

# 黑启动方案制定及决策支持实用系统

史华勃<sup>1</sup>, 丁理杰<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 袁贵川<sup>2</sup>, 唐伦<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川电力调度控制中心, 四川 成都 610041)

**摘要:** 结合四川电网的具体情况, 研究了黑启动路径生成、启动初期负荷恢复策略, 探索体现负荷恢复数量和恢复速度的实用方法, 以及黑启动操作过程中的暂态稳定、过电压等问题的自动校核技术。在此基础上开发了一套电网大停电后恢复方案制定及决策支持实用化系统。利用该系统制定了四川电网大停电后恢复方案, 给出了典型水电机组作为黑启动电源在启动初期的负荷冲击量参考值以及黑启动初期建议的恢复策略。

**关键词:** 黑启动; 方案制定; 决策支持; 实用系统

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)01-0078-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.018

## Formulation of Black-start Scheme and Practical Decision Support System

Shi Huabo<sup>1</sup>, Ding Lijie<sup>1</sup>, Chen Gang<sup>1</sup>, Yuan Guichuan<sup>2</sup>, Tang Lun<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Sichuan Electric Power Dispatching Control Center, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Combined with the specific situation of Sichuan power grid, the black-start path generation method and the load recovery strategy in black startup are studied. A practical method for calculating load recovery quantity and recovery speed is presented as well as the automatic checking technology of transient stability, overvoltage and other problems in the operation of black startup. On this basis, a set of black-start scheme formulation and decision support system is developed. The proposed system is used to formulate the recovery plan of Sichuan power grid, and gives the reference value of load impact and the recommended recovery strategy in the early stages of black-start in the system where black-start power supply is hydropower units.

**Key words:** black-start; scheme formulation; decision support; practical system

## 0 引言

随着电力系统规模的日益扩大,其网络结构和动态性能也变得越加复杂。近年来,随着可再生能源的大规模接入,其固有的波动性、随机性和间歇性,也给电力系统的安全、稳定运行带来了更大的不确定性和更严峻的挑战。而在市场环境下,电力系统的运行条件更加接近于稳定极限,若局部故障处理不当,极易导致事故扩大,引发大面积停电事故。为了在大停电发生后能迅速恢复系统、减少损失,需要提前制定黑启动恢复方案。

大量文献对黑启动决策理论进行了研究,并开

发了决策系统<sup>[1-3]</sup>。但对于大规模电力系统黑启动过程涉及的操作过电压<sup>[4]</sup>、空充主变压器励磁涌流引发过电压<sup>[5]</sup>等电磁暂态风险,采用广泛应用的商业化仿真软件进行自动校核以及实用的负荷恢复数量和速度控制方面研究较少。在大电网黑启动过程要完成前述风险分析,需要建立海量的仿真模型,耗时耗力,且难以对每个子网、每条启动路径均进行详细分析,从而影响了黑启动策略的科学性和有效性。

针对以上问题,结合四川电网的具体情况研究黑启动路径搜索方法,使搜索出的路径能综合考虑启动风险、负荷恢复速度和机组恢复速度等因素;研究黑启动初期负荷恢复的策略,探索体现负荷恢复数量和恢复速度的实用方法;研究黑启动操作过程

中的暂态稳定、过电压等问题的自动校核技术。在研究基础上开发了一套电网大停电后恢复方案制定及决策支持实用化系统,并应用该系统完成了四川电网黑启动方案制定和校核,给出了黑启动初期建议的恢复策略和冲击负荷投入策略。

## 1 系统总体设计方案

所设计系统基于大电网已有的机电暂态数据,实现快速的黑启动方案生成、全面的电磁暂态及机电暂态风险分析和对比,并能对方案校验结果予以保存和分析,基于相关的技术标准和专家经验,给用户 提供黑启动辅助决策。

系统的核心功能包括: 1) 电网机电暂态数据的解析及拓扑识别; 2) 黑启动方案生成; 3) 黑启动方案校验; 4) 黑启动方案管理。系统总体架构如图 1 所示。

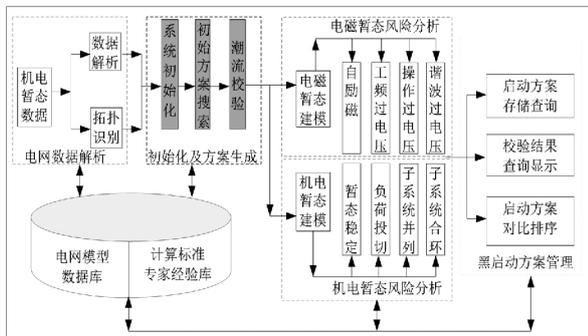


图 1 系统总体架构

## 2 系统关键功能实现

### 2.1 电网数据的解析和厂站划分

鉴于 PSD - BPA 在电力系统中的广泛使用,软件系统的数据源取自 BPA。电网数据解析包括对潮流 DAT 文件及稳定 SWI 文件的解析<sup>[6]</sup>。根据 BPA 软件说明,按照各卡片的格式<sup>[7-8]</sup>,按字段截取并理解,建立“母线 - 厂站”映射表和“厂站 - 分区”映射表,对电网进行全局拓扑识别。

在此基础上,对电网数据进行“再理解”,按人的思维,将电网数据分为 3 个层次:分区、厂站和设备。采用深度优先搜索的方法,识别出每个电厂和变电站内部拓扑,其中将厂站又根据其拥有的设备类型划分为:水电厂、火电厂、风电场、光伏电站等。

解析好的电网数据,由厂站设备字典、母线 - 厂站字典、厂站 - 分区字典组成。数据解析流程如图 2 所示。

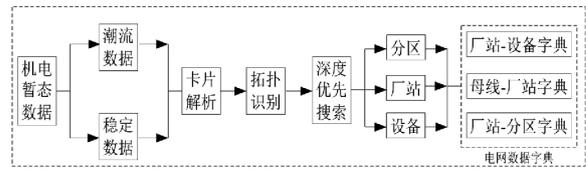


图 2 数据解析和厂站划分流程

### 2.2 黑启动方案生成

生成黑启动方案,首先要生成可靠的黑启动路径,需要搜索从黑启动电源至被启动机组的路径。该模块主要包括 3 大功能:黑启动区域设置、黑启动路径生成、黑启动方案编辑。

#### 1) 黑启动区域设置

对于大电网,需要分区制定黑启动方案,要先收缩电网数据,限定方案搜索的范围。通过设置筛选条件指定黑启动方案涉及的厂站集。

筛选时,分区的筛选是利用数据解析时生成的“母线 - 厂站”字典和“厂站 - 分区”字典,而电压等级、厂站名的筛选则是利用数据解析拓扑后生成的厂站设备集。

#### 2) 黑启动路径生成

黑启动路径的生成,既要考虑到最短路径搜索的自动性,也要考虑用户自定义的特殊性,所开发的系统提供了用户两种路径生成的方法。既可以自动搜索生成,也可以用户手动指定生成,得到的黑启动方案都可以存入“原始方案库”,供用户方案校验时使用。

软件采用前  $K$  最短路径算法,如果采用自动搜索生成,则需要设定起始厂站、终端厂站和  $K$  值,代表将搜索前  $K$  个从起始厂站到终端厂站的最短路径,此处最短指的是路径所含线路的权重和最小;如果采用手动指定生成,则只需要设定起始厂站,系统会根据起始厂站不断引导用户辐射向待启动电厂。

手动指定方案只需要指定“起始厂站”,与  $K$  值和终端厂站无关,与设置的黑启动区域也无关,可以全网手动指定路径。通过下拉列表选择连接母线的变压器卡和线路卡,下一个母线名自动显示。这利用的是电网数据解析时的拓扑关系,根据节点自动获得其相邻支路。

#### 3) 黑启动方案编辑

由于黑启动时系统环境较为复杂多变,某设备

的故障会引起黑启动路径的变化,故该系统允许用户对已生成的黑启动方案进行编辑,为了保证黑启动方案的可行性,程序自动检测节点的相邻支路,以节点毗邻的方式不断向外延伸来增加设备,通过增删相应电网数据卡,实现方案的完全自定义。黑启动方案生成流程如图3所示。

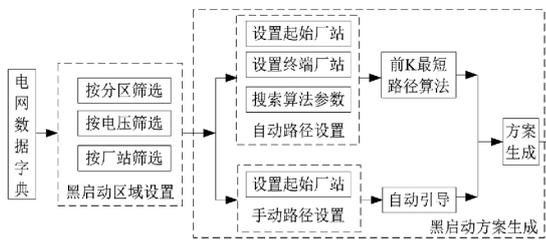


图3 黑启动方案生成流程

### 2.3 黑启动方案自动校验

黑启动方案是否可行,取决于它是否能通过相关的校验。系统首先对黑启动方案进行潮流校验,潮流校验通过后的方案再进行电磁暂态和机电暂态风险校验,潮流校验不通过的方案认为是不可行方案。

电磁暂态方面的校验包括:2%统计操作过电压校验、单相接地甩负荷和无故障三相甩负荷工频过电压校验、自励磁校验、空充主变励磁涌流引发谐波过电压校验。机电暂态方面的校验包括:投负荷校验和暂态稳定校验以及子系统并列、合环过程风险校验。

黑启动校验步骤为如下:

1) 根据黑启动方案,按启动步骤分解为厂站启动、线路启动两个方面。厂站启动主要包括主变压器空充过程、电源及负荷投入过程,线路启动主要为空充线路操作过程。

2) 根据启动步骤,系统自动拼接生成该步骤对应潮流文件、电磁暂态和机电暂态仿真模型文件。在潮流校验通过后,采用 ATP-EMTP 执行电磁暂态仿真,用 PSD-BPA 执行机电暂态仿真。本步骤中,机电暂态仿真主要给出各站单次负荷冲击量限值以及最大负荷投入量限值,主要考虑的问题为:负荷投入后系统最低频率不引发低周减载动作,仿真中应考虑机组调速器为孤网参数。

机电暂态校验给出各站负荷投入量后,建立电磁暂态模型,在此基础上对各步骤启动过程过电压水平进行校验。

3) 启动过程机电暂态校验完成后,给出各站负荷投入水平,并根据启动方案自动建立全区域机电

暂态模型,进行相关的稳定校验。

4) 最后将过电压校验和暂态稳定校验结果读入决策分析模块,利用相关的标准和专家经验,对比后给出最优的黑启动决策。黑启动方案自动校验流程如图4所示。

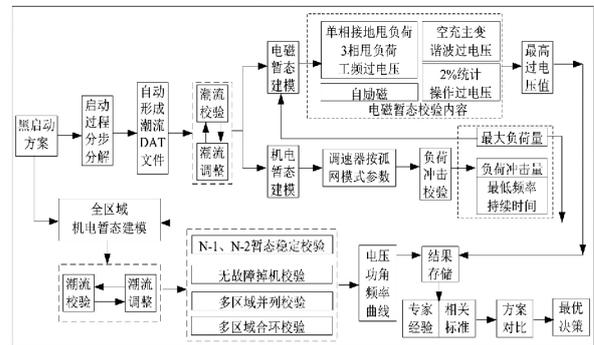


图4 黑启动方案校验流程

### 2.4 黑启动方案可行性判据

系统黑启动过程过电压应不超过相关标准、规范等的要求,对于无标准的应不超过运行经验给出的过电压值。负荷恢复量还应进行暂态过程校验,负荷投入后最低频率不应触发低周减载动作。黑启动过程中,投负荷对系统的影响主要体现在电压和频率的短时间大幅度下降,在投入同样负荷量的情况下,系统暂态最低频率较大、最低电压较高的黑启动方案是更优秀的。同理,在最低频率相同的情况下,投入负荷量更大的黑启动方案更优秀。启动过程过电压风险最小、稳定风险最小、启动负荷最多的方案则被认为是最优黑启动方案。电磁暂态和机电暂态校验中参考的具体判据<sup>[9-10]</sup>如下:

1) 潮流合理性判据:黑启动方案初始正常潮流计算结果应符合:电厂母线电压在0.95~1.05 p.u.范围内,并且机组的有功、无功在正常范围内;黑启动初期暂不考虑N-1安全;无功功率分布符合分层、分区平衡的原则。

2) 暂态稳定判据:黑启动子系统在并列前,大扰动后引起该子系统各机组之间功角相对增大,经过第一、第二摇摆不失步;大扰动主要考虑线路N-1和N-2故障以及机组无故障甩负荷。

3) 操作过电压判据:对于长度小于100 km的线路,无需做操作过电压校核,根据工程经验,认为其操作过电压不超标。220 kV及500 kV系统操作过电压采用以下判据:①500 kV线路2%统计操作过电压(相电压峰值)不超过2.0 p.u. (1.0 p.u. =

550 × √2 / √3 kV); ②220 kV 线路 2% 统计操作过电压(相电压峰值)不宜超过 3.0 p. u. (1.0 p. u. = 252 × √2 / √3 kV)。

4) 工频过电压判据: 500 kV 系统工频过电压水平合格的判据为线路断路器的变电站侧的工频过电压不超过 1.30 p. u. 线路断路器的线路侧的工频过电压不超过 1.40 p. u. (1.0 p. u. = 550 / √3 kV); 220 kV 系统工频过电压水平合格的判据为工频过电压不超过 1.30 p. u. (1.0 p. u. = 252 / √3 kV)。

5) 自励磁判据: 当发电机带空载长线时, 不发生自励磁的理论判据如式(1)。

$$W_N > Q_c \times X_d \quad (1)$$

式中:  $W_N$  为发电机额定容量, MVA;  $Q_c$  为考虑高抗或低抗补偿后的线路剩余充电功率, Mvar;  $X_d$  为发电机等值同步电抗(包括升压变漏抗, 以发电机容量为基准的标么值)。自励磁校核时首先采用理论判据进行初步风险排查, 对于明显无自励磁风险的方式不再进行电磁暂态仿真分析, 对于可能存在自励磁风险的方式应进行电磁暂态仿真校核, 参考工频过电压判据。

6) 谐波过电压判据: 谐波过电压计算, 变压器均考虑饱和特性, 励磁特性曲线的拐点取 1.1 p. u., 变压器最大剩磁按照 40% 考虑。对谐波过电压参考标准取值见表 1、表 2, 最高过电压不宜超过表中最大值。

表 1 谐波过电压参考标准 1

电压等级 /kV	系统最高运行电压 /kV	相电压峰值基准 /kV	1.3 倍相电压峰值 /kV
110	126	102.9	133.7
220	252	205.7	267.5
500	550	449	583.7

表 2 谐波过电压参考标准 2

电压等级 /kV	系统最高运行电压 /kV	相间电压峰值基准 /kV	倍相间电压峰值 /kV
35	40.5	57.27	99.19

### 2.5 黑启动方案管理

该模块主要包括以下两个功能:

#### 1) 黑启动方案校验结果查询与分析

黑启动方案生成之后存入“原始方案库”, 黑启动方案校验之后存入“已校验方案库”, 所有黑启动方案均按文件夹存放, 一个方案一个文件夹。用户

在查询和管理黑启动方案时, 可能需要对方案进行适当的编辑和修改, 故开发了可视化的电网数据编辑器, 通过对电网数据进行实时解析, 实现电网数据的可视化编辑。当用户要编辑某数据卡时, 程序会自动解析该行数据给予用户提示, 方便用户对方案进行编辑。

#### 2) 黑启动方案对比和排序。

黑启动过程中, 投负荷对系统的影响主要体现在电压和频率的短时间大幅度下降, 故软件统计了每个方案在投入一定量负荷后系统的暂态最低频率和最低电压。以此可以评价多个方案的优劣, 并对方案进行排序。

## 3 四川电网的应用

开发的电网大停电后恢复方案制定及决策支持系统部分界面如图 5 和图 6 所示。

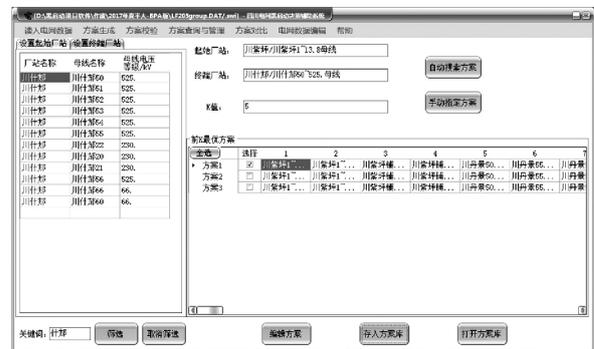


图 5 系统应用界面



图 6 过电压校核界面

利用开发的决策支持系统, 制定了四川电网 11 个子系统启动方案并进行了风险校核, 在此基础上进行了子系统间并列操作风险校核。最终形成了四川电网大停电后恢复方案, 给出了典型水电机组作为黑启动电源在启动初期的负荷冲击量参考值、黑

表 3 机组参数和负荷冲击量参考值

电厂	类型	容量/MW	$T_j/s$	$T_w/s$	调速器			负荷冲击/MW	间隔时间/s
					$K_p$	$K_i$	$K_d$		
1	混流式	200	7.65	2	1.5	0.15	0.5	7.5	40
2	混流式	129	7	2.5	1.5	0.15	0.5	6	40
3	混流式	88.89	6	1.5	1.5	0.15	0.5	4	40
4	冲击式	133.3	7.95	0.01	1.5	0.15	0.5	6	40
5	轴流转桨式	176.5	5.88	2.5	1.5	0.15	0.5	7	40

启动初期建议的恢复策略:

1) 黑启动初期负荷单次冲击量大小以及负荷投入时间间隔可参考表 3 进行,表中  $T_j$  为机组惯性时间常数,  $T_w$  为水锤时间常数,调速器参数为控制器 PID 参数。

2) 在水电通道上的子系统与其他子系统并列时,常常会出现过电压问题,应注意在并列点两侧合理投切低压电抗器以抑制电压偏高。

3) 由于风电厂和光伏电厂对调频调压无贡献,反而会恶化黑启动初期电网的稳定性。在子网与外部电网并列前,建议禁止风电、光伏电厂并网,待子网与外部电网并列后,才可以并网。

4) 黑启动初期,为防止空充主变压器对启动电源造成破坏,启动电源宜带下一级变电站主变压器零起升压,该变电站带上一定负荷后再考虑后续变电站空充主变压器。

## 4 结 论

前面研究了黑启动初期负荷恢复的策略,探索体现负荷恢复数量和恢复速度的实用方法,并进一步研究了黑启动操作过程中的暂态稳定、过电压等电磁暂态问题的自动校核技术。在此基础上开发了一套电网大停电后恢复方案制定及决策支持实用化系统。利用开发的决策支持系统,制定了四川电网 11 个子系统启动方案并进行了风险校核及子系统间并列操作风险校核。最终形成了四川电网大停电后恢复方案,给出了典型水电机组作为黑启动电源

(上接第 77 页)

- [13] 盛四清,王浩. 用于配电网规划的改进遗传算法[J]. 电网技术 2008, 32(17): 69-72.
- [14] 张思. 考虑短路电流的输电网优化规划[D]. 杭州: 浙江大学 2012.
- [15] 张勇,王云辉,沈建涛,等. 输电网短路电流计算[J]. 电网技术 2007( S1 ): 39-42.

在启动初期的负荷冲击量参考值、黑启动初期建议的恢复策略。

### 参考文献

- [1] 王洪涛,刘玉田,邱夕照. 基于分层案例推理的黑启动决策支持系统[J]. 电力系统自动化 2004, 28(11): 49-52.
- [2] 苏德生,顾雪平,赵书强,等. 河北南网黑启动决策支持系统的研究开发[J]. 电力系统自动化 2004, 28(12): 45-50.
- [3] 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.
- [4] 马燕峰,赵书强,顾雪平,等. 黑启动过程中操作过电压的仿真计算[J]. 高电压技术 2006, 32(11): 123-126.
- [5] 魏巍,向天堂,丁理杰,等. 励磁涌流引发的谐波过电压机理分析及抑制措施研究[J]. 电测与仪表 2016, 53(24): 24-31.
- [6] 罗彬,李刚,程春田,等. 基于 PSD-BPA 的省地一体化电力系统设备参数管理策略[J]. 电力系统自动化 2015, 39(6): 114-119.
- [7] 汤涌,卜广全,印永华,等. PSD-BPA 潮流程序用户手册[S]. 北京:中国电力科学研究院 2008.
- [8] 汤涌,卜广全,印永华,等. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[S]. 北京:中国电力科学研究院 2008.
- [9] DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [10] Q/GDW 1404-2015 国家电网安全稳定计算技术规范[S].

作者简介:

史华勃(1987),硕士、工程师,主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期:2017-11-02)

作者简介:

陈伟(1974),工程师,主要研究方向为变电运维检修、配网自动化;

刘莹(1985),工程师,主要研究方向为电网规划设计、电力系统分析与稳定;

刘晓宇(1986),工程师,主要研究方向为电网规划设计、电力系统分析与稳定。

(收稿日期:2017-09-18)