

基于状态空间分析法的高铁牵引网弓网燃弧电磁暂态影响

宋小翠, 刘志刚, 黄 可

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对高铁弓网燃弧造成的电磁暂态现象, 提出采用状态空间分析法对计及弓网燃弧的牵引网多工况的电磁暂态影响进行建模研究。以列车正常运行发生弓网第一次燃弧为例, 详细对牵引网分布参数模型、非线性状态方程建立、离散化求解算法流程进行分析; 通过求解得到不同负载特性下的电弧电压、电流特性波形验证了模型及该方法求解的正确性; 基于状态空间分析法, 实例研究弓网多次燃弧、熄弧情况下, 列车高速行驶和过分相 2 种常见工况的受电弓弓头电压变化, 并提出相应抑制方案。研究表明: 高速铁路多次燃弧是造成列车电压畸变及暂态过电压的重要因素, 所采用的状态空间分析法可有效分析高铁弓网非线性电弧的影响。

关键词: 高速铁路; 弓网离线电弧; 状态空间分析法; 非线性状态求解; 过分相

中图分类号: U 223.6

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.026

0 引言

电气化铁道受电弓与接触网良好接触是高速列车可靠受流的关键, 对高速铁路正常运行起着重要的作用^[1]。由于高速铁路弓网系统振动、轨道或接触网不平顺, 伴随弓网多次燃弧, 其产生的高幅值过电压及电弧放电对牵引主变压器、馈线断路器等危害巨大^[2], 影响列车安全运行。

由于弓网离线电弧的随机性、不稳定性和非线性, 现场很难直接测量。为降低燃弧所造成的危害程度, 分析电弧内部特性十分必要。为此, 国内外学者搭建电弧试验装置对电弧内部特征量提取开展分析^[3-5], 文献[3]还研究了电弧形态量。数学建模上, Mayr 和 Cassie 2 种黑盒电弧等效模型最先应用, 它们均从能量角度对电弧外特性进行研究, 后期许多学者加以改进^[6]; 文献[7]和[8]基于黑盒电弧模型, 分别提出不同的电弧数学等效模型, 并进行仿真验证。其中 Habedank 等效电弧模型对 Cassie 和 Mayr 模型进行了合并, 克服了两者的缺点, 能更好地反映真实电弧非线性动态特性。因此, 本文离线电弧模型考虑采用 Habedank 等效数学模型等值。此外, 文献[9]提出等效 KEMA 型断路器电弧模型, 模拟高压断路器的开断电弧; 文献[10]根据气体爆炸理论计算冲击波形成的气流对电弧的作用力, 结合链式电弧模型, 建立开放空间下电弧的数学模型。基

于电弧数学模型, 文献[8, 11]研究了车速、负载特性、参数变化等对特定电弧等效模型特性的影响; 文献[12]通过试验证明在接触网和受电弓之间增加磁性元件能达到改善弓网离线率从而减少电弧发生的目的; 文献[13]将状态分析法应用于电力系统故障接地电弧分析。针对高速列车过分相电磁暂态过程, 文献[14]采用状态分析法开展线性方程分析和仿真研究, 但未考虑电弧作用; 文献[15]提供一种新的分析思路, 将弓网电弧产生的电压脉冲作为电源代替电弧模型, 仿真分析不同牵引网位置处电弧分别作用于接触线上的电压。

综上, 大量相关电弧模型研究已清晰表明电弧的内部特性, 而高速铁路伴随燃弧现象所带来的实际电磁暂态影响少有研究, 且已有文献以软件研究为主。对于弓网离线电弧, 每一种特定非线性电弧等效模型或其他时变模型均需要通过软件重新建立对应模块, 所建立的新模块均存在参数匹配及初始化设置问题, 操作复杂, 不便于普遍应用。状态空间分析法是对已知数学模型的任意线性与非线性元素直接进行分析, 该方法已用于电力系统传输线路故障接地电弧分析, 但对于牵引网的非线性元素并未应用。因此, 考虑既能普遍解决此类问题又切合牵引网实际分析的其他方案十分必要。

基于此, 考虑牵引网电弧这一非线性因素, 本文以拓展的 Habedank 等效电弧模型模拟弓网离线实际电弧, 并在此基础上建立弓网发生燃弧时的非线性电弧模型, 详细给出利用状态空间法开展非线性状态方程求解的步骤。通过求解不同负载特性下等效电弧电压、电流特性波形验证建模和利用状态空间分析法求解的正确性。同时, 针对 2 种常见的高速铁路运行工况伴随弓网离线电弧多次重燃的情况, 分别开展列车受电弓弓头电压实例研究, 验证利用状态空间法进行高速铁路牵引网弓网燃弧电磁暂态分

收稿日期: 2016-10-31; 修回日期: 2017-09-14

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U14342-03); 国家自然科学基金资助项目(51377136); 四川省青年科技创新团队项目(2016TD0012)

Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(U1434203), the National Natural Science Foundation of China(51377136) and the Program of Sichuan Province Youth Science and Technology Innovation Team(2016TD0012)

析的普适性,并结合此方法给出抑制措施。本文采用状态分析理论方法研究弓网多次燃弧影响,旨在为牵引供电线路中其他非线性时变子系统对牵引供电系统的影响提供新的分析思路。

1 牵引网状态空间模型

高速列车在高速行驶、升弓、降弓和过分相等不同工况下均可能出现燃弧现象,本文针对列车高速行驶工况,于任意一相供电臂的任意位置均可能发生的弓网离线电弧现象开展分析。

我国高速铁路牵引网多采用 $2\times 27.5\text{ kV}$ 的自耦变压器(AT)供电方式,其简单示意图见图 1。

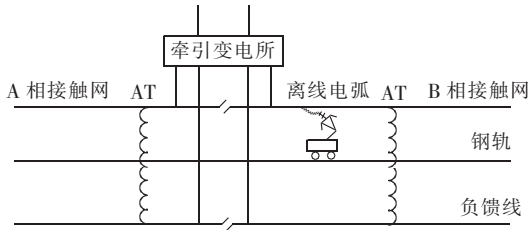


图 1 高速铁路 AT 供电方式示意图

Fig.1 Diagram of high-speed railway with AT power supply mode

基于图 1,对出现弓网离线电弧时的整个牵引网建立如图 2 所示的等效模型。牵引变电所到负荷间的牵引网线路采用分布参数模型等值,其由相同、多个 π 型等效集总参数模型串联组成。对于特定线路

长度的牵引网,根据电弧发生位置选取一定数量的等效串联部分,便可以准确获得线路任意点的电压、电流分布。此外,电弧模型可以用动态时变的电阻表示,牵引网末端接入的负荷模型采用电阻串联电感等效。

图 2 中,牵引网模型由 n 个 $R、L、C$ 构成的 π 型部分串联构成,其分别代表牵引网给定长度下的等效电阻、电感及电容; $R_m、L_m$ 分别为负荷等效电阻与电感; $R_{arc}(t)$ 为电弧等值的非线性电阻模型; $R_S、L_S$ 分别为牵引变电所变压器等效电阻和电感; $u_S(t)$ 为牵引变电所母线电压; $u_n(t)$ 为牵引网末端线路电压; $u_m(t)$ 为受电弓弓头输入电压。

基于图 2 的等效电路模型,系统的状态方程如下:

$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}\mathbf{u}(t)$ (1)

$\mathbf{x}(t)=\begin{bmatrix} i_S(t) & u(t) & i_1(t) & u_1(t) & i_2(t) & u_2(t) & \cdots \\ i_n(t) & u_n(t) & i_m(t) \end{bmatrix}^T$ (2)

$\mathbf{u}(t)=\begin{bmatrix} u_S(t) \end{bmatrix}$ (3)

其中, $\mathbf{x}(t)$ 为系统的状态向量; $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 为 $\mathbf{x}(t)$ 的导数矩阵; $\mathbf{u}(t)$ 为系统的输入向量; $\mathbf{A}、\mathbf{B}$ 分别为牵引网串联等效模型的系统矩阵和输入矩阵; $u_S(t)=27.5\sqrt{2}\times\cos(\omega t+\varphi)$, φ 为初始相角。

则求解状态方程可得式(4)。

上述状态方程的系统矩阵 $\mathbf{A}$ 为 $(2n+3)\times(2n+3)$ 阶的三对角矩阵,牵引线路部分对角元素轮换交替出现。式(4)中, $R_{arc}(t)$ 为电弧非线性动态电阻,因此状

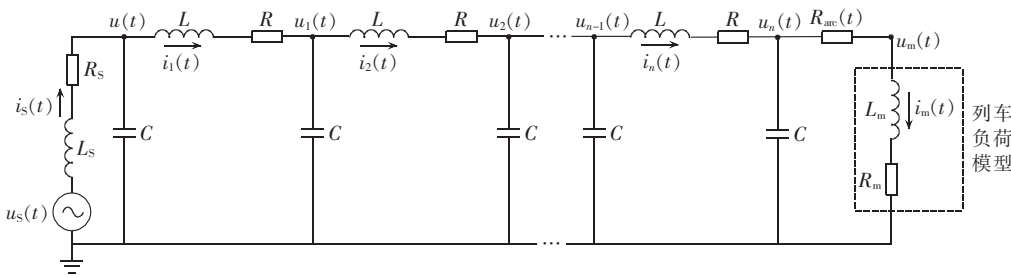


图 2 牵引网串联等效模型

Fig.2 Series equivalent model of traction network

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S(t) \\ u(t) \\ i_1(t) \\ u_1(t) \\ \vdots \\ i_n(t) \\ u_n(t) \\ i_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_S}{L_S} & -\frac{1}{L_S} & 0 & & \cdots & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \cdots & & 0 & \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \cdots & & 0 & \frac{1}{L_m} & -\frac{R_m+R_{arc}(t)}{L_m} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S(t) \\ u(t) \\ i_1(t) \\ u_1(t) \\ \vdots \\ i_n(t) \\ u_n(t) \\ i_m(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_S} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_S(t) \quad (4)$$

态方程为非线性方程,且在矩阵 $\mathbf{A}$ 中,仅 $A_{(2n+3)(2n+3)}$ 元素为时变,其余元素均为定常,输入矩阵 $\mathbf{B}$ 为定常。

由图 2 可知,状态变量 $i_m(t)$ 即为电弧电流,也即负荷电流, $u_i(t)$ ($i=1,2,\dots,n$) 为距离牵引变电所不同距离的接触网电压,电弧电压可以表示为:

$$u_{\text{arc}}(t)=i_m(t)R_{\text{arc}}(t) \quad (5)$$

根据接触网线路长度及电弧发生位置,选取合适的 n ,即可以求得电弧特性波形及接触网任意处电压波形。

2 牵引网状态方程求解

2.1 Habedank 等效电弧模型

由于式(4)存在非线性动态电阻 $R_{\text{arc}}(t)$,上述求解的状态方程不仅与牵引网参数有关,还与电弧数学模型选取有关。Mayr 等效电弧模型主要适用于电流过零时的小电流情况,Cassie 电弧模型则适用于电流过零前大电流燃弧情况。这 2 种电弧模型单独考虑均有一定的限制。Habedank 等效电弧模型是 Mayr 电弧模型与 Cassie 电弧模型的结合并加以修正,能较好地反映电弧非线性特性。文献[8]结合实际牵引供电系统,将反映车速变化的离线间隔规律引入 Habedank 等效电弧模型,进而对 Habedank 等效电弧模型进行了拓展,表达式描述如下:

$$\begin{cases} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_0 g^\alpha} \times \left[\frac{i^2}{(6.857 \times 10^{-5} v^2 + 0.357 v - 2.117)^2 g_c} - g_c \right] \\ \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_0 g^\alpha} \times \left[\frac{i^2}{\gamma g^\beta (4.571 \times 10^{-6} v^2 + 0.238 v - 0.141)} - g_m \right] \\ \frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \end{cases} \quad (6)$$

其中, g 为 Habedank 方程的瞬时电弧电导; i 为 Habedank 方程的瞬时电弧电流; g_c 为整体电弧方程 Cassie 部分的瞬时电导; g_m 为整体电弧方程 Mayr 部分的瞬时电导; v 为列车速度; τ_0 为初始的时间常数; α, γ, β 为影响电弧动态特性的相关常数。

由此可见,电弧电阻具有时变特性,此系统即为时变系统。

2.2 牵引网非线性状态方程及电弧等效模型离散化

求解非线性方程可以采用数值分析法,即将时变的方程作离散处理。一般而言,常用线性连续时间定常系统可根据如下公式直接进行离散化:

$$\begin{cases} \mathbf{G} = e^{\mathbf{A}t} \\ \mathbf{H} = \left(\int_0^T e^{\mathbf{A}t} dt \right) \times \mathbf{B} \end{cases} \quad (7)$$

离散处理后的状态方程表示为:

$$\dot{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{G}\mathbf{x}(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \quad (8)$$

对于该方法而言,由于图 2 所示的牵引网建模与电弧发生位置有关,即状态方程阶数受参数 n 影响。随着 n 取值增大,状态方程变量增加,方程求解迭代过程中,每迭代一次需要重新对高阶矩阵 $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ 按式(7)离散化处理,计算复杂。此外,当矩阵 $\mathbf{A}$ 阶数较高时,不能直接按式(7)求解,另需其他方法解决。

为了简化计算步骤,降低迭代难度,本文首先对状态方程式(4)及等效电弧动态电阻模型表达式(6)做如下离散简化处理。

考虑 $0 \leq t_k \leq t_{\text{end}}$,其中 $t_k = k \Delta t$ 表示 t_k 时刻,取步长 $h = \Delta t$,则整体迭代次数为 t_{end}/h 。假设在 $t_k < t \leq t_k + \Delta t$ 时间内,系统矩阵 $\mathbf{A}$ 及输入矩阵 $\mathbf{B}$ 连续,且该时刻所有的状态变量值 $\mathbf{x}_k$ 均已知,则 t_{k+1} 时刻的状态响应可表示为^[13]:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \frac{h}{2} [(\mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k) + (\mathbf{A}_k \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_{k+1})] \quad (9)$$

化简式(9)可得:

$$\bar{\mathbf{A}}_k \mathbf{x}_{k+1} = \bar{\mathbf{B}}_k \quad (10)$$

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{A}}_k = \mathbf{I} - \frac{h}{2} \mathbf{A}_k \\ \bar{\mathbf{B}}_k = \left(\mathbf{I} + \frac{h}{2} \mathbf{A}_k \right) \mathbf{x}_k + \frac{h}{2} \mathbf{B}_k (\mathbf{u}_k + \mathbf{u}_{k+1}) \end{cases} \quad (11)$$

对非线性时变状态方程迭代求解就可等效为求解每一步长时间内的非齐次线性方程式(10)。

同理,对式(6)的非线性 Habedank 电弧等效模型作简化离散处理可得:

$$\begin{cases} g_{Ck} = g_{C(k-1)} + \frac{\Delta t}{\tau_0 g_{k-1}^\alpha} \times \left[\frac{i_{k-1}^2}{(6.857 \times 10^{-5} v^2 + 0.357 v - 2.117)^2 g_{C(k-1)}} - g_{C(k-1)} \right] \\ g_{Mk} = g_{M(k-1)} + \frac{\Delta t}{\tau_0 g_{k-1}^\alpha} \times \left[\frac{i_{k-1}^2}{\gamma g_{k-1}^\beta (4.571 \times 10^{-6} v^2 + 0.238 v - 0.141)} - g_{M(k-1)} \right] \\ R_{\text{arck}} = \frac{1}{g_k} = \frac{1}{g_{Ck}} + \frac{1}{g_{Mk}} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 赋初值及多次燃弧迭代算法流程

初始状态变量值会影响迭代次数,迭代次数过多,不仅影响计算效率,也会影响结果精度,因此需要对状态方程的初始变量进行合适赋值,具体如下:

a. 列车正常运行时可认为牵引网各处电压值相等,即若变电所初始电压相位角 φ 为 90° (初始电源电压为 0),则接触网线路上电压与电流初始值均考虑赋 0;

b. 为简化计算,电弧动态电阻采用等效分配原则,由于电弧电阻较小且 Mayr 电弧模型与 Cassie 电弧模型采用串联等值,两部分电阻均取为整体电弧电阻的一半。

- 根据如上考虑,多次燃弧迭代求解步骤如下:
- a. 以 $t_k=0$ 时刻开始,代入初始参数求解电弧方程然后进行第一次状态方程求解;
 - b. 以前一次求得结果对时间参数 $t_{k+1}=t_k+\Delta t$ 、状态变量参数 $\mathbf{x}_k$ 以及电弧参数 g_k 进行更新,每迭代一次则需要不断修正系统矩阵 $\mathbf{A}$,直到满足迭代时限 $t_k>t_{\text{end}}$ 为止,最终实现非线性状态方程求解;
 - c. 考虑熄弧后再次燃弧情况,根据输出的第 l 次受电弓弓头电压波形参数,修正牵引网电压值,再次迭代,即可得到第 $l+1$ 次弓网燃弧后受电弓弓头电压波形,具体算法流程见图 3。

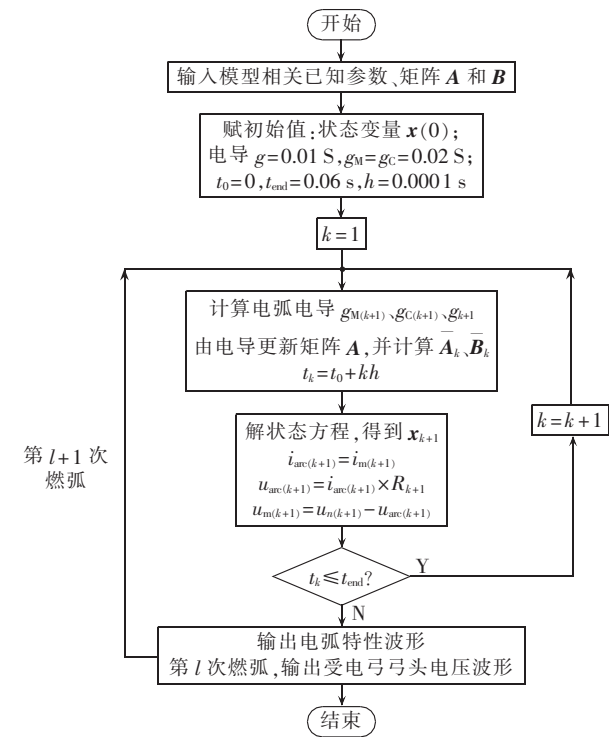


图 3 计及牵引网电弧状态方程的计算流程
Fig.3 Calculation process of state equation considering traction network arc

3 计及弓网离线电弧的牵引网模型验证

求解非线性状态方程不仅受牵引网相关参数影响,还与电弧参数密切相关^[15]。因此,需选取式(6)中影响电弧电阻特性的相关参数合适值,分析建模求解的电弧特性是否满足电弧一般动态特性,从而验证采用非线性状态研究方法对牵引网建模的正确性。

根据我国某线路相关参数可知:变压器设备参数取 $R_s=0.177\ \Omega$ 、 $L_s=31.8\ \text{mH}$;牵引网线路等值单位长度电阻、电感分别取 $0.197\ \Omega/\text{km}$ 、 $1.562\ \text{mH}/\text{km}$,对地电容取 $0.067\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。牵引网负荷等效总电阻 R_m 取 $56.2\ \Omega$,等效电感 L_m 取 $91.6\ \text{mH}$ 。假设离线电弧发生于距离牵引变电所 $15\ \text{km}$ 处,牵引网电压有效值取 $27.5\ \text{kV}$,接触网线路集总参数串联总量 n 取 20 ,则每段串联部分线路长度取 $0.75\ \text{km}$ 。求得每一

接触网集总参数串联部分的等值电阻 R 、电感 L 、电容 C 值分别为 $0.147\ \Omega$ 、 $1.175\ \text{mH}$ 、 $0.067\ \mu\text{F}$ 。按照图 3 的计算流程,代入数据,其中等效电弧相关参数取 $\tau_0=0.15\ \text{ms}$ 、 $\alpha=0.17$ 、 $\gamma=2000$ 、 $\beta=0.9$ 、 $v=250\ \text{km/h}$,求解非线性状态方程。考虑如下 3 种负荷情况(负荷以阻性为主($R_m=56.2\ \Omega$, $L_m\approx 0$)、负荷以感性为主($R_m\approx 0$, $L_m=91.6\ \text{mH}$)、负荷为阻感性($R_m=56.2\ \Omega$, $L_m=91.6\ \text{mH}$)),求解得到的 Habedank 等效电弧的电压、电流波形特性曲线见图 4。

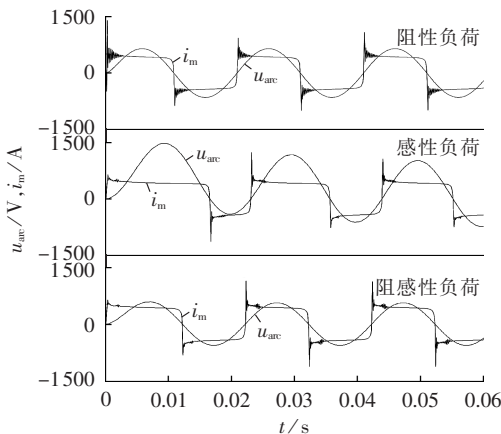


图 4 不同负载特性变化下的弓网离线电弧电气特性曲线
Fig.4 Electrical characteristic curves of pantograph-catenary detachment arc under different load characteristics

由图 4 可以发现,无论负载如何变化,电流过零点附近小电流时间内,电弧间隙电压有明显暂态冲击现象,之后短时间内迅速振荡恢复。图 4 的电弧动态曲线与文献[17]中弓网电弧实验系统测试的电弧电气特性曲线基本一致。因此,可认为以上对牵引网引入电弧等效模型并采用状态空间分析法的研究是有效的。

弓网离线电弧属于弓网两极自持放电现象,电弧弧柱部分由等离子体构成,质量极轻,形状极易改变,很不稳定,维持电弧弧柱稳定存在需要提供一定功率。电流过零点是电弧状态改变的关键,交流电弧在此处更容易发生熄弧^[18]。对比图 4 波形可以明显看出,3 种负荷情况下,零点附近电弧间隙电压幅值相差不大;感性负荷时,电弧电压很快恢复,较稳定;阻性负荷情况下,相较于其他 2 种情况,电弧电压在电流零点附近暂态过程较明显,说明此负荷特性下电弧状态较感性负荷情况更不稳定,若要维持电弧弧柱稳定存在,需要提供更大的能量,可以认为该状态有助于电弧的熄灭和介质的恢复。考虑到列车阻抗在高速铁路中呈感性,因此在高速列车上安装容性设备有助于弓网电弧的熄灭。

4 基于非线性状态模型的不同工况研究

高速铁路弓网离线电弧不仅发生于正常运行工

对比状态方程式(15)与(4)可发现,式(15)中输入变量有 2 个,系统矩阵 A 亦为三对角矩阵,除了与电弧参数相关的 A_{55} 为时变参数,其余参数均为常数。

相关参数仍按照 4.1 节中基本数据选取,供电臂长度取 25 km,七跨锚段关节式电分相长约 320 m。经过计算得:接触线 $R_C=4.93\ \Omega$, $L_C=39.05\ \text{mH}$, $C_C=0.1342\ \mu\text{F}$;中性段 $R_Z=0.063\ \Omega$, $L_Z=0.5\ \text{mH}$, $C_Z=1.88\ \mu\text{F}$;耦合电容 $C_{CZ}=1.15\ \text{nF}$ 。同理,利用迭代计算求得不考虑燃弧、一次燃弧、二次燃弧情况下的受电弓弓头电压波形如图 7 所示。

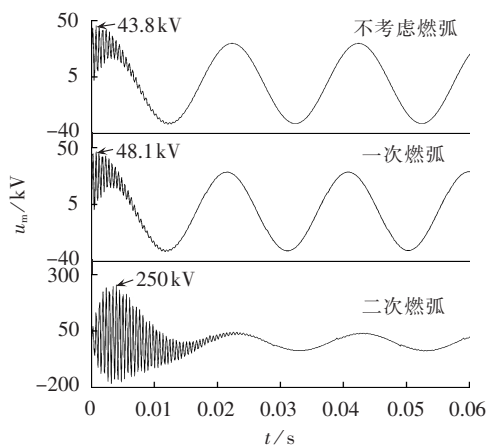


图 7 高速列车过分相燃弧工况下受电弓弓头电压波形
Fig.7 Waveforms of pantograph head voltages with high-speed train's passing electrical split-phase region considering arcing

由图 7 可见,考虑一次燃弧情况下受电弓弓头电压增大了大约 4 kV,一次燃弧对车体电压的影响并不明显,仅在电流过零点时刻产生不明显波动,这与图 5 结果相似;对比图 7 可以明显看到,一次电弧熄弧后若不考虑时间间隙再次燃弧情况下受电弓弓头电压明显畸变,且弓头最高电压暂态幅值达到 250 kV,即工频电压幅值的 6.25 倍,之后迅速衰减到工频正弦波形。分析如下:二次燃弧电压波形不仅取决于电弧,还包括列车本身过分相产生的电压振荡,在不考虑回路电阻的衰减作用时,两者叠加再在 LC 回路作用下暂态过电压显然会比一次振荡高。图 7 中不考虑电弧现象的高速列车过分相弓头电压波形与文献[14]过分相暂态过电压仿真及状态求解结果一致,因此,可认为本文的结果在一定程度上可为分析计及弓网离线电弧的弓头不同工况暂态过电压提供参考。

4.3 电磁暂态抑制措施

高速铁路弓网多次燃弧不仅会造成牵引网电压畸变,而且会使车体受电弓弓头电压幅值明显升高,造成车体暂态过电压现象,同时作用于受电弓与接触线间隙的高电压又促使弓网燃弧的发生。通过分析 4.1 节及 4.2 节可知,一次燃弧电压在线路中 LC

元件作用下多次振荡产生的暂态过电压现象实质属于谐振过电压,针对这种类型的过电压可以通过改变系统中电感、电容参数来抑制谐振发生[20]。

电力系统中常用的过电压抑制方法包括滤波技术、相控开关技术、锁相环技术等,结合第 3 节中高速列车上安装容性设备更有利于熄弧,本文选择将 RC 串联保护装置加于负载前端以起到过电压抑制作用。设置 $R=200\ \Omega$, $C=2\ \mu\text{F}$,按照以上分析方法,分别对高速列车正常运行及过分相 2 种情况重新求取状态方程。

图 8 分别给出了高速列车正常运行、过分相 2 种工况加入 RC 保护装置后,一次燃弧、二次燃弧情况下受电弓弓头电压波形,鉴于二次燃弧暂态过电压更明显,图中仅标注加入保护装置后二次燃弧的弓头过电压幅值。对比图 5 可以看出,图 8 上图中振荡电压得到了明显抑制;对比图 8 下图与图 7 可见,虽然暂态畸变电压波形得到了抑制,但计及二次燃弧工况时仍有较高的过电压幅值。分析如下:安装 RC 保护装置虽然能在一定程度上抑制电压振荡现象,但高速列车过分相期间注入负荷电压不仅与列车速度[11]、线路参数、运行方式(车载、地面等)有关[2],还受供电臂相角、相位差影响[21],因此,对于过分相工况下暂态电压的抑制措施还应综合考虑以上因素。

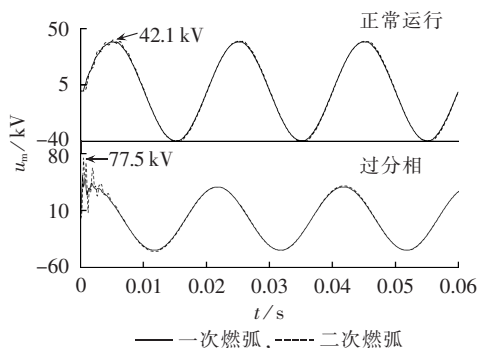


图 8 加入 RC 保护装置后受电弓弓头电压波形
Fig.8 Waveforms of pantograph head voltages with RC absorbers

5 结论

高速列车运行过程中,电弧具有不稳定性、随机性、反复性及非线性,针对高速列车正常运行、过分相 2 种工况,本文提出运用状态空间理论分析方法对计及弓网多次熄弧、燃弧的列车受电弓弓头电磁暂态影响进行研究。本文采用的状态空间分析法不仅可以解决利用软件仿真分析不同电弧模型时需重复搭建模块所带来的操作复杂性,还可以直接利用分析结果开展计及弓网多次燃弧的弓头暂态电压变化研究。因此,可认为状态空间方法适用于牵引网

计及弓网离线电弧影响的非线性研究;此外,仅考虑电弧影响下,分析结果表明高速列车的弓网多次燃弧、熄弧是造成牵引网电压畸变及列车暂态过电压的主要原因;列车过分相工况下,多次燃弧使得弓头过电压幅值严重超过工频幅值。

针对本文研究的弓网多次燃弧引起的高速铁路暂态过电压现象,本文提出采用 RC 保护装置措施,可在一定程度上达到抑制由弓网多次燃弧引起电压振荡的目的,但实际出现暂态过电压时,如过分相、升降弓、重合闸等工况,应综合考虑所有影响因素。

本文提出的研究方法具有一定的普适性,可推广用于电力系统其他电弧发生时的暂态分析,以及其他非线性或时变模型的研究,也为其他领域的研究提供一种分析思路。

参考文献:

- [1] 王英,刘志刚,范福强,等. 弓网电弧模型及其电气特性的研究进展[J]. 铁道学报,2013,35(8):35-43.
WANG Ying,LIU Zhigang,FAN Fuqiang,et al. Review of research development of pantograph-catenary arc model and electrical characteristics[J]. Journal of the Chinese Railway Society, 2013,35(8):35-43.
- [2] 许龙,崔艳龙,高仕斌,等. 动车组不分闸过分相时牵引变压器差动保护误动分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):105-109.
XU Long,CUI Yanlong,GAO Shibin,et al. Transient stability calculation considering traction load model[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):105-109.
- [3] 吴广宁,古圳,高国强,等. 弓网电弧形态特性试验研究[J]. 高压技术,2015,41(11):3531-3537.
WU Guangning,GU Zhen,GAO Guoqiang,et al. Experimental research on morphological characteristics of pantograph-catenary arc[J]. High Voltage Engineering,2015,41(11):3531-3537.
- [4] CHEN G X,YANG H J,ZHANG W H,et al. Experimental study on arc ablation occurring in a contact strip rubbing against a contact wire with electrical current[J]. Tribology International, 2013,61:88-94.
- [5] 王尧,韦强强,葛磊蛟,等. 基于电弧电流高频分量的串联交流电弧故障检测方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):191-197.
WANG Yao,WEI Qiangqiang,GE Leijiao,et al. Series AC arc fault detection based on high-frequency components of arc current[J]. Electric Power Automatic Equipment,2017,37(7):191-197.
- [6] GUARDADO J L,MAXIMOV S G,MELGOZA E,et al. An improved arc model before current zero based on the combined Mayr and Cassie arc models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):138-142.
- [7] AHMETHODZIC A,KAPETANOVIC M,SOKOLIJA K,et al. Linking a physical arc model with a black box arc model and verification[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(4):1029-1037.
- [8] WANG Y,LIU Z G,MU X Q,et al. An extended Habedank's equation-based EMTF model of pantograph arcing considering pantograph-catenary interactions and train speeds[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2016,31(3):1186-1194.
- [9] 贾恒,罗隆福,许加柱. 高压断路器 KEMA 电弧模型改进研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):134-137.
JIA Heng,LUO Longfu,XU Jiazhu. Improved KEMA arc model for high-voltage circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):134-137.
- [10] 王巨丰,黄志都,潘坤年,等. 基于链式的爆炸气流场耦合电弧动态模型[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):154-160.
WANG Jufeng,HUANG Zhidu,PAN Kunnian,et al. A dynamic chain arc model for coupling of explosion air flow field[J]. Proceedings of the CESS,2012,32(7):154-160.
- [11] 马云双,刘志刚,闻映红,等. 高速动车组车速对弓网离线电弧放电的影响[J]. 北京交通大学学报,2013,37(2):99-103.
MA Yunshuang,LIU Zhigang,WEN Yinghong,et al. Effect of vehicle speed on pantograph arc discharge for high speed EMU[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2013,37(2):99-103.
- [12] KUO M T,LO W Y. Magnetic components used in the train pantograph to reduce the arcing phenomena[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2014,50(4):2891-2899.
- [13] MAMIS M S,MERAL M E. State-space modeling and analysis of fault arcs[J]. Electric Power Systems Research,2005,76(1):46-51.
- [14] 王英,刘志刚,母秀清,等. 计及高架桥电气耦合的高速铁路过分相电磁暂态研究[J]. 铁道学报,2015,37(11):37-43.
WANG Ying,LIU Zhigang,MU Xiuqing,et al. Study on electromagnetic transient process in electric split-phase system considering electrical coupling of viaduct[J]. Journal of the Chinese Railway Society,2015,37(11):37-43.
- [15] LIN G H,ZHANG Y R,ZHI Y J. Effects of pantograph arcing on railway systems with auto transformers[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications,2013,27(13):1686-1693.
- [16] 王晓远,高森,赵玉双. 阻性负载下低压故障电弧特性分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):106-110.
WANG Xiaoyuan,GAO Miao,ZHAO Yushuang. Characteristic analysis of low-voltage arc fault in resistive load conditions[J]. Electric Power Automatic Equipment,2015,35(5):106-110.
- [17] 王万岗,吴广宁,高国强,等. 高速铁路弓网电弧试验系统[J]. 铁道学报,2012,34(4):22-27.
WANG Wangang,WU Guangning,GAO Guoqiang,et al. The pantograph-catenary arc test system for high-speed railways[J]. Journal of the Chinese Railway Society,2012,34(4):22-27.
- [18] MIDYA S,BORMANN D,SCHUTTE T,et al. Pantograph arcing in electrified railways-mechanism and influence of various parameters-part II:with AC traction power supply[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(4):1940-1950.
- [19] 马庆安,李群湛,解绍锋,等. AT 供电系统同相供电 PR 控制器设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):154-159.
MA Qingan,LI Qunzhan,XIE Shaofeng,et al. Design of PR regulator for co-phase AT-feeding traction power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):154-159.

- [20] 赵元哲,李群湛,周福林. 基于阻波高通滤波器的高速铁路谐振抑制方案[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):139-144.
ZHAO Yuanzhe,LI Qunzhan,ZHOU Fulin. Resonance suppression based on wave-trap high-pass filter for high-speed railway[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):139-144.
- [21] 宋小翠,刘志刚,王英. 基于 ATP-EMTP 的计及高架桥高速铁路过分相电磁暂态研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(13):6-13.
SONG Xiaocui,LIU Zhigang,WANG Ying. Study on electromagnetic transient process in split-phase insulator considering viaduct's electrical coupling based on ATP-EMTP[J]. Power System Protection and Control,2016,44(13):6-13.

作者简介:



宋小翠

宋小翠(1993—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,主要研究方向为电气化铁路车-网耦合暂态(E-mail:13183857890@163.com);

刘志刚(1975—),男,河南巩义人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为信号处理与计算智能及其在电力系统及轨道交通中的应用(E-mail:liuzg_cd@126.com);

黄可(1990—),男,四川成都人,博士研究生,主要研究方向为电气化铁路动车组接地电气安全防护(E-mail:hk1328170662@sina.com)。

Electromagnetic transient influence of pantograph detachment arcing for traction network in high-speed railway based on state space analysis method

SONG Xiaocui,LIU Zhigang,HUANG Ke

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the electromagnetic transient phenomenon caused by the pantograph detachment arcing, the state space analysis method for analyzing electromagnetic transient influence of traction network is proposed and adopted, and the corresponding modeling study for the traction network under several conditions is performed. Taking the situation of train's high-speed operation along with first detachment arc as the research example, the distributed-parameter modeling of traction network, establishment of nonlinear state equation, and discrete solution process of algorithm are analyzed in detail. Through solving the characteristic waveforms of arc voltage and current under different load characteristics, the correctness of above solution method is verified. Based on the state space analysis method, two common high-speed railway conditions, i.e. train's high-speed operation and passing electric split-phase region, are considered, and the waveforms of pantograph head voltages are solved considering multiple arcing. Results show that, multiple arcing is an important factor of train's voltage distortion and transient over-voltage, and the state space analysis method can effectively analyze the impact of pantograph detachment nonlinear arc in high-speed railway.

Key words: high-speed railway; pantograph-catenary detachment arc; state space analysis method; nonlinear state solution; passing electric split-phase region