

BPA 向 PSCAD 模型转换的研究

陶 华,许津津,邹文聪

(泉州电业局,福建 泉州 362000)

摘要: 电力系统电磁暂态仿真是测试继电保护装置性能的重要手段,也是分析交直流混合输电系统可靠性的重要方法。目前国内对电网动态仿真大都是对机电暂态过程的仿真,故电网数据也按照机电暂态仿真软件数据格式存储,从而造成了电磁暂态仿真数据的匮乏。在详细分析了机电暂态仿真软件 BPA 与电磁暂态仿真软件 PSCAD 差别的基础上,介绍了一种 BPA 向 PSCAD 的自动模型转换的实现方法,为电力系统电磁暂态仿真提供可靠的数据支撑,并且通过算例在 2 种软件下的电气拓扑结构和动态特性的比较,验证该转换方法的有效性和准确性。

关键词: 电磁暂态; BPA; PSCAD; 模型转换; 电力系统; 仿真

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.026

0 引言

随着电网规模的不断发展,特别是交直流混合输电的快速发展,电力电子设备大规模应用,电力系统机电暂态仿真已不能满足实际工程的需要,因此电网的电磁暂态仿真日益重要。

国内现行对电力系统的仿真一般集中于机电暂态仿真,大多采用 BPA 或者 PSASP 研究电力系统的机电暂态特性。因此,国内的电网数据一般采用 BPA 或者 PSASP 软件要求的格式进行存储,从而缺乏网络的电磁暂态仿真软件格式的数据。若要对目前运行的网络进行电磁暂态仿真,需要从已记录的机电暂态仿真软件格式的数据中获取电磁暂态仿真软件格式的数据。目前主要使用 PSCAD 或 RTDS 进行电网电磁暂态过程的研究,但现有的仿真软件尚未提供将 BPA 或 PSASP 格式数据转换成 PSCAD 格式数据的功能。

BPA 采用文本格式对网络潮流数据和动态数据分别进行存储,利用名称和电压等级区分母线,进而实现网络信息之间的传递,因此在计算中不需要形成网络的电气接线图,故 BPA 采用母线名称和电压等级的形式记录电网数据。而 PSCAD 拥有先进的图形化界面,可通过网络的电气接线图识别网络信息,在进行网络仿真计算以前需要形成准确的网络电气接线图。

因此,如何根据已记录的 BPA 软件格式的数据形成满足 PSCAD 软件要求的数据,是现代电网仿真需要解决的问题之一。对于小型网络,可以通过分析 BPA 记录的网络结构和元器件模型,手工搭建 PSCAD 仿真模型。但对于包含数百、数千条母线和数千条传输线路及变压器的大型网络,如果手工搭建

网络的 PSCAD 仿真模型,不仅增加了仿真的工作量,更有可能在转换过程中由于疏忽而导致过多的人为误差。同时,由于需要形成网络接线图,在转换过程中,需要根据网络的电气拓扑结构合理地分配各元件的位置,以绘制完整清晰的拓扑接线图,这是整个转换中最重要也是最困难的地方。

为了解决上述问题,给电力系统电磁暂态仿真提供数据支撑,本文结合实际工程应用,提出了一种基于广度优先搜索算法的 BPA 向 PSCAD 模型转换的方法,通过该方法可以搭建机电暂态数据向电磁暂态数据转换的平台,其转换思想大致如下:

- a. 分析待转换电力网络的特点,选择满足不同要求的元件模型;
- b. 依据记录的 BPA 格式的数据文件,分析网络的电气拓扑结构;
- c. 形成准确反映拓扑结构的节点-支路关联矩阵;
- d. 根据广度优先搜索算法形成电力系统的电气生成树;
- e. 根据生成树中节点先后顺序合理分配节点位置,逐一添加网络中的元器件,形成电磁暂态仿真软件 PSCAD 所需要的电力系统仿真文件。

本文最后通过实际算例在 2 种软件环境下的电气拓扑结构图和动态响应曲线,验证了本文提出的转换方法的正确性和有效性。

1 模型转换难点

1.1 线路模型

BPA 在模拟线路的特性时,不计及波过程,这与 PSCAD 软件中的 PI 型模型一致。为了更好地研究线路的动态过程,PSCAD 常采用考虑波过程的详细线路模型。

1.2 变压器模型

BPA 模拟三圈变时,采用 3 个两圈变来等值,其中某个两圈变的电抗可能等于或者小于零,此时向 PSCAD 转换时,若转换成 3 个两圈变压器,那么就会出现负阻抗的变压器。这种负阻抗的变压器模型,将会使得 PSCAD 无法进行计算。

1.3 负荷模型

BPA 大都采用静态模型和动态模型的组合来模拟负荷特性,转换过程中,PSCAD 可以采用 Fixed Load 模型和鼠笼式电动机模型来进行等值^①。但是 PSCAD 的鼠笼式电动机模型为定子双绕组模型,而 BPA 感应电机模型为定子单绕组模型。

1.4 发电机模型

PSCAD 采用的发电机模型是考虑磁链衰减过程的八阶模型,而 BPA 发电机模型未考虑磁链的衰减过程,一般采用六阶及以下的发电机模型。因此,如何有效转换发电机模型成为制约转换准确性的最大难点。

2 模型转换方法

文献[1]详细阐述了基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的形成方法及过程,本文在文献[1]的基础上,进一步分析研究机电暂态模型向电磁暂态模型转换的方法。

PSCAD 采用 psc 文件记录元件信息,包括所有元件的坐标位置和参数。修改或添加 PSCAD 模型及其参数可以在可视化图形界面上操作,也可以通过修改 psc 文件来完成,本文基于此提出模型转换方法。

2.1 线路模型

由于 BPA 没有考虑线路的波过程,因此可以采用 PI 型模型来等值。但是这种转换未能反映线路真实的特性,一般把线路转换成详细模型,如 Bergeron 模型。

当线路长度小于 15 km(仿真步长取 50 μ s)时,Bergeron 模型未能计及波过程。为了体现波过程对输电的影响,Bergeron 模型需要填入线路的长度。若已记录长度的线路,可以直接填写线路长度;若 BPA 未给出线路的长度,则根据表 1 的经验值进行长度的估算,估算公式如下:

$$L = \frac{\text{线路总电抗 } X}{\text{相应电压等级下线路的平均电抗 } \bar{X}} \quad (1)$$

表 1 不同电压等级下线路的平均电抗

Tab.1 Average impedance of different voltage levels

| 电压等级/kV | 平均电抗 | 电压等级/kV | 平均电抗 |
|---------|--------------------------|---------|--------------------------|
| 1000 | 2.36290×10^{-5} | 330 | 2.45000×10^{-4} |
| 750 | 4.26097×10^{-5} | 220 | 7.00000×10^{-4} |
| 500 | 1.00000×10^{-4} | | |

注:平均电抗为标么值。

2.2 变压器模型

升压三绕组变压器的低压绕组在中间,高压绕组在外层,中压绕组在里层, $U_{k(1-2)}\%$ 较大;降压三绕组变压器的中压绕组在中间,高压绕组在外层,低压绕组在里层, $U_{k(1-3)}\%$ 较大。因此排在中间的绕组,其等值电抗的绝对值较小。

根据三圈变的这一特性,BPA 数据中记录的等效阻抗可成为判断变压器是否是三圈变的一个重要依据。若节点 n 和 $n+1$ 之间的变压器的等值电抗的绝对值较小,则判断节点 n 的源节点和节点 n 之间、节点 $n+1$ 和节点 $n+1$ 的子节点之间、节点 n 和节点 n 的子节点之间是否构成三圈变^[1]。若节点 n 和 $n+1$ 之间的变压器是三圈变的一侧,则三圈变的第二侧必与 n 或者 $n+1$ 相连接,第三侧的另外一个节点是节点 n (节点 n 为三圈变的虚拟节点)或者 $n+1$ (节点 $n+1$ 为三圈变的虚拟节点)的非同一树枝子节点。

2.3 负荷模型

通过改变 Fixed Load 模型中电压对有功、无功的指数来实现恒功率、恒电流、恒阻抗模型的转换。根据功率的大小以及稳态负荷的比率,计算各负荷的初始功率,填入到 PSCAD;根据功率的大小以及动态负荷的比率,计算动态负荷的大小,并填入到感应电机的初始功率中。

BPA 感应电机模型为定子单绕组模型,PSCAD 的鼠笼式电动机模型为定子双绕组模型,在转换时将 PSCAD 中鼠笼式电动机模型的第二绕组处理成开路。

2.4 发电机模型

BPA 中发电机六阶模型与 PSCAD 采用的发电机模型在结构和参数上基本一致,只是 PSCAD 采用的发电机模型考虑了定子绕组磁链衰减的过程。转换时,BPA 发电机六阶模型可直接转换成 PSCAD 中的发电机模型。当 BPA 采用不计阻尼绕组的发电机四阶模型时,PSCAD 应采用不计次暂态过程的发电机模型与之对应;当 BPA 采用经典的二阶模型模拟发电机特性时,转换中 PSCAD 仍采用等值电路模型。在四阶模型的基础上,进一步忽略转子磁链变化的过程,使得发电机模型退化为二阶模型^{①-③,[2-3]}。经过处理后的发电机模型基本能满足工程应用。

2.5 发电机控制系统模型

根据 2 种软件提供模型的传递函数,实现工程中常用的原动机调速器模型、励磁模型和 PSS 模型的转换,其模型转换对应关系分别见表 2—4^{①-③}。

此外,因为 PSCAD 仿真页面所能承载的元器件

① Manitoba HVDC Research Centre. EMTDC/PSCAD user manual. 2005.

② 中国电力科学研究院. 中国版 BPA 潮流程序用户手册. 2000.

③ 中国电力科学研究院. 中国版 BPA 暂态稳定程序用户手册. 2000.

表 2 原动机调速器模型转换对应关系

Tab.2 Model conversion of speed regulator for prime motor between BPA and PSCAD

| BPA 模型 | PSCAD 模型 |
|--------|-------------------|
| GG | HY_GOV2 + HY_TUR1 |
| GH | HY_GOV1+ HY_TUR1 |
| GS | TH_GOV1 |
| TA、TB | TH_TUR1 |

表 3 励磁模型转换对应关系

Tab.3 Model conversion of exciter between BPA and PSCAD

| BPA 励磁模型 | PSCAD 励磁模型 | BPA 励磁模型 | PSCAD 励磁模型 |
|----------|------------|----------|------------|
| EA、EK、FA | DC1A | FB | DC2A |
| EB | AC5A | FF | AC2A |
| EC、FC | AC1A | FG | AC4A |
| ED、FD | ST2A | FH | AC3A |
| EE、FE | DC3A | FL | ST3A |
| EG、FJ、FK | ST1A | | |

表 4 PSS 模型转换对应关系

Tab.4 Model conversion of PSS between BPA and PSCAD

| BPA 模型 | PSCAD 模型 |
|-------------|----------|
| SS、SF、SG、SP | PSS1A |

有限,在转换大型网络时,应先根据网络的拓扑关系、网络的分区名或区域名多页面转换网络。因此,转换大型网络时,根据生成树预先计算各节点的坐

标,根据最大坐标计算需要的页面数,并按照计算坐标把网络数据分成不同的子块,同一子块内的数据转换后在同一页面内。页面之间通过外部连接节点 Xnode 进行信息的交换。

转换详细的负荷模型和发电机及其控制系统模型,采取类似的多页面转换:负荷页面内依据 BPA 各种动态负荷参数卡片,分别转换成恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷和感应电动机的组合;发电机及其控制系统页面中,同样根据 BPA 中相关的动态参数卡片,转换成与之对应的发电机模型、励磁模型、原动机调速器模型以及 PSS 模型。负荷页面和发电机页面都通过外部连接节点 Xnode 与外界网络进行信息的交换。

3 模型转换准确性验证

本节将从转换前后网络的拓扑结构和动态响应曲线验证所提模型转换方法的准确性和可靠性。

3.1 网络拓扑结构验证

网络拓扑结构准确性是保证转换正确的基本前提,只有在验证转换后的拓扑结构和原网络一致的前提下,才能验证转换后网络的各项物理指标与转换前的网络一致。此处采用 IEEE 9 节点算例验证网络拓扑结构的正确性,转换前后通过 2 种软件绘出的网络拓扑图分别如图 1(a)、(b)所示,比较

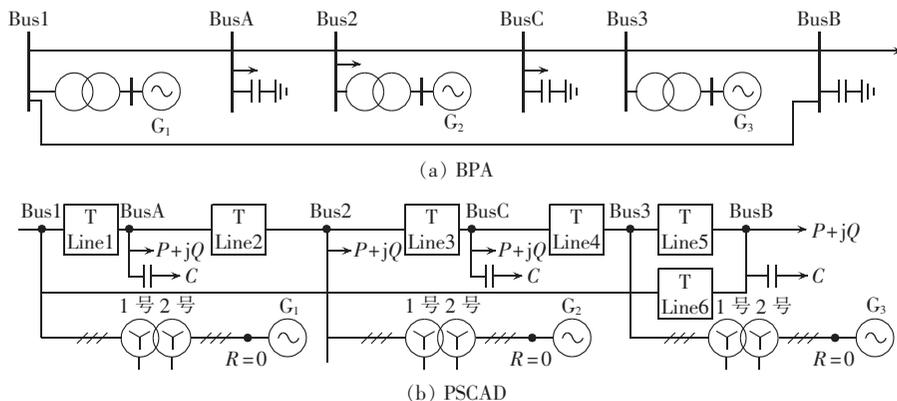


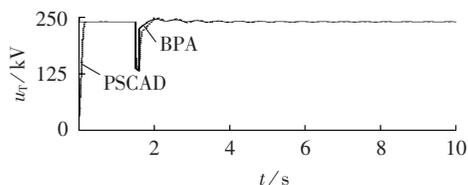
图 1 节点负荷消耗功率仿真结果

Fig.1 Simulative results of nodal power consumption

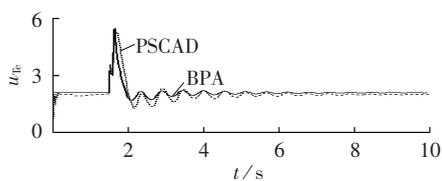
可知,两图的拓扑结构完全一致。

3.2 网络响应曲线验证

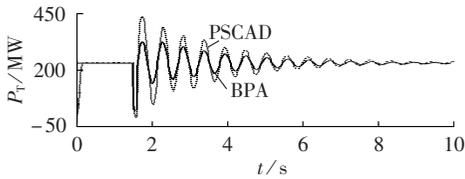
为了验证所转换的动态模型的准确性,对某实际电网分别用 BPA 和 PSCAD 进行仿真,该电网共有 125 个节点、159 条支路。在某线路首端施加故障时间为 0.1 s 的三相短路扰动,某发电机的出口电压、励磁电压(标幺值)、有功功率、无功功率分别如图 2(a)—(d)所示,某节点消耗的功率如图 3 所示。由图 3 可知,BPA 和 PSCAD 的仿真趋势基本一致,验证了所提模型转换方法在工程应用中是可行的。



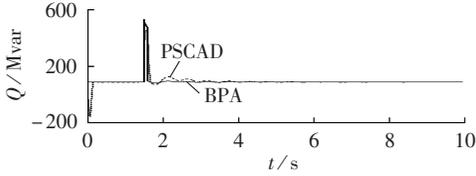
(a) 出口电压



(b) 励磁电压



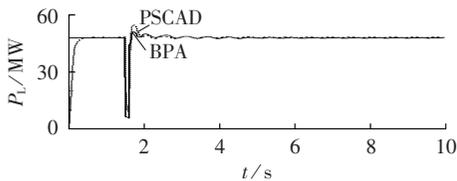
(c) 有功功率



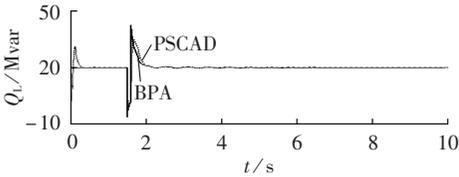
(d) 无功功率

图 2 发电机仿真结果

Fig.2 Simulative results of generator



(a) 有功功率



(b) 无功功率

图 3 节点负荷消耗功率仿真结果

Fig.3 Simulative results of nodal power consumption

4 结论

本文分析了基于深度优先搜索算法的 BPA 向 PSCAD 模型转换的方法,搭建了机电暂态数据向电磁暂态数据的转换平台,为解决缺乏大电网电磁暂态仿真数据的难题提供了一种全新的思路。通过实例从拓扑结构和网络在 2 种软件下的动态响应行为验证了本文所提转换方法的正确性和有效性。该方法已通过计算机编程实现,并应用到了工程实际中。

参考文献:

- [1] 陶华,杨震,张民,等. 基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J]. 电网技术,2010,34(2):120-124.
TAO Hua,YANG Zhen,ZHANG Min,et al. A depth-first search algorithm based implementation approach of spanning tree in power system[J]. Power System Technology,2010,34(2):120-124.
- [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,2002:1-13.
- [3] PRABHA K. 电力系统稳定与控制[M]. 本书翻译组,译. 北京:中国电力出版社,2001:28-53,77-89.
- [4] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄,译. 北京:水利电力出版社,1991:18-25.
- [5] 王朝瑞. 图论[M]. 3版. 北京:北京理工大学出版社,2005:33-

- 34,83-84.
- [6] 胡学钢. 数据结构算法设计指导[M]. 北京:清华大学出版社,1999:198-216.
- [7] 胥埴伦,于庆广. 电力系统电磁暂态和机电暂态混合仿真研究[J]. 电气技术,2007(7):47-50.
XU Zhilun,YU Qingguang. Research review on power system electromagnetic and electromechanical transient hybrid simulation [J]. Electrical Technology,2007(7):47-50.
- [8] 王栋,童陆园,洪潮. 数字计算机机电暂态与 RTDS 电磁暂态混合实时仿真系统[J]. 电网技术,2008,32(6):42-46.
WANG Dong,TONG Luyuan,HONG Chao. Digital computer electromechanical transient and RTDS electromagnetic transient hybrid real-time simulation system[J]. Power System Technology,2008,32(6):42-46.
- [9] 岳程燕,田芳,周孝信,等. 电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真的应用[J]. 电网技术,2006,30(11):1-5.
YUE Chengyan,TIAN Fang,ZHOU Xiaoxin,et al. Application of hybrid simulation of power system electromagnetic-electromechanical transient process[J]. Power System Technology,2006,30(11):1-5.
- [10] 岳程燕,田芳,周孝信,等. 电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真接口实现[J]. 电网技术,2006,30(4):6-10.
YUE Chengyan,TIAN Fang,ZHOU Xiaoxin,et al. Implementation of interfaces for hybrid simulation of power system electromagnetic electromechanical transient process[J]. Power System Technology,2006,30(4):6-10.
- [11] 岳程燕,田芳,周孝信,等. 电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真接口原理[J]. 电网技术,2006,30(1):23-27.
YUE Chengyan,TIAN Fang,ZHOU Xiaoxin,et al. Principle of interfaces for hybrid simulation of power system electromagnetic electromechanical transient process[J]. Power System Technology,2006,30(1):23-27.
- [12] 水利电力部. 电力系统安全稳定导则[M]. 北京:水利电力出版社,1984:33-40.
- [13] 高爱云,蔡泽祥. 基于 EMTDC 的异步电动机故障仿真[J]. 电力自动化设备,2002,22(12):23-27.
GAO Aiyun,CAI Zexiang. Fault simulation of induction motor based on EMTDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(12):23-27.
- [14] 宋少群,朱永利,于红. 基于图论与人工智能搜索技术的电网拓扑跟踪方法[J]. 电网技术,2005,29(19):45-49.
SONG Shaoqun,ZHU Yongli,YU Hong. A power network topology tracking method based on graph theory and artificial intelligence search technique[J]. Power System Technology,2005,29(19):45-49.
- [15] 岳程燕,田芳,周孝信,等. 电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真的应用[J]. 电网技术,2006,30(11):1-5.
YUE Chengyan,TIAN Fang,ZHOU Xiaoxin,et al. Application of hybrid simulation of power system electromagnetic-electromechanical transient process[J]. Power System Technology,2006,30(11):1-5.
- [16] 张红斌,汤涌,张东霞,等. 考虑配电网的感应电动机负荷模型聚合方法研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(24):1-4.
ZHANG Hongbin,TANG Yong,ZHANG Dongxia,et al. Study on aggregation of induction motors with distribution network [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(24):1-4.
- [17] 张东霞,汤涌,朱方,等. 接于高压母线的电动机负荷等值模型

- [J]. 中国电机工程学报,2006,26(6):14-18.
- ZHANG Dongxia,TANG Yong,ZHU Fang,et al. Equivalent model for induction-motor load connected to high voltage bus [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(6):14-18.
- [18] 王庆平,陈超英,陈礼义. 暂态全过程仿真中面向对象的负荷自适应模型[J]. 电网技术,2002,26(8):29-33.
- WANG Qingping,CHEN Chaoying,CHEN Liyi. Object-oriented self-adaptive load model in whole transient simulation [J]. Power System Technology,2002,26(8):29-33.
- [19] 侯俊贤,汤涌,张红斌,等. 感应电动机的综合方法研究[J]. 电网技术,2007,31(4):36-41.

HOU Junxian,TANG Yong,ZHANG Hongbin,et al. Study on integration method for induction motor [J]. Power System Technology,2007,31(4):36-41.

作者简介:

陶 华(1983-),男,湖南衡阳人,硕士,主要从事电力系统动态仿真、智能电网方面的研究工作(E-mail:miaoyan0702@163.com);

许津津(1987-),女,福建泉州人,硕士,主要从事电力系统动态仿真、状态检修方面的研究工作。

Model conversion from BPA to PSCAD

TAO Hua,XU Jinjin,ZOU Wencong

(Quanzhou Electric Power Bureau,Quanzhou 362000,China)

Abstract: The electromagnetic transient simulation of electric power system is an important test means of relay protection performance,as well as a main reliability analysis method of AC/DC hybrid transmission system. The present power system transient simulation in China is mostly for the electromechanical transient process and the grid data are consequently stored in the data format of electromechanical transient simulation software,resulting in the shortage of simulative electromagnetic transient data. The difference between BPA(a kind of electromechanical transient simulation software) and PSCAD(a kind of electromagnetic transient simulation software) is analyzed in detail and an implementation method of model conversion from BPA to PSCAD is presented. BPA and PSCAD are applied respectively to cases and its electric topology and transient characteristics are compared between two kinds of software,which proves the effectiveness and accuracy of the proposed conversion method.

Key words: electromagnetic transient; BPA; PSCAD; model conversion; electric power systems; computer simulation

(上接第 146 页 continued from page 146)

Processing of massive online monitoring data in smart substation

WANG Dewen,XIAO Lei,XIAO Kai

(Department of Computer Science,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: The characteristics of smart substation monitoring data and the technology of Hadoop cloud computing are analyzed and the mechanism of data examination and the method of index establishment are studied. A method based on Hadoop is proposed for the reliable storage and fast query of smart substation online monitoring data,which stores the collected massive online monitoring data of substation equipments in HDFS(Hadoop Distributed File System) redundantly,optimizes the structure of index table for online monitoring data and stores it in HBase(Hadoop column-oriented dataBases) to achieve the fast query of massive online monitoring data. An online monitoring platform based on Hadoop is built,with which,the benchmark test,sort test and read/write efficiency test are carried out. Test results indicate that,the proposed method and platform have high performance in query speed,read/write efficiency,latency and throughput,meeting the requirements of smart substation for reliable storage and efficient processing of massive online monitoring data.

Key words: smart substation; monitoring; cloud computing; Hadoop; fast query; data processing