

文章编号: 1005—0523(2007)05—0128—03

消除电力系统故障仿真中数值振荡的方法研究

王 毅, 刘百芬, 章 华, 刘振华

(华东交通大学 电气工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:在电力系统故障数字仿真中, 网络结构发生变化时会引起非状态变量的突变, 进而有可能造成非原型的数值振荡. 基于数值振荡是电力系统数字仿真领域中一个长期困扰的问题, 本文运用实例, 深入研究分析了数值振荡问题产生的根本原因, 就抑制数值振荡问题的方法进行了理论分析, 并以电路实例进行了仿真计算. 理论推导和实际算例都表明, 阻尼法计算精度高、消除数值振荡的优点突出, 计算量也不大, 在实际数字仿真中可以广泛的应用.

关 键 词:电力系统; 数字仿真; 数值振荡; 阻尼法

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A

1 引言

在电力系统故障仿真计算中, 首先需要建立整个电力系统的仿真数学模型, 同时确定其参数. 电力系统中各种元件的动态特性大都可以用微分方程来表达, 事实上描述电力系统的数学模型就是一组高阶常微分方程. 接着就要求解微分方程, 所以微分方程的数值解法是电力系统故障仿真计算的数学基础.

求解微分方程的数值解常用的方法有很多, 其中隐式梯形法是一种有效的数值离散方法, 因其数值稳定性好、精度高、计算量小等优点, 在电力系统故障仿真计算中得到了广泛的应用. 但是, 它有一个很大的缺点, 即在网络结构发生突变(如断路器操作、某些短路故障等)时, 会产生数值振荡.

2 数值振荡问题及其实质

在电力系统故障仿真计算过程中, 产生数值振荡的根本原因在于网络中出现了某种形式的扰动(如断路器操作等)时, 网络中的非状态变量(如电感元件的电压、电容元件的电流等)发生了突变, 但对于一个复杂的电力系统来说, 由于突变后的非状态变量难以求得, 常常采用突变前的变量计算突变后

的等值电流源. 这样计算所得的等值电流源显然不正确, 反映到计算结果中, 则表现为非状态变量的不正常摆动.

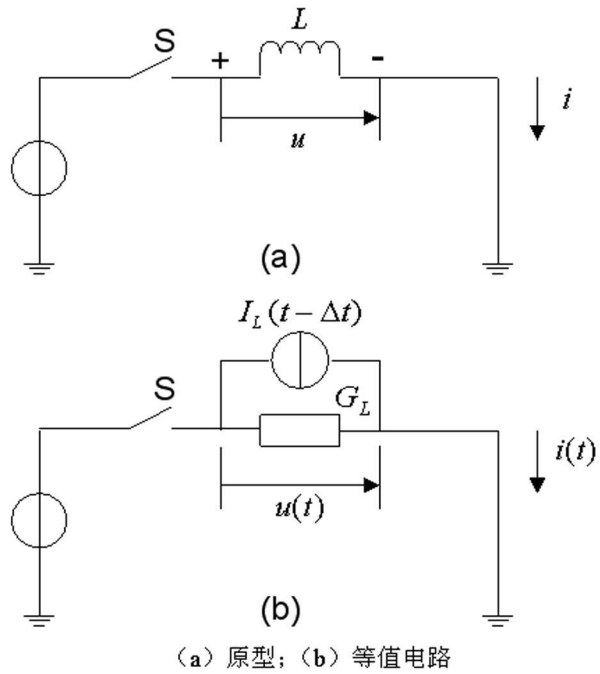


图 1 说明数值振荡问题的简单电路

以图 1 所示简单电路为例, 可以说明数值振荡的实质.

电感 L 的微分方程为:

$$u=L \frac{d_i}{d_t} \tag{1}$$

用隐式梯形法差分化以后有:

$$i(t)=G_L u(t)+I_L(t-\Delta t) \tag{2}$$

$$I_L(t-\Delta t)=G_L u(t-\Delta t)+i(t-\Delta t) \tag{3}$$

$$G_L=\frac{\Delta t}{2L} \tag{4}$$

开关 S 在 t_0 时刻断开后,电压 u 将会发生突变,即 $u(t_0^-)\neq u(t_0^+)$.但在实际仿真计算中,由于突变以后的非状态变量难以求取,常常用 t_0^- 时刻的变量值计算等值电流源.在图 1 电路中,则有:

$$I_L(t_0)=G_L u(t_0^-)+i(t_0^-) \tag{5}$$

由开关的动作特性可知:

$$i(t_0^-)=i(t_0^+)=i(t_0+k\Delta t)=0 \quad (k=1,2,3,\dots) \tag{6}$$

联立求解可得:

$$u(t_0+\Delta t)=-\frac{1}{G_L}I_L(t_0)=-u(t_0^-) \tag{7}$$

$$u(t_0+k\Delta t)=(-1)^k u(t_0^-) \quad (k=1,2,3,\dots) \tag{8}$$

$$I_L(t_0+k\Delta t)=(-1)^k G_L u(t_0^-) \quad (k=1,2,3,\dots) \tag{9}$$

可见,电压 u 将以 $u(t_0^-)$ 为幅值上下摆动.由于电流 $i(t_0)$ 过零时,电压 $u(t_0^-)$ 正好处于峰值,开关开断后的数值振荡幅度很大,如果不采取措施消除振荡将会影响后续仿真的正确性.

通过前面分析产生数值振荡的根本原因,我们知道解决这一问题的方法就是:要么求出突变后的非状态变量,要么在网络结构突变时回避非状态变量,或者采取措施使振荡逐渐衰减.

3 数值振荡的消除方法

3.1 求解突变后的非状态变量

既然数值振荡现象的根源在于非状态变量的突变,那么求解突变后的非状态变量便成为解决数值振荡问题最直接的方法.在网络结构发生变化时,状态变量是不会发生突变的.简单电路仿真计算的确可以用状态变量来求得突变后的等值注入电流源,该方法既可消除数值振荡,又有精度高、稳定性好的特点.但是实际电力系统是极其复杂的系统,元件很多,想以此法求解突变后的非状态变量是不切实际的,所以现实中一般不采用此法.

3.2 后退欧拉法

后退欧拉法之所以不会引起数值振荡是因为其

差分方程中不出现 $t-\Delta t$ 时刻的非状态变量,因而非状态变量的突变不会形成不合理的等值注入电流源.但是后退欧拉法的精度不及梯形法,不宜用来计算仿真全过程.在暂态仿真计算中,该方法一般与其他离散方法结合使用,通常只是在断路器操作等扰动后,先用后退欧拉法计算若干步,再转入隐式梯形法继续计算.这样虽可以抑制数值振荡问题,但两者系数矩阵的不同使得编程非常复杂.

3.3 阻尼法

阻尼法的基本原理是:对各元件的差分方程作适当的修正,使数值振荡在一定的时间内逐步衰减至零.通常的做法是在电感元件上并联一个小电导 G ,而在电容元件上串联一个小电阻 R .数值振荡是一种高频振荡,其频率为 $\frac{1}{2\Delta t}$.同时由电感和电容元件的特点可知 G 、 R 将对高频分量进行有效的衰减,而对低频分量影响较小.选定不同的 G 、 R 可以获得不同的衰减速度.通过进一步的研究,隐式梯形法和后退欧拉法的加权混合算法就相当于在电感上并联小电导,在电容上串联小电阻.

对于电感元件,用隐式梯形法差分化后得:

$$\begin{cases} i(t)=G_T u(t)+I_T(t-\Delta t) \\ I_T(t-\Delta t)=G_T u(t-\Delta t)+i(t-\Delta t) \\ G_T=\frac{\Delta t}{2L} \end{cases} \tag{10}$$

用后退欧拉法差分化后得:

$$\begin{cases} i(t)=G_H u(t)+I_H(t-\Delta t) \\ I_H(t-\Delta t)=i(t-\Delta t) \\ G_H=\frac{\Delta t}{L} \end{cases} \tag{11}$$

将两种方法按一定比例混合,设后退欧拉法的权重为,则有:

$$\begin{cases} i(t)=G_Z u(t)+I_Z(t-\Delta t) \\ I_Z(t-\Delta t)=(1-a)G_T u(t-\Delta t)+i(t-\Delta t) \\ G_Z=\frac{(1+a)\Delta t}{2L} \end{cases} \tag{12}$$

由上可得:选用不同的值,可以获得不同的衰减速度. a 越大,则振荡衰减得越快,但精度也随之降低.当 $a=1$ 时,即为后退欧拉法.

4 实例分析

图 2 为数值振荡算例.其中: $R_1=100 \Omega$, $L_1=0.02 \text{ H}$, $R_2=0.005 \Omega$, $L_2=0.04 \text{ H}$, $R_3=0.005 \Omega$, $L_3=0.02 \text{ H}$, $u_1=1.5 \sin 100 \pi \text{ V}$.

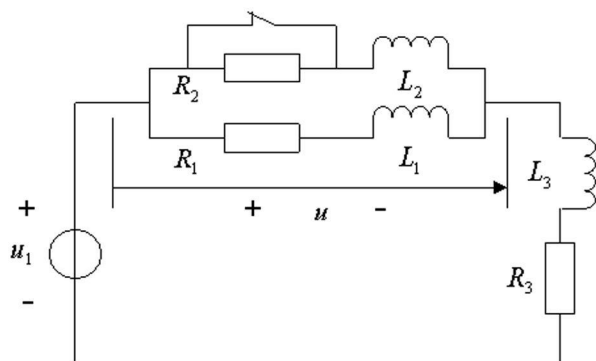
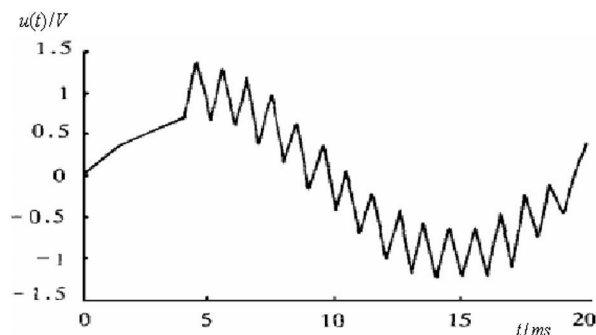
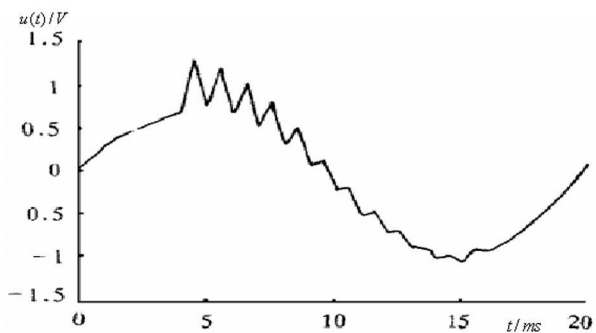
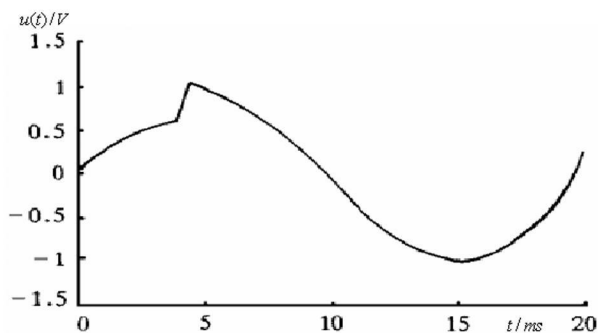


图2 数值振荡算例

图3 隐式梯形法得出的 $u(t)$ 曲线图4 $\alpha=0.05$ 时阻尼法得出的 $u(t)$ 曲线图5 求解非状态变量法得出的 $u(t)$ 曲线

本文分别用隐式梯形法、阻尼法和求解非状态变量法进行了编程仿真计算. 图3为隐式梯形法得出的 $u(t)$ 曲线, 图4为阻尼法 ($\alpha=0.05$) 得出的 $u(t)$ 曲线, 图5为求解非状态变量法得出的 $u(t)$ 曲线.

5 结果分析及结论

由上三图可知, 在电力系统故障仿真计算中, 采用隐式梯形法会产生数值振荡(见图3所示), 而采用阻尼法(见图4)和求解非状态变量法(见图5)则能有效地消除数值振荡, 同时具有较好的数值稳定性. 但是实际电网非常复杂, 求解非状态变量法往往是不能实现的, 所以阻尼法在实际中具有及其广泛的应用.

参考文献:

- [1] 黄家裕, 陈礼仪, 孙德昌. 电力系统数字仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 张瑛. 电力系统仿真计算中的数值振荡问题[J]. 东北电力技术, 1999, (4): 11-13.
- [3] 刘益青, 陈超英. 用以消除数值振荡的阻尼梯形法误差分析与修正[J]. 中国电机工程学报, 2003, (23): 57-61.

Study of Eliminating Numerical oscillations in Power System Simulation

WANG Yi, LIU Bai-fen, ZHANG Hua, LIU Zhen-Hua

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

Abstract: In the digital simulation of power systems transient, the change of network can cause the jumping of non-state variant, which may bring non-prototype oscillations. This is a big problem in the digital simulation of power systems. Based on the deeply analysis of essential reason caused numerical oscillations, this paper presents some ways to solve this problem. Both theoretic analysis and example indicate that the damping method is very good. The advantage of eliminating oscillations is obvious and the damping method can be used widely in the digital simulation of power systems.

Key words: power system; digital simulation; numerical oscillation; damping method