

基于有限元和神经网络的电缆输送 新能源极限能力评估

魏文青, 淡淑恒

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 新能源发电的不确定性对传输系统的输送能力提出了很大挑战。由于输电电缆具有一定过载能力, 可在温度不超过限值的前提下短时过载运行, 提出充分利用电缆的过载水平短时内提高电缆对新能源发电的输送能力的一种方法。该方法首先采用有限元法计算电缆温度场分布, 确立线路允许过载运行时间并分析其影响因素, 然后引入改进 BP 神经网络算法, 结合实际发电出力曲线对过载时间进行预测。结果表明, 该 BP 神经网络模型具有较高精度, 可应用于评估电缆极限输送能力, 为调度决策提供快速支持。

关键词: 新能源发电; 有限元; BP 神经网络; 短时过载

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.022 中图分类号: TM726.4 文章编号: 1673-9140(2023)01-0191-10

Evaluation of ultimate capacity of cable transmission new energy based on finite element and neural network

WEI Wenqing, DAN Shuheng

(Electric Power Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The uncertainty of new energy power generation poses a great challenge to the transmission system. Since the transmission cable has a certain overload capacity, it can be overloaded for a short time under the premise that the temperature does not exceed the limit value. A method of making full use of the overload level of the cable is proposed to improve the transmission capacity of the cable to new energy power generation in a short time. This method firstly uses the finite element method to calculate the cable temperature field distribution, establishes the allowable overload running time of the line and analyzes its influencing factors. Then the improved BP neural network algorithm is introduced to predict the overload time in combination with the actual power generation output curve. The results show that the BP neural network model has high accuracy and can be applied to evaluate the cable limit transmission capacity and provide rapid support for dispatching decisions.

Key words: new energy power generation; finite element; BP neural network; short-term overload

新能源发电降低了化石燃料的消耗, 具有较高
的环境友好性, 对于解决污染、资源短缺问题具有
重要意义。然而, 新能源发电具有高度不确定性和
间歇性。例如, 风力发电受气象因素影响, 导致发

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(50577040)

通信作者: 淡淑恒(1969—), 女, 博士, 教授, 主要从事电气设备与系统的相互影响研究; E-mail: danshuheng@shiep.edu.cn

电量不稳定,而线路负载也会出现极大波动^[1]。加之,送出通道的建设滞后于发电量的快速增长,给电能的传输系统带来了一定挑战。研究表明,输电线路的热稳定极限容量是制约新能源发电送出的瓶颈^[2]。因此,缓解新能源发电送出矛盾问题时,可将更多注意力转移到现有电缆输送潜力的挖掘上。

输电电缆设计时,需要以确保线路热运行的安全性为原则,确定载流量,即在电缆绝缘耐热温度的约束条件下计算导体允许的最高运行电流^[3-4]。载流量的确定需要考虑最恶劣的环境条件,其值通常较为保守。现有输电线路的过负荷保护通常按照线路额定载流量确定保护门槛值,一旦过载就会触发切机操作^[5]。由于新能源并网时电量随机波动较大,会引起馈线中的潮流发生变化,产生较大的冲击电流,造成电缆线路短时间过载。此外,当发生故障或部分线路退出运行时,健全送出线路在短时间内需承受相当大的潮流转移过负荷,而电缆线路过载情况比常规输电线路更加严重。实际上,由于电缆温度响应滞后于负荷的变化,过载发生时电缆温度尚未超越限值,因此线路存在一定备用容量,可以实现短时间内电能的持续外送,提高输电通道的输送功率。因此,研究电缆的极限传输能力可以为线路过载时的热保护动作提供时间依据,也可以为电力部门紧急调度和故障处理提供支持。

目前已有学者对电缆过载水平做出总结^[6],但其分析过程中允许电缆发生短时温升越限,无法完全避免过热对电缆绝缘寿命的影响,且大多工作在试验基础上展开^[7-10],制约条件较多,结果难以满足实际工程需求。

在此基础上,本文提出充分利用电缆的过载水平,以提高线路对新能源发电的输送能力。在确保缆芯温度不超过限值的前提下,允许电缆短时过载以提升输送功率。首先,基于传热学原理,采用有限元分析软件COMSOL搭建电缆温度场模型,计算电缆线路允许过载时间,并分析其影响因素。再选取影响较明显的因素作为输入变量构建神经网络模型,结合新能源发电实际出力曲线,计算电缆过载时的极限传输能力,为调度决策提供快速支持。

1 电缆发热机理

电缆的极限传输能力由其温升曲线确定,因此研究需要在分析电缆温度场的基础上进行。在没有外部热源的前提下,整个电缆系统温度场域内仅有电缆本体存在内热源,并且有内热源生成热量之和等于输出总热流量与内能增加之和。运行中的电缆内热源来自于各部分产生的损耗:导体损耗、介质损耗、金属护套损耗。电缆本体的热运动可以归结为三项热源的热传导过程。

1.1 导体焦耳热

电缆输送交流电时,趋肤效应使得内部电流分布不均,增大了导体的有效电阻,同时相邻敷设的电缆导体电阻值会因邻近效应而增大,此时的导体电阻称为交流电阻。交流电阻的存在增加了导体的焦耳热损耗,损耗可根据下式直接计算:

$$P_c = I_c^2 R_a \quad (1)$$

式中, I_c 为通载电流, R_a 为最高工作温度下单位长度缆芯导体交流电阻,其计算公式为

$$R_a = R_d (1 + Y_s + Y_p) \quad (2)$$

式中, R_d 为最高工作温度下单位长度缆芯导体直流电阻; Y_s 为趋肤效应系数,与导线类型相关; Y_p 为邻近效应系数,与电缆外径、轴间距相关^[11]。

1.2 介质损耗

交变电压使得电缆绝缘层中发生介质极化,产生能量损耗。对超高压电缆而言,介质损耗是影响绝缘寿命的重要因素。介质损耗的大小与电压有关,其值可计算如下:

$$P_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (3)$$

式中, ω 为电源角频率; C 为电缆单位长度电容; U_0 为相电压; $\tan \delta$ 为介质绝缘损耗因数,取0.001, $\tan \delta$ 越大,绝缘层中的有功损耗越大。

1.3 金属护套损耗

缆芯导体的通载电流产生交变磁场,在金属护套内引起涡流。而且,当金属护套双端接地时会与大地形成回路产生环流,两者共同构成金属护套的热损耗,其值可用于导体损耗的占比表示。热损耗值为

$$P_s = (\lambda_1 + \lambda_2) P_c \quad (4)$$

式中, λ_1 、 λ_2 分别为金属护套涡流、环流损耗与导体焦耳热损耗的比值, 计算公式在 IEC 60287 标准中已给出, 其大小受接地方式影响极大。为避免在非接地端产生感应电压, 高压电缆设施金属护套通常采用交叉互联方式接地^[12], 该接地方式下仅需考虑涡流损耗, $\lambda_2=0$ 。

2 温度场有限元模型

2.1 方程及边界条件

采用有限元分析软件 COMSOL 搭建 YJLW02 127/220 kV 1×1 200 型三相一字敷设电缆温度场计算模型。电缆物性参数定义如表 1 所示, 敷设条件为埋深 1.0 m, 间距 0.25 m。

表 1 电缆物性参数

Table 1 Physical parameters of the cable

| 结构 | 参数 | 单位 | 取值 |
|------|------------|-----------------|---------|
| 导体 | 材料(Cu) | — | — |
| | 标称截面 | mm ² | 1 200 |
| | 直径 | mm | 42.1 |
| | 90 °C时交流电阻 | Ω/km | 0.023 3 |
| 绝缘层 | 材料(XLPE) | — | — |
| | 厚度 | mm | 24 |
| 金属护套 | 材料(Al) | — | — |
| | 厚度 | mm | 2.6 |
| 外护层 | 材料(PE) | — | — |
| | 厚度 | mm | 4.7 |
| | 电缆近似外径 | mm | 128.9 |

土壤直埋电缆系统首要的热能转移方式是电缆本体及土壤的热传导, 其次是土壤表层与外部空气的自然对流。由于电缆线路长度相较于其横截面近似于无穷大, 因此只需考虑径向传热, 并通过开域二维场处理温度场计算问题。处于该场域内的所有微元体, 在任一时刻均满足如下控制方程:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + W \quad (5)$$

式中, ρ 为介质密度; C 为热容系数; T 为某一时刻温度; k 为介质热导率; W 为电缆热源。

忽略电缆材料热性参数对温度的响应, 且当系统未达到热稳定状态时, 方程(5)可简化为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + W \quad (6)$$

为获得式(6)的解, 需要给出表征该问题的边界条件, 将开域温度场转化为闭域进行分析。依据传热学原理, 深层土壤的温度不随电缆发热而变化^[13], 取深度 3.0 m 处土壤恒定温度 25 °C, 以热力学第 1 类边界条件形式给出; 左右两侧远离电缆的土壤不受电缆发热影响, 将距离外侧电缆 1.5 m 处的边界视为绝热面, 设置法向热流密度为 0, 以第 2 类边界条件形式给出; 地表与空气自然对流换热, 空气温度为 40 °C, 对流换热系数为 8 W/(m²·K), 以第 3 类边界条件形式给出。三类边界条件如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \\ T(x, y)|_r = f(x, y)|_r \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \\ k \frac{\partial T}{\partial n}|_r + q = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial n}|_r = \alpha(T - T_f)|_r \end{cases} \quad (9)$$

式(7)~(9)中, k 为介质热导率; q 为热流密度; α 为对流换热系数; T_f 为流体温度; Γ 为积分边界。

选择 COMSOL 中的固体传热模块, 实现电缆温度场建模, 参考式(1)~(4)计算电缆各部分损耗并作为热源施加在模型相应区域中, 设置三类边界条件, 对温度场控制方程进行求解。模型空间域的划分选择有限单元网格, 电缆本体及其附近土壤温度梯度较大, 采用密集网格进行划分, 其他区域可采用稀疏网格划分, 如图 1 所示。

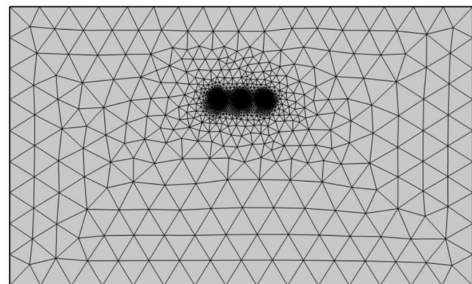


图 1 电缆系统网格划分

Figure 1 Grid division diagram of cable system

2.2 额定载流量的计算

当通载电流大小为 1 280 A 时,中间相电缆缆芯、绝缘层、金属护套、外护层温度分别为 89.53、81.40、76.39、74.35 °C,缆芯导体温度已接近绝缘材料 XLPE 所允许的最高工作温度 90 °C。因此,以 1 280 A 作为有限元法计算所得额定载流量。同时,分别参考热路法^[14]及某品牌电缆手册计算得同种型号电缆在相同敷设、接地方式下的载流量,计算过程中电缆工作环境条件均保持一致,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,有限元法与热路法所得载流量误差为 4.6%,计算结果较为准确。电缆手册由于考虑到实际运行中存在的不同情况,载流量取值较为保守,与有限元法结果相比留有 5.9% 的裕度。

表 2 载流量计算结果对比

Table 2 Comparison of current-carrying capacity calculation results

| 不同方法载流量 | | |
|---------|-------|-------|
| 有限元法 | 热路法 | 电缆手册 |
| 1 280 | 1 220 | 1 208 |

3 短时过载的初步分析

新能源出力具有强波动性和间歇性,线路负荷电流也会随出力变化产生极大波动。在分析过程中,通常将一日负荷按时间划分为若干区段,以每个区段的平均输出值作为负荷曲线^[15],并用阶跃函数模拟负荷的变化趋势。假设电缆初始运行在欠负荷状态,某一时刻发生过载,负荷骤升至超过额定载流量,分析此刻电缆温升过程并确定允许过载时间,如图 2 所示。

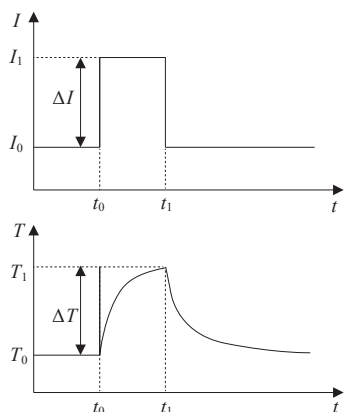


图 2 电缆短时过载温升

Figure 2 Temperature rise of short-term overload of the cable

电缆在初始负载电流 I_0 下,到达热稳定状态,导体温度为 T_0 。 t_0 时刻,线路通载大小为 ΔI 的过负荷,由于电缆各层结构分布热容的存在^[16],其温度并非跟随负荷发生阶跃变化,而是经历一个类似复合指数形式的暂态响应过程。 t_1 时刻,电缆温度仍处于暂态过程,但导体温度已经达到最高允许工作温度 T_1 ,此刻若持续过负荷运行会增加绝缘过热击穿的概率,因此立即撤去额外负荷,导体温度也随之缓慢下降。由图 2 可知,电缆允许过载运行的时长取决于 T_0 及 ΔI 。为进一步评估运行中电缆的过载能力,本文在搭建有限元温度场计算模型的基础上,计算不同负荷变化情况及不同敷设环境下的电缆允许过载时间,以此得出一般规律。

4 过载时间影响因素

由于三相一字型敷设电缆中间相散热条件最差,其运行温度略高于其他两相,因此以中间相缆芯温度为基准确定允许过载时间。试验电力电缆额定载流量 I_N 为 1 280 A,负荷变化情况均采用额定载流量的标幺值表示。

4.1 初始负荷及过负荷

初始负荷决定了电缆的初始温度场分布。假设电缆运行状态为欠负荷,以 $(0.4\sim 0.8)I_N$ 作为初始负荷,记录到达稳态后电缆各层的温度分布,如表 3 所示。在此基础上,使线路额外承担大小为 $(1\sim 1.5)I_N$ 的过负荷,记录缆芯温度到达 90 °C 所用时间作为允许过载时间,并绘制三维曲面图,如表 4、图 3 所示。

表 3 电缆初始温度分布

Table 3 Cable initial temperature distribution

| 初始负荷 | 电缆各层温度/°C | | | |
|----------|-----------|-------|-------|-------|
| | 缆芯 | 绝缘层 | 金属护套 | 外护层 |
| $0.4I_N$ | 45.80 | 44.24 | 43.22 | 42.71 |
| $0.5I_N$ | 51.08 | 48.73 | 47.23 | 46.53 |
| $0.6I_N$ | 57.30 | 54.01 | 51.94 | 51.02 |
| $0.7I_N$ | 64.35 | 60.00 | 57.29 | 56.12 |
| $0.8I_N$ | 72.13 | 66.61 | 63.19 | 61.75 |

表 4 电缆允许过载时间

Table 4 Cable allowable overload time

| 初始负荷 | 不同过负荷下的过载时间/h | | | | | |
|----------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | I_N | $1.1I_N$ | $1.2I_N$ | $1.3I_N$ | $1.4I_N$ | $1.5I_N$ |
| $0.4I_N$ | 16.20 | 8.20 | 4.60 | 3.00 | 2.20 | 1.70 |
| $0.5I_N$ | 5.87 | 3.40 | 2.30 | 1.70 | 1.33 | 1.10 |
| $0.6I_N$ | 2.36 | 1.69 | 1.31 | 1.05 | 0.86 | 0.73 |
| $0.7I_N$ | 1.17 | 0.92 | 0.75 | 0.63 | 0.53 | 0.46 |
| $0.8I_N$ | 0.57 | 0.47 | 0.40 | 0.34 | 0.30 | 0.26 |

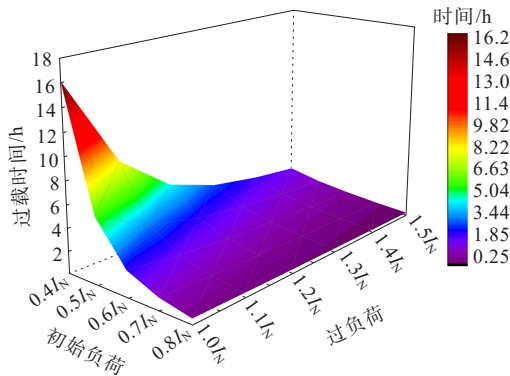


图 3 允许过载时间随负荷变化关系

Figure 3 Surface of allowable overload time versus load variation

由图 3 可知,当初始负荷确定时,随着过负荷的增大,电缆允许过载时间急剧减小;当面临相同过负荷时,随着初始负荷的增大,过载时间呈阶梯式递减,且变化率逐渐减小,这与电缆温度响应初期较快、随后变慢的规律相符合:由于初始负荷增大,电缆允许的温升裕度减小,负荷变化时,电缆在温度响应初期就能到达温升限值。因此,在允许过载时间不断减小时,时间的变化程度不再明显。

4.2 土壤热导率

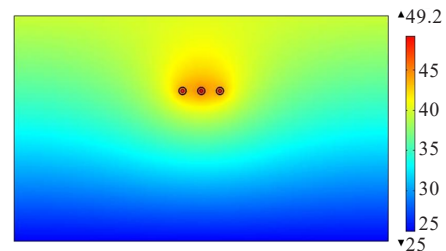
土壤是电缆热扩散途径中最主要的部分,热扩散在土壤中以热传导的形式进行。土壤热导率表征了土壤传导热量的能力,其值随含水率的增加呈单调线性递增^[17],经连续高温可降至 $0.5 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$,持续降水时可升至 $1.4 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ ^[18]。初始负荷 $0.5I_N$ 时,热导率不同的土壤中电缆各层温度分布如表 5 所示。

值得注意的是,通过对初始稳态温度场及缆芯温度接近允许值时的暂态温度场进行对比,如图 4 所示。由于土壤热容系数较大,过载时间较为短暂,当缆芯温度已接近 90°C 时,电缆本体周围土壤温度尚未明显升高。因此可忽略土壤因温度过高发生水分迁移问题。在此基础上所得允许过载时间如表 6 所示。

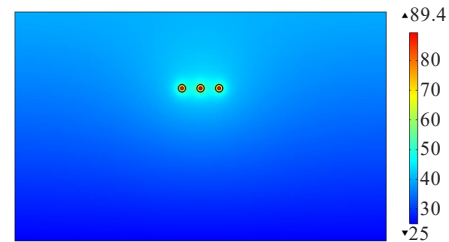
表 5 负荷 $0.5I_N$ 时电缆温度分布

Table 5 Cable temperature distribution when the load is $0.5I_N$

| 土壤热导率/ ($\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$) | 电缆各层温度/ $^\circ\text{C}$ | | | |
|--|--------------------------|-------|-------|-------|
| | 缆芯 | 绝缘层 | 金属护套 | 外护层 |
| 0.4 | 67.07 | 64.85 | 63.44 | 62.82 |
| 0.6 | 58.42 | 56.12 | 54.67 | 54.01 |
| 0.8 | 53.89 | 51.56 | 50.07 | 49.39 |
| 1.0 | 51.08 | 48.73 | 47.23 | 46.53 |
| 1.2 | 49.16 | 46.79 | 45.27 | 44.56 |
| 1.4 | 47.75 | 45.37 | 43.84 | 43.11 |
| 1.6 | 46.66 | 44.28 | 42.74 | 42.00 |



(a) $0.5I_N$ 时稳态温度场



(b) 缆芯温度接近 90°C 时暂态温度场

图 4 稳态温度场与暂态温度场对比

Figure 4 Comparison of steady-state temperature field and transient temperature field

表 6 电缆允许过载时间

Table 6 Time for overload of the cable

| 土壤热导率/ ($\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$) | 不同过负荷下的过载时间/h | | | | | |
|--|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | I_N | $1.1I_N$ | $1.2I_N$ | $1.3I_N$ | $1.4I_N$ | $1.5I_N$ |
| 0.4 | 1.28 | 1.00 | 0.81 | 0.67 | 0.56 | 0.48 |
| 0.6 | 2.60 | 1.84 | 1.41 | 1.12 | 0.92 | 0.77 |
| 0.8 | 4.05 | 2.59 | 1.87 | 1.44 | 1.16 | 0.96 |
| 1.0 | 5.87 | 3.40 | 2.30 | 1.70 | 1.33 | 1.10 |
| 1.2 | 8.10 | 4.20 | 2.65 | 1.91 | 1.48 | 1.19 |
| 1.4 | 10.70 | 5.20 | 3.02 | 2.10 | 1.59 | 1.27 |
| 1.6 | 13.70 | 6.30 | 3.40 | 2.27 | 1.69 | 1.34 |

以负荷由 $0.5I_N$ 变化至 $1.5I_N$ 为例,缆芯温度及过载时间随土壤热导率变化规律如图 5 所示。相同初始负荷时,缆芯温度随土壤热导率增大而降低,当

线路承担大小为 $1.0I_N$ 的过负荷时,允许过载时间随土壤热导率增大而增大。由以上结果可知,在负荷变化情况一定时,电缆允许过载的运行时间随土壤热导率的增加而增加,其变化规律近似指数函数。这是由于随着土壤热导率的增加,土壤散热能力随之增强。当负载相同时,土壤热导率越大,电缆本体温度越低,周围土壤初始温度也越低,而且电缆过载运行时所产生的热量更易通过土壤扩散,因此允许过载时间更长。

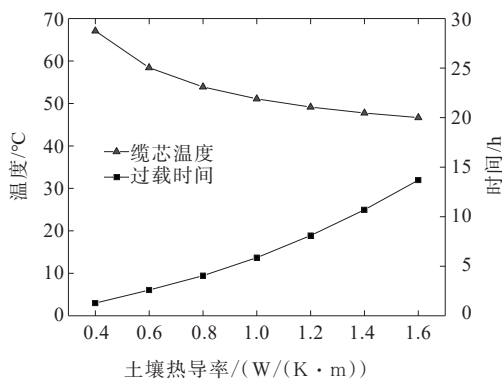


图5 过载时间与土壤热导率关系
Figure 5 Relationship between overload time and soil thermal conductivity

4.3 外部空气温度

直埋电缆热量扩散的另一途径是地表与空气的对流换热。通常空气自然对流换热系数取值为 $5\sim 25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[19],此处计算初始负荷为 $0.5I_N$ 时,不同对流换热系数下的电缆缆芯温度如图6所示。结果表明对流换热系数对缆芯温度几乎没有影响。因此,仅就外部空气温度对过载时间的影响作讨论。电缆负荷由初始 $0.5I_N$ 变化至 $1.5I_N$,空气温度变化范围 $15\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$,初始温度及过载时间计算结果如表7所示。

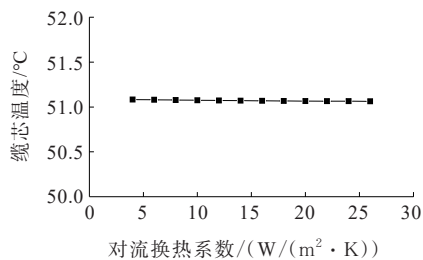


图6 缆芯温度与对流换热系数关系
Figure 6 Relationship between cable core temperature and convective heat transfer coefficient

由表7可知,外部空气温度的升高使得地表温度升高,直埋电缆本体的初始温度也随之升高,空气温度每升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$,缆芯温度升高约 $0.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。当负荷变化情况相同时,随着外部空气温度的升高,过载时间与其呈近似的线性下降关系,如图7所示。

表7 电缆初始温度与过载时间

Table 7 Cable initial temperature and overload time

| 外部空气温度/ $^\circ\text{C}$ | 电缆各层温度/ $^\circ\text{C}$ | | | | 过载时间/h |
|--------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|--------|
| | 缆芯 | 绝缘层 | 金属护套 | 外护层 | |
| 15 | 35.92 | 33.45 | 31.86 | 31.11 | 25.50 |
| 20 | 38.95 | 36.50 | 34.94 | 34.23 | 19.70 |
| 25 | 41.98 | 39.55 | 38.02 | 37.35 | 15.00 |
| 30 | 45.00 | 42.61 | 41.09 | 40.46 | 11.30 |
| 35 | 48.04 | 45.67 | 44.16 | 43.49 | 8.20 |
| 40 | 51.08 | 48.73 | 47.23 | 46.53 | 5.87 |

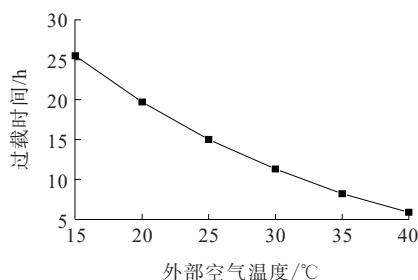


图7 过载时间与外部空气温度关系
Figure 7 The relationship between overload time and outside air temperature overload time

5 输送极限能力的评估

5.1 神经网络模型的设计

为评估某输电线路的极限输送能力,需要找到过载时间与各因素的函数关系。由此前分析可知,过载时间与其影响因素并非明确的单调函数关系,这使得输送能力的评估变得比较复杂,亟需一种有效的求解方法。近年来,神经网络作为解决非线性问题的理想化模型被广泛应用于电力领域,其基础结构又以BP神经网络最为典型。然而BP神经网络也存在内在的缺陷,如易形成局部极值、收敛速度慢等^[20]。因此,本文采用数值优化法对其改进,并选择Levenberg-Marquardt算法作为网络的训练算法。相较于传统的梯度下降法,

Levenberg-Marquardt算法具有更显著的训练效果。

利用神经网络评估电缆极限输送能力,具体过程如下:首先由有限元模型计算得出一个包含待研究电缆系统当前工作状态以及该状态下允许过载时间的数据库,其中,电缆当前工作状态由发电出力曲线和工作环境条件确定,允许过载时间由有限元计算得出。然后,将数据随机分割为训练集和测试集两部分。接下来,基于训练集的数据,使用神经网络进行学习训练,建立电缆当前状态和允许过载时间的映射关系。完成训练的神经网络具有一定泛化能力,可以根据待研究电缆系统的工作状态预测出其允许过载时间,从而对电缆极限输送能力作出评估。神经网络的设计参数包括输入层节点数 m , 输出层节点数 n , 隐含层节点数 s 。

1) 输入层点数 m 由输出的影响因素个数确定。由前文分析可知,影响过载时间的主要因素包括初始负荷及过负荷的大小、土壤热导率、外部空气温度。初始负荷决定了电缆初始温度场的分布,且电缆外护层温度易于测量。因此以电缆外护层温度、过负荷大小、土壤热导率、外部空气温度作为神经网络的输入变量,输入层节点数 $m=4$ 。

2) 输出层节点数 n 由输出量决定。本模型输出量为允许过载时间,输出层节点数 $n=1$ 。

3) 隐含层节点个数的确定是神经网络设计中的难点问题。隐含层节点过多会使网络出现过拟合倾向,容易陷入局部极小值,节点过少会使神经网络欠缺必要的学习能力。本文根据文献[21]提出的经验公式确定隐含层节点个数,计算公式如下:

$$s = \sqrt[2]{m + n} + l \quad (10)$$

式中, s 为隐含层节点数; m 为输入层节点数; n 为输出层节点数; l 为 1~10 的常数,可在保证神经网络泛化能力的区间内通过凑试法选取。

综上所述,本文采用如图 8 所示的 BP 神经网络模型实现输入量和输出量之间映射函数的拟合。该模型中,电缆外护层温度 T_0 、过负荷 ΔI 、土壤热导率 λ 、外部空气温度 T_{air} 为输入量, $\omega_1 \sim \omega_n$ 为权系数,过载时间 t 为输出量。

采用神经网络对允许过载时间进行预测,首先需要建立样本数据集。根据待研究系统的负荷曲

线计算出输出电缆的温度变化,取离散的若干时刻的温度为初始条件,计算一定过负荷下的允许过载时间,这样可以得到若干组包含电缆初始状态和允许过载时间的样本数据。

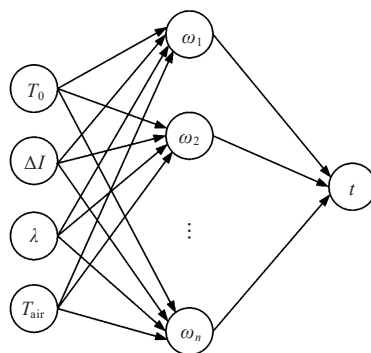


图 8 BP神经网络模型

Figure 8 BP neural network model

为避免不必要的数值问题,需将量纲不同的特征置于同一量纲下比较,这里对输入量 T_0 、 ΔI 、 λ 、 T_{air} 和输出量 t 采用线性函数转换法进行归一化处理:

$$x' = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (11)$$

式中, x 为当前值; x_{\min} 、 x_{\max} 分别为样本集中的最小、最大值; x' 为归一化后的值。归一化完成后,将数据随机分割为训练集和测试集两部分,训练集提供给神经网络进行学习,测试集用于验证神经网络的泛化能力。

神经网络隐含层与输出层的输入为

$$z_j = \sum_{i=0}^{m-1} \omega_{ij} x_i + \theta_j \quad (12)$$

式中, ω_{ij} 为单元节点 i 至 j 的权重; x_i 为单元 i 的输出; θ_j 为单元 j 的偏置。

神经网络隐含层与输出层的输出结果均是由激励函数计算,即

$$a_j = \sigma \left(\sum_{i=0}^{m-1} \omega_{ij} x_i + \theta_j \right) \quad (13)$$

式中, σ 为激励函数,表示神经网络提供非线性建模能力,这里采用 Sigmoid 函数,其表达式为

$$\sigma(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \quad (14)$$

神经网络输出值与期望值的误差采用二次代价函数表示,其表达式为

$$E = \sum_{j=0}^{n-1} (y_j - a_j)^2 / 2 \quad (15)$$

式中, y_j 为期望值; a_j 为输出值。

神经网络训练的目的在于使输出值与期望值的误差达到最小^[21],其本质上是一个通过迭代不断修正权重和偏置的过程。首先对神经网络进行初始化,给权重和偏置赋较小的随机数,通过前向传播计算输出值。然后将输出与期望的误差执行反向传播,修正权重和偏置,反复迭代求解,直至误差满足要求,至此训练结束,神经网络具有一定泛化能力。将测试集输入神经网络进行测试分析,可以验证网络的预测结果,实现根据任一电缆系统的初始状态输出其允许过载的时间,评估电缆输送电能的极限能力。

5.2 算例分析

某300 MW风电场220 kV线路有功功率一次值如图9所示。当日最高气温20℃,最低气温16℃,日平均气温18℃,未发生降雨,土壤热导率为1 W/(K·m)。将有功功率曲线以15 min为步长划分区段,以每区段的平均值作为实际出力值,求得电缆负载电流及外护层温度变化情况,如图10所示。

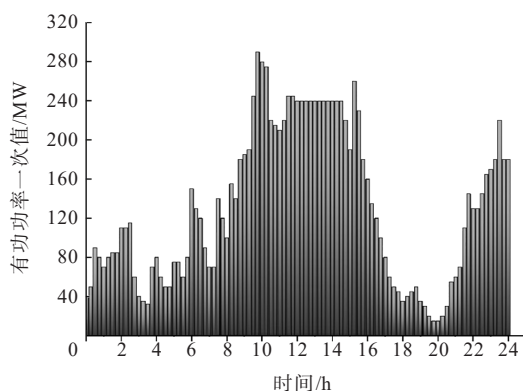


图9 线路有功功率一次值

Figure 9 Line active power primary value

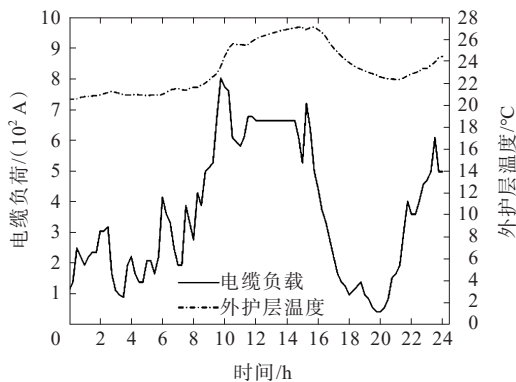


图10 线路实时负载与外护层温度

Figure 10 Real-time line load and temperature of cable outer sheath

由图10可知,风力发电的不确定性使得电缆负荷峰谷差达到 $0.7I_N$ 。因此,在原负荷曲线基础上,设计过载电流大小为 $1.7I_N$,并计算允许过载时间。将电缆外护层温度曲线以15 min为间隔均分,得97个时刻(包含零时刻)的电缆外护层实时温度。以此为初始值,计算在电缆每个时刻对应的允许过载时间,共计得到实时工况与过载时间一一对应的97组数据结果,至此神经网络数据集建立完成。过载时间计算值如图11所示。

针对所研究电缆线路,本文经多次试验确定隐含层节点数为6,神经网络的结构为4-6-1。从数据集中选取70组数据作为训练集样本输入神经网络进行训练,训练参数的设置如表8所示。剩余27个未经训练的数据作为测试集,与神经网络的预测值进行比对。

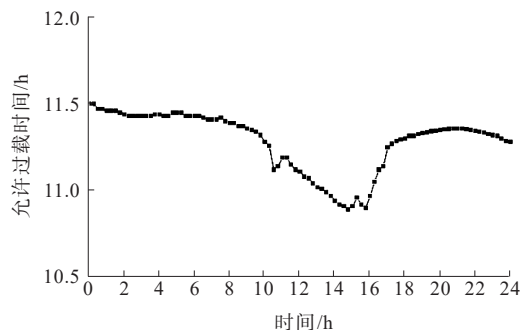


图11 允许过载时间计算值

Figure 11 Calculated value of allowable overload time

表8 神经网络参数设置

Table 8 Neural network parameter settings

| 参数 | 数值 |
|---------|-------|
| 学习率 | 0.01 |
| 训练次数 | 500 |
| 误差性能目标值 | 0.001 |

BP神经网络算法的预测值与期望值之间的对比如图12所示。由图12可知,预测值走势与期望值基本一致,二者间偏差较小,效果比较理想。此外,由图13数据回归曲线可知,大部分数据均落在拟合曲线上,数据回归系数 R 接近于1,表明模型对数据的拟合程度较好,预测精度高,结果有较大的参考价值,可以实现根据电缆线路不同时刻的状态预测其允许过载时间。

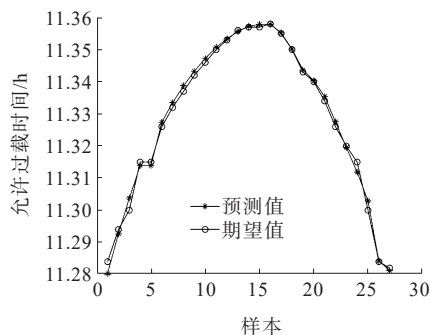


图 12 神经网络预测值与期望值比对

Figure 12 Comparison of neural network predicted values and expected values

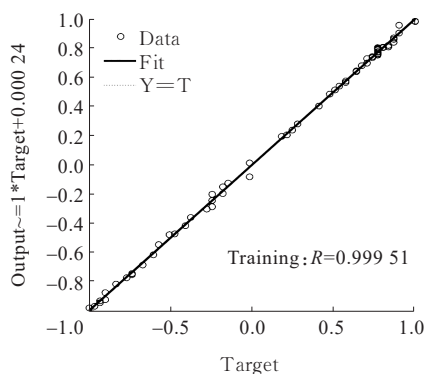


图 13 数据回归曲线

Figure 13 Data regression curve

6 结语

本文提出利用电缆的过载水平短时提升电缆对新能源发电的输送能力,建立了XLPE电缆温度场有限元分析模型,分析影响电缆允许过载时间的因素,并引入神经网络算法对实际工况中的新能源输送线路允许过载时间进行评估,具体结论如下。

1) 初始负荷及过负荷大小是影响线路允许过载时间最主要的因素:随着初始负荷及过负荷的增大,允许过载时间急剧减小,且时间减小的变化率总是越来越小。

2) 敷设环境对过载时间有一定影响:土壤热导率越大,电缆过载时间越长,二者呈指数关系;随着外部空气温度的升高,过载时间相应缩短,二者近似线性关系。

3) 改进BP神经网络算法对于评估电缆允许过载时间的问题具有可行性,模型具有参考价值,预

测精度较高,运算速度快,可为新能源输送系统的运行决策提供快速支持。

参考文献:

- [1] 焦东东,陈洁,方圆,等.基于变分模态分解下利用混合储能平抑风电出力波动的控制策略[J].电测与仪表,2021,58(5):14-19.
JIAO Dongdong, CHEN Jie, FANG Yuan, et al. Control strategy of hybrid energy storage for suppressing fluctuation of wind power output based on variational mode decomposition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 14-19.
- [2] 周泽昕,王兴国,杜丁香,等.过负荷状态下保护与稳定控制协调策略[J].中国电机工程学报,2013,33(28):146-153.
ZHOU Zexin, WANG Xingguo, DU Dingxiang, et al. A coordination strategy between relay protection and stability control under overload conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 146-153.
- [3] 马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2013:39-40。
MA Guodong. Current carrying capacity of wires and cables[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 39-40.
- [4] 陈玉,郝义,姚凯,等.500 kV充油海底电缆运行状态综合在线监测系统研究[J].电测与仪表,2021,58(10):133-139.
CHEN Yu, HAO Yi, YAO Kai, et al. Research on integrated on-line monitoring system for operating status of 500 kV oil-filled submarine cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 133-139.
- [5] HU J, XIONG X F, WANG J. Current tolerance capability calculation model of transmission lines and its application in overload protection[J]. Electric Power Components and Systems, 2018, 46(14): 1509-1521.
- [6] 李熙谋.电力电缆短时容许过载能力及其标准算法[J].电力设备,2001,2(3):59-60。
LI Ximou. Power cable permissible short duration overload capacity and its standard algorithm[J]. Electrical Equipment, 2001, 2(3): 59-60.
- [7] 李瑞芳,胡豪,曹晓斌,等.单芯电缆耦合电路等效模型及无功损耗影响因素研究[J].高压电器,2021,57(7):119-126。
LI Ruifang, HU Hao, CAO Xiaobin, et al. Study on equivalent model of coupled circuit of single-core cable and influencing factors of reactive power loss[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 119-126.
- [8] 柴鹏,周灏,张煜,等.基于双端行波法的电缆线路短路

- 故障定位改进[J].中国电力,2020,53(11):168-174.
- CHAI Peng, ZHOU Hao, ZHANG Yu, et al. Short-circuit fault location for power cables based on improved two-terminal traveling wave method[J]. Electric Power, 2020,53(11):168-174.
- [9] 张群峰,庄小亮,牛海清,等.考虑XLPE过热性能的配电网电缆过载能力的提高[J].电气应用,2015(10):20-23.
- ZHANG Qunfeng, ZHUANG Xiaoliang, NIU Haiqing, et al. Improvement of emergency current-carrying capacity of distribution cables considering overheating performance of XLPE[J]. Electrotechnical Application, 2015(10):20-23.
- [10] 李文祥,刘刚,王振华,等.XLPE三芯电缆稳态并联热路模型及实验验证[J].南方电网技术,2015,9(3):57-62.
- LI Wenxiang, LIU Gang, WANG Zhenhua, et al. Steady-state parallel thermal circuit model for three-core XLPE cable and its experimental verification[J]. Southern Power System Technology, 2015,9(3):57-62.
- [11] 王雪菲,李京,陈平,等.基于行波波波形综合相似度比较的电缆故障选线[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):51-59.
- WANG Xuefei, LI Jing, CHEN Ping. Cable fault line selection based on comprehensive similarity comparison of traveling wave waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(1):51-59.
- [12] 李嘉明,于沛鑫,邓军波,等.基于EMTP仿真平台的超高压电缆操作过电压特性及其影响研究[J].智慧电力,2021,49(10):83-89.
- LI Jiaming, YU Peixin, DENG Junbo, et al. Characteristics and influence of switching overvoltage in extra high voltage cables based on EMTP[J]. Smart Power, 2021,49(10):83-89.
- [13] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006:79-85.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:79-85.
- [14] IEC 60287—2001. calculation of the current rating-part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses[S].
- [15] 范京艺.考虑断面短时过载的断面输电能力提高的研究[D].北京:华北电力大学,2017.
- FAN Jingyi. Research on improvement of section transmission capacity considering section short time overload[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [16] 韩晓燕.热路模型在动态增容技术中的研究与应用[J].河南科技,2019(29):150-152.
- HAN Xiaoyan. Research and application of thermal path model in dynamic capacity increasing technology[J]. Henan Science and Technology, 2019(29):150-152.
- [17] 曾召田,范理云,莫红艳,等.土壤热导率的影响因素实验研究[J].太阳能学报,2018,39(2):377-384.
- ZENG Zhaotian, FAN Liyun, MO Hongyan, et al. Experimental research on influencing factors of soil thermal conductivity[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018,39(2):377-384.
- [18] 余传辉.地下土壤导热系数计算方法及结果分析[D].长春:吉林大学,2004.
- YU Chuanhui. Calculation method and result analysis of thermal conductivity of underground soil[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [19] 郭晓刚,高健,闫峰,等.长距离330 kV电缆依频模型局放传输特性分析及信号定位试验验证[J].电网与清洁能源,2022,38(11):17-26.
- GUO Zhigang, GAO Jian, YAN Feng, et al. Partial discharge transmission characteristic analysis of the frequency-dependent model of the long distance 330 kV cable and experimental verification of signal positioning [J]. Power System and Clean Energy, 2022,38(11):17-26.
- [20] 吴龙.基于ANSYS异步电动机过载热保护的研究[D].兰州:兰州理工大学,2020.
- WU Long. Research on overload thermal protection of asynchronous motor based on ANSYS[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [21] 齐琦,陈芳芳,赵辉,等.基于优化BP神经网络光伏出力短期预测研究[J].计算机测量与控制,2021,29(4):70-75.
- QI Qi, CHEN Fangfang, ZHAO Hui, et al. Prediction of photovoltaic output based on improved neural network[J]. Measurement & Control Programming, 2021,29(4):70-75.
- [21] 杨赛.BP神经网络学习问题的分析研究[D].赣州:江西理工大学,2019.
- YANG Sai. Analysis and research on bp neural network learning problems[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.