

DOI: 10.7667/PSPC160465

一种面向风险评估的输电线路故障概率模型

何迪¹, 章禹¹, 郭创新¹, 陈玉峰², 张金江³, 刘辉²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 3. 浙江科技学院自动化与电气工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 设备停运是电力系统失效的根本原因, 建立设备故障概率模型是进行系统风险评估的核心问题。根据输电线路故障产生的内外部机理, 提出了面向风险评估且适用于表征输电线路故障概率的 Ageing-Load-Health-Weather-PHM (ALHW-PHM)。模型中基准故障率函数采用老化失效模型, 协变量采用负载率相依的实时导体温度及健康状态和天气状况相依的劣化扣分值, 并采用极大似然估计进行参数拟合。为了提高参数拟合的效率, 设计了一种基于大数据平台的样本数据级并行参数估计架构。算例分析定量展现了各风险因素对故障概率的影响及在系统风险评估中故障概率的应用。该模型能综合响应老化失效、负载率、健康水平和天气状况等风险因素对故障概率的影响, 能为电网的风险评估提供理论支持。

关键词: 输电线路; 风险评估; 比例风险模型; 故障概率; 并行计算

Failure probability model of transmission lines for risk assessment

HE Di¹, ZHANG Yu¹, GUO Chuangxin¹, CHEN Yufeng², ZHANG Jinjiang³, LIU Hui²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Electric Power Research Institute of Shandong Power Supply Company of State Grid, Jinan 250002, China;
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The outage of equipment is the root cause of the failure of power system, so building a failure probability model for equipment is the key to the risk assessment of system. Based on internal and external mechanism which will lead to failure, this paper proposes 'Ageing-Load-Health-Weather-PHM (ALHW-PHM)', which is for risk assessment and applicable to characterize the failure probability of transmission lines. This model adopts temperature-based aging model as the baseline hazard function, and utilizes the wire real-time temperature which depends on load rate and the deterioration score deduction which depends on health status and weather condition as covariates in the link function. The maximum likelihood estimation (MLE) is used to estimate the model's parameters. In order to improve the efficiency, a structure of parallel parameter estimation for samples basing on big data platform is designed. The case study quantitatively shows the impact of different risk factors and the application of failure probability in the risk assessment of power system. This model, which comprehensively considers the influence of risk factors such as thermal aging process, load factor, health status and weather conditions, can provide theoretical support for risk assessment.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050204) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (No. LZ14E070001).

Key words: transmission line; risk assessment; proportional hazard model; failure probability; parallel computing

0 引言

电力系统风险评估的目的是在多维时空维度下给出综合反映电网运行状况和失效后果的多种风险量

化指标^[1-2]。作为电力系统的重要组成部分, 输电线路故障停运是系统失效的根本原因之一。因此, 如何充分考虑各项风险因素, 进而准确评估输电线路的可靠性水平是评估电网风险的核心问题。

输电线路故障是内部因素(如老化失效、健康状态)、外部因素(如天气、环境状况)及电网因素(如负载水平、电网状况)共同作用的结果。相比指标型的

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2015AA050204); 浙江省自然科学基金(LZ14E070001)

可靠性评估^[3-4], 输电线路故障概率模型能根据历史运行状况和内外运行条件, 将除二次系统外的风险因素对设备的影响落实到设备故障概率上, 对于实时了解潜伏性故障的发展趋势, 帮助调度人员做出正确决策意义重大^[2]。

国内外学者针对输电线路故障概率模型进行了大量研究, 但基本都是采用基于回归模型、贝叶斯模型等的历史故障率统计模型^[5-6], 虽然能在一定程度上体现线路可靠度的变化规律并用于预测, 但是忽略了设备实际运行状况的影响, 无法反映个体的差异性, 因此难以为设备及系统的风险评估提供依据。部分文献从线路自身状况和实时天气情况出发进行建模, 如温度相依的老化失效模型^[2]、基于健康状态的故障率模型^[7]、考虑天气情况的故障概率模型^[8-9]等。这类模型考虑因素单一, 对运行数据的利用率较低, 无法响应其他众多未建模风险因素对故障概率的影响, 应用于风险评估较为片面。而且此类模型较为粗略, 如考虑天气状况的故障概率模型均采用两态或多态^[10]模型来模拟天气情况, 界定范围模糊, 精度也相对较低。

为了综合响应各风险因素对故障概率的影响, 提高运行数据的利用率, 本文以比例风险模型 (Proportional Hazard Model, PHM)^[11]为基础, 构建以线路老化时间、负载率、设备健康状态和天气状况为输入, 为电网及设备的风险评估提供底层模型基础的综合故障概率模型, 即 Ageing-Load-Health-Weather-PHM (ALHW-PHM), 介绍了建模流程、各因素建模方式, 并设计了一种基于大数据平台的样本数据级并行参数估计架构, 以提高数据的处理效率。算例分析定量展现了线路故障概率的发展规律及在系统风险评估中的应用, 验证了模型有效性。

1 ALHW-PHM 建模流程

通过深入分析输电线路的老化失效机理和缺陷劣化机理, 针对不同线路个体分析其健康状态的物理表征、老化状态、健康指数等全寿命周期信息以及微气象、自然灾害、负载率等非周期随机信息, 进行数据挖掘和聚类分析, 可筛选出与设备故障停运强相关的各项风险因素。将其落实到线路故障概率上可量化不同风险因素对故障发展趋势的影响。

以某省电力公司输电线路近十年来运行数据为样本进行数据挖掘后发现, 老化失效、负载率、健康水平和天气状况是 4 类最易导致线路失效的强相关风险因素, 其他众多风险因素也多以影响上述指标的形式引发故障。ALHW-PHM 将这 4 种风险指标作为故障概率表征式的输入变量, 几乎可以响

应引发线路故障停运的全部风险因素的影响, 是基于数据筛选和多变时空状态的多数据模型, 模型在风险评估应用中的架构流程如图 1 所示。

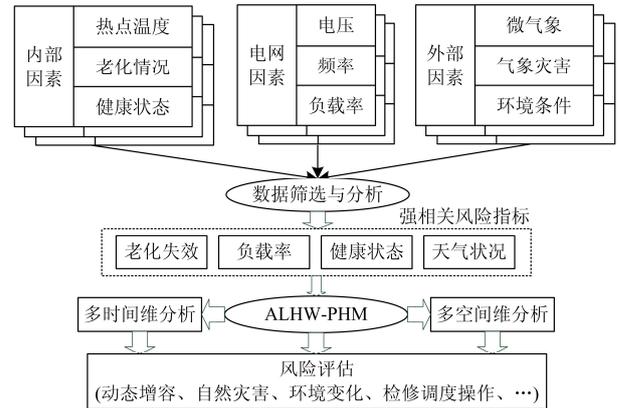


图 1 ALHW-PHM 模型架构流程

Fig. 1 Model structure process of ALHW-PHM

元件故障停运模型是电网风险评估的底层基础模型。借助 ALHW-PHM 的计算结果可用来评估线路动态增容、自然灾害、环境变化、状态检修等调度操作的设备风险及电网运行风险。

1.1 模型基础-比例风险模型

PHM^[11]由 D.R.Cox 于 1972 年提出, 广泛应用于经济学领域和机械零部件的失效建模^[12-13], 近年来也被逐渐应用于电力系统输变电设备的可靠性评估^[14-16]中。根据模型定义可知故障概率函数为

$$h(t; \mathbf{Z}) = h_0(t) \exp(\gamma \mathbf{Z}) \quad (1)$$

式中: t 为当前时刻; $h_0(t)$ 为基准故障概率函数; \mathbf{Z} 为反映设备不同状态的协变量向量; γ 为协变量向量参数; $\exp(\gamma \mathbf{Z})$ 为协变量连接函数。

PHM 认为状态变量与设备风险之间具有乘法效应。通过该模型能有效建立设备各类状态指标和故障概率之间的联系^[13]。

1.2 基准故障概率函数 $h_0(t)$ 的建模

$h_0(t)$ 作为基准故障概率函数, 可表征输电线路的老化失效情况。威布尔分布充分契合浴盆曲线变化趋势, 已广泛应用于输变电设备的失效建模中^[2, 15-16], 极适用于基准故障概率函数的建模。

$$h_0(t) = (\beta/\eta)(t/\eta)^{\beta-1} \quad (2)$$

式中: β 为形状参数; η 为比例参数。

导线抗拉强度损失是输电线路老化失效的主要成因。相关研究表明: 高温导体的退火是其抗拉强度损失的主要原因^[17-18]。文献[18]中 Morgan 给出了导体抗拉强度损失的经验公式为

$$W = W_a \left\{ 1 - \exp \left[- \exp \left(A + \left(\frac{B}{\theta} \right) \ln t + \frac{C}{\theta} + D \ln \left(\frac{R}{80} \right) \right) \right] \right\} \quad (3)$$

式中: W 为导线抗拉强度损失百分比; W_a 为完全退火状况下导线抗拉强度损失百分比; θ 为线温, K; t 为 θ 温度下导线持续运行时间, h; A 、 B 、 C 、 D 和 R 为与导体材料属性相关的常数。

当导线抗拉强度损失百分比达到最大, 即 W_{\max} 时, 可认为导线到达寿命终点^[19], 此时式(3)中 t 即为输电线路的期望寿命 L 。

$$L = \exp \left\{ \frac{1}{B} \left[\ln \ln \left(\frac{1}{1 - W_{\max} / W_a} \right) - A - D \ln \left(\frac{R}{80} \right) \right] \theta - \frac{C}{B} \right\} \quad (4)$$

令

$$P = \frac{1}{B} \left[\ln \ln \left(\frac{1}{1 - W_{\max} / W_a} \right) - A - D \ln \left(\frac{R}{80} \right) \right] \quad (5)$$

$$Q = \exp(-C/B) \quad (6)$$

代入式(4), 同时根据威布尔分布定义可得

$$\eta = L = Q \exp(P\theta) \quad (7)$$

式中, W_{\max} 、 W_a 、 A 、 B 、 C 、 D 和 R 均是材料相关参数, 因此 P 、 Q 也可定义为已知材料参数。则

$$h_0(t) = \frac{\beta}{Q \exp(P\theta_H)} \left(\frac{t}{Q \exp(P\theta_H)} \right)^{\beta-1} \quad (8)$$

式中, t 为恒定基准温度 θ_H 下的等效 t 值, 因此需要将波动的导体温度曲线对应的役龄时间折算为恒定 θ_H 下的等效运行时间。可按导体温度值将运行时间划分成 n 个小区间 t_i , 每个小区间内的导体温度 θ_{Hi} 恒定, 累加可得等效服役时间为^[2]

$$T_{\text{eq}} = \sum_{i=1}^n t_i \exp[P(\theta_H - \theta_{Hi})] \quad (9)$$

1.3 协变量连接函数 $\exp(\gamma Z)$ 的建模

$\exp(\gamma Z)$ 是协变量连接函数, 在 PHM 中反映不同状态协变量对设备故障概率的影响。当协变量个数为 p 时, 对应的协变量连接函数为

$$\exp(\gamma Z) = \exp \left[\sum_{k=1}^p \gamma_k Z_k(t) \right] \quad (10)$$

ALHW-PHM 中协变量应包含的风险指标包括线路自身的健康状态、所处的天气状况和线路负载状况等 3 大类。由于协变量指标的复杂分散会使参数估计运算量发生指数爆炸, 为了简化模型, 协变量连接函数的建模仿照文献[7,15]将各类指标融合为一个指标参量, 即协变量连接函数为

$$\exp(\gamma Z) = \exp(\gamma_1 Z_1 + \gamma_2 Z_2 + \gamma_3 Z_3) \quad (11)$$

式中, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 分别表示健康状态、天气状况、负载率以及相应的协变量参数。

1.3.1 健康状态值的建模

国家电网于 2008 年颁布了《架空输电线路状态评价导则》^[20]用于指导各区域电网和省市电网的输电线路状态评价工作。本模型的健康状态值即以该导则为依据, 取输电线路状态评价扣分为健康状态扣分值, 即

$$Z_1 = S_{\text{He}} \quad (12)$$

式中, S_{He} 为线路状态评价扣分值, 能充分反映不同设备部件状态与健康状态致失效率之间的量化关系。根据评价导则可知, 输电线路状态评价包括基础、杆塔、导地线、绝缘子、金具、接地装置、附属设施、通道 8 大风险单元, S_{He} 为综合扣分值。

1.3.2 天气状况值的建模

由于天气状况的评估十分困难, 众多线路可靠性研究中普遍采用三状态天气模型^[10]将天气状况分为正常天气、恶劣天气和灾变天气 3 类。这种建模方式简单易行, 但是应用于风险评估却有不足: 一是对于这 3 类天气状况没有明确的界定范围; 二是不能体现不同天气情况对故障风险的区分度, 如大雨和十级台风同属于恶劣天气, 采用三状态天气模型计算得到的线路故障概率几近相同, 但是实际故障概率却相差巨大。

仿照健康状态值的建模方法, 可采用天气状况扣分值这一新型的评价方式进行天气状况值 Z_2 的建模。从国家气象局规定的 13 项天气预警信号中选取对输电线路故障概率影响较大的雷电、覆冰、降雨、大风、气温、台风、冰雹、降雪等 8 项天气风险因素, 根据不同风险因素不同气象等级下的线路实际故障率统计情况^[21], 研制天气状况扣分表如附录表 A 所示。

评估天气状况时仿照健康状态评价的方式对各天气风险因素进行单项扣分并加权累加, 最终得到天气状况综合扣分值 S_{We} , 即

$$Z_2 = S_{\text{We}} \quad (13)$$

需要注意的是, 一旦某项天气指标超过阈值 TH , 即认为该项气象风险因素的恶劣程度已使其成为影响故障概率的最重要因素, 而其他诸如负载水平、老化状态、设备健康状态对故障概率的影响可忽略不计。此时 ALHW-PHM 已不适用于该状态下的线路故障概率求解, 相应的故障概率模型应采用各气象条件下的独立故障概率模型, 如风雨故障概率模型^[22]、覆冰故障概率模型^[23]等。

1.3.3 负载率的建模

输电线路线温-负载率相依模型^[24]表明在一定环境条件下,负载率与实时线温存在一一对应关系。结合式(9)可知, $h_0(t)$ 是负载率的因变量,因此在协变量连接函数中负载率无法像健康状态和天气状况一样进行简单建模,需进行独立分析。由于 PHM 中状态变量与设备风险之间具有乘法效应,可引入线温影响函数 $g(\theta)$ 代替负载率协变量的作用效果,因此式(1)可等效为

$$h(t; \mathbf{Z}) = h_0(t) \exp(\gamma_1 S_{He} + \gamma_2 S_{We}) g(\theta) \quad (14)$$

式中, $g(\theta)$ 与协变量连接函数相互独立。

线温影响函数是实时线温 θ_r 和基准恒定温度 θ_H 共同作用的结果。令

$$h'_0(t, \theta_H, \theta_r) = h_0(t, \theta_H) g(\theta_H, \theta_r) \quad (15)$$

则采用不同温度 θ_1, θ_2 作为基准恒定温度 θ_H 时,以恒定温度 θ_h 运行时间 t 的 h'_0 分别为

$$h'_0(t, \theta_1, \theta_h) = \frac{\beta g(\theta_1, \theta_h)}{Q \exp(P\theta_1)} \left(\frac{T_{eq1}}{Q \exp(P\theta_1)} \right)^{\beta-1} \quad (16)$$

$$h'_0(t, \theta_2, \theta_h) = \frac{\beta g(\theta_2, \theta_h)}{Q \exp(P\theta_2)} \left(\frac{T_{eq2}}{Q \exp(P\theta_2)} \right)^{\beta-1} \quad (17)$$

根据式(9)可得

$$T_{eq2} = \exp[P(\theta_2 - \theta_1)] T_{eq1} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17),可得

$$h'_0(t, \theta_2, \theta_h) = \frac{\beta g(\theta_2, \theta_h)}{\exp[P(\theta_2 - \theta_1)] Q \exp(P\theta_1)} \cdot \left(\frac{\exp[P(\theta_2 - \theta_1)] T_{eq1}}{\exp[P(\theta_2 - \theta_1)] Q \exp(P\theta_1)} \right)^{\beta-1} \quad (19)$$

在相同健康状态和天气状况下,式(14)中 $\exp(\gamma_1 S_{He} + \gamma_2 S_{We})$ 保持不变,则采用不同基准温度 θ_1, θ_2 计算得到的故障概率理应相同,即 $h'_0(t, \theta_1, \theta_h) = h'_0(t, \theta_2, \theta_h)$ 。联立式(16)和式(19),可得

$$g(\theta_H, \theta_r) = A k(\theta_r) \exp(P\theta_H) \quad (20)$$

式中: A 为常数系数; $k(\theta_r)$ 为线路实时线温作用函数,若以协变量连接函数形式表示即为 $\exp(\gamma_3 \theta_r)$ 。

1.4 综合故障概率模型

令 $A \exp(P\theta_H) = \exp(\gamma_4 P\theta_H)$, 可得综合故障概率函数为

$$h(t; \mathbf{Z}) = \frac{\beta}{Q \exp(P\theta_H)} \left(\frac{T_{eq}}{Q \exp(P\theta_H)} \right)^{\beta-1} \exp(\gamma_1 S_{He} + \gamma_2 S_{We} + \gamma_3 \theta_r + \gamma_4 P\theta_H) \quad (21)$$

式中: P, Q 为线路参数; $T_{eq}, \theta_r, S_{He}, S_{We}$ 均可从电力数据平台上读取相关数据计算后获取; $\beta, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ 为待估计参数。当通过计算求得健康状态扣分值和天气状况扣分值后,可采用劣化扣分 $[S_{He}, S_{We}]$ 这一新评判参量量化线路健康状态和天气状况的综合劣化程度,评判体系如图 2。

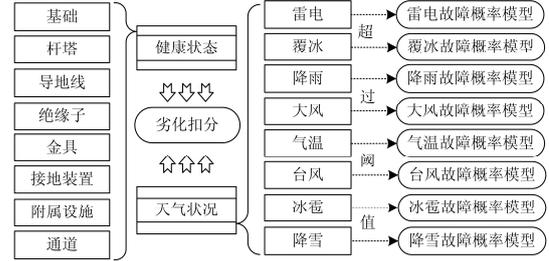


图 2 输电线路劣化扣分评判体系

Fig. 2 Evaluation system of deterioration score deduction for lines

将根据历史运行样本进行参数估计获得的参数拟合值作为故障概率预测模型的参数,代入待估测点的输电线路等效服役时间 T_{eq} 、实时导体温度 θ_r 以及劣化扣分 $[S_{He}, S_{We}]$, 即可预测输电线路故障概率。因此, ALHW-PHM 模型框架可总结为图 3。

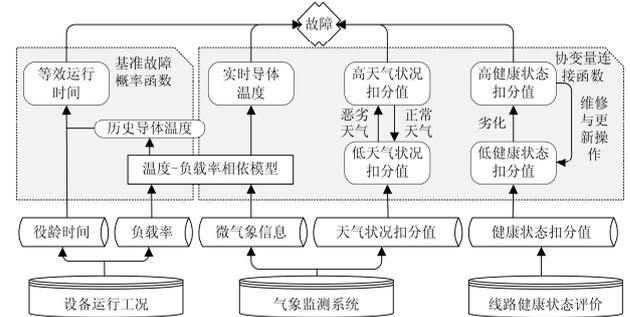


图 3 ALHW-PHM 模型框架

Fig. 3 Model framework of ALHW-PHM

2 基于大数据并行计算的极大似然估计

极大似然估计^[25]能分析运行样本寿命全过程,拟合最优参数值。因此本模型的参数估计采用极大似然估计,推导式(21)可得极大似然估计的似然函数的对数形式为

$$\ln L(\beta, \eta, \gamma) = Q_i + Q_f - Q_r \quad (22)$$

$$Q_i = q \ln(\beta/\eta) \quad (23)$$

$$Q_f = (\beta - 1) \sum_{i=1}^q \ln \left(\frac{t_i}{\eta} \right) + \sum_{i=1}^q [\gamma_1 S_{He}(t) + \gamma_2 S_{We}(t) + \gamma_3 \theta_r(t) + \gamma_4 P\theta_H] \quad (24)$$

$$Q_r = \sum_{j=1}^n \int_0^{t_j} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{s}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp[\gamma_1 S_{He}(t) + \gamma_2 S_{We}(t) + \gamma_3 \theta_r(t) + \gamma_4 P \theta_H] ds \quad (25)$$

式中: Q_t 为运行样本总览数据; Q_r 为失效样本数据; Q_f 为运行样本具体数据; n 为运行样本总个数; q 为失效个体数, t_i 为第 i 个个体在基准温度 θ_H 下的等效时间; s 为输电线路个体在 θ_H 下的等效检测时间点; η 取 $Q \exp(P \theta_H)$ 。

将式中参数 $\beta, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ 求一阶导并置为零, 可得一组五参数的超越方程组, 之后可采用拟牛顿法等数值方法拟合 $\hat{\beta}, \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \hat{\gamma}_3, \hat{\gamma}_4$ 的最优值。

极大似然估计中, 模型待估计参数的精度受参数估计样本完整程度和数据平台的计算能力制约, 需要利用大数据并行计算技术对冗杂的线路运行数据进行充分的利用和处理。从处理流程上看, 参数估计可分为数据样本处理和参数拟合两步骤, 一方面, 由于参数集合拟合效果相互独立, 可采用参数分区多线程并行计算减少运算时间; 另一方面, 在分析某一参数集合拟合效果时, 可并行处理下一参数集合样本, 提高运算效率。从数据样本构造上看, Q_t, Q_r, Q_f 3 类数据的处理线程执行操作相互独立, 可进行样本分类型多线程并行计算, 并在各自线程中, 实现计算方法和前期计算数据的复用与调用; 当数据库中不断增加数据条时, 通过复用前期计算结果, 结合新增数据条处理结果, 可不断精确模型待估计参数, 避免由于新增样本导致的重复计算。基于上述考虑, 在大数据并行计算思想指导下, 建立了基于电力大数据平台的样本数据级并行参数估计架构, 如附录图 D 所示。

3 算例分析

3.1 模型参数计算

若选用常用导线 LGJ-400/50^[26], 根据附录表 B 可计算得 P 为 -0.11968 , Q 为 1.041×10^{23} 。令恒定基准温度 θ_H 为 80°C (353 K), 代入式(9), 可得 η 为 46751 h , 换算得 η 为 1948 d 。则综合故障概率为

$$h(t; \mathbf{Z}) = \frac{\beta}{1948} \left(\frac{T_{eq}}{1948} \right)^{\beta-1} \exp(\gamma_1 S_{He} + \gamma_2 S_{We} + \gamma_3 \theta_r - 9.5744 \gamma_4) \quad (26)$$

以某省电力公司输电线路近十年来部分运行数据为样本在实验室搭建的 Hadoop 3 节点集群进行参数估计计算发现, 采用基于大数据平台的样本数据级并行计算可极大提高参数估计的效率, 如表 1; 并得到样本 3 的实例参数估计结果如表 2 所示。

表 1 参数估计效率比较

耗时	样本 1	样本 2	样本 3
普通参数估计耗时	2.1 h	4.7 h	10.6 h
并行参数估计耗时	0.6 h	1.3 h	2.9 h
效率提升比例	250%	261%	266%

表 2 参数估计结果

$\hat{\beta}$	$\hat{\gamma}_1$	$\hat{\gamma}_2$	$\hat{\gamma}_3$	$\hat{\gamma}_4$
4.6419	0.0402	0.0326	0.0625	1.9014

将参数估计结果代入式(26), 结合预测线路的等效服役时间 T_{eq} 、实时负载率及劣化扣分 [S_{He}, S_{We}], 即可计算线路故障概率, 并最终服务于风险评估。

3.2 单线路算例

由图 4 可知, 随着等效运行时间的增长, 即老化失效的严重度增加, 输电线路健康状态逐渐恶化, 由此导致故障概率上升且趋势变急, 充分契合浴盆曲线的变化趋势。此外, 天气状况的恶化对故障概率也有明显的增大作用。在等效时间为 650 天处有一个故障概率突降点, 对应于输电线路的检修换新操作。ALHW-PHM 可以量化老化失效、健康状态及天气状况对线路故障概率的影响。

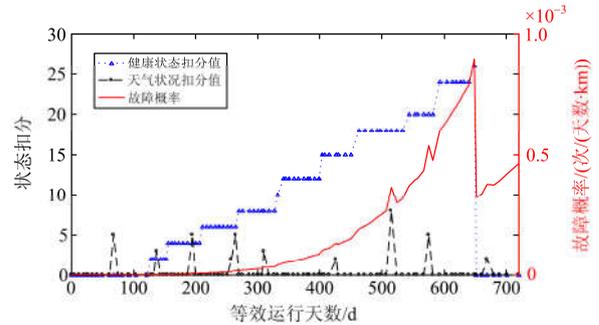


图 4 线路 L1 的劣化扣分信息及故障概率

Fig. 4 Deterioration score deduction and failure probability of the L1 line

图 5 展现了某日线路 L1 的实时负载率, 结合相关微气象信息和线温-负载率模型, 可以推算线路导体实时线温以及相应的实时故障概率。通过设备增容策略、检修操作等调度措施下的线路实时故障概率计算, 可分析在不同负载率条件下线路的设备损失风险及潜在的电网损失。

3.3 多线路系统算例

系统算例以 IEEE-RTS79 可靠性测试系统(附录图 C)^[27]为基础进行表 3 中所示 4 种运行场景的 110 kV 输电线路故障概率的计算。

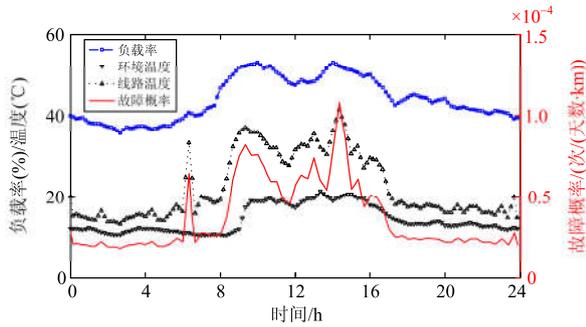


图 5 某日线路 L1 的负载率、温度及故障概率

Fig. 5 Load rate, temperature and failure probability of the L1 line in a certain day

表 3 运行场景介绍

Table 3 Introduction of operating scenes

场景	事故	后果
场景 1	无	各母线负荷及发电机出力均为默认数据
场景 2	负荷侧故障	母线 7 负荷数据变为 62+12j(Mvar)
场景 3	自然灾害	母线 8 附近区域天气状况恶化, 影响线路包括线路 7-8、8-9 和 8-10
场景 4	自然灾害、负荷侧故障	1. 母线 7 负荷数据变为 62+12j(Mvar); 2. 母线 8 附近区域天气状况恶化, 影响线路包括线路 7-8、8-9 和 8-10

ALHW-PHM 能够响应不同运行场景下多元风险因素对系统中不同线路故障概率的差异化影响。图 6 展示了 4 种场景下各线路的负载率、线温及故障概率对比情况。作为系统中负载率最大的线路, 线路 7-8 在 4 种场景下故障概率都是最大的。相较于场景 1, 场景 2 中母线 7 负荷减少, 大量潮流需要通过线路 7-8 转移到母线 8, 导致线路 7-8 过载, 故障概率急剧上升, 而其余线路由于受负荷侧故障影响较少, 故障概率基本保持不变。场景 3 中, 由于线路 7-8、8-9 和 8-10 所处天气状况恶劣, 天气状况扣分值增大, 相较于场景 1, 3 条线路的故障概率均有一定程度的上升。场景 4 中, 线路 7-8 由于受过载和恶劣天气两方面风险因素影响, 故障概率急剧上升, 需要调度人员采取相应调度操作以防止由于线路故障导致的严重后果。

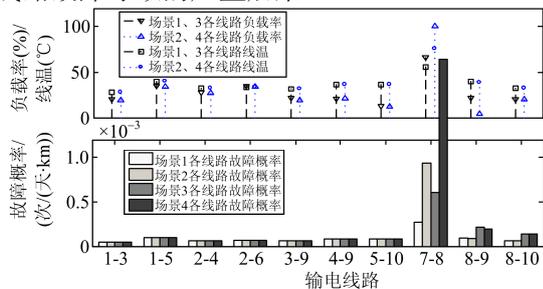


图 6 IEEE-RTS79 系统 110 kV 线路故障概率

Fig. 6 Failure probability of 110 kV lines in IEEE-RTS79

以架空线路的实时故障概率为基础, 结合其他输变电设备的运行状况, 可采用蒙特卡罗模拟等方法模拟系统的失效状态, 并对预想故障下系统运行状态进行分析与后果评估, 得出系统的相关风险指标, 为风险调度决策优化提供技术支持。

4 结论

通过算例分析可知, 本文搭建的 ALHW-PHM 具有以下优点:

1) 模型综合考虑输电线路老化失效、负载波动、健康状态和天气状况变化对故障概率的影响, 将多元风险因素落实到设备故障概率上, 能为电网风险评估提供底层模型基础。

2) 基于大数据平台的样本数据级并行计算极大地提高了参数估计的效率, 减少了重复计算量。

3) 引入劣化扣分概念综合表征线路健康状态与天气状况的劣化程度, 是一种全新的状态评价方式, 为设备状态评估及故障概率建模提供了新的思路。

以 ALHW-PHM 为基础, 通过进一步的研究及模型应用反馈修正, 融合深度关联分析、模糊聚类大数据挖掘分析方法, 可以发掘全局全量设备风险因素的耦合关系及内部关联机理, 建立电力大数据平台下各输变电设备差异化故障停运模型, 进而更为准确地评估设备风险及电网风险, 并为调度操作提供技术支持。

附录

(1) 附录 A

表 A 不同天气风险因素在不同气象等级下的扣分值

Table A Score deduction under various meteorological grades of different weather risk factors

风险因素	预警等级	1 级	2 级	黄色	橙色	红色
雷电	扣分值	0	5	TH		
覆冰	预警等级	1 级	2 级	黄色	橙色	红色
	扣分值	0	4	TH		
降雨	预警等级	中雨	大雨	暴雨	黄色	橙色
	扣分值	0	3	5	8	TH
大风	预警等级	3 级	4 级	5 级	6 级	蓝色
	扣分值	0	1	6	8	12
气温	预警等级	黄色	橙色	红色		
	扣分值	0	1	2		
台风	预警等级	3 级	4 级	5 级	6 级	蓝色
	扣分值	0	1	7	9	13
冰雹	预警等级	2 级	3 级	橙色	红色	
	扣分值	0	3	12	TH	
降雪	预警等级	2 级	3 级	橙色		
	扣分值	0	4	TH		

注: 各天气风险因素中, 级、蓝色、黄色、橙色、红色均表示气象等级, TH 为相应项天气风险因素阈值

(2) 附录 B 输电线路材料参数表

文献[18-19]给出了不同材质输电线路在试验温度下的相关材料参数 W_{max} 、 W_a 、 A 、 B 、 C 、 D 和 R 。根据线路材质选取其中较有代表性的参数制成表 B。

表 B 不同材质和温度下的输电线路材料参数
Table B Parameters under different material and time

金属	W_a	W_{max}	A	B	$-C$	D	R	θ_H
铝 ₁	56	10	9.8	100	5300	7.5	86	80-200
合金 ₁	60	10	19.3	270	10 000	4	91.3	77-160
铜 ₁	41	10	13.8	175	6700	3	90.2	77-160

(3) 附录 C IEEE 可靠性测试系统 RTS7

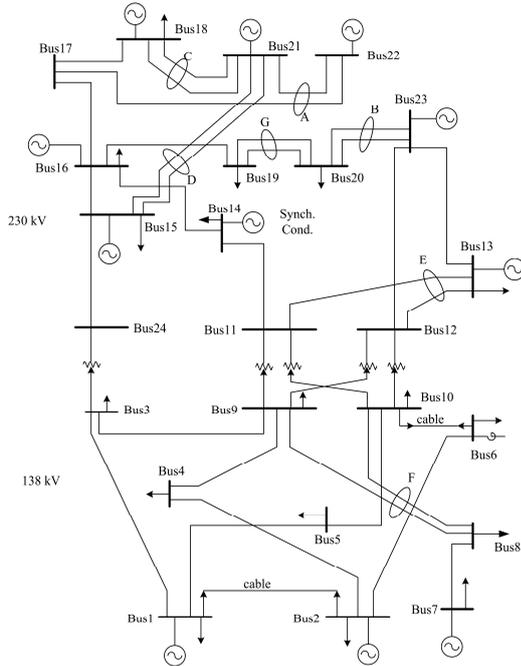


图 C IEEE 可靠性测试系统 RTS79

Fig. C IEEE reliability test system RTS79

(4) 附录 D 基于大数据平台的样本并行参数估计架构

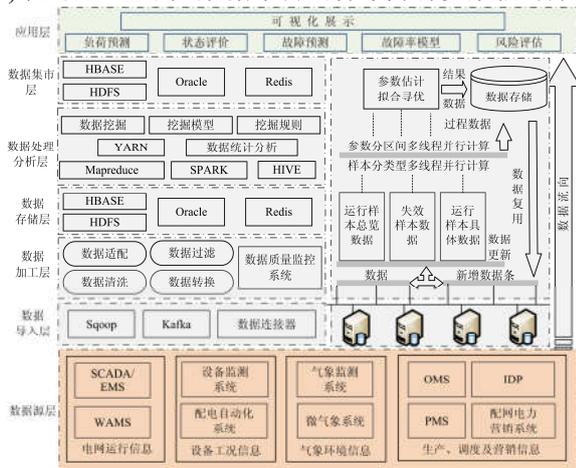


图 D 基于大数据平台的样本并行参数估计架构

Fig. D Structure of parallel parameter estimation for samples based on big data platform

参考文献

- [1] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-42.
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-42.
- [2] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 39-46.
HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Condition dependent short-term reliability models of transmission equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 39-46.
- [3] 何金定, 贺星棋. 考虑可修多状态的输电线路可靠性评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 11-14, 53.
HE Jinding, HE Xingqi. Evaluation model of reliability for overhead transmission line with considerations of repairable multi-state[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 11-14, 53.
- [4] 刘韶峰, 李碧君, 徐泰山, 等. 平行输电线路可靠性同调指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 24-31.
LIU Shaofeng, LI Bijun, XU Taishan, et al. Research on reliability coherency indices of parallel transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 24-31.
- [5] ZHOU Y, PAHWA A, YANG S S. Modeling weather-related failures of overhead distribution lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1683-1690.
- [6] LIU H, DAVIDSON R A, APANASOVICH T V. Spatial generalized linear mixed models of electric power outages due to hurricanes and ice storms[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(6): 897-912.
- [7] 王慧芳, 杨荷娟, 何奔腾, 等. 输变电设备状态故障率模型改进分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 27-31, 43.
WANG Huifang, YANG Hejuan, HE Benteng, et al. Improvement of state failure rate model for power transmission and transforming equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 27-31, 43.
- [8] BILLINTON R, SINGH G. Application of adverse and extreme adverse weather: modeling in transmission and distribution system reliability evaluation[J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(1): 115-120.
- [9] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.
XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal

- and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(15): 28-35.
- [10] IEEE Standard 346-1973. Terms for reporting and analysing outages of electrical transmission and distribution facilities and interruption to customer service[S].
- [11] COX D R. Regression models and life-tables[J]. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 1972: 187-220.
- [12] DENG X L and WANG T. Stock market factors and risk of financial distress: an empirical analysis using cox proportional hazard model[C] // 4th international Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008: 1-4.
- [13] 丁锋, 何正嘉, 瞿艳阳, 等. 基于设备状态振动特征的比例故障率模型可靠性评估[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(12): 89-94.
DING Feng, HE Zhengjia, ZI Yanyang, et al. Reliability assessment based on equipment condition vibration feature using proportional hazards model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(12): 89-94.
- [14] PRASAD P V N, RAO K R M. Failure analysis and replacement strategies of distribution transformers using proportional hazard modeling[C] // Reliability and Maintainability Symposium, 2003: 523-527.
- [15] 郭创新, 何迪, 张金江, 等. 考虑热老化的油浸式变压器比例风险模型[J]. *电力科学与技术学报*, 2014, 29(2): 14-20, 64.
GUO Chuangxin, HE Di, ZHANG Jinjiang, et al. A proportional hazard model for oil-immersed transformer concerning thermal aging[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2014, 29(2): 14-20, 64.
- [16] 鹿鸣明, 王逸飞, 郭创新, 等. 一种基于 PHM 考虑老化和设备状态的油浸式变压器故障率模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(18): 66-71.
LU Mingming, WANG Yifei, GUO Chuangxin, et al. Failure rate model for oil-immersed transformer based on PHM concerning aging process and equipment inspection information[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(18): 66-71.
- [17] IEEE Task Force on the Effects of High Temperature Operation of Transmission Lines. IEEE Standard 1283TM-2004 IEEE guide for determining the effects of high-temperature operation on conductors, connectors, and accessories [S/OL]. 2005-05-23.[2008-05-24].
- [18] MORGAN V T. Effect of elevated temperature operation on the tensile strength of overhead conductor[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(1): 345-352.
- [19] ADOMAH K, MIZUNO Y, NAITO K. Probabilistic assessment of the reduction in tensile strength of an overhead transmission line's conductor with reference to climatic data[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(4): 1221-1224.
- [20] 国家电网公司科技部. QGDW 173-2008 架空输电线路状态评价导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [21] 熊小伏, 王尉军, 于洋, 等. 多气象因素组合的输电线路风险分析[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2011, 23(6): 11-15, 28.
XIONG Xiaofu, WANG Weijun, YU Yang, et al. Risk analysis method for transmission line combining of various meteorological factors[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2011, 23(6): 11-15, 28.
- [22] 赵渊, 魏亚楠, 范飞, 等. 计及微振磨损与风雨荷载的输电线路可靠性建模[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(2): 19-25.
ZHAO Yuan, WEI Yanan, FAN Fei, et al. Reliability modeling for transmission lines incorporating fretting under strong wind and rain load[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(2): 19-25.
- [23] 孙羽, 王秀丽, 王建学, 等. 架空线路冰风荷载风险建模及模糊预测[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(7): 21-28.
SUN Yu, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Wind and ice loading risk model and fuzzy forecast for overhead transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(7): 21-28.
- [24] IEEE Working Group on Conductors. IEEE standard 738TM-2006 IEEE standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors[S/OL]. 2007-01-30[2008-05-24].
- [25] KALBFLEISCH J D, PRENTICE R L. The statistical analysis of failure time data[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [26] GB/T 1179—2008 圆线同心绞架空导线[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [27] Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979, PAS-98: 2047-2054.

收稿日期: 2016-04-03; 修回日期: 2016-05-30

作者简介:

何迪(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为输变电设备的状态监测、可载性分析和风险评估; E-mail: 3100103195@zju.edu.cn

郭创新(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为输变电设备状态检修、智能信息处理技术及其在电力系统中的应用。E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn

(编辑 张爱琴)