

DOI: 10.7667/PSPC170563

计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估

褚双伟¹, 熊小伏², 刘善峰³, 廖峥², 王建²

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450052; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 为了准备评估覆冰舞动环境下电网的短期运行风险, 保障输电线路的正常运维, 提出了一种计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估方法。定量地抓住决定事故风险程度的两个因素: 故障可能性指标和后果严重度指标, 从整体层面把握舞动对电网短期运行风险的影响。其中可能性指标通过 BP 神经网络预测舞动概率值和通过频次法划分的舞动分区图综合计算得到, 后果严重度指标根据输电线路故障断开后的支路过载和母线电压越限指标计算得到。以河南电网的历史舞动数据进行算例分析, 结果表明所提方法能有效评估电网的短期运行风险评估, 舞动预警和电网风险评估结果可以为电网调度和线路运维人员提供决策支撑, 及早调整运行方式或者进行防舞作业, 降低舞动对电网安全运行的影响。

关键词: 输电线路; 舞动; 风险评估; 气象灾害

Short-term risk assessment of power grid considering galloping prediction of transmission lines

CHU Shuangwei¹, XIONG Xiaofu², LIU Shanfeng³, LIAO Zheng², WANG Jian²

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. EPRI of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to assess the short term operational risk of the power grid under the ice-covered galloping environment and ensure the normal operation and maintenance of transmission lines, a short-term risk assessment method of power grid considering galloping prediction of transmission lines is proposed. It seizes two factors that determine the fault risk degree: the fault likelihood index and the system consequence severity index, which can grasp the impact of galloping on the short term operation of the power grid from an overall perspective. The fault likelihood index is comprehensively determined by the galloping prediction probability calculated through a BP neural network and the historical galloping level of a region which is divided by the frequency method. The system consequence severity index is calculated according to the conductor overload degree and bus voltage out-of-limit degree after power flow transferring. Taking the galloping data of Henan power grid as a case study, the results indicate that the proposed method can effectively evaluate the short term operational risk of power grid. The galloping early warning and risk assessment results can provide decision-making support for power grid dispatchers and transmission line operation staffs, help them adjust operation mode of power grid and (or) implement anti-galloping assignment of transmission lines in advance, to reduce the impact of transmission line galloping on the security operation of power grid.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900600) and Major and Basic Project of Foresight Science and Technology of State Grid Corporation of China (No. SG20141187).

Key words: series compensation; current reverse; differential protection; transient resistance; ratio coefficient

0 引言

绝大多数输变电设备暴露在复杂的外界环境之

中, 在极端冰雪天气侵害电网时, 非均匀覆冰导线由风激励引发的舞动现象会造成跳闸、闪络、金具及绝缘子磨损、断线甚至倒塔等事故, 严重影响输电安全, 会导致重要输电通道长时间停运, 影响电力系统的安全稳定运行^[1]。因此电网的安全防御和运维决策需要计及气象灾害的影响, 通过预测气象

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600);
国家电网公司重大基础前瞻科技项目资助(SG20141187)

灾害风险导致的故障概率, 进一步评估电网短期的运行风险, 从而更加充分地应对极端气象事件对电力系统安全运行的影响, 保证在覆冰舞动环境下输电线路的正常运维。

2008年初我国部分省份出现的罕见低温冰冻雨雪灾害, 造成电网大面积损毁, 对人民生活及国民经济都造成了相当严重的影响^[2], 诸多科研工作者、机构及电网运行单位针对性地展开了关于电力系统安全稳定评估^[3]、停电防御系统设计^[4-5]以及自然灾害对电网产生的影响^[6-8]等方面的研究。文献[9-11]分析了输电线路冰害事故及原因。文献[12]分析了冰雪灾害条件下我国电网安全运行面临的问题。文献[13]基于地理气象相关的实测数据对输电线路进行了风险差异化评价。文献[14-15]针对传统停电防御系统在极端外部灾害冲击下的改进做了深入研究与思考。文献[16]提出了强化学习理论在电力系统中的应用及展望。文献[17]利用人工神经网络对线路故障进行即时检测并分类。上述研究主要采用传统的电网可靠性评估方法, 基于系统充裕性分析、或是以年为单位的长期评估, 对电力系统进行的短期风险评估研究并不深入, 并且缺乏同极端气象灾害的紧密联系, 因此建立一个着眼于运行阶段的统一的分析、仿真、评估系统很有必要。

输电线路覆冰舞动是高风险的低概率事件, 只通过一次系统的建设和改造来防御覆冰舞动灾害投资成本高, 可操作性低, 因而迫切需要与二次系统的辅助决策相结合, 完善现有电力系统风险预警、势态分析、辅助决策、综合协调及事后评价^[18], 使其综合考虑自然气候环境带来的影响, 针对覆冰舞动事件进行综合评估、风险预警, 为调度人员提供数据支持。

本文分析了覆冰舞动形成演化及影响因素, 提出计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估方法, 参考已有安全评估准则以及各项规程^[19], 从两个方面定义了三个指标, 以对气象事件的影响从可能性和故障后果严重度两个层面进行评估, 在宏观层面把握舞动灾害对电网运行风险的影响, 实现计及线路舞动的电网短期风险评估。其中可能性指标通过 BP 神经网络预测舞动概率值和通过频次法划分的舞动分区图综合计算得到, 后果严重度指标根据输电线路故障断开后的支路过载和母线电压越限指标计算得到。以河南电网的历史舞动数据进行算例分析对所提方法的效果进行测试, 舞动预测和风险评估结果可以为电网调度和线路运维人员提供决策支撑, 及早调整运行方式或者进行防舞作业, 降低舞动对电网安全运行的影响。

1 输电线路舞动可能性计算

将风险评估法应用到电网的实际运行当中, 在概率评估方法的基础上, 定量地抓住决定舞动灾害风险严重等级的两个方面的三个指标: 事件发生概率、历史舞动情况以及后果严重程度指标, 从而对电网安全运行做出更可靠、科学、细致的评估。首先分析影响线路舞动的气象因素, 然后采用 BP 神经网络预测线路舞动概率, 再使用频次法划分的电舞动分区图对线路舞动概率进行修正, 据此确定线路舞动的可能性指标。

1.1 基于 BP 神经网络的线路舞动概率预测(图 1)

通过总结舞动发生区域的气温、湿度、风速等条件, 可知一定温度的冻雨及低层云中含有的饱和和过冷却水出现在线路附近时, 极易附着在导线表面, 进而累积形成坚实的雨凇、雾凇或混合覆冰^[20]。在重力和大风激励的双重影响下, 附着在导线表面的覆冰层容易形成不规则的形状, 且具有“良好”的空气动力学性能, 当风向与导线的夹角大于 45° 时, 易产生较大升力进而引发舞动^[21-22]。

笔者在之前的研究与文献[23]中以风速、风向与线路的夹角、相对湿度以及温度为训练集, 采用 BP 神经网络建立监测区域舞动的气象预警模型, 可以得到区域舞动概率^[24-25]。

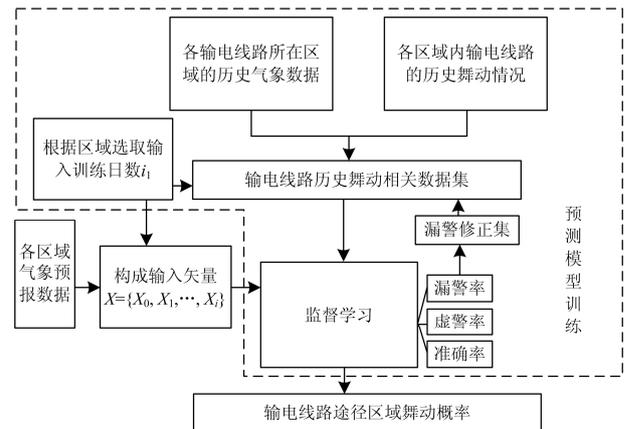


图 1 输电线路舞动概率预测流程图

Fig. 1 Flow chart of probability prediction of transmission line galloping

再以杆塔为起点, 沿着杆塔序号递增的方向, 将线路按沿途气象站监测区域划分为不同舞动区域。通过上述神经网络方法可以得到线路 i 途经的区域 j 的舞动概率预测值 P_{gij} 。假设各区域间舞动故障相互独立, 则线路 i 的舞动概率预测值为

$$P_{gi} = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_{gij}) \quad (1)$$

式中, n 为线路途经的舞动区域个数。

1.2 采用电网舞动分区进行舞动概率修正

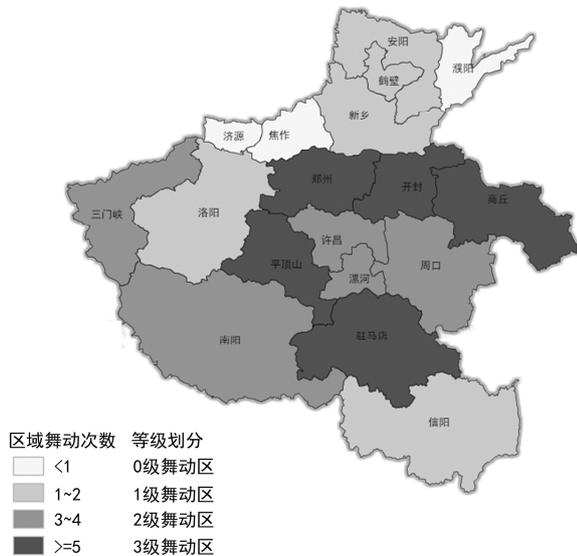
舞动等级划分图能清晰地反映输电线路历史上发生舞动的时空特点, 可以为线路设计、风险评估、运行维护等部门的防舞工作提供指导^[26]。舞区图能从宏观层面显示易舞地区、易连锁跳闸地区, 弥补了机器学习方法计算舞动概率的一些数据盲点, 提升舞动预警可靠性。

舞动等级划分图的绘制工作是提高电网抵御覆冰舞动事故能力的重要组成部分, 可以为相关输电线路设计提供参考, 为运行和管理部门提供决策依据^[27]。以河南省为例, 按照表 1 所示的舞动区域等级划分原则, 绘制的舞动分区图如图 2 所示。

表 1 电网舞动区域等级划分原则

Table 1 Classification rules of galloping area for power grid

区域舞动等级	具体划定原则
3 级舞动区	1998 年至今发生过 5 次及以上舞动的区域
2 级舞动区	1998 年至今发生过 3~4 次舞动的区域
1 级舞动区	1998 年至今发生 1~2 次舞动的区域和今后极可能发生的区域
0 级舞动区	1998 年至今从未发生过舞动并且今后不大可能发生舞动的区域



区域舞动次数 等级划分
 <1 0级舞动区
 1~2 1级舞动区
 3~4 2级舞动区
 >5 3级舞动区

图 2 河南电网舞动区域等级划分图

Fig. 2 Diagram of galloping area classification of Henan power grid

考虑输电线路途径不同的舞动区域, 线路的综合舞动等级应为最高舞动等级区域的等级 η_i 。

上述线路舞动概率预测值和电网舞动区域等级

两个指标从不同侧面反映了系统运行发生舞动灾害的可能性, 可用于电网发生舞动事件的综合评估。考虑在历史舞动多发区域, 按照式(2)对线路舞动可能性指标进行适当优化。

$$P_{osi} = (1 + 0.1 \times \eta_i) \times P_{gi} \quad (2)$$

式中: P_{osi} 表示线路舞动可能性指标; η_i 表示线路途经区域的舞动分区等级最高值; P_{gi} 表示线路舞动概率预测值。

2 电网短期风险评估指标

基于电网运行情况及历史故障数据的统计分析, 评估输电线路故障断开后的线路负载和母线电压偏差情况。经文献^[28]研究可知, 母线电压偏差严重性模型呈现中间型规律, 线路负载严重性模型呈现偏大型规律。

2.1 母线电压越限严重度指标

根据《国家电网公司电力系统电压质量和无功电力管理规定》^[29], 将母线电压越限超过 -5%~+10% 范围的事件设为越限情况。母线电压越限指标模型如图 3 所示。

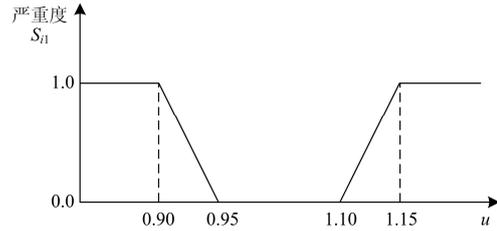


图 3 母线电压越限指标模型

Fig. 3 Model of bus voltage out-of-limit index

量化系统后果严重度指标时应该考虑到电力风险在低越限区域中的累积性, 将电压在 [0.90, 0.95] 以及 [1.10, 1.15] 范围内的越限定义成高风险情况, 并用特定的严重度函数表征其对整个系统的影响。同时, 将电压在 [0.96, 1.09] 之间的越限定义成无风险情况, 其余情况定义成严重风险情况。

$$S_{il}^j = \begin{cases} 1 & u \leq 0.9 \text{ 或 } u \geq 1.15 \\ \frac{1}{0.05} |u - 1.1| & 1.1 \leq u \leq 1.15 \\ 0 & 0.95 < u < 1.1 \\ \frac{1}{0.05} |0.95 - u| & 0.9 \leq u \leq 0.95 \end{cases} \quad (3)$$

式中, u 为母线电压与其额定电压的比值。

将灾害发生后, 系统所有母线的严重度函数相加值作为评价整个系统母线电压越限的后果严重度函数值。

$$S_{i1} = \sum_j^m S_{i1}^j \quad (4)$$

式中, m 为系统母线数。

2.2 支路过载严重度指标

将线路有功功率超过其额定值的事件视为严重风险情况, 将其后果严重度函数设为 1。支路过载指标模型如图 4 所示。

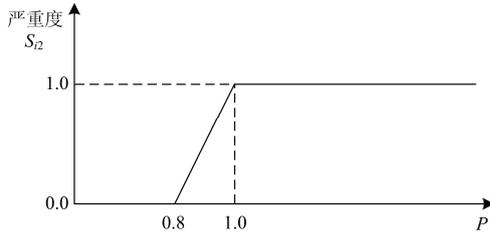


图 4 支路过载指标模型

Fig. 4 Model of conductor overload index

把线路有功功率在其额定容量的 80%与额定值之间的事设为高风险情况, 其余情况设为安全情况, 其后果严重度指标为 0。把所有线路的支路过载严重度函数相加作为评价整个系统的支路过载严重度函数值, 即

$$S_{i2}^j = \begin{cases} 0 & P \leq 0.8 \\ 4(P - 0.8) & 0.8 \leq P \leq 1 \\ 1 & P \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, P 为有功功率与额定值之比, 当该线路的有功功率为线路额定值的 80%时, 线路的过负荷后果严重度的取值为 0; 当线路的有功功率超过线路额定值时, 线路的过负荷后果严重度的取值为 1。

将系统所有支路过载严重度函数相加作为系统支路过载严重度指标

$$S_{i2} = \sum_j^l S_{i2}^j \quad (6)$$

式中, l 为系统支路总数。

最后, 将母线电压越限与支路过载之和作为评价第 i 条线路故障后的后果严重度函数, 即

$$S_i = S_{i1} + S_{i2} \quad (7)$$

3 计及线路舞动预测的电网短期风险评估

3.1 计及线路舞动故障的风险评估框架

舞动故障的预警流程如图 5 所示, 包括以下四大步骤:

1) 按沿途气象站监测区域将输电线路分段, 通过历史气象信息训练 BP 神经网络, 计算各区域舞动概率并得到线路的舞动概率预测值。

2) 统计区域历史舞动次数, 进行舞动等级划分, 综合舞动概率得到舞动可能性。

3) 结合母线电压越限及支路过载两个指标来评价故障后系统的后果严重度。

4) 综合舞动灾害可能性、后果严重度指标建立舞动后果严重度等级。

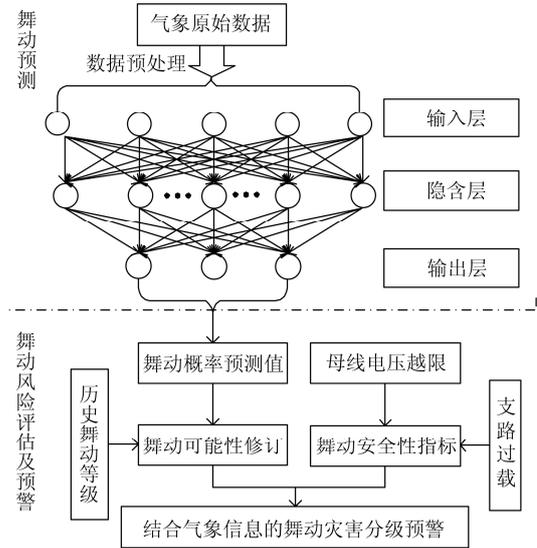


图 5 舞动故障的风险评估框架

Fig. 5 Risk assessment framework of galloping

3.2 电网舞动灾害风险评估模型的建立

为比较全面地反映系统运行状况, 基于风险的安全性评估方法将可能性和后果严重度两个因素放在统一的价值尺度来衡量, 从而更加有效科学地评估预想舞动灾害天气对电网所造成的影响^[30-31]。现将事故产生的风险定义为事故可能性与该状态对应的后果严重度函数的乘积。

$$S_{evi} = P_{osi} \times S_i \quad (8)$$

式中: S_{evi} 为事件 i 的系统风险指标; P_{osi} 为事件 i 发生的可能性; S_i 为事件 i 发生的后果严重度函数。

以可能性、后果严重度指标为判据对故障后系统的后果严重度划分了四个等级, 如表 2 所示, 以供运行人员找出使系统呈现高风险水平的预想事故, 找到薄弱点后方便提出有效的改进措施。

表 2 线路 L_i 故障后的系统风险严重等级

Table 2 System security level after the fault of line L_i

S_{evi}	风险等级
[0, 1]	低风险 L
[1.01, 2]	一般风险 N
[2.01, 3]	严重风险 H
[3.01, ∞]	极严重风险 VH

当出现舞动灾害预警后，视预警等级而定，电网运行调度人员可以从以下方面进行应对：

1) 及时进行除冰融冰措施。采用热力除冰法、机械除冰法或一些除冰新技术对输电线路进行除冰融冰作业，导线上没有了不均匀覆冰的累积，舞动就很难形成。

2) 需要提前联系工作人员驻站就位，安排好设备应对线路跳闸事故，并视情况准备好强送、复电工作。

3) 提前做好运行调整计划，按线路风险情况采取负荷转供或甩负荷措施，减少舞动突发时对电力系统的冲击。

4) 通知舞动预警线路关联的大用户，给予其充分的时间进行断电准备。

5) 做好线路因严重故障而长时间停运的事故预想。

4 算例分析

4.1 算例 A

根据河南电网及其“输电线路舞动防治技术”国网重点实验室统计的《历史舞动记录统计分析与验证表》中 2010 年 2 月的舞动记录，以 220 kV 郑启线为例。该线路于 28 日 12 时发生舞动，使用 BP 神经网络建立的舞动预警模型对线路进行预测，结果如图 6 所示。

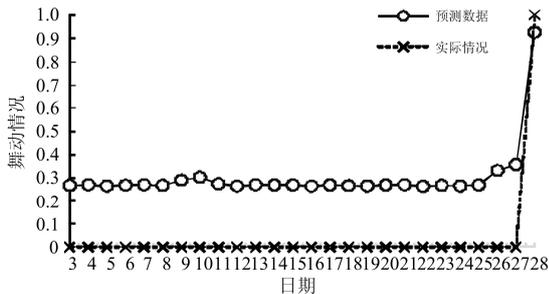


图 6 文中方法对郑启线舞动预测情况

Fig. 6 Galloping forecast of Zheng-qi transmission line using BP neural network

郑启线故障断线后的潮流变化情况如表 3 所示，其中峡鹅线、郑徐线、启陈线、宣郑线、II 郑凤线、I 鹅启线、II 鹅启线、I 徐博线、I 陈洁线、II 陈洁线、I 郑陈线将会出现较大的潮流变化。

综合可知，郑启线故障断线后，无母线越限情况发生，母线越限严重度为 0，峡鹅线、郑徐线、启陈线负载率分别达到 1.470 4、0.852 2 与 1.039 2，根据式(5)计算得出支路过载严重度为 2.208 8，总严重度为 2.208 8。

表 3 郑启线故障影响潮流变化情况

Table 3 Change of power flow under the fault influence of Zheng-qi transmission line

潮流变化 明显支路	故障前有功 潮流/MW	故障后有功 潮流/MW	极限传输 容量/MW	负载率
峡鹅线	416.49	573.17	389.81	1.470 4
郑徐线	298.16	445.08	522.27	0.852 2
启陈线	336.25	542.73	522.27	1.039 2
宣郑线	251.36	300.84	522.27	0.576 0
II 郑凤线	-227.21	-320.33	522.27	0.613 3
I 鹅启线	6.97	104.64	522.27	0.200 4
I 徐博线	104.05	161.34	522.27	0.308 9
II 鹅启线	7.06	115.43	522.27	0.221 0
I 陈洁线	164.45	201.26	522.27	0.385 4
II 陈洁线	164.45	201.26	522.27	0.385 4
I 郑陈线	-95.94	-223.53	522.27	0.428 0

根据表 4 所示的预测结果，28 日的舞动概率为 0.926 6，区域舞动等级为 3，因此系统舞动的可能性指标为 1.204 5，系统舞动风险严重等级为 H 级。

表 4 郑启线舞动故障风险严重等级

Table 4 Security level of Zheng-qi transmission line after galloping failure

预警 支路	后果严重 度指标	舞动可能 性指标	系统舞动风 险严重度	系统舞动风 险严重等级
郑启线	2.208 8	1.204 5	2.660 5	H

从实际情况来看，2010 年 2 月 28 日，220 kV 郑启线 1 号至 18 号杆塔于 28 日 12 时因恶劣天气引起导线舞动保护动作跳闸，郑州供电公司输电工程处迅速行动，安排事故巡线，对郑启线故障区段进行了全面巡视检查，现场发现导线发生大面积舞动现象，造成多处杆塔发生不同程度的破坏、基横担折断、部分杆件损坏，以及铁塔螺栓松脱等现象，舞动灾害影响严重，与舞动预测结果和线路故障后的电网风险分析结果相符。

4.2 算例 B

再以《历史舞动记录统计分析与验证表》中的 220 kV 唐白线为例。河南省 2010 年 2 月的一次寒潮过程，该线路于当月 10 日 14 时发生舞动，使用 BP 神经网络建立的舞动预警模型对线路进行预测，结果如图 7 所示。

当唐白线故障断线后，潮流变化情况如表 5 所示，可知 I 白青线、II 白青线、青唐线将会出现较大的潮流变化，但不会出现相关支路过载情况。

当唐白线故障断线后，母线电压变化情况如表 6 所示，其中荆关 220、贤能 220 母线分别出现轻微的电压越限预警状况。

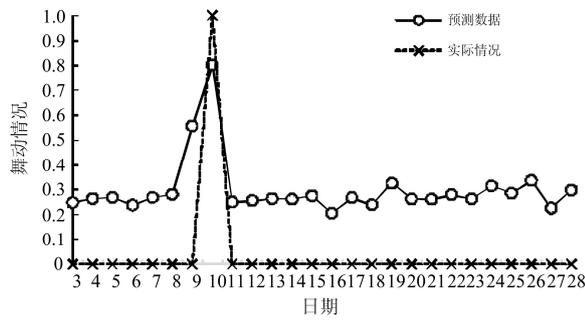


图7 文中方法对唐白线舞动预测情况

Fig. 7 Galloping forecast of Tang-bai transmission line using BP neural network

表5 唐白线故障影响潮流变化情况

Table 5 Change of power flow under the fault influence of Tang-bai transmission line

潮流变化 明显支路	故障前有功 潮流/MW	故障后有功 潮流/MW	极限传输 容量/MW	负载率
I 白青线	179.73	259.17	522.27	0.496 2
II 白青线	181.47	261.68	522.27	0.501 1
青唐线	125.20	297.68	522.27	0.570 0

表6 唐白线故障母线电压情况

Table 6 Condition of fault bus voltage of Tang-bai transmission line

故障线路	预警母线	预警母线电压	母线电压越限严重度
唐白线	荆关 220	0.947 1	0.263 6
	贤能 220	0.939 7	

综合可知,唐白线预警断线后,根据式(3)计算得出其造成的母线电压越限严重度为 0.263 6,无支路过载情况发生,支路过载严重度为 0,总严重度为 0.263 6。根据表 7 的预测结果,10 日唐白线的舞动概率为 0.803 6,区域舞动等级为 3,因此系统舞动的可能性指标为 1.044 7,系统舞动风险严重等级为 L 级。

表7 唐白线舞动故障风险严重等级

Table 7 Security level of Tang-bai transmission line after galloping failure

预警支路	后果严重度	舞动可能性指标	系统舞动风险值	系统舞动风险严重等级
唐白线	0.263 6	1.044 7	0.275 4	L

实际情况中,220 kV 唐白线于 2010 年 2 月 10 日 22 时 40 分出现暴风雪天气引发跳闸事故,对唐白线故障区段进行了全面巡视检查,认定为恶劣性天气及冰冻引起线路舞动保护动作跳闸。其 C 相故障重合不成功,距白河变 36 km,后试送成功,线

路上有线夹及挂线点螺栓松动,危害不大,属于低风险事件,与文中方法预警结果所述的低风险等级一致。

通过以上两个算例,验证了该方法在舞动灾害预警方面的有效性,利用气象预报信息有针对性地电力系统运行阶段的舞动风险进行评估与传统的基于预想事故集遍历方式的 $N-1$ 风险评估方法相比,不仅减少了计算量而且更具时效性和针对性,有助于电网调度和运维部门能够及时做出应急措施,将舞动灾害带来的损失降到最小。

5 结论

针对恶劣气象条件下电网的短期运行风险评估问题,本文在统计和分析输电线路舞动历史数据的基础上,结合线路舞动可能性指标以及故障后果严重度函数,建立了计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估模型,从整体上评价线路舞动后对电网运行风险的影响。通过本文研究,可以得出以下结论:

1) 本文以 BP 神经网络预测的舞动概率值和舞动分区图相结合来综合表征输电线路的舞动可能性,以母线电压越限和支路过载指标表征线路舞动故障后果,据此进行计及线路舞动预测的电网短期运行风险评估。通过河南电网的算例测试,表明了所提方法的有效性。相比于使用系统充裕性指标的电网可靠性评估,更能准确反映线路舞动对电网安全运行的影响。

2) 通过算例测试,发现某些关键线路因舞动概率较高,发生舞动故障后,存在大范围潮流转移导致的支路过载和母线电压越限问题。相比于传统 $N-1$ 安全校核使用预想事故集遍历系统风险,本文方法能减少 $N-1$ 风险评估的计算量,且更有针对性和时效性。评估结果有助于电网调度人员提前调整运行方式和线路运维人员采取除冰融冰等防舞措施,降低线路舞动对电网安全运行的影响。

参考文献

- [1] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等.输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J].高电压技术,2003,30(1):6-9.
YUAN Jihe, JIANG Xingliang, YI Hui, et al. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2003, 30(1): 6-9.
- [2] 王燕,皇甫成,杜志叶,等.覆冰情况下输电线路有限元计算及其结构优化[J].电力系统保护与控制,2016,44(8):99-106.
WANG Yan, HUANGFU Cheng, DU Zhiye, et al. Finite element calculation and structural optimization method

for the high voltage transmission line under icing condition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 99-106.

[3] 王守相, 张伯明, 郭琦. 基于时间裕度的全局电力系统暂态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 51-55.
WANG Shouxiang, ZHANG Boming, GUO Qi. Transient security risk assessment of global power system based on time margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 51-55.

[4] MAKAROV Y V, RESHETOV V I, STROEV A, et al. Blackout prevention in the United States, Europe and Russia[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(11): 1942-1955.

[5] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 1-7.
LI Xingyuan, WEI Wei, WANG Yuhong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 1-7.

[6] LI W, ZHOU J, XIONG X. Fuzzy models of overhead power line weather-related outages[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1529-1531.

[7] 方丽华, 熊小伏, 方嵩, 等. 基于电网故障与气象因果关联分析的系统风险控制决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 113-119.
FANG Lihua, XIONG Xiaofu, FANG Song, et al. Power system risk control decision based on cause and effect correlation analysis of fault and meteorology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 113-119.

[8] ENTRIKEN R, LORDAN R. Impacts of extreme events on transmission and distribution systems[C] // Power and Energy Society General Meeting, IEEE, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-10.

[9] 蒋兴良, 马俊, 王少华, 等. 输电线路冰害事故及原因分析[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 27-30.
JIANG Xingliang, MA Jun, WANG Shaohua, et al. Transmission lines' ice accidents and analysis of the formative factors[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 27-30.

[10] CHABART O, LILIE J L. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 967-976.

[11] LILIE J L, HAVARD D G. Galloping database on single and bundle conductors prediction of maximum amplitudes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 670-674.

[12] 李成榕, 吕玉珍, 崔翔, 等. 冰雪灾害条件下我国电网安全运行面临的问题[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 14-22.
LI Chengrong, LU Yuzhen, CUI Xiang, et al. Research issues for safe operation of power grid in china under ice-snow disasters[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 14-22.

[13] 王建, 熊小伏, 梁允, 等. 地理气象相关的输电线路风险差异评价方法及指标[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1252-1259.
WANG Jian, XIONG Xiaofu, LIANG Yun, et al. Geographical and meteorological factor related transmission line risk difference assessment: method and indexes[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1252-1259.

[14] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思(一)新的挑战与反思[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 1-6.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters, part I: new challenges and reflection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 1-6.

[15] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思(二)任务与展望[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 1-5.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters-part II: tasks and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-5.

[16] 公茂法, 张言攀, 柳岩妮, 等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 114-116.
GONG Maofa, ZHANG Yanpan, LIU Yanni, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 114-116.

[17] YADAV A, DASH Y, ASHOK V. ANN based directional relaying scheme for protection of Korba-Bhilai transmission line of Chhattisgarh state[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 128-144. DOI: 10.1186/s41601-016-0029-6.

[18] 张伯明, 吴素衣, 蔡斌, 等. 电网控制中心安全预警和决策支持系统设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 1-5.
ZHANG Boming, WU Sunong, CAI Bin, et al. Design of early warning and security counter measure system for electric power control centers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 1-5.

[19] 电力行业标准化技术委员会. 电力系统安全稳定导则: DL755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Power Industry Standardization Technical Committee. Technical guide for electric power system security and

- stability control: DL755—2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [20] 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 11-14
WANG Shaohua, JIANG Xingliang, SUN Caixin. Study status of conductor galloping on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 11-14.
- [21] FUJIMURA T, NAITO K, HASEGAWA Y, et al. Performance of insulators covered with snow or ice[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1979, 98(5): 1621-1631.
- [22] 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 覆冰导线舞动特性及其引起的导线动态张力[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 159-166.
WANG Shaohua, JIANG Xingliang, SUN Caixin. Characteristics of icing conductor galloping and induced dynamic tensile force of the conductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 159-166.
- [23] 廖峥, 熊小伏, 李新, 等. 基于 BP 神经网络的输电线路舞动预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 154-161.
LIAO Zheng, XIONG Xiaofu, LI Xin, et al. An early warning method of transmission line galloping based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 154-161.
- [24] WANG Jian, XIONG Xiaofu, ZHOU Ning, et al. Early warning method for transmission line galloping based on SVM and AdaBoost bi-level classifiers[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3499-3507.
- [25] LECUN Y, BOSER B, DENKER J S, et al. Handwritten digit recognition with a back-propagation network[C] // Advances in Neural Information Processing Systems, 1990: 396-404.
- [26] 国家电网公司. 舞动区域分级标准和舞动分布图绘制规则: Q GDW 11006—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
State Grid Corporation of China. Classification criteria for galloping region and drawing rule of galloping region distribution map: Q GDW 11006—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [27] 涂明, 张立春, 朱宽军, 等. 输电线路舞动区域划分方法[J]. 电力建设, 2011, 32(4): 26-28.
TU Ming, ZHANG Lichun, ZHU Kuanjun, et al. Zoning method for galloping of transmission lines [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(4): 26-28.
- [28] HALILCEVIC S S, GUBINA F, GUBINA A F. The uniform fuzzy index of power system security[J]. European Transactions on Electrical Power, 2010, 20(6): 785-799.
- [29] 国家电网公司. 国家电网公司电力系统电压质量和无功电力管理规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
State Grid Corporation of China. Power system voltage quality and reactive power management regulations of State Grid Corporation of China[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [30] 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.
- [31] 张勇军, 许亮, 吴成文. 计及多因素的电网冰灾风险评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 12-17.
ZHANG Yong, XU Liang, WU Chengwen. Research on ice disaster risk evaluation model of power system considering multi-factors[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 12-17.

收稿日期: 2017-04-18; 修回日期: 2017-07-10

作者简介:

褚双伟(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事输变电设备运维检修管理工作; E-mail: chushw@ha.sgcc.com.cn

熊小伏(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、电网气象灾害风险评估与预警等; E-mail: cqxxf@vip.sina.com

刘善峰(1986—), 男, 博士, 工程师, 主要从事输变电设备运行状态监测等相关研究工作。E-mail: liushanfeng@ha.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)