

电力系统黑启动初始方案的自动形成

林济铿¹, 蒋越梅², 郑卫洪³, 王海林³, 时燕新⁴, 顾 强⁴

(1. 天津大学电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津市 300072; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 100085;
3. 天津电力公司调度局, 天津市 200471; 4. 天津电力公司技术中心, 天津市 200561)

摘要: 制定有效的黑启动方案时首先需要一组黑启动初始方案。文中提出了采用基于规则的深度优先搜索技术形成黑启动初始方案的新方法。该方法结合黑启动过程的要求及特点, 首先总结出若干有效的规则, 利用图形建模系统形成网络的拓扑关系, 并结合这些规则采用基于深度优先搜索技术进行黑启动路径的搜索, 从而搜索出更精简的初始方案。实际算例表明, 该算法是有效的。

关键词: 黑启动; 规则; 深度优先搜索策略; 电力系统

中图分类号: TM76

0 引言

近年来发生的多起影响面广、停电时间长的大事故给各国经济带来了巨大损失^[1-4], 使黑启动问题因具有重大的理论和实际意义而备受重视^[5-10]。

现代的电力系统结构复杂, 各种各样的元件众多, 如何从这些关系复杂且数量众多的元件中自动形成基本可行的初始黑启动方案组, 以便于下一步挑选出最佳的方案, 是一项很有意义的工作。本文研究的就是这组黑启动初始方案的自动形成。

黑启动初始方案自动形成的研究, 因其涉及元件及部门众多, 且其关系复杂, 在文献中还不多见, 尚处于开始阶段。通常的做法是由调度部门根据经验提出若干初始方案; 显然所提出的方案个数是有限的, 很可能遗漏了一些更为有效的方案。另一种方法是文献^[11-12]提出的采用拓扑分析和搜索技术, 按一定的搜索策略(例如广度优先或深度优先搜索策略), 生成在拓扑关系上可行的黑启动路径组。这样的结果是搜索出来的黑启动方案较多, 在下一步的方案校验中要对众多的初始方案进行各项技术校验, 耗费时间较长; 且有些初始方案可能经过的厂站个数很多, 并经过多次电压转换, 路径较长, 是明显较差的方案, 完全没有必要参与校验计算。

为了使搜索出的方案更加精简有效, 本文根据黑启动方案需满足的基本原则, 制定了相应的黑启动方案规则, 结合这些规则, 提出了一个使初始方案组更为有效和简约的基于深度优先的搜索策略。

1 制定黑启动方案的一般原则

制定黑启动方案首先要确定黑启动电源。黑启

动电源一般是指具有自启动能力的发电机组。通常包括 3 类: ①本身具有黑启动能力的机组; ②事故后残存的机组或孤岛; ③相邻系统的支援。

通常列入恢复计划的只有第 1 类电源, 本文也主要考虑第 1 类黑启动电源。

根据黑启动方案导则, 在制定黑启动方案时需考虑的总原则为: ①启动路径中电压转换的次数要尽量少; ②每个黑启动方案中黑启动电源(系统侧母线)与被启动电厂(系统侧母线之间)经过的变电站个数不能太多, 一般不应超过 3 个~5 个; ③每个方案的路径长度要尽量短; ④尽量先启动距离重要负荷近的机组; ⑤每个方案的启动时间要尽量短; ⑥每个方案中在启动容量允许的前提下选择的被启动机组的容量要尽量大; ⑦考虑每个方案中各种校验指标的优劣。

2 图形建模简介

本文采用文献^[13-14]所建立的方便实用的图形建模系统。在此系统中, 将电力元件定义为图形和端口的集合, 其中以不同的图形表示元件的不同类型, 以端口建立元件之间的连接。在进行图形建模时, 拓扑关系就自动生成并作为连接属性存放在元件中, 不必另外生成数据表或矩阵, 具体建模过程见文献^[13-14]。建立好元件的基本部件——图形类和元件类之后, 根据具体情况再扩充一些必要的属性, 就可以组合起来形成各种类型的电力元件。基于规则进行黑启动初始方案搜索时, 就有赖于对这些属性的判断分析。为了便于黑启动方案的搜索, 需对设备的属性进行一定的扩充, 主要包括:

1) 图形连接的集合 $Links[i]$ (系统自带属性): 从该属性可以得到某个连接所在的本元件的连接端

口 Port,以及该连接连到的另一元件 LinkUnit 及其端口 LinkPort。

2)NName:元件名称,是各个元件的实际名称,如滨海电厂、葛沽等。

3)Ntype:元件类型,是各个元件的实际表示类型,虽然图形的不同已经定义了不同的元件类型,但是,例如母线既表示电厂,也表示变电站,为了更好地区分,所以添加这个属性来表示各个元件的实际表示类型,如电厂、变电站、变压器、输电线路。

4)Gtype:机组类型,如水电机组、燃气轮机组、燃煤火电机组;只有当 Ntype 为电厂的元件时才有这个属性,黑启动电源由这个属性可以确定。

5)Gcapacity:机组容量,是电厂中被启动机组的容量;只有 Ntype 为电厂的元件才有这个属性。

6)LineLength:线路长度,是输电线路的长度;只有 Ntype 为输电线路的元件才有这个属性。

3 黑启动路径规则的总结

本文在上述图形建模系统所建立的图形系统上,基于深度优先搜索策略搜索出符合要求的黑启动初始方案。深度优先搜索策略是一种盲目的搜索,会把在拓扑关系上可行的所有黑启动方案搜索出来,这样,初始黑启动方案会比较多,给后续的方案校验带来很大的负担,因为要对所有初始方案进行自励磁、过电压(包括工频过电压和操作过电压)、稳定性分析(主要是小扰动稳定性分析)等各项技术校验。为了使所搜索出的路径更有效,去除无效的路径,可以在搜索时制定一些相应的规则,把一些明显较差的方案去掉,而搜索出相对较好的方案,以便进一步进行方案校验和方案评估。根据黑启动方案制定原则,结合搜索策略,可以总结出如下规则:

1)路径所经过的电压转换次数不超过一定次数。电压转换次数的增加直接影响黑启动初始阶段空充线路是否会造成电压越限,还会增加电压损耗和增加三相不同期合闸的概率,亦即直接关系到黑启动能否成功。所以,在搜索时限定电压转换次数,对于那些经过电压转换次数太多路径的就不予选择。对于后文所研究的系统,设电压转换次数不超过 3 次;至于其他系统,可根据实际情况决定。

2)搜索时优先选择不经过电压转换的路径。按深度优先搜索时,若某个节点有几个子节点,选择不经过电压转换的节点得以优先扩展,即优先考虑沿不经过电压转换的支路往下搜索。

3)路径所经过的厂站个数不超过一定个数。变电站次数的增多会增加系统恢复时刀闸和断路器的操作次数,将会对系统造成不利的影响,如增加操作

过电压产生的可能性、延长黑启动时间等。而且,限制了厂站个数,实际上也设定了深度界限,使深度优先搜索不会无限制地搜索下去。对于后文所研究的系统,设路径所经过的厂站个数不超过 7 个;至于其他系统,可根据实际情况决定。

4)路径最短原则。如从黑启动电源到被启动电厂有 2 条或以上路径时,选择长度最短的路径。

5)被启动机组容量不能超过允许值。若被启动机组容量超过允许值,将不能被启动。沿黑启动路径启动时,要带上被启动电厂的厂用负荷,所以被启动电厂的厂用负荷不能超过黑启动电源机组容量。

结合上述规则指导路径的选择,相当于对所搜索出来的方案都经过了初步筛选,从而有利于进一步进行方案校验和评估。

4 基于规则的深度优先搜索策略

4.1 算法原理

对于第 2 节所建立的图形系统,搜索过程有关的定义说明如下:

- 1)当前节点:搜索过程中正在遍历的节点;
- 2)当前节点的子节点:由元件的拓扑连接关系,与当前节点直接相连的所有其他节点;
- 3)未遍历节点:没有遍历过的节点;
- 4)路径节点表:存放黑启动路径所经过的节点;
- 5)未遍历节点表:存放未遍历过的节点;
- 6)变压器节点:表示元件类型为变压器的节点。

搜索过程分前进和回溯 2 个过程,前进以深度优先原则顺序搜索,回溯则逆向搜索。在前进过程中,需统计经过的厂站个数、电压转换次数(经过的变压器个数)、路径长度和需确定沿哪条支路搜索,尽量先不往需经过电压转换(即经过变压器)的支路。当遇到下面几种情况时,就开始回溯:①前进至某支路的终端,已不能往下搜索;②发现形成了环路;③经过的厂站个数达到限定值,规则 3 限制了黑启动路径经过的厂站个数,对厂站个数太多的路径不予考虑,所以当经过厂站个数达到限定值时,就不再往下搜索;④电压转换次数达到限定值时,规则 1 限制了黑启动路径经过电压转换的次数,对电压转换次数太多的路径不予考虑,所以当电压转换次数达到限定值时,就不再往下搜索。回溯时,要减去回溯经过的厂站个数、电压转换次数、路径长度。

4.2 搜索过程

基于规则的深度优先搜索策略进行黑启动路径搜索的具体过程如下:

步骤 1:初始化。建立一个空栈,用来存放未遍历节点;建立一个空表,用来存放当前路径节点;经

过厂站个数计数为 0, 电压转换次数计数为 0, 实际经过厂站个数为 0, 路径长度为 0。

步骤 2: 根据黑启动电源选择的要求, 首先搜索出黑启动电源, 并把黑启动电源节点存放到当前路径节点表中, 经过厂站个数计数为 1。

步骤 3: 把当前路径节点表中最后一个节点作为当前节点。

步骤 4: 把当前节点的标识为未遍历的所有子节点堆入未遍历节点栈中。入栈时, 若有变压器节点, 先压入变压器节点, 再入栈其他节点, 这样, 不经过电压转换的节点就可以优先遍历。

步骤 5: 把未遍历节点栈中第 1 个节点移入当前路径节点表表尾。判断当前路径节点表中是否已有与当前节点相同的节点, 若有, 则形成环, 把当前节点从当前路径表中去掉, 并把当前节点的父节点作为当前节点, 进行回溯操作, 转步骤 11; 若无, 转步骤 6。

步骤 6: 对当前节点进行分析判断, 根据节点类型不同进行以下操作:

1) 当前节点是电厂, 经过厂站个数计数加 1, 若该电厂元件机组容量不超过允许值, 则当前路径节点表中所有节点按顺序连成的通路就是一条黑启动路径, 当前节点即为当前路径的被启动电厂。判断已搜索出的(保存的)路径中是否有把当前节点也作为被启动电厂的路径, 如无, 保存当前这条路径; 若有, 比较 2 条路径长度, 若当前路径比保存的路径短, 则用当前路径替换已保存路径, 否则, 不保存当前路径。

2) 若当前节点是变电站, 则厂站个数计数加 1。

3) 若当前节点是输电线路, 则把该段线路长度加到路径长度。

4) 若当前节点是变压器, 则电压转换次数计数加 1。

步骤 7: 计算实际经过的厂站个数, 其值为厂站个数减去电压转换次数。原因是变压器前后 2 个元件(母线)实际是同属于一个变电站, 而经过厂站个数计数时按不同变电站计数了, 所以要减去。

步骤 8: 判断实际经过厂站个数是否超过限定值, 若是, 如果未遍历节点栈不为空, 则需回溯, 转步骤 11; 否则转步骤 9。

步骤 9: 判断电压转换次数是否超过限定值, 若是, 如果未遍历节点栈不为空, 则需回溯, 转步骤 11; 否则转步骤 10。

步骤 10: 判断当前节点是否有标识为未遍历的子节点, 若有, 转步骤 4; 若无标识为未遍历的子节点, 且未遍历节点栈不为空, 则回溯, 转步骤 11; 若

无标识为未遍历的子节点, 且未遍历节点栈为空, 搜索结束。

步骤 11: 判断未遍历节点栈是否为空, 若是, 退出, 搜索结束; 否则, 转步骤 12。

步骤 12: 回溯过程:

1) 判断当前节点与未遍历节点栈中第 1 个节点是否相同, 若不同, 转过程 2; 若相同, 则对当前路径表中最后 2 个节点类型分别进行判断, 根据类型减去相应的线路长度、厂站个数或变压器个数, 把当前路径表中最后 2 个节点删去, 并把它们标识为已遍历, 转过程 2。

2) 判断当前节点是否与未遍历节点栈中第 1 个节点有连接关系, 若是, 则回溯结束, 转步骤 5; 否则转过程 3。

3) 对当前节点进行分析判断, 根据节点类型不同进行以下相应操作: ①若当前节点是电厂, 则经过的厂站个数计数减 1, 转过程 4; ②若当前节点是变电站, 则厂站个数计数减 1, 转过程 4; ③若当前节点是输电线路, 则把路径长度减去该段线路长度, 转过程 4; ④若当前节点是变压器, 则电压转换次数计数减 1, 转过程 4。

4) 删去当前路径节点表中最后一个节点, 并把它标识为已遍历, 转过程 2。

上述过程的流程图见附录 A。

5 算例分析

具体的算例过程比较繁琐, 见附录 B。附录 B 中的 8 条路径就是搜索出来的黑启动初始路径。把这些初始路径进行方案校核, 通过校核的方案需进一步结合调度部门的运行实际情况进行综合评估, 就可以选出最有效和可行的黑启动路径。

从附录 B 的算例分析及搜索过程可看出, 若没有第 3 节提出的规则限制, 整个搜索过程会很复杂, 搜索出的初始方案也会增加很多。而在本文规则的指导下, 相当于对初始路径的选择进行了优选, 选出的是从黑启动电源到某被启动电厂相对较为可行的路径, 去除了一部分相对不好的路径, 使搜索出的路径更精简有效, 也节省了大量的人力和时间。

6 结语

本文提出了一种实现黑启动初始方案自动形成的方法。该方法结合黑启动过程的要求及特点, 首先总结出若干有效的规则; 利用图形建模系统所形成的网络元件拓扑关系, 结合所总结的黑启动路径规则, 采用基于深度优先搜索技术进行有效的黑启动路径的搜索, 从而搜索出更为精简的初始方案, 以

便于下一步进行黑启动方案的校验和评估。实际算例表明,该算法是有效的。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 印永华,郭健波,赵建军,等.美加“8·14”大停电事故初步分析及应吸取的教训.电网技术,2003,27(10):8-11.
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnect north America power grid. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [2] 赵希正.强化电网安全 保障可靠供电——美加“8·14”停电事故给我们的启示.电网技术,2004,28(9):1-6.
ZHAO Xizheng. Strengthen power system security to ensure reliable delivery. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [3] 甘德强,胡江溢,韩祯祥.2003年国际若干停电事故思考.电力系统自动化,2004,28(3):1-4,9.
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang. After the 2003 blackouts across several continentals. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-4, 9.
- [4] 唐斯庆,张弥,李建设,等.海南电网“9·26”大停电事故的分析与总结.电力系统自动化,2006,30(1):1-7,16.
TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on September 26—causes and recommendations. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7, 16.
- [5] DELFINO B, DENEGRI G B, INVERNIZZI M, et al. Black-start and restoration of a part of the Italian HV network modelling and simulation of a field test. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1371-1379.
- [6] SHULTZ R D. Blackstart utilization of remote combustion turbines. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(8): 2188-2191.
- [7] LINDSTORM R R. Simulation and field tests of the black start of a large coal-fired generating station utilizing small remote hydro generation. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 162-168.
- [8] 郭嘉阳,吴涛,张仁伟,等.华北电网“黑启动”试验研究.华北电力技术,2001(5):3-18.
GUO Jiayang, WU Tao, ZHANG Renwei, et al. Test and
- research of black start in north China power network. North China Electric Power, 2001(5): 3-18.
- [9] 房鑫炎,郁惟镛,熊惠敏,等.电力系统黑启动的研究.中国电力,2000,33(1):40-43.
FANG Xinyan, YU Weiyong, XIONG Huimin, et al. Study on power system black start. Electric Power, 2000, 33(1): 40-43.
- [10] 张其明,王万军.陕西电网黑启动方案研究.电网技术,2002,26(4):42-46.
ZHANG Qiming, WANG Wanjun. A study on black-start schemes for Shanxi power network. Power System Technology, 2002, 26(4): 42-46.
- [11] 高远望,顾雪平,刘艳,等.电力系统黑启动方案的自动生成和评估.电力系统自动化,2004,28(13):50-54.
GAO Yuanwang, GU Xueping, LIU Yan, et al. Automatic derivation and assessment of power system black-start schemes. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 50-54.
- [12] 顾雪平,赵书强,刘艳,等.一个实用的电力系统黑启动决策支持系统.电网技术,2004,28(9):54-57.
GU Xueping, ZHAO Shuqiang, LIU Yan, et al. A practical decision support system for power system black start. Power System Technology, 2004, 28(9): 54-57.
- [13] 林济铿,覃岭,罗萍萍.基于 Visual Graph 的电力图形系统开发.电力系统自动化,2005,29(15):73-76.
LIN Jikeng, QIN Ling, LUO Pingping. Graphic system development of power system based on the visual graph. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 73-76.
- [14] 林济铿,覃岭,罗萍萍.基于图形建模的电力系统拓扑分析新方法.电力系统自动化,2005,29(22):54-59.
LIN Jikeng, QIN Ling, LUO Pingping. A new method for power system topology analysis based on graphic modeling. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 54-59.

林济铿(1967—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统稳定性分析及控制、电力市场、人工智能在电力系统中的应用。E-mail: mejiklin@126.com

蒋越梅(1982—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统黑启动。

郑卫洪(1969—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统运行及管理。

Automatic Establishment of the Initial Black Start Schemes for Power Systems

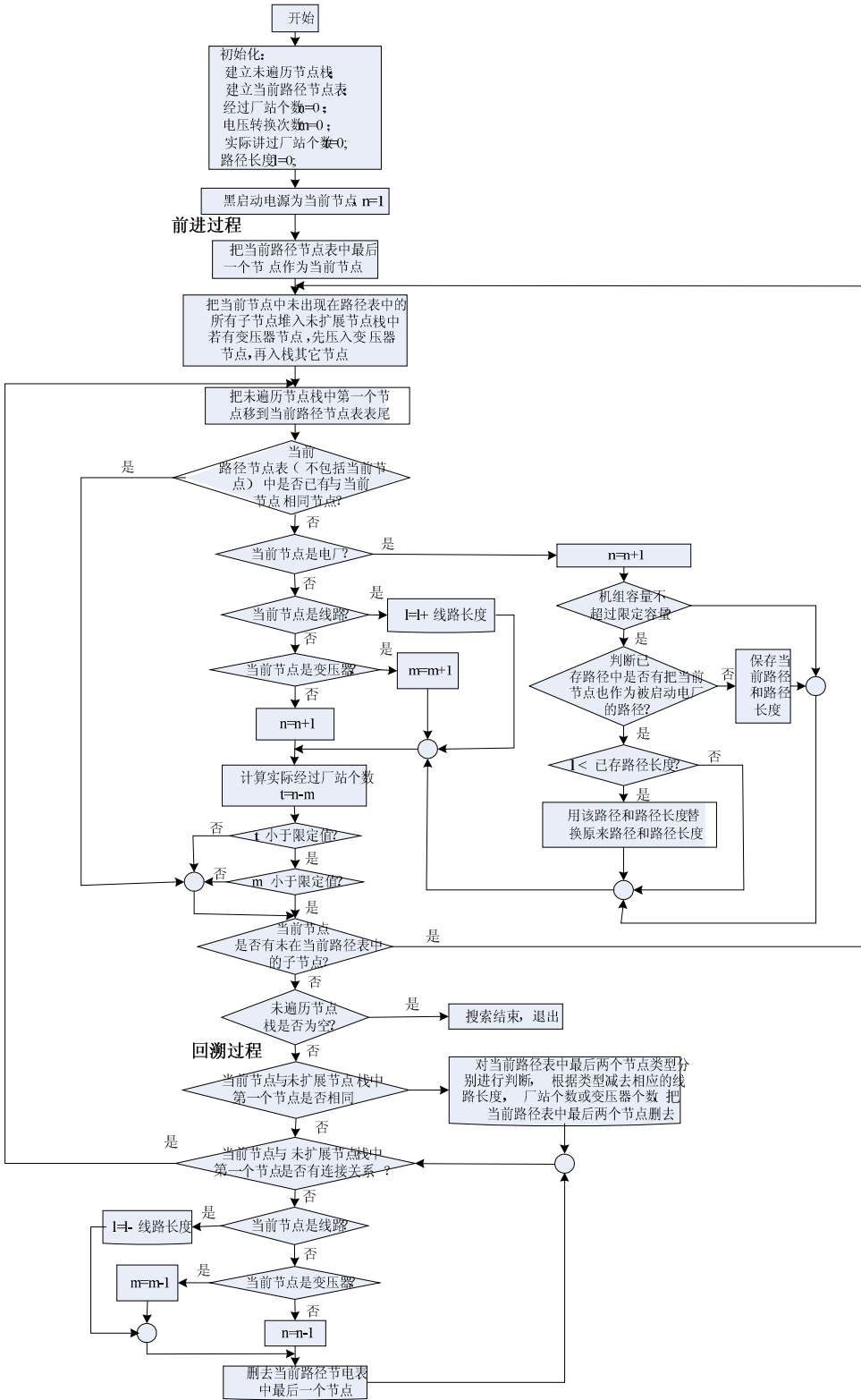
LIN Jikeng¹, JIANG Yuemei², ZHENG Weihong³, WANG Hailin³, SHI Yanxin⁴, GU Qiang⁴

(1. Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Electrical Power Research Institute of China, Beijing 100085, China; 3. Tianjin Electric Company, Tianjin 200471, China; 4. Tianjin Electric Company, Tianjin 200561, China)

Abstract: In order to work out effective black start schemes, the initial schemes should be provided during the establishment of black start. The depth first search strategy (DFS) integrated with rules is proposed to automatically form the black-start initial schemes. First, a number of effective rules are summarized according to the requirements and characteristics of the process of black start; then, by the topology connection of the power network built by the visual graph system, more concise initial schemes are found by the DFS with the help of the rules. An example shows that the proposed method for the automatic generation of black start schemes is effective and feasible.

Key words: black start; rule; the depth first search strategy (DFS); power system

附录 A 搜索过程流程图



图A1 基于规则的深度优先搜索流程图

Fig.A1 Flow chart of the depth first search algorithm based on the rule

附录B 算例分析

图 B1 为北方某城市电网的结构图。

首先，确定黑启动电源。对图 B1 进行搜索，只有滨海电厂的机组类型是燃气轮机，经改造之后具有自启动能力；而其他电厂，均不具备自启动能力。因此，把滨海电厂作为黑启动电源。

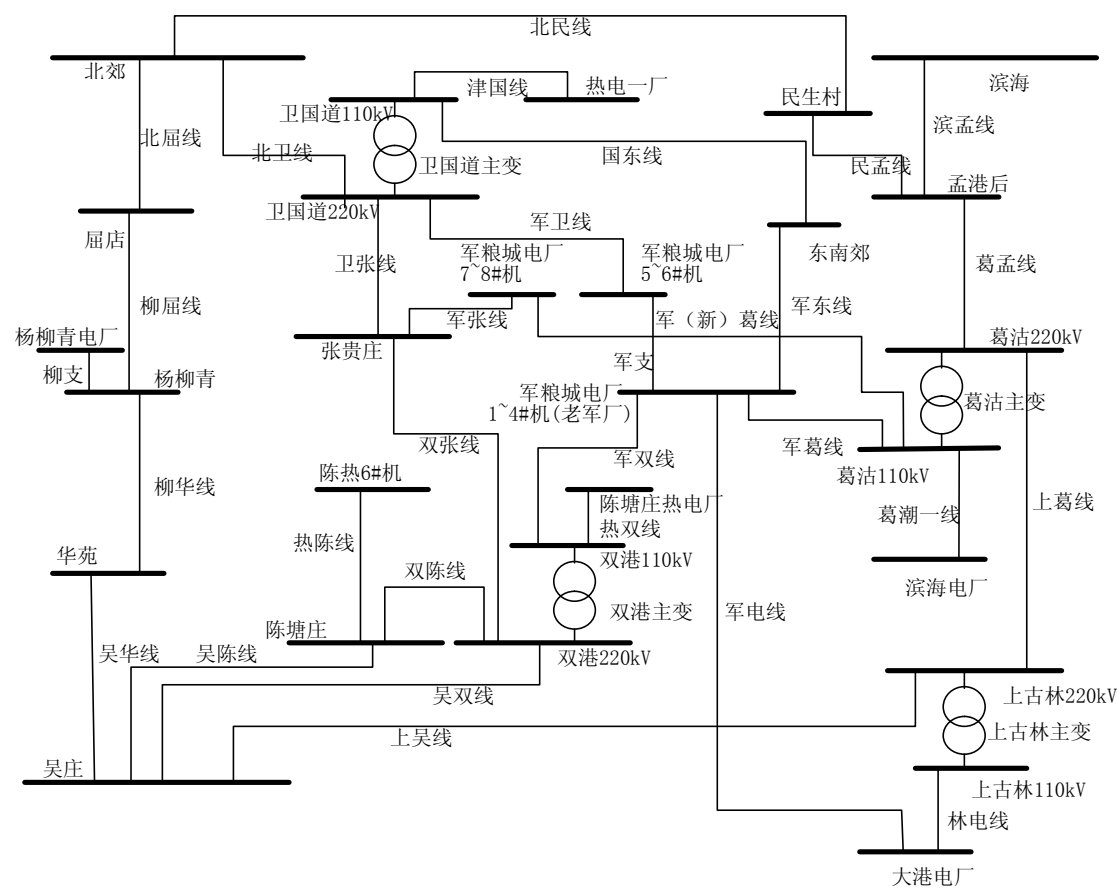


图 B1 北方某城市电网
Fig. B1 Configuration of some urban electricity power system in northern China

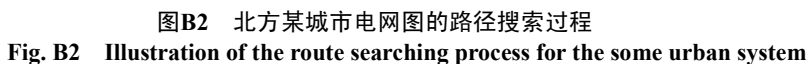
然后，从滨海电厂出发，采用基于规则的深度优先的搜索策略形成黑启动初始方案。

其搜索过程如图 B2 所示。由于整个搜索过程比较复杂和繁琐，图 B2 中就只给出前一部分搜索过程。在图 B2 中，在本文第 3 部分所提出的搜索规则均能得到体现。标记①~⑤处就是对所制定的搜索规则的体现，下面进行进一步说明。

- ①：搜索到的节点是电厂，根据规则 5，要对电厂被启动机组容量进行判断，经判断，军厂的 1~4 号机的厂用负荷是小于滨海电厂出力很多的，因此，完全可以启动起来。
- ②：卫国道 110kV 整个节点有两个子节点：津国线和卫国道主变（变压器节点），按照规则 2，优先选择不经过变压器转换的路径，所以选择津国线这个节点；
- ③：路径经过厂站个数为 7，按照规则 3，不允许继续搜索，需要进行回溯；
- ④和⑤：这两处的被启动电厂是一致的，都是军厂 5,6 号机，按照规则 4 就要对这两条路径的长度进行比较。
- ④ 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——军葛线——军粮城 1~4 号机组（老军厂）——军东线——东南郊——国东线——卫国道 110kV——卫国道主变——卫国道 220kV——军卫线——军粮城 5~6 号机组

⑤ 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——军葛线——军粮城 1~4 号机组——军支——军粮城 5~6 号机组

可知, 路径⑤的长度比路径④的长度短, 用路径⑤替代路径④。



按上述过程，对图 B1 进行搜索，得出了如下路径：

1. 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——军葛线——军粮城 1~4 号机组
2. 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——军葛线——军粮城 1~4 号机组——军双线——双港 110kV——热双线——陈塘庄热电厂
3. 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——军葛线——军粮城 1~4 号机组——军双线——双港 110kV——双港主变——双港 220kV——双陈线——陈塘庄——热陈线——陈热 6 号机
4. 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——军葛线——军粮城 1~4 号机组——军电线——大港电厂
5. 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——军葛线——军粮城 1~4 号机组——军支——军粮城 5~6 号机组
6. 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——军葛线——军粮城 1~4 号机组（老军厂）——军东线——东南郊——国东线——卫国道 110kV——津国线——热电一厂
7. 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——军（新）葛线——军粮城 7~8 号机组
8. 滨海电厂——葛潮一线——葛沽 110kV——葛沽主变——葛沽 220kV——上葛线——上古林 220kV——上吴线——吴庄——吴华线——华苑——柳华线——杨柳青——柳支——杨柳青电厂