

文章编号:1671-6833(2017)04-0029-06

# 土壤电参数频变性对接地体有效长度的影响分析

李景丽, 贺鹏威, 邱再森, 李渊博, 郭丽莹

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 接地装置冲击特性是影响输电线路耐雷水平和雷击跳闸率的重要因素. 将电力系统接地分析软件 CDEGS 中的快速傅里叶变换模块 FFTSES 和电磁场频域分析模块 HIFREQ 相结合, 通过引入 Visacro-Alipio 土壤频变公式, 建立可以考虑土壤电参数频变性的接地装置冲击特性的数值计算模型. 利用所建模型重点仿真分析不同土壤电阻率和不同冲击电流波形下土壤电参数频变特性对接地装置有效长度的影响情况. 仿真数据分析表明, 考虑土壤频变性时接地装置的有效长度与不考虑土壤频变性时的有效长度相比有一定减小, 并且在高土壤电阻率下减小程度更明显.

**关键词:** 频变性; 接地体; 傅里叶变换; CDEGS; 有效长度

**中图分类号:** TM862 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.016

## 0 引言

在高土壤电阻率地区的电力系统接地装置设计中, 降低输电线路杆塔接地电阻的主要方法是增加水平接地体长度, 在中国部分地区, 其长度通常可增至数百米. 这一方法可有效降低杆塔接地系统工频接地电阻, 但是, 其冲击接地电阻不会随接地体长度的增加而持续降低, 而是当接地体长度增加到某一特定值以后冲击接地电阻逐渐趋近于某一恒定值, 这一特定长度即为冲击有效长度<sup>[1]</sup>. 准确地计算接地体冲击有效长度是合理设计接地装置, 保障输电线路安全可靠运行并降低工程造价的重要工作<sup>[2]</sup>.

国内外学者对典型接地体的有效长度研究主要包含接地体有效长度的定义和接地体有效长度的影响因素两个方面. 文献[1]将满足冲击接地电阻对接地体长度的导数小于某一规定值的接地体长度定义为接地体的有效长度. 对接地体有效长度影响因素的研究主要有: 文献[3]对水平和方形接地体进行仿真分析和数值计算, 发现接地体的冲击有效长度与土壤电阻率和注入电流的波头时间存在密切的关系, 并且随着土壤电阻率和注入电流波头时间的增大, 接地体冲击有效长度也有增大的趋势. 单根水平接地体的有效长度还

与冲击电流的注入点有关, 且单端注入时有效长度最短. 文献[4]对典型接地体进行模拟试验和数值计算, 结果表明接地体有效长度与注入电流的波头时间、幅值、土壤电阻率有着密切的联系, 并对试验和计算的数据拟合得出考虑土壤火花放电现象的接地体冲击有效长度的公式. 然而, 目前计算有效长度时, 常假定土壤电阻率等于工频测定值, 并将相对介电常数取值为 4~81 (随土壤湿度而定)<sup>[5]</sup>. 但研究表明<sup>[6-10]</sup>, 土壤电参数具有明显的频变性. 文献[7]分别对具有不同初始电阻率的多种类型土壤的电参数进行测量, 结果表明, 土壤电阻率和介电常数与注入电流频率密切相关, 呈现明显的频变性, 并拟合试验数据得到土壤频变公式. 文献[10-12]建立了考虑土壤电参数频变性的接地体有限元模型, 分析了土壤电参数频变性对接地体冲击特性的影响, 结果表明, 考虑土壤电参数频变性时, 接地极的冲击接地电阻明显减小, 且工频土壤电阻率越高, 接地电阻减小越明显.

笔者通过引入具有代表性的 Visacro-Alipio 土壤频变公式, 利用电力系统接地分析软件 CDEGS 中的 FFTSES (快速傅里叶变换) 模块和 HIFREQ (电磁场频域分析) 模块, 建立了可以考虑土壤电参数频变性的接地体冲击特性模型. 利用所建模型仿真分析了不同工频土壤电阻率及不

收稿日期: 2016-11-01; 修订日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51307152)

作者简介: 李景丽 (1983—), 女, 河南周口人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电磁场数值计算方法、电力系统过电压与接地技术、高电压及绝缘技术等方面的研究, E-mail: lijingli1022@zzu.edu.cn.

同冲击电流波头时间下土壤电参数频变性对接地体有效长度的影响情况。

1 土壤电参数频变特性

土壤是由固体颗粒、液体和气体组成的混合物,其中固体颗粒间充斥着水分和空气间隙,在结构上呈现明显的多孔特征.从物理学微观角度分析,土壤介质的极化过程中涉及到多个电极化机制,如空间电荷极化、偶极子极化、离子极化/原子极化、电子极化.由于介质具有质量,当外电场频率较大时,介质的电极化响应无法瞬时跟上外电场的变化而显现滞后效应,且随着外电场频率增加,滞后效应更明显<sup>[13-14]</sup>.

在低频范围内,由于外电场变化缓慢,所有极化机制均能发挥作用,共同促进极化进行;随着频率的升高,每种机制的作用维持在一定的频率段内,超出频率段极化作用会逐渐消失.例如,频率超过 $f_1$ 后,空间电荷极化作用基本消失;频率超过 $f_2$ 后,偶极子极化作用基本消失;频率超过 $f_3$ 后,离子/原子极化作用基本消失;频率超过 $f_4$ 后,电子极化作用基本消失.这些极化作用的逐渐消失导致极化储能减小,介电常数随频率升高逐渐减小,如图 1 所示.

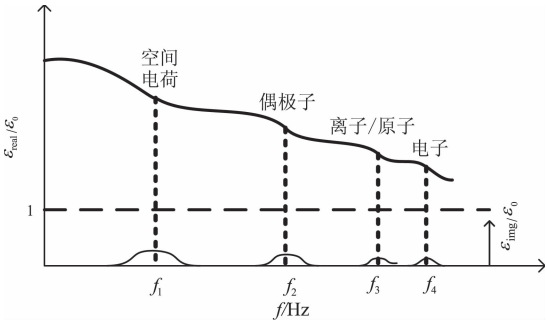


图 1 介电常数随频率变化的简图  
Fig. 1 Dielectric constant changes with frequency

为了在接地计算中考虑土壤电参数的频变性,需要得到频变规律,最好是找出以频率为变量的土壤电参数频变解析式.目前已经总结出多种土壤频变公式,如 Scott 式、Smith-Longmire 式、Messier 式、Portela 式、Visacro-Portela 式、Visacro-Alipio 式等<sup>[15]</sup>.文献[15]利用 Kramers-Kronig 关系检验了以上 6 种公式的准确性,其中 Visacro-Alipio 式比较具有代表性,能很好地反映土壤频变特点,因此笔者引入 Visacro-Alipio 频变公式到接地计算中.

Visacro-Alipio 频变公式是 Visacro 等利用试验测量与解析计算相结合的复合电磁模型(hy-

brid electromagnetic model, HEM),测量了 31 个地区的土壤(工频电阻率覆盖 60 ~ 9 100 Ω · m,测量时土壤保持自然条件)在不同频率下的电参数,并根据试验数据总结得出土壤电参数随频率变化的土壤频变公式:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho(f) &= \rho_0 \cdot \{ 1 + [ 1.2 \times 10^{-6} \rho_0^{0.73} ] \cdot \\ &\quad [ (f - 100)^{0.65} ] \}^{-1}; \\ \epsilon_r(f) &= 7.6 \times 10^3 \rho_0^{0.73} f^{-0.4} + 1.3, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中, $\rho_0$  是 100 Hz 时的土壤电阻率.土壤电阻率频变公式适用范围 100 Hz ~ 4 MHz,基本完整覆盖了常用雷电流的整个频谱.相对介电常数频变公式适用范围 10 kHz ~ 4 MHz,频率低于 10 kHz 时,介电常数一律取 10 kHz 时的数值<sup>[8]</sup>.

2 考虑土壤电参数频变性的接地冲击特性模型

为了准确计算典型接地体冲击有效长度,采用国际公认的接地计算软件包 CDEGS 建立考虑土壤参数频变性时接地体的冲击特性数值计算模型.

为验证所用模型的准确性,以水平接地极为例,参照文献[9]中试验所用参数:单端注入的钢制水平接地极,等效半径为 0.007 m,电导率为  $1.7 \times 10^7$  S/m,相对磁导率为 636,分别埋设于工频电阻率为 525 Ω · m 和 2 500 Ω · m 的均匀土壤中,埋深为 0.5 m;雷电流模型选用 Heidler 首次、后续回击雷电流函数模型,其解析表达式为:

$$\left\{ \begin{aligned} i(t) &= \sum_{k=1}^m \frac{I_{ok}}{\eta_k} e^{-t/\tau_{2k}} \frac{(t/\tau_{1k})^{n_k}}{1 + (t/\tau_{2k})^{n_k}}; \\ \eta_k &= \exp \left[ - \frac{\tau_1}{\tau_2} \left( n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{1/n} \right]. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

研究表明后续回击的破坏性更大<sup>[10]</sup>,故只对后续回击雷电流进行仿真分析,其参数如表 1 所示.幅值为 15 782 A,上升时间为 1.3 μs.

表 1 后续回击雷电流参数  
Tab. 1 The parameters of subsequent return stroke lightning current

$k$	$I_{ok}/\text{kA}$	$n_k$	$\tau_{1k}/\mu\text{s}$	$\tau_{2k}/\mu\text{s}$
1	14	2	0.25	2.5
2	9	2	2.1	230

对雷电流进行傅里叶分解,得到其特征频率,代入 Visacro 土壤电参数频变公式可得特征频率点下的土壤电阻率和相对介电常数,表 2 即列出土壤工频电阻率为 525 Ω · m 和 2 500 Ω · m 时各特征频率点下的土壤电参数.

不考虑土壤电参数频变性时,只需将土壤的

电阻率和相对介电常数以定值的形式输入 HIFREQ 模型中,在频域下计算接地体的接地电位升  $GPR$ ,再通过 FFTSES 模块进行傅里叶反变换,得到其不考虑土壤电参数频变性时的  $GPR$ . 考虑土壤电参数频变性时,将傅里叶变换与土壤频变公式相结合,在每个特征频率点下建立一个 HIFREQ 仿真模型,并保持其他条件不变,把土壤的电阻率和相对介电常数做为变量考虑进每个模型分别计算,然后将各频率点下的结果文件一起进行傅里叶反变换,得到考虑土壤频变性的冲击特性. 计算步骤如图 2 所示,结果如图 3 所示.

表 2 特征频率点下的土壤电阻率和相对介电常数  
Tab.2 Relative soil resistivity and relative dielectric constant in the characteristic frequency

特征频率/ Hz	电阻率/( $\Omega \cdot m$ ) (工频电阻率 为 525 $\Omega \cdot m$ )	电阻率/( $\Omega \cdot m$ ) (工频电阻率 为 2 500 $\Omega \cdot m$ )	相对介 电常数
13 333.3	426.1	2 130.8	171.4
20 000.0	384.7	2 039.3	145.9
33 333.3	379.3	1 900.7	119.2
53 333.3	374.2	1 750.4	99.0
240 000.0	333.9	1 168.5	54.8
480 000.0	300.9	896.6	41.8
720 000.0	276.6	751.3	35.8
960 000.0	257.6	656.8	32.1
1 200 000.0	242.1	589.0	29.4
1 440 000.1	229.0	537.3	27.4
1 680 000.1	227.7	496.3	25.9
1 706 666.8	426.0	492.2	25.7

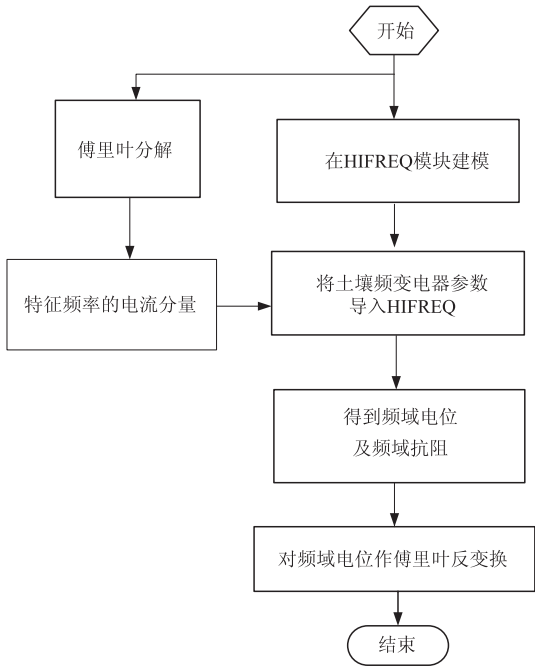
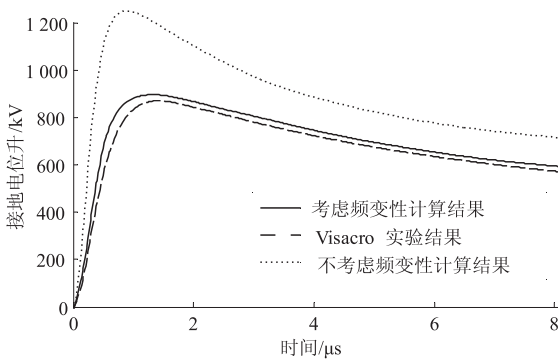
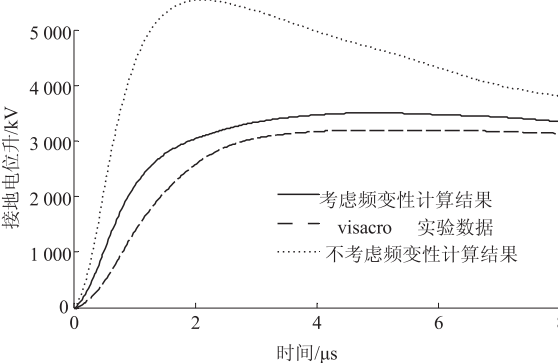


图 2 冲击特性计算流程图  
Fig.2 Flow chart of impact performance calculation



(a) 土壤工频电阻率为525  $\Omega \cdot m$  的接地电位升



(b) 土壤工频电阻率为2 500  $\Omega \cdot m$  的接地电位升

图 3 不同土壤工频电阻率水平接地极的接地电位升  
Fig.3  $GPR$  of a horizontal electrode buried in soils of different resistivity

如图 3(a)、(b) 所示,考虑土壤频变性有限元模型的计算结果和试验结果相比十分接近,有效地验证了本文模型的准确性. 并且从图中可以看出,不考虑土壤频变性会导致计算结果 ( $GPR$ ) 比实际值偏大,这一点和文献[10-13]中的结论相一致.

3 土壤电参数频变性对接地体有效长度的影响

3.1 接地体冲击有效长度的计算

文献[1]将满足冲击接地电阻对接地体长度的导数小于某一规定值的接地体长度定义为接地体的有效长度,公式为:

$$-dR_i/dl \leq \tan \alpha, \tag{3}$$

式中: $R_i$  为冲击接地电阻, $\Omega$ ;  $l$  为接地体长度, $m$ ;  $\alpha$  为冲击接地电阻随接地体长度变化的曲线上满足上式要求的点的切线与水平方向的夹角,通过大量计算表明, $\alpha = 5^\circ$  时,冲击接地电阻变化很小.

以土壤工频电阻率为 1 000  $\Omega \cdot m$  为例,阐述单端注入水平接地极有效长度的确定. 首先在 CDEGS 中建立上述考虑土壤频变性典型杆塔接地装置冲击特性数值计算模型,分别取接地极长

度为 10、30、50、70、90、110 m,继而分别计算其 GPR 和冲击接地电阻,下图 4(a)中列出了注入点动态接地电位升.

对模型计算所得各接地体长度下的冲击接地电阻数据进行拟合,可得到水平接地体的冲击接地电阻随接地体长度的变化关系曲线,如图 4(b)所示,接地体的 GPR 和冲击接地电阻随着接地体长度的增大呈现减小的趋势,且减小的速度越来越慢并逐渐趋于饱和,反映在图中为曲线斜率的绝对值越来越小.因此,可以结合有效长度的定义计算出不考虑土壤电参数频变性时接地极的有效长度约为 66.7 m;考虑土壤电参数频变性时接地极的有效长度约为 56.1 m.

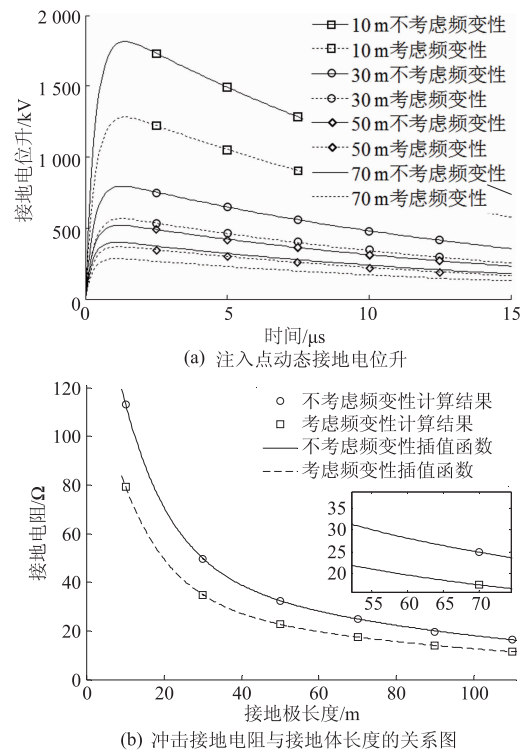


图 4 水平接地体长度对 GPR 和冲击接地电阻的影响

Fig.4 Influence of the length of the horizontal electrode on GPR and implus grounding resistance

3.2 土壤频变性对接地体有效长度的影响

利用前述接地体冲击有效长度的计算方法,分别计算不考虑土壤电参数频变性时不同土壤工频电阻率下单端注入水平接地体的冲击有效长度;并计算相同条件下考虑土壤电参数频变性时的冲击有效长度,单端注入水平接地极有效长度随其周围土壤工频电阻率变化关系如图 5 所示.

由图 5 可知:考虑土壤电参数频变性与不考虑频变性时,单端注入水平接地体的冲击有效长

度与土壤工频电阻率关系密切,且均随着土壤工频电阻率的增大而增大,在土壤工频电阻率高于 500 Ω·m 时曲线斜率减小,有效长度随土壤电阻率增大而增大的现象趋于饱和.这是因为高土壤电阻率将阻碍冲击电流从接地极入地端向土壤中散流,冲击电流将趋于沿接地体向末端散流,使得接地体的冲极有效长度增加.考虑土壤电参数频变性时,接地体的有效长度跟不考虑频变性时相比有一定程度减小,在高土壤电阻率(1 000 Ω·m 以上)下减小程度更明显.这是由于土壤电参数随着注入电流频率的增加呈现非线性下降,相比于土壤工频电阻率来讲,对冲击电流的阻碍作用小,引起水平接地体冲击有效长度较之不考虑土壤电参数频变性时减小的现象;同时土壤电参数频变性具有在高土壤电阻率下更加明显的特征.因此,土壤电阻率越高,其对冲击有效长度的影响越大,导致考虑土壤频变性与不考虑土壤频变性的有效长度值相差越来越大.

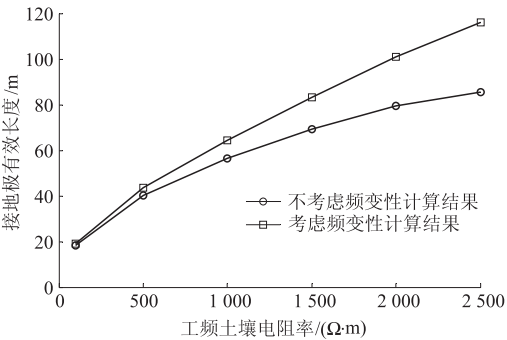


图 5 单端注入单根水平接地极的有效长度与电阻率关系  
Fig.5 Relation of effective length of single injection of single horizontal electrode and soil resistivity

3.3 冲击电流波形对接地体有效长度的影响

为分析冲击电流波形对接地体冲击有效长度的影响,采用上述考虑土壤电参数频变性的接地体冲击特性数值计算方法对单端注入的单根水平极建立模型,接地体埋设于电阻率为 1 000 Ω·m 的均匀土壤 0.5 m 深处,保持冲击电流的幅值不变,分别取上升时间为 1.3、2.6、5.2、7.8 μs,计算得单端注入水平接地极冲击有效长度与冲击电流上升时间的关系如图 6(a)所示;然后保持冲击电流上升时间为 2.6 μs 不变,幅值为 10、20、50、100、150、200 kA,仿真计算水平接地极冲击有效长度与冲击电流上升时间的关系如图 6(b)所示.

如图 6(a)显示,当冲击电流的上升时间增大时,接地体的有效长度也逐渐增大,即随着冲击电



流陡度的变缓,接地体的冲击有效长度呈现增大的趋势,这是由于陡波前冲击电流包含更多高频分量,接地体对高频分量电流呈现明显电感效应,冲击电流更趋向于沿土壤流散,冲击有效长度较之前缓波冲击电流有所减小。同理,增大冲击电流的幅值使电流波形陡度增加,则接地体的冲击有效长度逐渐减小,如图6(b)所示。并且考虑土壤电参数频变性会使接地体有效长度有一定的降低,但对于不同的冲击电流波形,土壤电参数频变性对有效长度的影响并没有很大的区别。

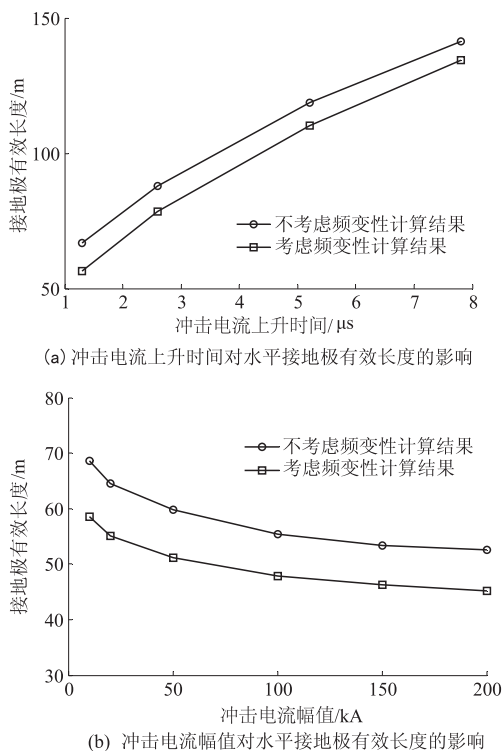


图6 冲击电流波形对单端注入水平接地极有效长度影响

Fig.6 The impact of current waveform on effective length of single injection horizontal electrode

## 4 结论

笔者采用CDEGS建立了可以考虑土壤电参数频变性的接地装置冲击特性的数值计算模型。利用所建模型重点仿真分析了不同土壤电阻率和不同冲击电流波形下土壤电参数频变特性对接地装置有效长度的影响,所得结论如下:

1)单端注入的水平接地体的冲击有效长度与土壤工频电阻率的关系很密切,并随着土壤工频电阻率的增大也有增大的趋势,且这种趋势逐渐变缓。

2)考虑土壤电参数频变性时接地体的有效长度与不考虑电参数土壤频变性时的有效长度相

比有一定程度的减小,且土壤电阻率越高减小的程度越明显。

3)冲击电流波形陡度变缓时,水平接地体的冲击有效长度会随之增大,土壤电参数也会发生一定的变化,但对接地体有效长度的影响并不明显。

## 参考文献:

- [1] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [2] 李景丽,郭丽莹,武东亚,等. 考虑土壤电离的接地装置冲击特性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4): 20-25.
- [3] GUPTA B R, THAPAR B. Impulse impedance of grounding grids[J]. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(6): 2357-2362.
- [4] 何金良,曾嵘. 输电线路杆塔接地装置冲击系数及其拟合计算公式[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(5): 9-12.
- [5] 袁涛,李景丽,司马文霞. 土壤电离动态过程对接地装置冲击散流的影响分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1606-1613.
- [6] 朱勇. 铬污染场地复电阻率法时频域联合探测技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学机电与信息工程学院, 2013.
- [7] VISACRO S, ALIPIO R. The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2011, 53(2): 401-406.
- [8] VISACRO S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents[J]. IEEE transactions on power delivery, 2007, 22(1): 381-386.
- [9] VISACRO S, ALIPIO R. Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes[J]. IEEE transactions on power delivery, 2012, 27(2): 927-934.
- [10] 司马文霞,唐妍,袁涛,等. 土壤介电频变特性对接地极冲击散流的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1512-1518.
- [11] 朱彬. 土壤电参数变化特性及其对接地装置性能的影响研究[D]. 重庆大学电气工程学院, 2015.
- [12] 李景丽,乔志远,武东亚,等. 考虑土壤频变特性的接地系统有限元模型[J]. 电瓷避雷器, 2015, 267(5): 100-110.
- [13] 成林,王森,李志忠,等. 接地装置冲击过程中土壤电气特性的研究进展综述[J]. 电网技术, 2014, 42(10): 63-67.

- [14] 张良莹,姚熹. 电介质物理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [15] DAMIR C, NICOLAS M. A comparison of frequency-dependent soil models; application to the analysis of grounding systems [J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2014, 56(1): 177 – 185.

## The Impact of Soil Electrical Parameters Frequency-Dependence Characteristics on the Effective Length of the Grounding Electrode

LI Jingli, HE Pengwei, QIU Zaisen, LI Yuanbo, GUO Liying

(College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Impulse charactersitic of grounding devices was the important factor of lightning withstand level and lightning trip-out rate of transmission line. Based on HIFREQ program and FFTSES program in grounding power system analysis software CDEGS, this paper presented a grounding system impulse characteristic modeling considered soil frequency-dependence, especially, the Visacro-Alipio soil frequency-dependence formula has been introduced. The impact of the soil frequency-dependence on the effective length of the grounding device in different initial soil resistivity and different impulse current waveform was analyzed. The calculating results showed that when considering soil frequency-dependence, the impulse effective length would be shorter, especially for the grounding devices buried in high resistivity soil.

**Key words:** frequency-dependence; grounding; fourier transform; CDEGS; effective length

(上接第 11 页)

- [14] 张韬,柯龙燕,白光建. 罐车制动工况液体晃动的流固耦合分析 [J]. 专用汽车, 2015, 26(8): 88 – 91.
- [15] 岳宝增. 液体大幅晃动动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [16] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries[J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201 – 225.

## The Influence of Different Baffles Arrangement on Liquid Sloshing in Container Under Longitudinal Excitation

DING Chang, FU Yantang, WU Xuehong, GONG Yi

(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001 Henan)

**Abstract:** FLUENT software was adopted to simulate the sloshing process of liquid in container under the sudden braking condition based on VOF (volume of fluid) model. The pressure variation of front and back head was compared, which showed that the sloshing liquid mainly had a greater impact on the front head. Baffles could effectively weaken the sloshing in the container, reduce the impact on the head and improve the container safety. The liquid impact on front head was studied in the condition of different filling ratio for different baffle arrangement( all down, all up, up and downinterlaced, left and right interlaced) of five same arc baffles. Results show that the arrangement style of left and right interlaced、all down could reduce impact load on front head for low filling ratio, however the arrangement style of up and downinterlaced all up had poor anti-wave effect. The anti-wave effect of the arrangement style of left and right interlaced became poorer and poorer with the increment of filling ratio. Compared with other arrangement style, the arrangement style of all down had better anti-wave effect.

**Key words:** container; vof model; baffles; arrangement; anti-wave effect