

# 基于G1赋权法的新型配电网安全态势综合评估技术

高捷<sup>1</sup>, 孔世炜<sup>2</sup>, 方珺<sup>1</sup>, 刘涌<sup>3</sup>, 李远舸<sup>3</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000;

2. 国网浙江省电力有限公司新昌县供电公司, 浙江 绍兴 312000;

3. 上海博英信息科技有限公司, 上海 200240)

**摘要:** 电力系统缺乏对于新型配电网运行状态的实时掌控, 智能化水平与自动化水平均较低, 设计基于G1赋权法的新型配电网安全态势综合评估技术, 合理评估其安全态势。以新型配电网安全态势为评估目标, 构建评估指标体系; 设计Autoencoder深度学习自编码网络, 其由数据输入层、最终输出层以及中间限制波兹曼机(RBM)层构成, 对各评估指标数据实施降维处理; 通过G1赋权法获取各指标的权重, 利用效用理论与ER算法等实现新型配电网的安全态势综合评估。测试结果表明, 设计技术的态势评估误差在后期趋于平稳, 稳定在0.02以下, 评估耗时较低。

**关键词:** G1赋权法; 新型配电网; 网架结构; Autoencoder; 卡方距离; 安全态势评估

中图分类号: TP18 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)03-0034-05

## A New Comprehensive Assessment Technology of Distribution Network Security Situation Based on G1 Weighting Method

GAO Jie<sup>1</sup>, KONG Shi-wei<sup>2</sup>, FANG Jun<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>3</sup>, LI Yuan-ge<sup>3</sup>

(1. State Grid Zhejiang Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000 China;

2. State Grid Zhejiang Xinchang Power Supply Company, Shaoxing 312000 China;

3. Shanghai Proinvent Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200240 China )

**Abstract:** The power system lacks real-time control over the operation status of the new distribution network, and the level of intelligence and automation is low. A new comprehensive assessment technology for the security situation of distribution network based on G1 weighting method is designed to reasonably assess its security situation. Taking the new distribution network security situation as the evaluation target, the evaluation index system is constructed. Autoencoder deep learning self coding network is designed, which is composed of data input layer, final output layer and intermediate bound Boltzmann machine (RBM) layer, to reduce the dimension of each evaluation index data. The G1 weighting method is used to obtain the weight of each index, and the utility theory and ER algorithm are used to realize the comprehensive assessment of the security situation of the new distribution network. The test results show that the situation assessment error of the design technology tends to be stable in the later stage, which is less than 0.02, and the assessment time is low.

**Keywords:** G1 weighting method; new distribution network; grid structure; Autoencoder; Chi square distance; security situation assessment

### 0 引言

在社会的不断发展中, 社会用电量与能源需求量都在迅速增长, 分布式发电与可再生能源越来越受重视。通常分布式能源与新型配电网直接相连, 使新型配电网面临的风险越来越多<sup>[1]</sup>。然而现有的电力系统仍然缺乏对于新型配电网运行状态的实时掌控, 智能水平与自动化水平均较低, 因此对其实施安全态势评估有很大必要性。可以说安全态势评估是新型配电网安全、经济、可靠

运行的基础, 能够协助管理人员作出更加合理、准确的决策, 全面提升新型配电网故障处理、数据分析、信息感知以及调度等能力, 提升其管理水平, 有助于实现其主动智能防控。

对于态势评估在新型配电网方面的研究, 于群提出一种基于L2范数的三维可视化评估方法, 主要综合五种指标, 考虑天气、结构变化等多种因素, 应用L2范数对安全态势评估函数进行构建, 并对该方法的有效性进行验证<sup>[2]</sup>。金明辉等人提出基于状态评估的智能配电网态势感知方法研究, 构建智能配电网模型, 确定特征向量, 基于状态评估检测矩阵的一致性, 提取特征向量矩阵最大

\*基金项目: 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司经济技术服务项目 (B7SBSX200010)

收稿日期: 2024-06-04

值,实现智能配电网的态势感知<sup>[3]</sup>。以上方法存在态势评估误差较大的问题,设计一种基于G1赋权法的新型配电网安全态势综合评估技术。

## 1 新型配电网安全态势综合评估

### 1.1 构建评估指标体系

分析新型配电网的运营高效性、电网互动性、网络坚强度、电能优质性,以新型配电网安全态势为评估目标,确定新型配电网安全态势综合评估的一级评估指标<sup>[4]</sup>。

电力装置发生故障会对新型配电网的电网互动性、运营高效性、电能优质性、网络坚强度造成全方位影响,因此将运行故障作为一级评估指标。当分析时段不是年时,需要转换年故障率的统计结果,具体公式如下:

$$P = E \times \frac{8760h}{r} \quad (1)$$

式(1)中, $P$ 是转换后的故障率; $E$ 是指年故障率的统计结果; $h$ 是小时; $r$ 是指转换后的统计小时数。

供电可靠性同样会对新型配电网的电网互动性、运营高效性、电能优质性、网络坚强度造成全方位影响,因此将供电可靠性作为一级评估指标<sup>[5]</sup>。

电压合格率是衡量电力质量与供电经济性的关键指标,将其定为一级评估指标。电压合格率的计算公式具体如下:

$$s = \left(1 - \frac{d}{t}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, $s$ 是电压合格率; $t$ 是指统计时间; $d$ 是电压越限时间<sup>[6]</sup>。

负载率描述的是电力装置的运行状况,反映新型配电网区域内的负荷分布情况。当该指标过高时,装置可能过热,引发运行隐患,影响新型配电网的安全。因此将负载率作为一级评估指标。其计算公式具体如下:

$$G = \frac{\alpha}{\beta} \times 100\% = \frac{\chi}{\delta \cdot \phi} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中, $\phi$ 是额定功率; $G$ 是负载率; $\alpha$ 是三相最大电流; $\delta$ 是功率因数; $\beta$ 是额定电流; $\chi$ 是实际功率<sup>[7]</sup>。

网架结构也是影响新型配电网安全态势的重要因素,因此将其列为一级评估指标<sup>[8]</sup>。

划分以上五个指标,获取二级评估指标,所构建的体系如表1所示。

其中指标基础数据主要来自新型配电网大数据平台中的各种系统。

### 1.2 指标数据预处理

对各评估指标数据实施降维处理,采用的处理方法为Autoencoder。设计一种Autoencoder深度学习自编码网络,由数据输入层、最终输出层以及中间限制波兹曼

机(RBM)层构成,其中RBM层由隐含层与可见层构成,共设置三层,通过该自编码网络实施降维处理<sup>[9]</sup>。

表1 构建的评估指标体系

评估目标	一级评估指标	二级评估指标
新型配电网安全态势	运行故障	10 kV 架空线路实际故障率
		开关设备实际故障率
		10 kV 电缆线路实际故障率
		配变实际故障率
		负荷可转移率
	供电可靠性	平均停电用户数量
		高运行年限设备占有率
		平均用户停电时间
		故障停电率
		低压用户实际电压合格率
	电压合格率	台区关口实际电压合格率
		主变 10 kV 母线实际电压合格率
		主变实际重过载比例
		10 kV 线路实际重过载比例
		主变轻载比例
负载率	10 kV 线路实际轻载比例	
	配变实际轻载比例	
	配变实际重过载比例	
	综合线损率	
	绝缘化率	
网架结构	高损配变率	
	平均供电半径	
	网架互联率	

该自编码网络的降维流程具体如下:

(1) 对适当的预训练次数进行设置,完成预训练。

在预训练中,将可见层神经元  $x_i$  表示,隐含层神经元用  $y_i$  表示,求出输入数据下与重构数据下  $x_i$ 、 $y_i$  对应的二进制状态乘积之间的差,通过对差的学习率进行计算,实现权重的更新,具体公式如下:

$$\Delta w_{ij} = \nu (\langle x_i y_i \rangle_d - \langle x_i y_i \rangle_r) \quad (4)$$

式(4)中, $\nu(\langle x_i y_i \rangle_d - \langle x_i y_i \rangle_r)$ 是 $\langle x_i y_i \rangle_d$ 与 $\langle x_i y_i \rangle_r$ 的差的学习率; $\langle x_i y_i \rangle_d$ 是指重构数据下的差; $\langle x_i y_i \rangle_r$ 是输入数据下的差<sup>[10]</sup>。

一次训练过程可以分解为三个步骤,具体如下:

1) 在  $x_i$  中对数据进行输入,以  $x_i$  为依据对  $y_i$  状态进行更新;

2) 在  $y_i$  中对  $x_i$  的状态进行重构;

3) 以  $x_i$  的重构状态为依据对  $y_i$  的状态进行重构。

(2) 以最小重构误差为原则对预训练获得的初始权重进行调整,实现微调过程,以获得较好的重构效果<sup>[11]</sup>。

将输入样本集用下式来表示:

$$A = \{a_0, a_1, \dots, a_m\} \quad (5)$$

式(5)中, $a_m$ 是第  $m$  个输入样本。

将编码函数设为  $d_1$ ,解码函数设为  $d_2$ ,用下式表示编解码参数:

$$\alpha = \{\varepsilon, \phi, \varphi, \gamma\} \quad (6)$$

式(6)中,  $\varepsilon$ 是  $d_1$ 的权重矩阵;  $\phi$ 是  $d_1$ 的偏差向量;  $\varphi$ 是  $d_2$ 的权重矩阵;  $\gamma$ 是  $d_2$ 的偏差向量<sup>[12]</sup>。

经过编码器编码后,高维数据成为低维数据,具体如下:

$$t_1 = d_1(A) = d_1(a_m) \quad (7)$$

通过解码器对低维数据进行解码,获取重构完成的高维数据,具体如下:

$$t_2 = d_2(A) = d_1(t_1) \quad (8)$$

完成降维处理后,通过降维数据实现新型配电网安全态势综合评估。

### 1.3 安全态势综合评估

通过G1赋权法获取各指标的权重,利用效用理论与ER算法(证据推理算法)等实现新型配电网的安全态势综合评估。指标权重的获取步骤具体如下:

#### (1) 序关系的确定

步骤如下:

##### 1) 将指标集用下式来表示:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \quad (9)$$

式(9)中,  $y_n$ 是第  $n$ 个指标。

2) 由专家选出  $Y$ 中关于新型配电网安全态势的一个最重要的指标,记为  $y_1^*$ ;

3) 由专家在剩余的  $n-1$ 个指标中筛选出关于新型配电网安全态势的一个最重要的指标,记为  $y_2^*$ ;

4) 不断重复以上步骤,由专家在剩余的  $n-(p-1)$ 个指标中筛选出关于新型配电网安全态势的一个最重要的指标,记为  $y_p^*$ ;

5) 将经过  $n-1$ 次挑选后将剩余的指标记为  $y_n^*$ 。

由此确定唯一的序关系,具体如下:

$$y_1^* > y_2^* > \dots > y_m^* \quad (10)$$

#### (2) 指标重要程度判断

假设专家对于指标  $y_{p-1}$ 与指标  $y_p$ 的重要性程度比值的判断为:

$$\begin{cases} y_{p-1} = l_p \\ y_p \\ p = n, n-1, \dots, 3, 2 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $l_p$ 的赋值情况具体如下:

当  $y_{p-1}$ 与  $y_p$ 有着同样的重要性,  $l_p$ 取值为1.0;

当  $y_{p-1}$ 比  $y_p$ 重要一点,  $l_p$ 取值为1.2;

当  $y_{p-1}$ 比  $y_p$ 重要很多,  $l_p$ 取值为1.4;

当  $y_{p-1}$ 比  $y_p$ 重要非常多,  $l_p$ 取值为1.6;

当  $y_{p-1}$ 比  $y_p$ 极度重要,  $l_p$ 取值为1.8。

#### (3) 计算权重系数

当专家给出的赋值满足序关系  $y_1^* > y_2^* > \dots > y_m^*$ ,则可

以通过下式对指标  $y_n$ 的权重系数  $\omega_n$ 进行计算:

$$\omega_n = \left( 1 + \sum_{p=2}^n \prod_{j=p}^n l_j \right)^{-1} \quad (12)$$

获取指标权重后,通过卡方距离实施组合赋权的权重优化。通过效用理论与物元矩阵对已获取数据的安全性等级信任度进行划分。最后根据ER算法与组合赋权结果实施新型配电网安全态势的综合性评估。评估公式具体如下:

$$\chi_i = \frac{\prod_{j=1}^n [\omega_j' q_{i,j} \omega_j'] - \prod_{j=1}^n [1 - \omega_j']}{\sum_{i=1}^M \prod_{j=1}^n [\omega_j' q_{i,j} \omega_j'] - M \prod_{j=1}^n [1 - \omega_j']} \quad (13)$$

式(13)中,  $\omega_j'$ 是指标  $y_j$ 优化以后的组合权重;  $q_{ij}$ 是指标  $y_i$ 对安全态势等级  $V_i$ 的信任度;  $M$ 是安全态势等级的个数;  $\chi_i$ 是安全态势等级  $V_i$ 的置信度。

以上完成新型配电网安全态势的综合性评估。

## 2 综合评估算例测试

### 2.1 实验设计

为证明设计基于G1赋权法的新型配电网安全态势综合评估技术,能够综合反映新型配电网的安全性与可靠性,选用某地区的新型配电网实施案例分析,即对该新型配电网实施安全态势综合评估。

实验算例共有33个节点,作为新型配电网,接入风电与光电。其中风电在节点12、24处接入,光电在节点15处接入。为使算例更加典型,在实验配电网中接入电动车,接入节点为16、22。

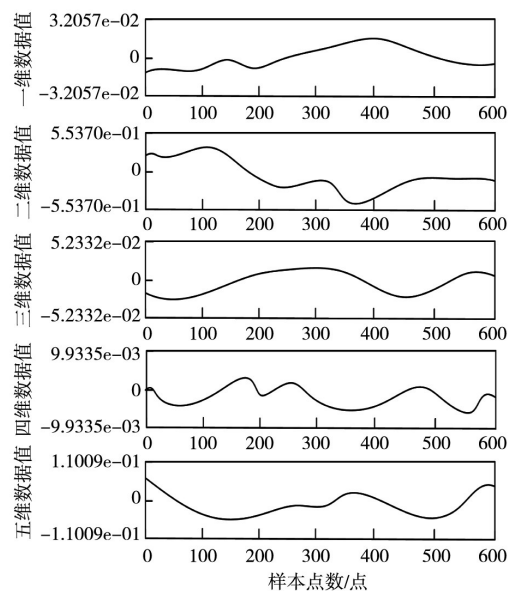


图1 综合线损率指标的降维处理结果

完成算例布置后,构建实验算例的评估指标体系,并收集指标基础数据。通过设计的Autoencoder深度学习

自编码网络对各评估指标数据实施降维处理,其中综合线损率指标的降维处理结果如图1所示。

通过G1赋权法获取各指标的权重,权重计算结果具体如表2所示。

表2 权重计算结果

评估目标	权重值	一级评估指标	权重值	二级评估指标	权重值	
新型配电网安全态势	1.00	运行故障	0.25	10 kV 架空线路实际故障率	0.06	
				开关设备实际故障率	0.07	
				10 kV 电缆线路实际故障率	0.06	
				配变实际故障率	0.06	
				负荷可转移率	0.04	
				平均停电用户数量	0.03	
				高运行年限设备占有率	0.03	
				平均用户停电时间	0.05	
				故障停电率	0.05	
	供电可靠性	0.20			低压用户实际电压合格率	0.04
					台区关口实际电压合格率	0.05
					主变10 kV 母线实际电压合格率	0.05
					主变实际重过载比例	0.04
					10 kV 线路实际重过载比例	0.04
					主变轻载比例	0.04
	电压合格率	0.18			10 kV 线路实际轻载比例	0.05
					配变实际轻载比例	0.04
					配变实际重过载比例	0.05
					综合线损率	0.03
					绝缘化率	0.04
					网架结构	0.15
					平均供电半径	0.03
					网架互联率	0.02
					负载率	0.22

最后利用效用理论与ER算法等实现新型配电网的安全态势综合评估。对于评估结果,对其态势评估误差、评估耗时进行测试。

在测试中,将文献[2]、文献[3]中的评估方法当作对比方法,进行三种方法的对比测试,以凸显设计方法的优越性。

## 2.2 态势评估误差测试结果

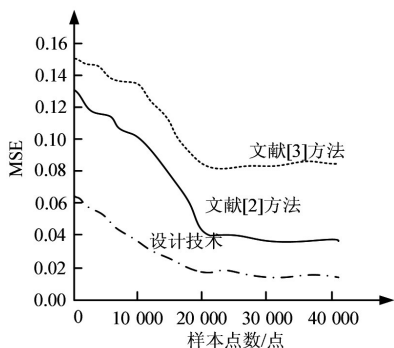


图2 态势评估误差测试结果

态势评估误差是衡量态势评估方法性能最直接的—个指标。分别测试三种方法的态势评估误差,测试结果具体如图2所示。

根据图2测试结果,三种方法的态势评估误差在初期均有强烈下降趋势,并在后期趋于平稳。其中设计技术的态势评估误差整体较低,而文献[2]、文献[3]评估方法的态势评估误差则整体较高,特别是文献[3]中的评估方法,与设计方法形成鲜明对比。

## 2.3 评估耗时测试结果

评估耗时情况也是反映态势评估方法性能的一个重要指标,因此测试三种方法的评估耗时情况,测试结果如图3所示。

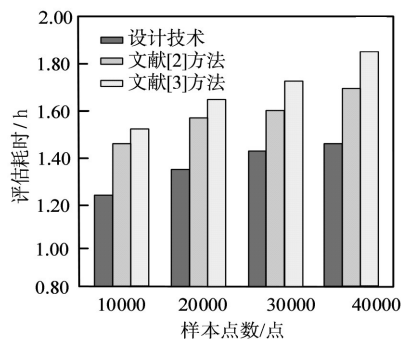


图3 评估耗时测试结果

图3的数据表明,随着样本点数量的增长,三种方法的评估耗时都在增加,且增加的节奏大致相似。但整体来说,设计技术的评估耗时在三种方法是最低的,也就是设计技术具备省时性,评估效率更高。

## 3 结束语

新型配电网的安全问题一直是电力行业的重点关注问题,面向该问题的讨论从未停止。设计一种基于G1赋权法的新型配电网安全态势综合评估技术,实现了高效而准确的安全态势综合评估,其评估指标涉及面较广,因此综合性较强,取得了一定研究成果。

### 参考文献:

- [1] 项波,吴承骏,胡伟楠,等.综合考虑检修策略和设备健康指数的配电网可靠性评估[J].重庆大学学报,2021,44(8):10-20.
- [2] 于群,刘启林.基于L2范数的电力系统运行安全态势三维可视化评估[J].科学技术与工程,2020,20(19):7704-7710.
- [3] 金明辉.基于状态评估的智能配电网态势感知方法研究[J].电网与清洁能源,2020,36(5):69-74.
- [4] 李程雄.面向发电集团的网络安全态势智能感知系统设计[J].自动化技术与应用,2021,40(7):76-80,90.
- [5] 田书欣,李昆鹏,魏书荣,等.基于同步相量测量装置的配电网安全态势感知方法[J].中国电机工程学报,2021,41(2):617-632.
- [6] 于唯一,王慧芳,曹芬,等.考虑场景缩减和动态寿命的用户侧新能源配储研究[J].电测与仪表,2024,61(9):127-136.
- [7] 郑国鑫,雷霞,王湘,等.地震灾害模拟及配电网的风险评估[J].电工技术学报,2020,35(24):5218-5226.

(下转第99页)