

隐极发电机励磁绕组 匝间短路故障定位及短路匝数估算

郝亮亮, 孙宇光, 邱阿瑞, 王祥珩

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市海淀区 100084)

Fault Location and Short Circuit Turns Estimation of Inter-turn Short Circuits of Field Windings in Non-salient-pole Synchronous Generator

HAO Liangliang, SUN Yuguang, QIU Arui, WANG Xiangheng

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments

(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: In order to realize the on-line detection and protection of the field winding inter-turn short circuit faults in synchronous generator, in this paper, the field winding inter-turn short circuit faults of a 12 kW non-salient-pole synchronous generator with three pairs on load were calculated by the multi-loop method, the result of which was analyzed comparatively with the corresponding experiment. The influences of distributed field winding fault position and short circuit turns to the fault characteristic quantities were respectively discussed. On the basis, a new method of fault slots judgment and short circuit turns estimation based on stator branch harmonic current was proposed. This paper firstly made a deep and systematical analysis to the fault law of distributed field winding inter-turn short circuit, laying a foundation for the inter-turn short circuit fault on-line detection and protection of the field windings in non-salient-pole generator.

KEY WORDS: non-salient-pole synchronous generator; inter-turn short circuits of field windings; fault location; turns estimation; multi-loop method

摘要: 为实现对发电机励磁绕组匝间短路故障的在线检测与保护, 以一台 12 kW、3 对极隐极同步发电机为例, 采用多回路法对该样机负载运行时发生的励磁绕组匝间短路故障进行计算, 并与实验进行了对比分析; 基于计算与实验结果, 分别探讨了分布式励磁绕组的故障位置及短路匝数对故障

特征量的影响; 在此基础上, 提出利用定子分支谐波电流进行故障定位及短路匝数估算的新方法, 为隐极发电机励磁绕组匝间短路故障在线检测与保护方案设计奠定了理论基础。

关键词: 隐极发电机; 励磁绕组匝间短路; 故障定位; 匝数估算; 多回路方法

0 引言

励磁绕组匝间短路是大型发电机常见的一种电气故障, 轻微故障不会对发电机产生严重影响, 但若长期带故障运行会给发电机组及电力系统带来严重的安全隐患。转子高速旋转中励磁绕组承受离心力造成绕组间的相互挤压及移位变形、励磁绕组热变形、通风不良引起的局部过热等是造成发电机励磁绕组匝间短路的重要原因, 这些原因引起的故障多在发电机实际运行时发生^[1-2]。近年来, 国内外专家学者提出了很多在线检测故障方法^[3-7], 利用发电机运行中的电气量实现对励磁绕组匝间短路故障在线检测与保护, 不需对发电机进行改造, 且能发现离线时无法检测的动态短路故障, 能更有效避免突发性严重匝间短路, 是目前的研究热点^[8-11]。

对故障的定量计算是实现故障在线检测与保护的前提, 交流电机的多回路分析法^[12]以单个线圈为分析单元, 能深入到电机绕组内部分析各回路的电流、电压分布情况, 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^[13-15]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50807027); 清华大学博士生科研创新基金(2010025)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50807027); Ph.D Candidate Scientific Research Innovation Foundation of Tsinghua University (2010025).

隐极同步发电机发生励磁绕组匝间短路时,分布式励磁绕组的故障位置及短路匝数等对故障特征量的影响很大,这为故障定位及短路匝数估算提供了依据。本文以一台 12 kW、3 对极隐极发电机样机为例,基于对励磁绕组匝间短路时故障特征量变化规律的分析,提出一种利用定子分支谐波电流进行故障定位及短路匝数估算的新方法,并通过计算论证了该方法的可行性,可为故障在线检测及保护方案的设计提供依据。

1 励磁绕组匝间短路故障的计算及与实验对比分析

1.1 故障的多回路数学模型及参数计算方法

不失一般性,可只分析励磁绕组并联支路数为 1,且只 1 处发生匝间短路的情况,考虑到故障引起的励磁绕组电路拓扑结构的改变以及定子相绕组内部出现的不平衡电流,文献[13]列出了以定、转子所有回路电流为变量的状态方程:

$$(M' + M_T)DI' + (DM' + R' + R_T)I' = E \quad (1)$$

式中:列向量 I' 为定、转子各回路的电流,在转子方面包括励磁绕组的正常回路和故障附加回路、由所有阻尼条构成的网型回路; M' 为回路电感矩阵,由于定、转子之间的相对运动,为时变矩阵; R' 为回路电阻矩阵; M_T 、 R_T 为与电网线路及变压器的漏感、电阻和励磁系统的内电感、内电阻有关的常数方阵; E 由电网电压和励磁系统电源电压组成,是已知的列向量; D 为微分算子 d/dt 。

式(1)为同步发电机励磁绕组匝间短路故障的多回路数学模型,对凸极机和隐极机都适用。在求解模型(1)之前,必须准确计算模型中时变的回路电感矩阵 M' ,其中与故障励磁绕组有关电感参数的特点(如周期性等)和计算方法,都与正常情况以及定子内部短路情况^[16-17]有所不同。

文献[14]从隐极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方法建立了励磁绕组匝间短路时的转子绕组电感参数模型和定、转子绕组互感参数模型,下文的分析计算即以此模型为基础。

1.2 负载时故障的计算结果及与实验的对比分析

本文基于多回路数学模型,对一台代号为 A1553 的隐极同步发电机进行负载时励磁绕组匝间短路故障的仿真计算和实验研究,该样机的主要参

数见附录 A。该样机励磁绕组除首、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端子上,各抽头的位置及相应匝数如图 1 所示。此外,以便于测量定子分支电流,还在定子端部将 a_3 和 c_3 分支电流引出。样机主要用来检验数学模型的正确性,所以在制造时没有考虑各抽头之间短路故障实际出现的可能性。

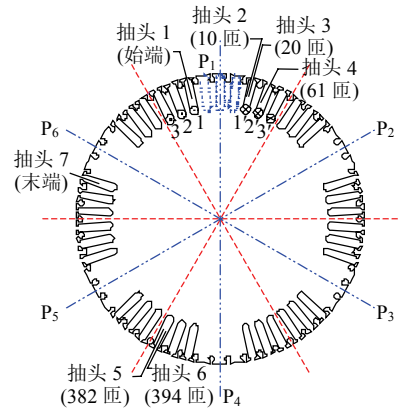


图 1 A1553 样机励磁绕组各抽头的引出情况

Fig. 1 Field winding's taps of A1553 model machine

实验系统如图 2 所示, A1553 样机由一台直流电动机拖动,该直流电机由 SIEMENS 6RA70 直流调速设备驱动(可保持电机转速恒定),样机的励磁由一台直流电源提供,负载为三相电阻(每相阻值为 27.5Ω),实验中不装设调速器及励磁调节器。

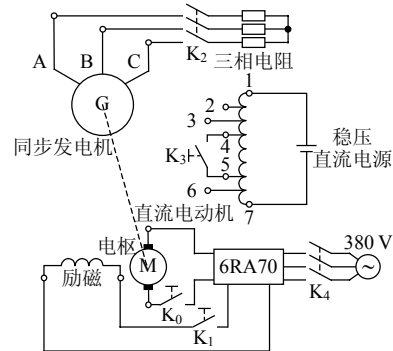


图 2 励磁绕组 4-5 抽头匝间短路实验的接线示意图

Fig. 2 Experimental wiring diagram of inter-turn short circuit of tap 4th to 5th in field winding of A1553 model machine

图 3 为该样机 4-5 抽头匝间短路时,各电气量的仿真波形和实验波形($t=0.2s$ 发生故障),两者吻合较好。

为进一步验证计算精度并分析故障后各电气量

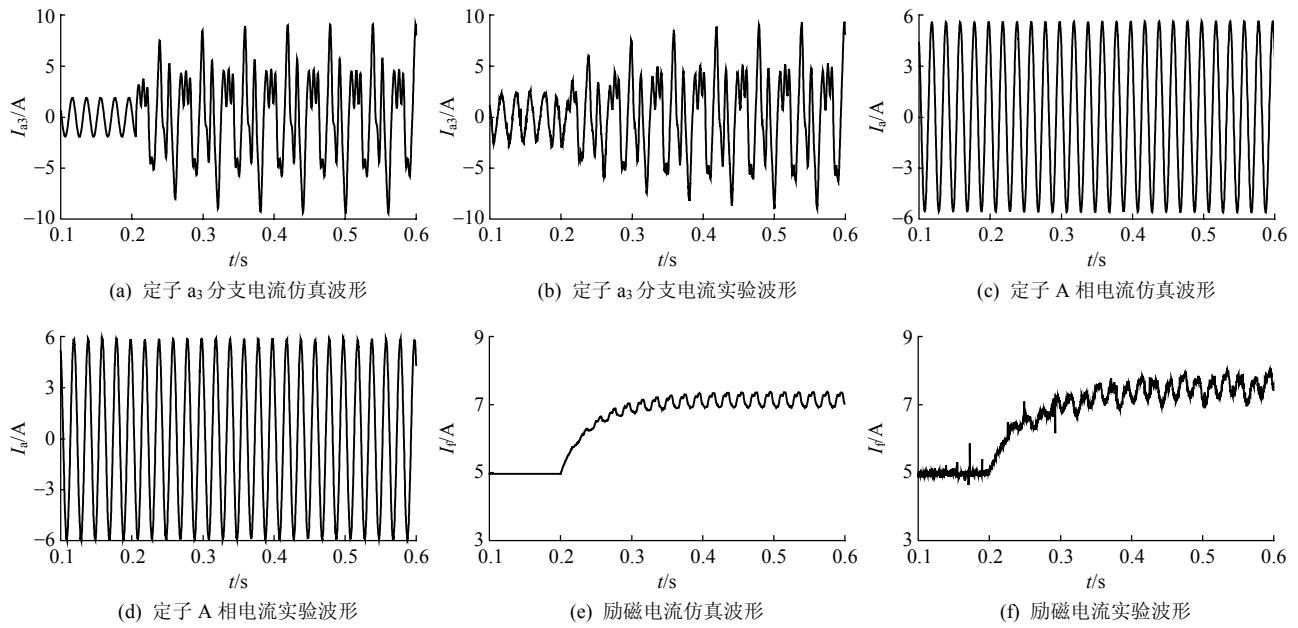


图 3 励磁绕组 4-5 抽头短路时各电气量的过渡过程波形

Fig. 3 Transient waveform under inter-turn short circuit of tap 4th to 5th in field winding

的特征，通过傅里叶算法可得稳态实验电流的各种交、直流成分有效值，并与计算的稳态值对比(故障前后均不含有的谐波分量不再列出)，如表 1 所示。

从表 1 看到，故障后稳态电流各次谐波的计算值与实验值基本吻合，特别是故障后占主要成分的定子分支各分数次谐波和励磁电流直流分量，计算值与实验值之间的偏差均在 10%以内，证明了多回

路模型计算负载时励磁绕组匝间短路故障的正确性。

2 故障定位及短路匝数估算的理论依据

2.1 故障特征及机理

由表 1 可知，A1553 样机负载运行时发生励磁绕组匝间短路故障的特征如下：

1) 定子分支出现了电机正常运行时没有的分数次谐波。这是由于励磁绕组短路时，各极下磁动势不再相等，故障后的励磁磁动势除包括正常运行时的空间基波及奇数次谐波外还包括各分数次和偶数次空间谐波^[15]。其中，空间各分数次谐波磁动势在定子同相各分支感应出相位不同的电动势，引起相绕组内部各分支的分数次谐波环流。由于 A1553 样机每分支由相距为 π 电角度的 2 个线圈组反向串联而成(附录 B)，故障励磁绕组产生的偶次谐波磁场在每个线圈组产生的感应电动势相等，但因反向串联，结果每个分支的感应电动势都为零，不会产生偶数次谐波环流^[18]。

2) 相电流变化不大，主要为基波分量，各分支的基波电流变化也不大。这是因为，故障后虽然励磁绕组在空间不再对称，会产生谐波磁动势，但由于相绕组本身的对称性没有被破坏，转子任一极下的励磁线圈都只会定在定子相绕组感应出三相对称的基波电势。同时，虽然励磁绕组有效匝数(正常

表 1 励磁绕组 4-5 抽头匝间短路时
稳态电流各次谐波有效值

Tab. 1 Different harmonics effective value of steady state current under inter-turn short circuit of tap 4th to 5th in field winding

参数	故障前稳态		故障后稳态		
	实验值/A	实验值/A	计算值/A	偏差/%	
a ₃ 分支电流	1/3 次谐波	0.000	0.666	0.623	-6.46
	2/3 次谐波	0.000	2.832	2.705	-4.48
	基波	1.372	1.362	1.329	-2.42
	4/3 次谐波	0.000	2.801	2.772	-1.04
	5/3 次谐波	0.000	1.001	1.018	1.70
	7/3 次谐波	0.000	0.132	0.136	3.03
	8/3 次谐波	0.000	0.655	0.711	8.55
	A 相电流	基波	4.092	4.065	3.987
5 次谐波		0.022	0.026	0.025	-3.85
励磁电流	直流分量	4.971	7.356	7.131	-3.06
	基波	0.005	0.204	0.154	-24.5
	2 次谐波	0.003	0.041	0.018	-56.1
	3 次谐波	0.004	0.040	0.034	-15.0

绕组的匝数减去短路匝数)有所减少,但在不考虑电源内阻抗及短路过渡电阻的影响时,故障后励磁电流直流分量的大小与励磁绕组有效匝数成反比,使故障后励磁绕组产生的基波磁动势变化不大,从而相电流及各分支基波电流变化也不大。

3) 故障后的励磁电流除直流分量外只包含整数次谐波,而不含分数次谐波。这是由于定子绕组的完整性及其空间分布与联接方式决定了定子的合成磁动势只会在转子回路(包括励磁绕组及阻尼回路)感应出整数次谐波电流^[18-21]。

4) 故障后的励磁电流几乎全是直流分量,交流分量很小。这是因为 A1553 样机具有结构完整的阻尼绕组,作为对比,本文对假设没有阻尼绕组的 A1553 样机计算了励磁绕组 4-5 抽头的匝间短路(计算条件均与前文相同)。由图 4 可见,如果没有阻尼绕组,相同的短路故障将引起较大的基波、2 次谐波等励磁电流交流分量。

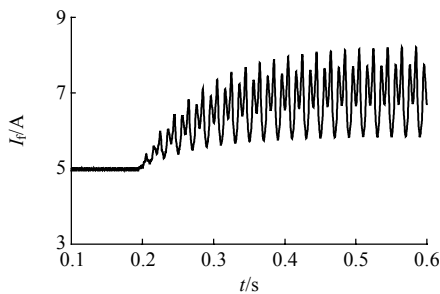


图 4 假设没有阻尼绕组,励磁绕组 4-5 抽头匝间短路时励磁电流的仿真波形

Fig. 4 Excitation current waveform under inter-turn short circuit of tap 4th to 5th in field winding with the assumption of no damper windings

一般大型发电机的转子都装有阻尼绕组,以提高其动态稳定性及负序承载能力,因此发生励磁绕组匝间短路时,励磁回路中的交流分量都不会很大(尤其是小匝数的短路故障),不适宜利用励磁电流中的交流成分进行故障判断,因此,后文对故障特征影响因素的分析以定子支路电流为主。

2.2 故障特征量影响因素分析

2.2.1 分布式励磁绕组短路位置的影响

如图 1 所示, A1553 样机每极下的励磁绕组由 3 个节距不同的同心式线圈串联而成,每个线圈的串联匝数都是 41,励磁绕组每极串联匝数为 123,全部 6 个极下的绕组串联起来构成整个励磁绕组。为研究不同短路位置对故障特征量的影响,分别计

算第 1 极下的 11'、22'、33' 同心式线圈分别发生 40 匝短路故障,计算时选取励磁电压为 6 V,负载电阻为 27.5 Ω,不考虑励磁短接线电阻及励磁电源内阻(下文相同)。

由表 2 可见,发生在不同同心式线圈内部的相同匝数短路所引起的定子分支电流的各分数次谐波都不同,下面对分布式励磁绕组短路位置对定子分支电流的影响进行分析。

表 2 节距不同的同心式线圈发生相同短路时 a₃ 分支电流有效值

谐波次数	11'	22'	33'
1/3	0.152	0.226	0.297
2/3	0.083	0.119	0.150
4/3	0.106	0.130	0.127
5/3	0.197	0.211	0.156

同步电机发生励磁绕组匝间短路后,如图 5 所示,励磁绕组被分为正常励磁回路(电流为 i_f)与故障附加回路(电流为 i_{fKL})。图中, E_{ZF} 为励磁电势; R_{fKL} 为励磁短接线电阻; R_{ZF} 为励磁电源内阻。

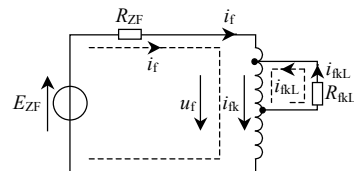


图 5 励磁绕组匝间短路时励磁回路示意图

Fig. 5 Loops of field winding with inter-turn short circuit

将故障后励磁磁动势看作正常励磁回路产生磁动势与故障附加回路产生磁动势的叠加。在不考虑故障后由定子电枢反应磁动势引起的励磁绕组和阻尼绕组的附加谐波电流时,正常励磁回路产生的磁动势性质与故障前相同,不会在定子支路感应各分数次谐波电流,只需分析故障励磁回路产生的磁动势对定子分支电流的影响。

如图 6 所示,对故障同心式绕组产生的磁动势进行傅里叶分解:

$$F(x) = \sum_{\nu} F_{\nu} \cos \nu x, \quad \nu = \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \dots \quad (2)$$

由于矩形波磁动势对转子坐标 d 轴对称,所以式(2)中只有余弦项。其中

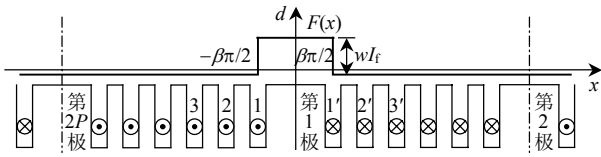


图 6 励磁绕组同心式线圈产生的磁动势

Fig. 6 MMF generated by field winding concentric coil

$$F_v = \frac{1}{3\pi} \int_{-3\pi}^{3\pi} F(x) \cos \nu x dx = \frac{2}{3\nu\pi} I_f w k_{y\nu} \quad (3)$$

式中： I_f 为励磁电流直流分量； w 为短路匝数； $k_{y\nu} = \sin(\nu\beta\pi/2)$ 为故障励磁同心式线圈对 ν 次谐波而言的短距系数，其中 β 为该线圈的短距比。

从式(3)可见，当励磁电流与短路匝数一定时，故障励磁同心式线圈所产生的 ν 次空间谐波磁动势与该线圈对 ν 次谐波而言的短距系数 $k_{y\nu}$ 成正比；并且各次空间谐波磁动势相对转子静止，均随转子以同步转速旋转。因此，定子支路 ν 次谐波电流的有效值近似与发生短路的励磁同心式线圈的短距系数 $k_{y\nu}$ 成正比，即

$$I_\nu = M_\nu k_{y\nu} \quad (4)$$

式中： I_ν 为定子支路 ν 次谐波电流的有效值； M_ν 为比例系数。

根据式(3)计算各同心式线圈产生的各分数次空间谐波磁动势幅值如表 3 所示，对比表 2、3 可知，故障后定子分支电流某次时间谐波大小与短路匝励磁线圈产生的磁动势同次空间谐波幅值近似成正比，验证了上述分析的正确。

表 3 节距不同的同心式线圈产生的空间谐波磁动势幅值
Tab. 3 Amplitude of spatial harmonic MMF produced by different concentric coils

谐波次数	11'	22'	33'
1/3	$0.15I_{f\nu}$	$0.22I_{f\nu}$	$0.29I_{f\nu}$
2/3	$0.14I_{f\nu}$	$0.20I_{f\nu}$	$0.26I_{f\nu}$
4/3	$0.13I_{f\nu}$	$0.16I_{f\nu}$	$0.15I_{f\nu}$
5/3	$0.12I_{f\nu}$	$0.13I_{f\nu}$	$0.09I_{f\nu}$

从表 3 中可以发现，3 种节距不同的同心式励磁线圈产生的空间谐波磁动势幅值均随着谐波次数的升高而减小，但在表 2 中定子分支电流的各分数次谐波电流并没有体现出相同的规律。这是因为故障后的定子分支某次谐波环流除与故障励磁绕组产生的磁动势有关外，还取决于该磁动势在定子同相不同分支感应的谐波电动势之差。这一影响因素已通过式(4)中的比例系数 M_ν 体现，其大小与定

子绕组形式、空间分布以及对 ν 次谐波而言的定子绕组短距系数有关。

以上探讨了发生在同槽导体间的同心式线圈短路故障(可能发生在槽内或端部)，另外相邻两槽导体间还可能在端部发生短路故障，对该类故障的分析可按本文方法进行，不再详述。在对隐极发电机励磁绕组匝间短路故障的检测与保护方案的设计中，应充分考虑不同节距同心式线圈短路的情况，不能片面认为故障特征量只与短路匝数有关。

2.2.2 短路匝数与分支电流各次谐波的关系

为探讨短路匝数对故障特征量的影响，对样机励磁绕组同心式线圈 11' 发生不同匝数的短路故障进行了计算。图 7 所示为 a_3 分支各分数次谐波电流与短路匝数的关系。

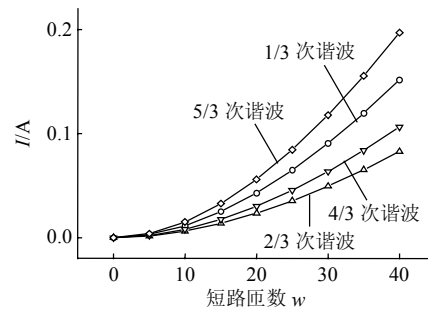


图 7 定子 a_3 分支电流与励磁绕组短路匝数的关系

Fig. 7 Relationship between stator a_3 branch current and short circuit turns of field winding

从图 7 可以看出，定子 a_3 分支的各次谐波电流均随着短路匝数的增加而增大，且增长率也随短路匝数的增加而增大，分析如下。

由于正常励磁回路的对称性，正常励磁回路电流不会影响定子分支各分数次谐波电流。由文献[14]可知，故障励磁同心式线圈与定子支路之间的互感系数同短路匝数 w 成正比。而若不考虑电源内阻抗 R_{ZF} 及短路过渡电阻 R_{rKL} 的影响时，故障励磁回路直流分量的大小与励磁回路总有效匝数成反比，因此定子分支各分数次谐波电流(用符号 I 统一表示)与短路匝数有式(5)的近似关系，与图 7 吻合。

$$I \propto \frac{w}{N - w} \quad (5)$$

式中 N 为励磁绕组总匝数。

当然，以上只是定性的理论分析，若考虑其它因素(如故障励磁电流和阻尼回路电流的交流分量)，定量关系可以通过具体计算或试验得到，每台不同

型号电机的关系曲线都不同,对于大型发电机很难进行实测,只有通过具体的科学定量计算获取^[13-15]。

3 利用定子分支谐波电流进行故障定位及短路匝数估算

3.1 故障类型及故障槽的判断

首先分析同槽内励磁绕组发生的匝间短路故障。由于故障后定子支路 ν 次谐波电流的有效值近似与发生短路的励磁同心式线圈的短距系数 $k_{y\nu}$ 成正比,因此理论上故障后定子支路各次谐波的幅值之比应近似不变,而与该槽短路匝数无关,可由此实现对故障定位。

表4对A1553样机不同槽内的励磁绕组发生不同匝数短路进行了计算。从表中可见,不同槽内的绕组发生短路后,定子 a_3 分支电流的5/3次谐波和1/3次谐波的比值均基本保持不变,且该比值能有效区分不同的短路槽,可实现对故障槽的定位。

表4 不同槽内的励磁绕组发生不同匝数短路故障时 a_3 分支电流有效值

Tab. 4 Effective value of stator a_3 branch current under short circuit faults with different turn numbers in different slots

短路槽	短路匝数	1/3次谐波/A	5/3次谐波/A	5/3次谐波与1/3次谐波比值
11'	20	0.043 04	0.056 09	1.303
	30	0.090 62	0.117 80	1.300
	40	0.151 70	0.197 00	1.299
22'	20	0.063 93	0.060 15	0.941
	30	0.134 60	0.126 30	0.938
	40	0.225 50	0.211 10	0.937
33'	20	0.084 00	0.044 50	0.530
	30	0.177 00	0.093 50	0.528
	40	0.296 50	0.156 40	0.528

本文对发生在励磁绕组端部的相邻两槽绕组之间的匝间短路故障也进行了计算,结果表明对于发生在11'与22'槽之间的短路,5/3次谐波与1/3次谐波比值范围为0.959~1.282,而对于发生在22'与33'槽之间的短路,该比值为0.539~0.924。

以上计算与分析结果表明,利用定子分支电流各次谐波的幅值之比在理论上能较好的实现对励磁绕组匝间短路故障定位。此外,分支电流各次谐波的相角之差也可作为有效的判断依据,在各次谐波幅值之比区分不明显时,也可结合相角差进行判断,限于篇幅不再详细分析。

3.2 短路匝数的估算

通过计算各励磁槽内的同心式线圈发生不同匝数的短路故障,均可得到与图7类似的曲线,在判断出故障类型及故障槽后,可利用该曲线进行短路匝数估算。估算方法先对该曲线进行拟合,对于定子支路电流的各次谐波量均可表示为以短路匝数为自变量的函数:

$$I_{\nu} = f_{\nu}(N) \quad (6)$$

可利用精度较高的最小二乘法对定子分支谐波电流与短路匝数的关系进行拟合。式(7)为图7所示定子支路5/3次电流与短路匝数之间关系的拟合结果,该结果与计算值之间的偏差非常小,能满足估算的需要。

$$I_{5/3} = -0.001 59 + 0.000 754N + 0.000 106N^2 \quad (7)$$

若为同槽导体间的单一同心式线圈短路故障,在判断出短路故障槽后,通过求解式(6),并加上约束条件:“ N 为正整数”,即可估算出短路匝数。而对于发生在不同槽之间的短路故障,需分别对两种不同的谐波列写方程,加上两槽导体匝数的约束条件联立求解,可估算出各槽的短路匝数。

3.3 方法的适用范围

故障定位方法是基于励磁绕组短路匝节距不同而引起大小不同的特征量这一理论基础,而短路匝数估算是建立在对故障的科学定量计算基础上。前文提出的故障定位及短路匝数估算方法适用于所有的隐极式同步发电机。

4 结论

基于对隐极发电机励磁绕组匝间短路的故障特征及特征量影响因素的分析,本文提出一种利用定子分支谐波电流进行故障定位及短路匝数估算的新方法。结论如下:

1) 对于发生在同槽导体间的同心式线圈短路故障,当短路匝数一定时,故障后定子支路 ν 次谐波电流的有效值近似与发生短路的励磁同心式线圈的短距系数 $k_{y\nu}$ 成正比,比例系数的大小取决于定子绕组形式、空间分布以及对 ν 次谐波而言的定子绕组短距系数;定子支路各次谐波电流均随着短路匝数的增加而增大,并且增长率也随短路匝数的增加而增大。

2) 通过计算说明了本文提出的故障定位及短

路匝数估算的新方法在理论上是可行的。该方法适用于所有的隐极式同步发电机, 并且只需从发电机机端采集定子一个分支的电流, 通过快速傅里叶分析滤取故障特征谐波分量即可完成判断。

本文的研究为隐极同步发电机励磁绕组匝间短路故障的在线检测、保护方案的设计、保护阈值的整定提供了理论依据。下一步将对短路匝数估算的算法及其优化进行研究。另外, 励磁绕组小匝数短路时故障特征量较小, 对小匝数短路时故障特征的有效提取与分析也将是今后的研究重点。

参考文献

- [1] 马宏忠. 电机状态监测与故障诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 927-929.
Ma Hongzhong. Condition monitoring and fault diagnosis of Electric Machines[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 927-929(in Chinese).
- [2] Huang Haizhou, Zhang Kanjun, Zhang Yong. Detection of turbine generator field winding serious inter-turn short circuit based on the rotor vibration feature[C]//Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference. Glasgow: IET, 2009: 1-5.
- [3] Penman J, Jiang H. The detection of stator and rotor winding short circuits in synchronous generators by analysing excitation current harmonics[C]//Opportunities and Advances in International Electric Power Generation. Hungary: IEEE, 1996: 137-172.
- [4] Trutt F C, Sottile J, Kohler J L. Detection of AC machine winding deterioration using electrically excited vibrations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 10-14.
- [5] 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).
- [6] 万书亭, 李和明, 李永刚. 转子匝间短路对发电机定转子振动特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 122-126.
Wan Shuting, Li Heming, Li Yonggang. Analysis of generator vibration characteristic on rotor winding inter-turn short circuit fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 122-126(in Chinese).
- [7] Neti P, Nandi S. Analysis and modeling of a synchronous machine with structural asymmetries[C]//Proceedings of 2006 IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering. Ottawa: IEEE, 2006: 1236-1239.
- [8] Kryukhin S S. A new principle for synchronous machine protection from rotor winding inter-turn and double earth faults[J]. Electric Technoloy USSR, 1972, 2(5): 47-59.
- [9] Muhlhaus J, Ward D M, Lodege I. The detection of shorted turns in generator rotor windings by measurement of circulating stator currents [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Electrical Machines-design and Applications. London, UK: IEE, 1985: 100-103.
- [10] Torlay J É, Corenwinder C. Analysis of shaft voltages in large synchronous generators[C]//Proceedings of International Conference on Electric Machines and Drives. Seattle, USA: IEEE, 1999: 607-609.
- [11] Alan M. Mirko C. Experimental research on rotor fault diagnosis using external coil voltage analysis and shaft voltage signal analysis [C]//Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Vienna, Austria: IEEE, 2005: 1-4.
- [12] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 1-28.
Gao Jingde, Wang Xiangheng, Li Fahai. Analysis of AC electrical machine systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 1-28(in Chinese).
- [13] 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).
- [14] 孙宇光, 郝亮亮, 王祥珩. 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[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 55-60.
Sun Yuguang, Hao Liangliang, Wang Xiangheng. Inductance calculation of the multi-loop model for inter-turn short circuits of field windings in non-salient-pole synchronous machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 55-60(in Chinese).
- [15] 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): 51-56.
Hao Liangliang, Sun Yuguang, Qiu Arui, et al. Steady-state Mathematical and Simulation of Inter-turn short circuit of field windings in synchronous machines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 51-56(in Chinese).

- [16] Wang Xiangheng, Chen Songlin, Wang Weijian, et al. A study of armature winding internal faults for turbo-generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(3): 625-631.
- [17] Wang Xiangheng, Sun Yuguang, Ouyang Bei, et al. Transient behavior of salient-pole synchronous machines with internal stator winding faults[J]. IEE Proceedings-Electric Power Application, 2002, 149(2): 143-151.
- [18] 孙宇光, 郝亮亮, 王祥珩. 同步发电机励磁绕组匝间短路时的稳态电流谐波特征研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 51-57.
Sun Yuguang, Hao Liangliang, Wang Xiangheng. Steady-state currents harmonic characteristics of synchronous machine with inter-turn short circuits of field windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 51-57(in Chinese).
- [19] 吴新振, 王祥珩, 罗成. 多相异步电机谐波电流与谐波磁势的对应关系[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(7): 865-868.
Wu Xinzheng, Wang Xiangheng, Luo Cheng. Relationship between harmonic currents and harmonic magneto-motive forces in multi-phase induction machines[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(7): 865-868(in Chinese).
- [20] 王东, 吴新振, 马伟明, 等. 非正弦供电十五相感应电机气隙磁势分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 88-94.
Wang Dong, Wu Xinzheng, Ma Weiming, et al. Air-gap MMF analysis of fifteen-phase induction motor with non-sinusoidal supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 88-94(in Chinese).
- [21] 张超, 夏立, 吴正国, 等. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征规律分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1506-1512.

Zhang Chao, Xia Li, Wu Zhengguo, et al. Analysis on fault characteristics law of interturn short circuit in synchronous generator rotor winding[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1506-1512(in Chinese).

附录 A

A1553 样机基本参数:

额定功率 $P_N = 12 \text{ kW}$; 额定功率因数 $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后); 额定电压 $U_N = 400 \text{ V(Y)}$; 额定频率 $f_N = 50 \text{ Hz}$; 极对数 $P = 3$; 定子槽数 $Z = 72$; 定子并联支路数 $a = 3$; 定子铁心长度 $l = 0.12 \text{ m}$; 定子铁心内径 $D_{si} = 0.415 \text{ m}$; 额定励磁电流 $I_{fdN} = 16 \text{ A}$; 转子槽分度数为 54; 转子实槽数为 36; 气隙长度 $\delta = 1.5 \text{ mm}$.

附录 B

附表 1 A1553 样机 A 相绕组联接表(机端→中性点, 顺转向)

a_1	-13	-14	-15	-16	4	3	2	1
a_2	-37	-38	-39	-40	28	27	26	25
a_3	-61	-62	-63	-64	52	51	50	49



郝亮亮

收稿日期: 2010-12-23。

作者简介:

郝亮亮(1985), 男, 博士研究生, 研究方向为发电机内部故障仿真与保护、电机及系统分析, haoll07@mails.tsinghua.edu.cn;

孙宇光(1975), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电机内部故障的仿真与保护;

邱阿瑞(1946), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机及分析、电机故障及保护等;

王祥珩(1940), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机分析和控制、电机故障及保护、电气传动及其自动化等。

(责任编辑 王剑乔)