

「线缆」

基于神经网络的架空输电线路覆冰增长预测方法研究

文/国网湖北省电力公司检修公司 王身丽 翁永春 张学锋 付 裕
三峡大学电气与新能源学院 黄 力

架空输电线路的覆冰会对电网的安全运行造成严重的威胁。针对架空输电线路的覆冰问题，提出了一种基于BP神经网络的覆冰增长预测方法。该方法利用目前架空输电线路已有的监测信息以及覆冰历史信息，对导线在不同外部条件下的覆冰厚度增长进行预测。根据实际运行架空输电线路的监测数据进行仿真，结果表明该方法使用简单，适用于实际输电线路运维工作中。

近年来，架空输电线路覆冰引发的大面积闪络、金具损坏、线路舞动、倒杆（塔）、断线甚至大范围停电等事故时有发生，对电网的安全运行造成了严重威胁。2005年初湖南电网遭遇了1954年以来最严重的一次冰冻灾害，其骨干电网发生了较严重的跳闸事故，带来了严重的损失。2008年贵州电网同样因覆冰灾害而造成巨大损失。架空输电线路覆冰越来越成为影响电网可靠安全运行的主要因素。

国内外对于架空输电线路覆冰增长预测的研究主要集中在线路覆冰的机理模型、线路覆冰的智能辨识等方面。线路覆冰机理模型是通过在实验室中模拟线路的覆冰，提出覆冰厚度增长的预测模型。智能辨识模型是以架空线路的在线监测数据为基础，利用模糊逻辑或者神经网络预测模型，进行输电线路覆冰厚度的预测。这些技术中所采用的参数大都来自于实验室，而在实际工作中，这些参数不易直接得到，大多数都是人为估计，如水滴直径的分布参数等。此外，这些技术的应用范围受限制，所得到的经验公式在不同地区应用时，需要进行修正。这些问题使线路覆冰增长预测成为当前架空输电线路运维中的难题。

从架空输电线路的覆冰机理出发，分别讨论了不同的因素对线路覆冰的影响，进而提出了一种基于BP神经网络模型的架空输电线路覆冰增长预测方法。该方法利用现有的架空输电线路监测信息，同时考虑到历史信息对线路覆冰的影响，建立的预测模型使用起来方便且可靠。

架空输电线路覆冰机理

架空输电线路覆冰的产生通常是在冬季，由于大气中的冷、暖气团相互作用，空气中的水汽形成水滴。低温的水滴在下降过程中，遇到尘埃等凝结核就会变成冰粒落到地面。反之，当没有与尘埃等凝结核相遇时，过冷水滴由于表面张力大，变得不稳定。在风的作用下，过冷水滴与架空输电线路相撞，并冻结在线路上，形成线路覆冰。特别是在水滴直径较小的情况，由于其不容易与尘埃等凝结核相遇，更容易在架空输电线路路上覆冰。

架空输电线路覆冰首先是从迎风面上开始发展。当覆冰的重量达到一定程度时，线路就会在迎风面覆冰重力的作用下发生扭转，使原先的背

风面变为迎风面。从而覆冰在新的迎风面继续发展。最终形成架空输电线路的完全覆冰。

覆冰影响因素

由覆冰机理可知，影响架空输电线路覆冰的因素是多方面的，通常包括气温，湿度，风速，风向以及导线、地线直径等。

1. 气温

低温是形成架空输电线路覆冰的首要条件。只有在0℃以下时，才能形成覆冰所必需的水滴。水滴容易被线路所捕获，线路的覆冰率增加很快。而当温度过低时，如超过了-10℃时，水滴由液态逐渐变为固态，形成雪花，不会引起线路的覆冰。因此，我国北方地区冬季虽然寒冷，但是架空输电线路覆冰却没有南方地区严重。

2. 湿度

空气中的水汽越多，湿度也越大，也更容易为架空输电线路覆冰提供水滴。架空输电线路覆冰时的空气相对湿度较高，通常在85%以上。当相对湿度较小时，水滴直径较小，线路覆冰增长慢；相对湿度较大时，水滴直径较大，线路覆冰增长快。但当相对湿度太大时，将会形成降雨。

3. 风速

风在架空输电线路覆冰过程中，起到输送过冷水滴到线路表面的作用。从而使线路与水滴不断撞击，形成线路的持续覆冰。根据统计资料，架空输电线路覆冰时的风速通常要大于1 m/s。风速越大，单位时间内线路所捕获的水滴也越多，覆冰的过程也更容易持续发展。然而，当风速过大时，水滴被线路捕获后，来不及结冰就被吹走，使线路覆冰率下降。

4. 风向

风向主要影响着水滴撞击架空输电线路的效率大小。当风向与线路的走向有一定角度时，水滴能够有效地与线路发生撞击，容易在迎风面形成具有偏心的覆冰。而风向与线路走向平行或接近平行时，覆冰的效率较差，形成的覆冰也是均匀的。

5. 线路直径

架空输电线路的直径对线路覆冰的影响，与流体力学、热力学相关。当线路直径大时，对气流的干扰大。气流中的水滴在离线路较远时，就开始随气流改变运动方向绕过线路。在风速小时，线路捕获的过冷水滴少，线路覆冰

增长慢。而在风速大时，由于直径大的线路迎风面积也大，更容易捕获水滴，形成覆冰。此外，直径大的线路热容量大，在覆冰初期不利于覆冰的发生。

覆冰增长预测模型

架空输电线路覆冰过程复杂，影响因素众多，各种环境参数随机变化，很难找到一个精确的物理模型来进行定性描述。在建模理论中，对于这一类超出认知范围的问题，往往不去考虑其真实的物理过程，而是以一个等效的模型来进行替代，可以把整个覆冰过程看作一个多因素共同作用的时间序列，其最终的表现形式为覆冰量的增长。

利用BP神经网络能够很好地表征线路覆冰增长。BP神经网络是由大量简单的处理单元（神经元）相互连接而组成，能进行并行推理的复杂系统。每个神经元向邻近的其他神经元发出抑制或激励信号，整个网络的信息处理通过这些神经元之间的相互作用完成。神经网络通过对反映某种客观规律的样本进行学习，来直接追寻这一客观规律，并模拟这一客观规律的作用。通过合理地构造神经网络结构，适当地选择网络权值、阈值的学习法则和网络的训练方法，得到收敛的神经网络，就能较好地反映其规律，并可不断地学习和补充不足，使其不断地完善。

据此，架空输电线路覆冰增长预测模型，需要从覆冰理论分析中确定影响覆冰增长的因素。考虑到实际各影响因素的获取难易程度，在实际的覆冰增长模型建立时，选择覆冰时间、环境风速、环境温度、相对湿度及上次覆冰厚度作为模型输入量，覆冰厚度作为模型输出量，可选择其中的全部或几个因素作为模型的输入量，影响因素如表1所示。

表1 影响架空输电线路覆冰厚度的因素

模型输入量	覆冰时间	环境风速	环境温度	相对湿度	上次覆冰厚度
模型输出量	本次覆冰厚度				

在架空输电线路导线覆冰增长预测的学习算法中，目标函数是通过确定BP神经网络的连接权值使得累积误差平方和函数最小。BP神经网络中的隐层选取Sigmoid函数（双曲线正切函数）作为传输函数，输出层的传输函数也为Sigmoid函数式，建立覆冰预测模型。

仿真分析

为验证所提出的架空输电线路覆冰增长预测方法,现以湖北某500 kV架空输电线路为例,进行了相关线路覆冰增长预测仿真分析。仿真的数据来源于实际测量结果,由装设在该500 kV线路上的监测装置采集得到。数据的记录从线路出现覆冰开始,并以等间隔的时间进行多次采集。同时,对架空输电线路覆冰区域的环境温度、相对湿度和环境风速等进行记录,其中的部分数据如表2所示。

表2 某500 kV架空输电线路导、地线部分覆冰数据

时间 编号	环境温度 /℃	相对湿度 (%)	风速 (m/s)	覆冰厚度 /mm
12	2	95	3.8	6.14
13	2	85	3.7	6.19
14	3	95	1.9	6.26
15	1	95	0.8	6.40
16	-2	96	1.7	6.62
17	-3	88	2.1	7.49
18	-2	90	1.3	7.06
19	-3	93	3.4	9.01
20	-2	96	1.2	9.50
21	-3	97	1.2	10.80
30	-3	96	1.1	19.80
31	-2	97	6.0	21.55
32	-2	97	4.9	21.60
33	-1	93	5.0	21.71

使用Matlab软件,建立线路覆冰增长预测模型所对应的BP神经网络结构。对于网络结构中隐层节点数目的选择,首先根据经验公式确定初始节点个数,设定网络最大学习次数,当达到最大次数,仍不收敛时,则增加节点数;当网络持续在小于某一给定次数就可以收敛时,则减少节点个数。

应用已记录的数据对该BP神经网络结构进行训练,设定学习速度为0.01,误差为0.01,训练结果如下图所示。

得到该架空输电线路覆冰增长预测模型以后,可以根据表1中的影响因素测量值,对导地线的覆冰增长情况进行预测计算,其计算结果如表3所示。

由表3可知,线路覆冰厚度增长预测的BP神经网络模型平均计算误差为12.73%。分析每个预

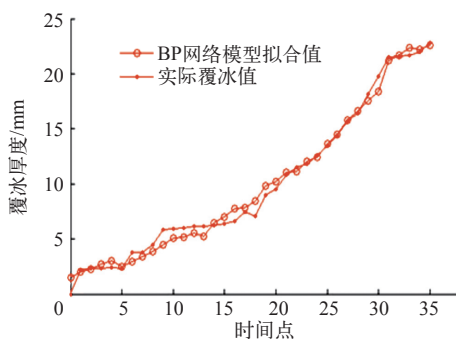


图 BP神经网络模型训练结果

表3 利用BP神经网络模型预测覆冰厚度结果

编号	温度 /℃	相对湿度 (%)	风速 (m/s)	实际值 /mm	预测值 /mm
1	-3	99	1.4	2.26	1.65
2	-3	88	2.1	6.56	7.42
3	-2	90	1.3	7.06	7.33
4	-3	93	3.4	9.20	11.93
5	-3	96	1.3	10.64	12.30
6	-2	95	1.1	10.92	12.63
7	-4	95	1.6	13.56	18.61
8	-2	96	1.1	19.60	21.55

测数据可以发现,最大误差发生在覆冰厚度较小的情况下。这是因为实际覆冰厚度值较小,造成计算的相对误差较大。但考虑到此时覆冰对架空输电线路的影响较小,运行单位更关注的是线路覆冰厚度较大时,其覆冰量是否达到了危害架空输电线路的程度。因此,该模型的预测结果满足实际要求。

同时也应注意到,使用BP神经网络模型时,需要较多的历史数据,并且存在收敛速度慢,学习算法容易陷入局部最小等缺陷。因而,对于实际的架空输电线路覆冰增长预测过程中,对历史数据的收集与整理,也是一项重要的工作。

结束语

利用某500 kV架空输电线路的实际测量结果,对此方法进行了仿真验证。结果表明,该方法能够有效地反映出线路覆冰厚度的增长变化,预测结果满足实际要求,为架空输电线路覆冰增长预测提供了一条新的思路。EA

(收稿日期:2017.09.24)

(编辑:刘群彦)