

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.018

电力系统动态等值中励磁系统参数聚合方法对比研究

闻丹银 孙黎霞 黄桦 鞠平

(河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心 江苏 南京 210098)

摘要 : 为了减少计算量 ,提高分析速度 ,对励磁系统进行动态等值时 ,可采用统一的降阶标准传递函数作为等值励磁系统模型 .分别使用加权平均法、离散时间最小二乘法和分段线性多项式函数 (PLPF)法确定了等值励磁系统模型的参数 ,并将遗传算法引入等值励磁系统模型的参数辨识 .重点对比了几种励磁系统聚合方法 ,归纳出各种方法的差异及优缺点 .仿真算例表明 ,离散时间最小二乘法性能较好 .

关键词 : 励磁系统 ;动态等值 ;离散时间最小二乘法 ;分段线性多项式函数法 ;遗传算法

中图分类号 : TM744 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1000-1980(2012)03-0350-07

Comparative studies on methods for parameter aggregation of excitation system for power system dynamic equivalent

WEN Dan-yin , SUN Li-xia , HUANG Hua , JU Ping

(*Research Center for Renewable Energy Generation Engineering , Ministry of Education , Hohai University , Nanjing 210098 , China*)

Abstract : In order to reduce the calculating time and to improve the analytical speed in an electric power system , the dynamic equivalence technique can be used in the excitation system with the uniform standard transfer function in a low order . The parameters of the equivalent excitation system were determined using the weighted average method , the method of least squares (LS) in discrete time domain , and the piecewise linear polynomial function (PLPF) method . The genetic algorithm was used for parameter identification . Different methods for aggregation of the excitation system were compared , and their differences and advantages , as well as their disadvantages were summarized . A case study indicates that , in general , the method of least squares in discrete time domain has good performance .

Key words : excitation system ; dynamic equivalent ; least squares in discrete time domain ; piecewise linear polynomial function ; genetic algorithm

随着电网规模的扩大、发电机组电压等级和单机容量的不断提高 ,电力系统已逐渐进入大电网、高电压和大机组时代 .在电力系统的规划和运行中 ,需要进行大量的仿真计算 ,如果按照详细的电力系统模型进行仿真 ,计算量将非常大 ,对在线分析和控制也会造成沉重的负担 .

实际上 ,对于一个庞大的电力系统 ,通常只需对其中某个区域进行详细研究 ,而与此区域联系较弱的其他区域 ,可适当降阶简化^[1] .这种在分析中保持研究系统拓扑结构和参数不变 ,根据一定原则对外部系统进行简化的过程称为动态等值 .动态等值可以极大地简化大规模电力系统 ,从而大大减少仿真的计算量 .国内外学者已在该领域取得很多进展^[1-10] .

动态等值中一个重要的环节是同调发电机群励磁系统的聚合 ,通常使用传递函数作为等值励磁系统模型 .获取其参数的方法有 :加权平均法、离散时间最小二乘法和分段线性多项式函数 (PLPF)法 .加权平均法只能用于模型结构相同的同调发电机群 ,离散时间最小二乘法需要经过变换才能得到连续传递函数 ,PLPF

法在计算过程中可能出现矩阵奇异.

遗传算法已被成功应用于单台发电机励磁系统的参数辨识^[11]. 本文将遗传算法引入等值励磁系统模型参数辨识,重点对几种励磁系统聚合方法进行对比.

1 等值励磁系统的聚合模型

经推导可知^[11],等值励磁系统的聚合传递函数 $G_{E\Sigma}(s)$ 并不是各台发电机励磁系统传递函数 $G_{Ej}(s)$ 的代数和,而是要分别乘以一个加权因子 $W_j(s)$ 后再求和,即:

$$G_{E\Sigma}(s) = \sum_j W_j(s) G_{Ej}(s) \tag{1}$$

由此求得的聚合传递函数 $G_{E\Sigma}(s)$ 的阶次往往很高,如果直接在实际工程中使用,将面临一些困难. 因此,有必要对 $G_{E\Sigma}(s)$ 进行降阶,将其简化为低阶的标准传递函数,并尽量使简化前后具有相同的输入、输出特性.

采用分子三阶、分母三阶的标准传递函数 $G_{3-3}(s)$ 进行分析,即:

$$G_{3-3}(s) = \frac{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \tag{2}$$

式中: a_i, b_i ——传递函数分子和分母的系数; s ——复变量.

2 聚合参数辨识方法

2.1 加权平均法

等值参数按下式进行计算:

$$X_G = \frac{\sum_{\forall i \in G} S_i X_i}{\sum_{\forall i \in G} S_i}$$

式中: X_i, X_G ——等值前和等值后的各参数值; S_i ——等值前各同调发电机的容量.

该方法在保证精度的条件下,节省了计算时间,但要求等值前后的励磁系统具有相同的模型结构.

2.2 离散时间最小二乘法

考虑一线性非时变的离散型单输入-单输出系统,在计及测量误差时,可表示为

$$y(k) = - \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^m b_i u(k-i) + e(k) \tag{3}$$

再引入下列向量和矩阵:

$$\begin{aligned} Y &= [y(n+1) \ y(n+2) \ \dots \ y(n+N)]^T \\ e &= [e(n+1) \ e(n+2) \ \dots \ e(n+N)]^T \\ \theta &= [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_m]^T \\ \Phi &= \begin{bmatrix} -y(n) & \dots & -y(1) & u(m+1) & \dots & u(1) \\ -y(n+1) & \dots & -y(2) & u(m+2) & \dots & u(2) \\ \dots & & & \dots & & \\ -y(n+N-1) & \dots & & u(m+N) & \dots & u(N) \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

用上述向量和矩阵可以写出向量方程 $Y = \Phi \theta + e$, 当其中 Y 和 Φ 已知时,就可以引用最小二乘公式来估计参数向量 θ . 经推导可知,最优解为 $\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y$. 式中各变量及参数的含义以及详细推导过程见文献[7].

该方法获得的是等值后离散传递函数的参数,需经过变换,才能得到相应的连续传递函数,且在变换过程中,传递函数的阶次可能发生变化.

2.3 分段线性多项式函数(PLPF)法

假设待辨识系统为一单输入-单输出系统:

$$\frac{d^n}{dt^n} y(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y(t) + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m}{dt^m} u(t) + b_{m-1} \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} u(t) + \dots + b_0 u(t) \tag{4}$$

在零初始条件下,对式(4)求 n 重积分,可得

$$y(t) + a_{n-1} \int_0^t y(t) dt + \dots + a_0 \int_0^t \dots \int_0^t y(t) dt^n = b_m \int_0^t \dots \int_0^t u(t) dt^{n-m} + \dots + b_0 \int_0^t \dots \int_0^t u(t) dt^n \quad (5)$$

式(5)相当于对式(4)各阶导数项进行逐次积分,如果设法求出输入信号 $u(t)$ 和输出信号 $y(t)$ 的多重积分,就可以估计模型参数 a_i 和 b_i 。采用PLPF法解决积分问题后,可以直接引用离散时间最小二乘法来估计模型参数。式中各变量及参数的含义以及推导过程见文献[7]。

该方法直接从时域采集信号,无需进行FFT变换,而且辨识精度相对较高,但是运算过程中可能出现矩阵奇异而导致结果不准确。

2.4 遗传算法

Matlab7.0中含有一个专用的遗传算法与直接搜索工具箱(GADS)[12],通过编写目标函数,然后调用该工具箱可以有效处理优化问题。以误差函数的平方和作为目标函数,即:

$$F = \sum_{i=1}^N (Y_i - y_i)^2 \quad (6)$$

式中: F ——目标函数值; N ——采样点数; Y_i, y_i ——原聚合传递函数模型和标准传递函数模型的输出。

调用遗传算法与直接搜索工具箱进行聚合参数辨识的具体步骤如下:(a)根据各单元间电气距离对发电机进行分群,计算同调发电机群中各发电机的权系数。(b)按照式(1)计算同调发电机群中励磁系统的聚合传递函数 $G_{E\Sigma}(s)$ 。(c)在Matlab中的Simulink平台下搭建原聚合传递函数模型,对其施加一定的阶跃扰动,计算时域动态响应曲线,获得输出 Y_i 。然后给标准传递函数模型作用相同的激励,用龙格-库塔法计算相应的输出 y_i ,即可根据式(6)编写目标函数。(d)调用GADS工具箱,即可求得标准传递函数中待辨识的参数。为了使辨识结果更精确,可在此基础上,给各待辨识参数设置更准确的取值范围,再调用GADS工具箱进行辨识。(e)取目标函数值最小、效果最好的一组结果,即为所得最优解。

该方法能有效克服传统方法的一些劣势,但容易早熟,且总耗时较长。

3 算例分析

3.1 算例系统

以IEEE推荐的10机39节点系统为例,其系统结构如图1所示。将10号机作为参考机,将1、8、9号机作为研究系统,其余为外部系统。将外部系统分为3个同调发电机群:2、3号机为同调发电机群C1;4、6、7号机为同调发电机群C2;5号机为孤岛[13]。

设同调发电机群C1中的2、3号机对应的励磁系统模型相同,均为IEEE推荐模型中的DC1A模型[13],其模型传递函数框图如图2所示,各参数值如表1所示。

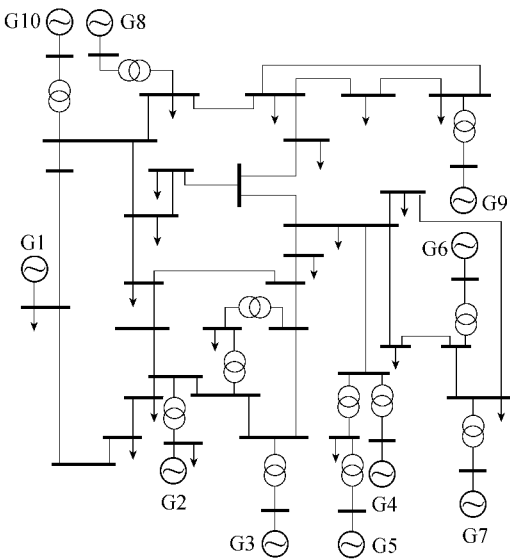


图1 IEEE-39节点系统
Fig. 1 IEEE-39 bus system scheme

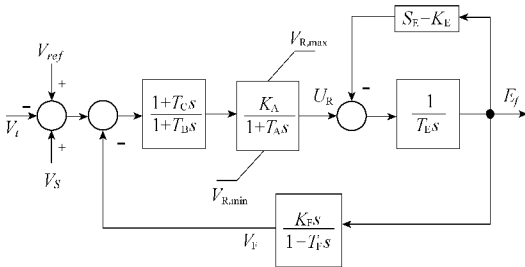


图2 2号机和3号机的励磁系统模型
Fig. 2 Excitation system model of G2 and G3

表1 2号机和3号机对应的励磁系统参数值
Table 1 Parameters of G2 and G3 excitation systems

编号	T_B	T_C	K_A	T_A	T_E	K_E	S_E	K_F	T_F	$V_{R\ max}$	$V_{R\ min}$
2	0.00	0.00	60.00	0.05	0.41	0.63	0.66	0.06	0.50	5.00	-5.00
3	0.00	0.00	50.00	0.06	0.50	0.80	0.13	0.08	1.00	5.00	-5.00

设同调发电机群 C2 中的 4、6、7 号机对应的励磁系统模型不同,其模型传递函数框图如图 3 所示^[13-14]。

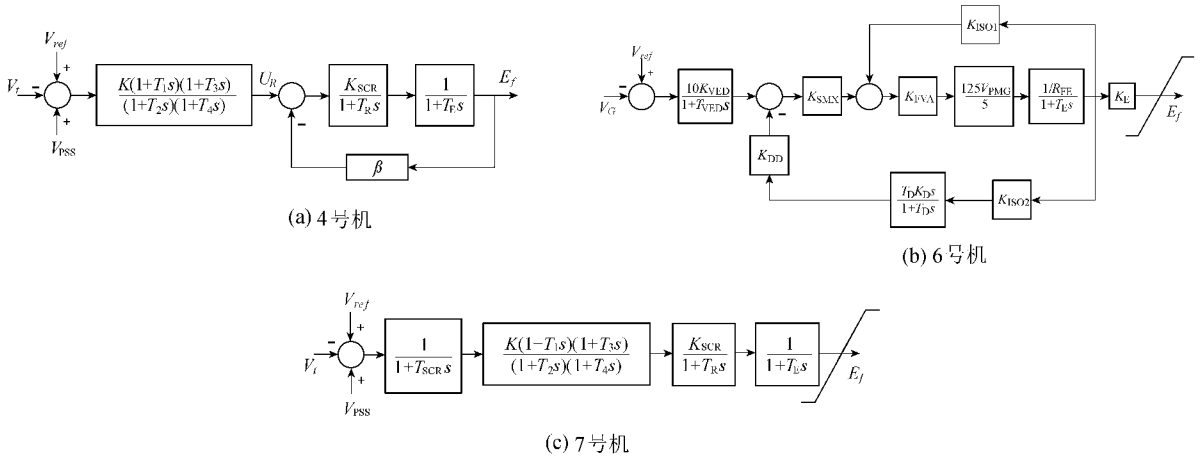


图 3 同调发电机群 C2 的励磁系统模型

Fig. 3 Excitation system model of C2

其中 4 号机的参数为 : $K=15.3$, $T_1=0.5$, $T_2=9.4$, $T_3=0.24$, $T_4=0.05$, $K_{SCR}=40$, $T_E=0.05$, $T_R=0.01$, $\beta=0.05$. 6 号机的参数为 : $10K_{VED}=3.7$, $T_{VED}=0.01$, $K_{SMX}=4$, $25K_{VFA} V_{PMG}=162.45$, $\frac{1}{R_{FE}}=1.28$, $T_E=1.56$, $K_E=6.286$, $K_{ISO1}=0.067$, $K_{DD}=0.2$, $K_D=4.2$, $T_D=1$, $K_{ISO2}=0.058$. 7 号机的参数为 : $K=15$, $T_1=1$, $T_2=21$, $T_3=0.5$, $T_4=0.05$, $K_{SCR}=40$, $T_E=0.02$, $T_R=0.01$, $T_{SCR}=0.03$.

3.2 同调发电机群 C1 的聚合

设 2、3 号机对应的励磁系统传递函数分别为 $G_2(s)$ 和 $G_3(s)$, 则对应励磁系统的聚合传递函数为

$$G_{\sum 2,3}(s)=G_2(s)W_2(s)+G_3(s)W_3(s) \tag{7}$$

经计算得

$$G_{\sum 2,3}(s)=\frac{6.097s^6+153.3s^5+2311s^4+6046s^3+5939s^2+2368s+289.8}{0.001384s^8+0.06387s^7+1.662s^6+21.37s^5+149.8s^4+239.6s^3+145.6s^2+35.39s+2.873}$$

3.2.1 加权平均法

由于 2、3 号机的励磁系统模型结构一致,故可使用加权平均法,求得相应的传递函数为

$$G_{W2,3}(s)=\frac{2146s+2784}{s^3+21.73s^2+267.2s+55.85}$$

3.2.2 离散时间最小二乘法

使用离散时间最小二乘法对式(2)中参数进行辨识,求得传递函数:

$$G_{Z2,3}(s)=\frac{-0.012s^3+28.77s^2+5018s+6255}{s^3+27.22s^2+300.7s+62.26}$$

3.2.3 PLPF 法

使用 PLPF 法对式(2)中参数进行辨识,求得传递函数:

$$G_{P2,3}(s)=\frac{-3.576s^3+203.9s^2+301.1s+38.62}{s^3+12.91s^2+4.582s+0.3825}$$

3.2.4 遗传算法

针对式(2)的标准传递函数,首先直接调用 GADS 工具箱,计算 5 组数据,结果如表 2 所示。

根据表 2 中 5 组数据,给各参数设定更准确的取值范围: $a_3:0\sim40$; $a_2:10\sim30$; $a_1:0\sim30$; $a_0:0\sim10$; $b_2:0\sim1$; $b_1:0\sim1$; $b_0:0\sim1$,再计算 5 组数据,结果如表 3 所示。

取其中目标函数值最小、拟合效果最好的一组数据,即第 2 组数据,则相应的标准传递函数为

$$G_{3-}(s)=\frac{12.607s^3+26.023s^2+7.997s+3.755}{s^3+0.482s^2+0.23s+0.037}$$

表2 直接调用 GADS 工具箱的计算结果

Table 2 Calculated results from GADS toolbox

序号	a_3	a_2	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0
1	9.664	18.747	10.158	1.728	0.443	0.200	0.015
2	16.396	20.841	5.923	1.280	0.369	0.117	0.012
3	9.082	16.171	5.681	0.911	0.283	0.116	0.008
4	12.629	19.965	10.034	6.762	0.359	0.411	0.066
5	20.077	20.108	16.778	2.119	0.696	0.272	0.020

表3 同调发电机群 C1 设定取值范围后的计算结果

Table 3 Calculated results from parameters with range settled for C1

序号	a_3	a_2	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0	目标函数值
1	12.002	24.515	4.525	2.755	0.362	0.155	0.027	1.851
2	12.607	26.023	7.997	3.755	0.482	0.230	0.037	1.556
3	13.971	27.752	13.884	3.922	0.701	0.301	0.039	1.870
4	11.983	23.824	3.070	2.533	0.305	0.130	0.025	2.113
5	12.881	26.140	10.227	6.912	0.493	0.378	0.069	1.636

3.3 同调发电机群 C2 的聚合

设 4、6、7 号机对应励磁系统的聚合传递函数为 $G_{\sum 4,6,7}(s)$ 则：

$$G_{\sum 4,6,7}(s) = G_4(s)W_4(s) + G_6(s)W_6(s) + G_7(s)W_7(s) \tag{8}$$

经计算得

$$G_{\sum 4,6,7}(s) = (5.309 \times 10^{-7}s^{12} + 0.00011s^{11} + 0.009715s^{10} + 0.4574s^9 + 12.01s^8 + 166.2s^7 + 1086s^6 + 3006s^5 + 4082s^4 + 2826s^3 + 921.9s^2 + 106.2s + 3.56) / (3.214 \times 10^{-13}s^{14} + 1.05 \times 10^{-10}s^{13} + 1.481 \times 10^{-8}s^{12} + 1.191 \times 10^{-6}s^{11} + 5.95 \times 10^{-5}s^{10} + 0.001894s^9 + 0.03799s^8 + 0.4515s^7 + 2.758s^6 + 6.314s^5 + 6.542s^4 + 3.211s^3 + 0.7008s^2 + 0.06035s + 0.001599)$$

3.3.1 加权平均法

由于 4、6 和 7 号机的励磁系统模型结构不一致，故不可使用加权平均法。

3.3.2 离散时间最小二乘法

使用离散时间最小二乘法对式(2)中参数进行辨识，求得传递函数：

$$G_{Z4,6,7}(s) = \frac{-0.7244s^3 + 11120s^2 + 721500s + 506400}{s^3 + 58.37s^2 + 1775s + 224.5}$$

3.3.3 PLPF 法

使用 PLPF 法对式(2)中参数进行辨识时，程序中矩阵出现奇异，导致结果不准确，没有参考价值，这也反映出了传统算法中存在的缺陷。

3.3.4 遗传算法与分析

由于 C2 群的聚合传递函数阶次比较高，直接调用 GADS 工具箱计算出来的结果误差会较大，综合考虑，可参考传统算法，如根据离散时间最小二乘法的计算结果，给各参数设定更准确的取值范围： $a_3(-5) \sim 5$ ； $a_2, 10000 \sim 20000$ ； $a_1, 500000 \sim 900000$ ； $a_0, 300000 \sim 700000$ ； $b_2, 0 \sim 100$ ； $b_1, 1000 \sim 3000$ ； $b_0, 100 \sim 400$ ，在此取值范围内计算 5 组数据，如表 4 所示。

表4 同调发电机群 C2 设定取值范围后的计算结果

Table 4 Calculated results from parameters with range settled for C2

序号	a_3	a_2	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0	目标函数值
1	4.813	10843.542	684079.772	593134.842	33.988	1909.488	274.242	9.23
2	4.796	15859.203	824061.995	478736.000	58.784	1707.464	220.540	6.65
3	4.730	11163.402	836236.991	683672.892	40.826	2227.912	315.678	8.70
4	4.934	18297.841	818011.719	617343.919	53.605	2100.923	284.241	8.28
5	4.806	12713.049	830068.471	609239.559	30.962	2079.346	280.582	8.02

取其中目标函数值最小、拟合效果最好的一组数据,即第 2 组数据,则相应的标准传递函数为

$$G_{3_3}(s) = \frac{4.796s^3 + 15\,859.203s^2 + 824\,061.995s + 478\,736}{s^3 + 58.784s^2 + 1\,707.464s + 220.54}$$

3.4 各种方法的比较

分别对同调发电机群 C1 和 C2 的加权平均法、离散时间最小二乘法、PLPF 法和遗传算法的辨识结果进行对比。

3.4.1 同调发电机群 C1 的结果比较

对各种方法辨识结果的时域和频域特性进行比较,其阶跃响应比较如图 4(a)所示,波特图比较如图 4(b)所示。

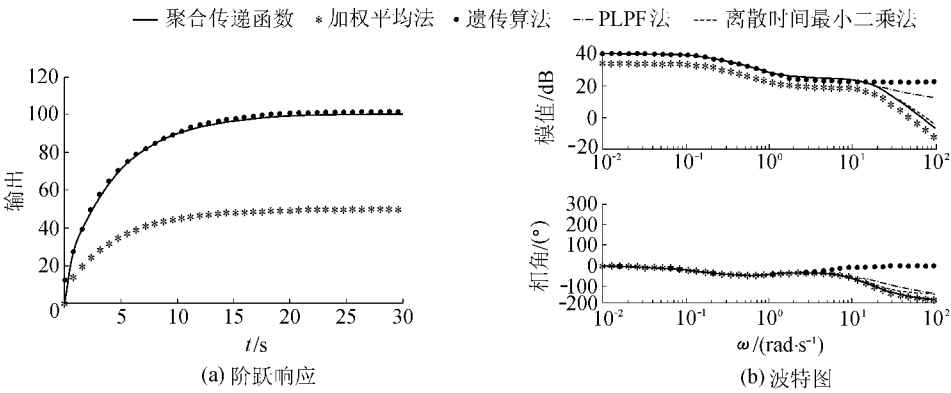


图 4 同调发电机群 C1 各种方法比较

Fig. 4 Comparison of different methods for C1

通过比较发现,加权平均法的相频特性拟合很好,但阶跃响应和幅频特性存在差异;其余方法的阶跃响应拟合效果和低频段波特图拟合效果都很好,高频段拟合效果最好的是离散时间最小二乘法,然后是 PLPF 法,遗传算法次之。

3.4.2 同调发电机群 C2 的结果比较

对各种方法辨识结果的时域和频域特性进行比较,其阶跃响应比较如图 5(a)所示,波特图比较如图 5(b)所示。

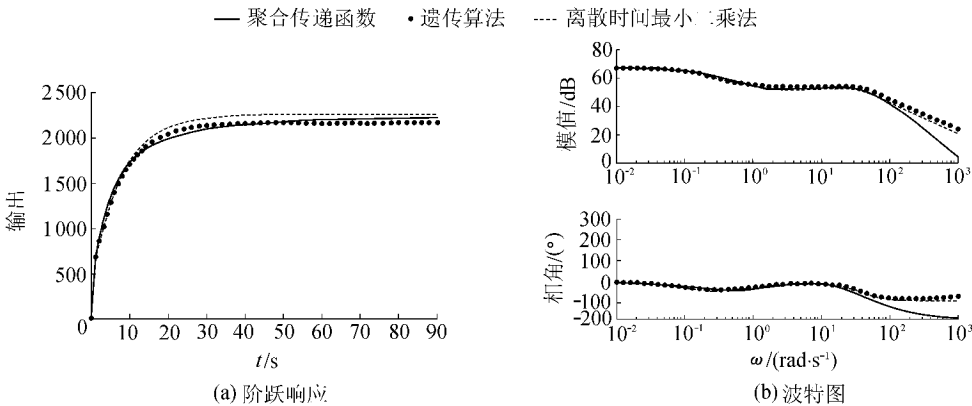


图 5 同调发电机群 C2 各种方法比较

Fig. 5 Comparison of different methods for C2

通过比较发现,遗传算法的阶跃响应拟合效果比离散时间最小二乘法的略好,2 种方法波特图低频段拟合效果都很好,但高频段不是很理想。

需要说明的是,本文等值传递函数只考虑了分子、分母均为三阶的情况。此外,也对比了不同阶次传递函数的效果,结果表明当阶次低于三阶时,效果不如三阶。

3.4.3 分析

将加权平均法、离散时间最小二乘法、PLPF 法和遗传算法各算例结果进行对比分析,归纳各种方法的差

异及优缺点,如表5所示.

表5 几种方法的比较
Table 5 Comparison of different methods

方法	方法难易程度	耗时	是否需要 设初值	计算 次数	波特图拟合效果		阶跃响应 拟合效果	其他
					幅频	相频		
加权平均法	简单	很短	否	1次	不好	很好		只适用于模型结构相同的系统
离散时间 最小二乘法	一般	一般	否	1次	好	好	较好	在离散传递函数转换为连续传递函数时,阶次可能会变化
PLPF法	较复杂	较长	否	1次	较好	较好	很好	计算过程中可能出现矩阵奇异
遗传算法	复杂	长	等值前模型阶次 较高时须给 参数设取值范围	多次	较好	一般	好	能有效克服传统算法的一些劣势,但容易早熟

4 结 论

本文针对动态等值时励磁系统模型结构相同及不同的情况,采用降阶标准传递函数模型作为等值的励磁系统模型,分别使用加权平均法、离散时间最小二乘法、PLPF法和遗传算法确定参数,并且进行了对比分析,归纳出各种方法的差异及优缺点.综合来看,离散时间最小二乘法性能较好.

参考文献:

[1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:330-349.

[2] 周海强,鞠平,孔德超,等. 基于机电距离的聚类方法在动态等值中的应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):14-17. (ZHOU Hai-qiang, JU Ping, KONG De-chao, et al. Application of clustering method based on electromechanical distance between different units in power systems dynamic equivalent[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(3):14-17. (in Chinese))

[3] 胡杰,余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术,2009,30(24):24-30. (HU Jie, YU Yi-xin. Practical method to parameter aggregation of power system dynamic equivalent[J]. Power System Technology, 2009, 30(24):24-30. (in Chinese))

[4] 蒋平,戴列峰,黄霆,等. 频域法在励磁系统参数识别中的应用[J]. 电力系统自动化,2001,25(16):30-33. (JIANG Ping, DAI Lie-feng, HUANG Ting, et al. Application of frequency domain method to parameter identification of excitation system[J]. Automation of Electric Power System, 2001, 25(16):30-33. (in Chinese))

[5] PRICE W W, CHOW J H, HAQGA V A W, et al. Large-scale system testing of power system dynamic equivalencing program[J]. IEEE Trans on Power System, 1998, 13(3):768-774.

[6] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003:263-275.

[7] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1988:79-148.

[8] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010:154-243.

[9] 许剑冰,薛禹胜,张启平. 电力系统动态等值述评[J]. 电力系统自动化,2005,29(14):91-95. (XU Jian-bing, XUE Yu-sheng, ZHANG Qi-ping. Review on dynamic equivalence of power system[J]. Automation of Electric Power System, 2005, 29(14):91-95. (in Chinese))

[10] 鞠平,王卫华,谢宏杰,等. 3区域互联电力系统动态等值的辨识方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(13):29-34. (JU Ping, WANG Wei-hua, XIE Hong-jie, et al. Identification approach to dynamic equivalents of the power system interconnected with three area[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13):29-34. (in Chinese))

[11] 王晓伟,蒋平,王杨正,等. 遗传算法在发电机励磁系统参数辨识中的应用[J]. 江苏电机工程,2007,26(5):4-6. (WANG Xiao-wei, JIANG Ping, WANG Yang-zheng, et al. Application of genetic algorithm in parameter identification of generator excitation system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(5):4-6. (in Chinese))

[12] 玄光南,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2004:208-253.

[13] 周海强,黄训诚,吴磊,等. 基于标准传递函数的励磁系统聚合[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):15-19. (ZHOU Hai-qiang, HUANG Xun-cheng, WU Lei, et al. Aggregation of excitation systems based on standard transfer function[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(1):15-19. (in Chinese))

[14] 王晓伟,蒋平,曹亚龙,等. 改进遗传算法在发电机励磁系统参数辨识中的应用[J]. 继电器,2007,35(11):16-20. (WANG Xiao-wei, JIANG Ping, CAO Ya-long, et al. Application of improved genetic algorithm in parameter identification of generator excitation system[J]. Relay, 2007, 35(11):16-20. (in Chinese))