

考虑饱和效应的汽轮发电机转子 电流和静稳裕量的在线估算

周胡亮, 苏鹏声

(清华大学 电机工程与应用电子系, 北京 100084)

摘要: 发电机和电力系统运行的精确分析要求考虑磁路饱和效应对电机模型的影响。提出了基于原有的发电机线性数学模型, 而发电机参数可以随磁路饱和程度不同而相应变化的分析方法。发电机参数的估计值由最小二乘法辨识得到。将经参数估计值修正后的发电机模型应用于发电机稳态运行的在线分析计算。试验及计算结果表明: 实时估算发电机稳态工况下的转子电流比用线性模型计算提高了精度, 可应用于在线监测转子绕组的动态匝间短路; 也可用于实时估算各个工况的静稳裕量值。

关键词: 汽轮发电机; 参数辨识; 最小二乘法

中图分类号: TM 311

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)07-0021-03

0 引言

发电机稳态运行下可能发生转子绕组动态匝间短路, 但短路在停机后往往消失, 不易检测。如果能根据发电机每个运行状态的基本数据准确计算出该状态下转子电流值, 就有可能在运行时实时判断转子绕组是否发生匝间短路。此外, 发电机稳态工况下的静稳裕量值对于发电机的经济安全运行有着重要的指导作用。基于理想电机假设条件的发电机线性数学模型^[1]在计算发电机以上运行行为时, 精度不高, 难以满足工程应用的需要。

近年来, 随着计算机技术的进步, 系统辨识应用于电机参数求解, 如卡尔曼滤波法^[2]、极大似然法^[3]、遗传算法^[4]、粒子群算法^[5]等, 然而, 系统辨识方法以某特定工况下对参数进行辨识的结果用于各个不同的工况时, 会产生一定的误差。通过有限元计算电机电磁场可以实时地获得发电机各个工况下的参数值^[6,7]。然而, 其计算量太大, 工程中难以在线实时计算。

本文提出了基于稳态同步发电机线性模型结构, 而电机模型参数随运行状态发生变化的分析方法。用这种参数随运行工况变化的同步电机模型反映发电机运行中饱和因素的影响。针对某 200 MW 汽轮发电机实验数据, 得到了不同运行状态的主回路参数, 由此估计相应状态下的同步发电机转子电流和静稳裕量值。在发电机运行数据已经上网的条件下, 该方法可以实时监测发电机的运行状态, 具有较强的实用价值。

1 汽轮发电机稳态线性数学模型

忽略发电机的定子绕组电阻, 汽轮发电机稳态运行时的数学模型可以用如图 1 所示的相量图表示, 数学关系式表达如下^[8]:

$$\begin{aligned} E_{\delta} &= E_f + E_a \\ U &= E_{\delta} - jIX_{\sigma} \\ E_a &= -jIX_{ad} \\ E_f &= I_f M \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $U, E_f, E_a, E_{\delta}, I, I_f$

分别是定子端电压、励磁电势、电枢绕组电势、气隙电势、定子相电流、转子电流; 在不及饱和效应时, 电枢反应电抗 X_{ad} 和互感系数 M 均为常数; X_{σ} 为电机定子漏抗。

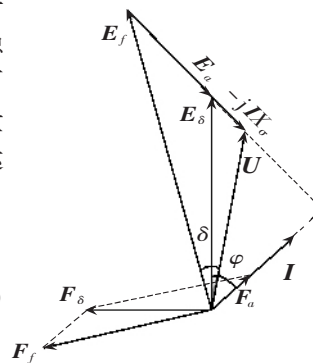


图 1 相量图

Fig.1 The phasor diagram

2 考虑饱和效应下的参数变化

主磁路饱和状况的变化可以归结为同步发电机数学模型中的参数发生了变化, 即式(1)中的 X_{ad} 和 M 发生了变化, 式(1)中的 X_{σ} 不受主磁路饱和的影响。参数 X_{ad} 和 M 的数值首先与气隙合成磁势 F_{δ} (见图 1) 大小有关, 气隙合成磁势 F_{δ} 越大则主磁路越饱和。 F_{δ} 对应气隙电势 E_{δ} , 因此, 电量 E_{δ} 大小可反映主磁路的饱和情况。同时, 应该注意到电枢反应磁势也会影响主磁路的饱和状况, 虽然 F_a (见图 1) 的作用已反映在气隙合成磁势 F_{δ} 之内, 但这是指基波分量, 磁密的谐波分量并未考虑其中, 它们

对主磁路饱和状况的影响是不可忽略的。 F_a 的大小可通过电量定子电流 I 表示。这样可近似将饱和效应的影响因子用气隙电势 E_δ 和定子电流 I 表示。

$$\begin{aligned} X_{ad} &= f_1(E_\delta, I) \\ M &= f_2(E_\delta, I) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)是非线性表达式,可以将它们由泰勒级数展开,忽略高阶项,可以得到线性表达式:

$$\begin{aligned} X_{ad} &= f_1(E_{\delta 0}, I_0) + (E_\delta - E_{\delta 0}) \frac{\partial f_1}{\partial E_\delta} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \\ & (I - I_0) \frac{\partial f_1}{\partial I} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \\ & \frac{1}{2} (E_\delta - E_{\delta 0})^2 \frac{\partial^2 f_1}{\partial E_\delta^2} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \\ & (E_\delta - E_{\delta 0})(I - I_0) \frac{\partial^2 f_1}{\partial E_\delta \partial I} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \\ & \frac{1}{2} (I - I_0)^2 \frac{\partial^2 f_1}{\partial I^2} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \dots \\ M &= f_2(E_{\delta 0}, I_0) + (E_\delta - E_{\delta 0}) \frac{\partial f_2}{\partial E_\delta} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \\ & (I - I_0) \frac{\partial f_2}{\partial I} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \\ & \frac{1}{2} (E_\delta - E_{\delta 0})^2 \frac{\partial^2 f_2}{\partial E_\delta^2} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \\ & (E_\delta - E_{\delta 0})(I - I_0) \frac{\partial^2 f_2}{\partial E_\delta \partial I} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \\ & \frac{1}{2} (I - I_0)^2 \frac{\partial^2 f_2}{\partial I^2} \Big|_{E_\delta=E_{\delta 0}, I=I_0} + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)(3)即为考虑饱和效应的发电机数学模型。

式(3)可以表示为矩阵形式:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{ad} &= [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \dots \quad \mathbf{x}_n]^T \mathbf{A} \\ \mathbf{M} &= [\mathbf{m}_1 \quad \mathbf{m}_2 \quad \dots \quad \mathbf{m}_n]^T \mathbf{A} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $[\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \dots \quad \mathbf{x}_n]^T$, $[\mathbf{m}_1 \quad \mathbf{m}_2 \quad \dots \quad \mathbf{m}_n]^T$ 为表达式中的待定系数向量; $\mathbf{A} = (E_\delta - E_{\delta 0}, I - I_0, \dots)^T$ 为发电机稳态运行时气隙电势和定子电流构成的向量。

以发电机不同工况下定子电压 U_i 、定子电流 I_i 、功率因数 λ ($\lambda = \cos \varphi_i$)、功角 δ_i 、励磁电流 I_{fi} 的数据值,可计算出 $E_{\delta i}$;进而可得各个工况下的参数: X_{adi} , M_i ($i=1, 2, \dots, n$)。根据最小二乘回归分析原理^[9],待定系数向量的残差平方和 Q_{xad} 和 Q_M 为

$$\begin{aligned} Q_{xad} &= \sum_{i=1}^n (X_{adi} - [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \dots \quad \mathbf{x}_n]^T \mathbf{A}_i)^2 \\ Q_M &= \sum_{i=1}^n (M_i - [\mathbf{m}_1 \quad \mathbf{m}_2 \quad \dots \quad \mathbf{m}_n]^T \mathbf{A}_i)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

当式(5)为最小时,即可估计出式(4)中待定系数向量。

3 应用

应用考虑饱和后的汽轮发电机稳态数学模型,

对某台 200 MW 汽轮发电机稳态工况分析计算。

3.1 转子电流实时估算

针对稳态运行工况下发电机有功功率、无功功率、定子电压、定子电流的数据: P_i, Q_i, U_i, I_i ($i=1, 2, \dots, n$),由式(1)(4)可求得转子电流值(见表1)。

表1 转子电流计算结果及对比

Tab.1 The calculated exciting currents compared with measured currents

测量数据					计算结果		
P/MW	Q/Mvar	U/kV	I/A	$\delta/(\circ)$	I_f/A	I_{fs}/A	I_{fu}/A
135.7	168.05	16.24	7 720	22	1 742	1 712	1 805
163.8	149.64	15.89	8 076	28	1 716	1 698	1 754
138.3	95.03	15.50	6 236	30	1 383	1 375	1 402
198.0	134.06	15.62	8 844	34	1 749	1 739	1 786
136.8	2.18	14.41	5 460	48	984	989	1 002
169.2	24.63	14.49	6 812	49	1 210	1 215	1 244
198.3	-35.85	13.44	8 644	70	1 250	1 255	1 224
138.4	-90.41	13.13	7 144	85	814	841	801

注: P, Q 是输出有功、无功功率; U, I 是定子电压、电流; I_f 是转子电流测量值; δ 是电机功角; I_{fs} 是计及饱和下的估计值; I_{fu} 是不计饱和下的计算值。

由表1的结果可知,计及主磁路饱和和效应后发电机各个工况的转子电流估计值与试验所测得的数据大致吻合。而不计及发电机主磁路饱和和效应所得结果对比试验数据有较大误差。因此,计及饱和和效应后的转子电流估计值可以较好地应用于转子绕组动态匝间短路故障的在线监测中。

3.2 静稳裕量的实时估算

为确保发电机运行过程中的稳定性并发挥其最大的经济效益,有必要实时精确获得发电机静稳裕量值。

静稳裕量简单定义如下:

$$K = P_m / P_0 \quad (6)$$

式中 P_m, P_0 为电机稳态工况下极限有功功率和当前稳态工况下输出有功功率。

$$P_m = \frac{3E_f U}{X_d}, \quad P_0 = \frac{3E_f U}{X_d} \sin \delta \quad (7)$$

考虑到发电机的饱和效应,发电机参数 X_{ad} 和 M 随工况而变,在发电机不同运行工况下, E_f, X_d 值均不同,所以, $\delta = 90^\circ$ 不能作为失稳判据。

电机运行手册规定,发电机的极限稳定点指保持该工况的发电机励磁电流不变下(电机端电压亦保持不变),电机运行中所能输出的最大功率。

根据汽轮发电机稳态数学模型(图1)有

$$\begin{aligned} E_\delta^2 - (U \cos \varphi)^2 - (U \sin \varphi + I X_\sigma)^2 &= 0 \\ \frac{I X_d}{\sin \delta} &= \frac{E_f}{\sin(90^\circ + \varphi)} = \frac{U}{\sin(90^\circ - \delta - \varphi)} \end{aligned} \quad (8)$$

由式(4)(6)(7)(8)进行联立迭代求解^[10],直至 $P_{0(\text{后})} < P_{0(\text{前})}$,可估计出极限功角,即可得当前工况下的静稳裕量 K 的估计值。表2为对某型电机静稳裕量估算结果。

表 2 静稳裕量计算结果
Tab.2 The calculated results of
steady-state stability margin

测量数据						计算结果	
P/MW	Q/Mvar	U/kV	I/A	$\delta/(^{\circ})$	I_f/A	K_s	K_u
93.6	180.22	16.365	7 236	15	1 609	3.666	3.618 6
102.2	-4.67	14.325	4 136	43	805	1.425	1.403 9
135.7	168.05	16.245	7 720	22	1 742	2.528	2.497 0
135.5	24.63	14.705	5 400	30	1 064	1.453	1.437 8
163.8	149.64	15.890	8 076	28	1 716	2.127	2.007 2
168.4	77.32	15.130	7 060	37	1 410	1.659	1.546 2
198.0	134.06	15.624	8 844	34	1 749	1.683	1.669 9
197.6	93.53	15.205	8 280	40	1 583	1.490	1.479 8

注:P,Q,U,I, δ 同表 1; K_s 是计及饱和下的估计值; K_u 是不计饱和下的计算值。

由表 2 可知,对比不计及饱和下的发电机静稳裕量值,计及饱和效应后的静稳裕量结果较大,有利于扩大发电机的稳定运行区域,进一步发掘发电机运行的潜力;根据估算的静稳裕量值,可以实时把握发电机当前的运行状态。

4 结论

本文采用汽轮发电机稳态数学模型中参数随运行状态变化的方法考虑饱和对发电机稳态运行的影响。试验及计算结果表明,实时估算发电机稳态工况下的转子电流达到了满意的精度,可应用于在线监测转子绕组的动态匝间短路;此外,还可以实时估算出各个工况的静稳裕量值,有利于发电机的经济安全运行。

参考文献:

[1] 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,1993.
[2] 米增强,陈志忠,南志远. 同步发电机动态参数辨识[J]. 中国电机工程学报,1998,18(2):100-105.

MI Zeng-qiang,CHEN Zhi-zhong,NAN Zhi-yuan. Dynamic parameter identification of synchronous machines[J]. **Proceedings of the CSEE**,1998,18(2):100-105.
[3] KARAYAKA H B,KEYHANI A. Identification of armature,field,and saturated parameters of a large steam turbine-generator from operating data[J]. **IEEE Trans. on Energy Conversion**,2000,15(2):181-187.
[4] PILLAY P,NOLAN R,HAQUE T. Application of genetic algorithms to motor parameter determination for transient torque calculations[J]. **IEEE Trans. on Industry Application**,1997,33(5):1273-1282.
[5] 胡家声,郭创新,曹一家. 基于扩展粒子群优化算法的同步发电机参数辨识[J]. 电力系统自动化,2004,28(6):35-40. HU Jia-sheng,GUO Chuang-xin,CAO Yi-jia. Generator parameter identification based on extended particle swarm optimization method[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2004,28(6):35-40.
[6] SCHULZ R P,FARMER R G. Benefit assessment of finite-element based generator saturation model[J]. **IEEE T-PWRS**,1987,2(4):1027-1033.
[7] ARJONA L M A,MACDONALD D C. Saturation effects on the steady-state stability limit of turbine-generators[J]. **IEEE Trans. on Energy Conversion**,1999,14(2):133-138.
[8] 李发海,陈汤铭,郑逢时. 电机学[M]. 北京:科学技术出版社,1995.
[9] 夏天长. 系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1983.
[10] 李庆扬,关治,白峰杉. 数值计算原理[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

周胡亮(1981-),男,江西吉安人,硕士研究生,从事同步电机运行及监测方面的研究(E-mail:zh102@mails.tsinghua.edu.cn);
苏鹏声(1946-),男,四川成都人,教授,主要从事电机在线监测和保护。

On-line estimation of exciting current and steady-state stability margin
of steam turbine-generator with saturation effects

ZHOU Hu-liang,SU Peng-sheng
(Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: The accurate analysis of a synchronous machine performance and the associated electrical power system requires the proper representation of the iron saturation in the machine model. A new machine model based on the linear synchronous machine model is presented,in which the machine parameters adapt to the variation of the saturation level and their estimated values are obtained by using the least square method. The modified machine model is applied to on-line analysis of a steam turbine-generator's steady-state operation. The experimental and calculated results show that the generator exciting current in steady state obtained by the on-line estimation is more precise than that by the linear model calculation,and can be used in both the on-line supervision of rotor's turn-to-turn short circuit and the real-time estimation of steady-state stability margin in different conditions.

Key words: steam turbine-generator; parameter identification; least square method