

文章编号:1005-0523(2017)05-0113-07

AT 牵引供电对电力电缆感应电压仿真分析

彭 涛,陈剑云

(华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:高速铁路电力贯通线一般采用全电缆敷设,牵引供电系统工作电流作用于电力电缆金属护层时将会产生感应电压。随着机车运营速度的提高,牵引供电系统工作电流的提高对电力电缆金属层感应电压是否会危及人员、设备的安全是亟需解决的问题。通过对牵引供电作用于电力电缆感应电压展开分析,将牵引供电系统和电力电缆利用统一链式网络模型对其整体建立仿真模型,仿真计算牵引供电系统工作电流不同情况下对电力电缆感应电压的情况,计算结果与理论分析较为吻合。计算数据表明,牵引供电系统工作电流的提高对电力电缆感应电压影响并不明显,仿真模型和仿真数据能够为铁路电力专业人员提供相关设计施工参考依据。

关键词:电力电缆;感应电压;牵引供电系统;统一链式网络

中图分类号:U223.8

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.05.017

高速铁路 10 kV 贯通线一般采用全电缆方式沿高架桥两侧电缆槽敷设,与牵引供电系统处于平行状态,二者处于同一电磁环境中,牵引供电系统电流通过电磁耦合会在电力电缆金属护层中产生感应电动势,感应电压过高将可能危及人员、设备的安全^[1]。近年来随着铁路发展,研究者都在致力于高速铁路运营速度的提高。伴随机车运行速度的提高,牵引供电系统工作负荷增大,电流增加,对 10 kV 电力电缆金属护层感应电压的变化是否会危及人员、设备的安全,是高速铁路设计、维护过程亟需解决的问题。然而,由于牵引供电系统的复杂性,针对牵引供电系统对电力电缆金属层感应电压的计算,目前并没有十分精确的模型。铁路 10 kV 电力电缆感应电压过高将会危及安全的问题,目前设计施工过程中一般对电力电缆金属保护层进行单点接地处理,通过地电位的钳制作用和护层的打断来降低金属护层的最大感应电压^[2-3]。但是考虑到供电的可靠性以及施工的便捷性,实际工程中应减少电力电缆中间接头。在《高速铁路设计规范》(TB10621-2014)12.4.5 中规定,设计时速在 350 km/h 时,电缆金属层连续长度不宜大于 3 km,且正常感应电压最大值在未采取有效防止人员任意接触金属护层的安全措施时,不应大于 60 V,采取安全措施时,不应大于 300 V 的要求。目前针对高速铁路牵引供电系统对电力电缆感应电压影响分析展开的工作较少,较为普遍的计算方法将牵引供电系统尽可能的简化合并成较少的导线数量,然后根据理论进行计算^[4-6]。文献[7]介绍了利用模拟仿真软件计算牵引供电系统对电力电缆感应电压分析,但是对计算软件的模型原理并没有介绍,且对牵引供电系统中导线做了归并处理。文献[8]讨论了牵引供电系统和电力电缆本身电流同时作用于电力电缆金属护层感应电压仿真计算,建模过程中对电力电缆自身电流作用于金属护层的感应电压分析较多,但是对于牵引供电系统作用于电力电缆金属层感应电压分析较少,对牵引供电系统导线简单归并处理。

为了能够分析牵引供电系统电流提高对 10 kV 电力电缆金属护层感应电压的影响,本文利用统一链式电路模型^[9-11],将牵引供电系统和 10 kV 电力电缆系统纳入统一建模。仿真计算牵引供电系统不同电流下对电力电缆金属护层感应电压的影响,为铁路电力专业设计施工人员提供计算模型和参考数据。

收稿日期:2017-04-25

作者简介:彭涛(1991—),男,硕士研究生,研究方向为轨道交通电气化与自动化。

通讯作者:陈剑云(1962—),男,教授,博士生导师,研究方向为牵引供电。

1 铁路 10 kV 电力电缆金属感应电压理论分析

电气化铁道供电系统由牵引供电系统和电力贯通线组成。由于铁路供电系统的特殊性,牵引供电系统与电力贯通线线路处于同一个电磁环境中。当铁路 10 kV 输电线路采用电力电缆敷设时,10 kV 电力电缆金属护层感应电压可看作牵引供电电流和电力电缆工作电流在电缆金属护层上所产生的感应电压的矢量和。但是如果考虑牵引供电电流和电力电缆同时作用情况下电缆金属护层感应电压计算较为复杂。根据铁路总公司有关规定,在检修作业中检修箱变或变配电所电缆头时,配电柜只能先断电,柜门才能打开,且电力电缆本身工作电流存在很大的不确定性。故在牵引供电系统工作电流提高对电力电缆感应电压影响时,只考虑牵引供电系统对电力电缆金属层感应电压的影响,电力电缆自身工作电流对金属互层感应电压可不考虑。而牵引供电系统中各传输导体对电力电缆产生的感应电压主要由电磁感应和静电感应两种方式叠加产生^[12-13]。

1.1 电磁感应

当牵引供电系统各传输导体电流产生交变的电磁场,通过电力电缆与牵引供电系统中各传输导线之间的互感,在电力电缆金属层产生感应电动势,称之为电磁感应电压。由于各相电缆与牵引供电系统相对位置大致相同,因此电力电缆金属层电磁感应产生的感应电压为

$$U_a \approx U_b \approx U_c \approx -(j\omega I_1 M_1 + j\omega I_2 M_2 + \dots + j\omega I_i M_i) \quad (1)$$

$$M_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{d_{12}} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: I_i 为牵引供电系统中某导线流过的电流(例如接触网、承力索、正馈线等); M_i 为牵引供电系统中某导线与电力电缆单位长互感; μ_0 为真空磁导率; l 为导线单位长度,km; d_{12} 为导线与电力电缆的距离。

1.2 静电感应

在牵引供电系统中各传输导线电压产生的电场中,通过电力电缆与传输导线间存在耦合电容,从而在电力电缆上产生静电感应。相当于电力电缆与牵引供电系统中某传输导线之间连着一个电流源 I_A ,对电力电缆产生的静电感应电压为

$$U_A = \frac{C_A}{C_{TA} + C_A} U \quad (3)$$

式中: C_{TA} 为牵引供电系统中某导线(例如接触网、承力索、正馈线等)与电力电缆间耦合电容; U 为导线上电压; C_A 为电力电缆对地分布电容。

通过以上分析可知,牵引供电系统工作时各导线通过电磁感应和静电感应对电力电缆金属护层产生感应电压,由于牵引供电系统导线较为复杂,通过公式(1)(2)(3)直接计算电力电缆感应电压几乎不可能。本文将采用统一链式电路模型,该模型能够同时计算电磁感应和静电感应问题,有效解决如何计算牵引供电系统作用于电力电缆感应电压问题。

2 统一链式网络电路仿真模型

2.1 AT 供电系统与电力电缆构成的供电网络

高速铁路一般为 AT 供电方式,相对于 10 kV 电力线路,其构成网络较为复杂,导体数量较多。如图 1 所示,一般由接触线(CW)、承力索(MW)、正馈线(PF)、保护线(PW)、钢轨(R)、综合地线 E 等构成。考虑上下行并联运行情况,整个牵引供电网络构成更为复杂。在计算电力电缆金属护层感应电压时,整个牵引供电网络同时作用于电力电缆金属护层。而电力电缆一般呈品字形敷设在电缆槽内,可以将 3 根电缆等效为按照 1 根导体进行考虑。

2.2 统一链式网络模型

从整体上看,整个铁路供电网络都是平行统一链式传输线,拓扑结构上构成一个复合链式网络。整个网络由纵向串联元件和横向并联元件构成。可以等效成图 2 复合链式网络模型。设整个模型中导体数量为 m ,则模型中阻抗、导纳矩阵均为 $m \times m$ 的矩阵。

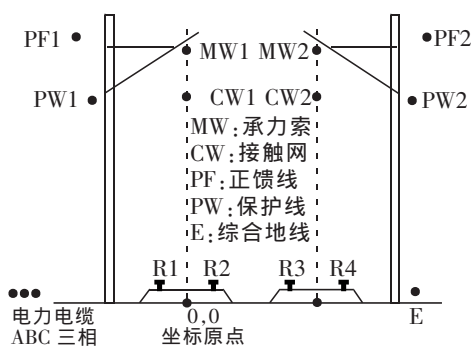


图1 铁路供电系统示意图

Fig.1 The railway power supply system

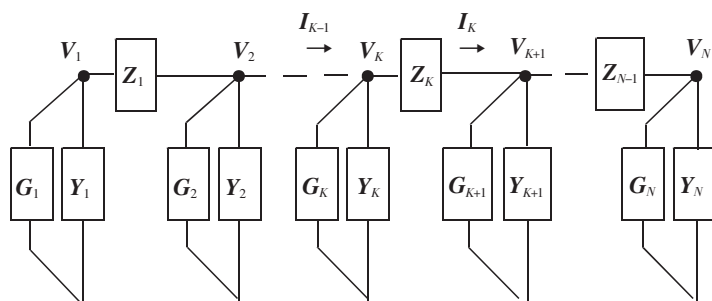


图2 统一链式电路模型等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of unified chain circuit model

构成铁路供电网络的平行统一链式可以横向切割成均匀段,为了提高计算精度,可以按1 km或者0.5 km切分一段,采用 π 型电路来表示。图3是当传输线路数量为 m 时,单位长度串联阻抗 Z 并并联导纳矩阵 Y 。

利用统一链式网络求解时,图3中 Z_K 为各段支路 $m \times m$ 阶的阻抗矩阵, I_K 为 $m \times 1$ 阶的支路电流矩阵, Y_K 为各节点 $m \times m$ 导纳矩阵, G_K 为 $m \times 1$ 阶外界注入的电流矩阵, V_K 是 $m \times 1$ 阶的电压矩阵。对于上面的链式电路,第 K 个节点,有

$$V_K - V_{K+1} = Z_K I_K \quad (4)$$

$$I_{K-1} - I_K = Y_K V_K - G_K \quad (5)$$

$$I_K = Z_K^{-1} (V_K - V_{K+1}) \quad (6)$$

$$I_{K-1} = Z_K^{-1} (V_{K-1} - V_K) \quad (7)$$

把式(6)和式(7)代入式(5),并令 $D_K = -Z_{K-1}^{-1}$ ($2 \leq K \leq N$), $M_K = Y_K + Z_K^{-1} + Z_{K-1}^{-1}$ ($2 \leq K \leq N$), $M_1 = Y_1 + Z_{K-1}^{-1} = Y_N + Z_{K-1}^{-1}$,则有:

$$D_K V_{K-1} + M_K V_K + D_{K+1} V_{K+1} = G_K \quad (8)$$

图3整个网络方程为

$$\begin{pmatrix} M_1 & D_2 & 0 & \cdots & 0 \\ D_2 & M_2 & D_3 & \cdots & 0 \\ 0 & D_3 & M_3 & D_4 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ & & D_{N-1} & M_{N-1} & D_N \\ 0 & \cdots & 0 & D_N & M_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{N-1} \\ V_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_{N-1} \\ G_N \end{pmatrix} \quad (9)$$

简写为

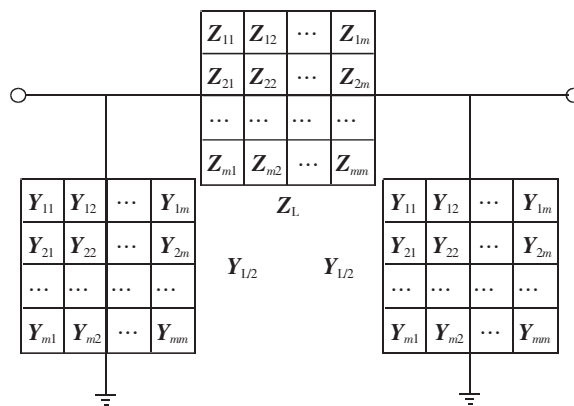
$$[M] = [V][G] \quad (10)$$

$$[V] = [M][G]^{-1} \quad (11)$$

由求解到的导线节点电压矩阵 V_K ,代入式(6),可求得导线各段的电流矩阵 I_K ,整个网络得以求解。

3 10 kV 电力电缆感应电压实例计算分析

根据第2章统一链式电路模型,将牵引供电系统和电力电缆纳入统一链式网络模型。利用MATLAB GUI编程工具,实现了对铁路整体供电系统网络模型计算软件开发工作,对计算过程所需参数通过参数设置界面进行输入。考虑到牵引供电系统作用电力电缆三相感应电压基本一致,且呈品字型敷设,将电力电缆

图3 等值 π 型电路Fig.3 equivalent π circuit

等效为 1 根导线,加上牵引供电系统中上行接触线、上行承力索、上行正馈线、上行保护性、上行钢轨 1、上行钢轨 2、下行接触线、下行承力索、下行正馈线、下行保护性、下行钢轨 1、下行钢轨 2、综合地线共 14 跟导线^[14]。构成的统一链式网络每一个分段都是 14×14 的矩阵节点。

3.1 仿真参数设置

根据统一链式网络计算参数要求,需要对设置参数进行设定。整个模型导线数量为 14,分段长度为 0.5 km 分割一段。模型中牵引变压器采用单相 V 接线,模型中间设 AT 变压所,末尾设 AT 分区所,在 AT 变压所和分区所处上下行并联。计算参数选取:变电所接地电阻 0.21Ω ,AT 所接地电阻 0.42Ω ,末端分区所接地电阻 0.24Ω ,钢轨泄漏电阻 $100 \Omega/\text{km}$,综合接地每 0.5 km 和钢轨并联,接地阻抗为 1Ω 。可计算一个供电臂(一般为 30 km)各个节点电流电压,机车以电流源模型代替。机车在匀速情况下,不同速度其从接触网取流大小存在差异。随着速度的提高,其取流大小也会提高。模拟仿真过程以机车取流的大小来模拟机车运行的不同速度,其计算流程和参数设置界面如图 4 和图 5。

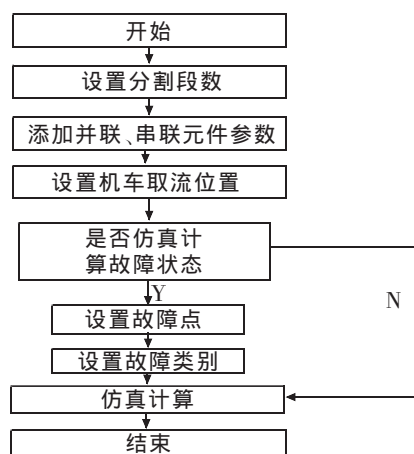


图 4 计算流程图

Fig.4 Calculation flowchart

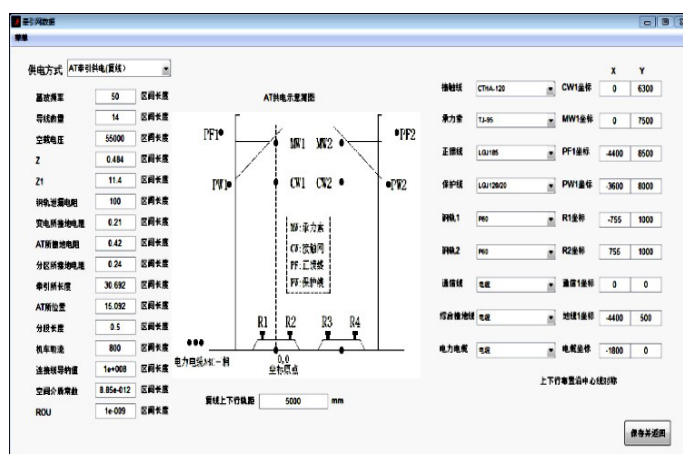


图 5 计算软件参数设定界面

Fig.5 Calculation software parameter setting interface

3.2 仿真计算

根据表 1 机车工作电流数据,结合统一链式网络铁路供电计算模型,仿真牵引供电系统对电力贯通线路金属层的感应电压,按正常运行和故障状态下分别模拟计算。

1) 正常运行状态下的仿真计算。分别仿真计算机车取流在表 1 四种情况下,因机车所在位置不同,对电力贯通电缆金属护层的感应电压值不同,通过仿真多个机车位置点分析判断牵引供电系统对电力贯通线路的最大感应电压值。本次计算选取机车取流点距变电所 10 km 和 25 km,分析电力电缆感应电压值。图 6 和图 7 为机车距离牵引变电所 10 km 和 25 km 时的单位长度电缆感应电压分布图。

2) 故障状态下的仿真计算。分析牵引供电系统在短路故障情况下的感应电压最大值,结合正常运行情况的仿真分析结论,选取接触网(+27.5 kV)接地短路故障和正馈线(-27.5 kV)接地短路故障两种情况分别分析,故障点设置在距变电所 10 km 处,机车取流点在距变电所 25 km 处。图 8 和 9 分别为接触网和正馈线接地故障时的感应电压分布图。

表 1 机车在不同速度情况下的取流电流大小

Tab.1 The current size of the locomotive at different speeds

参数	速度 1	速度 2	速度 3	速度 2
机车取流/A	1 000	1 150	1 300	1 500

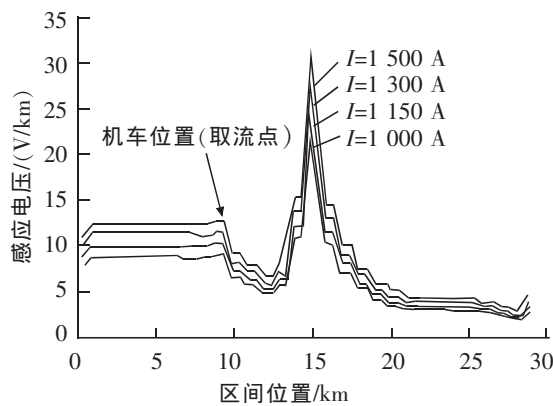


图 6 正常情况机车取流位置 10 km 处电缆感应电压
Fig.6 The cable induced voltage at the 10 km position of the locomotive

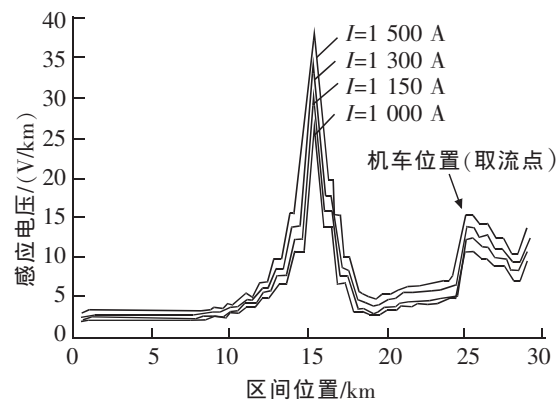


图 7 正常情况机车取流位置 25 km 处电缆感应电压
Fig.7 The cable induced voltage at the 25 km position of the locomotive

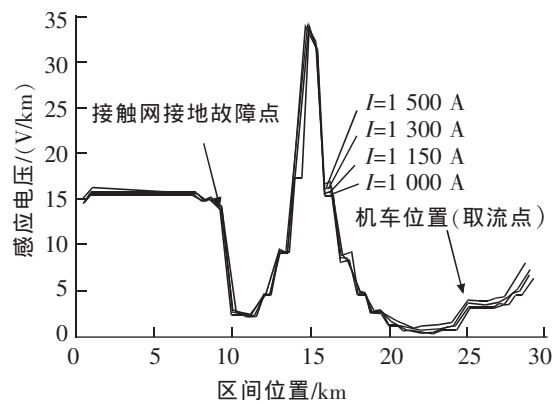


图 8 接触网接地故障电力电缆感应电压
Fig.8 Contact network grounding fault power cable induced voltage

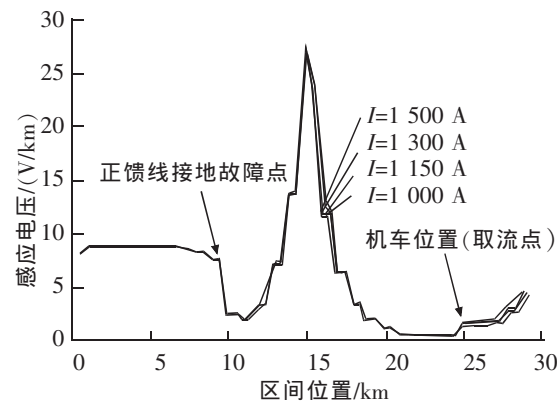


图 9 正馈线网接地故障电力电缆感应电压
Fig.9 The F line grounding fault power cable induced voltage

表 2 正常情况机车取流点 10 km 位置电缆感应电压
Tab.2 The cable induced voltage at the 10 km position of the locomotive

距变电所 位置点/km	10 kV 电缆感应电压/(V/km)			
	I=1 000 A	I=1 150 A	I=1 300 A	I=1 500 A
0.5	7.55	8.63	9.71	10.78
2.5	8.53	9.74	10.96	12.17
5	8.49	9.70	10.91	12.12
7.5	8.41	9.61	10.80	12.00
10	8.74	9.99	11.24	12.48
12.5	4.47	5.11	5.75	6.39
15	21.42	24.47	27.52	30.57
17.5	6.80	7.77	8.74	9.72
20	3.10	3.54	3.99	4.43
22.5	2.65	3.03	3.42	3.80
25	2.63	3.00	3.38	3.76
27.5	2.06	2.35	2.65	2.94
30	1.76	2.01	2.26	2.51

表 3 正常情况机车取流点 25 km 位置电缆感应电压
Tab.3 The cable induced voltage at the 25 km position of the locomotive

距变电所 位置点/km	10 kV 电缆感应电压/(V/km)			
	$I=1\ 000\ \text{A}$	$I=1\ 150\ \text{A}$	$I=1\ 300\ \text{A}$	$I=1\ 500\ \text{A}$
0.5	2.00	2.28	2.57	2.85
2.5	2.15	2.45	2.76	3.07
5	2.12	2.42	2.72	3.02
7.5	2.10	2.40	2.70	3.00
10	2.42	2.76	3.10	3.45
12.5	4.79	5.47	6.14	6.82
15	21.07	24.07	27.07	30.07
17.5	6.81	7.78	8.75	9.73
20	3.77	4.30	4.84	5.38
22.5	4.44	5.07	5.70	6.34
25	10.74	12.27	13.81	15.34
27.5	8.64	9.88	11.11	12.35
30	7.34	8.39	9.44	10.49

牵引供电系统中,电流流出牵引变电所和电流流入牵引变电所方向刚好相反,对叠加到电力电缆感应电压有抵消效果。根据仿真数据,结合牵引供电电流计算分析^[15],正常运行情况下,机车取流点在 AT 所中间位置时感应电压最高。主要原因为 AT 所在整个牵引供电系统中起吸流的作用,AT 所所在位置牵引供电系统电流较大且流入流出存在较大不平衡,故感应电压值最高。电力电缆除 AT 所感应电压较大外,机车所在位置处(即取流点处),电流感应电压也存在较大突变,牵引供电系统电流分布与机车取流位置密切相关,且在取流点接触网电流最大。仿真结果与理论分析数据基本一致。

根据图 7、图 8 分析易得,接触网接地或者正馈线接地时存在较大短路电流,电流通过大地分散流回牵引变电所,产生较大感应电压。此时取流点感应电压也有一定幅度的改变,但是由于机车取流相对短路电流太小,故在故障情况下机车速度对电力电缆感应电压影响较小。且一般牵引供电系统故障后二次保护会立即切断供电回路,此时牵引供电系统对电力电缆感应电压持续时间很短,瞬间即可消失。因此,故障情况下,牵引供电系统对电力贯通线路金属层感应电压对人体的危害为极小概率事件。

整体而言,随着机车运行速度的提高,牵引供电系统对电力电缆金属层的感应电压值逐渐增加,但增加的幅度并不大。主要原因为流入流出牵引变电所电流存在极大对称。尤其是对于 AT 供电系统,由于正馈线以及 AT 所的存在,电流大部分经过线路回流,较少分散经过大地回流。而感应电压与电流大小和方向有关系,流入流出电流越匹配,彼此对电力电缆产生的感应电压就会大大抵消。

4 结束语

高速铁路 10 kV 电力电缆金属层感应电压的大小直接关系到施工运营人员、设备的安全。得益于高速铁路 AT 供电方式,AT 变压器的存在使得牵引变电所流出电流大部分都经过牵引供电线路流回变电所,最终使得牵引供电工作电流对电力电缆感应电压影响较小。且在提高牵引供电系统负荷的前提下,牵引工作电流增加对电力电缆金属护层感应电压增加的幅度也较小。本文利用统一链式网络模型对牵引供电系统和电力电缆统一建模,仿真计算并分析了高速铁路牵引供电系统对电力电缆金属层感应电压。仿真结果和理论较为接近,能够为铁路供电施工提供基础模型参考和数据依据。

参考文献:

- [1] 易志兴,曹晓斌,吴广宁,等. 高速铁路电缆接地方式对护层感应电压的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2014(6):109-115.
- [2] 曹晓斌,易志兴,陈奎,等. 高速铁路单芯馈线电缆的敷设方式和敷设间距[J]. 中国铁道科学,2015,36(6):85-90.
- [3] 周明,陆伟颖,苏文群. 35 kV 单芯电缆金属屏蔽感应电压计算及接地处理方案[J]. 电世界,2011,52(5):1-4.
- [4] 常媛媛,吴命利,韦继肖. 津秦客运专线信号电缆受电磁影响测试与分析[J]. 铁道工程学报,2015,32(9):92-96.
- [5] 韦继肖. 电气化铁路对通信线路的电磁影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [6] 谭壹方. 基于有限元的高速铁路馈线电缆护层感应电压及环流分析[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [7] 王建军,苏梓铭,吴季浩. 铁路 10 kV 电力电缆屏蔽层感应电压计算分析[J]. 电气应用,2015(4):108-112.
- [8] 杨建兴. 客运专线牵引供电系统对电力电缆的影响分析[J]. 电气化铁道,2012,23(2):11-14.
- [9] 苏保卫,陈剑云. 综合接地对 AT 牵引供电网络参数影响的研究[J]. 电气化铁道,2011(3):1-4.
- [10] 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.
- [11] 刘仕兵,袁琳. 基于 Simulink 的高速铁路牵引供电系统仿真建模[J]. 华东交通大学学报,2013,30(6):59-61.
- [12] 徐迎辉. 客专牵引电流对信号电缆电磁影响研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2013.
- [13] 王敏. 10 kV 单相电力电缆屏蔽层的感应电压和环流[J]. 高电压技术,2002,28(5):30-32.
- [14] 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,2010:69-78.
- [15] 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.

Simulation of AT Traction Power Supply System for Power Cable Induced Voltage

Peng Tao, Chen Jianyun

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

Abstract: Power transmission lines of high speed railway usually adopt full cable laying, and the traction power supply system will generate induced voltage when the working current acts on the metal protective layer of power cable. With the increase of locomotive operating speed, it is urgent to improve the working current of traction power supply system when the induced voltage of metal layer of power cable may endanger the safety of personnel and equipment. In this paper, the influence of traction power supply on the induced voltage of power cable was analyzed. Besides, a simulation model combining the traction power supply system and power cable was established by using unified chain circuit model. Then, the induced voltage of power cable under different working currents of traction power supply system was simulated and calculated, and the calculation results were consistent with the theory. Research results show that the increase of working current of traction power supply system has little influence on the induced voltage of power cable, and the simulation model and data can provide railway electric power professionals with reference for design and construction.

Key words: power cable; induced voltage; traction power supply mode; unified chain circuit model

(责任编辑 刘棉玲)