

基于多回路法的同步发电机故障建模与仿真

同步发电机建模方法有多种,但结构特点及应用场合不同,多回路法在计算量与准确度方面都适合对发电机内部故障分析。应用多回路法对无阻尼发电机进行回路参数计算,并仿真其在正常状态下电气特征;而后利用多回路建模法对匝间短路故障进行建模并仿真,分析其相电流、励磁电流及短路线电流故障特征。仿真结果表明,过大的短路线电流对发电机冲击性很大,所以发电机需要必要的保护装置,而且励磁电流中谐波成分较大。该仿真能为电气设备安全运行提供参考,同时可为后续故障诊断研究提供理论基础。

石旭东 马颖川 屈俊超 杨占刚/中国民航大学航空自动化学院



石旭东/教授

现阶段,同步发电机是发电系统主要发电设备。随着用电量提升,发电机稳定运行已成为人们关心的主要问题。限于真实的物理装置,数字仿真已成为经济、安全且方便的发电机研究方法。虽然Matlab、PSCAD和Digsilent等专用商业仿真软件中给出了各种发电机模型,但这些模型只能用于发电机外部特性仿真^[1-3],即使改变模型结构也不能满足对内部特性仿真的要求,所以必须根据研究问题建立合适的发电机模型^[4-5]。发电机仿真模型是仿真的核心,合适的建模方法不仅能反映所要研究问题的物理状态,而且能使仿真在误差允许范围内快速解算。

发电机基本方程模型包括原始方程模型和派克变换模型。计算求解时,电感参数是时变系数矩阵。电压方程为非线性微分方程组,所以求解时较烦琐^[6-7]。变换后的派克方程,电感部分为定值,电压方程变为线性微分方程组,求解更简

便。部分学者提出将派克变换模型应用到内部故障分析中。但该方法将发电机电感矩阵简化为常数矩阵,其前提不严格^[8]。

绕组函数法对定子、转子部分考虑更细致。改进的绕组函数法能计算偏心发电机电感参数^[9-11]。另外,凸极同步发电机中,气隙为非均匀,转子旋转时将引起磁路磁阻变化,致使气隙磁场中包含低次和分数次谐波,定子电流含有奇数次谐波,励磁电流含有偶数次谐波。Xiaoping Tu等人将绕组函数法拓展,对多支路凸极同步发电机进行建模^[12],给出了六支路并联发电机互感参数数值特征。

采用有限元法对发电机仿真可以得到发电机内部电磁场的准确分布,并由此求取发电机参数及运行特性^[13-15]。同时能够较为准确地考虑磁极的实际形状、铁磁材料的非线性、饱和和齿槽效应等。不仅如此,有限元法可以针对偏心故障后发电机结构,详细分析其内部电磁场分布。但是该方法对计算机要求较高,剖分网格较多^[14],计算量较大。

多回路法能仿真发电机外部和内部故障,且回路选择灵活多变。相较于有限元法,多回路法计算简单仿真快速^[16]。相比基本方程法与绕组函数法,多回路法计算更加准确。该方法适用范围更广,计算难度适中,更适合进行发电机故障分析。多回路法以线圈为基础计算电感参数,充分考虑并联支路发电机的电感问题,用求和方式得到回路电感参数,建立回路模型并仿真解算数学模型^[17-18]。其仿

关键词/Keywords

同步发电机·
建模方法·
多回路·
匝间短路·
内部故障·

国家自然科学基金(51277011, 51377161, 51407185)。

真数据对于发电机设计制造也起到指导作用。

本文利用多回路法求取无阻尼同步发电机回路参数,仿真该发电机正常及故障状态下电气特征。对故障电流谐波进行了分析。故障电流谐波特性变化明显,可作为后续故障诊断研究的重点。

同步发电机多回路模型

多回路建模法步骤如图1所示。

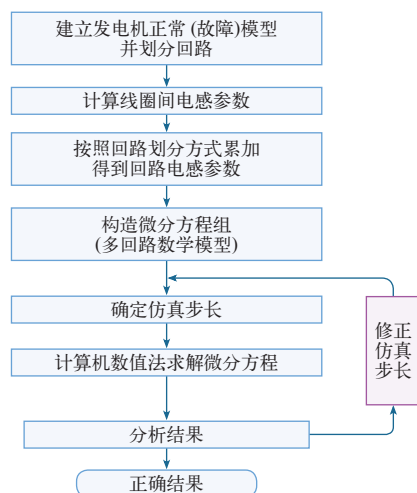


图1 多回路建模法过程

多回路法对定子回路,规定正值电流产生负值磁链,采用发电机原则;对转子回路,规定正值电流产生正值磁链,并采用发电机原则。则定子Q回路,励磁回路的电压方程为

$$\begin{aligned} u_Q &= p\Psi_Q - r_Q i_Q \\ u_F &= p\Psi_F - r_F i_F \end{aligned} \quad (1)$$

式中, Q, F分别为定子、励磁部分; Ψ 为磁链; p 为微分算子。表示成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_Q \\ u_F \end{pmatrix} = p \begin{pmatrix} \Psi_{11} & \cdots & \Psi_{1Q} & \Psi_{1F} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \Psi_{Q1} & \cdots & \Psi_{QQ} & \Psi_{QF} \\ \Psi_{F1} & \cdots & \Psi_{FQ} & \Psi_{FF} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & r_Q & \\ & & & r_F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_Q \\ i_F \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, $\Psi = MI$, M 为回路电感。由此构成多回路数学模型 $U = p(MI) + RI$, 用龙格-库塔法或Calahan法求解即可得到各回路电流暂态值。

M 为关于时间的变量, 只有准确计算出电感参

数才能正确仿真发电机各状态。气隙磁导法有较高的准确度且计算方便快捷, 本文采用此方法计算电感。

定子S线圈与定子Q线圈间电感为

$$M_{SQ} = M_{SQ0} + M_{SQ2} \cos 2(\gamma + \frac{\alpha}{2}) \quad (3)$$

式中, S、Q分别为定子线圈; γ 为转子位置角; α 为两线圈轴线相差电角度。当S、Q为同一线圈时, $\alpha = 0$, 计算结果为线圈自感。 γ 周期变化, 则 M_{SQ} 为周期变化量。

励磁绕组自感为

$$L_{FD} = \frac{\tau l P}{a_{FD}^2} w_{FD}^2 \lambda_0 \quad (4)$$

式中, w_{FD} 、 a_{FD} 为励磁线圈匝数、励磁绕组并联支路数; τ 、 l 、 P 和 λ_0 分别为定子线圈极距、转子有效长度、转子极对数和气隙导磁系数的常数项。

线圈Q与励磁绕组间电感为

$$M_{FQ} = \frac{2w_{FD}w_K \tau l}{\pi a_{FD}} \sum_k \frac{\lambda_{Dk}}{k} \sin \frac{k\beta\pi}{2} \cos k\gamma \quad k=1,3,\dots \quad (5)$$

式中, β 为定子线圈短距比; w_K 分别为定子线圈匝数; λ_{Dk} 为励磁部分导磁系数。

仿真求解

支路方程转化为回路方程为

$$HU = Hp(MI) + HRI \quad (6)$$

式中, H 为支路转换回路矩阵。回路电流变换为

$$I' = HI \quad (7)$$

式中, I' 、 I 为回路电流、支路电流。将式(7)代入式(6)化简可得到 pI' 为

$$pI' = \frac{HU - (HpMH^T + HRR^T)I'}{HMH^T} \quad (8)$$

由于 M 为时变电感矩阵, 此公式为非线性微分方程组, 传统解析方法很难实现对此方程求解, 对此方程数值解法则具有很强的适用性。半隐格式的Calahan求解算法由Calahan于1968年提出, 有较好的稳定性。该算法无须迭代, 直接递推即可得到数值解。该算法是具有三阶准确度 A 的稳定算法, 解算时容易收敛, 对阶数较少的方程组适用性强。

根据该算法,式(8)可简化为式(9),即

$$(HMH^T)pI' = HU - (HpMH^T + HRH^T)I' \quad (9)$$
 再次化简为

$$ApI' = HU - BI' \quad (10)$$

式中, M 电感矩阵具有时变性; A 、 B 同样为关于 t 的变量。如果求解具体时刻 t 的解, 则可将非线性微分方程变为线性微分方程, 再循环程序将每个时刻解顺序存储, 则可得想要的结果。根据式(10)运用Calahan算法, 其递推公式为

$$\begin{cases} I_{n+1} = I_n + 0.75K_1 + 0.25K_2 \\ K_1 = hNA^{-1}(t_n)f(t_n, I_n) \\ K_2 = hNA^{-1}(t_{n+1})f(t_n - 1.1547h, I_n - 1.1547K_1) \\ N = [I - 0.7887hI^{-1}(t_n)B(t_n)]^{-1} \\ f(t_n, I_n) = HU - B(t_n)I_n \end{cases} \quad (11)$$

式中, h 为计算步长, 在Matlab中通过生成函数、调用函数的方法计算单个 t 内数值解, 以此结果作为下一个 t 计算初值, 如此往复计算可得到一系列数值解。

算例分析

Matlab本身自带发电机模型, 许多学者用这些模型做发电机的相关仿真, 然而由于局限性, 该发电机模型只能做外部故障仿真。虽然如此, 发电机正常运行时仍可将Matlab模型作为参照检验所建多回路模型正确与否。本文利用多回路法对一无阻尼发电机进行参数计算。仿真其正常状态并与Matlab中发电机模型进行比较, 验证多回路模型的正确性。而后对发电机C相匝间短路故障进行仿真。

该发电机主要结构参数, 磁极对数2, 定子槽数36, 定子绕组并联支路数2, 额定频率50 Hz, 定子线圈匝数20, 励磁部分为集中绕组, 匝数119, 定子线圈短距比0.778。

图2为正常情况下定子绕组电路示意图。含6条支路, 每条支路6个线圈, 虚线部分为回路选择。

正常状态下, 根据网孔法划分, 含5条回路。仿真规定同步发电机已达到额定转速, 在零时刻加励磁电, 图3为定子A相电流从零时刻开始到电流稳定的过程, 图4为Matlab中固有模型仿真下A

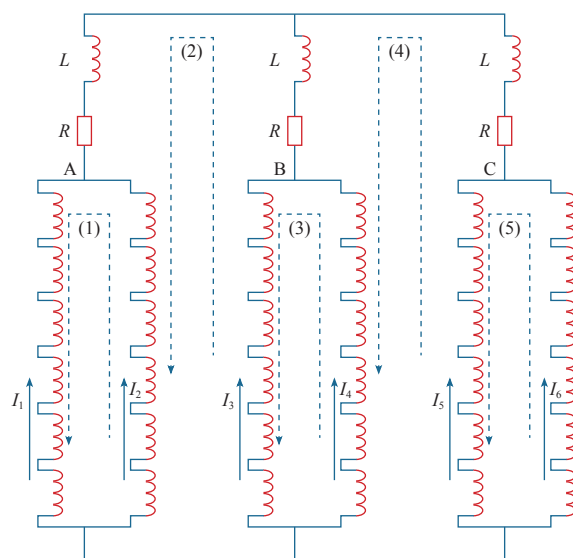


图2 发电机正常时示意图

相电流, 两种模型仿真情况相同, 结果相同, 表明所建多回路模型正确。

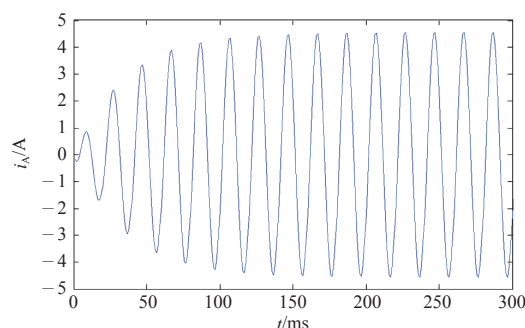


图3 多回路模型正常情况A相电流

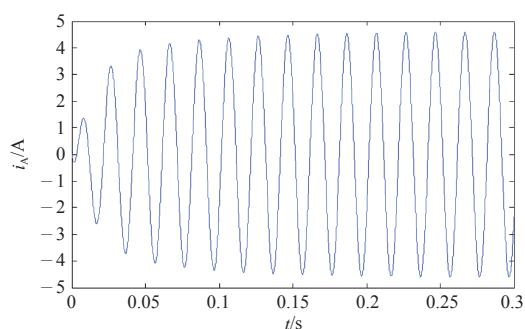


图4 Matlab发电机模型正常情况A相电流

发电机端带三相阻感负载, 设定0.3 s时发生故障。图5为发电机故障示意图, C相2支路33%对中性点短路, 故障后短路线圈作为定子第七支路, 并与短路线构成定子第六回路。短路突变对发电机造成一定的冲击, 使得电流瞬时振荡。

由于发电机自身稳定性, 振荡不会太大, 一段时间后电流趋于稳定。由于匝间短路发生在单支路内, 且短路匝数少, 对发电机影响较小, 故电流稳定后输出变化不大。图6为故障后C相电流暂态波形, 与理论分析吻合。

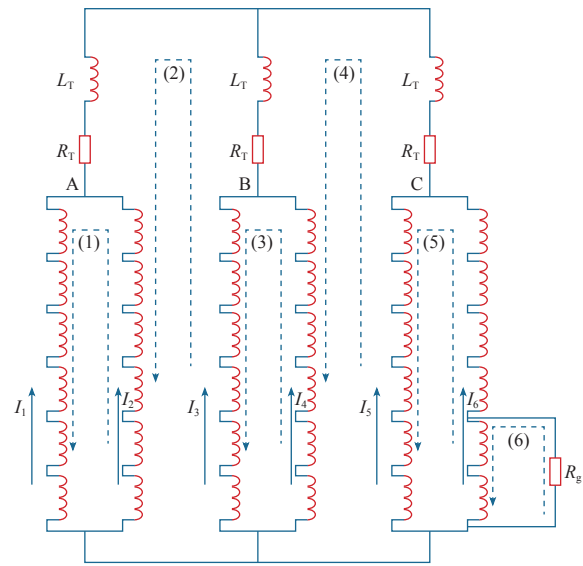


图5 发电机C相匝间短路示意图

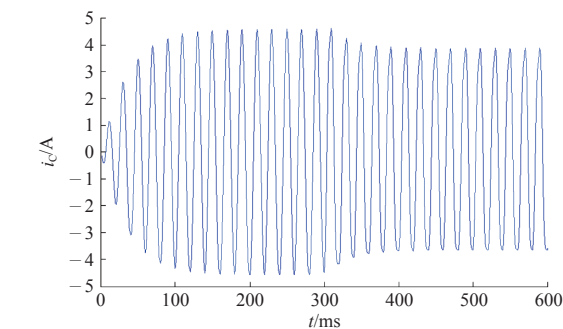


图6 C相匝间短路C相电流

图7为故障后励磁电流, 故障后电流谐波增加, 在图中显示为底部锯齿状波形。故障发生时励磁部分同样受到冲击, 短时的励磁电流增大, 随后趋于稳定, 但励磁电流的振荡较之稳定时更加剧烈, 在15~24 A间振荡。

被短路线圈能感应部分电动势, 短路线中电阻较小, 导致短路线中电流很大。图8为故障后短路线中流过电流。由图8可见短路线中电流远大于非故障支路电流, 与理论分析吻合。过大的电流导致发热严重, 会升级故障程度, 所以必须提供适当的保护装置以减轻损害。

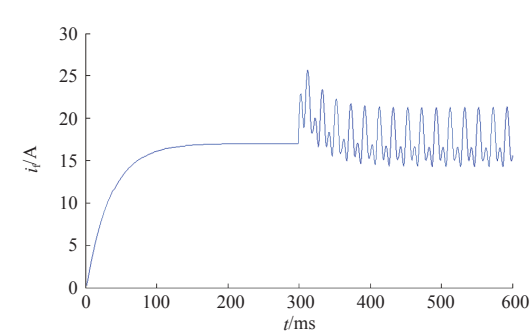


图7 C相匝间短路故障励磁电流

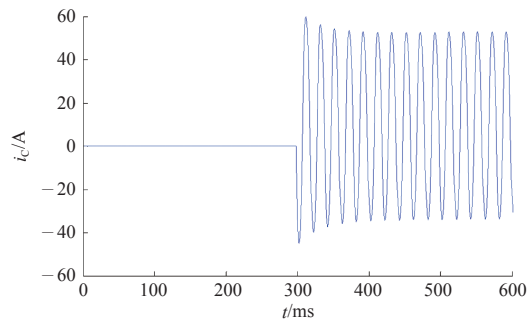


图8 C相匝间短路短路线电流

下表中列出了匝间短路故障、后定子电流、励磁电流中谐波所占比例。定子部分只计及奇数次谐波, 励磁部分计及偶数次谐波。如下表所示, 随着谐波次数增加, 其所占比例减小, 当谐波次数增加到很高时, 几乎可以忽略。

表 谐波比例

定子电流谐波			
谐波次数/次	3	5	7
匝间短路(%)	22.8	7.02	1.09
短路线电流			
谐波次数/次	3	5	7
匝间短路(%)	21.8	4.85	1.09
励磁电流谐波			
谐波次数/次	2	4	6
匝间短路(%)	26.3	6.56	1.02

结束语

多回路法仿真准确度高, 计算方便。运用多回路法仿真了一无阻尼发电机正常情况下及匝间短路下电气特征。仿真表明, 故障支路电流变化明显, 励磁电流振荡性增加, 谐波分量增加。

故障后定子电流中奇数次谐波分量很大, 励

磁电流中除含有直流分量外,还含有偶数次谐波分量。谐波次数越高所占比例越小。

参考文献

- [1] Suni J, Ruppert E, Fajoni F. A guide for synchronous generator parameter determination using dynamic simulations based on IEEE standards [C]. International Conference Electric Machines (ICEM), Rome; IEEE, 2010: 1-6.
- [2] 王成亮,王宏华.同步发电机进相研究综述[J].电力自动化设备,2012(11):131-135.
- [3] 高景德,王祥.交流电机的多回路理论[J].电工技术学报,1987(1):1-8.
- [4] 马庆安,李群湛.基于绕组函数法的直流电机电感参数计算及与有限元法的比较[J].电力自动化设备,2012(1):40-44.
- [5] Subramaniam P, Malik O P. Digital simulation of a synchronous generator in direct-phase quantities [J]. IEEE PROC, 1971, 118(1): 153-160.
- [6] 陈成功.船电系统中同步发电机的建模与仿真研究[D].上海:上海交通大学,2011.
- [7] 梁波,李玉忍,薛梦娇.飞机三级式发电系统建模与仿真[J].计算机仿真,2013(2):71-75.
- [8] 刘世明,尹项根,陈德树.同步发电机内部故障解耦分析法研究[J].电力系统自动化,1998,22(5):26-29.
- [9] Iamamura B A T, Menach Y, Tounzi A. Study of synchronous generator eccentricities using analytical approach and FEM [C]. International Conference Electrical Machines (ICEM), Rome; IEEE, 2010: 1-6.
- [10] Faiz J, Tabatabaei I. Extension of winding function theory for non-uniform air gap in electric machinery [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38: 3654-3657.
- [11] Jiang H, Aggarwal R, Weller G, et al. A new approach to synchronous generator internal fault simulation using combined winding function theory and direct phase quantities [C]. International Conference on Electrical Machines and Drives, Canterbury, UK; IEEE, 1999: 105-111.
- [12] TU XP, Dessaint L A, Fallati N, et al. Modeling and real-time simulation of internal faults in synchronous generators with parallel-connected windings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1400-1409.
- [13] Iamamura B A T, Menach Y, Tounzi A, et al. Study of synchronous generator static eccentricities-FEM results and measurements [C]. International Conference Electrical Machines (ICEM), Marseille, France; IEEE, 2012: 1829-1835.
- [14] 何玉灵,姜源元,柳春成.基于有限元的汽轮发电机转子动特性分析[J].机械,2009(6):14-16.
- [15] 苏毅.凸极同步发电机定子绕组内部故障暂态分析[D].北京:华北电力大学,2002.
- [16] 王祥珩.多支路同步电机无载时定子内部故障的分析方法[J].中国电机工程学报,1987(5):3-13.
- [17] 孙宇光.同步发电机定子绕组内部故障的暂态仿真和保护分析[D].北京:清华大学,2003.
- [18] 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(13):55-60.

(收稿日期:2015-05-22) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告