

电力系统外部等值理论及实用化探讨

刘峰

(福建电力调度通信中心, 福建 福州 350003)

摘要: 外网等值包含静态等值与动态等值两种等值方法, 是电力系统研究领域的一个重要分支。在对外部等值进行了简要概述之后于第一部分首先对静态等值的两大类方法: WARD等值法、REI法及其改进方法进行了详细阐述和小结, 然后针对同调等值、模态等值以及估计等值三种动态等值方法及其优缺点进行了归纳和分析。文章第三部分分别结合静态等值、动态等值在广东、福建电网中的应用实例并进行了具体分析。文章最后对外部等值进行了总结。

关键词: 电力系统; 外网等值; 静态等值; 动态等值; 能量管理系统

Elementary analysis of external network equivalence

LIU Feng

(Fujian Electric Power Dispatching and Communication Center, Fuzhou 350003, China)

Abstract: External network equivalence is an important investigation field in power system, which includes static equivalence and dynamic equivalence. After giving a brief description of ENE, this paper expatiates on the static equivalence involved Ward-type equivalence, REI equivalence and their improved methods. Afterwards, three dynamic equivalences consisting of coherency-based equivalence, pattern equivalence and estimation equivalence are depicted and induced. The characteristics of above mentioned equivalent methods with the advantages and deficiency are given respectively. In part III, some engineering practices of static and dynamic equivalence in Guangdong and Fujian provinces are analyzed and introduced. Ultimately, the research field of ENE is summarized and prospected.

Key words: power system; external network equivalence(ENE); static equivalence; dynamic equivalence; energy management system (EMS)

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)15-0067-05

0 引言

随电网的快速发展, 电网互联已是必然趋势。这给电力系统带来了许多新的问题, 互联电网中外部模型如何处理将对 EMS 中状态估计、静态安全分析、调度员潮流等众多高级应用模块产生很大影响, 因此电力系统外部等值已成为 EMS 中的一个重要功能模块。严格来说电力系统分析模型均包含简化因素。网络等值包含网络、机组、负荷三方面的等值, 其目的不外乎以下三点: 降低计算量、内存占用量以及降低量测信息需求量, 删除不关心部分。前两者随计算机技术和数据传送技术的发展已大为缓解, 随电网的不断发展和扩大, 处理网络的不关心部分成为中心问题。通常我们关心的仅仅是本地系统(内部系统), 对外部系统不需要也没必要搜集所有信息和模型, 因而可对外部系统进行网络等值, 保留关键节点, 略去不关心的部分, 此举大大缩小了计算规模, 提高了 EMS 的实用化进程。

根据研究系统静态行为的不同目的分为两种等值方法: 静态等值和动态等值。目前用于潮流计算的静态等值研究比较成熟, 但适合暂态研究的动态等值方法仍不成熟, 有待进一步研究。外部等值算法大致可划分为拓扑等值与非拓扑等值两类。拓扑等值需要外部系统的全部参数及网络结构来建立外部系统方程, 通过消元或其它简化措施求取外部系统等值参数; 非拓扑等值无需外部系统拓扑参数, 又称为辨识法, 它只需要内部系统的实时量测数据就可估计出外部系统等值参数。下面我们对各等值方法进行详细阐述。

1 电力系统静态等值

静态等值大多属拓扑等值, 主要包含 WARD 及 REI 两种等值方法, 对于静态等值具体要求有:

- 1) 外部等值需准确模拟外部系统物理特性;
- 2) 等值后系统满足收敛性、计算精度的要求;
- 3) 等值方法简单, 计算量尽量少;

- 4) 需求外部信息尽量减少;
- 5) 等值计算程序与现有潮流程序兼容;
- 6) 为保持稀疏, 等值外部系统保留节点尽量少。

在阐述静态等值方法以前, 有几个概念需要澄清, 即基本节点与基本支路的定义。在外部系统中对内部潮流影响较大的节点即为基本节点, 由各基本节点连接起来的支路为基本支路。外部等值时对基本节点和基本支路应予以保留并装备远动测点, 以保证内部系统在线潮流计算的精确性。通常可根据灵敏度分析法选取系统基本节点。最少的基本节点即边界节点, 最多的基本节点是外部系统全部节点和边界节点。

1.1 Ward 等值

1) 常规 WARD 等值: 这种等值方法由 WARD 于 1949 年提出并得到广泛应用^[1], 对线性网络来说为严格等值算法。该等值方法保留边界节点(外部系统等值后保留的节点), 其余外部节点全部消去。从数学角度来讲该网络等值过程实质上是线性代数方程的高斯消去, 若从物理角度讲则是对网络的星网变换。当外部系统节点全部为 PQ 时, 计算效果较好; 当外部系统有 PV 节点时, 若内部系统运行状态发生变化(如支路开断情况), 外部系统 PV 节点会向内网提供无功功率支援, 造成注入无功功率的偏差从而导致静态等值误差增大。此等值方法中外部系统对地电纳可由节点注入功率模拟, 这样能够提高系统计算收敛性, 对地电纳等效注入无功功率可由基本情况下潮流计算所得电压算出。

说明: 这种方法适合实际离线及在线应用, 因为内部与边界节点电压幅值相角与联络线(内部系统与边界节点联络线)潮流都可由状态估计提供。但外部系统注入功率在边界节点上的分配与边界节点电压及外部节点电压有关, 即与运行方式有关, 因此该等值是不严格的, 运行方式变化时存在一定的误差^[2], 并且存在等值网络求解潮流时迭代次数可能过多甚至不收敛、等值网络潮流可能收敛至一不可行解以及潮流计算结果误差可能过大等问题。常规 WARD 等值法非线性误差主要由注入节点复功率变化所引起。因为等值求解是在基本运行方式下进行, 电网实时运行方式的变化会导致外部系统实际注入功率的变化和系统参数变化因而产生较大误差, 这种问题在无功功率方面表现尤其明显, 这是因为常规 WARD 等值法在消元过程中消去了外网所有 PV 节点, 因此当系统方式变化时外部网络不能向内网提供无功支援。边界功率匹配可采用多平衡节点潮流技术自动进行。此外, 当边界节点较

多时 WARD 等值会导致导纳矩阵稀疏性变差, 这时需考虑其对稀疏性的影响。

针对上述常规 WARD 等值存在问题, 人们对其进行了深入研究并推出了如下几种改进方法:

2) WARD-PV 等值: 为提高外网等值精度, 需保留外部系统部分 PV 节点, 保留 PV 节点的选取原则是: 保留 PV 节点与内部系统电气距离尽量短以保证内部系统预想事故时的响应度; 保留 PV 节点具备最大的无功储备能力; 保留 PV 节点尽可能少。

3) 解耦 WARD 等值: 借助快速分解潮流方程推导得该等值方法。解耦等值的特点是外部系统接地支路对有功潮流无影响; 解耦后有功等值网络无接地支路而无功网络保留接地支路。解耦等值构造方法为: 有功网络等值忽略外部系统所有对地支路, 用高斯消去法得到有功潮流简化网络; 无功网络等值处理方法是外部系统 PV 节点接地, 用高斯消去得到无功潮流简化网络但每个边界节点需连接虚拟 PV 节点。虚拟 PV 节点电压模等于基本情况下该节点电压模值, 因此在基本情况下虚拟 PV 节点不会向内部系统提供无功支援, 以保证联络线潮流恒定。该等值方法对内部系统具很好的无功功率响应。

4) 缓冲等值法: 借鉴同心松弛的概念, 以边界节点为中心向外推广, 保留第一层节点, 忽略该层各节点间的联络线, 同时加上 WARD 等值所得边界等值支路与等值注入形成缓冲等值网^[3]。为保证内部开断故障时外部系统能提供无功支援, 可将所有缓冲母线定义为 PV 节点且规定有功注入为零, 并假设母线电压等于相连边界母线电压。因此, 在基本运行方式下缓冲母线不会向内部系统提供无功, 只有当内部系统故障开断时才会提供无功响应。需特别指出的是当边界节点本身为 PV 节点或有相邻 PV 节点连接时, 可不考虑添加对应缓冲节点。

1.2 REI 等值

基本原理是在保证注入功率不变的前提下用虚拟 REI(radial equivalent independent)节点代替被消去节点集合。通常可设置多个 REI 节点, 性质相似的节点集合可用一个等值 REI 节点代替。替代原则是: 设备(负荷或发电机类型)一致性等值; 节点性质(PQ、PV)一致性等值; 外部系统运行条件相近节点等值为一个 REI 节点。当在一母线上既有发电机又有负荷时, 可采用零阻抗支路将其隔离成两段母线分别进行归并。分别假定被等值节点全部为 PV、PQ 时推导所得条件是由基本运行方式下确定的, 这些条件非常苛刻, 一般可作为 REI 等值网络节点分组的准则。该等值是在基本运行方式下的

外部系统网络拓扑和注入功率下推导而得,若实时运行状态变化时需修改原等值网络,否则会引入较大误差。因此如何尽量少对原始 REI 网络修改并提高其对运行方式变化的适应性已成为在线 REI 方法的研究方向。将离线 REI 等值同在线的实时参数修正相结合是实现在线 REI 的主要思路。具体在线应用过程为:首先利用状态估计确定实时状态下边界节点电压幅值与相位角,然后以所有边界节点为平衡节点对外部等值网络进行潮流计算,由此可得边界节点校正注入功率以体现实时状态与基本运行状态的差异,此种等值思路方法称 X-REI 等值。X-REI 等值算法中可按以下原则选择节点:边界节点仍按基本运行方式选择;发电机虚拟节点选为 PV 节点(可按发电机电流相角差小于 10° 进行归并);负荷虚拟节点选为 PQ 节点;校正网络虚拟节点选为 PQ 节点。

小结:WARD 等值思路是利用外部网络拓扑数据进行等值,并考虑边界节点等值注入计算外部运行参数,因此数值解较为精确。但在线应用中仅考虑无功支援因素对实时性的要求来讲也是不够的。对于 REI 方法来讲,可以保持系统等值的稀疏性,因此非常适合在线应用,但是其运行参数往往包含于 REI 等值导纳阵,若外网节点归并不当可能会导致数值解出现异常。因此在实时等值时可考虑两种方法特点进行优势互补,采用一种混合的方法,即基本运行方式下采用 WARD 等值;实时方式下采用校正 REI 等值(如 X-REI 等值)以同时保证数值精确性和实时性的要求。网络等值软件与其它网络分析软件不同之处在于网络数据中的网络结构和参数是变化的,这大大增加了网络等值软件开发的难度。通常网络等值可作为独立的应用软件采用保留方式与其它网络软件传递数据,也可作为一个模块直接为其它应用软件所调用,因此可看作网络建模软件的补充。在软件设计中事先不能提前确定哪种算法最优,此问题应根据具体电网与运行方式试验选择。

2 电力系统动态等值

动态等值主要关心外部系统对于研究系统的动态响应过程,是电力系统暂态稳定分析和计算的重要手段,通常在以下三种情况下使用:

- 1) 大电力系统的离线暂态稳定分析。
- 2) 大电力系统的动态安全分析。
- 3) 大电力系统的稳定控制装置设计。

动态等值有三种主流方法,其中同调等值方法应用较为广泛,三种方法详述如下:

2.1 同调等值法

首先阐述同调机群的概念。将在一起以同一频率和相近角度摇摆的发电机划分为一组即为同调机群,在某同调机群内部的发电机可认为是刚性连接因而可简化为一等值机。根据暂态稳定计算的经验和采用以下简化条件,具体为:假设同调机群划分与扰动无关,系统可用线性模型表示;同调机群划分与高阶发电机模型无关,可忽略励磁及原动机调速器动态行为并采用经典二阶模型表示;基于高压电网特点,潮流可解耦处理。

动态等值过程包括以下内容:

1) 同调机群的判别:同调机群的划分与负荷模型相关性很小,因此可将负荷作为等值阻抗处理,并入节点导纳阵。正常情况下负荷注入功率为零,扰动模拟如母线甩负荷或负荷母线注入功率阶跃变化时为某一指定值。当扰动发生时,可用数值积分法求解同步发电机转子微分方程,用因子表法求解线性化有功网络方程(忽略电压无功因素影响),得到转子角度动态变化特性即可判断发电机相关性。可以采用线性模型模拟短路、甩负荷、切机及线路开断故障,判断同调的标准是整个计算时间段内两发电机相角差不大于某一角度值(一般取 $5^\circ \sim 10^\circ$);

2) 网络化简:包括相关发电机母线及负荷母线的化简。相关发电机母线的化简方法是首先将网络划分为需简化同调发电机群发电机端母线、边界母线及研究区域三个部分,然后根据等值前后注入功率守恒求解相关等值导纳。非线性负荷节点的处理方法是将非线性负荷节点从一群节点中划分出来并用 REI 法进行化简。为减小等值误差,一般保留长线和联络线两端母线;

3) 发电机单元的动态集合:即同调机群组合为一台等值机的过程,关键是确定等值机参数。

说明:同调性与扰动、工况以及网络拓扑等因素皆息息相关,因此不能根据某特定工况及故障判别同调机群并推广至所有工况以及故障情况。工程实际中很少有严格的同调,具体应用时应引入相应的实用化判据。同调等值中为分析方便应用简化的线性化模型,这不包含扰动的信息如大扰动时的情况,实质上是暗示同调与扰动无关的假设,因此应用效果并不十分理想。此外,某些学者提出了基于受扰轨迹主导群的观点划分同调群,电力系统本身固有的非线性和非自治性决定了其动态行为不能由某一瞬间的状态量来决定,完整的故障轨迹对于同调群的正确划分至关重要。此外,同调等值判断采用功角差而没有考虑角加速度等相关性因素,判据较为粗糙,这影响了最终结果精度^[4]。另外,同调判

据阈值的设置有否考虑不同工况规模以及扰动程度等众多因素的影响也是一个值得考虑的问题。

2.2 模态等值法

模态等值法用减少暂态分析中微分方程的阶数的方法节省计算时间。该方法求解思路是将原电力系统划分为内部系统与外部系统并保留两系统间端点, 然后结合外部系统线性化模型计算外部系统状态方程, 得到全部特征值后保留占优的主特征值而忽略其它特征值的影响, 这是一种相对简单的动态等值方法。该方法可加入控制器的影响且不需选择特定扰动, 但其等值模型不包含任何物理形式的等值元件, 因而不能利用现有的仿真元件进行分析且其线性化假设不能适用于大扰动情况。

2.3 估计等值法

同调等值与模态等值法都要求外部系统的完整结构和参数, 这个需求对于大型电力系统来讲非常困难, 因此它们一般只适用于离线计算。由于在线动态安全分析中运行方式的实时变化, 不可能得到外部系统的全部参数, 由此引入估计等值方法。该等值方法仅利用研究系统量测通过辨识即可得到理想的外部系统动态等值参数, 可满足外部系统在线实时动态等值的要求。根据施加扰动性质的不同, 估计等值方法可划分为随机信息法与确定信息法两种。人为施加的确定性扰动会影响系统运行, 一般采用最小二乘法求解; 随机扰动对系统运行影响较小, 但数学处理比较复杂, 对其可采用极大似然函数或卡尔曼滤波进行参数估计求解。估计等值方法也存在一定的问题, 即: 外部系统等值数学模型的选取具有经验性; 逐次迭代中估计待求参数的修正步长应确保计算快速收敛, 避免产生振荡。

小结: 同调等值法主要适用于大扰动暂态稳定分析, 采用同调等值方法时需满足等值前后功率恒定原则。基于线性化模型状态方程的模态等值法主要适用于小扰动的动态稳定分析。估计等值法即为根据系统动态响应或量测量的估计辨识法。前两种方法需外部系统全部数据, 第三种方法需对系统施加扰动并利用辨识方法进行估计外部等值系统模型参数。上述三种方法均针对特定运行方式等值, 还不能灵活适应系统方式的变化。

3 实用化分析

3.1 静态等值

边界节点挂等值机模型的方法是我国许多地区所采用的传统方法, 该方法难以保证结果的准确性。若采用固定的外部网络模型则无法保证内网调度操作和静态安全分析的准确性。针对我国电力系统的

管理模式和特点, 一种工程实用化的方法是通过实时数据交换自适应的更新外部网络模型, 由省调集中统一下发实时数据和等值参数, 各地调自适应更新外网等值模型和外网实时数据^[5]。可设置一个缓冲网大小可变的外网等值系统, 并根据用户实际需求灵活设定外网模型。如联合 DTS 培训时需采用详细外网模型, 正常运行时采用缓冲网模型即可。扩展 WARD 静态等值算法已实用化并得到广泛应用, 但它属于静态离线等值, 不能自动适应外部网络运行方式的变化。不同厂家的 EMS 软件可通过 IEC61970 标准的 CIM/CIS 接口实现互操作, 这使得实时外网等值自动生成系统的实现成为可能。省调侧等值计算采用扩展 WARD 等值方法, 随外部网络拓扑变化, 各个地区电网边界节点及其外网等值支路是变化的, 很难与地区电网本身实际设备模型相衔接。此外, 地区电网内网边界节点一般是固定的, 实时计算中需要拼接外网模型。为解决上述问题, 一种工程实践的处理方法是将等值网按照设备建模, 在等值线路、变压器上加装等值开关以与实时外网等值参数相配合, 从而控制等值网的拓扑结构, 建立实时的外网等值模型。采用该方法只需在初始化时装入固定的外网等值模型, 实时运行时接收外网等值支路上的等值开关状态以及相应外网等值支路参数即可。只有在外网模型发生变化时才需重传数据量较大的外网等值设备模型数据, 在正常运行时只需传送实时等值参数即可, 这部分数据量较小, 缩短了网络通信时间。

地调侧应用上述外网实时外部等值自动生成系统所提供外网模型和实时数据进行本地状态估计, 这是一种实用化的方法, 已在广东省地调得到实际工程应用^[6]。但是在采用缓冲网模型时需注意外网估计误差对本地估计的影响, 省网模型误差以及内外网量测采样、网络传送时间的不同步会造成边界失配量, 导致地调状态估计边界处量测残差增大从而导致整个内网的估计性能降低^[7]。此外, 边界处估计误差增大也会导致调度员潮流结果的准确性^[8]。注入量测是产生残差污染的重要原因, 同时注入量测也会造成信息矩阵条件数增大, 引发数值稳定性问题。一种解决的方法是在外网等值自动生成系统中采用缓冲模型, 禁用所有注入量测, 采用省调 EMS 在线潮流结果作为缓冲网支路潮流量测量实时下发至各个地调, 此举可减少边界误差积累, 改善估计收敛性和数值稳定性。利用关键量测残差为零的特性将边界量测作成关键量测可进一步阻断外网残差对内网的影响。同时, 采用更多外网支路量测可加大信息矩阵对角优势, 增强系统数值稳定性。上述外网

估计误差阻断方法的实施可保证在广域网通信中断情况下仍能保持地调侧较高的潮流计算精度。

3.2 动态等值

基于在线预决策、实时匹配策略的福建在线安控系统目前还不能得到华东电网的所有实时信息,此时动态等值模型的建立尤为重要。为适应华东多种运行方式,基于同调等值原理建立了等值系统参数与实际系统变量之间的数学关系^[9],通过实时系统参数的实时修正可较好的适应系统运行方式的动态变化。等值机动态参数仅与区域内开机方式有关,开机越多等值惯性越大,在福建向华东送电时,华东总出力相同条件下,开机越多,系统稳定度越差。在信息不全情况下基于保守性考虑,取机组全开模式下的等值机参数。负荷母线的简化采用电流变换法进行,结果表明,线路参数越大,稳定性越差。安控系统在实用中采用固定的较大线路参数值。等值系统中各节点负荷和并联导纳是实际系统中各节点负荷和导纳以及节点电压的复合函数。实际运行中根据所采集总系统有功无功负荷即可估计得到各节点负荷与导纳的吸收有功以及所发无功。在线暂态稳定的精度的提高也有赖于外网动态等值模型。具体方法是采用缓冲网等值并对重要外网厂站以及对内网影响较大的发电机详细建模。对线性网络元件(线路、变压器等)的等值不会造成外网动态响应信息的损失,外部系统信息误差主要由非线性元件(负荷、发电机等)引起。需从等值模型和等值算法两个角度来考虑动态等值。发电机转动惯量越大对内网影响越大,此类发电机保留需同时考虑电气距离和转动惯量的影响来选取。

4 结论

外部等值处理可简化系统不可观测部分,提高可观测性。同时,利用外部等值可协调解决速度与精度之间的矛盾。本文对电力系统外部等值问题进行概况分析和具体探讨,首先介绍了几种主流的静态等值方法及其改进方案,静态等值作为EMS的一个重要公共模块,对众多PAS(高级应用软件)模块影响深远,合理的等值可大大增加计算结果精度与速度。然后就电力系统动态等值问题进行了探讨,详细阐述了三种动态等值方法的思路及各自优缺点。文章第三部分结合实际应用,对广东、福建电网的外部等值模块工程实例进行了分析。由于动态安全的复杂性以及电力系统的多维高非线性的特点,动态等值领域仍旧有很多问题值得深入研究。

参考文献

- [1] 诸骏伟. 电力系统分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] 孙宏斌, 张伯明, 等. WARD型等值的非线性误差分析与应用[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(9): 12-16. SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Nonlinear Error Analysis and Application of WARD-type Equivalent[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(9): 12-16.
- [3] 张海波, 张伯明, 等. 不同外网等值模型对EMS应用效果影响的试验研究[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 1-6. ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming, et al. A Test Investigation on Effect of Different External Network Equivalent Models on EMS Applications[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 1-6.
- [4] 许剑冰, 薛禹胜, 等. 电力系统同调动态等值的述评[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 91-95. XU Jian-bing, XUE Yu-sheng, et al. A Critical Review on Coherency-based Dynamic Equivalences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 91-95.
- [5] 张海波, 张伯明, 等. 地区电网外网等值自动生成系统的开发与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 10-15. ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming, et al. Development and Application of Real-time External Equivalent System for Sub-transmission Networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 10-15.
- [6] 温伯坚, 张海波, 等. 广东省地区电网外部等值自动生成系统设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 77-79, 83. WEN Bo-jian, ZHANG Hai-bo, et al. 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, 83.
- [7] 张海波, 张伯明. 外网等值自动生成系统中地调侧外网估计误差的阻断[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(7): 24-27. ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming. Method to Isolate Estimation Error from External Network in External Network Real-time Equivalent System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(7): 24-27.
- [8] 刘峰. EMS中状态估计模块生产运行及实用化问题分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 118-123, 126. LIU Feng. Analysis of the State Estimation module in EMS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(7): 24-27.
- [9] 赵勇, 苏毅, 等. 福建电网在线稳定控制系统中华东电网的实时动态等值研究[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 18-22. ZHAO Yong, SU Yi, et al. Real-time Dynamic Equivalence of East China Grid for On-line Stability Control System of Fujian Power System[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 18-22.

收稿日期: 2006-11-25; 修回日期: 2007-02-09

作者简介:

刘峰(1976-), 男, 博士, 主要研究方向为能量管理系统、电力系统稳定。E-mail: liuaddress@tom.com