

负序磁场中同步发电机转子绕组匝间短路故障恶化的分析*

武玉才¹, 马倩倩¹, 王逸仙², 蔡波冲¹

(1. 华北电力大学 电气与工程学院, 河北 保定 071003;

2. 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司, 河北 邢台 055450)

摘要: 以 1 台 300 MW 同步发电机为例, 考虑了阻尼系统, 在不对称运行条件下, 研究了励磁绕组匝间短路后发电机的相关故障特征量, 包括励磁电流、励磁绕组的感应电动势、被短路的励磁回路电流以及阻尼绕组电流等。在此基础上研究了负序磁场中励磁短路线圈的匝数、节距以及短路点过渡电阻等因素对励磁短路电流的影响, 并粗略地计算了短路点的发热量。研究结果可为发电机经历恶劣工况后的励磁匝间短路故障的维修提供可靠的决策支持。

关键词: 同步发电机; 负序磁场; 转子绕组; 阻尼系统; 过渡电阻

中图分类号: TM 31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)10-0126-08

Deterioration Analysis of Inter-Turn Short Circuit Fault in Synchronous Generator Rotor Windings Under Negative Sequence Magnetic Field *

WU Yucai¹, MA Qianqian¹, WANG Yixian², CAI Bochong¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Xingtai Power Supply Branch of National Grid Hebei Power Co., Ltd., Xingtai 055450, China)

Abstract: The rotor windings inter-turn short circuit fault is one of the common faults in turbine generator. When a generator runs in asymmetric condition emerging negative sequence magnetic field, the deterioration rate of inter-turn short circuit fault in rotor windings can be accelerated. In this paper, a 300 MW turbine generator running under asymmetric operation was studied as an example. Considering damping system, the variations of generator fault characteristics after rotor winding inter-turn short circuit were studied, including rotor current, rotor winding induced electromotive force, short circuit loop current and damping current. What's more, the influences of rotor short circuit coil turns and pitch and short-circuit point transition resistance under negative sequence magnetic field on the rotor short current were studied, also the heating condition of the short circuit point was roughly analyzed. The results provided a reliable decision support for repairing inter-turn short circuit in rotor winding after a generator experienced bad operating conditions.

Key words: synchronous generator; negative sequence magnetic field; rotor winding; damping system; transition resistance

* 基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2016502031); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017MS106)

作者简介: 武玉才(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大型电机故障诊断。

马倩倩(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为发电机故障诊断。

0 引言

随着我国同步发电机组容量不断增大,转子绕组匝间短路故障的发生率逐步增高。对转子匝间短路故障的查找和处理过程繁琐,需要抽出转子,维修通常需要半个月以上,增加了发电厂的非计划停机时间,同时也影响了正常的发电计划,经济损失严重。

国内外学者为了有效诊断发电机的转子绕组匝间短路故障,先后提出了一系列在线和离线的诊断方法,其中,在线检测方法主要有探测线圈法^[1]、定子并联支路环流法^[2]、励磁电流法^[3]、轴电压法^[4]等。目前实用的在线诊断方法灵敏度并不高,通常无法检测出轻微的转子匝间短路故障。

发电机正常运行时,转子绕组的匝间短路故障发展较为缓慢,轻微的匝间短路不会对机组构成严重危害。当出现恶劣运行工况或故障时,发电机内产生了较强的负序磁场,被短路的转子绕组内部将产生幅值较大的二倍频感应电动势。例如,2014年国内某核电厂3号主变C相故障导致1号机定子中产生负序电流,转子绕组感应出倍频电压,导致励磁机旋转整流器1支二极管及熔断器受损^[5]。此外,励磁回路形成的倍频交流电流使得短路故障快速恶化,甚至导致转子绕组局部融化,引发绕组一点或两点接地故障,造成保护动作停机。例如,1999年大亚湾核电站2号发电机励磁绕组出现匝间短路故障,初步判断是在第8个线圈中,但故障程度并不严重,没有立即进行停机处理。2002年3月2日,2号机组主变压器发生两相短路事故,并进而对发电机转子造成较大的冲击破坏,由于转子匝间短路点的存在,使得其周围的槽绝缘被破坏,最终发展至转子接地故障^[6]。由此可见,负序磁场对转子绕组匝间短路故障的恶化有推动作用。

针对上述问题,本文研究了在负序磁场中发电机出现轻微转子匝间短路后其故障特征量的变化,旨在加强对负序磁场与转子匝间短路故障恶化趋势间的关联关系认识,为制定发电机的维修计划提供更好的决策支持。

1 发电机模型的建立

转子绕组匝间短路后,为了准确计算发电机的

内部电气参数,本文将多回路分析法与有限元法结合,建立起同步发电机的场路耦合模型,通过将电机的电路方程和磁场方程联立,把每一时刻的电与磁、定转子线圈与阻尼线圈的相互作用联系在一起,真实地模拟电磁场内部的复杂变化过程。

1.1 电路方程

1.1.1 定子回路方程

同步发电机出现转子绕组匝间短路后,由于转子绕组短路部分的存在,气隙磁场将变得不对称。定子回路示意图如图1所示。

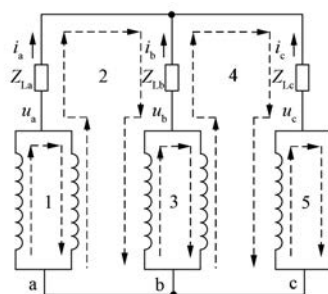


图1 定子回路示意图

图1中,实线箭头表示定子负载电流的正方向,虚线箭头表示定子绕组各回路电流的正方向。

设同步发电机定子每相并联支路数为 a ,相数为 m ,则定子的支路数 $N=ma$,定子 S_i 支路电压方程为

$$u_{S_i} = D\psi_{S_i} - r_{S_i} i_{S_i} \quad (1)$$

式中: u_{S_i} 、 ψ_{S_i} 、 r_{S_i} 、 i_{S_i} ——该支路的电压、磁链、电阻和电流;

D ——微分算子 d/dt 。

定子 S_i 支路的磁链方程为

$$\psi_{S_i} = - \sum_{j=1}^N M_{S_i, S_j} i_{S_j} + \sum_{j=1}^d M_{S_i, D_j} i_{D_j} + M_{S_i, f} i_f + M_{S_i, rk} i_{rkL} \quad (2)$$

式中: M_{S_i, S_j} 、 M_{S_i, D_j} 、 $M_{S_i, f}$ 、 $M_{S_i, rk}$ ——定子 S_j 支路、阻尼 D_j 回路、正常励磁回路和励磁故障附加回路与定子 S_i 支路的互感;

i_{S_j} ——定子 S_j 支路电流;

i_{D_j} ——阻尼 D_j 回路电流;

i_f ——正常励磁回路电流;

i_{rkL} ——励磁故障附加回路电流;

d ——阻尼回路数^[7]。

1.1.2 转子回路方程

在故障情况下转子绕组有 2 个独立回路: 正常励磁回路和故障附加回路。

正常励磁回路的电压方程为

$$E_{ZF} = D\psi_f + (r_f + R_{ZF})i_f + r_{fk}i_{fkL} \quad (3)$$

式中: ψ_f, r_f ——正常励磁回路的磁链和电阻;

r_{fk} ——正常励磁回路与励磁故障附加回路的互电阻。

正常励磁回路的磁链方程为

$$\psi_f = - \sum_{i=1}^N M_{S_i, f} i_{S_i} + \sum_{i=1}^d M_{f, D_i} i_{D_i} + L_f i_f + M_{f, fk} i_{fkL} \quad (4)$$

式中: M_{f, D_i} ——阻尼 D_i 回路与正常励磁回路的互感;

L_f ——正常励磁回路的自感;

$M_{f, fk}$ ——励磁故障附加回路与正常励磁回路的互感^[7]。

励磁故障附加回路的电压方程为

$$0 = D\psi_{fk} + r_{fk}i_f + (r_{fk} + R_{fkL})i_{fkL} \quad (5)$$

式中: ψ_{fk} ——励磁故障附加回路的磁链。

励磁故障附加回路的磁链方程为

$$\psi_{fk} = - \sum_{i=1}^N M_{S_i, fk} i_{S_i} + \sum_{i=1}^d M_{fk, D_i} i_{D_i} + M_{f, fk} i_f + L_{fk} i_{fkL} \quad (6)$$

式中: M_{fk, D_i} ——阻尼 D_i 回路与励磁故障附加回路互感;

L_{fk} ——励磁故障附加回路的自感。

1.1.3 阻尼回路方程

同步发电机的阻尼电路呈网孔状, 如图 2 所示。

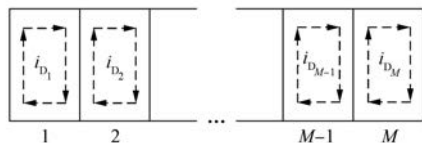


图2 阻尼回路示意图

列出任意回路 D_i 的电压方程为

$$0 = D\psi_{D_i} + r_{D_i}i_{D_i} - (i_{D_{i-1}} + i_{D_{i+1}})r_c \quad (7)$$

式中: ψ_{D_i}, r_{D_i} ——阻尼 D_i 回路的磁链及电阻;

r_c ——一根阻尼条的电阻。

阻尼 D_i 回路的磁链方程为

$$\psi_{D_i} = - \sum_{j=1}^N M_{S_j, D_i} i_{S_j} + \sum_{j=1}^d M_{D_i, D_j} i_{D_j} + M_{f, D_i} i_f + M_{fk, D_i} i_{fkL} \quad (8)$$

式中: M_{D_i, D_j} ——阻尼 D_i 回路与阻尼 D_j 回路的互感。

1.2 电磁场方程

在进行电磁场的有限元计算时, 根据发电机结构和磁场特点做了适当简化: 认为发电机的磁场在轴向方向上均匀分布, 不考虑交变磁场引起的涡流效应, 并假设铁心的磁导率各向同性, 以定子铁心外圆周作为计算区域。在上述前提下, 采用矢量磁位 A_z 建立发电机的二维电磁场方程:

$$\Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (9)$$

$$\tau: A_z = 0 \quad (10)$$

式中: μ ——材料的磁导率;

J_z ——电流密度的 Z 轴分量(包括外施电流和感应电流);

A_z ——第一类边界条件, 即磁力线平行边界条件, 施加在定子外圆周 $A_z = 0$ 。

1.3 发电机的有限元模型

以 QFSN-300-2 型同步发电机为例, 其基本参数如表 1 所示, 用电磁场有限元仿真软件 Ansoft 建立发电机的几何仿真模型。该发电机模型 N、S 极下励磁线圈从节距最小到节距最大依次为第 1、2、...、8 号线圈, 如图 3 和图 4 所示。

表 1 QFSN-300-2 型同步发电机额定运行参数

参数名称	参数值
额定线电压/V	20 000
额定线电流/A	10 190
额定功率/MW	300
额定励磁电流/A	2 575
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
定子槽数	54
转子槽数	32
定子内径/mm	625
定子外径/mm	1 270
转子半径/mm	550
定子绕组连接方式	Y-Y
频率/Hz	50
相数	3
极对数	1

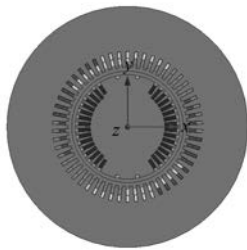


图3 发电机有限元仿真模型

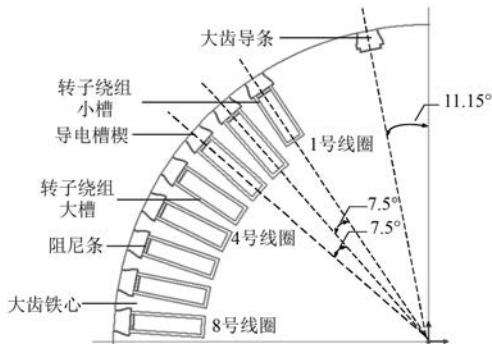


图4 QFSN-300-2型发电机转子结构图

用阻尼条和端环形成的阻尼笼代替原有的阻尼系统,大齿区在阻尼槽中加装阻尼条,小齿区在槽楔下设置阻尼条,所有阻尼条在端部连接构成阻尼笼。根据不同材料的电导率及几何尺寸完成了阻尼系统的等效设置和建模。转子阻尼材料电导率如表2所示。

表2 转子阻尼材料的电导率

阻尼结构	材料	电导率/(S·m ⁻¹)
阻尼条	铜	$\sigma_{cu} = 5.8 \times 10^7$
转子槽楔	铝合金	$\sigma_{al} = 1.76 \times 10^7$

2 负序磁场中发电机发生转子匝间短路故障后的暂态特征

设置该发电机运行于单机带额定负载状态,励磁绕组两端施加额定励磁恒压源,经过6.2 s定子电流 $I_A = I_B = I_C \approx 10\ 190\text{ A}$,电压 $U_A = U_B = U_C \approx 20\ 000/\sqrt{3}\text{ V}$,发电机进入稳定运行状态。

在 $t = 6.2\text{ s}$ 时刻设置发电机进入不对称运行状态,包括一相负载增大和两相相间短路2种情况。(1)一相负载增大的设置为:A相负载增大50%,B、C相负载保持不变;(2)相间短路的设置为:A、B两相相间短路,C相负载保持不变。

然后发电机在不对称运行状态运行0.5 s,在 $t = 6.7\text{ s}$ 时刻设置转子1号线圈短路1匝(短路约7%),并在此状态下运行0.4 s至 $t = 7.1\text{ s}$ 时刻。

2.1 定子电流

图5所示为 $t = 0 \sim 7.1\text{ s}$ 时间段内发电机在一相负载增大和两相相间短路两种情况下分别发生转子匝间短路故障的定子三相电流的变化情况。

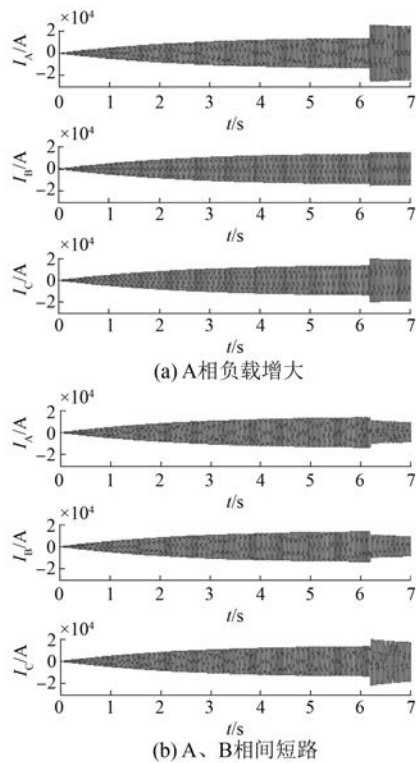


图5 定子电流

由图5可见,在 $t = 6.2\text{ s}$ 时刻,发电机近似达到稳定状态,由于此时设置的定子侧不对称类型不同,各相电流的变化规律也有所不同。现提取定子A相电流的正序、负序及零序分量幅值,如图6所示。

可以看出:(1)在 $t = 0 \sim 6.2\text{ s}$,由于定子侧的三相负载对称,故定子电流中不存在负序、零序电流,只有正序分量逐渐增大至额定电流;(2)在 $t = 6.2\text{ s}$ 时刻设置发电机进入不对称状态后($t = 6.2 \sim 7.1\text{ s}$),正序、负序及零序电流分量呈现出不同程度的增大,此后三者都逐渐减小,并且两相短路时的减小速度要高于一相负载变化时^[8-9]。

对比图6(a)和图6(b)可知,随着定子侧不对称程度的增加,发电机定子电流的负序分量变

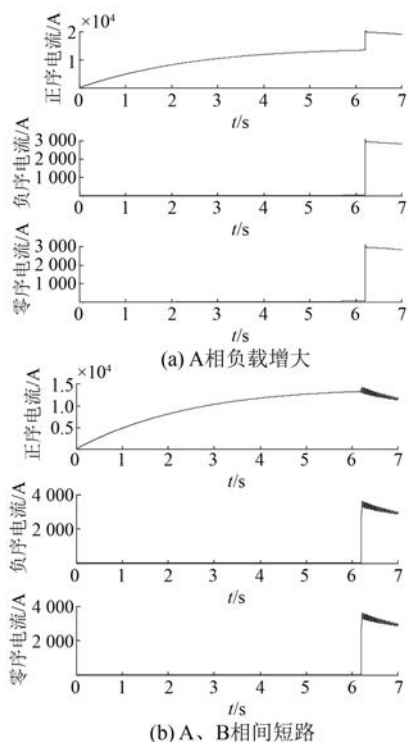


图6 定子电流的正序、负序及零序分量

大:一相负载增大时,负序电流约达到正序电流的15%;两相相间短路时,负序电流已近似正序电流的24%。

由于 Ansoft 软件必须在定转子各回路设置中性点接地端,因此发电机的零序分量与负序分量大小近似相等。

2.2 转子电流

转子电流如图7所示。

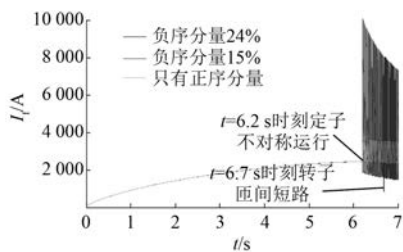


图7 转子电流

在 $t = 6.2$ s 时刻发电机进入不对称运行状态,此时转子电流出现了大量二倍频交流分量,发电机负序磁场越强,转子电流中的2次谐波幅值越大;2次谐波与转子电流的直流分量叠加后,转子电流的瞬时最大值和有效值均出现了明显的提

升。当在 $t = 6.7$ s 时刻转子绕组发生了轻微的匝间短路后,转子电流应有小幅增加,但此时负序磁场产生的大量二倍频交流分量由于阻尼绕组的作用在逐渐减小,造成转子电流的增加幅度并不明显,因而总体仍呈现减小趋势。

2.3 转子短路回路电流

发电机的转子短路回路电流如图8所示。

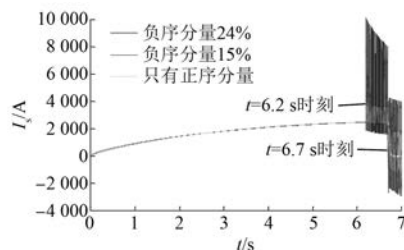


图8 发电机的转子短路回路电流

从图8可看出,发电机在只有正序磁场时发生转子匝间短路,转子短路电流基本为零,交流分量很小;在两种不同的不对称运行状态下,转子匝间短路后,短路电流的成分基本相同:包含直流分量和二倍频交流分量,并且负序磁场越强,转子短路回路的二倍频交流分量幅值也越大。

2.4 转子绕组感应电动势

发电机的转子绕组感应电动势如图9所示。

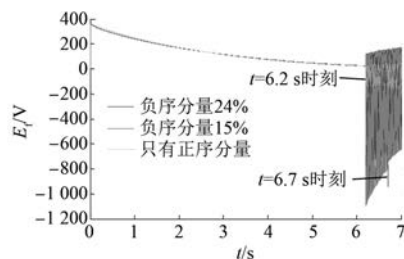


图9 发电机的转子绕组感应电动势

由图9可知,在 $t = 6.2 \sim 6.7$ s 时间段内,发电机不对称状态产生的负序磁场越强,二倍频暂态交流电动势的幅值越大。在 $t = 6.7$ s 时刻发生转子匝间短路故障后:一相负载增大(对应负序分量为15%)的二倍频交流电动势有增大趋势,这是因为在 Ansoft 中设置的一相负载增大,导致发电机在施加励磁恒压源运行后三相电流均呈现出不同程度的增大趋势[图5(a)],进而增大部分电流产生的负序磁场通过气隙交链到转子短路部分绕组,造成转子绕组电动势的增大;同样可知两相

相间短路时,转子绕组的二倍频交流电动势有减小趋势。总之,当转子匝间短路产生的负序磁场与不对称运行造成的负序磁场方向相同时,二倍频交流电动势增大;反之,则减小。

2.5 阻尼绕组电流

选取靠近大齿中心的一根阻尼条为例,其电流如图 10 所示。

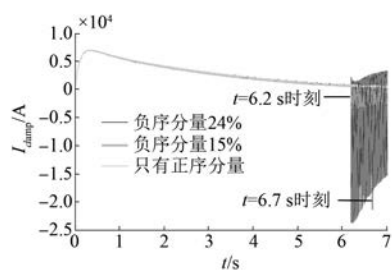


图 10 阻尼绕组电流

由图 10 可知,在 $t=6.2\sim 6.7$ s,阻尼电流幅值逐渐减小;同一时刻,负序分量越大,电流幅值越大。

在 $t=6.7$ s 时刻转子绕组匝间短路后,阻尼电流的直流分量略有升高,这是因为短路后转子电阻减小,造成转子短路部分绕组抵消负序磁场的的能力减弱,因而需要阻尼绕组承担较多的抵消负序磁场任务。

2.6 小结

发电机在不对称情况下运行时,定子三相不对称电流使发电机内出现了负序磁场,造成发电机阻尼回路、转子回路以及转子短路部分回路都出现了交流分量,交流电流与直流电流叠加,使得电流瞬时值大幅增大。在发电机带三相对称负荷时,被短路回路电流理论上为零,而在不对称工况下,被短路回路产生了幅值达到数千安的倍频电流,将引起短路点的严重发热,并可能加速匝间短路故障的恶化。

3 负序磁场下变因素对转子匝间短路故障的恶化影响分析

在 $t=6.2\sim 6.7$ s 时一相负载增大的工况下,在 $t=6.7\sim 7.1$ s 时,分别设置转子 1 号线圈短路 1 匝、3 匝,转子 1、8 号线圈各短路 1 匝,可得在负序磁场中转子短路电流与短路线圈的匝数、节距

之间的变化关系 ($R_d = 0 \Omega$),如图 11 和图 12 所示。

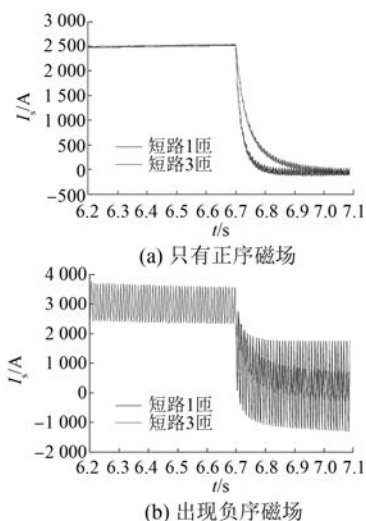


图 11 短路线圈的匝数不同时的转子短路回路电流

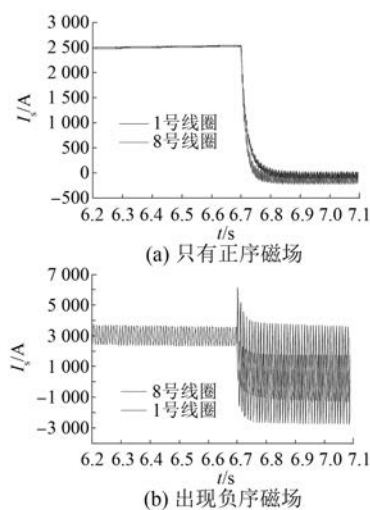


图 12 短路线圈的节距不同时的转子短路回路电流

对比图 11(a) 和图 11(b) 可知,在只有正序磁场的情况下发电机发生转子匝间短路故障,稳定后的转子短路回路电流基本稳定于零,与短路线圈的匝数无关;唯一的区别是从转子电流过渡到转子短路电流的时间长短:短路匝数越少,衰减速度越快。这与转子短路回路的衰减常数 $T_d = e^{-R/L}$ 有关^[10]。

在发电机内有负序磁场时,负序磁场在转子电流中感应的交流分量在转子匝间短路后随短路匝数的增加而减小。这是由于被短路回路的感应

电动势与短路匝数成正比,而回路阻抗则与匝数的平方成正比,因此,随着短路线圈匝数的增加,短路回路的交流分量呈现下降趋势。

由图 12(a) 和图 12(b) 可知,在只有正序磁场时,8 号线圈短路电流的衰减速度略高于 1 号线圈,这是因为 8 号线圈距离大齿铁心的节距大,励磁磁动势感应出的电感 L 大^[11],导致衰减常数较高;一旦发电机内出现负序磁场,转子 8 号线圈的短路电流要明显高于 1 号线圈,这是因为 8 号线圈的节距较大(距离大齿较远),导致负序电流产生的磁链穿过其的基波负序磁通量大,而 2 个线圈的阻抗值近似相等,所以 8 号线圈的短路回路电流大。

4 负序磁场下转子匝间短路故障发热的简化分析

4.1 短路点过渡电阻值不同时的仿真结果

设置转子 1 号槽短路 1 匝时的短路点过渡电阻分别为 $R_d=0.1、10、100\ \Omega$,之后发展为纯金属性短路, $R_d=0\ \Omega$,结果如图 13 所示。

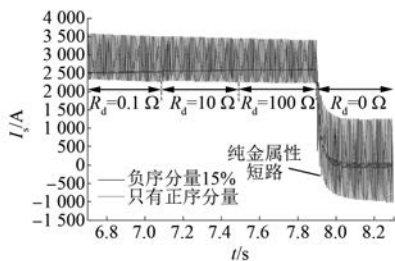


图 13 短路点过渡电阻不同时的转子短路回路电流

由图 13 可知,转子电流的变化还与短路性质有关。在短路发展过程中,负序磁场感应的转子电流交流分量随过渡电阻的增大而减小($t=6.7\sim 7.9\text{ s}$);当短路点发展为纯金属性短路时($R_d=0\ \Omega$),短路电流的直流分量逐渐减小到零,而交流分量较非金属性短路有所增加,原因是转子电阻的减小造成负序磁场感应的交流电流增大;当发电机内部只有正序磁场时,上述特征均不明显^[12]。

4.2 发电机发热量的近似计算

发电机额定运行时转子绕组的功率密度可以表示为

$$p_f=\frac{I_{\text{IN}}^2R_f}{L}$$

(11)

其中:该发电机额定工况下的励磁电流 $I_{\text{IN}}=2\ 575\text{ A}$,转子绕组的总电阻 $R_f=125.3\text{ m}\Omega$,转子绕组的总长度约为 $L=164.8\text{ m}$ 。

发电机发生轻微匝间短路故障后,短路电流流经短路点过渡电阻,如图 14(b) 所示。假定短路点的面积为 1 cm^2 ,折算为等价的转子绕组长度约为 $L_{\text{eq}}=0.2\text{ cm}$ 。短路点的功率密度可以表示为

$$p=\frac{i_s^2R_d}{L_{\text{eq}}}$$

(12)

式中: i_s ——转子短路回路电流;
 R_d ——短路点的过渡电阻。

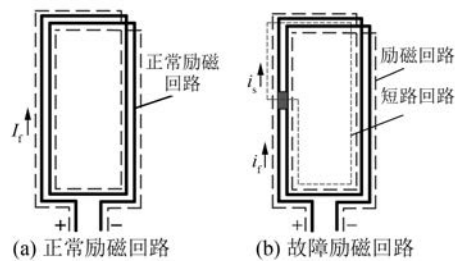


图 14 励磁回路局部示意图

短路点过渡电阻不同时,根据不同过渡电阻对应的电流有效值及式(11)、式(12)可以求得转子绕组近似的热功率密度,如表 3 所示。

表 3 转子绕组的热功率密度对比

(近似值)				10 ⁸ W/m
功率密度	额定运行 转子绕组	短路点		
		过渡电阻值		
		0.1 Ω	10 Ω	100 Ω
只有正序磁场	5.14×10 ⁻⁵	3.13	314	3 140
只有负序磁场		4.68	450.25	4 503

由表 3 可知,随着过渡电阻的增大,转子短路回路电流虽在下降,但短路点的功率密度却在增大。当发电机内出现负序磁场时,发热量要远高于只有正序分量时的发热,甚至当 $R_d=100\ \Omega$ 时,短路点的功率密度已高达额定工况下的 10^8 倍。在如此高的功率密度下,即使转子绕组的通风冷却条件良好,短路点也将在短时间内快速恶化。

4.3 小 结

根据以上分析可知,若发电机长时间运行于轻微不对称状态,短路点的热量得以累积,加之阻尼绕组发热的影响,转子绕组的匝间短路故障也

将有所发展,并最终可能演变为纯金属性短路甚至一点或两点接地故障,其具体发展的速度取决于不同发电机的转子绕组冷却条件、过渡电阻及发电机的不对称程度等因素。

5 结 语

本文在同步发电机不对称状态下进行了转子绕组匝间短路故障仿真,研究了负序磁场对转子匝间短路故障的恶化影响,并在此基础上粗略地分析了转子短路电流与短路线圈的匝数、节距以及短路点过渡电阻之间的关系,得出以下结论:

(1) 发电机在不对称运行状态下发生转子绕组匝间短路故障,不对称程度越严重,负序磁场越强,转子电流、转子绕组的感应电动势、转子短路回路电流及阻尼电流的二倍频交流分量的幅值也越大。

(2) 当发电机内只有正序磁场时,转子短路电流稳定后的大小与短路线圈的匝数、节距并无明显关系;当发电机中出现负序磁场时,转子短路电流随短路线圈匝数的减小和线圈节距的增大而增大。

(3) 发电机不对称运行产生的负序磁场造成转子短路回路电流增大,并且当短路点的过渡电阻值较大时会引起短路部分更为严重的发热,进而加速转子绕组匝间绝缘的破坏。因此,在转子绕组的匝间短路故障不能被立即处理的情况下,应加强对发电机定子侧不对称运行情况的监视,避免因出现负序磁场造成短路故障的快速恶化以及更严重的经济损失。

【参考文献】

[1] ALBRIGHT D R. Inter-turn short circuit detector for

turbine generator rotor windings [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, 1971, 90 (2): 478-483.

[2] 李永刚,宋欣羽,武玉才.基于多回路理论的转子匝间短路时定子并联支路环流分析[J].电力系统自动化,2009,33(17): 71-75.

[3] 李永刚,李和明,赵华.汽轮发电机转子绕组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.

[4] 武玉才,李永刚,李和明.基于轴电压的隐极同步发电机转子典型故障诊断[J].电工技术学报,2010,25(6): 178-184.

[5] 中广核工程有限公司.红沿河3号励磁机与LAB故障分析报告[R].2014.

[6] 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): 7-10.

[7] 郝亮亮,孙宇光,邱阿瑞,等.同步发电机励磁绕组匝间短路故障稳态数学模型及仿真[J].电力系统自动化,2010,34(18): 51-52.

[8] 高云鹏.大型半速汽轮发电机相间短路时瞬态负序分量研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2013.

[9] 张鹏鹏.大型半速汽轮发电机不对称短路及其负序分量的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.

[10] 汤蕴璆.电机学[M].北京:机械工业出版社,2014.

[11] 侯纪勇.汽轮发电机励磁绕组匝间短路分析及实验研究[D].保定:华北电力大学,2011.

[12] 郝亮亮,孙宇光,邱阿瑞,等.隐极发电机励磁绕组匝间短路故障定位及短路匝数估算[J].中国电机工程学报,2011,31(21): 85-90.

收稿日期: 2018-04-25

(上接第76页)

[6] CARMELI M S, CASTELLI D F, MAURI M. Electromagnetic vibration and noise analysis of an external rotor permanent magnet motor [C] // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Taormina, 2006: 1028-1033.

[7] KO H S, KIM K J. Characterization of noise and vibration sources in interior permanent-magnet brushless DC motors [J]. IEEE Transactions on

Magnetics, 2004, 40(6): 3482-3489.

[8] 于慎波.永磁同步电动机振动与噪声特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2006.

[9] 代颖.电动汽车驱动用感应电机的电磁噪声研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[10] ZHU Z Q, HOWE D. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. IV. Magnetic field on load [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 143-151.

收稿日期: 2018-04-25