

# 基于拓扑运行状态辨识的负荷转供技术

付俊强<sup>1\*</sup>, 吴磊<sup>2</sup>

(1. 杭州久益电力科技有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 国网安徽六安供电公司, 安徽 六安 237006)

**摘要:** 针对变电站发生全停后开关状态无法识别而引发的问题, 提出一种考虑配网实时运行方式的负荷转供技术。采用贝叶斯网络描述开关状态与节点电压的关系, 识别配网的拓扑运行状态进而作为转供方案的基础。最后通过对某个实际配电系统的故障仿真分析, 结果表明该方案可以有效提高停电负荷的转供能力。

**关键词:** 变电站全停; 负荷转供; 拓扑运行状态辨识; 最大恢复供电能力; 贝叶斯网络

**中图分类号:** TM763

## Load Transfer Technology Based on Topology Operating State Identification

FU Junqiang<sup>1\*</sup>, WU Lei<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Jiuyi power Technology Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou 310012, China; 2. State Grid LuAn Power Supply Company, Anhui LuAn 237006, China)

**Abstract:** Aims at the problem that the switch state cannot be identified after the complete shutdown of the substation, this paper proposes taking into account the frequent topology changes. Bayesian networks are used to describe the relationship between switch status and node voltage, identify the topology of the distribution network, and serve as the basis for the power transfer scheme; Finally, through fault simulation analysis of an actual distribution system, result can effectively increase the transfer capacity of power outage load.

**Keywords:** shutdown of the substation; load transfer; topology operation recognition; maximum power recovery capacity; Bayesian network

## 0 引言

变电站全停事故是影响电网可靠运行的重要因素<sup>[1-2]</sup>。当变电站发生全停事故后, 会直接引起地区大范围停电, 造成巨大的经济损失。变电站全停所引起的馈线间的负荷转供实际上是大规模、非线性以及混合整型的优化问题。文献 [3] 提出以主变之间的联络线作为恢复路径, 完成变电站之间的负荷转供。文献 [4] 考虑以主变间的互联关系作为转供条件, 建立负荷转供模型, 将全停主变的负荷均分配给具有联络关系的其他变电站。

自负荷转供提出以来, 都是在假设原始配电网拓扑运行状态是已知的前提下, 很少讨论拓扑运行状态未知时如何进行负荷转供。本文提出了一种判断变电站全停时配网拓扑运行状态辨识的技术。首先, 基于贝叶斯网络来建立开关状态和馈线上的电

收稿日期: 2024-01-10; 修回日期: 2024-01-15

压数据之间的数学模型; 接着在该模型上引入信念传播算法来辨识所有开关的状态, 从而获得配电网的实际运行状态。在基于精确的拓扑运行状态下, 生成最大恢复供电能力的负荷转供模型, 从而提高整体负荷的最大恢复供电能力。

## 1 基于贝叶斯网络的拓扑运行状态辨识

### 1.1 配网运行状态辨识模型

典型的配电网结构包括变电站、母线、支路、馈线、变压器、开关、继电保护装置以及一些自动化设备。网络中开关的运行状态会因不定期变动, 进而改变配电网的拓扑运行方式。对典型的配电网结构进行简化, 如图 1 所示为某一简化的配电网,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  为 4 所变电站的母线, 而  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  为相应母线所连接的变电站,  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  分别为网络中的等效负荷节点,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  表示其上相应的负荷,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  表示网络中的开关,  $F_1$ 、

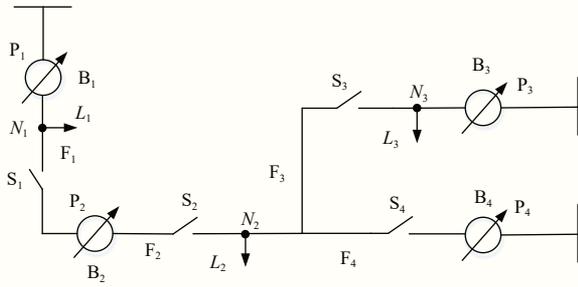


图1 简化的配电网物理模型图

$F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  分别表示节点之间的馈线。

皮尔逊相关系数是用来衡量数据间相关程度的评价指标，它以 2 组数据与各自平均值的离差为基础，通过 2 个离差相乘来反映 2 变量之间的相关程度，皮尔逊相关系数的定义为：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中： $X$ 、 $Y$  为待确定相关程度的 2 组数据，分别有  $m$  个元素； $i$  为从 1~ $m$  的数据样本序号； $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  分别为 2 组数据的平均值； $K$  为皮尔逊相关系数，其取值为  $[-1, 1]$ 。

数据间的相关程度由  $K$  的绝对值反映，绝对值越大表示数据  $X$  与  $Y$  间的相关程度越高，由于负荷点电压受母线支撑，其无功来源主要由母线提供，因此，变电站母线与负荷点的电压相关系数，可以通过皮尔逊相关系数来衡量，具体计算公式如下：

$$C_{V_p, V_L} = \frac{\text{cov}(V_p, V_L)}{\sigma(V_p)\sigma(V_L)} \quad (2)$$

式中： $V_p$  和  $V_L$  分别为变电站母线和负荷点的电压； $\text{cov}(V_p, V_L)$  为  $V_p$  和  $V_L$  之间的协方差； $\sigma(V_p)$  和  $\sigma(V_L)$  分别为  $V_p$  和  $V_L$  数据的标准差。

根据配电网的简化物理模型，开关的状态与相应的节点电压相关系数具有直接的联系。例如，在图 1 的配网模型中，当开关  $S_2$  闭合时，变电站母线  $P_2$  与负荷点  $N_2$  的电压相关系数要明显高于开关  $S_2$  断开时的相关系数。换句话说，如果将开关状态和变电站母线与负荷节点的电压相关系数作为随机变量，那么这二者之间必定存在着某种联系，以图 1 的配网为例，相应的关系如表 1 所示。

表1 开关状态与相应电压相关系数的关系

等效负荷节点	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$N_1$	$\varnothing$	$S_1$	$S_1, S_2, S_3$	$S_1, S_2, S_4$
$N_2$	$S_1, S_2$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$N_3$	$S_1, S_2, S_3$	$S_2, S_3$	$\varnothing$	$S_3, S_4$

在表 1 中，每一个元素表示变电站母线  $P_i$  和负荷点  $N_j$  之间的所有开关， $\varnothing$  表示空集，这些开关的状态与电压相关系数  $C_{P_i, N_j}$  有着直接的联系。因此， $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  开关状态的变化会导致电压相关系数的变化，例如当开关  $S_2$  状态闭合、开关  $S_3$  与  $S_4$  打开时， $C_{V_{P_2}, V_{N_2}}$  的值会明显高于开关  $S_2$  打开、开关  $S_3$  与  $S_4$  闭合时的值。

引用贝叶斯网络来表示随机变量之间的因果关系，如图 2 所示，图中间的圆形顶点表示开关状态的变量而边缘的椭圆形顶点表示电压相关系数的观测变量，其中从圆形顶点到椭圆形顶点的边则表示开关状态与对应的电压相关系数的关系，并且贝叶斯网络定了一个独立的结构：一个节点的概率仅仅依赖于它的父节点，例如，开关  $S_2$  的状态只会影响  $C_{P_2, N_2}$ 、 $C_{P_1, N_3}$ 、 $C_{P_3, N_2}$  和  $C_{P_4, N_1}$  的值，而不会影响其余节点间的电压相关系数。

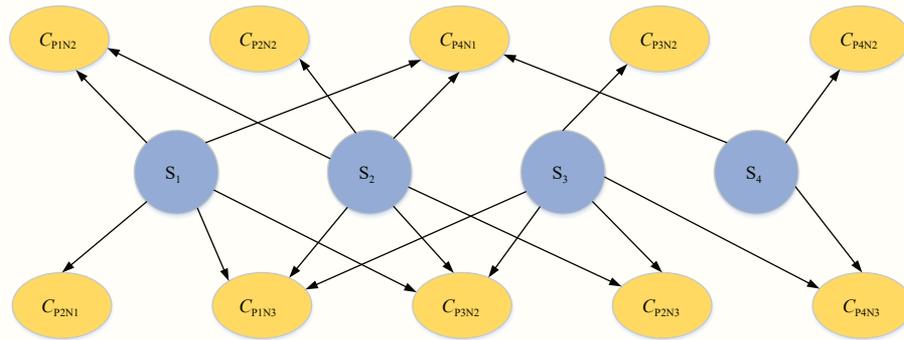


图2 基于贝叶斯网络的拓扑运行状态辨识模型

## 1.2 基于信念传播算法的开关运行状态估计

信念传播算法利用节点与节点之间相互传递信息而更新当前整个贝叶斯模型的标记状态,是基于贝叶斯模型的一种近似计算<sup>[5]</sup>。信念传播算法计算边缘概率分布时首先将贝叶斯模型转为CG模型<sup>[6]</sup>,CG模型是一种间接的概率图模型,每个节点将具有某种联系的随机变量结合到一起,以图2的贝叶斯网络为例,它可以转化为图3的CG模型。

图3所示的CG模型中,每个蓝色顶点为1组相关变量的集合,顶点之间的边传递着2个顶点之间的交流信息。比如,集群 $v_1$ 的置信度表示随机变量 $S_1$ 以及 $C_{P_2N_1}$ 的联合概率分布,而与 $v_1$ 相连的2条边则表示集群 $v_5$ 和 $v_6$ 可以向 $v_1$ 所传递的信息。

对于所转化的CG模型,其节点 $v_i$ 的置信度可表示为 $b_i(v_i)$ ,而且该置信度与集群 $v_i$ 的局部证据 $\phi_i(v_i)$ 以及所有通过相邻边传递给集群 $v_i$ 的信息 $m_{ji}(v_i)$ 成正比:

$$b_i(v_i) = z_i \phi_i(v_i) \prod_{j \in N(i)} m_{ji}(v_i) \quad (3)$$

式中: $z_i$ 为归一化常数,可使信念的和为1; $N(i)$ 为节点 $i$ 的一阶邻域,即为与 $v_i$ 相邻的集群。 $m_{ji}(v_i)$ 的更新原则如下:

$$m_{ji} \leftarrow \sum_{v_j - e_{ji}} \phi_j(v_j) \prod_{k \in N_{ji}} m_{kj} \quad (4)$$

式中: $v_j - e_{ji}$ 为 $v_j$ 中不包括与 $v_i$ 相同随机变量的其余变量; $N_{ji}$ 为除了 $v_i$ 以外与 $v_j$ 相连的所有集群集合。其中,信息在节点之间的传递是双向的,简言

之,从集群 $v_i$ 传递到集群 $v_j$ 的信息和 $v_j$ 传递到 $v_i$ 的信息是不同的。根据消息传播和信念更新的不断迭代,直到它们稳定,最后就能从信念中获取相应的概率。

## 2 负荷转供数学模型

在对配电网拓扑运行状态进行观测的基础上,变电站全停后的负荷转供优化问题须考虑最大供电恢复能力:在变电站全停的情况下,尽可能多地转移停电负荷。可利用文献[7]的技术设计配电网负荷转供模型。

## 3 算例

以图4所示的某配网简化接线方式为例,该系统共有5座变电站,21个开关,36个负荷节点,开关状态不一。现在假设由于分布式能源的大量接入引起开关 $S_1 \sim S_9$ 的变动而处于不确定状态,研究此情形下1号变电站全停时的负荷转供方案。

进行1000次配电系统潮流仿真得到原始电压运行数据,假设此时 $S_1 \sim S_9$ 的状态估计存在误差。首先根据物理模型图建立 $S_1 \sim S_9$ 开关状态与节点电压相关系数的贝叶斯模型,如图5所示,接着运用信念传播算法对贝叶斯模型进行推理,得到开关 $S_6$ 的状态已经发生变动。在此基础上,以遗传算法求解转供模型<sup>[8]</sup>,转供的详细路径如表2所示。可以发现,当未采取准确拓扑运行状态辨识时,开关 $S_6$ 运行状态的变动,直接引起负荷 $L_5$ 与 $L_6$ 转供方案

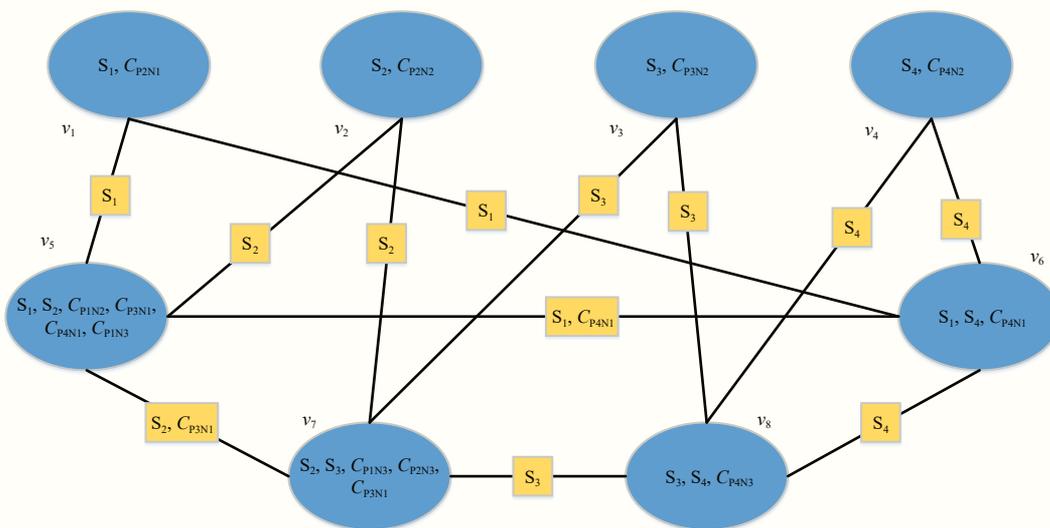


图3 简单贝叶斯模型的CG模型

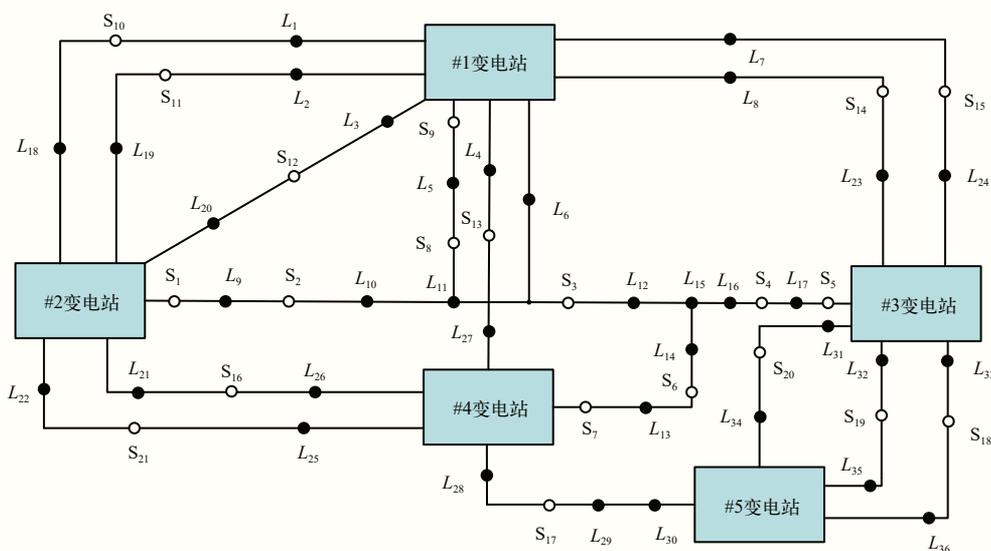


图4 某配网部分简化接线图

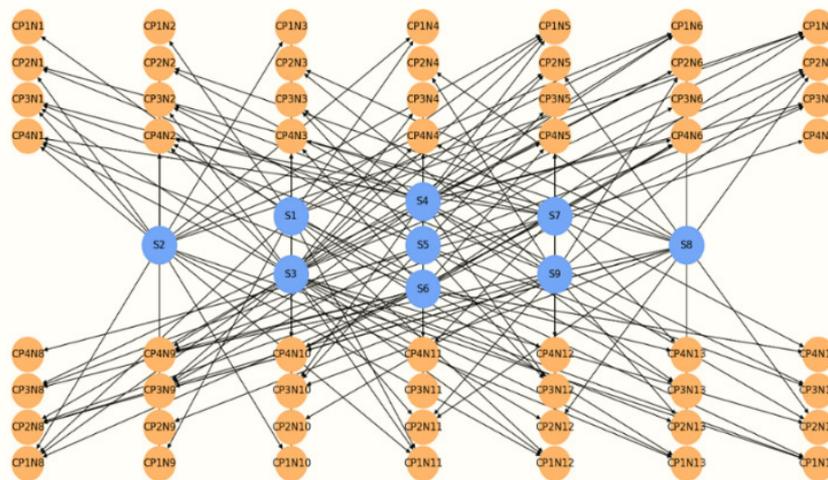


图5 基于贝叶斯网络的  $S_1-S_9$  开关运行状态辨识模型

表2 负荷转供详细路径表

负荷	负荷转供路径	
	未采用拓扑辨识	采用拓扑辨识
$L_1$		$L_1 \rightarrow S_{10} \rightarrow L_{18}$
$L_2$		$L_2 \rightarrow S_{11} \rightarrow L_{19}$
$L_3$		$L_3 \rightarrow S_{12}$
$L_4$		$L_4 \rightarrow S_{13} \rightarrow L_{27}$
$L_5$	转供出错	$L_5 \rightarrow S_8 \rightarrow S_3 \rightarrow S_6 \rightarrow S_7$
$L_6$	转供出错	$L_6 \rightarrow S_3 \rightarrow S_6 \rightarrow S_7$
$L_7$		$L_7 \rightarrow S_{15} \rightarrow L_{24}$
$L_8$		$L_8 \rightarrow S_{14} \rightarrow L_{23}$

出错，造成无法快速恢复停电负荷供电。采用拓扑辨识后的负荷转供优化对比见图6，因此，本文采取的考虑配网拓扑运行状态的负荷转供技术能够适用于拓扑频繁变动的配网中，提高调度决策的准确

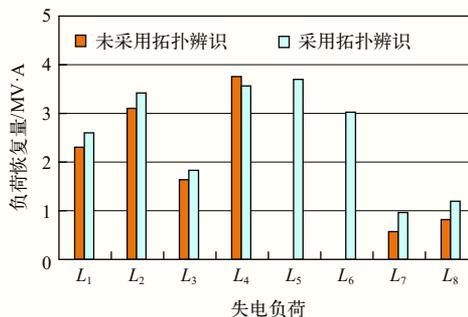


图6 负荷转供优化结果图

性与快速性。

#### 4 结束语

本文在针对变电站全停时忽视馈线开关状态所造成的转供路径受限问题，提出了利用贝叶斯网络的拓扑运行状态辨识技术。在发生事故后以开关状态和节点电压相关系数的关系将配网的简单物理模型转化为贝叶斯图模型，引入信念传播算法有效迅速地识别配网的拓扑运行方式，并在该识别拓扑的基础上考虑最大可恢复量进行负荷转供，充分计及线路与主变容量的约束以及主变的负载均衡度，有效地解决了传统算法中转供恢复量少、转供决策慢的问题，进一步挖掘配电网的供电潜力，提升配电系统的供电可靠性。

#### 参考文献

- [1] 顾明宏, 孙为兵, 李培培, 等. 面对极端扰动事件的城市弹性配电网评估指标体系[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(7): 103-109.
- [2] 王树元, 谢志华, 杨柏. 基于新型电力系统地区电网区域自备投研究与应用[J]. 东北电力技术, 2023, 44(10): 49-52.
- [3] 廖怀庆, 刘东, 黄玉辉, 等. 基于公共信息模型拓扑收缩的配电网转供能力分析[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 51-55.
- [4] Luo Fengzhang, Wang Chenshan, Xiao Jun, et al. Rapid evaluation method for power supply capability of urban distribution system based on N-1 contingency analysis of main-transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(10): 1063-1068.
- [5] 刘子琳. 信息传播算法在支配集问题中的应用研究[D]. 北方民族大学, 2022. DOI: 10.27754/d.cnki.gbfmz.2022.000041.
- [6] J. Yedidia, W. Freeman and Y. Weiss, "Understanding belief propagation and its generalizations", in Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium. 2002(54): 276-286.
- [7] 章立宗, 吴磊, 蒋玮, 等. 考虑二次转供的配电网负荷转供方案多目标优选技术[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2321-2328.
- [8] 江岳文, 罗泽宇, 程诺. 基于线性化方法的交直流混合配电网系统网架规划[J/OL]. 电工技术学报, 2023-09-14. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222363.

#### 作者简介

付俊强 (1973—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 电网智能调度技术、人工智能、水电调度, E-mail: fujunqiang2019@outlook.com。

吴磊 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网优化规划技术, E-mail: 1571393422@qq.com。

(责任编辑: 袁航)

#### 资讯

新型无人机巢技术应用交流会在京召开

【本刊讯】2024年3月15日, 由中国电机工程学会农村电气化专业委员会、北京国宇出版有限公司联合主办的“2024北京电网无人机巢技术应用交流会议”在京召开。会议邀请国网北京市电力公司、华商远大电力建设有限公司、武汉飞流智能技术有限公司等专业人员参会, 20余人参加了此次会议。

会上, 国网北京市电力公司设备部谭磊介绍了北京电网无人机巡检管理及发展现状。近几年, 北京公司加速推动输电、配电、变电多专业无人机协同规模化巡检, 完善巡检制度, 加强机场建设, 探索“微芯片、人工智能”等技术与无人机的深度融合, 持续优化无人机巡检作业模式, 不断推进无人机巡检模式全自动、无人化、智能化。

国网北京市电力公司电力科学研究院王雅妮介绍了北京输电线路巡检新技术及数智化应用状况, 目前北京公司已完成21000余基杆塔三维点云采集, 安装9400余套可视化装置, 实现全部适航区杆塔无人机自主巡检和通道可视化全覆盖。同时, 不断完善无人机管控系统与智能安防管控系统, 统一管理海量数据与各类无人机工作任务, 提高无人机巡检的效率和水平。

国网北京市电力公司检修分公司马立博介绍了检修公司无人机业务发展现状和无人机飞手培养情况, 通过竞赛, 以赛促学, 以赛促培, 加速人才队伍建设。同时, 就现阶段无人机巡检及无人机机场巡检的业务需求进行了交流介绍。

武汉飞流智能技术有限公司、广州中科云图智能科技有限公司、北京未来智能科技有限公司代表分别介绍了其主流产品和应用情况, 以无人机+智能机巢的技术组合模式, “多巢多机多任务”协同、专业融合、不分电压等级的巡检模式, 多源数据融合、巡检全流程监控、运行环境的模拟仿真和缺陷智能识别及闭环处理跟踪等模式, 满足输变配一体化巡检作业需求, 达到巡检全天候无人化、智慧化、可视化。

本次会议加强了企业之间的合作和交流, 推动无人机巢技术进步, 促进数智化运维手段革新, 为电网的安全稳定运行提供技术支撑。