

文章编号:1005-0523(2013)04-0065-04

集总元件对电气化铁路接触网暂态仿真的影响

吕福星, 伦 利

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 电气化铁路接触网的暂态仿真对接触网过电压的防护至关重要, 与一般电力系统不同, 接触网线路中存在着轨道电路, 自耦变压器, 吸流变压器等集总参数元件, 它们会对基于分布参数模型的接触网暂态仿真结果产生影响; 计及集总参数元件的影响, 与时域有限差分方法相结合, 对集总参数元件的影响进行了仿真。仿真结果表明, 由于集总元件对行波的折反射, 使得接触网上感应电压、电流的波形产生了变化, 考虑集总参数元件的影响, 对于接触网过电压的计算及其防护具有重要意义。

关键词: 接触网; 集总参数; 暂态; 行波

中图分类号: TM743

文献标志码: A

随着高速铁路在我国的迅猛发展, 我国的电气化铁路通车总里程已跃升至世界第1位。作为为电气化铁路提供电能的设备, 接触网的规模越来越大, 认识和研究接触网工作时的电气特性对保证电气化铁路的正常运行至关重要。

接触网的暂态仿真是研究接触网电气特性的重要手段。目前, 接触网的暂态仿真一般是在多导体传输线理论上进行电压电流的求解, 从而得到不同时刻的电气特性^[1-4]。在电力系统中, 电源和负载等集总参数元件一般都位于输电线的两端, 但在牵引供电系统中, 存在许多沿线布置的设备, 如轨道电路, 吸流变压器(boost transformer, BT), 自耦变压器(auto-transformer, AT)等, 他们的存在会对电压和电流行波产生影响, 因而在进行暂态仿真时, 需要考虑这类集总参数元件对仿真结果的影响。

1 牵引供电回路中集总参数元件的分布

牵引供电系统负责给在线路上运行的电力机车提供能量, 除了处于线路上的接触线外, 线路的钢轨往往要参与回流, 因而沿线路钢轨分布的其他设备也会对牵引供电系统产生一定的影响。

轨道电路是以一段钢轨为导体构成的电路, 用于自动、连续检测这段线路是否被机车车辆占用, 也用于控制信号装置或转辙装置, 以保证行车安全的设备^[5]。对于电气化铁路, 钢轨还参与牵引供电系统的回流, 是牵引供电系统多导体传输线的重要组成部分。因而轨道电路和牵引供电系统之间存在着相互耦合的影响。轨道电路的组成如图1所示。

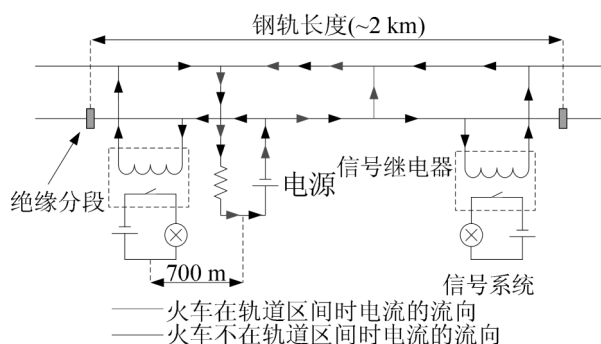


图1 轨道电路示意图
Fig.1 Diagram of track circuit

收稿日期:2013-06-12

基金项目: 江西省自然科学基金项目(20122BAB216026, 20132BAB216027); 江西省教育厅科研基金项目(GJJ13355, GJJ13356); 华东交通大学基金项目(12DQ02)

作者简介: 吕福星(1964—), 男, 实验师, 研究方向为电力牵引自动化。

由于AT供电方式具有干扰小、供电距离长、供电能力大等优点,在电气化铁路中得到了普遍应用。在AT供电方式中,一般每隔10 km左右并联一台自耦变压器,采用自耦变压器可提高供电电压,扩大供电范围,减小对邻近通信线路的影响^[6-8]。自耦变压器在接触网中的连接方式如图2所示。

可以看到,电气化铁路牵引供电系统中,除了要考虑分布参数的接触网线路之外,还存在着众多的集总参数元件。在进行接触网雷击过电压等此类暂态仿真时,串联(轨道电路)和并联(AT)于线路的集总参数元件会对电压电流行波产生反射和消弱,从而对沿线的过电压波形等产生影响。事实统计也表明,轨道信号电路会受到接触网雷击的影响产生损坏。研究这些集总参数元件对接触网暂态计算的影响,将有利于对接触网过电压的计算以及后续保护措施的选取。

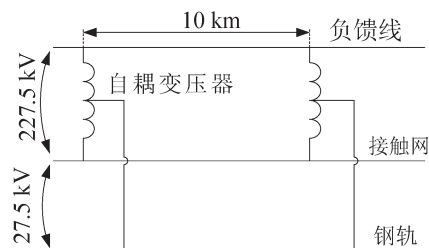


图2 自耦变压器的连接
Fig.2 Connection of auto-transformer

2 分布参数线路中集总元件的处理

暂态仿真具有现象刻画准确、应用广泛、数值稳定性好等特点,是了解电力系统暂态复杂行为的必要手段。在电力系统暂态仿真中,为清楚认识电磁过程的电压、电流之间的关系,输电线路往往采用分布参数模型。

当前,分布参数模型求解多采用时域有限差分方法(finite difference time domain, FDTD)^[9-12],传输线的电报方程:

$$\frac{\partial V(z, t)}{\partial z} + L_c \frac{\partial I(z, t)}{\partial t} + \int_0^t \zeta(t - \tau) \frac{\partial I(z, \tau)}{\partial \tau} d\tau = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} + C_c \frac{\partial V(z, t)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中: V , I 为线路的电压和电流; L_c 和 C_c 为线路单位长度的电感和电容; z 为传输线的位置; t 为时间; τ 为传输线上的延迟时间; $\zeta(t)$ 为地导体的暂态瞬时电抗,在无损条件下, $\zeta(t)$ 的影响可以忽略。

利用FDTD,可以采用迭代方法求出每点的电压和电流:

$$V_1^{n+1} = \left(\frac{C_c \Delta z}{2} + \frac{1}{2R_s} \right)^{-1} \left(\left(\frac{C_c \Delta z}{2} - \frac{1}{2R_s} \right) V_1^n - I_1^n + \frac{I_s^n + I_s^{n-1}}{2} \right) \quad (3)$$

$$V_k^{n+1} = \left(\frac{C_c}{\Delta t} \right)^{-1} \left(\frac{C_c}{\Delta t} V_k^n - \frac{I_k^n - I_{k-1}^n}{\Delta z} \right) \quad (4)$$

$$I_k^{n+1} = \left(\frac{L_c}{\Delta t} \right)^{-1} \left(\frac{L_c}{\Delta t} I_k^n - \frac{V_{k+1}^{n+1} + I_k^{n+1}}{\Delta z} \right) \quad (5)$$

式中: $V_1, \dots, V_k$ 分别为节点1到节点 k 上的电压; $I_1, \dots, I_k$ 分别为流过节点1及节点 k 的电流。 R_s 为传输线的电阻, I_s 流过 R_s 的电流。

利用式(3)~(5)进行迭代计算,便可求出仿真对象上各点电压、电流变化的情况。

当在分布参数线路上存在集总参数元件时,集总参数元件上的电压和电流不能简单的按式(3)~(5)进行计算。分布参数的线路中存在集总参数元件的示意图如图3所示。

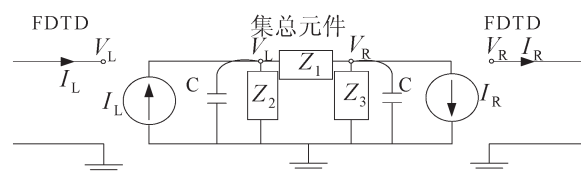


图3 集总元件与有限时域差分之间的连接关系
Fig.3 Connection between lumped-elements and finite-difference time-domain

图中 V_L , V_R , I_L 和 I_R 分别为与集总参数元件相邻的分布元件迭代计算而得的电压和电流值。 Z_1 , Z_2 , Z_3 为接入的集总元件的分布阻抗, C 为其对地分布电容。

为简单起见,在分析中假设负载为纯阻性负载,即 $Z_1=R_1$, $Z_2=R_2$, $Z_3=R_3$,对于图3,节点 V_L 和 V_R 处的电流满足:

$$I_L(t) = \frac{C\Delta z}{2} \frac{\partial V_L(t)}{\partial t} + \frac{V_L(t) - V_R(t)}{R_1} + \frac{V_L(t)}{R_2} \quad (6)$$

$$-I_R(t) = \frac{C\Delta z}{2} \frac{\partial V_R(t)}{\partial t} + \frac{V_R(t) - V_L(t)}{R_1} + \frac{V_R(t)}{R_3} \quad (7)$$

进行离散化,可得

$$\frac{I_L^n + I_L^{n-1}}{2} = \frac{C\Delta z}{2} \frac{V_L^{n+1} - V_L^n}{\Delta t} - \frac{V_R^{n+1} + V_R^n}{2R_1} + \frac{V_L^{n+1} + V_L^n}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \approx I_L^n \quad (8)$$

$$-\frac{I_R^n + I_R^{n-1}}{2} = \frac{C\Delta z}{2} \frac{V_R^{n+1} - V_R^n}{\Delta t} - \frac{V_L^{n+1} + V_L^n}{2R_1} + \frac{V_R^{n+1} + V_R^n}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) \approx -I_R^n \quad (9)$$

根据式(8)和(9),可求得在集总参数元件影响下电压和电流的分布情况。

考虑一种特殊情况, $R_1 \rightarrow 0$, $R_2=R_3 \rightarrow \infty$,此时,节点电压相等 $V_L=V_R=V_k$,节点电流 $I_L=I_{k-1}$, $I_R=I_k$ 。式子(8)和(9)相加,可得(4)。说明该式具有通用性,全分布参数模型是该式的一种特例。

3 考虑集总元件的牵引供电系统仿真

利用前述方法,对某一牵引供电系统情况进行仿真来验证该方法的可行性。

图4是某高铁接触网供电系统图,该图中包含4个导体:接触线(其中承力索和接触线视为一根导体)、负馈线、两根钢轨,他们之间的关系如图4所示。

由于牵引供电系统一般每10 km左右设置一个AT所,因而本文以10 km线路为单位进行仿真,仿真中,雷电流取 $1.2/50 \mu s$,幅值50 kA的双指数波形,地电导率 $0.0004 s \cdot m^{-1}$,相对介电常数为10。

分别对不考虑集总参数和考虑集总参数元件两种情况,对接入自耦变压器和轨道电路两种情况进行了仿真,得到的钢轨和线路上的电流电压波形分别如图5,图6所示。

通过图5的对比可以看到,并联的集总元件对电流的波形产生了影响,在AT的影响下,接触线感应电流的极性发生了变化,钢轨和负馈线上的感应电流极性没有变化,但波形受到了影响,进而使电压的波形受到影响发生改变。

从图6中可以看到,串联的轨道电路对钢轨和负馈线的电压产生了影响,使得他们的电压升高。同时由于轨道电路的阻碍作用,使得进入负馈线的电流也发生了变化。

通过对该实际系统的仿真计算,验证了本文方法的可行性,并且验证了在考虑集总参数元件时,会对接触网中电压电流的波形产生影响。

4 结论

和电力系统集总元件多处于线路两端不同,牵引供电系统中沿线分布的轨道电路,吸流变压器,自耦变压器等元件会对牵引供电系统的暂态仿真产生影响。将时域有限差分方法计算得到的节点电流视为电

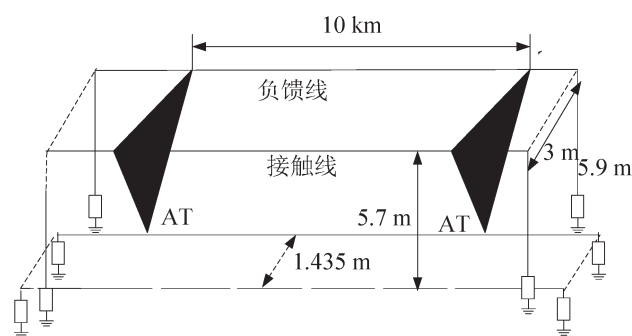


图4 包含有自耦变压器与轨道电路的接触网传输线模型示意图

Fig.4 Transmission line model of catenary containing auto-transformer and track circuit

流源注入集总元件两端,对集总参数元件的电压进行求解。通过对牵引供电系统中轨道电路、自耦变压器存在影响仿真结果的分析,表明集总参数元件会对牵引供电系统电压电流行波的波形产生影响。本文方法对电气化铁路接触网雷击过电压、操作过电压等的仿真和过电压的防护具有实际意义。

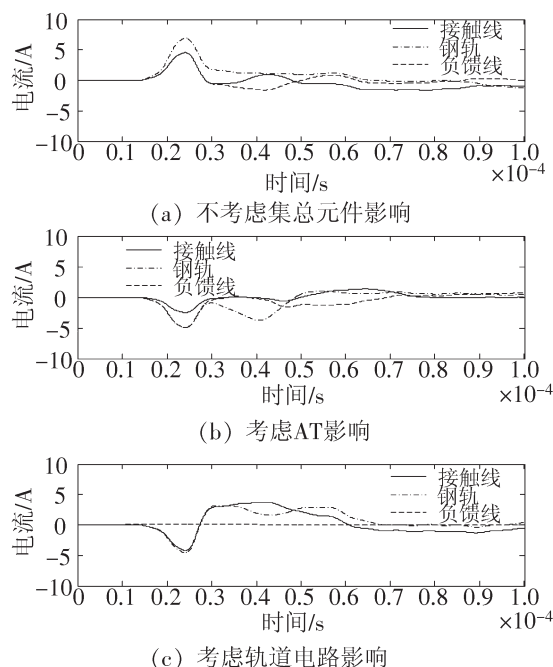


图5 集总元件对接触网导体电流波形的影响
Fig.5 Catenary currents effected by lumped-elements

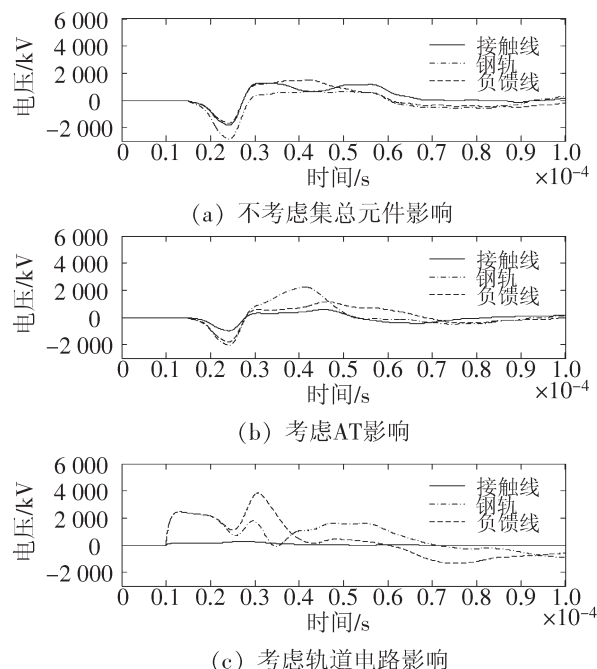


图6 集总元件对接触网导体电压波形的影响
Fig.6 Catenary voltages effected by lumped-elements

参考文献:

- [1] 何俊文,李群湛,刘炜,等. 交流牵引供电系统仿真通用数学模型及其应用[J]. 电网技术,2010,34(7):25-29.
- [2] HO T K, CHI Y L, SIU L K, et al. Traction power system simulation in electrified railways[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5(3): 93-107.
- [3] 王洪帅,徐青山,袁宇波. 电气化铁路AT牵引供电方式电流分布的理论计算及仿真[J]. 江苏电机工程,2011,30(4): 34-38.
- [4] 何俊文,李群湛,刘炜. 交流牵引供电系统运行仿真软件的开发[J]. 电气化铁道,2010(2):5-9.
- [5] 刘鹏宇. 轨道电路电气特性仿真方法研究[J]. 城市轨道交通研究,2011(12):24-27.
- [6] 李群湛,郭锴,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.
- [7] 何正友,方雷,郭东,等. 基于AT等值电路的牵引网潮流计算方法[J]. 西南交通大学学报,2008,43(1):1-7.
- [8] 杨丰萍,王喜燕. AT供电牵引网故障测距仿真研究[J]. 华东交通大学学报,2012,29(5):34-37.
- [9] 吴命利. 牵引供电系统电气参数与数学模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2006.
- [10] GOODMAN C J, KULWORAWANICHONG T. Sequential linear power flow solution for AC electric railway power supply systems[J]. Computers in Railways, 2002, 61(13): 531-540.
- [11] NELSON THEETHAYI, YAQING LIU, RAUL MONTANO. A theoretical study on the consequence of a direct lightning strike to electrified railway system in Sweden[J]. Electric Power Systems Research, 2005(74): 267-280.

(下转第88页)

An empirical study on SHIBOR with Single -factor Term Structure of Interest Rate models

Hou Wenqi, Pan Shanbao

(School of Economics and Commerce South China University of Technology, GuangZhou 510006, China)

Abstract: Because the structure of interest rates is so important in financial asset pricing and risk management, on the basis of summary and analysis of existing literature, this article use the single-factor interest rate models to do the empirical research on the structure of SHIBOR interest rate. The results show that; in all of the single-factor interest rate models (Vasicek, CIR, CKLS), on the fitting effect of SHIBOR interest rate behavior characteristics, Vasicek's effect is the best, not only the estimated value of coefficient is statistically significant, but also the estimator of its prediction error is the most satisfying. Vasicek model has better ability to describe the dynamic characteristic of the SHIBOR market, it's the ideal interest rate model, it has better applicability in the research on characteristics of our country interest rate.

Key words: interest rate model; SHIBOR; empirical research

(上接第68页)

- [12] YONG HYEON CHO. Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 315: 433-454.

Effects of Lumped-elements on Transient Simulation of Electrified Railway Catenary

Lv Fuxing, Lun Li

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Transient simulation is necessary for catenary overvoltage protection. Unlike the general power system, lumped elements in catenary, such as track circuit, autotransformer and boost transformer, may influence the transient simulation results based on distributed parameter model. Through the simulations of lumped elements, combined with finite-difference time-domain (FDTD), this study maintains that the wave propagation reflected by lumped elements has effects on the waveform of induced voltage and current, which is important for transient calculation and protection in electrified railway systems.

Key words: catenary; lumped-parameter; transient; traveling wave