

基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法

张春梅¹, 许兴雀¹, 王曦¹, 黄彬系², 袁杰生¹

(1. 广东电网有限责任公司中山供电局, 广东 中山 528400;

2. 广东电力信息科技有限公司, 广东 广州 510030)

摘要: 为保证电网安全运行, 风险预警技术是其中不可缺少的步骤, 但预警过程中易受不均匀电压、强磁场等问题的干扰, 为了解决上述问题, 提出基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法。该方法首先采用主成分分析法对电网数据做降维处理, 其次利用小波变换法提取电网数据的特征, 然后采用 D-S 证据理论将特征融合, 得到元素可信度, 最后采用模糊 C 均值聚类对元素可信度分类, 完成电网调控多阶段风险预警。实验结果表明, 所提方法对电网调控多阶段风险的预警时间短、通信网络时延小, 预警实时性稳定性。

关键词: 投影变换; 主成分分析; 信号重构; 证据体概率赋值; 模糊 C 均值

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)01-0084-05

Multi-stage Risk Early Warning Method for Power Grid Regulation Based on Multi-source Information Fusion

ZHANG Chun-mei¹, XU Xing-que¹, WANG Xi¹, HUANG Bin-xi², YUAN Jie-sheng¹

(1. Zhongshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhongshan 528400 China;

2. Guangdong Electric Power Information Technology Co., Ltd., Guangzhou 510030 China)

Abstract: In order to ensure the safe operation of the power grid, risk early warning technology is an indispensable step, but the early warning process is easily disturbed by problems such as uneven voltage and strong magnetic field. In order to solve the above problems, a multi-stage power grid regulation based on multi-source information fusion is proposed. Risk warning methods. This method first uses the principal component analysis method to reduce the dimension of the power grid data, secondly uses the wavelet transform method to extract the features of the power grid data, then uses the D-S evidence theory to fuse the features to obtain the element credibility, and finally uses the fuzzy C-means clustering to Element credibility classification, completes multi-stage risk early warning of power grid regulation. The experimental results show that the proposed method has short early warning time, small communication network delay, and real-time stability of early warning for multi-stage risks of power grid regulation.

Keywords: projection transformation; principal component analysis; signal reconstruction; evidence body probability assignment; fuzzy C-means

0 引言

作为电力建设的重要组成部分, 电网一旦处于危险状态就会造成巨大经济损失, 因此电网调控多阶段风险预警方法一直是工作人员的关注重点。近年来, 随着中国电力发展步伐不断加快, 我国在电网风险预警系统中融入分析、评估、风险调控等多个环节, 有效地提升了电网运行的安全性。而电网调控过程复杂, 各个阶段均存在不同程度的风险, 针对电网调控多阶段的风险预警问题, 已成为当前相关领域的重点研究内容。

针对上述问题, 国内外相关领域学者对电网调控多

阶段风险预警方法作出了研究。国外针对风险预警主要表现在电网的智能化^[1]研究方面, 比如利用可再生能源的间歇性制约^[2]电网风险。由实验证明和理论依据可知, 研究电网调控多阶段风险预警方法具有重要意义。张中丹^[3]等人根据电网常见风险的耦合作用, 挖掘电网数据信息资源, 然后构建基于区块链支持的风险预警模型, 将数据信息资源输入到模型中。最后采用模型预测控制算法修正了预警模型, 并通过 MPC 算法对模型求解, 完成电网调控多阶段的风险预警。该方法没有对电网数据做降维处理, 导致预警时间较长。杜晓东^[4]等人利用电网的历史数据构建基于随机行为的马尔科夫风险预警模型, 然后采用吉布斯算法对模型随机抽样调查, 得到电网当前的运行状态, 最后结合孪生电网超时算法计算出电网随机场风险评判指标, 完成电网调控多阶段的风险预警。该

*基金项目: 中山供电局 2021 年综合域个性化数据应用建设(全业务合规管理监控应用)项目(032000HK42210004)

收稿日期: 2023-10-17

方法没有提取电网数据的特征,导致预警时间较长。王瑾^[5]等人在电网异常状态的基础上构建电网健康度评估指标,然后采用随机森林对异常类型检测,并将检测结果分成不同的电压拐点,最后结合人工神经网络模型预测拐点的变化趋势并实时控制,完成电网调控多阶段的风险预警。该方法没有对电网数据做聚类处理,导致预警复杂度较高。

为了解决上述方法中存在的问题,提出基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法。

1 电网数据预处理

1.1 电网数据降维

为了降低电网风险的预警所耗时间,基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法,采用主成分分析法对电网数据做降维处理,消除冗余数据的同时可以完好地保留原始数据信息,具体步骤如下:

(1) 假设电网数据点用 a 表示,每个数据点都有其对应的负荷数据,则由电网负荷数据构成的矩阵可用如式(1)表示。

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \\ A = [A_1, A_2, \cdots, A_n] \end{cases} \quad (1)$$

式中, A 描述的是负荷数据矩阵; m 为采集的负荷数据量; n 表示的是电网数据的排序。

(2) 将电网负荷矩阵投影变换,得到的矩阵新维度为 m 维。然后计算出矩阵的平均值 \bar{a} ,即得到消除中心化的电网数据,如式(2)所示。

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{n} \quad (2)$$

其中, i 代表矩阵中的任意电网数据点。

(3) 根据矩阵的平均值计算出电网数据的协方差矩阵,得到所有电网数据样本点对应的协方差。为了使所有电网数据样本点的投影尽可能分散,需要保证投影点处的协方差数值最大化。如式(3)所示。

$$\begin{cases} B = \frac{AA^U}{n} \\ AA^U a = \alpha a \end{cases} \quad (3)$$

式中, B 描述的是协方差矩阵; A^U 代表的是电网数据在新空间上的投影; α 为分散程度。

(4) 引入优化函数^[6]对协方差数值排序,取前 c 个协方差数值,其对应的数据样本点即为主成分分析的解,完成电网数据的降维。如式(4)所示。

$$\begin{cases} \max \frac{AA^U}{n} = I \\ \alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \cdots \alpha_c \end{cases} \quad (4)$$

其中, I 代表优化函数。

1.2 特征提取

针对降维后的电网数据,基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法,采用小波变换算法提取电网数据中的特征,具体步骤如下:

(1) 电网数据在传输过程中产生的电磁波的形式,可用信号表达。小波变换具有低通滤波特性,可以将原始信号分解^[7]成高频信号与低频信号,如式(5)所示。

$$\begin{cases} z(u) = E_1(u) + Z_1(u) = E_1(u) + E_2(u) + Z_2(u) \\ z(u) = \sum_{j=1}^v E_j(u) + Z_v(u) \end{cases} \quad (5)$$

式中, z 描述的是原始信号; u 表示的是分量系数; E 代表高频信号; Z 为低频信号; v 代表的是离散信号; j 表示任意电网数据点。

(2) 在电网的运行过程中,将分解后的高频信号与低频信号重新融合到一起,得到具有统一表达的重构信号,如式(6)所示。

$$z(u) = E_1(u) + Z_1(u) = \sum_{j=1}^{v+1} E_j(u) \quad (6)$$

(3) 重构信号的不同频域对应的系数能量分布可以用系数序列的平方积表示。假设信号在重构后的系数能量分布为 G ,则其基本形式可用式(7)表示。

$$\begin{cases} G_j = \sum_i |E_j(u)|^2 \\ G_{v+1} = \sum_i |Z_v(t)|^2 \\ G = G_1, G_2, \cdots, G_v \end{cases} \quad (7)$$

式中, t 代表时刻。

(4) 根据系数能量分布可以计算出原始信号的小波能量总和,等于不同频域时高频信号与低频信号的能量总和,即为电网数据的特征。如式(8)所示。

$$G(u) = \sum_{j=1}^v G_j + G_{v+1} \quad (8)$$

2 风险预警

基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法,采用D-S证据理论将提取的特征融合,得到元素可信度,然后采用模糊聚类算法完成风险预警,具体步骤如下:

(1) 将提取的电网数据特征作为证据体,引入证据可信度,可以反映证据体之间的相对可信程度,然后将可信度作为修正系数,修正原始证据体;

(2) 原始证据体得到修正后,证据体之间的冲突概率

被随机分配到识别框架中,得到修正后的证据体基本概率赋值,如式(9)所示。

$$\begin{cases} L = [I(C_1)I(C_2)\cdots I(C_k)I(\Omega)] \\ I(C_e) = [\chi^{l'}(C_e) | e = 1, 2, \dots, k] \\ I(\Omega) = 1 - \sum_{e=1}^k I(C_e) \\ I'(C_e) \in L' \end{cases} \quad (9)$$

式中, L 表示修正后的证据体; l 为修正后的证据体元素; C 为基本概率赋值; Ω 代表识别框架; χ 代表的是修正系数; e 表上的是元素顺序; k 为元素总数量; L' 表示原始证据体元素; L' 为原始证据体。

(3) 基于多源信息融合的风险预警方法,在证据体识别框架中,基于局部冲突分配的合成原理,在证据体基本概率赋值与引起局部冲突的证据体之间做分配处理,如式(10)所示。

$$\begin{cases} I(C) = \sum_{R \cap S = C} I_k(R)I_k(S) + f(C) \\ f(C) = \sum_{C \cap T} \left[\frac{I^2(C)I^2(T)}{I(C)+I(D)} + \frac{I^2(C)I^2(T)}{I(D)+I(C)} \right] \\ R, S, T \in [L_1, L_2, \dots, \Omega] \end{cases} \quad (10)$$

其中, R, S, T 分别表示原始证据体; f 表示分配常数。

(4) 分配处理后,每两个证据体融合,得到新的证据体。归一化处理^[8]新的证据体,得到电网数据对应的元素可信度,如式(11)所示。

$$\begin{cases} I''(C) = \frac{I(C)}{\sum I(\oplus)} \\ I(\oplus) \in L_k \end{cases} \quad (11)$$

式中, I'' 为归一化处理后的证据体元素可信度; \oplus 表示融合过程。

(5) 基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法^[9],采用模糊C均值聚类算法处理元素可信度。然后迭代计算寻找最接近最小准则函数 F 的元素,准则函数公式如式(12)所示。

$$\begin{cases} F_{\min}(V, W) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^d V^l d^2 \\ V = [V_1, V_2, \dots, \Omega] \\ l \in [0, 1] \\ \sum_{i=1}^d V_{ij} = 1 \\ d = (i - V)^T C (i - V) \end{cases} \quad (12)$$

式中, V 表示隶属度矩阵; W 为分类中心; d 表示数据点与分类中心之间的距离; v 为隶属度; i 表示电网数据点。

(6) 设定模糊聚类隶属度阈值为 ε , 将隶属度小于阈

值的元素可信度视为非风险元素;将隶属度大于阈值的元素可信度视为风险元素,进而完成电网调控多阶段的风险预警^[10-12]。

基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警流程如图1所示。

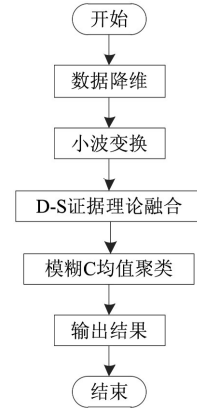


图1 基于多源信息融合的电网风险预警流程

3 实验与分析

为了验证基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法的整体有效性,需要对其做出如下测试。

在测试实验中,借助 MATLAB 平台设计节点电网系统作为测试目标,其结构如图2所示。

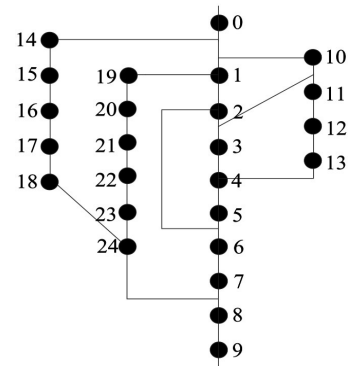


图2 节点电网系统结构图

将各个预警方法的节点响应时间、网络时延作为指标,采用基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法、文献[3]方法、文献[4]方法做出对比测试。

(1) 预警时间

针对图2中的全部电网节点,采用所提方法、文献[3]方法、文献[4]方法对其预警。并且在电网运行过程中,实时调整节点负荷比例,测试不同负荷比例下各个方法的预警时间。预警时间越短,表明方法的预警实时性越好;预警时间越长,表明方法的实时预警性越差。不同方法的测试结果如表1所示。

分析表1中的数据可知,针对电网调控多阶段风险的预警,在不同的负荷比例下,所提方法的预警时间均小于

文献[3]方法、文献[4]方法的预警时间。并且随着负荷比例的不断增加,所提方法的预警时间增加幅度较小,而文献[3]方法、文献[4]方法的预警时间增加幅度较大,说明所提方法的预警实时性强于文献[3]方法、文献[4]方法的预警实时性。

表1 不同方法的预警时间

负荷比例/%	预警时间/ms		
	所提方法	文献[3]方法	文献[4]方法
10(节点0-3)	0.2	5.4	3.9
20(节点4-6)	0.5	5.7	4.1
30(节点7-10)	0.9	6.3	4.8
40(节点11-14)	1.1	6.6	5.2
50(节点15-18)	1.2	6.9	5.7
60(节点19-22)	1.4	7.3	6.1
70(节点23-24)	1.5	7.6	6.4

所提方法在电网调控多阶段风险预警过程中,采用主成分分析法对电网数据做出了降维处理,预处理后的电网数据消除了冗余数据,进而降低了节点的预警时间,拥有更强的预警实时性。

(2) 通信网络时延

为了分析各个方法的计算复杂度对预警实时性的影响,设计通信网络时延测试。网络时延越大,表明方法的计算复杂度越高、对预警实时性影响越大;网络时延越小,表明方法的计算复杂度越低、对预警实时性的影响越小。利用电压幅值在一定时间内的波动情况来表示网络时延的大小。

为了保证实验的公正性与严谨性,根据实际存在的风险将电网运行接线图分成辐射网与环状网,分别如图3(a)、图3(b)所示。

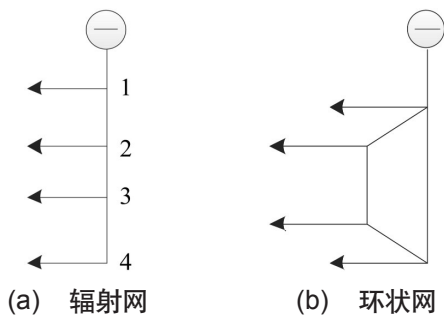
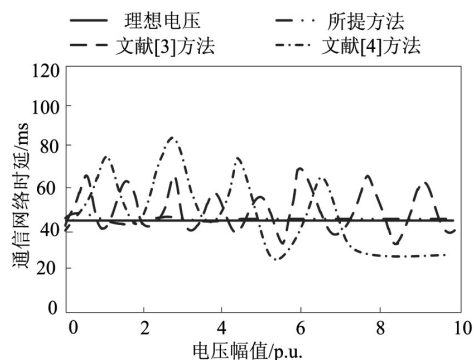


图3 电网运行接线图

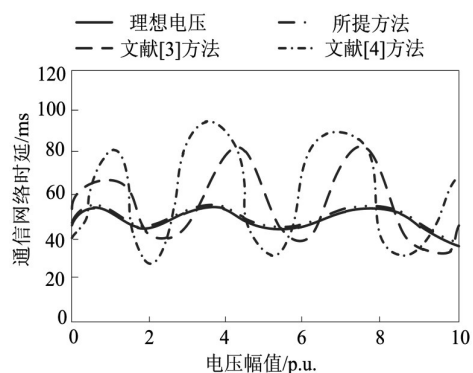
所提方法、文献[3]方法与文献[4]方法的网络时延测试结果如图4所示。

分析图4可知,无论是在辐射网下还是环状网下,文献[3]方法和文献[4]方法的网络时延曲线都与理想曲线相差甚远,通信时延较大;所提方法的网络时延曲线与理想曲线基本重合,通信时延较小。说明所提方法的预警计算复杂度低于文献[3]方法与文献[4]方法的计算复杂度,

即所提方法的预警实时性稳定性强于文献[3]方法与文献[5]方法预警实时性的稳定性。这是因为所提方法对电网数据做降维处理,通过小波变换法提取电网数据的特征,利用D-S证据理论将特征融合,避免了不均匀电压、强磁场等问题的干扰,提升了风险预警的稳定性。



(a) 辐射网下的通信网络时延



(b) 环状网下的通信网络时延

图4 不同方法的通信网络时延

4 结束语

经测试发现,目前电网调控多阶段风险预警方法存在预警时间长、通信网络时延大等问题。为此提出基于多源信息融合的电网调控多阶段风险预警方法。该方法首先对电网数据做降维处理,然后提取其特征,最后采用D-S证据理论将特征融合,获得元素可信度,并采用模糊C均值聚类算法对元素可信度分类,完成电网调控多阶段的风险预警。降低了预警时间的同时,一定程度上也降低了方法的通信网络时延,为电网的风险预警奠定了基础。

参考文献:

[1] 陈盛慧,叶良,徐光年,等.智能化视觉系统在配电网带电接火上的应用[J].机械制造与自动化,2021,50(3):228-231.
 [2] 马涛,张正文,李津.多站模式下对电网中可再生能源波动的消除[J].能源与环保,2021,43(11):128-133.
 [3] 张中丹,杨德州,王洲,等.基于区块链技术的电网灾害预警决策系统[J].现代电力,2021,38(3):307-315.
 [4] 杜晓东,赵建利,刘科研,等.基于数字孪生的光伏高比例配电

网过载风险预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 136-144.

[5] 王瑾, 裴亮. 基于深度学习的电网调控系统异常检测与多阶段风险预警[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(6): 601-607.

[6] 张飞, 石琴, 陈一镨, 等. 基于敏感性分析的悬架多目标优化函数构建方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(1): 14-19, 25.

[7] 杨思元, 陈小惠, 王凯莉, 等. 一种改进的PPG信号稀疏分解身份识别方法[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(9): 55-60.

[8] 熊炜, 童磊, 李利荣, 等. 基于可分离空洞卷积与联合归一化的语义分割算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(10): 18-23.

[9] 周慷, 温立超, 王蒙蒙, 等. 基于梯度算法的电网台区线损状态自动识别模型[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(8): 109-112.

[10] 郑鹏程. 基于GRU网络的电网故障诊断方法研究[J]. 自动

化技术与应用, 2021, 40(2): 11-15.

[11] 谢景海, 贾伟轲, 苏东禹, 等. 考虑并发数据流的电网运行风险实时预警算法[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(5): 130-134.

[12] 徐晓春, 王栋, 李佑伟, 等. 基于多源信息融合的配电网停电风险预警方法研究[J]. 机械与电子, 2020, 38(2): 3-6, 10.

作者简介: 张春梅(1978-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 数字化管理、人工智能、大数据分析。

(上接第31页)

监测到作弊行为, 通过监测报告可以详细掌握作弊信息, 其中包含称重器所属编号、作弊时间以及称重结果和误差情况, 信息详细可查, 对所有可能的生产过程进行实时作弊监测。

为了保证煤炭销运平台计量发运的可靠性, 需要尽快地监测到并实施防作弊计划, 在这一过程中, 最重要的环节为作弊动作出现到防止作弊的时间, 将4号作弊称重器进行煤炭发运前的计量实验, 并通过本文所提方法对4号作弊称作业情况进行防御, 结果如图8所示。

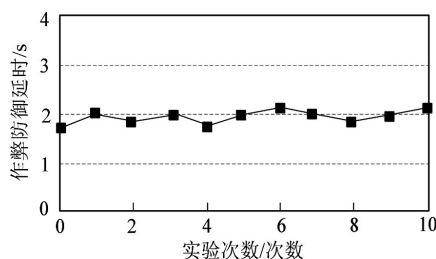


图8 防止作弊延时

从图8中可以看出, 经过多次实验的数据比对, 防作弊技术从作弊发现到防御的过程平均需要2 s左右, 防御延时相对稳定, 可判定为对作弊行为的即时防御, 证明防作弊效果较好。

5 结束语

经过真实的实验数据及分析证明, 本文所研究的煤炭无人值守智能计量发运自动防作弊技术, 能够及时准确地发现称量过程中的作弊行为, 通过防作弊信息中可以直观地看到煤炭的计量情况以及作弊时间, 同时作弊防御机制的启动响应延时较短, 能够及时处理作弊行为, 鲁棒性好, 可适用性强。

参考文献:

[1] 王文雅, 李振福. 轴辐式中国国内煤炭运输网络构建[J]. 大

连海事大学学报, 2020, 46(1): 75-88.

[2] 段凯鑫, 郭红光, 成雅彤. 生物煤层气的文献计量与发展综述[J]. 煤矿安全, 2020, 51(8): 206-212.

[3] 王宗省, 管振栋, 张欣, 等. 基于图像处理的输送带煤量动态计量研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 138-142.

[4] 郝建生. 煤矿短壁开采自动连续运输系统设计及实现[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 213-218.

[5] 石光明, 马震远, 麦智荣, 等. 作弊防控系统中独立可调双频带通滤波器设计[J]. 电子学报, 2020, 48(8): 1641-1646.

[6] 马传香, 汪炀杰, 王旭. 基于卷积神经网络的煤炭运载车辆识别[J]. 计算机科学, 2020, 47(S2): 219-223.

[7] 李爽, 薛广哲, 方新秋, 等. 煤矿智能化安全保障体系及关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2320-2330.

[8] 刘全, 冯琛, 宋子达, 等. 基于机器视觉的非接触式土石方运输车辆智能计量方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 174-178.

[9] 朱晔, 张戎. 铁路煤炭运输发展趋势研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(4): 98-103.

[10] 王桂梅, 逯圣辉, 刘杰辉, 等. 基于图像处理的带式输送机煤体积计量[J]. 计量学报, 2020, 41(6): 724-728.

[11] 左娟娟, 朱红杰, 杨继党, 等. 基于半监督机器学习的复杂电网连锁故障诊断方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(12): 47-50, 92.

[12] 罗建明, 陈超, 李明, 等. 煤炭智能化验系统性能鉴定方法验证[J]. 煤质技术, 2022, 37(1): 90-96.

作者简介: 李自杰(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: IT、网络、通信、自动、信息化及智能化管理。