

考虑饱和效应的同步发电机参数辨识

孙黎霞¹,高运华¹,甄威²,刘柏私²,吴磊¹,鞠平¹

(1.河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098;2.四川电力试验研究院,四川 成都 610051)

摘要 针对传统分析方法对同步发电机的运行分析都基于其线性化模型的问题,以考虑磁路饱和效应的同步电机模型为研究对象,将一种新的优化方法——蚁群算法应用于同步发电机参数辨识,并给出了参数辨识算法的详细步骤.仿真算例表明,使用考虑饱和效应的同步发电机模型能有效地提高辨识精度.

关键词 同步发电机 饱和效应 参数辨识 蚁群算法

中图分类号 :TM31 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2008)03-0401-04

饱和效应是同步发电机运行的一个重要现象.传统分析方法对同步发电机的运行分析都基于其线性化模型.实际上,在设计同步发电机时,通常使额定电压时的磁通量位于磁化曲线开始弯曲的部分^[1].如果取额定电压时的磁通量在直线部分,则说明磁路不饱和,此时铁心没有得到充分利用,不经济.同时,励磁电流稍有变化,就会引起电势和端电压的较大变动.另一方面,如果电机的额定工况工作在磁路过于饱和之处,要得到额定电压就需要较多的励磁磁势,这样用铜量以及电机的铜耗都将增加,也不经济.故同步发电机在额定运行点都有一定程度的饱和^[2].当发电机运行水平超过一定的门槛值时,饱和效应将导致发电机电抗变小.发电机的饱和程度越深,发电机电抗减少越明显^[3].文献[4]指出:对于水轮发电机,饱和后的 X_d 和 X_q 比非饱和值减少 25% 左右;对于汽轮发电机,则将减少 15% ~ 25%.在过电压及强励磁等非正常工况下,饱和程度会大大增加.因此,为了更准确地对同步发电机参数进行辨识,本文采用电力系统综合分析程序中考虑磁路饱和的五阶同步发电机模型.

在进行同步发电机参数辨识时,除了需要准确的同步发电机模型外,还需要高效的算法.同步发电机的参数辨识过程是一个参数寻优的过程,其目的是使发电机在辨识值下输出预报值与实际输出值最接近.近年来,国内外提出了许多同步发电机参数的辨识算法^[5-7],如最小二乘法、扩展卡尔曼滤波法、进化规划算法等.本文在发电机带负载运行时,对励磁系统施加阶跃干扰,仿真出发电机电压、电流以及发电机功角的暂态响应,采用蚁群算法辨识发电机的电气参数.

1 同步发电机模型

本文采用国内常用的电力系统综合分析程序(PSASP)五阶发电机模型,其方程式如下:

a. d 轴电气模型

$$\begin{cases} T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_f - [E'_q - (X_d - X'_d) I_d + (K_G - 1) E'_q] \\ T''_{d0} \frac{dE''_q}{dt} = - E''_q - (X'_d - X''_d) I_d + E'_q + T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} \\ u_q = E''_q - X''_d i_d \end{cases} \quad (1)$$

其中 $E_f = ku_f$ 为励磁电流在定子绕组中产生的电势,饱和系数

$$K_G = 1 + \frac{b}{a} E_q'^{(n-1)} \quad (2)$$

b. q 轴电气模型

$$\begin{cases} T_{q0}'' \frac{dE_d''}{dt} = -E_d'' + (X_q - X_q'') I_q \\ u_d = E_d'' + X_q'' i_q \end{cases} \quad (3)$$

式中各变量和参数的含义参见文献[6]。

对于同步发电机中的磁饱和问题,PSASP用如下的幂函数关系描述饱和特性曲线^[8]:

$$I_f = aE_q' + bE_q'^n \quad (4)$$

式中 a, b, n 的参数值可根据实际饱和曲线用拟合方法求出。本文提出了这3个参数的简便计算方法:首先,根据不饱和曲线 I_f 和 E_q' 关系是线性的($I_f(0) = aE_q'$),可知不饱和曲线的斜率即为参数 a 。然后,把求得的参数 a 和饱和曲线上取的2个典型值^[9]($I_f = 1.0, 1.2$ 除时间 t 外,模型中参数均采用无因次分析)代入式(4),即可求出 b 与 n 。有了 a, b, n 后,即可求出饱和系数 K_G 。虽然式(4)仅描述了空载情况,但通常假设带负荷时的饱和效应和空载的一样,所以从式(1)可以看出,PSASP中考虑饱和效应相当于对励磁电压 E_f 进行部分抵消,当 $K_G = 1$ 时,式(1)即为常见的不考虑饱和的同步发电机模型。

从式(2)知饱和系数是 E_q' 的函数,而 E_q' 又是 K_G 的函数,故在解方程时要进行交替迭代。首先,由饱和曲线和 E_q' 的初值求出 K_G ,再用 K_G 代入式(1)求出新的 E_q' ,然后再用这个 E_q' 的新值求新的 K_G ,依此类推,即可得出饱和情况下的电动势。

2 同步发电机参数辨识中的蚁群算法

蚁群算法是一种基于种群的启发式搜索算法,它充分利用了蚁群能够搜索从蚁穴至食物间最短路径的集体寻优特征,以及该过程与旅行商问题(TSP)之间的相似性,模拟了真正的蚂蚁行为。真正的蚂蚁能够在没有任何视觉线索的情况下找到从食物源到蚁穴的最短路径,并且能够适应环境的改变,比如在旧的路径上放置一障碍物,此时蚂蚁能够很快找到一条新的最短路径。生物学家的研究揭示了蚂蚁的这种能力是借助于一种叫做“信息素”的物质,蚂蚁个体利用该物质进行信息交流从而决定选择哪一条路径。蚂蚁在运动过程中,能够在它经过的路径上沉淀一定的“信息素”,而且蚂蚁在运动过程中能够感知这种物质的存在及其强度,并以此指导自己的运动方向,蚂蚁倾向于朝着该物质强度高的方向移动。因此,由大量蚂蚁组成的蚁群的集体行为便表现出一种信息正反馈现象:某一路径经过的蚂蚁越多,则后来者选择该路径的概率越大。蚂蚁个体之间就是通过这种信息的交流来搜索食物的。

以优化为基础的非线性系统的参数辨识方法其主要过程是寻找1组最优的参数向量 Z ,使预定的误差目标函数 $E(Z)$ 值达到最小。在同步发电机参数辨识中,目标函数为:对于 d 轴参数辨识,目标函数为 d 轴电流的误差平方和函数;对于 q 轴参数辨识,目标函数为 q 轴电流的误差平方和函数;对于机械参数辨识,则为功角 δ 的误差平方和函数。

对于同步发电机五阶模型, d 轴同时辨识6个参数($X_d, X_d', X_d'', T_{d0}', T_{d0}'', K$),其中 K 是 d 轴电枢反应电抗 X_{ad} 与励磁绕组电阻 r_f 的比值。 q 轴辨识3个参数(X_q, X_q'', T_{q0}')^[10],考虑饱和效应的同步发电机蚁群算法具体步骤^[11]如下:

- 根据发电机手册上的空载饱和曲线,用文中所述的方法求出饱和系数 K_G 的参数 a, b, n 。
- 将蚁群在解空间内按照一定方式作初始分布(推荐采用均匀分布)。这里要根据问题定义域的大小,即被辨识系统参数的可能范围的大小,决定合适的蚁群规模。一般推荐的蚁群规模为 N^m 个, m 为同时需辨识参数的个数。这样就相当于把整个问题空间分成了 N^m 个子空间,每个单蚁就处于每个子空间的中心,定义此时各子空间内的单蚁个数为1。这样实际上就是每一轴代表1个参数,每一个参数的定义域被分成了 N 个区间,每个区间内有 N^{m-1} 个单蚁,这也就是各区间内实际蚂蚁的数量。
- 根据蚁群所处解空间位置的优劣,决定蚁群的信息量分布。经过第1步就已经把待辨识的参数分成了 N^m 组,1只单蚁就代表1组参数,这样就可以把每组参数和饱和系数 K_G 代入同步发电机综合稳定计算模型中,用龙格-库塔法求解微分方程,计算出每一点的 d 轴电流值和 q 轴电流值,把这些计算出的电流值与测量值相比较,得到相应的误差,即目标函数,此误差应是 k 组由辨识出来的参数值计算出来的电流与测量出的电流的误差平方和。这样每一组参数就对应1个误差值,如果此误差值较大的话,说明此组参数不是最优,误差小的话,此组参数则较优。现在就是要通过蚁群的移动来在问题空间内寻找1组最优的参数。定义1个与各单蚁当前所处解空间位置相关的信息量分布函数

$$W_i = \frac{M_i e^{-q_i \sqrt{(A-A_i)^2 + (B-B_i)^2}}}{(1 + e^{-q_i \sqrt{(A-A_i)^2 + (B-B_i)^2}})^2}$$

(5)

q_i 为根据实际问题所定义的压缩系数,须根据实验确定, M_i 表示其峰值,其定义要与各单蚁当前所处的解空间位置 (A_i, B_i) 的优劣相关,这里取目标函数的倒数: $M_i = 1/E(Z)$,其中 $E(Z)$ 为上面所说的误差函数.显然,当某一单蚁所对应的 1 组参数与真值越接近,其取值就越大.

d. 求出各轴子区间内应有的蚁数分布. 首先将当前蚁群散布的信息量分布函数总合在各轴子区间内进行积分,根据此积分值占整个问题空间内的总积分值的比例和当前的蚁群规模决定各轴子区间内应有的蚁群数量.

e. 根据各子区间内应有的蚁数分布状况和当前蚁数分布状况之间的差别,决定蚁群的移动方向,并加以移动. 首先分别求出各子区间及其左右的应有蚁数和实际蚁数,然后根据被考察之蚁所处子区间及其左右的应有蚁数和实际蚁数之间的差别,决定该蚁的运动方向,并改变该组蚁群的坐标值.

在蚁群做完一次整体移动之后,又可回到第 2 步,进行相应的初始分布、信息量分布,考察蚁群移动操作,如此循环往复,当目标函数的误差小于设定的某个值时,迭代收敛,得出最优解.

3 仿真算例

仿真系统如图 1 所示.

表 1 中的参数真值来源于四川某台水轮发电机的手册. 在 $t = 0.1\text{ s}$ 时发电机励磁电压升高 10%, 利用 PSASP 五阶考虑饱和的同步发电机模型仿真得到发电机出口电压、电流以及发电机励磁电压、转速、功角的变化数据. 利用这些数据作为发电机的实测数据,分别对考虑饱和与不考虑饱和效应的同步发电机模型进行辨识.

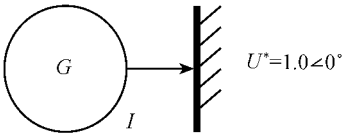


图 1 单机-无穷大系统

Fig.1 The single-machine infinite-bus system

表 1 同步发电机参数辨识结果

Table 1 The identification results of synchronous generator parameters

结果类型	X_d		X'_d		X''_d		T'_{d0}		T''_{d0}	
	值	误差/%	值	误差/%	值	误差/%	值	误差/%	值	误差/%
真 值	0.992		0.257		0.201		8.770		0.140	
饱和模型辨识结果	0.910	- 8.241	0.250	- 2.507	0.230	14.563	8.242	- 6.020	0.125	- 10.594
非饱和模型辨识结果	0.814	- 17.926	0.183	- 28.614	0.234	16.708	9.473	8.017	0.118	- 15.155

结果类型	K		X_q		X''_q		T''_{q0}	
	值	误差/%	值	误差/%	值	误差/%	值	误差/%
真 值	2301.2		0.608		0.24		0.3	
饱和模型辨识结果	2216.0	- 3.702	0.608	0.0	0.24	0.0	0.3	0.0
非饱和模型辨识结果	1859.7	- 19.184	0.608	0.0	0.24	0.0	0.3	0.0

发电机的空载饱和特性如图 2 所示. 用本文所述方法求出此台同步发电机饱和系数的参数为 $a = 0.9258$, $b = 0.0791, n = 8.0417$.

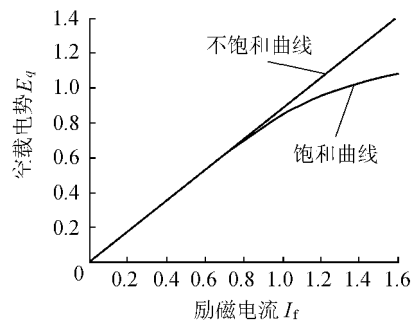
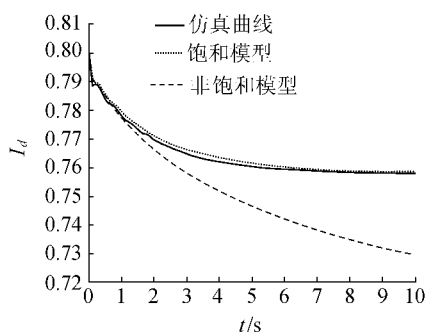
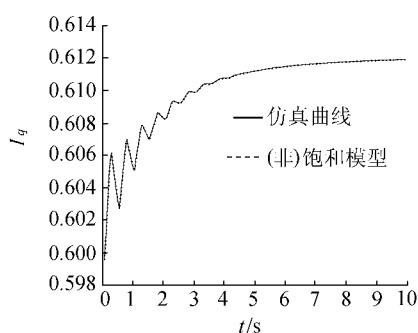


图 2 同步发电机空载饱和特性曲线
Fig.2 Open-circuit saturation characteristic curve of synchronous generator

表 1 是对考虑饱和与不考虑饱和的同步电机模型进行参数辨识得出的结果. 由于水轮机 q 轴气隙比 d 轴气隙大得多,对于 q 轴一般不考虑饱和情况,所以本文饱和与非饱和模型的 q 轴辨识结果是一样的. 由于暂态和次暂态时间比较短,所以暂态和次暂态的电气参数的辨识误差也相应地会大一点. q 轴电气参数的辨识误差小于 d 轴参数,主要原因可能是 d 轴辨识参数的个数比 q 轴多. 图 3 和图 4 分别是 d 轴和 q 轴辨识所得参数仿真曲线与实际仿真曲线的比较. 由图 3 可以看出,考虑发电机饱和模型的拟合曲线要比采用线性化模型的拟合曲线更加精确.

从仿真结果可以看出,蚁群算法具有全局收敛性好、计算精度高等优点,辨识出的参数与真实参数很接近,精度能满足工程要求. 由饱

图3 d 轴动态响应曲线Fig.3 The d -axis dynamic response curve图4 q 轴动态响应曲线Fig.4 The q -axis dynamic response curve

和模型辨识出的参数比由非饱和模型辨识出的参数更加精确,计算出的曲线也更加拟合仿真曲线,因此采用考虑饱和效应的同步发电机进行参数辨识和仿真更加准确和可靠.

4 结 语

本文以 PSASP 中考虑饱和的同步发电机模型为研究对象,将一种新的优化方法——蚁群算法应用于同步发电机参数辨识,并比较了同步发电机饱和模型和不考虑饱和效应的模型之间的差别.仿真计算结果表明,对考虑饱和效应的同步发电机模型进行辨识具有更高的精度,将蚁群算法应用于同步发电机参数辨识是有效的.

参考文献:

- [1] 李发海,陈汤铭,郑逢时,等.电机学[M].北京:科学技术出版社,1995:287-339.
- [2] 周济.同步发电机不同运行条件下多因素饱和效应的研究[D].北京:华北电力大学,2001.
- [3] KYRIAKIDES E, THOMAS G, VITTALL V. Online parameter estimation of round rotor synchronous generators including magnetic saturation[J]. IEEE T-EC, 2005, 9(3): 529-537.
- [4] DANDENO P L. Current usage and suggested practices in power system stability simulations for synchronous machine[J]. IEEE T-EC, 1986, 1(1): 77-93.
- [5] 沈善德.电力系统辨识[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [6] 鞠平.电力系统非线性辨识[M].南京:河海大学出版社,1999.
- [7] 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.
- [8] PSASP 电力系统综合分析程序暂态稳定手册[K].北京:电力科学研究院,1993.
- [9] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [10] 黄其新.基于功角测量的同步发电机参数辨识方法与应用研究[D].南京:河海大学,2007.
- [11] 汪镭,吴后迪.蚁群算法在系统辨识中的应用[J].自动化学报,2003,29(1):102-109.

Identification of synchronous generator parameters including magnetic saturation

SUN Li-xia¹, GAO Yun-hua¹, ZHEN Wei², LIU Bai-si², WU Lei¹, JU Ping¹

(1. College of Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Sichuan Electric Power Test and Research Institute, Chengdu 610051, China)

Abstract: Unlike the linear model used in traditional research on synchronous generators, a model including the effect of magnetic saturation was introduced. The ant colony algorithm was incorporated into the model to identify synchronous generator parameters and its process is presented in detail. A case study indicates that the new model can efficiently improve the precision of the parameters.

Key words: synchronous generator; saturation effect; parameter identification; ant colony algorithm