

文章编号: 1674—8247(2023)04—0100—08

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 04. 019

高速铁路全并联 AT 供电牵引网短路故障仿真研究

张一鸣¹ 智慧² 林宗良² 任卓¹

(1. 西南交通大学, 成都 611756; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:牵引供电系统作为牵引动力的唯一来源,其长期供电能力与大功率随机性冲击负荷之间的平衡适应问题,以及高供电可靠性与复杂系统运行环境之间的协调匹配问题,将是开展 400 km/h 及以上运行速度条件下高速铁路工程建设项目所需解决的关键技术问题。针对全并联 AT 供电系统在实际运营场景下可能出现的 3 种牵引网典型短路故障,分别从单边及双边供电角度,探究了牵引网系统发生不同类型故障时的电气分布特征,并基于实际牵引网悬挂类型及参数选型构建系统仿真模型,以实施短路故障仿真,从而获取牵引变电所系统及馈线侧、AT 所和分区所处遭遇不同类型故障时的故障电流仿真结果。研究成果可为供电系统方案设计及优化配置提供相应的理论和技术支撑。

关键词:高速铁路;牵引供电系统;AT 供电网络;电气特性分析

中图分类号: U223. 6

文献标志码: A

Simulation Study on Short-circuit Fault of Fully Parallel Auto-transformer Fed Traction Network for High-speed Railway

ZHANG Yiming¹ ZHI Hui² LIN Zongliang² REN Zhuo¹

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The traction power supply system is the only source of traction power. The balance between its long-term power supply capacity and high-power random impact load, and the coordination and matching between high power supply reliability and complex system operating environment will be the key technical problems to be solved in promoting the construction project of the high-speed railway with a running speed of 400 km/h or above. In this paper, aiming at 3 kinds of typical short-circuit faults of traction networks that may occur in the actual operation scenario of a fully parallel auto-transformer feeding system, the electrical distribution characteristics of the traction network system with different types of faults were explored from the perspective of unilateral and bilateral power supply, and a system simulation model was constructed based on the actual suspension type and parameter selection of traction network, so as to implement short-circuit fault simulation and obtain the fault current simulation results of traction substation system, feeder side, auto-transformer substation, and section substation when encountering different types of faults. The results can provide corresponding theoretical and technical support for the scheme design and optimal configuration of the power supply system.

Key words: high-speed railway; traction power supply system; auto-transformer feeding network; electrical characteristic analysis

收稿日期: 2022-04-29

作者简介: 张一鸣(1997-),男,硕士研究生。

引文格式: 张一鸣,智慧,林宗良,等. 高速铁路全并联 AT 供电牵引网短路故障仿真研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 100-107.

ZHANG Yiming, ZHI Hui, LIN Zongliang, et al. Simulation Study on Short-circuit Fault of Fully Parallel Auto-transformer Fed Traction Network for High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 100-107.

近年来我国高速铁路建设迅猛发展,铁路客货运量不断提升,列车行车速度对于牵引供电系统供电能力的适应性提出了更高层次的挑战^[1-3]。以新建成渝中线高速铁路项目为例,线路设计速度为350 km/h,同时预留提速至400 km/h的运行条件,在此背景下,作为牵引动力的唯一来源,牵引供电系统的长期供电能力及系统可靠性至关重要。AT供电方式因其供电电压等级的提升,供电能力大大增强,具有供电距离长,电磁干扰防护效果好的特点,被广泛应用于世界各国的高速电气化铁路当中^[4-5]。

目前,我国的高速铁路牵引供电系统所采用的常规供电方案以单边 2×27.5 kV全并联AT供电方案为主,由于全并联AT供电牵引网的拓扑结构具有更高的复杂程度,其发生短路故障时的电气特性更为复杂,因此本文基于现行 2×27.5 kV的全并联AT供电方案,分别针对单边及双边供电模式下的牵引网典型短路故障进行深入分析研究,可为保护装置的整定配置提供相应的理论技术支撑,确保牵引供电方案的高度可靠性,从而更好的满足400 km/h及以上运行条件下的牵引负荷供电需求。

1 全并联AT牵引网短路故障分析

全并联AT供电是通过在牵引变电所及AT所内将上下行牵引网T线、R线以及F线进行并联而形成的一种供电方案。牵引网系统正常运行时因受各方面因素的影响,遭遇线路故障的形式多样,其中以短路故障占绝大部分。通常直接短路故障主要包括T-R、F-R以及T-F短路故障3种形式^[6-7]。

1.1 单边供电模式

单边 2×27.5 kV全并联AT供电方案如图1所示。其特点在于牵引变电所采用 2×27.5 kV出线,所内不设置AT,并通过在牵引变压器的次边绕组设置中间抽头,与钢轨直接相连,可利用牵引变压器兼做馈线AT,能够有效简化变电所结构,减少供电设备数量,降低工程投资成本。

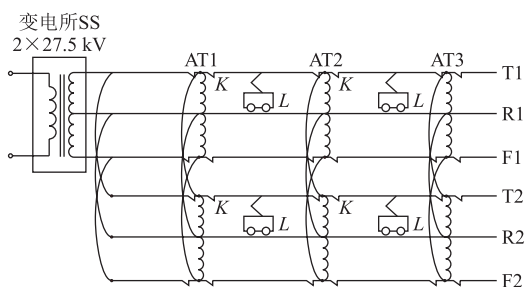
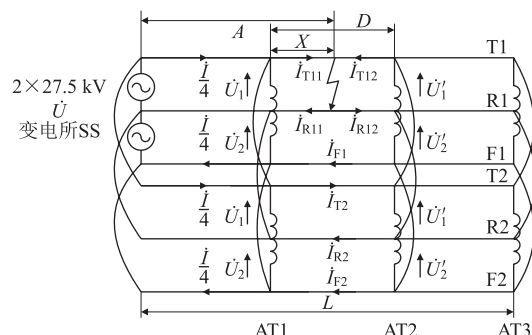


图1 单边 2×27.5 kV全并联AT供电方案示意图

1.1.1 T-R 短路故障

以上行牵引网的接触线及钢轨之间在距离牵引变电所SS的距离长度为A处发生T-R短路故障时的情形为例,此时牵引网中电流分布如图2所示。



联立式(1)~式(6)求解,当认为接触线与正馈线自阻抗近似相等,即可推导得到单边供电模式下发生 T-R 短路故障时简化的牵引网短回路电流分布为:

$$\begin{cases} i_{T11} = i - \frac{3X}{4D}i & i_{T12} = \frac{3X}{4D}i \\ i_{R11} = i - \frac{X}{D}i & i_{R12} = \frac{X}{D}i \\ i_{F1} = \frac{X}{4D}i & i_{T2} = \frac{X}{4D}i \\ i_{R2} = 0 & i_{F2} = \frac{X}{4D}i \end{cases} \quad (7)$$

考虑到全并联 AT 供电方式下, T 线与 F 线的线路长度及走向基本一致,结构上相互对称,阻抗近似相等,根据对称性原理可将以上结论进一步推广得到单边供电模式下发生 F-R 短路故障时的牵引网电流分布,故此处将不再赘述^[8]。

1.1.2 T-F 短路故障

当接触线及正馈线之间在距离牵引变电所 SS 的长度为 A 处发生 T-F 短路故障时,牵引网中电流分布如图 3 所示。

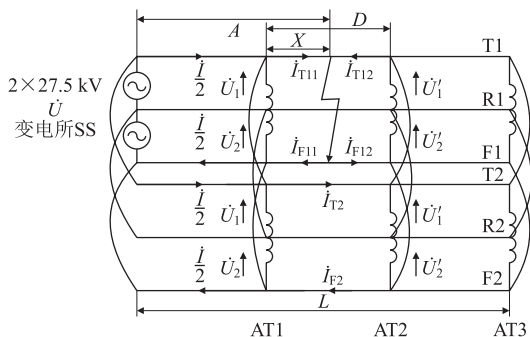


图3 单边全并联AT牵引网T-F短路故障示意图

当认为接触线与正馈线自阻抗近似相等,即可推导得到单边供电模式下发生 T-F 短路故障时,简化的牵引网短回路电流分布为:

$$\begin{cases} i_{T11} = i - \frac{X}{2D}i & i_{T12} = \frac{X}{2D}i \\ i_{F11} = i - \frac{X}{2D}i & i_{F12} = \frac{X}{2D}i \\ i_{T2} = \frac{X}{2D}i & i_{F2} = \frac{X}{2D}i \end{cases} \quad (8)$$

1.2 双边供电模式

双边 2×27.5 kV 全并联 AT 供电方案如图 4 所示。相邻两供电臂实施双边供电,可使接触网供电分

区由 2 个相邻牵引变电所 SS1、SS2 分别从两边供应电能。

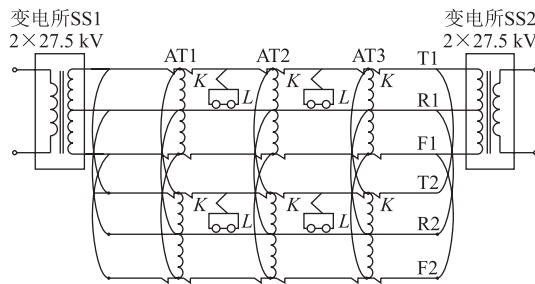


图4 双边 2×27.5 kV 全并联 AT 供电方案示意图

1.2.1 T-R 短路故障

以上行牵引网的接触线及钢轨之间在距离牵引变电所 SS1 的长度为 A 处发生 T-R 短路故障时的情形为例,牵引网中电流分布如图 5 所示。

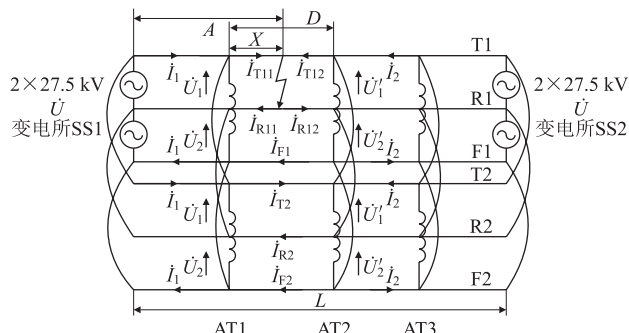


图5 双边全并联AT牵引网T-R短路故障示意图

当发生 T-R 短路故障时,上下行牵引网的 T1 与 T2、R1 与 R2、以及 F1 与 F2 分别形成了 3 个闭合回路,可列出电压回路方程:

$$Xi_{T11}Z_T - (D-X)i_{T12}Z_T - Xi_{R11}Z_{TR} + (D-X)i_{R12}Z_{TR} - Di_{F1}Z_{TF} - D(i_{T2}Z_T - i_{R2}Z_{TR} - i_{F2}Z_{TF}) = 0 \quad (9)$$

$$-Xi_{R11}Z_R + (D-X)i_{R12}Z_R + Xi_{T11}Z_{TR} - (D-X)i_{T12}Z_{TR} - Di_{F1}Z_{RF} + D(i_{R2}Z_R + i_{F2}Z_{RF} - i_{T2}Z_{TR}) = 0 \quad (10)$$

$$-Di_{F1}Z_F + Xi_{T11}Z_{TF} - (D-X)i_{T12}Z_{TF} - Xi_{R11}Z_{RF} + (D-X)i_{R12}Z_{RF} + D(i_{F2}Z_F - i_{T2}Z_{TF} + i_{R2}Z_{RF}) = 0 \quad (11)$$

认为 AT 为理想变压器,则对下行的 2 个网孔列电压方程为:

$$i_{T2}Z_T + i_{R2}Z_R - Z_{TR}(i_{T2} + i_{R2}) + i_{F2}(Z_{RF} - Z_{TF}) = -i_{R2}Z_R + i_{F2}Z_F + Z_{RF}(i_{R2} - i_{F2}) + i_{T2}(Z_{TR} - Z_{TF}) \quad (12)$$

由于在故障点处,各电流满足:

$$\begin{cases} \dot{I}_{T11} + \dot{I}_{T12} = \dot{I} \\ \dot{I}_{R11} + \dot{I}_{R12} = \dot{I} \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 1/4\dot{I} \end{cases} \quad (13)$$

且从牵引变电所 SS1 出线到故障点处归算至 55 kV 侧的电压降和从牵引变电所 SS2 出线到故障点处归算至 55 kV 侧的电压降相等:

$$\begin{aligned} & (Z_T + Z_F - 2Z_{TF})(A - X)\dot{I}_1 + 2[\dot{I}_{T11}(Z_T - Z_{TR})X + \\ & \dot{I}_{R11}(Z_R - Z_{TR})X + X\dot{I}_{F1}(Z_{RF} - Z_{TF})] = (Z_T + Z_F - 2Z_{TF}) \\ & (L - A - D + X)\dot{I}_2 + 2[\dot{I}_{T12}(Z_T - Z_{TR})(D - X) + \\ & \dot{I}_{R12}(Z_R - Z_{TR})(D - X) + \dot{I}_{F1}(D - X)(Z_{TF} - Z_{RF})] \end{aligned} \quad (14)$$

若将故障点处距离牵引变电所 SS1 出线方向最近的 AT 所 AT1 视为一个广义电流节点,电流方程为:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}(\dot{I}_{R11} - \dot{I}_{R2}) + 2\dot{I}_1 = \dot{I}_{T11} + \dot{I}_{T2} \\ \frac{1}{2}(\dot{I}_{R11} + \dot{I}_{R2}) + \dot{I}_{F1} + \dot{I}_{F2} = 2\dot{I}_1 \end{cases} \quad (15)$$

式(9)~式(16)求解,当认为接触线与正馈线自阻抗近似相等,即可推导得到双边供电模式下发生 T-R 短路故障时简化的牵引网短回路电流分布为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{T11} = \dot{I} - \frac{DA + 3LX}{4LD}\dot{I} & \dot{I}_{T12} = \frac{DA + 3LX}{4LD}\dot{I} \\ \dot{I}_{R11} = \dot{I} - \frac{X}{D}\dot{I} & \dot{I}_{R12} = \frac{X}{D}\dot{I} \\ \dot{I}_{F1} = \frac{LX - DA}{4LD}\dot{I} & \dot{I}_{T2} = \frac{LX - DA}{4LD}\dot{I} \\ \dot{I}_{R2} = 0 & \dot{I}_{F2} = \frac{LX - DA}{4LD}\dot{I} \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{I}}{4} - \frac{\dot{I}A}{4L} & \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}A}{4L} \end{cases} \quad (16)$$

根据对称性原理,仍可将以上结论进一步推广得到双边供电模式下发生 F-R 短路故障时的牵引网电流分布,此处不再赘述。

1.2.2 T-F 短路故障

当接触线及正馈线之间在距离牵引变电所 SS1 的长度为 A 处发生 T-F 短路故障时,牵引网中电流分布如图 6 所示。

同理,根据回路方程,当认为接触线与正馈线自阻抗近似相等,即可推导得到双边供电模式下发生 T-F 短路故障时,简化的牵引网短回路电流分布为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{T11} = \dot{I} - \frac{LX + DA}{2DL}\dot{I} & \dot{I}_{T12} = \frac{LX + DA}{2DL}\dot{I} \\ \dot{I}_{F11} = \dot{I} - \frac{LX + DA}{2DL}\dot{I} & \dot{I}_{F12} = \frac{LX + DA}{2DL}\dot{I} \\ \dot{I}_{T2} = \frac{LX - DA}{2DL}\dot{I} & \dot{I}_{F2} = \frac{LX - DA}{2DL}\dot{I} \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{I}}{2} - \frac{\dot{I}A}{2L} & \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}A}{2L} \end{cases} \quad (17)$$

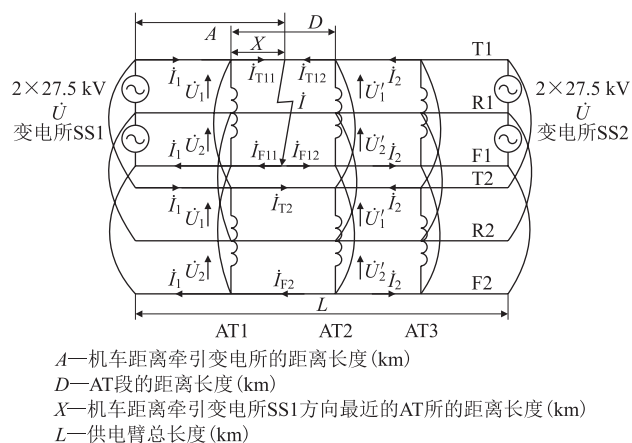


图6 双边全并联AT牵引网T-F短路故障示意图

2 建模仿真

为进一步明确单边及双边供电模式下全并联AT牵引网在发生上述3种典型直接短路故障时,牵引网所承受的短路故障电流,采用MATLAB/Simulink仿真平台,分别搭建了单边及双边供电模式下的全并联AT供电系统仿真模型,并进行短路故障仿真。仿真中牵引网各导线线材选型如表1所示。

表1 牵引网悬挂类型及各导线基本参数表

名称	线型	电阻 Ω /km	计算截面 /mm ²	计算半径 /mm ²	等效半径 /mm ²
接触网	CTMH-150	0.185 2	151	7.2	5.616
承力索	JTMH-120	0.242 0	116.99	7	5.306
正馈线	LGJ-240	0.113 6	275.96	9.372	7.104
钢轨	P60	0.135 0	77.03	109.1	12.79

2.1 单边供电模式仿真分析

设定牵引变电所SS采用Vx接线牵引变压器,安装容量为2x(50+50)MVA,高压侧进线电压为220kV电压等级,外部电源处于最小运行方式下时短路容量设置为1500MVA,处于最大运行方式下时短路容量设置为4500MVA,单个供电臂长度为30km,共包括2个AT段,每个AT段长15km,AT所和分区所内自耦变压器的安装容量为32MVA。

针对牵引变电所SS出口馈线处,以及AT所处和分区所处的T线、R线、F线进行短路故障仿真,此时系统侧按照最小运行方式考虑。当T-R短路故障分别发生在牵引变电所SS出口馈线处,以及AT所和分区所处时,则短路故障电流的仿真及统计结果分别如图7和表2所示。

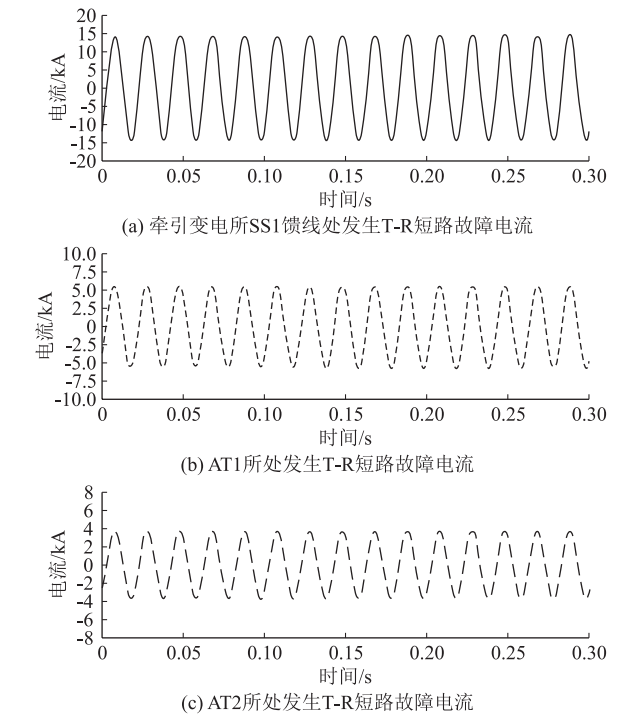


图7 单边供电模式下T-R短路故障仿真结果图

表2 单边供电模式下T-R短路故障仿真统计结果表(A)			
项目	SS出口馈线处故障	AT1所处故障	分区所处故障
短路电流	10 200	3 883	2 621

当F-R短路故障分别发生在牵引变电所SS出口馈线处,以及AT所和分区所处时,则短路故障电流的仿真及统计结果分别如图8和表3所示。

表3 单边供电模式下F-R短路故障仿真统计结果表(A)			
项目	SS出口馈线处故障	AT1所处故障	分区所处故障
短路电流	10 200	3 727	2 578

当T-F短路故障分别发生在牵引变电所SS出口馈线处,以及AT所和分区所处时,则短路故障电流的仿真及统计结果分别如图9和表4所示。

表4 单边供电模式下T-F短路故障仿真统计结果表(A)			
项目	SS出口馈线处故障	AT1所处故障	分区所处故障
短路电流	6 013	2 259	1 387

当在系统侧对牵引变电所SS的电力系统进线进行短路故障仿真时,此时系统侧按照最大运行方式考

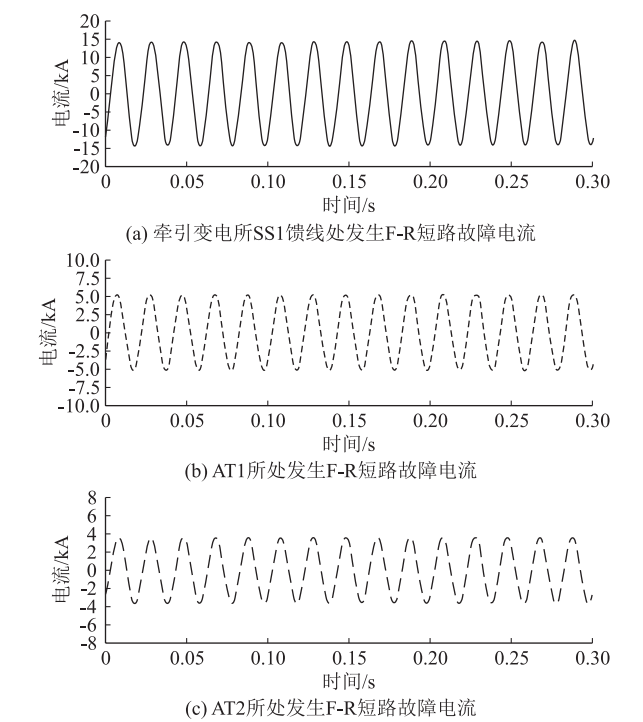


图8 单边供电模式下F-R短路故障仿真结果图

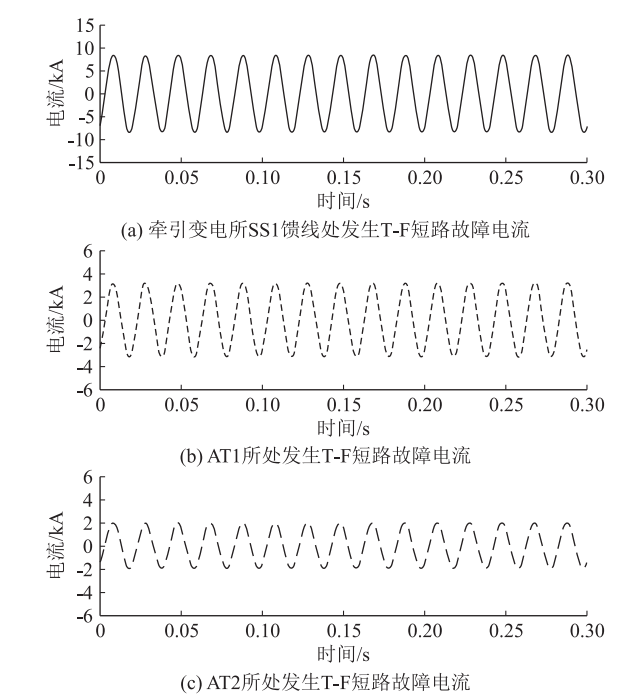


图9 单边供电模式下T-F短路故障仿真结果图

虑。当短路故障发生在牵引变电所SS的高压侧进线处时,则短路故障电流的仿真及统计结果分别如图10和表5所示。

表5 单边供电模式下系统侧短路故障仿真统计结果表(A)			
项目	单相接地短路	两相接地短路	两相相间短路
短路电流	12 470	12 470	10 790

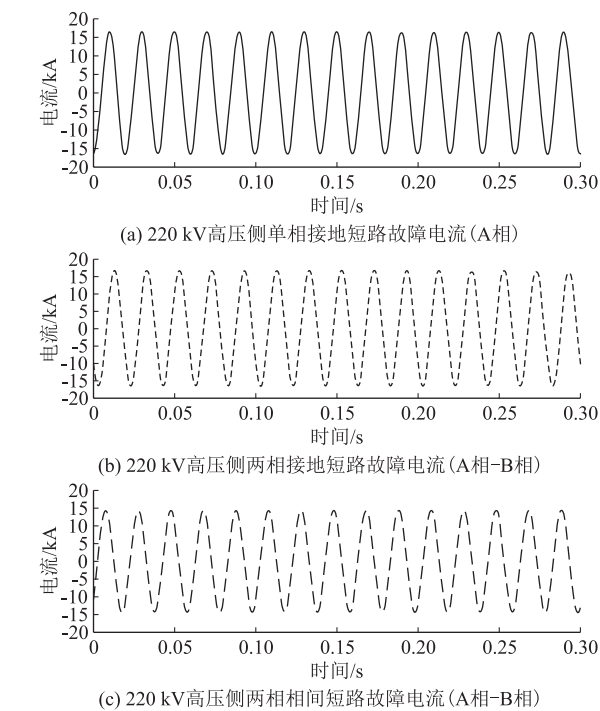


图 10 单边供电模式下系统侧短路故障仿真结果图

2.2 双边供电模式仿真分析

设定牵引变电所 SS1 和 SS2 均采用 V_x 接线牵引变压器, 且其系统参数设置均与单边供电模式相同, 供电臂长度为 60 km, 共包括 4 个 AT 段, 每个 AT 段长 15 km, AT 所和分区所内自耦变压器的安装容量为 32 MVA。

针对牵引变电所 SS1 和 SS2 出口馈线处, 以及 AT 所和分区所处的 T 线、R 线、F 线进行短路故障仿真, 此时系统侧按照最小运行方式考虑。当 T-R 短路故障分别发生在牵引变电所 SS1 和 SS2 出口馈线处, 以及 AT 所和分区所处时, 则短路故障电流的仿真及统计结果分别如图 11 和表 6 所示。

表 6 双边供电模式下 T-R 短路故障仿真统计结果表(A)

项目	SS1 出口馈线处故障	AT1 所处故障	AT2 所处故障	AT3 所处故障	SS2 出口馈线处故障
短路电流	11 300	5 270	4 617	5 270	11 300

当 F-R 短路故障分别发生在牵引变电所 SS1 和 SS2 出口馈线处, 以及 AT 所和分区所处时, 则短路故障电流的仿真及统计结果分别如图 12 和表 7 所示。

表 7 双边供电模式下 F-R 短路故障仿真统计结果表(A)

项目	SS1 出口馈线处故障	AT1 所处故障	AT2 所处故障	AT3 所处故障	SS2 出口馈线处故障
短路电流	11 250	4 984	4 392	4 984	11 250

当 T-F 短路故障分别发生在牵引变电所 SS1 和

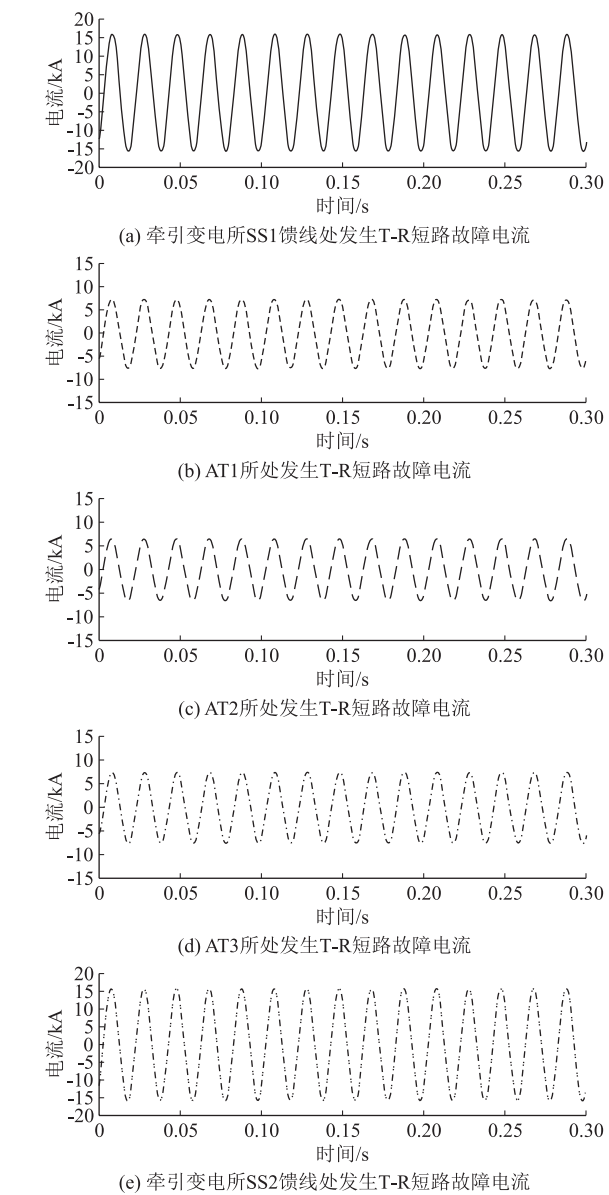


图 11 双边供电模式下 T-R 短路故障仿真结果图

SS2 出口馈线处, 以及 AT 所和分区所处时, 则短路故障电流的仿真及统计结果分别如图 13 和表 8 所示。

表 8 双边供电模式下 T-F 短路故障仿真统计结果表(A)

项目	SS1 出口馈线处故障	AT1 所处故障	AT2 所处故障	AT3 所处故障	SS2 出口馈线处故障
短路电流	6 778	3 256	2 772	3 256	6 778

当在系统侧对牵引变电所 SS1 和 SS2 的电力系统进线进行短路故障仿真时, 此时系统侧按照最大运行方式考虑。当短路故障分别发生在牵引变电所 SS1 和 SS2 的高压侧进线处时, 则短路故障电流的仿真及统计结果分别如图 14 和表 9 所示。

2.3 仿真结果对比

由表 2~表 9 可知, 由于接触网供电分区将由两

表 9 双边供电模式下系统侧短路故障仿真统计结果表(A)

项目	单相接地短路	两相接地短路	两相相间短路
短路电流	12 580	12 470	10 990

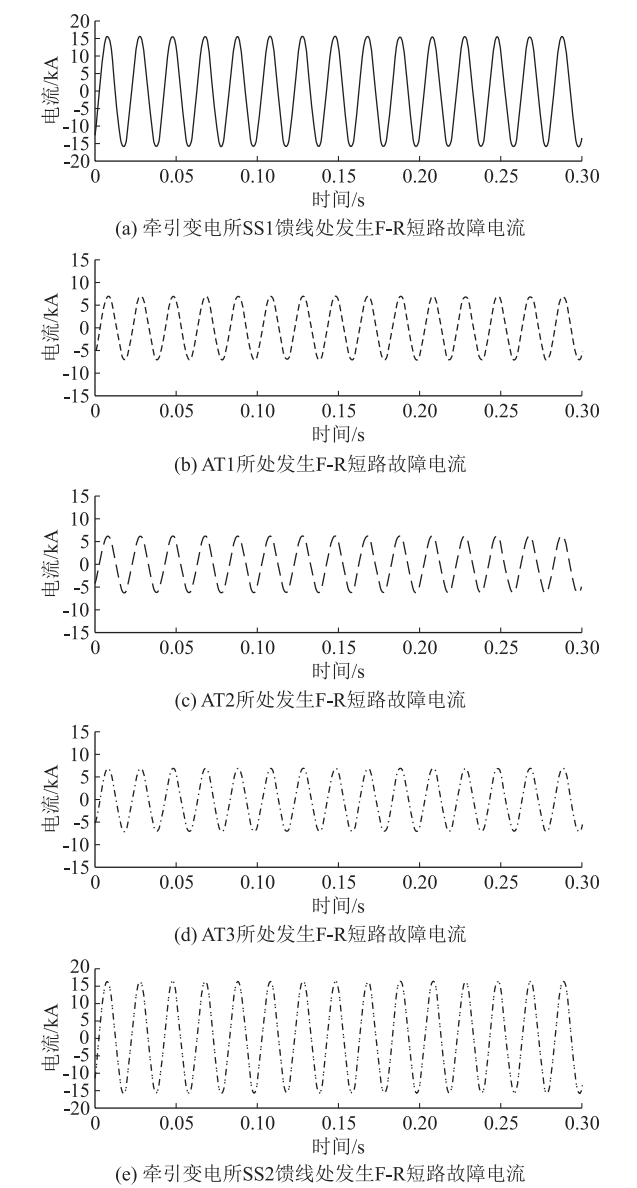


图 12 双边供电模式下 F-R 短路故障仿真结果图

相邻牵引变电所同时供电,因此双边供电模式与单边供电模式相比在相同故障点处发生短路故障时的故障电流将由两路电源同时提供,导致其故障电流的整体水平有所增大,进而使得采用双边供电模式对于牵引供电系统方案设计、设备参数选型及继电保护配置将提出更高要求。但不容忽视的是双边供电模式对于系统供电能力的提升以及取消分区所电分相的设置的作用十分显著,因此有必要结合项目实际条件,针对工程可行性及运行经济性能做进一步的深入研究与探讨。

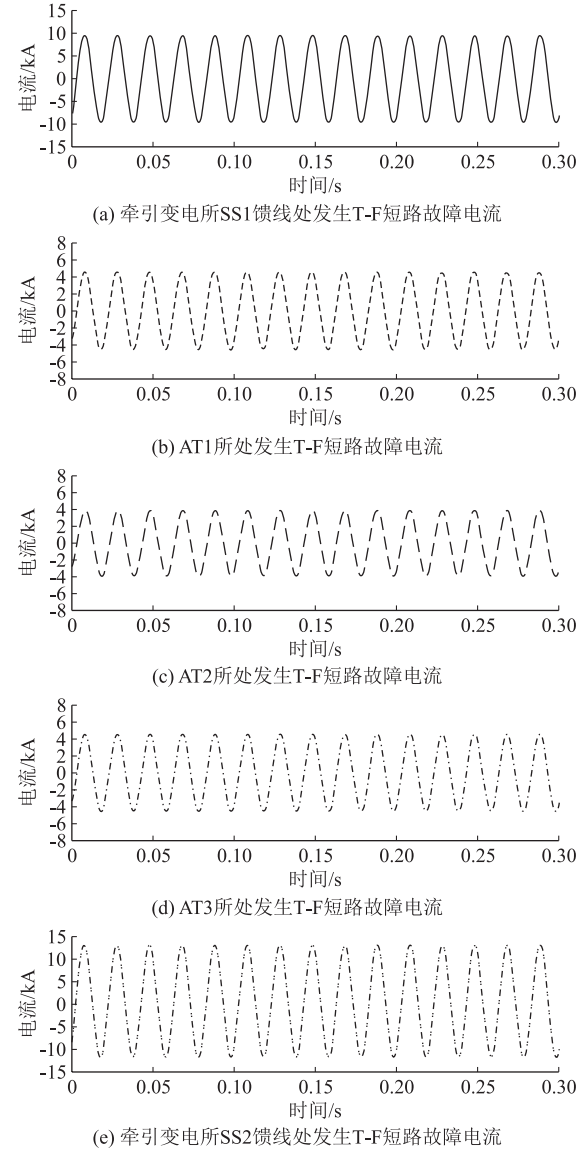


图 13 双边供电模式下 T-F 短路故障仿真结果图

3 结束语

基于我国高速铁路目前现行的 $2 \times 27.5 \text{ kV}$ 全并联 AT 供电方案,针对其在实际运营中可能出现的牵引网短路故障进行了仿真研究,明确了单边及双边供电模式下 3 种不同典型短路故障的牵引网电流分布特征,并推导得到了故障电流在牵引网各导线间的分布计算公式。在此基础上结合实际牵引网悬挂参数建立了单边及双边供电模式下的全并联 AT 供电系统仿真模型,并进行短路故障仿真,获取了相应的故障电流仿真结果,可为供电系统设计、设备参数选型及继电保护方案的整定配置等提供理论技术支撑。

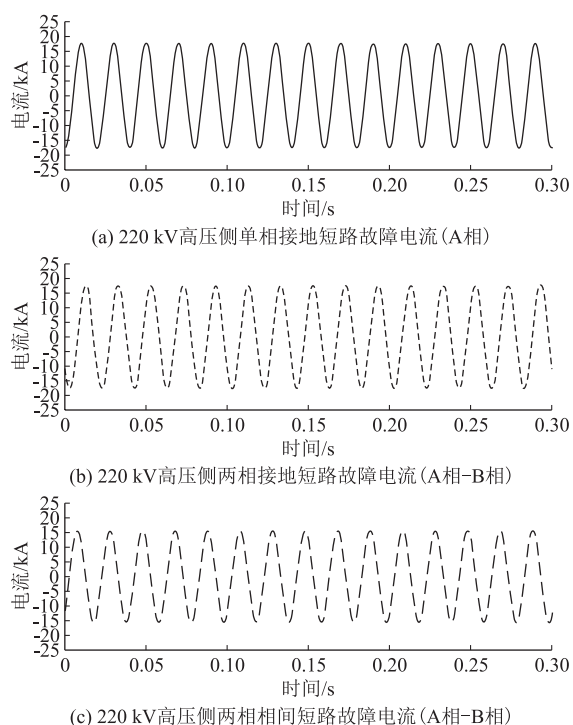


图14 双边供电模式下系统侧短路故障仿真结果图

参考文献:

- [1] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2012.
LI Qunzhan, HE Jianmin. Analysis of Traction Power Supply System [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2012.
- [2] 李群湛,连级三,高仕斌. 高速铁路电气化工程[M]. 成都:西南交通大学出版社,2006.
LI Qunzhan, LIAN Jisan, GAO Shibin. High-speed Railway Electrification Project [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006.
- [3] 李群湛,郭锦,周福林. 交流电气化铁路AT供电牵引网电气分析[J]. 西南交通大学学报,2012,47(1):1-6.
LI Qunzhan, GUO Kai, ZHOU Fulin. Analysis of AT Power Supply Network in AC Electrified Railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(1): 1-6.
- [4] 智慧,林宗良,李剑,等. 高速铁路牵引供电系统适应性关键技术研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(3):79-83.
ZHI Hui, LIN Zongliang, LI Jian, et al. On the Key Technologies of Adaptability of Traction Power Supply System of High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 79-83.
- [5] 马庆安,朱小军,郭楷,等. 三种AT供电模式的比较[J]. 铁道学报,2012,34(3):34-39.
MA Qing'an, ZHU Xiaojun, GUO Kai, et al. Comparison of Three Modes of AT-feeding System [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(3): 34-39.
- [6] 陈海涛,熊列彬,王昌. 纵向分段式全并联AT牵引网保护配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(12):47-51.
CHEN Haitao, XIONG Liebin, WANG Chang. Protection Configuration of Longitudinal Segmented all Parallel at Traction Network [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(12): 47-51.
- [7] 夏兆阳,高利武,郑志辉,等. 高速公路大型重力式及衡重式挡土墙施工[J]. 建筑技术,2020,51(10):1170-1171.
XIA Zhaoyang, GAO Liwu, ZHENG Zhihui, et al. Construction of Big Gravity Type and Balance Weight Retaining Wall in Expressway Project [J]. Architecture Technology, 2020, 51(10): 1170-1171.
- [8] 方俊,郑玲,徐礼强. 临近衡重式挡土墙边坡防治工程研究[J]. 工程技术研究,2020,3(18):114-115.
FANG Jun, ZHENG Ling, XU Liqiang. Research on Slope Treatment Engineering of Adjacent Balance-weight Retaining Wall [J]. Engineering and Technological Research, 2020, 3(18): 114-115.
- [9] 柴晶. 某衡重式挡土墙断面优化设计探讨[J]. 北方交通,2020(8):65-68,72.
CHAI Jing. Discussion on Optimization Design for the Section of a Balance Weight Retaining Wall [J]. Northern Communications, 2020(8): 65-68, 72.
- [10] GB 50330-2013 建筑边坡工程技术规范[S].
GB 50330-2013 Technical Code for Building Slope Engineering[S].
- [11] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010-2010 Code for Design of Concrete Structures[S].
- [12] 何蛟,罗劲松. 衡重式超高挡土墙在山区公路中的应用[J]. 西部交通科技,2020(4):57-59.
HE Jiao, LUO Jinsong. Application of Counterweight Super-high Retaining Wall in Mountainous Highway [J]. Western China Communication Science & Technology, 2020(4): 57-59.
- [13] 宋鑫华,闫鸿浩,徐佩洪. 基于非线性化衡重式挡土墙稳定性分析[J]. 长江科学院院报,2018,35(2):98-103.
SONG Xinhua, YAN Honghao, XU Peihong. Stability Analysis of Balance-weight Retaining Wall Based on Nonlinear Model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(2): 98-103.