

# 贯通式同相AT牵引供电系统牵引网边界频率特性研究

陈仕龙, 杨鸿雁, 毕贵红, 赵四洪  
(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:**分析贯通式同相自耦变压器(AT)牵引供电系统及由牵引变电所出口处电容和区外一段接触线构成的牵引网边界频域特性,分析牵引网及边界对高频暂态信号的衰减作用及故障位置对保护安装处检测到的高频暂态信号的影响。研究表明,在现行贯通式同相AT牵引供电系统中,牵引网对高频暂态量的衰减作用小于边界对其的衰减作用;保护安装点检测到的高频暂态量与故障发生的位置密切相关。建立仿真模型对贯通式同相AT牵引供电系统牵引网及边界的对高频暂态量的衰减作用进行验证,仿真结果验证了研究结果的正确性。

**关键词:**贯通式同相AT供电系统;牵引网;边界;高频暂态信号;频谱分析

**中图分类号:**TM 771

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202102026

## 0 引言

高速铁路的建设与国民经济的增长息息相关,我国通过对高速铁路加大投资力度和提供政策支撑保证其长期稳定的发展。随着高速铁路的迅猛发展,已有的牵引供电系统在运行过程中逐渐暴露出过分相、电能质量以及系统效率等方面的问题<sup>[1]</sup>,新型贯通式同相牵引供电系统可以有效地解决其中最为紧迫的电分相问题和负序问题<sup>[1-2]</sup>。自耦变压器AT(AutoTransformer)供电方式在经济、技术方面有诸多优点,已广泛应用于高速重载列车<sup>[1]</sup>。

利用数字信号处理技术从故障暂态信号所包含的信息中提取有效信息进而构成继电保护的方法已得到了普遍应用。当贯通式同相牵引供电系统的牵引网发生故障时将会产生大量的故障暂态信号,如何利用这些故障暂态信号构成高效、可靠的牵引供电系统保护方法已引起继电保护工作者的关注<sup>[3-7]</sup>。文献[8]以特高压直流输电系统为研究对象,分析了特高压直流输电线路边界和输电线路对高频暂态量的衰减作用,并得出当线路的长度超过某一临界值时边界对高频暂态量的衰减作用将小于线路对其衰减作用的结论。文献[9]以贯通式同相AT牵引供电系统为研究对象,利用Carson理论计算得到AT牵引网参数并推导了AT牵引网相模变换矩阵。

本文提出由一段接触线和牵引变电所出口处电容构成牵引网边界,参照文献[8]对特高压直流输电线路边界及线路对高频量衰减作用的研究方法,分析贯通式同相AT牵引供电系统牵引网边界的频率

特性,得到其对故障高频暂态量的带阻传变特性;利用文献[9]推导得到的贯通式同相AT牵引供电系统牵引网参数及牵引网相模变换矩阵,对该牵引供电系统进行相模变换,得到其线模分量;对贯通式同相AT牵引供电系统的牵引网进行频域分析,得出两相邻牵引变电所之间的牵引网距离大于某个临界值时,牵引网对高频暂态信号的衰减作用可能大于边界对其衰减作用的结论,并推导出该临界值的范围,研究表明由于同一区间的牵引网线路较短,远小于临界值,牵引网对高频暂态信号的衰减作用不会超过边界对其的衰减作用;研究了贯通式同相AT供电系统牵引网发生故障时,故障位置的改变对保护正确动作的影响。本文工作为进一步开展牵引网的暂态保护研究提供了基础。

## 1 贯通式同相AT牵引供电系统牵引网频率特性

### 1.1 贯通式同相AT牵引供电系统牵引网参数

输电线路的电磁特性能够通过其参数进行集中表示,即根据贯通式同相AT牵引供电系统牵引网的工程条件,可推导出该牵引网的模量特性阻抗进而反映牵引网的频率特性<sup>[6-8]</sup>。本文采取三相脉宽调制(PWM)整流与单相PWM逆变的变换方式来实现牵引变电所的交流-直流-交流变换<sup>[10]</sup>;电力机车模型选取CHR2型交-直-交电力机车模型<sup>[11]</sup>,利用PSCAD仿真平台搭建贯通式同相AT牵引供电系统模型,该供电系统牵引网结构见图1。图中, $C_1$ 为承力索; $C_2$ 为接触线; $F$ 为负馈线; $N$ 为回流线; $T_1$ 、 $T_2$ 为钢索;各导线、钢轨位置及距离均以mm为单位<sup>[6]</sup>。图1中各部分的型号、参数见附录中表A1<sup>[6]</sup>。

由于AT供电方式下钢轨和回流线电位较低,故障发生时钢轨中的故障暂态信号与接触网和负馈线

收稿日期:2020-03-02;修回日期:2020-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51767012)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51767012)

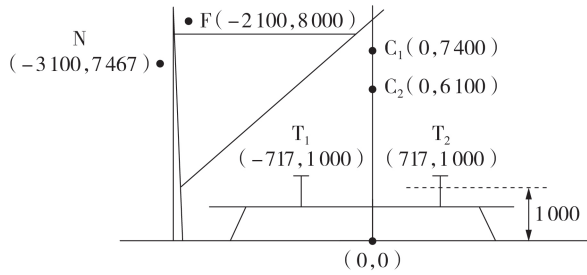


图1 AT供电牵引网结构示意图

Fig.1 Structure diagram of AT power supply traction network

中的故障暂态信号相比极为微弱,且在实际工程中难以获得,因此将钢轨与回流线视作架空地线并按照文献[3-4]中的方法将其消去<sup>[9]</sup>。

文献[9]利用图1所示结构及表A1中的参数,对牵引网模型进行如下简化:将承力索 $C_1$ 与接触线 $C_2$ 等效合并为 $C'$ 相;负馈线、钢轨和回流线等效合并为 $F$ 相。由Carson理论计算得到牵引网简化模型的阻抗 $Z$ 的相量矩阵 $Z_p$ 、电容 $C$ 的相量矩阵 $C_p$ 、电感的相量矩阵 $L_p$ 分别如式(1)~(3)所示<sup>[1,12]</sup>。

$$Z_p = \begin{bmatrix} 0.1117 + j0.3544 & 0.0361 + j0.1167 \\ 0.0361 + j0.1167 & 0.2002 + j0.5169 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 1.2304 \times 10^{-8} & -1.7417 \times 10^{-9} \\ -1.7417 \times 10^{-9} & 7.8435 \times 10^{-9} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L_p = \begin{bmatrix} 1.1282 \times 10^{-3} & 3.7147 \times 10^{-4} \\ 3.7147 \times 10^{-4} & 1.6454 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $Z_p$ 、 $C_p$ 、 $L_p$ 中元素的单位分别为 $\Omega/\text{km}$ 、 $\text{F}/\text{km}$ 、 $\text{H}/\text{km}$ 。

## 1.2 牵引网的相模分析

贯通式同相AT牵引供电系统的牵引网是由 $C'$ 相和 $F$ 相构成的两相不换位线路。由于 $C'$ 相是由接触线与承力索2条相异的导线共同构成的一相二分裂导线, $F$ 相由负馈线、钢轨和回流线等效合并而成, $C$ 相和 $F$ 相的线路参数不同,故牵引网是不对称线路。牵引网的不对称性导致线路的传播模量也是不平衡的,因此需要对电压、电流波动方程采样不同的变换矩阵进行对角化<sup>[9,12]</sup>,如式(4)、(5)所示。

$$\begin{cases} U_p = T_u U_m \\ I_p = T_i I_m \end{cases} \quad (4)$$

$$T_i = (T_u^T)^{-1} \quad (5)$$

其中, $T_u$ 、 $T_i$ 分别为电压、电流的相模变换矩阵; $U_p$ 、 $I_p$ 分别为电压、电流的相量矩阵; $U_m$ 、 $I_m$ 分别为电压、电流的模量矩阵。

计算得牵引网电阻、电感、电容模量矩阵如式(6)所示。

$$\begin{cases} R_m = T_u^{-1} R_p T_i \\ L_m = T_u^{-1} L_p T_i \\ C_m = T_i^{-1} C_p T_u \end{cases} \quad (6)$$

其中, $R_p$ 为牵引网电阻的相量矩阵; $R_m$ 、 $L_m$ 、 $C_m$ 分别为牵引网电阻、电感、电容的模量矩阵。根据式(4)~(6)及牵引网参数计算得到的模量矩阵 $R_m$ 、 $L_m$ 、 $C_m$ 分别如附录中式(A1)~(A3)所示<sup>[11]</sup>。

牵引网的模量特性阻抗(波阻抗) $Z_{ej}(j\omega)$ 、模量传播系数 $\gamma_j$ 、牵引网的传输函数 $A_j(j\omega)$ 分别如式(7)~(9)所示。

$$Z_{ej}(j\omega) = \sqrt{\frac{Z_j}{Y_j}} = \sqrt{\frac{R_j + j\omega L_j}{j\omega C_j}} \quad (7)$$

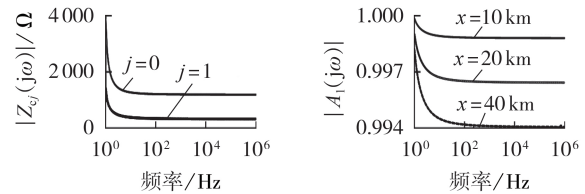
$$\gamma_j = \sqrt{R_j + j\omega L_j} = \alpha_j + j\beta_j \quad (8)$$

$$A_j(j\omega) = e^{-\gamma_j x} \quad (9)$$

其中, $j=1$ 、 $j=0$ 分别表示1模、0模; $\alpha_j$ 为衰减常数; $\beta_j$ 为相位常数; $\omega$ 为角频率; $R_j$ 、 $L_j$ 、 $C_j$ 分别为单位长度线路的电阻、电感、电容<sup>[8]</sup>;  $x$ 为牵引网线路长度。

## 1.3 牵引网的频率特性

根据贯通式同相AT牵引供电系统牵引网的结构和参数,对牵引网进行相模分析,并由式(7)~(9)得到其牵引网模量特性阻抗的幅频特性如图2(a)所示,牵引网1模分量传输函数的幅频特性曲线如图2(b)所示。



(a) 模量特性阻抗幅频特性 (b) 牵引网1模幅频特性

图2 贯通式同相AT牵引供电系统的幅频特性

Fig.2 Amplitude-frequency characteristics of continuous co-phase AT traction power supply system

由图2(a)可见,贯通式同相AT牵引供电系统牵引网的模量特性阻抗的幅值 $|Z_{ej}(j\omega)|$ 随着频率的增加而减小,最终趋于稳定; $|Z_{e0}(j\omega)|$ 的初始值、稳定值都较大,且随着频率变化的程度相对较小; $|Z_{e1}(j\omega)|$ 的初始值远小于 $|Z_{e0}(j\omega)|$ 的初始值, $|Z_{e1}(j\omega)|$ 随着频率的升高迅速达到稳定状态,但其稳定值仍小于 $|Z_{e0}(j\omega)|$ 的稳定值。由图2(b)可见,牵引网1模分量传输函数的幅值 $|A_1(j\omega)|$ 随着频率的升高而降低,且牵引网长度 $x$ 对 $|A_1(j\omega)|$ 的影响较大,牵引网越长, $|A_1(j\omega)|$ 越小,即:贯通式同相AT牵引供电系统运行时,牵引网对高频暂态信号有一定的衰减作用,且牵引网的长度对衰减作用有很大的影响,牵引网越长则衰减作用越强。 $A_0(j\omega)$ 的特性与 $A_1(j\omega)$ 相似,本文不再赘述。

## 2 贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网边界的频率特性

### 2.1 牵引网边界

贯通式同相 AT 牵引供电系统因三相交流-直流-单相交流变换器的存在会产生降低牵引网电能质量的高次谐波,故需要在牵引变电所出口处装设由电容、电感构成的滤波装置来降低高次谐波的干扰,其中电容并联在牵引网上,连接方式如图 3 所示<sup>[10]</sup>。由图可见,电容  $C_b$  并联在牵引网上形成了天然边界,该边界对高频量有很强的衰减作用。

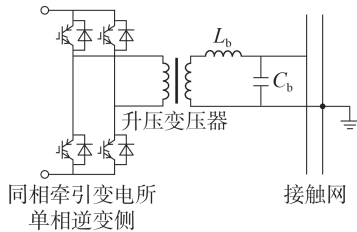


图3 电容与牵引网并联示意图

Fig.3 Schematic diagram of capacitor and traction network connected in parallel

### 2.2 牵引变电所出口处电容的频率特性

牵引变电所出口处电容等效阻抗如式(10)所示。

$$Z_1(j\omega) = \frac{1}{j\omega C_b} \quad (10)$$

根据文献[9],  $C_b = 130 \mu\text{F}$ , 则有:

$$Z_1(j\omega) = \frac{1}{j2\pi f \times 130 \times 10^{-6}} \quad (11)$$

其中,  $f$  为频率。

### 2.3 牵引变电所出口处一段接触线的频率特性

文献[13]在研究电压源换流器型直流输电(VSC-HVDC)技术输电线路全线速动保护时,提出直流电容与区外 10 m 长线路共同构成该直流系统的输电线路边界<sup>[13]</sup>,故本文在研究贯通式同相 AT 牵引供电系统时可以由一段接触线与牵引变电所出口处电容一起构成牵引网的天然边界。大量仿真表明,3 m 长接触线与牵引变电所出口电容构成的边界已能有效区分区内、外故障,故本文构成边界的接触线的长度取为 3 m,3 m 长接触线的等效阻抗为:

$$Z_2(j\omega) = R_1 + j\omega L_1 \quad (12)$$

其中,  $R_1$ 、 $L_1$  分别为 3 m 长接触线的电阻、电感。由文献[9],两者取值分别为  $4.38 \times 10^{-4} \Omega$ 、 $1.7676 \times 10^{-3} \text{H}$ , 则有:

$$Z_2(j\omega) = 4.38 \times 10^{-4} + j2\pi f \times 1.7676 \times 10^{-3} \quad (13)$$

### 2.4 贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网边界的频率特性

本文提出牵引变电所出口处电容与其外侧 3 m

长的接触线构成了牵引网的物理边界,边界等效电路如图 4 所示。

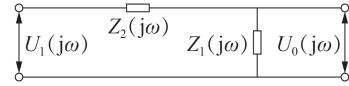


图4 贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网边界

Fig.4 Boundary of traction network of continuous co-phase AT traction power supply system

由等效电路图推导出牵引网边界的传递函数为:

$$G(j\omega) = \frac{U_0(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{Z_1(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)} = \frac{1}{(j\omega)^2 L_1 C_b + j\omega R_1 C_b + 1} = \frac{1}{-9.0625 \times 10^{-3} f^2 + j3.5758 \times 10^{-4} f + 1} \quad (14)$$

其中,  $U_0(j\omega)$ 、 $U_1(j\omega)$  分别为电压 0 模、1 模函数。

传递函数  $G(j\omega)$  的幅频特性如图 5 所示。分析图 5 可知,在直流分量和低频段(0~110 Hz),  $G(j\omega)$  的幅值  $|G(j\omega)| = 1$ ;  $|G(j\omega)|$  在  $f = 395 \text{ Hz}$  处达到极大值;当  $f > 1 \text{ kHz}$  时,  $|G(j\omega)| \ll 1$ , 即贯通式同相 AT 牵引供电系统的边界元件对故障信号的高频暂态量有很强的衰减作用。综上所述,牵引网区外故障产生的故障信号需经过牵引网边界的衰减作用(或边界与牵引网的双重衰减作用)后才传至保护安装处,故检测到的故障高频暂态量较小;而区内故障的故障信号仅经过牵引网的衰减作用便到达保护安装处,故检测到的故障高频暂态量较大<sup>[8]</sup>。

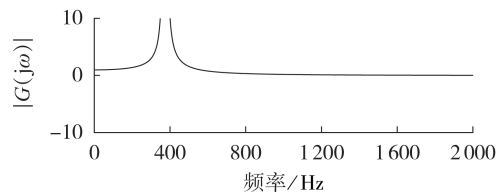


图5  $G(j\omega)$  的幅频特性

Fig.5 Amplitude-frequency characteristics of  $G(j\omega)$

## 3 贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网边界及线路对故障高频暂态量的衰减作用

贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网及边界对高频信号都有一定的衰减作用,但衰减的程度存在一定的差异。牵引网对高频信号的衰减作用较弱,但随着牵引网线路长度的增加而增加,边界对高频暂态信号有很强的衰减作用。文献[8]在比较特高压直流输电线路和边界对高频暂态量的衰减作用时,提出随着线路长度的增长,线路对高频暂态量的衰减可能超过边界对其的衰减作用。可见由于牵引网对高频暂态信号的衰减作用随牵引网长度的增长

而增强,所以当牵引网的长度超过一定范围时,牵引网对高频暂态信号的衰减作用可能会大于边界对其的衰减作用。因此,有必要对贯通式同相AT牵引供电系统牵引网及边界对故障暂态信号高频分量的衰减作用进行比较分析。

假设存在一个高频暂态信号  $U(j\omega)$  分别通过贯通式同相AT牵引供电系统的牵引网及边界。通过长度为  $x$  的牵引网后,  $U(j\omega)$  经牵引网的衰减作用变为  $U_L(j\omega)$ , 通过牵引网边界后  $U(j\omega)$  经边界的衰减作用变为  $U_B(j\omega)$ , 则有<sup>[8]</sup>:

$$\frac{U_L(j\omega)}{U(j\omega)} = e^{-\gamma x} \quad (15)$$

$$\frac{U_B(j\omega)}{U(j\omega)} = G(j\omega) \quad (16)$$

$$\text{令 } |U_B(j\omega)| \geq |U_L(j\omega)|, \text{ 即:} \quad (17)$$

$$|G(j\omega)| \geq |e^{-\gamma x}|$$

则有:

$$x \geq -\frac{1}{\alpha} \ln |G(j\omega)| \quad (18)$$

其中,  $\alpha$  为衰减系数, 即线路长度为  $x$  的牵引网的传播系数的实部;  $\gamma$  为模量传播系数。

分析式(18)可知, 当  $x < -\ln |G(j\omega)| / \alpha$  时, 边界对频率为  $\omega / (2\pi)$  的高频暂态量的衰减作用大于牵引网对其的衰减作用; 当  $x = -\ln |G(j\omega)| / \alpha$  时, 边界对频率为  $\omega / (2\pi)$  的高频暂态量的衰减作用与牵引网对其的衰减作用相同; 当  $x > -\ln |G(j\omega)| / \alpha$  时, 边界对频率为  $\omega / (2\pi)$  的高频暂态量的衰减作用小于牵引网对其的衰减作用。

通过大量仿真实验发现: 两相邻牵引变电所之间的牵引网长度达到300 km时, 将首次出现牵引网对高频暂态信号的衰减作用超过边界对其的衰减作用, 即牵引网的衰减作用大于边界的衰减作用的牵引网长度临界值为300 km。牵引网末端故障的仿真结果如图6所示, 区外3 m处故障的仿真结果见附录A图A1。

现行贯通式同相AT牵引供电方式中两相邻牵引变电所之间牵引网的距离最长不超过120 km, 故

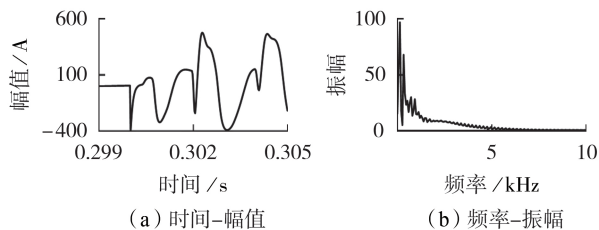


图6  $x=300$  km时牵引网末端故障的仿真结果

Fig.6 Simulative results of fault occurring at end of traction network when  $x=300$  km

两相邻牵引变电所牵引网对高频暂态信号的衰减作用小于边界对其的衰减作用<sup>[8]</sup>。

## 4 故障位置对保护安装处高频暂态量频率特性的影响

### 4.1 AT及机车对故障行波传播的影响

AT并联在牵引网中, 在理想情况下对于高频故障行波信号可以将其绕组看作开路, 忽略其对故障行波信号的影响。在实际工程中, AT虽然会对牵引网故障行波有一定的折反射, 但并不影响利用故障初始首波头构成的行波保护方法<sup>[9]</sup>。

交-直-交电力机车通过单相降压变压器直接与牵引网相连, 降压后与单相三电平PWM整流器连接, 由于其波阻抗极大, 折射率和反射率分别接近0、1, 牵引网发生故障时故障行波几乎不进入电力机车<sup>[11]</sup>, 故牵引负荷对牵引网高频暂态信号的传播几乎不产生影响。但电力机车会产生高次谐波, 同时机车在运动时受电弓和接触线之间会产生电弧, 电弧含有大量的高频暂态信号, 可见牵引负荷本身就是一个移动的高频暂态信号。所以为了防止暂态保护装置误动, 有必要研究电力机车在保护区间内启动及运动时所产生的高频暂态信号的频率特性, 并将其与牵引网故障所产生的高频暂态信号进行比较, 提出故障高频暂态信号和牵引负荷高频暂态信号的辨识方法, 笔者将在后续工作中对此进行研究。

### 4.2 故障位置对保护安装处高频暂态量的影响

贯通式同相AT牵引供电系统牵引网及边界对故障高频暂态信号的衰减作用强弱与故障位置密切相关, 不同故障发生位置示意图如图7所示<sup>[5]</sup>。规定: 同相牵引变电所1、2之间的牵引网发生的故障为区内故障, 否则为区外故障。本节以如下设置为例进行分析: 故障  $f_2$  位于同相牵引变电所2出口处; 故障  $f_3$  与同相牵引变电所2的距离为20 km; 故障  $f_4$  与同相牵引变电所2的距离为40 km, 为牵引网末端

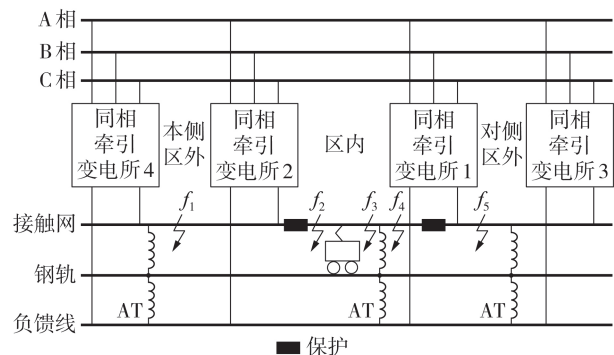


图7 贯通式同相AT牵引供电系统牵引网故障位置示意图

Fig.7 Schematic diagram of fault location of traction network of continuous co-phase AT traction power supply system

故障;故障 $f_1$ 位于同相牵引变电所2的区外3 m处(本侧区外);故障 $f_3$ 位于同相牵引变电所1区外3 m处(对侧区外)。贯通式同相牵引供电系统为多电源双边供电系统,为有效隔离并切除故障,需在每个保护区间的首端和末端均设置断路器。如图7所示,若保护对象为同相牵引变电所1、2之间的接触线,则需在该接触线的首端和末端安装保护装置,电流互感器和断路器也布置在相同的位置。

本侧区外发生故障 $f_1$ 时,保护设备检测到的故障高频暂态量是通过牵引网边界衰减作用后的信号。 $f_2$ — $f_4$ 均为区内故障,其中 $f_2$ 发生在保护安装处,故障高频暂态量不通过牵引网或边界的衰减作用而直接到达保护安装处;当 $f_3$ 、 $f_4$ 发生时,故障高频暂态信号仅通过牵引网的衰减作用后便被保护设备检测到。 $f_5$ 发生时,故障高频暂态量经过牵引网及边界的共同衰减作用后才能被保护设备检测到。

综上所述,当牵引网故障发生在不同位置时保护设备检测到高频暂态信号也不同。由于工程实际中AT供电方牵引网供电距离较短,即 $x \ll 300$  km,因此在目前的贯通式同相AT牵引供电系统中牵引网对高频暂态信号的衰减作用不会超过边界对其的衰减作用。

## 5 牵引网及边界对高频暂态信号衰减作用仿真

### 5.1 贯通式同相AT牵引供电系统建模

利用PSCAD/EMTDC平台搭建的贯通式同相AT牵引供电系统仿真模型如附录中图A2所示。模型参数设置为:选取220 kV/27.5 kV为设计电压,频率为50 Hz;采用三相PWM整流器与单相PWM逆变器共同构成三相交流-单相交流的电能变换器<sup>[9-10]</sup>;利用正弦脉宽调制(SPWM)技术在输出以基波为主的单相交流电的同时抑制高次谐波<sup>[14]</sup>;电力机车模型选取CHR2型交-直-交机车模型,总牵引功率为4800 kW<sup>[11]</sup>;电力机车模型选用电压型变流器模型,因为与电流型变流器相比,电压型变流器输出的电压波形更接近正弦波且电压波中含有的谐波分量较少<sup>[11]</sup>;将AT并联于牵引网中,其变比为2:1<sup>[15]</sup>。

### 5.2 牵引网和边界对高频暂态信号的衰减作用

利用本文搭建的贯通式同相AT牵引供电系统模型,分别对牵引网及边界对高频暂态信号的衰减作用进行仿真试验。雷击、牵引网故障、电力机车的高次谐波等都可以在牵引网中产生高频暂态信号,其中雷击包括非故障型雷击和故障型雷击,牵引网故障包括接触网对地故障、负馈线对地故障、接触网对负馈线故障、接触网对负馈线接地故障等。本文主要研究牵引网及边界对牵引网不同位置产生的高频暂态信号的衰减作用,选择对非故障型雷击发生

在接触网(简称非故障型雷击接触网)、负馈线(简称非故障雷击负馈线)的不同位置,以及接触线对地故障下牵引网及边界对高频暂态信号的衰减作用进行仿真研究。对于故障型雷击、负馈线对地故障、接触网对负馈线故障、接触网对负馈线对地故障、电力机车负荷等情况下的高频暂态信号,牵引网及边界对其的衰减规律与对非故障型雷击情况下的衰减规律是基本一致的,区别在于高频暂态信号特征不同,由于篇幅所限,本文未对这些故障下高频暂态信号的衰减进行仿真,详细的仿真将在后续研究中进行。

#### 5.2.1 非故障型雷击接触网

对非故障型雷击接触网进行仿真时,雷击位置设置在区内距同相牵引变电所2为0(保护安装点)、20、40 km处及本侧区外距同相牵引变电所2出口3 m处、对侧区外距同相牵引变电所1出口3 m处。本文选取幅值为20 kA、2.6/50  $\mu$ s双指数波形的雷电流,干扰性雷击信号主能量频带为[20,30] kHz<sup>[16]</sup>。设置0.3 s为非故障型雷击开始时间,提取保护安装处检测到的暂态电流通过相模变换进行解耦,得到非故障型雷击发生在接触网保护安装处及本侧区外3 m时保护安装处的暂态电流1模分量信号如图8所示,雷击发生在接触网其他位置的暂态电流1模分量信号见附录中图A3。

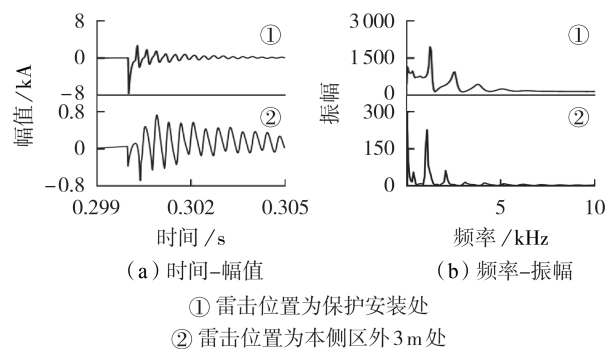


图8 非故障型雷击接触网的部分仿真结果

Fig.8 Partial simulative results of non-fault lightning strike occurring in catenary

由图8及图A3可知:非故障型雷击发生在牵引网保护安装点处时,暂态电流1模分量的幅值最大;非故障型雷击发生在牵引网区内40 km处(牵引网末端)时的暂态电流1模分量的幅值小于其发生在牵引网区内20 km处时的暂态电流1模分量的幅值,但二者均大于非故障型雷击发生在牵引网区外时的幅值;非故障型雷击发生在本侧区外3 m处时的暂态电流1模分量的幅值大于其发生在对侧区外3 m处时暂态电流1模分量的幅值,且后者的值最小。

#### 5.2.2 非故障型雷击位置为负馈线

非故障型雷击发生在负馈线保护安装处时,保护安装处检测到的暂态电流1模分量信号如图9所

示,非故障型雷击发生在负馈线其他位置时的仿真结果见附录中图A4。

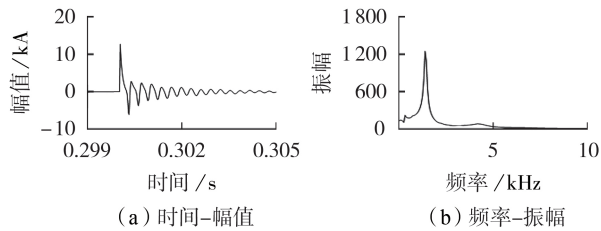


图9 非故障雷击位置为负馈线保护安装处时的仿真结果  
Fig.9 Simulative results of non-fault lightning strike occurring at protection of negative feeder

由图9和图A4可知,短距离牵引网对暂态电流1模分量高频暂态量的衰减作用小于边界对其的衰减作用,且牵引网与边界共同作用时的衰减作用最强。

### 5.2.3 接触网对地故障

设置接触网对地故障的过渡电阻为 $0.1\ \Omega$ ,采样频率为 $50\ \text{kHz}$ ,故障发生时间为 $0.5\ \text{s}$ 。接触网接地故障发生在接触网保护安装处时的仿真结果如图10所示,接触网接地故障发生在接触网其他位置时的仿真结果图见附录中图A5。

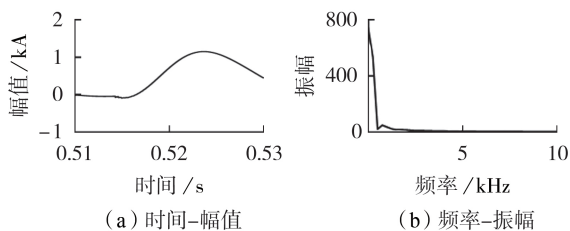


图10 接触网接地故障发生在接触网保护安装处时的仿真结果

Fig.10 Simulative results of catenary grounding fault occurring at protection of catenary

分析图10及图A5可知,区内、区外故障电流1模分量的幅值相差1个数量级,且牵引网对故障高频暂态量的衰减作用小于边界对其的衰减作用,与前文分析相符。

综上所述,贯通式同相AT牵引供电系统牵引网及边界对高频暂态信号衰减作用的强度不同。由于AT供电方式牵引网线路长度较短,牵引网对高频暂态信号的衰减作用小于边界对其的衰减作用。

## 6 结论

本文对牵引变电所出口处电容及区外 $3\ \text{m}$ 长的接触线所构成的贯通式同相AT牵引供电系统的牵引网边界进行了频率特性分析;同时对贯通式同相AT牵引供电系统牵引网进行了频域分析,并推导了牵引网对高频暂态量的衰减作用大于边界对其的衰减作用时牵引网长度的临界值范围。本文所得结论

如下。

(1)贯通式同相AT牵引供电系统牵引网对故障信号的高频暂态量有一定的衰减作用,且衰减作用随牵引网线路长度的增长而逐渐增强;由牵引变电所出口处电容和出口处 $3\ \text{m}$ 长接触线组成的牵引网边界对高频暂态信号有较强的衰减作用。

(2)牵引网对高频暂态量的衰减作用大于牵引网边界对其的衰减作用的牵引网线路长度临界值为 $300\ \text{km}$ 。目前提出的AT供电方式牵引网线路长度远小于临界值,故现行AT牵引供电系统中牵引网对高频暂态量的衰减作用始终小于边界对其的衰减作用。

(3)故障发生位置对保护安装处检测到的高频暂态信号的频率特性有很大影响。发生区内故障时,故障高频暂态信号仅经过牵引网的衰减作用到达保护安装点,保护设备检测到的高频暂态量较大;发生区外故障时由于牵引网边界的衰减作用,保护安装点检测到的高频暂态量较小。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559-568.  
LI Qunzhan. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559-568.
- [2] 钱清泉, 高仕斌, 何正友, 等. 中国高速铁路牵引供电关键技术[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 9-20.  
QIAN Qingquan, GAO Shibin, HE Zhengyou, et al. Study of China high-speed railway traction power supply key technology[J]. Engineering Science, 2015, 17(4): 9-20.
- [3] 戴攀, 刘田, 周浩. 高速铁路接触网行波传播特性研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(2): 25-30.  
DAI Pan, LIU Tian, ZHOU Hao. Characteristics of travelling wave propagation in catenary of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(2): 25-30.
- [4] 林晓鸿, 林圣, 温曼越, 等. 电气化铁路电力贯通线无通道保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 212-219.  
LIN Xiaohong, LIN Sheng, WEN Manyue, et al. Non-communication protection scheme for electric railroad power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 212-219.
- [5] 韩正庆, 刘淑萍, 魏昕, 等. 同相供电设备保护方案研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 21-25.  
HAN Zhengqing, LIU Shuping, WEI Xin, et al. Study on protection scheme for cophase supply equipment[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(2): 21-25.
- [6] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 52-58.  
WU Mingli. Uniform chain circuit model for traction networks of electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52-58.
- [7] 费彬, 黄少锋, 申洪明. 交直流互联系统对距离保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 15-21.  
FEI Bin, HUANG Shaofeng, SHEN Hongming. Impact of AC-DC interconnected system on distance protection and counter-

- measure[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8): 15-21.
- [8] 陈仕龙,束洪春,谢静,等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):134-139,153.  
CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):134-139,153.
- [9] 李建平. 贯通式同相牵引供电系统牵引网行波传播特性及保护初探[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.  
LI Jianping. Continuous cophase traction power supply system transmission characteristic and protection of the traction network fault traveling wave [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2017.
- [10] 胡景瑜. 贯通同相供电系统潮流控制策略研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.  
HU Jingyu. Study on power flow control strategy for co-phase traction power supply system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2014.
- [11] 张桂南,刘志刚,向川,等. 交-直-交电力机车接入的牵引供电系统电压波动特性[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):121-128,136.  
ZHANG Guinan, LIU Zhigang, XIANG Chuan, et al. Voltage fluctuation characteristics of traction power supply system considering AC-DC-AC electric locomotives accessed [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):121-128,136.
- [12] 施围,郭洁. 电力系统过电压计算[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006:10-46.
- [13] 宋国兵,冉孟兵,褚旭,等. 利用高低频电流幅值比的 VSC-HVDC 输电线路全线速动保护新原理[J]. 电网技术,2014,38(5):1402-1407.  
SONG Guobing, RAN Mengbing, CHU Xu, et al. A new single-end current based whole-line quick-action protection for VSC-HVDC transmission lines [J]. Power System Technology,2014,38(5):1402-1407.
- [14] 刘保连,丁祖军,张宇林. 三相电压源型 PWM 整流器优化控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(12):59-63.  
LIU Baolian, DING Zujun, ZHANG Yulin. Optimal control strategy of three-phase voltage-source PWM rectifier [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(12):59-63.
- [15] 马庆安,刘炜,徐英雷,等. 自耦变压器供电牵引网接地回流网络的特征阻抗矩阵的求取[J]. 电网技术,2013,37(6):1764-1768.  
MA Qing'an, LIU Wei, XU Yinglei, et al. Determination of characteristic impedance matrix of earth return circuit for autotransformer-fed traction power network [J]. Power System Technology,2013,37(6):1764-1768.
- [16] 周利军,高强,黄军玲,等. 高速铁路 27.5 kV 电缆金属护层的雷击感应电压[J]. 中国铁道科学,2015,36(4):87-92.  
ZHOU Lijun, GAO Qiang, HUANG Junling, et al. Lightning induced voltage in the metal sheath of 27.5 kV cable for high speed railway [J]. China Railway Science,2015,36(4):87-92.

#### 作者简介:



陈仕龙

陈仕龙(1972—),男,四川汉源人,教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护、牵引供电系统(**E-mail**: chenshilong3@126.com);

赵四洪(1974—),男,湖南岳阳人,讲师,硕士,通信作者,主要研究方向为牵引供电技术(**E-mail**: zhaosh@kust.edu.cn)。

(编辑 任思思)

## Boundary frequency characteristic study of traction network in continuous co-phase AT traction power supply system

CHEN Shilong, YANG Hongyan, BI Guihong, ZHAO Sihong

(School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The boundary frequency characteristics of continuous co-phase AT (AutoTransformer) traction power supply system and the traction network composed of the capacitor at the exit of the traction substation and a section of catenary line outside the traction network are analyzed. The attenuation effect of traction network and traction network boundary on high-frequency transient signals, and the impact of fault location on high-frequency transient signals detected at protection are analyzed. The study results show that in the current continuous co-phase AT traction power supply system, the attenuation effect of the traction network on the high-frequency transients is smaller than that of the traction network boundary, and the high-frequency transient signals detected by the protection are closely related to the fault location. A simulation model is established to verify the attenuation effects of the traction network of the continuous co-phase AT traction power supply system and the traction network boundary, and the simulation results verify the correctness of the study results.

**Key words:** continuous co-phase AT traction power supply system; traction network; boundary; high-frequency transient signals; frequency spectrum analysis

表 A1 牵引网各导线参数  
Table A1 Parameters of traction network wire

导线	型号	计算半径 $R/m$	等效半径 $R_e/m$	单位长度电阻 $r/(\Omega \cdot km^{-1})$
承力索 $C_1$	THJ-120	$7 \times 10^{-3}$	$5.31 \times 10^{-3}$	0.158
接触线 $C_2$	MgCu-120	$5.9 \times 10^{-3}$	$4.2 \times 10^{-3}$	0.146
负馈线 F	LGJ-185	$9.5 \times 10^{-3}$	$9.03 \times 10^{-3}$	0.163
钢轨 T	P60	0.1091	$12.79 \times 10^{-3}$	0.135
回流线 N	LGJ-120	$7 \times 10^{-3}$	$5.31 \times 10^{-3}$	0.236

$$\mathbf{R}_m = \begin{bmatrix} 0.0885 & -0.0112 \\ -0.0112 & 0.10 \end{bmatrix} \quad (A1)$$

$$\mathbf{L}_m = \begin{bmatrix} 1.5375 \times 10^{-3} & -1.2606 \times 10^{-19} \\ -1.8887 \times 10^{-19} & 1.0377 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (A2)$$

$$\mathbf{C}_m = \begin{bmatrix} 9.1766 \times 10^{-9} & 2.0610 \times 10^{-24} \\ 1.2246 \times 10^{-24} & 1.0971 \times 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (A3)$$

其中,  $\mathbf{R}_m$  中各元素的单位为  $\Omega/km$ 。

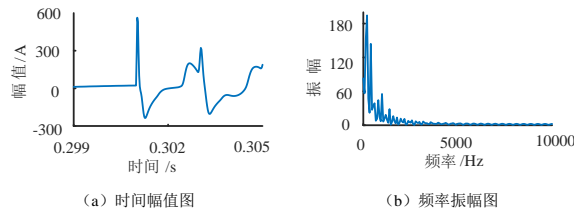


图 A1  $x=300km$  时, 牵引网区外 3m 处故障的仿真结果

Fig.A1 Simulative results when external fault occurs 3m away from traction network with  $x= 300km$

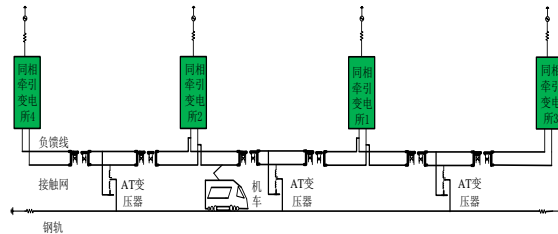
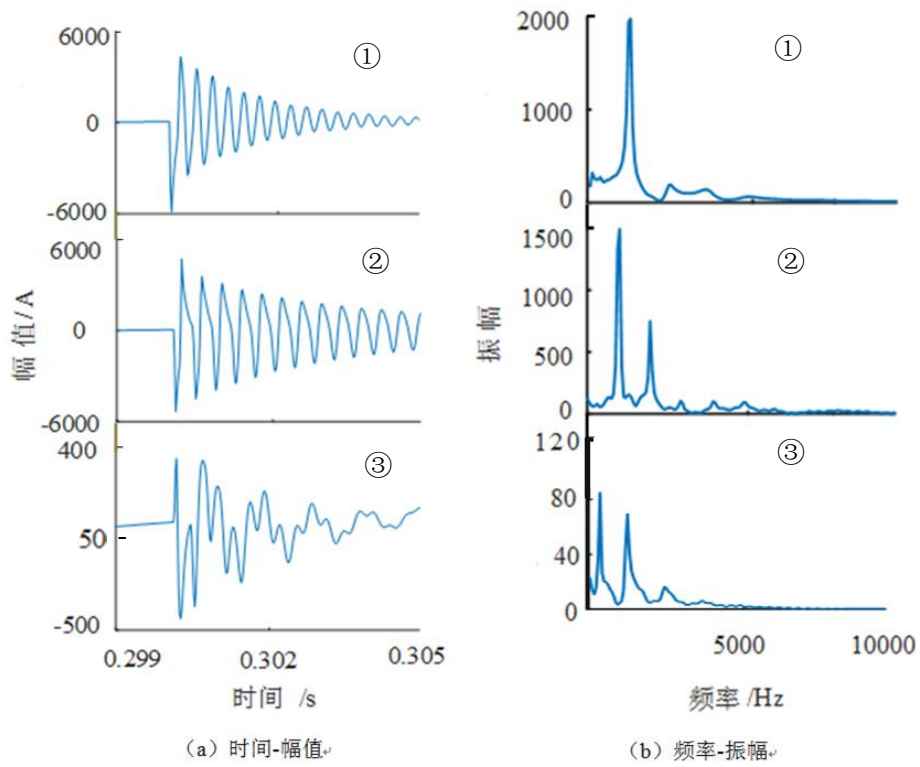


图 A2 贯通式同相AT牵引供电系统仿真模型

Fig.A2 Simulation model of through-phase in-phase AT traction power supply system

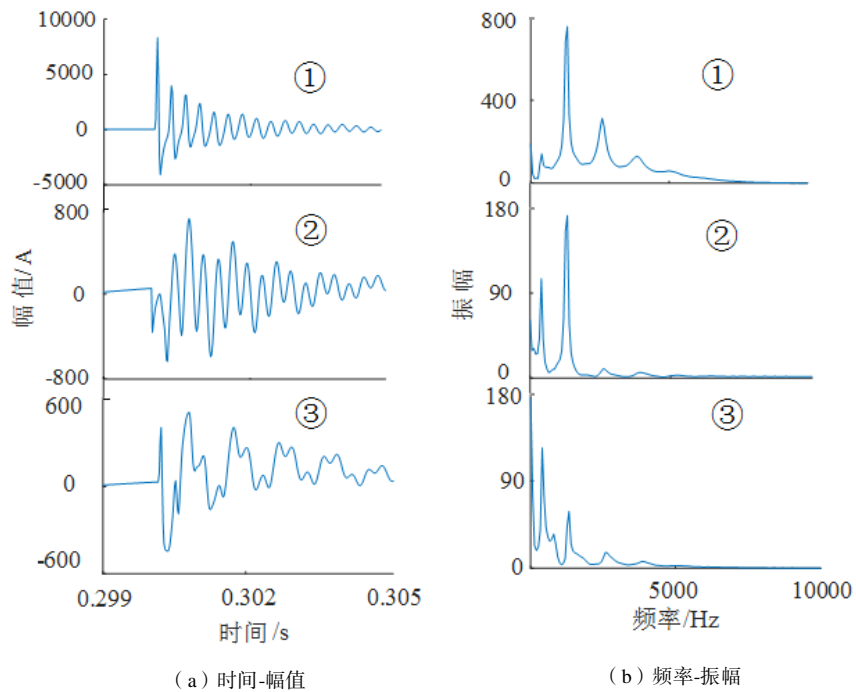




①雷击位置为区内 20km, ②雷击位置为区内 40km, ③雷击位置为对侧区外 3m

图 A3 非故障型雷击接触网的部分仿真结果

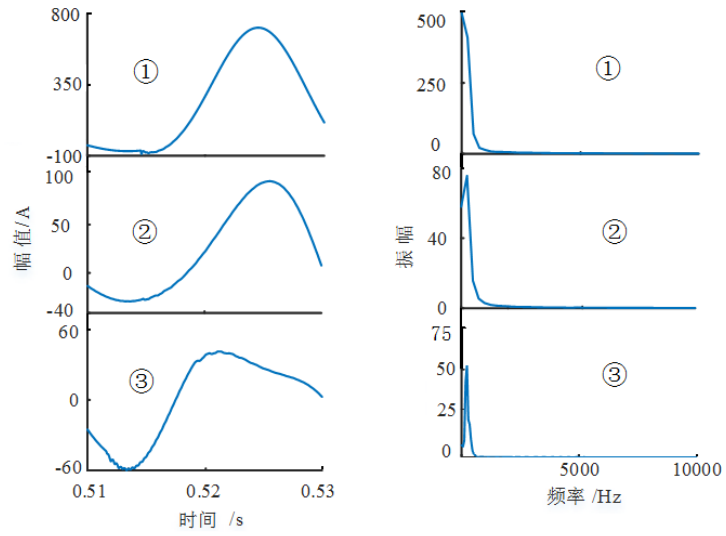
Fig.A3 Partial simulative results of non-fault lightning strike fault occurring in catenary



①雷击位置为区内 40km, ②雷击位置为本侧区外 3m, ③雷击位置为对侧区外 3m

图 A4 非故障型雷击负馈线的部分仿真结果

Fig.A4 Partial simulative results of non-fault lightning strike fault occurring in negative feeder



(a) 时间-幅值

(b) 频率-振幅

①故障位置为区内 40km, ②雷击位置为本侧区外 3m, ③雷击位置为对侧区外 3m

图 A5 接触网对地故障的部分仿真结果

Fig.A5 Partial simulative results of catenary grounding fault