

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211194

计及节点-线路重要度的配网实时健康状态评估*

程江洲^{1,2} 王永威^{1,2} 朱险峰³(1.三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2.湖北省微电网工程技术研究中心 宜昌 443002;
3.国网宜昌供电公司 宜昌 443000)

摘要: 随着大量分布式光伏的接入,配电网运行状态变得更为复杂。为准确的评估配电系统实时健康状态,提出一种计及网络节点与线路重要度的配电网实时健康状态评估方法。首先,考虑光伏接入网络最优潮流、负荷重要性和某节点停运后的负荷损失对 LeaderRank 算法进行改进,考虑某节点停运后的功率损失和节点 LR 值对负荷矩算法进行改进,利用改进的电气 LeaderRank 算法和线路负荷矩算法对配电网中节点与线路重要度进行评估;然后,基于配电设备运行的电气量与非电气量参数分别计算配电节点与线路的健康指数。综合考虑配电网中节点与线路的健康度和重要度计算配电网的健康指数,判断配电网的健康状态。最后,以某地 10 kV 配电网为例,得到其健康指数为 2.266 3,处于一般缺陷状态,适当提高该配电网中分布式光伏渗透率,其健康状态有所改善,证明所提方法的有效性 with 合理性。
关键词: 配电网;电气 LeaderRank 算法;线路负荷矩算法;健康指数;健康状态评估
中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

Real-time health assessment of distribution network
considering node-line importanceCheng Jiangzhou^{1,2} Wang Yongwei^{1,2} Zhu Xianfeng³(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. State Grid Yichang Power Supply Company, Yichang 443000, China)

Abstract: With the access of a large number of distributed photovoltaics, the operation status of the distribution network has become more complex. In order to accurately evaluate the real-time health status of distribution system, a real-time health status assessment method of distribution network is proposed, which takes into account the importance of network nodes and lines. First, consider the optimal power flow, load importance and load loss of a node in the photovoltaic access network to improve the LeaderRank algorithm, consider the power loss after a node outage and the LR value of the node to improve the load moment algorithm, use the improved electrical LeaderRank algorithm and line load moment algorithm evaluate the importance of nodes and lines in the distribution network. Then, based on the electrical and non-electrical parameters of the operation of the distribution equipment, the health indices of the distribution nodes and lines are calculated respectively. Comprehensively consider the health and importance of nodes and lines in the distribution network to calculate the health index of the distribution network to judge the health status of the distribution network. Finally, taking a 10 kV distribution network as an example, the health index is 2.266 3, which is in a general defect state. The health of the distributed PV system has been improved by appropriately increasing the PV penetration rate in the distribution network, which further verifies the effectiveness and rationality of the proposed method.

Keywords: distribution network; electrical LeaderRank algorithm; line load moment algorithm; health index; health status assessment

0 引言

配电网是连接终端用户与输电网的关键一环,其健康

稳定运行直接影响到广大人民群众的生产和生活,全面掌握配电网的健康状态,依据其健康状态制定合理的检修计划,是保障人民用电安全,提升配电网运维管理效率的需

收稿日期:2022-08-27

* 基金项目:国家自然科学基金(52107107)项目资助

要^[1-2]。但是,配电网是一个动态系统,其健康状态受网络拓扑结构与配电设备运行状态的共同影响,另外,随着大量分布式光伏的接入,配电网运行状态更为复杂^[3-4]。因此,如何对复杂多变的配电系统进行实时健康状态评估并为检修人员及时制定合理的检修策略,不仅是配电网日常运维管理的需要,还是现代配电网发展的基石。

配电网是一个实时变化的动态系统,主要由配电网络和配电设备构成,目前对配电网健康状态的评估主要分为两大类:一类是从配电设备或配电网络着手,建立评价指标和评价模型,以此来评价单一配电设备或配电网络的健康状态。文献[5]提出一种 MI-PSO-BP 算法对配电变压器进行两阶段状态评估;文献[6]根据设备特征参数的重要度,为设备各特征参数赋予不同的权重值,建立评估体系,评估配电设备健康状态;文献[7]从配电网 4 个维度选取 11 个评估指标,采用层次分析法—证据理论确定各指标的相对权重,由此计算配电网网络结构的健康指数,该类评价方法虽然对配电设备层或网络结构层的健康状态评估具有很好的适应性,但其未能将两者评价结果相结合,忽略了配电网是一个配电设备和网络相互联系的有机整体。另一类是将配电网健康状态评价从配电设备层面扩展到网络结构层,对配电网运行状态进行综合评价。文献[8]将配电网络看作复杂的配电设备,采用模糊集—DS 证据理论—层次分析法建立配电设备健康指数计算模型,并由单一设备健康指数计算映射到群体设备,综合评价配电网健康状态;文献[9]采用成功流法评估设备层健康状态,在此基础上利用网络等值法解析网络结构,将设备层健康状态扩展到网络层健康状态,综合评估得到配电网运行状态,但是该评估过程忽略了配电设备之间的拓扑关系,未能考虑到每台配电设备在网络中的重要性以及对网络健康状态的影响。

本文提出一种计及网络节点与线路重要度的配电网实时健康状态评估方法,结合配电网的电气特性与动态变化的特点分别对电气 LeaderRank 算法和线路负荷矩算法进

行改进,基于上述改进算法分别计算各节点与线路的重要度,综合考虑配电网中节点与线路的健康度和重要度计算配电网的健康指数,判断配电网的健康状态。最后,以某地 10 kV 配电网为例进行算例分析,并将计算结果与相关文献进行对比,验证本文所提方法的有效性 with 合理性。

1 配电网实时健康状态评估体系的构建

配电网健康状态受配电设备与线路健康状态的影响,同时其在配电网中发挥的重要作用也会对配电网健康状态造成影响。因此配电网健康状态评估过程中不仅要考虑配电设备与线路的健康状态,还要考虑其在网络中的重要度。

针对配电网动态变化的特点,为准确评估其实时健康状态,本文提出的计及网络节点与线路重要度的配电网实时健康状态评估方法分 3 部分对配电网健康状态进行评估:配电节点与线路的健康指数计算、配电节点重要度计算与配电线路的重要度计算。基于配电设备的电气参数与非电气参数计算配电节点与线路的健康指数,基于改进的电气 LeaderRank 算法计算配电节点重要度,基于改进的线路负荷矩算法计算配电线路重要度。配电网实时健康状态评估流程如图 1 所示。

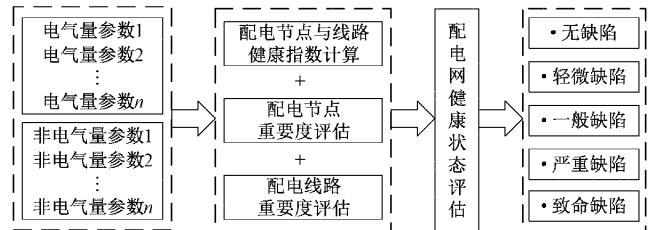


图 1 配电网实时健康状态评估流程

本文将配电网健康指数取值范围定义为 $[0, 5]$,其中,健康指数越大,配电网健康状态越好,依据健康指数,划分配电网健康状态如表 1 所示^[10-11]。

表 1 配电网健康状态等级

健康指数	健康等级	意义
$[4, 5]$	无缺陷	配电网性能优秀,能执行所有功能,抗扰动与环境适应能力强
$[3, 4)$	轻微缺陷	配电网性能良好,部分执行功能退化,抗扰动能力下降,稳定裕度正常
$[2, 3)$	一般缺陷	配电网性能较差,能按规定执行功能,但部分指标越限,抗扰动能力较差
$[1, 2)$	严重缺陷	配电网性能严重退化,抗扰动和环境适应能力存在显著缺陷,存在安全隐患
$[0, 1)$	致命缺陷	配电网性能恶化,已无法执行其正常功能,系统处于崩溃边缘

2 配电网节点与线路重要度计算

配电网是由配电节点与配电线路按照一定的拓扑关系构成的有机整体,因此,配电节点与线路在配电网中的重要程度将对配电网健康状态具有不同的贡献,当配电网动态变化的同时,其节点与线路之间的拓扑关系也会相

应发生改变,节点与线路在配电网中的重要度也会相应改变,配电网健康状态随之改变。在进行配电网健康状态计算时首先需要计算配电网节点与线路的重要度。

2.1 考虑光伏出力不确定性的配电网最优潮流计算

大量分布式光伏接入,极大影响了配电网潮流,进而影响配电网节点与线路重要度评估结果,因此,需要计算

光伏接入配电网的最优潮流^[12]。为准确刻画光伏出力的不确定性,引入区间数理论,将入射辐照度、温度、输出功率等分别建立区间模型。其中,入射辐照度区间模型为:

$$H_{ING} = [H_{ING}^-, H_{ING}^+] \quad (1)$$

式中: H_{ING} 表示入射辐照度不确定性的区间变量; H_{ING}^- 、 H_{ING}^+ 表示入射辐照度区间的上下限值。

温度区间模型为:

$$T_C = [T_C^-, T_C^+] \quad (2)$$

式中: T_C 表示温度不确定性的区间变量; T_C^- 、 T_C^+ 表示温度区间的上下限值。

光伏输出功率区间模型为:

$$P_P = \left[\frac{P_{PV}}{H_{STC}} (H_{ING} + \epsilon_T H_{ING} T_C - \epsilon_T H_{ING}^+ T_0), \frac{P_{PV}}{H_{STC}} (H_{ING}^- + \epsilon_T H_{ING}^- T_C^- - \epsilon_T H_{ING}^- T_0) \right] \quad (3)$$

式中: P_P 为光伏系统的间隔输出功率, P_{PV} 为光伏系统的额定容量, H_{STC} 为入射辐照度的标准值, ϵ_T 为功率温度系数, T_0 为额定参考温度。

结合光伏出力区间建模和最优潮流理论,目标函数为总有功发电成本,最优区间潮流求解如式(4)所示。

$$\begin{cases} F = [F^-, F^+] \\ \min F = \sum_{i \in S_G} c_i \cdot P_{Gi} \\ \text{s. t. } P^{PF} = A \cdot P^{SP} \\ \sum_{i \in S_G} P_{Gi} - \sum_{j \in S_D} P_{Dj} = 0 \\ P_{Gi}^- \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^+, i \in S_G \\ -P_{ij}^+ \leq P_{ij} \leq P_{ij}^+, i, j \in S_B \\ P_P = [P_P^-, P_P^+] \end{cases} \quad (4)$$

式中: F 表示发电成本不确定性的区间变量; F^- 、 F^+ 表示发电成本区间的上下限值, c_i 第 i 台发电机发电成本系数, P^{PF} 、 A 、 P^{SP} 分别为支路潮流、支路导纳、节点功率矩阵, P_{Gi} 为节点 i 处光伏输出有功, P_{ij} 输电线路中的功率流, S_G 、 S_B 分别为有功节点和普通节点。

求解上述区间最优潮流模型得到最优潮流区间为:

$$P_{ij} = [P_{ij}^-, P_{ij}^+] \quad (5)$$

取该区间数的期望值作为两节点间的传输功率,其期望值可表示为:

$$E(P_{ij}) = \frac{P_{ij}^- + P_{ij}^+}{2} \quad (6)$$

若 $E(P_{ij}) \geq 0$, 则表示功率从节点 i 流向节点 j ; 若 $E(P_{ij}) < 0$, 则表示功率从节点 j 流向节点 i 。

2.2 改进的 LeaderRank 算法评估配电网节点重要度

传统的 LeaderRank(LR)算法是将节点的 LR 值均分给其出链节点的^[13], 这种均分的方法并不适用于复杂的配电网。考虑配电网的电气特性,综合配电网线路潮流分布、负荷重要程度、配电网某节点故障停运等因素对配电

网节点重要度评估过程的影响,对 LeaderRank 算法进行改进,改进的电气 LeaderRank 算法迭代公式表示为:

$$LR_i = \sum_{j=1}^{n+1} \alpha_{(j \rightarrow i)} LR_j + \beta_{(g \rightarrow i)} LR_g \quad (7)$$

式中: LR_i 为第 i 个节点的电气 LeaderRank 算法计算结果, $\alpha_{(j \rightarrow i)}$ 为节点 j 分配给节点 i 的 LR 值比例, $\beta_{(g \rightarrow i)}$ 为背景节点 g 分配给节点 i 的 LR 值比例; LR_j 为节点 j 的 LR 值, LR_g 为背景节点的 LR 值;在迭代过程中,设置电网中各节点初始 LR 值为 1,背景节点为 0。

考虑电网节点间的潮流分布、节点负荷的重要度对节点重要度评估的影响,对 $\alpha_{(j \rightarrow i)}$ 值进行修正,修正后的 $\alpha_{(j \rightarrow i)}$ 值计算方法表示为:

$$\alpha_{(j \rightarrow i)} = \frac{l_{i \text{ in}}}{\sum_{x \in A} l_{x \text{ in}}} \times \frac{l_{i \text{ out}}}{\sum_{x \in A} l_{x \text{ out}}} \times \frac{S_{ji}}{S_j} \quad (8)$$

式中: $l_{i \text{ in}}$ 和 $l_{i \text{ out}}$ 分别为节点 i 的入度和出度, A 为节点 j 的出链节点集合, x 为 A 集合中的一个元素, $l_{x \text{ in}}$ 与 $l_{x \text{ out}}$ 分别为节点 x 的入度和出度, S_{ji} 为线路功率从节点 j 流向节点 i , S_j 为从节点 j 流出的总功率。定义如下参数:

$$\frac{S_{ji}}{S_j} = \begin{cases} \frac{S_{ji}}{S_j}, & j \in \Omega_1 \\ 1, & j \in \Omega_2 \\ \frac{1}{n}, & j \text{ 是背景节点} \end{cases} \quad (9)$$

式中: Ω_1 指除背景节点之外至少有 1 个外链节点的节点集; Ω_2 指仅有背景节点作为唯一的外链节点的节点集, n 为节点总数。

考虑节点负荷重要度与节点遭受攻击后可能带来的功率损失对 $\beta_{(g \rightarrow i)}$ 值进行修正, $\beta_{(g \rightarrow i)}$ 修正公式如式(10)所示。

$$\beta_{(g \rightarrow i)} = \frac{l_{i \text{ out}} + l_{i \text{ in}}}{\sum_{y \in B} (l_{y \text{ out}} + l_{y \text{ in}})} \times \frac{Q_i}{\sum_{y \in B} Q_y} \quad (10)$$

式中: B 为配电网中除背景节点外所有节点的集合, y 为 B 集合中的一个元素, Q_i 为节点 i 故障停运后可能带来的功率损失, Q_i 的计算公式如式(11)所示。

$$Q_i = \sum_{j=1}^{c_i^{\text{out}}} Q_{ij} \cdot t \quad (11)$$

式中: c_i^{out} 为节点 i 的出链节点个数, Q_{ij} 为节点 i 正常运行时向所有出链线路传输的功率之和, t 为节点停运时间。利用改进的电气 LeaderRank 算法评估配电网中节点重要度,其算法具体流程如图 2 所示。

2.3 改进的线路负荷矩算法评估配电网线路重要度

原始的负荷矩算法仅考虑了线路传输功率与负荷距电源的距离,未能考虑到某线路故障停运后给配电网带来的影响,因此对原始的线路负荷矩算法进行改进,得到第 j 条线路的重要度 LR_j 计算公式为:

$$LR_j = \lambda_M M_j^* + \lambda_Q Q_j^* + \lambda_L LR_{j+1}^* \quad (12)$$

式中: M_j^* 为配电网中第 j 条线路的负荷矩归一化值, Q_j^* 为

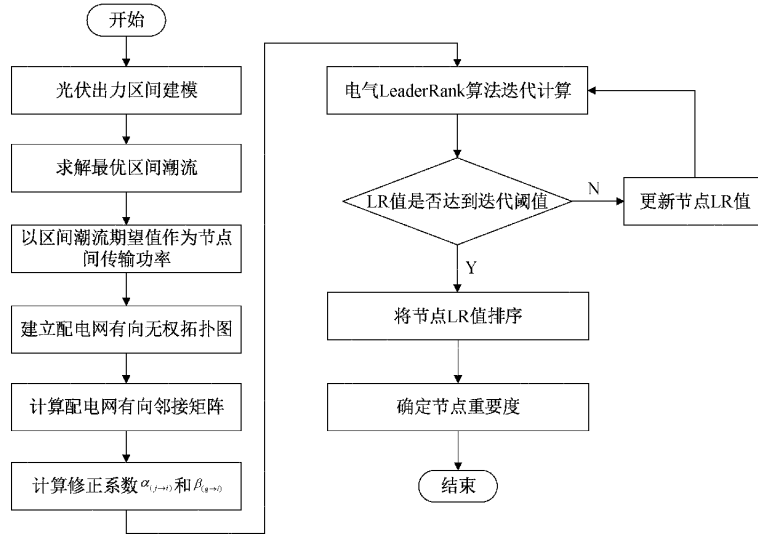


图 2 改进的 LeaderRank 算法评估配电网节点重要度流程

第 j 条线路故障后的功率损失归一化值, LR_{j+1} 为该线路下游节点的 LR 值归一化值; $\lambda_M, \lambda_Q, \lambda_L$ 分别为负荷矩、功率损失量、LR 值所对应的权重。配电网中第 j 条线路的负荷矩 M_j 计算如式(13)所示。

$$M_j = M_{c_j} \times M_{d_j} \tag{13}$$

式中: M_{c_j} 为第 j 条线路正常运行时功率传输量, M_{d_j} 为第 j 条线路长度。

第 j 条线路故障后的功率损失 Q_j 计算公式如下:

$$Q_j = M_{c_j} \times t_j \tag{14}$$

式中: t_j 为第 j 条线路停运时间。

3 配电网健康指数计算

将配电网中各节点看成是配电变压器节点,以各节点

上配电变压器的实时健康指数作为该节点的健康指数;将导线看成配电设备,以节点间导线的健康指数作为线路的健康指数;综合节点与线路的重要度计算配电网健康指数。

3.1 配电变压器与导线运行参数选取

利用监测装置可获取配电变压器与导线实时运行参数,包括电气量参数与非电气量参数,本文在现有文献和监测技术的基础上,综合考虑配电变压器与导线的运行状态,分别选取多个运行参数作为其运行指标,并依据相关文献与规程确定各缺陷状态所对应的参数阈值^[14-17]。配电变压器与导线主要运行参数如表 2 所示。

3.2 配电变压器与导线健康指数计算

通过监测装置获得配电变压器与导线的实时运行参

表 2 配电变压器与导线主要运行参数

配电设备	运行参数	缺陷等级				
		无缺陷	轻微缺陷	一般缺陷	严重缺陷	致命缺陷
导线	导线温度/°C	<70	[70,85)	[85,100)	[100,130]	>130
	介质损耗因数 tanδ/%	<0.2	[0.2,0.5)	[0.5,0.8)	[0.8,1)	>1
	箱体温度/°C	<35	[35,65)	[65,85)	[85,105)	>105
	顶层油温/°C	<25	[25,90)	[90,120)	[120,145)	>145
配电变压器	C ₂ H ₆ 含量/(μL/L)	<20	[20,40)	[40,55)	[55,65]	>65
	CH ₄ 含量/(μL/L)	<35	[35,60)	[60,85)	[85,120]	>120
	C ₂ H ₄ 含量/(μL/L)	<15	[15,25)	[25,35)	[35,50]	>50
	H ₂ 含量/(μL/L)	<30	[30,50)	[50,70)	[70,100]	>100
	C ₂ H ₂ 含量/(μL/L)	<10	[10,18)	[18,25)	[25,35]	>35

数,将其各缺陷状态对应的上下限值与实际运行参数作比较,得到各参数所对应的健康指数,计算方法如式(15)所示。

$$H_n = \begin{cases} \left| \frac{x_n - x_n^{5\min}}{x_n^{5\min}} \right|, & x_n^{5\min} \leq x_n \leq x_n^{5\max} \\ 1 + \left| \frac{x_n - x_n^{4\min}}{x_n^{4\max} - x_n^{4\min}} \right|, & x_n^{4\min} \leq x_n \leq x_n^{4\max} \\ 2 + \left| \frac{x_n - x_n^{3\min}}{x_n^{3\max} - x_n^{3\min}} \right|, & x_n^{3\min} \leq x_n \leq x_n^{3\max} \\ 3 + \left| \frac{x_n - x_n^{2\min}}{x_n^{2\max} - x_n^{2\min}} \right|, & x_n^{2\min} \leq x_n \leq x_n^{2\max} \\ 4 + \left| \frac{x_n - x_n^{1\min}}{x_n^{1\max} - x_n^{1\min}} \right|, & x_n^{1\min} \leq x_n \leq x_n^{1\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $x_n^{1\max}, x_n^{1\min}, x_n^{2\max}, x_n^{2\min}, x_n^{3\max}, x_n^{3\min}, x_n^{4\max}, x_n^{4\min}, x_n^{5\max}, x_n^{5\min}$ 分别为配电变压器与导线对应的轻微缺陷、一般缺陷、严重缺陷和致命缺陷的上下限值, x_n 为设备实际运行参数, H_n 计算结果与设备参数缺陷水平对应结果如表1所示。

由于配电设备不同的运行参数对应不同的健康状态,这里将健康状态最差的参数所对应的健康指数作为该节点或线路的健康指数,故健康指数计算如式(16)所示。

$$H = \max\{H_1, H_2, \dots, H_n, \dots, H_k\} \quad (16)$$

式中: $H_n (n = 1, 2, \dots, k)$ 表示配电变压器或导线第 n 个运行参数所对应的健康指数。

3.3 配电网健康指数计算

根据上述计算结果,按照式(17)计算配电网健康指数:

$$HI = \omega_n \sum_{i=1}^N HI_i \cdot LR_i + \omega_m \sum_{j=1}^M HI_j \cdot LR_j \quad (17)$$

式中: HI_i 为第 i 个节点健康指数, HI_j 为第 j 条线路的健康指数, LR_i 为第 i 个节点的重要度, LR_j 为第 j 条线路的重要度, ω_n, ω_m 分别为配电网中节点和线路的综合权重, n 为节点总数, m 为线路总数,其中, $i \in (1 \sim n), j \in (1 \sim m)$ 。

4 算例分析

4.1 配电网实时健康状态评估

以某地 10 kV 配电系统为例对本文所提方法进行验证,该配电系统网络拓扑图如图 3 所示,该地区主要为居民、农业以及工商业用电,各节点负荷重要性如图 3 所示,该系统共有 33 个常规节点,32 条支路,负荷总量为 9.9 MW,包含 33 台配电变压器,并且网络在节点 12、16、22、24、31 共 5 个节点加入分布式光伏发电,其中,分布式光伏发电渗透率为 8%。

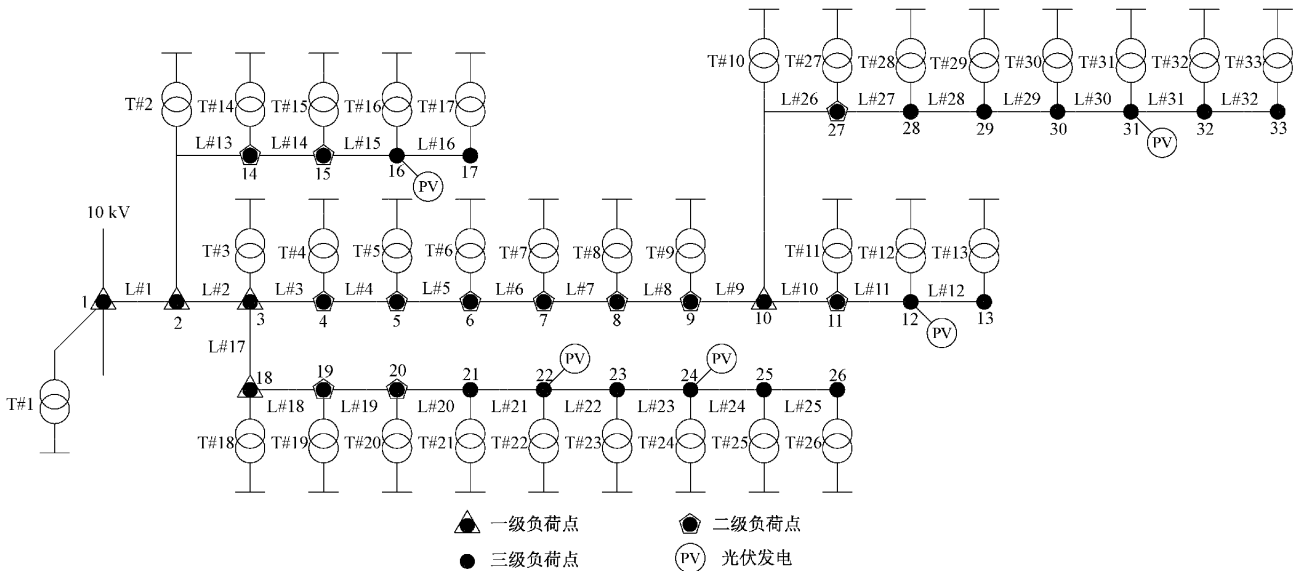


图3 某地 10 kV 配电系统网络拓扑图

1)首先考虑光伏出力的不确定性,结合区间数理论计算该配电网的最优潮流,配电网传输功率期望值计算结果如表3所示。

2)根据配电网线路最优潮流求解结果,利用改进的电气LeaderRank算法对节点重要度进行评估,并计算各节点健康指数。该系统各节点的LR值与健康指数计算结果如图4所示。

如图4所示节点LR值曲线并结合网络拓扑图可知,在网络中,节点的负荷传输量越大、与该节点相连接的支路越多,节点LR值越大;在每条支路上,越靠近支路首端,节点LR值越大,沿着支路到支路末端,节点LR值整体呈现降低的趋势;在某节点处加入分布式光伏,会改变线路潮流,在整条支路LR值呈现降低的趋势下,加入分布式光伏的节点LR值降低程度较小。另外,节点1、节点2、节点3

表 3 考虑光伏接入的配电线路功率传输期望值

配电线路	线路功率/MW	配电线路	线路功率/MW
L#1	3.317+j2.267	L#17	0.940+j0.457
L#2	2.847+j2.041	L#18	0.846+j0.405
L#3	1.780+j1.525	L#19	0.421+j0.201
L#4	1.647+j1.438	L#20	0.271+j0.091
L#5	1.575+j1.402	L#21	0.211+j0.081
L#6	0.541+j0.388	L#22	0.151+j0.060
L#7	0.340+j0.286	L#23	-0.037+j0.058
L#8	0.139+j0.186	L#24	-0.147+j0.045
L#9	0.079+j0.166	L#25	0.090+j0.040
L#10	0.019+j0.146	L#26	0.075+j0.089
L#11	-0.027+j0.116	L#27	0.063+j0.081
L#12	-0.087+j0.081	L#28	0.042+j0.021
L#13	0.361+j0.161	L#29	0.027+j0.014
L#14	0.271+j0.121	L#30	-0.021+j0.010
L#15	-0.180+j0.080	L#31	-0.054+j0.008
L#16	-0.090+j0.040	L#32	0.022+j0.005

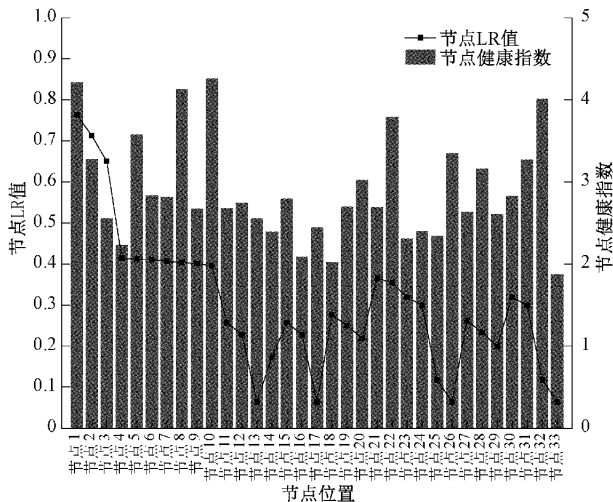


图 4 某地 10 kV 配电系统各节点的 LR 值与健康指数计算结果

是排名最靠前的 3 个节点,这 3 个节点也是该配电系统的 3 个起始节点,一旦遭遇故障停运,对整个该配电系统的影响极大。因此,改进的电气 Leaderrank 算法在节点重要度评估方面可信度较高,更符合电力生产实际。

3)进一步,利用改进的线路负荷矩算法求得线路重要度并对线路重要度进行评估,依次计算各配电线路健康指数。该系统各线路的重要度值与健康指数计算结果如图 5 所示。

如图 5 所示线路 LR 值曲线并结合网络拓扑图可知,负荷传输量越大、越接近电源点,线路的 LR 值越大;在某节点加入分布式电源后,由于线路潮流的改变,线路 LR 值改变也会受到影响。线路 1、线路 2 的 LR 值最大,这两条

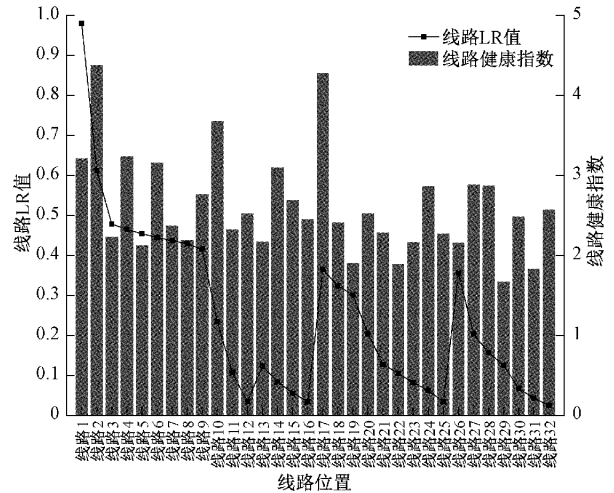


图 5 某地 10 kV 配电系统各线路的 LR 值与健康指数计算结果

线路也是配电网的两条起始线路,其稳定运行保证了整个系统的电力供应。因此,改进的线路负荷矩算法在线路重要度评估方面可信度较高,符合电力生产实际。

4)计及配电网节点与线路的健康度与重要度,结合配电网健康指数计算公式得到配电网健康指数。该系统健康指数计算结果如图 6 所示。

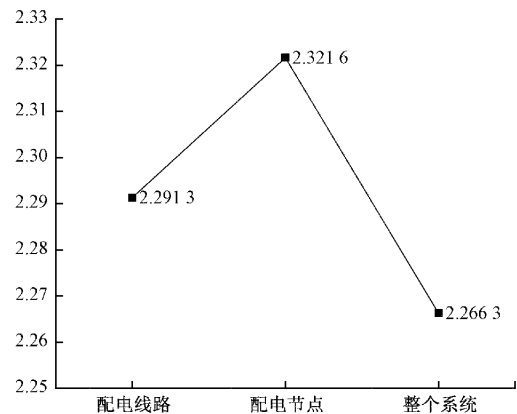


图 6 配电系统健康指数计算结果

由图 6 可知,由本文方法计算所得配电网健康指数为 2.266 3,该配电网为一般缺陷状态,配电网性能较差,能按规定执行功能,但部分指标越限,抗扰能力较差。另外,配电节点健康指数为 2.321 6,配电线路健康指数为 2.291 3,均大于配电网整体健康指数。由此可见,配电网中节点与线路的重要度对配电网健康状态评价具有较大影响。在该配电网中,网络拓扑结构存在一定缺陷,一些重要节点与线路健康状态较差,需要加强对该配电网重要节点与线路的检修与维护。

4.2 算法对比分析与可行性验证

利用本文方法评估配电网的健康状态,其核心是配电网中节点与线路重要度的计算。在本文数据基础上,分别

利用不同的方法计算该网络的节点与线路重要度并进行对比分析,对比结果如图7、8所示。

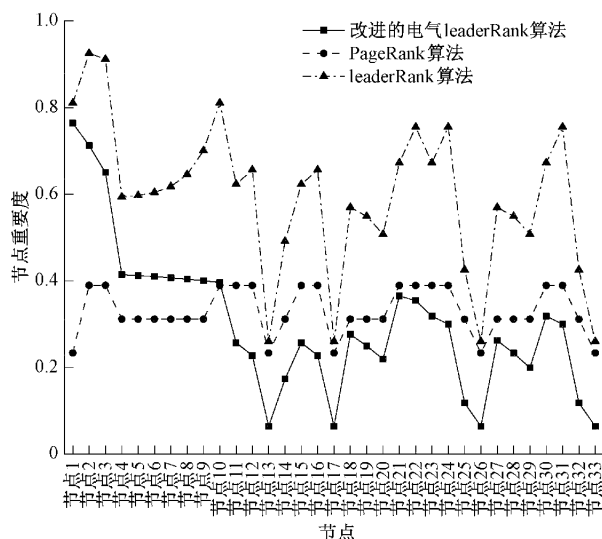


图7 配电网节点重要度评估算法对比

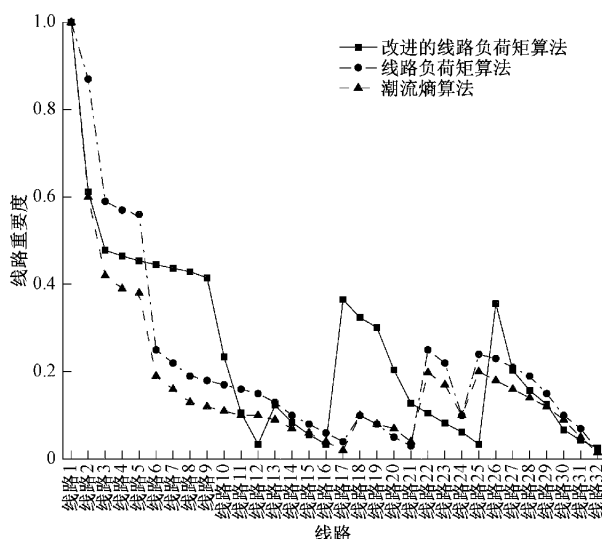


图8 配电网线路重要度评估算法对比

由图7可知,利用PageRank算法计算节点重要度,其只考虑各节点的入度和出度,容易陷入局部最优,使入度和出度相同的节点重要度一致,显然该评估结果不符合电力生产实际;利用LeaderRank算法计算节点重要度,由于背景节点的引入,算法抗干扰能力更强,迭代结果更为理想,但未能考虑配电网的电气特性,导致节点重要度值偏大;考虑配电网的电气特性对LeaderRank算法进行改进,利用改进的电气LeaderRank算法计算节点重要度,计算结果更符合电力生产实际,更适用于配电网健康指数计算。

由图8可知,线路负荷矩算法和潮流熵算法计算得到的线路重要度值相近,但其在同一支路上,线路重要度值

均呈下降趋势,未能考虑到节点重要度与光伏出力对线路重要度的影响;因此利用改进的线路负荷矩算法计算线路的重要度值可以克服这一缺陷,评估结果更符合电力生产实际,更适用于配电网健康指数计算。

采用本文方法,提高节点12、16、22、24、31这5个节点的分布式光伏发电渗透率为11%和13.3%,再次搜集该配电网与设备的运行数据,依次计算该配电节点与线路的健康度和重要度,评估配电网的健康状态,并将计算结果与文献[7]方法进行对比,结果如表4所示。

表4 配电网健康指数与状态

分布式光伏渗透率	8%	11%	13.3%
健康指数(本文)	2.266 3	2.324 3	2.461 2
健康指数(文献[7])	1.664 0	1.534 2	1.424 3

对比不同分布式光伏渗透率下配电网的健康指数与健康状态,可见配电网仍处于一般缺陷状态,但随着分布式光伏渗透率的提高,配电网的健康指数增大,其运行状态更加健康;根据文献[7]所提评估方法,其健康指数越小,配电网运行状态越优,由表4可知,适当提高分布式电源的渗透率,配电网健康指数减小,健康状态有所改善。由此可见,本文评估方法所得结论与文献[7]结论一致,这也进一步证明了本方法的有效性;另外,本文所提方法将配电网健康状态划分为5个健康等级,具有更好的适用性。

5 结 论

在对现有配电网实时健康状态评估方法的局限性分析的基础上,提出一种计及网络节点与线路重要度的配电网实时健康状态评估新方法,并以某地10 kV配电网为例,对该方法进行仿真验证,得出如下结论:

1) 本文采用改进的电气LeaderRank算法评估网络中节点重要度,该方法充分考虑到配电网的电气特性,节点重要度评估结果符合电力生产实际。

2) 相比于传统评估方法,该方法充分考虑到每个节点与每条线路对配电网整体健康状态的贡献度,符合配电网动态变化的特点,计算结果更加准确可靠。

3) 该方法避免了评价指标的选取与计算,只需提前得出每台设备健康指数,且在一定时间内设备健康状态并不会发生改变,根据改进的电气LeaderRank算法、线路负荷矩算法重新计算节点与线路的重要度便可实现配电网的实时健康状态评估。

参考文献

- [1] 李鹏,王瑞,冀浩然,等. 低碳化智能配电网规划研究与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 10-21.
- [2] 葛磊蛟,李元良,陈艳波,等. 智能配电网态势感知

- 关键技术及实施效果评价[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2269-2280.
- [3] ZHENG X, WANG S, SU X, et al. Real-time dynamic behavior evaluation of active distribution networks leveraging low-cost PMUs[J]. Energies, 2021, DOI: 10.3390/en14164999.
- [4] KORNAKKA M, GAWLAK A. An analysis of the operation of distribution networks using kernel density estimators[J]. Energies, 2021, DOI:10.3390/en14216984.
- [5] 杨志淳, 靖晓平, 乐健, 等. 基于 MI-PSO-BP 算法的配电设备状态实时评估方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 108-113.
- [6] 张朝龙, 何怡刚, 杜博伦, 等. 基于深度学习的电力变压器智能故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 81-89.
- [7] 孙黎霞, 王中一, 戴洪, 等. 计及网络结构的配电网健康状态评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 64-74.
- [8] 马钊, 周莉梅, 袁海文, 等. 现代配电网健康指数理论及其应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 130-140, 328.
- [9] 李毅强, 董清, 程林, 等. 一种辐射型配电系统的网络健康性能评价方法[J]. 现代电力, 2016, 33(5): 68-73.
- [10] 廖涛, 高利明, 徐二强, 等. 基于全时校验及综合赋值法的计量二次回路健康度评价[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2): 93-97.
- [11] 国家电网公司. 配电设备状态评价导则: Q/GDW 645—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [12] 于晶荣, 曹一家, 何敏, 等. 单相单级光伏逆变器最大功率点跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 18-25.
- [13] 苏树清, 杨凯, 张宁. LeaderRank 与 PageRank 算法比较研究[J]. 信息技术, 2015(4): 8-11.
- [14] 朱新. 配电设备的关键状态监测与评价技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [15] 刘行谋, 薛金鑫, 杨永明, 等. 变压器铁芯搭接区磁热等效及温升影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 187-196.
- [16] 李金湖. 基于改进 K-means 算法的电力大数据系统研发[J]. 电子测量技术, 2018, 41(13): 23-28.
- [17] 胡志广. 配电设备在线状态监测及评价[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

作者简介

程江洲, 副教授, 主要研究方向为配电网健康状态评估、智能配网等。

E-mail: chengjiangzhou@ctgu.edu.cn

王永威(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为配电网健康状态评估。

E-mail: 2491814591@qq.com

朱险峰, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

E-mail: 104082564@qq.com