

基于频谱分析的发电机跃变量补偿算法

王庆平, 陈超英, 王海吉, 刘益青, 梁磊

(天津大学电力系, 天津 300072)

摘要: 利用频谱分析的方法,对同步发电机模型的误差进行修正,使修正后的向后欧拉法友模精度大大提高,同时也避免了非原形的数值振荡。仿真实验结果表明:该算法在电力系统故障以及开关动作等暂态过程的发电机跃变量仿真方面具有广泛应用,同时这种基于频谱分析的误差补偿方法亦可推广到其他电力系统暂态仿真的领域中。

关键词: 跃变量计算; 频谱分析; 同步发电机; 数字仿真

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)08-0667-03

1 引言

同步发电机的电磁暂态仿真多采用的是隐式梯形法^[1]。梯形法算法简单,数值稳定,精度也较高,误差为 $O(h^3)$ 。但当系统中有故障发生或开关操作时,网络中非状态变量(如电感电压、电容电流等)产生跃变。如果认为所有电量均连续变化,不进行跃变量计算,则会引入不衰减的非原形数字振荡。目前,对于跃变量的计算多直接采用向后欧拉法或阻尼梯形法^[2]。向后欧拉法无数值振荡但精度低于梯形法,误差为 $O(h^2)$;阻尼梯形法精度介于梯形法和欧拉法之间,仍有衰减的震荡,衰减速度与阻尼因子有关。因此,建立可避免数值振荡且精度较高的发电机跃变量模型,可以有效地提高发电机电磁暂态仿真的精确性。

本文利用频谱的观点对向后欧拉法的误差进行分析,从简单的电感、电容元件出发,进一步得到了同步发电机跃变量计算的综友模。并在此基础上编写程序进行算例仿真,验证了算法的可靠性。

2 频谱分析与 RL、RC 支路跃变量模型

2.1 频谱分析法

在分析实际系统网络时,无论系统元件的电压、电流波形如何,都具有一定的频谱特性。根据这一特性,可以对模型的误差进行分析,然后根据叠加原理求出总体的计算误差。假设元件中电压电流为:

$$\begin{cases} i_n = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \\ i_{n+1} = I_m \sin(\omega t + \varphi_i + H) \\ u_n = U_m \sin(\omega t + \varphi_u) \\ u_{n+1} = U_m \sin(\omega t + \varphi_u + H) \end{cases}$$

其中 ω 为频谱中任意频率分量。

将上式代入元件模型方程,其不匹配量即为该模型对频率 ω 分量的计算误差。当激励含有多个频率分量时,将各频率分量叠加,即为补偿误差。

2.2 RL、RC 支路的跃变量补偿模型

向后欧拉法可有效防止数值振荡,因此电量的跃变量计算多采用欧拉法。但其截断误差较大,约为 $O(h^2)$,故需进行补偿。

对于 RL 支路有 $L \frac{di}{dt} = u - Ri$,应用欧拉法得:

$$L \frac{i_{n+1} - i_n}{H} = u_{n+1} - Ri_{n+1} \quad (2)$$

上式中 H 为步长。

将(1)式代入得:

$$\begin{aligned} \text{左边} &= \frac{LI_m}{H} [\sin(\omega t + \varphi_i + H) - \sin(\omega t + \varphi_i)] = \\ &= \frac{LI_m}{H} 2 \sin \frac{H}{2} \cos \left(\omega t + \varphi_i + \frac{H}{2} \right) = \\ &= \left(\frac{H}{2} \right)^{-1} \sin \frac{H}{2} L \frac{di_{n+\frac{1}{2}}}{dt} \\ \text{右边} &= \cos \frac{H}{2} \left(1 + j \operatorname{tg} \frac{H}{2} \right) \left(u_{n+\frac{1}{2}} - Ri_{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

可见,对于任意频率 ω ,式(3)两侧并不相等。这是由于向后欧拉法造成两侧存在不平衡分量,其只与算法有关,而与激励无关。如使方程两侧重新匹配,则可对频率 ω 分量进行精确计算。由网络分析可知,元件中电压、电流只占一定频带,且主导频率只有一个,如我们使算法对主导频率精确计算,则可有效减小总体误差。令主导频率为 ω_0 (一般可取工频 50Hz),对方程进行修正使在主导频率下(即 $\omega = \omega_0$)时方程两侧精确相等:

$$\left(\sin \frac{H}{2} / \frac{H}{2} \right) \cdot \left(\sin \frac{\omega_0 H}{2} / \frac{\omega_0 H}{2} \right)^{-1} \cdot L \frac{di_{n+\frac{1}{2}}}{dt} =$$

$$\cos \frac{H}{2} \left(\cos \frac{0H}{2} \right)^{-1} \left(1 + j \operatorname{tg} \frac{H}{2} - j \operatorname{tg} \frac{0H}{2} \right) \left(u_{n+\frac{1}{2}} - Ri_{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (4)$$

(2) 式中增加上式的修正分量:

$$L \left\{ \sin \frac{0H}{2} / \frac{0H}{2} \right\}^{-1} \cdot \frac{i_{n+1} - i_n}{H} = \left(\cos \frac{0H}{2} \right)^{-1} \left[u_{n+1} - Ri_{n+1} + \frac{0L}{2} \operatorname{tg} \frac{0H}{2} (i_{n+1} + i_n) \right] \quad (5)$$

$$\text{令: } H = \operatorname{tg} \frac{0H}{2} \left(\frac{0H}{2} \right)^{-1} H, B = \frac{0L}{2} \operatorname{tg} \frac{0H}{2}$$

则上式可变为:

$$i_{n+1} = \left(\frac{L}{H} + R - B \right)^{-1} \left[u_{n+1} + i_n \left(\frac{L}{H} + B \right) \right] \quad (6)$$

则电感支路方程可修正为:

$$\begin{cases} G_L = \left(\frac{L}{H} + R - B \right)^{-1} \\ J_L = \left(\frac{L}{H} + B \right) \left(\frac{L}{H} + R - B \right)^{-1} \cdot i_n \\ i_{n+1} = G_L \cdot u_{n+1} + J_L \end{cases} \quad (7)$$

同理,对于 RC 支路,应用同样的方法进行误差分析修正,其友模为:

$$\begin{cases} G_C = \left(\frac{H}{C} + R - RH B \right)^{-1} \\ J_C = (1 + HB) \left(\frac{H}{C} + R - RH B \right)^{-1} (Ri_n - u_n) \\ i_{n+1} = G_C \cdot u_{n+1} + J_C \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{式中: } H = \operatorname{tg} \frac{0H}{2} \left(\frac{0H}{2} \right)^{-1} H, B = \frac{0}{2} \operatorname{tg} \frac{0H}{2}$$

3 发电机支路友模的跃变量计算

下面以 d 轴为例推导发电机跃变量综合友模。

3.1 仿真等值电路

图 1(a) 为 d 轴微分方程的等值电路。进而可得

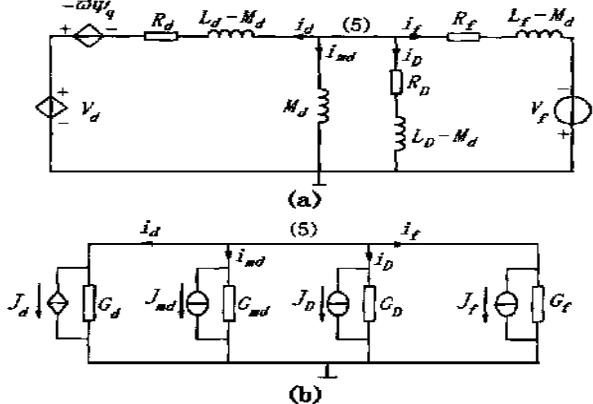


图 1 d 轴等值电路和综合友模

其基于欧拉法的综合友模如图 1(b)。

3.2 求解综合友模的等值电导 G 和注入电流源 J

由图 1 可看出:同步发电机的等值电路由电感、电容、电阻和电流源组成,因此可采用类似前文的方法对发电机模型进行修正。本文对同步发电机采用的是可与系统同时求解的发电机同步模型^[3]。该模型接口简单,精度高,且无须预测校正。结合图 1 的友模电路,应用文献^[3]的方法可得到 d 轴无跃变时的欧拉法同步模型。

a) 求解 G_d, J_d

修正前的方程为:

$$u_{5,n+1} = \left(R_d + \frac{L_d - M_d}{H} \right) i_{d,n+1} - \left(\frac{L_d - M_d}{H} \right) i_{d,n} + q_{,n} u_{7,n+1} + \frac{2}{3} \left[\cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H \right) u_{2,n+1} + \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H - \frac{2}{3} \right) u_{3,n+1} + \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H + \frac{2}{3} \right) u_{4,n+1} \right]$$

式中: u_7, u_8 分别为发电机转子角速度和角度, M_d 为磁链; H 为步长。

采用修正算法可得:

$$u_{5,n+1} = \left[R_d + \frac{L_d - M_d}{H} - B \right] i_{d,n+1} - \left[\frac{L_d - M_d}{H} + B \right] i_{d,n} + q_{,n} u_{7,n+1} + \frac{2}{3} \left[\cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H \right) u_{2,n+1} + \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H - \frac{2}{3} \right) u_{3,n+1} + \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H + \frac{2}{3} \right) u_{4,n+1} \right]$$

$$\text{令等值电导 } G_d = \left(R_d + \frac{L_d - M_d}{H} - B \right)^{-1}$$

则等值注入电流源为:

$$J_d = G_d \left\{ \left(\frac{L_d - M_d}{H} + B \right) i_{d,n} - q_{,n} u_{7,n+1} - \frac{2}{3} \left[\cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H \right) u_{2,n+1} + \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H - \frac{2}{3} \right) u_{3,n+1} + \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H + \frac{2}{3} \right) u_{4,n+1} \right] \right\}$$

$$\text{则原方程可化为: } i_{d,n+1} = G_d u_{5,n+1} + J_d \quad (9)$$

$$\text{其中: } H = \operatorname{tg} \frac{0H}{2} \left(\frac{0H}{2} \right)^{-1} H,$$

$$B = \frac{0(L_d - M_d)}{2} \operatorname{tg} \frac{0H}{2}$$

b) 求解 G_f, J_f

同理,令等值电导 $G_f = \left(R_f + \frac{L_f - M_d}{H} - B \right)^{-1}$

则注入电流源为

$$J_f = G_f \left[\left(\frac{L_f - M_d}{H} + B \right) \cdot i_{f,n} - u_{f,n+1} \right]$$

则原方程可化为: $i_{f,n+1} = G_f u_{5,n+1} + J_f$ (10)

其中: $B = \frac{0(L_f - M_d)}{2} \text{tg} \frac{0H}{2}$

c) 求解 G_{md} 、 J_{md}

同理,令等值电导 $G_{md} = \left(\frac{M_d}{H} - B \right)^{-1}$

则注入电流源为 $J_{md} = G_{md} \left[\frac{M_d}{H} + B \right] \cdot i_{md,n}$

原方程可化为: $i_{md,n+1} = G_{md} u_{5,n+1} + J_{md}$ (11)

其中: $B = \frac{0M_d}{2} \text{tg} \frac{0H}{2}$

d) 求解 G_D 、 J_D

同理,令等值电导 $G_D = \left(R_D + \frac{L_D - M_d}{H} - B \right)^{-1}$

则注入电流源为 $J_D = G_D \left[\frac{L_D - M_d}{H} + B \right] \cdot i_{D,n}$

则原方程可化为: $i_{D,n+1} = G_D u_{5,n+1} + J_D$ (12)

其中: $B = \frac{0(L_D - M_d)}{2} \text{tg} \frac{0H}{2}$

3.3 d 轴对导纳及注入电流源矩阵的修正

根据 $(G_d + G_f + G_{md} + G_D) u_{5,n+1} = - (J_d + J_f + J_{md} + J_D)$, 将(9) (10) (11) (12)式代入得:

$$(G_d + G_f + G_{md} + G_D) u_{5,n+1} = G_d \left[\left(-B - \frac{L_d - M_d}{H} \right) \right]$$

$$i_{d,n} + q_{,n} u_{7,n+1} + \frac{2}{3} \left[\cos(u_{8,n} + u_{7,n} H) u_{2,n+1} + \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H - \frac{2}{3} \right) u_{3,n+1} + \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H + \frac{2}{3} \right) u_{4,n+1} \right] - (J_f + J_{md} + J_D)$$

整理得:

$$- \frac{2}{3} G_d \cos(u_{8,n} + u_{7,n} H) u_{2,n+1} - \frac{2}{3} G_d \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H - \frac{2}{3} \right) u_{3,n+1} - \frac{2}{3} G_d \cos \left(u_{8,n} + u_{7,n} H + \frac{2}{3} \right) u_{4,n+1} + (G_d + G_f + G_{md} + G_D) u_{5,n+1} - G_d q_{,n} u_{7,n+1} = G_d \left[\left(-B - \frac{L_d - M_d}{H} \right) \cdot i_{d,n} - (J_f + J_{md} + J_D) \right]$$

4 跃变量仿真算法的实现及其算例

本文以华中电网 500kV 系统为例进行仿真,如图 2 所示。葛洲坝—凤凰山 371km 500kV 线路距葛洲坝约 46%发生 A 相单相短路,60ms 后保护动作断开。

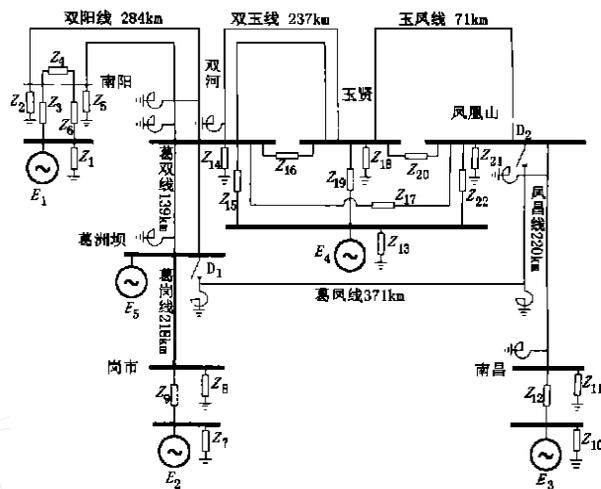


图 2 华中 500kV 系统图

如图 3,为非故障线路玉贤—双河的 A 相电流的仿真波形。其中:()为故障录波结果转换为本文图形输出系统格式的波形;()为本文算法的仿真结果;()为向后欧拉法的仿真结果;()为阻尼梯形法的仿真结果。可见,()中不仅仿真精度较()和()高,且避免了()中的振荡。

由仿真结果可以看出:采用阻尼梯形法会产生衰减的数值振荡;采用向后欧拉法在换路后初瞬间误差较大;而采用本文的补偿法录波的结果也十分相近。所以,该算法在防止振荡的同时,精度也得到了大大的提高。

5 结论

同步发电机的电磁暂态仿真过程中,如有故障发生或开关操作时,采用隐式梯形法等方法建模计算跃变量会产生数值振荡,而采用欧拉法则精度不高。本文从向后欧拉法的综合友模出发,根据频谱分析的原理,推导出发电机的补偿友模方程,从而大大地提高了计算的精度。仿真结果表明,该算法模型简单,数值稳定性好,精度远远高于向后欧拉法且有效地消除了数值振荡,可用于系统故障及开关操作时同步发电机电磁暂态的研究。基于频谱分析的误差补偿算法亦可应用于电力系统中其他元件的跃变量仿真研究。

参考文献:

[1] Donnell H. Electromagnetic Transients Program Reference manual [M]. Canada:1986.

(下转第 12 页)

基波及各次谐波的有效值,计算量大,当电流中所含谐波次数较高,每工频周期内采样点数较大时,微机无法满足保护响应速度的要求。式(6)算法计算量要小得多,但如前仿真计算所示,它受非周期分量的影响大,且没有相应的修正算法。采用本文提出的方法可有效地解决这一问题:当电流采样值与它一个周波前的采样值之间的差值较大时,认为存在非周期分量,对采样值进行修正。

5 结论

本文提出的采样值修正方法,与以往滤除非周期分量的其它方法相比,其突出特点是,它不是针对任何特定算法而设计的,从而对所有算法均适用。在微机保护中,采用本方法对采样值进行修正,可明显减小非周期分量对计算的影响,其实现简单,附加计算量较小。仿真计算和实际应用均证实了本文方法的可行性和有效性。

A new approach to eliminate non-period components from sampling data

HUANG Chun¹, PAN Hua², JIANG Ya-qun¹, WANG Liar-qun²

(1. Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Electric

Power Transformation & Experimentation Co., Changsha 410002, China)

Abstract: In order to eliminate the non-period components, a new approach that modifies the sampling data is presented. This paper details the principle and the procedure as well as the simulation result of the approach.

Key words: non-period component; sampling; algorithm; microprocessor-based protection

(上接第9页)

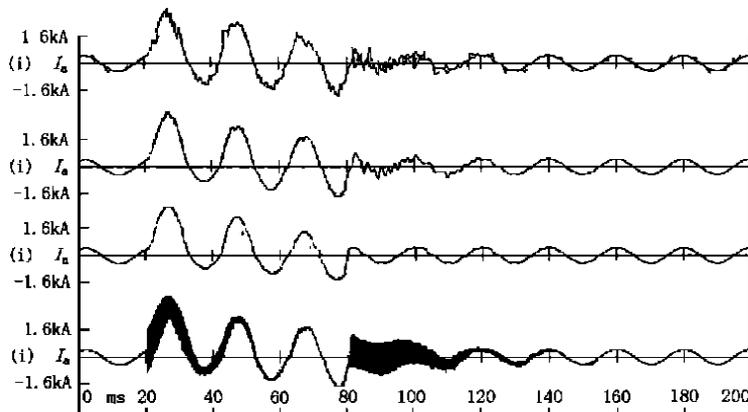


图3 玉双线电流波形

"Compensation method" of generator jump quantity based on spectral analysis

WANG Qing-ping, CHEN Chao-ying, WANG Hai-ji, LIU Yi-qing, LIANG Lei

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on spectral analysis, this paper modifies error of synchronous generator's model. Accuracy of modification Euler method is improved greatly and it also avoids mathematical oscillation. This method can be used mostly in generator jump quantity's simulation of transient caused by fault or switch operation. At same time, this "compensation method" based on spectral analysis can also be used in other transient simulation of power system.

Key words: calculation of jump quantity; spectral analysis; synchronous generator; digital simulation

参考文献:

- [1] Sachdev M S, Baribeau M A. A new algorithm for digital impedance relay. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1978, (6).
- [2] 杨念慈. 校正非周期分量对傅立叶算法影响的分段并联滤波器及其计算程序. 电力自动化设备, 1993, 3.
- [3] 周大敏. 递推富氏算法中衰减非周期分量的消除方法. 继电器, 1998, 26(5).

收稿日期: 2001-02-21

作者简介: 黄纯(1966-),男,副教授,在职在读博士,主要从事电力系统自动化、继电保护、谐波治理等方面的教学和科研工作; 潘华(1966-),男,高级工程师,主要从事电力系统自动化、继电保护等方面的科研和生产工作; 江亚群(1971-),女,硕士,讲师,主要从事电工技术、微机保护、电气测量等方面的教学和科研工作。

- [2] 白学风. 一种快速的暂态仿真算法[J]. 继电器, 2000, 28(1): 3-7.
- [3] 王庆平. 同步发电机数字仿真的研究[D]. 天津大学硕士论文. 天津: 天津大学, 2000.

收稿日期: 2001-01-11

改回日期: 2001-04-12

作者简介: 王庆平(1975-),男,博士生,主要从事电力系统仿真及其故障分析的研究工作; 陈超英(1957-),男,博士,博导,研究方向为电力系统故障分析、继电保护等。