

超导电缆系统的系统动力学模型构建方法及其在安全状态动态评估中的应用

谢敬东¹, 徐嘉文²

(1. 上海电力大学经济与管理学院, 上海 200082; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200082)

摘要: 为实现超导电缆安全状态的实时动态评估, 基于系统动力学理论提出了一种基于系统动力学的超导电缆安全状态评估方法。首先, 选取影响系统安全状态的关键非电气指标, 并对其搭建系统动力学流程图; 其次, 得到与设备相关参数的健康指标, 并对其给出权重; 然后, 再求得设备健康指数和故障概率之间的关系, 对设备进行实时安全状态评估; 最后, 采用串联系统模型求得超导系统的故障概率, 并利用仿真算例检验了所提出模型和技术方法的合理性, 结果表明所提出方法可以实时评估超导电缆运行的安全状况。

关键词: 超导电缆; 系统动力学; 安全状态评估

Construction Method of System Dynamics Model for Superconducting Cable System and Its Application in Safety State Dynamic Evaluation

XIE Jingdong¹, XU Jiawen²

(1. School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China; 2. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

Abstract: In order to assess the safety state of superconducting cables in real-time, this paper proposes a safety state evaluation method for superconducting cables based on system dynamics theory. Firstly, the key non electrical indicators that affect the safety state of the system are selected and a system dynamics flow chart for them is built; Secondly, health indicators related to equipment parameters are obtained and weights are assigned to them; Then, the relationship between equipment health index and failure probability is obtained to conduct real-time safety state assessment of the equipment; Finally, the series system model is used to obtain the fault probability of the superconducting system, and the rationality of the proposed model and technical method is verified through simulation examples. The results show that the proposed method can evaluate the safety state of superconducting cable operation in real time.

Key words: superconducting cable; system dynamics; safety state assessment

0 引言

100 多年前至今, 学者们将超导技术从开发阶段发展到了产业化和商业化的应用阶段。虽然超导技术已被应用于各种领域, 但其仍有较大的发展潜力。超导电缆具有低损耗、大容量的特点, 能够为高密度城市带来巨大能源的同时可以节约珍贵的土

地资源。超导电缆也有其不足之处, 与架空线路相比, 它一般敷设在地面之下, 如果产生故障则很难找到故障点位置。为了减少电缆故障的发生, 应建立一种“应检必检、当修必修”的检修机制, 这就需要对超导电缆进行安全状态评估。

目前国内外对各类电力设备的状态评估开展了大量的研究。文献[1]收集大量变压器寿命的特征参数, 通过自适应模糊神经网络(adaptive network-based fuzzy inference system, ANFIS)对变压器的寿命及状态进行评估。文献[2]采集电抗器振动信号, 储存离散频谱, 进行分析后将权重叠加实现电抗器

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507099)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51507099).

的健康评估。文献[3]的研究对象为变压器,运用灰色关联方法搭建状态评估模型,对变压器内部绝缘情况以及整体受潮程度做出判断。文献[4]通过 K-means 聚类算法分析智能高压开关设备 GIS 的安全状态并收获了成效,但是聚类算法仅用于凸数据集并且对初值的选择条件较高。文献[5-6]采用贝叶斯网络算法对电力设备进行评估,此方法需要得到先验概率,故选择假设模型不当会对结果造成较大的偏差。文献[7-8]基于神经网络方法通过多维度对电力设备进行评估,此方法虽然有自学习的优点,但是需要大量数据进行训练,若数据样本较少则无法使用。

由于电缆安装的在线监测设备较少,其运行数据数量不够完善,故对电缆状态评估的研究较少。文献[9]根据专家打分法对电缆多个维度的特征与参数的变化进行了状态评估。文献[10]使用等温松弛电流理论对电缆的绝缘老化程度进行了评估,由于研究对象为人工样本或单因素样本,无法体现电缆真实运行情境下的多因素影响,故评估结果存在偏差。文献[11]将灰色理论和模糊理论应用于电缆的状态评估,选取了绝缘性能、热性能、机械性能、运行年限、缺陷及检修情况等进行综合判断,但在隶属度函数选取上会受主观因素影响。文献[12-13]将邻近算法(K-nearest neighbor, KNN)与遗传算法(genetic algorithm, GA)相结合,但是 KNN 算法十分依赖于训练数据,GA 算法容易得到局部最优解,并且两种算法都无法处理多因素结合的问题。

本文的研究对象超导电缆有别于普通电缆,它需要依靠冷却系统将液氮充入管道中,保持电缆的超导状态。因此,为保障超导电缆本体及制冷系统各关键参量运行在可控区间内,超导监控系统运用在线监测技术,实时关注电缆运行时非电气量的数值变化情况,如液氮温度、压力、流量、液位等,保证其在安全参数范围内持续运行。近些年在线监测技术不断提升,也逐步运用于电力设备的评估^[14]。在线监测技术的兴起使其能够预测电力设备的未来风险水平,为准确评估设备安全状态奠定了基础^[15-16]。综上所述,目前对电缆状态的评估大多为定性分析,各因素权重会受到主观影响,十分依赖训练数据,同时也较少从宏观的视角对整个系统进行周期性的状态评估。因此,本文应用系统动

力学理论将整个超导电缆系统作为研究对象,对超导电缆系统的内部运行和外界环境两方面进行评估。

1 超导电缆评估模型

1.1 超导电缆介绍

超导电缆通常采用高温超导带材,缠绕在柔性中心支撑芯上,一般为空心波纹管或铜绞线。这些超导带材组成了超导电缆的导体层,主要作用是传输工作电流。导体层外层是绝缘层,一般采用聚丙烯层压纸(polypropylene laminated paper, PPLP)。PPLP 是一种非常好的电介质材料,能够在低温下工作。绝缘层外分别是屏蔽层或其他超导导体层、液氮流动空间、多层热绝缘的圆柱形真空低温恒温器和外部保护套。

与常规电力电缆系统相比,除了原本的电缆终端、中间接头、本体外,超导电缆还拥有其独有的过冷液氮循环系统及监测监控系统。冷却循环系统由制冷机、液氮泵、冷却机组、液氮罐、回流管等设备组成。实现电缆冷却的基本原理是通过过冷液氮吸收系统热量,将吸收的热量输送到冷却装置中,过冷液氮在制冷机中实现冷却后再通过回流管返回至冷却系统中,实现过冷液氮的循环,从而达到满足电缆超导态运行所需的温度、液氮冷却压力和流速要求。

超导电缆的技术特点如下。

1) 传输损耗低。超导材料在超导态时电阻为 0,它的交流损耗也大大低于常规电缆,即使考虑低温冷却所需的功率,其功率损耗仍然小于传统电缆。

2) 大容量输电。超导电缆可实现大容量输送,节约输电空间,相同截面的超导电缆其载流能力是传统电缆的 4~6 倍。在配电网中使用超导电缆代替原有的普通电缆,可以实现低损耗、高效率、大容量输电。

3) 节约通道资源。由于高温超导电缆的载流能力强大,与传统电缆相比能够显著节省地下空间和土地资源,适用于地下空间紧缺的城市中心。

1.2 超导电缆安全状态评估指标选取

超导电缆系统的健康度存在海量影响因素,为增加模型实用性,本文选取关键影响因素作为安全评估指标。超导电缆发生故障的原因分为两类:一是内部运行故障,内部因素主要是指超导电缆本

体、冷却系统的运行参量, 根据文献[17-18]对过冷液氮冷却系统的设计, 选择包括液位、压力、流量、温度作为主要评估因素; 二是外部环境, 是指超导电缆通道的环境参量, 主要关注是否有外力损坏风险, 根据《Q/GDW 1512—2014 电力电缆及通道运维规程》^[19]可以从振动信号(由智能地钉采集获得)、沉降信号等参量进行分析。

本文对超导电缆系统建立安全状态评估体系, 如表 1 所示。根据指标的数据采集类型, 分为定量和定性两类指标。

表 1 超导电缆安全状态评估指标体系
Tab. 1 Evaluation index system for safety status of superconducting cables

目标层	系统层	设备层	因素
超导电缆系统	冷却系统	液氮罐	液位/cm ▲ 压力/bar — 流量/(m ³ ·h ⁻¹) —
		A 泵箱	液位/cm ▲ 压力/bar ▼ 流量/(m ³ ·h ⁻¹) —
		B 泵箱	流量/(m ³ ·h ⁻¹) —
		冷却塔+冷却机组	压力/bar ▼ 流量/(m ³ ·h ⁻¹) ▲
			液位/cm ▲
		制冷机	温度/K — 流量/(m ³ ·h ⁻¹) —
		电缆入口终端	流量/(m ³ ·h ⁻¹) — 压力/bar — 温度/K —
		电缆出口终端	液位/cm —
	外界因素	电缆本体	流量/(m ³ ·h ⁻¹) —
		回流管	温度/K — 流量/(m ³ ·h ⁻¹) —
		电缆通道	温度 测振 沉降

注: 因素指标为: ▼为小而优型; ▲为大而优型; —为中间型; 剩余为定性指标。

1.3 基于系统动力学的电缆系统安全评估模型搭建

1.3.1 系统动力学理论

系统动力学(system dynamics)由 J. W. Forrester 教授提出, 该理论是系统科学和管理科学的分支, 也是一门解决系统问题的综合性横向学科^[20]。系统动力学衍生于系统论, 它将种类不同却相互影响

的事物组合成一个系统。系统内事物变化产生的相互影响确定整个系统的运行方式和性质, 且一个因素细微的变化会通过因素间的相互反馈对系统产生较大的影响, 因此系统动力学适合于分析非线性复杂大系统的问题, 这与超导系统的特性是契合的。

起始阶段, 系统动力学主要用于解决公司运营中遇到的管理难题, 如今已经逐步扩展到应对跨领域的复杂系统。这种方法结合了自然科学和社会科学的长处, 具备预见性和结构化的特性, 它能通过分析变量之间的因果和逻辑联系来深入理解问题的本质。

系统动力学有以下特点。

1) 适合应用于长期及周期性的系统。如人口的增长问题、经济问题和自然界的生态平衡等问题, 并已有许多系统动力学模型科学地解释了这类问题。

2) 可用于处理数据不足的问题。建模过程中可能会碰到数据缺失或者无法量化的问题, 通过系统动力学各因素间的因果关系能将有限的数据进行推演分析。

3) 系统动力学把系统的表现和有效机制分解为事件、活动、元素、过程、内部机制和内部规则等不同构成单元, 明确了它们间联系以及其影响。这使研究者能更好地把握, 更清晰地看到系统间的关系, 弄清系统中每个构成部分之后的影响, 从而更容易发现和解决与系统相关的问题。

1.3.2 模型运行条件假设

为保证研究结论正确可靠, 本文对模型运行提出以下假设。

1) 本文所涉及的外界因素影响, 均只考虑是否存在, 存在即故障, 不再对其安全状态分级评估;

2) 由于系统在不同时期不同季节的外界温度不同, 且系统运行负荷也不同, 因此本文不考虑季节差异性;

3) 模型注重对设备函数关系的反映, 本文将各个因素的不同阈值进行归一化处理。

1.3.3 模型构建

系统动力学模型的构建需要借助计算机语言来建立系统模型, 目前在国内外应用最广泛的软件是 Vensim。本文采用 Vensim 软件对超导电缆系统进行了设计。

构建系统动力学模型的第一步是明确研究目标

的系统架构, 将其分解为若干独立元素, 并清楚地理解各个元素之间的反馈和联系, 这样才能满足建立系统动力学方程的基本需求^[21-22]。

系统动力学建模的具体步骤可以参考图 1。

基于表 1 的超导电缆安全状态因素, 结合系统动力学理论方法, 构建超导电缆安全状态系统动力学模型, 如图 2 所示。

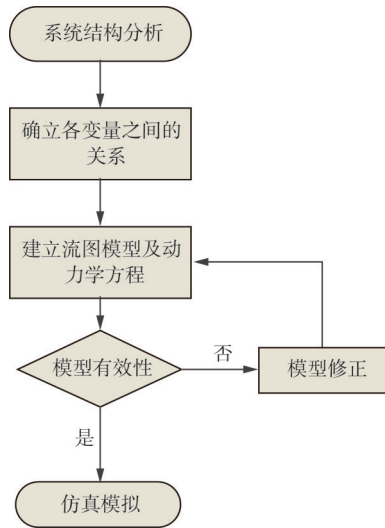


图 1 系统动力学模型分析步骤

Fig. 1 Analyzing steps for system dynamics models

2 安全评估函数

2.1 设备评估

电力系统中普遍使用的配电设备健康指数 h 与设备实时故障率 λ 的关系^[21]可表示为:

$$\lambda = K e^{ch} \quad (1)$$

式中: K 为比例系数; c 为曲率系数; h 为健康指数。

得到式(1)具体关系式需要联立健康指数 h 和故障率 λ 的方程组。最小故障率 $\lambda_{\min}$ 对应的健康指数为 1, 而平均故障率 λ_a 所代表的设备健康指数则是 0.8。联立两组数据得到的方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\lambda_a}{\lambda_{\min}} = e^{-0.2c} \\ K = \frac{\lambda_a}{e^{-0.8c}} \end{cases} \quad (2)$$

通过计算求得系数 K 和 c , 得到超导电缆系统中各因素的健康指数 h 与实时故障率的关系式为:

$$\lambda = -12.15 e^{-7.544h} \quad (3)$$

超导电缆系统实时故障率 λ 与发生偶然的故障概率 p 的关系可表示为:

$$p = 1 - e^{-\lambda} = 1 - e^{-12.15 e^{-7.544h}} \quad (4)$$

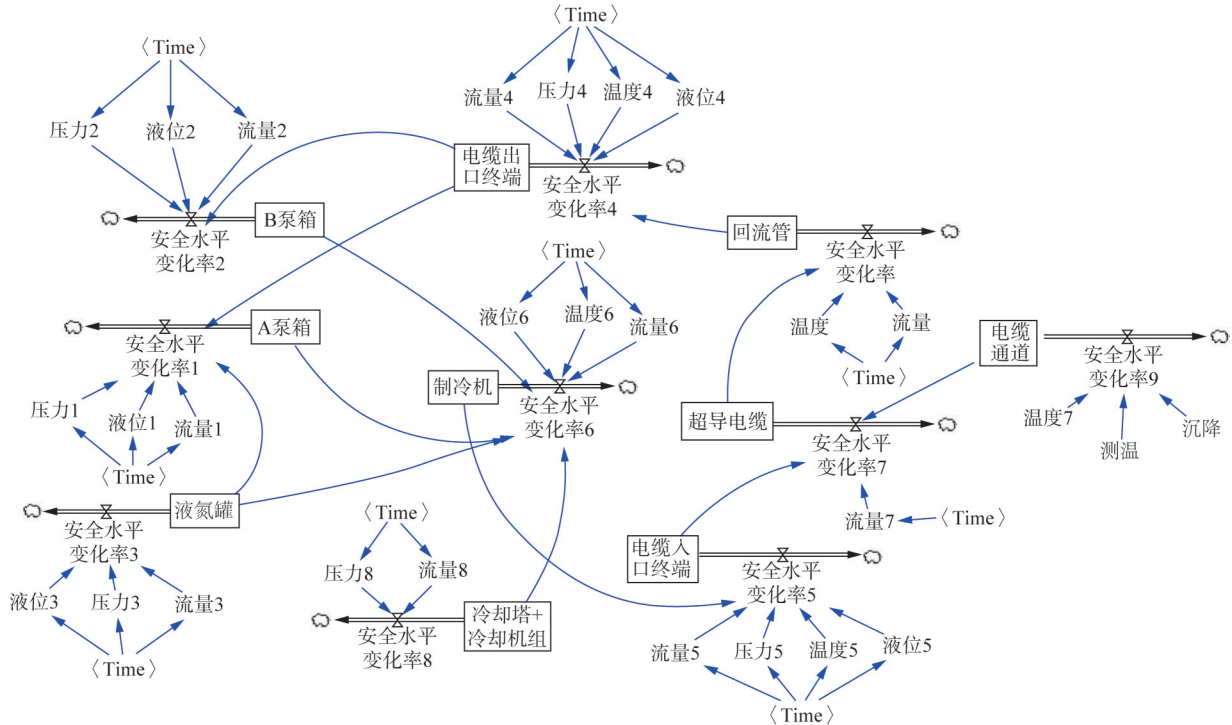


图 2 超导电缆安全状态 SD 模型

Fig. 2 SD model for safety status of superconducting cable

2.1.1 健康指数

1) 定性指标

有些指标(如设备振动)无法衡量其严重程度,故应采用巡检等手段或参照专业经验直接作出评估;本文定性指数为达标性指数,即达到规定范围就可以打满分,如不达到标准即为零分。

2) 定量指标

定量指标是指通过在线监测获得的可量化指标。由于超导电缆系统内每个因素的量纲不同,数量级有差距大,因此将各因素进行归一化处理将量化指标划分为小而优型标、大而优指标及中间型指标,并改进文献[23-27]中的相关研究模型,再根据历史运行数据拟合出下列函数。

(1)如果指标实际的值降低时,其健康状态越好,即该指标为小而优型指标,其表达式为:

$$h_i = e^{-\frac{(y_i - y_{\min})^2}{2(y_{\max} - y_{\min})^2}} \quad (5)$$

式中: h_i 为设备第 i 个指标的健康指数; y_i 为第 i 个指标的实际值; $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 分别为正常运行状态下指标的最大值和最小值。假设以越小越优型指标作为示例,当 $y_i = y_{\min}$ 时, $h_i = 1$ 表明此刻设备处于最健康状态;当 $h_i = y_{\max}$ 时, $h_i \approx 0.6$ 表明此刻设备处在故障的边缘;当 $y_i > y_{\max}$ 时, $h_i < 0.6$ 表明此刻设备处于故障状态。

(2)当指标实际值升高时,其健康状态越好,即为该指标为大而优型指标,其表达式为:

$$h_i = e^{-\frac{(y_{\max} - y_i)^2}{2(y_{\max} - y_{\min})^2}} \quad (6)$$

(3)当指标的实际值是正常运行阈值之间的某个值,此刻设备的健康状态最好,偏离此值会导致其状态变差,即为该指标是中间型指标,其表达式为:

$$h_i = \begin{cases} e^{-\frac{(y_0 - y_i)^2}{2(y_0 - y_{\min})^2}}, & y_i \in [y_{\min}, y_0] \\ e^{-\frac{(y_i - y_0)^2}{2(y_{\max} - y_0)^2}}, & y_i \in (y_0, y_{\max}] \end{cases} \quad (7)$$

式中 y_0 为中间型指标的最优值,取 $y_0 = \frac{y_{\max} + y_{\min}}{2}$ 。

2.1.2 因素权重

对于复杂系统的评估,需要全面考虑各种影响因素。目前的评价体系中,同一层级下的同一评价指标权重是固定的,也就是说,使用常权分析法来

评估结构健康状态有其局限性。因此,本文将变权重理论用于评价指标权重的调整。

当某个状态变量的值显著偏离正常值时,通常表明设备某个方面的性能显著降低。然而,如果使用常权重系数进行评估,由于其权重相对较小,因此设备的总体评估通常仍处于正常水平,所以无法反映设备真实的运行状态。

变权重理论是为了解决由于保持权重不变而导致结果出现误差的问题^[28]。若将状态变权向量视为 m 维实函数的梯度向量,则可以利用均衡函数作为另一种方式来构建变权向量。

在本文中,均衡函数 α 象征着各个指标在总体状态下的重要性, α 值越小意味着每个指标对整体状态的影响力就越大。

文献[29]提供了一个典型的权重变化计算公式,具体如式(8)所示。

$$w'_i = \frac{w_i}{h_i} / \sum_{j=1}^m \frac{w_j}{h_j} \quad (8)$$

式中: w'_i 为第 i 个指标的变权重系数; h_i 为第 i 个指标的评分值; m 为指标的数量; w_i 为第 i 个综合状态量的常权重系数。

文献[30]在文献[29]基础上引入了均衡函数的应用,其变权重计算公式为:

$$\frac{w_j}{h_j} = w_i h_i^{\alpha-1} / \sum_{j=1}^m w_j h_j^{\alpha-1} \quad (9)$$

α 的取值体现了决策者对监测指标优缺点均衡性的需求。 α 值越高,说明决策者更关注监测指标的优势,而对其不足之处则较为忽视。反之, α 值越低,意味着对缺陷的容忍度越低。本文设 $\alpha=0$,即可满足要求。

在运用变权重理论进行状态评价时,需要完成以下几个步骤。

1)对各种状态参数在超导电缆系统状态评估中的重要性进行研究,并确定其常权重;

2)依据各状态量在状态评估中的特性,设定均衡函数;

3)通过均衡函数确定变权重公式中的参数,从而得出具体的变权重公式;

4)计算各状态变量的评价结果;

5)按照评分标准,利用变权重公式来计算各状态量的变权重系数;

6)依据各状态量的评分标准和变权重系数,来

计算超导电缆系统的最终评价结果。

2.2 系统评估

如图 3 所示, 串联体系结构模式把整个系统划分成多个子单元, 这些子单元的结构具备较好的可分析属性, 并且在每个局部层面都展现出高水平的稳定性, 在对它们执行故障仿真及故障研究的过程中也相对简便。在串连体系结构中, 整个系统被细分为 n 个子单元, 各个单元彼此连接并形成链条, 只要所有的子单位都能顺利运行, 那么整个系统就能保持正常的运转状态。本文超导电缆系统故障概率采用此方法求出故障概率。



图3 串联系统模型可靠性分析图

Fig. 3 Reliability analysis diagram of series system model

串联系统模型的可靠性分析如图 3 所示, 从图 3 可知, 信息流在整个串联系统中从输入到输出贯穿始终。这意味着系统的可靠性是所有子系统可靠性之积。串联系统的可靠性 R 可以通过式 (10) 来表示。

$$R = R_1 \times R_2 \times R_i \times \cdots \times R_n \quad (10)$$

式中: R_i 为第 i 个子系统的可靠性指标; n 为子系统数量。

因为每个系统的健康程度都不可能达到 100%, 也就是说 R_i 小于 1, 所以连接系统模型中的子系统的数量越多, 系统发生故障的可能性就越大。串联各设备求得的故障概率求得整个系统的故障概率。

$$p = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_i) \cdots (1 - p_n) \quad (11)$$

式中 p_i 第 i 个子系统发生故障的概率。

按照超导电缆运行规程, 将安全状态分为“正常”、“注意”、“异常”、“严重”。本文定义当 $0 \leq p \leq 0.2$ 时, 状态为正常; $0.2 < p \leq 0.4$ 时状态为注意; $0.4 < p \leq 0.6$ 时状态为异常; $p > 0.6$ 时状态为严重。

3 算例分析

以上海某 35 kV 超导电缆系统作为研究对象, 采用本文所提方法对其进行安全状态评估分析。使用 Vensim 平台搭建超导电缆安全状态评估模型, 赋予状态变量函数到模型中, 通过 Vensim 软件进行状态评估得到超导电缆安全状态结果以验证所提出的超导电缆系统运行评估模型的有效性和准确性。算例每 1 s 记录监测数据 1 次, 共采集故障发生后 30 s 运行数据。以电缆出口终端为例, 数据详见表 2。

首先给出状态变量函数如式 (12) 所示。

表 2 电缆出口终端运行数据

Tab. 2 Operation data of cable outlet terminal

时间/s	P/bar	$T/(\text{℃})$	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	L/cm	时间/s	P/bar	$T/(\text{℃})$	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	L/cm
0	5.3	73.2	2.6	110	16	5.8	74.5	2.7	119
1	5.5	74.6	2.7	110	17	5.7	73.9	2.6	120
2	5.4	74.5	2.7	111	18	5.4	74.8	2.7	121
3	5.9	75.4	2.6	112	19	5.5	75.5	2.8	123
4	5.6	76.3	2.7	112	20	5.6	75.6	2.7	125
5	5.8	75.5	2.8	111	21	5.5	74.4	2.8	126
6	5.7	74.8	2.9	112	22	5.9	76.1	2.9	127
7	5.1	75.9	3.0	113	23	5.8	75.5	3.0	129
8	5.3	74.7	3.0	114	24	5.1	74.3	3.1	128
9	5.6	74.8	3.1	115	25	5.3	73.5	3.2	128
10	5.8	73.6	3.0	116	26	5.0	74.3	3.2	129
11	5.2	75.4	2.9	115	27	5.5	73.4	3.0	130
12	5.3	76.5	2.8	117	28	5.8	75.7	2.8	131
13	5.5	76.6	2.9	118	29	5.7	74.8	2.6	132
14	5.4	75.1	2.8	117	30	5.6	75.5	2.7	132
15	5.9	74.4	2.7	117					

注: 表中 P 、 T 、 Q 、 L 分别为电缆出口终端的压力、温度、流量、液位。

$$h_{\text{压}} = \begin{cases} e^{-\left(y_{\text{压}} - y_{\text{压}0}^2 / (2 \cdot (y_{\text{压}0} - y_{\text{压}min})^2)\right)}, & y_{\text{压}} \leq y_{\text{压}0} \\ e^{-\left(y_{\text{压}} - y_{\text{压}0}\right)^2 / (2 \cdot (y_{\text{压}max} - y_{\text{压}0})^2)}, & y_{\text{压}} > y_{\text{压}0} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $h_{\text{压}}$ 为压力的健康指数; $y_{\text{压}}$ 为压力的监测量; $y_{\text{压}0}$ 为压力的最优值; $y_{\text{压}max}$ 为压力阈值的最大值; $y_{\text{压}min}$ 为压力阈值的最小值。

$$h_{\text{出口终端}} = w_{\text{压}} \cdot h_{\text{压}} + w_{\text{温}} \cdot h_{\text{温}} + w_{\text{流}} \cdot h_{\text{流}} + w_{\text{液}} \cdot h_{\text{液}} \quad (13)$$

式中: $w_{\text{压}}$ 、 $w_{\text{温}}$ 、 $w_{\text{流}}$ 、 $w_{\text{液}}$ 分别为压力、温度、流速、液位的权重; $h_{\text{温}}$ 、 $h_{\text{流}}$ 、 $h_{\text{液}}$ 分别为温度、流速、液位的健康指数。本文依据专家经验和客观数据采用层次分析法得到常权重 $w_{\text{压}} : w_{\text{温}} : w_{\text{流}} : w_{\text{液}} = 4 : 3 : 2 : 1$ 且权重相加之和为1。

随着各因素值不断变化,其权重也相应变化。

$$\begin{aligned} h'_{\text{出口终端}} &= w'_{\text{压}} \cdot h_{\text{压}} + w'_{\text{温}} \cdot h_{\text{温}} + w'_{\text{流}} \cdot h_{\text{流}} + w'_{\text{液}} \cdot h_{\text{液}} \\ &= \frac{w_{\text{压}} \cdot h_{\text{压}}^{-1}}{w_{\text{压}} \cdot h_{\text{压}}^{-1} + w_{\text{温}} \cdot h_{\text{温}}^{-1} + w_{\text{流}} \cdot h_{\text{流}}^{-1} + w_{\text{液}} \cdot h_{\text{液}}^{-1}} \cdot h_{\text{压}} + \\ &\quad \frac{w_{\text{温}} \cdot h_{\text{温}}^{-1}}{w_{\text{压}} \cdot h_{\text{压}}^{-1} + w_{\text{温}} \cdot h_{\text{温}}^{-1} + w_{\text{流}} \cdot h_{\text{流}}^{-1} + w_{\text{液}} \cdot h_{\text{液}}^{-1}} \cdot h_{\text{温}} + \\ &\quad \frac{w_{\text{流}} \cdot h_{\text{流}}^{-1}}{w_{\text{压}} \cdot h_{\text{压}}^{-1} + w_{\text{温}} \cdot h_{\text{温}}^{-1} + w_{\text{流}} \cdot h_{\text{流}}^{-1} + w_{\text{液}} \cdot h_{\text{液}}^{-1}} \cdot h_{\text{流}} + \\ &\quad \frac{w_{\text{液}} \cdot h_{\text{液}}^{-1}}{w_{\text{压}} \cdot h_{\text{压}}^{-1} + w_{\text{温}} \cdot h_{\text{温}}^{-1} + w_{\text{流}} \cdot h_{\text{流}}^{-1} + w_{\text{液}} \cdot h_{\text{液}}^{-1}} \cdot h_{\text{液}} \end{aligned} \quad (14)$$

确定出口终端的故障率为:

$$\lambda_{\text{出口终端}} = 12.15e^{-7.544h'_{\text{出口终端}}} \quad (15)$$

发生偶然的故障概率为:

$$p_{\text{出口终端}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{出口终端}}} \quad (16)$$

通过串联模型求得最后的系统故障率为:

$$p = 1 - (1 - p_{\text{冷却系统}})(1 - p_{\text{电缆通道}}) \quad (17)$$

式中 $p_{\text{电缆通道}}$ 、 $p_{\text{冷却系统}}$ 、 $p_{\text{液氮泵}}$ 分别为电缆通道、冷却系统、液氮泵的故障率。其中, $p_{\text{冷却系统}} = 1 - (1 - p_{\text{出口终端}}) \cdots (1 - p_{\text{液氮泵}})$ 。

现假设出口终端液位不断升高超出阈值。在图4中, y_1 为出口终端液位的健康指数变化曲线, y_2 为常权下出口终端的健康指数变化曲线, y_3 为变权下出口终端的健康指数变化曲线, y_4 为常权下出口终端的故障概率变化曲线, y_5 为变权下出口终端的故障概率变化曲线, y_6 为常权下超导系统的故障概率变化曲线, y_7 为变权下超导系统的故障概率变化曲线。

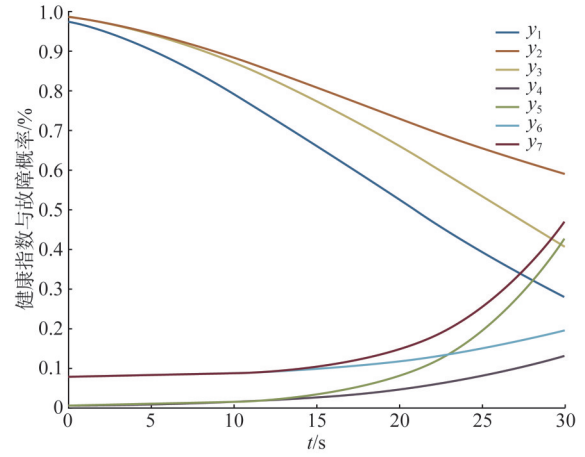


图4 出口终端液位健康指数与故障概率变化图

Fig. 4 Export terminal liquid level health indexes and failure probability variations chart

随着时间的推移,出口终端液位超出阈值不断上升,出口终端的健康指数也随着液位的上升不断降低,其故障概率上升,系统故障概率也呈上升趋势。

在常权重情况下,系统故障概率虽呈上升趋势,但上升程度不明显,故障概率低于0.2。主要原因是液位指标的权重比为1/7,对液氮罐故障概率影响较小。这容易造成指标劣化发生故障,而设备健康指数仍然是正常的问题。故在常权重指标故障的情况下,无法及时响应系统中权重值较小的故障。

在变权重情况下,即使只有液氮罐液位单一指标发生故障,系统故障概率也大幅度上升,呈现出故障状态。变权重理论基于指标实时值对权重不断进行调整,可以很好地反映出系统的短板效应,提高了对系统中缺点的重视程度,使评价结果更加可靠。

根据各因素运行数据,运行系统得到超导电缆系统安全状态评估曲线如图5所示。由图5中可知,超导电缆系统的故障概率在0.1左右浮动,均小于0.2,可见电缆当前运行状态正常,与实际相符。

4 结语

在现有电缆风险评估方法的基础上,本文考虑多因素对超导电缆运行状态的实时影响,并结合系统动力学提出一种对电缆当前运行安全状态进行评估的新方法。

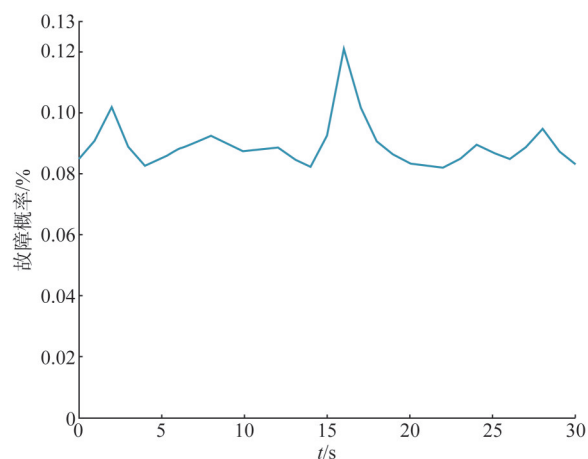


图5 超导电缆系统安全状态评估曲线图

Fig. 5 Safety status evaluation curve of superconducting cable system

1)从宏观角度识别了影响超导电缆安全状态因素,并建立超导电缆系统安全状态的SD模型,开展动态模拟安全状态水平的研究。

2)采用变权重理论降低了评估结果的主观性,改善了监测指标优缺点的均衡性,提高了对系统中缺点的重视程度,使评价结果更加可靠。

3)基于某35 kV超导电缆系统中多状态监测系统的监测数据进行验证,由超导电缆安全运行状态的分析表明,评估结果与实际运行状态一致,表明所建立的SD模型能够客观量化地评估电缆的安全运行状态,且计算复杂度低、速度快。然而,由于历史数据量有限,设备功能不精确,因此所建立的系统动力学状态评估模型仍需要更多的历史数据对模型进行调整优化。

4)系统动力学的安全状态评估方法可以帮助生产运行人员有效地了解设备的健康状态,为设备的检修维护提供指导思路。根据设备不同工况下的运行状态,通过系统动力学SD模型准确评估设备的安全状态,适当调整运行策略及检修周期,提高机组安全稳定性。

参考文献

- [1] 胡碧伟,邓祥力,贾声昊.基于ANFIS的变压器寿命预测和状态评估[J].电测与仪表,2022,59(1):61-68.
HU Biwei, DENG Xiangli, JIA Shenghao. Transformer life estimation and state assessment based on ANFIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1):61-68.
- [2] 朱明,黄勤清,齐用卡.基于振动信号总离散频谱的高压并联电抗器健康评估方法[J].电测与仪表,2023,60(8):114-120.
- [3] 蔡金铤,黄云程.基于灰色关联诊断模型的电力变压器绝缘老化研究[J].高电压技术,2015,41(10):156-161.
CAI Jinding, HUANG Yuncheng. Study on insulation aging of power transformer based on gray relational diagnostic model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10):156-161.
- [4] 于维娟,张文涛,陈潇楠,等.K-means聚类算法在高压开关设备机械状态评估中的应用[J].智能电网,2015,3(7):603-607.
YU Weijuan, ZHANG Wentao, CHEN Xiaonan, et al. Application of K-means clustering algorithm in mechanical state evaluation of high-voltage switchgear[J]. Smart Grid, 2015, 3(7):603-607.
- [5] 李腾飞,朱溥楠,张晓龙.基于朴素贝叶斯分类器的高压开关柜状态评估方法[J].电网与清洁能源,2020,36(6):99-104.
LI Tengfei, ZHU Punan, ZHANG Xiaolong. The high voltage switchgear condition assessment based on naïve bayesian classifier[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6):99-104.
- [6] QUAN J, RUAN L, XIE Z, et al. The application of Bayesian network theory in transformer condition assessment[C]//2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), December 08-11, 2013, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2013:1-4.
- [7] YADAV A, DASH Y, ASHOK V. ANN based directional relaying scheme for protection of Korba-Bhilai transmission line of chhattisgarh state[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1):128-144.
- [8] 刘咏鑫,宋斌,王力农,等.基于混沌序列优化的BP网络油纸绝缘变压器寿命预测[J].电测与仪表,2022,59(4):137-143.
LIU Yongxing, SONG Bin, WANG Linong, et al. Life prediction of oil-paper insulated transformer based on chaotic sequence optimization BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4):137-143.
- [9] 周路遥,曹俊平,王少华,等.基于多状态量特征及变化规律的高压电缆状态综合评估[J].高电压技术,2019,45(12):3954-3963.
ZHOU luyao, CAO junping, WANG shaohua, et al. Comprehensive state evaluation of high voltage cable based on multi-state variables characteristics and variation law[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12):3954-3963.
- [10] 刘刚,张高言,周凡.基于等温松弛法的110 kV高压电缆老化状况评估[J].高电压技术,2014,40(2):497-504.
LIU Gang, ZHANG Gaoyan, ZHOU Fan. Aging state assessment of 110 kV high-voltage cable by isothermal relaxation method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2):497-504.
- [11] 李平,洪思远,李海峰.XLPE电力电缆健康度的模糊灰色综合评价方法[J].机电工程技术,2012,41(1):20-24.
LI Ping, HONG Siyuan, LI Haifeng. Study of XLPE power cables health state evaluation based on fuzzy grey theory[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012, 41(1):20-24.
- [12] 罗彦鹏,夏向阳,厉广城.基于KNN的10 kV配电电缆绝缘

- 状态评估[J]. 电工材料, 2020, 48(3): 43–45.
- LUO Yanpeng, XIA Xiangyang, LI Guangcheng. Evaluation of insulation status of 10 kV distribution cable based on KNN [J]. Electrical Engineering Materials, 2020, 48(3): 43–45.
- [13] 周伟. 基于遗传算法的电缆局部缺陷状态评估方法[J]. 电力设备管理, 2018, 3(6): 41–44.
- ZHOU Wei. A genetic algorithm based method for evaluating the status of local defects in cables [J]. Electric Power Equipment Management, 2018, 3(6): 41–44.
- [14] 明菊兰, 钱洲亥, 余璐静. 绝缘油中溶解气体在线监测装置自动校验评估及校准系统的研制[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9): 169–175.
- MING Julan, QIAN Zhouhai, YU Lujing. Research and development of the auto testing, estimating and calibrating system for on-line monitoring device of gases dissolves in transformer oil [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9): 169–175.
- [15] RENFORTH L A, GIUSSANI R, MENDIOLA M T, et al. Online partial discharge insulation condition monitoring of complete high-voltage networks [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 1021–1029.
- [16] WU R, CHANG C. The use of partial discharges as an online monitoring system for underground cable joints [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1585–1591.
- [17] 黎予颖, 伦振坚, 杜翔宇, 等. 超导电缆过冷液氮冷却循环系统设计及试验验证[J]. 真空与低温, 2023, 29(2): 188–193.
- LI Yuying, LUN Zhenjian, DU Xiangyu, et al. Design and experiment of subcooled liquid nitrogen cooling circulation system for superconducting cables [J]. Vacuum and Cryogenics, 2023, 29(2): 188–193.
- [18] 范宇峰, 龚领会, 徐向东, 等. 10米 10.5 kV/1.5 kA 三相交流高温超导电缆低温系统[J]. 制冷学报, 2005(1): 49–53.
- FAN Yufeng, GONG Linghui, XU Xiangdong, et al. Cryogenic system of the 10 m-1.5 kV/1.5 kA three-phase high temperature superconducting cable plant [J]. Journal of Refrigeration, 2005(1): 49–53.
- [19] 国家电网公司. 电力电缆及通道运维规程: Q/GDW 1512—2014 [S]. 北京: 国家电网公司, 2014.
- [20] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2009.
- [21] 李金超, 韩柳, 王栋. 基于系统动力学的智能电网示范项目建设管理模式优选[J]. 项目管理技术, 2015, 13(12): 93–97.
- LI Jinchao, HAN Liu, WANG Dong. Optimization of construction management mode for smart grid demonstration projects based on system dynamics [J]. Project Management Technology, 2015, 13(12): 93–97.
- [22] 王帆, 顾洁, 张宇俊, 等. 基于系统动力学的配电网规划评价[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 77–83.
- WANG Fan, GU Jie, ZHANG Yujun, et al. Assessment of distribution grid planning based on system dynamics theory [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(2): 77–83.
- [23] 韩韬, 么军, 葛荣钢, 等. 考虑测量丢失下配电网动态状态估计的滤波设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 83–88.
- HAN Tao, YAO Jun, GE Ronggang, et al. Filter design for dynamic-state estimation of distribution network with the consideration of missing measurements [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 83–88.
- [24] 管霖, 陈臻凯, 陈灏颖, 等. 考虑新能源随机性的新型电力系统图深度学习稳定指标概率分布评估模型[J]. 南方电网技术, 2024, 18(7): 118–128.
- GUAN Lin, CHEN Liukai, CHEN Haoying, et al. Graph deep learning based stability index probability distribution assessment method of new power system considering the stochastic output of renewable energy [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(7): 118–128.
- [25] 李志超, 李卫国, 夏喻, 等. 基于模糊综合评判的变压器套管绝缘状态评估[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 22–26.
- LI Zhichao, LI Weiguo, XIA Yu, et al. Evaluation of transformer bushing insulation status based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Electric Power, 2018, 51(4): 22–26.
- [26] 杨春波, 陶青, 张健, 等. 基于综合健康指数的设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 104–109.
- YANG Chunbo, TAO Qing, ZHANG Jian, et al. Equipment status evaluation based on comprehensive health index [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 104–109.
- [27] 林敢, 鲍明正, 何一川, 等. 10 kV 配电线路差异化防雷策略及综合评估[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 32–41.
- LIN Gan, BAO Mingzheng, HE Yichuan, et al. Differential lightning protection strategy and comprehensive evaluation of 10 kV distribution lines [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 32–41.
- [28] 汪培庄. 模糊集与随机集落影[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985.
- [29] 汪培庄, 李洪兴. 知识表示的数学理论[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994.
- [30] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58–64.
- LIU Wenqi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1997, 17(4): 58–64.

收稿日期: 2023-12-19; 网络首发日期: 2024-06-21

作者简介:

谢敬东(1968), 男, 教授, 博士, 研究方向为新型电力系统电力市场化改革, 电力市场监管, xie_jd@shiep.edu.cn;

徐嘉文(1996), 男, 通信作者, 助理工程师, 硕士, 研究方向为新型电力系统, 超导电缆, 状态评估。