# 基于反熵-AHP 二次规划组合赋权法的电网节点综合脆弱性评估

周依希,李晓明,瞿合祚

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:针对电网脆弱节点辨识存在的评估指标片面、不同评价方法偏差较大的问题,从系统固有拓扑结构、电 网当前安全运行水平以及预想故障冲击影响三方面出发,构建电网脆弱性节点评估指标体系。该体系基于 系统对脆弱度的需求层次,衍生出改进节点韧性度、节点电气介数、节点能量裕度、改进潮流分布熵及最小失 负荷百分比等相关指标,综合考虑电网结构抗毁性、节点抗干扰能力、节点退出运行后系统潮流分布及系统 自我调节后仍无法避免负荷削减时的状况。提出基于反熵-AHP 二次规划组合赋权法的综合评估模型对节 点脆弱度进行评估。IEEE 39 节点系统算例证明了所提指标体系与评价方法的合理性和有效性。 关键词:脆弱节点;节点韧性度;能量函数;最小失负荷百分比;反熵法;二次规划组合赋权

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.020

# 0 引言

中图分类号:TM 761

电力系统节点是电网能量传输的出发点和重要 汇聚点<sup>[1]</sup>,大量事实证明某些脆弱节点的故障停运 在电网事故传播过程中起到推波助澜的作用<sup>[23]</sup>。 为防止这些节点受到扰动退出运行造成电力系统发 生连锁故障,引发灾变,辨识电网中的薄弱节点并对 其进行保护就显得尤为重要。

目前关键线路识别的研究比较丰富<sup>[46]</sup>,而对节 点脆弱性评估的研究相对较少,且尚未形成确定的 定义和评估体系。根据研究的侧重点不同,主要分 为2个方向。一是从脆弱性机理入手,基于电网的 某种特征,将物理参量转化为确定性评价指标。如 文献[4]在基于等值导纳的电力系统小世界特性的 基础上,提出物理背景更加符合电力系统实际的输 电线路"电气介数"的概念,文献[7]进一步将该概 念引入节点,并将其应用于系统关键节点的识别。 文献[8]从熵理论出发,提出以奇异值熵和潮流分 布熵表征负荷变化对节点电压幅值和线路负载率的 影响,从而辨识电力系统中的关键节点。但是上述 指标都只考虑了脆弱性的某一方面,因此有一定的 局限性。

二是基于已有脆弱性指标,通过赋予各个指标 相应的权重得到节点的综合脆弱性。文献[9]从复 杂网络特征出发,考虑节点多种结构信息,结合层次 分析法(AHP)与风险熵权法得到节点综合脆弱性 评估模型。文献[10]结合电气介数模型及静态能 量函数模型,提出综合结构与状态脆弱性并考虑两

收稿日期:2018-07-29;修回日期:2019-04-25

基金项目:广东电网科技项目(GDKJXM20161884)

Project supported by the Science and Technology Program of Guangdong Power Grid Corporation(GDKJXM20161884) 者权重因子影响的综合脆弱性评估方法。文献 [11]综合考虑系统潮流分布、电压稳定性以及电网 拓扑特性等因素,应用犹豫模糊决策方法构建电网 脆弱性评估模型。这些文献在一定程度上兼顾了电 网的结构和运行状态,但并没有涉及节点因故障退 出运行后由于网络拓扑结构和电力潮流变化所可能 引起的负荷削减情况,且评价方法间偏差值较大,未 能较好地融合主观偏好和客观实际,使结果具有片 面性。

为解决上述问题,本文将反映节点脆弱性的因 素归纳为系统固有结构、系统当前运行安全水平及 节点故障后果严重程度3个宏面准则:从电网结构 抗毁性出发,在节点失效后系统网架结构完整度的 基础上,考虑剩余子网的最大传输能力,定义改进节 点韧性度指标,并引入电气介数,共同反映节点结构 脆弱性;基于能量函数构造方法,构建节点能量裕度 指标以表征节点的状态脆弱性;根据系统网络约束 和机组出力调整,提出考虑负荷重要度分级的最小 负荷削减模型,同时结合改进潮流分布熵指标,多角 度衡量节点的故障风险性。最后提出基于反熵法-AHP 二次规划组合赋权的综合评估模型,通过数学 规划,在权重约束范围内通过降低评价值偏差将主 客观权重无偏好结合。IEEE 39 节点仿真结果表 明,本文方法比传统方法能更有效地辨识电网中的 脆弱节点,具有一定的实用价值。

# 1 脆弱性指标体系构建

# 1.1 节点结构脆弱性指标

1.1.1 改进节点韧性度

韧性度<sup>[12]</sup>是指网络中节点因故障或遭受恶意 攻击退出运行时,网络拓扑结构保持连通及维持其 原有功能的能力。该指标综合考虑节点失效后网络 134

被破坏情况、剩余网络状态及重新连通断裂子网的 难易程度,能有效度量电网中各节点的独立性及相 互联系程度,定义如下:

$$T(\mathbf{S}_i) = \frac{|\mathbf{S}| + \tau(\mathbf{G} - \mathbf{S}_i)}{\mu(\mathbf{G} - \mathbf{S}_i)}$$
(1)

其中, |S|为退出运行的节点数,因本文只考虑单个 节点失效的情况,故其值取 1;G 为电网的原拓扑矩 阵;G-S<sub>i</sub>为节点 i 退出运行后的剩余网络; $\tau(G-S_i)$ 为剩余网络中最大连通子网的节点数,剩余连通节 点越多,表示可以正常传输功率的网络规模越大;  $\mu(G-S_i)$ 为剩余网络中连通子网数目,表征电网被 分割的程度及重构网络的难易程度,子网数量越多, 破坏越严重,重构也越困难。

相较于其他结构性指标而言,韧性度能更深刻 地刻画出节点失效后网络拓扑的抗毁性能,但该指 标仅考虑剩余连通子网的规模和数量,忽略了不同 线路极限传输容量的差异对系统供电能力造成的影 响。实际上,当节点退出运行时,电网韧性度变化体 现在2个方面:一方面由于节点自身所处位置不同, 网络结构被破坏程度不同,电网连通水平产生较大 差异;另一方面,即使网络结构变化相似,由于实际 电网中节点对电能传输的承载作用以及连带退出运 行的支路传输容量不同,剩余网络的传输能力也会 发生相应改变。因此,电网的结构抗毁性需由节点失 效后网络的连通性水平和最大传输能力共同反映。

文献[13]提出网络最大流可近似表征电网的 最大传输能力,则节点退出运行后系统最大传输能 力与初始最大传输能力百分比表达式如下:

$$\gamma = \frac{\phi_{\max}((G-S_i), C_{(G-S_i)})}{\phi_{\max}(G, C_G)}$$
(2)

其中, $\phi_{max}$ 为网络最大流算法;C为支路容量矩阵,取 线路自身极限传输容量, $C_{G}$ 和 $C_{(G-S_{i})}$ 分别为节点退 出运行前、后的电网支路容量矩阵。

将系统传输能力百分比γ作为τ(G-S<sub>i</sub>)的修正 因子,结合剩余子网可正常传输功率的规模及传输 能力,更准确地反映节点在拓扑模型中的重要程度。 修正后的节点韧性度指标如下:

$$T(\mathbf{S}_{i}) = \frac{|\mathbf{S}| + \gamma \tau (\mathbf{G} - \mathbf{S}_{i})}{\mu (\mathbf{G} - \mathbf{S}_{i})}$$
(3)

修正后的节点韧性度指标值越小,表明该节点 对电网拓扑结构及传输能力的影响越大,剩余网络 的持续生存能力越差,该节点的结构脆弱度越高。

1.1.2 节点电气介数

节点电气介数<sup>[7]</sup>在复杂网络理论的基础上,计 算各"发电-负荷"节点对间电流源对各节点的占用 情况,量化了各节点在全网潮流传输中的贡献值大 小。相对于纯拓扑模型,电气介数模型更加符合电 网实际运行状况,定义如下:

$$\begin{cases} B_{e}(k) = \sum_{i \in g, j \in I} \sqrt{P_{Gi} P_{Ij}} B_{e,ij}(k) \\ B_{e,ij}(k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_{m_{k}} |I_{ij}(m_{k},k)| & k \neq i,j \\ 1 & k = i,j \end{cases}$$
(4)

其中,g、l分别为发电机和负荷节点的集合; $P_{Gi}$ 为发电机节点 i 的额定容量或实际出力; $P_{Ij}$ 为负荷节点 j 的实际负荷或峰值负荷大小; $B_{e,ij}(k)$ 为单位电流源 注入"发电机-负荷"节点对(i,j)后节点 k 的电气介 数; $I_{ij}(m_k,k)$ 为单位电流源注入线路 $(m_k,k)$ 上产生 的电流; $m_k$ 表示和 k 直接相连的节点。

# 1.2 节点状态脆弱性指标

电网实际运行时,节点受扰动程度与各运行参量紧密联系,若仅通过单一变量反映网络中各节点的抗干扰能力,会造成部分信息丢失。而节点能量函数<sup>[10]</sup>通过量化系统运行方式变化前后由于负荷波动所造成的能量累积,将相关联的潮流参量以势能的形式统一在同一模型中,是评估节点抗干扰能力的一种有效手段,表达式如式(5)所示。

$$E_{i} = \int_{(\theta_{i}, U_{i}^{*})}^{(\theta_{i}, U_{i}^{*})} \left[ f(\theta_{i}, U_{i}), g(\theta_{i}, U_{i}) \right] \begin{bmatrix} \mathrm{d}\theta_{i} \\ \mathrm{d}U_{i} \end{bmatrix} = P_{\mathrm{L}i}(\theta_{i} - \theta_{i}^{*}) - U_{i} \sum_{j=1}^{n} U_{j}G_{ij}\sin(\theta_{i} - \theta_{j}) \begin{vmatrix} \theta_{i} \\ \theta_{i}^{*} - U_{i} \sum_{j=1}^{n} U_{j}B_{ij}\cos(\theta_{i} - \theta_{j}) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \theta_{i} \\ \theta_{i}^{*} + Q_{\mathrm{L}i}\ln\frac{U_{i}}{U_{i}^{*}} + U_{i} \sum_{j=1}^{n} U_{j}B_{ij}\cos(\theta_{i} - \theta_{j}) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_{i} \\ U_{i}^{*} - U_{i} \sum_{j=1}^{n} U_{j}G_{ij}\sin(\theta_{i} - \theta_{j}) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_{i} \\ U_{i}^{*} \end{vmatrix}$$
(52)

其中,f()为节点电压方程;g()为支路潮流方程;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点i、j之间的电导和电纳; $U_i^*$ 、 $U_i$ 和  $\theta_i^*$ 、 $\theta_i$ 分别为系统初始状态、系统当前运行状态下 的节点i电压幅值和相角; $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$ 分别为节点i的有 功和无功负荷;n为系统节点数。

通过计算负荷波动后节点 *i* 的能量值逼近其临 界能量的程度,建立能量裕度指标如式(6)所示。

$$\Delta E_i = \frac{|E_i - E_{icr}|}{E_{icr}} \tag{6}$$

其中,*E<sub>i</sub>*为节点*i*当前运行状态下能量值;*E<sub>icr</sub>为节 点<i>i*临界状态下对应的能量值。

节点能量裕度指标值越小,表明其抗干扰能力 越差,节点越脆弱。

#### 1.3 节点故障后果指标

#### 1.3.1 改进潮流分布熵

节点退出运行后,线路潮流分布高度不均衡,可

能会引发连锁故障,甚至导致大停电事件发生<sup>[14]</sup>。 传统潮流分布熵指标<sup>[15]</sup>仅单纯反映潮流转移的分 布聚集程度,并未考虑支路承受潮流冲击能力的差 异,也无法体现系统存在过载线路时的危险性。为 克服以上不足,本文引入改进潮流分布熵指标<sup>[16]</sup>, 通过负载率扩大倍数,衡量系统出现过载线路时的 运行安全水平。

设节点 i 因故障退出运行后,线路 j 的实际潮流为  $P_i^0(i)$ ,则此时该线路的负载率为:

$$\boldsymbol{\beta}_{j}(i) = \left| \frac{P_{j}^{0}(i)}{P_{i}^{\max}(i)} \right| \tag{7}$$

其中,P<sub>i</sub><sup>max</sup>(i)为线路j最大传输容量。

将线路负载率分为q个区间,给定负载率常数 序列 $E=(0,e,2e,\dots,qe)$ ,令qe=1。将不同负载率 的线路分别置于相应的区间(ke,(k+1)e)内,过载 线路则均置于[ $1,\infty$ )区间内,定义改进潮流分布熵 指标如式(8)所示。

$$\begin{cases} H(i) = -\sum_{k=0}^{q} \delta \overline{\beta}_{k}(i) \varphi_{k}(i) \ln \varphi_{k}(i) \\ \varphi_{k}(i) = l_{k} / \sum_{k=0}^{q} l_{k} \\ \overline{\beta}_{k}(i) = \frac{1}{l_{k}} \sum_{j=1}^{l_{k}} \beta_{kj}(i) \end{cases}$$

$$(8)$$

其中, $\varphi_k(i)$ 为线路处在负载率区间(ke,(k+1)e)的 概率; $l_k$ 为负载率落在区间(ke,(k+1)e)内的线路条 数; $\beta_k(i)$ 为处于该区间所有线路的平均负载率; $\delta$ 为 负载率扩大倍数,当 $\beta_k(i)$ 越限时, $\delta>1$ ,否则 $\delta=1$ 。

节点改进潮流分布熵越大,说明该节点退出运 行后系统运行安全水平越低,节点越脆弱。

1.3.2 考虑负荷重要度的最小负荷削减量

潮流分布熵通过确定性潮流计算分析节点退出 运行后的潮流分布,但该指标只考虑了给定负荷大 小及发电机出力情况下潮流超出运行限值的程度, 忽略了电网自身的调节能力。在系统实际运行过程 中,若出现约束违限问题,应首先考虑重新调度系统 中健全部分发电功率来尽可能避免负荷削减,或者 在无法避免时切除部分负荷以满足电力系统的安全 可靠运行。因此,将节点失效后系统失负荷量大小 作为故障后果严重程度的评估指标,是对潮流分布 熵的补充和完善。

传统失负荷指标只是简单累加节点失效后其自 身和连带退出运行的负荷损失量,结果较为保守,且 由于不同负荷在电网中作用、地位不同,其停电损失 也有较大差异,若不加区分地进行负荷削减,不符合 电网实际情况。

据此,本文基于交流潮流的最优潮流模型,综合

考虑负荷重要程度差异、系统运行约束及机组出力 调整,将节点退出运行后系统最小重要负荷削减量 和初始负荷的比值作为评价故障后果严重程度的指 标,为简化计算,设负荷削减前后功率因数保持不 变,则可描述为:

$$L_{\rm s} = \min \sum \eta_i (P_{\rm Di} - P_{\rm Li}) / \sum P_{\rm Di}$$
(9)

$$\begin{array}{ll} \text{t.} & \sum_{j=1}^{n} U_{i}U_{j}(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij})+P_{\text{L}i}-P_{\text{G}i}=0 \\ & \sum_{j=1}^{n} U_{i}U_{j}(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij})+Q_{\text{L}i}-Q_{\text{G}i}=0 \\ & P_{\text{L}i}/Q_{\text{L}i}=P_{\text{D}i}/Q_{\text{D}i} \\ & 0 \leqslant P_{\text{L}i} \leqslant P_{\text{D}i}, \ 0 \leqslant Q_{\text{L}i} \leqslant Q_{\text{D}i} \\ & P_{\text{Gimin}} \leqslant P_{\text{G}i} \leqslant P_{\text{Gimax}} \\ & Q_{\text{Gimin}} \leqslant Q_{\text{G}i} \leqslant Q_{\text{Gimax}} \\ & U_{i\min} \leqslant U_{i} \leqslant U_{i\max} \\ & P_{ij}^{2}+Q_{ij}^{2} \leqslant S_{ij\max}^{2}, \ P_{ii}^{2}+Q_{ij}^{2} \leqslant S_{ij\max}^{2} \end{array}$$

其中, $\eta_i$  为负荷节点 *i* 的重要度权重, I 级负荷为 1, II 级负荷为 0.6, III 级负荷为 0.4;  $P_{\text{Di}}$ 、 $P_{\text{Li}}$ 、 $Q_{\text{Di}}$ 、 $Q_{\text{Li}}$ 分 别为负荷削减前、后节点 *i* 的有功功率及无功功率;  $P_{Gi}$ 、 $P_{Gimax}$ 、 $P_{Gimin}$ 分别为发电机节点 *i* 的有功功率及 其上、下限;  $U_{imax}$ 、 $U_{imin}$ 分别为节点 *i* 的电压幅值上、 下限;  $S_{ijmax}$ 为线路传输容量限值, 以视在功率表示;  $\theta_{ij}$ 为节点 *i* 和节点 *j* 之间的相角差;  $P_{ij}$ 为线路 *i*-*j* 传输的有功功率;  $Q_{ij}$ 为线路 *i*-*j* 传输的无功功率。约 束 1、约束 2 为系统潮流约束; 约束 3 为功率因数约 束; 约束 4 为负荷削减量约束; 约束 5—7 分别为发 电机有功、无功出力约束及节点电压约束; 约束 8 为 输电线容量约束。

该模型在满足各类约束条件的前提下,通过优 化调度使系统最大限度保证重要负荷的供电,由于 计及了故障后系统的运行情况,能更准确地反映故 障的严重程度,因此能有效考量该节点的脆弱程度。

# 2 反熵-AHP 二次规划综合评价方法

近年来,对于电网安全性或脆弱性等综合评估问题,AHP<sup>[17]</sup>、熵权法<sup>[9]</sup>及各种混合方法<sup>[1011]</sup>被逐渐引入以求取不同影响因素的权重值。不同单一赋权法间偏差值较大,且易受离散极值或主观偏差影响,鲁棒性较差;传统组合赋权法通过在权重集成中引入偏好系数,求取主客观权重的加权平均值,但该方法人为缩小或放大某种赋权方法对组合赋权的影响,产生了权重偏好。

为克服传统方法的缺陷,本文利用权重向量的 同时,结合决策矩阵自身数据信息,提出基于二次规 划组合赋权的多属性决策模型。其实质为通过数学 规划,在权重约束范围内通过最小化评价值偏差,选 择最终评价值与其他各权重评价结果最为接近的组 合权值,从而达到无偏好融合主客观权重的目的,使 组合权重的赋值更为客观合理。该方法利用客观数 据信息同时,计及指标的价值系数,最大限度地减少 了信息损失。

# 2.1 指标数据预处理

多属性决策问题可表述为一个三元组 $\langle 0, C, P \rangle$ ,其中 $0 = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ 为决策单元集, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_s\}$ 为准则单元集, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_s\}$ 为属性单元集,n, m, s分别为决策单元、准则单元和属性单元中元素的个数。对决策单元各属性进行评估,得到原始决策矩阵  $X = (x_{ij})_{n \times m}, x_{ij}$ 为属性 $P_j$ 中各个指标的计算值。由于各指标的量纲、数量级间存在差异,需对其进行归一化处理。其中节点改进韧性度指标、节点能量裕度指标属于效益型指标,需对其求倒数转化为成本型指标。最终得到规范化决策矩阵  $Y = (y_{ij})_{n \times n}$ 。

#### 2.2 反熵权法客观权重计算

客观权重常使用熵权法计算,但传统熵权法受 样本容量限制,对指标差异度敏感性较大,在权重分 配时可能会出现个别权重过大或过小的极端情况, 导致重要信息淹没,且该方法在指标数据为0和1 时所得熵值均为0,这显然不切合实际。因此,本文 采用反熵法<sup>[18]</sup>确定客观权重。该方法产生的权重 反差较弱,既能克服极端情况下指标失效的缺陷,又 能较好地体现指标之间的差异,不会"喧客夺主", 且该方法能在有限样本容量条件下充分利用原始数 据信息,有效避免人为因素的干扰,具有真实、可靠 的优点。

指标j的信息反熵如式(11)所示。

$$\begin{cases} R_{j} = -\sum_{i=1}^{n} r_{ij}^{*} \ln(1 - r_{ij}^{*}) \\ r_{ij}^{*} = y_{ij} / \sum_{i=1}^{n} y_{ij} \end{cases}$$
(11)

根据反熵值进一步确定各指标的客观权重向量  $U=(u_1, u_2, \dots, u_s)^{\mathrm{T}}$ ,其中 $u_i$ 如式(12)所示。

$$u_j = R_j / \sum_{j=1}^{s} R_j$$
 (12)

#### 2.3 AHP 求主观权重

为反映决策者对指标权重的主观偏好,引入九标度的AHP<sup>[18]</sup>,根据判断尺度量化规则<sup>[18]</sup>对各层指标进行两两比较,得到准则层和属性层中各指标相对于上一层各个因素的判断矩阵 $C_m = (c_{ij})_{m \times m}$ 及 $P_{sk} = (p_{ijk})_{sxs}(k=1,2,\cdots,m),其中 P_{sk}$ 表示属性单元各个指标对准则层因素 $C_k$ 所构建的判断矩阵。当判断矩阵满足一致性检验时,令:

$$\begin{cases} \boldsymbol{C}_{m} = \boldsymbol{C}_{m} - \boldsymbol{\lambda}_{c} \boldsymbol{E}_{m} \\ \boldsymbol{\overline{P}}_{sk} = \boldsymbol{P}_{sk} - \boldsymbol{\lambda}_{Pk} \boldsymbol{E}_{sk} \quad k = 1, 2, \cdots, m \end{cases}$$
(13)

其中, $\lambda_{a}$ 为准则单元对决策层所构建判断矩阵的最 大特征值; $\lambda_{Pk}$ 为属性单元对准则层因素  $C_{k}$ 所构建 判断矩阵的最大特征值; $E_{m}$ 和  $E_{sk}$ 分别为 m 阶和 s阶单位矩阵。进一步求解各层特征向量:

$$\begin{cases} \boldsymbol{C}_{m}\boldsymbol{\omega}=0, \ \boldsymbol{\omega}=[\,\boldsymbol{\omega}_{1},\boldsymbol{\omega}_{2},\cdots,\boldsymbol{\omega}_{m}\,]^{\mathrm{T}}\geq 0\\ \boldsymbol{\overline{P}}_{sk}\,\boldsymbol{\mu}_{k}=0, \ \boldsymbol{\mu}_{k}=[\,\boldsymbol{\mu}_{k1},\boldsymbol{\mu}_{k2},\cdots,\boldsymbol{\mu}_{ks}\,]^{\mathrm{T}}\geq 0 \end{cases}$$
(14)

其中, $\omega$ 为 $C_m$ 的特征向量; $\mu_k$ 为 $P_{sk}$ 的特征向量。 则此时底层属性单元各指标对决策单元的主观总权

重为
$$v_j = \sum_{k=1}^{\infty} \omega_k \mu_{kj}$$
,得到的指标主观权重向量为 $V = (v_1, v_2, \cdots, v_s)^{\mathrm{T}}$ 。

# 2.4 二次规划组合赋权

考虑权向量间的一致性要求,采用二次规划法 将所得主客观权重组合优化,得到各指标的综合权 重。以评估对象主客观评价结果与组合权重评估结 果间的偏差值 Q 最小作为目标函数,建立二次规划 的组合赋权模型如式(15)所示。

$$\min Q(\mathbf{W}) = [\mathbf{Y}(\mathbf{U} - \mathbf{W})]^{\mathrm{T}} [\mathbf{Y}(\mathbf{U} - \mathbf{W})] + [\mathbf{Y}(\mathbf{V} - \mathbf{W})]^{\mathrm{T}} [\mathbf{Y}(\mathbf{V} - \mathbf{W})] = 4 \left[\frac{1}{2}\mathbf{W}^{\mathrm{T}}(\mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\mathbf{Y})\mathbf{W} - \left(\frac{1}{2}\mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\mathbf{Y}\mathbf{U} + \frac{1}{2}\mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\mathbf{Y}\mathbf{V}\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{W}\right] + c$$
  
s.t.  $\boldsymbol{\alpha} \mathbf{W} = 1$   
 $\mathbf{W} \ge 0$  (15)

其中, W 为综合权值向量; α 为 s 阶全为 1 的行向 量; c 为任意常数。约束条件为 W 中各指标权重大 于0 且总和为 1。

根据式(15)构造拉格朗日函数,由多元函数的 极值条件得到矩阵如式(16)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\mathbf{Y} & -\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}} \\ -\boldsymbol{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\mathbf{Y}\mathbf{U} + \frac{1}{2}\mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\mathbf{Y}\mathbf{V} \\ -1 \end{bmatrix} (16)$$

其中,  $\lambda$  为拉格朗日乘数。令  $Y^{T}Y = H_{\chi}Y^{T}YU/2 + Y^{T}YV/2 = L$ ,则解得主客观相结合的最优综合权重向量  $W = -FL + D^{T}$ ,其中  $F = H^{-1}\alpha^{T}(\alpha H^{-1} \times \alpha^{T})^{-1}\alpha^{-1} - H^{-1}$ , $D = (\alpha H^{-1}\alpha^{T})^{-1}\alpha H^{-1}$ 。

# 3 算法分析

#### 3.1 算法流程

本文提出基于反熵法-AHP 二次规划组合赋权 法的节点脆弱性综合评估模型,具体算法流程如图 1所示。

### 3.2 节点脆弱性评估指标分析

采用 IEEE 39<sup>[12]</sup>节点系统进行算例验证,首先 依据指标定义与流程图分别计算 5 个脆弱性指标。 在节点状态脆弱性计算过程中,选取负荷增长 15% 的负荷波动模式,计算负荷波动情况下的节点能量



图1 节点脆弱性综合评估模型算法流程

Fig.1 Flowchart of comprehensive evaluation model for node vulnerability

裕度。此外,涉及最小负荷削减量计算时的负荷重 要度分级见附录。

将计算所得原始数据归一化后,依据反熵法求 解各指标客观权重,并与传统熵权法所求权重对比, 结果见表1。

表1 各指标客观权重

Table 1 (	Objective	weights	of	each	index
-----------	-----------	---------	----	------	-------

七标	客观权重		
1日 7小	熵权法	反熵法	
$T(S_i)$	0.086	0.160	
$B_{ m e}$	0.102	0.176	
$E_i$	0.024	0.108	
H(i)	0.405	0.292	
$L_{\rm s}$	0.383	0.265	

由表1可知,2种赋权方法得到的客观权重整 体趋势一致,但熵权法的权重分配两极化严重。这 是由于归一化后各指标数据中存在极端数值(0和 1),而熵权法将这种变异放大,导致评价结果的可靠 性大幅下降。相较于熵权法,反熵法不但能较好地 体现指标变异程度,且避免了部分指标失效或权重 过大的极端情况,因此对处理脆弱性指标的客观权 重具有明显优势。

利用 AHP 对各指标进行重要性判断时主要考虑以下方面:节点的结构脆弱性、状态脆弱性及故障后果脆弱性三者相辅相成,单从一个方面研究都有局限性,不能揭示电网脆弱性的全貌,因此认为3个指标同样重要;在结构脆弱性指标中,节点电气介数引入潮流和发电机负荷容量,更加真实地反映潮流对节点的占用情况,因此它的重要度高于节点韧性

度;在故障后果指标中,最小负荷削减量是加权潮流 熵的补充和完善,更能反映该节点的故障后果脆弱 性,相较而言具有更大贡献度。由上述分析可得各 指标主观权重如表2所示。

表 2 节点脆弱性指标主观权重

Table 2	Subjective	weights	of node	vulnerability	indexes
	5				

指标	主观权重	指标	主观权重
$T(S_i)$	0.111	H(i)	0.111
$B_{ m e}$	0.222	L <sub>s</sub>	0.222
$E_i$	0.333		

结合反熵法客观权重与 AHP 主观权重,利用二 次规划组合赋权求取各指标的综合权重,并与加权 均值法(主观偏好系数分别取 0.4、0.5、0.6)所求组 合权重对比,结果如表 3 所示。

表 3 节点脆弱性指标综合权重

Table 3 Comprehensive weights of node vulnerability indexes

		4	宗合权重	
指标		加权均值法	二次规划组合	
	0.4	0.5	0.6	赋权法
$T(S_i)$	0.140	0.135	0.130	0.158
$B_{e}$	0.194	0.199	0.203	0.201
$E_i$	0.198	0.221	0.243	0.180
H(i)	0.220	0.202	0.183	0.215
$L_{\rm s}$	0.248	0.243	0.239	0.245

由表3可知,加权赋权方式稳健性较差,随着主 观偏好系数取值的不同,某些指标权重波动较大,这 是由于以固定系数笼统表示某类赋权方式的重要性 易产生权重偏好,导致某些指标对整体脆弱性的贡 献程度被人为地增强或削弱。而二次规划组合赋权 法依托于权重信息及决策向量,通过偏差最小化对 各指标权重比例进行均衡限定,无偏好地综合主客 观2类赋权法的优点,反映样本数据所蕴含的客观 信息的同时,又能根据实际运行经验反映专家的主 观意见,因此能更加合理可靠地区分不同脆弱性指 标的重要程度。

### 3.3 脆弱性评估结果分析

分别运用均值权重、加权均值权重以及本文所 提二次规划组合赋权模型所得权重求出各节点综合 脆弱度,结果如图2所示。



由图2可知,网络中处于重要位置节点的脆弱 度明显大于其他节点,且各节点的数值区分度较高, 这说明二次规划法组合赋权法能有效识别关键节 点,具有一定合理性。

138

4 种赋权方法的评价结果大致保持一致,但某 些节点的脆弱度随着主观偏好系数取值的不同而变 化较大。当偏好系数取0.5及0.6时,能量裕度指标 的贡献被夸大,此时节点33的排名高于节点5及节 点11。而实际上由各指标计算可知,当节点5及节 点11失效后电网供电能力下降,系统发生较大的潮 流转移,线路潮流冲击较大,电网运行安全水平较 低,而节点33虽然在负荷波动时能量裕度较小,但 因其处于网络边缘位置,退出运行时反而对系统影 响较小;当设置偏好系数为0.4时,节点21、27的综 合脆弱值显著升高,这是由于该系数人为强化了客 观权重的影响,由此放大了潮流熵指标和最小失负 荷百分比指标的贡献。而二次规划组合赋权通过综 合利用权向量和决策矩阵自身数据信息,有效克服 了权重偏好的缺陷。

为进一步验证本文方法的有效性,将本文方法 与侧重于单指标的改进奇异值熵法(方法1)<sup>[8]</sup>、侧 重于多因素多指标综合的犹豫模糊决策法(方法 2)<sup>[11]</sup>和效用风险熵权法(方法3)<sup>[9]</sup>进行对比,得 到不同评估方法下节点脆弱性水平的排序结果见 表4。

非它		节	点	
3HF/37	方法1	方法 2	方法 3	本文方法
1	6	5	16	16
2	8	6	6	6
3	7	11	17	4
4	5	7	5	17
5	9	8	2	39
6	4	10	4	20
7	11	13	14	5
8	13	14	11	14
9	29	4	26	11
10	14	9	10	15

表 4 节点脆弱性评估结果比较 Table 4 Results comparison of node vulnerability evaluation

由表4可知,4种评估方法的结果具有良好的 一致性,即运用本文所提方法得到的排名前十的节 点有7个和前3种方法重合,如节点4、5和6,这些 节点都处于电网核心位置,连接着重要的输电通道, 一旦发生故障而退出运行,会使系统发生较大的潮 流转移,对线路冲击极大,容易引起线路过载,甚至 会使电网进入自组织临界状态,引发灾变。

除一致性外,4种方法的评价结果也表现出差 异性,这是由每种方法选择的指标、评估侧重点以及 综合处理方法分别不同所导致的,如节点16没有在 方法1和方法2中体现,而实际上它是整个电网的 传送枢纽,是发电机节点 33—36 的重要功率外送节 点,一旦其退出运行,系统拓扑结构会发生较大变 化,电网将解列成3个孤岛,可能会造成岛内相邻节 点的功率不平衡,引发功角失稳等问题。由于前2 种方法主要考虑节点的抗干扰能力,弱化了系统固 有拓扑结构的脆弱性,因此无法有效识别节点16。 而方法3从节点的复杂网络特征出发,主要采用多 种结构性评估指标分析节点脆弱度,弱化了状态和 故障后果脆弱性的影响,因此能识别出结构脆弱程 度较高的节点16,但其难以筛选出故障后果脆弱度 较为显著的节点 20、39。对于节点 39,由于该节点 处于电网的边缘位置,所以其脆弱程度在结构脆弱 性指标上无法得到较好的反映。但从故障后果来 看,节点39的发电机容量较大,是整个电网中最重 要的有功电源,且其带有大量重要负荷,一旦退出运 行,会使电网损失大量负荷,造成严重的后果,因此 该节点的脆弱性较为显著。

相较于前3种方法,本文所提指标和综合评估 方法反映拓扑位置,同时考虑实际电网运行状态及 故障后果严重程度,可以准确全面识别出这些脆弱 节点,能有效克服节点脆弱性评估中出现的信息片 面问题。

# 4 结论

本文从系统运行前拓扑结构、运行时状态参量 和故障后造成后果3个方面出发,进一步完善脆弱 节点指标体系,并提出基于反熵-AHP二次规划法 组合赋权法的节点综合脆弱性评估方法。通过仿真 分析得到结论如下。

a. 提出的节点改进韧性度指标综合考虑节点自 身失效后网架结构完整度和相邻线路属性对系统抗 毁性造成的影响,能够有效区分网架结构破坏相同 但剩余子网最大供电能力不同的情况,更准确地反 映了节点在拓扑结构中的重要性。

b. 结合电力系统实际情况引入改进潮流分布 熵,并提出计及负荷重要度分级的最小负荷削减百 分比指标。既通过确定性潮流计算度量了故障后潮 流分布情况,也考虑到系统自我调节能力,通过最优 潮流得到系统无法避免削减负荷时的状况,使最终 得到的指标能更好地反映电力系统故障后果严重 程度。

c. 反熵法-AHP 二次规划组合赋权法结合权重 矩阵和决策矩阵,通过数学规划方法无偏好融合主 客观权重,且反熵法既克服了传统熵权法灵敏度过 大的缺陷,又能较好地体现指标之间的差异。由仿 真结果可知,使用该综合评价方法能更有效地辨识 电网中的脆弱节点,具有一定的实用价值。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

# 参考文献:

- [1]程林,刘满君,易俊,等.基于运行可靠性模型的连锁故障模拟 及薄弱环节分析[J].电网技术,2016,40(5):1488-1494.
   CHENG Lin,LIU Manjun,YI Jun, et al. The power system cascading outage simulation and vulnerability analysis based on operational reliability model[J]. Power System Technology, 2016, 40(5):1488-1494.
- [2] 汤涌,卜广全,易俊. 印度"7.30"、"7.31"大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):167-174.
   TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31,2012[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):167-174.
- [3]林伟芳,汤涌,孙华东,等.巴西"2·4"大停电事故及对电网安 全稳定运行的启示[J].电力系统自动化,2011,35(9):1-5.
  LIN Weifang, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Blackout in Brazil Power Grid on February 4,2011 and inspirations for stable operation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35 (9):1-5.
- [4] 徐林,王秀丽,王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):33-39.
  XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(1):33-39.
- [5] 王羽佳,李华强,刘沛清,等. 基于改进 DEAHP 模型的支路综合脆弱性评估方法[J]. 电网技术,2016,40(4):1249-1256.
   WANG Yujia,LI Huaqiang,LIU Peiqing, et al. A branch comprehensive vulnerability assessment method based on improved DEAHP model[J]. Power System Technology,2016,40(4):1249-1256.
- [6]刘利民,刘俊勇,魏震波,等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):30-37.
   LIU Limin,LIU Junyong,WEI Zhenbo, et al. Transmission line vulnerability assessment based on synergetic effect analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):30-37.
- [7] 徐林,王秀丽,王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制 与积极防御[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):61-68. XU Lin,WANG Xiuli,WANG Xifan. Cascading failure mechanism in power grid based on electric betweenness and active defence[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(13):61-68.
- [8] 王涛,岳贤龙,顾雪平,等. 基于奇异值熵和潮流分布熵的电网 关键节点辨识[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):46-53.
  WANG Tao,YUE Xianlong,GU Xueping, et al. Power grid critical node identification based on singular value entropy and power flow distribution entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(4):46-53.
- [9] 丁明,过羿,张晶晶,等. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报,2015,30(3): 214-223.

DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropyweighted fuzzy comprehensive evaluation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3):214-223.

[10] 张程,于永军,李华强,等. 考量能量裕度及权重因子的电力系 统节点综合脆弱性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(3): 136-141.

ZHANG Cheng, YU Yongjun, LI Huaqiang, et al. Analysis of nodal comprehensive vulnerability considering energy margin and weight factor for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(3):136-141.

- [11] 王涛,岳贤龙,顾雪平,等. 基于犹豫模糊决策法的电网脆弱性综合评估[J]. 电网技术,2017,41(7):2272-2281.
   WANG Tao, YUE Xianlong, GU Xueping, et al. Comprehensive evaluation of power grid vulnerability based on hesitant fuzzy decision making method[J]. Power System Technology,2017,41(7):2272-2281.
- [12] 孙成雨,申卯兴,史向峰. 网络抗毁性的点韧性度指标计算方法 研究[J]. 计算机应用研究,2017,34(7):1997-2000.
   SUN Chengyu,SHEN Maoxing,SHI Xiangfeng. Study of computing method to node tenacity index for network invulnerability[J]. Application Research of Computers,2017,34(7):1997-2000.
- [13] 王锡凡. 电网可靠性评估的随机网流模型[J]. 电力系统自动 化,2006,30(12):1-6.
  WANG Xifan. Probabilistic network-flow models for reliability evaluation of power networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(12):1-6.
- [14] 雷成,刘俊勇,魏震波,等. 计及网络传导能力与抗干扰能力的 节点综合脆弱评估模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(7): 144-149.

LEI Cheng, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Integrative evaluation model of node vulnerability considering network transmission ability and anti-interference ability [J] Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7):144-149.

- [15] 刘文颖,蔡万通,张宁,等. 基于联合加权熵的电网自组织临界 状态演化[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1363-1370.
   LIU Wenying, CAI Wantong, ZHANG Ning, et al. Evolution of selforganizing of grid critical state based on united weighted entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(6):1363-1370.
- [16] 徐岩,郅静. 基于加权潮流熵的电网故障传播脆弱线路识别
  [J]. 现代电力,2016,33(3):88-94.
  XU Yan,ZHI Jing. Identification of vulnerable lines for fault propagation in power grid based on the weighted power flow entropy[J].
  Modern Electric Power,2016,33(3):88-94.
- [17] 曹清山,郑梦莲,丁一,等. 新电改背景下基于多属性决策的电力客户评估和选择研究[J]. 电网技术,2018,42(1):117-125.
  CAO Qingshan, ZHENG Menglian, DING Yi, et al. Multi-attribute decision making model for customer evaluation and selection in electricity market [J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 117-125.
- [18] 吕朋蓬,赵晋泉,李端超,等. 电网运行状态评价指标体系与综合评价方法[J]. 电网技术,2015,39(8):2245-2252.
  LÜ Pengpeng, ZHAO Jinquan, LI Duanchao, et al. An assessment index system for power grid operation status and corresponding synthetic assessment method[J]. Power System Technology, 2015, 39 (8):2245-2252.

# 作者简介:



周依希(1993—),女,浙江丽水人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统运行 与控制(**E-mail**:286846853@qq.com);

李晓明(1955—),男,湖北应城人,教 授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为 电力系统运行与控制(E-mail: xml@whu. edu.cn)。

# Node comprehensive vulnerability assessment of power grid based on anti-entropy-AHP quadratic programming combination weighting method

ZHOU Yixi, LI Xiaoming, QU Hezuo

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract**: Aiming at the problem of one-sided evaluation index and large deviation of different evaluation methods in vulnerable node identification of power system, an evaluation index system of vulnerable node is built from three aspects of system inherent topology, system current safe operation level and impact of expected fault. The system, based on the demand hierarchy of system to vulnerability, derives related indexes such as improve node toughness, node electric betweenness, node energy margin, improved power flow distribution entropy and minimum load loss percentage. Considering comprehensively the invulnerability of grid structure, node anti-interference ability, power flow distribution after node withdrawing operation, and inevitable load reduction after system self-regulation, a comprehensive evaluation model based on anti-entropy-AHP quadratic programming combination weighting method is proposed to evaluate node vulnerability. The case of IEEE 39-bus system verifies the rationality and effectiveness of the proposed index system and evaluation method.

Key words: vulnerable node; node ductility; energy function; minimum load loss percentage; anti-entropy method; quadratic programming combination weighting

(上接第 124 页 continued from page 124)

界态判断模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(7):1-6. CAO Yijia, WANG Guangzeng, CAO Lihua, et al. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 1-6.

[19] 张文朝,顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电 场综合评价[J]. 电网技术,2014,38(10):2741-2746. ZHANG Wenchao,GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order

preference by similarity to ideal solution [J]. Power System Technology, 2013, 38 (10):2741-2746.

#### 作者简介:



梁海平(1979—),男,河北保定人,讲师,博士,研究方向为现代电网评估、智能技 术在电力系统中的应用、电力系统安全防 御与恢复控制;

田 潮(1993—),男,河北保定人,硕 士研究生,研究方向为运行方式智能决策、 智能技术在电力系统中的应用(E-mail:

11 肥权不在 七万 东 50 千 时 应 7.

 $1069992182@qq.com)_{\circ}$ 

# Running section similarity matching based on improved K-means algorithm

LIANG Haiping<sup>1</sup>, TIAN Chao<sup>1</sup>, WANG Tieqiang<sup>2</sup>, CAO Xin<sup>2</sup>, YANG Xiaodong<sup>2</sup>, LIU Yingpei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract**: In order to simplify the complex scheme checking work in the process of making power grid work tickets and reduce the dependence on work experience of power grid dispatchers, a running section similarity matching method of power grid by section characteristic extraction is proposed. Firstly, the decision tree model is adopted to exact and screen the characteristic variables according to the system operation characteristic and data storage format. Then, initial similarity clustering is carried out based on the improved semi-supervised K-means algorithm to obtain effective samples and reduce the data scale. Finally, a similarity matching index system is used to match the most valuable and useful historical running section and its corresponding decision information for the system current running section in the clustering results. Simulation cases show that the proposed method can well match the similarity of running sections.

Key words: work ticket; running section; semi-supervised K-means algorithm; similarity matching index system; clustering algorithms

TH I	. <b>=</b> .	
ŊЛ	ऋ	:
1.14	*4*	•

 近荷
 负荷节点

 一级
 4、8、20

 二级
 3、15、16、24、27、29、39

 三级
 1、7、9、12、18、21、23、25、26、28、29、31

表 A1 负荷分级 Table A1 Load classification