

同步发电机短路故障分析方法研究

史丽敏, 杨泽江, 高向前, 李艳君

(四川水利职业技术学院 电力工程系, 四川 成都 611133)

摘要:为提高同步发电机励磁绕组匝间短路故障的诊断速度和精度,提出了一种基于“场路结合”算法的故障分析方法。首先,建立了同步发电机励磁绕组匝间短路故障的扩充多回路数学模型。在此基础上,利用有限元分析确定了电感参数表达式,将有限元分析所得电感参数代入回路电压方程即可实现场路结合分析。以1台凸极同步发电机作为平台,进行仿真和实验研究,数据对比表明:场路结合法不仅具有较高的准确度而且可以提高计算效率,可以为励磁绕组匝间短路保护提供依据。

关键词:发电机;场路结合法;励磁绕组;短路故障分析

中图分类号: TM341 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19902

Research on Analysis Method of Short Circuit Fault of Synchronous Generator

SHI Limin, YANG Zejiang, GAO Xiangqian, LI Yanjun

(Department of Electric Power Engineering, Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611133, Sichuan, China)

Abstract: In order to improve the diagnosis speed and accuracy of inter-turn short circuit fault of synchronous generator excitation windings, a fault analysis method based on "field - path combination" algorithm was proposed. Firstly, the extended multi-loop mathematical model of the inter-turn short circuit fault of the excitation windings of synchronous generators was established. On this basis, the expressions of inductance parameters were determined by finite element analysis. Field-path combination analysis can be realized with substituting the inductance parameters obtained by finite element analysis into the circuit voltage equation. A salient pole synchronous generator was used as a platform for simulation and experimental research. The comparison of the data shows that the field circuit combination method not only has higher accuracy but also can improve the calculation efficiency, and can provide a basis for the protection of inter-turn short circuit of the excitation windings.

Key words: electric generator; field-circuit method; excitation winding; short circuit fault analysis

对于发电机来说,励磁绕组匝间出现短路故障是比较常见的^[1]。通常情况下,轻微匝间短路并不会影响发电机正常运行,另外,现有匝间短路保护措施并不完善,所以不会强制要求安装励磁绕组匝间短路保护装置^[2-3]。但是如果任凭短路故障继续发展,会造成一系列严重后果,例如输出无功功率减小、励磁电流增加、发电机剧烈震动等^[4-7]。短路点的局部过热容易损坏转子铁心,甚至导致大轴磁化,有可能出现轴颈和轴瓦烧伤的情况,降低机组运行安全系数^[8-10]。因此,

开展发电机励磁绕组匝间短路故障分析方法研究具有十分重要的意义。

目前,众多研究人员已开展这方面研究。樊静等人以发电机转子绕组匝间短路后磁场变化为研究对象,利用有限元分析建立了短路程度和不对称磁场之间的关系,同时论证了磁场不对称将产生一定的电磁应力^[11]。孙宇光等人基于多回路理论确定了同步发电机数学模型,在励磁电压保持不变的条件下,分析、对比了故障前后励磁电流、定子电流的谐波特征^[12]。

基金项目:四川水利职业技术学院院级项目(ky2020-20)

作者简介:史丽敏(1976—),女,本科,讲师,Email:179237966@qq.com

本文在现有研究的基础上,利用场路结合算法对同步发电机短路故障进行分析并进行仿真和实验研究。

1 同步发电机多回路数学模型

多回路分析法不仅可以较好地实现电机绕组内部各回路电流、电压的分析、计算,而且能够分析气隙磁场的各种谐波。为体现一般性,文中以并联支路数为1且只有一处匝间短路的励磁绕组作为研究对象。

1.1 定子回路电压方程

励磁绕组匝间短路故障会造成相绕组内部电流失衡,所以不能以相绕组为基础单元求解定子方程,需要结合多个相绕组进行分析。

如果将定子各回路电流作为变量,那么可得到定子各回路电压方程,即

$$U_{\infty} = D\Psi'_s + R'_s I'_s + M'_{s,T} DI'_T + R_{s,T} I'_T \quad (1)$$

式中: U_{∞} 为电网电压,其值无穷大; D 为微分算子; Ψ'_s 为磁链; I'_s 为电流; R'_s 为电阻; $M'_{s,T}$ 为漏感作用变量; $R_{s,T}$ 为电阻作用变量。

1.2 励磁绕组电压方程

如果发生匝间短路故障,励磁绕组会存在2个独立回路,其中正常励磁回路的电流为 i_f ,附加回路电流为 i_{fkL} 。此时励磁绕组电压方程可表示为

$$\begin{bmatrix} E_{zf} \\ 0 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_{fkL} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_f + R_{zf} & r_{fk} \\ r_{fk} & r_{fk} + R_{fkL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_{fkL} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Ψ_f 为正常回路磁链; Ψ_{fkL} 为故障附加回路磁链; r_f 为正常回路电阻; r_{fk} 为短路匝电阻; E_{zf} 为电源电动势; R_{zf} 为电源内阻; R_{fkL} 为故障附加回路过渡电阻。

1.3 阻尼绕组电压方程

由于故障气隙磁场存在不同空间谐波,如分次数谐波,文中以实际网型阻尼回路为研究对象,其电压方程可表示为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} \Psi_{d,1} \\ \Psi_{d,2} \\ \vdots \\ \Psi_{d,N_d-1} \\ \Psi_{d,N_d} \end{bmatrix} + R_d \begin{bmatrix} i_{d,1} \\ i_{d,2} \\ \vdots \\ i_{d,N_d-1} \\ i_{d,N_d} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\Psi_{d,1}, \Psi_{d,2}, \dots$ 为阻尼回路磁链; $i_{d,1}, i_{d,2}, \dots$ 为阻尼回路电流; R_d 为阻尼回路电阻。

1.4 状态方程

结合上述各式就可以得到定子和转子所有回路电压方程,可统一表示为

$$U = D\Psi' + M_T DI' + (R' + R_T) I' \quad (4)$$

式中: U 为电网电压和励磁系统电源电压; Ψ' 为定子和转子各回路磁链; I' 为定子和转子各回路电流; R' 为回路电阻; M_T, R_T 均为常数方阵。特别地,定、转子各回路正值电流均产生正值磁链,那么所有回路磁链可表示为

$$\Psi'_{any} = M' I' \quad (5)$$

式中: M' 为回路电感。

求解式(4)的前提条件是需要准确计算回路电感,尤其是发生短路故障的绕组电感。

2 电感参数计算

2.1 有限元分析

为便于计算,文中选用静态磁场进行分析,即电机内磁场始终保持恒定。为描述磁通密度 Φ ,可引入矢量磁位 Ω ,那么则有:

$$\Phi = \nabla \times \Omega \quad (6)$$

式中: ∇ 为旋度算子。

以 XY 坐标内二维平面场为例,如果矢量磁位、电流密度仅在 Z 轴方向存在分量,那么发电机二维磁场的数学模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Omega_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Omega_z}{\partial y} \right) = -J_z \\ \Omega_z = \Omega_{z0} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ρ 为磁导率; Ω_{z0} 为边界已知值; J_z 为电流密度 Z 轴分量。

由于空气磁导远小于铁心磁导,所以可认为穿过定子外表面的磁通为零。定子外表面处磁力线的方向与边界平行,此时矢量磁位 Ω 在铁心表面切线方向不会发生变化,即满足 $\Omega_{z0} = 0$ 。

基于有限元分析的电感参数自动计算,关键步骤可描述如下:

- 1) 设定计算时间和步进时间;
- 2) 进行节点耦合,励磁电流注入;
- 3) 判断是否空载,带负载的情况下,建立定子坐标,确定转子位置;
- 4) 获取相位图,分别计算相电流、磁场,求解电感参数;
- 5) 判断是否完成,若完成,则结束;否则,重复上述过程。具体流程如图1所示。

2.2 电感参数表达式

如果仅仅选取互感参数常数项和2次谐波项,那么定子的 k_i 支路和 k_j 支路之间互感参数表达式可描述为

$$M_{k_i,k_j} = M_{k_i,k_j,0} + M_{k_i,k_j,2} \cos[2(\varphi + \delta_{k_i,k_j,2})] \quad (8)$$

式中: $M_{k_i,k_j,0}$ 为互感参数常数项; $M_{k_i,k_j,2}$ 为2次谐波项幅值; $\delta_{k_i,k_j,2}$ 为2次谐波项相位; φ 为转子位置角。

定子支路 k_i 和阻尼回路 d_j 之间互感参数表达式可描述为

$$M_{k_i,d_j} = \sum_{h=1,2,\dots} M_{k_i,d_j,h} \cos[n(\varphi + \delta_{k_i,d_j,h})] \quad (9)$$

式中: $M_{k_i,d_j,h}$ 为互感参数幅值; $\delta_{k_i,d_j,h}$ 为互感参数相位; n 为谐波次数。

定子支路 k_i 和正常励磁回路之间的互感参数表达式可描述为

$$M_{k_i,f} = \sum_{h=1,3,\dots} M_{k_i,f,h} \cos[n(\varphi + \delta_{k_i,f,h})] \quad (10)$$

式中: $M_{k_i,f,h}$ 为互感参数幅值; $\delta_{k_i,f,h}$ 为互感参数相位。

定子支路 k_i 和故障励磁回路之间互感参数表达式可以描述为

$$M_{k_i,fk} = \sum_{h=1,2,\dots} M_{k_i,fk,h} \cos[n(\varphi + \delta_{k_i,fk,h})] \quad (11)$$

式中: $M_{k_i,fk,h}$ 为互感参数幅值; $\delta_{k_i,fk,h}$ 为互感参数相位。

综上所述,将有限元分析所得电感参数代入回路电压方程即可实现场路结合分析。

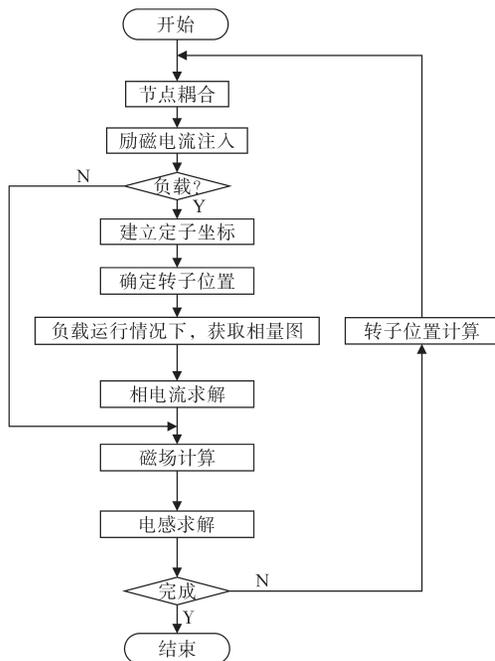


图1 电感参数计算流程

Fig.1 Inductance parameter calculation process

3 仿真和实验分析

为验证所述励磁绕组匝间短路故障分析方法的可行性和有效性,参考文献[10-12]所述多回

路和场路耦合仿真和实验方法,以一台凸极同步发电机作为仿真和实验平台,在联网负载情况下励磁绕组匝间发生短路故障时,基于上述“场路结合”分析方法,计算定子和转子各绕组电流。该发电机主要参数如下:额定功率12 kW,额定电压400 V,额定电流21.7 A,励磁电流22.6 A,极数4,定子并联支路2,定子槽42,励磁绕组匝数/极为94,转子阻尼条数/极为6。

为验证“场路结合”算法的有效性和优势,文中开展实验研究并与仿真数据进行比较。选用12 kW励磁绕组匝间短路专用同步发电机作为实验样机,实验过程可简要描述为:启动并调节直流调速设备,改变发电机转速,使其机端电压频率接近电网电压频率;确保样机机端电压和电网电压相序一致;确保发电机平稳入网;闭合短路开关,使励磁绕组出现匝间短路故障,记录故障数据。结果如表1所示。

表1 数据对比

Tab.1 Data comparison

A

电气参数/有效值	实验数据	仿真数据		
		多回路	场路耦合	场路结合
相电流基波	10.62	13.72	12.47	12.91
励磁电流直流分量	8.35	9.38	8.36	8.38
基波	5.58	7.41	6.08	6.23
分支电流谐波				
2次谐波	5.39	6.59	5.45	5.22
3次谐波	0.34	0	0	0.03
4次谐波	2.84	3.59	2.66	2.49

由表1可知,实验数据和仿真数据还是比较接近的,说明“场路结合”算法计算励磁绕组匝间短路故障的正确性。另外,通过对比不同仿真结果可以看出:场路结合法计算精度虽然不是最高,但是与多回路法相比,计算准确度明显提高。

综上所述,场路结合法利用有限元计算发电机电感参数,虽然计算精度低于场路耦合法,但同场路耦合法的计算结果比较接近,二者之间计算误差在工程研究可接受的范围内。另外,场路结合算法的优势在于计算速度较快。相同条件,场路耦合法完成计算耗时8 h左右,而场路结合算法仅需1 h左右,充分证明了场路结合算法在计算准确度和速度方面的优势。

4 结论

以发电机励磁绕组匝间短路故障为研究对

(下转第58页)

基本概念和开发测试流程,并通过在测试平台上应用TestStand软件的案例来展示整个测试平台的测试结果。测试结果说明TestStand软件实现了公司生产板卡的自动一体化测试,同时使测试系统平台具有了实时分析、逻辑判断、记忆的能力。实际测试时操作人员可以灵活地调整测试序列的前后顺序进行测试,本测试系统平台会将测试的最终结果自动存储起来,有利于日后对测试结果进行分析查验。通过对测试结果的分析,验证了此程序的可行性,将此软件程序引入到公司产品生产线测试后,提升了公司板卡类产品的测试效率与测试精度。

综上所述,在电路板卡类产品的测试周期内应用本测试程序大幅度地提高了测试的精确度和可靠性,不管是测试过程的操作还是测试结果的记录都减少了人为主观因素对测试结果的影响^[1],对提升公司品牌形象及公司产品的核心竞争力都起到了至关重要的作用。

参考文献

[1] 胡典钢. TestStand工业自动化测试管理[M]. 第一版. 北京: 电

子工业出版社, 2016.
 [2] 郎杰. 基于TestStand的自动检测程序开发[J]. 电子测试, 2018(11): 71-72.
 [3] 王栋. 基于NI TestStand的超高频电子标签清点功能自动化测试序列软件的设计与实现[J]. 集成电路应用, 2018, 35(4): 66-69.
 [4] 王昉, 史贤俊, 肖支才, 等. 基于虚拟仪器的数字电路板测试系统研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(4): 8-10.
 [5] 于洋, 丁喜波, 胡逸, 等. 基于LabVIEW的电路板自动测试系统: 中国, 204789908[P]. 2015-11-18.
 [6] 于洪泽, 贺永鹏, 袁绍民, 等. 基于LabVIEW与TestStand的通用板卡自动测试系统[J]. 电气传动, 2015, 45(9): 66-69.
 [7] 吴伟, 张宏军, 刘康, 等. 基于TestStand的自动测试系统软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(7): 2321-2323.
 [8] 梅萌. 基于TestStand的高频参数自动化测量系统[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
 [9] 甘广辉, 王思华, 黄文基, 等. 基于TestStand的医疗仪器产品性能自动测试系统研制[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12): 3962-3965.
 [10] 桂训发. 基于LabVIEW及TestStand的自动化功能测试系统研究[J]. 科技创新与应用, 2017(16): 107.
 [11] 丁光林, 崔根群, 蔡永祥, 等. 基于虚拟仪器的VCU自动测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(4): 5-7.

收稿日期: 2019-09-25

修改稿日期: 2019-12-02

(上接第54)

象,重点讨论故障分析方法。在多回路分析法的基础上,通过有限元分析计算电感参数,实现场路结合分析计算。通过仿真和实验验证了所述计算方法的可行性和有效性。结果表明,场路结合计算方法在准确度和速度方面均有一定优势,可用于发电机匝间短路故障计算、分析。

参考文献

[1] 武玉才, 袁浚峰. 不同励磁模式下的汽轮发电机转子绕组匝间短路故障特征分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(9): 86-91.
 [2] 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.
 [3] 郝亮亮, 孙宇光, 邱阿瑞, 等. 同步发电机励磁绕组匝间短路时的电磁转矩[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 59-65.
 [4] 诸嘉惠, 邱阿瑞. 转子偏心对凸极发电机主保护不平衡电流的影响[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 57-60.
 [5] WU Y C, LI Y G. Diagnosis of rotor winding interturn short-circuit in turbine generators using virtual power[J]. IEEE Transac-

tions on Energy Conversion, 2014, 30(1): 1-6.
 [6] 张征平, 刘石. 大型汽轮发电机转子匝间短路故障在线诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 148-152.
 [7] 李和明, 张文静, 李永刚, 等. 汽轮发电机励磁绕组短路及伴随故障不平衡电磁力分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 13-20.
 [8] 班国邦, 李永刚, 赵立进. 基于电磁特性的转子绕组动态匝间短路故障联合诊断方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(3): 32-35.
 [9] 侯纪勇, 李和明, 李俊卿, 等. 隐极同步发电机励磁绕组匝间短路励磁磁动势研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(S1): 220-225.
 [10] 武玉才, 李永刚, 李和明, 等. 机电复合故障下汽轮发电机转子振动特性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2687-2692.
 [11] 樊静. 汽轮发电机转子绕组匝间短路时的电磁场分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
 [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[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 5-10.

收稿日期: 2019-01-24

修改稿日期: 2019-04-01