

基于电网扰动PMU数据的同步发电机参数辨识方法

同步发电机参数的准确性关系到电力系统分析计算的正确与否。首先利用电网扰动下PMU的实测数据,将发电机与励磁控制器及电力网络进行解耦;然后将同步发电机参数的辨识问题等效为一个动态输入输出系统的优化问题;最后利用遗传算法对发电机参数进行辨识。基于实际电网的仿真结果验证了该方法的有效性。

张俊利 潘莹/国网上海市电力公司市南供电公司



张俊利/助理工程师

同步发电机的行为和运行情况与发电机电抗参数紧密相关,电抗参数的准确性关系到电网的安全稳定运行^[1, 2]。目前,进行电力系统分析计算所采用的同步电抗大多是厂家提供的设计值或理论值,由于这两种值不能计及磁滞、饱和及涡流等实际运行工况的影响,所得到的结果常常和实际工况不符^[3]。为此,国家电网公司明确指出要加强四大参数(发电机、励磁、调速器和负荷)以及相关电力系统元件的建模和参数辨识工作。

同步发电机参数的辨识方法可以分为两种:频域辨识方法和时域辨识方法。频域辨识方法于20世纪50年代就已被应用,其具体实施方法主要有三种:静态频域法(SSFR)、在线频域法(OLFR)和直流衰减法。频域辨识方法的测试原理是将一定频带的扰动信号施加到被测系统上,然后将此扰动信号下的频率响应录取下来,利用动态拟合程序在计算机上求取传递函数,并且进一步得到同步发电机的参数^[4]。频域辨识方法已经比较成熟,算法的稳定性比较高,而且具有一定的滤波能力。

但是此方法对于施加在被测系统上扰动信号的波形、幅值大小以及其相关性要求都比较严格;其次,频域辨识方法难以将发电机动态过程中本身的扰动作为输入信号;再者,频域分析建立在线性系统的基础上,且发电机动态过程中参数呈非线性变化的这一特点无法反映出来^[5]。

时域辨识法提出于20世纪70年代后期,其基本原理是给被测系统施加一个扰动信号,然后录取它的动态时间响应,再利用时间域辨识方法在计算机上估计发电机时间模型的参数。由于时域辨识方法针对的是发电机的实用导出参数,采用了发电机高阶导出模型,所以此方法对发电机的非线性问题能够比较好地进行描述,并且能计及发电机在运行过程中实际工况的影响。此方法经过不断改进,能够得到较为直观的结果,这一领域的相关研究已经取得了很多成果。

目前,对于同步发电机的参数辨识多是采用离线辨识方法,即使是在线辨识,也多是利用励磁系统参考电压的变化来人为施加扰动(如阶跃扰动、白噪声扰动)^[6-9]。直接利用电网扰动下的实际数据进行同步发电机参数辨识则至今鲜见报道。

另一方面,相量测量单元(PMU)的出现为在线辨识同步发电机参数提供了全新而有力的工具。针对PMU平台的应用研究在国内外已经广泛地开展^[10-12],其中在线参数辨识的研究工作逐渐得到

关键词/Keywords

同步发电机 ·
参数辨识 ·
遗传算法 ·
PMU ·

关注。当电力系统中发生断线、短路、负荷突变及运行方式改变时，PMU装置通过广域量测系统（WAMS）提供关于这台发电机的某些状态量的响应，如机端的电压、电流、有功、无功、频率、相角、内电动势和功角等信息。利用这些信息可以辨识同步发电机的参数，且采用的信号来自于系统扰动，无须人为进行试验，这不仅大大地节省人力物力，而且具有较高的可信度^[13]。

近年来，国内外的学者陆续提出了许多同步发电机参数的辨识算法，如最小二乘法、进化规划算法和扩展卡尔曼滤波法等。其中，最小二乘法的目标函数是测量结果与辨识结果的偏差二次方和，经过估算可以得到一个在最小方差意义上和试验数据拟合最好的数学模型。这种方法的目标函数简单明了，但是主要有两方面缺点：一是对测量噪声非常敏感；二是它采用的局部搜索法在梯度方向上进行寻优，很容易陷入局部最优解，最终导致不能得到全局最优解。进化规划算法的不足主要表现在收敛性差，而且施加大干扰的情况下辨识的有效性难以满足要求。进化规划算法对辨识过程中参数的初始值设定要求比较高，当发电机设计值和实际值的偏离比较大时，难以搜索到准确值^[14]。扩展卡尔曼滤波法适合应用于有噪声干扰的系统中，但该方法的缺点是计算量非常大。

鉴于此，本文研究采用电网扰动下的PMU数据进行同步发电机参数在线辨识的方法。即采用PMU实测扰动数据将发电机与励磁控制器及电力网络解耦，使发电机参数辨识问题等效成为一个简化后的输入输出系统优化问题，最后用遗传算法对重点参数进行逐一优化。

数学描述

这一部分的主要工作是对同步发电机参数的辨识问题进行相关数学描述。首先，给出了发电机参数辨识的整体描述；然后，利用PMU实测数据将发电机与励磁控制器及电力网络解耦，得到发电机输入输出系统模型；最后，给出了发电机参数辨识的实用模型。

1. 同步发电机参数辨识的整体描述

数学上，发电机可以描述为

$$\begin{aligned}\dot{x}_{iG} &= f_1(x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha) \\ \dot{x}_{iGa} &= f_2(x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha) \\ 0 &= g(x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha)\end{aligned}\quad (1)$$

式中， x_{iG} 为需辨识的同步发电机的状态变量； x_{iGa} 为其他的状态变量； y 为系统中的代数变量； α 为需要辨识的参数。

发电机参数辨识的目的就是根据获得的测量量 $\hat{z}(t) = z(t; x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha)$ 和理论值 $z(t) = z(t; x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha)$ 的差异，直接获得参数 α 。该问题可以表示为

$$\begin{aligned}\min_{\alpha} J_0(\alpha) &= \int_0^T \|z(t) - \hat{z}(t)\|^2 dt \\ \text{s. t. } \dot{x}_{iG} &= f_1(x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha) \\ \dot{x}_{iGa} &= f_2(x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha) \\ 0 &= g(x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha) \\ z(t) &= z(t; x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha)\end{aligned}\quad (2)$$

其中，辨识中测量量 $\hat{z}(t) = z(t; x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha)$ 的选择范围很大，可以选择本地的信号，也可以选择远方的信号。发电机参数辨识对应的整体模型维数很高，这将造成辨识消耗的时间过大。鉴于此，下面采用解耦方案。

2. 同步发电机参数辨识的解耦数学描述

发电机本体与其控制系统及电力系统的关系如图1所示。

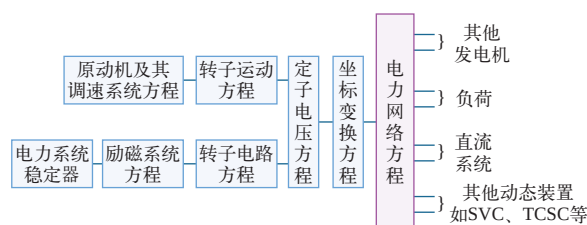


图1 含励磁的闭环电力系统

利用发电机机端的PMU测量量将发电机与电网解耦，其模型如图2所示。

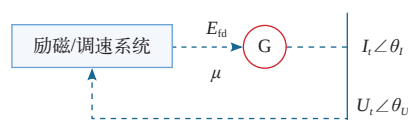


图2 发电机和电网系统解耦后的模型

进一步地利用PMU获得的发电机励磁电压、出口电压、电流和原动机输出电压,将励磁系统与发电机解耦,解耦之后的系统模型如图3所示。

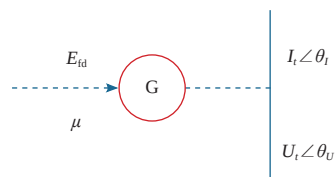


图3 发电机的解耦系统模型

利用发电机机端的PMU测量量,将发电机与电网解耦;利用励磁系统的输出电压,将发电机与励磁系统解耦。经上述解耦,发电机成为一个输入输出系统,如图4所示。

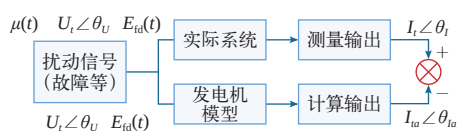


图4 发电机系统的输入输出描述

在解耦下,发电机可以描述为

$$\dot{x}_{iG} = f_1(t, x_{iG}(t), x_{iGa}(t), y(t), \alpha) \quad (3)$$

式中, $x_{iGa}(t)$ 、 $y(t)$ 可由测量直接获得。

基于解耦的发电机参数辨识可描述为

$$\begin{aligned} \min_{\alpha} J_0(\alpha) &= \int_0^T \|z(t) - \hat{z}(t)\|^2 dt \\ \text{s. t. } \dot{x}_{iG} &= f(t, x_{iG}(t), x_{iGa}(t), y(t), \alpha) \\ \hat{z}(t) &= z(t; x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

和整体模型相比,此模型无须考虑其他发电机的动态情况,只须测量和待辨识机组相关联的状态量即可。对于任一同步发电机来讲,只须测量发电机的出口电压、出口电流及励磁电压,即可将发电机与励磁系统和电网解耦,这将使计算量大幅度下降。解耦之后辨识过程中测量量 $\hat{z}(t) = z(t; x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha)$ 的选择范围变小,其变量的选择只与接口电压、电流有关。目前,普遍采用的方法是通过测量发电机出口电流获得辨识结果。

3. 同步发电机实用模型

解耦后的发电机参数辨识一般采用发电机d、q

轴电流作为参考的标准量。对应于发电机五阶实用模型,其输入是发电机端口电压和励磁电流,输出是发电机d、q轴电流。考虑到测量点的不连续性,该解耦的参数辨识问题可用优化问题近似^[15]为

$$\begin{aligned} \min_{\alpha} J_0(\alpha) &= \sum_{i=1}^K [I_i^m(t_i) - I_i(\alpha, t_i)]^2 \\ \text{s. t. } \alpha_i &\in [\alpha_i^{\min}, \alpha_i^{\max}] \\ \dot{x}_{iG} &= f_1(t, x_{iG}(t), x_{iGa}(t), y(t), \alpha) \\ \hat{z}(t) &= z(t; x_{iG}, x_{iGa}, y, \alpha) \\ S_i(\alpha) &\leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, α 为待辨识参数; t_i 为采样时刻; K 为采样点总数; $I_i^m(t_i)$ 为在 t_i 时刻实际测量所获得的发电机出口电流; $I_i(\alpha, t_i)$ 为实用模型在参数为 α 时,计算所得的出口电流。

该优化问题的系统目标函数是利用最小二乘法获得的不同参数下系统响应的偏差,极小化实际数据和辨识数据的差别。其中,参数满足上下界约束 $\alpha_i \in [\alpha_i^{\min}, \alpha_i^{\max}]$ 及其他特殊约束 $S_i(\alpha) \leq S_i^{\max}$ 。

遗传算法

遗传算法(GA)是一种随机优化概率搜索算法,它基于自然遗传学原理,适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂问题和非线性问题。通过群体搜索策略,遗传算法使群体中个体间的信息进行相互交换,对个体构成群体的学习能力进行模拟。如图5所示,遗传算法从任意一个初始化的群体出发,经过选择、交叉和变异等遗传操作,使群体逐代优化,最后收敛到一个“最适应环境”的个体。选择通常采用比例选择,即选择概率正比于个体的适配值,意味着适配值高的个体在下一代中复制自身的概率大,从而提高种群的平均适配值;交叉是通过将两父代个体的部分信息进行交换从而构成后代个体,使后代继承父代的有效模式,进而有助于产生优良的个体;变异通过将个体中的某些基因随机改变而产生新的个体,有利于增加种群的多样性,从而避免早熟收敛的现象。

GA具有并行性、全局性、较好的适应性及鲁棒性,已经在电力系统各领域得到广泛的应用。

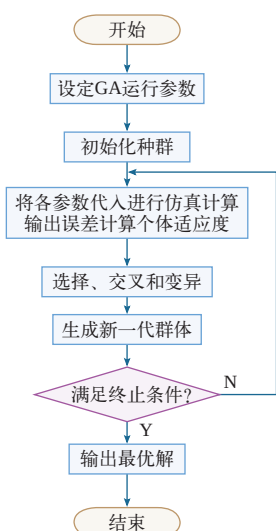


图5 遗传算法参数辨识流程

仿真结果

BPA同步发电机的五阶实用模型能够计及励磁绕组，阻尼 D 、 Q 绕组的作用及转子动态，并且忽略了定子 d 、 q 绕组的暂态，即定子电压方程中 $p\Psi_d = p\Psi_q = 0$ 。BPA同步发电机五阶模型的方程描述如下

$$\begin{aligned} T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} &= E_{fd} - [E_q' + (x_d - x_d')I_d + (K_G - 1)E_q'] \\ T_{d0}'' \frac{dE_q''}{dt} &= -E_q'' - (x_d' - x_d'')I_d + E_q' + T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} \\ T_{q0}'' \frac{dE_d''}{dt} &= -E_d'' + (x_q - x_q'')I_q \\ T_J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{P_T}{\omega} - (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) - D(\omega - \overline{\omega_0}) - 2\pi f_0 \\ \frac{d\delta}{dt} &= (\omega - 1)2\pi f_0 \\ u_q &= E_q'' - x_d'' I_d \\ u_d &= E_d'' + x_q'' I_q \end{aligned} \quad (6)$$

式中，参数 x_q 、 x_q'' 、 T_{q0}'' 、 x_d 、 x_d' 、 x_d'' 、 T_{d0}' 和 T_{d0}'' 为需要辨识的参数。

利用PMU测得发电机的功角 δ 、内电动势 E_q 、机端电压 U 和机端电流 I ，可以分别得出 d 、 q 轴的电压 u_d 、 u_q 和电流 I_d 、 I_q ，从而发电机 d 、 q 轴电气参数可以分开进行辨识。其中：

d 轴电气方程

$$\begin{aligned} T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} &= E_{fd} - [E_q' + (x_d - x_d')I_d + (K_G - 1)E_q'] \\ T_{d0}'' \frac{dE_q''}{dt} &= -E_q'' - (x_d' - x_d'')I_d + E_q' + T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} \\ u_d &= E_d'' + x_q'' I_q \end{aligned} \quad (7)$$

q 轴电气方程

$$\begin{aligned} T_{q0}'' \frac{dE_d''}{dt} &= -E_d'' + (x_q - x_q'')I_q \\ u_q &= E_q'' - x_d'' I_d \end{aligned} \quad (8)$$

利用PMU的实测数据，采用遗传算法，通过辨识可以得到同步发电机的各个参数，下表为发电机各个参数的辨识结果。

表 同步发电机参数辨识结果

参数	辨识值 (pu)	设计值 (pu)	偏差 (%)
x_d	1.771	1.882	-0.058 6
x_d'	0.264	0.301	-0.123 1
x_d''	0.262	0.223	0.175 4
T_{d0}'	9.477	8.61	0.100 8
T_{d0}''	0.054 6	0.045	0.214 6
x_q	1.626	1.774	-0.067 4
x_q''	0.310 5	0.380 6	-0.184 1
T_{q0}''	0.035 6	0.029 6	0.203 2

由表可知，稳态参数的辨识准确度比较高，由于同步发电机参数的动态特性，其辨识所得到的暂态和次暂态参数不够平稳。这其中的影响因素较多，可能是由于实用模型是在一定的假设简化下得出，参数辨识时忽略了定子电阻以及暂态和次暂态时间比较短等因素造成的。

图6和图7分别为计算得到的 $I_d(I_q)$ 与实测的 $I_d(I_q)$ 的拟合情况。

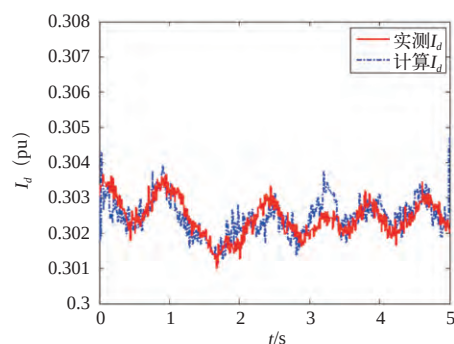
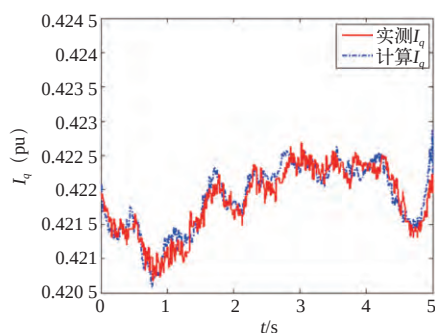


图6 d 轴动态响应曲线

图7 q 轴动态响应曲线

由图6、图7可以看出,基于同步发电机五阶实用模型的参数辨识曲线拟合得较好。所以,本文所提出的同步发电机参数辨识方法是可行的。

结束语

本文基于BPA同步发电机五阶实用模型,利用PMU的实测动态数据对同步发电机参数进行在线辨识。同时将遗传算法引入到同步发电机参数辨识的问题中。仿真结果表明,利用PMU的实测数据对解耦后的同步发电机单独进行辨识,同时采用遗传算法,不但解决了非线性辨识问题,同时也可有效地提高辨识的准确度。

参考文献

- [1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统理论和方法[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [2] Kundur P. Power system stability and control [M]. McGraw-Hill Inc, 1994.
- [3] 陈建,吴文传,张伯明. 一种基于轨迹灵敏度的发电机参数抗差估计法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (23): 21-24.
- [4] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科

学出版社,2010.

- [5] 胡光之. 电机电磁场的分析与计算[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [6] 孙黎霞,高运华,甄威,等. 考虑饱和效应的同步发电机参数辨识[J]. 河海大学学报,2008, 36 (3) .
- [7] 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.
- [8] 周济. 同步发电机不同运行条件下多因素饱和效应研究[D]. 北京:华北电力大学,2000.
- [9] 岳陈熙. 基于GPS-PMU的同步发电机参数辨识研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [10] Thorp J S, Phadke A G, Horowitz S H, et al. Some applications of phasor measurements to adaptive protection [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3 (2): 791-798.
- [11] Chih-Wen Liu, James S. Thorp. New methods for computing power system dynamic response for Real-Time transient stability prediction [J]. Transactions on circuits and system, 2000, 47 (3): 324-337.
- [12] 王茂海,鲍捷,齐霞,等. 基于PMU实测数据的输电线路参数在线估计方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (1): 25-27.
- [13] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [14] 黄其新,孙黎霞,甄威,等. 同步发电机参数辨识的蚁群算法及扰动分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (11): 50-53.
- [15] 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.

(收稿日期:2014-08-08) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告