

# 电力系统动态等值中原动机调速系统聚合的研究

孙素琴<sup>1</sup>, 蒋周士<sup>2</sup>, 周海强<sup>2</sup>, 鞠平<sup>2</sup>

(1. 河南省电力调度通信中心, 河南 郑州 450052; 2. 河海大学能源电气工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 动态等值中进行原动机调速系统聚合时, 如果各模型不相同, 采用加权求和法所得聚合模型阶次很高。为此, 提出采用统一的标准传递函数作为等值原动机调速系统模型的结构, 采用频域最小二乘法获得等值原动机调速系统模型的参数。这种方法可以适应各种原动机调速系统, 而且聚合后的应用也很方便。仿真算例结果表明, 采用适当阶次的标准传递函数作为等值模型, 聚合前后原动机调速系统的特性非常接近, 由此验证了模型和方法的有效性和适用性。

**关键词:** 原动机; 调速系统; 动态聚合; 加权求和法; 最小二乘法; 频域响应曲线拟合

## Aggregation of turbine and governing system for dynamic equivalents of power systems

SUN Su-qin<sup>1</sup>, JIANG Zhou-shi<sup>2</sup>, ZHOU Hai-qiang<sup>2</sup>, JU Ping<sup>2</sup>

(1. Dispatching and Communication Center, Electric Power of Henan, Zhengzhou 450052, China;  
2. Energy and Electrical School, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** As the turbine and governing systems of the coherent generators may be of different type, the equivalent model obtained with the weighted summation may be of high order. This paper proposes to use the standard transfer function as the model of equivalent turbine and governing system, and apply the frequency domain least square method to estimate the parameters of the standard transfer function. This approach could adapt different types of turbine and governing systems, and could be convenient in applications. The simulation results show that the standard transfer function with suitable order could represent the characteristics of the original turbine and governing systems adequately.

This work is supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (No.2004CB217901) and Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of China(No.50725723).

**Key words:** turbine; governing system; dynamic aggregation; weighted summation method; least square method; frequency domain response curve fitting

中图分类号: TM31 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0024-05

## 0 引言

在大规模电力系统暂态稳定分析中, 为减少数值仿真的计算量, 可采取动态等值的方法对系统进行简化<sup>[1-4]</sup>。电力系统动态等值的主要方法有同调等值法<sup>[5-9]</sup>、辨识等值法<sup>[10-13]</sup>和模态等值法<sup>[2]</sup>, 其中的关键环节就是如何获得准确的等值机的参数, 这就涉及到同调发电机组的动态聚合问题<sup>[14]</sup>。

原动机调速系统的聚合, 就是要构造出等值的原动机及其调节系统, 使它在暂态稳定仿真的过程中, 能够很好地模拟同调机群中全部原动机及其调节系统的综合动态响应。

目前动态聚合使用较多的是加权求和法, 加权求和法的特点是等值元件模型均为实际电力系统元件模型, 计算量很小。对于某个同调机群 $G$ , 等值发电机的容量 $S_G$ 为各发电机的容量 $S_i$ 之和, 等值参数 $C_G$ 为各发电机参数 $C_i$ 的加权求和:

$$C_G = \sum_{\forall i \in G} \left( \frac{S_i}{S_G} \right) C_i, \quad S_G = \sum_{\forall i \in G} S_i \quad (1a)$$

对于时间常数等参数则采用对数加权求和:

$$\ln C_G = \sum_{\forall i \in G} \left( \frac{S_i}{S_G} \right) \ln C_i, \quad S_G = \sum_{\forall i \in G} S_i \quad (1b)$$

但是, 加权求和法要求各发电机元件的模型均为相同的结构形式, 从而聚合前后的模型结构相同。然而, 同调机群中各发电机的原动机调速系统却可能是多种多样的<sup>[15]</sup>, 所以往往无法使用加权求和

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2004CB217901); 国家杰出青年科学基金项目(50725723)

法。

针对这种情况, 本文提出采用标准传递函数作为等值原动机调速系统的模型。然后, 采用频域最小二乘法对标准传递函数模型的参数进行辨识。最后, 采用IEEE-39节点系统算例进行验证。

### 1 原动机调速系统聚合的模型结构

设同调机群中, 第  $i$  号原动机调速系统的传递函数为  $G_{Gi}(s)$ :

$$G_{Gi}(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta \omega_i(s)} \quad (2)$$

由于等值发电机的机械功率是同调机群中各发电机机械功率之和, 而同一群中发电机速度相同。如果各发电机机械功率和传递函数均为统一基准之下的标么值, 则等值原动机调速系统的聚合传递函数  $G_{G\Sigma}(s)$  为各原动机调速系统的传递函数之和:

$$G_{G\Sigma}(s) = \sum_{\forall i \in G} G_{Gi}(s) \quad (3a)$$

如果各发电机机械功率和传递函数均为各自容量基准之下的标么值, 则等值原动机调速系统的聚合传递函数  $G_{G\Sigma}(s)$  为各原动机调速系统的传递函数的加权和:

$$G_{G\Sigma}(s) = \sum_{\forall i \in G} \left( \frac{S_i}{S_G} \right) G_{Gi}(s), \quad S_G = \sum_{\forall i \in G} S_i \quad (3b)$$

由此可见, 如果各原动机调速系统的传递函数结构相同而且参数也相同, 则聚合传递函数与各原动机调速系统的传递函数相同。但实际电力系统中, 各原动机调速系统参数不同, 甚至各原动机调速系统的传递函数结构也不同。所以, 获得的聚合传递函数  $G_{G\Sigma}(s)$  是一个复杂的高阶传递函数, 在实际工程中难以使用。

为此, 本文提出将上述高阶的聚合传递函数  $G_{G\Sigma}(s)$  简化为低阶的标准传递函数  $G_G(s)$ :

$$G_G(s) = \frac{\sum_{j=0}^m A_j s^j}{\sum_{j=0}^n B_j s^j + 1} \quad (4)$$

简化的目标是等效, 即  $G_G(s)$  与  $G_{G\Sigma}(s)$  具有尽量相同的输入输出特性。一般来说, 分母阶次等于或者大于分子阶次, 即  $n \geq m$ 。

### 2 原动机调速系统聚合的参数确定

将  $s = j\omega$  代入待求的等值传递函数  $G_G(s)$  可得:

$$G_G(j\omega) = \frac{A_0 + A_1(j\omega) + A_2(j\omega)^2 + \dots + A_m(j\omega)^m}{1 + B_1(j\omega) + B_2(j\omega)^2 + \dots + B_n(j\omega)^n} =$$

$$\frac{C(j\omega)}{D(j\omega)}, \quad n \geq m \quad (5)$$

令

$$e_k = G_{G\Sigma}(j\omega_k)D(j\omega_k) - C(j\omega_k) \quad (6)$$

式中:  $G_{G\Sigma}(j\omega_k) = R_k + jI_k$  为聚合传递函数的频率响应曲线, 根据式 (3) 可以计算获得。将  $e_k$  在  $\omega_k$  处展开成实部和虚部后有:

$$R_{Rk} = R_k - A_0 + \omega_k^2 A_2 - \omega_k^4 A_4 + \dots - \omega_k I_k B_1 - \quad (7)$$

$$\omega_k^2 R_k B_2 + \omega_k^3 I_k B_3 + \omega_k^4 R_k B_4 + \dots$$

$$e_{Ik} = I_k - \omega_k A_1 + \omega_k^3 A_3 + \dots + \omega_k R_k B_1 - \quad (8)$$

$$\omega_k^2 I_k B_2 - \omega_k^3 R_k B_3 + \omega_k^4 I_k B_4 + \dots$$

引入向量:

$$Y = [R_1, I_1, R_2, I_2, \dots, R_N, I_N]^T \quad (9)$$

$$e = [e_1, e_1, e_2, e_2, \dots, e_N, e_N]^T \quad (10)$$

$$\theta = [A_0, A_1, \dots, A_m, B_1, B_2, \dots, B_n]^T \quad (11)$$

式中:  $e_{Rk}$  为第  $k$  采样的实部误差;  $e_{Ik}$  为第  $k$  采样的虚部误差;  $N$  为采样点数,  $N > n + m$ 。

定义矩阵  $\varphi$  为:

$$\varphi = \begin{bmatrix} -1 & 0 & (\omega_1)^2 & 0 & -(\omega_1)^4 & \dots & -I_1 \omega_1 & -R_1 (\omega_1)^2 & I_1 (\omega_1)^3 & R_1 (\omega_1)^4 & \dots \\ 0 & -\omega_1 & 0 & (\omega_1)^3 & 0 & \dots & R_1 \omega_1 & -I_1 (\omega_1)^2 & -R_1 (\omega_1)^3 & I_1 (\omega_1)^4 & \dots \\ -1 & 0 & (\omega_2)^2 & 0 & -(\omega_2)^4 & \dots & -I_2 \omega_2 & -R_2 (\omega_2)^2 & I_2 (\omega_2)^3 & R_2 (\omega_2)^4 & \dots \\ 0 & -\omega_2 & 0 & (\omega_2)^3 & 0 & \dots & R_2 \omega_2 & -I_2 (\omega_2)^2 & -R_2 (\omega_2)^3 & I_2 (\omega_2)^4 & \dots \\ \vdots & \vdots \\ -1 & 0 & (\omega_N)^2 & 0 & -(\omega_N)^4 & \dots & -I_N \omega_N & -R_N (\omega_N)^2 & I_N (\omega_N)^3 & R_N (\omega_N)^4 & \dots \\ 0 & -\omega_N & 0 & (\omega_N)^3 & 0 & \dots & R_N \omega_N & -I_N (\omega_N)^2 & -R_N (\omega_N)^3 & I_N (\omega_N)^4 & \dots \end{bmatrix} \quad (12)$$

写成量测方程的矩阵形式有:

$$Y = \varphi \theta + e \quad (13)$$

式 (13) 是最小二乘估计量测方程的一般形式, 据此可得参数向量的估计值为:

$$\hat{\theta} = [\varphi^T \varphi]^{-1} \varphi^T Y \quad (14)$$

这个估计方法的主要特点是, 采样间距可以等距, 也可以不等距, 一般应在曲线变化显著的区段缩短间距, 而在曲线平缓处减少取点数。量测的点数愈多, 冗余的方程愈多, 估计的精度也愈高。另外, 这个方法可以一次性将所有的参数估计出来, 不需要对每个参数逐个求偏导, 计算速度快。

### 3 原动机调速系统聚合的基本步骤

(1) 原动机有水轮机和汽轮机之分, 由于这两种原动机以及其调速系统的模型差异很大, 所以如果在同一个同调机群里既有水轮机又有汽轮机时, 可将其分别进行动态聚合。

(2) 在同一个同调机群中, 如果原动机调速系统的传递函数模型的结构相同而只是参数不同, 此

时采用加权（对数）求和法比较简单，计算量少，而且速度很快。

(3) 如果同一个同调机群中原动机调速系统的类型不同，则按照式（3）求取聚合传递函数  $G_{G\Sigma}(s)$ 。

(4) 计算  $G_{G\Sigma}(s)$  在各个离散频率点上的实部  $R_k$  和虚部  $I_k$ 。

(5) 采用频域最小二乘法，按照式（14）求出标准传递函数的系数。

## 4 算例验证

### 4.1 算例系统

本文中所使用的算例系统为 IEEE 10 机 39 节点系统，如图 1 所示。将机组  $G_{10}$ 、 $G_8$ 、 $G_9$  作为研究系统， $G_1$  作为参考机。根据同调性分析可知，外部系统可以分为三个同调机群：发电机组  $G_2$  和  $G_3$  为一个同调机群 C1，发电机组  $G_4$ 、 $G_6$  和  $G_7$  为一个同调机群 C2， $G_5$  为孤岛称为 C3。

同调机群 C1 中原动机为水轮机，同调机群 C2 中原动机为汽轮机，模型请见文献[2, 15]，参数如表 1、表 2 和表 3 所示。其中， $T_w$  为水流时间常数， $K_\delta$  为调差系数的倒数， $K_\alpha$  为硬反馈增益， $K_\beta$  和  $T_i$  分别为软反馈的增益和时间常数， $T_s$  为接力器的时间常数； $T_{CH}$  为高压缸蒸汽容积时间常数， $F_{VHP}$  分别为超高压缸稳态输出功率占总功率的百分比， $T_{RH1}$  为第一中间再热蒸汽容积时间常数， $F_{HP}$  为高压缸稳态输出功率占总功率的百分比， $T_{RH2}$  为第二

中间再热蒸汽容积时间常， $F_{LP}$  为中压缸稳态输出功率占总功率的百分比， $T_{CO}$  为低压蒸汽容积时间常数， $F_{LP}$  为低压缸稳态输出功率占总功率的百分比； $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_r$ 、 $T_b$ 、 $T_t$ 、 $T_F$  为调速系统的时间常数， $K_P$ 、 $K_D$ 、 $K_I$  为 PID 环节倍数， $K_{PI}$ 、 $K_{DI}$ 、 $K_{II}$  为调节级压力控制 PID 环节倍数。

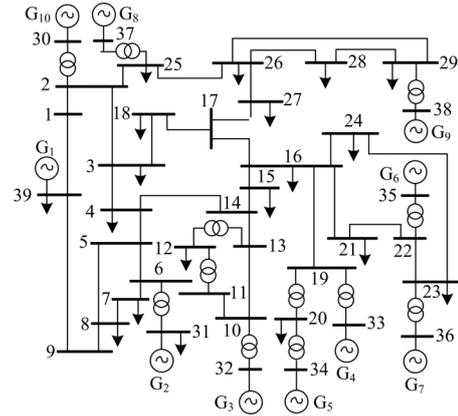


图 1 算例系统图

Fig.1 System Scheme

表 1 同调机群 C1 中原动机调速系统的参数

Tab.1 Parameters of primer and governing system in C1

机组号	$T_w$ /s	$K_\delta$	$K_\alpha$	$K_\beta$	$T_i$ /s	$T_s$ /s
G2	3.5	20.0	1.0	10.0	8.0	5.0
G3	2.0	20.0	1.0	5.0	10.0	7.0

表 2 同调机群 C2 中原动机的参数

Tab.2 Parameters of primer system in C2

机组号	$T_{CH}$ /s	$F_{VHP}$	$T_{RH1}$ /s	$F_{HP}$	$T_{RH2}$ /s	$F_{LP}$	$T_{CO}$ /s	$F_{LP}$
G4	0.2	0	0	0.3	9.00	0.4	0.40	0.3
G6	0.3	0	0	0.3	7.00	0.4	0.50	0.3
G7	0.5	0	0	0.3	5.00	0.4	0.40	0.3

表 3 同调机群 C2 中调速系统的参数

Tab.3 Parameters of governing speed system in C2

机组号	$k_\delta$	$T_s$ /s	$T_1$ /s	$T_2$ /s	$T_r$ /s	$T_b$ /s	$T_t$ /s	$K_P$	$K_D$	$K_I$	$T_F$ /s	$K_{PI}$	$K_{DI}$	$K_{II}$
G4	20.0	0.1	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G6	20.0	0.5	0	0	0.02	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
G7	20.0	0.6	0	0	0	0	0.02	1.0	0	0.01	0.02	1.0	0	0.01

### 4.2 同调群 C1

首先，求得聚合传递函数为：

$$G_{C1,\Sigma}(s) = \frac{N_{C1,\Sigma}(s)}{M_{C1,\Sigma}(s)} \quad (15)$$

$$N_{C1,\Sigma} = -67200s^5 - 140320s^4 - 28410s^3 + 27115s^2 + 3505s + 40$$

$$M_{C1,\Sigma} = 4900s^6 + 23780s^5 + 39170s^4 + 26910s^3 + 6783s^2 + 162.8s + 1$$

其次, 采用加权求和法获得传递函数为:

$$G_{C1,A}(s) = \frac{-468.6s^2 + 128s + 20}{70s^3 + 154.4s^2 + 78.65s + 1} \quad (16)$$

然后, 采用频域最小二乘法获得传递函数为:

$$G_{C1,B}(s) = \frac{N_{C1,B}(s)}{M_{C1,B}(s)} \quad (17)$$

$$N_{C1,B} = -65.06s^5 - 1788s^4 - 3004s^3 + 47.46s^2 + 467.9s + 30.85$$

$$M_{C1,B} = 4.744s^6 + 143.5s^5 + 588s^4 + 841s^3 + 475.7s^2 + 83.77s + 1$$

作出以上三个传递函数的 Bode 图, 如图 2 所示。由图可见: 采用加权求和法和基于频域最小二乘法所得传递函数模型的 Bode 图与聚合传递函数模型重合度高, 拟合效果好。

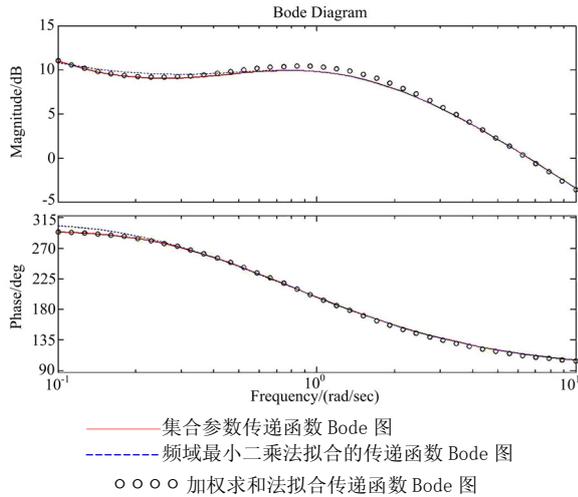


图 2 C1 中原动机调速系统聚合前后传递函数 Bode 图

Fig.2 Bode plot for an aggregated and an equivalent governor-turbine transfer function in C1

从两种方法拟合出的传递函数的结构来看, 在同一个同调机群中, 如果原动机调速系统的传递函数模型结构相同, 只有参数不同时, 采用加权对数平均法求取的传递函数模型结构简单, 分子分母的阶次和原系统中单台机组的的阶次相同, 而且比聚合传递函数模型的阶次低。而采用频域最小二乘法所得传递函数和聚合传递函数的阶次相同, 相对较高。

因此, 在这种情况下, 加权对数平均法是比较适合的方法。

### 4.3 同调群 C2

首先, 求得聚合传递函数为:

$$G_{C2,\Sigma}(s) = \frac{N_{C2,\Sigma}(s)}{M_{C2,\Sigma}(s)} \quad (18)$$

$$N_{\Sigma}(s) = 1.418 \times 10^6 s^{14} + 1.334 \times 10^8 s^{13} + 4.308 \times 10^9 s^{12} + 6.821 \times 10^{10} s^{11} + 6.472 \times 10^{11} s^{10} + 4.091 \times 10^{12} s^9 + 1.748 \times 10^{13} s^8 + 4.821 \times 10^{13} s^7 + 8.019 \times 10^{13} s^6 + 7.176 \times 10^{13} s^5 + 2.628 \times 10^{13} s^4 + 4.049 \times 10^{12} s^3 + 2.373 \times 10^{11} s^2 + 2.625 \times 10^9 s + 6.25 \times 10^6$$

$$M_{\Sigma}(s) = 56700s^{14} + 6.99 \times 10^6 s^{13} + 2.926 \times 10^8 s^{12} + 5.136 \times 10^9 s^{11} + 5.137 \times 10^{10} s^{10} + 3.003 \times 10^{11} s^9 + 1.104 \times 10^{12} s^8 + 2.459 \times 10^{12} s^7 + 3.168 \times 10^{12} s^6 + 2.133 \times 10^{12} s^5 + 6.167 \times 10^{11} s^4 + 7.818 \times 10^{10} s^3 + 3.832 \times 10^9 s^2 + 3.125 \times 10^7 s$$

然后, 采用频率最小二乘法获得同阶次的传递函数为:

$$G_{C2,B}(s) = \frac{N_{C2,B}(s)}{M_{C2,B}(s)} \quad (19)$$

$$N_{C2,B}(s) = 0.3582s^{14} + 14.73s^{13} + 89.62s^{12} + 592.3s^{11} + 247.7s^{10} - 406.6s^9 - 2 \times 10^4 s^8 - 2.67 \times 10^4 s^7 - 1.17 \times 10^5 s^6 - 1.54 \times 10^5 s^5 + 6.96 \times 10^5 s^4 + 3.14 \times 10^6 s^3 + 1.23 \times 10^6 s^2 + 1.17 \times 10^5 s + 441$$

$$M_{C2,B}(s) = 0.024s^{14} + 0.9447s^{13} + 9.751s^{12} + 27.1s^{11} + 15.19s^{10} - 226.6s^9 - 922.1s^8 - 1726s^7 - 7969s^6 + 1463s^5 + 7.13 \times 10^4 s^4 + 1.0 \times 10^5 s^3 + 2.66 \times 10^4 s^2 + 1889s - 1$$

由式(18)和式(19)可以看到, 采用频率最小二乘法获得传递函数阶次和聚合传递函数的阶次相同, 而且较高, 不利于在 PSASP 或其他仿真软件中使用。

为了得到便于使用的低阶模型, 进一步采用低阶传递函数进行拟合, 分别尝试以 6 阶和 5 阶的标准传递函数模型来拟合聚合传递函数, 所得到的结果如式(20)和式(21)所示。

$$G_{C2,C}(s) = \frac{N_{C2,C}(s)}{M_{C2,C}(s)} \quad (20)$$

$$N_{C2,C} = 105s^6 + 994.3s^5 + 6932s^4 + 2.1 \times 10^4 s^3 + 2.76 \times 10^4 s^2 + 6121s + 83.56$$

$$M_{C2,C} = 6.03s^6 + 94.86s^5 + 486.5s^4 + 1001s^3 + 769.3s^2 + 105.3s - 1$$

$$G_{C2,D}(s) = \frac{N_{C2,D}(s)}{M_{C2,D}(s)} \quad (21)$$

$$N_{C2,D}(s) = 0.2845s^5 + 3.017s^4 + 20.61s^3 + 20.25s^2 + 299.7s + 62.7$$

$$M_{C2,D}(s) = 0.012s^5 + 0.456s^4 + 0.041s^3 + 5.867s^2 + 8.632s - 1$$

作出式(18)~式(21)所示四个传递函数的 Bode 图, 如图 3 所示。

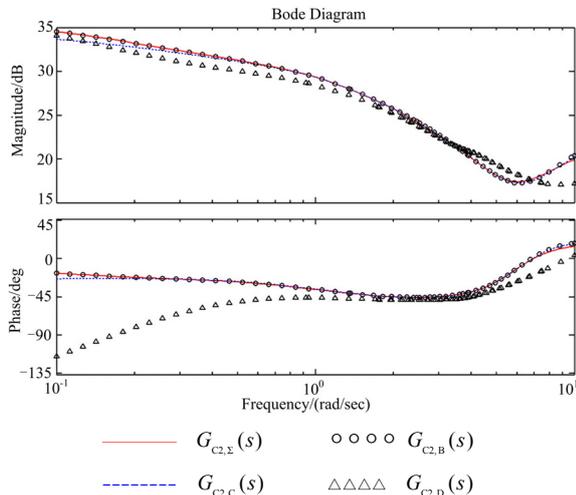


图 3 C2 中原动机调速系统聚合前后传递函数 Bode 图  
Fig.3 Bode plot for an aggregated and an equivalent governor-turbine transfer function in C2

由图 3 可以看出:(1)  $G_{C2,B}(s)$  与  $G_{C2,Σ}(s)$  的 Bode 图基本上是完全重合的, 拟合效果很好。但是, 所得到的传递函数阶次太高。(2) 降阶拟合为 5 阶的传递函数  $G_{C2,D}(s)$  与  $G_{C2,Σ}(s)$  的 Bode 图相差大, 拟合效果差, 所以 5 阶及以下的传递函数不适合。(3) 降阶拟合为 6 阶的传递函数  $G_{C2,C}(s)$  与  $G_{C2,Σ}(s)$  的 Bode 图在 0.1~0.3 Hz 的区间稍有偏差, 在 0.3~10 Hz 之间曲线重合, 拟合效果较  $G_{C2,B}(s)$  稍差, 但总体来说拟合精度还是能满足稳定计算的要求。然而传递函数的阶次得到了降低, 模型得到了简化。所以, 本文推荐采用降为 6 阶的统一传递函数。

## 5 结论

如果同调机群中原动机调速系统的传递函数模型结构相同, 只有参数不同时, 采用加权求和法所得传递函数的分子分母阶次和单台原动机调速系统的阶次相同, 简单实用。

但如果同调机群中原动机调速系统的传递函数模型结构不同时, 可以采用低阶(适当阶次)的标准传递函数作为等值原动机调速系统的模型, 采用频域最小二乘法求取其参数。

## 参考文献

[1] Podmore R, Germond A. Development of dynamic equivalents for transient stability studies[D]. EPRI EL-456 Final Report, 1977.

[2] 倪以信. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
NI Yi-xin. Theory and analysis of dynamic power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[3] 余贻鑫, 陈礼义. 电力系统安全性和稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1988.  
YU Yi-xin, CHEN Li-yi. Security and stability of electric power systems[M]. Beijing: Science Press, 1998.

[4] 许剑冰, 薛禹胜, 张启平, 等. 电力系统动态等值述评[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 92-95.  
XU Jian-bing, XUE Yu-sheng, ZHANG Qi-ping, et al. Review on dynamic equivalence of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 92-95.

[5] 王刚, 张伯明. 电力系统外网在线等值方案[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 21-26.  
WANG Gang, ZHANG Bo-ming. External online dynamic equivalents of power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 21-26.

[6] 温柏坚, 张海波, 张伯明. 广东省地区电网外网等值自动生成系统设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 77-79.  
WEN Bo-jian, ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming. Design of a real time external network auto equivalence system of sub-transmission networks in Guangdong[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 77-79.

[7] 蒋维勇, 吴文传, 张伯明. 在线安全预警系统中的网络模型重建[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 5-9.  
JIANG Wei-yong, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Network model reconstruction in on-line security early warning system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 5-9.

[8] Wallace do Couto Boaventura, Reza Iravani M, Amauri Lopes. Robust sparse network equivalent for large systems: part I - methodology[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 157-163.

[9] Wallace do Couto Boaventura, Reza Iravani M, Amauri Lopes. Robust sparse network equivalent for large systems: part II - performance evaluation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 293-299.

[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): 31-36.  
JU Ping, WANG Wei-hua, XIE Hong-jie, et al. Identification approach to dynamic equivalents of the power system interconnected with three areas[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 31-36.

[11] 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.

- expert system for power system[J]. Modern Electric Power, 2004, 8 (3): 41-46.
- [2] 朱永利, 张文勤, 高曙. 电力系统故障判断专家系统[J]. 华北电力大学学报, 2005, 12 (1): 1-6.  
ZHU Yong-li, ZHANG Wen-qin, GAO Shu. Power system fault diagnosis expert system[J]. North China Electric Power University, 2005, 12 (1): 1-6.
- [3] 毕天姝, 倪以信, 吴复立. 基于新型神经网络的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (2): 73-78.  
BI Tian-shu, NI Yi-xin, WU Fu-li. New neural network-based fault diagnosis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (2): 73-78.
- [4] 张耀天, 何正友. 基于粗糙集理论和朴素贝叶斯网络的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2007, 12 (7): 14-19.  
ZHANG Yao-tian, HE Zheng-you. Study on power grid fault diagnosis method based on rough set theory and naive Bayesian networks[J]. Power System Technology, 2007, 12 (7): 14-19.
- [5] 吴欣, 郭创新. 基于贝叶斯网络的电力系统故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (4): 11-15.  
WU Xin, GUO Chuang-xin. Power system fault diagnosis approach based on Bayesian network[J]. Proceedings of the EPSA, 2005, 17 (4): 11-15.
- [6] 霍利民, 朱永利, 贾兰英, 等. 基于贝叶斯网络的电网故障诊断方法[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31 (3): 30-34.  
HUO Li-ming, ZHU Yong-li, JIA Lan-ying, et al. Power system fault diagnosis based on Bayesian network [J]. North China Electric Power University, 2004, 31 (3): 30-34.
- [7] 李强, 徐建政. 基于主观贝叶斯方法的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (15): 46-50.  
LI Qiang, XU Jian-zheng. Power system fault diagnosis based on subjective Bayesian approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (15): 46-50.
- [8] 周玉兰, 王俊永, 等. 2002年全国电网继电保护与安全自置运行情况[J]. 电网技术, 2003, 27 (9): 55-60.  
ZHOU Yu-lan, WANG Jun-yong, et al. Relay protection and security to the national grid operation of home in 2002[J]. Power System Technology, 2003, 27 (9): 55-60.
- [9] 吴玉鹏, 陈丽鹃, 等. 2002年全国电力可靠性统计分析[J]. 中国电力, 2002, 36 (5): 1-7.  
WU Yu-peng, CHEN Li-juan, et al. Statistical analysis of the national electric reliability in 2002[J]. Electric Power, 2002, 36 (5): 1-7.
- [10] 周兆庆. 基于SCADA及保护信息系统的输电网故障诊断(硕士学位论文)[D]. 南京: 河海大学, 2005.

收稿日期: 2009-08-05; 修回日期: 2009-10-29

作者简介:

何小飞 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电网故障诊断; E-mail: phllip\_cd@qq.com

童晓阳 (1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能Agent、信息技术及其在电力系统的应用、变电站自动化;

周曙 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为人工智能在电力系统故障诊断中的应用。

(上接第 28 页 continued from page 28)

- 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 Systems, 2008, 32 (3): 14-17.
- [12] Ju P, Ni L Q, Wu F. Dynamic equivalents of power systems with on-line measurements, part I: theory[J]. IEE Trans on Proc Gen, 2004, 151 (2): 175-178.
- [13] Ju P, Wu F, Yang N G, et al. Dynamic equivalents of power systems with on-line measurements, part II: applications[J]. IEE Trans on Proc Gen, 2004, 151 (2): 179-182.
- [14] 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.
- [15] Kundur P. Power system stability and control[M]. McGraw-Hill Companies Inc, 1994.

收稿日期: 2009-08-01; 修回日期: 2009-09-03

作者简介:

孙素琴 (1971-), 女, 高级工程师, 副总工程师, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制; E-mail: sunsuqin@x263.net

蒋周士 (1977-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统动态等值;

周海强 (1971-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。