

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.04.013

地区电网模型与省级电网模型的拼接

秦川¹,赵智成¹,赵树法²,江凯²,鞠平¹

(1.河海大学能源与电气学院,江苏南京 210098; 2.新乡市供电公司,河南新乡 453000)

摘要:提出地区电网模型与省级电网模型的拼接方案:首先从地区电网 EMS 系统获取 CIM 模型文件以及状态估计结果文件,对其进行解析、合并及网络拓扑分析,生成适合于电力系统仿真计算的地区电网模型;研究了地区电网及省级电网边界节点潮流调整方法,提出利用功率灵敏度矩阵调整边界联络线注入功率,利用基于电气距离的负荷、发电机分组方法调整边界节点电压的方法。最后以实际电网应用为例,验证了模型拼接方案以及边界节点潮流调整方法的可行性。

关键词:电网模型;模型拼接;潮流调整;灵敏度矩阵;电气距离;分组调整

中图分类号:TM714 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2013)04-0354-06

Integration of regional and external power network models

QIN Chuan¹, ZHAO Zhicheng¹, ZHAO Shufa², JIANG Kai², JU Ping¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Xinxiang Power Supply Company, Xinxiang 453000, China)

Abstract: A method for integration of regional and external power network models is proposed in this paper. The CIM and PAS files of the regional power network were collected from EMS, and the network topology analysis was carried out to obtain the regional power network model. Then, a power flow matching method was used to match the power flow between the regional and external power networks. A sensitivity matrix was used to adjust the active power of boundary lines, and a clustering scheme based on electrical distance was used to adjust the voltage. A practical application to a power network verified the feasibility of the proposed method.

Key words: power network models; model integration; power flow matching; sensitivity matrix; electrical distance; clustering adjustment

目前,电网的分层分区管理有了新的变化,即 220 kV 线路及其变电站的管理权隶属于地区调度中心管理,这使得地区调度中心需要计算地区电网的动态安全问题,即需要建立相应地区电网的计算模型^[1]。由于电网省内各地区之间联系越来越紧密,如果使用孤立的、220 kV 及以上等级不与外网相连的地区电网模型,或使用对外网进行动态等值后的模型,计算结果可能不能反映地区电网的实际情况^[2],因此需要建立对省内各地区电网不等值、不简化,地区电网(220 kV/110 kV 以下)与省级电网(简称省网)拼接后的模型。在进行模型拼接时,由于测量误差及监控系统通信误差等原因,使得模型拼接处的边界潮流可能出现不平衡的现象,必须加以修正^[3]。为此笔者提出了地区电网模型与省网模型的拼接方案,并以河南电网实际应用为例,验证模型拼接方案和边界潮流调整方法的可行性。

1 模型拼接方案

省网电力调度中心建立省网模型(包括外网动态等值模型)之后,每天定时将省网模型下发给各地区电网,或者将定时更新存放在固定的地址供地区调度通过 FTP 调用。经过潮流调整后将剩余省网模型与地区电网模型(220 kV/110 kV 以下)拼接起来,形成地区电网的完整模型。

收稿日期:2012-08-21
基金项目:国家自然科学基金(51137002);江苏省自然科学基金(BK2011026)
作者简介:秦川(1981—),男,江苏靖江人,博士研究生,主要从事电力系统建模与控制研究。E-mail:qcqin@hhu.edu.cn

地区电网模型与省网模型拼接的基本步骤如下:(a)地区调度获取省网在线模型,从中去除边界节点之外本地区电网部分;(b)从地区电网 EMS 系统获取本地区模型(220 kV/110 kV 及以下),排除坏数据,获得 1 个具有一定精度的地区电网模型;(c)调节省网相关发电机和负荷注入,使得省网边界节点电压和边界联络线注入功率匹配,保证地区电网状态不变;(d)将由(b)得到的本地区电网模型与由(c)得到的剩余省网模型进行拼接合并,从而获得完整的电网模型。

2 地区电网模型的获取

地区电网 EMS 系统提供地区电网的 CIM 模型文件^[4-7]以及状态估计结果文件(E 格式文件),其中 CIM 模型文件包含地区电网的拓扑结构信息,状态估计结果则反应了地区电网的实时稳态信息。

对 CIM 模型文件与状态估计结果文件分别进行解析、转换,依据元件和厂站命名规则的一致性,可以将两者合并,得到地区电网包含实时量测信息的开关/节点模型^[8]。

然而电力系统仿真或计算软件通常使用母线/支路模型,因此有必要对 CIM 数据进行网络拓扑分析,省略开关类元件及复杂的设备连接,只考虑线路、变压器、负荷、发电机等非零阻抗电气元件,从而得到适合于电力系统计算的地区电网模型。

基于 CIM 模型文件的电网拓扑分析包括连接节点分析和拓扑岛分析,对于二者的遍历都采用广度优先搜索算法。

连接节点分析的对象是网络中的连接节点和端点,其基本思路如下^[8-11]:(a)从任一未遍历过的连接节点出发,利用连接节点和端点的关联关系,查找该连接节点包含的所有端点。(b)根据 CIM 端点与导电设备—端点—连接节点的关联关系,找到该连接节点上所有闭合开关和刀闸。(c)定位这些闭合开关或刀闸的另一端端点,可以找到相邻层次的连接节点;从该相邻层次的连接节点出发,查找下一层的连接节点,直到相连的一组连接节点都被访问到。(d)合并访问到的所有连接节点,得到 1 个拓扑节点。(e)从下一个未被访问的连接节点出发,返回(a),直到拓扑分析合并所有连接节点,形成全网的拓扑节点。

拓扑岛的分析方法与连接节点分析类似,只是搜索的对象是拓扑岛中的拓扑节点。

3 边界潮流调整方法

为了得到完整的网络模型,需要将外网模型与内网实时模型拼接。在模型拼接时,边界潮流可能会出现不平衡的现象,必须加以修正。本文将所要研究的地区电网作为内网,令其边界上电量为准确值;省网作为外网,需要调整外网注入量,使其边界节点的电量与准确值一致,从而实现地区电网和省网的模型拼接。

内外网边界潮流示意图如图 1 所示。 l, n, m 为内网的边界节点,令电压幅值 U_l, U_m, U_n 以及有功功率 P_l, P_m, P_n 为准确值; i, j, k 为外网的边界节点,电压幅值及有功功率分别为 $U_i, U_j, U_k, P_i, P_j, P_k$,即得该值与准确值之间的偏差量。利用下述方法,反复交替调节外网中相关节点的 U, P 以逐渐减小偏差,直至外网边界量与内网边界量一致。

3.1 有功注入偏差的灵敏度调整^[3,12-13]

对含有 S 个边界节点的区域网,基于多数据源易得边界联络线上有功注入与内网实际值之间的偏差量 $\Delta P_s, \Delta P_s$ 是一个 S 维的列向量。假定区域外网给定节点中有 M (通常 $M>S$) 个节点的有功注入可调(包括发电机节点和负荷节点),其调节量用 ΔP_M 表示, ΔP_M 是一个 M 维的列向量。通过合理的 ΔP_M 可使得 $\Delta P_s=0$ 。两者之间的灵敏度关系为

$$\Delta P_s = -B_{SM} \Delta P_M \tag{1}$$

式中 B_{SM} 为 $S \times M$ 维的矩阵,其第 j 列元素表示可调节节点中第 j 个节点有功注入改变 1 个单位值时,各边界节点有功注入量变化的大小,负号表示可调节节点的有功注入增加使各个边界节点有功注入减小,反之亦然。

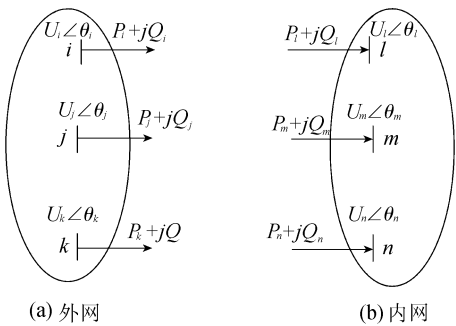


图 1 内外网边界潮流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of boundary flow

求解 $\mathbf{B}_{SM}$ 各元素的过程如下:先求得区域网快速分解潮流算法中的 $\mathbf{B}'$, $\mathbf{B}'$ 为用 $-1/x$ 为支路电纳并忽略所有接地支路而建立的节点电纳矩阵;再利用节点消去法,计算可调节节点 $j(j=1,2,\cdots,M)$ 与边界联络节点 $i(i=1,2,\cdots,S)$ 之间的转移导纳 B'_{ij} ,即仅保留外网中某一可调节节点 j 和所有 S 个边界联络节点,对 $\mathbf{B}'$ 进行 Gauss 消去。由于 S 个边界联络节点的相角固定不变,因此当节点 j 的有功注入增量 $\Delta \mathbf{P}_{Mj}$ 使其对应的相角增加 $\Delta \theta_j$,各边界联络节点的有功注入将增加 $\Delta \mathbf{P}_{Si} = \mathbf{B}'_{ij} \Delta \theta_j$ ($\mathbf{B}'_{ij}$ 为负)。由于系统要满足功率平衡,故各节点的有功注入变化量之和应为 0,即

$$\sum_{i=1}^S B'_{ij} \Delta \theta_j + \Delta \mathbf{P}_{Mj} = 0 \tag{2}$$

因而

$$\Delta \mathbf{P}_{Si} = \mathbf{B}'_{ij} \Delta \theta_j = \frac{B'_{ij} \Delta \theta_j}{\sum_{k=1}^S B'_{kj} \Delta \theta_j} \Delta \mathbf{P}_{Mj} \tag{3}$$

因此, $\mathbf{B}_{SM}$ 的第 j 列元素可表示为

$$B_{ij} = \frac{B'_{ij}}{\sum_{k=1}^S B'_{kj}} \quad (i=1,2,\cdots,S) \tag{4}$$

用此方法可计算出 $\mathbf{B}_{SM}$ 的所有元素。

式(1)是一个相容方程组,可用广义逆矩阵法求出其最小的范数解^[14]:

$$\Delta \mathbf{P}_M = -\mathbf{B}_{SM}^T (\mathbf{B}_{SM} \mathbf{B}_{SM}^T)^{-1} \Delta \mathbf{P}_S \tag{5}$$

3.2 边界电压偏差的可调节节点分组校正

3.2.1 基于电气距离的可调节节点分组

在电力系统中,对于每个 PQ 节点及 PV 节点,极坐标形式的有功潮流方程可描述为

$$\Delta \mathbf{P}_i = P_{S,i} - U_i \sum_{j \in i}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{6}$$

式中: $P_{S,i}$ ——节点给定的注入有功; G_{ij} ——电导; B_{ij} ——电纳。 $j \in i$ 表示 $\sum$ 后的标号为 j 的节点必须直接和节点 i 相连,并包括 $j=i$ 的情况。

电气距离 $D^{[13-14]}$ 的计算公式如下:

$$D_{ij} = \frac{1}{U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})} \quad (i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,n; i \neq j) \tag{7}$$

D 越小,两节点之间的联系也越紧密;反之, D 越大,两节点之间联系就越松散。由此可以看出 D 与不同节点间的相关度成反比,随着两节点间关联程度的加强而减小。两节点间的 D 较小,它们之间就存在较大的电气耦合性,以较大的相互作用影响潮流的分布状态,即它们之间的灵敏度较大。

大规模系统中发电机节点数相对较少,且很有可能远离边界节点。在电压调整过程中,若边界节点之间距离较近,电气耦合性较强,单纯通过电压灵敏度矩阵调节部分发电机的电压,较难达到平衡边界节点电压的目的。

为此,本文提出基于电气距离的发电机、负荷分组调整办法,共同作用调整边界联络节点电压。对含有 S 个边界联络节点的区域网,依据可调节节点距离某一边界节点电气距离最小,把可调节节点分为 S 组,每一个边界节点的电压偏差 $\Delta U_i (i=1,2,\cdots,S)$ 由一组与之相对应的可调节节点(包括发电机及负荷) $M_i (i=1,2,\cdots,S)$ 进行调整。

3.2.2 边界电压调整及速度步长

采用可调节节点分组对边界电压进行调整时,如果每次的调整步长固定且偏大,如设为 0.02,则前期边界节点电压误差会较迅速下降;随着误差逐步减小,后期较大的步长会引起误差波动甚至潮流不收敛。

为了使初始偏差大和初始偏差小的边界节点电压误差能够同步下降,减小后期的误差波动,同时又能保证前期误差的快速减小,对每次调整采用可变步长。可变步长包括偏差步长和速度步长。

设第 $n+1$ 次调整前的边界节点 i, j, k 的电压偏差 $\Delta U_{i,n+1}, \Delta U_{j,n+1}, \Delta U_{k,n+1} (n=1,2,3,\cdots)$, 以及第 n 次调整之前的电压偏差 $\Delta U_{i,n}, \Delta U_{j,n}, \Delta U_{k,n}$ 。

令

$$\Delta U_{n+1} = |\Delta U_{i,n+1}| + |\Delta U_{j,n+1}| + |\Delta U_{k,n+1}| \tag{8}$$

则 $n+1$ 次调整的偏差步长:

$$\begin{cases} e_{i,n+1} = \frac{\Delta U_{i,n+1}}{\Delta U_{n+1}} \\ e_{j,n+1} = \frac{\Delta U_{j,n+1}}{\Delta U_{n+1}} \\ e_{k,n+1} = \frac{\Delta U_{k,n+1}}{\Delta U_{n+1}} \end{cases} \tag{9}$$

计算 $n+1$ 次调整的速度误差:

$$\begin{cases} R_{i,n+1} = \left| \frac{\Delta U_{i,n+1} - \Delta U_{i,n}}{\Delta U_{i,n}} \right| \\ R_{j,n+1} = \left| \frac{\Delta U_{j,n+1} - \Delta U_{j,n}}{\Delta U_{j,n}} \right| \\ R_{k,n+1} = \left| \frac{\Delta U_{k,n+1} - \Delta U_{k,n}}{\Delta U_{k,n}} \right| \end{cases} \tag{10}$$

其中, $\Delta U_{i,n}, \Delta U_{j,n}, \Delta U_{k,n}$ 最小将限制在一个极小数,不会出现为零的情况。

速度误差总和:

$$R_{n+1} = R_{i,n+1} + R_{j,n+1} + R_{k,n+1} \tag{11}$$

将 $R_{i,n+1}, R_{j,n+1}, R_{k,n+1}$ 按照大小排序,假设 $R_{i,n+1} > R_{j,n+1} > R_{k,n+1}$, 则边界节点 i, j, k 第 $n+1$ 次电压调整的速度步长分别为

$$\begin{cases} \Delta e_{i,n+1} = \frac{R_{i,n+1}}{R_{n+1}} \\ \Delta e_{j,n+1} = \frac{R_{j,n+1}}{R_{n+1}} \\ \Delta e_{k,n+1} = \frac{R_{k,n+1}}{R_{n+1}} \end{cases} \tag{12}$$

则第 $n+1$ 次边界节点 i, j, k 对应的可调节节点电压调整量为

$$\begin{cases} \Delta V_{i,n+1} = e_{i,n+1} \Delta e_{i,n+1} \\ \Delta V_{j,n+1} = e_{j,n+1} \Delta e_{j,n+1} \\ \Delta V_{k,n+1} = e_{k,n+1} \Delta e_{k,n+1} \end{cases} \tag{13}$$

调节边界节点 i, j, k 对应的发电机、负荷调节组内的节点。若是发电机节点,则发电机电压加上对应的调整量;若是负荷节点,则负荷无功减去对应的调整量。

调整完毕,调用潮流计算程序计算潮流,得出新的偏差量,按照前文所述步骤继续调整,直到边界节点电压误差满足收敛要求。边界电压调整算法的流程如图 2 所示。

4 河南电网应用实例

4.1 内外网边界节点的确定

河南电网新乡地区内、外网络示意简图如图 3 所示。新乡地区与外网相连的变电站有 3 个,分别是新乡变电站(220kV)、获嘉变电站(500kV)和塔铺变电站(500 kV)。

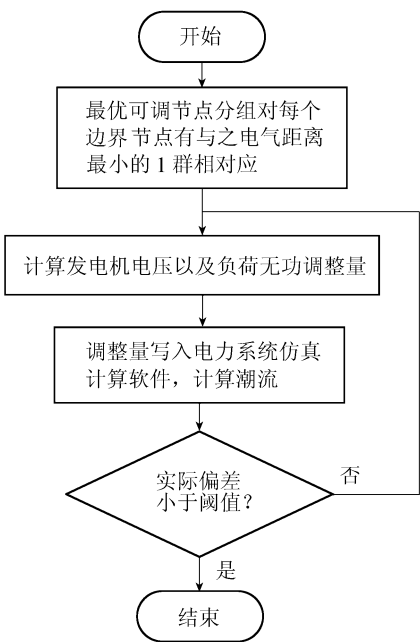


图 2 可调节节点分组校正算法流程
Fig. 2 Flow chart of clustering adjustment scheme

由于获嘉变电站在 220 kV 侧与焦作修武变电站有一条联络线,且与边界节点新乡变电站相连,所以内外网边界节点设定为:获嘉变电站 220 kV 母线、塔铺变电站 500 kV 母线和新乡变电站 220 kV 母线。

4.2 电压调节节点分组

算例选取最优调节节点以及功率灵敏度矩阵调整边界联络线功率;采用发电机、负荷分组以及固定步长调节边界节点电压。电压调节节点分组情况见表 1。

河南电网 2011 年某个时间段内系统数据共有母线 2 096 条,交流线 1 225 条,变压器支路 1 653 条,发电机 159 台,负荷 952 个。其中新乡地区共有母线 312 条,交流线 384 条,变压器支路 251 条,发电机 3 台(不含省调电厂),负荷 87 个。

有功功率可调节节点取距离和最小的 60 个作为功率最优调节节点,并将前 400 个可调节节点分为 3 组。由于篇幅有限,分组结果只给出每组调节节点个数。

4.3 潮流调整结果

实际的潮流调整结果如表 2、表 3 所示(有功功率及电压采用标么值),调整计算 143 次边界电压和注入功率满足收敛条件。结果表明尽管有功功率初始偏差较大,经过模型拼接之后边界电量高度吻合。

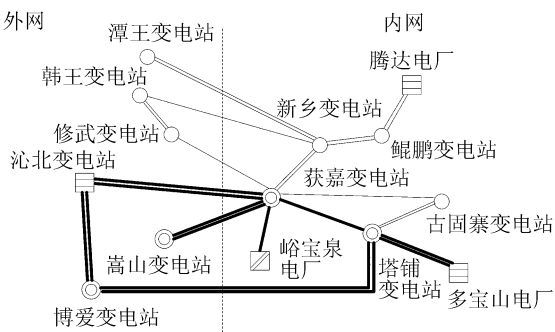


图 3 河南新乡地区网络示意图
Fig. 3 Schematic diagram of power network for Xinxiang City, Henan Province

表 1 电压调节节点分组情况
Table 1 Clustering of voltage regulation nodes

边界节点	可调节节点分组情况/个		
	负荷	发电机	总数
塔铺变电站 500 kV 母线	255	109	364
新乡变电站 220 kV 母线	12	0	12
获嘉变电站 220 kV 母线	22	2	24

表 2 有功功率调整结果

Table 2 Results of active power matching

边界节点	边界节点注入有功功率/p. u.			调整前 偏差/%	调整后 偏差/%
	内网准确值	调整前外网	调整后全网		
获嘉变电站 220 kV 母线	5. 403 22	6. 479 01	5. 402 40	19. 910 2	-0. 015 20
新乡变电站 220 kV 母线	-2. 224 82	-2. 068 68	-2. 225 17	7. 017 9	-0. 015 96
塔铺变电站 500 kV 母线	5. 943 34	7. 846 04	5. 943 90	32. 014 0	0. 009 39

表 3 边界电压调整结果

Table 3 Results of voltage matching of boundary nodes

边界节点	边界节点电压/p. u.			调整前 偏差/%	调整后 偏差/%
	内网准确值	调整前外网	调整后全网		
获嘉变电站 220 kV 母线	1. 005 85	0. 998 28	1. 005 369	-0. 752 6	-0. 047 8
新乡变电站 220 kV 母线	1. 001 02	0. 991 06	1. 001 275	-1. 097 0	-0. 025 5
塔铺变电站 500 kV 母线	1. 009 94	0. 991 24	1. 009 984	-1. 851 0	0. 004 4

在调整过程中,边界节点注入功率总误差曲线如图 4(a) 所示,边界节点电压总误差曲线如图 4(b) 所示

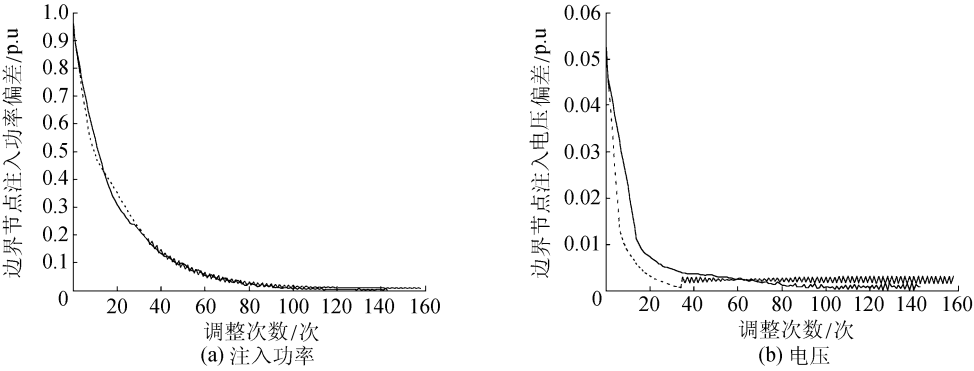


图 4 边界节点注入功率及电压总误差
Fig. 4 Power deviation curves of boundary nodes

示。通过图 4,对比是否采用速度步长调整边界节点注入功率和电压的总误差,可以看出调整前期,采用速度步长的总误差减小幅度小于采用固定步长的误差减小幅度;但在后期收敛性和抑制波动上,采用速度步长的调整明显占优,能达到较好的收敛效果。

5 结 语

提出地区电网模型与省网模型的拼接方案,以及结合可变步长的发电机、负荷分组的边界电压偏差校正方法。河南电网实际算例结果表明,所提出的边界潮流调整方法能够达到较好的潮流收敛效果,适用于工程实际。

参考文献:

[1] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术,2001,25(12):1-10. (XIN Yaozhong. Development trend of power system dispatching automation technique in 21st century [J]. Power System Technology, 2001, 25 (12) : 1-10. (in Chinese))

[2] 张海波,张伯明,王俏文,等. 不同外网等值模型对 EMS 应用效果影响的试验研究[J]. 电网技术,2006,30(3):2-6. (ZHANG Haibo,ZHANG Boming,WANG Qiaowen,et al. A test investigation on effect of different external network equivalent models EMS applications[J]. Power System Technology,2006,30(3):2-6. (in Chinese))

[3] 蒋维勇,吴文传,张伯明,等. 在线安全预警系统中的网络模型重建[J]. 电力系统自动化. 2007,31(21):5-9. (JIANG Weiyong,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. Network model reconstruction in online security early warning system[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(21):5-9. (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 Congru,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] 吴文传,孙宏斌,张伯明,等. 基于 IEC 61970 标准的 EMS/DTS 一体化系统的设计与开发[J]. 电力系统自动化,2005,29(4):23-57. (WU Wenchuan,SUN Hongbin,ZHANG Boming,et al. Design of integrated EMS/DTS system based on IEC 61970 [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(4):23-57. (in Chinese))

[6] 张慎明,刘国定. IEC 61970 标准系列简介[J]. 电力系统自动化,2002,26(14):1-6. (ZHANG Shenming,LIU Guoding. Introduction of standard IEC 61970[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(14):1-6. (in Chinese))

[7] 董越,孙宏斌,吴文传,等. EMS 中公共信息模型导入/导出技术[J]. 电力系统自动化,2002,26(3):10-13. (DONG Yue,SUN Hongbin,WU Wenchuan,et al. Import/export technique based on common information model (CIM) in EMS [J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(3):10-13. (in Chinese))

[8] ALAN W M, GRAHAM W A, IAN M E, et al. Translating CIM XML power system data to a proprietary format for system simulation[J]. IEEE Transaction on Power Systems,2004,19(1):229-235.

[9] 陆承宇,章文立. CIM 电网模型的拓扑分析方法[J]. 浙江电力,2005(4):5-8. (LU Chengyu,ZHANG Wenli. CIM topology analysis for electric power networks[J]. Zhejiang Electric Power,2005(4):5-8. (in Chinese))

[10] 李盟,秦立均,郭庆,等. 基于 CIM 模型的电网拓扑分析[J]. 电力科学与工程,2011,27(9):18-22. (LI Meng,QIN Lijun, GUO Qing,et al. CIM-based network topology analysis[J]. Power Science and Engineering,2011,27(9):18-22. (in Chinese))

[11] 刘冬. 电力系统中通用信息模型的研究和应用[D]. 郑州:郑州大学,2007.

[12] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,1996.

[13] 王舒琴,周海强,鞠平. 基于电气距离的灵敏度潮流校正法[EB/OL]. [2010-03-26]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201003-908>.

[14] 周海强,鞠平,孔德超,等. 基于机电距离的聚类方法在动态等值中的应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):14-17. (ZHOU Haiqiang,JU Ping,KONG Dechao,et al. Application of clustering method based on electromechanical distance between different units in power system dynamic equivalence[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(3):14-17. (in Chinese))