

## ABSTRACT

With the expending scale of local power system and the formation of nation wide inter-connected power system, the amount of generation units and other composing components increase acutely, such that the burden of simulation and analysis of electromechanical transient process of power system are increasingly onerous. To alleviate the simulation burden of electromechanical transient process such as power system transient stability and catch the predominate dynamic characters of the power system quickly, the method of dynamic equivalence of power system is still important, though the ability of computer has elevated much nowadays, especially in the online and real time dynamic security assessment and the decision-making of preventive control. In dynamic equivalence method an entire power system is to be divided into a study system and sevral exterior systems. Its principle is to replace the influence of the exterior systems to the study system by the approximate influence of simplified exterior systems.

Dynamic equivalence of power system is comprised of three parts: identification of coherent generator group, reduction of network and parameter aggregation of coherent generators. This paper firstly introduces the basic concept of dynamic equivalence and the status of both domestic and abroad development. It specially introduces parameter aggregation of dynamic models and mainly analyzes the frequency domain method, which is mostly adopted by engineering grade softwares. The problem, brought by the frequency domain method, is that the calculation time is too long for the extremely complicated aggregation models. So this paper presents a practical method of parameter aggregation of coherent generators' detailed models, which is based on the weighting method. Parameters of equivalent generator units and its voltage and power control system' detailed models can be obtained by using this method. This method does not only aggregate parameters successfully and guarantee the precision of simulation, but also reduce the time of calculation greatly.

Secondly, the model of induction motor is most common of all dynamic load models, in electrical power system simulation. Moreover, the parameters of induction motor model, which adopted in our country, are always the “typical parameters”. It is demonstrated by research that the “typical parameters” of induction motor model

cannot suitably describe the practical composite dynamic load. To improve the model of practical composite dynamic load, this paper presents a practical method of parameter aggregation to induction motor groups, which is based on the weighting method. It is proved that this method cannot only aggregate parameters successfully by the simulation of simple distribution system. It may act as a powerful technique in developing an effective way to obtain a more acceptable model of composite dynamic load.

**KEY WORDS:** Power system; Dynamic equivalence; Parameter aggregation; Weighting method

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名: 胡杰 签字日期: 2007 年 1 月 29 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 胡杰

导师签名: 余贻金

签字日期: 2007 年 1 月 29 日

签字日期: 2007 年 1 月 29 日

# 第一章 绪 论

## 1.1 引言

随着现代电力工业的迅速发展,电力系统迅速向多机(上千台机)、大电网(几千条线路、几千条母线)、交直流联合输电及大区域联网运行发展,当进行电力系统实时仿真或动模实验时,由于仿真规模和硬件设备的限制,必须对原有系统做合理简化才能进行。实际上,对一个大电力系统的动态性能研究一般只对某一个区域最感兴趣,该区域称之为研究系统,而与此区域较远的区域,研究中只要计及其对研究区域的影响,其内部不必详细描写,往往可做降阶及简化,以节省研究的人力和物力,该拟作简化的区域称为外部系统。通过系统简化可以突出主要矛盾,对于掌握研究系统的主要特征,是十分必要的。这种保留研究区域不变,而对外部区域在保证其对研究系统的动态影响不畸变的条件下,进行简化的过程称为动态等值<sup>[1]</sup>。

动态等值程序设计的目的原来主要是为了节约内存、提高计算速度以及计算分析的效率。随着计算机技术的快速发展,计算机硬件能够满足目前大部分电力系统分析软件的要求,因此目前等值程序主要用于物理仿真系统或者实时在线动态安全分析,等值的目的发生了很大的变化<sup>[2]</sup>。

动态等值方法和对系统进行何类物理问题的研究密切相关,一般分为三种情况<sup>[3]</sup>:

1) 同调聚合法。这是当前应用最为广泛的方法,该方法首先将同调机群中的发电机聚合为一台带等值控制器的等值机,然后采用 WARD 或 REI 等静态等值方法,消去外部系统中的负荷母线。在消去负荷母线时,为了减少等值误差,建议保留长线和联络线两端的母线。消去母线上的负荷可以按两种方式处理:①按恒阻抗、恒电流、恒功率分类合并后,分别移到需保留的负荷母线上;②电流沟简化法,将恒阻抗负荷折合成等值阻抗,将恒电流和恒功率负荷转换成电流源,转移到保留的负荷母线上,再返回相应的负荷形式,与原先负荷同类合并。

2) 模态压缩法。该方法通过对外部系统线性化模型的模态分析,找到这些关键模式和对应同调群的划分,然后采用模态去耦线性变换,仅保留关键模式。模态压缩法可以考虑控制器的影响,不需要选择特定扰动,但其等值模型不含有物理形式的等值元件,不能直接利用已有的仿真工具,其线性化的假设不适用于大扰动。

3) 系统识别法。该类方法又可以分为两种。第一种是基于激励信号响应的

确定性模型的方法。这种方法首先给定等值系统的模型，通过优化其参数，使在相同的激励信号下，等值系统的仿真结果与原系统实测值的差别最小。第二种是基于数值拟合的预测性模型的方法。这种方法采用不含有物理等值元件形式的数学模型，首先记录扰动过程中边界上的交换功率、电流、电压响应，然后利用数值拟合方法求取方程系数，使得按照等值模型求得的物理量和实测量的误差最小。

三种等值方法分别适用于不同的场合，也分别有其优、缺点：

1. 同调等值法。其优点是：物理透明度大；等值系统元件模型均为实际电力系统元件模型，可直接用于暂态稳定分析；适应系统的非线性和大扰动，且可适用于大规模系统等值；动态等值精度控制较方便，实际应用表明动态等值的效果良好。其缺点是：同调机群的划分和扰动施加的地点、类型等因素有关；网络化简、移相变压器的消去对动态过程会带来一定误差；同调发电机聚合较复杂，且有一定的拟合误差。

2. 模式等值法。其优点是：物理概念清楚，可对外部系统作高度简化并保留其主特征根。缺点是：等值过程中要形成外部系统的线性化模型，通过系数矩阵做特征根分析，当外部系统极大时，求特征根会有“维数灾”问题，等值计算工作量较大；等值后的外部系统用线性化状态方程表示，若用于暂稳分析，会带来较大误差。

3. 估计等值法。其优点是：实时、快速，不需知道外部系统的完整结构及参数，适合系统结构、运行工况多变的系统。其缺点是：当采用随机或伪随机扰动进行系统等值时，要考虑噪声影响及作滤波及相关分析，数学处理较复杂。

本文主要关心的是用于电力系统暂态稳定分析的等值方法，因此，下文涉及的动态等值法主要是针对同调等值法而言的。

## 1.2 电力系统动态等值研究及应用综述

### 1.2.1 动态等值研究的现状

动态等值方法已经研究了几十年，在理论上已经比较成熟。动态等值可以分为以下几个步骤：①研究系统和外部系统的划分；②同调机群的识别；③同调发电机聚合和网络化简。研究系统和外部系统的划分比较简单，所以下面分别介绍当前同调机群识别的方法、同调发电机聚合和网络化简方法。此外，对动态等值方法的评估指标也做了介绍。

## 一、同调机群识别

如果系统发生某个故障后，其中某些发电机具有相同的角速度，则它们相对于各自初值的功角变化量相同，称这些发电机组成为一个理想的同调群。在工程实际中很少有严格的同调群，因此需要引入同调群的实用判据。实用判据分为两类：

1) 基于时间响应曲线相似度的同调定义。该类定义是用两台发电机的转角差在观察时间段 $[0, \tau]$ 内的最大值来反映其非同调程度，当小于阈值 $\epsilon$ 时，称这两台发电机是同调的。 $\epsilon$ 值直接影响到识别的结果，但其如何选择却很少被论及。显然，对不同强度的扰动或者不同规模的系统，采用相同的 $\epsilon$ 并不合理。此外，对于失稳轨迹，如何选择 $\tau$ 值也是个难题。这些问题致命的阻碍了这类定义的工程应用。

2) 第二类基于振荡模式的同调定义。该类定义是基于动态等值的实用原则：等值前后系统主要动态模式不丢失。其又可分两种定义方法。第一种是按特征值分析的定义方法。该方法利用特征值分析技术，将与线性化系统的主要振荡模式强相关的发电机定义为该模式下的同调群。由于忽略了系统的非线性和非自治性，故只适用于小扰动，难以用于暂态稳定分析。第二种是按受扰轨迹的定义方法。该方法将有关工况和扰动下同属于主导群或同属于余下群的发电机定义为同调机群，考虑了系统的非线性，所以适用于暂态稳定分析。

## 二、同调发电机聚合和网络化简

在同调机群识别完成以后进行同调机群聚合和网络化简，它主要是通过简化系统中母线和线路数目来达到减少暂态稳定仿真程序的计算时间和所需内存的目的。在进行同调发电机聚合和网络化简时，应该考虑如下几个方面的要求：①简化算法应该产生一个包含正常元件(母线、线路、变压器)的等值网络；②简化算法应该产生一个适合于数值运算的等值网络，即该等值不应有先天的舍入问题，也不应使暂态稳定仿真期间求解网络的一般方法(如牛顿法、高斯塞德尔法、PQ 分解法)的收敛出现问题；③等值元件的参数最好是处于现有暂态稳定数据格式容易适应的范围内；④暂态稳定仿真的计算量的主要部分是解系统代数方程，采用了稀疏性技术的计算时间和内存通常以比网络中线路的数目增长比例稍大的速度增长，因此，在网络化简中不仅要简化网络中母线的数目，更重要的是要简化网络中线路的数目。前三项要求主要是为了保证等值程序能与现有的暂态稳定仿真程序相兼容，从而不必对暂态稳定仿真程序进行重大修改。第四项的要求是为了适应现有的暂态仿真程序中广泛应用的稀疏技术。

## 三、动态等值方法的评估指标

动态等值不但必须使内部系统的初始潮流保持不变，并且应该在内部系统故

障时保证如下几点：等值前后的摇摆曲线有很高的相似度；振荡模式不变；保证稳定裕度的精度和稳定域的精度。此外，压缩比(如等值前后节点数、线路数和发电机数之比)、对不同电网的适用性、与已有计算程序的兼容性等也是重要的评估指标。

### 1.2.2 动态等值工程应用的现状

国际上，关于动态等值的分析研究，最早开始于六十年代后半期。当时的方法认为系统中一些节点的振荡特性不受系统中某些区域的扰动的影响，因而可被消去。由于确定这些不受干扰的节点很困难，再加上使用等值方程的状态矩阵必须修改原来的稳定仿真程序，因此这种方法并没有得到应用。

七十年代，美国电力研究院(EPRI)基于同调概念开发出一种新方法，相应程序称作DYNEQ<sup>[4]</sup>。在该程序中，同调的判别是根据暂态稳定时域仿真所得的转子摇摆曲线进行的，这一方法得到一定应用。但是，应用过程中发现，同调机群的判别受扰动地点距边界节点距离远近的影响非常大。

八十年代早期，基于奇异摄动理论(Singular Perturbation Theory)的慢同调技术被开发出来<sup>[5]</sup>，并应用于同调机群的判别和动态等值的建立。近几年，这些技术又有了进一步的发展。

1993年，Ontario水电局开发了一个新的EPRI动态等值程序，称为DYNRED(它综合了DYNEQ和慢同调技术的优点)。93年后半年，GE-PSED又合同RPI, NYPP和Powertech labs开始了对DYNRED的进一步完善工作。

近几年电力系统动态等值又有了一些新的进展。例如建立了一种传统发电机模型聚合的改进方法，还引入一种综合了慢同调和模态等值的SME方法<sup>[6]</sup>。但是，对于简化技术的特性还没有一个全面的评估，模型简化过程还有待进一步探索和建立。

国内来说，1987年，本课题组为西北电网公司开发了一套动态等值软件，包括相关发电机识别程序以及同调机群聚合和网络化简程序，用于对西北电网(当时具有35台发电机、260条母线)的动态等值。中国电力科学研究院和清华大学于1990年合作开发了与中国版BPA程序接口的动态等值程序PSDEP<sup>[7]</sup>，并于1997年进一步改进，加入了等值机的次暂态模型。

### 1.3 参数聚合研究现状<sup>[8]-[13]</sup>

目前有一种误解，总觉得方法研究、模型的确定很重要，至于参数则是很容易得到的，它的对错也无关大局。这是不对的，因为模型结构和参数是不可分的，

无论哪一个不对，整个模型就不会对，用这样的模型仿真出的结果也就不会与实际相符。其实，模型的建立是从物理到数学的重要一步，参数的取得也是从物理到数学的重要环节。数模和参数同样都对等值结果有关键性的影响<sup>[14]</sup>。因此本文更注重于模型动态参数的求取。

### 1.3.1 发电机组参数聚合方法<sup>[15][16]</sup>

同调发电机群等值机参数的获取是同调等值法中最关键的一步，直接关系到等值与仿真结果的正确性。识别出来的等值机参数将作为动态等值的计算结果用于大型电力系统的暂态稳定分析。不够精确的参数聚合将导致暂态稳定分析的失误，影响稳定措施的可靠性和有效性，从而影响到大型电力系统的暂态稳定。发电机组的参数聚合要尽可能保证发电机组简化等值后的参数不影响暂态过程，保证等值前后系统的动态过程不变。由于电力系统本身是属于高阶、非线性、复杂的系统范畴，所以把系统聚合技术用于电力系统要比用于其它的工程领域显得更加困难。而同时由于大型电力系统一般包含不同机型、不同容量、不同网络层次，这也使得发电机组的参数聚合非常困难。人们对这个课题作了不少研究，形成了一些理论体系和方法，从思路上可以初步分为两类：频域聚合法和时域聚合法：

#### 1) 频域聚合法

频域聚合方法是一种经典方法，适用于发电机参数聚合。假设相关的发电机单元是在一条具有相同端电压U<sub>T</sub>的公共母线上，并具有同样的角速度。频域拟合方法的目的是由原型中各个单元的特性来确定等值模型的特性。为此，将分别考虑转子动态，原动机及其调速器模型，励磁系统模型和PSS。求解的基本思路是调整每个等值模型的线性参数以获得它的传递函数与原型中各个单元的传递函数之和之间的最小误差（对于特定的离散频率使传递函数的模的差的平方和最小），也就是将同调发电机组各单元的传递函数动态聚合，求出最小误差的等值传递函数。

对于一般的发电机组模型，我们可以得到其各个单元的传递函数框图，而框图每一环节都有各自特定的参数，如励磁系统的参数K<sub>A</sub>，T<sub>A</sub>等，通过自控原理框图变换，可以将整个模型的输入输出传递函数变换为一个用多项式表示的形式，其中用s代替jω：

$$H(s) = \frac{b_0 + b_1(s) + \dots + b_m(s)^m}{1 + a_1(s) + \dots + a_n(s)^n} = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (1-1)$$

式中 a<sub>i</sub> (i=1, …, n), b<sub>i</sub> (i=1, …, m) 为待求系数，由发电机传递函数框图各环节的参数组成，n, m 分别为变换后分母、分子的最高次数，n ≥ m。因此如

果辨识出  $a_i$ ,  $b_i$  各系数, 可以列出方程, 唯一地解出发电机模型各个单元中的各项系数例如  $K_A$ ,  $T_A$  等。

研究表明, 目前的频域拟合方法存在以下几个问题:

(1) 离散频率  $\omega$  的取值问题。 $\omega$  比较理想的取值是取研究系统的自然振荡频率, 但这需要进行特征根的计算, 计算量过大。因此, 一般取值在 0~10Hz。

(2) 传递函数的频率响应有两个量:幅值和相角, 而普遍采用的最小二乘法只能取一个作为目标函数, 一般取幅值。

### 2) 时域聚合法

时域聚合法基本思路是将等值机的微分方程组用隐式梯形法则展开后进行暂态计算, 并要求参数的选取使得等值发电机的出口潮流和同调发电机的出口潮流在相同的激励下, 尽可能相等。这样, 拟合的目标函数和我们暂态计算中的所求量是一致的, 并且等值化简的结果的有效性是先验的。

研究表明, 目前的时域拟合方法存在以下几个问题:

- (1) 难以用于发电机模型阶次太高的参数聚合。
- (2) 需要大量实测潮流数据, 但有时这些数据难以得到。
- (3) 只考虑了潮流没考虑暂态。

### 3) 算法的实现<sup>[17]-[27]</sup>

无论是频域聚合法还是时域聚合法, 都必须借助一定的算法来实现。实现聚合的算法有很多, 目前主要研究和应用的有:混沌优化法、对数方法、遗传算法、自适应参数聚合、最小二乘法、扩展卡尔曼滤波法、分段线性多项式函数法。

#### (1) 遗传算法

遗传算法是一种模拟生物进化机制的随机全局优化搜索算法, 具有很强的全局优化能力及鲁棒性。遗传算法是根据生物进化“适者生存”、“优胜劣汰”的原理, 将待求解问题转化成由个体组成的演化群体和对该群体进行操作的一组遗传算子, 通过参数编码、群体搜索、个体间的信息交换、个体变异、生成检测等迭代搜索过程所形成的一种全局优化算法。遗传算法应用于非线性系统参数聚合的基本思想是:首先, 通过仿真得到模型输出; 然后, 比较模型输出与实际输出的差异, 构成误差函数。根据误差函数, 通过遗传算法修正数学模型中的未知参数。当误差函数取极小值时, 数学模型的参数即是待聚合系统的参数。遗传算法是参数聚合的一种“随机全局寻优”算法, 可以克服传统优化方法的弱点, 对目标函数要求较少, 无论目标函数连续还是离散, 线性还是非线性, 是否可微, 一律可以解决。但其编程非常复杂, 其结果的准确性和可信度值得考虑。

#### (2) 扩展卡尔曼滤波法

卡尔曼滤波法是现代控制理论中的一种重要方法, 它的一个重要作用在于系

统的状态估计。一般情况下,卡尔曼滤波用于线性系统的状态,如果用于估计非线性系统的状态,则使用扩展卡尔曼滤波。扩展卡尔曼滤波同一般卡尔曼滤波的最大区别就是试图将非线性系统线性化,线性化以后在形式上同卡尔曼滤波无太多差别。一般来说,扩展卡尔曼滤波不是最优的,实际上可以把它作为一种限制复杂性的滤波器。它被限定成具有与线性滤波器类似的结构形式。由于使用了线性逼近,这种滤波器有可能发散。这种方法多用于状态估计,而且其初值的选取很困难。

### (3) 神经网络

利用神经网络进行聚合,一般都是预先规定网络结构,然后通过学习系统的输入、输出,按聚合的目的,使要求的误差函数达到最小,进而归纳出隐含在系统输入输出中的关系,完成系统聚合。

神经网络有很强的自适应性,能趋近任何非线性映射,用于参数聚合有很多优点。但是对于大型电网来说要获得神经网络所必须的大量样本很困难,而且基于神经网络的聚合从本质上讲属于“黑箱”聚合,其对被聚合系统输入输出关系的拟合很难直接看出其物理意义所在,并且其运算代价较高。

### (4) 最小二乘法

最小二乘法是高斯在解决天体运动轨道问题时提出的,由于这种方法具有计算原理简单,不需要随机变量的任何统计特性,自60年代后期以来,已得到广泛应用。从计算方法讲,既可以离线计算,又可以在线计算,并可以在非线性系统中扩展为迭代计算。从计算的数学模型看,可以用于参数模型估计,也可以用于非参数模型估计,并且经过适当的状态滤波处理后,可以从离散系统模型推广到连续系统模型应用。

经过几十年的发展,最小二乘参数辨识方法已经是工程中常用的辨识方法,比较成熟,适用范围广泛。它包括最小二乘法、增广最小二乘法、广义最小二乘法、辅助变量法和相关二步法等。其中最小二乘法是最基本的,也是应用最为广泛的一种方法。

## 1.3.2 感应电动机群参数聚合方法

电力综合负荷是电力系统的重要组成部分,其中感应电动机是最主要的动态成分。因此,在电力系统仿真计算中,感应电动机模型是最常用的动态负荷模型。电力系统实际综合负荷由为数众多且特性各异的用电设备组成,综合负荷的结构及特性都非常复杂,具有时间上的随机性和地域上的分散性等特点。因此在使用感应电动机模型描述电力系统的实际综合负荷时,有以下两个关键问题必须解决:

首先是模型参数问题。目前，在使用感应电动机模型时，不管实际负荷的具体构成成分如何，通常都是采用所谓“典型参数”。研究表明，“典型参数”的感应电动机模型无法准确地描述实际综合负荷。解决这一问题的可行和有效的办法是基于现场实测综合负荷记录( $\{\tau, i(\tau), u(\tau)\}$ 序列)的总体聚合建模<sup>[28][29]</sup>。该方法采用总体测辨方法，用大量的现场实测和动模实验综合负荷数据，在对感应电动机参数进行动态聚合的基础上，深入且全面地研究感应电动机模型的综合描述能力，从而建立一个改进后的“广义感应电动机模型”。

其次是模型的覆盖能力问题，亦即在一定现场负荷记录条件下所获得的模型是否具有异时异地的适应性。研究表明，由于综合负荷特性的异常复杂性，当综合负荷组成结构不同时，其感应电动机模型的参数可能有很大的差别，模型参数具有分散性的特点。因此，基于某单一现场负荷记录所获得的模型无法描述不同时间和不同母线的综合负荷。解决此问题的一个有效途径是基于同一物理综合负荷在所能获得的不同时间的现场实测负荷记录的综合聚合建模。但由此带来的主要问题是，随着负荷记录个数的增加，综合聚合所需时间可能无法满足实际应用的要求。

## 1.4 电力系统机电暂态数字仿真

电力系统数字仿真是在数字计算机上，为电力系统的物理过程建立数学模型，并用数学方法求解以进行实验研究的过程。数字仿真可按模型中物理量与实际系统的物理量间时间尺度的关系分为实时仿真和非实时仿真。如果模型与实际系统中的时间比例系数为1:1，即模型中的动态与实际系统中的动态以相同的速度进行，这种仿真为实时仿真；如果这一比例系数不等于1:1，则为非实时仿真，一般用于离线仿真计算。

目前，电力系统离线仿真软件，对不同的动态过程，采用不同的仿真方法。主要有电磁暂态过程仿真、机电暂态过程仿真和中长期动态过程仿真三种。由于本文主要分析的是机电暂态过程，因此主要介绍这种仿真过程。

机电暂态过程的仿真，主要研究电力系统受到大扰动后的暂态稳定和受到小扰动后的静态稳定性能。其中暂态稳定分析是研究电力系统受到诸如短路故障，切除或投入线路、发电机、负荷，发电机失去励磁或者冲击性负荷等大扰动作用下，电力系统的动态行为和保持同步稳定运行的能力。校验和分析运行中电力系统的稳定性能，为确定临界传输功率极限和为制定稳控措施提供依据。静态稳定分析是研究电力系统受到小扰动后的稳定性能，为确定输电系统的输送功率，分析静态稳定破坏和低频振荡事故的原因，选择发电机励磁调节系统、电力系统稳

定器和其他控制调节装置的型式和参数提供依据。

电力系统机电暂态过程仿真的数学模型可写为：

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, t) \\ 0 = g(x, y) \end{cases} \quad (1-2)$$

式中  $x$  表示元件的状态变量, 由机电暂态仿真应考虑的各种动态元件决定;  $y$  表示电力系统运行变量。微分方程表示电力系统动态元件特性, 是系统的状态方程; 代数方程表示电力系统静态元件特性, 是系统的网络方程。

电力系统机电暂态仿真的算法就是联立求解该微分方程式组和代数方程式组, 以获得物理量的时域解。微分方程组的求解方法主要有隐式梯形积分法、改进欧拉法、龙格—库塔法等, 其中隐式梯形积分法由于数值稳定性好而得到越来越多的应用。代数方程组的求解方法主要有适用于求解线性代数方程组的高斯消去法和适用于求解非线性代数方程组的牛顿法。按照微分方程和代数方程的求解顺序可分为交替解法和联立解法。

目前, 国内常用的机电暂态仿真程序是电力系统分析综合程序(PSASP)和中国版 BPA 电力系统分析程序。国际上常用的有美国 PTI 公司的 PSS/E, 美国 EPRI 的 ETMSP, 以及国际电气产业公司开发的程序如: ABB 的 SYMPOW; SIEMENS 的 NETOMAC 也有机电暂态仿真功能, 本文仿真所采用的就是 ETMSP 软件。

## 1.5 本文所做工作

本文作者在论文期间所做的工作主要是, 提出适用于现有动态等值程序中详细发电机模型以及负荷中感应电动机群参数聚合的实用算法, 使动态等值精度满足系统机电暂态仿真试验的要求。本文结合本课题组现有的动态等值程序, 参考国内外相关文献, 就现行的动态等值过程提出了一种实用策略。简单来说, 论文期间所作的工作主要是:

1. 编写一套基于频域法的同调发电机组参数聚合方法的程序, 通过理论和实际仿真效果, 发现该方法对同调发电机聚合较复杂, 对于大系统, 等值时间较长等问题。并针对这些问题提出基于加权法的参数聚合的实用方法, 同时结合 IEEE10 机 39 节点系统及华中系统的等值, 测试其实际效果, 并给出分析结果。
2. 根据感应电动机群等值研究现状, 提出了基于加权法感应电动机群的参数聚合方法, 并应用到配电网感应电动机群的参数聚合中。
3. 完善本课题组开发的一套电力系统动态等值软件, 增加对发电机详细模型的分析, 加入了励磁系统模型、PSS 模型、原动机及其调速器模型。

## 第二章 同调法动态等值的基本原理

### 2.1 引言

所谓同调，是指：当在研究系统施加扰动时，外部系统中会有一些发电机其摇摆特性相似或相同。这种现象叫同调，这些发电机称作同调机群。同调等值法分为以下三大步，即：

1. 划分研究区域和外部区域，判别外部区域的同调发电机群。
2. 同调发电机母线化简、网络化简。
3. 同调发电机动态参数聚合，得到聚合后等值机参数。

对于同调等值法中同调判别、网络化简、同调机群的聚合，每一步都对应有多种不同的算法。现简述如下：

#### 2.1.1 同调机群的判别方法

##### 1. 基于特征值的分类法

特征分类法的步骤为：①建立训练集；②从模型数据、静态工况数据和瞬间动态数据中抽取能反映同调性的特征量，为减少积分计算量和分类的困难，这种分类法很少采用时间响应曲线数据；③构造分类函数或人工智能手段；④对被试样本的特征参数进行分类，识别同调群。

典型的特征量包括降阶导纳阵、故障瞬间和故障清除前后的信息、初始加速度、机电距离等。常用的分类工具有识别函数、人工神经网络、决策树等。

##### 2. 基于线性化系统矩阵的解析法

系统矩阵  $A$  的每个实特征值对应一个单调失稳模式，而每一对共轭特征值对应一个振荡模式。基于系统阵的特征值分析，可以用特征向量或参与因子来确定机组和模式的相关性。全维特征分析的“维数灾”问题可以用选择模式法来避免。

##### 3. 基于线性化系统矩阵改进的解析法

对系统阵进行适当的变换，通过系统阵各自由度之间的耦合度来识别紧耦合的机组。其中包括利用格纳姆矩阵的  $\epsilon$ -相关发电机的识别、基于雅可比矩阵的 Epsilon 分解、基于系统矩阵元素耦合关系的模糊识别等。

虽然理论上同调的划分方法有以上许多种，但是实际上，同调聚合方法的选择对降阶模型的动态行为影响不大。

### 2.1.2 同调机群的聚合算法

- 1、*Terminal-bus method*: 由 Podmore 提出的终端母线聚合算法, 即 DYNEQ 中使用的算法;
- 2、*Internal-node method*
- 3、*Impedance-compensated method*
- } 以上两种方法在文献[30]中作了详细的论述, 此处略。

### 2.1.3 聚合时发电机模型的选择

1. 经典模型: 同调机群发电机用一台等值经典发电机模型替代。
2. 详细模型: 如果在一个同调机群中一些或所有发电机具有相似的控制系统, 就可聚合为一个详细的发电机模型。并具有等值励磁机、稳定器、调速器。

### 2.1.4 网络化简

对不同的系统状况可采用不同的网络化简方案。化简过程大致可分为两步:

第一步: 等值发电机接入系统, 移走相应的同调机群, 修正网络, 以保持静态潮流的平衡。

第二步: 用降阶技术化简网络, 自动确定要消去的母线。

## 2.2 同调等值的原理和步骤

2.1 节列出了动态等值各步骤中可用的多种方法以及现有动态等值程序采用的方法, 本节, 就各步的原理作一具体论述。

### 2.2.1 同调机组的判别

为了快速正确地判别同调机组, 通常作基本假定, 并对系统元件作必要简化, 这些假定为:

- 1) 同调组的划分应与扰动大小无关, 从而可把系统线性化, 化为增量形式的方程组表示, 用它的动态行为判别同调;
- 2) 同调组的划分与发电单元的细节描述无关, 故同调判别时发电机可用经典二阶模型来描写, 忽略励磁系统和原动机、调速器的动态;
- 3) 同调组的划分与负荷模型关系较小, 则同调判别时负荷化为等值阻抗描述, 并入导纳阵;

4) 设系统有高  $X/R$  比值, 从而有功与无功潮流可近似解耦计算。

在上述假定基础上, 系统大大地简化, 有利于快速作同调机组判别, 并仍能满足正确判别同调机组的要求。

具体判别同调机组的方法有多种, 本文采用的方法为格纳姆矩阵的判别方法。这里涉及到系统模型的建立、扰动的模拟、同调机组的判别准则及对该判别方法的简要介绍。

#### A. 系统模型的建立

设系统有  $N$  台发电机, 用经典二阶模型描写, 则线性化转子动态方程为 (p.u.):

$$\begin{cases} M_j \frac{d\omega_j}{dt} = P_{mj} - P_{ej} - D_j(\omega_j - 1) \\ \frac{d\delta_j}{dt} = \omega_j \end{cases} \quad (2-1)$$

发电机等值电磁回路如图 2-1 所示, 设  $X'_d$  后的内电势为  $E' \angle \delta$ ,  $E'$  为定值,  $P_G$ 、 $Q_G$  为由发电机内电势节点向网络注入的有功和无功功率, 内电势节点可看作 “PV” 节点, 而  $X'_d$  可并入节点导纳阵, 但有一台发电机为平衡机, 其内电势节点作 “ $P\delta$ ” 节点。

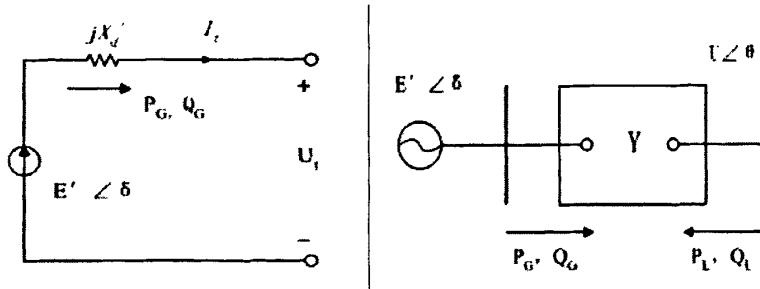


图 2-1 发电机等值电路图

图 2-2 网络示意图

设负荷化为等值阻抗, 并入导纳阵, 从而负荷节点正常运行时注入网络的有功和无功功率  $P_L$ 、 $Q_L$  为零。

网络节点导纳阵在并入发电机暂态电抗  $X'_d$  及负荷等值阻抗  $Z_L$  后设为  $Y$ , 如图 2-2 所示。则根据电力系统牛顿法潮流计算的数学模型可知, 网络线性化后可采用雅可比矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_G}{\partial \delta} & \frac{\partial P_G}{\partial \theta} & V \frac{\partial P_G}{\partial V} \\ \frac{\partial P_L}{\partial \delta} & \frac{\partial P_L}{\partial \theta} & V \frac{\partial P_L}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_L}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_L}{\partial \theta} & V \frac{\partial Q_L}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

若设系统有高  $X/R$  比值, 则有功及无功潮流可近似解耦, 从而有:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \Delta P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_G}{\partial \delta} & \frac{\partial P_G}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial \delta} & \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} H_{GG} & H_{GL} \\ H_{LG} & H_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$\Delta Q_L = \left[ V \frac{\partial Q_L}{\partial V} \right] \left[ \frac{\Delta V}{V} \right] \quad (2-4)$$

若再进一步假定在  $H$  阵元素计算时, 近似取  $V=V_0$  或任意母线  $i$  上  $V=1p.u.$  及  $\theta=\theta_0$  或  $\theta=0^\circ$ ; 而  $E, \delta$  取潮流计算相应的值, 则  $H$  阵为定常, 且 (2-4) 可不必计算, 因  $V$  已作近似而为已知, 从而系统网络方程由 (2-3) 给出, 且  $H$  为定常, 全系统模型由 (2-1) 及 (2-3) 构成, 从而大大地简化了系统模型及计算工作量。

### B. 扰动的模拟

扰动模拟有以下四种—短路故障、断线故障、切机、切负荷, 并用  $\Delta P_i$  和  $\Delta P_m$  来近似模拟施加的扰动。正常无扰动时  $\Delta P_i = \Delta P_m = 0$ , 各变量的增量均为零; 系统有大扰动时, 用  $\Delta P_i$  和  $\Delta P_m$  来模拟扰动, 然后用数值稳定性良好的隐式梯形积分法求解系统微分方程, 可得到转子摇摆曲线  $\Delta \delta(t)$ , 并据之作同调判别。

### C. 同调组的判别准则

如果发电机满足:

$$\max_{t \in [0, \tau]} |\Delta \delta_i(t) - \Delta \delta_j(t)| \leq \varepsilon, \varepsilon \geq 0 \quad (2-5)$$

则发电机  $i, j$  是相关的; 类似地, 如果一群发电机彼此之间是相关的, 则这群发电机是相关发电机群。如果式中  $\varepsilon = 0$ , 发电机是完全相关的; 如果  $\varepsilon > 0$ , 则发电机是  $\varepsilon$ -相关的。

### D. 基于格纳姆矩阵的相关发电机判别<sup>[31]</sup>

根据线性系统理论, 线性系统可表示为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2-6)$$

式中  $x \in R^{2n-1}$ ;  $u \in R^k$ ;  $A \in R^{(2n-1) \times (2n-1)}$ ;  $B \in R^{(2n-1) \times k}$ 。这样  $A$  的秩为  $2n-1$ ,  $A$  为满

秩矩阵。在  $\tau$  时的格纳姆可定义  $W_\tau^2$ ：

$$W_\tau^2 \stackrel{\Delta}{=} \int_0^\tau e^{At} BB^T e^{A^T t} dt \quad (2-7)$$

在  $\tau$  时的可达性状态集合可由下式给出：

$$S_\tau = \{x \mid x = \int_0^\tau e^{A(t-t')} Bu(t) dt, \int_0^\tau \|u(t)\|^2 dt \leq K^2\} \quad (2-8)$$

由于式(2-6)中的  $A$  为满秩矩阵，所以确保了  $\tau$  时存在唯一的可达性格纳姆矩阵  $W_\tau^2$ 。于是  $S_\tau$  还可以用半径为  $K$  的球体在  $W_\tau$  映射下的集合表述：

$$S_\tau = \{x \mid x = W_\tau p, \|p\| \leq K\} \quad (2-9)$$

用式(2-6)的稳态解  $W^2 = \{W^2 \mid AW^2 + W^2 A^T = -BB^T\}$  近似代替  $W_\tau^2$ 。对于任何  $x(t), \exists p(t), \|p(t)\| \leq K, \forall t \in [0, \infty]$ , 使得  $x(t) = Wp(t)$ 。

在格纳姆的求取过程中，需要利用一个正交相似变换将矩阵  $A$  转换到 Schur 形式。但由于  $A$  是一个定常矩阵，是不随预想事故的改变而改变的，所以当需要对一个偶然事故集中的多个故障进行分析时，只需在第一种故障情况下将其转化到 Schur 形式，后面的故障则不必进行。因此基于格纳姆矩阵进行相关发电机的识别，在对多个故障进行暂态分析时，可大大节省计算时间，特别适合应用于大电力系统的动态等值<sup>[32][33]</sup>。

## 2.2.2 同调发电机母线的化简

在这里我们将根据物理的网络元件上所进行的一系列操作来描述基于相关的等值过程。这种过程的物理解释被用来作为建立一个有效算法的基础，它也有助于深入理解暂态仿真程序中，应该怎样完成等值。本文所采用的等值方法就是根据这种物理解释来进行的。

该过程由四步组成，第五步可以任意选取。如果采用这一步将得到进一步的简化，但准确性将有所降低。下面依次加以介绍。为了便于解释，以图 2-3 的网络为例，其中发电机端母线 1、2 和 3 已知是相关的，并准备以一条母线 4 代替它们。

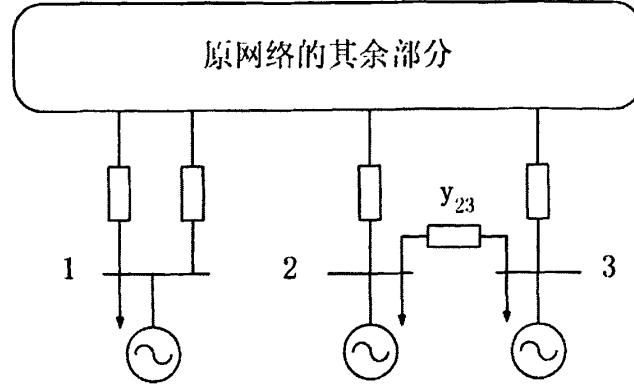


图 2-3 原系统

步骤 1: 先定义等值母线电压  $\dot{U}_t$ , 一般可取  $\dot{U}_t$  的幅值为相关发电机母线群各电压幅值的平均值,  $\dot{U}_t$  的相位也未母线群各电压相位的均值, 即

$$\begin{cases} |\dot{U}_t| = \frac{\sum_{k=m+1}^n |\dot{U}_k|}{n-m} \\ \theta_t = \frac{\sum_{k=m+1}^n \theta_k}{n-m} \end{cases} \quad (2-10)$$

式中,  $\theta_t$ ,  $\theta_k$  为相应母线电压的相位, 各量均为稳态值。然后通过具有复变比的理想变压器把相关发电机母线接到等值母线上。其中, 复变比  $a_k$  取值为

$$a_k = \frac{\dot{U}_k}{\dot{U}_t} \quad (2-11)$$

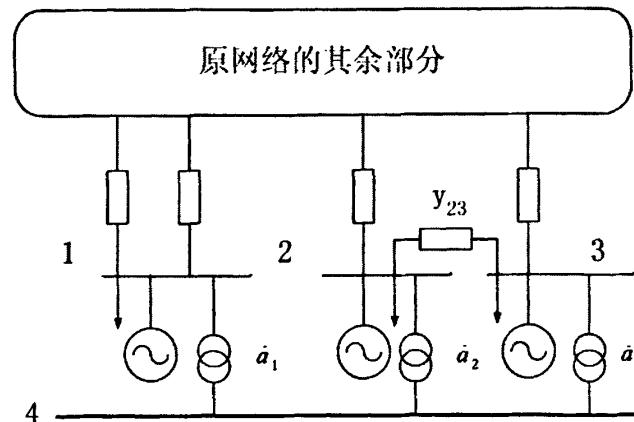


图 2-4 引入移相变压器和等值母线

步骤 2: 用母线 2 和 3 上的对地导纳代替母线 2 和 3 之间的支路

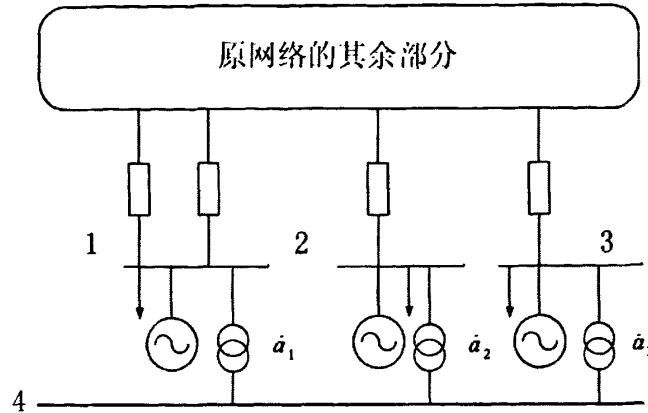


图 2-5 消去同调母线间关联支路

步骤 3：把原母线上的发电，负荷和对地导纳转移到等值母线上。其中，将同调母线上的负荷分别按定阻抗、定电流、定功率三类移到母线 4 上，分类合并，仍作综合负荷处理。

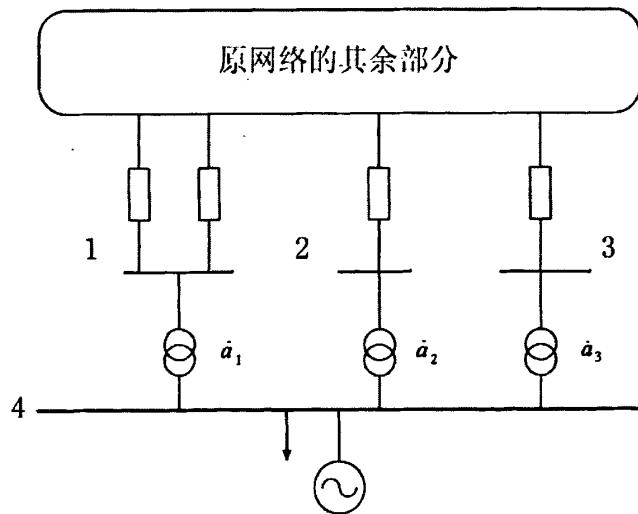


图 2-6 负荷和发电量移植

步骤 4：用理想变压器同原来支路相串联的方式，把原发电机端母线消去。但这些支路中都含有移相变压器，相应的节点导纳矩阵是不对称的。暂态稳定程序通常不考虑系统中存在移相变压器，所以只适应对称的节点导纳阵，故往往还需要将移相变压器近似消去，这就要进行步骤五的工作。

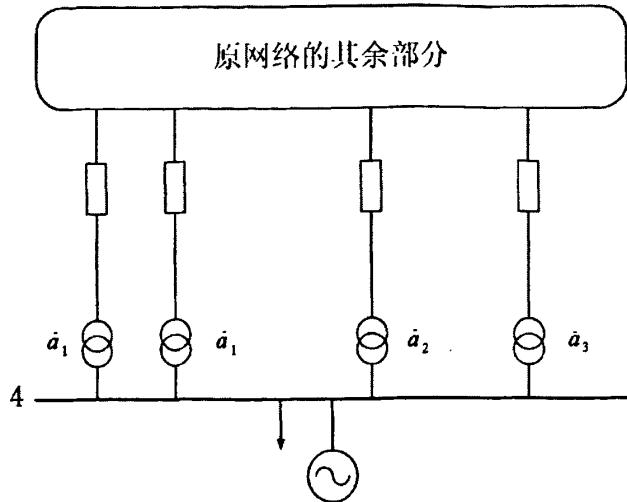
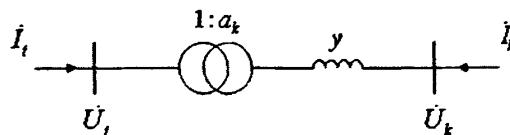


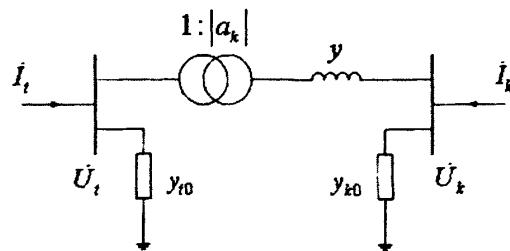
图 2-7 同调母线消去后的系统

步骤 5：消去移相变压器。设母线  $t-k$  间有移项变压器如图 2-8 (a) 所示，要求将其等值为图 2-8 (b) 所示电路，使两端电压、电流无稳态偏差，变压器化为非移相变压器。根据两端约束条件，确定  $y_{t0}$  和  $y_{k0}$  两条对地支路的值，理论分析可知  $y_{t0}$  和  $y_{k0}$  在动态中是不定常的，近似为定常值后会引起一定误差。根据等值前后保留系统稳态偏差为零可计算得（设  $a_k = |a_k| \angle \theta_k$ ）

$$\begin{cases} y_{k0} = \frac{\dot{U}_{t0}}{\dot{U}_{k0}} y |a_k| (1 \angle 0 - 1 \angle \theta_k) \\ y_{t0} = \frac{\dot{U}_{k0}}{\dot{U}_{t0}} y |a_k| (1 \angle 0 - 1 \angle \theta_k) \end{cases} \quad (2-12)$$



(a) 消去前



(b) 消去后

图 2-8 移相变压器消去示意图

这一步是任选的,在这一步中,用对地并联补偿支路来代替理想变压器的相位移。这些支路的计入,是为了保持支路两端流出的功率不变。当偏离了基本潮流时,新的网络只是一种近似,但由于在暂态稳定程序中没有移相器,所以为了适合暂态稳定程序,这一步是必要的。

显然,上述的简化过程只影响接到相关群里的母线上去的那些支路,所以在原有母线上的潮流平衡条件保持不变,而在等值母线上建立了新的潮流平衡条件。

### 2.2.3 系统网络化简

网络的化简过程中,需要保留故障节点或支路,等值发电机和等值母线,其余的负荷母线都可以消去。

在通常的暂态稳定程序中,常把负荷作为具有恒定阻抗、恒定电流和恒定功率分量的非线性负荷来处理,在动态等值中,为了使等值网络能在相同条件下产生与原系统具有相近形式的振荡曲线,等值负荷的形式应该和暂态稳定研究中所用的负荷特性一致。这里负荷采用依从于电压的综合负荷模型,即 ZIP 模型,它一般可以用下式表示:

$$P_{Lj} = a_{s_j} + a_{I_j}V_j + a_{Z_j}V_j^2 \quad (2-13)$$

$$Q_{Lj} = b_{s_j} + b_{I_j}V_j + b_{Z_j}V_j^2 \quad (2-14)$$

式中:

$P_{Lj}, Q_{Lj}$ : 有功负荷和无功负荷;

$V_j$ : 母线电压值;

$a_{s_j}, b_{s_j}$ : 恒功率系数;

$a_{I_j}, b_{I_j}$ : 恒电流系数;

$a_{Z_j}, b_{Z_j}$ : 恒阻抗系数;

$j$ : 母线编号。

计算具有非线性负荷的等值网络采用的是电流穴简化法<sup>[34]</sup>,该法是把高斯消元法推广到处理非线性负荷,这时是用恒定电流沟近似表达负荷的。即把被消去负荷的恒阻抗部分、恒电流部分和恒功率部分均转化成电流。此时节点导纳方程可写为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{I}_{2z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{I}_{2s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{I}_{2s} \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

式中,下角标 1 表示保留母线,下角标 2 表示被消去的母线,  $\dot{I}_1$  是保留母线上的

综合注入电流（含负荷）。此时把被消去负荷母线上负荷的恒阻抗部分、恒电流部分和恒功率部分的电流  $I_{2Z}$ 、 $I_{2I}$  和  $I_{2S}$ （流出为正方向）在式（2-15）右侧单独表示出来。

应用高斯消去给出了一组简化方程：

$$\dot{I}_1 = Y'_{11} \dot{V}_1 + \dot{I}'_{2Z} + \dot{I}'_{2I} + \dot{I}'_{2S} \quad (2-16)$$

式中，等值导纳矩阵是：

$$Y'_{11} = Y_{11} - Y_{12} Y_{22}^{-1} Y_{21} \quad (2-17)$$

保留母线上的等值电流的恒阻抗、恒电流和恒功率分量分别是：

$$\dot{I}'_{2Z} = -Y_{12} Y_{22}^{-1} \dot{I}_{2Z} = -Y_{12} Y_{22}^{-1} ([\dot{V}_2]^{-1} \cdot \dot{S}_{2Z}) \quad (2-18)$$

$$\dot{I}'_{2I} = -Y_{12} Y_{22}^{-1} ([\dot{V}_2]^{-1} \cdot \dot{S}_{2I}) \quad (2-19)$$

$$\dot{I}'_{2S} = -Y_{12} Y_{22}^{-1} ([\dot{V}_2]^{-1} \cdot \dot{S}_{2S}) \quad (2-20)$$

其中， $[\dot{V}_2]$  是消去节点电压共轭的对角矩阵。将等值电流各分量乘以表示保留节点电压共轭的对角矩阵  $[\dot{V}_1]$ ，可把各电流分量转化成相应的复共轭功率。

## 2.2.4 同调发电机的参数聚合

在同调发电机的参数聚合中，频域拟合法是一种适用于发电机详细模型参数聚合的经典方法<sup>[35]</sup>。本课题组为西北电网公司开发的动态等值软件以及中国电科院现有的动态等值程序中同调发电机的动态聚合主要采用了这种算法。现对该算法作一简单介绍。

对同调发电机作动态聚合时作如下假定：

1. 设同调发电机有相同的角速度  $\omega$ ；
2. 设同调发电机均移置到等值母线  $t$  上；
3. 聚合前、后发电机输入总机械功率和输出总电磁功率不变；
4. 发电机及其控制系统的传递函数可分为若干环节分别聚合，且线性部分和非线性部分可分别聚合。通常将发电机分为五个环节，并依次作动态聚合，这五个环节为：发电机转子运动方程；调速器和原动机；发电机电磁回路；发电机励磁系统；发电机 PSS 装置。

求解的基本思路是先选择一个在结构上与相关发电机相同的等值模型，然后调整参数使该环节的频域传递函数和相关机组该环节综合频域传递函数在离散的频域上以某种精度相近似。这种近似可以用离散频率域上两个传递函数之差的

平方和最小来衡量。

其等值步骤：1) 确定各待聚合控制器传递函数的聚合函数  $G_{\Sigma}(s)$ ，一般取各传递函数的加权和；2) 选择等值控制器的类型，设其传递函数为  $G^*(s)$ ；3) 选择适当的外部激励函数，计算 0.01Hz—10Hz 扫描频段内  $G^*(s)$  和  $G_{\Sigma}(s)$  的响应；4) 优化  $G^*(s)$  中的参数，使下列目标函数值最小：

$$J = \sum_{\omega_i} \frac{|G_{\Sigma}(j\omega_i) - G^*(j\omega_i)|^2}{|G_{\Sigma}(j\omega_i)|^2} \quad (2-21)$$

在这一过程中，对发电机各个环节的目标函数寻优实际上是通过寻求多维无约束目标函数  $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$  的极小值来确定参数  $X$ 。本文采用的是模矢搜索方法对发电机各个环节的参数求解，具体步骤如下：从给定的基点  $X_{(1)}$  出发，分别沿每个坐标方向以步长  $D$  进行探索，以目标函数值最小的点为新矢点，并成为第二个基点  $X_{(2)}$ 。由  $X_{(1)}$  到  $X_{(2)}$  构成一个模矢。这是使目标函数得以最有利的方向移动。因此可略去这一基点的探索，把第一个模矢加长一倍，设端点为  $T_{20}$  是第二个模矢的终点， $X_{(2)}$  到  $T_{20}$  就是第二个模矢。然后在  $T_{20}$  附近进行如上搜索，得出新的最有利的第三基点  $X_{(3)}$ 。接着继续探索和加速，如果搜索移动进行到某一步得不到新的下降点，则应缩小步长以进行更精细的探索。当步长小于给定的误差限，即可得到满足精度要求的结果。其流程图如图 2-9 所示。

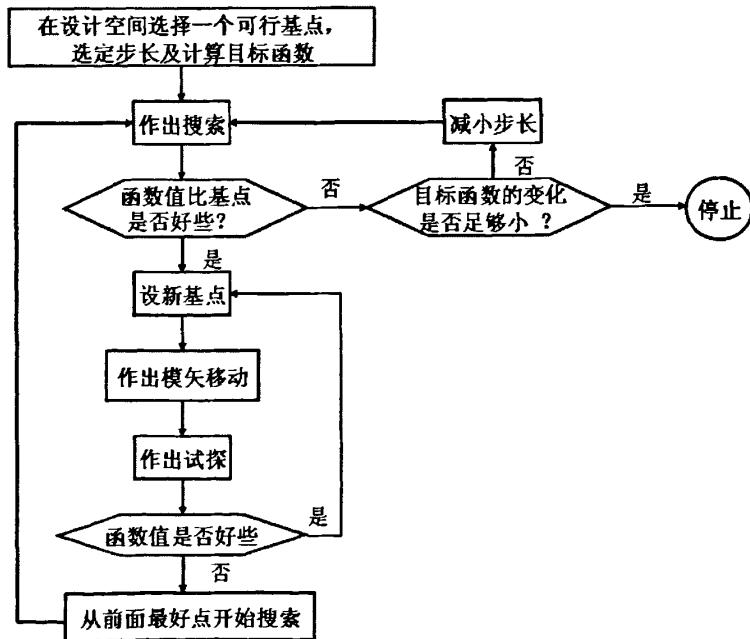


图 2-9 模矢搜索法流程图

频域拟合法的优点是：物理透明度大；等值系统元件模型均为实际电力系统元件模型，可直接用于暂态稳定分析；适应系统的非线性和大扰动，并可适用于大规模系统等值；动态等值精度控制较方便，实际应用表明动态等值的效果良好。其缺点是：同调发电机聚合较复杂，对于大系统，等值时间较长。

## 2.3 小结

同调法动态等值是进行大规模电力系统的离线暂态(大扰动)稳定分析时采用的一个比较经典也比较有效的动态等值方法。同调法动态等值分为以下三步：①划分研究区域(或系统)和外部区域(或系统)，判别外部区域的同调发电机群；②同调发电机母线化简、网络化简；③同调发电机动态聚合，得聚合后等值机参数。本章就同调等值各步的等值原理进行了论述，并对同调发电机参数聚合的频域法作了简单的介绍，分析其优缺点，为下文对发电机参数聚合方法的改进提供了依据和目标。

## 第三章 基于加权法的等值发电机参数聚合

### 3.1 引言

国内现有的动态等值程序中同调发电机的动态聚合主要采用了频域聚合的算法。这种方法假设发电机及其控制系统的传递函数可分为若干环节分别聚合，且线性部分和非线性部分可分别聚合。在这种假设下，对等值机各参数进行优化，使等值机传递函数与该同调机群中各单机传递函数的集合函数有最接近的频域特性。但由于同调发电机聚合较复杂，因此对于大系统，等值时间较长。针对这一情况，本文提出了基于加权法的发电机详细模型参数的聚合方法。

该方法将同调发电机群等值为一个发电机单元模型。在扰动期间，该发电单元与原相关群有相同的速度、电压、总机械功率和总电功率。

对发电机详细模型的参数聚合可以分为 5 个环节，分别是发电机转子运动方程，发电机电磁回路，发电机励磁系统，电力系统稳定器以及调速器和原动机环节。各环节的输入输出量是：

转子动态：输入  $P_m - P_e$ ，输出  $\omega$ ；

原动机及调速器：输入  $\omega$ ，输出  $P_m$ ；

同步发电机(或称发电机电磁回路)：输入  $\dot{U}_r$ ，输出  $\dot{I}_r$ ；

励磁调节系统：输入  $\dot{U}_r$ ，输出  $e_{FD}$ ；

电力系统稳定器(PSS)：输入  $\omega$  或  $P_e$ ，输出  $U_{PSS}$ 。

参数聚合的前提和假定：

1. 设同调发电机有相同的角速度  $\omega$ ；
2. 设同调发电机均移置到等值母线  $t$  上；
3. 聚合前、后发电机输入总机械功率和输出总电磁功率不变。

### 3.2 详细发电机模型的参数聚合

设通过相关识别得知某个相关机群  $G = \{1, \dots, j, \dots, N\}$ ，其中包括  $N$  台相关发电机。

鉴于合成的等值机的容量为各台电机的容量(MVA)之和，即

$$S_G = \sum_{\forall j \in G} S_j \quad (3-1)$$

其中下标  $G$  表示等值机，于是我们可以导出等值发电机及其调节系统详细模型的参数。

### 3.2.1 转子动态参数聚合

假设发电机  $j$  摆摆方程为：

$$M_j \frac{d\omega_j}{dt} = P_{mj} - P_{ej} - D_j(\omega_j - 1), \forall j \in G \quad (3-2)$$

式中， $M_j$ 、 $D_j$ 、 $P_{mj}$  和  $P_{ej}$  分别为电机  $j$  的惯性时间常数、阻尼系数、原动机功率和电磁功率，各参数值均为以其自身额定容量  $S_j$  为基值的标幺值。为了写出以聚合后的等值机容量  $S_G$  为基值容量的等值机的摆摆方程，把式 (3-2) 改写为

$$\frac{S_j}{S_G} M_j \frac{d\omega_j}{dt} = \frac{S_j}{S_G} [P_{mj} - P_{ej} - D_j(\omega_j - 1)], \forall j \in G \quad (3-3)$$

将  $N$  台同调机运动方程相叠加，并计及一群内的各同调机转速相同（即  $\omega_j = \omega, \forall j \in G$ ）的假设，则得到

$$\sum_{\forall j \in G} \left( \frac{S_j}{S_G} M_j \right) \frac{d\omega}{dt} = \sum_{\forall j \in G} \left\{ \frac{S_j}{S_G} [P_{mj} - P_{ej} - D_j(\omega - 1)] \right\} \quad (3-4)$$

若合成等值机的转子运动方程为

$$M_G \frac{d\omega}{dt} = P_{mG} - P_{eG} - D_G(\omega - 1) \quad (3-5)$$

其中的参数应是以合成等值机容量  $S_G$  为基值容量时的等值机参数。于是可知

$$M_G = \frac{\sum_{\forall j \in G} S_j M_j}{S_G} = \frac{\sum_{\forall j \in G} S_j M_j}{\sum_{\forall j \in G} S_j} \quad (3-6)$$

$$P_{mG} = \frac{\sum_{\forall j \in G} S_j P_{mj}}{\sum_{\forall j \in G} S_j} \quad (3-7)$$

$$P_{eG} = \frac{\sum_{\forall j \in G} S_j P_{ej}}{\sum_{\forall j \in G} S_j} \quad (3-8)$$

$$D_{eG} = \frac{\sum_{\forall j \in G} S_j D_j}{\sum_{\forall j \in G} S_j} \quad (3-9)$$

即聚合后等值机的惯性常数、原动功率、电磁功率和阻尼系数（以聚合后等值机容量为基值）的标幺值，等于聚和前群内各台电机相应参数（以它们各自容量为基值）的标幺值的加权平均值。值得注意的是，聚合前后总惯性常数、总机械功率和总电磁功率的有名值并未改变。

### 3.2.2 发电机电磁回路参数聚合

当同步发电机采取双轴模型表示时，根据派克方程式可以推导出用运算导纳表示的电流方程式：

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Y_{dq}(s) \\ Y_{qd}(s) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{d0} \\ 0 \end{bmatrix} e_{FD} \quad (3-10)$$

其中  $i_d, i_q$  为纵轴和横轴分量电流，  $u_d, u_q$  为纵轴和横轴分量电压，  $e_{fd}$  为励磁电压，式中

$$Y_{dq}(s) = \frac{-(s^2 T_{d0}'' T_{d0}' + s T_{d0}' + 1)}{s^2 T_{d0}'' T_{d0}' X_d'' + s T_{d0}' X_d' + X_d} \quad (3-11)$$

$$Y_{qd}(s) = \frac{s T_{q0}' + 1}{s T_{q0}' X_q' + X_q} \quad (3-12)$$

则等值机的相应函数：

$$Y_{DQ}^*(s) = \frac{-(s^2 T_{d0}''* T_{d0}'* + s T_{d0}'* + 1)}{s^2 T_{d0}''* T_{d0}'* X_d''* + s T_{d0}'* X_d'* + X_d'*} \quad (3-13)$$

$$Y_{QD}^*(s) = \frac{s T_{q0}'* + 1}{s T_{q0}' X_q'* + X_q'*} \quad (3-14)$$

在同步发电机电磁回路聚合中，本文建议采用类似式 (3-6) ~ (3-9) 所示的加权法求取等值机的电抗和时间常数，即等值机的电抗为

$$X_G = \frac{\sum_{\forall j \in G} S_j X_j}{\sum_{\forall j \in G} S_j} \quad (3-15)$$

式中  $X_G$  为等值机电抗 (以已聚合后等值机的容量为基值), 可分别为等值机  $d$ 、 $q$  轴同步电抗、暂态电抗和次暂态电抗  $X_d$ ,  $X_q$ ,  $X_d'$ ,  $X_q'$ ,  $X_d''$ ,  $X_q''$ 。 $X_j$  为第  $j$  台相关发电机对应的参数 (以第  $j$  台机自身容量为基值的标幺值)。同样等值机  $G$  的时间常数可按下式计算:

$$C_G = \frac{\sum_{j \in G} S_j C_j}{\sum_{j \in G} C_j} \quad (3-16)$$

式中  $C_G$  为等值机时间常数, 包括等值机  $d$ 、 $q$  轴的开路暂态时间常数及开路次暂态时间常数  $T_{d0}'$ ,  $T_{q0}'$ ,  $T_{d0}''$ ,  $T_{q0}''$ 。 $C_j$  为第  $j$  台相关发电机对应的参数。

### 3.2.3 励磁系统参数聚合

励磁单元传递函数中, 每个单独的励磁系统用一个信号输入-输出框图表示, 如 IEEE-1 型励磁调节系统有如图 1 所示的框图<sup>[36]</sup>:

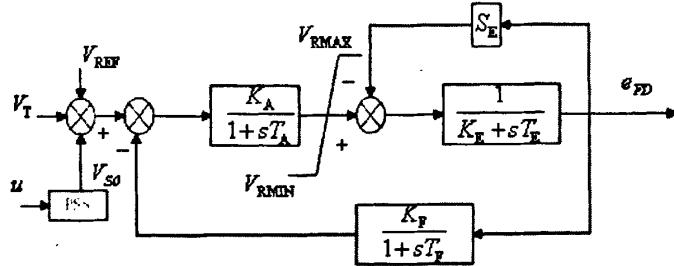


图 3-1 励磁单元传递函数

图中,  $K_A$ ,  $T_A$ ,  $K_E$ ,  $T_E$ ,  $K_F$ ,  $T_F$ ,  $V_{RMAX}$ ,  $V_{RMIN}$  分别为调压器的增益和时间常数, 励磁机的增益和时间常数, 调压器镇定回路的增益, 时间常数, 调压器的最大、最小输出;  $S_E$  为励磁机的饱和系数;  $e_{FD}$  为励磁机输出电压。则等值机具有相同的框图, 其参数也可按照加权平均的方法, 由式 (3-16) 求得。此时式中,  $C_G$  为等值机励磁系统参数, 包括各环节增益和时间常数,  $C_j$  为第  $j$  台相关发电机对应的参数。

### 3.2.4 电力系统稳定器参数聚合 (PSS)

PSS 有多种输入信号, 应对具有相同输入信号的 PSS 聚合, 亦即应仅对装设具有相同输入信号 PSS 的相关发电机群进行聚合。如果参与聚合的 PSS 的传递函数为

$$G_s(s) = \frac{sK_{Q0}T_{Q0}}{1+sT_{Q0}} \left[ \frac{1+sT_{Q1}}{1+sT_{Q2}} \cdot \frac{1+sT_{Q3}}{1+sT_{Q4}} \right] \quad (3-17)$$

式中,  $K_{Q0}$ ,  $T_{Q0}$  分别为电力系统稳定器的增益和复归时间常数,  $T_{Q1}$ ,  $T_{Q2}$ ,  $T_{Q3}$ ,  $T_{Q4}$  为相位补偿环节的时间常数。则等值机的 PSS 有相同的传递函数, 其参数也可按照加权平均的方法, 由式 (3-16) 求得。

### 3.2.5 原动机调速系统参数聚合

由于水轮机和汽轮机的参数和传递函数差距很大, 不可能有一个统一的模型拟合由水轮机和汽轮机所组成的相关群的频率特性。所以当同调的发电机组中既有水轮机又有汽轮机的时候, 将水轮机单元组成一个等值水轮机单元, 汽轮机单元组成另一个等值汽轮机单元, 并把两者接到同一条母线上。

由图 2 的简化调速器和原动机系统的框图可得传递函数:

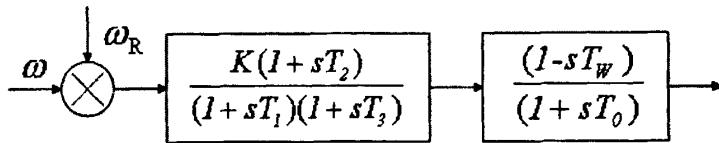


图 3-2 调速器和原动机传递函数

水轮机:

$$G_G(s) = \frac{K(1+sT_2)(1-sT_w)}{(1+sT_1)(1+sT_3)(1+s\frac{T_w}{2})} \quad (3-18)$$

汽轮机:

$$G_G(s) = \frac{K(1+sT_2)}{(1+sT_1)(1+sT_3)(1+sT_4)} \quad (3-19)$$

式中  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_w$ ,  $T_4$  分别为调速系统增益、调速器时间常数、倒阀时间常数、伺服时间常数、水锤效应时间常数和蒸汽容积时间常数, 则等值机参数亦可由式 (3-16) 求得。式中,  $Z$  为等值机原动机调速器各环节的增益及时间常数;  $Z_j$  为第  $j$  台相关发电机对应的参数。

### 3.3 算例分析

运用本文提出的参数聚合的加权法, 分别计算 IEEE10 机 39 节点系统<sup>[36]</sup>和华中系统的等值发电机参数 (均未考虑 PSS 模型), 并与实际系统进行仿真比较。

同时以一个简单的配电网络为例，验证该方法对感应电动机群等值的有效性。

### 3.3.1 IEEE 10 机 39 节点系统算例<sup>[37]</sup>

该系统中，发电机采用四阶模型，选取故障为 0.5s 时在 26-29 线路发生三相短路，然后分别在 0.58s 时切除故障（不失去稳定），0.6s 时切除故障（失去稳定）。系统网络结构见附录所示。

利用基于格纳姆矩阵的发电机相关识别程序<sup>[38]</sup>识别出三组相关机群（G2，G3；G4，G6，G7；G8，G10），表 3-1 列出一组相关机群（G2，G3）以及利用频域拟合法和加权等值法得到的等值发电机参数。

表 3-1 发电机参数

发电机参数	原系统		频域法	加权法
	G2 机	G3 机	等值机	等值机
$X_d$	1.48	1.25	1.35	1.36
$X_q$	1.41	1.19	1.29	1.30
$X'_d$	0.32	0.27	0.29	0.29
$X'_q$	0.35	0.27	0.30	0.31
$T'_{d0}$	6.56	5.70	6.05	6.13
$T'_{q0}$	1.50	1.50	1.50	1.50
$S_b$ (MVA)	20	20	40	40

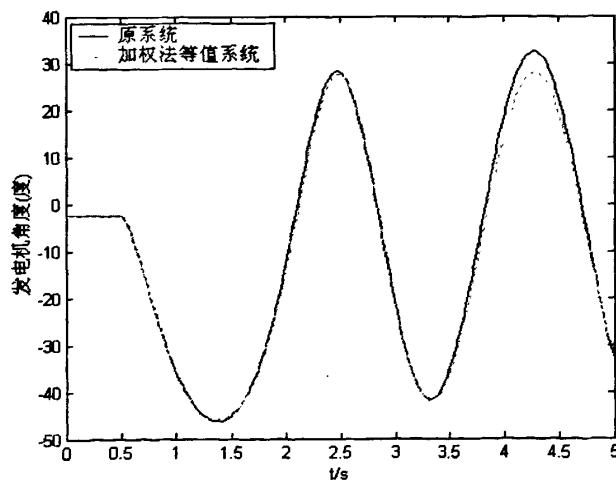


图 3-3 功角曲线图

利用ETMSP<sup>[39]</sup>，对原系统及加权法等值系统进行仿真。在该故障下，图 3-3 为系统未失去稳定时，原系统与加权法等值系统的功角曲线比较图，其中曲线均为 G5 号发电机的功角曲线，参考机为 G9 号发电机。由图 3-3 可以看出，在 5s 的仿真时间内，加权法得到的等值系统和原系统的发电机功角曲线比较近似，表明等值效果良好。

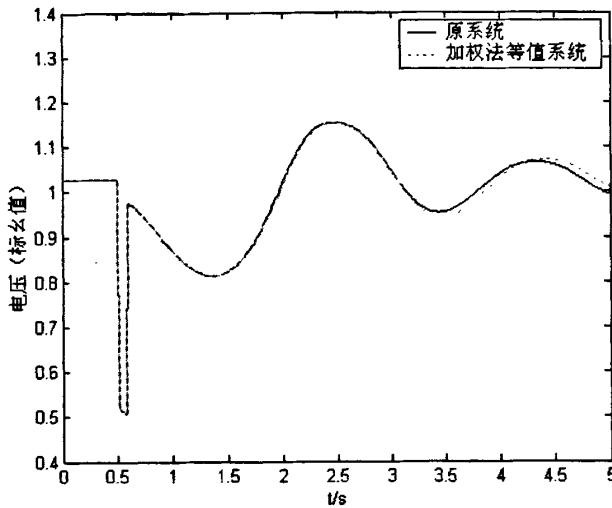


图 3-4 电压响应曲线图

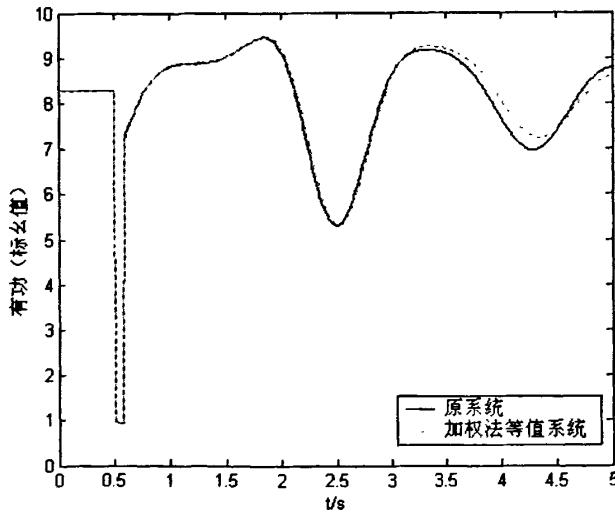


图 3-5 有功输出曲线图

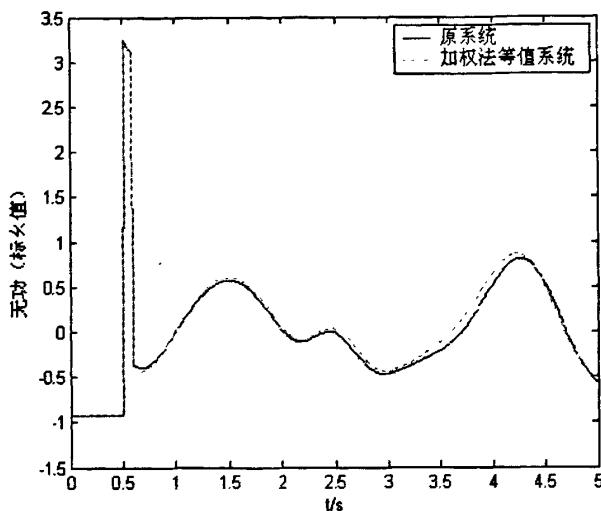


图 3-6 无功输出曲线图

图 3-4、3-5、3-6 分别给出原系统和加权法等值系统的 G9 号发电机的电压、有功和无功的比较图像。由图中 G9 机母线电压等值前后的比较可知，等值系统的电压恢复特性能比较准确的体现原系统的特性，母线电压基本与原系统吻合。同样有功和无功功率的等值精度也很高。

图 3-7 为系统失稳时，原系统与等值系统 G5 号发电机的功角曲线，参考机为 G9 号发电机，等值系统和原系统的功角曲线基本重合。

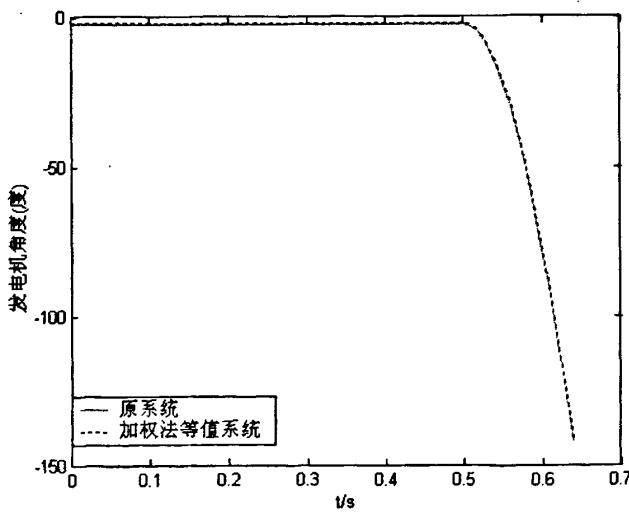


图 3-7 系统失稳功角曲线图

### 3.3.2 华中系统算例

华中系统的地理接线图见附录。设置如下的等值方案：选择河南系统作为研究系统，湖北系统、湖南系统、江西系统作为外部系统；选择的故障为姚孟—郑州 500kV 线路故障、郑州—白河 500kV 线路故障、祥符—郑州 500kV 线路故障，这三条线路为河南省内的三条主干线。由于故障地点和故障切除时间对同调机群识别几乎没有影响，所以不必给出故障的详细信息<sup>[40]</sup>。根据以上等值方案可以得到一等值系统，等值的示意图如图 3-8。

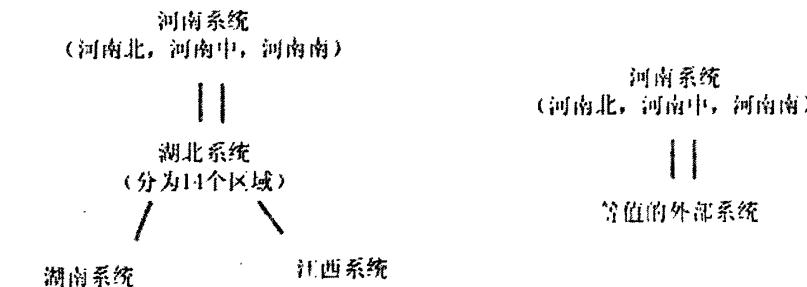


图 3-8 华中系统等值示意图

华中系统有 182 台发电机(河南 61 台)、1319 条母线(河南 447 条)、1752 条线路(河南 580 条)，等值系统有 77 台发电机、461 条母线、621 条线路，所以压缩比很高。

该系统，发电机模型采用五阶模型<sup>[41]</sup>，选择河南系统作为研究系统，选择的故障为姚孟—郑州 500kV 线路故障、郑州—白河 500kV 线路故障和祥符—郑州 500kV 线路故障，这三条线路为河南省内的三条主干线。设定上述三个故障均为 1 秒时刻线路首端发生三相短路，1.1 秒时刻切除故障线路。表 3-2 给出其中两台等值机利用频域拟合法和加权等值法得到的发电机参数和聚合时间。

表 3-2 发电机参数及聚合时间

发电机参数	等值机 1		等值机 2	
	频域法	加权法	频域法	加权法
$X_d$	1.61	1.61	1.45	1.46
$X_q$	1.60	1.61	1.40	1.45
$X_d'$	0.19	0.19	0.19	0.19
$X_q'$	0.15	0.15	0.16	0.16
$X_d''$	0.12	0.12	0.11	0.12

$T'_{d0}$	8.35	8.37	7.68	7.81
$T'_{q0}$	1.66	1.66	1.47	1.47
$T''_{d0}$	0.03	0.03	0.03	0.03
$S_b$ (MVA)	40	40	240	240
聚合时间	频域法: >5min		加权法: <1s	

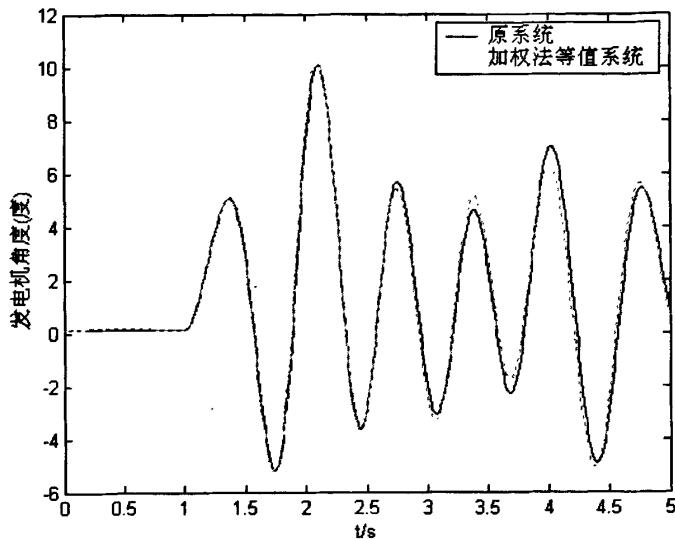


图 3-9 姚-郑线路故障时

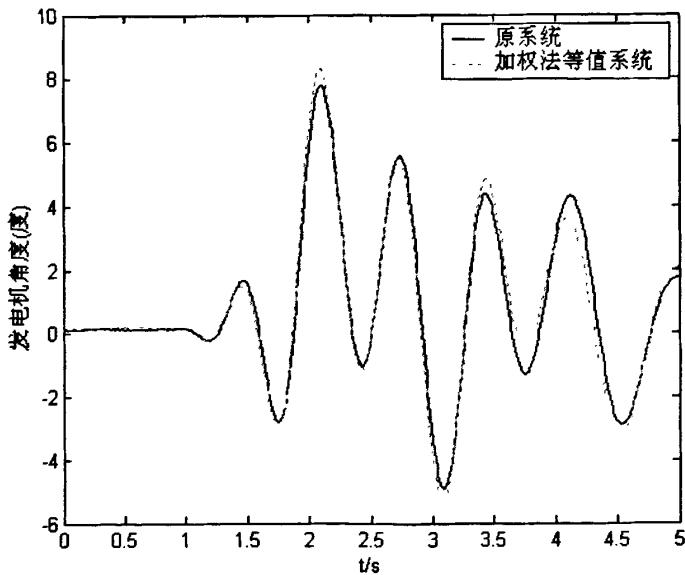


图 3-10 郑-白线路故障时

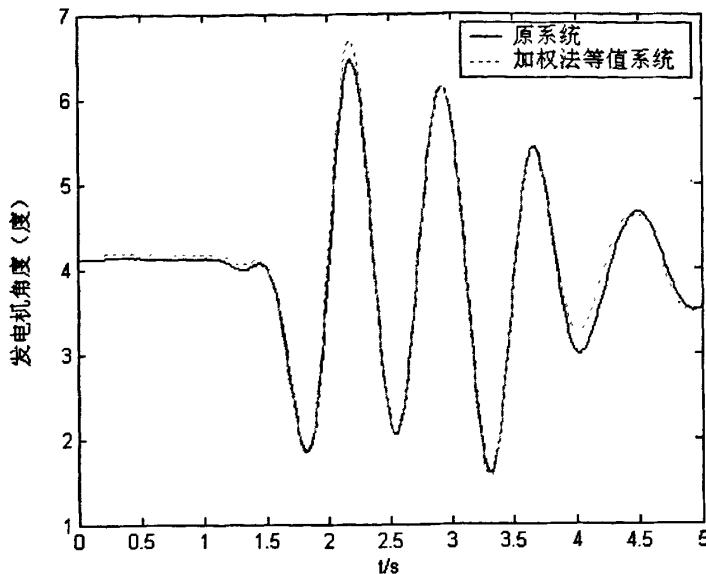


图 3-11 祥-郑线路故障时

图 3-9、图 3-10 和图 3-11 分别为发生这三个故障时原系统和加权等值系统的功角曲线比较，其中曲线均为焦作 2 号发电机的功角曲线，参考机为禹州 2 号发电机<sup>[42]</sup>。由图像发现，在这三种故障下，由加权法得到的等值系统和原系统发电机功角曲线在 5s 内等值效果较好。

### 3.4 方法的改进与补充

在利用加权法对发电机详细模型进行参数聚合的大量检验中我们发现，当相关群中各发电机励磁系统时间常数差异过大时，以一个相关发电机群为例，当

$$\frac{|T_{x_{max}} - T_{x_{min}}|}{|T_{x_{min}}|} > \delta \quad (3-17)$$

其中  $T_{x_{max}}$ ， $T_{x_{min}}$  分别为相关机群中各发电机励磁系统时间常数的最大值及最小值， $\delta$  为时间常数差异的门槛值，经多次仿真试验，目前设定为 5，直接应用加权法将得到较差的结果。以图 3-12 所示系统为例，其中 3 号机为研究系统，1 号机和 2 号机为相关机群。选取故障为 0.1s 时在母线 5 处发生三相短路，在 0.2s 时切除故障。表 3-3 给出其励磁系统参数，图 3-13 给出仿真曲线图。可以发现，仿真结果较不理想。为解决此问题，建议仍用式 (3-16) 求取等值机参数  $K_A$ ，而等值励磁系统时间常数则取为该相关机群中起关键性作用的发电机的励磁系统时间参数，对于本系统，选择 1 号机的参数，通过仿真，得到了良好的效果，功角曲线比较如图 3-14。

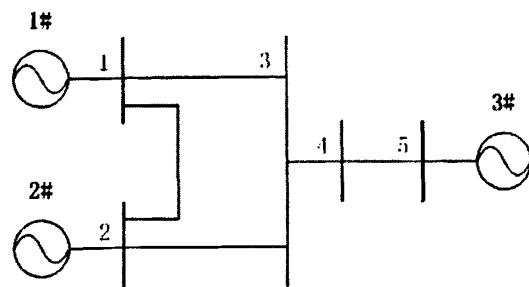


图 3-12 三机小系统结构图

表 3-3 发电机励磁系统参数

发电机	G1	G2
$K_A$	299	100
$T_A$	0.02	0.12
$K_E$	1.00	1.00
$T_E$	0.25	0.73
$K_F$	0.02	0.06
$T_F$	0.10	1.00
$S_b$ (MVA)	450	100

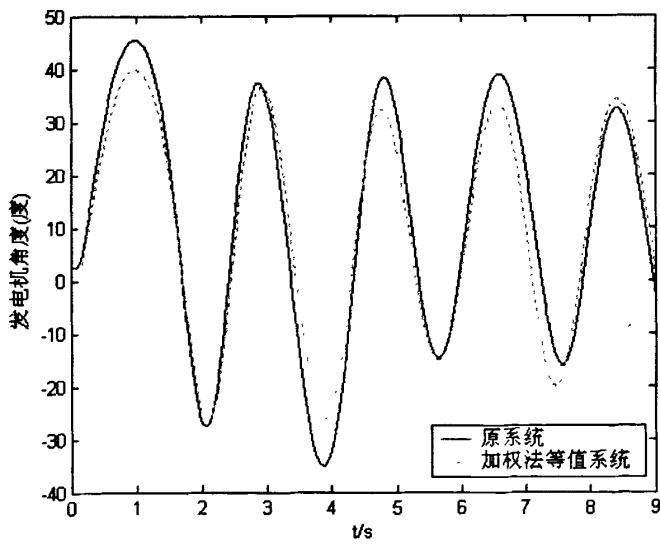


图 3-13 系统功角曲线图

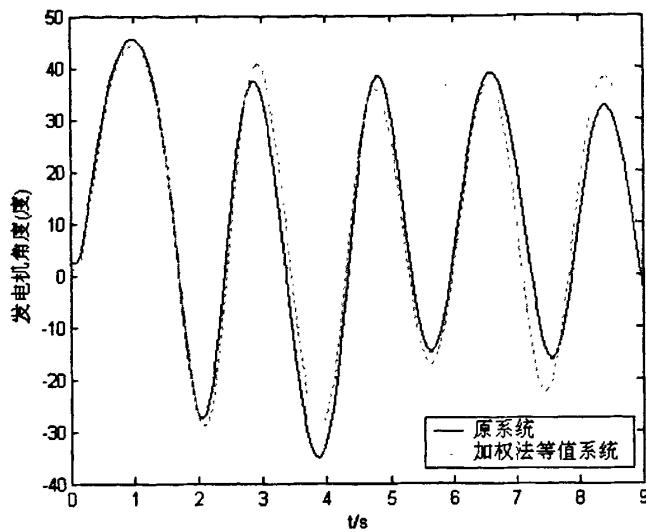


图 3-14 系统功角曲线图

### 3.5 小结

由于基于频域法的同调发电机聚合较复杂，造成对于大系统分析时，等值时间较长。针对这一情况，本文提出了基于加权法的发电机详细模型参数的聚合方法。这一章着重介绍了这种聚合方法的思路和聚合过程，同时，通过对两个算例系统的仿真发现该聚合方法具有以下特点：

(1) 在发电机详细模型参数聚合中，利用加权法等值具有与用频域法等值相同的特点即：等值系统元件模型均为实际电力系统元件模型，可直接用于大规模系统暂态稳定分析的等值聚合。

(2) 通过对 10 机 39 节点系统，华中系统以及简单的配电系统算例仿真发现，加权法得到的等值系统与实际系统的仿真结果比较吻合，初步验证了加权等值方法的有效性。同时，通过对系统仿真过程的分析，对该等值方法进行了进一步的改进与补充。

(3) 由仿真结果发现，加权法和频域法结果很接近，但在等值中，两种方法所用时间却有很大的差别。以华中系统为例，将其 182 台发电机、1319 条母线、1752 条线路，等值为 77 台发电机、461 条母线、621 条线路，用频域聚合法程序需要 5 分钟以上，而利用本文提出的加权法在 1 秒内即可完成等值，计算效率明显提高。

## 第四章 基于加权法的感应电动机群参数聚合

### 4.1 引言

指导电力系统生产和运行的基本工具是电力系统仿真，而仿真的准确程度直接依赖于模型的准确度<sup>[43][44]</sup>。负荷模型对电力系统仿真准确度的影响极为重要。1996年7月美国西部大停电的事后分析报告指出，采用不同的负荷模型进行仿真将得到不同、甚至截然相反的分析结果<sup>[45]</sup>。另一方面，近年来世界各地发生了多起暂态电压失稳事故<sup>[46]-[53]</sup>，而负荷模型对电压稳定有着直接影响<sup>[54]</sup>。研究负荷模型对于目前我国的电力系统也具有极为重要的意义。随着三峡电站机组陆续并网发电，我国送端电力系统与受端电力系统的联网模式已经形成。我国的受端电力系统是经济发展的中心地带，其安全性尤为重要，由于受端电力系统集中了大量的负荷，因此有效、可靠的负荷模型直接关系到系统的安全与稳定。

长期以来，我国电力部门采用感应电动机和恒PI抗并联的综合负荷模型，如湖南电网采用65%感应电动机和35%恒定阻抗负荷模型。我国采用感应电动机模型的参数一直以来是所谓的“典型参数”<sup>[55]</sup>，其中通过仿真可看出定子漏电抗参数对稳定计算结果影响最明显，但该参数的取值是否真正反映了负荷实际情况却一直未能得到证实。最近有学者提出我国采用的定子漏电抗参数与我国实际情况不符，(即应由现在的0.295改为0.10左右)，该问题已引起国内广大电力工作者的高度重视。

随着区域互联电网的形成，负荷模型对电力系统仿真结果的影响变得十分敏感，特别是负荷模型的选取、参数的确定、配电网络的模拟等都对联网系统的稳定计算结果的具有重大影响。如在东北—华北联网工程的研究工作中，负荷模型和参数对稳定性计算结果的影响变得非常突出，影响了计算结果的可信度，给决策方案的取舍带来了困难。

目前常用的综合负荷模型一般都不考虑配电网络的影响<sup>[57]-[61]</sup>，或仅将配电网络的阻抗添加到感应电动机的定子阻抗中进行近似的模型。本文分析了电力系统数字仿真中负荷模型所代表的配电网络和感应电动机的结构，提出了基于加权法的配电网络感应电动机群的参数建模方法。

## 4.2 配电网

在电力系统数字仿真中，负荷一般接在110kV或220kV母线<sup>[62]</sup>。但无论是电动机负荷、照明或生活用电负荷都不可能直接由110kV或220kV母线供电，因此在负荷模型中需要考虑配电网的影响。

文[63]讨论了一种如图4-1所示的可能的结线图，其中，35kV线路平均长度取10km，6kV线路平均长度取2km，并根据前苏联国家标准给出了变压器的典型电抗值和线路的典型阻抗值，具体参数如下：

- 110kV/35kV变压器的电抗为j0.0653；
- 35kV配电线路的阻抗为0.0135+j0.0103；
- 35kV/6~10kV变压器的电抗为j0.0526；
- 6~10kV配电线路的阻抗为0.013+j0.0469。

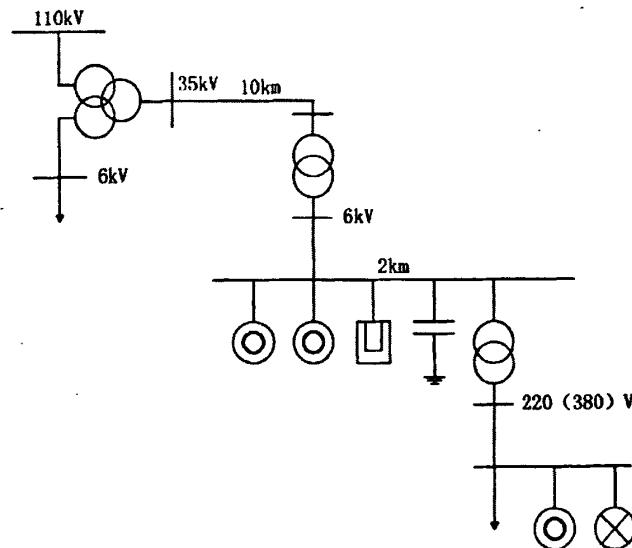


图4-1 对电能用户供电结线图

## 4.3 感应电动机群参数聚合

### 4.3.1 感应电动机模型

在电力系统机电暂态仿真中，感应电动机模型采用考虑转子回路电磁暂态过程和转子机械暂态过程的三阶模型<sup>[64]-[66]</sup>，其稳态等值电路如图4-2所示，感应电动机的暂态等值电路如图4-3所示。

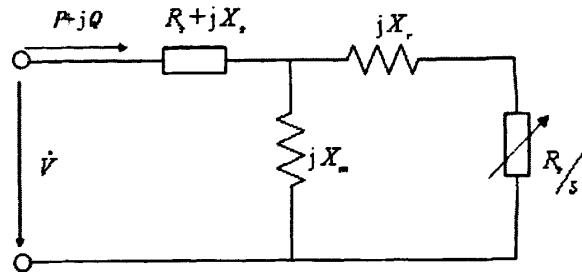


图4-2 感应电动机稳态等值电路

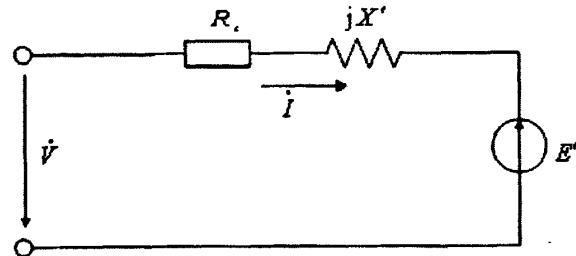


图4-3 感应电动机暂态等值电路

在电力系统机电暂态仿真中一般采用考虑机电暂态过程的感应电动机模型，不考虑电子绕组的电磁暂态过程，其转子电压方程为

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = -[E'_d + (X - X')I_q] / T' + \omega_0 s E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} = -[E'_q - (X - X')I_d] / T' - \omega_0 s E'_d \end{cases} \quad (4-1)$$

式中， $s$  为转子滑差； $T' = \frac{X_t + X_m}{\omega_0 R_t}$ ，为暂态开路时间常数； $X = X_t + X_m$ ，为转子开路电抗； $X' = X_s + X_m // X_t$ ，为转子堵转短路电抗。其中  $X_s$ ， $R_s$ ， $X_t$ ， $R_t$ ， $X_m$  分别为定子电抗和电阻、转子电阻和电抗以及定子和转子绕组间的互感抗。

其转子方程为：

$$\begin{cases} T_J \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \\ T_m = (A\omega_t^2 + B\omega_t + C)T_0 \end{cases} \quad (4-2)$$

$T_J$  为转子惯性时间常数； $\omega_t$  为转子角速度； $T_m$  为电动机机械转矩， $A$ ， $B$ ， $C$  为机械转矩系数。

### 4.3.2 感应电动机群参数聚合

设感应电动机群  $M = \{1, \dots, i, \dots, m\}$ ，其中包括  $m$  台异步电动机，则其等值机参数的聚合过程如下：

等值机的容量为各台电机的容量 (MVA) 之和：

$$S_M = \sum_{i \in M} S_i \quad (4-3)$$

其中下标  $M$  表示等值机。同样利用加权法求取等值机的阻抗：

$$Z_M = \frac{\sum_{i \in M} S_i Z_i}{\sum_{i \in M} S_i} \quad (4-4)$$

式中  $Z_M$  为等值机阻抗，可分别为  $X_s, R_s, X_r, R_r, X_m$ ； $Z_i$  为第  $i$  台异步电动机对应的参数。等值机时间常数及机械转矩系数也可由式 (4-4) 求得。

### 4.3.3 算例分析

该配电系统网络结构图如图 4-4 所示。四台异步电动机分别接在不同的母线上，根据 4.2 设定 35kV 线路平均长度取为 10km，3kV，6kV 及 10kV 线路平均长度取 2km，并采用相应的变压器典型电抗值和线路的典型阻抗值。

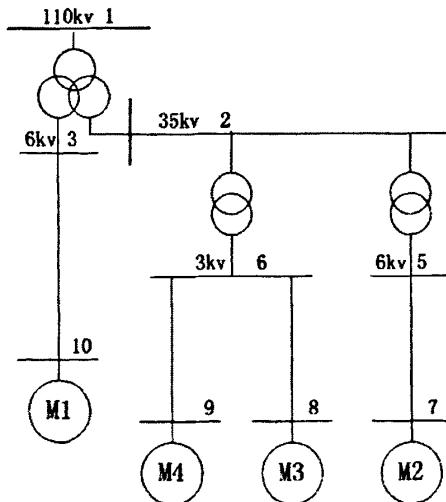


图 4-4 简单配电系统网络结构图

表 4-1 列出原系统异步电动机以及用加权等值法得到的等值机 EQ 的详细电动机参数。各电动机负荷采用不同的额定容量和机械负荷。

表 4-1 电动机参数

电动机	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$T_J$	$S_b$ (KVA)
M1	0.0635	0.0816	2.25	0.0287	0.0836	0.5	200
M2	0.0682	0.0759	2.62	0.0228	0.1028	0.3	400
M3	0.0595	0.1353	2.58	0.0440	0.1430	0.1	350
M4	0.0595	0.1353	2.58	0.0440	0.1430	0.1	250
EQ	0.0627	0.1090	2.54	0.0370	0.1216	0.22	1200

利用仿真程序对原系统和等值系统进行仿真。设定故障为母线 1 发生 20% 的电压降落, 0.2s 后电压恢复。图 4-5、图 4-6 分别为母线 1 的有功功率和无功功率图像。通过图像可以发现, 基于加权法得到的等值异步电动机效果较好。

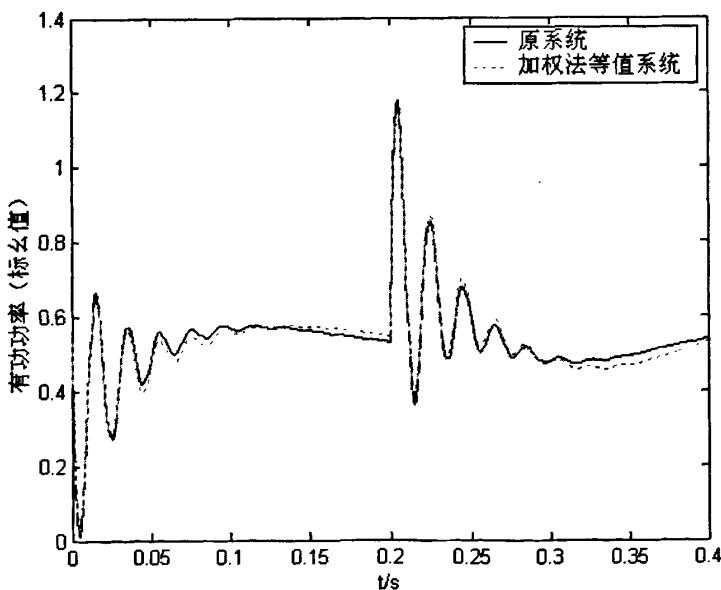


图 4-5 有功功率曲线图

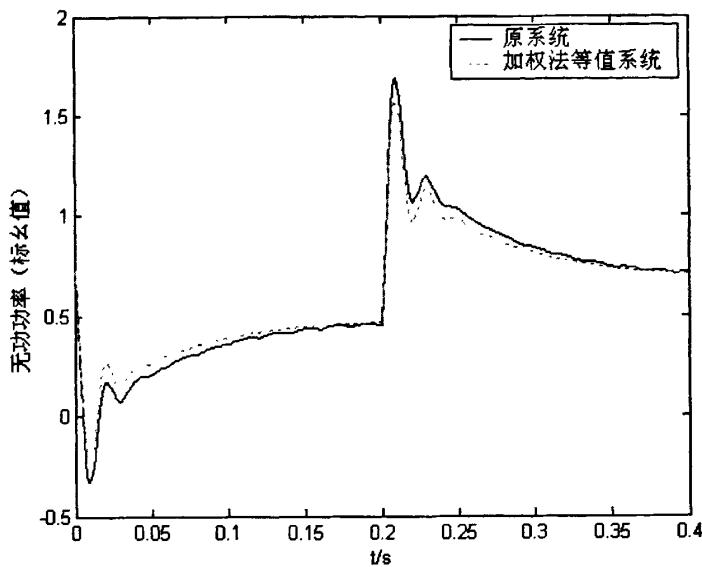


图 4-6 无功功率曲线图

#### 4.4 小结

感应电动机模型是电力系统仿真计算中使用最为广泛的综合动态负荷模型。为了确保模型对实际综合负荷的较准确描述, 应当抛弃不考虑负荷具体构成而一律采用典型感应电动机参数的做法。

本章介绍了典型的配电网络和感应电动机模型, 提出了基于加权法的感应电动机群参数聚合方法, 经简单配电网络的仿真表明, 该方法得到的等值系统与实际系统的仿真结果比较吻合, 初步验证了基于加权法的感应电动机群参数聚合的等值方法的有效性。

## 第五章 结论及展望

### 5.1 本文工作总结

对大规模电力系统进行动态等值在物理仿真系统或实时在线动态安全分析方面具有非常重要的现实意义。当进行电力系统实时仿真或动模实验时,由于仿真规模和硬件设备的限制,必须对原有系统做合理简化才能进行,但是,对原系统进行等值化简必然造成对原始网络动态特性的丢失。如何才能在满足物理仿真规模限制的同时尽可能多地保留原系统的动态特性便是电力系统动态等值需要解决的问题。

虽然动态等值的研究起步较早,在理论上、方法上取得了一定的研究成果,并得到一定程度的应用,但由于现代电力系统结构复杂,对等值的要求较高,至今仍然没有一个十分理想的动态等值方法。本文结合本课题组现有的电力系统动态等值程序及其所使用的方法,参考国内外相关文献,对动态等值的聚合过程提出了一种实用方法。具体说来,本论文在大规模电力系统动态等值技术的改进方面,主要取得了以下成果:

1. 总结了现有电力系统动态等值中参数聚合的各种算法,特别是频域算法。在电力系统仿真,发现频域算法的缺点是,对大系统等值聚合的时间较长。
2. 针对该问题,提出了一种基于加权法的发电机参数聚合方法。该方法具有与用频域法等值相同的优点,即等值系统元件模型均为实际电力系统元件模型,可直接用于大规模系统暂态稳定分析的等值聚合。同时通过对两个算例的仿真分析表明,该方法取得了令人满意的结果,但在对大系统进行等值时,却极大的节省了计算时间。
3. 提出基于加权法的感应电动机群参数聚合方法,并通过一个简单配电网的仿真分析,证实该方法的有效性,为电力系统负荷分析提供了一种快捷实用的方法。
4. 完善了本课题组的一套动态等值软件。该软件在动态等值过程中,初期采用的是经典模型,利用本文提出的参数聚合方法,将发电机详细模型加入,使该等值软件具有更富实际意义的利用价值。

## 5.2 展望

虽然本文取得了一些成果，但是由于时间不足等原因，还有一些问题留待今后去做进一步的研究：

- 1) 在已有动态等值程序中，添加了不同类型发电机调节系统的模型，对于不同种模型在参数聚合时使用该方法所能取得的效果及所需进行的改进，仍需在今后的工作中不断观察完善。
- 2) 将基于加权法的感应电动机参数聚合方法利用到更大型更复杂的实际大电力系统中，观察等值效果，并考虑加以补充完善。

## 参考文献

- [1] 余贻鑫, 陈礼义, 电力系统的安全性与稳定性, 北京: 科学出版社, 1988.40~80
- [2] 岳程燕, 大规模电力系统动态等值中聚合问题的研究: [硕士学位论文], 北京: 中国电力科学研究院, 2001
- [3] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖, 动态电力系统的理论和分析, 北京: 清华出版社, 2002.330-350
- [4] WW.PRICE, JOE.H.CHOW, A.WHAQGAVE, *et al.* Large-scale System Testing of Power System Dynamic Equivalencing program, IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(3): 768-774
- [5] JOE.H.CHOW, R.GALARZA, RACCARI, *et al.* Inertial and slow coherency aggregation algorithms for Power System Dynamic model reduction, IEEE Trans. on Power Systems, 1995, 10(2): 680-685
- [6] GANESH N. RAMASWAMY, CHRISTOPHE ENRARD, Extensions, Simplifications and Tests of Synchronic Modal Equivalencing (SME), IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 12(2): 450-455
- [7] 印永华, 卜广全, 电力系统动态等值程序技术和使用手册, 北京: 中国电力科学研究院, 1993, 30-45
- [8] 徐南荣, 宋文忠, 夏安邦, 系统辨识, 武汉: 东南大学出版社, 1991.50-70
- [9] 沈善德, 电力系统参数辨识, 北京: 清华大学出版社, 1995.0-100
- [10] 刘清, 基于人工神经网络的非线性系统辨识, 武汉交通科技大学学报, 1999, 20(2): 23-28
- [11] 周西峰, 系统辨识与建模的一种新方法, 信息与控制, 2000, 29(2): 10-15
- [12] 许立滨, 动态系统辨识的一种近似算法, 信息技术, 2002, 26(12): 20-25
- [13] 滕林, 刘万顺, 李贵存, 等, 一种基于摇摆曲线的电力系统同调机群识别新方法, 电力自动化设备, 2002, 22(4): 25-30
- [14] 杨俊华, 陈斌, 系统辨识法在同步电机参数测量中的应用, 中小型电机, 2000, 27(5): 32-37
- [15] 王琳, 马平, 系统辨识方法综述, 电力情报, 2001, 4(2): 30-34
- [16] 刘长良, 于希宁, 姚万业, 等, 基于遗传算法的火电厂热工过程模型辨识, 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 17-22
- [17] X.Lei, D.Povh, O.Ruhle, Industrial approaches for dynamic equivalents of large power systems, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, IEEE, 2002(2): 27-31

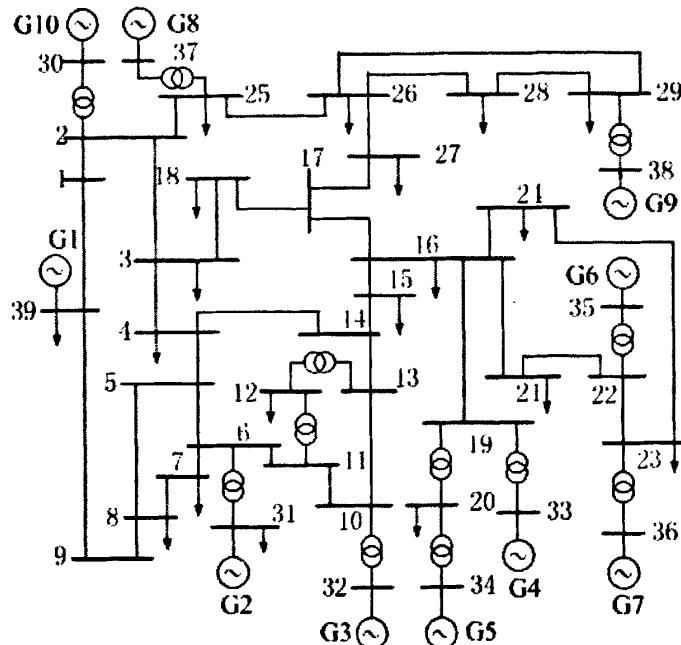
- [18] P.Ju, Zhou X.Y, Dynamic equivalents of distribution systems for voltage stability studies, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, 2001, 148(1): 48-53
- [19] 戴义平, 邓仁纲, 刘炯, 等, 基于遗传算法的汽轮机非线性调节系统的参数辨识研究, 动力工程, 2003, 23(1):20-24
- [20] 李剑飞, 尹泉, 万淑芸, 基于扩展卡尔曼滤波器的异步电机转速辨识, 电工技术学报, 2002, 17(5):18-22
- [21] 汪镭, 周国兴, 吴启迪, 神经网络辨识方案在异步电机传动系统参数辨识中的应用讨论, 电工电能新技术, 2001, 2(1):23-28
- [22] 蔡超, 陈光东, 段三丁, 等, 最小二乘法在感应电机参数辨识中的应用研究, 武汉化工学院学报, 2003, 25 (6): 23-28
- [23] 于功军, 钟彦儒, 杨耕, 无速度传感器矢量控制系统中电机参数辨识, 电气传动, 1999, 1:23-26
- [24] Faa-Jeng Lin, Ho-Ming Su. A, High-Performance Induction Motor Drive with On-Line Rotortime-Constant Estimatio, IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 4(12): 26-35
- [25] 夏超英, 基于复数模型描述的感应电动机参数辨识算法, 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 1-6
- [26] Richard F.F.Koning, Chun Tung Chou, Michel H.G Verhaegen, *et al.* A Novel Approach on Parameter Identification for Inverter Driven Induction Machines, IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2000, 18(6): 50-54
- [27] Rajeev Bhaskar, M.L.Crow, E.ludwig, *et al.* Nonlinear Parameter Estimation of Excitation Systems, IEEE Trans on Power Systems, Nov 2000, 15(4): 20-25
- [28] 张广莹, 邓正隆, 小波分析在系统辨识中的应用, 电机与控制学报, 2002, 3(1):64-67
- [29] 李欣然, 贺仁睦, 周文, 等, 综合负荷感应电动机模型的改进及其描述能力, 电力系统自动化, 1999, 23(9):12-17
- [30] Joe.H.Chow, R.Galarza, Raccari, *et al.* Inertial and slow coherency aggregation algorithms for Power System Dynamic model reduction, IEEE Trans. on Power Systems, 1995, 10(2): 680-685
- [31] F. F. Wu, Y. K. Tsai, Identification of Groups of  $\varepsilon$ -Coherent Generators, IEEE Transactions, 1983, CAS-30(4): 234-240
- [32] 侯科峰, 电力大系统实用动态安全域的降维与还原:[硕士学位论文], 天津: 天津大学, 2003
- [33] 闵亮, 电力系统动态安全域边界性质的研究:[硕士学位论文], 天津: 天津大学, 2003

- [34] F. F. Wu, Y. K. Tsai and Y. X. Yu, Probability Steady-State and Dynamic Security Assessment, IEEE Transactions on Power Systems, 1988, PWRS-3(1):1-9
- [35] 许剑冰, 薛禹胜, 张启平, 等, 电力系统同调动态等值的述评, 电力系统自动化, 2005, 29(14):91-95
- [36] Stephen M. Benchluch, Joe H. Chow, A trajectory sensitivity method for the identification of nonlinear excitation system models, IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2): 159-164
- [37] Carvalho V F, El-kady M A, Fouad A, A direct analysis of transient stability for large power systems, EPRI Report EL 2 4980, December 1986
- [38] 余贻鑫, 赵国刚, 电力系统暂态稳定研究中相关发电机群的识别, 天津大学学报, 1987, 20(1):1-8
- [39] P kundur, Extended Transient Midterm Stability Program (ETMSP) Version 3.1 Volume 1: User's Manual (Revision 1), Electric Power Research Institute, 1994, 1-50
- [40] 赵国刚, 电力系统暂态稳定研究中的动态等值: [硕士学位论文], 天津: 天津大学, 1981
- [41] P M Anderson, A A Fouad, 电力系统的控制与稳定 (第一卷), 北京: 水利电力出版社, 1979
- [42] 冯兆飞, 快速确定实用动态安全域的方法的研究: [硕士学位论文], 天津: 天津大学, 2006
- [43] 贺仁睦, 电力系统动态仿真准确度的探究, 电网技术, 2000, 24(12): 1-4
- [44] 马进, 王景钢, 贺仁睦, 电力系统动态仿真的灵敏度分析, 电力系统自动化, 2005, 29(17):20-27
- [45] Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A, Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage, IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979
- [46] 何大愚, 一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思, 电网技术, 2004, 28 (21): 1-5
- [47] 胡学浩, 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示, 电网技术, 2003, 27(9): T2-T6
- [48] 韩祯祥, 曹一家, 电力系统的安全性及防治措施, 电网技术, 2004, 28(9): 1-6
- [49] 刘永奇, 谢开, 从调度角度分析美国 8.14 大停电, 电网技术, 2004, 28(8): 10-15, 45
- [50] 唐葆生, 伦敦南部大停电及其教训, 电网技术, 2003, 27(11): 1-5, 12

- [51] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等, 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训, 电网技术, 2003, 27(10): 9-11
- [52] 周孝信, 郑健超, 沈国荣, 等, 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训, 电网技术, 2003, 27(9): T1
- [53] 赵希正, 强化电网安全保障可靠供电——美加“8·14”停电事件给我们的启示, 电网技术, 2003, 27(10): 1-7
- [54] 李欣然, 贺仁睦, 章健, 等, 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据, 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 26-30
- [55] 马进, 贺仁睦, 王景钢, 等, 电力综合负荷感应电动机模型参数的研究, 电网技术, 2006, 30 (9): 20-25
- [56] IEEE task force on load representation for dynamic performance load representation for dynamic performance analysis, IEEE Trans on Power Systems, 1993, 18(2): 472-482
- [57] IEEE task force on load representation for dynamic performance. standard load models for power flow and dynamic performance simulation. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 302-1313
- [58] 张红斌, 贺仁睦, 刘应梅, 基于 KOHONEN 神经网络的电力系统负荷动特性聚类与综合, 中国电机工程学报, 2003, 23 (5) :1-6
- [59] 姚建刚, 陈亮, 戴习军, 等, 混沌神经网络负荷建模的理论研究, 中国电机工程学报, 2002, 22 (3): 99-102
- [60] 张伶俐, 周文, 章健, 等, 面向综合的电力负荷动特性建模, 中国电机工程学报, 1999, 19 (9) :36-40
- [61] 贺仁睦, 王卫国, 蒋德斌, 等, 广东电网动态负荷实测建模及模型有效性的研究, 中国电机工程学报, 2002, 22 (3) :78-82
- [62] 水利电力部, 电力系统暂态稳定计算暂行规定, 北京: 中国电力出版社电力系统规程合订本, 1995.1-50
- [63] Д · И · 阿扎里也夫著, 韩祯祥, 戴熙杰译, 电力系统的数学模拟, 北京: 中国工业出版社, 1965.1-100
- [64] 鞠平, 马大强, 电力系统负荷建模, 北京: 水利电力出版社, 1995.1-100
- [65] 鞠平, 潘学萍, 韩敬东, 3 种感应电动机综合负荷模型的比较, 电力系统自动化, 1999, 23 (19) :40-47
- [66] 汤涌, BPA 暂态稳定用户手册, 北京: 中国电力科学研究院, 2000.1-200

## 附录

## 1. 新英格兰系统接线图及参数



新英格兰系统接线示意图

新英格兰系统发电机参数表 ( $S_b=20$ MVA)

发电机	G1	G2	G3	G4	G5
惯性常数 $H$ (s)	500.0	30.3	35.8	28.6	26.0
阻尼系数 $D$ (p.u.)	10.00	9.75	10.00	10.00	3.00
D 轴同步电抗 $X_d$ (p.u.)	1.00	1.48	1.25	1.31	3.35
Q 轴同步电抗 $X_q$ (p.u.)	1.00	1.41	1.19	1.29	3.10
D 轴暂态电抗 $X_d'$ (p.u.)	0.03	0.32	0.27	0.22	0.66
Q 轴暂态电抗 $X_q'$ (p.u.)	0.03	0.35	0.27	0.22	0.66
D 轴开路暂态时间常数 $T_{d0}'$ (sec)	1.00	6.56	5.70	5.69	5.40
Q 轴开路暂态时间常数 $T_{q0}'$ (sec)	0.70	1.50	1.50	1.50	0.44

附录

新英格兰系统发电机参数表续 ( $S_b=20\text{MVA}$ )

发电机	G6	G7	G8	G9	G10
惯性常数 $H$ (s)	34.8	26.4	24.3	34.5	42.0
阻尼系数 $D$ (p.u.)	10.0	8.00	9.00	14.0	4.00
D 轴同步电抗 $X_d$ (p.u.)	1.27	1.48	1.45	1.05	0.35
Q 轴同步电抗 $X_q$ (p.u.)	1.21	1.46	1.40	1.03	0.35
D 轴暂态电抗 $X_d'$ (p.u.)	0.25	0.25	0.29	0.29	0.16
Q 轴暂态电抗 $X_d''$ (p.u.)	0.25	0.25	0.29	0.29	0.16
D 轴开路暂态时间常数 $T_{d0}'$ (sec)	7.30	5.66	6.70	4.79	10.2
Q 轴开路暂态时间常数 $T_{q0}'$ (sec)	0.40	1.50	0.14	4.50	1.50

新英格兰系统发电机调节系统参数表 ( $S_b=100\text{MVA}$ )

发电机	G1	G2	G3	G4	G5
调压器增益 $K_A$ (p.u.)	—	6.20	5.00	5.00	40.0
调压器时间常数 $T_A$ (sec)	—	0.05	0.06	0.06	0.02
励磁机增益 $K_E$ (p.u.)	—	1.00	1.00	1.00	1.00
励磁机时间常数 $T_E$ (sec)	—	0.41	0.50	0.50	0.79
调压器镇定回路增益 $K_F$ (p.u.)	—	0.06	0.08	0.06	0.03
调压器镇定回路时间常数 $T_F$ (sec)	—	0.50	1.00	1.00	1.00
调速系统增益 $K$ (p.u.)	—	20.0	20.0	20.0	20.0
调速系统时间常数 $T_1$ (sec)	—	1.58	0.28	0.38	2.08
调速系统倒阀时间常数 $T_2$ (sec)	—	0.00	0.0	0.00	0.00
调速系统伺服时间常数 $T_3$ (sec)	—	0.20	0.20	0.20	0.20
调速系统蒸汽容积时间常数 $T_4$ (sec)	—	0.05	0.05	0.05	0.05

新英格兰系统发电机调节系统参数表续 ( $S_b=100\text{MVA}$ )

发电机	G6	G7	G8	G9	G10
调压器增益 $K_A$ (p.u.)	5.00	5.00	5.00	40.0	5.00
调压器时间常数 $T_A$ (sec)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06
励磁机增益 $K_E$ (p.u.)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
励磁机时间常数 $T_E$ (sec)	0.47	0.73	0.53	1.40	0.25
调压器镇定回路增益 $K_F$ (p.u.)	0.08	0.03	0.08	0.03	0.04

附录

调压器镇定回路时间常数 $T_F$ (sec)	1.25	1.00	1.26	1.00	1.00
调速系统增益 $K$ (p.u.)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
调速系统时间常数 $T_1$ (sec)	2.09	1.58	0.18	0.38	0.18
调速系统倒阀时间常数 $T_2$ (sec)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
调速系统伺服时间常数 $T_3$ (sec)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
调速系统蒸汽容积时间常数 $T_4$ (sec)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

新英格兰系统输电线路参数表 ( $S_b=100\text{MVA}$ )

No.	节点 1	节点 2	R	X	B/2
1	1	2	0.0035	0.0411	0.3494
2	1	39	0.0010	0.0250	0.3750
3	2	3	0.0013	0.0151	0.1286
4	2	25	0.0070	0.0086	0.0730
5	3	4	0.0013	0.0213	0.1107
6	3	18	0.0011	0.0133	0.1069

新英格兰系统输电线路参数表(续) ( $S_b=100\text{MVA}$ )

No.	节点 1	节点 2	R	X	B/2
7	4	5	0.0008	0.0128	0.0671
8	4	14	0.0008	0.0129	0.0691
9	5	6	0.0002	0.0026	0.0217
10	5	8	0.0008	0.0112	0.0738
11	6	7	0.0006	0.0092	0.0565
12	6	11	0.0007	0.0082	0.0695
13	7	8	0.0004	0.0046	0.0390
14	8	9	0.0023	0.0363	0.1902
15	9	39	0.0010	0.0250	0.6000
16	10	11	0.0004	0.0043	0.0365
17	10	13	0.0004	0.0043	0.0365
18	13	14	0.0009	0.0101	0.0862
19	14	15	0.0018	0.0217	0.1830
20	15	16	0.0009	0.0094	0.0855

附录

21	16	17	0.0007	0.0089	0.0671
22	16	19	0.0016	0.0195	0.1520
23	16	21	0.0008	0.0135	0.1274
24	16	24	0.0003	0.0059	0.0340
25	17	18	0.0007	0.0082	0.0660
26	17	27	0.0013	0.0173	0.1608
27	21	22	0.0008	0.0140	0.1283
28	22	23	0.0006	0.0096	0.0923
29	23	24	0.0022	0.0350	0.1805
30	25	26	0.0032	0.0323	0.2565
31	26	27	0.0014	0.0147	0.1198
32	26	28	0.0043	0.0474	0.3901
33	26	29	0.0057	0.0625	0.5145
34	28	29	0.0014	0.0151	0.1245

新英格兰系统变压器支路参数表

No.	节点 1	节点 2	R	X	变比 $k$
1	12	11	0.0016	0.0435	1.006
2	12	13	0.0016	0.0435	1.006
3	6	31	0.0000	0.0250	1.070
4	10	32	0.0000	0.0200	1.070
5	19	33	0.0007	0.0142	1.070
6	20	34	0.0009	0.0180	1.009
7	22	35	0.0000	0.0143	1.025
8	23	36	0.0005	0.0272	1.000
9	25	37	0.0006	0.0232	1.025
10	2	30	0.0000	0.0181	1.025
11	29	38	0.0008	0.0156	1.025
12	19	20	0.0007	0.0138	1.060

## 2. 华中电网接线图

### 华中电网接线示意图



## 攻读硕士期间发表论文和科研情况说明

### 发表的论文:

- [1] 胡杰, 余贻鑫, “电力系统动态等值参数聚合的实用方法”, 《电网技术》,  
(已录用)

### 参与的科研项目:

1. 河南电力系统保证暂态稳定的动态安全域与概率的动态安全分析系统的研究与开发项目, 正在进行。
2. Direct Methods for Security Regions of Bulk Power System, Supported by U.S., EPRI under Agreement EP-P11543/C5729, completed.

### 专利申请:

- [1] 余贻鑫, 胡杰. 电力系统同调发电机组及异步电动机群参数聚合方法.(专利申请号: 200610016074.X)

## 致 谢

本课题的研究工作是在导师余贻鑫教授的悉心关怀和指导下完成的。三年来先生对我在学习上的循循善诱、工作上的谆谆教诲、生活上的热心关怀将使我终生难忘。先生渊博的学识、严谨的治学态度、孜孜不倦的敬业精神、为人师表的高尚风范以及宽广坦荡的胸怀是我学习的榜样，极大地激励我不断的追求和探索。每次聆听先生教诲总是受益良多，回来之后总是细心品味以求甚解，三年来跟随先生在做人和做学问上都学到了很多，这将使我受益终生。面对先生厚望，无以为报，唯有在将来工作中奋力拼搏。

感谢黄纯华教授，王成山教授、贾宏杰副教授对作者在工作和学习中给予的关心和照顾；感谢曾沅老师在论文研究工作上给予的大力指导。

感谢魏炜、吴建中、孙强、侯科峰、闵亮、李慧玲、韩琪、冯兆飞、王兴刚，王春成等诸多师兄师姐及同门多年来的扶持和帮助。尤其感谢赵金利师姐对我研究工作的指导与帮助，师姐严谨求学的作风，令我深深感动。

感谢卞海波，尚蕊等同学，给我温馨的学习环境，让我可以专心研究；感谢赵方、周亚娜、武媛、顾丽梅等同学，让我拥有充实和谐的研究生生活。感谢所有帮助过我的人。

感谢我的父母，你们对我的支持与鼓励是我奋斗的源泉。感谢男友孙玮，在我最需要鼓励的时候，你的支持让我前进。