

PSASP 动态等值功能的应用与分析

刘宪林, 矫龙飞, 程子霞

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为简化计算常将电力系统不需要进行详细分析的某些区域进行等值简化. 以典型算例和实际大规模区域电网为对象, 对 PSASP 中的 EPRI E' 动态等值功能进行验证分析, 指出其优点和不足. 该功能操作简便实用; 既可用于单区域等值, 也可以实现多区域等值; 既可用于稳态等值计算, 也可实现机电暂态稳定等值计算; 但在某些情况下可能出现无法完成等值计算即等值失效的情况, 具体原因及其改进措施有待进一步研究.

关键词: PSASP; 电力系统; 动态等值; 潮流计算; 暂态分析

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.003

0 引言

随着互联电力系统的日益增大, 区域电网之间的联系加强, 逐渐形成了大规模的联合电力系统, 这就使得电力系统的仿真计算规模变得异常庞大. 为了节省计算时间和计算机空间, 在保留原系统动态特性前提下, 对不需研究分析的部分进行等值简化处理. 动态等值是保持电力系统中需要研究的区域不变(或称为内部系统, 研究网), 而对外部系统(等值网)在保证其对研究系统的动态影响不畸变前提下进行简化的过程^[1].

PSASP(电力系统分析综合程序)是国内电力部门和科研院所普遍应用的系统分析计算软件, 它构造上万节点的大型电力网络数据库^[2]. 该软件可进行电力系统的多种计算分析, 如暂态稳定性分析、继电保护的整定、电力系统等值计算等. 笔者在分析动态等值原理的基础上, 应用 PSASP6.28 版动态等值模块, 对经典算例和实际系统进行计算研究, 指出了软件该模块的优点及部分不足, 以期工程科技人员应用该软件的动态等值功能和软件的更新升级提供参考.

1 PSASP 动态等值基本原理

1.1 电力系统常用的动态等值方法简介

电力系统等值可以分静态等值和动态等值两

部分. 电力系统静态等值法主要有 Ward 等值法和 REI 等值法. 电力系统常用的动态等值方法有同调等值法^[3]、模式等值法、估计等值法等.

同调等值法是将互联电网受到扰动后转子振荡趋势较为接近发电机划分为一组, 这一组发电机可以用一台等值机标示. 该方法适用于大规模电力系统离线暂态稳定分析. 研究系统在任何同一大扰动下, 等值前后转子摇摆曲线相同或者接近.

模式等值法是通过消去外部系统线性化模型矩阵的高频特征根来实现系统的降解简化^[4-5]. 它物理概念清晰, 具有严格的数学基础, 适用于大规模电力系统的小扰动分析.

系统在受到扰动情况下, 利用数值拟合方法对内部系统和外部系统联络线上外部系统的动态响应来估计和辨识外部系统参数的等值方法是估计等值法^[6]. 估计等值法的近年来研究比较多的电力系统等值方法. 该方法需要有大量的实测数据做支撑, 当系统有变化时用这些实测数据对外部系统进行辨识等值, 以便对研究系统进行动态分析. 相较于前两种等值方法, 估计等值法可以对大规模电力系统进行在线动态安全分析.

1.2 EPRI E' 等值法

PSASP 等值计算提供了两种等值方法, 一种是用于稳态计算的 Ward 等值法, 另一种是由中

收稿日期:2013-09-03; 修订日期:2013-11-09

基金项目:河南省教育厅重点科研计划资助项目(12A470008)

作者简介:刘宪林(1955-), 男, 河南洛阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究; E-mail:liuxl@zzu.edu.cn.

国电力科学研究院提出的一种在稳态计算和暂态计算均可应用的 E' 等值法,称为 EPRI E' 等值法. 程序提供了图示化的等值结果,方便查看等值结果,并且等值结果可直接生成等值数据库组,可通过文本方式进行浏览,同时也可以进行数据组选择,方便简化后网络的各种计算以及等值前后网络的对比计算等. 笔者主要对 EPRI E' 等值法进行讨论.

EPRI E' 等值法在等值机的处理上与静态等值中的 REI 等值法类似,是具有固定的网络接线方式的有源多端子系统的等值方法. 该等值方法除能够保证稳态边界外,还考虑了待简化子系统的开路和短路条件,这就保证等值子系统边界处的开路电压和短路阻抗等与等值前系统的相关参数相等,能够用于暂态稳定的计算.

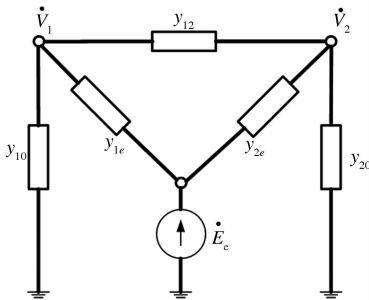


图 1 两端口网络的等值电路

Fig. 1 The equivalent circuit of two - port network

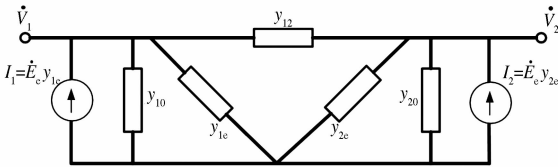


图 2 以电流源表示的两端口网络等值电路

Fig. 2 The equivalent circuit of two - port network with current source

EPRI E' 等值法的基本思想是以一台等值机及相应的固定接线网络来等值系统中动态行为相近的机组及相应的负荷、线路,等值网络的固定接线方式随着端口数的不同而变化,端口数确定后相应的接线方式亦可确定,如图 1 所示即为两端口等值网络的固定接线形式. 当待简化的子系统(等值网)确定后,该方法可以确定子系统等值机的内电势(大小和角度)和等值网络的参数.

假设待简化的子系统内有 n 台发电机及若干负荷,所有发电机以暂态电抗后恒定电势(E')模拟;所有负荷以恒阻抗模型模拟. 当用一台恒定电势模拟的电机等值时,等值惯性常数为

$$T_J = \sum_{i=1}^n T_{Ji}. \quad (1)$$

按照各个发电机惯性常数加权平均,可得到等值机的恒定电势和电势角

$$E_e = \frac{1}{T_J} \sum_{i=1}^n T_i E'_i. \quad (2)$$

$$\delta_e = \frac{1}{T_J} \sum_{i=1}^n T_i \delta_i. \quad (3)$$

其中, T_i, E'_i, δ_i 分别为各个发电机的惯性常数、恒定电势及电势角. 以上 3 个公式实际上已求出了等值系统的惯性中心(即等值机). 如果等值区域内的机组同调或者其动态行为相似或相近,等值计算后网络的动态特性与等值前的更加接近.

图 2 是与图 1 对应的以电流源表示的等值后两端口网络等值电路,可得其节点电流方程

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

导纳矩阵各元素可由实际待简化子系统得到. 将等值后固定接线方式的网络各元件阻抗代入上式后可得以下等式

$$\begin{cases} Y_{11} + Y_{12} = y_{10} + y_{1e}; \\ Y_{21} + Y_{22} = y_{20} + y_{2e}; \\ Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}. \end{cases} \quad (5)$$

若切断待简化子系统与主系统的联系,将子系统内所有电压源短路并在两个端口注入电流源(如图 2 所示),则端电压就是实际子系统的开路电压 \dot{V}_{10} 和 \dot{V}_{20} ,可以方便地由实际待简化子系统开路后的方式计算得到. 将式(4)写为阻抗矩阵形式,并以电流源形式表示注入电流有

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_e y_{1e} \\ \dot{E}_e y_{2e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{10} \\ \dot{V}_{20} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由(4)~(6)式即可解出两端口等值网络中各个导纳参数. 一般的,对于 n 端口网络子系统可用相应的固定接线方式及相同的算法求取等值网络参数^[7].

使用 PSASP 进行等值计算的流程可用图 3 简要表示,其中等值方法可选择动态等值或静态等值(笔者仅涉及前者),而通过输电断面两侧的一对或多对母线则可确定等值区域和保留区域.

在电网实际计算中有时需要将多个互不直接联系的子区域进行简化处理,即多区域等值. EPRI E' 等值法不仅可以完成单个区域的等值计算,还可以同时对多个区域进行等值,等值机的数量与等值子区域数量相等.

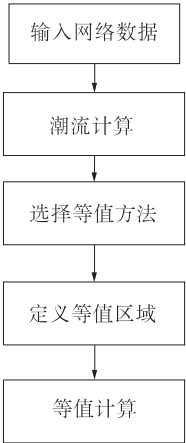


图 3 等值计算流程图

Fig. 3 The flow chart of equivalent calculation

2 PSASP 动态等值的应用分析

2.1 典型算例单区域等值计算应用分析

IEEE39 节点纯交流电力系统单线图如图 4 所示,该系统有 10 台机,19 个负荷,节点 31 为平衡节点.在 PSASP 暂态稳定计算中 10 台发电机的同步机模型均选择“3”,即 E_q' 变化的三阶模型.以系统节点 2,17,18 为等值网边界,以节点 1,3,16 为研究网边界进行等值计算.本部分对等值前后网络的潮流计算和暂态稳定性计算分别进行对比分析.

按照图 3 的流程进行等值计算,得到惯性中心(即其等值机)的恒定电势为 1.609,等值电势角

的值是 42.48° ,惯性常数 18.1 s.用等值后数据组进行潮流计算,并和等值前网络潮流进行对比,如表 1 所示.表中传输有功、无功为等值网边界向研究网传送的功率,正值表示等值网向研究网输送功率,负值表示等值网向研究网吸收功率.最右一栏“变化率”是分别计算等值前后传输有功、无功之差除以等值前该边界传输的有功、无功取百分数而得.

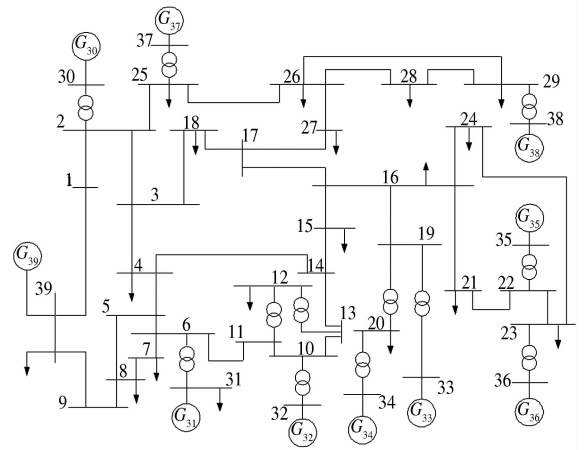


图 4 IEEE 10 机 39 节点系统

Fig. 4 IEEE39 bus power system

从表 1 可以看出,等值前后边界节点传输的功率几乎没有变化,进一步查看等值前后研究网的各个节点电压相角也基本一致,EPRI E' 等值计算可以满足工程计算中稳态潮流计算要求,可以通过等值突出研究网,节省计算时间.

表 1 10 机 39 节点系统等值前后边界潮流

Tab. 1 Boundary flow of the IEEE39 bus system before and after equivalence

边界节点		等值前(标幺)		等值后(标幺)		变化率/%	
等值网	研究网	传输有功	传输无功	传输有功	传输无功	有功	无功
2	1	1.161 1	-0.276 9	1.161 2	-0.277	-0.008 61	-0.036 11
2	3	4.072 9	0.983 6	4.073 3	0.983 6	-0.009 82	0
17	16	-1.286 4	0.118 0	-1.286 2	0.118 0	0.015 547	0
18	3	-0.272 7	0.021 9	-0.272 7	0.021 9	0	0

对等值系统的暂态分析通过假设系统发生三相对地短路的严重故障来进行,观察发电机的转子相对角度 δ 为表示区分称故障点距离等值子系统近的近点和故障点距离等值子系统远的远点来进行.近点选择母线 16 处出口两相短路接地,0.2 s 发生故障,0.35 s 切除故障,观察发电机 35 和 39 的转子相对角变化曲线 δ_{35-39} ;远点故障选择母线 11 处三相接地短路,其他实验条件与近点故障相同.

图 5 所示为近点故障时系统等值前后转子相对角变化曲线,图 6 所示为远点故障时系统等值前后转子相对角变化曲线.通过对比可以看出,系统发生故障后 2 s 内原系统和等值简化后的系统转子相对角变化曲线一致,不影响暂态稳定性分析.

2.2 实际电网多区域等值应用分析

以华中电网实际系统为例,对 EPRI 等值法进行验证.华中电网区域包括豫、鄂、赣、湘、渝、川

等省市的电网. 赣网和湘网通过若干条 500 kV 交流线与鄂网连接, 而赣网和湘网之间并无直接连接的线路. 以赣网和湘网作为需要等值简化的两个子区域, 对网络等值前后的稳态潮流和发电机相对角度变化情况进行对比.

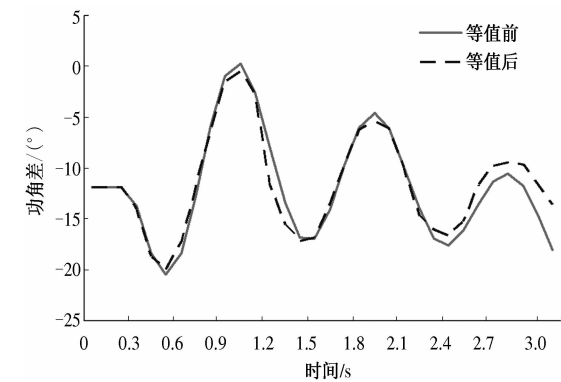


图 5 近点故障等值前后 δ_{35-39} 曲线

Fig. 5 The curve of relative rotor angle before and after equivalence at vicinity

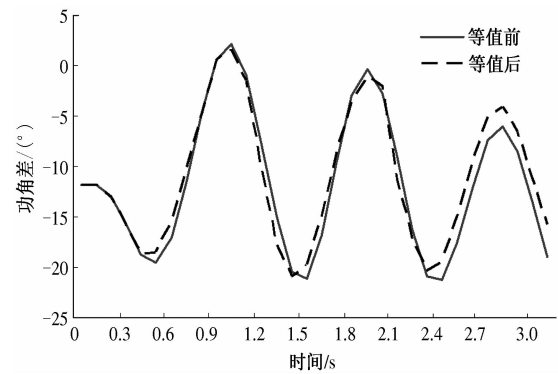


图 6 远故障等值前后曲线

Fig. 6 The curve of relative rotor angle before and after equivalence at distance

等值后湘网得到惯性中心(即等值机)的恒定电势为 1.059 2, 等值电势角的值是 31.22° , 惯性时间常数 876.1 s; 赣网惯性中心的恒定电势为 1.110 9, 等值电势角 8.66° , 惯性时间常数 739.356 s. 等值前后等值网边界和研究网边界的功率传输情况如表 2 所示.

表 2 华中网等值前后边界潮流

边界节点		等值前(标么)		等值后(标么)		变化率/%	
等值网	研究网	传输有功	传输无功	传输有功	传输无功	有功	无功
鄂宋家 500	宋岗抗	11.741 7	1.378 7	11.740 5	1.378 5	0.010 22	0.014 506
鄂江陵 500	江复 I 抗	8.132 1	0.274 6	8.130 7	0.274 5	0.017 216	0.036 417
鄂江陵 500	江复 II 抗	8.132 1	0.264 5	8.130 6	0.264 4	0.018 445	0.037 807
鄂磁湖 500	磁永抗	8.631 3	0.839 4	8.632 5	0.839 6	-0.013 9	-0.023 83
鄂咸宁 500	咸梦 I 抗	10.944 4	0.563 0	10.945 5	0.563 1	-0.010 05	-0.017 76
鄂咸宁 500	咸梦 II 抗	10.949 9	0.562 1	10.951 0	0.562 3	-0.010 05	-0.035 58

不难看出, 等值前后等值边界处的功率传输变化率最大不足 0.04%, 这在工程实际中并不影响计算精度. 等值前潮流计算用时 2 s, 等值后潮流计算用时 1 s, 时间大为缩短.

EPRI E' 等值法暂态特性分析假设川网中一点发生三相接地短路的严重故障, 时间是 0.1 ~ 0.3 s, 取川白水河#2 机组和豫姚孟 5G 机组, 观察其转子相对角的变化, 计算结果见图 7.

由图 7 可见, 该区域电网等值前后发生暂态故障时发电机间转子相对角变化情况一致, 可以用等值后的系统代替等值前系统作暂态分析. 等值前网络暂态计算耗时 8.8 s, 等值后网络耗时 6.89 s, 计算时间减少.

2.3 在等值计算中遇到的问题

通过算例对比发现, EPRI E' 等值法对等值系统动态行为的描述在系统发生扰动的 2 ~ 3 s 内与等值前原系统动态行为描述相似, 但继续加长

观察时间等值前后系统动态特性差异较大, 不能很好地反映等值前系统的实际状况. 可见该等值方法适用于暂态稳定性分析, 但对需要较长观察时间的低频振荡等稳定性分析并不适用.

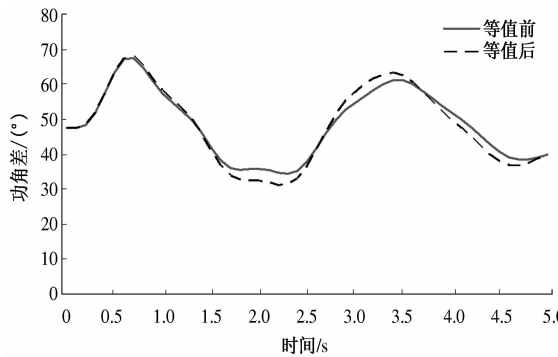


图 7 多子区域等值前后转子相对角曲线

Fig. 7 The curve of relative rotor angle before and after two areas equivalent calculation

文献[7]指出等值区域的选择主要依据计算经验和对计算数据的分析,通过大量计算分析的基础上来确定等值区域的划分,这给等值区域的合理选择带来了比较大的困难.

对华中电网进行等值时,将川网、湘网、赣网分别单独等值均可得到合理结果. 但将川渝网作为一个整体等值时,曾以母线渝张家坝 500 和渝九盘 500 作等值网边界节点、以母线张恩抗和奉节串补作研究网边界节点,或以母线张恩抗和渝九盘 500 为等值网边界节点、以母线鄂恩施 500 和奉节串补为研究网边界节点,等等,PSASP 程序均提示“The Voltages of E. Q Networks Is Not Equal To The Voltages of LF Network”,等值过程终止,不能得出等值结果. 这表明,PSASP 的动态等值功能在某些情况下会失效. PSASP 是一款在国内外都有重要影响、使用广泛的电力系统计算商用软件. 发现上述问题后,曾与软件开发人员进行了沟通和探讨,但未能得到明确的解释. 基于直观的判断,导致等值失败的可能原因,一是相比于川网、湘网、赣网单独等值,川渝网的规模更大,覆盖地域更广,二是等值区域与研究区域之间的输电断面上安装有串补,但确切的原因及其改进方法值得深入研究.

3 结论

笔者通过对 PSASP 中 EPRI 动态等值功能进行验证分析,得出以下结论:该功能操作简便实

用;既可用于单区域等值,也可以实现多区域等值;既可用于稳态等值计算,也可实现机电暂态稳定等值计算;但用于大型区域电力系统等值,或等值区域与研究区域之间的输电断面上安装有串补时,等值可能失败,确切原因及其改进措施有待进一步研究.

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,2001.
- [2] 魏巍,王渝红,李兴源,等. 基于 PSASP 的双馈风电场建模及接入电网方针[J]. 电力自动化设备,2009,29(12):68-73.
- [3] 李如琦,杭乃善. 暂态稳定分析中的角加速度同调识别法[J]. 广西大学学报:自然科学版,1995,20(4):373-377.
- [4] 张翼松. 电力系统动态等值及其应用[D]. 郑州:郑州大学电气工程学院,2011.
- [5] RAMIREZ J, VALLE R. Identification of dynamic equivalents preserving the internal modes ramirez [C] // IEEE Power Tech Conference Proceedings . Berin: Bologna, 2003 : 415-419.
- [6] 陈涵,邓长虹,李大路. 基于循环神经网络的动态等值模型辨识[J]. 高电压技术,2008,34(5):1001-1004.
- [7] 周孝信,李汉香,吴中习. 暂态稳定计算中的电网等值方法[J]. 中国电机工程学报,1983,1:12-17.

The Application and Analysis of PSASP Dynamical Equivalence

LIU Xian-lin, JIAO Long-fei, CHENG Zi-xia

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: For simplified calculation, we often simplify some areas that do not need intensive study in power system analysis. By using the PSASP software to process dynamical equivalence calculation in typical example and actual large scale power networks, this paper analyzes the advantages and disadvantages of PSASP dynamical equivalence function, which is named EPRI. It is convenient to use. It could calculate multiple equivalence and the calculated results are suitable for transient analysis. But in some situations the EPRI equivalent can not get results, and the equivalent calculation interrupts. The specific causes and improvement measures need to be further studied.

Key words: PSASP; power system; dynamical equivalence; power flow calculation; transient analysis