

DOI:10.12158/j.2096-3203.2024.01.023

基于多特征量的 GIS 触头温度预测方法

刘昱轩¹, 徐志钮¹, 胡伟涛², 赵汉武¹, 赵丽娟¹, 金虎³

(1. 华北电力大学电气与工程学院, 河北 保定 071003;

2. 国网河北省电力有限公司超高压分公司, 河北 石家庄 050070;

3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘要:为防止因气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)触头温升造成的事故,有必要对 GIS 触头温度进行监测与预测。针对触头温度不易直接测量以及其温度易受运行工况与外界因素影响的问题,文中提出了一种基于多特征量的 GIS 触头温度预测方法。文中通过建立三维仿真模型,分析了在不同接触电阻值、负荷电流、环境温度、风速、SF₆压强、太阳辐射强度下 GIS 的温度分布规律,结合热路理论定性验证了仿真模型的可靠性。通过分析可知, GIS 触头温度预测的关键因素为外壳温升、负荷电流、风速、SF₆压强、太阳辐射强度,而环境温度影响可忽略,采取反向传播(back propagation, BP)神经网络用以上多特征量预测触头温升,将得到的预测值与建模方法的计算结果进行对比,误差为-0.7~0.68℃。该预测方法综合考虑多种影响因素对 GIS 温度场的影响,为基于外置传感器的 GIS 触头温度预测提供参考。

关键词:气体绝缘开关(GIS);多物理场耦合;有限元法;反向传播(BP)神经网络;温度预测;热路理论

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)01-0212-08

0 引言

气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)设备具有结构紧凑、可靠性高、配置灵活、安全性强、维护工作量小等优点,在电力系统中被广泛应用。GIS 长时间运行会导致触头接触不良^[1-2],严重时可能会引起短路,造成重大事故,必须对其进行可靠监测。由于其结构封闭^[3],难以直接测量触头温度,现有技术多监测外壳温度。因此,有必要研究 GIS 触头温度与外壳温度之间的关系。

目前, GIS 外壳与触头温度关系的研究主要分为解析法和有限元分析法。解析法物理概念清晰,但未考虑电导率温度效应、热量沿轴向传递等问题,现在很少应用于 GIS 的温度场计算中。近年来研究者们大多采用三维有限元法计算 GIS 温度场。文献[4-5]建立仿真模型并结合温升试验,计算分析 GIS 温度分布特性,但以上研究均未考虑外界环境因素对其温度场的影响;文献[6]通过仿真获得相关因素对温度分布的具体影响,但未获得触头温度与外壳温度间的具体关系;文献[7]基于 GIS 温升实验数据,用反向传播(back propagation, BP)神经网络算法以环境温度、多点外壳温度作为监测量预测触头温度,但该方法考虑的因素尚不够全面;文献[8]计算触头温升与外壳温升之间的比例关

系,但未考虑环境因素,如辐射强度、风速等因素对二者关系的影响;文献[9]给出以环境温度、风速和外壳温度为监测量的触头温度预测公式,但其忽略的 SF₆压强、负荷电流等因素对触头温升预测有显著影响。综上所述,现有研究在触头温度预测方面展开了大量工作,虽然也获得了触头温度预测方法,但未全面考虑各种因素对预测准确性的影响,限制了这些方法的应用。

为获得一种综合考虑多种因素的 GIS 触头温升预测方法,文中通过建模研究了接触电阻阻值、负荷电流、环境温度、风速、SF₆压强、太阳辐射强度对 GIS 外壳及触头温度的影响并结合热路图进行了验证,在此基础上分析得到对预测效果影响显著的 5 个特征量。文中利用 BP 神经网络,以 5 种特征量作为输入变量预测触头温升,反复尝试后得到一种最佳的网络结构,并提出了一种基于多特征量的 GIS 触头温升预测方法。

1 多物理场耦合模型

1.1 电磁场数学模型

为准确计算损耗发热量^[10-12],假设:

(1) 低频条件下,不计位移电流对发热量计算的影响;

(2) 只考虑电流沿导体轴向流动。

据此,列写电流密度的控制方程,即式(1)一式(4),其中式(1)、式(2)为外壳及屏蔽罩内电流密

收稿日期:2023-08-17;修回日期:2023-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62171185,62273146)

度的控制方程,式(3)为导体内部电流密度的控制方程,式(4)为总电流密度方程。

$$j\omega\sigma\mathbf{A} + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla(\mu^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \nabla\varphi = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (-\mathbf{J}_e \omega\sigma\mathbf{A} - \sigma \nabla\varphi) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla(\mu^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_z = -j\omega\sigma\mathbf{A} + \mathbf{J}_e \quad (4)$$

式中: μ 为材料磁导率; σ 为材料的电导率; ω 为电流角频率; φ 为标量电位; \mathbf{J}_z 为总电流密度; \mathbf{A} 为磁矢势; \mathbf{J}_e 为源电流密度。

1.2 流体场-温度场数学模型

为简化模型计算,假设^[13]:

(1) 以外外部辐射源输入矢量表示直射到外壳表面的太阳辐射条件;

(2) 以入口边界气体流速矢量表示风速条件;

(3) 流体计算中,空气和 SF₆均采用层流模型;

(4) 模型中的固体材料物理参数选择为常数,流体的自然对流传热满足 Boussinesq 近似, SF₆的密度满足理想状态气体密度公式。

基于上面的简化,得到如下控制方程。

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_h \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + C \nabla \mathbf{u} + C(\nabla \mathbf{u})^T) + \mathbf{S} \quad (7)$$

式中: ρ 为材料密度; c_p 为材料比热容; \mathbf{u} 为速度矢量; k 为材料导热系数; Q_h 为通过电磁场计算所得到的导体、屏蔽罩和外壳中损耗的体积热源; p 为气体压强; \mathbf{I} 为单位矩阵; C 为气体动力粘度; \mathbf{S} 为源项。

为方便考虑环境因素对 GIS 温度场的影响,文中模型采用多重边界条件^[7]。

(1) 温度边界条件。

$$T|_{\text{空气域边界}} = T_0 \quad (8)$$

式中: T_0 为环境温度。

(2) 辐射边界条件。

GIS 内部面-面辐射边界如式(9)和式(10)所示, GIS 外壳外部与太阳辐射边界如式(11)和式(12)所示。

$$q_r|_{\text{导杆外边,外壳内边}} = \varepsilon_1(G - \sigma T^4) \quad (9)$$

$$J|_{\text{导杆外边,外壳内边}} = (1 - \varepsilon_1)G + \varepsilon_1\sigma T^4 \quad (10)$$

$$q_r|_{\text{外壳外边}} = \varepsilon_2(G_{\text{ext}} - k_0 T^4) \quad (11)$$

$$G_{\text{ext}} = q_{0,s} \quad (12)$$

式中: k_0 为斯忒藩-玻耳兹曼常数; ε_1 、 ε_2 分别为 GIS 内表面与外壳外表面发射率; q_r 为表面流入 r 向辐射换热总热通量大小; J 为流出辐射换热总热通量大小; G 为表面直射热通量大小; G_{ext} 为太阳直射外

壳表面热通量大小; $q_{0,s}$ 为外部辐射源热通量大小。

(3) 风速边界条件。

入口风速边界如式(13)所示。

$$\mathbf{u}|_{\text{入口}} = -v_0 \mathbf{n} \quad (13)$$

出口压力边界如式(14)所示。

$$p|_{\text{出口}} = p_0 \quad (14)$$

式中: v_0 为入口处气流速度; \mathbf{n} 为方向法线; p_0 为出口处静压。

1.3 物理模型

以 252 kV 三相分箱型 GIS 隔离开关为原型建立仿真模型。为便于模型的建立与计算,作以下简化:(1) 由于内部小部件对设备温度分布的影响很小,将其简化;(2) 隔离开关上方操作机构箱和底部支撑支架对 GIS 导体的散热影响不大,将其简化。

简化后,在 COMSOL Multiphysics 中建立三维几何模型^[14],其几何结构和具体尺寸参数如图 1 和表 1 所示^[6]。

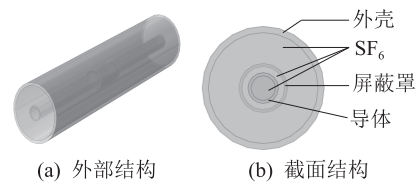


图 1 GIS 三维几何模型

Fig.1 GIS three-dimensional geometric model

表 1 252 kV 三相分箱型 GIS 母线模型数值计算尺寸参数

Table 1 Size parameters of 252 kV three-phase box-divided GIS bus model calculated numerically

参数	数值	参数	数值
外壳内径/mm	180	触头长度/mm	300
外壳外径/mm	200	屏蔽罩内径/mm	70
导杆内径/mm	40	屏蔽罩外径/mm	80
导杆外径/mm	50	模型总长度/mm	1 000

为验证模型的可靠性,与某 252 kV 的 GIS 实验平台^[15]的实测数据对比验证。该实验中负荷电流为 3 kA,环境温度为 20 °C, SF₆压强为 0.5 MPa,实测数据与仿真数据对比如表 2,可得到实测数据与仿真数据基本一致,仿真模型本身的误差在 1.8 °C 以内,因此模型建立基本合理。

表 2 实测数据与仿真数据对比

Table 2 Comparison of measured and simulated data

触头接触电阻值/ $\mu\Omega$	试验壳体最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	仿真计算壳体最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	试验触头最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	仿真计算触头最高温度/ $^{\circ}\text{C}$
25	30	29.02	50	48.88
50	45	43.24	70	68.63
75	60	58.29	105	103.67
100	70	68.21	155	153.78

2 GIS 温度场的影响因素分析

运行工况及外界因素对 GIS 温度场的影响,可以借助 GIS 热路模型来辅助验证。热路模型是一种基于热平衡原理的解析法,通过分析 GIS 内部传热特性,得到其内部温度分布及其触头与外壳温度间的定量关系。GIS 单相母线的结构是内部轴线上装有圆形空心导体,外壳是金属圆筒,夹层为 SF₆ 气体。只考虑单位长度的热平衡关系,忽略轴向传热。图 2 为其简化热路图^[3]。

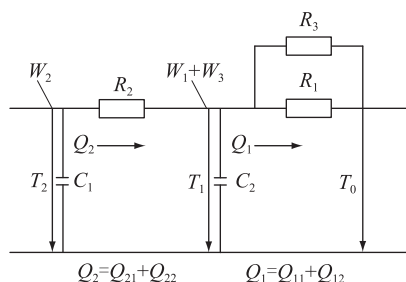


图 2 GIS 热路图

Fig.2 Heat circuit model of GIS

图 2 中, T₁、T₂ 分别为外壳、触头的温度; R₁、R₂ 和 R₃ 分别为外壳辐射散热与对流散热、导体对外壳热辐射与热对流散热和风吹时外壳散热的热阻; C₁、C₂ 分别为外壳及导体的热容; W₁ 为外壳中涡流损耗; W₂ 为导体的电能损失; W₃ 为太阳辐射吸收的热量; Q₁₁ 为外壳对周围空气环境的辐射换热; Q₂₁ 为气体夹层的辐射换热; Q₁₂ 为外壳对周围环境的对流散热; Q₂₂ 为气体夹层的对流散热。在额定工况发热的计算中, W₃ = 0, R₃ 为无限大, 忽略 C₁ 以及 C₂ 的影响。

根据图 2, 可以列出 GIS 热路关系式。式 (15) 和式 (16) 为外壳与触头温度的计算公式。式 (17) 为导体电能损失的计算公式。由式 (15) 一式 (17) 可得式 (18), 即外壳温度与触头温度间的关系。

$$T_1 = T_0 + (W_1 + W_3) \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} W_2 \quad (15)$$

$$T_2 = T_0 + (W_1 + W_3) \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \left(\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2 \right) W_2 \quad (16)$$

$$W_2 = I^2 K R_0 \quad (17)$$

$$T_2 = T_1 + W_2 R_2 \quad (18)$$

式中: K 为导体集肤系数; R₀ 为单位长度接触电阻阻值; I 为负荷电流。

由式 (18) 可知, 触头温度与外壳温度大致成线

性关系, 说明通过外壳温度来推算触头温度是可行的。

热路计算式虽然能够定性分析各个影响因素对 GIS 外壳及触头间的关系, 但公式中的各个参数同外界环境因素之间的数量关系没有具体对应的公式。例如表征导体对外壳热辐射与热对流散热的热阻 R₂ 与气体压力、导体接触面积、周围温度等有直接关系^[16], 但是并没有具体的关系式来表示其与各参量的定量关系。因此有必要采用建模的方式来定量分析^[17]。

2.1 接触电阻阻值

由于触指与导体间常发生接触, 故存在接触电阻, 正常情况下为 5 ~ 10 μΩ^[18]。将接触电阻等效为串联在触头与导杆之间的电阻, 在触头与导杆接触部位设置一段长度为 30 mm、电阻率可变的导体模拟热故障, 热故障越严重, 电阻率越大。

接触电阻阻值变化范围在 0 ~ 100 μΩ, 步长为 5 μΩ, 其他参数按照额定工况设置, 具体见表 3^[19]。仿真得到不同接触电阻阻值下的温升数据, 触头与外壳温升随接触电阻的变化如图 3 所示。触头与外壳温升跟接触电阻阻值近似成正比, 但触头温升的变化速度远大于外壳温升。根据式 (15) 和式 (16) 可知, T₁ 与 T₂ 均与 R 成线性关系, 且 T₂ 的变化率更大, 该规律与建模结果吻合。

表 3 额定工况运行物理参数设置

Table 3 Setting of physical parameters for rated operating conditions

物理参数	数值	物理参数	数值
额定电流/A	3 150	风速/(m·s ⁻¹)	0
环境温度/°C	20	太阳辐射强度/(W·m ⁻²)	0
SF ₆ 压强/MPa	0.5	接触电阻阻值/Ω	0

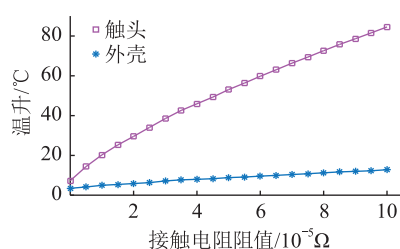


图 3 接触电阻变化时, 触头温升与外壳温升的变化

Fig.3 The contact temperature and the shell temperature rise with the increasing value of the contact resistance

2.2 负荷电流

GIS 运行时的热量主要来自导体通入电流时产生的焦耳热与涡流损耗, 因此触头和外壳温升与负荷电流有必然联系。

负荷电流变化范围为 1 000~3 150 A,步长为 500 A,其他参数见表 3。由式(15)和式(16)可知,负荷电流 I 变化时, T_1 和 T_2 与 I 成平方关系,且 T_2 的二次项系数大于 T_1 。图 4 给出了触头和外壳温升随负荷电流的变化。由图 4 可知,随着负荷电流的增加,外壳及触头温升与负荷电流成非线性关系,且触头温升增长幅度明显大于外壳温升,这与由热路公式得出的结论相符。

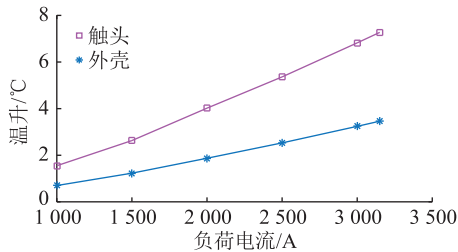


图 4 负荷电流变化时,触头温升与外壳温升的变化

Fig.4 The contact temperature rise and the shell temperature rise with the increasing value of the load current

2.3 环境温度

由于 GIS 所处的环境温度时刻变化,因此有必要研究环境温度对其温度场的影响。

环境温度变化范围为 $-10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,步长为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,其他参数见表 3。图 5 为触头和外壳温升随环境温度的变化情况。由图可得,随着环境温度增加,触头和外壳温升也随之增加,且二者之差基本保持不变,且在正常温度取值范围内,外壳与触头温升变化在 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内。由式(15)和式(16)可知,只有 T_0 发生改变,其余部分均不改变, T_1 与 T_2 随之变化。这表明环境温度对二者温升影响不大,与图 5 的仿真结果一致。

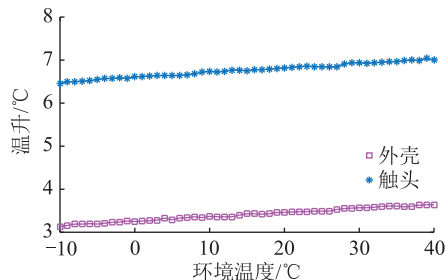


图 5 环境温度变化时,触头温升与外壳温升的变化

Fig.5 The change of contact temperature rise and shell temperature rise with the increasing value of the ambient temperature

2.4 风速

外界风速可加快 GIS 表面散热,改变其外表面对流换热系数,从而对其温度场产生影响。

通过调整入口气体流速矢量模拟不同风速条件对 GIS 的散热影响。当风速小于 1 m/s 时,步长

为 0.2 m/s ;当风速大于 1 m/s 时,步长为 1 m/s ,最大至 30 m/s ,其他参数见表 3。图 6 为风速变化时,触头与外壳温升的变化情况。当风速小于 1 m/s 时,触头及外壳温降低速度快;风速大于 1 m/s 时,触头及外壳温升以缓慢速度减小直至外壳温度接近环境温度。其原因可用式(15)和式(16)进行解释,当风速越来越大时, R_3 从无穷大变为 0,其余参数不变, T_1 逐渐下降至与环境温度接近, T_2 与 T_1 变化趋势一致。因此风速对 GIS 散热有一定效果,但随着风速增加,散热效果会逐渐趋于饱和。

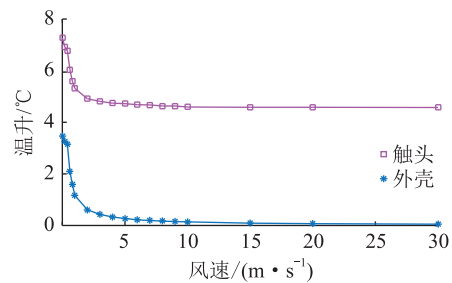


图 6 风速变化时,触头温升与外壳温升变化

Fig.6 The contact temperature rise and the shell temperature rise with the increasing value of the wind speed

2.5 SF₆压强

GIS 长时间运行会发生气体泄露现象,气压会逐步降低^[20]。

设置 SF₆气压变化范围为 $0.3\sim 0.6\text{ MPa}$,步长为 0.1 MPa ,其他参数见表 3。仿真得到的触头与外壳温升随 SF₆压强的变化如图 7 所示。

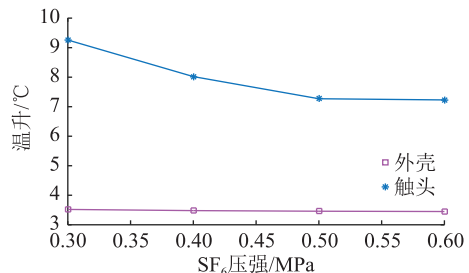


图 7 SF₆压强变化时,触头温升与外壳温升变化

Fig.7 The contact temperature rise and shell temperature rise with the increasing value of the SF₆ pressure

由图 7 看出,随着气压的增加,SF₆气体的散热能力增强,触头温升下降速度先快后慢,当气压增至 0.5 MPa 时导体温度降低趋势变缓,散热效果趋于饱和,但外壳温升始终不发生变化,因此 GIS 的 SF₆压强普遍在 $0.4\sim 0.5\text{ MPa}$ 范围内^[21]。根据式(15)和式(16)可知, R_2 随 SF₆压强变化而改变,但式(15)中的参数均不发生改变,因此外壳温升不会随着 SF₆压强改变,但 T_2 与 T_1 之间的关系会随着 R_2 的变化发生改变,与仿真结果相符。

2.6 太阳辐射强度

太阳辐射强度随着海拔高度、天气状况、地面经纬度的不同存在显著差异,会对室外 GIS 温度场产生影响^[22]。

通过改变外部无限远辐射源模拟实际太阳辐射条件^[22]。设太阳光垂直照射在 GIS 上表面,辐射强度变化范围在 0~1 000 W/m²,100 W/m²为步长,其他参数见表 3,得到触头温升与外壳温升随太阳辐射强度的变化如图 8 所示。

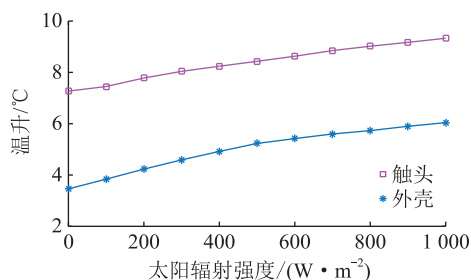


图 8 太阳辐射强度变化时,触头温升与外壳温升的变化

Fig.8 The shell temperature rise and contact temperature rise with the increasing value of the solar radiation intensity

由图 8 可知,随着太阳辐射强度的增加,触头与外壳温升随之增加,且二者温升幅值大致相同^[4]。其原因可用热路理论来解释,当太阳辐射强度 W_3 变化时,式(15)和式(16)的第二项发生改变,其余部分不变, T_1 随着第二项的变化而改变, T_2 随着 T_1 的变化而改变,因此 T_1 与 T_2 变化程度基本一致。

3 特征量筛选

经上述分析,触头与外壳的温度关系受各种因素^[23]的影响,很难得到固定的公式。在预测触头温度时,要引入对用外壳温升预测触头温升的准确性影响更大的因素,作为特征量来提高触头温度的预测准确性。

为解决接触电阻阻值监测不便的问题,可用便于监测的外壳温升代替接触电阻阻值作为预测触头温升的特征量。为尽可能减少特征量的数目,减少传感器的投资,应对负荷电流、环境温度、风速、SF₆压强、太阳辐射强度这 5 种影响因素进行筛选。通过改变接触电阻阻值增大温升跨度,得到的结果更直观。图 9 为不同因素变化下,外壳与触头温升之间的关系。由图 9(a)、(c)、(d)、(e)可知,当负荷电流、风速、SF₆压强、太阳辐射强度不同时,不同的外壳温升对应着不同的触头温升,说明若利用外壳温升预测触头温升,应充分考虑这些因素的数值才能得到更准确结果。由图 9(b)可知,当环境温度

不同时,外壳与触头温升之间的关系曲线基本重合,可以忽略环境温度对二者关系的影响。

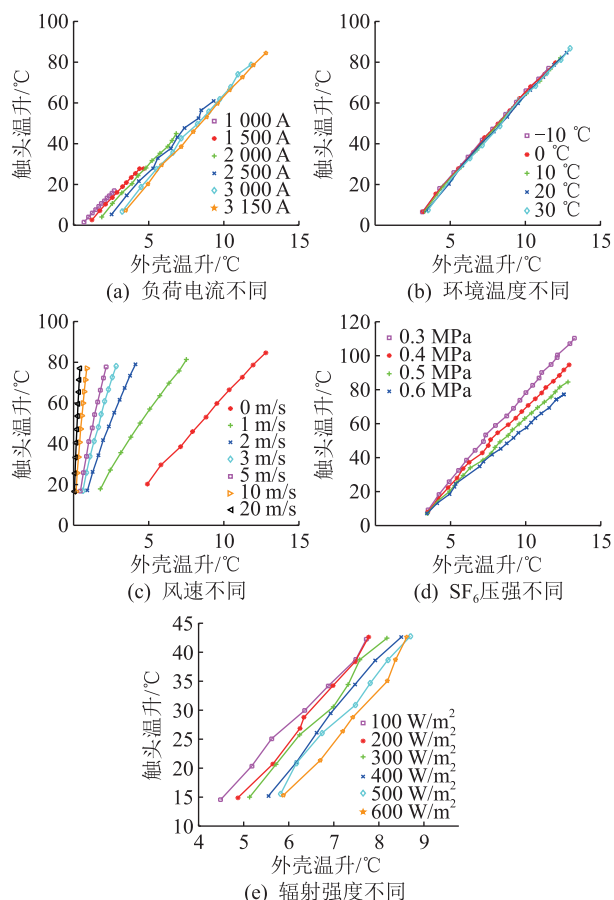


图 9 不同影响因素下,触头温升与外壳温升间的关系

Fig.9 The relationship between contact temperature rise and shell temperature rise under different factors

4 基于 BP 神经网络的 GIS 触头温度预测

GIS 触头温升的影响因素较多且作用机理复杂,难以利用物理模型或固定公式描述触头温度与多个特征量之间的关系。而 BP 神经网络算法^[24]能够用于多影响因素、不精确和模糊的信息处理,具有强非线性映射能力和柔性的网络结构,以解决输入量适中的数据预测问题。因此可采用 BP 神经网络算法建立各特征量与触头温升之间的映射关系。

利用仿真得到 6 种影响因素不同的 390 组样本,仿真参数取值范围如表 4 所示。文中将 390 组数据作为样本训练 BP 神经网络,BP 神经网络由输入层、隐层和输出层 3 层组成。在确定外壳温升、负荷电流、风速、SF₆压强、太阳辐射强度 5 个特征量作为输入量预测触头温升后,只考虑这 5 个因素对输出量触头温升的影响,故输入层节点数为 5,输出层节点数为 1。隐层节点数设置为 5~15,步长为 1,经测试,发现隐层节点数为 10,具有最高准确性。采

用基于 Levenberg-Marquardt 算法的贝叶斯正则化训练,log-sigmoid 作为隐层激励函数,linear 作为输出层激励函数时,结果误差最小,共迭代 423 次。针对训练样本,该网络的绝对误差在 $-0.664 \sim 0.536$ °C 范围内,标准方差值为 0.226 °C,误差幅值均值为 0.261 °C,说明预测效果较为理想。所以仅利用 5 个特征量来预测 GIS 触头温升是可行的。

表 4 仿真参数取值范围

Table 4 The range of simulation parameters

影响因素	取值范围	影响因素	取值范围
接触电阻/ $\mu\Omega$	0~100	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0~30
负荷电流/A	1 000~3 150	SF ₆ 压强/MPa	0.3~0.7
环境温度/°C	-10~40	太阳辐射强度/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	0~1 000

为验证该网络的拟合效果,将建模得到的另外 1 300 组不同接触电阻、负荷电流、风速、SF₆压强、太阳辐射强度下的结果作为测试样本数据,部分测试样本数据和采用 BP 神经网络预测结果的对比如图 10,训练集、测试集的网络训练回归分析结果如图 11 所示,预测误差如图 12 所示。

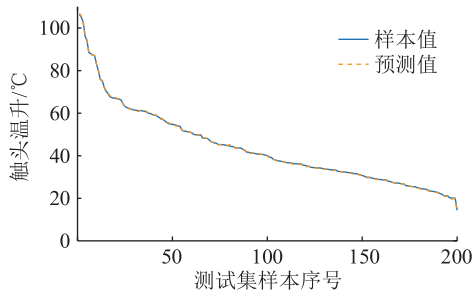


图 10 测试集样本和采用 BP 神经网络预测数据对比曲线

Fig.10 Test set sample data and BP neural network prediction data contrast curves

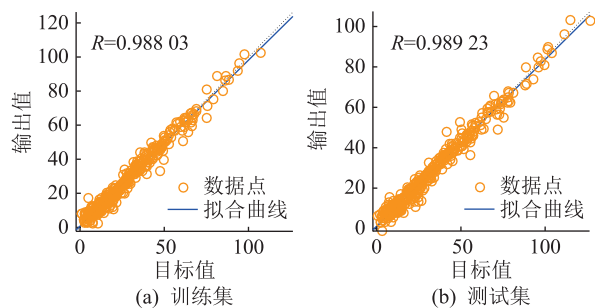


图 11 训练集与测试集的网络训练回归分析结果

Fig.11 Network training regression analysis results of training set and test set

由图 10 可知,由该网络预测得到结果的变化趋势与期望值一致且二者差距很小。由图 11 可知,该网络预测的训练集与测试集的复相关系数 R 接近 1,即网络输出值与目标值的线性度很高,说明预测

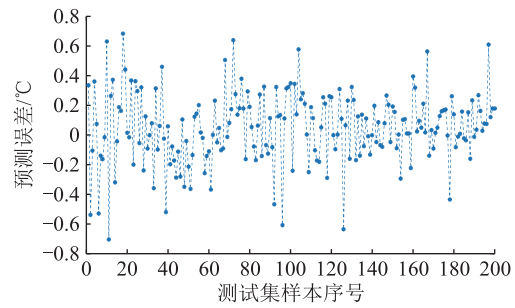


图 12 BP 神经网络预测误差

Fig.12 Error of BP neural network prediction

效果较好。由图 12 可知,由 BP 神经网络预测得到的结果,其绝对误差范围为 $-0.70 \sim 0.68$ °C;预测的均方根误差为 0.26 °C。综上,通过该 BP 神经网络算法可基于外壳温升、负荷电流、风速、SF₆压强与太阳辐射强度较为准确地预测触头温升。

5 结论

为了进一步提高 GIS 触头温升预测的准确性,建立了电磁-流体-温度场三维简化仿真模型,分析不同运行工况与环境因素对 GIS 触头温升预测的影响,并提出利用 BP 神经网络方法来预测触头温升结果,得出如下结论:

(1) 结合仿真结果与热路定律,确定外壳温升、负荷电流、风速、SF₆压强、太阳辐射强度 5 种特征量可以有效预测触头温升。

(2) 结构优化后的 BP 神经网络算法能够较为准确地利用多特征量预测 GIS 触头温升,与建模方法得到的仿真数据对比,绝对误差可控制在 $-0.70 \sim 0.68$ °C。

参考文献:

- [1] 霍思佳. GIS 设备隔离开关接触过热缺陷特征分析及检测技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
HUO Sijia. Characteristic analysis and detection technology research on contact overheating defect of GIS equipment disconnector[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [2] 吴旭涛,赵晋飞,马云龙,等. 基于多频激励下振动响应的 GIS 机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2022, 43(4):108-115.
WU Xutao,ZHAO Jinfei,MA Yunlong,et al. Mechanical defect diagnosis technology of gis based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2022,43(4):108-115.
- [3] 袁文海,刘彪,徐浩,等. 基于复合神经网络的 GIS 局放故障类型识别[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(4):157-164.
YUAN Wenhai,LIU Biao,XU Hao,et al. Partial discharge fault type identification of GIS based on composite neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,

- 36(4):157-164.
- [4] 李伟,谢文刚,宫瑞磊,等. 基于热电耦合方法的 800 kV GIS 隔离开关温度场仿真研究[J]. 高压电器,2020,56(7):44-49.
LI Wei,XIE Wengang,GONG Ruilei, et al. Simulation and research on temperature field of 800 kV GIS disconnector based on thermoelectric coupling method[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(7):44-49.
- [5] 金虎,彭在兴,王颂,等. 252 kV 三相共箱 GIS 母线壳体温度场分布特性研究[J]. 高压电器,2017,53(12):20-25.
JIN Hu,PENG Zaixing,WANG Song, et al. Research on temperature field distribution characteristics of 252 kV three-phase enclosed GIS bus bar shell[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(12):20-25.
- [6] 马波,吴旭涛,李秀广,等. GIS 温度场分布特性及影响因素的有限元仿真研究[J]. 绝缘材料,2019,52(3):69-73,79.
MA Bo,WU Xutao,LI Xiuguang, et al. Finite element simulation of temperature field distribution characteristics and influencing factors in GIS[J]. Insulating Materials,2019,52(3):69-73,79.
- [7] 陈强,李庆民,丛浩熹,等. 基于多点分布式光纤光栅的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术[J]. 电工技术学报,2015,30(12):298-306.
CHEN Qiang,LI Qingmin,CONG Haoxi, et al. On-line temperature monitoring for GIS disconnecting switch contacts based on multipoint-distributed fiber Bragg grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(12):298-306.
- [8] 周甜,李自品,沈泉宇,等. GIS 隔离开关触头温升多场耦合数值计算与分析[J]. 中国电力,2018,51(2):13-20.
ZHOU Tian,LI Zipin,SHEN Quanyu, et al. The numerical analysis on temperature rise multiphysics coupling of GIS disconnector contacts[J]. Electric Power,2018,51(2):13-20.
- [9] 吴旭涛,马波,李秀广,等. 基于有限元分析的不同电压等级 GIS 隔离开关温度场仿真研究[J]. 高压电器,2018,54(11):160-164,169.
WU Xutao,MA Bo,LI Xiuguang, et al. Simulation on temperature field of GIS disconnector at different voltage level based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(11):160-164,169.
- [10] 赵义松,宋成伟,邢凯,等. 高压 GIS 壳体环流及损耗计算模型研究[J]. 电力工程技术,2021,40(1):201-207.
ZHAO Yisong,SONG Chengwei,XING Kai, et al. Circulation and loss calculation model of high voltage GIS shell[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(1):201-207.
- [11] 马志强,赵艳涛,张垒,等. GIS 用 550 kV/8 000 A 大电流高压绝缘套管设计研究[J]. 电瓷避雷器,2022(3):201-208.
MA Zhiqiang,ZHAO Yantao,ZHANG Lei, et al. Design and research of 550 kV/8 000 A large current and high voltage insulating bushing for GIS[J]. Insulators and Surge Arresters,2022(3):201-208.
- [12] 许鹏飞,杨帆,刘刚,等. 110 kV 插拔式 GIS 电缆终端轴向传热分析[J]. 电力工程技术,2020,39(5):30-35.
XU Pengfei,YANG Fan,LIU Gang, et al. Assessment on axial heat transfer of 110 kV plug-in GIS cable terminal[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(5):30-35.
- [13] 纽春萍,矫璐璐,王小华,等. 基于多场耦合的环保型 GIS 热特性分析[J]. 电工技术学报,2020,35(17):3765-3772.
NIU Chunping,JIAO Lulu,WANG Xiaohua, et al. Thermal characteristics analysis of environmentally friendly GIS based on multi-field coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(17):3765-3772.
- [14] 徐志钮,李先锋,郭一帆,等. 基于温度滞后相位的输电线路覆冰监测方法[J]. 电力工程技术,2022,41(6):91-100.
XU Zhiniu,LI Xianfeng,GUO Yifan, et al. Icing monitoring method of transmission lines based on temperature lagging phase[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(6):91-100.
- [15] 戴伟伟,高凯,马利,等. 基于多物理场耦合的 GIS 温升异常状态评估研究[J]. 机电工程,2018,35(6):623-626.
DAI Weiwei,GAO Kai,MA Li, et al. Condition assessment of abnormal temperature rise of GIS based on multi-physics coupling[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2018,35(6):623-626.
- [16] 乔宇娇,唐泽华,高鹏,等. 不同环境因素下 GIL 温度场分布特性研究[J]. 电力工程技术,2020,39(3):136-143,150.
QIAO Yujiao,TANG Zehua,GAO Peng, et al. Distribution characteristics of GIL temperature field under different environmental factors[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(3):136-143,150.
- [17] 刘分,刘刚,秦晓宇,等. 等效热路在共箱隔离开关温升计算中的运用[J]. 高压电器,2020,56(8):211-216.
LIU Fen,LIU Gang,QIN Xiaoyu, et al. Application of equivalent thermal circuit in calculation of temperature rise of three-phase enclosed disconnector[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(8):211-216.
- [18] 黄孟丹,肖纯,杨芷宁,等. GIS 设备发热研究进展[J]. 高压电器,2020,56(12):24-33.
HUANG Mengdan,XIAO Chun,YANG Zhining, et al. Research progress of GIS equipment heating[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(12):24-33.
- [19] 王珂珂,李丽,王久阳,等. 基于混合绝缘气体的三相 GIS 母线温升多物理场耦合机制研究[J]. 高压电器,2021,57(4):69-75.
WANG Keke,LI Li,WANG Jiuyang, et al. Study on multi-physical field coupling mechanism of three-phase GIS bus temperature rise based on mixed insulating gas[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(4):69-75.
- [20] 徐亮,张高爽,龙艳,等. 特高压管廊 GIL 热特性的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(7):177-184.
XU Liang,ZHANG Gaoshuang,LONG Yan, et al. Numerical simulation of thermal characteristics of gas-insulated transmission lines in UHV pipe gallery[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2018,50(7):177-184.

- [21] 高克利,颜湘莲,王浩,等. 环保型气体绝缘输电线路(GIL)技术发展[J]. 高电压技术,2018,44(10):3105-3113.
GAO Keli, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Progress in environment-friendly gas-insulated transmission line (GIL) [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3105-3113.
- [22] 鲁旭臣,李爽,唐佳能,等. 550 kV GIS 内触头发热故障诊断方法与影响因素研究[J]. 高压电器,2021,57(11):220-226.
LU Xuchen, LI Shuang, TANG Jianeng, et al. Study on diagnosis method and influence factor of overheating of contacts in 550 kV GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 220-226.
- [23] 吴琛,苏明昕,谢云云,等. 基于 BP 神经网络的输电线路雷击故障预测[J]. 电力工程技术,2020,39(5):133-139.
WU Chen, SU Mingxin, XIE Yunyun, et al. BP neural network based lightning fault prediction of transmission lines [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 133-139.
- [24] 郭易鑫. 基于 EMTP 和 BP 神经网络的超高压电缆护套雷击感应电压研究[J]. 电瓷避雷器,2022(6):31-37.
GUO Yixin. Study on lightning induced voltage of ehv cable sheath based on EMPT and BP neural network [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 31-37.

作者简介:



刘昱轩

刘昱轩(1999),女,硕士在读,研究方向为光纤分布式传感及在电气设备状态监测与故障诊断中的应用(E-mail: 1172930408@qq.com);

徐志钊(1979),男,博士,教授,研究方向为光纤分布式传感及在电气设备状态监测与故障诊断中的应用;

胡伟涛(1977),男,硕士,高级工程师,从事电气试验、电气设备在线监测与故障诊断等相关工作。

GIS contact temperature prediction method based on multiple parameters

LIU Yuxuan¹, XU Zhiniu¹, HU Weitao², ZHAO Hanwu¹, ZHAO Lijuan¹, JIN Hu³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Hebei Extra High Voltage Company, Shijiazhuang 050070, China;

3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to prevent the faults caused by the overheating phenomena of gas insulated switchgear (GIS) contacts, it is necessary to monitor and predict the temperature of GIS contacts. In view of the problems that the temperature of contacts is not easy to be directly measured and the temperature is easily affected by the operation conditions and external factors, a prediction method of GIS contact temperature based on multiple parameters is proposed in this work. The temperature distribution law of GIS under different influencing factors is investigated by employing a three-dimensional simulation model. The influencing factors are contact resistance, load current, ambient temperature, wind speed, SF₆ pressure and solar radiation intensity. The reliability of the model is validated by use of heat circuit model. The results indicate that the key factors to predict the contact temperature are the shell temperature rise, load current, wind speed, SF₆ pressure and solar radiation intensity. At the same time, the influence of ambient temperature can be ignored. Further, the back propagation (BP) neural network is adopted to predict the temperature rise of the contacts with the above factors. The predicted temperature rise is compared with the calculated one of the model, and the error is in the range of -0.70~0.68 °C. The method comprehensively takes into account the influence of various factors on the GIS temperature field, and it helps to give a reference for the temperature prediction of GIS contacts based on external sensors.

Keywords: gas insulated switchgear (GIS); multi-physics field coupling; finite element method; back propagation (BP) neural network; temperature prediction; heat circuit theory

(编辑 李栋)