

文章编号: 1000-5013(2015)01-0011-06

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0011

地市级电网发展诊断体系及综合评价

史智萍¹, 单体华¹, 刘文峰², 张兴平²

(1. 国家电网冀北电力有限公司 经济技术研究院, 北京 100045;
2. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

摘要: 结合地市级电网的特点, 从电网发展安全与质量、速度与规模、协调性、运行效率及经济效益 5 个维度对电网发展进行综合评价, 并根据实地调研和数据挖掘方法确定了 46 个评价指标, 从而构建了电网发展评价与诊断双层结构模型. 利用多层次序关系法和模糊综合评价模型对三个样本的城市电网进行实证分析, 利用雷达图从三个层次对电网发展水平进行分析, 指出电网发展过程中存在的问题, 为进一步促进电网的高效健康发展提供了决策依据.

关键词: 电网; 评价指标体系; 序关系; 模糊数; 地市级
中图分类号: TM 727.2 **文献标志码:** A

在我国城镇化建设的进程中, 地市级电网与当地社会经济的协同发展起着关键的作用. 国内学者针对我国的电网建设运营评价展开了大量研究, 并取得一系列成果^[1-17]. 文献[2]研究了电网企业的特征, 构建了描述可持续发展的指标体系. 文献[3]结合电网建设的特点, 建立了电网建设可持续发展评价指标体系. 文献[4]建立了电网发展指标体系, 研究了指标的度量方法. 文献[5]采用鱼骨图及层次分析相结合的方法对评价指标进行选取, 建立配电网综合评价指标体系结构. 文献[6]建立地区电网运行方式评价的指标体系, 实现了对地区电网运行方式的全面综合评价. 文献[7]基于分层、分类思维方式建立农村中低压配电网规划指标评估体系. 文献[8-9]从技术性、经济性、社会性和实用化等方面建立智能电网试点项目评价指标体系框架. 文献[10]采用层次分析法与模糊综合评价相结合的综合评价方法, 建立了电网调度系统安全运行的指标体系. 文献[11]构造了一套包括经济性指标、技术性指标、社会环境指标、适应性指标、风险性指标在内的较为合理完整的电网规划综合指标体系. 文献[12]从反映配电网建设规模的主导信息出发, 运用统计分析等原理和方法, 建立配电网建设规模的定量评估指标体系. 文献[13]从形态结构、技术与管理、运行绩效与绿色发展 4 个评价维度, 提出一套“世界一流电网”的评价指标体系. 文献[14]依据协调发展的内涵和机理, 构建了新能源与智能电网协调发展评价指标体系. 文献[15]构建了智能配电网三级评估指标体系的初步框架, 给出部分重要评估指标的定义和量化公式. 文献[16]构建了针对我国大都市电网特点的综合评价体系, 通过大都市电网实例说明指标体系及评价模型的合理性与适用性. 文献[17]通过逻辑框架法分析, 对电网建设项目进行后评价. 本文结合地市级电网运行的特点, 构建具有诊断功能的电网发展评价体系, 采取模糊层次法对三地市级电网发展进行综合评价, 为电网规划和改造提供决策依据.

1 地市级电网运行及发展诊断体系构建

1.1 诊断指标体系构建

电网是技术密集型产业, 电能的发输配供用是同时完成的, 保证电网的安全运行并提供合格的电能是电网运行的首要职能. 因此, 电网发展的安全与质量是衡量电网发展的基本因素. 其次, 电网是经济增

收稿日期: 2015-01-12

通信作者: 史智萍(1979-), 女, 高级工程师, 主要从事输电网规划与电网诊断评估的研究. E-mail: szp19@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71473083); 国家电网冀北电力有限公司经济技术研究院科研基金资助项目(8FE000M14001)

长与社会发展重要的基础设施,电网发展的速度与规模能否支撑当地社会经济发展的需要是电网的重要功能. 第三,不同电压等级电网之间的协调运行关系到整个电网的有序、高效运行. 因此,电网自身的协调性也是一个重要的分析内容. 最后,电网也是资金密集型产业,作为电网投资和建设主体的电网企业必须要提高电网资产的利用效率和盈利能力. 因此,电网的发展效率与经营效益对于电网的可持续发展具有重要的意义.

从电网发展速度与规模、电网发展安全与质量、电网发展协调性、电网发展效率和电网经济效益 5 个方面(即准则层)对电网的发展进行诊断. 在充分调研、征求专家意见的基础上,利用数据挖掘的方法筛选出 46 个具体评价指标(即指标层). 电网发展诊断的多层次评价指标体系,如表 1 所示.

表 1 地市级电网发展诊断指标体系

Tab. 1 Development diagnosis index system of Municipal power

| 准则层 | 一级指标层 | 二级指标层 |
|---|------------------------------|---|
| S ₁ 电网发展安全与质量 (0. 302) | I11:主变 N-1 通过率(0. 273) | I111:220 kV 主变 N-1 通过率(0. 342) I112:210 kV 主变 N-1 通过率(0. 336) I113:35 kV 主变 N-1 通过率(0. 322) |
| | I12:线路 N-1 通过率(0. 273) | I121:220 kV 主变 N-1 通过率(0. 340) I122:110 kV 主变 N-1 通过率(0. 335) I123:35 kV 主变 N-1 通过率(0. 325) |
| | I13:10 kV 互联率(0. 167) | — |
| | I14:10 kV 市辖电缆化率(0. 167) | — |
| | I15:瓶颈线路占比(0. 120) | — |
| S ₂ 电网发展速度与规模 (0. 216) | I21:电网发展弹性系数(0. 275) | — |
| | I22:10 kV 电网规模合理性(0. 211) | — |
| | I23:电源消纳水平(0. 239) | I231:220 kV 电源消纳水平(0. 361) I232:110 kV 电源消纳水平(0. 324) I233:35 kV 电源消纳水平(0. 315) |
| | I24:主变容载比(0. 275) | I241:220 kV 主变容载比(0. 358) I242:110 kV 主变容载比(0. 327) I243:35 kV 主变容载比(0. 315) |
| | I31:10 kV 城乡供电能力协调性(0. 234) | — |
| S ₃ 电网发展协调性 (0. 179) | I32:供电半径发散度(0. 245) | I321:220 kV 供电半径发散度(0. 347) I322:110 kV 供电半径发散度(0. 335) I323:35 kV 供电半径发散度(0. 318) |
| | I33:容载比发散度(0. 253) | I331:220 kV 容载比发散度(0. 335) I332:110 kV 容载比发散度(0. 334) I333:35 kV 容载比发散度(0. 331) |
| | I34:各级电网协调度(0. 268) | I341:220 kV 各级电网协调度(0. 507) I342:110 kV 各级电网协调度(0. 493) |
| | I41:线路最大功率占比经济输送功率(0. 202) | I411:220 kV 线路最大功率占比经济输送功率(0. 347) I412:110 kV 线路最大功率占比经济输送功率(0. 336) I413:35 kV 线路最大功率占比经济输送功率(0. 317) |
| S ₄ 电网发展效率 (0. 162) | I42:线路等效平均功率占比经济输送功率(0. 204) | I421:220 kV 线路等效平均功率占比经济输送功率(0. 347) I422:110 kV 线路等效平均功率占比经济输送功率(0. 331) I423:35 kV 线路等效平均功率占比经济输送功率(0. 322) |
| | I43:主变等效平均功率(0. 194) | I431:220 kV 主变等效平均功率(0. 341) I432:110 kV 主变等效平均功率(0. 339) I433:35 kV 主变等效平均功率(0. 320) |
| | I44:主变最大负载正态分布(0. 200) | I441:220 kV 主变最大负载正态分布(0. 344) I442:110 kV 主变最大负载正态分布(0. 334) I443:35 kV 主变最大负载正态分布(0. 322) |
| | I45:线路最大负载正态分布(0. 200) | I451:220 kV 线路最大负载正态分布(0. 342) I452:110 kV 线路最大负载正态分布(0. 337) I453:35 kV 线路最大负载正态分布(0. 321) |
| | | |

续表

Continue table

| 准则层 | 一级指标层 | 二级指标层 |
|---------------------------------------|---------------------------|-------|
| S ₅ 经济 效益 (0.141) | I51:单位电网投资增售电量(0.102) | — |
| | I52:10 kV 及以下配网线损率(0.280) | — |
| | I53:单位电网资产售电收益(0.152) | — |
| | I54:每万元电网资产运行维护费(0.254) | — |
| | I55:废旧设备回收率(0.212) | — |

对于电网发展安全与质量,主变和线路的 $N-1$ 通过率及互联率是重要的诊断指标,样本地区涉及到的电压等级主要包括 220,110,35,10 kV. 考虑到当地的电网结构,主变和线路的 $N-1$ 通过率涉及到前 3 个电压等级,而互联率则主要考虑 10 kV. 另外,通过对某地的三个城市进行调研,10 kV 市辖电缆化率及瓶颈线路占比也是比较重要的指标.

电网发展速度与规模主要反映电网与经济发展、电源装机接入、供应负荷电力等需求的适应性和协调性. 筛选出的主要指标包括电网发展弹性系数、电网规模合理度、电源消纳水平以及主变容载比. 经过专家讨论并结合当地实际情况,电网规模合理度选用 10 kV 电压等级更符合地市级电网的特点;电源消纳水平和主变容载比则包括 220,110,35 kV.

电网发展协调性主要从 4 个指标来衡量,即城乡供电能力协调性、反映电网网架密集程度是否合理的供电半径发散度、评价市辖和县域线路容载比分布发散程度的容载比发散度,以及各级电网协调度. 根据专家意见和当地地市级电网的特点,这 4 个方面分别选择了不同电压等级的线路.

对于电网发展效率,主要从 5 个方面进行分析,即线路最大功率占比经济输送功率、线路等效平均功率占比经济输送功率、主变等效平均功率、主变最大负载正态分布和线路最大负载正态分布. 对于电网企业经济效益,文中通过电网的投资、运行、维护、回收 4 个角度来对电网的经济效益进行有效评价.

1.2 指标模糊隶属度确定及诊断分析

地市级电网发展评价指标体系具有多层次、多指标等特点. 利用模糊数和模糊隶属度来直观地指出某指标所反映的内容是好还是不好. 因此,将诊断指标分为 5 级,即指标的判断集均定为 $V=(\text{很好,较好,一般,差,很差})$. 在具体确定不同等级时,以某省不同地市级电力公司同业对标数据作为参考,对各个指标制定了具体的判断集标准,从而确定了所有指标的模糊隶属度.

为直观地对某指标做出判断,将判断集转换为等级,即 $V=(\text{一级,二级,三级,四级,五级})$. 采用最大隶属度原则确定该指标所属的等级,若 $b_k=\max_j[b_1, b_2, b_3, b_4, b_5]$,则认为该指标评价等级为第 k 级. 当出现 b_i 和 $b_k(k=i\pm1)$ 比较接近时 $\lambda=\max b_j/\sum b_j\leqslant 0.7$ (其中, b_i 为和 b_k 最接近的值),最大隶属度原则便失效,则在评价时,令 $\delta=b_k/(b_k+b_i)$;当 $i=k-1$ 时,被评价对象为第 $(i+\delta)$ 级;当 $i=k+1$ 时,被评价对象为第 $(k-\delta+1)$ 级. 各指标等级计算结果,如图 1 所示.

如果指标位于第 2 级以内,说明该指标介于“很好”和“好”之间,这些指标应该继续保持. 该雷达图非常直观地显示了 3 个地市级电网 42 个诊断指标的状况,为提高管理水平提供了很好的决策依据.

以城市Ⅲ为例,指标 I111(220 kV 主变 $N-1$ 通过率)等 26 个指标位于该区域. 如果指标位于第 2 级和第 3 级之间,说明该指标介于“好”和“一般”之间,这些指标提升的空间较大,对电网的整体发展具

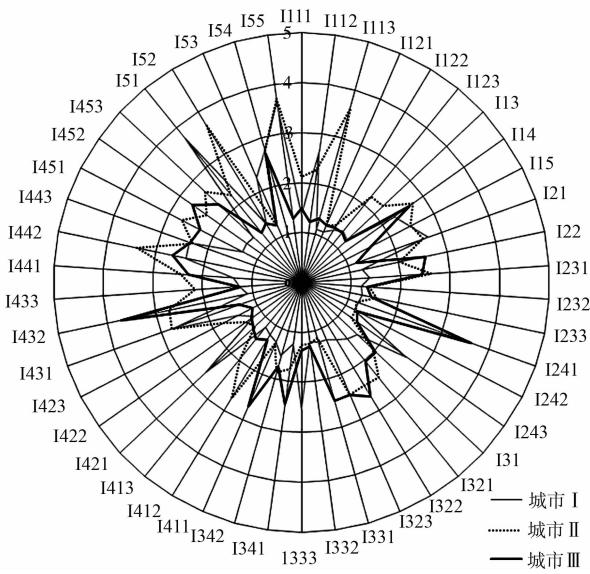


图 1 指标层雷达图

Fig. 1 Radar chart of index layer

有较大的促进作用. 以城市Ⅲ为例, 指标 I14(10 kV 市辖电缆化率)等 17 个指标位于该区间. 如果指标位于第 3 级以外, 说明该指标距离“一般”的水平还有差距. 因此, 这些指标是电网发展中的薄弱环节, 已经制约了电网的整体发展.

从图 1 可以看出: 只有少数指标位于该区间, 如城市Ⅲ有两个指标 I241(220 kV 主变容载比)和 I432(110 kV 主变等效平均功率)位于第 3, 4 级之间, 这些指标是管理层应该高度关注和重点改进的指标. 如果指标评价结果位于第 4 级以外, 那说明该指标严重地影响了电网的整体发展, 必须立即改进. 对于 3 个样本城市电网而言, 没有指标落入该区间.

2 基于三角模糊数的权重确定

序关系和层次分析法是常用的权重确定方法, 但专家通常难以给出一个确定的分数来确定两个因素比较时的相对重要程度, 而三角模糊层次分析法利用模糊隶属度的原理可以有效地解决这一问题.

如图 2 所示的三角模糊数, $a, b, c(a \leq b \leq c)$ 分别表示的是隶属于所属论域的最小可能值、最可能值和最大可能值, 而介于 a, b, c 三者之间的某一数值 x 和隶属度 y 的关系满足

$$\left. \begin{aligned} x &= a + (b - a)y, & x \in [a, b] \\ x &= c + (b - c)y, & x \in [b, c] \\ 0, & & \text{其他} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

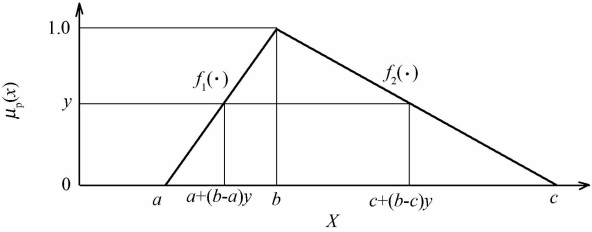


图 2 一个三角模糊数

Fig. 2 Triangle fuzzy number

将传统层次分析法中的两两因素比较矩阵中的数值用三角模糊数的方式代替, 结果如表 2 所示. 将两两比较矩阵中的数值用三角模糊数代替, 然后

进行权重的计算, 具体有如下 4 个主要步骤.

1) 计算第 i 个目标的模糊综合评价, 即

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_1}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_1}^i \right]^{-1}. \quad (2)$$

式(2)中: $\sum_{j=1}^m M_{g_1}^j = (\sum_{j=1}^m a_j, \sum_{j=1}^m b_j, \sum_{j=1}^m c_j), j = 1, 2, \dots, m;$ $[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_1}^i]^{-1} = (\sum_{i=1}^n c_i)^{-1}, (\sum_{i=1}^n b_i)^{-1}, (\sum_{i=1}^n a_i)^{-1}, i = 1, 2, \dots, n.$

2) 计算两两模糊数的可能比较值, 即

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_2 \cap M_1) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, & b_2 \geq b_1, \\ 0, & a_1 \geq c_2, \\ \frac{a_1 - c_2}{(b_2 - c_2) - (b_1 - c_1)}, & \text{其他}. \end{cases} \quad (3)$$

3) 取最小比较值作为最终值, 即有

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = \min V(M \geq M_i), \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

4) 设 $d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) (k = 1, 2, \dots, n; k \neq i)$, 则权重向量可以表示为

$$\mathbf{W}' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T,$$

将其标准化, 则可以得到标准后的向量为

$$\mathbf{W} = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T.$$

电网发展诊断指标体系涉及指标较多, 同时不同电压等级的线路共存形成网络. 因此, 许多指标都对应不同的电压等级, 比如容载比涉及到不同电压等级的容载比. 为清晰地反应诊断体系, 构建了三层

表 2 模糊数转换表

Tab. 2 Conversion scale of fuzzy number

| 语义值 | 三角模糊数 | 三角模糊倒数 |
|------|-------------|---------------|
| 相等 | (1,1,1) | (1,1,1) |
| 可能相等 | (1/2,1,3/2) | (2/3,1,2) |
| 略微重要 | (1,3/2,2) | (1/2,2/3,1) |
| 很重要 | (3/2,2,5/2) | (2/5,1/2,2/3) |
| 非常重要 | (2,5/2,3) | (1/3,2/5,1/2) |
| 绝对重要 | (5/2,3,7/2) | (2/7,1/3,2/5) |

评价指标体系;同时在计算权重时,对三层诊断指标分别计算权重,计算得到的各层诊断指标的权重如表 1 括号中的数值.

3 电网发展运行的模糊综合评价

在对地市级电网发展评价体系的构建中体现为 3 个层次,故文中构建三级级评价模型,分别利用模型(5)对每层诊断评价指标,进而得到 3 个地市级电网的综合评价结果.

$$B_i = (b_{i,1}, b_{i,2}, \cdots, b_{i,m}) = W_i \circ R =$$
$$(\omega_{i,1}, \omega_{i,2}, \cdots, \omega_{i,n}) \circ \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{2,1} & \cdots & r_{n,1} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n,1} & r_{n,2} & \cdots & r_{n,m} \end{pmatrix}.$$

(5)

式(5)中: W_i 为各层指标权重向量; R 为各层指标模糊隶属度矩阵; b_i 是综合考虑因素集中所有因素后判断对象属于第 j 个评语 V_j 的隶属度; B 是属于判断集 V 上的模糊集合;“ \circ ”代表合成算子.

为直观地反映评价结果并进行诊断,按前述指标分级办法将评价结果分为六级,并用雷达图标定 3 个城市电网发展整体水平和 5 个准则的评价等级,如图 3 所示.由图 3 可知:城市 I 和城市 III 的电网整体发展水平比较接近,分别为 1.76 和 1.83 级,介于第 1,2 级之间,即介于“很好”和“较好”之间.但城市 II 电网整体发展水平为 2.25 级,即介于“较好”和“一般”之间.因此,该城市电网整体发展水平需要大力改进.为进一步诊断各城市电网发展中存在的问题,可以从两个方面对城市电网整体发展进行诊断.

对于城市 I,电网发展安全与质量(S1)、电网发展速度与规模(S2)、电网发展协调性(S3)和电网发展效率(S4)4 个方面分别位于 1.75,1.85,1.49 和 1.63 级,都介于“很好”和“较好”之间,这 4 个方面发展得比较好.但电网经济效益(S5)的评价结果为 2.62 级,也就是介于第 2,3 级之间.因此,该指标应该有较大的提升空间.

对于城市 II,电网发展速度与规模(S2)和电网发展协调性(S3)分别位于 1.97 级和 1.88 级,而电网发展安全与质量(S1)、电网发展效率(S4)和电网经济效益(S5)分别为位于 2.35 级、2.25 级、2.98 级,即介于“较好”和“一般”之间.因此,改进这 3 个方面的工作应该是未来的工作重点.

对于城市 III,电网发展安全与质量(S1)、电网发展速度与规模(S2)和电网经济效益(S5)评价结果分别位于 1.57 级、1.86 级、1.73 级,结果较比较好,但电网发展协调性(S3)和电网发展效率(S4)分别位于第 2.15 和 2.02 级,也就是介于“较好”和“一般”之间,大力改进这两个方面应该是该城市电网未来发展的重点.

4 结束语

结合地市级电网的特点,首先从电网发展安全与质量、电网发展速度与规模、电网发展协调性、电网发展效率、电网经济效益 5 个维度对电网发展进行分析;然后,根据专家建议和数据挖掘的方法筛选了 46 个具体指标,构建了电网发展诊断多层评价指标体系.通过计算各指标的模糊隶属度并确定其评价等级,从而清晰地分析各评价指标的状况.最后,利用三角模糊数确定了评价指标的权重,用模糊综合评价法对三个城市电网的发展水平进行实证分析.该诊断评价体系可以全面地对电网发展进行评价,并指出电网发展中需要加强的环节,为管理决策提供依据.

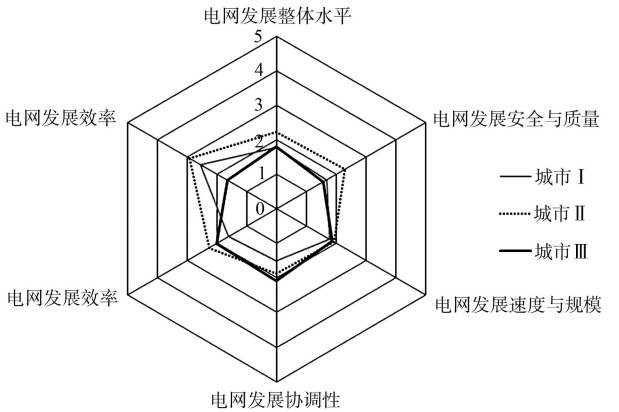


图 3 准则层和电网发展整体水平评价雷达图
Fig. 3 Radar map of criterion layer
and the grid development evaluation

参考文献：

[1] 葛旭波,电网企业可持续发展指标体系及评价方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2007:5-37.

[2] 李莉,雷宇,葛旭波,等. 电网企业可持续发展的指标体系及评价方法[J]. 电力学报,2007,22(78):1-2.

[3] 王国威. 电网建设项目可持续发展后评价研究[D]. 北京:华北电力大学,2008:1-23.

[4] 王志东. 我国电网发展评价指标体系研究[J]. 东北电力大学学报:社会科学版,2009,29(4):83-84.

[5] 韩震煮. 城市配电网综合评价体系研究[D]. 天津:天津大学,2011:16-17.

[6] 陈轩. 地区电网运行评价指标体系及评价方法研究[D]. 上海:上海交通大学,2011:5-39.

[7] 朱韬. 基于层次分析法的农网评估指标体系研究[D]. 北京:华北电力大学,2012:10-16.

[8] 张红斌. 智能电网试点项目评价指标体系研究[J]. 能源技术经济,2010,22(12):11-15.

[9] 陈安伟. 智能电网技术经济综合评价研究[D]. 重庆:重庆大学,2012:15-70.

[10] 刘芳,徐文强,陈春歌,等. 电网调度系统安全运行评价指标体系研究[J]. 工业安全与环保,2012,38(5):92-96.

[11] 蒋国臻. 电网规划综合评价指标体系及方法的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009:6-28.

[12] 李欣然,刘杨华,朱湘有,等. 高压配电网建设规模的评估指标体系及其应用研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(17):18-24.

[13] 范孟华. “世界一流电网”评价指标体系[J]. 中国信息化:学术版,2012,18(9):33-34.

[14] 代红才. 新能源与智能电网协调发展评价指标体系研究[J]. 能源技术经济,2011,23(5):18-23.

[15] 王敬敏,施婷. 智能配电网评估指标体系的构建[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2012,39(6):65-70.

[16] 王琬,刘宗岐,曾博,等. 大都市电网综合指标体系与评价模型[J]. 现代电力,2011,28(4):24-28.

[17] 陈午,许新宜,王红瑞,等. 基于序关系法的北京市水资源可持续利用模糊综合评价[J]. 水利经济,2014,3(2):19-24.

Comprehensive Evaluation and Development Diagnosis
System of the Municipal Power Grid

SHI Zhi-ping¹, SHAN Ti-hua¹, LIU Wen-feng², ZHANG Xing-ping²

(1. Economic Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100045, China;
2. College of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Combining the characteristics of the municipal power grid, this paper conducts a comprehensive evaluation on the power grid development from five dimensions including power grid safety and power quality, power grid development speed and scale, the coordination of the power grid, operation efficiency and economic benefit of the power grid. We also specify 46 evaluation indicators based on field research and data mining. Thus, this paper proposes a bilayer structure model to evaluation and diagnosis of grid development. Then multi-hierarchy order relation method and fuzzy comprehensive evaluation model are employed to empirical analysis of three sample cities. Finally, radar charts are acquired for analyzing and diagnosing the development level of the power grid from three levels. The empirical results clearly point out problems existed in power grid and provide some policy implications for managers.

Keywords: grid; evaluation index system; order relation; fuzzy number; municipal

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)