

电力系统计算分析软件包——中国版 BPA

张 艳,毛晓明,陈少华

(广东工业大学 自动化学院,广东 广州 510006)

摘要: 电力系统仿真软件是电力系统规划设计、试验研究、调度运行和教学培训等不可或缺的重要工具. 中国版 BPA (Bonnevill e Power Adm inistration)模型齐全、功能强大、使用灵活、操作方便,特别适合大规模交直流系统的仿真计算. 分别从数学模型、软件功能和输入输出 3 方面对 BPA 进行了介绍,并通过 IEEE 7 节点算例展示了其功能.

关键词: BPA 软件;潮流计算;暂态稳定;数字仿真

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2008) 04-0073-05

电力系统数字仿真指用数学模型和数值方法对电力系统的运行特性进行分析,以拟定系统运行方式、整定控制参数、确定规划方案、分析事故原因和辅助运行决策^[1-6]. 目前,国内外有多种软件包用于电力系统仿真分析和计算,为电力系统的规划、调度、运行提供强有力的技术支持^[7-10]. BPA (Bonnevill e Power Adm inistration)软件最初由中国电力科学研究院从美国 Bonneville 电力局引进,经过不断消化吸收、开发创新和推广应用,逐步形成了满足我国电力系统计算分析要求的电力系统计算分析软件包——中国版 BPA. 该软件包的核心是潮流计算和暂态稳定计算程序,可对大规模交直流系统进行潮流、暂态稳定计算. 此外, BPA 还配备有单线图和地理接线图格式潮流图程序、稳定曲线绘图工具 (CurveM aker)等较完善的图形辅助计算分析程序,并具有短路电流计算、电网静态等值分析等功能. 本文对 BPA 进行了较详细的介绍,并通过 IEEE 7 节点算例展示了其功能.

1 数学模型

1.1 发电机模型

BPA 基于简化 Park 方程,用六绕组发电机模型 (见表 1)模拟同步发电机动态过渡过程,采用实用参数,忽略定子侧电磁暂态 (定子漏抗)、不考虑变压器电势. 适当选取发电机参数,可得到隐极发电机和凸极发电机详细程度不同的仿真模型. 若计及原动机和负荷阻尼,可采用经典模型,用阻尼因子 D 考虑阻尼,但不可与励磁系统模型连用. 较小的发电机则可采用等值负荷模型,用负的负荷来表示.

表 1 BPA 发电机模型

BPA 发电机模型		考虑的绕组 ¹⁾
次暂态模型 (考虑阻尼绕组)	隐极机 (六阶)模型	f, g, D, Q
	凸极机 (五阶)模型	f, D, Q
	隐极机 (四阶)模型	f, g
暂态模型 (不考虑阻尼绕组)	凸极机 (三阶)模型	f
	经典 (二阶)模型 ($E' = C$)	—
等值负荷模型		—

1) f 为励磁绕组, g 为由 q 轴铁芯内部构成的短路阻尼线圈, D 为 d 轴等值阻尼绕组, Q 为 q 轴等值阻尼绕组.

此外,考虑到频率对发电机定子和转子方程的影响, BPA 提供了 5 种计及频率影响的发电机模型,可方便地设置是否计及频率对定子和转子方程的影响或按模拟精度要求指定与频率相关的方程.

BPA 中发电机惯性常数以发电机动能 E_{MWS} (单位为 $MW \cdot s$)形式输入, $E_{MWS} = 999\ 999$ 表示无穷大母线, $E_{MWS} = 0.0$ 表示无惯性发电机.

1.2 励磁系统、原动机及调速器模型

BPA 提供了 30 种励磁系统模型^[11], 分别是: 根据 IEEE 1968 年提出的励磁系统定义的 E 型模型, 包括较常见的连续、旋转直流式励磁系统模型、无刷旋转交流式励磁系统及其改进型模型、无刷旋转交流励磁模型、不连续调节变阻器式励磁系统模型等; 根据 IEEE 1981 年提出的励磁系统定义的 F 型模型, 包括直流整流子励磁机励磁系统、具有不可控整流器的交流发电机—整流励磁系统、复合源整流励

收稿日期: 2008-04-07

作者简介: 张 艳 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制.

磁系统、具有非连续作用调节器的直流整流子励磁系统、具有不可控整流器的交流发电机 - 整流励磁系统、交流发电机可控整流励磁系统、交流发电机整流励磁系统、电势源 - 可控整流励磁系统、复合源可控整流励磁系统等; 根据中国电机工程学会励磁工作组提出的旋转励磁系统和自并励静止励磁系统定义模型。

此外, BPA 不仅提供了通用模型、水轮机模型和双轴交叉复式汽轮机模型 3 种调速器和原动机组合在一起的综合模型, 还提供了汽轮机和水轮机两种单独的调速器模型以及 7 种单独的原动机模型。

BPA 中励磁系统、原动机及调速器的控制参数均以原始数据形式, 按一定格式直接输入。若发电机采用 $E'_q = C$ 模型, 则无励磁系统和调速器。

1.3 负荷模型

负荷特性对电力系统稳定性有着十分重要的影响, 但在电力系统仿真中有效模拟负荷往往较困难。代数模型由恒定功率、恒定电流、恒定阻抗及频率因子等构成, 针对整个区域负荷定义。其中, 负荷综合静态特性模型由恒功率、恒电流和恒阻抗构成, 模拟电压变化对负荷的影响, 潮流计算准确度较高; 考虑感应电动机机电暂态过程的动态模型, 是三阶机电暂态模型, 只有一个转子绕组且其参数不依赖于滑差, 经等值后仍可忽略定子侧暂态, 不计及定子侧变压器电势, 而只考虑转子侧暂态和转子运动状态, 能较精确地反映转子侧电磁暂态对电磁力矩的影响。感应电动机模型则针对某节点负荷定义, 优先级较高。综合 / 实测负荷模型通过实测、辨识获得参数, 既能反映负荷静态特性又能反映负荷动态特性, 具有广阔的发展前景。

1.4 直流系统控制与调制模型

BPA 可研究两端和多端直流系统。对于两端直流系统, BPA 提供了简化和详细两种模型; 对于多端直流系统, BPA 只提供详细模型。

简化模型用一阶惯性环节表示直流线路, 故不能模拟直流线路故障; 不考虑换流站控制器的动态过程, 而由式 (1) 计算所得直流电流的大小判断直流系统的稳态控制效果。

$$I_t = \frac{V_{dor} \cos \alpha_{min} - V_{doi} \cos \gamma_{min}}{R_{cr} + R_d - R_{ci}} \quad (1)$$

式中, R_{cr} R_{ci} V_{dor} V_{doi} 分别为整流和逆变侧的比换相压降及理想空载直流电压, α_{min} γ_{min} 和 R_d 分别为整流侧最小触发角、逆变侧最小允许熄弧角和直流

线路电阻。

电流控制是高压直流系统最基本的特性^[12]。详细模型主要考虑了换流站电流控制的动态过程。该模型将直流电流的偏差转化为对换流站直流电压的控制要求, 进而确定换流器的触发延迟角。用户可调节主要的控制参数, 如控制增益、时间常数等。该模型可模拟直流输电线路短路、阀闭锁等直流故障以及直流功率 / 电流定值变动、直流功率反转和直流快速增带负荷等。

多端直流系统模型不但可精确模拟直流网络、详细模拟直流控制, 而且可实现直流线路零电流跳闸、直流换流器闭锁和再起动的模拟。

BPA 中可选的直流调制有: 整流侧小方式调制 (抑制系统低频振荡)、整流侧大方式调制 (改善系统暂态稳定性)、逆变侧熄弧角调制 (改善直流系统的无功特性和电压稳定性, 实现逆变侧定电压控制) 以及单 / 双侧频率调制, 均适用于详细模型, 目前尚不能用于简化模型。

1.5 其它模型

潮流计算中, BPA 定义的节点类型较多、较复杂, 主要是交流节点, 除一般的 PQ、PV 和缓冲节点外, 还有 5 种电压控制节点, 以实现节点电压自动控制功能。对于变压器, BPA 只定义了两绕组变压器, 三绕组变压器须按常规方法化为 3 台两绕组变压器。BPA 中电力系统稳定器 (PSS) 模型可选取轴滑差 / 电机加速功率 / 母线频率变化 / 机组电磁功率差和 (或) 端电压变化作为输入信号。

BPA 采用补偿算法模拟各种对称或不对称故障、复故障以及发电机失磁等故障, 由不对称故障序网提供变压器、对地支路以及线路零序参数。故障发生后不修改导纳阵, 计算速度快。

稳定程序中, 不仅考虑了静补及其控制装置和多种继电保护自动装置, 还模拟了各种稳定措施及其控制回路。暂态过程与自动装置相结合, 更便于正确分析事故、研究自动装置的运行特性、参数整定及全局协调。

2 软件功能

BPA 中潮流与暂态稳定计算程序联合运行, 其间的联系如图 1 所示^[13]。

潮流程序提供了 PQ 分解法、牛顿 - 拉夫逊法和改进的牛顿 - 拉夫逊法 3 种算法, 各算法和迭代最大步数可自行选定, 对不同性质的状态变量可分

别设定容许误差^[14]. 稳定程序用导纳阵三角分解迭代法或牛顿法解网络方程, 用隐式梯形积分法解常微分方程^[15].

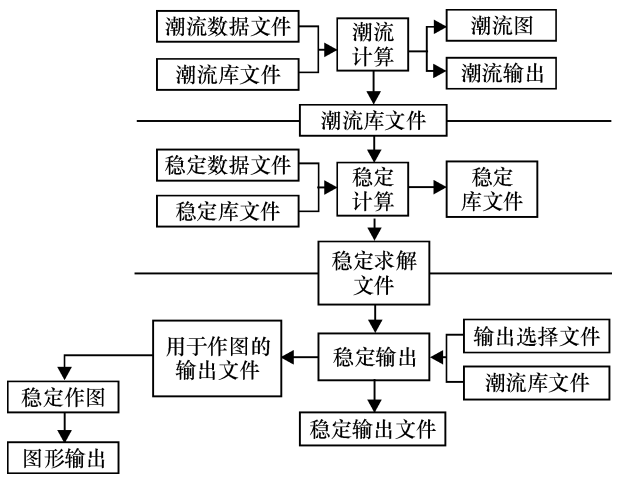


图 1 BPA 总框图

BPA 模拟了可控硅快速调整网络阻抗、控制线路功率; 用切除发电机模拟系统因故障失去部分发电机功率后的短期响应特性, 反映各机组出力调整和线路潮流分布变化情况; 用断线补偿法快速检查指定系统区域中每一元件故障后系统状态, 指出系统运行的薄弱环节, 为电网规划、运行提供依据; 通过节点参数或负荷扰动法, 自动给出指定节点的 $Q-V$ 、 $P-V$ 或 $P-Q$ 曲线, 按指定扰动量给出功角、电压灵敏度及线路功率和损耗、网损等灵敏度分析报告; 为确定系统网络极限传输水平、预测网络对负荷变化的适应能力, 可按指定百分数修改全网或局部发电出力、负荷。

BPA 不仅可自动合并区域网络数据、控制区域交换功率, 还可按区域、分区或所有者修改发电和负荷功率, 按负荷静特性在指定范围内分配负荷, 按区域或分区实现电压控制节点类型的转换、节点曲线的求解、灵敏度的计算分析等。配合这一系列在区域或分区互联方面的功能, BPA 可方便地删除指定分区内所有节点, 只对感兴趣的分区进行计算分析。此外, 自动发电控制 (AGC) 与区域联络线功率控制相结合, 由若干机组共同承担系统或区域功率偏差值, 使潮流能更快收敛。

3 输入输出

BPA 主要为卡片式数据输入, 可直接在数据文件中编辑、修改参数。在潮流文件中, 通过详细的专用控制语句, 可方便地设定潮流程序的输入、计算和

输出内容、修改数据、选择和改变控制功能等; 网络数据则以卡片形式紧跟程序控制语句后输入, 也可另存于潮流库文件中, 由程序控制语句调用^[14]. 而在稳定文件中, 元件动态参数、故障操作、计算和输出控制均以卡片式输入; 以相同基础数据进行一系列不同扰动方式下的稳定计算时, 可通过保存的原始数据文件输入大部分稳定数据, 而只需在稳定文件中给出线路操作和计算控制^[15].

潮流程序输出内容详细、方式灵活, 可有选择地列表输出原始数据、计算结果和潮流分析报告, 在潮流结果输出文件中还可能出现部分负荷数据。稳定计算过程明了, 缺省显示每一时间步系统最大摇摆角及其机组、节点最低电压和最大频差曲线, 也可按输出控制即时浏览其他稳定曲线; 计算结束后, 还会自动输出全网机组功角最低和最高点、电压和频率最低点曲线, 体现全网运行大致情况。

中国版 BPA 的图形辅助计算分析程序采用标准的 Windows 应用程序界面, 操作和使用方便、灵活, 图形编辑、输入和输出功能齐全。潮流图程序是准自动作图, 只需设定所选节点位置, 则自动判断节点类型及所连接元件, 并搜索网络拓扑结构、自动生成连线。潮流图存储文件可共享或套用, 运行方式变化时根据新潮流数据中的网络拓扑结构自动修改图形, 这保证了图形和网络拓扑结构的一致性, 也大大减少了绘图工作量。单线图作图工具还可绘制短路电流分布图。地理接线图中火电、水电和核电机组或某个电压等级节点等这些具有主要和明显特征的节点可选用专用母线符号“站”来表示, 所显示的潮流计算结果可选择用标么值或有名值表示以及是否显示无功值、节点电压和角度。稳定计算正常结束后生成的二进制绘图文件可供 Curve Maker 自由组合及编辑, 输出稳定曲线, 且多个稳定作业的稳定曲线格式还可共享^[13]。

4 仿真算例

本文采用 BPA 对 IEEE 7 节点系统进行了仿真计算分析。交流系统采用次暂态发电机模型、静态负荷模型, 两端直流系统采用详细模型、定功率控制。

在已求解的基本潮流方式 (见图 2) 上进行 N-1 静态安全分析, 可见: B1-500 与 B4-500、B4-500 与 B3-500 间任一回线路断开会引起 B4-500 和直流线路两端节点电压越下限。其他 N-1 校验无线路、变压器过载。

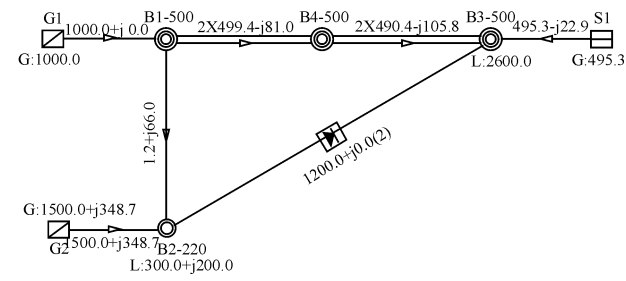


图 2 IEEE 7 节点系统地理接线图格式潮流图

设 0.2 s 时逆变侧交流系统母线 B3-500 附近发生三相短路故障, 逆变侧直流电压突降, 整流侧瞬时电压不变, 因此直流电流瞬间激增. 逆变侧换流母线

附近的短路故障导致交流电压严重下降, 逆变器短时换相失败不可避免, 此时, 整流侧由于电流控制点燃角较大, 从而使相应的整流侧无功需求增大. 为此, 直流控制器低压限流 (VDCOL) 环节减小直流电流, 以防止连续换相失败、电压失稳. 0.06 s 后故障切除, 随着交流系统的恢复, 直流控制器调节恢复直流系统功率传输.

由图 3 各曲线可见, BPA 直流系统详细模型考虑了直流系统控制特性, 能正确反映交流系统故障时直流系统的响应.

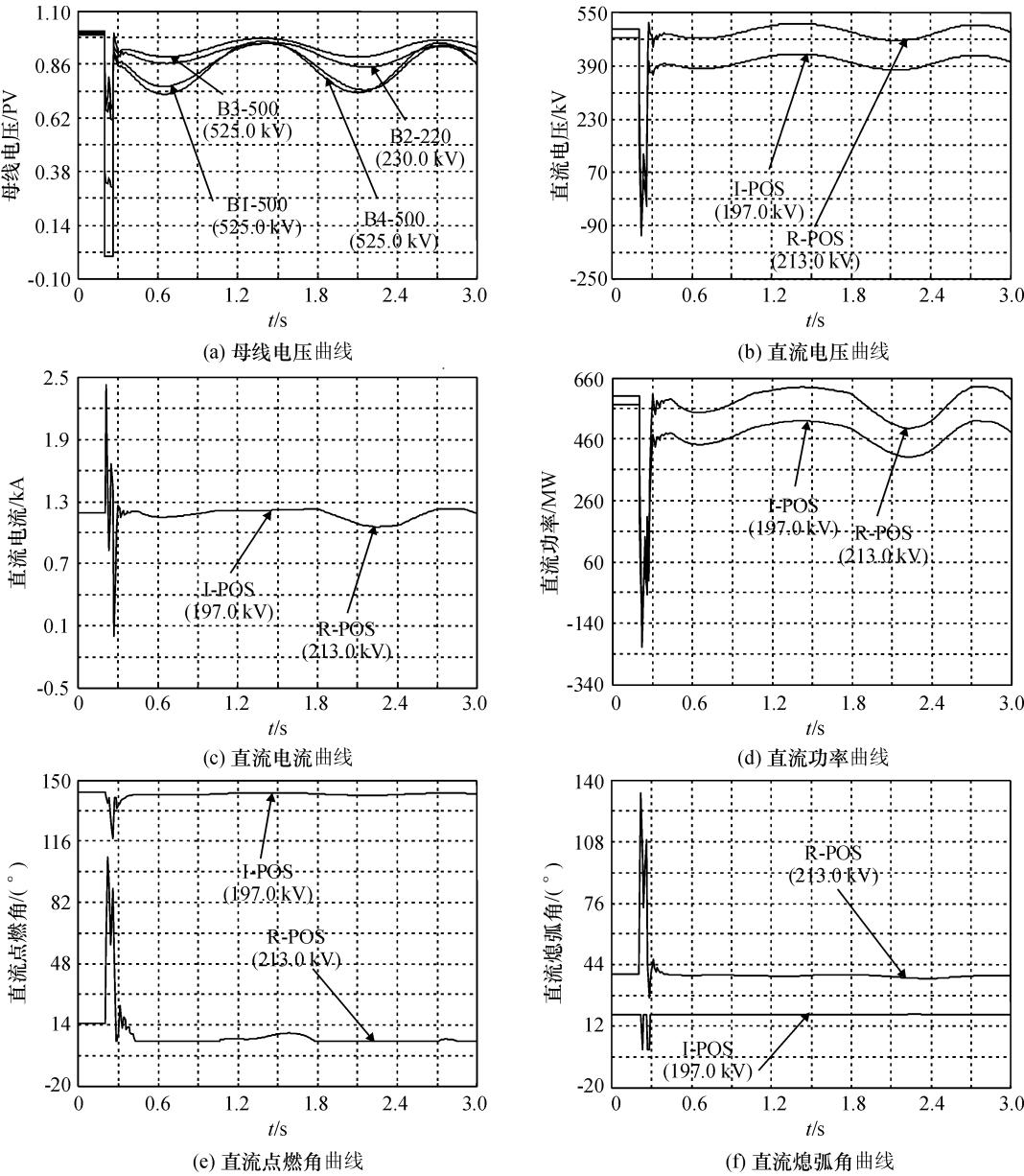


图 3 近逆变侧交流系统故障稳定曲线

5 结束语

BPA 自 1984 年引入我国以来,经过不断消化吸收、完善更新和推广应用,已成为我国电力系统仿真研究的重要工具之一。BPA 的突出优点在于能够对大规模交直流系统进行潮流和机电暂态数字仿真,其仿真计算的收敛性和稳定性都很好,并具有独特的地理接线图格式潮流图程序,便于绘制潮流图和直观地观察潮流分布情况。但 BPA 无用户自定义模型功能,对 HVDC、灵活交流输电系统 (FACTS) 的模拟较简单^[16]。随着电力系统数学模型的发展和程序应用实践经验的积累, BPA 在国内外都得到了新的发展。电力专业理论性和实践性都很强,学习和掌握 BPA 的使用方法,不仅有利于融会贯通电力专业知识、整体把握电网概念,而且有利于积累对电网规划、设计、调度和运行的工程实践经验。

参考文献:

[1] Lei X, Lerch E, Povh D, et al A Large Integrated Power System Software Package-NETOMAC [C] // Proceedings POWERCON' 98 Beijing [s n], 1998

[2] Wu Zhong-xi Zhou Xiao-xin Power System Analysis Software Package (PSASP) -An Integrated Power System Analysis Tool[C] // Proceedings POWERCON' 98 Beijing [s n], 1998

[3] 韩祯祥, 张琦, 徐政. 电力系统分析软件的现状与发展

[J]. 国际电力, 1999(1): 51-54

[4] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD /EMTDC [J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66

[5] 祝瑞金, 傅业盛. 电力系统仿真软件 PSS/E 的消化和应用 [J]. 华东电力, 2001(2): 8-11.

[6] 徐政. 免费使用的电磁暂态分析程序——ATP-EMTP 程序介绍 [J]. 电网技术, 23(7): 64-65 69

[7] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70

[8] 潘学萍. 电力系统数字仿真研究综述 [J]. 江苏电机工程, 2005, 24(1): 80-83

[9] 李广凯, 李庚银. 电力系统仿真软件综述 [J]. 电气电子学报, 2005, 27(3): 61-65

[10] 倪以信, 陈寿孙, 孙宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002

[11] Kundur P. Power system stability and control [M]. New York M cGraw-Hill Inc , 1994

[12] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004

[13] 电科院系统所电力系统分析软件程序培训手册 [S]. 北京: 中国电力科学研究院系统所, 2000

[14] 中国版 BPA 潮流程序用户手册 [S]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004

[15] 中国版 BPA 暂态稳定程序用户手册 [S]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004

[16] 张秀钊. BPA 与 SIM POW 应用于电力系统仿真研究 [J]. 云南电力技术, 2007 35(2): 12-14

Power System Analysis Software Package

—— BPA in Chinese Copyright

Zhang Yan Mao Xiao-ming Chen Shao-hua

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract The power system simulation software is an important tool for programming research, operating and teaching of the power system. BPA (Bonneville Power Administration) in Chinese copyright has many traits, such as complete models, strong functions, flexible uses and convenient operation. Especially, it adapts to the simulation of large scale AC/DC power system. It introduces BPA from the aspects of mathematical models, software functions, input and output. It sets out the functions of BPA by the simulation based on IEEE seven-node power system.

Key words Bonneville Power Administration, power flow analysis, transient stability, digital simulation