

基于 FLUX 2D 的大型同步发电机在额定运行下定子绕组匝间短路故障特性研究

叶志军¹, 游佰强², J. Rosendahl¹, S. T. Kulig¹

(1. 多特蒙德工业大学电机拖动与机电一体化研究所, 多特蒙德 44227, 德国;
2. 厦门大学信息科学与技术学院, 福建省厦门市 361005)

Fault Characteristic Study Based on FLUX 2D for Large Synchronous Generators With Stator Winding Inter-turn Short Circuits Under Rated Operating Conditions

YE Zhijun¹, YOU Baiqiang², J. Rosendahl¹, S. T. Kulig¹

(1. Institute of Electrical Drives and Mechatronics, TU Dortmund University, TU Dortmund 44227, Germany;
2. School of Information and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China)

ABSTRACT: This paper investigates the stator winding short circuit characteristics in synchronous generators under rated operating conditions by combining the single-winding analytical method and the finite element method (FEM), which is still the effective method to determine currents and torques under specific fault conditions. Some special measures have to be considered in case of the electromagnetic transient process under the condition of inner faults, e.g., the correct interconnection between sub-strands and the grid is of the particular importance for inner fault simulations. The previous results show that the traditional calculation method based on the equivalent networks fails in case of the inner asymmetry magnetic field. Based on the systematic investigation of a turbo generator with inter-turn short circuits, the results of this paper show the short circuit currents, phase currents, torques and the radial forces have strong correlations with the location and the turn number of faults. In some cases of inter-turn short circuits, the fault currents exceed that of the outer faults. Furthermore, strong radial forces acting on the magnet wheel might lead to the damages of the total shaft train.

KEY WORDS: synchronous generator; stator windings finite element method (FEM); inter-turn short circuits

摘要: 该文采用单一绕组分析和有限元分析相结合的方法, 研究大型同步发电机在额定运行方式下定子绕组匝间短路故障特性。该方法同样适用于确定故障条件下的电流和转矩。对于内部故障情况的电磁瞬态仿真必须考虑到一些特殊措施, 如单一绕组和电网之间正确的连接对于模拟内部故障是相当关键的。以往的结果表明, 在内部磁场非对称的情况下, 基于等效电路的经典算法是不适用的。该文通过对汽轮

发电机匝间短路故障进行系统的研究, 表明: 其短路电流、相电流、转矩和径向力与短路的位置及匝数紧密相关。在一些短路情况下, 发电机将产生很大的局部电流, 该局部电流对同步发电机的影响甚至超过外部故障。此外, 很大的径向力作用在转子上可能对整个转轴产生极大的危害。

关键词: 同步发电机; 定子绕组; 有限元法; 匝间短路

0 引言

发电机在能量转换的过程中发挥着重要的作用。机电能量转换增加了对设备可靠性、材料应力和成本的要求。三相同步电机具有灵活性强和转化效率高的优势, 因此在能量转换中占有特殊的位置。随着同步电机单机容量的不断增加, 其结构也越来越复杂。一旦发生电气故障, 将带来重大的经济损失。

同步电机的电气故障分为两大类: 内部故障和外部故障。对于外部故障, 目前已经有大量文献研究, 诸如端子间短路和同步故障等^[1-2]。内部故障即发电机的定子或者转子的绕组间的短路, 根据故障类型可分为: 定子匝间短路、定子相间短路和转子的绕组短路^[3]。对于大型同步电机主要是由于棒绝缘或绕组槽绝缘的机械损坏和绕组过热造成短路。一旦发生内部故障, 同步电机的气隙磁场分布将变成不对称, 其磁场分布也不再是正弦分布, 甚至有些情况会产生很强的偶数次谐波分量。因此, 同步电机发生内部故障时, 通过三相电机的经典理论, 如 Park'sche 理论、对称分量法或链梯模型分析计算出

的结果是不准确的,因为这些经典理论都是基于其气隙磁场分布是正弦形式且只对对称的电机有效^[4]。

到目前为止,很多学者对同步发电机内部故障也进行了研究。1964年, Kinitzky 基于对称分量法定量计算同步电机定子的匝间短路的影响,不过这种方法只能适用于小功率(15 kVA)的电机^[5]。近年来, Megahed 和 Malik 等利用相坐标法来分析大型同步电机的内部故障^[6-7]。在此基础上, Reichmeider 提出绕组分割法,该方法丰富了相坐标法的理论,并提高了算法的计算精度。虽然通过该方法对于许多对称短路情况可以得到准确的结果,但是随着气隙磁场分布非对称性度的增加,其误差也随之增大,并且对于铁心饱和只是近似计算^[8-10]。高景德和王祥珩提出了以单个线圈为分析单元的交流电机多回路理论,为发电机内部故障的研究奠定了理论基础^[11]。近年来,许多专家学者进行了大量的分析研究^[12-15],结果表明该方法使用灵活,分析精度高,可以有效的模拟发电机内部故障,具有广泛的理论意义和实用价值。然而,现有的文献大都关注于同步定子绕组内部故障的数值分析,忽略了研究在不同故障位置与故障绕组匝数情况下的故障特征。

本文采用单一绕组的分析与有限元法相结合的方法研究同步发电机在额定运行方式下定子绕组匝间短路的故障特性,并在 FLUX 2D 中建立了发电机匝间短路的等值模型,该模型既考虑了绕组的空间位置、连接方式,又兼顾了铁磁材料的饱和及气隙磁场的不对称。在此模型中,具体分析了3种不同匝数情况下匝间短路时短路电流、磁力线分布、相电流、径向力和电磁转矩的变化,进行了比较,并对短路电流、相电流、径向力和电磁转矩与故障位置以及故障匝数的关系进行了研究,得出了一系列的结论。

1 绕组故障理论计算方法

文献[3]提出了只考虑单一绕组的电机分析方法,即单元电机分析法。方程(1)给出单元电机对于每个回路的系统电压方程,其中含有每个回路间的互感^[3-4]。

$$\begin{bmatrix} u^s \\ u^r \\ 0^d \\ 0^q \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} M^{ss} & M^{sr} & M^{sd} & M^{sq} \\ M^{rs} & M^{rr} & M^{rd} & M^{rq} \\ M^{ds} & M^{dr} & M^{dd} & M^{dq} \\ M^{qs} & M^{qr} & M^{qd} & M^{qq} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i^s \\ i^r \\ i^d \\ i^q \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} R^s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R^r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R^d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R^q \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i^s \\ i^r \\ i^d \\ i^q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:上标“s”表示定子侧的量;上标“r”表示转子侧的量;上标“d”表示纵轴阻尼绕组的量;上标“q”表示横轴阻尼绕组的量; u 为电压; M 为电感; i 为电流; R 为电阻; M^{ss} 、 M^{rr} 、 M^{dd} 、 M^{qq} 表示自感; M^{sr} 、 M^{sd} 、 M^{sq} 、 M^{rs} 、 M^{rd} 、 M^{rq} 、 M^{ds} 、 M^{dr} 、 M^{dq} 、 M^{qs} 、 M^{qr} 、 M^{qd} 表示互感。

为求解微分方程(1),必须先求出回路间的互感。根据互感的定义,若线圈 k 中电流 i_k 所激发的磁场穿过线圈 v 的磁链是 $\psi_{v,k}$, 其磁链 $\psi_{v,k}$ 与电流 i_k 的比值就是互感的值。根据斯托克斯公式,磁链 $\psi_{v,k}$ 与磁向量势 $A_{v,k}$ 之间有如下关联式:

$$\psi_{v,k} = \iint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \iint_S \text{rot} \mathbf{A}_{v,k} d\mathbf{S} = \oint_{l(\partial S)} \mathbf{A}_{v,k} d\mathbf{l} \quad (2)$$

互感与磁向量势之间的关系可以表示:

$$M_{v,k} = \frac{1}{i_k} \oint_{l(\partial S)} \mathbf{A}_{v,k} d\mathbf{l} \quad (3)$$

在实际的电机中沿着 Z 轴上的绕组的磁向量势可以看作是均等的。如图1所示,绕组 v 和 k 之间的互感可以由式(4)计算:

$$M_{v,k} = \frac{l_G}{i_k} (A'_{v,k} - A''_{v,k}) \quad (4)$$

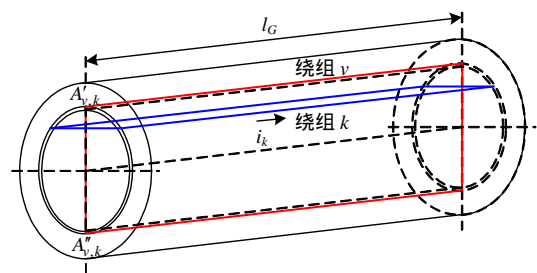


图1 基于矢势原理的互感测定

Fig. 1 Determination of the mutual inductances based on vector potential

如果同时考虑绕组端部的互感,则绕组 v 和 k 之间的互感表示为

$$M_{v,k} = \frac{l_G}{i_k} (A_{o,v} - A_{u,v}) + M_v^{\text{leakage}} \quad (5)$$

发电机的端电压可以通过单一回路电压得到,如方程(6),其中矩阵 C 是由0和1组成的,当此单一回路是原电机中端电压的一部分时为1。

$$u = Cu^s \tag{6}$$

因为求解方程(1)时,电流和互感之间关系必须是线性的,而对于非线性情况只能是由事先修正好的电感代入计算。通过这种单一绕组理论所分析计算的结果与大型同步电机实测数据基本一致,只是由于铁心饱和的影响,在数值精度上存在小的误差。

2 同步发电机定子匝间短路故障仿真模型

2.1 仿真模型

本文以 1 台 775 MVA 汽轮发电机(美国运行的电机额定频率为 60 Hz)为例,在 FLUX 软件中建立该仿真模型,该电机的主要参数如表 1 所示。

表 1 发电机参数

Tab. 1 Generator parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_N /MVA	775	额定频率 f_N /Hz	60
额定电压 U_N /kV	26	极数 $2P$	2
额定电流 I_N /kA	17.2	每极励磁绕组匝数	47
额定功率因数 $\cos\varphi_N$	0.9	转子每极阻尼条 N_c	6

发电机定子绕组结构和模拟的短路连接位置如图 2 所示。对于这样一个双层星形连接的同步发电机,仅仅通过简单外部的计算很难准确的确定内部故障对整个发电机的影响^[16]。根据设定的参数,本文在 FLUX 2D 中建立了发电机的模型,并对该电机内部故障特性进行研究。

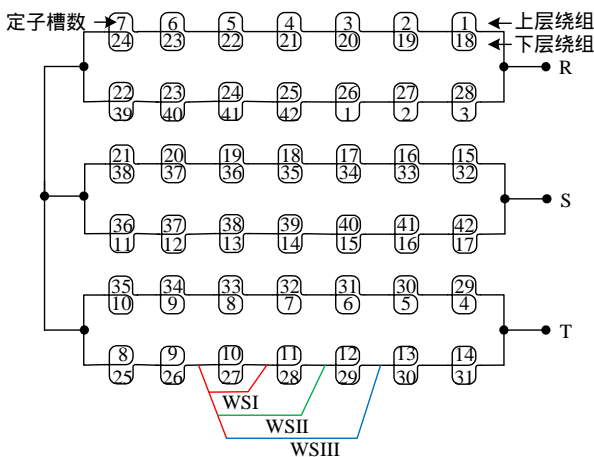


图 2 发电机定子绕组联结和仿真短路位置示意图

Fig. 2 Diagram of stator winding connection and the simulative short-circuit position

2.2 FLUX 2D 模型

本文研究的同步发电机为二极电机,在模拟外部故障时,由于其结构对称,一般只需要分析半个电机截面。当分析定子匝间短路时,发电机中的旋转磁场不再满足对称的条件,因此必须对整个电机

进行模拟^[17-19]。

相对于发电机的定子和转子,气隙中的磁通量变化最大,因此气隙部分必须剖分得很精确,而对于定子和转子部分剖分精度可以适当的减小。图 3 给出了基于有限元分析法剖分的发电机截面网格图。为了提高运算速度,发电机中的气隙分为 3 部分:定子气隙、转子气隙和实际仿真气隙。其中,定子气隙跟定子一样是不动的,转子气隙跟转子一起转动。

图 4 给出了该同步电机匝间短路的电路模型。

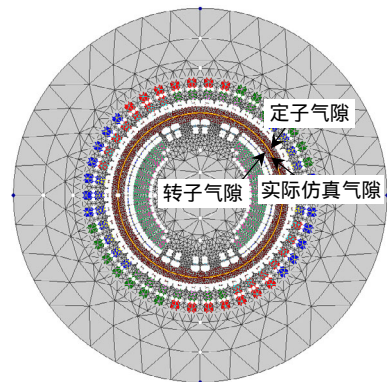


图 3 基于有限元剖分的发电机截面网格图

Fig. 3 Subdivided cross section of the generator with FEM

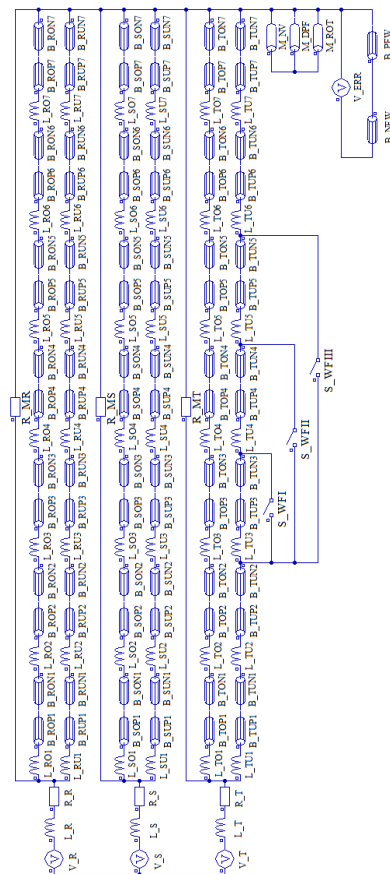


图 4 匝间短路的电路模型

Fig. 4 Circuit model of inter-turn short circuit

其中,图的底端是个等值电网,在 FLUX 中用电压源(V_R、V_S 和 V_T)来代替。另外,用 3 个电感(L_R、L_S 和 L_T)和电阻(R_R、R_S 和 R_T)来表示电力变压器,用来连接电网和发电机。发电机的定子上的每匝线圈用 1 个电感和 2 个导线组成。转子用 3 个实体导线(M_NV、M_DPF 和 M_ROT)、1 个电压源(V_ERR)和 2 个线圈导线(B_NEW 和 B_PEW)来表示^[20]。

3 仿真分析

3.1 短路瞬态过程分析

3.1.1 短路时刻分析

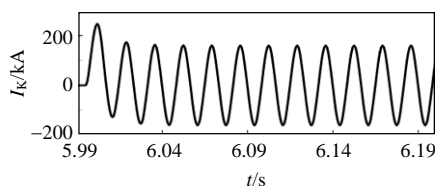
对于本例中的汽轮发电机每相绕组有 2 条并联支路,每条支路由 7 个绕组串联而成。对每条支路来说,可能会发生 27 种不同的匝间短路。根据电磁感应定律(7),当磁链 ψ 不变时,此时电压 u 为零。

$$u(t) = -\frac{d\psi}{dt} \quad (7)$$

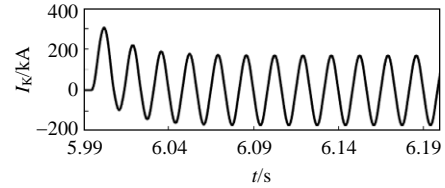
当旋转转子所产生的磁场与定子绕组的磁链最大时,发生匝间短路得到的短路电流最大。为了更好地分析图 4 中的短路情况,接着对短路电流、磁力线分布、相电流、径向力和转矩进行相互比较分析。

3.1.2 短路电流

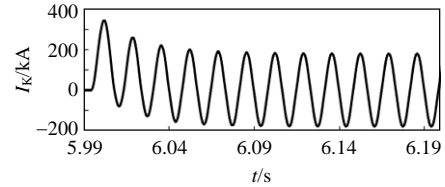
在图 4 中表示的短路情况下,得到流过开关(S_WFI、S_WFII 和 S_WFIII)的电流如图 5 所示。从图 5(a)可以看到,短路电流 I_K 明显增大。对于 WFI 在 $t=5.9945\text{ s}$ 时短路,经过半个周期以后,即 $t=6.001764\text{ s}$ 时短路电流达到最大值,其值为额定电流幅值的 14.357 倍。短路电流由直流和交流 2 部分组成,在 $t=6.001764\text{ s}$ 时其直流成分为 87 kA。到 $t=6.1\text{ s}$ 以后,短路电流的直流成分基本消失,其交流成分的幅值为额定电流的 9.297 倍。表 2 给出了在图 5 中 3 种短路情况下,短路电流的比较。从表 2 中可以看出,其电流基本是同时到达最大值,但是其短路电流的最大值和直流分量的最大值随着短路匝数的增加而增大。



(a) 匝间短路 WFI



(b) 匝间短路 WFII



(c) 匝间短路 WFIII

图 5 定子在不同短路位置情况下的短路电流

Fig. 5 Short circuit currents of stator in the different short-circuit locations

表 2 3 种短路电流比较

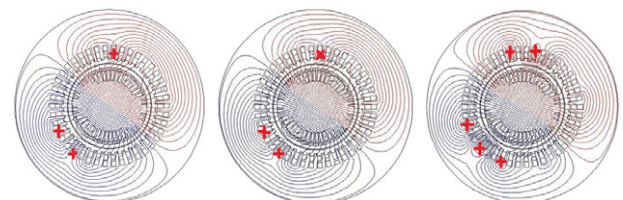
Tab. 2 Comparison of short-circuit current

位置	最大值的时刻/s	最大值/pu	最大直流分量/pu
WFI	6.001 764	14.357	5.058
WFII	6.002 061	17.618	7.770
WFIII	6.001 962	19.983	9.503

一般来说,在单机空载情况下,随着匝间短路匝数的增加,短路电流会有些减少,这是由于短路回路自感系数的增加多于其感应电动势增加的缘故。但在额定负载下匝间短路时的变化规律则不同,如表 2 所示,这是因为额定负载下匝间短路时的磁路不对称,磁路饱和及磁场扭曲造成的。

3.1.3 磁力线分布

图 6 给出了定子在不同位置发生短路时,短路电流达到最大值时磁力线的分布和最大磁场强度的位置(红色小叉)。由图 6 可以看出,当定子发生匝间短路时,短路处的磁场将会产生严重的失真,其磁力线会呈现类似漩涡状的分布。对于 WFI 和 WFII 的情况,其磁力线的分布基本一样,而对于 WFIII 的磁力线失真更加严重。



(a) 匝间短路 WFI (b) 匝间短路 WFII (c) 匝间短路 WFIII

图 6 定子在不同短路位置情况下最大短路电流时的磁场分布

Fig. 6 Magnetic field distribution of the stator when the maximum short-circuit current in the different short-circuit location

3.1.4 相电流

相电流是整定发电机保护装置的重要指标，但并不是在任何内部故障发生时，其相电流都会明显增大，比如在匝间短路 WFI 这种情况下(图 7(a))，相电流变化就不明显。而这种情况对于发电机的正常工作却是非常危险的。短路发生以后，R 相的电流基本没有变化，而 S 相和 T 相的电流变小。由图 7(b)可以看出，匝间短路 WFII 在 $t=6.003847\text{ s}$ 时，R 相的电流是额定电流的 1.88 倍。而在 $t=6.004343\text{ s}$ 时，T 相的电流是额定电流的 2.063 倍。对于匝间短路 WFIII 在 $t=6.0035\text{ s}$ 时，T 相的相电流就有明显的增大，其最大值是额定电流的 3.39 倍。由图 7 可以得到，短路以后的相电流(I_R 、 I_S 和 I_T)也是由直流和交流成分组成的。由图 7(c)看出，R 相和 T 相的直流分量消失比 S 相快，并且 S 相的电流明显变小。

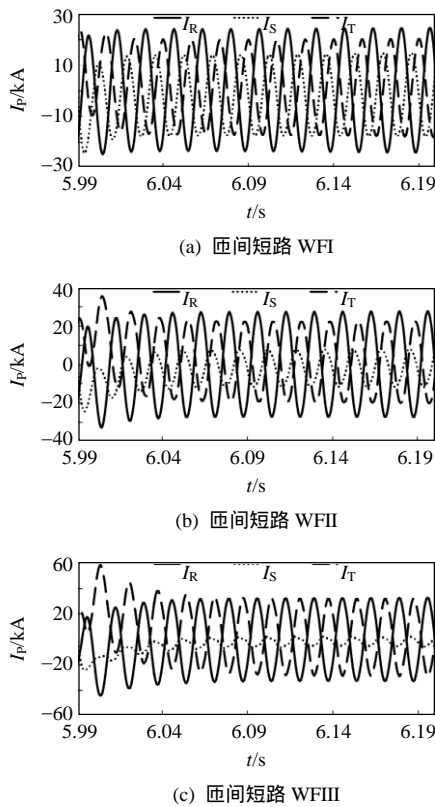


图 7 定子在不同短路位置情况下的相电流

Fig. 7 Phase current of stator in a different location short-circuit

3.1.5 径向力

各种短路不仅对电气方面产生影响，也会引起电机中径向力和电磁转矩的变化。因为作用于轴上的径向力往往难以测量和计算，所以对电机径向力的限制要求往往被忽视。电机径向力标准是指电机

轴承所能承受的最大径向力。如果超过这个标准，最直接的后果是发电机轴承损坏，进而发电机噪音增大、甚至导致整部发电机损毁，因此在电机选择中应该给予足够的重视。事实上，发电机径向力不是一个固定值，它是随转速和输出力矩而变化的。通常而言，发电机工作转速越大，所能承受的径向力越小。

FLUX 软件的设计思想是利用麦克斯韦应力张量(Maxwell stress tensor)的方法来求解电机中的径向力和电磁转矩。根据图 8 中匝间短路 WFI 可以看出，当 $t=6.00335\text{ s}$ 时转子在水平方向上受到大约 805 kN 的作用力。当 $t=6.0019\text{ s}$ 时转子在垂直方向上受到大约 655 kN 的作用力。当 $t=6.00286\text{ s}$ 时转子受到大约 921.5 kN 的最大径向合力。从表 3 可以看出，在水平方向上 WFII 转子受到的力最大，而

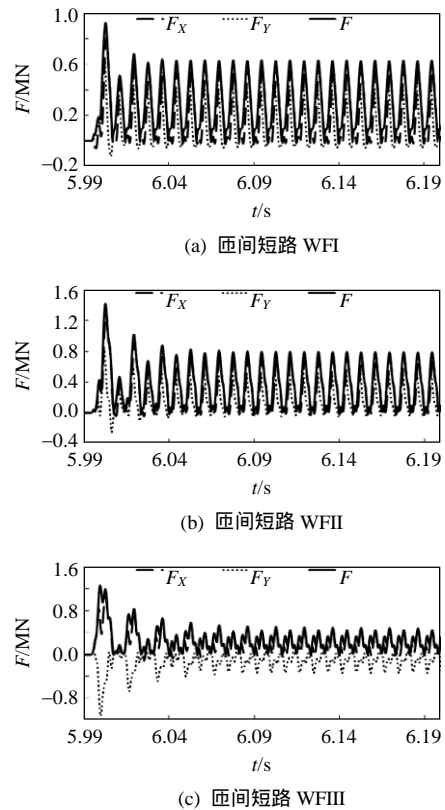


图 8 定子在不同短路位置情况下的径向力

Fig. 8 Radial force of stator in a different location short-circuit

表 3 3 种径向力比较

Tab. 3 Comparison of radial force

位置	F_x 最大值/kN	F_y 最大值/kN	F 最大值的时刻/s	F 最大值/kN
WFI	805	655.0	6.002860	921.5
WFII	1290	822.8	6.002658	1418.5
WFIII	1074	-1126.4	5.999482	1253.3

在垂直方向上 WFIII 转子受到的力最大,且方向相反。从时间上看 WFIII 最早达到最大径向合力;从力的大小看 WFII 转子受到的径向合力最大。

3.1.6 转矩

匝间短路不仅对电流产生影响,也会对气隙中的电磁转矩造成影响。对于发电机,电磁转矩是转子的基本载荷形式,与发电机的工作能力、能源消耗、效率、运转寿命及安全性能等因素紧密相关,转矩的测量对转子载荷的确定,控制、传动系统工作零部件的强度设计以及涡轮机容量的选择等都具有重要的意义。

图 9(a)—(c)分别为在短路瞬间 3 种不同匝数的匝间短路的电磁转矩。由此可知,短路后,电磁转矩由直流成分、双倍电网频率(120 Hz)的交流成分和谐波组成;电磁转矩都明显增大:对于匝间短路 WFI 在 $t=6.191645\text{ s}$ 时,最大转矩从额定转矩 $-1851114\text{ N}\cdot\text{m}$ 增加到 $-2211983\text{ N}\cdot\text{m}$;而对于匝间短路 WFII 和 WFIII 在短路后很快转矩就到达最大值,如表 4 所示。

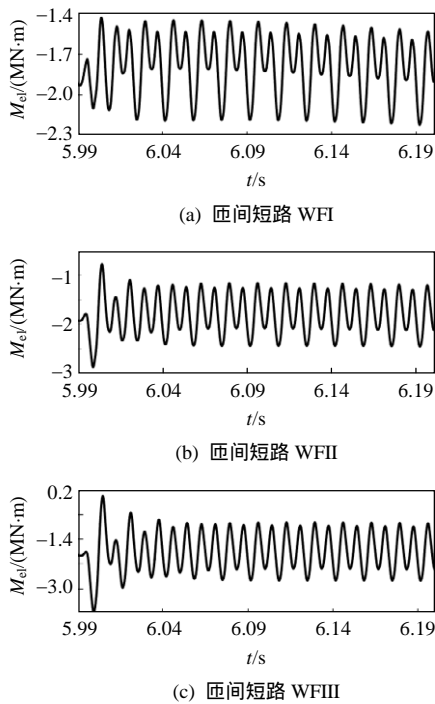


图 9 定子在不同短路位置情况下的力矩

Fig. 9 Torque of stator in a different location short-circuit

表 4 3 种转矩比较

Tab. 4 Comparison of torque

位置	M_{e1} 最大值的时刻/s	M_{e1} 最大值/(N·m)
WFI	6.191645	-2211983
WFII	5.999482	-2871220
WFIII	5.999285	-3749932

3.2 电流、径向力和转矩与故障位置和匝数的关系
为了更好地理解模拟得到的数据,将对短路电流、相电流、径向力和力矩与短路位置和匝数间的相关性做进一步分析。

图 10(a)和图 11(a)给出定子的不同短路位置,即以下图 10(b)、(c)和图 11(b)、(c)相应的横坐标。从图 10(b)和图 11(b)可以看出,定子在不同位置短路时,同一支路里的电流和转矩并没有明显的变化。这个规律对于短路匝数为 3、4、5 或 6 的情况也是一样的。对于径向力而言,在同一支路里随着短路位置的不同,径向力的大小也发生相应的变化,其中在中心位置短路时的径向力最小,具体的变化情况见图 10(c)和图 11(c)。在单匝短路情况下,短路发生在位置 1 处时的径向力是短路发生在中心位置 4 处时的 3 倍。事实上,径向力的大小不仅与在转子表面的磁感应强度大小有关,还与气隙磁场的不对称程度有关。当短路位置越靠近同一支路的边上,其气隙磁场失真越大。

图 12(a)给出定子的不同短路位置,即以下(b)和(c)相应的横坐标。由图 12 可知,在同一支路上,随着短路匝数的增加,电流和转矩也相应的增大,

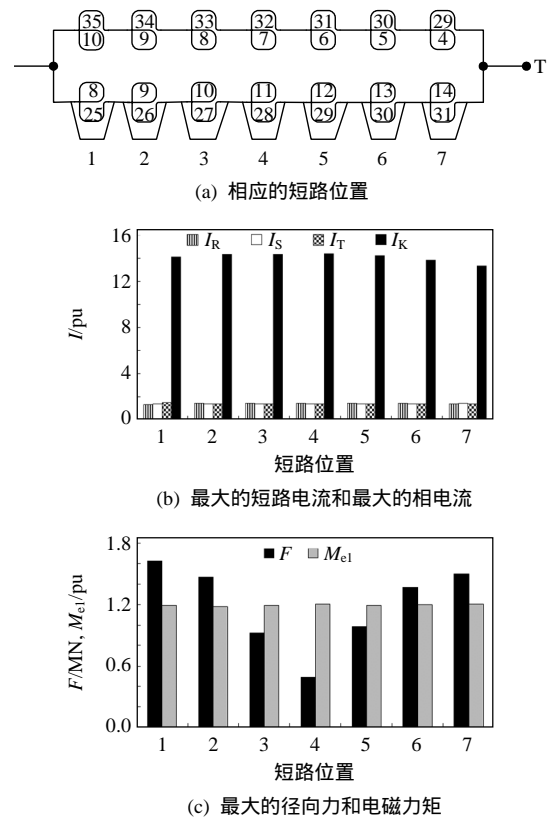


图 10 定子在不同位置的单匝短路

Fig. 10 Single-turn short circuit of the stator in a different location short-circuit

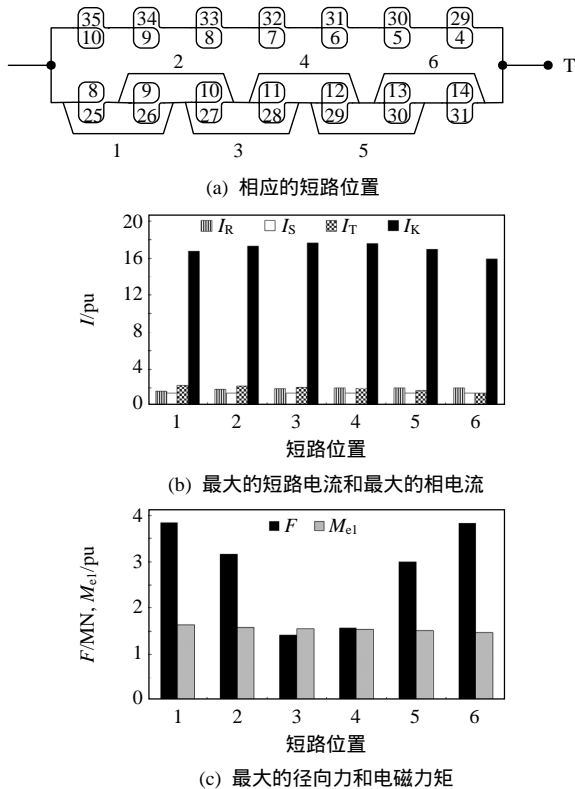


图 11 定子在不同位置的两匝短路

Fig. 11 Double-turn short circuit of the stator in a different location short-circuit

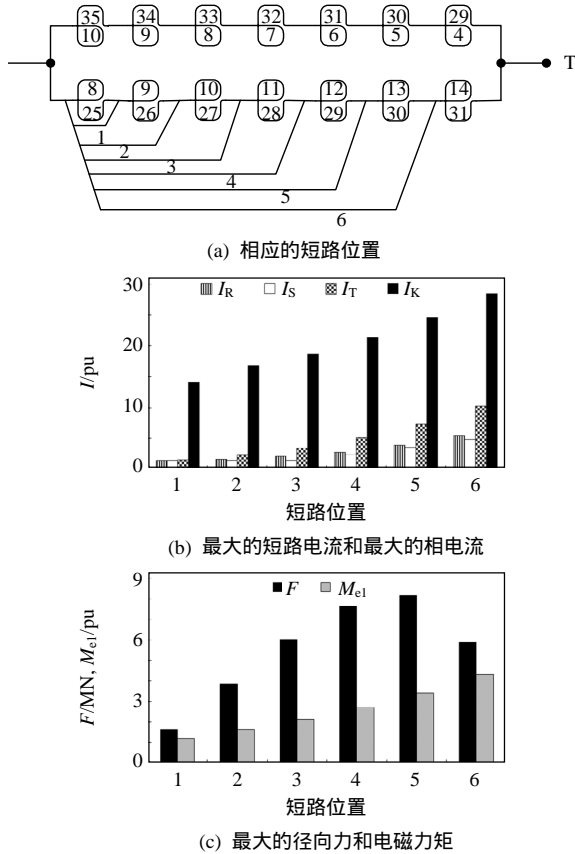


图 12 从定子端部开始不同匝数的短路

Fig. 12 Different number of turns of the short circuit from the stator end

其中短路电流近似成比例上升，其斜率的平均值为 2.868。对于径向力而言，不同的短路匝数，其大小不一样。当 5 匝短路时，其径向力最大接近单匝短路的 5 倍。

4 结论

基于经典理论算法在分析定子匝间短路故障时的应用限制，本文提出单一绕组分析和有限元分析相结合的方法研究同步发电机在额定运行方式下定子绕组匝间短路的故障特性，得出的主要结论总结如下：

- 1) 当短路匝数相同时，短路电流、相电流、电磁转矩受短路位置的影响很小，而径向力与短路位置密切相关，越靠近串联绕组的中心位置，其径向力越小。
- 2) 在额定负载以及在一段短路位置相同的情况下，随着短路匝数的增加，匝间短路电流、相电流和转矩也增大。
- 3) 对于磁场和电路之间强耦合的仿真可以提供可靠的计算结果，甚至可以模拟电机定子内部的故障。尽管如此，仍然需要在建模和计算速度上进一步的改善和提高，同时也应考虑不对称形成的气隙场和铁芯饱和所带来的影响。

参考文献

- [1] 高仕红 . 同步发电机突然三相短路的仿真研究[J]. 湖北民族学院学报：自然科学版，2008，26(1)：36-40 .
Gao Shihong . Simulation study of synchronous generator on sudden three-phase short circuit[J]. Journal of Hubei Institute for Nationalities :Natural Science Edition , 2008 , 26(1) : 36-40(in Chinese) .
- [2] Wood A I . Synchronizing out of phase[J]. IEEE Transactions on Power , 1957 , 76 : 1-10 .
- [3] Stefan K T . Über die beeinflussung der ströme und des drehmoments von turbogeneratoren durch windungs- und phasenschlüsse[D]. Hannover : University of Hannover , 1979(in German) .
- [4] Stefan K T . Anwendung der numerischen feldberechnung zur modellierung elektrischer drehstrom-maschinen mit inneren fehlern[J]. Bulletin SEV/VSE , 1990 , 81(7) : 35-43 .
- [5] Kinitsky V A . Über die inneren Fehler in Synchronmaschinen[D]. Hannover : University of Hannover , 1964(in German) .
- [6] Megahed A I , Malik O P . Synchronous generator internal fault computation experimental verification[J]. IEE Proc-Gener Trans. Distrib , 1998 , 145(5) : 604-610 .

- [7] Megahed A I , Malik O P . Simulation of internal faults in synchronous generators[J] . IEEE Transactions on energy conversion , 1999 , 14(4) : 1306-1311 .
- [8] Reichmeider P P , Querrey D , Gross C A , et al . Partitioning of synchronous machine winding for internal fault analysis[J] . IEEE Transactions on energy conversion , 2000 , 15(4) : 372-375 .
- [9] Reichmeider P P , Querrey D , Gross C A , et al . Internal faults in synchronous machine part I : the machine model[J] . IEEE Transactions on Energy Conversion , 2000 , 15(4) : 376-379 .
- [10] Reichmeider P P , Querrey D , Gross C A , et al . Internal faults in synchronous machine part II : the model performance[J] . IEEE Transactions on energy conversion , 2000 , 15(4) : 380-383 .
- [11] 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) .
- [12] 孙宇光,王祥珩,桂林,等.场路耦合法计算同步发电机定子绕组内部故障的暂态过程[J].中国电机工程学报,2004,24(1):136-141.
Sun Yuguang , Wang Xianghen , Gui Lin , et al . Transient calculation of stator's internal faults in synchronous generator using FEM coupled with multi-loop method[J] . Proceedings of the CSEE , 2004 , 24(1) : 136-141(in Chinese) .
- [13] Bi Daqing , Wang Xiangheng , Wang Weijian Zhu , et al . Improved transient simulation of salient-pole synchronous generators with internal and ground faults in the stator winding[J] . IEEE Transactions on energy conversion , 2005 , 20(1) : 128-134 .
- [14] 魏书荣,马宏忠.基于多回路理论的同步电机定子绕组内部故障仿真的谐波分析[J].电力自动化设备,2008,28(4):32-36.
Wei Shurong , Ma Hongzhong . Harmonic analysis of synchronous generator stator winding internal fault simulation based on multi-loop theory[J] . Electric Power Automation Equipment , 2008 , 28(4) : 32-36(in Chinese) .
- [15] Wang Xiangheng , Chen Songlin , Wang Weijian , et al . A study of armature winding internal faults for turbogenerators[J] . IEEE Transactions on Industry Applications , 2002 , 38(3) : 625-631 .
- [16] Meinolf K , Jens R . Effects of turn to turn stator winding faults in synchronous generators-a numerical study[C]// Optimization of Electrical and Electronic Equipments (OPTIM06) . Romania , 2006 : 55-62 .
- [17] Hasan-Serdar A . Windungsschlüsse im Stator großer synchronmaschinen : aufbau und verifikation eines 2D finite-elemente-modells eines 775 MVA-turbogenerators für die berechnung von windungsschlüssen mit FLUX 2D[D] . Dortmund : Institute of Electrical Drives and Mechatronics , TU Dortmund University , 2007(in German) .
- [18] Cedrat . FLUX 9 . 10 , 2D/3D Applications , User's guide [M] . Volume 1 . Geometry&mesh with FLUX , Tutorial , 2005 , Meylan .
- [19] Cedrat . FLUX 9 . 10 , 2D/3D Applications , User's guide [M] . Volume 2 . Physical description-circuit coupling-Kinematic coupling , Tutorial , 2005 , Meylan .
- [20] Heinrich S . Elektrische maschinen eine einführung in die grundlagen[J] . Wien/New York : Springer-Verlag , 1971 .



叶志军

收稿日期:2012-07-02。

作者简介:

叶志军(1976),男,博士研究生,研究方向为电磁场数值分析,大型发电机内部故障仿真以及变压器饱和特性, ye_zhijun@hotmail.com ;

游佰强(1958),男,教授,厦门大学教学名师,研究领域为电磁场数值分析、电子材料与器件、天线等, youzhou@xmu.edu.cn ;

Jens Rosendahl(1975),男,博士,研究方向为大型发电机内部故障仿真与保护;

Stefan Kulig(1947),男,教授,博士生导师,研究方向为电机设计、分析和控制,电机故障及保护等。

(责任编辑 王剑乔)

Fault Characteristic Study Based on FLUX 2D for Large Synchronous Generators With Inter-turn Short Circuit of Stator Windings Under Rated Operating Condition

YE Zhijun¹, YOU Baiqiang², Jens Rosendahl¹, Stefan T. Kulig¹

(1. Institute of Electrical Drives and Mechatronics, TU Dortmund University, TU Dortmund 44227, Germany;

2. School of Information Science and Technology, Xiamen University)

KEY WORDS: synchronous generator; stator windings finite element method (FEM); inter-turn short circuits

With the increasing capacity of synchronous generators in power systems, stator winding inter-turn short circuit analysis plays a significant role in the reliable operation of the generator. In order to investigate the stator winding short-circuit characteristic, a novel method combing the single-winding analytical and Finite Element Method (FEM) is proposed. First of all, the simulation model of the typical synchronous generator is built with FLUX-2D software considering saturation and un-symmetrical air gap field. The connection style and short-circuit locations of the stator winding are shown in Fig.1.

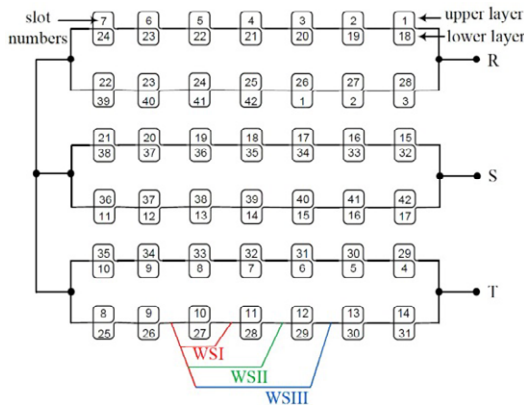


Fig. 1 Diagram of stator winding connection and simulative short-circuit position

Aiming at describing the inner asymmetry problem and improving the computation accuracy, the air gap in the simulation model is classified into three categories: rotor air gap, stator air gap and simulation air gap. The subdivided cross section of the simulated generator based on the FEM is presented in Fig.2.

According to the locations of three different short circuits (Fig.1), the variations of parameters including short circuit currents, magnetic field distribution, phase current, radial force and torque are comprehensively analyzed. The transient processes of three different short circuits are further compared based on the simulated results. Furthermore, the relationships between the transient parameters (short circuit currents, phase current, radial force and torque) and different short circuit locations as well as winding turns are researched.

The simulation results from Tab. 1 show that with

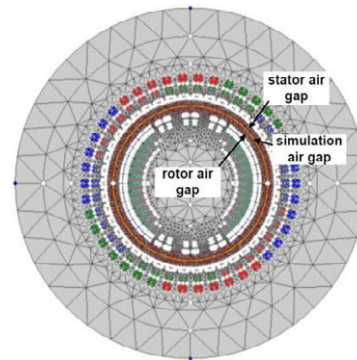


Fig. 2 Subdivided cross section of the generator with FEM

Tab. 1 Comparison of parameters for single-turn short circuit of the stator in a different location short-circuit

Locations short-circuit	I_K /pu	I_R /pu	I_S /pu	I_T /pu	F /Mn	M_{el} /pu
1	14.13	1.36	1.42	1.48	1.63	1.19
2	14.38	1.42	1.42	1.40	1.47	1.18
3	14.36	1.43	1.42	1.40	0.92	1.20
4	14.40	1.44	1.42	1.40	0.49	1.21
5	14.25	1.45	1.42	1.40	0.98	1.19
6	13.83	1.44	1.42	1.40	1.37	1.20
7	13.36	1.41	1.43	1.40	1.50	1.20

the same number of short circuit turns, short circuit current, phase current, electromagnetic torque the influence of short-circuit location is very small. While the radial force is closely related to the short-circuit location, the closer the center of the series winding, the smaller the radial force.

Tab. 2 Comparison of parameters for different number of turns of the short circuit from the stator end

Turns of short-circuit	I_K /pu	I_R /pu	I_S /pu	I_T /pu	F /Mn	M_{el} /pu
1	14.13	1.36	1.42	1.48	1.63	1.19
2	16.74	1.62	1.42	2.23	3.85	1.64
3	18.72	2.04	1.42	3.40	6.01	2.14
4	21.35	2.71	2.32	5.06	7.65	2.72
5	24.59	3.83	3.51	7.32	8.16	3.44
6	28.47	5.39	4.84	10.22	5.88	4.32

Tab. 2 shows that under the rated operating condition and the same position at the end of short-circuit, when the number of short circuit turns increases, short-circuit current, phase current and torque will also increase.