

DOI: 10.7667/PSPC160835

基于多级可拓法的地市电力骨干通信网发展水平诊断分析

李莉¹, 邹英杰², 罗田田², 吴润泽²

(1. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100160; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 为分析地市电力骨干通信网在特定阶段的发展态势, 确定制约发展的关键因素, 现需要对通信网络整体的发展水平进行全面诊断。分别从电网阶段发展水平、骨干通信网阶段发展水平、骨干通信网拓扑状态三个角度建立一种分层、多目标融合的地市电力骨干通信网全景诊断指标模型, 利用多级可拓算法, 最终以等级的形式给出通信网发展水平的诊断结果。根据已建立的诊断指标模型, 以三个典型地市骨干网为研究对象, 综合诊断不同地区电力骨干通信网“十二五”期间的发展水平, 并给出了今后的发展重点及投资建议。诊断模型的建立为研究面向规划发展的地市电力骨干通信网建设状况提供了解决方法和思路。

关键词: 地市电力骨干通信网; 诊断; 多目标融合; 全景诊断模型; 多级可拓法

Development level diagnosis of city power backbone communication network based on multilevel extension method

LI Li¹, ZOU Yingjie², LUO Tiantian², WU Runze²

(1. State Power Economic Research Institute of Jibei, Beijing 100160, China;

2. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To analyze the development trend of city power backbone communication network in particular stage and determine the key factors restricting the development, it is necessary to make a comprehensive development level diagnosis for the whole communication network. This paper establishes a layered, multi-objective fusion panoramic diagnosis index model for city power backbone communication network from the aspects of the grid development level, backbone communication network development level and backbone communication network topology state with multilevel extension method, and finally obtains the diagnosis results of the communication network development level in the form of grades. According to the established diagnostic index model, three typical cities are the objects of the research to make the comprehensive development diagnosis for these power backbone communication networks during the period of Twelfth Five-Year. In addition, the proposals are also given about the future development focus and the investment. The diagnostic model is provided to offer solutions and ideas for the research of construction state oriented to the planning and development of city power backbone communication network.

Key words: city power backbone communication network; diagnosis; multi-objective fusion; panoramic diagnostic model; multilevel extension method

0 引言

电力通信网作为电网生产和企业运营的支撑, 具备信息产业技术迅速更迭的特点, 但规划及前期工作理论研究薄弱, 相对滞后的研究能力及管理手段与“互联网+”快速发展的需求之间已出现矛盾。分析现有的网络规划研究, 大多是针对运行网络的评估, 更关注细节、突发事件概率及应对策略, 因此对通信网运行的评估是一种动态的、针对具体网

络及系统的单层次评估且多是针对网络可靠性及风险等某个方面的评估。

国内对电力通信网可靠性的研究主要包括两个方向: 电力通信网通信通道可靠性和电力通信网可靠性管理。在通信通道可靠性方面, 文献[1]通过有效性测度对电力通信网可靠性进行了研究, 建立了通信电路的有效性模型, 并提出了业务有效性风险的概念, 将可靠性与风险分析结合起来; 在电力通信网可靠性管理方面, 基于对其特殊性的分析, 有

研究^[2-4]指出了电力通信网设计、实施、运维和战略可靠性所包含的研究内容，同时对建立电力通信网可靠性及风险评估体系等问题进行了分析说明；文献^[5-6]对电力通信系统运行中影响其可靠性的因素进行了分析，从可靠性因果关系和网络分层的角度提出了电力通信系统可靠性研究的思路和方法。现有的网络评估方法多数未对物理资源到网络架构的纵向变化进行分析，不能准确地反映网络设计的水平，没有从发展角度对通信网整体状况进行研究。

另外，国内外对通信网整体性的研究也已形成一些评估软件系统，且大部分针对公共通信网，研究内容以网络性能为主，且无线网、IP网是公网通信研究的重点^[7-10]。电力通信网业务的逻辑星形结构，其存在上下行数据严重不匹配、站点布置及光缆路径方式受限于电网结构以及多梯度的可靠性要求问题，因此一系列针对公共通信网整体性评估的软件无法完全适用于电力通信网的规划设计工作。

电力系统中关于发展水平诊断分析主要是电网领域，而针对地市电力骨干通信网的综合诊断分析，并结合建设、投资的综合性研究更是处于空白状态。科学规划是电力通信网持续健康发展的必要手段，客观、全面、常态化的电力通信网诊断是项目规划前期的基础。因此本文提出了一种分层、多目标融合的电力四级骨干通信网全景诊断模型，将多级可拓评估方法运用到地市电力骨干通信网综合发展水平的诊断评估中，不局限于对全景模型某层中的某单一目标进行诊断评判，还可以针对不同层次中的多个诊断目标分别进行评判分析，最后形成一般性的综合诊断结论。针对不同技术、经济指标的评估结果指出电力通信网络在特定发展阶段存在或潜在的问题，以明确未来投资重点，提升发展质量和发展能力。

1 电力骨干通信网诊断模型

1.1 网络诊断的定义

“诊断”一词原为医学用语，从医学角度对人们的精神和体制状态做出判断^[11]。对骨干通信网进行诊断就是对某一时间节点或某一时间段内的骨干通信网建设发展状况进行体检，查找存在及潜在的健康问题，发现需进一步研究、重点解决的要点，确定基本诊断问题及发展建议，形成最终客观的通信网体检报告。评估与诊断的区别在于，评估即评价、估计，仅针对既定条件形成评价结论，既不寻找导致结果的关键因素，亦不给出发展建议。而诊断既要形成结论，也要找出导致结果的关键因素，并给出发展建议。

1.2 电力通信网诊断的内容及目标

地市骨干通信网汇聚 10 kV 接入网、支撑省级骨干网，是涉及电压等级、站点类型、业务种类最多的网络基本单元。地市骨干通信网的包容性、复杂性、差异性问题在各级通信网中最为突出。对地市骨干通信网进行客观诊断、全面评估骨干通信网发展水平，有助于发现问题、查找不足，各地市公司协调发展，合理安排投资计划；具体应用在规划工作中是规划编制的基础，是规划目标确定、规划落实评价的重要标准；在专业管理方面为形成大数据支撑确定电网与电力通信网的关联度奠定基础，结合了技术、经济的综合分析为领导决策提供基础支撑。

1.3 分层、多目标融合的全景诊断指标模型

电力通信网发展水平诊断是一个复杂的过程，需要由一系列代表性指标按一定的结构层次组合形成指标模型。通过对地市电力骨干通信网的特性进行研究，依照综合性、科学性和灵活使用性的原则选取指标，需要根据可采集到的各项阶段统计数据，建立地市电力骨干通信网综合发展水平的全景诊断指标模型。模型的二级指标集为电网阶段发展水平、骨干网阶段发展水平、骨干网拓扑状态三个方面的内容，其下包含对应的多个子指标。全景诊断指标模型如图 1 所示。

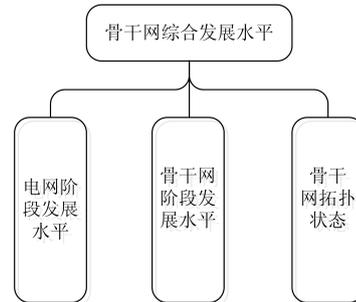


图 1 地市电力骨干通信网综合发展水平全景诊断指标模型
Fig. 1 Diagnosis index system of comprehensive development level of city electric power backbone communication network

1.3.1 电网阶段发展水平

电力骨干通信网发展水平是在地区电网发展水平的基础上建立起来，因此需要考虑该地区的电网基本建设规模和投资收益情况。为实现不同区域间的可比性，除了从绝对数量的角度进行分析，更重要的是考虑电网建设的发展趋势。电网阶段发展水平子指标主要分为三大类：电网建设规模、电网年负荷和电量增长状况、电网成本及投资状况。电网阶段发展水平指标数据一般从电网年度总结及规划报告中收集。图 2 所示的地市电网阶段发展水平指

标体系较为详细地列出了部分具体子指标。

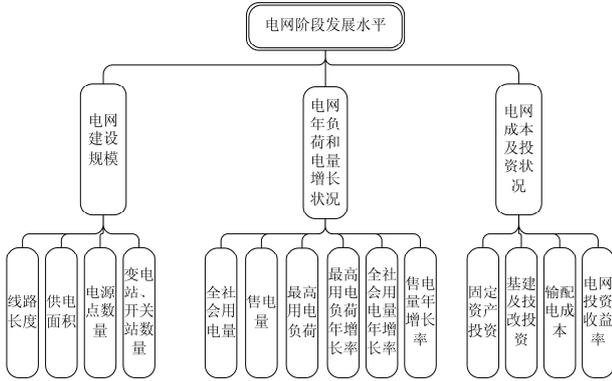


图2 电网阶段发展水平指标体系

Fig. 2 Diagnosis index system of staged development level of city's power grid

令电网投资收益率为 S_n , 则

$$S_n = \frac{S_d - T_d}{T_d} \quad (1)$$

式中: S_d 表示售电总收益; T_d 表示电网总投资。电网投资收益率用于评估区域内电网总投资以及售电总收益统计。

1.3.2 骨干通信网阶段发展水平

电力骨干通信网阶段发展水平主要从技术角度对网络状态进行分析, 从电力骨干通信网的装备水平、网络水平、通信网成本与投资状况方面构建诊断指标集合, 如图3所示。

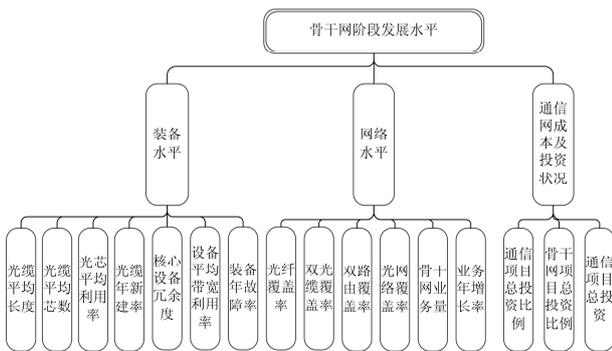


图3 骨干通信网阶段发展水平诊断指标体系

Fig. 3 Diagnosis index system of staged development level of city's backbone communication network

其中, 通信项目总投资比例为通信项目的投资量占当年电网项目投资量的比例; 骨干网项目总投资比例以当年通信项目总投资为基准计算得到。这两项指标主要用于衡量单个通信网项目阶段建设是否与电网及通信网总项目投资规划协调一致。其他诊断指标可由台账直接生成或人为定义台账属性生成。

1.3.3 骨干通信网拓扑状态

运用地市电力骨干通信网拓扑状态指标体系形成拓扑状态发展水平诊断结论, 分析地区光纤通信网络的结构可靠性, 包括物理层拓扑状态的完备性和路由可靠性等方面, 具体包括网络平均最短路径、聚类系数、成环率、中心节点收敛度以及 220 kV 变电通信站平均连接度等, 骨干通信网拓扑状态诊断指标体系如图4所示。

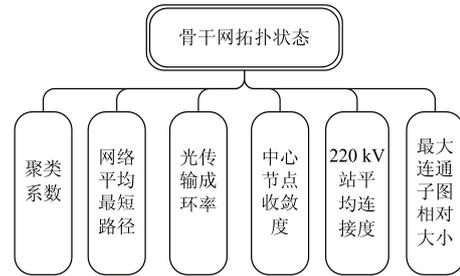


图4 骨干通信网拓扑状态诊断指标体系

Fig. 4 Diagnosis index system of current topology state of backbone communication network

(1) 聚类系数: 由邻居节点之间的实际边数与所有可能连接边总数之比得到。网络聚类系数越大, 表明节点之间的平均集聚程度越高。不同地区的电力通信网规模可能存在较大差异, 而聚类系数是一种局部参数, 与网络的实际规模无关。

(2) 网络平均最短路径: 为网络全局参数, 一般与网络规模成正比, 但不排除存在节点数较大、平均最短路径较小的可能性。

(3) 光传输成环率: 主要用于计算 35 kV 及以上光传输站点之间的成环程度, 表征通信网节点成环保护情况, 是衡量通信网运行可靠性的关键参数之一。

(4) 中心节点收敛度: 为体现地市骨干网整体的通信汇聚能力, 本文定义了中心节点收敛度 C_i 。

$$C_i = \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^{N-1} \frac{1}{d_{ij}}}{N-1} \quad (2)$$

式中: N 为网络中的节点总数; d_{ij} 表示中心节点 i 与网络中其他节点 j 之间的最短路径距离。中心节点收敛度 C_i 为中心节点到网络所有节点之间最短路径倒数之和的均值, 能够较为直观地反映地市骨干通信网络的拓扑结构紧密程度。 C_i 越大, 表明中心节点与其他节点的关系越紧密, 中心节点与其他节点间的数据可靠传输越容易实现, 网络的汇聚能力越好。

(5) 220 kV 站平均连接度: 由于地市骨干网 500 kV 变电站较少, 220 kV 变电通信站数目一般为

10%左右,属于网络第二大类汇聚节点,对于网络的连通可靠性起到了关键作用。平均连接度越高,表明 220 kV 变电站的重要程度越突出,网络结构更加合理。

(6) 最大连通子图相对大小:假设节点度排名前 10%的节点受到蓄意攻击后,此时统计网络的最大连通子图的节点数目占总节点数的比值,用于直接反映网络遭到攻击与破坏的程度。最大连通子图的相对大小越大,表明通信网络抵御蓄意攻击的能力越强,电力通信网的连通性和抗毁性越好。

光传输网络的结构分析结论在短时间内受到人为统计因素与设备品牌类别、替换及总量增减的影响,因此结论可信度不高,而实际通信网的物理结构不易发生改变,站点与光缆在短时间内的新建率低,基本不影响整体的光网络架构,因此选取地市通信网光缆拓扑结构作为网络结构分析的依据。

2 地市骨干通信网发展水平诊断分析

2.1 多级可拓的定义

可拓学是对经典数学的一种拓展,通过基元建立起结合事物和量的可拓模型,再利用关联函数来对单因素事物进行评价^[12-13]。多级可拓评价方法是在单因素可拓评价的基础上,引入指标权重的概念,通过单因素关联度与其权重的复合运算得到其上层因素的关联度,将其应用到隶属度的计算过程中,最后根据最大隶属度原则确定待评价对象的多级可拓评价结果^[14]。

将多级可拓的方法运用于电力骨干通信网综合发展水平的诊断过程中,达到综合使用定性与定量评估方法完成指标诊断的目的,从而发现特定地区电力骨干通信网在特定时间段内存在的建设短板以及其产生的原因。

2.2 骨干通信网综合发展水平诊断流程

在全景诊断指标模型中,多级可拓评级方法将利用指标权重、实际指标集和每一等级最优(劣)解集的复合运算从而得到上一级指标的隶属度,根据最大隶属度原则并结合上一级指标的权重与评价结果的复合运算得到更上一级指标的评价结果。具体诊断流程如图 5 所示。

诊断过程主要分为如下 5 个步骤。

步骤 1:首先构建全景诊断指标模型作为整个诊断分析的基础,指标选取的合理与否直接影响到最终的评价结果。

步骤 2:收集基础数据对指标值进行无量纲化处理。根据整个评价指标体系的需要,进行实际调

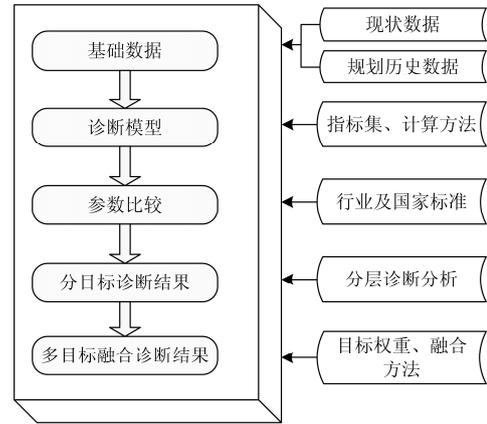


图 5 诊断分析流程

Fig. 5 Diagnostic analysis process

查,收集原始数据,然后依据指标的性质对指标实际值进行标准化处理。

步骤 3:根据行业规范或国家标准对参数进行比较以确定指标权重。根据实际情况选择不同的标度法对统计指标间进行两两相对重要度比较。为了消除不确定的主观判断,比较结果用区间数表示。

根据 1~5 标度法对 n 个指标进行两两相对重要度比较。为了降低主观判断的不确定性,比较结果用区间数表示。最终形成的区间数判断矩阵如式(3)所示。

$$A = \begin{bmatrix} [1,1] & [a_{12}^-, a_{12}^+] & \dots & [a_{1n}^-, a_{1n}^+] \\ [a_{21}^-, a_{22}^+] & [1,1] & \dots & [a_{2n}^-, a_{2n}^+] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ [a_{n1}^-, a_{n1}^+] & [a_{n2}^-, a_{n2}^+] & \dots & [1,1] \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, a_{ij}^+ 和 a_{ij}^- 分别表示第 i 个指标和第 j 个指标相对重要度比较结果的上下限。根据区间数的运算法有 $A = [A^+, A^-]$, 其中 A^+ 、 A^- 为上下限矩阵。

根据区间数特征根法^[13],计算 A^+ 、 A^- 对应的最大特征根 λ_{\max}^+ 、 λ_{\max}^- 以及对应的具有正分量的归一化特征向量 w^+ 、 w^- 。然后运用式(4)、式(5)计算判断矩阵 A 的正分量系数 m 和负分量系数 k 。

$$m = \sqrt{\sum_{j=1}^n (1 / \sum_{i=1}^n a_{ij}^-)} \quad (4)$$

$$k = \sqrt{\sum_{j=1}^n (1 / \sum_{i=1}^n a_{ij}^+)} \quad (5)$$

计算矩阵 A^+ 、 A^- 对应的一致性检验指标值 CR^+ 、 CR^- ^[15],当 $(CR^+ - CR^-)/2$ 的值小于 0.1 时,则通过一致性检验。最后得到叶子指标区间权重向量为 $W = [kw^-, mw^+]$,二级指标的区间权重向量为 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)$,一般可通过专家评价得出,其中 k 为区

间数, μ_k 为指标的权重。确定指标权重是整个指标评价过程中的关键步骤之一, 其是否规范合理直接影响着各方案的评价值。

步骤 4: 采用多级可拓诊断评级方法得到分目标诊断结果。需要确定包括待诊断物元、经典域、每一等级的最优解集和最劣解集、指标实际值与各个等级的关联度和指标实际值与各个等级的隶属度等一般过程, 在此不详细说明。

利用全景诊断指标模型中的各个层级目标以及多级可拓算法, 通过下层指标的具体值对上层指标进行等级评价, 诊断结果等级为 $j_k (1 \leq j_k \leq n)$ 。诊断目标的评价结果等级可用式(6)表示。

$$j^* = \sum_{k=1}^t j_k \mu_k \quad (6)$$

其中, t 为上层同一指标下的所有子指标的个数。由于 μ_k 是区间权重, 所以得到的 j^* 也为区间数, 最后诊断对象的评价等级即介于区间数之间。

步骤 5: 分析多目标融合结果。按照步骤 3 所示过程, 结合二级指标的权重及评级结果, 得到一级指标即网络综合发展水平诊断评级结果。

3 地市骨干通信网发展水平诊断仿真分析

3.1 典型地区选取依据

选取某省三个典型地级市 T、L、C 的骨干通信网作为诊断对象, 其中地区 T 售电量位于三者之首, 站点分布密集, 电网结构复杂, 用户站多; 地区 L 其地理结构狭长, 且北区与南区、市区分离, 负荷增长速度居各地之首; 地区 C 地处山区, 地广人稀, 站点稀疏, 平均路径长度大, 新能源潜力大。分别从 3 个地区“十二五”期间电网阶段发展水平、骨干网阶段发展水平、骨干网拓扑状态 3 个方面全面诊断这 5 年间地市骨干通信网的综合建设水平。

3.2 骨干网综合发展水平诊断分析

本文根据 1~5 标度法对 m 个指标进行两两相对重要度比较, 将二级指标与通信网综合发展水平诊断结果划分为 5 个等级, 等级 1~5 分别对应优秀、良好、中等、合格、欠佳。由于电网及通信网阶段发展水平指标数据量较大, 现仅以三个地区骨干网拓扑状态为例, 首先根据图 4 所示的诊断指标模型进行指标数值计算, 如表 1 所示。

由于地区 T 网络规模为三个地区中最大, 因此其聚类系数最低, 网络平均最短路径较大, 这与地区 T 骨干通信网实际网络拓扑情况基本相符, 且 220 kV 变电通信站平均连接度最高, 说明此地区 220 kV 变电通信站点的汇聚能力较为理想; 地区 L 骨干通

表 1 骨干网拓扑状态指标值

二级指标	内容	指标值		
		地区 T	地区 L	地区 C
骨干网拓扑状态	网络平均最短路径	6.0538	6.1236	4.8615
	聚类系数	0.1163	0.1753	0.1245
	光传输成环率	0.6555	0.6198	0.6075
	220 kV 站平均连接度	5.4063	5.0870	4.8947
	中心站点收敛度	0.2279	0.2092	0.2537
	最大连通子图相对大小	0.2410	0.5085	0.6071

信网主要有两大分区组成, 在节点数目与地区 C 相差不多的情况下, 其网络平均最短路径最大; 三个地区骨干通信网的光传输节点成环率基本在 0.6 左右, 未有明显差异; 攻击每个网络前 10% 的重要节点, 结果显示地区 T 最大连通子图的相对大小仅为 0.2410, 说明最多只有约 1/4 的节点仍保持连接, 网络连通状况最差, 地区 C 骨干通信网 60% 的节点仍能够保持连通状态, 网络抗毁性能最优。不同参数显示三个典型地区的拓补网络结构都存在一定的优势与问题, 因此无法通过单一因素评价网络的整体发展水平。

根据步骤三, 令骨干网拓扑状态下的指标区间数判断矩阵 $A_3 = [A_3^+, A_3^-]$, 经归一化后, A_3^+, A_3^- 最大特征值对应的特征向量分别为

$$w_3^+ = [0.107, 0.0649, 0.276, 0.155, 0.289, 0.107]$$

$$w_3^- = [0.0940, 0.0576, 0.292, 0.171, 0.292, 0.0940]$$

因此可得到骨干网拓扑状态各指标区间权重向量:

$$W_3 = \begin{bmatrix} [0.0943, 0.121], [0.0579, 0.0730], [0.293, 0.310], \\ [0.172, 0.174], [0.293, 0.325], [0.0943, 0.121] \end{bmatrix}$$

现假设二级指标间的权重差异不明显, 可令对应的区间权重向量 $\mu = [0.333, 0.333, 0.333]$ 。

类似地, 根据图 2、图 3 中的骨干网综合发展水平二级指标体系模型计算指标值, 结合多级可拓评价方法, 按照 2.2 节中的诊断流程得到不同地区在各个对应二级指标下的评价等级值及汇总后得到的四级网综合发展水平诊断结论, 如表 2 所示。

对 3 个二级指标分别进行诊断, 结合具体的指标数据可以得到如下结论。

1) 电网阶段发展水平

地区 T 的电网发展水平最高, 地区 C 电网发展水平一般, 地区 L 电网发展最不理想。电网发展水平的诊断结果很大程度上受地区电网规模的影响:

表 2 地市电力骨干通信网诊断结果

Table 2 Diagnosis results of city electric power backbone communication network

诊断目标	目标层级	诊断结果		
		地区 T	地区 L	地区 C
电网阶段发展水平	二级	1/优秀	5/欠佳	3/中等
骨干网阶段发展水平	二级	2/良好	5/欠佳	4/合格
骨干网拓扑状态	二级	3/中等	1/优秀	3/中等
骨干网综合发展水平	一级	1/优秀	4/合格	2/良好

地区 L 电网规模仅为地区 T 电网规模的 1/3 左右，电网发展水平受到地域面积的限制；地区 C 电网规模介于地区 T 和地区 L 之间，但其用电量较地区 L 少，且仅为地区 T 用电量的 1/5 左右，但用电量年平均增长率比地区 T 高出 2.5 个百分点。

三个典型地区电网建设过程中的主要问题有：

地区 T 变电站及电网线路建设较快，但存在电网负荷年增长缓慢的问题；地区 L 规模较小，其站点已趋饱和，线路新增稳定，但用电量与发电量增长情况不一致；地区 C 变电站与线路建设处于稳定增长当中，但电网负荷年增长波动较大。

2) 骨干网阶段发展水平

地区 T、地区 L 与地区 C 的骨干通信网阶段发展水平分别为良好、欠佳与合格。地区 T 骨干光网络规模最大，设备国产化率为三个地区中最高，但其面临光缆老化率较严重、业务增长缓慢、光传输设备品牌杂乱等突出问题，亟需提高国产设备的占有率与已有国产设备品牌的统一化；地区 L 光骨干通信网络规模最小光缆建设及光网络覆盖情况良好，业务增长迅速，但面临设备国产化率较低，进口设备依赖程度过高、设备老化问题严重等诸多问题，致使其骨干通信网阶段发展水平为三个地区中相对最低，今后需加大骨干网的改造力度；地区 C 的数据网与传输网已达到全覆盖，除却光传输设备新增状况一般、双光缆及双路由覆盖情况较差的问题外骨干网的其他运行状况良好。

将电网与通信网线路建设情况对比分析还可以发现，在 2011 年到 2015 年间，地区 T 光缆建设与电缆建设并不同步；地区 L 光缆建设增长率与电缆建设增长率在五年间不断降低，但由于 2011 年光缆大量新建，光网络覆盖率近乎 100%，2012 年到 2015 年光缆长度新增小于电缆建设速度，整体上，地区 L 光缆建设与电缆建设近趋同步；地区 C 电缆建设速度高于地区光缆建设速度，但两者的建设增长率都呈现同步降低趋势，两网线路建设已趋饱和。

3) 骨干网拓扑状态

地区 T、地区 L 与地区 C 骨干通信网拓扑状态分别为中等、优秀、中等。地区 T 的网络抗毁性能最差；地区 L 骨干网规模最小，网络结构狭长、节点分散，但其网络抗毁性能较好，节点之间的联系较为紧密，其余的指标均为次优水平，最终拓扑网络的诊断评价结果最好；地区 T 骨干网的突出问题主要是抗毁性能较差；地区 C 220 kV 变电通信站在网络中的重要程度不够突出。最终地区 T 与地区 C 的拓扑网络诊断结果都处于一般水平。

4) 骨干网综合发展水平

最终的诊断评级结果为地区 T 的骨干网综合发展水平优秀，地区 C 骨干网发展良好，地区 L 骨干网综合水平为合格。

4 结论

本文基于可拓评级的指标量化评价方法，构建了一种分层、多目标融合的电力地市骨干通信网诊断模型。根据对“十二五”期间三个典型地区的各项指标统计数据，诊断不同地市级骨干网的综合发展水平；各项指标的选取体现当前的网络建设水平评价需求，同时兼顾规划发展中的重点内容；对指标灵活设定权重范围，在一定程度上降低主观判断的不确定性；实例的分层诊断结论能够直接发现网络阶段建设过程中各个方面的不足之处，并可用于分析区域网络发展的不均衡性，为“十三五”规划方案提供技术支撑；还可从诊断方法和目标角度为各级电力骨干通信网发展水平诊断提供解决思路。

参考文献

- [1] 高会生. 电力通信网可靠性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
GAO Huisheng. Research on reliability of power communication networks[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [2] 金鑫. 高压直流输电系统极控信号通信网络可靠性分析[J]. 电力系统保护及控制, 2015, 43(12): 110-116.
JIN Xin. Reliability analysis on HVDC pole control signal transmission network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 110-116.
- [3] ZHAO Ziyang, LIU Jianming, ZHANG Ruirui, et al. Research of safety and risk assessment technology for power system communication services[C] // 2010 International Conference on Power System Technology. Hangzhou, China: IEEE Power Engineering Society (IEEE/PES), Chinese Society for Electrical Engineering (CSEE), 2010: 110-111.

- [4] 程晓荣, 张兰, 岳娇. 基于粗糙集属性约简的评估模型在电力通信网风险评估中的应用及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 44-48.
CHENG Xiaorong, ZHANG Lan, YUE Jiao. Application and implementation of the assessment model based on rough set attribute[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 44-48.
- [5] DINH T N, YING Xuan, THAI M T, et al. On new approaches of assessing network vulnerability: hardness and approximation[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(2): 609-619.
- [6] 樊冰, 唐良瑞. 电力通信网脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1191-1197.
FAN Bing, TANG Liangrui. Vulnerability analysis of power communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1191-1197.
- [7] 李淼. 无线通讯网络中特殊区域的可靠性分析及方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
LI Miao. Research on reliability of specific area for wireless communication network[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [8] 杨文国, 朱建明, 黄钧. 高质量分层结构电信网络设计中的可靠性问题研究[J]. 计算机学报, 2014, 37(11): 2366-2373.
YANG Wenguo, ZHU Jianming, HUANG Jun. Research on reliability for high quality and multilevel telecom network design[J]. Chinese Journal of Computer, 2014, 37(11): 2366-2373.
- [9] 何荣希, 张治中, 李乐民, 等. IP/MPLS over WDM 网中基于共享风险链路组限制的共享通路保护算法[J]. 电子学报, 2002, 30(11): 1638-1642.
HE Rongxi, ZHANG Zhizhong, LI Lemin, et al. A shared path protection algorithm in IP/MPLS over WDM networks under shared risk link groups constraints[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(11): 1638-1642.
- [10] 田青, 郝雪, 耿立卓, 等. 电力传输网综合培训仿真系统的设计与实现[J]. 陕西电力, 2016, 44(5): 69-73.
TIAN Qing, HAO Xue, GENG Lizhuo, et al. Design and implementation of transmission network integration training simulation system for electric power communication[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(5): 69-73.
- [11] 何建敏, 于跃海. 基于粗集理论的医学诊断规则提取方法[J]. 系统工程学报, 2002, 17(6): 519-525.
HE Jianmin, YU Yuehai. Extracting medical diagnosis rules based on rough sets theory[J]. Journal of System Engineering, 2002, 17(6): 519-525.
- [12] 蔡文, 杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1190-1199.
CAI Wen, YANG Chunyan. Basic theory and methodology on extenics[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1190-1199.
- [13] 王涛云, 马宏忠, 崔杨柳, 等. 基于可拓分析和熵值法的GIS状态评估[J]. 电力系统保护及控制, 2016, 44(8): 115-120.
WANG Taoyun, MA Hongzhong, CUI Yangliu, et al. Condition evaluation of gas insulated switchgear based on extension analysis and entropy method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 115-120.
- [14] LI Li, LUO Tiantian. A new method for the diagnosis of power backbone communication network based on extension rating[C] // The 4th National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (NCEECE 2015): 899-904.
- [15] 李滨, 王亚龙. 基于多级可拓评价法的变电站建设项目功能效果后评价[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1146-1152.
LI Bin, WANG Yalong. A multilevel extension assessment based post-evaluation on function and effect of substation construction project[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1146-1152.

收稿日期: 2016-06-07; 修回日期: 2016-07-24

作者简介:

李莉(1979—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力通信规划及项目评审工作;

邹英杰(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统通信及其可靠性评价。E-mail: fenghoudejiang@163.com

(编辑 魏小丽)