

电路计算软件中频变元件的仿真方法

钱家骊, 闵春燕

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 在常用的 EMTP 及其他一些电路计算软件中, 没有频变元件的设定方法, 造成在宽频率的瞬变过程计算中准确度降低。针对于此, 笔者提出 3 种方法: 开关接入及短接元件法、圆导体分层法、并联电阻—电感支路法, 它们各适用于各种不同的电路情况和元件种类。文中还提出提高仿真准确度和简单校核的方法。

关键词: EMTP; 频变; 电路瞬变过程; 仿真

中图分类号: TM502

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2010)09-0008-03

Simulation of Frequency-dependent Elements for Circuit Analysis Softwares

QIAN Jia-li, MIN Chun-yan

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Because there are no frequency-dependent elements in EMTP and some other softwares, three simulation methods of frequency-dependent elements were deducted in this paper. They are switching method, laying method for cylinder conductors, and parallel R-L branch method. Each of them is suitable for different conditions individually. Some suggestions are proposed for increasing the accuracy as well.

Key words: EMTP; frequency-dependent; transient process; simulation

0 引言

EMTP 是电工领域常用的仿真软件, 使用方便快捷。但对于输电线路及一些感性元件, 由于存在集肤效应和邻近效应, 其电阻和电感都是频变值, 特别是前者, 在低频和高频下电阻甚至会有高达几倍到几十倍的差别, 这会使仿真结果产生很大误差。如雷电波的传输, 高压开关触头间隙的击穿引起的多种瞬变过程, 包括 GIS 中的特快速暂态过电压 (VFTO)、真空断路器开断电抗器, 以及气体断路器近距故障等, 都属于这种情况。而对于元件的电感值, 由于集肤效应会导致内电感减小, 因此, 随着频率的增加, 电感稍有减小。邻近效应则会对电流分布起均匀作用, 适当补偿了集肤效应的作用。由于 EMTP 中没有频变元件, 计算会产生或多或少的误差, 特别是常使高频下的衰减明显减小。其它一些电路仿真软件也有此问题^[1-3]。

在电工界, 频变元件的稳态频率特性的求解已有很多方法, 包括: ①实心或空心圆导体的贝塞尔

(Bessel) 方程法; ②有限元法; ③分裂导线的几何均距法; ④试验法。但应用 EMTP 等软件求解的瞬变过程中都常是宽频现象, 无法直接应用稳态特性。为解决这一问题, 现已有不少时域-频域-时域变换方法问世, 但较复杂。

笔者的目的是, 应用已有的各种频变元件的稳态频变结果, 求得在 EMTP 软件或其它电路软件中频变元件的仿真电路。文中共提出 3 种方法, 分别适用于不同的情况。为节约篇幅, 现以简单的文字说明各方法的基本原理, 并举出几个简单算例。

1 开关接入和短接元件法

该方法是利用开关来接入和短接元件, 从而改变电阻值和电感值。其只适用于一个元件在瞬变过程中基本上只工作在两个频率下的情况, 通常其中一个频率是直流或工频, 另一个频率是在瞬变过程中的某一高频, 该频率可以在试算时近似得到。典型的例子是开关开断并联电抗器的情况, 电抗器在工频下电阻为 R_{pf} , 电感为 L_{pf} , 而在高频下电阻增加为 R_f , 电感减小为 L_{fo} 。

收稿日期: 2010-04-12; 修回日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金 (50907037)。

作者简介: 钱家骊 (1932—), 男, 教授, 长期从事高压电器及相关技术的研究。

对这样一个电感性频变元件的仿真电路可见图1。图1中,在瞬变过程开始前,电源开关 K_1 处于闭合状态,电路中流有稳态工频电流。此时,开关 K_2 闭合,线路中的电阻为元件的工频电阻 R_1 ; 开关 K_3 打开, L_1 与 L_2 之和为工频电感。

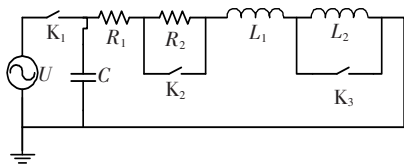


图1 开关接入和短接法原理图

当电源开关 K_1 断开,并出现电流截断时,负荷侧会出现高频振荡。为模拟在此高频下的电阻和电感的状态,令 K_2 分断,电路电阻增加为 R_1+R_2 ,而电路中电感减小为 L_1 。这样负荷侧的振荡就比较符合高频下的实际情况。高频振荡的频率也可以用试切法逐步求得满意的结果。

2 圆导体分层法

该方法适用于考虑集肤效应的圆导体,将圆导体划分为多层,并等效为多个支路并联,以此电路来构造其频变模型。

其原理是将分析实心或空心圆导体的贝塞尔方程^[4]中的微增量近似为增量,即在圆长导体横截面上作出 $n-1$ 个同心圆,从而将导体分成 n 个圆筒状导体,并设每一导体内的电流密度分布均匀。这样,每层导体的电路参数可以用电阻 R 、电感 L 和与其它圆筒导体间的互感 M 串联组成。圆导体的等效电路则是由所有圆筒的 $R-L-\Sigma M$ 电路并联构成。考虑到 EMTP 软件中没有互感元件,可以用变比为 1:1 的理想变压器代替。

最简单的 $n=2$ 的情况下的长圆导体横截面分割图见图2,将半径为 r_2 的铜圆导体,划分为一个半径为 r_1 的圆柱和一个外径为 r_2 、内径为 r_1 的圆筒两个部分,由此得到的等效电路见图3。

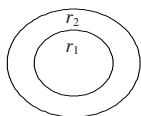


图2 长圆导体横截面的分割

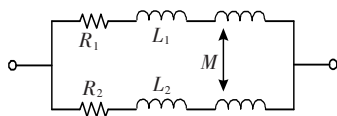


图3 长圆导体的频变的两并联支路仿真电路

在此等效电路中,内外层的单位长的电阻 R_1 、 R_2 、内电感 L_1 、 L_2 和内互感近似值 M 可由式(1)~(5)计算。

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi r_1^2} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, ρ 为导体电阻率, $\Omega \cdot m$; r_1 为圆导体内层半径, m ; r_2 为圆导体外半径, m 。

由电工原理的部分磁链方法,可知铜的磁导率 μ 近似为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$,可推导出两部分导体单位长的互感 M 和自感 L_1 、 L_2 (单位 H/m),见式(3)~(5)。

$$M = 10^{-7} \times \left[1 - \frac{2r_1^2 \ln(\frac{r_2}{r_1})}{r_2^2 - r_1^2} \right] \quad (3)$$

$$L_2 = 10^{-7} \times \left[\frac{1}{2} + \ln(\frac{r_2}{r_1}) \right] - M \quad (4)$$

$$L_1 = 10^{-7} \times \left[\frac{1}{2} - \frac{(r_2^4 - r_1^4) + 2r_1^4 \ln(\frac{r_2}{r_1}) - 2r_1^2(r_2^2 - r_1^2)}{r_2^4 - r_1^4} \right] - M \quad (5)$$

显然,分层越多,准确度越高,但电路也越复杂。在很多实际问题中,瞬变过程的频率也不是均匀分布的,因此圆筒的划分也没有必要是均匀的,而主要考虑有意义的频率下的准确度。这可以用相关频率的侵入深度 a 来估计,其计算公式见式(6)。

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad (6)$$

式(6)中, γ 为电导率, $(\Omega \cdot m)^{-1}$ 。

对于铜导体,可简单地用式(7)计算。

$$a = \frac{k}{\sqrt{f}} \quad (7)$$

式(7)中, a 的单位为 cm 。当温度为 20°C 和 50°C 时, k 分别取 6.6 及 7.65。式(6)、(7)有百分之几的差别。

此法的主要缺点在于 L_2-M 为负值,虽无物理意义,但可以应用。

3 并联电阻—电感支路法

该方法适用于各种频变元件。频变仿真电路见图4,与上述的圆导体分层法相似,是由多个含有电阻—电感的支路并联而成,不同的是不含有互感元件,电路显得比较简单。这种方法没有那么明确的物理概念,只是在效果上可用而已。

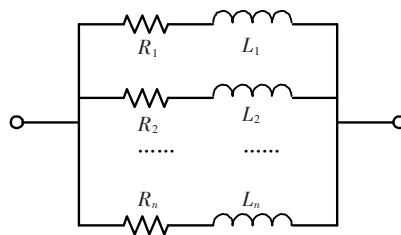


图4 并联电阻—电感支路的仿真电路

应用该方法必须预先通过资料、仿真或试验获知元件电阻的频率特性,或电阻及电感的频率特性。

对 n 个支路进行电路公式推导, 可以得出 n 个方程式。由此可求得某一频率 f_k 下的电阻值 R_{f_k} 和电感值 L_{f_k} , 见式(8)。

$$R_{f_k} + j\omega_k L_{f_k} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{R_i^2 + (\omega_k L_i)^2} + j \sum_{i=1}^n \frac{\omega_k L_i}{R_i^2 + (\omega_k L_i)^2}}{\left[\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{R_i^2 + (\omega_k L_i)^2} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n \frac{\omega_k L_i}{R_i^2 + (\omega_k L_i)^2} \right]^2} \quad (8)$$

式(8)中, R_i 为第 i 支路的电阻; L_i 为第 i 支路的电感。

在已知各频率下的电阻 R_{f_k} 的条件下, 只考虑实部, 联立求解 n 个非线性方程式组, 即可以得到各个支路的电阻及电感值, 从而构成频变仿真元件的仿真电路。

若采用最简单的两个支路, 并再简化, 把其中一个电路的电感也去掉, 即支路 1 只有电阻 R_1 , 支路 2 有电阻 R_2 和电感 L , 见图 5。该电路可以满足 3 个频率下的电阻值。这两个电路在直流及固定频率 f_k 下的阻抗分别为 R_1 和 $R_2 + j2\pi f_k L$ 。为了得到等效电路, 须正确求解电路中的 3 个元件的参数值。为此可有以下方程式。

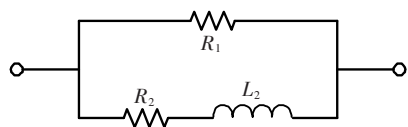


图 5 简化为两个并联支路的仿真电路

如取在直流情况下, 电路呈现直流电阻 R_d , 即

$$1/R_1 + 1/R_2 = 1/R_d \quad (9)$$

考虑频率分别为 f_2 和 f_3 时, 电阻分别为 R_{f_2} 和 R_{f_3} , 经简单推导后, 可得式(10), 其中 k 分别取 2 和 3。

$$R_k = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) + \omega_k^2 R_1 L_2^2}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega_k L_2)^2} \quad (10)$$

这个方程式组可用试切法或软件解出。

3.1 算例 1

设某元件在频率 $f = 0, 1 \text{ kHz}$ 及 1 MHz 时, 电阻 $R = 1, 2, 4 \Omega$ 。试求出 R_1, R_2, L_2 。

可采用上述的两支路法。由于在 1 MHz 时, $R_2 - L_2$ 基本处于断路, 因此可取 $R_1 = 4.0 \Omega$ 。根据已知, 在直流下, R_1 与 R_2 并联应为 1Ω , 可求出 $R_2 = 1.33 \Omega$ 。将两个电阻值代入式(9), 可得 $L_2 = 6.0 \times 10^{-4} \text{ H}$ 。

对该并联电路, 经用上述 3 个频率校核相应交流电阻值, 误差很小, 在该 3 个频率附近范围也应可用, 但由于并联电路数很少, 对于远离给定范围的频率, 会有或多或少的误差, 可以用 EMTP 方便地作出

有关频率范围的电阻曲线, 进行校核。如有更多数据, 可列出更多方程式, 仿真可以更为准确。

3.2 算例 2

已知一元件的电阻频率特性为: 在频率 f 分别为 $0, 5, 10, 20 \text{ kHz}$ 时, 电阻 R_k 分别为 $1, 1.2, 1.7, 2.5 \Omega$ 。求仿真电路。

由于有 4 组数据, 可采用两个 $R-L$ 支路的仿真电路, 在 4 个不同频率下, 由式(8)列出 4 个方程式。由数值计算方法解得 $R_1 = 4.61 \Omega, R_2 = 1.26 \Omega, L_1 = 0.008 20 \text{ mH}, L_2 = 0.050 9 \text{ mH}$ 。用 EMTP 软件计算该仿真电路在不同频率下的电阻特性, 见图 6。

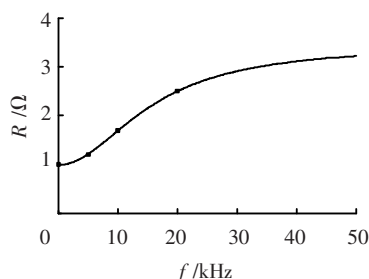


图 6 仿真电路的电阻-频率特性

由图 6 可见, 在所设频率上限的 20 kHz 以上, 电阻随频率的变化趋势变缓, 不符合物理规律。即该频变仿真电路只能应用于给定的频率上限 20 kHz 以内。

4 提高仿真准确度及简单校核的方法

笔者从原理上提出可用在 EMTP 等电路软件中频变元件仿真的 3 种方法, 分别适用于不同情况。若要提高计算准确度, 以及进行简单的校核, 可以采用以下的原理性措施。

1) 按照瞬变电路的估计的频率范围设定电路和参数;

2) 采用更多支路, 可以适用于更宽频率范围;

3) 用 EMTP 或其它软件在有关频率范围内对该仿真电路进行校验, 检查设定频率范围的电阻或电感频变曲线是否合理。

参考文献:

- [1] 徐 雁, 韩小涛, 肖 霞, 等. $\pm 500 \text{ kV}$ 电子式直流电流互感器集肤效应分析[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 54-57.
- [2] 朱 剑, 高锦春, 黎淑兰. 同轴连接器高频接触阻抗有限元分析[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 65-69.
- [3] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [4] 严镇军. 数学物理方程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002.