

考虑电网安全风险的融冰序列决策

周晓雨,李华强,刘沛清,吕歆瑶

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:基于可靠度理论和风险理论,综合考虑冰风荷载影响,提出冰灾天气下的覆冰线路故障概率模型,并与衡量事故后果的综合严重度指标相结合,构建覆冰风险指标反映覆冰线路故障对系统运行安全水平的影响;根据气象监测信息提出线路覆冰增长预测模型,构建系统覆冰度指标衡量电网全局覆冰水平;兼顾电网安全运行水平和系统覆冰发展趋势,综合覆冰风险指标和系统覆冰度指标构建融冰决策指标,提出融冰序列决策方案的制定方法。IEEE 30 节点系统仿真结果验证了所提方法的合理性与可行性。

关键词:冰灾;融冰策略;电网安全性;运行风险;覆冰预测;风险

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.023

0 引言

冰雪灾害对电网损害极大,大量输电线路因为过度覆冰而发生故障^[1],严重危害电力系统的安全运行,甚至造成巨大经济损失。为减小冰灾危害,对覆冰线路采取融冰措施是最直接有效的重要手段之一^[2]。然而,受到融冰装置配置水平及电网安全运行条件的限制,无法对所有覆冰线路同时展开融冰工作。因此,当电网出现大范围覆冰情况时,制定科学合理的融冰序列决策,对及时有效地开展融冰工作、提高融冰效率、降低电网安全运行风险有重要的意义。

目前针对电网冰灾的研究越来越受重视,主要集中在覆冰机理、覆冰监测、融冰技术、冰灾风险及防御策略几个方面。文献[3-4]针对线路覆冰机理,提出基于冰灾气象信息的覆冰预测模型;文献[5-6]对覆冰监测方法进行研究,提出构建覆冰监测系统对线路覆冰情况进行实时测量及预警;文献[7-9]对不同融冰技术在冰灾中的应用进行分析,提出融冰方法的实施方案及适用范围;文献[10-11]分析了影响冰灾中电网风险的多方面因素,并建立评估模型;文献[12]构建关于电网冰灾的防御策略,提出保证系统安全稳定的融冰措施。以上研究为冰灾防御工作提供了较强的理论支撑,然而对冰灾天气下,如何高效开展融冰工作,如何制定覆冰线路的融冰优先序列方案,目前的相关研究仍不完善,制定的一些预案和规范还很不系统。关于线路融冰序列的研究处于定性分析和框架设计阶段,尚缺乏具体、全面和实用的融冰序列决策模型,这也是当前亟需解决的问题。

线路融冰序列策略是多因素决策问题。在融冰过程中,由于系统受到外界气象环境和自身运行状态的影响,仅考虑历史冰情和线路覆冰程度是不全面的,还需要对电网实时运行安全水平进行捕捉和了

解,掌握融冰期间电网受冰灾影响的衍变过程。将安全分析及覆冰增长预测与融冰策略的制定相结合,最大限度保证电网安全稳定运行,增强电网抵御冰灾的能力。

本文首先根据可靠度理论,综合考虑冰风荷载对线路故障的影响,建立了冰灾情况下线路故障概率模型;其次,基于风险理论,结合线路覆冰故障概率与综合严重度评估指标,构建反映电网安全水平的覆冰风险指标;然后,根据基于气象信息的线路覆冰增长模型,建立系统覆冰度指标表征电网全局覆冰水平;进而综合考虑电网安全运行风险与融冰过程中的系统覆冰恶化程度,综合 2 个指标提出了融冰决策指标,并以此为依据制定具体的融冰序列策略。最后,以 IEEE 30 节点系统为算例,通过本文方法确定大范围冰灾下线路的融冰顺序,对仿真结果进行分析,证明所提方法的有效性和实用性。

1 冰灾天气下线路故障概率模型

1.1 可靠度理论

可靠度理论是分析和衡量结构安全性的有效方法^[13]。根据可靠度理论,可计算线路结构可靠性水平。在规定时间、规定条件下,元件能完成预定功能的概率为可靠度 P_t ;不能完成的概率为故障概率 P_f 。两者存在互补关系:

$$P_t + P_f = 1 \quad (1)$$

线路状态由作用荷载与线路强度共同决定,本文设线路强度为 M ,作用荷载为 Q ,则在结构可靠度计算中,线路的极限状态方程可表示为:

$$Z = M - Q = 0 \quad (2)$$

显然,当 $Z > 0$,线路强度能够承受作用荷载的影响,此时线路处于可靠状态;反之,当 $Z < 0$,线路处于故障状态。线路的可靠度为:

$$P_t = P(M > Q) = P(Z > 0) = \int_{Z > 0} f(x) dx \quad (3)$$

其中, $P(\cdot)$ 为概率; $f(x)$ 为系统变量的概率分布函数。

1.2 覆冰线路故障概率模型

冰灾中覆冰和风的综合荷载是引起线路故障的主要原因^[14], 冰荷载由覆冰厚度和冰密度决定, 风荷载主要受风速和风向的影响, 其中风向考虑垂直于导线的严重情况。假设冰风荷载沿线路均匀分布, 按工程近似处理, 线路单位长度承受的冰荷载 Q_i 如式(4)所示^[15]。

$$Q_i = \frac{\rho_i \pi g}{4} [(2H+D)^2 - D^2] \times 10^{-6} \quad (4)$$

其中, ρ_i 为冰的密度; H 为导线覆冰厚度; g 为重力加速度; D 为导线直径。

在水平方向上, 垂直线路走向产生的风荷载 Q_d 为:

$$Q_d = 10^{-3} \frac{\rho_k V_d^2}{2} (2H+D) \quad (5)$$

其中, ρ_k 为空气密度; V_d 为水平方向上垂直线路的风速。

垂直地面方向产生的风荷载 Q_l 为:

$$Q_l = 10^{-3} \frac{\rho_k V_l^2}{2} (2H+D) \quad (6)$$

其中, V_l 为垂直地面方向的风速。

冰风荷载是指线路承受的冰荷载和风荷载的合成荷载, 表示线路单位长度的受力情况, 通常以 N/m 为单位。在冰雪天气条件下, 线路单位长度承受的冰风荷载为:

$$Q_L = \sqrt{(Q_i + Q_d)^2 + Q_l^2} \quad (7)$$

线路强度是线路结构承受外界荷载的能力, 具有不确定性, 将其作为随机变量处理。根据统计数据, 元件材料强度的分散特性大多服从正态分布^[16]。线路强度的概率密度函数表达式为:

$$f_M(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{m-\bar{m}}{\sigma_m}\right)^2\right] \quad (8)$$

其中, σ_m 为线路强度的标准差; $\bar{m}$ 为线路强度的期望, 取线路设计荷载值。

根据 IEC60826—2003 标准^[17], 线路强度分布由变差系数 C_v 决定, 定义为:

$$C_v = \frac{\sigma_m}{\bar{m}} \quad (9)$$

通常 C_v 取值范围为 0.05~0.2。

对于当前冰风荷载, 线路强度分布大于冰风荷载的区域, 表示线路处于可靠状态; 冰风荷载大于线路强度分布的区域, 表示线路处于故障状态, 如图 1 所示。

当作用荷载为 Q_L 时, 线路可靠度为:

$$P_i = P(M > Q_L) = \int_{Q_L}^{+\infty} f_M(m) dm = \int_{Q_L}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{m-\bar{m}}{\sigma_m}\right)^2\right] dm \quad (10)$$

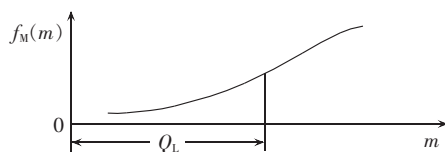


图 1 线路状态区域划分

Fig.1 Division of line status areas

则线路故障概率 P_f 为:

$$P_f = 1 - P_i \quad (11)$$

2 覆冰风险指标模型

2.1 综合严重度评估指标

本文从低电压、支路过载和负荷损失三方面构建综合严重度评估指标, 衡量覆冰线路故障对系统造成的影响。

2.1.1 低电压严重度指标

低电压严重度反映事故后系统母线电压下降的严重程度, 其函数如图 2 所示。

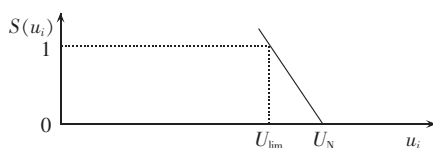


图 2 低电压严重度函数

Fig.2 Severity function of bus under-voltage

对应的节点低电压严重度表达式为:

$$S(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \geq U_N \\ \frac{U_N - u_i}{U_N - U_{lim}} & u_i < U_N \end{cases} \quad (12)$$

其中, u_i 为节点 i 的电压; U_N 为节点额定电压; U_{lim} 为节点低电压极限, 通常取为 U_N 的 90%。

由于不同节点和支路在系统中重要程度不同, 本文引入反映电网元件拓扑结构重要度的电气介数指标, 作为权重因子, 与运行状态严重度相结合^[18]。将节点电气介数作为权重, 定义系统低电压严重度指标为:

$$S_U = \sum_{i=1}^N B_e(i) S(u_i) \quad (13)$$

其中, $B_e(i)$ 为节点 i 的电气介数; N 为系统节点数量。

2.1.2 支路过载严重度指标

支路过载严重度反映事故后系统中输电线路传输功率过载的严重程度, 其函数如图 3 所示。

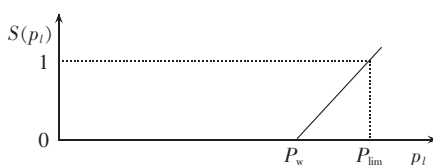


图 3 支路过载严重度函数

Fig.3 Severity function of branch overload

对应的支路过载严重度表达式为:

$$S(p_l) = \begin{cases} 0 & p_l \leq P_w \\ \frac{p_l - P_w}{P_{\lim} - P_w} & p_l > P_w \end{cases} \quad (14)$$

其中, p_l 为支路 l 的有功功率; $P_{\lim}$ 为支路极限传输功率; P_w 为支路功率风险阈值, 通常取为 $P_{\lim}$ 的 90%。

与低电压严重度类似, 将支路电气介数作为权重, 定义系统支路过载严重度指标为:

$$S_p = \sum_{l=1}^Y B_e(l) S(p_l) \quad (15)$$

其中, $B_e(l)$ 为支路 l 的电气介数; Y 为系统支路数量。

2.1.3 负荷损失严重度指标

冰灾事故发生后往往导致负荷损失, 严重时甚至会对一些重要负荷用户造成巨大的经济损失, 关注失负荷风险是很重要的。负荷损失一般存在以下情况: 负荷节点因为支路故障形成孤立节点导致的负荷损失; 故障后由于节点电压偏低, 低压减载装置动作造成的负荷损失。

由于负荷类型不同, 为反映不同负荷损失对系统影响程度的差异, 本文引入负荷经济因子作为权重, 定义负荷损失比例为:

$$L_{lp} = \frac{\sum_{i=1}^Z w_i L_i}{L_0} \times 100\% \quad (16)$$

其中, w_i 为失负荷节点 i 的经济因子; Z 为失负荷节点数; L_i 为失负荷节点 i 的负荷损失量; L_0 为事故前负荷总量。

负荷损失严重度函数如图 4 所示。

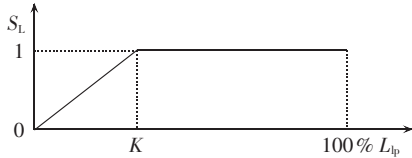


图 4 负荷损失严重度函数

Fig.4 Severity function of load loss

对应的负荷损失严重度表达式为:

$$S_L = \begin{cases} \frac{L_{lp}}{K} & L_{lp} \leq K \\ 1 & L_{lp} > K \end{cases} \quad (17)$$

其中, K 为负荷损失比例风险阈值, 本文取 30%^[19]。

2.2 风险指标

冰灾情况下影响电网稳定运行的因素主要有 2 类: 一是线路覆冰情况, 直接影响线路能否可靠运行; 二是线路故障造成的严重程度, 某些线路在电网中起着重要作用, 一旦发生故障会对电网运行安全造成较严重的危害。

风险表示为事故概率和后果的乘积, 本文将覆冰情况引入故障概率模型, 用综合严重度指标反映线路故障后果, 将两者结合得到线路覆冰故障下电力系统风险指标, 反映线路覆冰故障对系统安全风

险的影响, 衡量覆冰线路在冰灾中的危险级别, 其表达式为:

$$R_{\text{risk}} = P_f(S_U + S_p + S_L) \quad (18)$$

3 系统覆冰度指标模型

线路在融冰期间, 系统中其他运行线路仍处于冰灾天气下, 覆冰持续增长, 有些线路甚至出现严重覆冰现象, 导致系统整体覆冰程度恶化, 安全水平降低, 对电网危害很大。因此, 选择融冰线路时, 不仅要考虑系统当前运行水平, 还应考虑融冰期间电网的覆冰发展情况。本文对线路覆冰增长进行预测, 构建系统覆冰度指标衡量线路融冰结束时电网全局覆冰水平, 反映不同线路融冰过程中系统的覆冰恶化程度。

3.1 线路覆冰增长模型

文献[3]考虑风速和降雨对覆冰的影响, 计算导线捕获水滴冻结成冰的总量, 得到单位小时覆冰厚度增长量 ΔH 为:

$$\Delta H = \frac{1}{\rho_i \pi} [(\rho_w H_g)^2 + (3.6 V W)^2]^{1/2} \quad (19)$$

其中, $W = 0.067 H_g^{0.846}$ 为空气液态水含量; ρ_w 为水的密度; V 为覆冰时的风速; H_g 为降水量。

该模型假设覆冰密度为固定值, 但不同覆冰性质下的冰密度差异较大^[20]。覆冰性质受温度影响, 温度较高时雨淞成分所占比重大, 冰密度更大, 温度较低时则反之。因此, 为提高预测精度, 考虑冰密度随温度的变化, 冰密度 ρ_i 表达式为:

$$\rho_i = \begin{cases} 0.11 r^{0.76} & r \leq 10 \\ r(r+5.61)^{-1} & 10 < r \leq 60 \\ 0.92 & r > 60 \end{cases} \quad (20)$$

$$r = \frac{-v_\sigma d_\delta}{2C} \quad (21)$$

其中, d_δ 为云雾液滴中值体积直径; v_σ 为云雾液滴撞击速度; C 为空气温度。

计及 t 时刻线路覆冰厚度 H_t , 预测 Δt 小时后线路覆冰厚度为:

$$H(t + \Delta t) = H_t + \Delta H \Delta t \quad (22)$$

其中, $H(t + \Delta t)$ 为预测的 $t + \Delta t$ 时刻线路覆冰厚度。

3.2 系统覆冰度指标

覆冰率可定量描述线路的覆冰情况, 定义为线路覆冰厚度 H 与设计覆冰厚度 H_n 的比值, 表达式如下:

$$\eta = \frac{H}{H_n} \quad (23)$$

为表征融冰期间线路覆冰增长的严重程度, 定义线路覆冰严重度函数如图 5 所示。

对应线路 l 的覆冰严重度函数表达式为:

$$S(\eta_l) = \begin{cases} 0 & \eta_l \leq \lambda_1 \\ \frac{\eta_l - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} & \eta_l > \lambda_1 \end{cases} \quad (24)$$

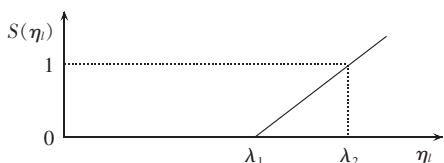


图 5 线路覆冰严重度函数

Fig.5 Severity function of line icing

其中, λ_1 为融冰门槛覆冰率^[12]; λ_2 为紧急融冰覆冰率。

电网受冰灾天气影响范围大、影响程度不同,因此,覆冰线路常表现为区域性。当某条线路进行融冰时,其他未融冰线路的覆冰率仍随冰灾天气影响而持续增长,假设某线路融冰时间为 T 小时,根据覆冰增长预测模型,得到融冰 T 小时后未进行融冰线路的覆冰率,为表征融冰 T 小时后电网的全局覆冰水平,定义系统覆冰度指标为:

$$\eta_{l-T} = \frac{H_l + T\Delta H}{H_n} \quad (25)$$

$$R_\eta = \sum_{l=1}^Y S(\eta_{l-T}) \quad (26)$$

其中, η_{l-T} 为 T 小时后线路 l 的覆冰率。

4 电网融冰序列策略

4.1 融冰决策指标

为了最大限度保证电网稳定运行,降低系统安全运行风险,有效控制融冰期间系统覆冰恶化趋势,本文从以下两方面出发制定融冰决策指标:

(1) 考虑冰灾中覆冰线路故障对电网安全风险水平的影响,风险越大的线路,危险级别高,越应该优先进行融冰;

(2) 考虑线路融冰期间系统中其他线路覆冰增长情况,系统覆冰度指标越小的线路,该线路融冰后系统全局覆冰水平越低,融冰顺序应越靠前。

基于以上 2 个原则,将覆冰风险指标与系统覆冰度指标相结合,制定融冰决策指标,选择优先融冰的线路。其表达式如下:

$$R = \alpha R_{\text{risk}} + \beta R_\eta^{-1} \quad (27)$$

其中, α 、 β 为决策指标权重因子。

4.2 融冰序列决策方案

线路受冰灾天气影响,其覆冰程度随时间而逐渐恶化,导致系统安全运行水平不断降低,全局覆冰程度持续加深,因此,冰灾对电网的影响为渐进累积的过程。考虑电网受冰灾影响的衍变过程,对线路覆冰增长进行预测,综合考虑电网运行风险及系统全局覆冰水平得到融冰决策指标,进而根据线路覆冰预测情况和融冰决策指标确定优先融冰线路,制定融冰序列决策方案。

根据覆冰率对线路进行划分,对线路融冰序列决策的具体规则如下。

(1) 覆冰率大于 λ_1 的线路,进入覆冰预警状态,形成融冰线路集。

(2) 融冰线路集中,覆冰率大于 λ_2 的线路,当前覆冰情况严重,极易发生断线故障,甚至导致倒塔、倒杆的事故,需要及时采取措施,优先考虑对这些线路进行融冰。此时线路进入紧急融冰状态,其覆冰严重程度成为影响融冰序列的主要因素,覆冰率越大,则融冰顺序越靠前。

(3) 融冰线路集中,覆冰率小于 λ_2 的线路,融冰时应该综合考虑电网的安全运行水平和覆冰发展情况,根据融冰决策指标确定线路融冰先后顺序,指标越大的线路,融冰顺序越靠前。

覆冰线路融冰序列决策流程图如图 6 所示。

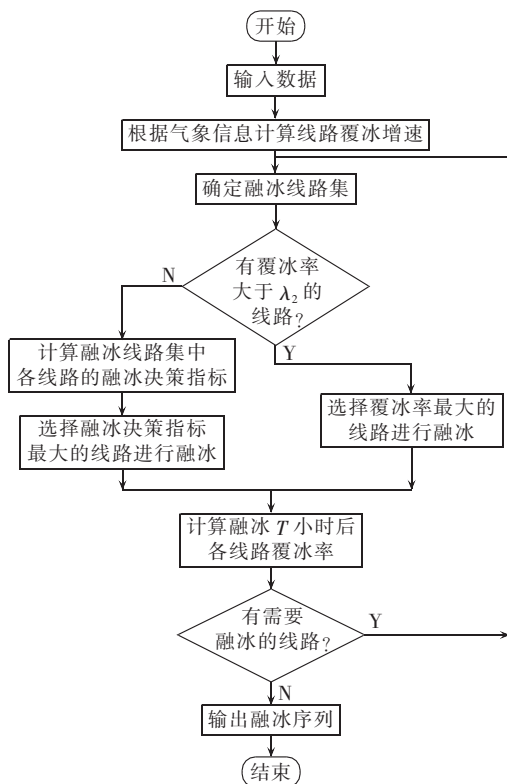


图 6 融冰序列决策流程图

Fig.6 Flowchart of decision-making scheme of ice-melting sequence

5 仿真分析

5.1 概述

本文以图 7 所示 IEEE 30 节点系统为例,假设电网受冰灾天气影响,部分线路出现覆冰情况。仿真过程中,参数设置如下:线路设计荷载值 $\bar{m}=10 \text{ N/m}$,变差系数 $C_v=0.15$,线路设计覆冰厚度 $H_n=10 \text{ mm}$,线路直径根据型号确定;对覆冰线路采取融冰措施,假设线路融冰时间为 $T=2 \text{ h}$,融冰门槛覆冰率 $\lambda_1=0.4$,紧急融冰覆冰率 $\lambda_2=0.7$,决策指标权重因子 $\alpha=\beta=0.5$ 。

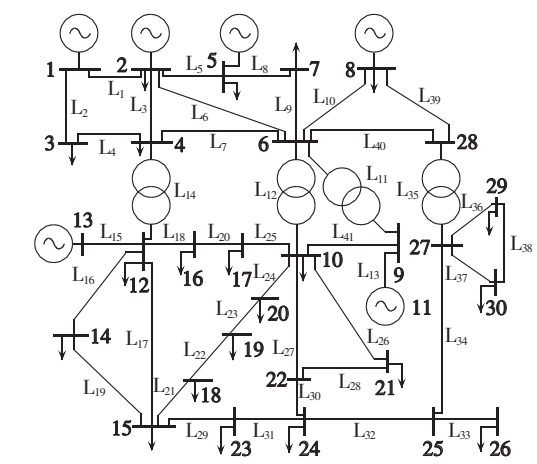


图 7 IEEE 30 节点系统接线图
Fig.7 Wiring diagram of IEEE 30-bus system

本文线路实时覆冰厚度和气象数据可以由监测系统获得,假设气象预报某日 10:00—22:00 有持续 12 h 的冰冻气象灾害,为分析方便,取该时段气象因素的平均值,可得到 10:00 电网覆冰情况及线路覆冰增速如表 1 所示。

表 1 10:00 线路覆冰情况及覆冰增速
Table 1 Line icing situation and growth rate at 10:00

线路编号	覆冰厚度/mm	覆冰率	覆冰增速/(mm·h ⁻¹)
L ₁	3	0.3	0.6284
L ₂	5	0.5	0.4548
L ₄	3	0.3	0.4970
L ₇	2	0.2	0.3361
L ₈	4	0.4	0.2845
L ₉	1	0.1	0.5100
L ₁₀	8	0.8	0.4675
L ₂₀	4	0.4	0.3162
L ₂₄	3	0.3	0.4022

5.2 线路融冰序列决策

依照本文方法确定覆冰线路的融冰序列,首先根据电网当前覆冰情况,筛选出覆冰率大于 0.4 的线路,得到融冰线路集为 {L₂, L₈, L₁₀, L₂₀}。此时线路 L₁₀ 的覆冰率为 0.8,其覆冰率超过 0.7,进入紧急融冰状态。因此,确定第一条融冰线路为 L₁₀,避免该线路因严重覆冰而发生故障。

在 10:00 覆冰线路冰厚数据的基础上,根据覆冰增长预测,计算覆冰线路不同时间段的覆冰厚度。按照线路覆冰率和相应的融冰决策指标选择优先融冰的线路,其中 12:00—16:00 覆冰线路融冰排序结果如表 2 所示。

由表 2 可知,在线路 L₁₀ 进行融冰 2 h 后,线路 L₁ 覆冰厚度达到融冰门槛,得到 12:00 融冰线路集为 {L₁, L₂, L₈, L₂₀}。其中线路 L₂ 在 12:00 冰厚严重,线路承受的冰风荷载较大,对应的故障概率更大;并且 L₂ 故障后综合严重度指标较高,表明该线路在系统中起着重要作用,一旦发生故障极易引起支路潮流过

表 2 12:00—16:00 线路融冰排序结果
Table 2 Line ice-melting sequence from 12:00 to 16:00

时刻	线路	覆冰厚度/mm	覆冰风险指标	系统覆冰度指标	融冰决策指标	优先融冰线路
12:00	L ₁	4.2568	1.6252	2.2729	1.3045	L ₂
	L ₂	5.9096	2.0325	1.8377	1.3757	
	L ₈	4.5690	1.4282	2.3981	0.9226	
	L ₂₀	4.6324	0.7038	2.3558	1.0833	
14:00	L ₁	5.5136	1.8433	2.3587	1.1336	L ₁
	L ₄	4.9880	1.4485	2.6215	0.9150	
	L ₈	5.1380	1.5118	2.7131	0.9402	
	L ₂₀	5.2648	0.7496	2.6297	0.5649	
16:00	L ₂₄	4.6088	0.5435	2.8111	0.4496	L ₄
	L ₄	5.9820	1.5992	2.9306	0.9702	
	L ₇	4.0166	1.3903	3.6930	0.8305	
	L ₈	5.7070	1.6007	3.1640	0.9584	
	L ₉	4.0600	0.9151	3.6016	0.5963	
	L ₂₀	5.8972	0.7987	3.0794	0.5617	
	L ₂₄	5.4132	0.5888	3.1834	0.4515	

载、节点电压偏低及负荷损失的严重后果。由此得到 L₂ 的覆冰风险指标靠前,表明 L₂ 危险级别较高,故障后对电网安全运行风险影响大,将其进行融冰可降低系统的安全风险水平。同时, L₂ 的系统覆冰度指标低于其他线路,表明将其融冰后系统的全局覆冰水平最低。将以上 2 个指标综合考虑,得到 L₂ 的融冰决策指标高于其他线路,因此将其确定为优先融冰线路,可最大限度降低系统的安全运行风险,增强电网抵御冰灾的能力。

在表 2 的仿真结果中,16:00 线路 L₄ 和 L₈ 的覆冰风险指标均靠前,但是线路 L₈ 的系统覆冰度指标更大,表明在其融冰过程中系统全局覆冰水平较高。线路 L₄ 和 L₈ 的覆冰增长曲线如图 8 所示,假设将线路 L₈ 先进行融冰,在 16:00—18:00 融冰期间,线路 L₄ 覆冰增长较快,18:00 覆冰厚度为 6.976 mm,覆冰严重度达到 0.992,导致系统覆冰度指标较高。结合表 2,16:00 将 L₄ 确定为优先融冰的线路,可以降低系统全局覆冰水平,控制电网覆冰恶化程度。

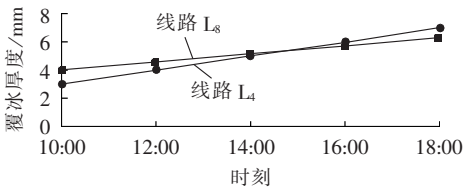


图 8 线路 L₄ 和 L₈ 的覆冰增长曲线
Fig.8 Icing growth curves of L₄ and L₈

在此次冰灾 12 h 中,根据本文方法制定的融冰序列为 L₁₀—L₂—L₁—L₄—L₈—L₂₀。冰冻灾害过后,系统中仍有线路需要进行融冰来防止线路故障给对电网带来的影响。各线路覆冰不再增长,根据线路覆冰率和风险指标进行排序,融冰序列为 L₇—L₉—L₂₄—L₁₀,其中线路 L₁₀ 在冰冻天气已经进行过融冰处理,但是因其所处地区气象条件的原因,需要进行二次融

冰处理。

6 结论

在大面积冰灾的情况下,电网稳定运行受到严重威胁。为防止线路因覆冰发生故障,需要提前制定线路融冰策略,及时开展融冰工作。本文基于可靠度理论和风险理论构建覆冰风险指标,基于覆冰增长模型构建了系统覆冰度指标,进而建立了融冰决策指标,帮助运行人员全面把握电网运行水平和冰情发展情况,在融冰过程中最大限度保证电网安全稳定运行,降低系统安全风险水平,提高电网抗冰灾的能力。同时,提出了一套具体的融冰序列决策方法,该方法结合实际,考虑全面,可为融冰安排及相关方案的制定提供合理的参考。

参考文献:

- [1] 李正,杨靖波,黄璜,等. 2008 年输电线路冰灾倒塔原因分析[J]. 电网技术,2009,33(2):31-35.
LI Zheng,YANG Jingbo,HUANG Huang,et al. Analysis on transmission tower toppling caused by icing disaster in 2008[J]. Power System Technology,2009,33(2):31-35.
- [2] 潘力强,张文磊,汤吉鸿,等. 2008 年湖南电网特大冰灾事故综述[J]. 电网技术,2008,32(26):20-25.
PAN Liqiang,ZHANG Wenlei,TANG Jihong,et al. Overview of the extraordinarily serious ice calamity to Hunan Power Grid in 2008[J]. Power System Technology,2008,32(26):20-25.
- [3] JONES K F. A simple model for freezing rain ice loads[J]. Atmospheric Research,1998,46(1):87-97.
- [4] 刘和云,周迪,付俊萍,等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):44-47.
LIU Heyun,ZHOU Di,FU Junping,et al. A simple model for predicting glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(4):44-47.
- [5] 杨浩,吴畏. 基于三维重建的绝缘子覆冰图像监测[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):92-98.
YANG Hao,WU Wei. Insulator icing monitoring based on 3D image reconstruction[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):92-98.
- [6] 黄新波,马龙涛,肖渊,等. 均匀覆冰下的架空线有限元找形分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):72-76.
HUANG Xinbo,MA Longtao,XIAO Yuan,et al. Form-finding analysis based on finite element method for line with uniform ice-coating[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):72-76.
- [7] HORWILL C,DAVIDSON C C,GRANGER M,et al. An application of HVDC to the de-icing of transmission lines[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition,2005/2006 IEEE PES. [S.l.]:IEEE,2006:529-534.
- [8] WANG C,WEN J,LI S,et al. Design on DC de-icing schemes for high voltage transmission line[C]//2010 5th International Conference on Critical Infrastructure(CRIS). [S.l.]:IEEE,2010:1-5.
- [9] 郑欢,江道灼,金文德,等. 基于电磁感应原理的绝缘子防(融)冰技术方案探讨[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):135-138.
ZHENG Huan,JIANG Daozhuo,JIN Wende,et al. Insulator de-icing based on electromagnetic induction principle[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):135-138.
- [10] 潘斌,张勇军,黄慧. 多因子电网冰灾风险评估建模[J]. 电网技术,2012,36(5):102-106.
PAN Bin,ZHANG Yongjun,HUANG Hui. Modeling for multi-factor risk assessment on ice disaster of power system[J]. Power System Technology,2012,36(5):102-106.
- [11] TOM B,GUTWIN P. Application of BCTC standardized risk estimation model to assess risk due to ice storms[C]//8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames,Iowa,Canada:[s.n.],2004:12-16.
- [12] 刘文涛,和识之,陈亦平,等. 基于直流融冰的电网大面积冰灾防御策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):102-106.
LIU Wentao,HE Shizhi,CHEN Yiping,et al. The DC melting ice grid area ice storm defense strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(11):102-106.
- [13] 冯经军,柳春光,冯娇. 输电塔线在覆冰与风载下的可靠性分析[J]. 水电能源科学,2011,29(10):203-206.
FENG Jingjun,LIU Chunguang,FENG Jiao. Reliability analysis of transmission tower-line considering wind and icing load[J]. Water Resources and Power,2011,29(10):203-206.
- [14] 孙羽,王秀丽,王建国,等. 架空线路冰荷载风险建模及模糊预测[J]. 中国电机工程学报,2011,31(7):21-28.
SUN Yu,WANG Xiuli,WANG Jianxue,et al. Wind and ice loading risk model and fuzzy forecast for overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(7):21-28.
- [15] 谢云云,薛禹胜,文福拴,等. 冰灾对输电线路故障率影响的时空评估[J]. 电力系统自动化,2013,37(18):32-41.
XIE Yunyun,XUE Yusheng,WEN Fushuan,et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(18):32-41.
- [16] 武淑琴,赵吉斌,张祖明. 强度为正态分布应力为其它分布的可靠度求解[J]. 机械设计与制造,2006(8):31-32.
WU Shuqin,ZHAO Jibin,ZHANG Zuming. Reliability solution of strength with normal distribution and stress with different ones[J]. Machinery Design & Manufacture,2006(8):31-32.
- [17] International Electro-technical Commission. IEC/IEC60826:2003 design criteria of overhead transmission lines[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2003.
- [18] 赵阳,李华强,王伊渺,等. 基于复杂网络理论和条件概率的灾难性事故风险评估方法[J]. 电网技术,2013,37(11):3190-3196.
ZHAO Yang,LI Huaqiang,WANG Yimiao,et al. A complex network theory and conditional probability based risk assessment method for disastrous accidents[J]. Power System Technology,2013,37(11):3190-3196.
- [19] 国务院. 电力安全事故应急处置和调查处理条例[Z]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [20] MAKKONEN L. Modeling of ice accretion on wires[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology,1984,23(6):929-939.

作者简介:



周晓雨

周晓雨(1991—),女,四川资阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统安全分析及预防控制(E-mail:1281578145@qq.com);

李华强(1965—),男,四川成都人,教授,博士,长期从事电力系统分析、稳定及优化问题研究。

Decision-making scheme of ice-melting sequence considering grid safety risk

ZHOU Xiaoyu,LI Huaqiang,LIU Peiqing,LÜ Xinyao

(School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

Abstract: Based on the reliability theory and risk theory and with the consideration of wind and ice loads, a failure probability model of icing lines in the ice disaster is proposed,which is combined with the comprehensive severity index for measuring the consequence of accident to build an icing risk index for reflecting the influence of faulty iced lines on the safety of system operation. According to the monitored meteorological information,a line-icing prediction model is proposed and a system icing index is built to measure the grid-wide icing level. An ice-melting index is built by combining the icing risk index with the icing level index,which considers both the safety level of grid operation and the development tendency of grid-wide icing,and a decision-making scheme of ice-melting sequence is proposed. The simulative results of IEEE 30-bus system verify the rationality and feasibility of the proposed scheme.

Key words: ice disaster; ice-melting strategy; grid safety; operational risk; icing prediction; risks

.....
(上接第 140 页 continued from page 140)

Influence of insulated ground wire installation
on lightning current shunt by tower

CHEN Kui¹,CAO Xiaobin¹,WU Guangning¹,YI Zhixing¹,MA Yutang²,FAN Jianbin³

- (1. School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China;
- 2. Yunnan Electric Power Test Institute Co.,Ltd.,Electric Power Research Institute,Kunming 650051,China;
- 3. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: The lightening model of power transmission line with wholly insulated installation of ground wire is established for studying the influences of lightening current amplitude,tower grounding resistance and tower span on the lightning current shunt by tower,which shows that,it is mainly influenced by the number of insulation gap breakdown when the lightning current is smaller,for example,the maximum difference of shunt coefficient between the insulated and directly-earthed installations of ground wire is 9% when the lightning current amplitude is 1 kA;it is mainly influenced by the grounding resistance of tower when the lightning current amplitude is larger than 20 kA and there are five or more insulation gap breakdowns. Therefore,it is not necessary to consider the influence of insulated installation of ground wire during the calculation of line lightening resistant level.

Key words: overhead transmission line; insulated ground wire; shunt coefficient; lightning current; grounding resistance; tower span