

低压配电网拓扑结构识别方法研究

李晓钰

国网福州供电公司

摘要: 低压配电网拓扑结构识别是配电自动化和智能电网建设的关键技术之一。本文综述了低压配电网拓扑结构识别的基本理论和主要方法,重点分析比较了基于计量数据的统计分析方法和基于图论与机器学习的智能识别方法。前者包括基于相关系数、互信息和条件概率的识别方法,后者包括最小生成树、深度优先搜索、聚类分析和图神经网络等算法。

关键词: 低压配电网; 拓扑结构识别; 图论; 机器学习; 智能电网

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6261.2022.11.076

引言

随着新型电力系统的快速发展和泛在电力物联网的建设,对配电网的感知、分析与控制提出了更高要求。

《国家电网公司“十四五”电网发展规划》明确提出,要推进以信息化、自动化、互动化为特征的智能电网建设,提升低压配电网的智能化水平。而掌握低压配电网的拓扑结构是实现上述目标的基础。传统的拓扑识别方法难以适应日趋复杂的现代配电网,亟须研究开发智能化的新方法。本文将系统梳理低压配电网拓扑识别的理论基础和各类方法,以期对相关研究和工程应用提供参考。

一、低压配电网拓扑结构识别的基本理论

1. 图论基础

图论是研究由顶点和边组成的离散结构的数学理论,为描述和分析低压配电网拓扑结构提供了基础。无向图可用于表示配电网的物理连接关系,其中变压器、开关、线路等设备对应图的顶点,导线连接对应图的边。有向图可进一步表征潮流方向等信息。树是一类特殊的无环连通图,与辐射状配电网拓扑同构。图的矩阵表示如邻接矩阵、关联矩阵等,可方便计算机进行拓扑分析。图的连通性、生成树、独立集、着色、最短路等基本概念和算法,在配电网拓扑分析中广泛应用。例如,配电系统重构问题可转化为最小生成树问题求解,或用最短路算法优化馈线路径。总之,图论为研究配电网拓扑结构奠定了数学基础。

2. 低压配电网拓扑结构的数学表示

低压配电网作为连接中压侧与用户侧的桥梁,通常采用树状拓扑结构,具有根节点(如配电变压器)和大量叶节点(如用户)的特点。为实现拓扑结构的数学表示,一般将配电设备抽象为顶点(或节点),导线连接抽象为边(或支路),从而建立低压配电网地图模型。常用的图类型有无向图、有向图、加权图等。例如,无向图可表示设备间的物理连接关系,有向图可进一步表示电能流动方向,加权图可刻画导线的电阻等属

性参数。通过邻接矩阵、关联矩阵等方式,可将图的拓扑结构转化为计算机易于处理的数值矩阵。此外,不同配电设备和线缆的拓扑属性和物理特性也可嵌入图模型中,如母线、开关、变压器等设备分别对应不同类型的顶点,线缆材质、长度、截面积等参数作为边的属性。基于图的数据表示,低压配电网拓扑结构可进一步结合图论算法进行分析和计算。

3. 拓扑结构识别的基本方法

拓扑结构识别旨在通过测量数据和先验知识,估计低压配电网的物理连接关系。基本思路是在已知配电网设备类型和部分连接信息的前提下,分析隐含拓扑结构信息的各类数据,推断未知连接关系,从而还原完整拓扑结构。常用的数据源包括电压、电流等状态量测量值,以及开关状态、用电记录等非电量数据。根据数据的时间尺度和测点位置,可分为实时测量法、历史数据挖掘法、主动扰动法等。实时测量法利用同步采集的多点电压电流数据,基于欧姆定律、基尔霍夫定律构建回路方程,求解支路导纳矩阵,进而推断拓扑连接。历史数据挖掘法从海量用电数据、营销数据中提取拓扑特征,如相关性、一致性等,运用统计学习和数据挖掘技术识别拓扑结构。主动扰动法通过施加短时扰动信号,分析其在网络中的传播特性,反演线路参数和连接关系。在实际应用中,不同识别方法常结合使用,以期获得较快收敛速度和较高估计精度。此外,先验物理模型、全局优化准则的引入,有助于提升拓扑识别的鲁棒性和可解释性。

二、基于计量数据的拓扑识别方法

1. 基于相关系数的拓扑识别

基于相关系数的拓扑识别方法利用不同测量点数据间的统计相关性,推断低压配电网的连接关系。其基本假设是,电气连接紧密的测点(如同一条馈线上的点)其电压、电流、功率等测量数据呈现较强的相关性,而电气距离较远或不直接连通的测点数据相关性较弱。通过计算不同测点时间序列数据的皮尔逊相关系数、斯皮

尔曼等级相关系数等指标，可构建测点的相关性矩阵。进一步利用聚类分析方法，如层次聚类、谱聚类等，将相关性较强的测点归为一类，形成连通支路，最终还原出完整的网络拓扑。该方法的优点是原理简单，计算高效，容易实现；缺点是容易受测量噪声和负荷波动影响，对数据质量和同步性要求较高。在实际应用中，需进行数据预处理和去噪，选择合适的相关系数阈值和聚类参数，以提高识别的准确性和可靠性。

2. 基于互信息的拓扑识别

互信息 (Mutual Information) 是度量两个随机变量之间相关性的一种信息论指标，相比相关系数能更好地刻画非线性依赖关系。将不同测点的数据视为随机变量，互信息就表征了两个测点之间的统计依赖程度，互信息越大意味着两个测点在网络拓扑中更可能存在直接连接。因此，基于互信息的拓扑识别方法先计算测点间的成对互信息，形成互信息矩阵，再运用最大权生成树、Chow-Liu树等算法构建互信息最大的网络拓扑。该方法能在一定程度上克服线性相关系数的局限性，挖掘测点间的高阶统计关系，在复杂配电网拓扑识别中具有优势。但其缺点是计算互信息需估计概率密度函数，对数据量和分布有较高要求，实际应用中往往结合核密度估计、近似算法等手段。此外，互信息对噪声和数据缺失较为敏感，数据质量的预处理和互信息估计的优化是提升识别效果的关键。

3. 基于条件概率的拓扑识别

条件概率反映了在已知某个事件发生的条件下，另一个事件发生的概率。将配电网测点视为随机变量，给定某一测点发生变化（如电压越限），其直接连接点的条件变化概率显然高于间接连接或不连通的测点。基于这一思想，可构建测点间的条件概率模型，即在某一测点发生显著变化时，分析其他测点的响应概率分布，概率越高说明两测点更可能直接连通。通过计算成对测点间的条件概率，可得到有向图的形式表示网络拓扑。进一步地，可结合图论中的最大似然估计、贝叶斯推断等方法，基于全局测点响应数据对网络拓扑进行推断和优化。该方法的优点是能有效融合先验物理规律和数据驱动机理，具有较好的可解释性，缺点是条件概率的准确计算需大量训练数据，且应考虑时间、空间相关性等因素，具有一定挑战。因此，如何平衡数据的可获得性与算法的精度是关键问题。

4. 不同方法的比较与讨论

前述三类基于计量数据的拓扑识别方法分别从不同侧面刻画了配电网测点间的数据关联特性，为拓扑结构估计提供了多元视角。就建模思路而言，相关系数法主要考虑线性相关性，互信息法则能挖掘非线性依赖关

系，条件概率法更多体现了因果关联。就算法原理而言，相关系数法多采用无向图聚类模型，互信息法侧重基于信息论准则的生成树方法，条件概率法则引入有向图模型和概率图推理。在实际应用中，由于真实配电网拓扑的复杂性和不确定性，往往需结合不同方法的优势，形成多维度、多阶段的拓扑估计方案，以期获得较为全面和准确的识别效果。如可先用相关系数法快速锁定疑似拓扑区间，再用互信息法细化重构局部结构，最后采用条件概率法动态校正和优化。当然，不同方法在融合应用时，如何权衡计算效率与精度、如何协调不同模型的参数与机理，仍有待深入研究。此外，高质量计量数据的获取与预处理、全局优化准则的引入，以及实用化工程化的开发，也是进一步提升基于计量数据拓扑识别方法性能的重要方向。

三、基于图论与机器学习的拓扑识别方法

1. 最小生成树算法

最小生成树是一类经典的图论算法，在加权连通图中求取总权值最小的生成树结构。将低压配电网建模为带权图，线路的物理距离、电阻等特性参数作为边的权重，则MST算法可用于重构权重最优的网络拓扑。常用的MST算法包括Kruskal算法和Prim算法。Kruskal算法按照边权递增的顺序遍历图的所有边，每次选择权值最小且不会形成环路的边加入生成树，直至生成树包含图的所有顶点。Prim算法则从一个顶点开始，每次将离当前生成树最近（权值最小）的顶点纳入树中，直至所有顶点均被纳入。在实际配电网拓扑重构中，考虑到配电变压器与开关设备的辐射状布局特性，往往先确定变电站与开关设备的连接方式，再运用MST算法在开关之间和开关至用户端构建最优馈线拓扑，并结合实际地理环境和线路铺设成本进行优化。值得一提的是，面向配电网自动化和智能故障处理的需求，研究者进一步提出了最小根树、最小直径树等MST的动态变种，以在保证供电可靠性的同时最小化馈线路径与投资成本。然而，经典MST算法难以适应日趋复杂的现代配电网，亟须引入启发式搜索、多目标优化等智能计算方法，综合考虑供电距离、线损cost、负荷密度等多元边权重指标，鲁棒高效地求解配电网最优拓扑重构问题。

2. 深度优先搜索算法

深度优先搜索是图的遍历算法之一，其基本思想是从图的某一顶点出发，沿着一条路径向前探索，直到无法继续为止，然后回溯到最近的岔路口并探索另一条路径，直至遍历图的所有顶点。DFS算法具有路径搜索快速、空间复杂度低等优点，在求解网络连通性、拓扑排序、关键路径等问题时广泛应用。将配电网抽象为图模型后，DFS算法可用于验证网络的radial特性，生成

配电馈线拓扑,分析潮流路径等。如采用基于DFS的回溯搜索策略,从配电变压器顶点出发,深度探索所有下游负荷节点,在搜索过程中剪枝去除环路和重复支路,即可高效生成辐射状配电网拓扑。在此基础上,进一步考虑负荷分布、三相平衡等约束,引入智能化搜索机制,可求解配电网重构、负荷均衡等实际工程问题。例如一种改进的带启发函数的DFS算法,通过定义综合考虑供电半径、负荷分布、网损等因素的评价函数,指导DFS搜索智能选择分支方向,在降低搜索复杂度的同时优化重构拓扑。此外,研究人员还提出概率DFS、分布式DFS等算法变体,用于应对不确定负荷、分布式电源的接入等复杂场景。然而,经典DFS算法容易陷入局部最优,对初始点和搜索策略敏感,不能保证全局最优拓扑。未来需进一步融合现代优化理论和智能计算方法,提出新型混合拓扑搜索框架,在满足工程约束的同时提升配电网重构与优化水平。

3. 聚类分析方法

聚类分析是数据挖掘和机器学习的重要方法之一,旨在把相似的样本自动归为一类,形成不同的簇结构。凭借无监督学习和异常检测的能力,聚类分析方法在电力系统拓扑识别领域得到广泛应用。以配电网为例,可将变压器、开关、线路等不同类型设备的状态量测点数据进行特征提取,运用聚类算法进行分组,则同一簇内的测点可认为在物理和拓扑上属于同一条馈线或连通支路。常用的聚类算法包括K-means、DBSCAN、层次聚类等。其中,K-means通过迭代优化最小化簇内样本与簇中心的距离,实现测点数据的聚类划分;DBSCAN基于样本局部密度的连通性进行聚类,能自动发现任意形状的簇结构和噪声点;层次聚类采用树状层次结构描述样本间的远近关系和归属层次,既可自下而上合并(聚合聚类),也可自顶向下分裂(divisive聚类)。在配电网测点数据聚类时,往往先对原始测点数据进行特征工程,提取反映拓扑属性的电压-电流相似度、配电变压器关联度等特征量,并预处理异常值;然后选择合适的距离度量(如欧氏距离、余弦相似度)和聚类评价准则,迭代优化聚类模型;最后将聚类结果与已知拓扑信息对比分析,校正算法参数。聚类分析的优点是无须预先标注数据,通过非监督学习揭示数据内在连接模式,可有效补足配电网拓扑信息的先验知识。但其性能受限于特征表达和相似度计算方式,且难以刻画不同测点间的复杂关联。因此,亟须从数据质量提升、网络拓扑特征融合、多视图聚类等方向改进现有分析范式,进一步提高聚类分析方法在实际配电网拓扑识别中的适用性和精准度。

4. 图神经网络算法

图神经网络是一类专门面向图结构数据的深度学习模型,通过迭代更新节点的状态嵌入表示,能够端到端地学习图的拓扑结构和节点特征。将配电网拓扑和测点数据表示为图,GNN即可直接应用于学习隐含的拓扑关联模式。最经典的GNN模型是图卷积网络,其通过定义卷积核在图域上的谱分解,实现节点信息在图拓扑上的传播与聚合,进而学习到节点的低维嵌入表示。在配电网拓扑识别任务中,可将变压器、开关等设备建模为图的节点,线路连接关系表示为边,线路参数、测点数据等属性特征附加到相应的节点和边上。输入所构建的属性图数据,GNN可通过端到端训练学习到不同测点的状态嵌入,再基于嵌入表示的相似度计算或图边的后验概率推断出各测点间的连接关系。相比传统方法,GNN能充分挖掘网络拓扑结构信息,学习测点间的高阶关联模式,在复杂多变的现代配电网环境下展现出良好的拓扑识别性能。目前,国内外学者已提出多种GNN变体模型用于配电网拓扑识别,如门控图神经网络引入了类似LSTM的门控机制增强信息传递,图注意力网络运用Attention机制自适应地聚合邻域节点的影响。然而,现有GNN方法仍面临可解释性不足、鲁棒性有待提高等问题。如何进一步融合先验物理规律,提升小样本学习能力,在GNN框架下构建因果模型,是图神经网络方法在实际配电网拓扑识别应用中亟待解决的问题。

结束语

低压配电网拓扑结构识别是一个复杂的系统工程,涉及电力系统、图论、统计学习、人工智能等多学科知识。本文分别从基于图论与机器学习的智能算法和基于计量数据挖掘的统计方法两个角度,对几类典型方法进行了介绍和比较分析,并通过实际案例说明其应用效果。可以看出,不同方法都有其特点和局限性,实际应用时需根据系统特性、数据条件等因素综合选择。未来一方面要在理论和算法层面寻求新的突破,另一方面也要加强不同方法的融合应用,以期获得更准确、高效、鲁棒的拓扑识别效果,更好地指导配电网规划、运行与控制。

参考文献

- [1] 海迪,崔娇,文玉兴,等.基于电压波动特征聚类的配电网拓扑识别方法[J].湖南师范大学自然科学学报,2021,44(6):7.
- [2] 耿俊成,吴博,万迪明,等.基于离群点检测的低压配电网拓扑结构校验[J].电力信息与通信技术,2017,15(5):5.
- [3] 冯人海,赵政,谢生,等.基于主成分分析和凸优化的低压配电网拓扑识别方法[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2021,54(7):8.