

汽轮发电机动态数学模型参数辨识

王红宇¹, 郭志忠^{1,2}, 周逢权²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京许继电气公司, 北京 100084)

摘要: 针对发电机主保护的切机时间越来越短、故障录波器记录的故障数据越来越少的问题, 提出了一套新的参数辨识方法, 并给出了详细的推导过程。此方法的特点是根据故障后一个周波以内的定子三相电流、电压波形以及励磁绕组电流、电压波形辨识出发电机动态数学模型的参数。对一台 300 MW 汽轮发电机三相突然短路的数值仿真结果进行了参数辨识, 辨识出的所有参数的误差都小于 5%, 证明了该方法的正确性。

关键词: 汽轮发电机; 数学模型; 参数辨识

中图分类号: TM311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)12-0015-04

1 引言

随着现代电力系统的容量及网络规模的迅速发展, 现已形成了包含不同机型、不同容量、不同网络层次的大型电力系统。虽然电力系统的经济效益大大提高了, 但影响安全、可靠运行的因素却越来越多。其中发电机的动态参数准确与否, 直接关系到系统运行的稳定性。电网的故障计算, 同步电机电压波形, 冲击电压计算和励磁系统设计等也都需要准确的瞬态参数。运行部门往往只以典型设计参数或静止的和离线的测量参数为依据, 而这些参数由于饱和原因, 有时严重偏离设计值, 致使系统稳定性计算误差很大, 满足不了运行分析及控制的要求。

目前, 针对同步发电机参数辨识的研究比较活跃, 主要研究方法有: 混沌优化法^[1]、对数方法^[2]、遗传算法^[3]、自适应参数辨识^[4]、最小二乘法^[8,14]、修正扩展卡尔曼滤波法^[9]、分段线性多项式函数法、频响拟合法^[10]等。

本文针对发电机主保护的切机时间越来越短, 故障录波器记录的故障数据越来越少的问题提出了一种新的参数辨识方法, 下面给出了其推导过程。

2 参数辨识数学模型的建立

2.1 汽轮发电机动态数学模型

汽轮发电机动态数学模型及其状态方程如下:

$$\dot{I} = AI + BU \quad (1)$$

式中: $A = -(R + G)^{-1}$; $B = X^{-1}$

$$I = [i_d, i_q, I_{fd}, I_{1d}, I_{1q}]$$

$i_d, i_q, I_{fd}, I_{1d}, I_{1q}$ 分别为定子 d、q 轴绕组, 励磁绕组, 转子 d、q 轴阻尼绕组电流; ω 为角频率。

$$U = [u_d, u_q, U_{fd}, U_{1d}, U_{1q}]$$

$u_d, u_q, U_{fd}, U_{1d}, U_{1q}$ 分别为定子 d、q 轴绕组, 励磁绕组, 转子 d、q 轴阻尼绕组电压。对于阻尼绕组有: $U_{1d} = U_{1q} = 0$

$$X = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & -x_q & 0 & 0 & x_{aq} \\ -x_{ad} & 0 & X_{ffd} & X_{fd1d} & 0 \\ -x_{ad} & 0 & X_{fd1d} & X_{11d} & 0 \\ 0 & -x_{aq} & 0 & 0 & X_{11q} \end{bmatrix}$$

x_d, x_q 分别为定子 d、q 轴绕组自电抗; x_{ad}, x_{aq} 分别为 d、q 轴电枢反应电抗; X_{ffd} 为励磁绕组自电抗; X_{fd1d}, X_{fd1d} 分别为励磁绕组与 d 轴阻尼绕组、d 轴阻尼绕组与励磁绕组互电抗; X_{11d}, X_{11q} 分别为阻尼绕组 d、q 轴绕组自电抗。

$$R = \begin{bmatrix} -r & & & & \\ & -r & & & \\ & & R_{fd} & & \\ & & & R_{1d} & \\ & & & & R_{1q} \end{bmatrix}$$

$r, R_{fd}, R_{1d}, R_{1q}$ 分别为定子绕组、励磁绕组、d、q 轴阻尼绕组电阻。

$$G = \begin{bmatrix} 0 & x_q & 0 & 0 & -x_{aq} \\ -x_d & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由式(1)可得:

$$XI + (R + G)I = U \quad (2)$$

2.2 对于汽轮发电机稳态时的参数辨识

当稳态时, $\dot{I} = 0$, 则有:

$$(R + G)I = U \quad (3)$$

即

$$\begin{bmatrix} -r & x_q & 0 & 0 & -x_{aq} \\ -x_d & -r & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{ld} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{lq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ I_{fd} \\ I_{ld} \\ I_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ U_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

又因 $I_{ld} = I_{lq} = 0$, 可得

$$\begin{cases} -\dot{n}_d + x_q \dot{i}_q = u_d \\ -x_d \dot{i}_d - \dot{n}_q + x_{ad} I_{fd} = u_q \\ R_{fd} I_{fd} = U_{fd} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: i_d 、 i_q 和 u_d 、 u_q 分别由可测量 i_a 、 i_b 、 i_c 和 u_a 、 u_b 、 u_c 经坐标变换得到; I_{fd} 和 U_{fd} 为可测量。这样,励磁绕组电阻即可得到

$$R_{fd} = U_{fd} / I_{fd} \quad (6)$$

而式(5)中 r 、 x_d 、 x_q 、 x_{ad} 为未知数。四个未知数,两个方程,不够求解条件,就必须有两个不同的稳定状态的电流、电压值。设为 $(i_d, i_q, I_{fd}, u_d, u_q)$; $(i_d, i_q, I_{fd}, u_d, u_q)$, 即可得到四个方程:

$$\begin{cases} -\dot{n}_d + x_q \dot{i}_q = u_d \\ -x_d \dot{i}_d - \dot{n}_q + x_{ad} I_{fd} = u_q \\ -\dot{n}_d + x_q \dot{i}_q = u_d \\ -x_d \dot{i}_d - \dot{n}_q + x_{ad} I_{fd} = u_q \end{cases} \quad (7)$$

这样,四个未知数四个方程,可解。写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} -\dot{i}_d & 0 & i_q & 0 \\ -\dot{i}_q & -\dot{i}_d & 0 & I_{fd} \\ -\dot{i}_d & 0 & i_q & 0 \\ -\dot{i}_q & -\dot{i}_d & 0 & I_{fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ x_d \\ x_q \\ x_{ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过求解式(8)即可解出: r 、 x_d 、 x_q 、 x_{ad} 等四个未知量。

2.3 汽轮发电机动态时的参数辨识

由汽轮发电机状态方程,见式(1)即

$$\begin{bmatrix} -x_d & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & -x_q & 0 & 0 & x_{aq} \\ -x_{ad} & 0 & X_{ffd} & X_{fld} & 0 \\ -x_{ad} & 0 & X_{lfd} & X_{lld} & 0 \\ 0 & -x_{aq} & 0 & 0 & X_{llq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{I}_{fd} \\ \dot{I}_{ld} \\ \dot{I}_{lq} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -r & x_q & 0 & 0 & -x_{aq} \\ -x_d & -r & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{lld} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{llq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ I_{fd} \\ I_{ld} \\ I_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ U_{fd} \\ U_{ld} \\ U_{lq} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中, r 、 x_d 、 x_q 、 $x_{ad} = x_{aq}$ (对于隐极发电机)已由稳态工况(两种不同稳定运行工况)求得。

对于 i 和 I 以及 U 中的量,只有 \dot{i}_d 、 \dot{i}_q 、 \dot{I}_{fd} 和 \dot{I}_{lq} 为不可测量,其余均为可测量(已知量)。而对于参数来讲, X_{ffd} 、 $X_{fld} = X_{lfd}$ 、 X_{lld} 、 X_{llq} 、 R_{lld} 、 R_{llq} 等转子参数为未知(待求量),将式(9)展开得:

$$-x_d \dot{i}_d + x_{ad} \dot{I}_{fd} + x_{ad} \dot{I}_{ld} - \dot{n}_d + x_q \dot{i}_q - x_{aq} I_{lq} = u_d \quad (10)$$

$$-x_q \dot{i}_q + x_{aq} \dot{I}_{lq} - x_d \dot{i}_d - \dot{n}_q + x_{ad} I_{fd} + x_{aq} I_{ld} = u_q \quad (11)$$

$$-x_{ad} \dot{i}_d + X_{ffd} \dot{I}_{fd} + X_{fld} \dot{I}_{ld} + R_{fd} I_{fd} = U_{fd} \quad (12)$$

$$-x_{ad} \dot{i}_d + X_{lfd} \dot{I}_{fd} + X_{lld} \dot{I}_{ld} + R_{lld} I_{ld} = 0 \quad (13)$$

$$-x_{aq} \dot{i}_q + X_{llq} \dot{I}_{lq} + R_{llq} I_{lq} = 0 \quad (14)$$

对于式(10)和式(11)而言:只有 I_{ld} 、 \dot{I}_{ld} 、 I_{lq} 和 \dot{I}_{lq} 为未知量; r 、 x_d 、 x_q 、 $x_{ad} = x_{aq}$ 为已知量; i_d 、 i_q 、 I_{fd} 、 u_d 、 u_q 和 U_{fd} 均为可测量或由可测量经坐标变换得到。 \dot{i}_d 、 \dot{i}_q 、 \dot{I}_{fd} 可通过对 i_d 、 i_q 、 I_{fd} 进行数值微分得到,本文采用第一类边界条件的三次样条插值来进行数值微分。

若设

$$A(t) = x_d \dot{i}_d - x_{ad} \dot{I}_{fd} + \dot{n}_d - x_q \dot{i}_q + u_d \quad (15)$$

$$B(t) = x_q \dot{i}_q + x_d \dot{i}_d + \dot{n}_q - x_{ad} I_{fd} + u_q \quad (16)$$

则式(10)和式(11)可变为:

$$x_{ad} \dot{I}_{ld} = x_{aq} I_{lq} + A(t) \quad (17)$$

$$x_{aq} \dot{I}_{lq} = -x_{ad} I_{ld} + B(t) \quad (18)$$

写成矩阵形式,且对于隐极发电机(汽轮发电机)有 $x_{ad} = x_{aq}$, 则

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ld} \\ \dot{I}_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ - \quad 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ld} \\ I_{lq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A(t)/x_{ad} \\ B(t)/x_{ad} \end{bmatrix} \quad (19)$$

由于稳定运行状态的 I_{ld} 、 I_{lq} 都为零,那么对于瞬态而言, I_{ld} 、 I_{lq} 的初值就为零。并且 $A(t)$ 、 $B(t)$ 的每一时刻的值均可由计算得到,则上述状态方程式(19)可通过常微分方程的数值解法求得。

在求得 I_{ld} 、 I_{lq} 的每一时刻的数值后,对于式(12)、(13)、(14)而言,有 X_{ffd} 、 $X_{fld} = X_{lfd}$ 、 X_{lld} 、 X_{llq} 、 R_{lld} 、 R_{llq} 等六个未知数。但只有三个方程,理论上

讲对于瞬态过程中的任意两个不同状态就可构成六个方程。如, t_1 时刻的 $(\dot{I}_{fd}, \dot{I}_{fd}, I_{fd}, I_{fd}, \dot{i}_d, \dot{i}_q, \dot{I}_{fd}, I_{fd}, U_{fd})$; t_2 时刻的 $(\dot{I}_{fd}^*, \dot{I}_{fd}^*, I_{fd}^*, I_{fd}^*, \dot{i}_d^*, \dot{i}_q^*, \dot{I}_{fd}^*, I_{fd}^*, U_{fd}^*)$ 。

$$\begin{cases} -x_{ad} \dot{i}_d + X_{ffd} \dot{I}_{fd} + X_{f1d} \dot{I}_{fd} + R_{fd} I_{fd} = U_{fd} \\ -x_{ad} \dot{i}_d + X_{ffd} \dot{I}_{fd} + X_{11d} \dot{I}_{fd} + R_{11d} I_{fd} = 0 \\ -x_{aq} \dot{i}_q + X_{11q} \dot{I}_{1q} + R_{11q} I_{1q} = 0 \\ -x_{ad} \dot{i}_d^* + X_{ffd} \dot{I}_{fd}^* + X_{f1d} \dot{I}_{fd}^* + R_{fd} I_{fd}^* = U_{fd}^* \\ -x_{ad} \dot{i}_d^* + X_{ffd} \dot{I}_{fd}^* + X_{11d} \dot{I}_{fd}^* + R_{11d} I_{fd}^* = 0 \\ -x_{aq} \dot{i}_q^* + X_{11q} \dot{I}_{1q}^* + R_{11q} I_{1q}^* = 0 \end{cases} \quad (20)$$

写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{fd} & \dot{I}_{fd} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{I}_{fd} & \dot{I}_{fd} & 0 & I_{fd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{I}_{1q} & 0 & I_{1q} \\ \dot{I}_{fd}^* & \dot{I}_{fd}^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{I}_{fd}^* & \dot{I}_{fd}^* & 0 & I_{fd}^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{I}_{1q}^* & 0 & I_{1q}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ffd} \\ X_{f1d} \\ X_{11d} \\ X_{11q} \\ R_{11d} \\ R_{11q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{fd} + x_{ad} \dot{i}_d - R_{fd} I_{fd} \\ x_{ad} \dot{i}_d \\ x_{ad} \dot{i}_q \\ U_{fd}^* + x_{ad} \dot{i}_d^* - R_{fd} I_{fd}^* \\ x_{ad} \dot{i}_d^* \\ x_{ad} \dot{i}_q^* \end{bmatrix} \quad (21)$$

由式(21)的六个方程就可解出 X_{ffd} 、 $X_{f1d} = X_{1fd}$ 、 X_{11d} 、 X_{11q} 、 R_{11d} 、 R_{11q} 等六个未知数。但应注意式(21)的系数矩阵的确定问题:对于一些不同瞬态状态所形成的系数矩阵可能是病态矩阵,本文采用对系数矩阵的条件数加以约束来避免解的失真。这样,汽轮发电机(隐极发电机)的动态参数,即 Park 方程的所有参数均已解出。

3 仿真结果与理论分析

本文针对一台 300 MW 汽轮发电机进行了数值仿真计算。根据实际数字故障录波器录波情况,对仿真结果中的定子三相电压 u_a 、 u_b 、 u_c ,定子三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c ,励磁电压 U_{fd} ,励磁电流 I_{fd} 等八个可量测量进行辨识。由于本文是针对仿真结果进行的,也就排除了测量误差的影响,从而验证本文所提辨识方法的理论正确性、有效性。

稳态时,两种稳态工况分别为:有功功率标么值

分别为 $P = 1.0$, $P = 0.95$,功率因数 \cos 均为 0.85。参数辨识结果如表 1。

表 1 稳态时参数辨识结果

Tab. 1 Result of parameter identification in steady state

参数名	设定值 (标么值)	辨识值 (标么值)	理论误差 (%)
x_d	1.836	1.835938	0.0034
x_q	1.836	1.836038	0.0021
$x_{ad} = x_{aq}$	1.719	1.718973	0.0016
r	0.0011	0.001113747	1.25
R_{fd}	0.00286	0.00286	0

瞬态时,以发电机定子三相突然短路为例来进行数值仿真,对仿真结果:定子三相电流、电压以及励磁绕组电流、电压进行参数辨识。参数辨识结果如表 2。

表 2 瞬态时参数辨识结果

Tab. 2 Result of parameter identification in dynamic state

参数名	设定值 (标么值)	辨识值 (标么值)	理论误差 (%)
X_{ffd}	1.8	1.823748	1.32
$X_{f1d} = X_{1fd}$	1.7273	1.74696	1.14
X_{11d}	1.756	1.768122	0.69
X_{11q}	1.756	1.808725	3.00
R_{11d}	0.0683	0.065890	3.53
R_{11q}	0.0683	0.068182	0.17

从表 1 辨识结果可以看出,稳态时辨识出的 x_d 、 x_q 、 $x_{ad} = x_{aq}$ 等参数理论误差都非常小,可小于千分之五。由于定子电阻与定子电抗的比值很小,所以定子电阻的理论误差要大一些,但定子电阻 r 的理论误差也小于 1.5%。也就是说,本辨识模型可以很精确地辨识出上述四个定子参数。而这四个参数又是瞬态辨识的基础,它们的准确辨识保证了进一步瞬态辨识得以进行。从表 2 辨识结果可以看出,瞬态时辨识出来的 X_{ffd} 、 $X_{f1d} = X_{1fd}$ 、 X_{11d} 、 X_{11q} 、 R_{11d} 、 R_{11q} 等参数理论误差都小于 5%。这样,辨识出的所有参数的理论误差都小于 5%,满足工程需要,说明本文提出的辨识方法在理论上是可行的、有效的。

4 结论

本文针对发电机主保护的切机时间越来越短,故障录波器记录的故障数据越来越少的的问题,进行了理论推导和分析,主要结论如下:

(1) 提出了一种新的参数辨识方法,给出了详细的推导过程。此方法的特点是可根据故障后一个周波以内的定子三相电流、电压波形以及励磁绕组电流、电压波形辨识出发电机动态数学模型参数。由于本文所提方法只需一个周波以内的故障数据,而不象其它方法那样要几个周波的故障数据才能辨识参数。这就大大提高了该方法的适应性。

(2) 通过对一台 300 MW 汽轮发电机进行三相突然短路数值仿真,应用本文所提方法针对仿真结果进行了参数辨识。辨识出的所有参数的理论误差都小于 5%,说明了参数辨识结果的准确性。由于本文是对数值仿真结果进行参数辨识,所以排除了测量误差和外界干扰。因此,从理论上证明了本文所提参数辨识方法的正确性。

参考文献:

- [1] 唐巍,郭镇明,李殿璞.混沌优化用于电力系统静态负荷模型参数辨识[J].电力系统自动化,2000,24(13):27-30.
- [2] 马宏忠,胡虔生,方瑞明.同步电机瞬变参数的测量[J].电力系统及其自动化学报,2000,12(2):8-12.
- [3] 黄开胜,董怀,郑泰胜,等.遗传算法在异步电动机动态模型参数识别中的应用[J].中国电机工程学报,2000,20(8):37-41.
- [4] 赵争鸣,郑逢时.同步电机非线性参数的自适应辨识方法[J].电工技术学报,1994,9(2):1-5.
- [5] 郑逢时,赵争鸣.用最小二乘辨识方法测取水轮发电机参数[J].电工技术学报,1994,9(3):1-4.
- [6] 赵争鸣,郑逢时.同步电机模型的模型条件和参数偏差分析[J].电工技术学报,1992,(4):31-34.
- [7] 吴硕麟.电力变压器的数学模型和参数决定[J].电工技术学报,1990,(2):24-28.
- [8] 黄进.同步电机 Park 模型参数的识别[J].中国电机工程学报,1990,10(增刊):86-91.
- [9] 米增强,陈志忠,南志远,等.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.
- [10] 朱守真,沈善德,焦连伟,等.建立大型同步发电机组励磁系统动态参数[J].中国电机工程学报,1997,17(3):179-183.
- [11] Jintar Ma, Hogg B W, Nan Zhiyuan, et al. Online Decoupled Identification of Transient and Subtransient Generator Parameters[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1994, 9(4): 1908-1914.
- [12] GB/T 1029-93. 三相同步电机实验方法[S].
- [13] Richard E Fairbairn, Ronald G Harley. Online Measurement of Synchronous Machine Parameters[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1992, 28(3): 639-645.
- [14] Merchant R W, Gbbarn M J. Identification of Synchronous Machine Parameters from Standstill Tests Using Recursive Estimation with the Bilinear Operator[J]. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1992, 139(2): 157-165.
- [15] Anton Boelt, Klaus Frohlich. Two New Methods for Very Fast Type Detection by Means of Parameter Fitting and Artificial Neural Networks[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(4): 1269-1275.
- [16] 陈超英,贺家李.电力系统仿真中消除非原型振荡的一种新方法—龙库-梯法[J].中国电机工程学报,1995,15(3):210-216.
- [17] Alvarado F L, Lasseter R H, Sanchez J J. Testing of Trapezoidal Integration with Damping for the Solution of Power Transient Problem[J]. IEEE Trans. on PAS, 1983, 102(2): 1262-1268.
- [18] 倪以信.电力系统故障暂态全过程数字仿真[D].北京:清华大学工学博士学位论文,1983.

收稿日期: 2001-10-23

作者简介:

王红宇(1971-),男,硕士研究生,从事电力系统自动化及参数辨识方面的研究;

郭志忠(1961-),男,教授,博士生导师,从事电力系统自动化、稳定控制、能量管理等方面的研究;

周逢权(1969-),男,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化等方面的研究。

Parameter identification of dynamical mathematic model of steam-turbine generator

WANG Hong-yu¹, GUO Zhi-zhong¹, ZHOU Feng-quan²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Beijing Xuji Electric Company, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents a novel method of parameter identification and gives its detailed process of derivation in order to solve the difficulty of identification due to less and less data of recording of digital fault recorder caused by shorter and shorter time of generator's main protection. The characteristic of this method is that parameters of dynamic mathematic model of generator can be identified by using the data of three-phase stator windings' and field winding's currents and voltages within only one cycle. The parameters were identified from the data of numerical simulation of the three-phase sudden short-circuit of 300MW steam-turbine generator. The result of parameter identification verifies the accuracy of this method.

Key words: steam-turbine generator; mathematic model; parameter identification