

# 基于变电站线路出口信息的小水电群 等值及参数辨识研究

魏 巍,丁理杰,史华勃,滕予非

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072)

**摘要:**针对同调法和模态法动态等值对外部系统做等值简化时,需要尽知外部系统的结构、参数以及各工况下的运行状态的局限性,对于集中上网中小水电机群发电机参数,励磁、调速参数部分未知或全部未知情况下,提取较大扰动后变电站高压侧出线的电压电流动态响应录波信号,并基于FOXPRO平台,结合PSASP电力系统分析软件实现连续变参数自动分析计算,将集中上网水电机群等值为一台机组,并准确辨识出等值机的相关参数。最后在四川电网某小水电机群上进行了仿真验证,试验结果表明,该等值方法实用可行,并具备一定的鲁棒性。

**关键词:**动态等值;参数辨识;鲁棒性

**Abstract:** There are the limitations of homology method and modal method during equivalent simplification of external equivalent system by dynamic equivalence, that is, the structure and parameters of the external system under various operating conditions should be known. For the part or all of generator parameters excitation and governing speed parameters of the small and medium-sized hydroelectric generating group with centralized access to the grid are unknown, the dynamic response signals of voltage and current in high-voltage side of substation after major disturbances are extracted, and based on FOXPRO platform, the automatic analysis and calculation of continuous variable-parameters is realized combined with PSASP, which makes the online hydroelectric generating group be equivalent as a unit, and accurately identifies its relevant parameters. Finally, the simulation of a small hydroelectric generating group in Sichuan power grid is carried out, and the test results show that the equivalent method is practical and feasible with a certain robustness.

**Key words:** dynamic equivalence; parameter identification; robustness

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)05-0020-05

## 0 引言

当今电力系统的特点是庞大、复杂,基于全网络模型的分析方法越来越苦难。通过文献[1-7]可知,同调法和模态法动态等值对外部系统做等值简化时,需要尽知外部系统的数据,包括外部系统的结构、参数以及各工况下的运行状态。现实是缺少网络的实际参数,尤其是某些特殊工况下的数据,如涡流、磁滞、饱和等等。随着电力市场的不断深化,一方面外部系统越来越大、复杂,全系统模型分析既费力又费时;另一方面,外部系统数据获取越来越困难。可以看出,同调和模态动态等值法的不足已经显现出来。而辨识法动态等值则没这方面的问题,它是根据测量的边界数据对外部系统做等值简化,不需要尽知外部系统的结构、参数,只要测得各工况

下的运行状态即可。辨识法动态等值很好地适应了现代电网的变化,其优越性和重要性随着电网的发展不断得以提升。

下面将针对集中上网中小水电机群,发电机参数,励磁、调速参数部分未知或全部未知情况下,提取较大扰动后变电站高压侧出线的电压电流动态响应录波信号,并基于FOXPRO平台,结合PSASP电力系统分析软件实现连续变参数自动分析计算,将集中上网水电机群等值为一台机组,并根据不同运行方式,外推出多种开机方式下的等值发电机参数。

## 1 小水电机群动态等值模型研究

这里采用的电力系统动态等值模型为单一发电机的形式。但从辨识算法本身的角度来看,由于量测量数目的限制,机组数量过多会导致等值模型的

某些参数不可辨识。当外部系统主要发电机同调时,等值模型结构用一台等值机代替是合适的,反之则会有很大误差。但是若外部系统通过较长联络线接至研究系统,在研究系统施加扰动时,外部系统的机群基本上可以看作是同调的,这可作为实际应用时的同调判据,即认为通过长联络线连接的外部系统,其机群是同调的,可等值为一台发电机的形式。

本项目以联络线的功率振荡曲线拟合作为辨识的目标函数值,一条联络线的外部系统对应一个等值模型。而随着电网的发展,电力系统的规模越来越大,联系也越来越紧密,这就有可能使得在划分好研究系统和外部系统后,存在外部系统与研究系统间的联络线不止一条的情况,因此,有必要对通过多条联络线连接外部系统的电力系统按联络线划分好等值区域后再进行动态等值。

### 1.1 单联络线区域等值模型

对于单联络线区域,动态等值过程如图1所示。

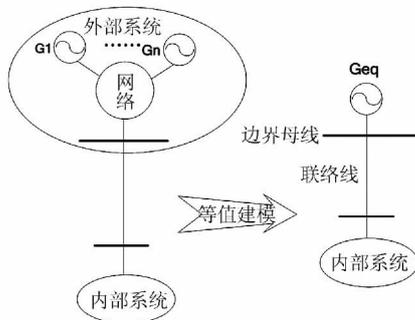


图1 单联络线区域动态等值示意图

### 1.2 多联络线区域等值模型

当电网外部系统与内部系统通过多条联络线相连时,需要进行多联络线区域动态等值。此时,外部系统等值模型相应地采用多台发电机,分别在每个联络线所连的边界节点处联接一台等值机。两联络线区域动态等值过程如图2所示。

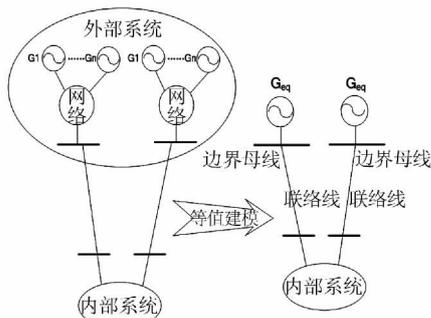


图2 多联络线区域动态等值示意图

### 1.3 发电机等值模型

动态等值模型主要用于电力系统机电动态过程分析中。由于动态过程时间较长以及系统的复杂性,采用计及饱和、考虑励磁、调速、PSS等的发电机详细模型并不必要,要将所有参数都准确辨识出来也几乎不可能。因此,等值发电机模型可以忽略定子绕组和阻尼绕组的电磁暂态,仅计及励磁绕组的动态过程,从而获得常用的三阶机电暂态模型。该模型既简单又考虑了励磁绕组动态,阻尼绕组的作用可通过在转子运动方程中的阻尼项来近似考虑。

本项目研究水电机群等值,为了使模型参数可辨识,并简化分析和计算,往往忽略暂态凸极效应,即令  $x'_d = x_q$ ,用隐极化了的暂态电抗  $x'$  后的电势  $E'$  来代表发电机。这在大规模电力系统分析中经常应用,而且取得了满意的结果,故这里采用这种简化模型。另外,对励磁系统采用比例反馈模型,调速系统采用转矩恒定模型。下面给出具体等值模型方程。

$$\begin{cases} T_j \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - \omega_s) \\ \frac{d\delta'}{dt} = \omega - \omega_s \\ T'_d \frac{dE'_q}{dt} = -E'_q - (x_d - x'_d) i_d + E_f \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $E_f = E_{f0} - K_v(V - V_0)$ ,  $u_d = x_q i_q$ ,  $u_q = E'_q - x'_d i_d$ 。下标  $m$ 、 $e$  分别表示机械部分和电磁部分;  $E'_q$  为暂态电抗后电势;  $\delta'$  为  $E'_q$  与参考轴的夹角;  $\omega$  为转子转速;  $x'_d$  为暂态电抗;  $x_d$  为同步电抗;  $\omega_s$  为参考轴转速;  $T'_d$  为暂态闭路时间常数;  $K_v$  为电压反馈系数;  $T_j$  为惯性时间常数。

设发电机端口电压为  $V \angle \theta$ ,  $V$  为联络线母线电压;  $\theta$  为母线电压相角。

$$u_d = V \sin(\sigma' - \theta) = V \sin(\sigma) \quad (2)$$

$$u_q = V \cos(\sigma' - \theta) = V \cos(\sigma) \quad (3)$$

$$i_d = [E'_q - V \cos \sigma] / x'_d \quad (4)$$

带入式(1)可得

$$T'_d \frac{dE'_q}{dt} = -E'_q - (x_d - x'_d) / x'_d [E'_q - V \cos \sigma] + E_f \quad (5)$$

为方便起见,可以将  $x_d$ 、 $x'_d$ 、 $E'_q$  写成  $x$ 、 $x'$ 、 $E'$ ,重新列写发电机的功率方程式为

$$\begin{cases} P_e = \frac{E'V}{x'} \sin(\delta' - \theta) \\ Q_e = \frac{E'V \cos(\delta' - \theta) - V^2}{x'} \end{cases} \quad (6)$$

上面推导的发电机模型和输出功率方程构成所研究的中小水电机群的动态等值模型。其输入量为  $[V, \theta, \omega_s]$ , 输出量为  $[P, Q]$ , 待辨识参数为  $[x, x', T'_d, T'_j, D, K_v]$ 。

## 2 基于 PSASP 与 FOXPRO 交互计算的小水电机群动态等值方法研究

PSASP 被国家电网公司各省调度中心广泛应用于电网安全稳定分析。PSASP 软件虽然具有批处理计算功能,但是在每次计算过程中不能实现自动参数更新,无法完成发电机参数辨识,因此在进行等值发电机参数辨识的迭代过程中,计算速度相当慢,而且计算结果往往偏离真实结果。为了给电网公司监测、调度、运行等相关部门提供更加方便直观的分析结果,并且尽可能地缩短等值时间,提高等值的准确度,本节将提出采用 VISUAL FOXPRO 和 PSASP 相结合,混合编程,相互调用的方法来实现发电机群的动态等值。PSASP 作为交互计算的主平台,主要用于潮流计算以及每次等值机参数更新下的暂态稳定计算。VISUAL FOXPRO 作为辅助平台,主要用于发电机参数辨识以及各次计算结果的数据处理。

### 2.1 小水电机群动态等值方法

原型系统和等值系统都可以用相似的线性状态方程表示,方程阶数比原型系统要小得多。原型系统用状态方程表示如下。

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (7)$$

$$Y = CX \quad (8)$$

式中  $X$  为系统状态量;  $Y$  为量测量;  $u$  为施加的故障;  $A$  为系统矩阵;  $B$  为故障矩阵;  $C$  为量测量矩阵。等值系统可以表示为

$$\dot{X}'(\alpha) = A'(\alpha)X'(\alpha) + Bu \quad (9)$$

$$Y'(\alpha) = C'(\alpha)X'(\alpha) \quad (10)$$

式中  $X'(\alpha)$ ,  $Y'(\alpha)$ ,  $A'(\alpha)$ ,  $C'(\alpha)$  为等值模型参数向量  $\alpha$  的函数,  $\alpha = [x, x', T'_d, T'_j, D, K_v]$ 。

原型系统在随机扰动信号的作用下产生响应  $Y$ , 等值系统在相同的扰动信号作用下产生计算值  $Y'(\alpha)$ , 其误差为  $e$ 。代价函数  $J$  就是量测误差  $e$  的函数  $e = Y - Y'(\alpha)$ , 经辨识准则计算后,更新模型参数向量  $\alpha$ , 反复迭代直至误差  $e$  满足代价函数最小为止。数学表述可写为

$$J = f(e) = \sum R | Y - Y'(\alpha) | \quad (11)$$

迭代模型参数向量  $\alpha$  使  $J$  最小, 则最优向量即被辨识。

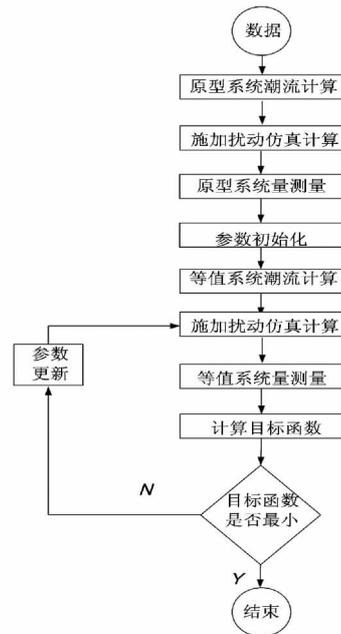


图3 电力系统动态等值计算流程

计算流程如图3所示,具体等值的步骤为:①对原型系统进行潮流计算,得到系统的初始稳态值;②施加扰动信号,测取功率响应  $Y$ ;③初始化等值系统待估参数  $\alpha$ ,选择等值系统模型;④对等值系统进行潮流计算,其稳态应与原型系统的初始稳态相同;⑤施加扰动信号,对等值系统进行仿真,计算响应  $Y'(\alpha)$ ;⑥按照式(11)计算误差函数;⑦利用辨识优化算法求待估参数  $\alpha$ 。

### 2.2 计算接口及实现方法

为了实现对 PSASP 计算程序的调用及用户程序和 PSASP 的计算接口,首先研究软件的计算流程和相关程序。如潮流计算程序 wmlf.exe、暂稳计算程序 wmud.exe、计算作业存储路径 OPDIR.DBF 等。等值计算接口程序涉及的 PSASP 数据库及相关文件如表1所示。

特别指出的是公共参数库文件夹 LIB 中存储了发电机及相关暂态计算数据。接口程序的目的是通过程序实现自动变参数多次暂态仿真,接口实现方法主要是采用 FOXPRO 数据库平台实现 PSASP 软件计算程序的调用和计算库的修改。

具体实现步骤为:①读取计算数据;②将暂稳计算程序 wmud.exe 置于 temp 文件夹下,设定故障形式,进行暂态仿真;③判断暂稳计算是否结束,计算完成后关闭暂稳计算进程,并为下一次计算做准备;

④读取计算结果,与原系统计算结果比对;⑤根据辨识计算和参数更新方法,按PSASP计算规则修改计算库中等值发电机参数;⑥多次自动变等值机参数仿真,直至等值系统响应与原系统响应一致。

表1 PSASP程序及其数据库

子文件夹	程序/数据库	数据文件	存储信息
	wmlf.exe		潮流计算程序
	wmud.exe		暂稳计算程序
DATA_IN	commdata		发电机、负荷
	stcase		暂稳计算数据
	lfcase		潮流计算数据
	L_DATA		潮流作业
RESULT	S_DATA		暂稳作业
	LFRESULT		潮流计算结果
	STRESULT		暂稳计算结果
	LIB	COMMPAR	公共参数库
		DATALIB	公共参数 计算库
Temp		FN1.DAT	DOS版本 计算结果
WPSASP		OPDIR	数据存储 路径

需要说明的是,开始暂稳计算之前需要将原系统联络线和等值系统联络线潮流调至基本一致。计算接口实现流程如图4所示。

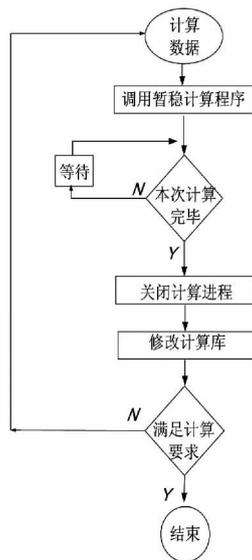


图4 PSASP计算接口流程

### 3 单联络线区域动态等值仿真验证

以四川电网某水电送出通道为例,选取三处小

水电站点G1、G2、G3接入系统作为待等值模型,其结构如图5所示。水电站G1、G2、G3均通过220kV变电站上网,并通过500kV变电站接入四川电网,总上网功率约216MW。

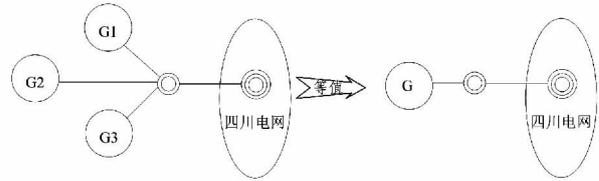


图5 小水电机群等值模型

按照上述等值方法,具体步骤如下。

1) 首先搭建系统模型。

2) 1.0s时,采用未等值系统模型,在四川电网某条线路施加持续0.1s的三相金属性短路故障,以联络线L上的有功功率响应作为系统实测功率录波数据,存储于文件FN2.dat中。

3) 将暂稳计算程序wmud.exe置于temp文件夹下,设定故障形式和仿真参数。

4) 将电站G1、G2、G3用等值机G代替,辨识发电机参数 $T_J$ 、 $x_d$ 、 $x'_d$ 、 $x_q$ 、 $D$ 、 $K_V$ ,由于本项目忽略暂态凸极效应和阻尼效应,因此 $x'_d = x_q$ 、 $D = 0$ 。

5) 调节等值系统潮流,使等值模型初始潮流,特别是联络线功率及电厂接入点电压幅值和相位与原系统基本一致。

6) 估计等值发电机参数范围,以此为参数搜索边界条件。

7) 以等值机联络线功率响应与原系统功率响应误差平方和为目标函数。

8) 利用PSASP等值计算接口,以相同故障形式对等值模型进行变参数自动暂态仿真,直至等值系统与原系统动态响应一致或接近。

等值机的等值参数如表2所示。系统等值前后相同故障下的功率、电压响应如图6和图7所示。从功率和电压对比曲线可以看出,等值前后系统动态响应比较吻合。对功率曲线进行振荡模式辨识,辨识结果如表3所示。可以看出,等值前后主振荡模式振荡频率和阻尼与等值前系统也比较吻合。

表2 单联络线区域动态等值参数辨识结果

参数	$x_d$	$x'_d$	$x_q$	$T_J$	$K_v$	$P$	$Q$
辨识值	0.993	0.298	0.298	7.68	20.48	209.51	16.26

表3 等值前后联络线振荡模式辨识结果

	幅值	相位	频率/Hz	阻尼
未等值	0.053 6	-106.123	0.388 1	0.022 9
	0.009 2	40.700 4	0.975	0.080 7
	0.006 7	-168.733	1.152 7	0.016 6
等值后	0.055 2	-111.37	0.389 7	0.026 2
	0.008 1	48.783 5	0.970 8	0.083 8
	0.006 2	-155.965	1.154 8	0.016 4

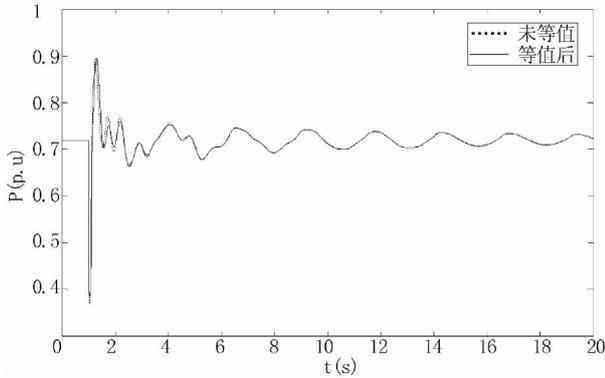


图6 等值前后联络线功率响应曲线

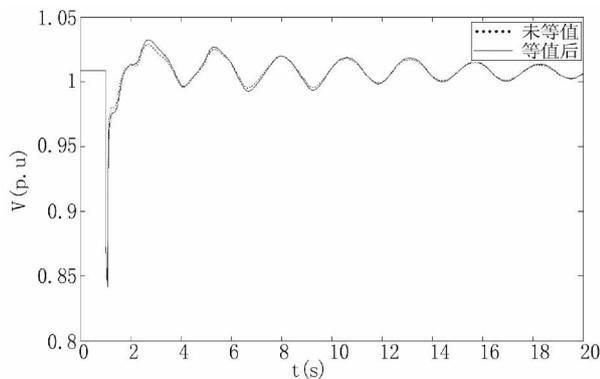


图7 等值前后出口电压响应曲线

由以上的仿真结果可以表明,由表2构成的等值机G基本可以反映G1、G2、G3共同作用的动态特性,且该方法具有快速、准确、简单、实用的特点,对于调度运行以及安全稳定控制能起到一定的支撑作用,具备一定的工程实用价值。

## 4 结论

给出了外部系统和研究系统分别通过单联络线和多联络线连接时的等值模型,同时给出了等值系统模型所采用的发电机模型结构和方程表达式。针对同调法和模态法动态等值对外部系统做等值简化时,需要尽知外部系统的结构、参数以及各工况下的运行状态的局限性,提出了一种基于变电站线路出口信息的小水电机组等值方法,对于集中上网中小水电机群,发电机参数,励磁、调速参数部分未知或

全部未知情况下,利用较大扰动后变电站高压侧出线的电压电流动态响应信号,将集中上网水电机群等值为一台机组。并根据运行方式,可外推出多种开机方式下的等值发电机参数。

### 参考文献

- [1] 王卫华. 3区域互联电力系统动态等值的辨识方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [2] 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.
- [3] 余耀南. 动态电力系统(第一版)[M]. 北京: 北京水利电力出版社, 1985.
- [4] 鞠平, 韩敬东, 倪腊琴, 等. 电力系统动态等值的在线测辨研究(1)——模型及其可辨识性[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 15-17.
- [5] 周云海, 李咸善, 胡翔勇, 等. 基于联络线动态潮流的动态等值方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(5): 29-33.
- [6] 谢宏杰. 双端口互联电力系统动态等值问题的研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [7] 鞠平. 电力系统非线性辨识[M]. 南京: 河海大学出版社(第一版), 1999.
- [8] 倪腊琴. 同步发电机和动态等值模型的可辨识性与辨识方法的研究[D]. 南京: 河海大学, 1998.
- [9] 倪以信, 陈寿孙. 动态电力系统的理论和分析(第一版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [10] 段献忠, 汪馥英, 何仰赞, 等. 负荷建模研究现状综述[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(8): 602-608.
- [11] 李娟, 丁坚勇. 电力系统负荷建模和算法的研究及进展[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2209-2213.
- [12] 文劲宇, 吴清华. 利用就地测量量进行负荷静态等效的新算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 17-20.
- [13] 许剑冰, 薛禹胜, 张启平, 等. 电力系统同调动态等值的评述. 电力系统自动化[J], 2005, 29(14): 91-95.
- [14] 伍黎艳. 基于参数辨识的电力系统动态等值方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [15] 余贻鑫, 陈礼义. 电力系统安全性与稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

### 作者简介:

魏巍(1984),男,博士,工程师,研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电;

丁理杰(1981),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制;

史华勃(1987),男,硕士,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等;

滕予非(1984),男,博士,工程师,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2013-06-20)