

Research on Optimal Path of Black Start Grid Reconfiguration Stage of Nujiang Power Grid

Xiaoxin Liu^{1*}, Bicai Pu¹, Xiang Wang², Biguang Kong¹, Zhijian Liu², Hui Xu²,
Yongfei Yan², Yanhong Wang², Xuhui Wang², Jin Yu², Boqian Zhang²

¹Nujiang Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Corporation of China Southern Power Grid, Nujiang Yunnan

²Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan
Email: *2807511967@qq.com

Received: Nov. 5th, 2018; accepted: Nov. 20th, 2018; published: Nov. 27th, 2018

Abstract

In this paper, Dijkstra algorithm is used to establish the target network for path optimization in the grid reconstruction stage during the black start process of Nujiang Power Grid. The Nujiang Power Grid is divided into four black start subsystems in the Lushui area, the Gongshan area, the Fugong area and the Lanping area, and the target grids are respectively established. Taking the power grid switch station, network hub substation and hydropower station as the nodes in the black start process, the connection line between the switch stations, network hub substations and hydropower stations in each area is taken as the side. Considering the important loads and branch parameters in the black-start process, the weighting values of each edge are given, and finally find the shortest path from the specified starting node to the end point and mark the shortest path. The Dijkstra algorithm is used to find the optimal path for the black start network reconstruction and reduce the black start time. The main task of the grid reconstruction phase is to send power to the power plant and establish a stable grid structure, and restore the load for the next stage. It is important to lay a solid foundation for the whole process of black start.

Keywords

Black Start, Grid Reconstruction, Optimal Path, Dijkstra Algorithm, Weight

怒江电网黑启动网架重构阶段最优路径研究

刘晓欣^{1*}, 普碧才¹, 王翔², 孔碧光¹, 刘志坚², 徐慧², 晏永飞², 王雁红², 王旭辉²,
余进², 张伯谦²

¹中国南方电网云南电网公司怒江供电局, 云南 怒江

²昆明理工大学, 云南 昆明

Email: *2807511967@qq.com

*通讯作者。

文章引用: 刘晓欣, 普碧才, 王翔, 孔碧光, 刘志坚, 徐慧, 晏永飞, 王雁红, 王旭辉, 余进, 张伯谦. 怒江电网黑启动网架重构阶段最优路径研究[J]. 电气工程, 2018, 6(4): 300-310. DOI: 10.12677/jee.2018.64035

收稿日期：2018年11月5日；录用日期：2018年11月20日；发布日期：2018年11月27日

摘要

本文采用Dijkstra算法对怒江电网黑启动过程中的网架重构阶段进行路径寻优建立目标网架。将怒江电网划分为泸水区域、贡山区域、福贡区域、兰坪区域共4个黑启动子系统，分别建立目标网架。以黑启动过程中各地区电网开关站、网络枢纽变电站以及水电站为节点，以各地区开关站、网络枢纽变电站以及水电站间连接线路为边，综合考虑黑启动过程中重要负荷，支路参数等情况，给每一条边赋权值，最后求出指定起始节点到终点的最短路径并标示出该最短路径。通过Dijkstra算法为黑启动网络重构寻找最优路径，减少黑启动时间，网架重构阶段的主要任务是给失电厂站送电并建立一个稳定的网架结构，为下一阶段全面恢复负荷打下坚实基础对黑启动整个过程具有重要意义。

关键词

黑启动，网架重构，最优路径，Dijkstra算法，权值

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来不断发生的大停电事故表明，大停电是现代电力系统必须面对的严重威胁。随着电力系统规模的同益扩大及社会对电力供应依赖度的不断提高，大停电事故造成的后果也越来越严重。因此，研究并制定电网的“黑启动”方案可以有效加快电网发生大面积停电或全停电事故后的恢复速度，最大限度地减少停电所造成的损失，对国民经济和电网运行都具有十分重要的意义。

近年来怒江电网中小电站迅速投产发电，并网的电站数目较大，致使怒江电网的稳定经受前所未有的考验。同时，怒江州行政区发电量和用电量都在快速增长，但是网架建设相对较为滞后。汛期大量电力外送，枯期部分地区又需吸纳外部电力。在“十三五”期间及以后很长一段时间，怒江配电网的电源与网架相矛盾的问题仍将存在，甚至更加凸显，严重故障条件下，怒江配电网运行稳定问题风险较大，电网安全形式依然严峻。

根据怒江电网的水电分布情况，将怒江电网划分为泸水区域、贡山区域、福贡区域、兰坪区域共4个黑启动子系统。这4个子系统具有独立的子系统，由于兰坪区域具有自启动能力的电源容量较小，电压不稳定，需要接入系统外电源—大理电网。四个地区可以并行展开黑启动恢复操作，以显著提升电网恢复速度。本文主要研究的是怒江电网的网架重构阶段，采用Dijkstra算法进行路径寻优。

2. 网架重构

网络重构阶段，是在初期黑启动成功实施的基础上，通过对发电厂、重要负荷、网络枢纽变电站和关键线路的尽快恢复，迅速实现整个电网的主干网架的恢复过程。网架重构阶段一般划分为两个阶段：首先是确定最优目标网架；然后是确定到最优网架的具体恢复序列[1]。当确定了最优或较优的目标网架后，若路径的恢复顺序不同，控制操作的难度和实际重构效果也将有很大差异。网架重构阶段是其中承

上启下的阶段，在此阶段需要充分利用恢复初期已经恢复的发电容量，尽快给失电厂站送电并建立一个稳定的网架，为系统的全面恢复奠定基础[2]。

为了加快系统的恢复速度，在有了黑启动电源后应根据电网的结构特点将其划分为几个子系统，独立地进行初步的电力恢复，然后在某一阶段通过调度联系，进行子系统的并列与合环；针对各个子系统黑启动的具体情况，进行黑启动路径的选择。国外对电力系统恢复的策略大体上可以划分为两种：第一，串行恢复。第二，并行恢复。系统完全瓦解或没有任何外部互联援助时，常常采用并行恢复[3] [4]。

2.1. 恢复路径的选择

合理的恢复路径应使自启动机组充分利用启动功率，迅速、安全地启动其他具有临界时间限制的重要机组，并能在后续的恢复中有利于网络的拓展，为机组及重要负荷的恢复提供便利。恢复路径应考虑的主要因素包括[5] [6]：

- 1) 恢复路径中电压转换的次数要尽量少。由于启动电源和待恢复目标在网络中的具体位置的不同，恢复路径往往会涉及到电压等级的多次转换。
- 2) 恢复路径的长度要尽量短。
- 3) 恢复路径经过节点的拓扑重要性尽可能高。节点的重要度描述了节点在网络拓扑结构中的位置和作用。
- 4) 恢复路径上的被启动电源或负荷的优先级应尽可能高。使恢复路径首先辐射到系统中重要性等级较高的机组和负荷，以有利于这些机组与负荷的快速恢复。
- 5) 恢复路径一次设备的操作次数应尽量减少。
- 6) 恢复路径应具备技术可行性。在黑启动初期，技术可行性主要通过数值仿真计算，检验发电机自励磁，线路空载合闸过电压，电压和频率稳定性及小系统低频振荡等项目是否符合运行安全要求。

2.2. 网架重构的数学模型

2.2.1. 目标函数

网架重构阶段以恢复骨干网架供电为目标，为充分利用已并网机组提供的发电量，保证网架重构有效地进行，应恢复部分负荷。根据网络重构阶段负荷恢复的一般原则，应尽可能地恢复更多的重要负荷。构造目标函数如式(1)所示。

$$\max f = \sum_{i=1}^m \alpha x_i L_{imi} + \sum_{j=1}^n \beta x_j L_{gej} \quad (1)$$

式中： L_{im} 、 L_{ge} 分别为重要负荷和一般负荷的功率； x 的取值为 1、0，表示负荷是、否恢复； m 、 n 分别为重要负荷、一般负荷的个数； α 、 β 分别为重要负荷和一般负荷的权重。通过调节 α 、 β 之间的比例关系，在充分利用已并网机组所提供发电量的同时，尽量提高恢复负荷中重要负荷所占的比重。

2.2.2. 约束条件

- 1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^M V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^M V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_i 、 Q_i 分别为有功、无功注入功率； V_i 、 V_j 为节点电压； G_{ij} 、 B_{ij} 分别为电导、电纳； δ_{ij} 为两电压的相角差； $i=1, 2, \dots, n$ ， n 、 N 为节点数。

2) 发电机节点功率约束

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中： P_{Gi}^{\max} 、 P_{Gi}^{\min} 和 Q_{Gi}^{\max} 、 Q_{Gi}^{\min} 分别为发电机有功功率的上、下限和无功功率的上、下限； $i=1,2,\dots,n$ ， n 为发电机的数目。

3) 线路传输功率极限约束

$$P_{Li} \leq P_{Li\max} \quad (4)$$

式中： $P_{Li\max}$ 为线路上流过的功率极值； $i=1, 2, \dots, m$ ， m 为线路数。

除此之外，目标网架还需满足连通性，保证所有恢复节点能通过送电线路的导通建立连接关系。

2.3. 确定路径权值

电力系统网架重构过程较为复杂，并且实际恢复过程存在众多不确定性因素。对于确定的重构目标网架，若电源节点的恢复顺序不同，则重构恢复的难度和效果也会有很大差异。需要找到全局最优的电源节点恢复顺序及与之对应的路径恢复顺序。因此，不仅要针对不同的电源节点恢复顺序寻找局部最优恢复顺序，还要对其恢复总时间、重要负荷的恢复量、机组出力恢复程度等方面作动态、全面比较，这极大地增加了恢复顺序优化的难度，这就需要统筹兼顾处理多个目标的关系，求得更切合实际要求的解。利用目标规划方法建立网架重构路径优化的目标规划模型[7]。

目标规划相对于传统的线性或非线性规划方法在处理实际的决策问题时，考虑不同优化目标之间可能存在的冲突。可以根据对目标的侧重不同，设定它的权重因子。采用目标规划方法对重构路径进行优化，能够根据与不同优化目标相对应的目标值及权重系数来调整优化过程的不同侧重[8]。

3. Dijkstra 算法

Dijkstra (迪杰斯特拉)算法是一种单源最短路径算法，即在图中求出给定顶点到其它任一顶点的最短路径。运算的主要过程是以给定顶点为中心向外搜寻，直到找到所有的最短路径为止[9]。Dijkstra 算法作为代表性的最短路径算法，被广泛介绍在如图论、运筹学、算法导论等各种专业课中。这种算法的限制是不允许图中存在负权边[10]。

3.1. 算法原理

算法思想是设一个带权无向图 $G=(V,E)$ ，图中的顶点集合 V 被分成集合 S 和集合 U ，其中集合 S 为已求出最短路径的顶点集合，每找到一条以源点为开始的最短路径，就把对应最短路径的顶点加入到 S 集合中；集合 U 中包含其他没有找到最短路径的顶点。保证后加入 S 中的顶点对应的最短路径长度总是大于先前加入 S 的顶点所对应的最短路径长度。并且保证源点到集合 S 中任意一点的距离都小于等于到集合 U 中所有点的距离。集合 S 、 U 中包含的顶点都代表一个距离，源点 v 到集合 S 中顶点的距离为最短路径距离，源点 v 到集合 U 中顶点的距离为只以集合 S 中的顶点为中介的最短路径距离[11]。

算法步骤(图 1):

(1) 初始时， S 只包含源点，即 $S = \{v\}$ ， v 到 v 的距离为 0。其他所有顶点都在集合 U 中。在源点与集合 U 中的顶点邻接时距离 $\langle u,v \rangle$ 有正常权值，反之则距离 $\langle u,v \rangle$ 权值为正无穷。

(2) 将集合 U 中的点加入集合 S 中，选取的点 k 必须与源点 v 邻接且保证距离最短。

(3) 对源点 v 到集合 U 中各顶点的距离进行更新，以新加入集合 S 中的点 k 为中介点，重新搜索最

短路径，若经过中介点 k 的最短路径距离相比之前变短，则以该距离取代之前的距离。

(4) 重复步骤(2) (3)，当集合 U 中没有点时，搜索完成。

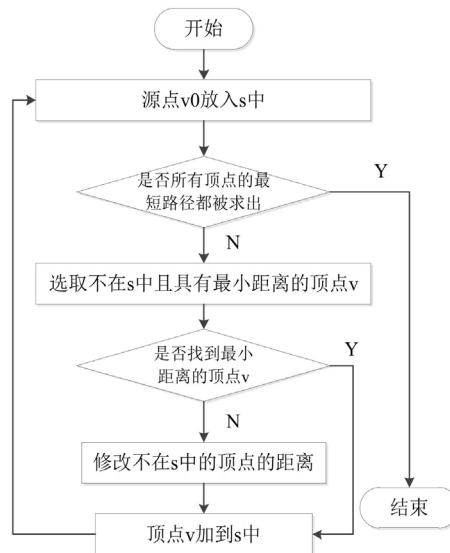


Figure 1. Dijkstra algorithm flow chart
图 1. Dijkstra 算法流程图

3.2. 基于网架结构的 Dijkstra 算法

通过对网架结果进行分析，结合算法求出最优路径。

算法步骤如下(图 2):

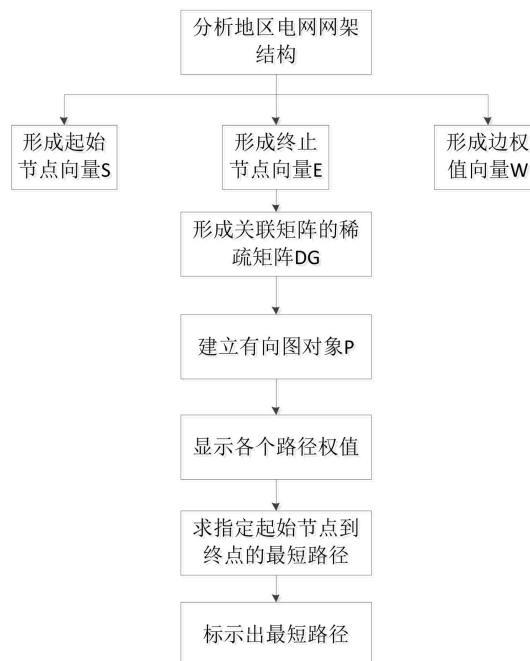


Figure 2. Flow chart of Dijkstra algorithm based on grid structure
图 2. 基于网架结构的 Dijkstra 算法流程图

(1) 以黑启动过程中各地区电网开关站、网络枢纽变电站以及水电站为节点，以各地区开关站、网络枢纽变电站以及水电站间连接线路为边，综合考虑黑启动过程中重要负荷，支路参数等情况，给每一条边赋权值，形成起始节点向量 S 、终止节点向量 E 以及边权值向量 W 。

再给每条边赋权值时综合考虑黑启动过程中重要负荷，支路参数等情况，对于与发电厂、重要负荷、网络枢纽变电站直接相连的关键线路所赋的权值比较小，而对于没有直接与地区电网主干网架相连的线路所赋的权值较大。

(2) 在步骤一分析地区电网形成起始节点向量、终止节点向量以及边权值向量的基础上构建关联稀疏矩阵 DG 。

(3) 建立地区电网有向图对象 P 并显示地区电网各路径权值。

(4) 求地区电网指定起始节点到终点的最短路径，即起始节点到终点的权值最小。求出指定节点间的最短距离、标出最短距离经过的路径节点。

(5) 标示出所指定的起始节点到目标节点的最短路径。

在步骤(1)(2)(3)以及四的基础上对地区电网指定节点到目标节点的最短路径进行标示。

4. 算例分析

按照分层、分区建立目标电网的原则，怒江电网“黑启动”方案主要将 110 kV 电压等级定为“黑启动”目标电网。建立“黑启动”目标电网时，首先按电压等级分解怒江电网为三个电压等级层：220 kV、110 kV 以及 35 kV 及以下等级供电负荷层，各电压等级层的分界点分别为各个 220 kV、110 kV 变电站主变的高压侧断路器。110 kV 层为怒江电网“黑启动”目标电网，是怒江电网“黑启动”组织恢复的主要目标电网；35 kV 以下供电负荷层由怒江配网调度根据负荷恢复方案组织恢复；220 kV 主网层由于 220 kV 线路的充电功率较大，对电网恢复过程中电压运行调整的影响及控制要求较高，在怒江电网“黑启动”方案中待 110 kV 网架基本恢复正常后再进行恢复。

根据怒江电网的水电分布情况，将怒江电网划分为泸水区域、贡山区域、福贡区域、兰坪区域共 4 个黑启动子系统。下面将分别对四个区域的主网架进行路径寻优。以各地区电网开关站、网络枢纽变电站以及水电站为节点，以各地区开关站、网络枢纽变电站以及水电站间连接线路为边，综合考虑黑启动过程中重要负荷，支路参数等情况，给每一条边赋权值，利用 Dijkstra 算法最后求出指定起始节点到终点的最短路径并标示出该最短路径。

4.1. 泸水区域

对怒江电网 110 kV 泸水片区系统进行路径寻优，泸水片区的主要网架结构选择重要的发电站、变电站以及开关站，该案例中指定听命河电站为起始节点，以腊门嘎二级电站为终止节点，通过起始节点到终止节点之间选择权值最小的路径作为黑启动过程中的最优路径。表 1 为泸水区域各条边权值汇总结果。

泸水片区的主要网架结构图如图 3 所示，从听命河电站起始节点到腊门嘎一级电站终止节点一共有两种恢复路径，通过比较两种方案的权值大小确定最优路径，表 2 详细列出了两种方案的恢复路径以及权值大小。其中权值越小，表示路径越优，黑启动恢复过程越快，即综合比较后方案一最优。通过起始节点到终止节点结果显示该最优恢复路径经过的节点分别为泸水片区的听命河电站 - 六库中心变 - 220 kV 崇仁变 - 秤杆开关站 - 腊门嘎一级电站，经过路径的权值大小为 132.464。网络重构阶段最优路径为图 3 红色箭头所示。

4.2. 福贡区域

对怒江电网 110 kV 福贡片区系统进行路径寻优，福贡片区的网架结构属于链式结构。该案例中指定

施底河一级电站为起始节点，以子楞河电站为终止节点，施底河一级电站和子楞河电站为福贡片区重要的电源点，优先恢复可以带动后续的电源快速恢复，从而寻找黑启动过程中的最优路径。表 3 记录了福贡区域各条边权值。

Table 1. Summary of the results of each edge of the Lushui area

表 1. 泸水区域各条边权值结果汇总

序号	起始节点名称	起始节点名称	权值
1	听命河电站	六库中心变	24.862
2	老窝河四级电站	六库中心变	6.583
3	六库中心变	220 kV 崇仁变	27.718
4	220 kV 崇仁变	宏盛锦盟总降变	0.749
5	220 kV 崇仁变	金岭变	1.654
6	金岭变	秤杆开关站	70.534
7	六库中心变	古登开关站	63.97
8	六库中心变	片马变	35.396
9	220 kV 崇仁变	秤杆开关站	71.824
10	秤杆开关站	腊门嘎一级电站	8.06

Table 2. Recovery path scheme comparison of the Lushui area

表 2. 泸水区域恢复路径方案比较

序号	恢复路径	权值大小
方案一	听命河电站 - 六库中心变 - 220 kV 崇仁变 - 秤杆开关站 - 腊门嘎一级电站	132.464
方案二	听命河电站 - 六库中心变 - 220 kV 崇仁变 - 金岭变 - 秤杆开关站 - 腊门嘎一级电站	132.828

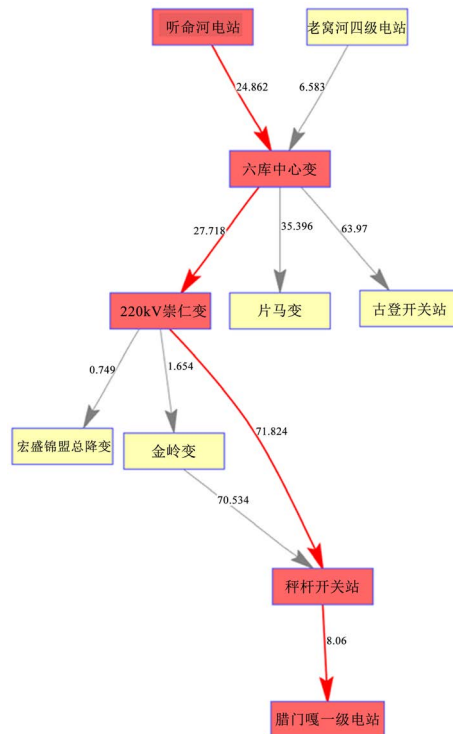


Figure 3. Schematic diagram of optimal path reconstruction in the Lushui

图 3. 泸水区域网络重构阶段最优路径示意图

Table 3. Summary of the results of each edge of the Fugong area
表 3. 福贡区域各条边权值结果汇总

序号	起始节点名称	终止节点名称	权值
1	施底河一级电站	220 kV 福贡变电站	9.6
2	220 kV 福贡变电站	阿路底开关站	10.863
3	220 kV 福贡变电站	马吉开关站	44.335
4	220 kV 福贡变电站	上帕变	14.431
5	阿路底开关站	亚目河三级电站	7.605
6	马吉开关站	木加甲一级电站	6.242
7	上帕变	中排开关站	38.458
8	上帕变	腊吐底开关站	3.83
9	上帕变	亚古开关站	30.398
10	中排开关站	拉嘎鲁河电站	20.63
11	腊吐底开关站	腊吐底电站	0.1
12	亚古开关站	子楞河电站	8

由于福贡地区的主要网架结构比较简单，如图 4 所示，呈现链式结构。从施底河一级电站到子楞河电站只有一条路径可走，即为该片区最优恢复路径，经过的节点分别为施底河一级电站 - 220 kV 福贡变电站 - 上帕变 - 亚古开关站 - 子楞河电站，经过路径的权值大小为 62.4290。当恢复该条线路以后，可以逐级恢复其他电源点，最终使该片区全部恢复供电。网络重构阶段最优路径为图 4 红色箭头所示。

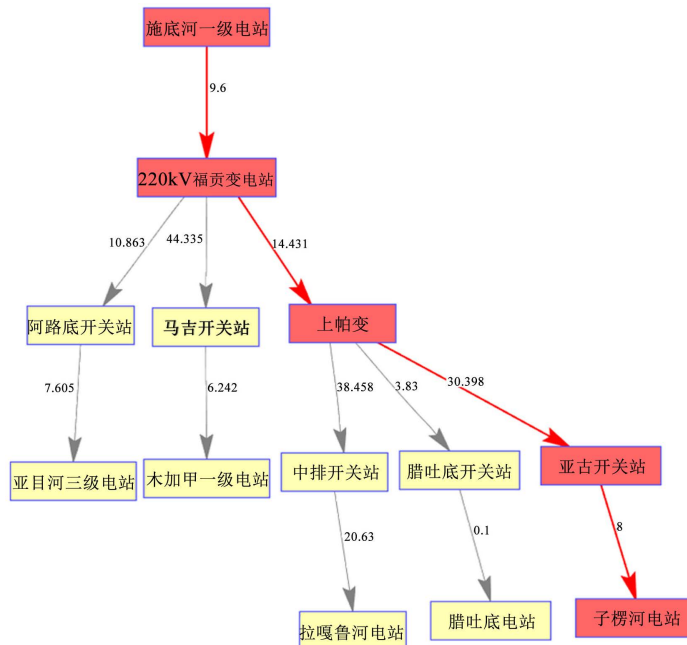


Figure 4. Schematic diagram of optimal path reconstruction in the Fugong
图 4. 福贡区域网络重构阶段最优路径示意图

4.3. 贡山区域

对怒江电网 110 kV 贡山区系统进行路径寻优，该片区的网架结构属于链式结构。该案例中指定丹珠河电站为起始节点，以双拉河电站为终止节点，丹珠河电站和双拉河电站为贡山片区重要的电源点，优

先恢复可以带动后续电源快速恢复，寻找黑启动过程中的最优路径。表 4 记录了贡山区域各条边权值。

Table 4. Summary of the results of each edge of the Gongshan area

表 4. 贡山区域各条边权值结果汇总

序号	起始节点名称	终止节点名称	权值
1	丹珠河电站	220 kV 贡山变	26.047
2	220 kV 贡山变	茨开变	14.41
3	220 kV 贡山变	丙中洛开关站	16.458
4	茨开变	普拉河电站	9.768
5	丙中洛开关站	双拉河电站	0.06

由于贡山地区的主要网架结构比较简单，如图 4 所示，呈现链式结构。从丹珠河电站到双拉河电站只有一条路径可走，即为该片区最优恢复路径，经过的节点分别为丹珠河电站 - 220 kV 贡山变 - 丙中洛开关站 - 双拉河电站，经过路径的权值大小为 42.5650。当恢复该条线路以后，可以逐级恢复其他电源点，最终使该片区全部恢复供电。网络重构阶段最优路径为图 5 红色箭头所示。

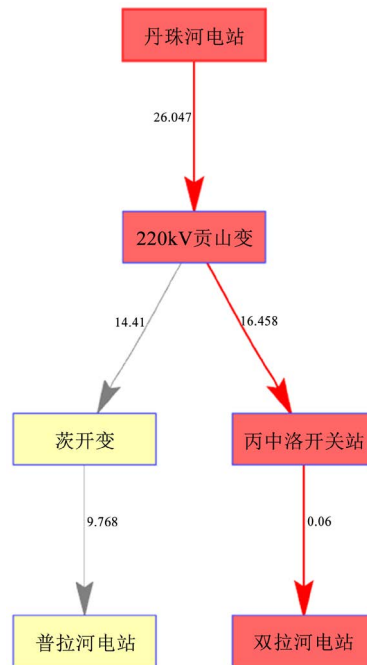


Figure 5. Schematic diagram of optimal path reconstruction in the Gongshan

图 5. 贡山区域网络重构阶段最优路径示意图

4.4. 兰坪区域

对怒江电网 110 kV 兰坪片区系统进行路径寻优，该案例中指定外接大理电网为起始节点，以拉嘎鲁河电站为终止节点，寻找黑启动过程中的最优路径。表 5 记录了兰坪区域各条边权值，权值用于路径寻优，权值和越小，所选路径越优。

兰坪片区的主要网架结构图如图 6 所示，从大理电网起始节点到拉嘎鲁河电站终止节点一共有四种恢复路径，通过比较四种方案的权值大小确定最优路径，表 6 详细列出了四种方案的恢复路径以及权值大小。其中权值越小，表示路径越优，黑启动恢复过程越快，即综合比较后方案三最优。通过起始节点

到终止节点结果显示该最优恢复路径经过的节点分别为兰坪片区的外接大理电网 - 220 kV 兰坪变 - 兰坪中心变 - 黄木变 - 中排开关站 - 拉嘎鲁河电站，经过路径的权值为 158.7310。网络重构阶段最优路径为图 6 红色箭头所示。

Table 5. Summary of the results of each edge of the Lanping area

表 5. 兰坪区域各条边权值结果汇总

序号	起始节点名称	终止节点名称	权值
1	外接大理电网	220 kV 兰坪变	47.153
2	220 kV 兰坪变	金鼎锌业	4.534
3	220 kV 兰坪变	兰坪中心变	2.898
4	金鼎锌业	兰坪中心变	21.654
5	兰坪中心变	黄木变	33.5
6	兰坪中心变	兔峨开关站	47.328
7	兔峨开关站	黄登变电站	28.118
8	黄登变电站	石登变电站	19.928
9	石登变电站	中排开关站	0.831
10	黄木变	中排开关站	54.55
11	中排开关站	拉嘎鲁河电站	20.63

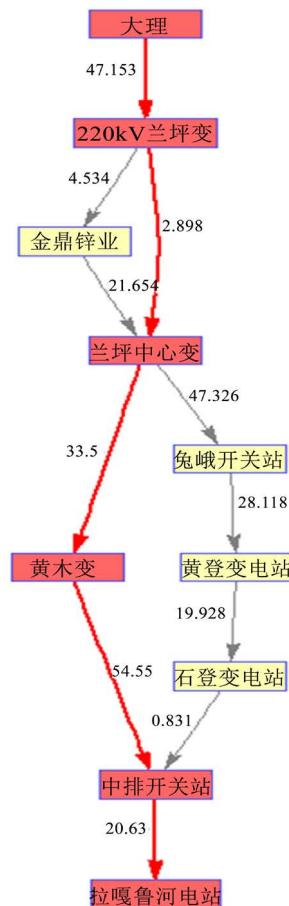


Figure 6. Schematic diagram of optimal path reconstruction in the Lanping
图 6. 兰坪区域网络重构阶段最优路径示意图

Table 6. Recovery path scheme comparison of the Lanping area
表 6. 兰坪区域恢复路径方案比较

序号	恢复路径	权值大小
方案一	大理 - 220 kV 兰坪变 - 金鼎锌业 - 兰坪中心变 - 兔峨开关站 - 黄登变电站 - 石登变电站 - 中排开关站 - 拉嘎鲁河电站	190.174
方案二	大理 - 220 kV 兰坪变 - 兰坪中心变 - 兔峨开关站 - 黄登变电站 - 石登变电站 - 中排开关站 - 拉嘎鲁河电站	166.884
方案三	大理 - 220 kV 兰坪变 - 兰坪中心变 - 黄木变 - 中排开关站 - 拉嘎鲁河电站	158.731
方案四	大理 - 220 kV 兰坪变 - 金鼎锌业 - 兰坪中心变 - 黄木变 - 中排开关站 - 拉嘎鲁河电站	182.021

5. 结论

本文根据怒江电网的水电分布情况, 利用 Dijkstra 算法对怒江电网泸水区域、贡山区域、福贡区域、兰坪区域 4 个黑启动子系统进行网架重构, 找到最优路径。该算法只要给定起始节点, 终止节点, 通过对每条线路的权值进行寻优, 生成各区域网络重构最优路径示意图。尽快给失电厂站送电并建立一个稳定的网架, 为系统的全面恢复奠定基础。

参考文献

- [1] 戴小俊. 电力系统黑启动研究[J]. 中国电力教育, 2012(33): 148-149.
- [2] 周云海, 刘映尚, 胡翔勇. 大停电事故后的系统网架恢复[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 32-36.
- [3] 刘艳. 电力系统黑启动恢复及其决策支持技术的研究[D]: [博士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2007.
- [4] 顾雪平, 李少岩, 李凯. 用于网架重构决策的节点重要度动态评价方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 89-95.
- [5] 孙璞玉, 张焰, 罗雯清. 考虑网架覆盖率与分散度的网架重构优化[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 271-278.
- [6] Fink, L.H., Liou, K.L. and Liu, C.C. (1995) From Generic Restoration Actions to Specific Restoration Strategies. *IEEE Transactions on Power Systems*, **10**, 745-752. <https://doi.org/10.1109/59.387912>
- [7] 朱海南, 刘玉田. 考虑线路投入顺序的网架重构机组恢复多目标优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 53-59.
- [8] 刘连志, 顾雪平, 刘艳. 不同黑启动方案下电网重构效率的评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 24-28.
- [9] 林振智, 文福拴. 基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 11-15, 103.
- [10] Adibi, M.M. and Milanicz, D.P. (1999) Estimating Restoration Duration. *IEEE Transactions on Power Systems*, **14**, 1493-1498. <https://doi.org/10.1109/59.801939>
- [11] 刘强, 石立宝, 倪以信, 等. 电力系统恢复控制的网络重构智能优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 8-15.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org