

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212233

考虑源荷相关性的风电接入配电变压器 风险联合概率评估

甘 艳¹, 何靖萱², 邹建明¹, 吕华林¹, 杜志叶², 蔡泓威², 黄菁雯²

(1. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 730074;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 730072)

[摘要] 高比例新能源的逐步接入改变了电力系统的运行方式, 新能源接入配网侧的变压器运行环境也发生了极大改变, 基于传统电力系统“源随荷动”的变压器风险评估体系已无法满足现有新型电力系统“源荷互动”的评估需求。基于 Copula 模型与变压器 Susa 模型, 建立风电接入的新能源配电网中“源”“荷”新型相关性模型, 并引入绝缘劣化概率等指标, 提出了一种考虑风电-负荷相关性的变压器运行风险联合概率评估方法, 利用蒙特卡罗法计算各个风险指标值并对变压器运行风险进行评估。研究表明, 传统不考虑“源”“荷”相关性的变压器评估体系会导致整体风险评估结果偏低, 指标最高误差可达 55.02%, 且随着相关性提升, 变压器热缺陷风险不断增加。研究结论可辅助提升新型电力系统变压器运行风险等级评估准确度, 为今后变压器状态评估与检修计划制定提供参考。

[关键词] 源荷相关性; 风电-负荷相关性; 变压器; Copula 函数; 蒙特卡罗法

[引用本文格式] 甘艳, 何靖萱, 邹建明, 等. 考虑源荷相关性的风电接入配电变压器风险联合概率评估[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 162-170. GAN Yan, HE Jingxuan, ZOU Jianming, et al. Joint probabilistic risk assessment of wind power transformer connected to distribution networks considering source-load correlation[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 162-170.

Joint probabilistic risk assessment of wind power transformer connected to distribution networks considering source-load correlation

GAN Yan¹, HE Jingxuan², ZOU Jianming¹, LYU Hualin¹, DU Zhiye², CAI Hongwei², HUANG Jingwen²

(1. Central China Branch of State Grid Corporation, Wuhan 730074, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 730072, China)

Abstract: With the increasing penetration of new energy in new power system, the influence of the uncertainty of wind power output and the correlation with load on the system operation is increasingly prominent. Thus, the conventional transformer risk assessment can no longer meet the demand. Based on Copula model and Susa model, a joint probability assessment method of transformer operation risk considering wind power and load correlation is proposed. Monte Carlo method is used to calculate each risk index value and evaluate transformer operation risk. The research results show that, the conventional transformer evaluation system that does not consider the wind-load correlation will lead to a low overall risk assessment result, with the maximum error of the index up to 55.02%. Also, with the increase of wind-load correlation, the risk of thermal defects of the transformer is increasing. The research conclusions can assist to improve the accuracy of the operation risk level assessment of new power system transformers, and provide a reference for the later transformer condition assessment and maintenance plan formulation.

Key words: source charge correlation; wind power-load correlation; transformer; Copula function; Monte Carlo method

修回日期: 2022-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51977152); 国家电网公司华中分部科技项目 (5214AJ220017)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51977152); Science and Technology Project of Central China Branch of State Grid Corporation of China (5214AJ220017)

第一作者简介: 甘艳 (1976), 女, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术, gany@cc.sgcc.com.cn。

近年来,随着“碳达峰、碳中和”战略目标的提出,电力系统中新能源渗透率不断提高。高比例新能源的接入使电力系统运行方式带来巨大变化,从传统“源随荷动”转变为“源荷互动”,同时由于风能等新能源所具有的波动性、随机性、间歇性特点^[1],甚至一些地方会出现用电高峰时少风甚至无风,或者在用电低谷时发电量较高的反调峰特性,严重影响新型电力系统的稳定运行^[2-4]。而变压器(尤其是新能源送端侧变压器)作为逐步构建的新型电力系统中的关键枢纽设备,易受新能源发电侧出力波动影响,因此,在新型电力系统“源荷互动”运行背景下对变压器进行运行风险评估具有重大意义。

目前已有大量研究数据证明在同一区域内,“源”(风电出力)与“荷”(负荷)二者并非完全独立的随机变量^[5-6],而是受多种因素影响而呈现一定的相关性,从而据此预测极热无风等现象的出现。在构建模型时,将二者关联性纳入考虑可以大大提升风险评估准确度^[7]。

变压器的老化以及预期寿命主要取决于其热特性^[8],通过计算相对热老化率的相关指标,可以得到变压器老化状况,从而进行风险等级计算。目前国际通用的IEEE油浸式变压器负载导则主要针对传统火电出力的电力系统,采用的是确定性方法,并未考虑在电力系统中新能源接入所带来的风力、负荷波动的不确定因素。

目前国内外对风电出力与负荷的相关性已有研究。文献[9]建立了时序风速-负荷模型,在研究含风电的系统裕度时计及负荷变化的影响。文献[10]基于风速与负荷的线性相关系数,构建了风速与负荷相关模型,用于配电网可靠性评估。文献[11]应用Copula模型建立了考虑风电-光伏出力的风光互补发电系统可靠性评估模型,但未考虑风电-负荷间的相关性。文献[12]基于Copula函数理论,选择最优的Frank-Copula函数描述样本风速与负荷的相关性,提出一种计及风速与负荷相关性的配电网潮流算法。但上述关于风电-负荷相关性的研究主要集中于分析新型电力系统配电网潮流问题,对关键电力设备的风险分析尚未涉及。因此,如何在风电新能源系统中计及风电-负荷相关性影响,建立联合概率密度分布模型来评估变压器运行风险等级具有较大研究价值。

综上,本文在新型电力系统逐步构建的背景

下,基于变压器Susa模型与Copula理论,建立风电-负荷联合出力概率模型,提出了一种考虑风电-负荷相关性的变压器运行风险联合概率评估方法。

1 Copula理论与相关性建模

1.1 Copula函数

Copula理论最早由Sklar于1959年提出,也称为连接函数,多用于描述变量间的相关性,将 $n(n \geq 2)$ 个边缘分布函数和一个联合分布函数结合于一体^[13]。其弥补了传统相关性模型各随机变量边缘分布必须相同、基于线性相关系数会改变原始样本结构等缺陷。相较于其他描述相关性的函数,Copula函数可以较好描述具有非线性相关性的变量关系,因此多用于构造联合分布模型。最初基于Copula函数的联合分布模型主要应用于经济金融领域,近年来也被引入风光荷功率相关性分析中^[14-15]。

相较于只能表示线性相关性的简单联合函数,Copula函数将随机变量的边缘分布与相关性分开表达,因此对于变量间的复杂非线性相关性也可以较好描述。若 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是具有连续边缘分布的随机变量 $x_1 \sim x_n$ 的联合概率分布函数,则存在唯一的Copula函数 $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 满足:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) = C(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (1)$$

式中: $u_i = F_i(x_i)$, $F_i(x_i)$ 为 x_i 的边缘分布。

对式(1)求导,得到多元随机变量的联合概率密度函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \prod_{i=1}^n f_i(x_i) = \quad (2)$$

$$c(u_1, u_2, \dots, u_n) \prod_{i=1}^n f_i(x_i)$$

式中: $f_i(x_i)$ 为 $F_i(x_i)$ 的导数; $c(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 为Copula函数 $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 的导数,如式(3)所示。

$$c(u_1, u_2, \dots, u_n) = \frac{\partial C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n))}{\partial(F_1(x_1) \partial(F_2(x_2) \dots \partial(F_n(x_n))} \quad (3)$$

1.2 构建联合分布模型的Copula函数选择

Copula函数主要包括椭圆分布族(包括正态Copula函数、 t -Copula函数等)及阿基米德函数族(包含Frank-Copula函数、Gumbel-Copula函数等)。其中,阿基米德Copula函数族中的Frank-Copula函

数主要应用于分析具有对称相关结构的随机变量间的相关关系，而且适用于正负相关性数据^[16]，同时具有构造简单、计算方便等特点，被广泛应用于构造风速-负荷的相关性模型^[17-18]。

Frank Copula 函数分布函数为：

$$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]; \theta \in R \quad (4)$$

概率密度函数为：

$$c(u, v) = \frac{\theta e^{\theta(1+u+v)}(e^{\theta} - 1)}{[e^{\theta} - e^{\theta(1+u)} + e^{\theta(u+v)} - e^{\theta(1+v)}]^2}, \theta \in R \quad (5)$$

式中： θ 为相关系数。当 $\theta > 0$ 时，表示变量相互之间呈正相关关系；当 $\theta < 0$ 时，表示变量相互之间呈负相关关系。 θ 绝对值越大，二者相关性越强；当 θ 趋近于 0 时，随机变量趋于相互独立。

2 变压器绝缘老化故障机理及热缺陷评估指标

2.1 变压器油纸绝缘老化故障机理

目前，变压器老化问题主要聚焦于其油纸复合

固液绝缘结构的老化^[19]，包括变压器油与固体绝缘纸板。常见的变压器油为矿物油，绝缘纸板主要分为热改性纸与非热改性纸^[20]。

变压器绝缘纸板老化类型主要分为热老化（温度作用）、电老化（局部放电作用）、机械老化（机械振动作用）及环境老化（外部环境作用）；变压器油老化主要由油中烃类物质的氧化反应引起。在内外多种因素作用下，变压器的绝缘性能和机械性能发生衰减，进而出现老化甚至故障情况。变压器油纸绝缘结构如图 1 所示，影响变压器绝缘老化的因素及机制如图 2 所示。

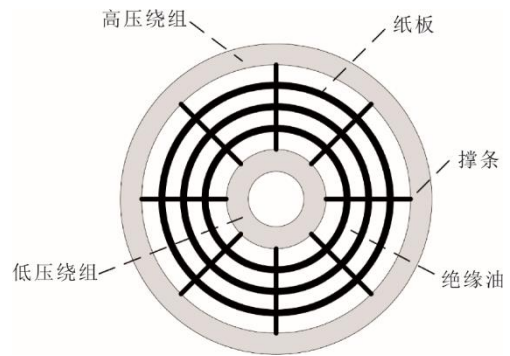


图 1 变压器油纸绝缘结构

Fig.1 The oiled paper insulation structure of the transformer

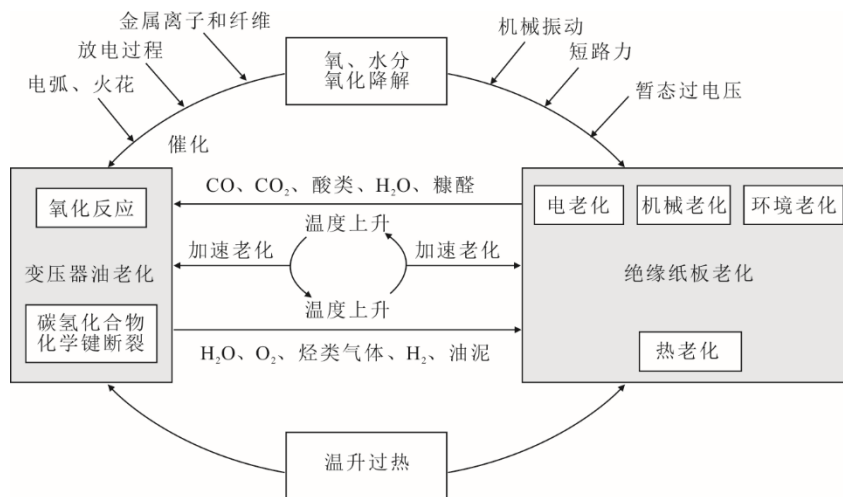


图 2 变压器油纸绝缘老化机理简介

Fig.2 Insulation aging mechanism diagram of the transformer

2.1.1 绝缘纸板老化机理

绝缘纸板主要成分为纤维素，当绝缘纸板在外界物理作用或化学作用下发生绝缘老化时，绝缘纸板中纤维素的分子链会产生损坏，发生解聚反应、消去反应等，产生低聚物（ H_2O 、 CO 、 CO_2 、有机酸、糠醛等）。在上述 4 种变压器绝缘纸板老化形式

中，热老化被 IEC-60354、IEEE 等标准认定为最主要的形式^[19]。热老化由变压器绕组、铁芯部件运行产生的温升产生，热老化速度随温度的不断上升而急速加快，使绝缘纸板的电气、机械性能不断降低。绝缘纸板老化后，脱落的纤维会阻塞油道影响绝缘散热，进一步加剧温升。由此温升与热老化形成正

反馈循环，不断加速绝缘纸板老化直至产生故障。同时，温度的上升不仅会催化热老化，还会加速其他老化形式的化学反应。

2.1.2 变压器油老化机理

变压器油纸绝缘系统中的变压器油主要由各种烃类组成，其主要作用为电气绝缘与热交换。常温时，变压器油老化的主要原因为油中溶解的氧气导致的变压器油的氧化反应^[21]，随着变压器油氧化产物的不断增加形成油泥，变压器油散热能力降低并加速绝缘纸板的老化。同时，变压器油温骤升时，烃类化合物的化学键断裂，产生烃类气体、氢气，油中含气量的提升使变压器油的散热能力进一步降低。

因此，变压器的热特性在变压器绝缘老化过程中起着至关重要的作用，通过对变压器特性温度（顶层油温、热点温度）的分析，可以准确评估变压器的运行老化故障风险。

2.2 热缺陷评估指标

2.2.1 相对老化率

变压器绝缘老化速度影响因素中，温度是最为关键的因素。变压器绝缘老化程度可以由相对热老化率进行直观反映，当相对热老化率大于1时，已开始产生绝缘热老化^[22]。相对热老化率在相关规程中已有具体规定。在《电力变压器 第7部分：油浸式电力变压器负载导则》（GB/T 1094.7—2008）给出了非热改性纸的相对老化率计算公式为式(6)；《电力变压器 第7部分：矿物油浸电力变压器加载指南》（IEC 60076-7—2018）给出了热改性纸的相对老化率计算公式为式(7)。

$$V = 2^{(\theta_{hst} - 98)/6} \tag{6}$$

$$V = e^{\left(\frac{15\,000}{110+273} - \frac{15\,000}{\theta_{hst}+273}\right)} \tag{7}$$

式中：V为变压器相对老化率； θ_{hst} 为变压器套组热点温度，℃。

表1为典型温度下变压器相对热老化率的数值^[4]。

表1 典型温度下的变压器相对热老化率

Tab.1 The relative thermal aging ratio of the transformer at typical temperatures

| 绕组热点温度/℃ | 相对老化率 | |
|----------|-------|-------|
| | 热改性纸 | 非热改性纸 |
| 110 | 1.000 | 4.000 |
| 104 | 0.536 | 2.000 |
| 98 | 0.282 | 1.000 |
| 92 | 0.145 | 0.500 |
| 86 | 0.073 | 0.250 |

从表1可以看出：对于采用热改性纸的变压器，在110℃时，变压器无热性寿命损失；而对于采用非热改性纸的变压器，在98℃时无热性寿命损失。

2.2.2 顶层油温温升限值

IEEE C57.12.90—2015给出了对变压器顶层油温的温升限值：任意24h平均温度30℃的环境中，变压器顶层油温限值为65K^[23]。

2.2.3 绝缘寿命

IEEE C57.12.00给出了变压器绝缘寿命计算公式为：

$$M = e^{\left(\frac{15\,000}{\theta_n+273} - 27.064\right)} \tag{8}$$

式中：M为变压器绝缘寿命，h。

3 考虑风电-负荷相关性的变压器特征温度概率密度分布

3.1 Susa 模型

变压器热路模型是基于热电等效原理的一种半物理模型，以暂态电路的形式模拟变压器热传递过程。其中，被广泛引用的经典模型是Susa建立的热路模型，图3为其基本原理。

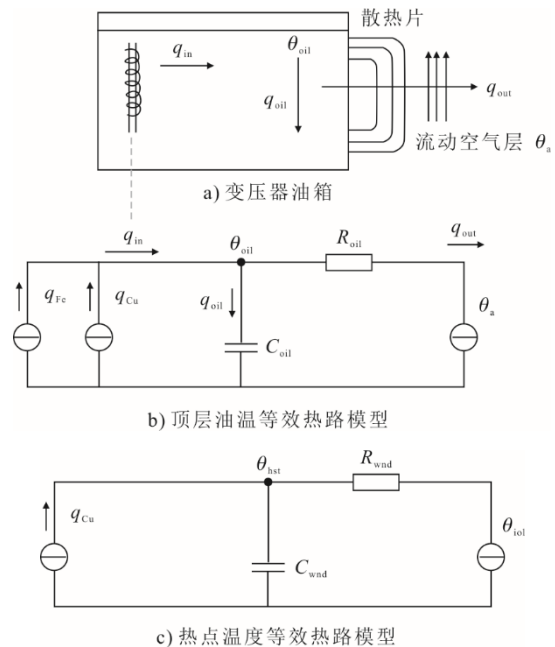


图3 Susa 热路模型原理
Fig.3 Susa thermal path model

图3中： q_{Fe} 、 q_{Cu} 分别为变压器铁耗、铜耗的发热； q_{in} 为变压器空载损耗、负载损耗发热之和； q_{out} 为变压器传递到大气环境中的热能； q_{oil} 为传递到变压器油中的热能，J； C_{oil} 为变压器油的热容； C_{wnd}

为变压器绕组的热容, pF ; θ_{oil} 为变压器顶层油温; θ_{hst} 为变压器顶层油温; θ_a 为环境温度, $^{\circ}C$; R_{oil} 与 R_{wnd} 分别为额定负载下顶层油温对空气、绕组对顶层油的热阻, Ω 。

根据图 3b) 可得:

$$P_{Fe} + P_{Cu} = C_{oil} \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{1}{R_{oil}} (\theta_{oil} - \theta_a)^n \quad (9)$$

式中: P_{Fe} 、 P_{Cu} 分别为变压器铁耗、铜耗功率, W ; n 为非线性指数。

将变压器铜耗、铁耗随负载变化的关系代入式(9), 简化可得顶层油温的计算公式^[24-25]为:

$$\theta_{oil} = \left(\frac{k^2 R + 1}{R + 1} \right)^n \Delta\theta_{oil,R} + \theta_a \quad (10)$$

式中: k 为变压器的负载系数; R 为变压器额定情况下负载损耗与空载损耗的比值; $\Delta\theta_{oil,R}$ 为额定负载下变压器顶层油相对环境温度的稳态温升。

基于图 3c), 可推导得变压器的热点温度为:

$$\theta_{hst} = k^{2m} \Delta\theta_{hst,R} + \left(\frac{k^2 R + 1}{R + 1} \right)^n \Delta\theta_{oil,R} + \theta_a \quad (11)$$

式中: m 为非线性指数; $\Delta\theta_{hst,R}$ 为额定负载下变压器绕组相对顶层油的稳态温升。

3.2 变压器特征温度联合概率模型

以风电送出变压器额定容量为基准值实现风电出力与负荷标么化。同时基于风电出力数据, 利用 Beta 分布函数拟合风电出力概率分布函数

$$f_{wr}(p_w^*) = \frac{\Gamma(\alpha_1 + \beta_1)}{\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\beta_1)} (p_w^*)^{\alpha_1 - 1} (1 - p_w^*)^{\beta_1 - 1} \quad (12)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; p_w^* 为风电场出力标么值, $0 \leq p_w^* \leq 1$; α_1 和 β_1 为分布参数。

负荷的概率密度分布采用相关研究中最为常用的正态分布, 见式(13)。

$$f_p(p_L^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left(-\frac{(p_L^* - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (13)$$

式中: p_L^* 为负荷的标么值; μ_p 、 σ_p 分别为负荷期望和标准差的标么值。

将式(8)与式(9)代入 1.2 节中的 Frank-Copula 概率密度函数, 计算可得:

$$f(p_w^*, p_L^*) = \frac{-\rho(e^{-\rho} - 1)e^{-\rho(u+v)} F_{WT}(p_w^*) F_p(p_L^*)}{\left[(e^{-\rho} - 1) + (e^{-\rho u} - 1)(e^{-\rho v} - 1) \right]^2} \quad (14)$$

式中: u 为风电出力概率分布函数 $f_{WT}(p_w^*)$,

$F_{WT}(p_w^*)$ 为其累计概率分布函数; v 为负荷的概率密度分布函数 $f_p(p_L^*)$, $F_p(p_L^*)$ 为其累积概率分布函数; ρ 为相关参数。

由于此模型构建对象是新能源送端变压器, 因此此处风电送出变压器的负载系数与标么化的风电出力相等, 故负载系数 k 的概率密度分布为:

$$f_{k1}(k) = \int_0^1 f(p_w^*, p_L^*) dp_L^* \quad (15)$$

之后引入变量求取顶层油温 θ_{oil} 与热点油温 θ_{hst} 的概率密度分布, 见式(16)、式(17)。

$$\left\{ \begin{aligned} a_1 &= \left(\frac{k^2 R + 1}{R + 1} \right)^n \Delta\theta_{oil,R} \\ J_{oil} &= \frac{\partial(k, \theta_a)}{\partial(a_1, \theta_{oil})} \\ f_{\theta}(\theta_{oil}) &= \int_{\left(\frac{1}{R+1}\right)^n \Delta\theta_{oil,R}}^{\Delta\theta_{oil,R}} \frac{|J_{oil}| f_{k1}(f^{-1}(a_1))}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \times \\ &\quad e^{-\frac{(\theta_{hst} - a_1 - \mu_a)^2}{2\sigma_a^2}} da_1 \end{aligned} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{aligned} a_1 &= \left(\frac{k^2 R + 1}{R + 1} \right)^n \Delta\theta_{oil,R} \\ \theta_{hst} &= (f^{-1}(a_1))^{2m} \Delta\theta_{hst,R} + a_1 + \theta_a \\ J_{hst} &= \frac{\partial(k, \theta_a)}{\partial(a_1, \theta_{hst})} \\ f_{\theta}(\theta_{hst}) &= \int_{\left(\frac{1}{R+1}\right)^n \Delta\theta_{oil,R}}^{\Delta\theta_{oil,R}} \frac{|J_{hst}| f_{k1}(f^{-1}(a_1))}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \times \\ &\quad e^{-\frac{(\theta_{hst} - a_1 - (f^{-1}(a_1))^{2m} \times \Delta\theta_{hst,R} - \mu_a)^2}{2\sigma_a^2}} da_1 \end{aligned} \right. \quad (17)$$

式中: $|J_{oil}|$ 与 $|J_{hst}|$ 为雅各比行列式的绝对值。

4 蒙特卡罗抽样模拟

评估指标的计算主要采用蒙特卡罗法统计模拟。蒙特卡罗法首先利用产生的随机数来对变量进行随机抽样, 产生不同分布的随机变量, 然后结合实际时序情况加入变量进行模拟, 最后得到概率统计值进行渐进统计分析。具体步骤如下:

- 1) 输入风电与负荷的概率模型信息(分布类型、参数)及相关系数与构建的联合概率密度分布模型;
- 2) 利用时序抽样程序产生存在相关关系的风电、负荷随机样本;
- 3) 基于第 3 节构建的变压器热点温度概率密

度模型, 获取样本所对应的变压器热点温度值;

4) 对变压器热损失情况进行判别, 计算所需的可靠性指标。

重复步骤 1) 一步骤 4) 直至获取 1000 套样本数据。其中, 风险样本与总样本的比值为各风险判定指标值。风险判定指标值主要采用以下 3 个指标:

1) 绝缘劣化概率 P_d 表示在一定期间内, 变压器绕组热点温度过高导致 $V>1$, 造成绝缘产生劣化的概率。

$$P_d = \frac{S_d}{\text{SUM}} \quad (18)$$

式中: S_d 为变压器相对老化率超过 1 的抽样次数; SUM 表示总抽样次数。

2) 温升超限概率 P_t 表示在一定期间内, 变压器顶层油温过高超过 IEEE 限定值, 影响变压器安全稳定运行的概率。

$$P_t = \frac{S_t}{\text{SUM}} \quad (19)$$

式中: S_t 为变压器顶层油温超过 IEEE 限定值的抽样次数。

3) 绝缘寿命损失期望 E_d 表示在一定期间内由于绝缘劣化造成的绝缘寿命损失期望值。

$$E_d = \frac{1}{S_d} \sum_{i=1}^{S_d} L_i \times P_d \quad (20)$$

式中: L_i 为变压器在绝缘劣化时的寿命损失。计算公式为:

$$L = M(V=1) - M(\theta_{\text{hst}}) \quad (21)$$

5 算例评估

本文算例取自荷兰 De Kooy 风电场^[26]。图 4 为风电场 2021 年 8 月 1 日—2022 年 8 月 1 日的时序风速, 测速高度 10 m。

通过对时序风速数据进行分析, 得到风电场出力概率密度基本服从 Beta 分布, 分布参数 $\alpha=1.54$ 和 $\beta=2.98$ 。

负荷以 IEEE 测试系统负荷数据为例, 如图 5 所示, 以 IEEE-RTS 系统年度时序负荷曲线进行分析。

根据拟合结果可知负荷的概率密度服从正态分布, 参数为 $\mu=0.6142$ 、 $\sigma=0.1482$ 。风电出力与负荷 Spearman 秩相关系数为-0.2。

风电送出变压器型号为 SF11-63000/110, 绝缘纸采用非热改性纸。环境温度为正态分布, $\mu=28.3765$ 、 $\sigma=12.4120$ 。

参照第 4 章所述, 利用蒙特卡罗模拟法实现变

压器热点温度状态抽取, 变压器顶层油温与热点温度概率密度分布如图 6 所示。

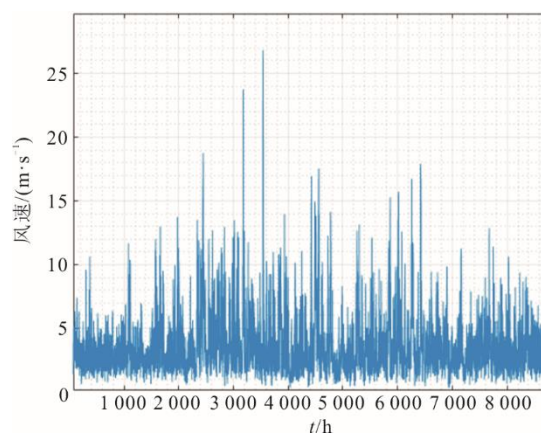


图 4 De Kooy 风电场 2021 年 8 月 1 日—2022 年 8 月 1 日时序风速

Fig.4 Temporal wind speed at De Kooy wind farm from 2021.08.01 to 2022.08.01

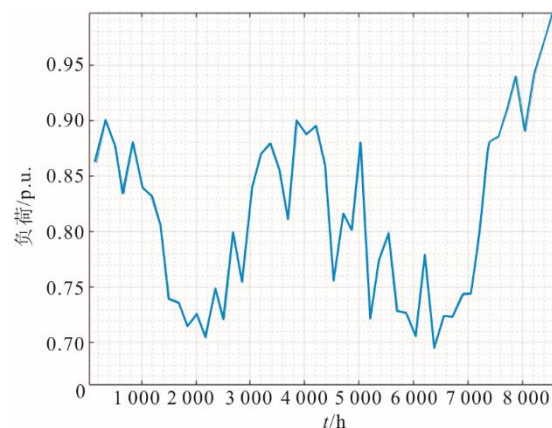


图 5 IEEE-RTS 系统年度时序负荷拟合图

Fig.5 Annual timing load of IEEE-RTS system

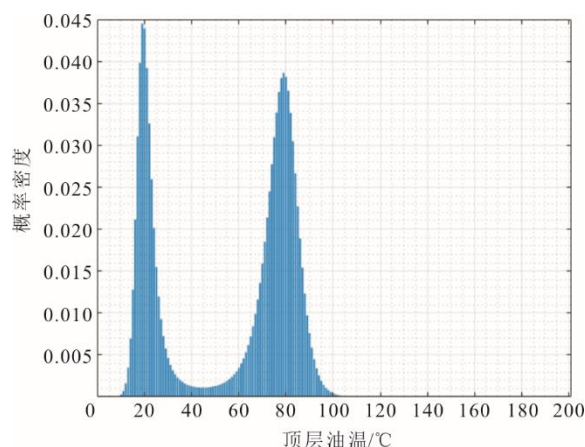


图 6 变压器顶层油温概率密度分布

Fig.6 Probability density distribution diagram of oil temperature in the transformer top layer

由图 6 可见, 正常情况下, 变压器顶层油温大多分布于 20~70 °C, 考虑风电-负荷相关性的变压

器顶层油温在 80 °C 左右迎来另一个概率密度波峰,温升异常的概率较大,对应高出力-低负荷与低出力-高负荷的极端情形。

变压器绕组热点温度相较于顶层油温,还需考虑额定负载下变压器绕组相对顶层油的稳态温升,此处设置为 20 °C。变压器热点温度概率密度分布如图 7 所示。由图 7 可见,变压器热点温度概率密度分布不对称,在 78 °C 左右迎来峰值,并存在超过 98 °C 的异常情况,具有一定的故障风险。

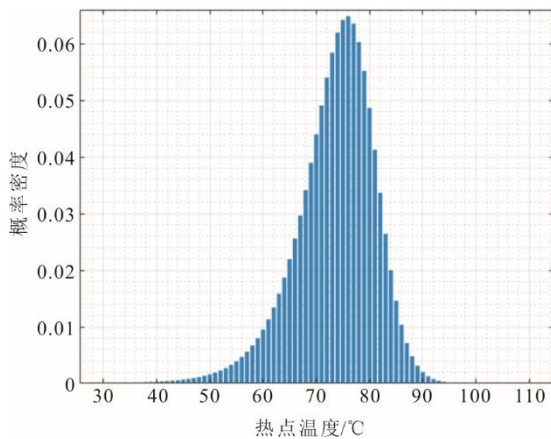


图 7 变压器热点温度概率密度分布
Fig.7 Probability density distribution of the transformer hot spot temperature

根据蒙特卡罗抽样结果,结合式(18)一式(21)可计算此变压器各指标参数。

表 2 为 4 种不同情形下变压器的 P_d 、 P_t 与 E_d 值。其中,情形 1 为包含风力发电,但不考虑风电-负荷相关性;情形 2 为上例所述,包含风力发电,风电-负荷相关系数为-0.2;情形 3 为包含风力发电,且风电-负荷呈高度相关,相关系数为-0.9;情形 4 为包含风力发电,且风电-负荷呈完全负相关,相关系数为-1。

表 2 不同情形下的变压器指标值
Tab.2 The transformer index value under different conditions

| 情形 | P_d | P_t | E_d/h |
|------|-----------------|-----------|-----------------|
| 情形 1 | $3.861 7e^{-5}$ | 0.000 614 | $4.177 5e^{-3}$ |
| 情形 2 | $8.111 2e^{-5}$ | 0.001 365 | $5.998 4e^{-3}$ |
| 情形 3 | $1.753 8e^{-4}$ | 0.017 630 | $5.929 1e^{-2}$ |
| 情形 4 | $2.873 3e^{-4}$ | 0.020 850 | $6.410 0e^{-2}$ |

由表 2 可知,对于同一区域的风电接入新能源电网,若不考虑风电-负荷相关性,所计算出的变压器运行风险等级会偏低。这是由于若不考虑风电-

负荷相关性,便会忽略“极热无风”等极端低出力、高负荷情形,而往往此时变压器的运行风险等级较高。忽略高风险因素的存在会导致传统评估方式的风险值较低,为变压器的状态评估及之后的定期检修埋下隐患。数据显示,对比考虑实际运行情况下风电光伏相关性的情形 2 与不考虑风电-负荷相关性的情形 1,指标中误差最为显著的为温升超限概率,若不考虑风电-负荷实际相关性的误差率为 55.02%。由此可见,对于新型电力系统而言,在传统变压器评估系统中引入风电-负荷相关性进行热缺陷检验具有重大作用。

同时,随着风电-负荷相关性的不断提升, P_d 、 P_t 与 E_d 指标值不断上升,变压器风险等级升高。可见在风电-负荷相关性较强的区域,变压器受风力发电出力波动而产生的热缺陷绝缘损失较相关性不强的区域更大。这是由于风电出力与负荷多数呈负相关关系,二者相关性的提升会导致风电出力大而负荷需求小的极端情形增多,变压器负载系数 k 的波动性增大;相反,若风电-负荷的相关性偏小,负载系数波动性降低,运行稳定风险更低。

目前国内常用的变压器多数采用非热改性纸作为变压器绝缘纸,本算例中同样也采用非热改性纸,但仍存在部分以热改性纸作为绝缘纸的变压器。图 8 为根据 IEEE 标准,对上述 4 种情形的 3 个指标进行对比计算的结果。

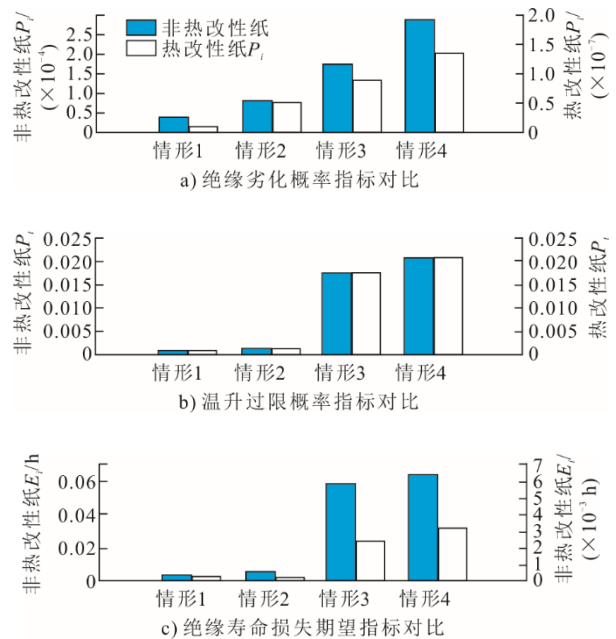


图 8 采用不同绝缘纸的变压器指标对比
Fig.8 Comparison of the transformer indexes using different insulating papers

由图8可见,相较于非热改性纸,采用热改性纸的绝缘劣化概率 P_d 与绝缘寿命损失期望 E_d 更低,这是由于在IEEE标准中,热改性纸110℃相对老化率为1,而非热改性纸的对应热点温度为98℃。而在IEEE标准中,顶层油温的温升限值均为65℃,使得计算出的温升过限概率指标 P_l 相同。整体而言,变压器采用热改性纸可以在一定程度上降低热缺陷风险值,提升变压器使用寿命。

6 结 论

本文提出了一种考虑风电-负荷相关性的变压器运行风险联合概率评估方法。通过引入绝缘劣化概率、温升过限概率以及绝缘寿命损失期望等指标,构建变压器热点温度联合概率模型,实现新型电力系统变压器运行风险评估。研究结果可得以下结论。

1) 传统不考虑风电-负荷相关性的变压器评估体系会导致整体风险评估结果偏低,尤其是对于 P_l 指标,误差率可达55.02%。

2) 随着风电-负荷相关性提升,变压器热缺陷风险等级不断上升,表明在风电-负荷相关性较高的区域,变压器面临的热缺陷风险更高。

3) 采用热改性纸作为绝缘纸的变压器相较于非热改性纸变压器运行风险更低。

本文的研究结论可辅助提升新型电力系统变压器运行风险等级评估准确度,为今后的变压器状态评估与检修计划制定提供参考。

【参 考 文 献】

[1] 唐坚, 苏剑涛, 姚禹歌, 等. 面向新型电力系统的风电调频技术分析[J]. 热力发电, 2022, 51(7): 1-8.
TANG Jian, SU Jiantao, YAO Yuge, et al. Technical analysis of power system frequency regulation by wind power for new power system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(7): 1-8.

[2] 王涛, 诸自强, 年珩. 非理想电网下双馈风力发电系统运行技术综述[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 455-471.
WANG Tao, ZHU Ziqiang, NIAN Heng. Review of operation technology of doubly-fed induction generator-based wind power system under nonideal grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 455-471.

[3] VALENTINE K, TEMPLE W, THOMAS R J, et al. Relationship between wind power, electric vehicles and charger infrastructure in a two-settlement energy market[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 82: 225-232.

[4] REIHANI E, MOTALLEB M, GHORBANI R, et al. Load peak shaving and power smoothing of a distribution grid

with high renewable energy penetration[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 1372-1379.

[5] 龙川, 张文涛, 叶圣永, 等. 计及源荷相关性含电动汽车的分布式电源选址定容规划[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 97-104.
LONG Chuan, ZHANG Wentao, YE Shengyong, et al. Optimal planning for siting and sizing of distributed generator including electric vehicles considering correlations of source and load[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 97-104.

[6] 黄启航, 王秀丽, 齐世雄, 等. 考虑负荷和风电相关性的多场景鲁棒输电规划[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 63-70.
HUANG Qihang, WANG Xiuli, QI Shixiong, et al. Multi-scenario robust transmission planning considering correlation between wind power and load demand[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6): 63-70.

[7] 张雪寒, 余涛. 计及风速与负荷相关性的电-气互联系统概率可靠性评估方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3263-3272.
ZHANG Xuehan, YU Tao. Probabilistic reliability evaluation method of electricity-gas integrated energy system considering correlation of wind speeds and loads[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(10): 3263-3272.

[8] 徐莲环, 韩克俊, 张志强, 等. 电力变压器绝缘材料寿命与热点温升限值的研究[J]. 变压器, 2021, 58(10): 1-3.
XU Lianhuan, HAN Kejun, ZHANG Zhiqiang, et al. Research on the insulation life and hot-spot winding temperature limit of power transformer[J]. Transformer, 2021, 58(10): 1-3.

[9] JAYAWEEERA D, ISLAM S. Probabilistic assessment of distribution network capacity for wind power generation integration[C] // Power Engineering Conference. Adelaide: IEEE, 2009: 1-6.

[10] 孙若笛, 谢开贵. 计及风速-负荷相关性的配电网可靠性评估 Monte Carlo 模拟法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 12-18.
SUN Ruodi, XIE Kaigui. Reliability evaluation of distribution networks using Monte Carlo method considering correlations between wind speed and load[J]. Protection and Control of Electric Power Systems, 2012, 40(18): 12-18.

[11] 赵继超, 袁越, 傅质馨, 等. 基于 Copula 理论的风光互补发电系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 124-129.
ZHAO Jichao, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 124-129.

[12] 李春燕, 杨强, 魏蔚, 等. 计及风速与负荷相关性的配电网重构方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 148-153.
LI Chunyan, YANG Qiang, WEI Wei, et al. Distribution network reconfiguration considering correlation between wind-speed and load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 148-153.

[13] 王俊, 蔡兴国, 季峰. 基于 Copula 理论的相关随机变量模拟方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 75-82.
WANG Jun, CAI Xingguo, JI Feng. A simulation method of correlated random variables based on Copula[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 75-82.

- [14] 马建鹏, 李文升, 安树怀, 等. 基于 Copula 理论的综合能源系统负荷相关性研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2018, 33(4): 56-60.
MA Jianpeng, LI Wensheng, AN Shuhuai, et al. Study on the correlation of load of comprehensive energy system based on copula theory[J]. Journal of Qingdao University (E&T), 2018, 33(4): 56-60.
- [15] 邢贵阳, 刘莉, 庞新富, 等. 基于 Copula 理论的风电出力相关性研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2020, 16(3): 19-23.
XING Guiyang, LIU Li, PANG Xinfu, et al. Research on correlation of wind power output based on Copula theory[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2020, 16(3): 19-23.
- [16] 徐晓环. 基于 Copula 函数的截断区间变结构点诊断及应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 1.
XU Xiaohuan. The research on the diagnosis and application of the variable structure point based on Copula function[D]. Changsha: Hunan University, 2019: 1.
- [17] 邵煦晴. 基于 Copula 函数探究内蒙古自治区风速关系[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2020: 1.
SHAO Xuqing. Copula function to explore the relationship of wind speed in Inner Mongolia Autonomous Region[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2020: 1.
- [18] 潘奇鑫. Copula 函数在宿迁古黄河流域月降雨量模拟中的运用[D]. 扬州: 扬州大学, 2021: 1.
PAN Qixin. Application of Copula function in simulation of monthly rainfall in Suqian Ancient Yellow River Basin[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021: 1.
- [19] SIMONI L, MAZZANTI G, MONTANARI G C, et al. A general multi-stress life model for insulating materials with or without evidence for thresholds[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(3): 349-364.
- [20] 高敏华, 王欣. 热改性绝缘纸的应用以及相关变压器技术的分析[J]. 变压器, 2018, 55(2): 18-23.
GAO Minhua, WANG Xin. Application of thermally upgraded paper and analysis of related transformer technology[J]. Transformer, 2018, 55(2): 18-23.
- [21] 廖瑞金, 冯大伟, 邓帮飞, 等. 绝缘油中抗氧化剂 DBPC 对油纸绝缘老化速率及糠醛生成特性影响研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 1652-1661.
LIAO Ruijin, FENG Dawei, DENG Bangfei, et al. Influence of DBPC in insulating oil on aging rate of oil-paper system and production characteristics of furfural[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1652-1661.
- [22] 连启祥, 杜志叶, 杨知非, 等. 油纸绝缘内部合成电场数值模拟方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 53-61.
LIAN Qixiang, DU Zhiye, YANG Zhifei, et al. Numerical simulation method of electric field in oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 53-61.
- [23] 张良伟, 曾令甫, 张伟, 等. 变压器负荷对温升影响分析[J]. 山东电力技术, 2016, 43(2): 60-61.
ZHANG Liangwei, ZENG Lingfu, ZHANG Wei, et al. Analysis method for transformer load effects on temperature-rise[J]. Shandong Electric Power Technology, 2016, 43(2): 60-61.
- [24] 李可军, 亓孝武, 魏本刚, 等. 基于核极限学习机误差预测修正的变压器顶层油温预测[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4045-4053.
LI Kejun, QI Xiaowu, WEI Bengang, et al. Prediction of transformer top oil temperature based on kernel extreme learning machine error prediction and correction[J]. High Voltage Technology, 2017, 43(12): 4045-4053.
- [25] 杨欢红, 丁宇涛, 宋亮, 等. 基于热路和 BP 神经网络的变压器顶层油温预测研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 171-174.
YANG Huanhong, DING Yutao, SONG Liang, et al. Study on prediction of top-oil temperature for transformer based on thermal circuit and BP neural network[J]. Journal of Hydropower Energy Science, 2018, 36(8): 171-174.
- [26] Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI. Potentiele_wind[EB/OL]. (2022-08-01)[2022-08-08]. http://www.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/potentiele_wind.

(责任编辑 邓玲惠)