

基于SVG的高速铁路在线防冰系统

为防止高速铁路接触网覆冰，并保证列车安全运行，在考虑防冰电流、系统功率因数和接触网末端电压的基础上，提出了单线AT供电方式、末端并联复线AT供电方式以及全并联复线AT供电方式的在线防冰方案，研究了SVG装置的控制方式，确定了SVG装置的电流上、下限值，并在Matlab/Simulink中搭建了仿真模型，仿真结果验证了该方案的可行性，为现场防冰措施的选择提供了参考。

陈 隆 解绍锋 夏焰坤/西南交通大学电气工程学院



陈 隆/硕士研究生

关键词/Keywords

在线防冰 ·
AT供电方式 ·
系统功率因数 ·
控制策略 ·
装置电流限值 ·

接触网覆冰会导致受电弓无法正常取流，从而影响列车的正常运行，因此，有必要研究高速铁路的在线防冰系统，保证高速列车的正常运行。文献[1-5]详细介绍了接触网防融冰原理，仿真验证了基于SVG装置的在线防冰在直供方式下的可行性，但其没有考虑系统的功率因数，也没有验证基于SVG装置的在线防冰方案在高速铁路普遍采用AT供电方式下的可行性；文献[6-8]简要介绍了接触网和输电线在线防冰和离线防冰的方法，并比较了其优劣性，但方法过于烦琐，对开关要求过高，不适宜自动化的高速铁路；文献[9]介绍了电气化铁路接触网直流融冰技术及装置的研制，但其在采用单相交流制的电气化铁路中并未得到验证；文献[10]介绍了全并联AT方式牵引网阻抗的计算方式，但并未提及接触网防冰。本文在考虑防冰电流、系统功率因数和接触网末端电压的

同相供电技术深化研究（2012J012-E），中国铁路总公司科技研究开发计划项目资助（2014J009-B），电气化高速铁路对成都电网影响研究（SCF-201403-FW-48）。

基础上，提出了单线AT供电方式、末端并联复线AT供电方式以及全并联复线AT供电方式的在线防冰方案，研究了SVG装置的控制策略，确定了防冰装置的电流限值，搭建了仿真模型并验证了其可行性。

高速铁路在线防冰方案

1. AT供电方式下的在线防冰方案

高速铁路都是复线，忽略上、下行线之间的互阻抗，复线AT可以看作两条单线AT，由于部分高铁采用末端并联复线AT供电方式或全并联复线AT供电方式，基于此，本文提出了基于SVG的单线AT供电方式、末端并联复线AT以及全并联复线AT供电方式的在线防冰方案，其结构如图1、图2所示，即在AT网首末端均并联SVG装置。

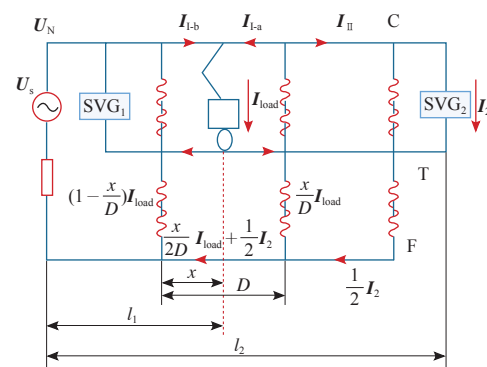


图1 单线AT在线防冰方案

在图2中，上、下行AT所的T、R和F线分别并联后就是全并联复线AT供电方式的在线防冰方案。AT网末端的SVG装置提供防冰电流，首端的SVG装置补偿系统无功功率。两套SVG装置共同保证了高速铁路的在线防冰。

当SVG装置发出的无功功率过大时,会导致接触网末端电压低于供电要求的19 kV,因此,需要建立AT系统的线路电压方程以约束SVG发出的无功功率。AT系统的电压方程为

$$E = Z_{AA} I_2 l_1 + Z_{AA} I_{load} l_2 + U_2 \quad (7)$$

式中, $Z_{AA} = (Z_C + Z_F - 2Z_{CF})/4$, 其阻抗角度为 θ_{AA} ; E 为27.5 kV, 其角度为0; U_2 为19 kV, 其角度为 θ 。

此时, 当末端SVG装置吸收感性无功时, 其电流值上限值为

$$I_2 = \frac{I_{load} Z_{AA} l_2 \sin(\varphi + \theta_{AA}) + U_2 \sin \theta}{Z_{AA} l_1 \sin \theta_{AA}} \quad (8)$$

当末端SVG装置发出感性无功时, 其电流值上限值为

$$I_2 = \frac{-U_2 \sin \theta - I_{load} Z_{AA} l_2 \sin(\varphi + \theta_{AA})}{Z_{AA} l_1 \sin \theta_{AA}} \quad (9)$$

通过上、下限值可以确定末端SVG装置指定电流的大小, 从而为接触网提供防冰电流。

2. 末端并联及全并联AT系统的SVG装置电流限值

以末端并联的AT系统为例, 其与单线AT系统的电流分布求解类似, 机车在第一个AT段运行, 当AT网末端SVG装置吸收感性无功时, 其电流值下限为

$$I_2(x) = \max \left[\begin{array}{l} 4\left(\frac{x}{2D} + \frac{l_1}{4l_2}\right) I_{load} \sin \varphi + \\ 4\sqrt{I_c^2 - \left[\left(\frac{l_1}{4l_2} + \frac{x}{2D}\right) I_{load} \cos \varphi\right]^2} \\ -\frac{l_1}{l_2} I_{load} \sin \varphi + 4\sqrt{I_c^2 - \left(\frac{l_1}{4l_2} I_{load} \cos \varphi\right)^2} \end{array} \right] \quad (10)$$

当AT网末端SVG装置发出感性无功时, 其电流值下限为

$$I_2(x) = \max \left[\begin{array}{l} \left(1 - \frac{x}{2D} - \frac{l_1}{4l_2}\right) I_{load} \sin \varphi + \\ 4\sqrt{I_c^2 - \left[\left(1 - \frac{l_1}{4l_2} - \frac{x}{2D}\right) I_{load} \cos \varphi\right]^2} \\ \frac{l_1}{l_2} I_{load} \sin \varphi + 4\sqrt{I_c^2 - \left(\frac{l_1}{4l_2} I_{load} \cos \varphi\right)^2} \end{array} \right] \quad (11)$$

当AT网末端SVG装置吸收感性无功时, 其电

流值上限为

$$I_2 = -\frac{I_{load} Z_{AA} \frac{(2l_2 - l_1)l_1}{2l_2} \sin(\varphi + \theta_{AA}) + U_2 \cos \theta}{Z_{AA} \frac{l_2}{2} \sin(\theta_{AA} + \theta) + Z_{BB} \frac{D'}{4} \sin(\theta_{BB} + \theta)} \quad (12)$$

当AT网末端SVG装置发出感性无功时, 其电流值上限为

$$I_2 = \frac{-I_{load} Z_{AA} \frac{(2l_2 - l_1)l_1}{2l_2} \sin(\varphi + \theta_{AA}) + U_2 \cos \theta}{Z_{AA} \frac{l_2}{2} \sin(\theta_{AA} + \theta) + Z_{BB} \frac{D'}{4} \sin(\theta_{BB} + \theta)} \quad (13)$$

在式(12)和式(13)中, $Z_{BB} = (Z_C + 2Z_T + Z_{CF} - Z_{TF} - 3Z_{CT})/2$; θ_{BB} 为 Z_{BB} 的阻抗角。

全并联AT系统接触网末端SVG装置的限值与末端并联的AT系统末端SVG装置的限值类似, 其中, 全并联AT系统的牵引网阻抗计算参照文献[10]。通过式(10)~式(13)可以确定末端并联系统AT网末端SVG装置发出功率的大小, 从而为接触网提供防冰电流, 保证高速铁路能够长距离在线防冰。

3. AT网首端SVG的电流输出

AT网首端SVG装置的电流输出由系统所要求的功率因数决定。其补偿的思路是检测系统的无功功率, 若无功功率为感性, 则输出容性无功功率; 相反, 输出感性无功功率, 从而保证功率因数在0.9以上。

仿真与效果分析

接触网采用CTMH150, 承力索采用JTMH-120, 环境温度为 -4°C , 液滴直径为 $25\text{ }\mu\text{m}$, 空气液态含水量为 0.5 g/m^3 , 将所需数据代入式(1)和式(3)中, 忽略上、下行线的互阻抗, 得出接触网的临界防冰电流为533 A。

1. 单线AT的在线防冰系统

在Matlab/Simulink中搭建如图1所示的模型, AT段长15 km, 机车在第一个AT段的10 km处运行, 仅末端SVG装置工作时, 接触网上电流、接触网末端电压以及系统功率因数波形如图4所示。

由图4可知, 接触网电流和接触网末端电压都满足要求, 但系统的功率因数过低, 因此需要补

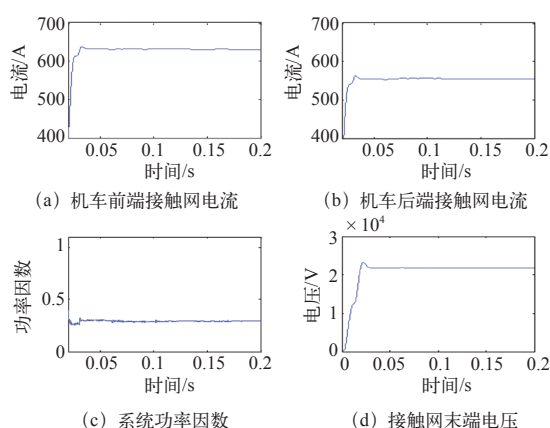


图4 仅末端SVG装置投入时各指标波形

偿系统的无功功率,由于机车是感性负荷,因此接触网前端的SVG需要发出容性无功以提高其功率因数,其仿真效果如图5所示。

由图5可以看出,SVG可以为接触网提供防冰电流,接触网末端电压为22 kV左右,满足供电要求,且使功率因数上升至电力部门所要求的0.9。因此,图1的方案可以运用于单线AT的在线防冰。

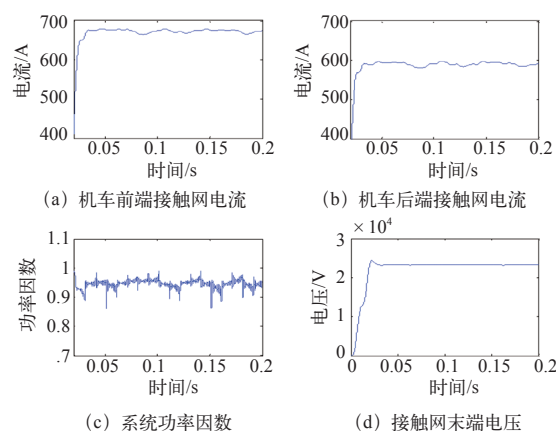


图5 接触网上电流、接触网末端电压以及系统功率因数波形

2. 末端并联及全并联AT系统的在线防冰系统

在Matlab/Simulink中搭建图2所示的模型,假设AT段长15 km,上、下行各有3个AT段,每个AT段都有机车在该段10 km处运行,以电源侧为基准,末端并联以及全并联系统的AT段接触网末端电压和AT段各电流分布如下表所示,系统功率因数曲线如图6所示。

表 末端并联系统和全并联系统的AT段接触网末端电压和AT段各电流分布

	上行AT1	上行AT2	上行AT3	下行AT1	下行AT2	下行AT3
接触网末端电压/kV	24.5 (24.9)	22.4 (22.8)	20.1 (20.5)	24.5 (24.9)	22.3 (22.7)	20 (20.4)
机车前接触网电流/A	788 (780)	665 (657)	673 (665)	786 (778)	663 (654)	672 (664)
机车后接触网电流/A	680 (669)	583 (573)	618 (607)	678 (666)	582 (571)	617 (605)

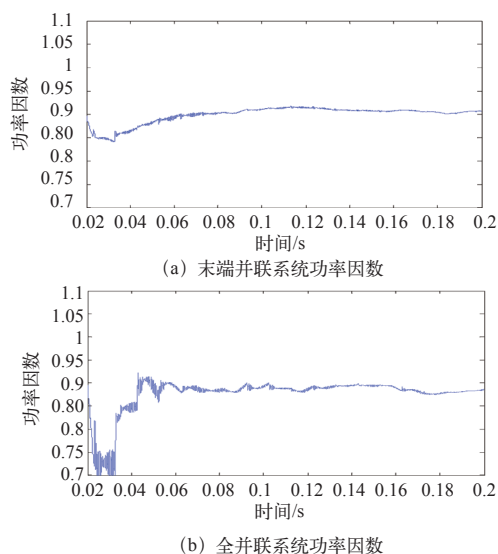


图6 两个系统功率因数曲线

在上表中,括号内为全并联系统的指标。由表和图6可以看出,两系统的各指标值大小相似,

接触网上的电流都满足在线防冰要求,接触网的末端电压也都满足供电要求,系统的功率因数全部保持在0.9左右,因此,AT网首端和末端都并联SVG装置的方案可实现高速铁路的在线防冰。

结束语

基于SVG的高速铁路在线防冰系统,在AT网首端和末端并联SVG装置,通过图3的控制方式控制和所研究的SVG装置电流上、下限值设定指令电流,可向接触网提供在线防冰电流,提高系统的功率因数,满足系统供电要求,保证了在线防冰系统在单线AT供电系统、末端并联复线AT供电系统以及全并联复线AT系统中的可靠运行。经仿真验证,在每个AT段都有机车行驶的情况下,AT网首端和末端并联SVG的方案可以保证高速铁路在线防冰。

(下转第93页)

故障识别是一种小样本分类问题，支持向量机是针对小样本、高维分类的机器学习算法，克服了神经网络收敛速度慢等不足，加快了训练速度，拓宽了模型的应用范围。

结束语

为了提高建筑电气故障的识别效果，提出一种人工鱼群算法和支持向量机相融合的建筑电气故障的识别模型。仿真实验表明，相对于其他建筑电气故障识别模型，本文模型提高了建筑电气故障的识别率，并且故障识别模型的训练速度得到了提升，可以满足建筑电气故障识别的工程应用需求，具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 贺湘琨. 从两起事故看“电楼”现象 [J]. 建筑电气, 2011, 30 (2): 3-5.
- [2] 王宏力, 侯青剑. 故障识别方法现状与展望 [J]. 传感器与微系统, 2008, 27 (5): 1-4.
- [3] 陈安华, 周博, 张会福, 等. 基于改进人工鱼群算法的机械故障聚类诊断方法 [J]. 振动与冲击, 2012, 31 (17): 145-200.
- [4] 胡国胜. 支持向量机及在电力系统中的应用 [J].

高压技术, 2007, 33 (4): 101-105.

- [5] 邵晓非, 宁媛, 刘耀文, 等. 电力系统故障识别方法综述与展望 [J]. 工业控制计算机, 2012, 25 (12): 4-7.
- [6] 杜伟康. 浅谈电气线路常见故障的分析与处理 [J]. 城市建设理论研究, 2013 (2): 56-58.
- [7] 王焕, 王亚慧. 建筑电气实验平台的故障自识别算法研究 [J]. 北京建筑工程学院学报, 2010, 26 (4): 100-105.
- [8] 范庚, 马登武, 张继军, 等. 基于决策树和相关向量机的智能故障识别方法 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49 (14): 267-270.
- [9] 霍一峰. 基于神经网络的建筑电气故障识别研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012.
- [10] 吴茜, 王亚慧. 基于RBF与BP神经网络的建筑电气系统故障识别比较研究 [J]. 北京建筑工程学院学报, 2012, 28 (4): 92-96.
- [11] 王亚慧, 张龙, 韩宁. 建筑电气系统故障识别方法研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 31 (2): 436-440.
- [12] 张龙, 陈宸, 韩宁, 等. 基于压缩感知理论的建筑电气系统故障识别 [J]. 智能系统学报, 2014, 9 (2): 377-380.

(收稿日期: 2015-04-12) **EA**

(上接第88页)

参考文献

- [1] 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.
- [2] 郭蕾, 李群湛, 解绍锋. 在线防冰过程中电气化铁路接触网的温度场 [J]. 西南交通大学学报, 2013 (2): 230-235, 242.
- [3] 李群湛, 郭蕾, 舒泽亮. 电气化铁路接触网在线防冰技术研究 [J]. 铁道学报, 2013 (10): 46-51.
- [4] 崔永强. 电气化铁路接触网在线防冰技术方案研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [5] 孙轩. 电气化铁路接触网防冰融冰技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

- [6] 李岗, 郭华. 接触网交流在线防冰与离线融冰原理研究 [J]. 电气化铁道, 2012 (6): 5-8.
- [7] 王国梁. 接触网融冰防冰问题的分析研究 [J]. 铁道工程学报, 2009 (8): 93-95.
- [8] 莫理莉, 甘凌霄, 王善生. 输电线路完善化融冰技术综述 [J]. 电气自动化, 2013 (3): 1-3, 18.
- [9] 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 (9): 277-284.
- [10] 王猛. AT所全并联供电方式牵引网电压损失分析 [C]. 电气化铁路牵引变电所新技术研讨会论文集, 2004.

(收稿日期: 2015-03-14) **EA**