

# 安稳风险动态约束下综合能源支撑的 输电线路融冰优化策略

曾华荣<sup>1,2</sup>, 雷业涛<sup>3</sup>, 马章峰<sup>4</sup>, 杨旗<sup>1,2</sup>, 古庭赞<sup>1</sup>, 曹杰<sup>4</sup>, 安甦<sup>4,5</sup>

(1.贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 555002; 2.南方电网防冰减灾联合实验室, 贵州 贵阳 555002; 3.北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192; 4.贵州电网有限责任公司调度通信中心, 贵州 贵阳 555002; 5.贵州大学, 贵州 贵阳 555002)

**摘要:** 针对现有的电网输电线路融冰方案决策过程耗时长、存在运行安稳风险而导致电网应对严重冰灾决策能力不足的问题, 文章提出了安稳风险动态约束下综合能源支撑的输电线路融冰优化策略。首先, 根据气象数据建立覆冰增长模型, 分析输电线路覆冰增长与线路故障的对应关系, 建立线路停运概率模型, 并量化线路停运的损失程度; 其次, 分析基于综合能源改变线路潮流以减缓线路覆冰增长机理, 并考虑综合能源配电网融冰风险约束, 建立基于综合能源的线路融冰模型, 在此基础上, 提出了安稳风险动态约束下综合能源支撑的输电线路融冰优化方法, 基于拉格朗日松弛方法进行迭代求解。采用 IEEE RTS-79 进行融冰算例仿真, 研究结果表明, 基于该策略可以提高输电线路融冰方案决策效率, 并保证电网的安全稳定运行。

**关键词:** 安稳风险; 输电线路; 融冰优化; 综合能源

**中图分类号:** TK51; TM612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)05-0704-07

## 0 引言

随着新型电力系统建设以及经济社会的发展, 我国的输电线路建设规模将不断扩大, 输电线路架构也将日益复杂<sup>[1,2]</sup>。输电线路覆冰是电网面临的一种常见灾害, 如果输电线路出现大面积覆冰, 将会对电网的安全运行产生较大影响<sup>[3,4]</sup>。2005年, 湖南有4条500 kV线路因覆冰跳闸, 河南电网因大面积严重覆冰与华中电网的主网断开<sup>[5]</sup>。尤其是2008年春节期间, 南方的结冰灾害导致线路结冰厚度超过30 mm, 仅湖南、江西、浙江、贵州等500 kV输电线路杆塔的倒塔数量就超过600组<sup>[6,7]</sup>。2020年12月, 贵州、广西等区域电网由于覆冰严重导致大面积断线故障<sup>[8]</sup>。

国内外学者对于输电线路覆冰的影响因素进行了大量研究。文献[9]分析了广西区域气候、地形、海拔等因素对输电线路覆冰的影响。文献[10]根据两个不同区段输电线路的覆冰监测数据, 采用灰色关联法分析了微气象参数和输电线路温度对输电线路覆冰的影响。结果表明, 风速是最大的影响因素, 其次是环境温度、线路温度, 最后是空气的相对湿度。文献[11]进行了结冰影响

因素的深度分析, 并定义了公式和步骤, 以探索结冰与天气之间的关系。文献[12]采用灰色综合分析方法, 包括灰色关联法和灰色斜率校正法, 对输电线路覆冰的影响因素进行了分析。

为了积极应对电网覆冰的危害, 国内外研究机构提出了各种除冰或融冰方法, 如机械法、热熔法和自然除冰法<sup>[13]</sup>。其中, 基于热融法的直流融冰技术的融冰效果较好, 被广泛地应用于实际工程中。文献[14]分析了直流融冰技术在高压线路和长距离线路上的融冰特性。现有的相关文献缺乏合理的输电线路融冰计划, 导致融冰决策过程存在工作量大、耗时较长等问题。

与长距离输电线路不同, 综合能源系统中的输电线路距离短、容量小。但随着电网中综合能源耦合程度的不断加深, 已有学者充分分析了综合能源系统中的输网配网协同优化, 以往输配独立运行模式已不适用。若将综合能源用于输电线路融冰优化, 则会大幅减少系统运行成本, 提高输电线路融冰效率。

本文提出一种考虑安稳风险动态约束下综合能源支撑的输电线路融冰优化策略。首先, 分析冻

收稿日期: 2022-12-28。

基金项目: 南方电网重点科技项目(066600KK52210005)。

作者简介: 曾华荣(1969-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事输变电设备智能运维及防冰减灾技术工作。E-mail: supeng1024@163.com

雨密度、风速等因素对覆冰增长的影响;其次,根据覆冰厚度计算线路故障概率,并根据负荷重要度量化配电网线路断线风险;最后,研究综合能源接入后对配电线路潮流的影响,分析基于综合能源进行融冰时的配电线路电压、电流特性。在此基础上,建立考虑安全稳定约束的输电线路融冰方案优化模型,并采用拉格朗日松弛方法将原问题分解为电网运行成本问题和覆冰增长问题进行迭代求解。采用 IEEE RTS-79 进行融冰算例仿真,仿真结果验证了本文所提的输电线路融冰优化策略的有效性。

### 1 线路覆冰情况下的安稳风险分析

在进行融冰方案优化前,须要对线路覆冰增长特性和断线风险进行研究,以保证融冰优化方案的合理性。

#### 1.1 覆冰增长模型

气象条件是输电线路覆冰的主要影响因素,考虑气象条件的输电线路覆冰增长特性可表示如下<sup>[15]</sup>:

$$\Delta R = \frac{1}{\rho_i \pi} \sum_{j=1}^{\tau_1} \sqrt{(\rho_0 S_j)^2 (3600 V_j \cdot 0.067 S_j^{0.846} \alpha_d)^2} \quad (1)$$

式中: $R$ 、 $\rho_i$ 、 $\rho_0$  分别为覆冰增长量、覆冰密度和冻雨密度; $S_j$ 、 $V_j$ 、 $\tau_1$  分别为降水强度、风速和冻雨持续时间; $\alpha_d$  为不同地理影响下覆冰修正因子。

$$\alpha_d = \begin{cases} 1.0 & \text{平原地区} \\ 1.0 \sim 1.2 & \text{郊区} \\ 0.9 \sim 1.0 & \text{市区} \end{cases} \quad (2)$$

#### 1.2 配电网线路断线风险

配电网覆冰线路  $l$  的故障概率  $P[R_l(T)]$  为

$$P[R_l(T)] = p_0 + (1-p_0) \frac{R_l(T)}{R_{l,n}} \quad (3)$$

式中: $p_0$  为配电网线路  $l$  的初始故障概率; $R_l(T)$ 、 $R_{l,n}$  分别为配电网线路  $l$  的覆冰厚度和最大允许覆冰厚度。

配电网线路负荷损失度  $S_{ev,l,T}$  计算如下:

$$S_{ev,l,T} = \sum_{i \in l} \omega_{i,T} P_i \quad (4)$$

式中: $\omega_{i,T}$ 、 $P_i$  分别为节点  $i$  处负荷重要度的权重和出力。

配电网线路  $l$  的断线风险  $C_{melt}$  可量化为

$$C_{melt} = P[R_l(T)] S_{ev,l,T} \quad (5)$$

## 2 基于综合能源的配电线路融冰模型

电、气、热综合能源系统的耦合程度不断加深,同时输网、配网间的多能双向流动日益加剧。为实现全网资源的优化配置和运行效率的提升,有必要将电、气、热多能耦合的主动配电网与输电网进行动态协调,充分发挥各层系统中多能流资源的互联互济作用,在配网层实现电、气、热的深度耦合与能源转换,以降低用能成本<sup>[4]</sup>,在输网层实现输配协同,提升系统的灵活性。

输电导线覆冰增长量与线路损耗发热量存在负相关性。因此,可以采取综合能源协调潮流调整的方式来增大覆冰线路的电流,通过增大线损焦耳热抑制线路覆冰增长。引入电、气、热综合能源协调优化可在多能耦合的基础上,改变系统潮流特性,使主动配电网对多能互补的支持融入到输电线路融冰优化策略中。

### 2.1 综合能源能量调节特性

综合能源耦合矩阵可表示如下:

$$\begin{bmatrix} P_{EOUT} \\ P_{HOUT} \\ P_{GOUT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{ee} & \varepsilon_{he} & \varepsilon_{ge} \\ \varepsilon_{eh} & \varepsilon_{hh} & \varepsilon_{gh} \\ \varepsilon_{eg} & \varepsilon_{hg} & \varepsilon_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{EIN} \\ P_{HIN} \\ P_{GIN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $P_{EIN}$ 、 $P_{EOUT}$  分别为电能输入与输出; $P_{HIN}$ 、 $P_{HOUT}$  分别为热能输入与输出; $P_{GIN}$ 、 $P_{GOUT}$  分别为气能输入与输出; $\varepsilon_{ee}$ 、 $\varepsilon_{hh}$ 、 $\varepsilon_{gg}$  分别为电、热、气的自耦合系数; $\varepsilon_{he}$ 、 $\varepsilon_{eh}$  分别为热电、电热耦合系数; $\varepsilon_{ge}$ 、 $\varepsilon_{eg}$  分别为气电、电气耦合系数; $\varepsilon_{gh}$ 、 $\varepsilon_{hg}$  分别为气热、热气耦合系数。

$$\sum P_{OUT} \Delta t = \sum P_{IN} \Delta t \quad (7)$$

$$\sum P_{OUT} \Delta t = P_{EOUT} \Delta t_1 + P_{HOUT} \Delta t_2 + P_{GOUT} \Delta t_3 \quad (8)$$

$$\sum P_{IN} \Delta t = P_{EIN} \Delta t_1 + P_{HIN} \Delta t_2 + P_{GIN} \Delta t_3 \quad (9)$$

式中: $P_{IN}$ 、 $P_{OUT}$  分别为系统输入、输出的功率; $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t_3$  分别为电、气、热系统的时间常数; $\Delta t$  为系统调度时间间隔。

基于综合能源的潮流调节如下:

$$\begin{cases} Q_{eg,k,n} - Q_{eh,k,n} = \sum_{m \in S_e} q l_{k,mm}, \forall k \in \varphi_k, \forall mn \in \varphi_{em} \\ V_{k,m} = V_{k,n} - (r_{k,mm} p l_{k,mm} + x_{k,mm} q l_{k,mm}) / V_{REFe} \\ P_{w,k,n} + P_{eg,k,n} - P_{eh,k,n} = \sum_{m \in S_e} p l_{k,mm} \\ V_{n,\min} \leq V_{k,n} \leq V_{n,\max}, \forall k \in \varphi_k, \forall n \in \varphi_n \end{cases} \quad (10)$$

式中： $P_{eg,k,n}$ 、 $Q_{eg,k,n}$  分别为  $k$  时段节点  $n$  处火电的有功和无功输出； $pl_{k,mn}$ 、 $ql_{k,mn}$  分别为  $k$  时段线路  $mn$  的有功和无功功率； $P_{w,k,n}$  为  $k$  时段节点  $n$  处综合能源机组  $w$  的输出功率； $V_{k,n}$  为  $k$  时段节点  $n$  处的电压幅值； $V_{REFe}$  为电压标称值； $r_{k,mn}$ 、 $x_{k,mn}$  分别为线路  $mn$  的阻抗和电抗； $V_{n,max}$ 、 $V_{n,min}$  分别为节点  $n$  处电压的上、下限； $\varphi_{em}$  为电力线路的集合； $\varphi_k$ 、 $\varphi_n$  分别为综合能源调度时间集合和节点集合。

### 2.2 综合能源融冰优化的风险分析

利用综合能源改变潮流实现融冰优化，须要保证线路电流安全。配电网线路最大允许融冰电流可表示为<sup>[16]</sup>

$$I_{melt} = \sqrt{\frac{7.24 \left( \frac{318+0.5t_2}{1000} \right) \varepsilon d + 0.7 \left( \frac{Vd}{2} \right)^{\frac{3}{4}} (90-T_e)}{r_{90}}} \quad (11)$$

式中： $I_{melt}$ 、 $t_2$ 、 $T_e$  分别为最大融冰电流、外界温度和导线温度； $r_{90}$ 、 $d$  分别为导线的单位长度电阻和导线直径； $V$  和  $\varepsilon$  分别为风速和辐射系数，冰、霜、铝的辐射系数分别为 0.64、0.32、0.11 W/(m<sup>2</sup>·°C)。

综合能源转换设备如燃气轮机、电转气装置、空调等通过换流器转移功率后的支路电压降  $\Delta U$  为

$$\Delta U = \frac{P_{VSC}r + Q_{VSC}X}{U_n} \quad (12)$$

式中： $P_{VSC}$ 、 $Q_{VSC}$  分别为换流器的有功功率和无功功率； $r$ 、 $X$ 、 $U_n$  分别为线路电阻、电抗和电压。

### 2.3 综合能源融冰优化的风险分析

综合能源通过能源转换装置进行功率转移，其潮流改变须要利用换流器，换流器容量约束可表示为

$$\sqrt{P_{VSC}^2 + Q_{VSC}^2} \leq S_{VSC} \quad (13)$$

式中： $S_{VSC}$  为换流器的容量。

计及综合能源转移功率过程中的功率损耗  $P_{SOP,loss}$ ，换流器须要满足功率平衡方程：

$$P_{VSC1} + P_{VSC2} + P_{SOP,loss} = 0 \quad (14)$$

$$P_{SOP,loss} = A_{SOP} \sqrt{P_{VSC}^2 + Q_{VSC}^2} \quad (15)$$

式中： $P_{VSC1}$ 、 $P_{VSC2}$  分别为换流器 1 和换流器 2 的功率； $A_{SOP}$  为综合能源功率转移的损耗因子。

为使线路融冰最大化，设置综合能源转移潮流的最大电流为配电网线路的融冰电流  $I$ ，其计

算式如下：

$$I = \frac{\Delta t}{r_0(r_{T0}+r_{T1})} + \frac{1}{r_{T0}T_r} [10g_0db + t \frac{0.045g_0D^2}{r_{T0}+r_{T1}} (r_{T1}+0.22 \frac{r_{T0}}{D}) \Delta t]^{\frac{1}{2}} \lg \frac{D}{d} \quad (16)$$

式中： $r_0$ 、 $T_r$ 、 $\Delta t$  分别为 0 °C 时输电线路的单位长度电阻、融冰时间和温差； $g_0$ 、 $b$ 、 $D$ 、 $r_{T0}$ 、 $r_{T1}$  分别为冰的相对密度、厚度、覆冰后线路外径、冰的热阻和辐射热阻。

综合能源转移潮流后线路产热值  $Q_i$  为

$$Q_i = \frac{S_{I0}}{|Z|} \sqrt{(P_0+P_{VSC})^2 + (Q_0+Q_{VSC})^2} \frac{r_0}{|Z|} \quad (17)$$

式中： $S_{I0}$ 、 $|Z|$  分别为配电网线路的视在功率和阻抗的模； $P_0$ 、 $Q_0$  分别为输电线路初始有功功率和无功功率。

## 3 考虑安全稳定约束的电网输电线路融冰方案优化

### 3.1 目标函数

本文以电网运行成本与覆冰成本最小为目标，以输电网安全稳定运行为约束，建立安稳风险动态约束下综合能源支撑的输电线路融冰优化模型：

$$\min F = C_{PG} + C_{PR} + C_D + C_{melt} \beta_{melt} \quad (18)$$

式中： $C_{PG}$  为综合能源设备出力成本； $C_{PR}$  为需求响应成本； $C_D$  为覆冰惩罚项； $\beta_{melt}$  为线路断线风险成本系数。

$$C_{PG} = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^G c_g PG_{g,t} \quad (19)$$

式中： $T$ 、 $G$  分别为时段数和综合能源设备数量； $c_g$ 、 $PG_{g,t}$  分别为第  $g$  台综合能源设备单位成本系数和出力。

$$C_{PR} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I c_r |P'_{i,t} - P_{i,t}| \quad (20)$$

式中： $c_r$  为需求响应成本系数； $P_{i,t}$ 、 $P'_{i,t}$  分别为需求响应前、后节点  $i$  在时段  $t$  的有功负荷。

$$C_D = \frac{\bar{l}=1}{\bar{L}} \sum_{\bar{l}=1}^{\bar{L}} E_{\bar{l}} k C^{eco} \sum_{\bar{l}=1}^{\bar{L}} E_{\bar{l}}^{eco} \quad (21)$$

式中： $\bar{l}$  为第  $\bar{l}$  条覆冰线路； $\bar{L}$ 、 $E_{\bar{l}}$ 、 $k$  分别为覆冰

线路数目、覆冰量指标和覆冰惩罚因子; $E_T^{\text{eco}}$ ,  $C^{\text{eco}}$  分别为线路覆冰量与运行成本。

### 3.2 约束条件

#### ①设备出力约束

$$\begin{cases} PG_g^{\min} \leq PG_{g,t} \leq PG_g^{\max}, \forall g, \forall t \\ QG_g^{\min} \leq QG_{g,t} \leq QG_g^{\max}, \forall g, \forall t \end{cases} \quad (22)$$

式中: $PG_g^{\max}$ ,  $PG_g^{\min}$  分别为综合能源设备  $g$  有功输出的上限、下限; $QG_g^{\max}$ ,  $QG_g^{\min}$  分别为综合能源设备  $g$  无功输出的上限、下限。

#### ②无功约束

$$LQ_{i,\min} \leq LQ_{i,t} \leq LQ_{i,\max}, \forall i, \forall t \quad (23)$$

式中: $LQ_{i,\max}$ ,  $LQ_{i,\min}$  分别为节点  $i$  处无功变化量的最大值和最小值。

#### ③需求响应约束

$$\begin{cases} K_i^{\min} \leq K_{i,t} \leq K_i^{\max}, \forall i, \forall t \\ P'_{i,t} = P_{i,t} \times K_{i,t}, \forall i, \forall t \\ Q'_{i,t} = Q_{i,t} \times K_{i,t}, \forall i, \forall t \end{cases} \quad (24)$$

式中: $K_i^{\max}$ ,  $K_i^{\min}$  分别为需求响应因子上限、下限; $Q'_{i,t}$ ,  $Q_{i,t}$  分别为需求响应前后负荷的无功输出。

#### ④耦合约束

利用线损产热原理能够将系统运行和线路覆冰两类模型耦合:

$$q_{j,\bar{l},t}^L = P_{\bar{l},t}^L / L_{\bar{l},t}, \forall \bar{l}, \forall t \quad (25)$$

式中: $L_{\bar{l},t}$  为覆冰线路  $l$  的长度; $P_{\bar{l},t}^L$  为线路损耗的宏观变量; $q_{j,\bar{l},t}^L$  为线损焦耳热的微观变量。

#### ⑤线路损耗约束

$$0 \leq P_{l,t}^L \leq P_{l,t}^{L,\max}, \forall l, \forall t \quad (26)$$

式中: $P_{l,t}^{L,\max}$  为支路  $l$  线损上限。

#### ⑥节点电压幅值约束

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max}, \forall i, \forall t \quad (27)$$

式中: $V_i^{\max}$ ,  $V_i^{\min}$  分别为节点  $i$  处电压的上限、下限。

### 3.3 基于拉格朗日松弛法的模型求解

本文采用次梯度法解决综合能源支撑的输电线路融冰优化策略的拉格朗日对偶问题。

$$s = -\frac{\partial \varphi(x, u)}{\partial u} = -h(x) \quad (28)$$

式中: $s$  为拉格朗日乘子的次梯度方向; $u$  为拉格朗日乘子; $x$  为模型变量。

次梯度算法的步骤如下。

步骤 1: 设置迭代次数与拉格朗日乘子的初值。

$$u^1 = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T = (0, 0, \dots, 0)^T \quad (29)$$

步骤 2: 当算法进行至第  $k$  次迭代时, 基于式 (28) 计算第  $k$  次的次梯度方向。当  $s^k=0$  时获得最优值; 否则按下式对拉格朗日乘子进行调整。

$$u^{k+1} = \max\{u^k + \theta^k s^k, 0\} \quad (30)$$

式中: $\theta^k$  为第  $k$  次迭代的步长; $u^k$  为第  $k$  次迭代的拉格朗日乘子; $s^k$  为第  $k$  次迭代的拉格朗日乘子的次梯度方向。

$$\theta^k = \frac{Z_{\text{UB}}^k - Z_{\text{LB}}^k}{\left\| \sum (s^k) \right\|^2} \beta^k \quad (31)$$

式中:  $\left\| \sum (s^k) \right\|^2$  和  $\beta^k$  分别为次梯度方向二范数的平方和步长系数; $Z_{\text{UB}}^k$ ,  $Z_{\text{LB}}^k$  分别为最优上界和下界。

### 3.4 安稳风险动态约束下综合能源支撑的输电线路融冰优化模型的对偶函数

前文给出了考虑安稳风险动态约束的综合能源支撑的输电线路融冰优化模型, 其中, 式 (25) 是电网运行方式问题与覆冰增长问题的耦合约束, 该约束会增大模型求解难度。本文引入拉格朗日乘子将式 (25) 进行松弛, 得到对偶问题如下:

$$\begin{aligned} \min F_{LR} = & \sum_{t=1}^T \left( \sum_{g=1}^G c_g PG_{g,t} + \sum_{i=1}^I c_r |P'_{i,t} - P_{i,t}| \right) + \\ & \sum_{\bar{l}=1}^{\bar{L}} E_{\bar{l}} \\ & \frac{\bar{L}}{L} k C^{\text{eco}} + \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{l}=1}^{\bar{L}} \lambda_{\bar{l},t} (q_{j,\bar{l},t}^L - P_{\bar{l},t}^L / L_{\bar{l},t}) \end{aligned} \quad (32)$$

式 (32) 第一项和后两项分别与电网运行和覆冰增长相关, 可将对偶问题分解为相互独立的两个子问题。

子问题 1 为系统层面优化运行, 可表示如下:

$$\min F_{\text{SP1}} = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{g=1}^G c_g PG_{g,t} + \sum_{i=1}^I c_r |P'_{i,t} - P_{i,t}| - \sum_{\bar{l}=1}^{\bar{L}} \lambda_{\bar{l},t} (P_{\bar{l},t}^L / L_{\bar{l},t}) \right) \quad (33)$$

子问题 1 的约束为式(22)~(24)。

子问题 2 为覆冰增长优化,可表示如下:

$$\min F_{spi} = \frac{\sum_{\bar{T}=1}^{\bar{T}} E_{\bar{T}}}{\sum_{\bar{T}=1}^{\bar{T}} E_{\bar{T}}^{eco}} kC^{eco} + \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{T}=1}^{\bar{T}} \lambda_{\bar{T},t} q_{j,\bar{T},t}^L \quad (34)$$

子问题 2 的约束为式(26),(27)。

#### 4 仿真分析

本文以改进的 IEEE RTS-79 系统进行仿真,如图 1 所示。削负荷惩罚为 6 000 元/(MW·h)。设 L12,L14,L30,L31,L32,L33 线路发生覆冰,各线路采用的融冰方式和线路初始覆冰厚度如表 1 所示。环境温度为-8℃,液态水密度为 0.256 g/m<sup>3</sup>,输电线路外径为 22.06 mm。

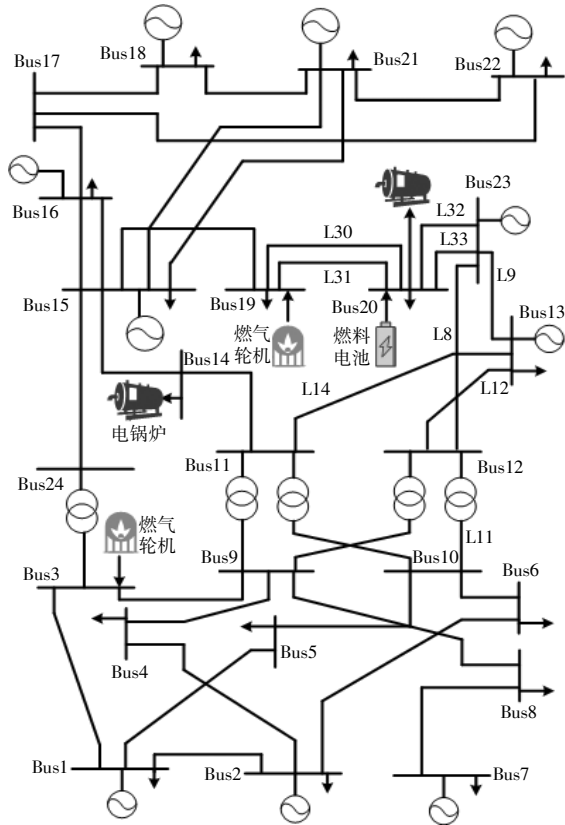


图 1 含综合能源的 IEEE RTS-79 测试系统结构  
Fig.1 IEEE RTS-79 test system structure with integrated energy

表 1 线路覆冰参数  
Table 1 Line icing parameters mm

线路	直流融冰线路			运行方式融冰线路		
	L12	L14	L30	L31	L32	L33
初始覆冰厚度	1.5	2.0	0	0.5	2.3	4.0

将系统参数与天气参数代入本文安稳风险动

态约束下综合能源支撑的输电线路融冰优化策略模型中,采用拉格朗日松弛算法进行求解。

场景 1: 采用本文提出的安稳风险动态约束下综合能源支撑的输电线路融冰优化模型。

场景 2: 不计及两种融冰方式的协调,先采用基于综合能源的融冰,后采用直流融冰。

场景 3: 不计及两种融冰方式的协调,先采用直流融冰,后采用基于综合能源的融冰。

表 2 为仿真系统中负荷参数,图 2~4 为 3 种场景下的融冰计划。

表 2 负荷具体参数  
Table 2 Load specific parameters

时段	T1	T2	T3	T4	T5	T6
占最大负荷比	0.75	0.85	0.80	0.70	0.90	0.75
有功负荷/MW	2 099.5	2 559.7	2 268.7	1 855.5	2 265.8	2 196.1
无功负荷/MVar	463	501	442	430	423	432

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
L12				■		
L14		■				
L30						
L31		■				
L32				■		
L33			■			
开断线路	—	—	L11	L11	—	—
	—	—	L33	L32	—	—

图 2 场景 1 融冰计划  
Fig.2 The de-icing plans of scene 1

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
L12			■			
L14		■				
L30						
L31		■		■		
L32				■		
L33			■			
开断线路	—	—	L11	—	—	—
	—	—	L9	—	—	—

图 3 场景 2 融冰计划  
Fig.3 The de-icing plans of scene 2

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
L12			■			
L14						
L30				■		
L31			■			
L32				■		
L33						
开断线路	—	—	—	L11	—	—
	—	—	—	L8	—	—

图 4 场景 3 融冰计划  
Fig.4 The de-icing plans of scene 3

场景 1 采用本文安稳风险动态约束下综合能源支撑的输电线路融冰优化方案,图 5 为本文优化方案下的线路覆冰厚度增长曲线。在本文基于综合能源支撑的融冰场景中,L32,L33 在不同时段以综合能源改变潮流方式进行融冰。其中,L33 在 T3 时段进行融冰,基于燃气轮机和燃料电池对 Bus13 供电并断开 L32。L32 在 T4 时段进行融冰,通过断开 L33 线路对 L12 进行直流融冰。另外,L14,L30,L31 在 T2 时段进行直流融冰。

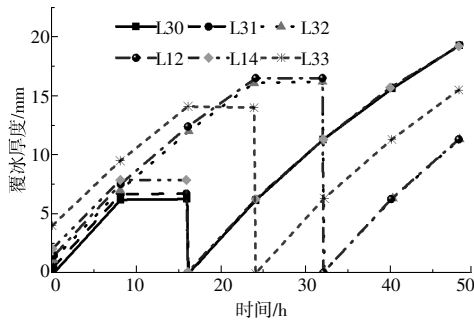


图 5 线路覆冰厚度增长曲线

Fig.5 The curve of ice accretion

场景 2 为不计及综合能源支撑的融冰计划与直流融冰的协调优化。首先采用综合能源改变潮流的运行方式融冰,在此基础上再开始直流融冰。表 3 为 3 种场景下不同融冰计划结果的对比。从表 3 中可以看出,场景 2 的运行成本与场景 1 相差不多,但最大覆冰厚度比场景 1 高很多,为 18.63 mm。从图 2 和图 3 中可以看出,场景 2 和场景 1 的融冰计划类似,但场景 2 在 T3 时段进行运行方式融冰操作时关断 L11 与 L9 线路。基于综合能源的融冰方案可以降低成本,但在 T4 时段,L14,L31 缺少综合能源功率支撑,线路仍然会有覆冰增长。

表 3 不同场景融冰对比

Table 3 Comparison of ice melting in different scenarios

场景	成本/10 <sup>6</sup> 元	最大覆冰厚度/mm
场景 1	0.93	13.41
场景 2	1.16	18.63
场景 3	1.40	14.97

场景 3 为不计及综合能源支撑的融冰计划与直流融冰的协调优化,首先采用直流融冰计划,在此基础上再采用综合能源改变潮流的运行方式融冰。从表 3 中可以看出,场景 3 的最大覆冰厚度与场景 1 相似,但成本比场景 1 高 50.5%。场景 3 中基于直流融冰方式在 T3 时段对 L12,L14,L31

线路融冰,L12 线路退出融冰可以促进 L32,L33 以综合能源改变潮流融冰。但若 T3 时段进行综合能源改变潮流融冰会造成失负荷成本增大,所以将综合能源支撑融冰推到 T4 时段,但不含 L12 断开配合,系统成本仍较高。

## 5 结论

①本文提出的安稳风险动态约束下综合能源支撑的输电线路融冰优化模型可在系统安全稳定运行的基础上使融冰效果最佳且经济性较好。

②与先采用直流融冰后进行综合能源融冰策略相比,考虑本文的综合能源支撑的输电线路融冰协调优化策略能够提高电网运行可靠性,减少失负荷量,从而显著降低成本。

③与先采用综合能源改变潮流的运行方式融冰后采用直流融冰策略相比,采用本文的综合能源支撑的输电线路融冰协调优化策略可在成本较低的前提下使线路最大覆冰厚度明显降低。

## 参考文献:

- [1] 熊玮,徐浩,徐林享,等.计及时间累积效应的 RF-APJA-MKRVM 输电线路覆冰组合预测模型[J].高电压技术,2022,48(3):948-957.
- [2] 马富齐,王波,董旭柱,等.面向输电线路覆冰厚度辨识的多感受野视觉边缘智能识别方法研究[J].电网技术,2021,45(6):2161-2169.
- [3] 蒋兴良,张志劲,胡琴,等.再次面临电网冰雪灾害的反思与思考 [J]. 高电压技术,2018,44 (2): 463-469.
- [4] 王宇晨,成斌.基于灰色 FTA 的风机叶片覆冰对机组运行可靠性影响研究 [J]. 可再生能源,2018,36(4): 598-602.
- [5] 刘政,张蔚,季小雨,等.基于优化小波重构算法的直流输电线路故障测距方法 [J]. 可再生能源,2021,39 (12):1675-1679.
- [6] Bahrami A, Yan M Y, Shahidehpour M, et al. Mobile and portable de-icing devices for enhancing the distribution system resilience against ice storms: preventive strategies for damage control [J]. IEEE Electrification Magazine,2021,9(3):120-129.
- [7] Wang Y D, Zhang G, Tian Z B, et al. An online thermal deicing method for urban rail transit catenary [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2021,7 (2): 870-882.
- [8] 王昭力,刘小春,文飞,等.2 MW 风机叶片气热法防除冰的传热试验研究[J].可再生能源,2022,40(3):356-

- 361.
- [9] Yan M Y, Shahidehpour M, Paaso A, et al. Distribution system resilience in ice storms by optimal routing of mobile devices on congested roads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1314–1328.
- [10] 黄新波, 李弘博, 朱永灿, 等. 基于时间序列分析与卡尔曼滤波的输电线路覆冰短期预测[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1943–1949.
- [11] 朱永灿, 黄新波, 贾建援. 输电线路覆冰导线对流换热的数值模拟[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3441–3446.
- [12] 安利强, 王鹏, 常明, 等. 叶片覆冰对抗冰冻机组疲劳载荷的影响研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(1): 78–84.
- [13] Yan M Y, Ai X M, Shahidehpour M, et al. Enhancing the transmission grid resilience in ice storms by optimal coordination of power system schedule with prepositioning and routing of mobile DC de-icing devices [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2663–2674.
- [14] 刘金, 李更丰, 孙思源, 等. 暴雨灾害下配电网预警与风险评估技术研究综述 [J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(6): 1–7.
- [15] Lu M Zeng, X Zeng, Z Fang, et al. Analysis of ice-covering characteristics of China Hunan Power Grid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3): 1997–2002.
- [16] Liu Y, Farzaneh M, Du B X. Nonlinear characteristics of leakage current for flashover monitoring of ice-covered suspension insulators [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1242–1250.

## Optimization strategy for ice melting of transmission lines supported by comprehensive energy under the dynamic constraints of stability risk

Zeng Huarong<sup>1,2</sup>, Lei Yetao<sup>3</sup>, Ma Tanfeng<sup>4</sup>, Yang Qi<sup>1,2</sup>, Gu Tingyun<sup>1</sup>, Cao Jie<sup>4</sup>, An Su<sup>4,5</sup>  
 (1. Electric Power Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 555002, China; 2. China Southern Power Grid Ice Prevention and Disaster Reduction Joint Laboratory, Guiyang 555002, China; 3. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China; 4. Dispatching and Communication Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 555002, China; 5. Guizhou University, Guiyang 555002, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the decision-making process in the existing power grid transmission line ice melting scheme arrangement takes a long time, and there is a risk of operation stability, which leads to the insufficient decision-making ability of the power grid to deal with severe ice disasters, a comprehensive energy-supported transmission line ice melting optimization strategy under the dynamic constraints of stability risk is proposed. Firstly, an icing growth model is established based on meteorological data, the corresponding relationship between transmission line icing growth and line faults is analyzed, a line outage probability model is established, and the loss degree of line outage is quantified. Secondly, the mechanism of changing the line flow based on integrated energy to slow down the growth of line icing is analyzed, and the ice-melting risk constraints of distribution lines based on integrated energy are considered to establish a line ice-melting model based on integrated energy. On this basis, an ice-melting optimization method for transmission lines with integrated energy support under the dynamic constraints of stability risk is proposed, which is iteratively solved based on the Lagrangian relaxation method. IEEE RTS-79 is used to simulate the ice melting example. The results show that the method based on this paper can improve the efficiency of the transmission line ice melting scheme arrangement and ensure the safe and stable operation of the power grid.

**Keywords:** stability risk; transmission lines; ice melting optimization; integrated energy