

文章编号:1005-0523(2020)05-0015-08

牵引网高频阻抗特性研究

朱明,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:经典牵引网阻抗计算公式采用实心圆导线模型及 Carson 级数法,其在推导过程中皆以工频(50 Hz)为条件,并不适合高频计算。为了准确描述牵引网高频阻抗特性,运用双曲余切近似和 Sunde 地阻抗算法总结出针对牵引网高频阻抗计算公式。结合 Python 科学计算及仿真,以沪宁无锡东变电所东段供电臂的牵引网架设为实例给出阻抗特性曲线,分析了牵引网高频阻抗与架设高度、大地电导率之间的关系。结果表明低频电流时大地电导率和高度对阻抗数值影响不大,但高频尤其频率高于 10^4 Hz 后大地电导率和架设高度对牵引网阻抗的影响不容忽视,在模拟高频或快速瞬变的情况下需精确大地电导率和架设高度的数值。

关键词:牵引网阻抗;频率;土壤电阻率;架设高度

中图分类号:U223.2

文献标志码:A

本文引用格式:朱明,陈剑云.牵引网高频阻抗特性研究[J].华东交通大学学报,2020,37(5):15-22.

Citation format:ZHU M, CHEN J Y. Research on high frequency impedance characteristics of traction network[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(5): 15-22.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.003

牵引网阻抗矩阵的计算实际上可以归结为多导体传输线的阻抗计算,考虑到在交流电的作用下,传输线和大地中出现集肤效应,使得牵引网络的电阻和电感成为电流频率的函数^[1],也就是说,整个牵引网络的阻抗是频变的。由于牵引网对谐波、行波、暂态信号分析的需要,我们必须将 0~1 MHz 的阻抗特性曲线作为分析基础,精准描述牵引网阻抗频率特性有助于准确建立牵引网模型。对于牵引网的阻抗数值及频变特性的研究,不少学者做过相关工作。文献[2]分析了架空导线的电气参数在频变条件下对一些输入数据的敏感性;文献[3-4]充分考虑钢轨铁磁特性计算了某实际线路的频变阻抗参数矩阵,在计算阻抗时都采用牵引网阻抗经典算法。该算法将牵引网视为传输线结构并采用架空多导体传输线理论,阻抗矩阵计算包括导线间的电感(导线和大地均为理想导体)、导线内阻抗、导线-地回路阻抗(大地为非良导体)三部分,其中导线内阻抗以及导线-地回路阻抗(又称大地阻抗)是一类非常复杂的电磁计算问题。经典算法中内阻抗采用实心圆导线模型^[5-6],大地阻抗采用 Carson 级数法^[7],但经典算法在工频(50 Hz)附近应用较广,在高频激励下可能会出现误差,如实心圆导线模型使用的 Kelvin 函数计算较为复杂,高频等大参数下直接利用其基本展开式结果会溢出,另外 Carson 级数法在推导时初始条件使用了低频近似,因而高频激励下结果准确性有待商榷。

基于此,以多导体传输线理论为基础,运用双曲余切及 Kelvin 函数多项式展开近似内阻抗和 Sunde 地阻抗公式,得到了适合牵引网高频阻抗计算公式。并以沪宁线无锡东变电所东段供电臂为例,通过 Python 科学计算得到阻抗结果并分析讨论牵引网阻抗在高频激励下的变化趋势以及与架设高度、大地电

收稿日期:2020-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51467004)

作者简介:朱明(1995—),女,硕士研究生,研究方向为牵引供电计算。E-mail:zhu-ming113@126.com。

通信作者:陈剑云(1962—),男,教授,博士,研究方向为牵引供电系统计算及电力系统监控与自动化。E-mail:tiger984@163.com。

导率间的关系。

1 牵引网高频阻抗计算公式的基本原理

牵引网阻抗计算采用多导体传输线理论^[8-10],包括计算电感、内阻抗和大地阻抗。采用双曲余切近似内阻抗可以简化内阻抗的计算,Sunde 地阻抗公式使用了完整的大地传播常数,不用忽略高频位移电流。

设有 n 根导体输电线,当多导体传输线中电流频率一定时,沿输电线路单位长度内的压降与导线电流之间存在由阻抗矩阵相联系的关系^[11],即

$$-\begin{bmatrix} \frac{dU_1(j\omega)}{dx} \\ \vdots \\ \frac{dU_n(j\omega)}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(j\omega) & \cdots & Z_{1n}(j\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{n1}(j\omega) & \cdots & Z_{nn}(j\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(j\omega) \\ \vdots \\ I_n(j\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵 Z 是元素与频率相关的复数对称矩阵,可将串联阻抗分解成式(2)形式

$$Z=R+j\omega L \quad (2)$$

对角元素 Z_{ii} 是牵引网中各导线的自阻抗,表示单相导线-大地回路电磁感应关系,它包括 3 个成分。

$$Z_{ii}=j\omega L_{ii}+Z_c+Z_g \quad (3)$$

式中: L_{ii} 是导线 i 与大地回路均为理想导体时的回路电感; Z_c 是导线的内阻抗; Z_g 是大地的内阻抗。

$$L_{ii}=\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i}=2 \times 10^{-4} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (4)$$

非对角线元素 $Z_{ij}=Z_{ji}$ 是 2 个回路即导体 i 接地回路和导体 j 接地回路之间的单位长度的串联互阻抗。

$$Z_{ij}=j\omega L_{ij}+Z_{gm} \quad (5)$$

式中: L_{ij} 是当导线与大地均为理想导体时导线 i 与导线 j 之间的互感; Z_{gm} 是当导线 i, j 均以大地为返回回路的互阻抗。

$$L_{ij}=\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}}=2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (6)$$

1.1 内阻抗的计算

导线内阻抗表示导线的内部损耗,是计算阻抗矩阵自阻抗部分的一个重要部分,需考虑集肤效应的影响。导线内阻抗与频率相关,对于规则的实心圆导线,其内阻抗可直接采用计及实心圆导线模型,对于与牵引网中接触线类似的形状不规则的导线,可等效为和它具有相等截面积的圆导线。最早提出圆导线模型内阻抗方法的 Schelkunoff 计及了集肤效应而不考虑临近效应对半径为 r 的圆形导线,给出了表示其内部阻抗频率相关性的确切表达式

$$Z_c=\frac{\rho r j_0(yr)}{2\pi r j_1(yr)} \quad (7)$$

式中: $r=\sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho}}$; j_0 为一阶第一类 Bessel 函数; j_1 为零阶第一类 Bessel 函数; μ 为导线磁导率, $\mu=\mu\mu_0$, 对非铁磁导线 $\mu=\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m; ρ 为导线电阻率; $\omega=2\pi f$ 。

公式(7)也可以用基于 Kelvin 函数的公式表示

$$Z_c^{\text{Schelkunoff}}=\frac{j\omega\rho \operatorname{ber}(mr)+j \operatorname{bei}(mr)}{2\pi \operatorname{ber}'(mr)+j \operatorname{bei}'(mr)} \quad (8)$$

式中: $m=\sqrt{\frac{\omega\mu}{\rho}}$; ber 与 bei 为开尔文函数,是由无穷项级数的和定义的。

以上是实心圆导线法计算内阻抗的最基本计算方法。虽然当前的计算机有强大的计算能力,通过编程语言可以直接计算 Bessel 函数及 Kelvin 函数。然而当出现高频率、高磁导率以及大导线尺寸即过大时计算机并不能给出可靠结果^[12-13]。以 Python 科学计算为例,使用 special 库中的 Kelvin 函数 ber 及 bei 计算公式

(8)的结果,当频率过高时,会有溢出报错而导致结果为 Nan;另外当用该模型计算钢轨的内阻抗时,会因为其本身的磁导率导致大参数而计算溢出。

为避免以上问题的发生,不少学者进行了近似计算或通过有限元软件得出了较为准确的结果^[14-15]。本文按照 Wedepohl 和 Wilcox^[16]的思路,采用双曲余切函数对公式(8)进行近似以便于数学估算。根据内阻抗的频变特性,在低频范围内显示为纯直流电阻 $\frac{\rho}{\pi r^2}$,在高频范围内由于集肤效应阻抗趋近于 $\frac{\rho\gamma}{2\pi r}$,利用双曲余切在 $x>0$ 时逐步趋近于 1 的特性可将高频部分近似为 $z = \frac{\rho\gamma}{2\pi r} \coth(\gamma r)$ 。结合以上特点,利用自由度优化可得

$$z = \frac{\rho\gamma}{2\pi r} \coth(k\gamma r) + \frac{\rho}{\pi r^2} \left(1 - \frac{1}{2k}\right) \quad (9)$$

式中: k 为任意常数,在低频时选择 k 值对公式进行修正; $\gamma = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho}}$ 。

将式(9)进行级数展开,由于内电感常被内电阻所影响,电感项的容许误差比电阻项大,对应式(6)的展开式,比较电阻项得到 $k^3 = 90/192$,即 $k = 0.777$ 。代入(9)可得到近似公式

$$Z_c^{\text{Wedepohl}} = \frac{\rho\gamma}{2\pi r} \coth(0.777\gamma r) + \frac{0.356\rho}{\pi r^2} \quad (10)$$

由于双曲余切函数的自身特性,当过大时,逐渐减小并趋于 1,故使用 Kelvin 函数计算造成溢出的情况在该公式中不会出现。计算表明当 $|mr| = 5$ 时阻抗的电阻部分(实部)产生最大误差 4%,当 $|mr| = 3.5$ 时电抗部分(虚部)产生最大误差 5%,远离这两种情况时误差很小。因而,该近似公式的优点是数字运算量少且适用于大参数下的计算机运算,给出了较为精确的内阻抗近似值。

1.2 导线-大地回路阻抗的计算

在计算输电线自阻抗和互阻抗时应考虑大地回路的影响。我们常将大地视为理想无损或有一定电阻率的均匀结构,在工程计算中 Carson 级数法是最常用的方法。Carson 最先研究了地阻抗的概念,通过分析大地回路中的电磁场给出大地中轴向电场相关的磁场分量并提出磁场分量源于导线中的电流以及大地中的电流两部分。但推导过程中对来源于大地中的电流采用了低频近似(即忽略大地中的位移电流),大地传播常数 $\gamma' = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_g}$ (丢掉了 ε_g 项),导出了地阻抗的广义积分形式

$$Z_{\text{gii}}^{\text{Carson}} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-2h_i u}}{\sqrt{u^2 + j\omega\mu_0\sigma_g} + u} du \quad (11)$$

$$Z_{\text{gmii}}^{\text{Carson}} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-2(h_i+h_j)u} \cos(d_{ij}u)}{\sqrt{u^2 + j\omega\mu_0\sigma_g} + u} du \quad (12)$$

式中: σ_g 是土壤电导率,土壤磁导率用 $\mu = \mu_0$ 表示; h_i 是导线 i 对地面的平均高度; d_{ij} 是导线 i 与导线 j 之间的水平距离。为了简化计算通常采用 Carson 积分公式的级数解。

在低频范围内该公式的无穷级数收敛很快,随着频率逐渐升高无穷级数的收敛速度下降,利用低频近似亦可推导出简化法的 Carson 公式^[17],一般电力工程中皆是用此法计算地阻抗。然而当频率趋于无穷大时 Carson 方法的表达式出现了奇点,也就是说地阻抗趋于无穷大,根据定义可以理解为大地穿透深度趋近于 0。事实上根据大地穿透深度的计算公式 $\delta_g = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu_0\varepsilon_g}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_g}{\omega\varepsilon_g}\right)^2} - 1 \right]}}$,当频率 ω 趋于无穷大时,有

$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \delta_g = \frac{2}{\sigma_g} \sqrt{\frac{\varepsilon_g}{\mu_0}}$,即大地穿透深度趋近于一个常数渐进值,说明地阻抗趋于无穷大的结论是不成立的,地阻抗应该趋近于一个有限值。后来 Gary, Deri 等人提出及证明的闭式近似即复深度回路法同样有出现奇点的问题

题^[18]。因此,使用低频近似为前提的 Carson 表达式由于忽略了 ε_g 项,频率趋于无穷大时计算结果与大地穿透深度理论相悖。在高频情况下计算结果并不准确。

Sunde 针对宽频谱范围的情况进行了分析,假设两层大地以及地表上空的一个偶极子共 3 种介质,利用波函数或赫兹位导出了如下公式

$$Z_{gii}^{\text{Sunde}} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2h_i u}}{\sqrt{u^2 + \gamma_g^2} + 2} du \quad (13)$$

$$Z_{mij}^{\text{Sunde}} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2(h_i+h_j)u} \cos(d_{ij}u)}{\sqrt{u^2 + \gamma_g^2} + u} du \quad (14)$$

式中: $\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\varepsilon_g)}$; ε_g 是土壤介电常数,通过对比 Carson 表达式(11)(12),可以看出区别仅在于大地传播常数不同。由于高频时土壤中的位移电流不能忽略,Sunde 使用了完整的大地传播常数。为了便于计算,Sunde 及 Rachidi 等^[19]推导出了对数近似表达式

$$Z_{gii}^{\text{Sunde-log}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1+h_i\gamma_g}{h_i\gamma_g}\right) \quad (15)$$

$$Z_{gmii}^{\text{Sunde-log}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{\left[1 + \left(\frac{\gamma_g(h_i+h_j)}{2}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\gamma_g d_{ij}}{2}\right)^2}{\left(\frac{\gamma_g(h_i+h_j)}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_g d_{ij}}{2}\right)^2}\right) \quad (16)$$

可以看出与文献[19]中的复深度法的对数表达形式相似,区别在于复深度法同样使用了地传播常数的低频近似表达式。针对 Carson 公式随着频率增大出现奇点的缺点,在对数表达式中也被证明频率趋向无穷大时结果是有限的,积分表达式被证明没有出现奇点。因而,在宽频范围内尤其是高频下使用 Sunde 的对数近似式计算地阻抗更为准确。

将式(10)(15)(16)带入多导体传输线理论阻抗矩阵算法(3)(5)中,得到本文牵引网高频阻抗矩阵计算公式

$$Z_{ii} = j\omega L_{ii} + Z_c^{\text{Wedepohl}} + Z_{gii}^{\text{Sunde}} \quad (17)$$

$$Z_{ij} = j\omega L_{ij} + Z_{gm}^{\text{Sunde}} \quad (18)$$

2 仿真与分析

利用上述方法参照沪宁无锡东变电所东段供电臂的复线牵引网架设方案计算分析牵引网高频阻抗特性,探究环境参数对牵引网高频阻抗的影响,通过 Python 科学计算的 Numpy 库进行矩阵计算及合并。其中各导线空间分布及牵引网导线的主要参数见表 1^[20]。

表 1 牵引网导线架设及参数
Tab.1 Wire erection and parameters of traction network

导线名称	导线型号	计算半径/ mm	等效半径/ mm	直流电阻/ (Ω/km)	电阻率/ $\times 10^{-7}\Omega$	架设位置/mm
正馈线(PF)	LGJ-185	9.5	9.03	0.163	0.462 1	(-4 400, 8 500)(9 400, 8 500)
承力索(MW)	TJ-95	6.25	4.74	0.158	0.243 2	(0, 7 500)(5 000, 7 500)
接触线(CW)	CTHA-120	5.9	6.3	0.179	0.159 6	(0, 6 300)(5 000, 6 300)
保护线(PW)	LGJ120/20	7.60	7.22	0.255	0.462 7	(-3 600, 8 000)(8 600, 8 000)
钢轨(R)	P60	109.1	120.3	0.135	5.048 0	(-715.5, 1 000)(715.5, 1 000) (4 282.5, 1 000)(5 171.5, 1 000)
综合地线(E)	TJ-95	6.25	4.74	0.158	0.243 2	(-4 400, 500)(9 400, 500)

2.1 大地电导率对牵引网阻抗的影响

由于实际线路跨度较大,所经区域不可能是单一地质。根据表 2 选取 4 种不同数量级的大地电导率进行分析,以接触线及钢轨回路为例,图 1,2 反映了该回路的阻抗矩阵 \mathbf{R}, \mathbf{X} 对大地电导率和频率的依赖性。

表 2 大地电导率 σ_g 简表
Tab.2 Earth conductivity σ_g

地质情况	$\sigma_g/(s/m)$
干燥地区	0.1
潮湿地区	1~10
多岩地区	0.001
平均情况	0.01

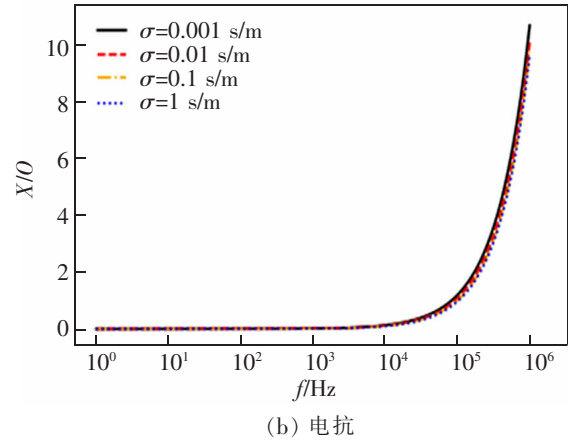
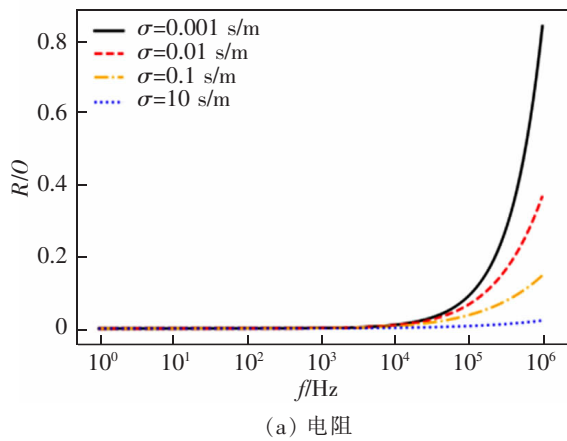


图 1 自阻抗和大地电阻率的关系

Fig.1 Relationship between self-impedance and earth resistivity

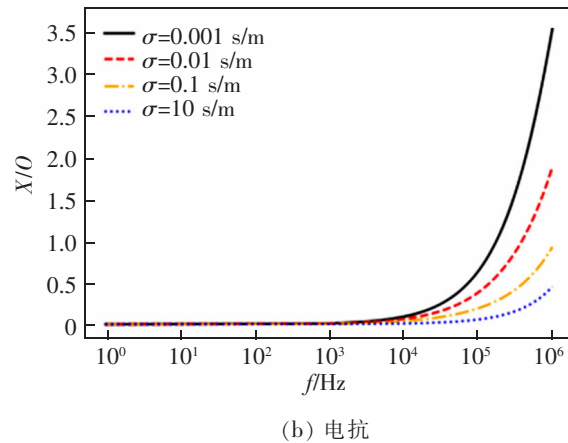
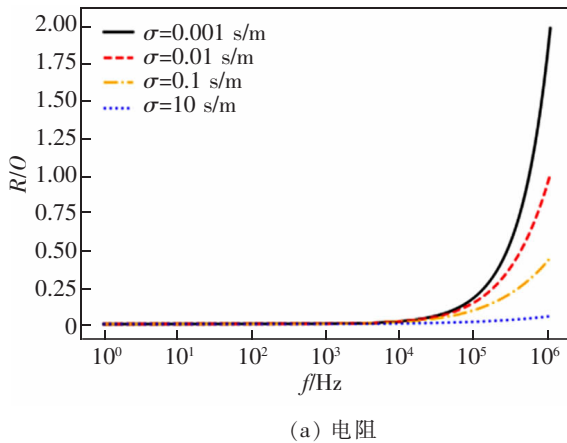


图 2 互阻抗和大地电导率的关系

Fig.2 Relationship between mutual impedance and earth conductivity

从图 1,图 2 观察到,自阻抗的电阻和电抗数值随频率增大而增大,当频率大于 10⁴ Hz 时数值上升幅度明显提高。同时,高频下大地电导率导致的电阻和电抗数值的差异大于低频,频率越高差异越明显。

2.2 架设高度对牵引网阻抗的影响

架设高架桥是用来解决铁路跨越江河、峡谷或冻土等复杂地质地带的主要手段。在实际工程中,高架桥的标准高度为 32 m,故在原模型的架设方案下整体高度分别增加 10,20,30 m 进行计算。图 3,图 4 反映了接触线及钢轨回路的阻抗矩阵对导线高度和频率的依赖性。

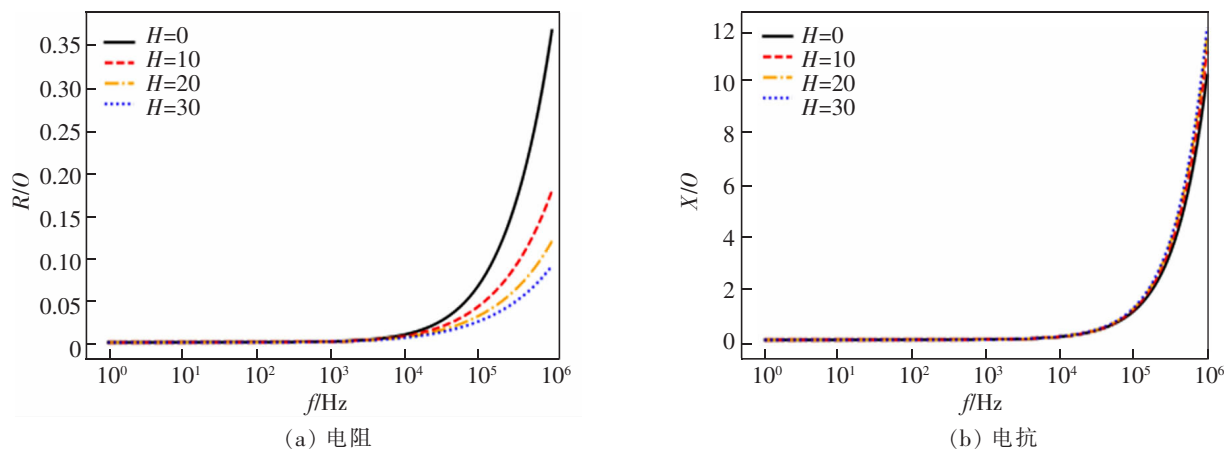


图3 自阻抗和架设高度的关系

Fig.3 Relationship between self-impedance and erection height

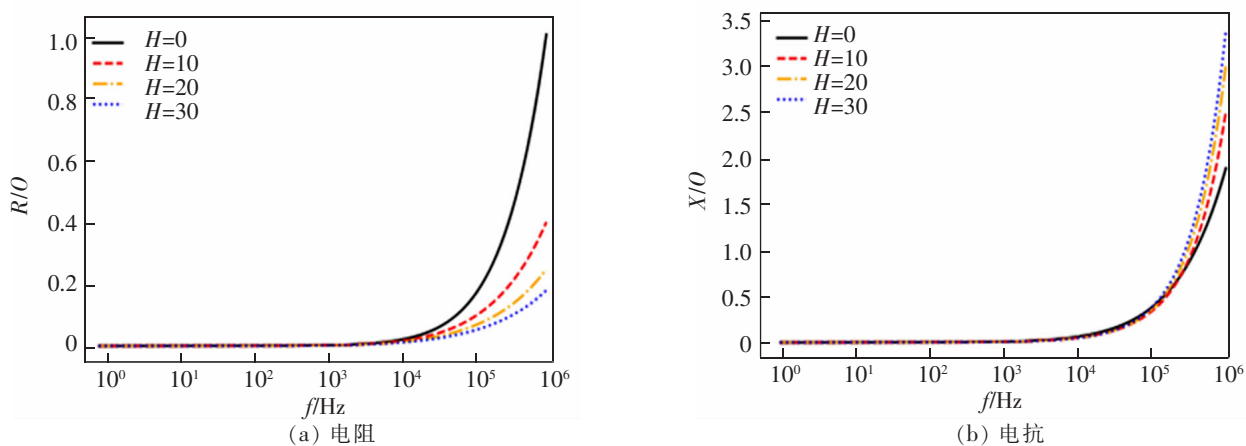


图4 互阻抗和大地电导率的关系

Fig.4 Relationship between mutual impedance and earth conductivity

从图3,图4可看出以下特点,互阻抗的电阻和电抗数值随频率增大而增大,当频率大于 10^4 Hz时数值上升幅度明显提高。同时,高频下架设高度导致的电阻数值的差异大于低频,频率越高差异越明显。

3 宽频牵引网阻抗矩阵计算结果

利用公式(17)(18)以表1的实际线路为算例在 10^7 Hz范围内挑选工频的10倍频率计算牵引网阻抗矩阵。将复线牵引网络的14根导线采用逐根合法合并为6根,最终简化成六阶的阻抗矩阵,合并规则为① 1.接触线(CW1)+2.承力索(MW1);② 3.正馈线(PF1);③ 4.钢轨1(RA1)+5.钢轨2(RA2)+6.保护线(PW1)+7.综合地线(E1);④ 8.接触线(CW2)+9.承力索(MW2);⑤ 10.正馈线(PF2);⑥ 11.钢轨3(RA3)+12.钢轨4(RA4)+13.保护线(PW2)+14.综合地线(E2)。该规则中①至⑥分别代表阻抗矩阵中的 Z_{11} 至 Z_{66} 。

表3为50 Hz频率时牵引网阻抗矩阵结果。以合并后接触线的单位长度自阻抗及与正馈线的互阻抗为例,50 Hz时分别为 $(0.000\ 163+0.000\ 73i)\ \Omega$, $(0.000\ 102+0.000\ 598)\ \Omega$;500 Hz时分别为 $(0.000\ 805+0.006\ 96i)\ \Omega$, $(0.000\ 938+0.004\ 512)\ \Omega$;5 000 Hz时分别为 $(0.006\ 608+0.051\ 54i)\ \Omega$, $(0.008\ 466+0.0031\ 708)\ \Omega$;50 000 Hz时分别为 $(0.052+0.425i)\ \Omega$, $(0.068+0.198i)\ \Omega$;500 000 Hz时分别为 $(1.717+32.819i)\ \Omega$, $(2.116+7.373i)\ \Omega$ 。

表3 50 Hz 牵引网阻抗矩阵
Tab.3 Partial frequency traction network impedance matrix

阻抗矩阵 $Z/(10^3 \Omega/m)$					
0.163+0.73i	0.102+0.598i	0.108+0.613i	0.1+0.596i	0.092+0.558i	0.108+0.58i
0.102+0.598i	0.194+0.712i	0.089+0.615i	0.092+0.558i	0.079+0.533i	0.093+0.562i
0.108+0.613i	0.089+0.615i	0.136+0.661i	0.108+0.58i	0.093+0.562i	0.126+0.592i
0.1+0.596i	0.092+0.558i	0.108+0.58i	0.163+0.73i	0.102+0.598i	0.108+0.613i
0.092+0.558i	0.079+0.533i	0.093+0.562i	0.102+0.598i	0.194+0.712i	0.089+0.615i
0.108+0.58i	0.093+0.562i	0.126+0.592i	0.108+0.613i	0.089+0.615i	0.136+0.661i

4 结论

在多导体传输线理论的基础上运用双曲余切近似和 Sunde 地阻抗算法总结出针对牵引网高频阻抗计算公式,解决了经典算法在高频时内阻抗会溢出、地阻抗忽略了土壤位移电流的问题,结合 Python 科学计算和作图仿真,得出结论:

在低频范围内,频率变化对牵引网阻抗影响不大,高频范围内尤其是频率大于 104 Hz,频率增加阻抗值增长明显;在模拟计算低频或慢波瞬变时大地电导率和高度变化对阻抗的影响不大,可以在指定输入值时不需要很高的精度,如果在模拟高频或快速瞬变的情况下,大地电导率和高度变化对阻抗值影响较大,需精确输入参数。设计过程中需要针对频率高低分情况讨论。

参考文献:

- [1] 丁峰. 电气化铁路牵引供电计算方法适应性研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [2] MARTINEZ J A, GUSTAVSEN B, DURBAK D. Parameter determination for modeling system transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3):2038-2044.
- [3] 刘思然,陈剑云,乐果. 考虑钢轨铁磁特性的牵引网阻抗频变参数矩阵计算[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(4):97-105.
- [4] 彭涛,陈剑云. 基于管状导体模型钢轨高频频变参数计算[J]. 铁道学报, 2019, 41(8):45-49.
- [5] SPIES O R. Laplace transforms for electrical engineers[J]. Iliffe & Sons, Ltd, 1955, 260(1):79.
- [6] SCHELKUNOFF S A. The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields[J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 13(4):532-579.
- [7] CARSON J R. Wave propagation in overhead wires with ground return[J]. Bell Labs Technical Journal, 1926, 5(4):539-554.
- [8] 刘潇. 高速铁路牵引供电系统供电数据仿真[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [9] 贺明,王冲,慕华. 基于多导体传输线模型的牵引网谐波谐振模态分析[J]. 内蒙古电力技术, 2018, 36(2):16-21.
- [10] 邓云川,刘志刚,黄可,等. 基于多导体回路法的牵引网电气参数计算研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(8):34-42.
- [11] 徐建军. 铁磁谐振过电压及其抑制措施的研究[D]. 西安:西安科技大学,2014.
- [12] 朱峰,李嘉成,李朋真,等. 电气化铁路钢轨交流内阻抗计算[J]. 铁道学报, 2017, 39(12):38-42.
- [13] 吴命利,范瑜. 圆导线内阻抗的数值计算[J]. 电工技术学报, 2004(3):52-58.
- [14] 张文仁. 基于贝塞尔函数修正的异型长导体阻抗计算实用方法[J]. 兰州交通大学学报, 2019, 38(6):50-55.
- [15] 武伟康,陈剑云. 基于有限元的接触导线频变阻抗曲线计算[J]. 电气化铁道, 2019, 30(2):44-50.
- [16] WEDEPOHL L M, WILCOX D J. Transient analysis of underground power-transmission systems: system model and wave propagation characteristics[J]. Electrical Engineers Proceedings of the Institution of, 1973, 120(2):253-260.
- [17] 魏巍. 含综合地线的牵引供电系统建模与仿真[D]. 成都:西南交通大学,2017.

- [18] DERI A, TEVAN G, SEMLYEN A, et al. The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 2007(8): 3686–3693.
- [19] RACHIDI F, NUCCI C A, IANOZ M. Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 294–302.
- [20] 武伟康, 陈剑云. 基于有限元的接触导线频变阻抗曲线计算[J]. 电气化铁道, 2019, 30(2): 44–50.

Research on High Frequency Impedance Characteristics of Traction Network

Zhu Ming, Chen Jianyun

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

Abstract: The classical traction network impedance calculation formula use the solid circular wire model and the Carson series method, but it is based on the power frequency (50 Hz) during the derivation process, which is not suitable for high frequency calculation. In order to accurately describe the high-frequency impedance characteristics of the traction network, the hyperbolic cotangent approximation and the Sunde ground impedance calculation method are used to summarize the calculation formula for the high-frequency impedance of the traction network. Combined with the scientific calculation and simulation of Python, the traction grid of the power supply arm of the east section of Shanghai–Nanjing Wuxi Substation is used as an example, and the relationship between the high-frequency impedance of the traction grid and the erection height and earth conductivity is analyzed. The results show that the conductivity and height of the earth have little effect on the impedance value under low frequency currents, but the effect of the earth conductivity and erecting height on the impedance of the traction network at the high frequency, especially when the frequency is higher than 10^4 , cannot be ignored. In the simulation of high frequency or fast transient, the values of ground conductivity and erection height need to be accurate.

Key words: traction network impedance; frequency; soil resistivity; erection height