文章编号：1000-3673（2010）12-0094-05　中图分类号：TM 734　文献标志码：A　学科代码：470·4054

应用模型拼接建立的全电网模型

陈根军，顾全
（南京南瑞继保电气有限公司，江苏省 南京市 211102）

Creation of Complete Power Network Model by Splicing Power Network Model for EMS With External Network Model Built by BPA

CHEN Genjun, GU Quan
(Nari-relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: To improve the accuracy of power network analysis, the network model currently applied in dispatching center, in which the external power network is expressed as equivalent model, should be graded into complete power network model. By means of splicing power network model for EMS with external network model built by BPA, a complete power network model can be created, and the difficult points of model splice and the procedures for it are analyzed. Case study results show that by use of complete power network model, the calculation accuracy of power netwrok analysis can be improved.

KEY WORDS: external network model; complete power network model; Bonneville Power Administration (BPA); model combination; energy management system (EMS)

摘要：为提高电网分析的准确性，调度中心采用的电网模型应从外网等值模型逐步过渡到全电网模型。通过BPA(bonneville power administration)电网模型与能量管理系统电网模型进行模型拼接可生成全电网模型，分析了模型拼接的难点、步骤。算例结果表明应用全电网模型进行电网分析可提高计算精度。

关键词：外网模型；全电网模型；BPA；模型拼接；EMS

0　引言

在分级调度体制下，各级调度中心的能量管理系统(energy management system，EMS)建立电网模型时，一般只建立本调度中心管辖范围内的详细电网模型，而外网部分通常采用等值模型[1-3]，即在本区域电网与外网之间的边界部分建立简单的等值网络，并用等值发电机和等值负荷来代替外网的总发电量和总负荷。以上方式建立的外网等值模型过于简单，难以真实反映外网的真实情况，而基于该模型进行电网分析(如合环潮流计算)会影响分析结果的准确性，而且也难以满足电网在线安全分析的精度要求，为此有必要建立同时包括内网模型和外网模型的全电网模型，以提高计算精度。

调度专业人员应用 EMS 工具处理日常工作，所采用的电网模型是利用图模库一体化工具生成的模型。运行方式专业人员通常使用专用的电网分析软件，如 BPA(Bonneville Power Administration)、PSASP(power system analysis software package)等，进行不同运行方式下的电网分析，所采用的电网模型为 BPA、PSASP 电网模型。运行方式专业采用的电网运行方式一般通过人工设置获得，由于缺少与 EMS 之间的信息交互，往往难以获得电网实时数据，无法实现在线电网分析。

随着计算机技术的迅速发展，未来调度中心的电网模型也必将从外网等值模型过渡到全电网模型，并且不同专业之间能够实现电网模型的共享和数据的互通。

调度中心可通过将上、下级调度中心发送过来的外网模型与 EMS 电网模型进行模型拼接建立全电网模型。外网模型可以是标准的 CIM/XML (common information model/extensible markup language)电网模型[4-15]，也可以是专用的电网分析标准计算模型(如 BPA、PSASP 等)。从实际情况看，目前运行方式专业使用的 BPA、PSASP 模型通常为包括了完整外网的全电网模型，但缺少 EMS 实时数据。如果将运行方式专业使用的 BPA、PSASP 模型与 EMS 模型进行拼接，即外网部分采用 BPA、PSASP 模型，内网部分采用现有 EMS 模型，则拼接生成的全电网模型即可同时为调度和运行方式专业使用，并且能够获取电网实时数据。基于以上思想，本文将通过模型拼接建立全电网模型，以提高电网分析精度，便于各专业共享电网模型信息。

1　电网模型分析

一般来说，EMS 电网模型由内部电网和外部等值电网组成，其中，内部电网描述了调度中心管辖电网部分，而外部等值电网采用等值方式描述了与内部电网相联系的外部电网。外部等值电网可以是简单的等值负荷或等值发电机，也可以是包括联络线、等值厂站、等值发电机、等值负荷在内的等值网络，如图 1 所示。

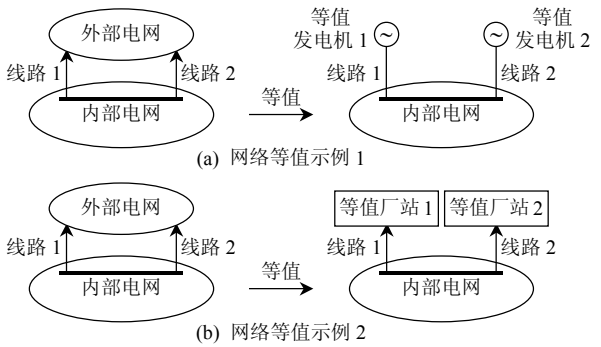

图 1　网络等值示例

Fig. 1　Examples of network equivalent

本文将内部电网与外部电网相联的联络线称为边界线路，而将与外部电网相联的内部厂站称为边界厂站。一般来说，对于省级电网，边界线路通常为 500 kV 联络线，边界厂站为 500 kV 厂站；对于地区电网，边界线路通常为 220 kV 联络线，边界厂站为 220 kV 厂站。

BPA 模型是直接用于网络分析的节点–支路模型，其由若干数据卡构成，主要数据卡可分为 4 类：区域控制数据卡、节点数据卡、支路数据卡和数据修改数据卡。目前，运行方式专业使用的 BPA 模型通常为包括了完整外网的全电网模型。

EMS 电网模型采用了外网等值模型，该模型简单，难以真实反映外网的实际情况，基于该模型进行电网分析会影响分析结果的准确性。而 BPA 模型虽然为全电网模型，但其电网方式是离线设置的，不能真实反映当前电网的实际运行方式。为了取长补短，需要实现 EMS 模型与 BPA 模型的模型拼接。

图 2 描述了 EMS 电网模型与 BPA 电网模型的模型拼接过程。

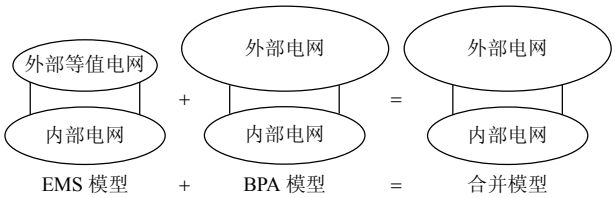

图 2　模型拼接

Fig. 2　Model combination

模型拼接过程中，EMS 电网模型的外网等值部分被 BPA 电网模型中对应模型所替代，并与 EMS 内部电网模型共同组成拼接后的合并模型。

模型拼接可采用 2 种方式：1）将 EMS 内部电网模型转换成 BPA 模型后，与 BPA 外网模型进行拼接，生成 BPA 大模型；2）将 BPA 外网模型转换成 EMS 电网模型后，与内部电网模型进行拼接，生成 EMS 大电网模型。在方式 1）下进行电网分析需要专门的 BPA 软件，不能充分利用 EMS 丰富的网络分析软件资源和平台工具，而且利用 EMS 实时数据更新 BPA 大模型中的内网状态也存在困难，因此本文采用方式 2）进行模型拼接。

EMS 电网模型真实描述了电网中各设备及设备间的连接关系，是物理电网的实际模型。而 BPA 模型是根据实际电网模型抽象得到的节点–支路模型，是电网计算模型。虽然从分析计算角度看，BPA 模型与实际电网模型是等价的，但其却未包含任何实际电网设备。因此要实现 EMS 模型与 BPA 模型的拼接需要解决 BPA 计算模型到 EMS 实际电网模型的模型转换问题，这是模型拼接的难点所在。

2　模型拼接

2.1　边界线路建立

为了实现模型拼接，需要首先建立 EMS 电网模型中边界线路与 BPA 模型中线路支路之间的对照表，从而将 BPA 模型正确划分为内网模型和外网模型。根据 EMS 建模需要，边界线路有多种模型表现方式，可以是线路，也可以是等值的发电机或负荷。无论边界线路采用何种建模方式，边界线路对照表必须保证能够将 BPA 模型划分为内网模型和外网模型，并且能与 EMS 模型正确对应。

2.2　边界厂站建立

边界厂站通过边界线路与外部电网相联系，因此根据边界线路对照表可以很容易确定 EMS 模型的边界厂站。

模型拼接时，EMS 模型边界厂站中的等值发电机、等值负荷需要替换成边界线路，EMS 模型中建立的属于外部电网的等值厂站需要予以舍弃，外部电网模型根据 BPA 模型重新建立厂站。

2.3　外网模型建立

由图 2 可知，拼接后的外部电网模型完全基于 BPA 模型中的外部电网模型而建立。由于 BPA 模型为等值电网计算模型，利用其建立 EMS 外部电

网模型时，需要将计算模型还原成电网物理模型。

作为等值计算模型，BPA 模型只包含节点、支路信息，而不直接包含设备信息，因此其还原为电网物理模型的程度是有限的，从电网分析计算角度看，这种近似不会带来任何影响。外网模型中各对象具体如下：

1）子控制区。

BPA 模型间接描述了子控制区对象。BPA 模型的每个节点均有 Zone 属性，该属性描述了节点所属的区域，据此可以建立外网模型的各子控制区。

2）厂站。

厂站作为设备容器，在 BPA 模型中没有直接对应的对象，而是以厂站包含的变压器支路对象和节点对象等隐含在模型中。厂站的显著特征是其通过线路与其他厂站相联系。据此可通过对 BPA 模型进行网络拓扑分析，以变压器为中心，利用宽度优先算法搜索变压器所在厂站包含的其他节点，从而建立外网的各个厂站。对于未搜索到的剩余节点，单独建立厂站，该类厂站通常为终端厂站或等值厂站，在 BPA 模型中未建立站内变压器模型。

3）变压器。

变压器在 BPA 模型中对应 1 或 3 条变压器支路。两卷变压器在 BPA 模型中描述为 1 条变压器支路，三卷变压器在 BPA 模型中描述为 3 条变压器支路，每条变压器支路均包含变压器虚拟计算节点。

在建立外网模型时，对于两卷变支路，可直接生成 1 个两卷变；对于三卷变支路，需要找到其余 2 条三卷变支路，将 3 条支路合并成 1 个三卷变。

BPA 模型中两卷变压器支路的 2 个节点为变压器两端的实际计算节点，电压等级为变压器两端的实际电压等级。图 3 描述了 220/13.8 kV 两卷变(电厂升压变压器)的还原过程，变压器支路直接还原成两卷变，而变压器支路两端的节点还原成母线。

对于 BPA 模型中的三卷变压器，每条变压器支路的一端节点为变压器的一个实际计算节点，电压等级为该卷的实际电压等级；而另一端节点为三卷变压器的虚拟计算节点，其电压等级可任意设置或者取变压器 3 个电压等级中的 1 个，3 条变压器支路通过该虚拟计算节点相联系，共同组成一个三卷变。图 4 描述了 220/110/35 kV 三卷变压器的还原过程，3 条变压器支路直接还原成三卷变压器，每条变压器支路包含的实际计算节点还原成母线，变压器的虚拟计算节点被舍弃。

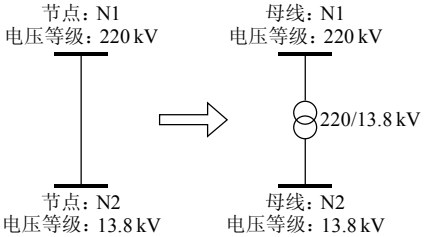

图 3 两卷变的还原过程

Fig. 3 Restore process of two-winding transformer

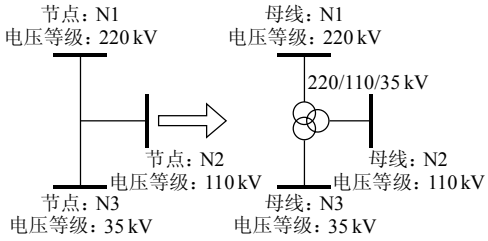

图 4 三卷变的还原过程

Fig. 4 Restore process of three-winding transformer

变压器还原过程中还需要解决 2 个问题：1）如何区分两卷变支路和三卷变支路；2）如何据 1 条三卷变支路查找其余 2 条支路。三卷变支路的一端节点为实际计算节点，另一端节点为虚拟计算节点，而两卷变支路的两端节点均为实际计算节点，据此似乎可以区分两卷变支路和三卷变支路，从而解决问题 1)，但由于 BPA 模型中实际计算节点与虚拟计算节点并没有特别的区分，因此根据这一点无法区分两卷变支路和三卷变支路。

对于虚拟计算节点，与该节点相连的变压器支路有且仅有 3 条，并且这 3 条变压器支路的另一端节点的电压等级一定不同。利用这一原则，可以顺利解决变压器还原过程中的 2 个问题，完成变压器的还原过程，具体思路为：首先根据上述原则找到所有虚拟计算节点，并设置该类节点的虚拟计算节点标志位为真；然后对所有变压器支路进行遍历，如果某个变压器支路的两端节点均不是虚拟计算节点，则该变压器支路为两卷变压器支路，否则为三卷变压器支路。对于三卷变压器支路，从虚拟计算节点端查找其他 2 条变压器支路，并将 3 条变压器支路合并为三卷变压器。

变压器对象建立后，根据所包含的各变压器支路计算节点所属厂站信息，并设置变压器与所属厂站之间的关联关系。

4）电压等级。

在厂站内部，变压器各侧属于不同电压等级，因此可根据 BPA 模型中变压器支路来生成厂站所含电压等级。对于未建立变压器模型的厂站，直接根据厂站内节点电压等级来生成电压等级对象。

5）母线。

母线对象根据 BPA 模型中的节点对象来生成。遍历 BPA 模型中所有外网节点，判断其是否为三卷变的虚拟计算节点，如果是，放弃该节点，否则生成 1 条母线。母线生成后，还需根据当前节点所属电压等级来设置母线所属电压等级。

6）发电机。

发电机根据 BPA 模型中的节点对象生成。遍历 BPA 模型中所有外网节点，检查节点的有功发电量是否为 0，如不为 0，则新建 1 个发电机对象，并设置发电机所属电压等级为该节点所属电压等级。

7）负荷。

负荷根据 BPA 模型中的节点对象生成。遍历 BPA 模型中所有外网节点，检查节点的有功负荷及无功负荷是否为 0，如有 1 个不为 0，则新建 1 个负荷对象，并设置负荷所属电压等级为该节点所属电压等级。

8）容抗器。

容抗器根据 BPA 模型中的节点对象生成。遍历 BPA 模型中所有外网节点，判断当前节点是否为容抗器节点类型，如是，则新建 1 个容抗器对象，并设置容抗器所属电压等级为该节点所属电压等级。

9）交流线路。

交流线路根据 BPA 模型中的对称线路支路 L 卡、不对称线路 E 卡来生成。

10）直流线路。

直流线路根据 BPA 模型中的两端直流线路数据卡来生成。对于每条直流线路，不仅需要生成直流线路对象本身，还要生成整流器、逆变器以及换流变压器等相关对象。

11）开关、刀闸。

开关、刀闸在 BPA 模型中完全消失，根据 BPA 模型难以重现开关、刀闸模型，因此从网络分析角度看，可以不建立开关、刀闸模型。但为了方便外网运行方式的设置，也可以为各种主设备建立开关模型，如为线路两侧分别建立 1 个开关对象，为变压器各侧分别建立 1 个开关对象。

2.4　外网模型入库

外网模型建立后，需要将外网模型对象生成到 EMS 网络模型数据库中。同时，为了完善设备模型，还需要在网络模型数据库中生成与主设备相关的附属设备对象(如对于变压器，需要建立变压器卷和分接头对象；对于发电机，需要建立发电机组对象等)。另外，为了描述设备之间的连接关系，需要在数据库中生成电网拓扑模型，拓扑模型由设备端点、连接节点以及它们之间的关联关系来共同描述。

2.5　拼接

外网模型入库后，通过与内网模型进行模型拼接，形成统一的全电网模型。模型拼接根据边界线路对照表进行。如果边界线路在 EMS 模型中已经建模为线路，则保持不变，直接建立边界线路与外网模型的拓扑关联；如果边界线路在 EMS 模型中建模为等值发电机或等值负荷，则删除该等值发电机或等值负荷，新建线路对象，并分别与内网模型和外网模型建立拓扑关联。

模型拼接完成后，还需要将网络模型数据库中多余的外网等值厂站删除掉。

3　算例分析

利用模型拼接生成全电网模型后，即可利用该模型进行各种电网分析。由于拼接前外网潮流方式与内网潮流方式并不一致，因此对拼接后的全模型进行电网分析时，对外网模型只利用外网中发电机注入功率和负荷注入功率，而不利用其支路潮流和节点电压，同时取外网模型中的 1 台或多台发电机作为计算用平衡发电机，以平衡全网的发电负荷不平衡量。因此，全模型内外网边界潮流将主要取决于内网，从而可获得较好的潮流匹配效果。实际应用时，可由上级调度中心的 EMS 系统按一定周期生成实时的 BPA 外网模型，从而使内外网边界潮流的计算结果更为准确。

本文以华东某地区电网为例进行分析，内网模型采用地区 EMS 电网模型，其中包含 5 个外网等值厂站以及 10 条边界线路，外网模型采用省调下发的 BPA 模型，该模型包含了华东 220 kV 以上电压等级的电网。模型拼接后，生成全电网模型，并利用该模型进行调度员培训仿真。调度员培训仿真初始断面中外网运行方式直接采用 BPA 模型的运行方式，而内网运行方式采用 EMS 的实时运行方式。分别在全电网模型和地区 EMS 电网模型下运行调度员培训仿真系统，对 2 种电网模型下的仿真结果进行对比后发现，采用全电网模型时地区电网中 220 kV 电压等级电网的仿真结果比采用外网等值模型的地区 EMS 电网模型的仿真结果更接近实际情况，特别是边界 220 kV 厂站，采用地区 EMS 电网模型计算得到的该厂站动态潮流误差较大，而

基于全电网模型的动态潮流结果则基本符合实际情况。对于地区电网中 110 kV 及以下电压等级部分，2 种模型的仿真结果基本接近，这主要是因为外部电网模型对地区电网 110 kV 及以下电压等级电网影响较小。

4 结论

准确的外网模型是提高 EMS 电网分析精度的重要基础，也是 EMS 高级应用实用化的前提。随着计算能力的不断提高和智能电网对不同层次电网模型信息融合的需要，调度中心传统的基于外网等值模型的电网分析可以逐步过渡到基于全电网模型的电网分析。本文探讨了调度中心利用 BPA 外网模型与 EMS 模型进行模型拼接生成全电网模型并进行电网分析的可行性，今后还需对 BPA 与 EMS 拼接模型的统一命名规范进行进一步研究，以方便模型拼接，并可考虑采用实时 BPA 外网模型，以使拼接后的全电网模型更准确。

参考文献

[1] 张海波，张伯明，王志南，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 Haibo，Zhang Boming，Wang Zhinan，et al．Development and application of real-time external network equivalent system for sub-transmission networks[J]．Power System Technology，2005，29(24)：10-15(in Chinese)．

[2] 张海波，张伯明，王俏文，等．不同外网等值模型对 EMS 应用效果影响的实验研究[J]．电网技术，2006，30(3)：1-5．
Zhang Haibo，Zhang Boming，Wang Qiaowen，et al．A test investigation on effect of different external network equivalent models on EMS applications[J]．Power System Technology，2006，30(3)：1-5(in Chinese)．

[3] 王刚，张伯明．电力系统外网在线动态等值方案[J]．电网技术，2006，30(16)：21-26．
Wang Gang，Zhang Boming．External online dynamic equivalents of power system[J]．Power System Technology，2006，30(16)：21-26(in Chinese)．

[4] 刘崇茹，孙宏斌，张伯明，等，基于 CIM XML 电网模型的互操作研究[J]．电力系统自动化，2003，27(14)：45-48．
Liu Chongru，Sun Hongbin，Zhang Boming，et al．An investigation on a common information model for energy management system[J]．Automation of Electric Power Systems，2003，27(14)：45-48(in Chinese)．

[5] 潘毅，周京阳，吴杏平，等．基于电力系统公共信息模型的互操作试验[J]．电网技术，2003，27(10)：31-35．
Pan Yi，Zhou Jingyang，Wu Xingping，et al．Interoperability test based on common information model[J]．Power System Technology，2003，27(10)：31-35(in Chinese)．

[6] 刘崇茹，孙宏斌，张伯明，等．公共信息模型拆分与合并应用研究[J]．电力系统自动化，2004，28(12)：51-55．
Liu Chongru，Sun Hongbin，Zhang Boming，et al．A research on incremental and partial model transfers based CIM[J]．Automation of Electric Power Systems，2004，28(12)：51-55(in Chinese)．

[7] 潘凯岩，寇强，郑涛，等．基于公共信息模型的 EMS/DMS/DTS 一体化设计[J]．电网技术，2004，28(18)：62-65．
Pan Kaiyan，Kou Qiang，Zheng Tao，et al．Integrated design of EMS/DMS/DTS based on CIM[J]．Power System Technology，2004，28(18)：62-65(in Chinese)．

[8] 孙宏斌，吴文传，张伯明，等．IEC61970 标准的扩展在调度控制中心集成化中的应用[J]．电网技术，2005，29(16)：21-25．
Sun Hongbin，Wu Wenchuan，Zhang Boming，et a1．Application of extension of IEC 61970 standard in control center integration[J]．Power System Technology，2005，29(16)：21-25(in Chinese)．

[9] 柳明，何光宇，卢强．网络分析应用中的公用信息模型[J]．电网技术，2006，30(17)：51-58．
Liu Ming，He Guangyu，Lu Qiang．Common information model in network analysis applications[J]．Power System Technology，2006，30(17)：51-58(in Chinese)．

[10] 柳明，何光宇，卢强．运行规划中的公用信息模型[J]．电网技术，2006，30(22)：24-31．
Liu Ming，He Guangyu，Lu Qiang．Common information model in operational planning[J]．Power System Technology，2006，30(22)：24-31(in Chinese)．

[11] 钱锋，唐国庆，顾全．基于 CIM 标准的多级电网模型集成分析[J]．电网技术，2007，31(12)：69-73．
Qian Feng，Tang Guoqing，Gu Quan．Analysis on integration of multilevel power network model based on CIM[J]．Power System Technology，2007，31(12)：69-73(in Chinese)．

[12] 钱锋，唐国庆，顾全．基于 CIM 标准和 SVG 的分散式图模合并[J]．电力系统自动化，2007，31(5)：84-89．
Qian Feng，Tang Guoqing，Gu Quan．Composition of decentralized graphics and model based on CIM and SVG[J]．Automation of Electric Power Systems，2007，31(5)：84-89(in Chinese)．

[13] 孙宏斌，李鹏，李矛，等．中国南方电网在线分布式建模系统研究与设计[J]．电力系统自动化，2007，31(10)：82-86．
Sun Hongbing，Li Peng，Li Mao，et al．Study and design of online distributed modeling system for China southern power grid[J]．Automation of Electric Power Systems，2007，31(10)：82-86(in Chinese)．

[14] 米为民，韦凌霄，钱静，等．基于 CIM XML 的电网模型合并方法在北京电力公司调度系统中的应用[J]．电网技术，2008，32(10)：33-37．
Mi Weiming，Wei Lingxiao，Qianjing，et al．Application of CIM & XML based combination method of power network models in dispatching system of Beijing electric power corporation[J]．Power System Technology，2008，32(10)：33-37(in Chinese)．

[15] 邹根华，黄伟，姚诸香，等．考虑外网等值的江西电网模型拼接实现方法研究[J]．电力系统保护与控制，2009，37(13)：94-97．
Zou Genhua，Huang Wei，Yao Zhuxiang，et al．An implementation scheme of model integration considering external network equivalence for Jiangxi power networks[J]．Power System Protection and Control，2009，37(13)：94-97(in Chinese)．

陈根军

收稿日期：2010-03-15。

作者简介：

陈根军(1974)，男，博士，高级工程师，从事调度自动化的研究与开发工作，E-mail：chengenjun@nari-relays.com；

顾全(1970)，男，博士研究生，高级工程师，从事调度自动化的研究和开发工作。

（编辑　徐梅）