

基于黑板模型专家系统的黑启动决策支持系统

阮阳¹, 黄伟², 胡文平³, 李京¹, 罗伟¹, 袁荣湘¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 广东电网公司惠州供电局, 广东 惠州 516000; 3. 河北电网公司电力试验研究院, 河北 石家庄 050000)

摘要: 专家系统在电力系统恢复中的应用取得了一定的成果, 但针对大停电之后的系统恢复(黑启动)研究和应用较少。对黑启动的恢复策略问题做了研究, 提出将黑启动恢复过程的三个阶段(电源、网架、负荷)综合考虑的恢复策略。根据黑启动三个恢复阶段的层次性和联系性, 设计并开发了基于黑板模型专家系统的黑启动决策支持系统, 在某地区电网的实际应用中取得了满意的效果, 证明了该模型的理论意义和实用价值。

关键词: 电力系统恢复; 黑启动; 专家系统; 黑板模型

Black-start decision support system based on blackboard modeled expert system

RUAN Yang¹, HUANG Wei², HU Wen-ping³, LI Jing¹, LUO Wei¹, YUAN Rong-xiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Huizhou 516000, China; 3. Electrical Power Research Institute of Hebei Power Grid Corporation, Shi Jiazhuang 050000, China)

Abstract: The application of expert system in power system restoration has made some progress, but not for black start, i.e. the restoration of power system after blackout. In this paper, the strategy for black start is studied. The restoration of black start generally consists of three procedures, i.e. source restoration, skeleton restoration and load restoration. The paper analyses the hierarchy and connectivity of the three restoration procedure, designs a black-start decision support system based on blackboard modeled expert system, and then develops the system. The operation of the system on a practical power grid proves its value of both theory and application.

Key words: power system restoration; black start; expert system; blackboard model

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0016-05

0 引言

电力系统大面积停电之后的黑启动一般分为三个阶段, 即电源恢复、网架恢复和负荷恢复。每一阶段都必须考虑系统的电压和频率稳定问题, 同时, 各阶段的恢复目标的侧重点也不同, 在电源恢复和网架恢复阶段, 恢复目标分别是启动无自启动能力的电厂和恢复重要变电站, 负荷的投入只是为了平衡发电机出力, 维持系统稳定, 在负荷恢复阶段, 负荷的快速恢复则成为恢复目标。因此, 黑启动是一个多目标、多变量、多步骤的优化问题^[1]。由于这一问题的复杂性和随机性, 当前还没有广泛认可的算法可直接求解出整个恢复方案。

黑启动作为电力系统恢复的一种特殊情况, 与电力系统一般故障后的恢复有一定的联系。从 Sakaguchi T 和 Matsumoto K 的工作开始, 许多研

究^[2~9]尝试将专家系统应用到电力系统恢复, 包括大停电后的黑启动, 并取得一定成果。

Sakaguchi T 和 Matsumoto K 第一次提出将知识库系统应用到电力系统恢复, 文献[2,3]提出从调度人员的经验得到启发性知识, 构成知识库系统, 以此指导大停电后的恢复。文献[4]设计了分层结构的专家系统, 在恢复方案求解时首先将下一个恢复目标分离, 找出恢复路径并对其他恢复路径备份, 再搜索出恢复路径的开关操作顺序, 从而在开关操作发生故障时能选择备份的恢复路径, 快速地调整恢复方案。但作者并没有对负荷的恢复以及系统的暂态和稳态约束加以考虑。文献[5]将专家系统与数学规划法相结合, 把求解恢复后的最优系统描述成一个数学规划问题, 并运用专家知识将问题分解成若干个子问题, 从而加快求解过程。但这种方法在本质上仍然是数学规划法, 由于黑启动问题自身的极

其复杂性, 并且实际的电网拓扑庞大, 因此数学规划法求解极其费时, 专家知识的引入只是在一定程度上缓解了这一不足。

文献[6]设计了基于灵敏度分析和启发式规则的专家系统, 其规则分为潮流控制规则、充电规则、线路开断规则、切负荷规则及电压控制规则, 对一般的电力系统故障后的恢复问题考虑比较全面, 但该系统并不适用于大停电后的电力系统恢复(黑启动)。文献[7, 8]提出的黑启动决策支持系统分别采用规则和知识库来求解恢复方案, 但都只考虑了电源的恢复。文献[9]将专家系统应用到舰船电力系统的重构和恢复中, 其提出的按负荷重要等级恢复或者切断, 有一定的借鉴意义。

虽然专家系统应用在电力系统恢复中取得了一定成果, 但就黑启动问题来说, 前文所述的研究没有区分大停电恢复(黑启动)和电力系统一般故障后的恢复, 没有深入研究前者的特殊性, 而只是把它作为后者的一种情况, 没有完整考虑黑启动整个过程, 只对黑启动的某一个方面(如电源的恢复)做了研究。另外, 由于常规专家系统的知识表示以及推理的复杂性, 实际成功应用的专家系统并不多见。

黑板模型专家系统适用于复杂问题的求解, 与一般的专家系统相比, 黑板模型能更方便地描述复杂问题, 推理过程清晰。一个简单的黑板模型由黑板、知识源、控制模块组成^[10]。黑板描述问题的各个层面; 知识源包含求解问题的不同知识, 黑板状态的变化可以触发不同的知识源; 控制模块通过一定策略选择某个已触发的知识源, 对问题进一步求解。国内外学者对黑板模型在电力系统问题求解中的应用已有部分研究^[11, 13], 并取得了一定成果。文献[11]提出了适用于多专家合作诊断的变压器绝缘故障诊断黑板模型专家系统, 文献[12]、文献[13]分别提出了网络故障后恢复及低压配电网故障诊断的黑板模型。

本文深入分析了大停电之后的黑启动过程, 分析了电源、网架和负荷三个恢复阶段的层次性和联系性, 设计、开发了基于黑板模型专家系统的黑启动决策支持系统, 并成功应用到某地区电网中。

1 黑启动的整体恢复策略

黑启动具体的过程可大致分为三个阶段:

1) 电源恢复阶段: 具备黑启动能力的电厂自启动, 并沿输电线路向其他没有自启动能力的电厂送电, 这样逐步启动电网内的所有电厂, 形成一个初步稳定的系统。电源恢复阶段的成功是整个黑启动

的关键。

2) 网架恢复阶段: 由已恢复系统向附近重要变电站送电, 恢复部分重要负荷, 同时, 新的电厂不断启动成功, 恢复发电, 这样逐步形成一个稳定的系统。

3) 负荷恢复阶段: 根据系统有功余量尽可能多地恢复负荷。

这三个阶段并没有严格的界限, 电源的启动、重要变电站的恢复以及负荷的恢复是相互影响、交替进行的。电源恢复阶段中, 对非黑启动电厂送电的过程中伴随着送电路径上变电站的恢复, 同时, 为保持发电机稳定运行, 必须投入一定的负荷以维持有功平衡; 在网架恢复时, 当重要变电站送电之后, 应根据恢复情况有选择地投入部分负荷, 以维持已恢复系统的稳定; 负荷恢复阶段则应根据电源并网和网架恢复情况, 并结合负荷重要等级, 综合考虑来决定投入的负荷。

将黑启动分成三个阶段的原因在于, 各阶段的恢复目标的侧重点是不同的。在前两个阶段中, 负荷恢复是作为手段, 来保证系统频率和电压稳定; 负荷恢复阶段中, 负荷恢复是目标, 应尽可能多地恢复负荷, 减少经济损失。

因此, 黑启动具有很强的层次性——分成三个阶段, 同时这三个阶段又密切联系、相互影响。

以往的研究没有对这三个阶段的联系予以重视, 在设计恢复策略时往往将这三个阶段分开考虑, 这与实际情况是不相符的。

2 系统的结构

结合恢复过程三个阶段的层次性和联系性, 本文设计了基于黑板模型专家系统的黑启动决策支持系统, 系统结构如图1所示。该系统由黑板、知识源、控制模块、数据库、仿真模块以及图形平台组成。

2.1 黑板

黑板是黑板模型的全局工作区, 一般分成若干个信息层, 每一层用于描述领域问题的某一类信息, 高层信息可以看作为下层信息的抽象, 下层信息为上层信息的实例。根据前述恢复问题的讨论, 建立了五个信息层, 由低层到高层分别为电源恢复层、网架/变电站恢复层、负荷全面恢复层以及方案评估层和恢复方案层。电源恢复层、网架/变电站恢复层和负荷全面恢复层用来描述通过仿真校验的三个阶段的恢复方案, 方案评估层存储优化后的方案, 恢复方案层存储根据优化方案推理出各个恢复方案的具体操作序列。

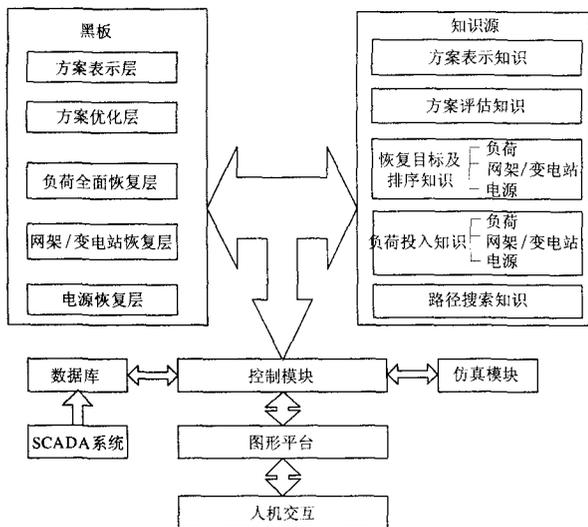


图1 黑启动决策支持系统结构

Fig.1 Structure of decision support system for black-start

2.2 知识源

知识源在黑板模型中是描述某个独立领域问题的知识及知识处理方法的知识库，黑板状态的变化会触发不同的知识源。知识源通过对黑板上的信息的建立、修改和删除等操作对各信息层进行更新。根据恢复方案求解所需要的知识，设计了五个知识源。知识源之间相互独立，它们只能通过黑板进行通信和相互调用，每个知识源用来完成恢复方案求解过程中的某个特定问题。

1) 路径搜索知识源：结合恢复目标和已恢复系统情况，搜索出从已恢复系统到恢复目标的恢复路径。由于电力系统网络拓扑非常复杂，为防止搜索出许多实际不可行的路径，在该知识源加入启发知识，比如限制路径经过的变电站个数等。

2) 负荷投入知识源：负荷的投入以变电站的充电为前提。在一个变电站充电后，应投入必要的负荷，以平衡机组的出力，同时这对吸收线路无功、防止线路因空载引起电压升高而导致设备绝缘长时间经受高电压冲击起到一定作用。负荷设计为五个重要等级，根据三个阶段恢复目标的不同，负荷投入应区别对待。在电源恢复阶段主要考虑1、2等级负荷，网架恢复时考虑1、2、3、4等级负荷，负荷全面恢复时所有等级负荷都予以考虑。

3) 恢复目标及排序知识源：选择每个阶段恢复的目标及目标恢复的先后顺序。每个阶段的恢复目标和排序规则是不同的，因此又按电源、网架/变电站和负荷分成三个子知识源。

(1) 在电源恢复阶段，恢复目标为待启动机组，在综合考虑这些机组的容量、与黑启动机组距离、

进相能力及机组状态等因素后，得出机组的恢复顺序。

(2) 网架恢复阶段时，根据已恢复系统情况，以变电站电压等级、所管辖负荷重要程度、与电源中心距离远近、与已恢复系统距离等因素决定变电站恢复顺序。

(3) 负荷全面恢复时，结合负荷所属变电站位置、系统恢复情况，按负荷重要等级从大到小依次分五层恢复。

4) 方案评估知识源：根据前面三层得到的各阶段的恢复方案，得到整体恢复方案，进而评估这些恢复方案，给出方案的优劣次序。地区调度的主力电厂的恢复是地区电网黑启动的关键，同时，负荷的恢复时间和恢复容量决定着恢复的效果。因此，在方案评估中，估计电厂、变电站、线路及负荷的恢复时间，将各个电厂的容量、恢复时间以及负荷的容量、恢复时间相乘并加权，结果较小者即是较优的恢复方案。

5) 方案表示知识源：根据整体恢复方案，形成具体的方案操作序列（如合上断路器、给线路充电、给母线充电……等等）。该知识源包括操作序列搜索，以及一些简单的操作规程知识，如合闸前在操作路径上断路器两侧的隔离开关先于断路器合上。

2.3 仿真模块

校验恢复过程中的暂态过程和潮流。暂态过程涉及自励磁和过电压，校验各方案在恢复过程中是否出现自励磁和过电压越限的情形；潮流计算用来检验各个恢复方案的三个阶段潮流平衡。

2.4 数据库

存储电网的数据。恢复方案的求解策略既涉及到拓扑分析和路径搜索，也涉及到了仿真计算。因此，数据库分为拓扑数据层和计算数据层两层结构，如图2所示。其中，拓扑数据层又分为厂站层和厂站内部接线层，分别适用于路径搜索和操作序列搜索。

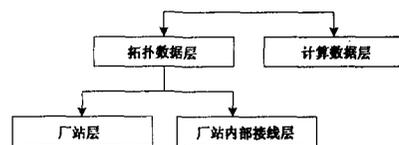


图2 数据库结构

Fig.2 Structure of database

2.5 控制模块

控制方案的求解过程。黑板的状态即问题求解的状态，每个黑板状态会触发多个知识源，控制模块优选一个知识源并根据其执行结果以及仿真情况

来修改黑板状态, 为下一步求解创造条件。控制模块也是黑板和知识源与数据库的接口, 同时决定何时调用仿真模块。三个阶段的恢复方案求解过程分别如图 3、4、5 所示。

2.6 图形平台及人机交互

图形平台是录入数据的场所, 人机交互是决策支持的方式。图形平台实现了图模一体化, 既可以通过图元的编辑输入数据, 也可以通过数据库与 SCADA 的连接导入数据; 通过人机交互, 能实现黑启动恢复方案整体求解、分阶段求解、方案恢复过程演示等决策功能。

3 应用

以某地区电网为例, 通过图形平台将该地区电网所管辖系统画出, 如图 6、7 所示。决策支持系统求解出的优化的恢复方案一共有 8 个, 如图 8 所示, 恢复方案得到了该地区电网调度人员的认可。

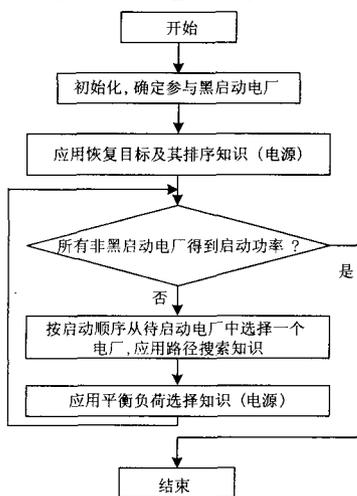


图 3 电源恢复方案求解流程

Fig.3 The processing flow for restoration of source

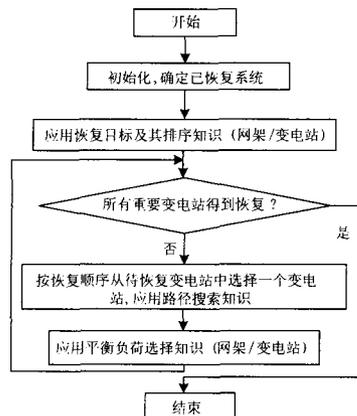


图 4 网架恢复方案求解流程

Fig. 4 The processing flow for restoration of skeleton

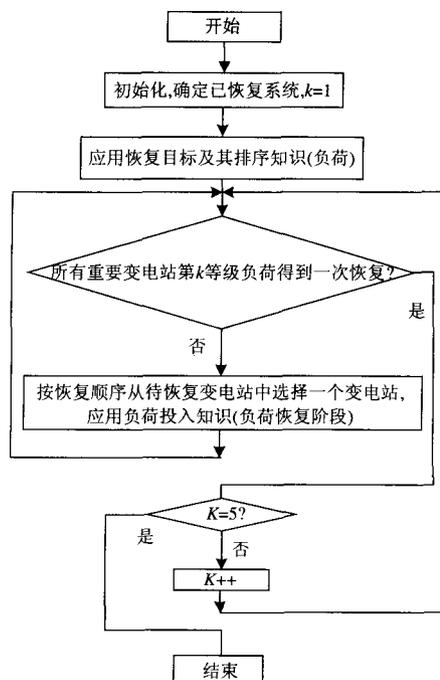


图 5 负荷恢复方案求解流程

Fig.5 The processing flow for restoration of loads

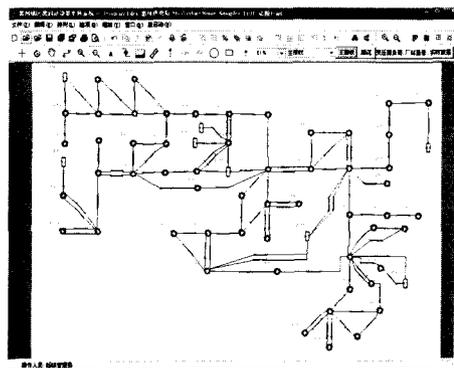


图 6 厂站层接线

Fig.6 Graphics for layer of plants and substations

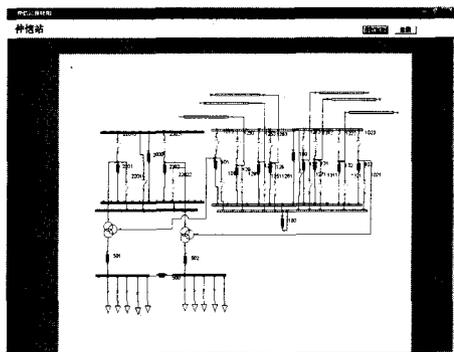


图 7 厂站内部接线

Fig.7 Graphics for layer of the internal of plants and substations

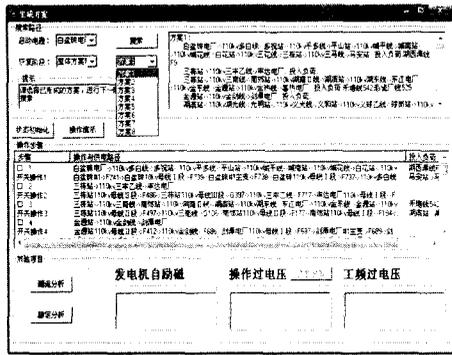


图 8 方案及其操作步骤

Fig.8 Schemes and operation sequences

4 结束语

电力系统黑启动方案能有效地指导大停电后的恢复,减少经济损失。由于目前还没有广泛认可的算法用来求解出恢复方案,因此,可以借助专家知识,利用专家系统来求解黑启动方案。目前专家系统电力系统恢复中的应用主要是在一般故障后的恢复中,而没有针对黑启动问题的特殊性进行深入研究。并且黑启动是一个多目标、多变量、多步骤的优化问题,常规的专家系统难以实现。

根据黑启动的三个阶段(电源、网架、负荷)的层次性和联系性,本文将黑板模型专家系统应用到黑启动方案求解和优化,设计并开发了相应的软件,在某地区电网的实际应用中取得了满意的效果。目前该系统仍在不断完善之中。

参考文献

[1] Matsumoto K, Sakaguchi T, Kafka R J, et al. Knowledge-Based Systems as Operational Aids in Power System Restoration[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(5): 689-697.

[2] Sakaguchi T, Matsumoto K. Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(2): 320-329.

[3] Matsumoto K et al. Heuristic Management of Complex and Large Scale Power System in Restorative States[C]. Proc. CIGRE/IFAC, 1983.

[4] Kirschen Daniel S, Volkmann Terry L. Guiding a Power System Restoration with An Expert System[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 558-566.

[5] Nagata T, Sasaki H, Yokoyama R. Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and

Mathematical Programming Approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1473-1479.

[6] Park Young-Moon, Lee Kwang-Ho. Application of Expert System to Power System Restoration in Sub-control Center[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 629-635.

[7] 周云海, 闵勇, 杨滨. 黑启动及其决策支持系统[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 43-46.

ZHOU Yun-hai, MIN Yong, YANG Bin. Decision Support System for Black-start[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 43-46.

[8] 顾雪平, 赵书强, 刘艳, 等. 一个实用的黑启动决策支持系统[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 54-57.

GU Xue-ping, ZHAO Shu-qiang, LIU Yan, et al. A Practical Decision Support System for Power System Black Start[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 54-57.

[9] Srivastava S, Butler-Burry K L. Expert-system Method for Automatic Reconfiguration for Restoration of Shipboard Power Systems[J]. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 2006, 153(3): 253-260.

[10] 曹文君. 知识库系统原理及其应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995.

[11] 廖瑞金, 姚陈果, 孙才新, 等. 多专家合作诊断变压器绝缘故障的黑板型专家系统[J]. 电工技术学报, 2002, 17(1): 85-90.

LIAO Rui-jin, YAO Cheng-guo, SUN Cai-xin, et al. Blackboard Expert System of Multi-expert Cooperating Diagnosis in Transformers' Insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(1): 85-90.

[12] Mondon E, Heilbronn B, Harmand Y et al. MARS: An aid for Network Restoration After a Local Disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2): 850-855.

Montakhab M R, Adams R N. Intelligent System for Fault Diagnosis on Low Voltage Distribution Networks[J]. IEE Proc.-Gener. Transm Distrib., 1998, 145(5): 592-596.

收稿日期: 2008-04-02; 修回日期: 2008-06-23

作者简介:

阮 阳 (1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制、大停电后的电力系统恢复; E-mail: ruan-yang@163.com;

黄 伟 (1969-), 男, 从事电力系统运行与调度管理工作;

胡文平 (1968-), 男, 博士, 从事电力系统故障诊断、电力系统分析与规划工作。