 样机正常单机空载运行,理论上定子所有分支都没有电流,但从图 5(a)和图 5(c)看到,A1553 样机定子各分支存在较小的电流,实际上是相绕组内部的固有环流,主要是电机制造和安装中造成的微小偏差所致(比如转子偏心等);而仿真计算并不能考虑这些因素,所以仿真波形在故障发生前定子各分支电流都为 0(如图 5(b)和图 5(d)所示)。而励磁绕组 2 和 5 抽头的匝间短路引起了定子更大的环流,故障后电机制造安装工艺造成的定子绕组固有正常环流就几乎可以忽略了,从图 5 看到,故障后定子分支电流和励磁电流的仿真波形都与实验波形相吻合。由此可以验证

本文提出的隐极同步发电机励磁绕组匝间短路故障情况下多回路电感参数模型(包括多回路数学模型)的正确性。

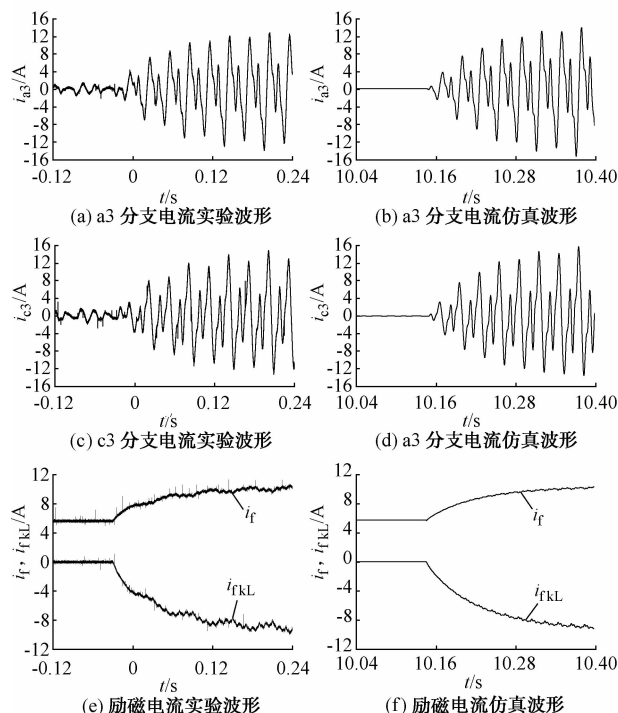


图 5 A1553 样机单机空载工况下励磁绕组 2 和 5 抽头匝间短路故障的定、转子绕组各电流过渡过程波形
Fig. 5 Transient currents of stator and rotor windings under inter-turn short circuit of tap 2th to 5th in field winding of A1553 model machine on no-load condition

4 结语

为分析隐极同步发电机励磁绕组匝间短路故障,本文从每极下的单个同心式线圈出发,提出了与故障的励磁绕组有关的电感参数的计算方法。

计算实例表明,励磁绕组故障附加回路与定子各分支互感中不仅包括时间基波,还包括分数次谐波和其他整数次谐波,这体现了故障的励磁绕组产生的谐波磁场作用,由此导致了定子同相各分支的环流。在参数模型基础上得到的仿真结果与样机实验结果相吻合,验证了参数模型的正确性。

参考文献

- [1] 李伟清,刘双宝. 大型汽轮发电机常见故障的检查及处理方法. 大电机技术, 2000(3): 11-15.
LI Weiqing, LIU Shuangbao. Methods of checking and handling on common faults for large turbogenerator. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2000(3): 11-15.
- [2] MUHLHAUS J, WARD D M, LODGE I. The detection of shorted turns in generator rotor windings by measurement of circulating stator currents// Proceedings of the 2nd International Conference on Electrical Machines-design and

- Applications, September 17-19, 1985, London, UK: 100-103.
- [3] 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. 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. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 64-67.
- [4] NETIP, NANDI S. Analysis and modeling of a synchronous machine with structural asymmetries// Proceedings of 2006 IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering, May 7-10, 2006, Ottawa, Canada: 1236-1239.
- [5] 王祥珩. 多支路同步电机无载时定子内部故障的分析方法. 中国电机工程学报, 1987, 7(5): 1-11.
WANG Xiangheng. The analyzing method of stator internal fault of synchronous machine with multi-branch on no-load. Proceedings of the CSEE, 1987, 7(5): 1-11.
- [6] 高景德, 王祥珩, 金启玖. 凸极同步电机回路参数的计算. 清华大学学报: 自然科学版, 1987, 27(1): 9-19.
GAO Jingde, WANG Xiangheng, JIN Qimei. Calculation of loop parameters of salient-pole synchronous machines. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 1987, 27(1): 9-19.
- [7] 张龙照, 王祥珩, 高景德. 同步电机定子绕组不对称状态的分析方法(II). 中国科学: A 辑, 1991, 31(1).
ZHANG Longzhao, WANG Xiangheng, GAO Jingde. The analytical method of unsymmetrical armature windings of synchronous machine (II). Science in China: A, 1991, 31(1).
- [8] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [9] WANG Xiangheng, CHEN Songlin, WANG Weijian, et al. A study of armature winding internal faults for turbogenerators. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(3): 625-631.
- [10] 孙宇光, 王祥珩, 桂林, 等. 三峡发电机定子绕组内部故障暂态仿真计算. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 56-61.
SUN Yuguang, WANG Xiangheng, GUI Lin, et al. Transient simulation of internal faults on the stator winding of the Three Gorges generator. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(16): 56-61.
- [11] 邱阿端, 张龙照. 鼠笼式异步电动机转子导条及端环故障时的稳态运行分析. 电工技术学报, 1987(3): 7-12.
QIU Arui, ZHANG Longzhao. Steady-state operation analysis of the squirrel-cage induction motors with rotor-bar and end-ring faults. Transactions of China Electrotechnical Society, 1987(3): 7-12.
- [12] 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. 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. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(2): 5-10.
- [13] 王东, 吴新振, 马伟明, 等. 非正弦供电十五相感应电机磁路计算方法. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 58-64.
WANG Dong, WU Xinzhen, MA Weiming, et al. Magnetic circuit calculation of fifteen-phase induction motor with non-sinusoidal supply. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 58-64.
- [14] 陈世坤. 电机设计. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1990.

孙宇光(1975—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向: 电机内部故障的仿真与保护. E-mail: sunyuguang98@mails. tsinghua. edu. cn

郝亮亮(1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 大型发电机励磁绕组匝间短路故障仿真与保护、电机及系统分析. E-mail: haoll07@mails. tsinghua. edu. cn

王祥珩(1940—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电机分析和控制、电机故障及保护、电气传动及其自动化等. E-mail: wangxh@mail. tsinghua. edu. cn

Calculation of the Multi-loop Inductances for Inter-turn Short Circuits of Field Windings in Non-salient Pole Synchronous Machines

SUN Yuguang, HAO Liangliang, WANG Xiangheng

(State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to simulate the electrical states such as currents of stator and rotor windings accurately in fault conditions, and to find out the physical principles behind inter-turn short circuits of field windings in non-salient pole synchronous machines, it is necessary to calculate the parameters of the machine accurately, especially the inductances of the filed windings with inter-turn faults. Given that non-salient pole synchronous machines feature distributed field windings, this paper calculates the inductances of single field coils using the harmonics analysis method and air-gap permeance concept, and derives the multi-loop parameter model based on the actual connection of the field winding with inter-turn faults. The parameter model considers the harmonics of magnetic-field caused by the fault loop in field winding, and is justified by several inductance calculation examples in this paper. Substituting the parameter model into the multi-loop model for inter-turn short circuit faults of field winding, the currents of all the stator and rotor loops in non-salient pole synchronous machines are derived. The results coincide well with the experiment results on a model machine. The correctness and accuracy of the parameter model are thus verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807027).

Key words: non-salient pole synchronous machine; inter-turn short circuits of field windings; multi-loop model; inductance parameters