



基于牵引变压器分接头电压差的复线电气化铁路接触网在线防融冰方案

聂逸杰, 胡海涛, 葛银波, 李朝阳, 王 科
(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘 要: 在极端冰雪冻雨天气下, 电气化铁路接触网易发生覆冰, 导致供电长时间中断并造成重大经济损失, 然而, 现有接触网在线防融冰技术因投资成本较高, 在实际应用中受到限制。为此, 文章提出一种基于牵引变压器分接头电压差的复线电气化铁路接触网在线防融冰方案。该方案利用牵引变电所内原有的一主一备两台牵引变压器, 通过调节其高压侧分接头形成电压差作为接触网在线防融冰电源, 无须增设防冰设备, 具备投资成本低、实施便捷等优点。首先阐述了防融冰电路的架构与工作原理, 并提出了牵引变电所主接线改造方案; 然后介绍了防融冰模式的倒闸操作方法, 并从空载与负载两种工况分析了系统的防融冰电压和电流特性; 最后, 基于实际牵引供电系统参数搭建仿真模型, 验证了所提方案的有效性。

关键词: 电气化铁路; 接触网防融冰; 牵引变压器; 主接线改造; 倒闸操作

中图分类号: U225; U216.41⁺² **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)04-0162-08

0 引言

随着我国轨道交通的快速发展, 铁路运输负荷持续增加, 对牵引供电系统的安全性与可靠性提出了更高要求。作为机车车辆获取电能的关键设备, 接触网的运行状态直接影响机车的受流质量与整个线路的运输效率。然而, 接触网采用架空裸露结构, 在低温、冻雨、冻雪等极端天气条件下极易发生覆冰现象。覆冰不仅会增大接触网的机械负荷, 还可能引发闪络放电等电气故障, 甚至导致线索断裂、支撑装置损坏等机械故障, 严重威胁铁路运输安全^[1-2]。例如, 2024年2月武汉极端暴雪冻雨天气造成接触网大面积覆冰损坏, 引发铁路列车长时间延误, 经济损失巨大。因此, 开展高效可靠的接触网除冰和防冰技术研究, 对提升电气化铁路在极端气候下的抗灾能力具有重要意义。目前针对接触网覆冰的清除技术主要涵盖机械除冰、化学除冰、内置阻性丝技术和热力融冰等几类方法^[3]。

机械除冰技术主要包括人工敲打^[4]、冲击振动除冰^[5]以及利用机车受电弓进行摩擦除冰等方法。其中, 受电弓摩擦法在我国应用较为广泛, 但其除冰效率有限, 且作用范围受限, 难以覆盖全部覆冰区段^[6]。化学除冰法则通过在接触线表面涂覆防冰材料以抑制覆冰形成, 但该技术面临材料寿命短、维护成本高以及潜在环境污染等问题^[7-9]。内置阻性丝技术通过在接触线内部嵌入阻性丝结构, 增大导线电阻, 并提升发热量以实现融冰, 然而该方法存在成本高、发热控制难度大等局限性^[10]。热力融冰技术则是通过在覆冰线路上通入大电流, 利用焦耳热效应升高导线温度以融化覆冰, 根据电流类型可分为直流融冰与交流融冰两种方式^[11]。

直流融冰技术通常将牵引变电所输出的单相交流电整流为直流电, 作为融冰电源注入接触网, 利用焦耳效应实现融冰。在城轨直流供电系统中, 文献[12]在覆冰区段接触网中点处设置融冰电力单元, 并利用上下接触网构成电流回路进行融冰。文献[13]针对配备中

基金项目: 国家自然科学基金项目(52477128); 四川省科技计划项目(2025NSFTD0007)

通信作者: 胡海涛, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事牵引供电/新能源系统谐波与电能质量方面的研究; E-mail: hht@swjtu.edu.cn

引用格式: 聂逸杰, 胡海涛, 葛银波, 等. 基于牵引变压器分接头电压差的复线电气化铁路接触网在线防融冰方案[J]. 机车电传动, 2025(4): 162-169. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.020.

Citation: NIE Yijie, HU Haitao, GE Yinbo, et al. Online catenary anti-icing and de-icing solution for double-track electrified railway based on voltage difference at traction transformer tap changers[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 162-169. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.020.

压能馈装置的城轨供电系统, 提出了防冰能量循环方案。文献[14]采用AC-DC和DC-DC变换装置输出可控融冰电流。在交流电气化铁路方面, 文献[15]提出移动式直流融冰装置, 将牵引网27.5kV交流电降压整流, 再经过控制电路输出可控直流融冰电压。文献[16]提出“源-网-车-储”一体化供电系统中的接触网直流融冰方案, 该方案利用背靠背变流器从牵引变电所的 α 、 β 相母线取电, 并将其直流侧串联输出, 通过设定目标电压实现所需融冰电压。文献[17]提出的移动式直流融冰装置采用三相桥式全控整流电路, 可实现输出电流的连续调节。文献[18]提出一种新型功率单元斩波级联全控整流融冰拓扑, 采用输入并联、输出串联的结构, 通过调节斩波占空比以精确控制融冰电流。直流融冰因无须考虑线路电抗影响, 具有装置容量小、融冰效率高的优点, 但同时也存在着与交流电气化铁路系统的兼容性较差的问题, 因而难以实现在线持续防冰。

在交流融冰技术领域, 基于接触网的阻抗特性, 已有诸多研究聚焦于利用无功电流实现防融冰目标。例如, 文献[19]利用STATCOM构建防融冰系统。文献[20]提出通过限流电抗器调节接触网电流和功率进行防融冰。文献[21]提出基于静止无功发生器(SVG)的防融冰方案, 该方案通过末端SVG向接触网注入可控的感性或容性无功电流, 同时由首端SVG承担无功补偿功能, 以维持系统功率因数稳定。在SVG方案的基础上, 文献[22]进一步引入晶闸管投切电容器(TSC), 以辅助输出所需无功电流。此外, 文献[23]提出一种基

于静止无功补偿器SVC的融冰装置, 通过在牵引网末端并联晶闸管控制电抗器TCR以调节融冰电流, 并在首端并联电容器进行无功补偿。总体而言, 现有交流融冰方法虽具备一定技术可行性, 但所注入的无功电流对牵引网电压影响较为显著, 且系统装机容量普遍较大, 导致整体投资及运行成本偏高。

基于上述分析, 本文提出一种基于牵引变压器分接头电压差的接触网在线防融冰方案(traction transformer tap voltage difference-based catenary online anti-icing and de-icing scheme, TVD-ADS)。该方案无须额外加装专用防冰装置, 借助牵引变电所内既有牵引变压器一次侧的分接头结构, 通过调节分接头位置在接触网首端形成可控电压差, 并以此作为防融冰所需电压, 该方案不仅能显著降低投资成本, 而且可兼顾机车运行, 实现接触网的在线防冰功能。

1 TVD-ADS工作原理与主接线改造方案

1.1 TVD-ADS工作原理

本文所提出的TVD-ADS具体结构如图1所示。该方案适用于复线直供牵引供电系统, 图1中牵引变压器采用V/v接线方式, 其一次侧设有可分接调压的抽头。

根据牵引变压器分接头可调节输出电压的特性, 并结合牵引变电所通常配置一主一备两套牵引变压器的实际情况, 本方案通过将主变压器与备用变压器设置于不同分接头位置, 使其二次侧输出不同电压, 进

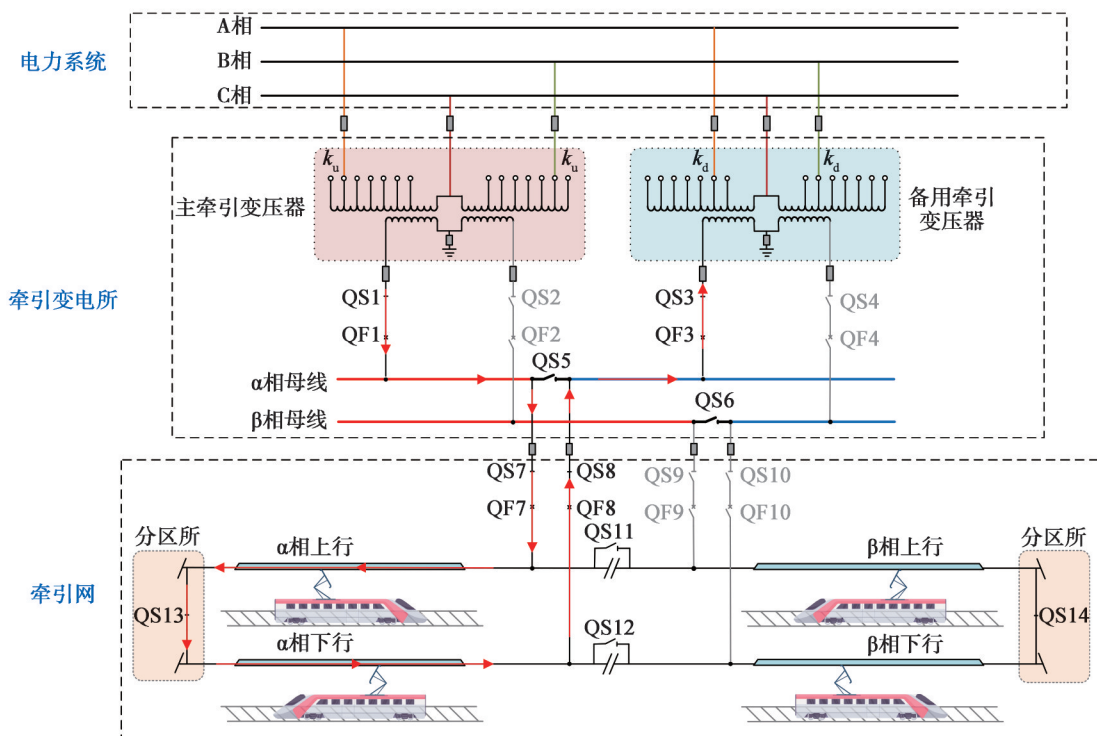


图1 TVD-ADS结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the main wiring of TVD-ADS

而在接触网首端形成一定电压差。该电压差可作为防融冰电源，配合接触网末端并联所形成的回路，为牵引网提供持续防融冰电流，同时还可兼顾 α 相与 β 相线路的防融冰需求，有效提升系统整体防融冰效率。

变压器一次侧通常有 $\pm 2.5\%$ 、 $\pm 5.0\%$ 、 $\pm 7.5\%$ 等6种分接头，图2为变压器分接头示意图。

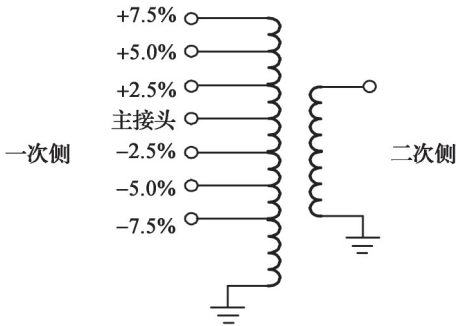


图2 变压器分接头示意图

Fig. 2 Schematic diagram of transformer tap changer

通过调整电源出线所连接的分接头位置，可改变牵引变压器一次绕组的实际匝数，进而调整其实际变比，实现二次侧输出电压的调节。以额定变比220/27.5的牵引变压器为例，其二次侧输出电压与分接头位置的关系可由下式表示：

$$U_2 = U_1 \times \frac{27.5}{220 \times (1 + k)} \tag{1}$$

式中： U_1 为牵引变压器一次侧输入电压，kV； U_2 为二次侧输出电压，kV； k 为牵引变压器不同的分接头电压比例系数。

由于牵引变压器主接头的额定电压通常与系统输入电压一致，即 $U_1=220$ kV，则上述二次侧输出电压的计算公式可简化为

$$U_2 = \frac{27.5}{1 + k} \tag{2}$$

1.2 牵引变电所主接线改造方案

在常规牵引变电所中，同一相的上下行馈线通常连接至同一母线上。为实现本方案所需的接触网首端电压差，需将上下行馈线分别连接至不同电压等级的母线。为此，本文对主接线结构进行改造采用母线分段设计，通过在 α 相和 β 相母线上增设隔离开关，使上行与下行馈线可分别接入对应于主牵引变压器和备用牵引变压器的不同母线段，从而在上下行接触网线路首端建立所需电压差。

假设牵引变电所主牵引变压器接于分接头 k_u ，备用牵引变压器接于分接头 k_d ，并定义主变压器对应分接头 k_u 为负极性，备用变压器对应分接头 k_d 为正极性。在此配置下，系统可提供多个不同等级的防融冰电压。该结构在理论上可实现的全部电压挡位情况如表1所示。

表1 不同分接头理论上可提供的防融冰电压

Table 1 Theoretical anti-icing and de-icing voltages from different tap changers

挡位	分接头位置	U_{C1}/kV	U_{C2}/kV	U_{ice}/kV
①	$k_u=-2.5\%$, $k_d=+2.5\%$	28.205	26.829	1.376
②	$k_u=-2.5\%$, $k_d=+5\%$	28.205	26.190	2.015
③	$k_u=-2.5\%$, $k_d=+7.5\%$	28.205	25.581	2.624
④	$k_u=-5\%$, $k_d=+2.5\%$	28.947	26.829	2.118
⑤	$k_u=-5\%$, $k_d=+5\%$	28.947	26.190	2.757
⑥	$k_u=-5\%$, $k_d=+7.5\%$	28.947	25.581	3.366
⑦	$k_u=-7.5\%$, $k_d=+2.5\%$	29.730	26.829	2.901
⑧	$k_u=-7.5\%$, $k_d=+5\%$	29.730	26.190	3.540
⑨	$k_u=-7.5\%$, $k_d=+7.5\%$	29.730	25.581	4.149

2 TVD-ADS工作模式和挡位选取

2.1 TVD-ADS工作模式分析

由于正常运行与防融冰状态下牵引供电系统的拓扑结构存在差异，需通过相应的倒闸操作实现运行状态的切换。在完成母线分段改造后，牵引变电所同一相位的上下行馈线已由隔离开关实现电气隔离。以图1中的牵引网 α 相线路为例，将系统切换至防融冰状态所需执行的倒闸操作步骤如下：

- ① 断开隔离开关QS5、QS6，实现两侧母线电气隔离，使其分别处于不同电压等级；
- ② 闭合断路器QF1和QF3，将主牵引变压器和备用牵引变压器投入运行；
- ③ 闭合 α 相馈线对应的断路器QF7与QF8；
- ④ 保持电分相隔离开关QS11、QS12处于分断状态；
- ⑤ 断开牵引变电所出口处及牵引网中部的所有并联开关，同时闭合牵引网末端上下行并联隔离开关QS13，以构成防融冰电气回路；
- ⑥ 启动数据处理及控制系统，设定融冰电压参考值 U ，根据参考值调节两台牵引变压器一次侧分接头位置，使防融冰电压处在合适的挡位；
- ⑦ 经缓冲时间 t 后，依次闭合隔离开关QS1、QS3、QS7、QS8。

完成上述倒闸操作后，系统进入防融冰运行模式。根据线路中是否存在机车运行，TVD-ADS可分为空载和负载两种工作模式。下面针对这两种模式，分别对系统的防融冰电压与电流特性进行分析。

1) 空载模式

在线路空载，即无机车运行的情况下，防融冰系统的等效电路如图3所示。

图3中，将牵引变压器等效为理想变压器与等效阻抗串联的模型，其中 $\dot{U}_{T1}$ 、 $\dot{U}_{T2}$ 分别为理想情况下主、备牵引变压器二次侧输出电压， Z_T 为牵引变压器二次

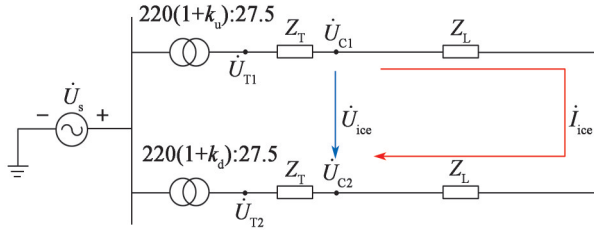


图3 空载模式下系统等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of the anti-icing and de-icing system in no-load mode

侧等效阻抗, i_{ice} 为系统防融冰电流。设置上行线路主牵引变压器分接头位置为 k_u , 下行线路备用牵引变压器分接头位置为 k_d , 则上下行接触网首端电压 $\dot{U}_{C1}$ 、 $\dot{U}_{C2}$ 可分别表示如下:

$$\begin{cases} \dot{U}_{C1} = \dot{U}_{T1} - Z_T i_{ice} \\ \dot{U}_{C2} = \dot{U}_{T2} + Z_T i_{ice} \end{cases} \quad (3)$$

上下行接触网首端电压差即为系统对外输出的防融冰电压, 即

$$\dot{U}_{ice} = \dot{U}_{C1} - \dot{U}_{C2} = \dot{U}_{T1} - \dot{U}_{T2} - 2Z_T i_{ice} \quad (4)$$

图3中接触网上下行线路的等效阻抗均为 Z_L , 则系统提供的防融冰电流为

$$i_{ice} = \frac{\dot{U}_{ice}}{2Z_L} \quad (5)$$

结合式(4)、式(5), 防融冰电流可表示为

$$i_{ice} = \frac{\dot{U}_{T1} - \dot{U}_{T2}}{2Z_L + 2Z_T} \quad (6)$$

根据式(6)即可选择适应不同环境条件下的防融冰电压挡位。

2) 负载模式

在线路负载, 即有机车运行的情况下, 防融冰系统的等效电路如图4所示。

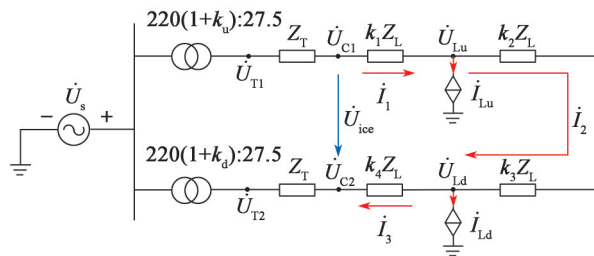


图4 负载模式下系统等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of the anti-icing and de-icing system in load mode

图4为上下行线路各存在一列列车运行时的工况。将牵引网分为3个区段, 对应的区段电流分别 i_1 、 i_2 、 i_3 ; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为牵引网阻抗分配系数, 与上下行机

车位置有关, 且满足 $k_1+k_2=1$ 、 $k_3+k_4=1$ 。将上下行线路中的机车等效为受控电流源, 其电流大小分别为 i_{Lu} 、 i_{Ld} 。此时上下行接触网首端电压的表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{U}_{C1} = \dot{U}_{T1} - Z_T i_1 \\ \dot{U}_{C2} = \dot{U}_{T2} + Z_T i_3 \end{cases} \quad (7)$$

此时, 系统对外输出的防融冰电压为

$$\dot{U}_{ice} = \dot{U}_{C1} - \dot{U}_{C2} = \dot{U}_{T1} - \dot{U}_{T2} - Z_T (i_1 + i_3) \quad (8)$$

对于区段1和区段3的电流 i_1 和 i_3 , 可通过区段2的电流 i_2 和负载电流表示如下:

$$\begin{cases} i_1 = i_{Lu} + i_2 \\ i_3 = i_2 - i_{Ld} \end{cases} \quad (9)$$

此处需考察区段2的电流, 首先列出上下行机车取流点处电压表达式如下:

$$\dot{U}_{Lu} = \dot{U}_{C1} - k_1 Z_L i_1 \quad (10)$$

$$\dot{U}_{Ld} = \dot{U}_{C2} + k_4 Z_L i_3 \quad (11)$$

则区段2电流为

$$i_2 = \frac{\dot{U}_{Lu} - \dot{U}_{Ld}}{(k_2 + k_3) Z_L} \quad (12)$$

结合式(9)、式(10)、式(11)得

$$i_2 = \frac{\dot{U}_{ice}}{(k_2 + k_3) Z_L} - \left(\frac{2}{k_2 + k_3} - 1 \right) i_2 - \frac{k_1 i_{Lu} - k_4 i_{Ld}}{k_2 + k_3} \quad (13)$$

整理可得

$$i_2 = \frac{\dot{U}_{ice}}{2Z_L} - \frac{k_1 i_{Lu} - k_4 i_{Ld}}{2} \quad (14)$$

从式(14)可以看出, 中间区段的电流 i_2 与空载时系统防融冰电流 i_{ice} 相比多了 $\frac{k_1 i_{Lu} - k_4 i_{Ld}}{2}$ 项, 该项与机车位置及其负载电流有关。

分析结果表明, 负载工况下牵引网各区段电流受负载电流影响较大。负载电流对防融冰电流形成有效补充, 进而优化系统的整体防融冰性能。

2.2 TVD-ADS 工作挡位选取方案

以空载模式为例, 设牵引网单位长度等效阻抗为 $0.098 + j0.3159 \Omega/\text{km}$ ^[24], 牵引变压器二次侧等效阻抗为 $0.14 + j2.468 \Omega$, 且上行、下行接触网线路长度均为 25 km。基于上述参数, 由式(6)计算其模值, 即可得到系统在各挡位下能提供的防融冰电流大小, 即 $I_{ice} =$

$\left| \frac{\dot{U}_{T1} - \dot{U}_{T2}}{2Z_L + 2Z_T} \right|$, 具体数据如表2所示。

在接触线-承力索分流系数为 0.95、覆冰厚度为 10 mm 的条件下, 当环境温度为 -0.5°C , 风速为 1 m/s 时, 计算得到 (计算方法详见文献[25]) 临界防冰电流为

表2 空载模式下系统各挡位防融冰电流大小

Table 2 Anti-icing and de-icing current levels for tap positions in the system in no-load mode

挡位	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
防融冰电流/A	64.40	94.30	122.80	99.12	129.02	157.53	135.76	165.67	194.17

116.99 A，临界融冰电流为 149.34 A。根据表 1 可选择挡位⑥，即 $k_u=-5\%$ 、 $k_d=+7.5\%$ 挡位；当环境温度为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，风速增至 3 m/s 时，临界防冰电流为 161.91 A，临界融冰电流为 190.52 A，在此条件下可选择挡位⑨，即 $k_u=-7.5\%$ 、 $k_d=+7.5\%$ 挡位。

TVD-ADS 的具体工作流程如图 5 所示。首先，系统工作在正常运行模式下；接着启动参数检测分析单元，通过接触网监控设备获取线路覆冰状况，并通过环境参数监测单元中各传感器采集的温度、湿度及风速等数据，分析系统基于上述数据评估覆冰风险，若判定接触网已覆冰或存在较高的覆冰风险，则执行倒闸操作，将系统切换至防融冰模式，再根据实时监测的参数计算临界防融冰电流，并据此选取合适的电压挡位；最后系统再次评估覆冰风险，若仍需进行防融冰则返回上一步进行电流计算与挡位调整，否则流程结束。

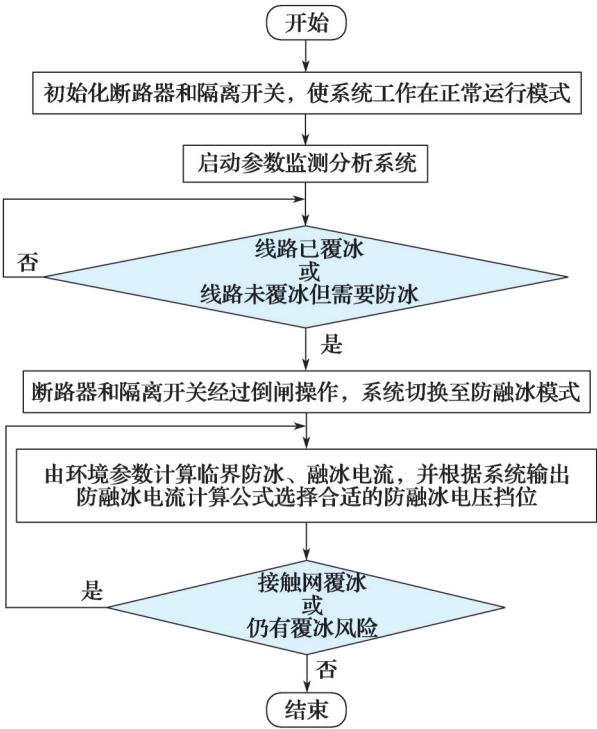


图 5 TVD-ADS 工作流程图
Fig. 5 Workflow diagram of TVD-ADS

3 仿真分析

为验证所提 TVD-ADS 方案的可行性，本文结合实际的牵引变压器与接触网参数，基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了系统的仿真模型，具体仿真参数设置如表 3 所示。

基于所搭建的仿真系统依次进行如下验证：其一，验证当牵引变压器一次侧接入电网而二次侧开路（即空载工况）时，其输出电压是否与理论防融冰电压挡位一致；其二，评估 TVD-ADS 在空载与负载两种模式

下的防融冰性能。

表 3 系统仿真参数

Table 3 System simulation parameters

参数项目		参数值或说明
三相电源	电压/kV	220
	频率/Hz	50
牵引变压器	接线方式	V/v
	容量/MVA	31.5
	变比	220:27.5
	短路损耗/kW	183.6
	短路电压百分比/%	10.28
牵引网	上（下）行线路长度/km	25
	单位长度等值阻抗/($\Omega\cdot\text{km}^{-1}$)	$0.098+\text{j}0.3159$

3.1 牵引变压器空载运行工况

设置牵引变压器高压侧接入电力系统，低压侧不接入牵引网，使牵引变压器处于空载运行模式，对接触网首端电压与系统防融冰电压变化进行了监测，结果分别如图 6 和图 7 所示，图中序号对应防融冰装置的 9 个挡位。结果表明，上下行线路首端电压、系统输出的防融冰电压均与理论计算值一致。

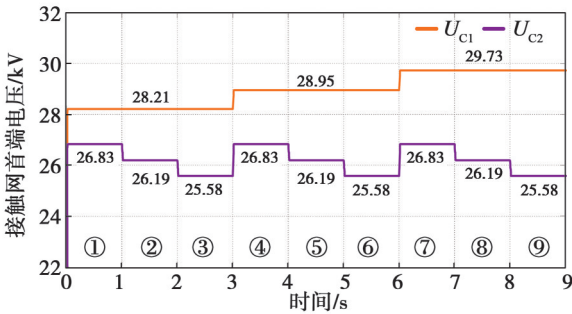


图 6 牵引变压器不接入系统时接触网首端电压
Fig. 6 Head-end voltage of the catenary with the traction transformer disconnected

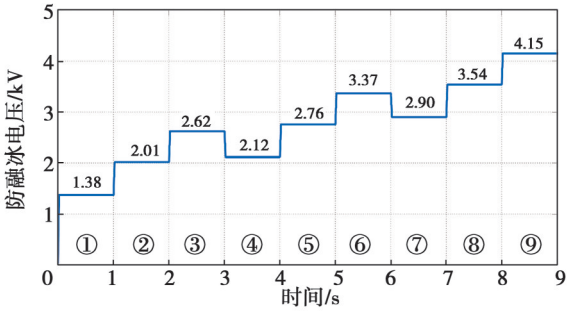


图 7 牵引变压器不接入系统时输出的防融冰电压
Fig. 7 Anti-icing and de-icing voltage with the traction transformer disconnected

3.2 系统空载模式

在线路无列车运行，即系统空载时，接触网首端电压与系统防融冰电压变化的仿真结果分别如图 8 和图 9 所示。由于变压器阻抗的影响，上行接触网电压降

低, 而下行接触网电压有所升高, 同时系统输出的防融冰电压也随之下降。相应的防融冰电流变化如图10所示, 其数值同样因阻抗影响而减小, 且仿真值与理论计算结果吻合良好。

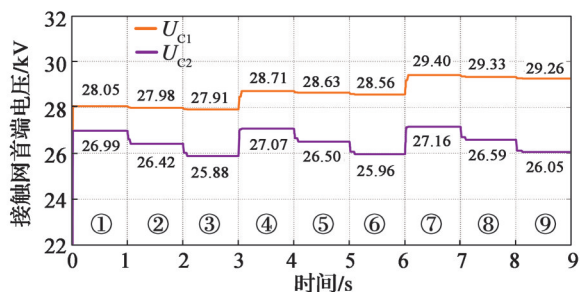


图8 系统空载时接触网首端电压

Fig. 8 Head-end voltage of the catenary with the system in no-load mode

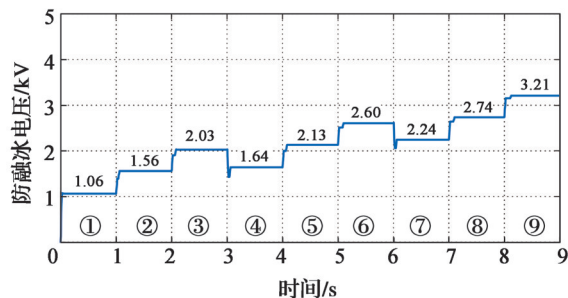


图9 系统空载时输出的防融冰电压

Fig. 9 Anti-icing and de-icing voltage output from the system in no-load mode

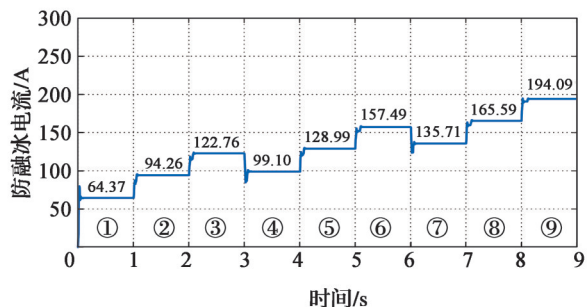


图10 系统空载时输出的防融冰电流

Fig. 10 Anti-icing and de-icing current output from the system in no-load mode

3.3 系统负载模式

在线路有列车运行, 即系统处于负载工况时, 设置上行机车功率15 MW, 位于20 km处; 下行机车功率10 MW, 位于10 km处。接触网首端电压、防融冰电压及防融冰电流分别如图11、图12与图13。仿真结果表明, 处于负载工况时的接触网电压和防融冰电压与空载工况相比变化不显著; 然而, 防融冰电流的分布呈现出明显的空间差异: 靠近牵引变压器的区段1和区段3电流较大, 受负载电流影响显著, 而中间区段2的电流则相对较小, 受负载影响也较小, 其电流值在部分挡位下与空载工况接近。

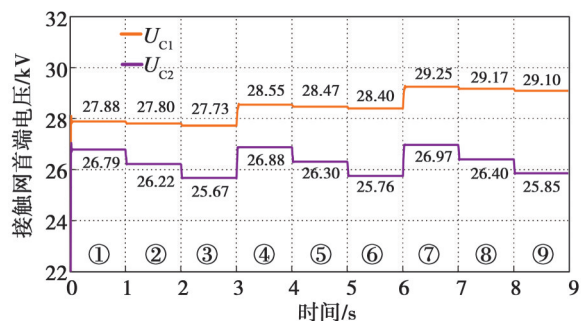


图11 系统负载时接触网首端电压

Fig. 11 Head-end voltage of the catenary with the system in load mode

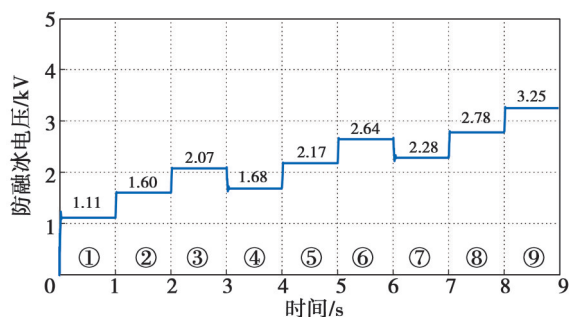


图12 系统负载时接触网防融冰电压

Fig. 12 Anti-icing and de-icing voltage output from the system in load mode

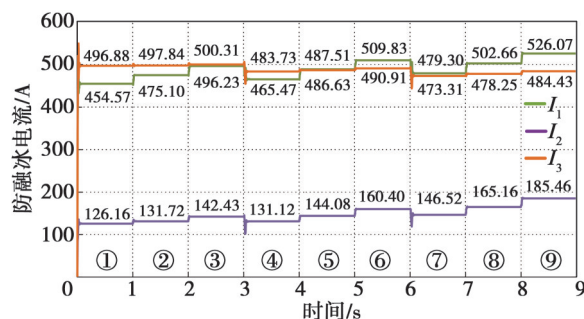


图13 系统负载时接触网各区段防融冰电流

Fig. 13 Anti-icing and de-icing current in catenary sections with the system in load mode

综上所述, 本文所提TVD-ADS方案具备输出多挡位防融冰电流的能力, 可灵活应对不同等级的防融冰需求, 同时能确保接触网电压波动维持在安全限值之内。此外, 在有机车运行的负载工况下, 负载电流与防融冰电流可产生协同增强效应, 有效增大牵引网特定区段(如接近变压器区段)的电流水平, 从而显著提升系统的在线防冰效能。

4 结论

本文提出了一种基于牵引变压器分接头电压差的防融冰方案(TVD-ADS), 对不同工作模式下系统的防融冰电流进行了理论分析, 并结合实际参数构建了接触网防融冰模型, 通过对多种工况的仿真分析, 得到牵引网电压与防融冰电流等关键参数, 验证了所提

系统的有效性。该方案依托现有牵引变电所结构,无须新增设备,可有效降低投资成本;同时,在防融冰过程中,牵引网电压始终维持在允许范围内,从而保障了机车正常运行,实现在线防冰功能。

由于该方案所提供的防融冰电流受限于牵引变压器分接头电压的调节范围,在环境条件更恶劣,如温度更低、风速更大的情况下,线路所需的临界防融冰电流将相应增大。为应对这一挑战,未来可在现有系统基础上增设辅助变流装置,以提升防融冰电流的输出能力,从而满足在各种环境条件下的防融冰需求。

参考文献:

- [1] 甄磊. 浅析接触网覆冰现象的危害以及应对措施[J]. 电气化铁道, 2011(3): 30-32.
ZHEN Lei. Analysis of hazard of ice coating on overhead contact system and its counter-measures[J]. Electric railway, 2011(3): 30-32.
- [2] 张安洪. 雪灾对接触网覆冰及其影响的探讨[J]. 电气化铁道, 2008(3): 32-33.
ZHANG Anhong. Discussion of ice coating of overhead contact system in snowstorm disaster[J]. Electric railway, 2008(3): 32-33.
- [3] 刘辉, 漆照, 贾然, 等. 输电线路和电气化铁路接触网交直流融冰技术研究进展[J]. 山东电力技术, 2022, 49(7): 32-39.
LIU Hui, QI Zhao, JIA Ran, et al. Research on AC/DC ice-melting technology for transmission line and electric railway catenary[J]. Shandong electric power, 2022, 49(7): 32-39.
- [4] ZHU Yuan, TAN Yanjun, HUANG Qingjun, et al. Research on melting and de-icing methods of lines in distribution network[C]//IEEE. 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Changsha: IEEE, 2019: 2370-2373.
- [5] 吴磊, 徐梦楠, 张华鹏, 等. 电气化铁路接触网冲击振动除冰仿真分析[J]. 铁道学报, 2025, 47(1): 47-53.
WU Lei, XU Mengnan, ZHANG Huapeng, et al. Simulation analysis of impact vibration de-icing for overhead catenary of electrified railway[J]. Journal of the China railway society, 2025, 47(1): 47-53.
- [6] GUO Lei, GAO Xiaojie, LI Qunzhan, et al. Online antiicing technique for the catenary of the high-speed electric railway [J]. IEEE transactions on power delivery, 2015, 30(3): 1569-1576.
- [7] KIM Y K, BUI V K H, LEE J Y, et al. Surface characterizations of railway electrical wires coated with anti-icing mixtures of ethylene glycol or glycerol with tap water[J]. Journal of nanoscience and nanotechnology, 2019, 19(3): 1269-1275.
- [8] 蒋兴良, 肖代波, 孙才新. 憎水性涂料在输电线路防冰中的应用前景[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 13-18.
JIANG Xingliang, XIAO Daibo, SUN Caixin. Application prospect of hydrophobic coatings on anti-icing of transmission lines[J]. Southern power system technology, 2008, 2(2): 13-18.
- [9] 邢金慧. 电气化铁路接触网防融冰技术优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
XING Jinhui. Optimization research on anti-melting ice technology for catenary of electrified railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [10] 吴广宁, 王敏, 郭裕钧, 等. 高速铁路接触网融冰机理及关键技术: 系统性综述[J]. 铁道学报, 2025, 47(3): 40-53.
WU Guangning, WANG Min, GUO Yujun, et al. Ice melting mechanism and key technologies for high-speed railway contact networks: a systematic review[J]. Journal of the China railway society, 2025, 47(3): 40-53.
- [11] 郭蕾. 接触网覆冰机理与在线防冰方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
GUO Lei. Ice mechanism and on-line anti-icing technology for catenary of electrified railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [12] WANG Yunda, ZHANG Gang, TIAN Zhongbei, et al. An online thermal deicing method for urban rail transit catenary [J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021, 7(2): 870-882.
- [13] 范国荣. 城市轨道交通接触网在线防冰技术方案研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
FAN Guorong. Research on online anti-icing technology proposal for urban rail transit catenary[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [14] 王运达, 张钢, 邱瑞昌, 等. 城市轨道交通接触网在线融冰方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1970-1978.
WANG Yunda, ZHANG Gang, QIU Ruichang, et al. Online ice melting method for catenary of urban rail transit[J]. High voltage engineering, 2022, 48(5): 1970-1978.
- [15] 裴晓娟. 移动式接触网直流融冰装置技术方案研究[J]. 铁道建筑技术, 2023(11): 35-38.
PEI Xiaojuan. Research on a technical scheme of a mobile DC ice melting device for overhead contact system[J]. Railway construction technology, 2023(11): 35-38.
- [16] 胡海涛, 葛银波, 黄毅, 等. 电气化铁路"源-网-车-储"一体化供电技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4374-4390.
HU Haitao, GE Yinbo, HUANG Yi, et al. "Source-network-train-storage" integrated power supply system for electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4374-4390.
- [17] 史国强. 高速铁路接触网直流融冰技术[J]. 中国铁路, 2020(11): 122-127.
SHI Guoqiang. DC-based deicing technology for OCL of high speed railway[J]. China railway, 2020(11): 122-127.

- [18] 敬华兵, 年晓红. 电气化铁路接触网直流融冰技术及装置研制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 277-284.
JING Huabing, NIAN Xiaohong. Catenary DC ice-melting technology and device development of electrified railway[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2012, 27(9): 277-284.
- [19] 韩婉娇. 基于在线监测的接触网防冰研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
HAN Wanjiao. Research of overhead contact system anti-icing based on online monitoring[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [20] 郭华, 范红疆, 董晓冬, 等. 客专铁路接触网交流融冰方案研究及工程验证[J]. 电气化铁道, 2015(3): 27-30.
GUO Hua, FAN Hongjiang, DONG Xiaodong, et al. Research and engineering validation on scheme of overhead contact system AC de-icing of passenger dedicated line[J]. Electric railway, 2015(3): 27-30.
- [21] 李群湛, 郭蕾, 舒泽亮, 等. 电气化铁路接触网在线防冰技术研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(10): 46-51.
LI Qunzhan, GUO Lei, SHU Zeliang, et al. On-line anti-icing technology for catenary of electrified railway[J]. Journal of the China railway society, 2013, 35(10): 46-51.
- [22] 向钰, 解绍锋. 电气化铁路接触网混合型防融冰技术方案研究[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊2): 15-20.
XIANG Yu, XIE Shaofeng. Research on hybrid anti-icing technology scheme for electrified railway catenary[J]. Electric railway, 2020, 31(Suppl 2): 15-20.
- [23] 蒋汶兵, 支正轩, 杨代刚, 等. 铁路接触网在线防融冰装置(SVC型)的研制[J]. 电气化铁道, 2023, 34(6): 36-40.
JIANG Wenbing, ZHI Zhengxuan, YANG Daigang, et al. Development of online anti-icing and ice melting device (type of SVC) for OCS of railways[J]. Electric railway, 2023, 34(6): 36-40.
- [24] 邓云川, 刘志刚, 黄可, 等. 基于多导体回路法的牵引网电气参数计算研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(8): 34-42.
DENG Yunchuan, LIU Zhigang, HUANG Ke, et al. Study on electrical parameters calculation of traction network based on the multi-conductor loop circuit method[J]. Journal of the China railway society, 2018, 40(8): 34-42.
- [25] 周彤昕. 接触网防冰融冰方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
ZHOU Tongxin. Study on anti-icing and ice-melting scheme of catenary[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

Online catenary anti-icing and de-icing solution for double-track electrified railway based on voltage difference at traction transformer tap changers

NIE Yijie, HU Haitao, GE Yinbo, LI Zhaoyang, WANG Ke

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: Under extreme ice, snow, and freezing rain conditions, catenaries in electrified railway systems are prone to icing, which can result in prolonged power supply interruptions and cause severe economic losses. However, existing online anti-icing and de-icing techniques are costly, which limits their practical application. Therefore, this paper proposes an online anti-icing and de-icing solution for catenaries on double-track electrified railways based on the voltage difference at the traction transformer tap changers. This solution is designed based on the existing two traction transformers, typically configured at traction substations with one active and one standby. By adjusting their tap changers on the high-voltage side, the resulting voltage difference serves as the power source for online anti-icing and de-icing of the catenary, without the need for additional equipment. The proposed solution offers advantages including low investment costs and the ease of implementation. This paper began by detailing the structure and operating principle of the anti-icing and de-icing circuit, followed by an introduction to the main wiring transformation design at the traction substation. Subsequent sections explained the switching operation method for the proposed anti-icing and de-icing mode, and analyzed the anti-icing and de-icing voltage and current characteristics of the system in both no-load and load modes. The final part verified the effectiveness of the proposed solution through a simulation model incorporating parameters of actual traction power supply systems.

Keywords: electrified railway; anti-icing and de-icing of catenary; traction transformer; main wiring transformation; switching operation