

# 基于权重数值积分的电力电子开关仿真插值算法

黄宇鹏, 汪可友, 李国杰

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240)

## A Weight-Numerical Integration Based Interpolation Algorithm for Simulation of Power Electronic Circuit

HUANG Yupeng, WANG Keyou, LI Guojie

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education  
(Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China)

**ABSTRACT:** With wide application of power electronics apparatuses in modern power system, electromagnetic transient program (EMTP) have to face with new challenges due to high-frequent topologic sudden change caused by the action of power electronic valves. For this reason, a new interpolation algorithm for the simulation of power electronic circuits is proposed to ensure the accuracy and reliability of control system. Under the condition of global implicit trapezoidal integration, at the action point of the power electronic valve the proposed algorithm computes system variables by linear interpolation and reinitializes the control system by backward Euler method, then according to the position of the interpolation point in current simulation step the weight-numerical integration is utilized to flexibly adjust the integration step-length and the fast integration is carried out to determine the time point of the resynchronization in the simulation. During the action of power electronic valves, the proposed algorithm reinitialize the simulation via only once of interpolation, and during the reinitialization the nodal admittance matrix is kept unchanged, thus the numerical oscillation can be effectively suppressed. Under the premise of ensuring accuracy, the proposed algorithm can reduce the calculation burden and accelerate the computation, and the multiple-switch problem is taken into account. Both adaptability and effectiveness of the proposed algorithm are validated by case study.

**KEY WORDS:** electromagnetic transients; weight-averaged integration; resynchronization; reinitialization; multi-switching events

基金项目: 国家高技术研究发展计划 863 计划资助项目 (2014AA052003); 国家自然科学基金资助项目 (51307107); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20130073120034); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

The National High Technology Research and Development Program of China 863 Program (2014AA052003); National Natural Science Foundation of China (51307107); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20130073120034); the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

**摘要:** 随着电力电子技术在电力系统中的广泛应用, 电力电子开关引起的高频次系统拓扑突变对电磁暂态仿真提出了新挑战, 为此, 提出了一种电力电子开关仿真插值算法。在全局隐式梯形积分法条件下, 该算法在开关动作点通过线性插值计算系统变量, 并利用后向欧拉法对系统进行重新初始化, 而后根据插值点在当步仿真步长的位置, 利用权重法数值积分, 灵活改变积分步长, 快速积分至仿真整步时间点, 对仿真进行再同步。在开关动作过程中, 算法仅通过一次插值对仿真进行重新初始化, 并在再同步过程中保持节点导纳矩阵不变, 且能有效抑制数值振荡。算法在保证精度的前提下, 降低了计算负担, 提高了计算速度, 并考虑了多重开关问题。最后通过算例验证了算法的适应性和有效性。

**关键词:** 电磁暂态; 权重数值积分; 重新初始化; 重新同步化; 多重开关

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.01.023

## 0 引言

从早期的高压直流输电系统、灵活交流输电技术 (flexible alternative current transmission systems, FACTS) 到如今的基于电压源型变流器的多端直流输电技术 (voltage source converter-multi-terminal direct current, VSC-MTDC)、基于可再生能源的分布式发电系统, 电力电子技术的应用遍及电力系统<sup>[1-2]</sup>。作为电力系统安全分析与控制研究的重要工具, 电磁暂态仿真对系统快速电磁过程进行精细化建模, 是电力系统全数字仿真的重要组成部分<sup>[3]</sup>。电力电子开关具有开关动作频率高、暂态过程快的特点, 这对电磁暂态仿真是一个挑战。

电力电子建模方式与电磁暂态仿真算法是影响电磁暂态仿真效率的 2 个主要因素。电力电子开关是一种非线性元件, 根据不同的响应要求, 主要有 2 种建模方式<sup>[4-5]</sup>: 1) 拓扑建模法, 可以准确模拟系统内电压电流情况; 2) 输出建模法, 该方法

忽略了系统内部信息,对开关端口响应进行建模。本文中电力电子开关采用拓扑建模法的建模方式。

电磁暂态仿真算法分为状态变量法和差分方程法。状态变量法的主要优点是对系统时变、非线性元件建模简单,且不会产生数值振荡,但该方法难以确定系统独立状态变量,且面对高维复杂系统时,建模难度高,扩展型较差。传统电磁暂态仿真程序(electromagnetic transients program, EMT)采用差分方程法,相比于状态变量法,EMTP程序采用定步长隐式梯形积分法,具有较高的精度与绝对稳定性,至今仍然被广泛应用于电力系统仿真中<sup>[6]</sup>。

本文总结了电力电子开关仿真算法设计应考虑的问题,并以传统EMTP程序为框架,针对电力电子开关动作,提出了一种基于权重数值积分法的变步长电力电子开关仿真插值算法。

## 1 电力电子开关仿真基本问题

差分方程法改变了状态变量法将整个系统微分方程组列出后求解的方式,采用元件差分化的方法,将系统微分方程转化为代数方程进行求解<sup>[6]</sup>。电力电子开关动作引起的系统拓扑高频变化会对传统EMTP程序的计算效率产生不利影响,因此基于定步长的传统EMTP程序需要改进。针对电力电子开关仿真,有如下问题需要考虑:1)EMTP程序数值积分方法的选择;2)开关动作与插值技术;3)重新初始化过程;4)重新同步化过程。

### 1.1 数值积分方法选择

数值积分方法的选择是EMTP程序首先需要考虑的问题。隐式数值积分方法稳定性高,对步长变化不敏感,因此成为电力系统仿真的主流算法。常用隐式数值积分有梯形积分法和后向欧拉法,为统一表示,下面以电感元件为例,采用权重法对元件进行差分化推导。

电感元件特征微分方程差分化后表示如下:

$$i_L(t) = i_L(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{L} [\theta u_L(t) + (1 - \theta) u_L(t - \Delta t)] \quad (1)$$

可以写为:

$$i_L(t) = G_L u_L(t) + I_{\text{history}}(t) \quad (2)$$

其中,

$$G_L = \theta \Delta t / L \quad (3)$$

$$I_{\text{history}}(t) = i_L(t - \Delta t) + \frac{(1 - \theta) \Delta t}{L} u_L(t - \Delta t) \quad (4)$$

$$1/2 \leq \theta \leq 1 \quad (5)$$

式中: $\Delta t$ 表示仿真步长; $L$ 为电感值; $\theta$ 为权重值; $G_L$ 为节点导纳矩阵; $i_L(t)$ 、 $u_L(t)$ 分别为当前时刻支路电流与支路电压; $i_L(t - \Delta t)$ 、 $u_L(t - \Delta t)$ 为上一步仿真

时刻的支路电流电压; $I_{\text{history}}(t)$ 为历史电流项。易看出当 $\theta=1/2$ 时式(1)为隐式梯形积分法,当 $\theta=1$ 时式(1)为后向欧拉法。对于电容元件可以同样进行类似推导,但该建模方式只适用于线性元件,对非线性元件需要采用分段线性化或补偿法做处理。根据实际仿真网络拓扑,将差分化后的元件模型连接,利用式(2),可以将待仿真电路统一表示如下:

$$G(t)v(t) = i_s(t) + i_{\text{history}}(t) \quad (6)$$

式中: $G(t)$ 为节点导纳矩阵; $i_s(t)$ 为电流源向量; $v(t)$ 为待求节点电压向量。

研究表明<sup>[6]</sup>,隐式梯形积分法与后向欧拉法都具有绝对稳定性。隐式梯形法更适于具有正弦波响应的系统,而后向欧拉法更适于具有分段线性特点的系统仿真<sup>[7]</sup>。对比截断误差,梯形积分法截断误差为 $O(h^3)$ ,后向欧拉法截断误差为 $O(h^2)$ ,权重法截断误差介于两者之间。根据电力系统的特点以及计算精度的需要,传统EMTP程序采用梯形积分法作为主要数值积分方法。

### 1.2 开关动作与插值技术

电力电子开关动作本质上是系统拓扑结构的突变。传统EMTP程序采用隐式梯形法,网络突变时会产生数值振荡<sup>[7]</sup>。文献[7-8]提出数值临界阻尼法(critical damp adjustment, CDA),其利用后向欧拉法自带阻尼特点,在开关动作过程中以两步半步长后向欧拉法代替梯形法以抑制数值振荡。

采用定步长计算的EMTP程序只能在整步时间点改变系统开关状态,由此会产生开关动作判断延时以致出现非特征谐波<sup>[6]</sup>。在算法发展早期采用二分法或牛顿拉夫逊法确认开关动作<sup>[9]</sup>,现在多采用线性插值对开关时间点进行确认<sup>[10]</sup>,如图1轨迹1所示。

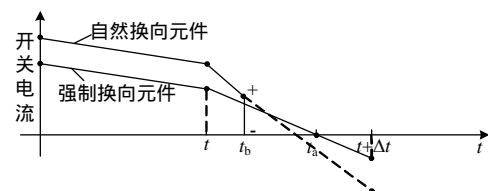


图1 插值算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interpolation algorithm

多重开关指在一个单步仿真时间内有多个开关发生动作。此现象分为2类:1)同一步长内互相独立的开关动作,2)具有因果关系的开关动作。如在Buck降压斩波电路中,IGBT动作导致二极管开通承担续流任务。对此种情况,需对开关动作多次插值以确定系统动作。对于复杂变流器拓扑,多重开关现象不可避免。

### 1.3 重新初始化过程

重新初始化<sup>[11-12]</sup>过程指在系统突变后对系统初始状态进行重新计算的过程。针对不同的开关换向方式,开关动作分为自然换向和强制换向。自然换向指由自然换向器件(二极管等)根据支路电压电流条件进行开关动作,此类动作,系统变量为连续变化,在算法设计中只需考虑开关动作时间点的确定以及数值振荡的处理,如图1轨迹1。

强制换向指由强制型器件(可关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)、绝缘栅双极型晶闸管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)等)根据控制信号进行换向动作。此类动作系统内状态变量存在突变,如图1轨迹2中 $t_{b+}$ 到 $t_{b-}$ 的突变,因而在算法设计时除需对开关动作时间点与数值振荡进行处理外,还要对系统拓扑重新计算初值,否则会出现“熄火”现象<sup>[11-13]</sup>。

### 1.4 重新同步化过程

电磁暂态仿真需要在整步时间点输出计算结果,以使算法可以同时适应离线以及实时仿真平台。在保证算法精度的条件下,快速将插值后的仿真时间点与原整步时间点重新同步是电力电子开关仿真算法设计的重要部分,即重新同步化过程<sup>[10]</sup>。针对重新同步化过程,文献[10,14-15]提出了不同的重新同步化算法。

文献[16]提出了一种灵活变步长的重新同步化算法,该算法通过在开关动作改变仿真步长,直接积分至整步时间点,避免了文献[10,14-15]中的多次插值,并保证了重新同步化过程中节点导纳矩阵不变,加快仿真速度。但该算法采用全局后向欧拉法,当其应用于采用全局梯形法的EMTP程序中时,无法取得合适的步长。

本文在文献[16]基础上,利用权重法数值积分对重新同步化过程进行设计,使其可以应用于全局梯形法的EMTP程序中,并考虑重新初始化问题。

## 2 基于权重数值积分的插值算法

### 2.1 算法流程

基于权重数值积分的插值算法如图2、3所示。图2、3中,以二极管电流过零示意开关动作,算法积分顺序按图中数字进行。算法的核心思想是,在开关动作后线性插值到最先动作的开关时刻,利用半步长后向欧拉法试探该过程可能发生的多重开关现象,并进行重新初始化,以保证进行重新同步化之前,仿真已经得正确的系统初值。而后为保持节点导纳矩阵不变,根据插值点位置计算权重值,

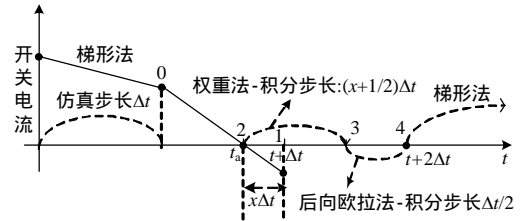


图2 权重法插值算法( $0 \leq x \leq 1/2$ )  
Fig. 2 Interpolation algorithm with weight-averaged integration( $0 \leq x \leq 1/2$ )

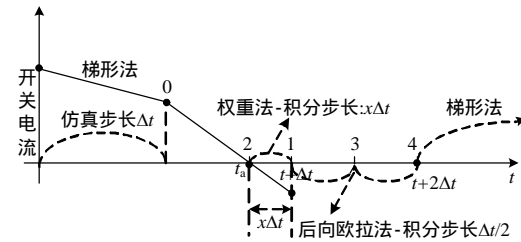


图3 权重法插值算法( $1/2 \leq x \leq 1$ )  
Fig. 3 Interpolation algorithm with weight-averaged integration( $1/2 \leq x \leq 1$ )

利用权重数值积分,直接积分至仿真整步时间点。

插值算法具体算法流程如下:

- 1) 全局采用隐式梯形法进行计算,式(3)(4)中 $\theta=1/2$ ,积分至 $t+\Delta t$ 。
- 2) 此时检测到开关动作,在 $t$ 和 $t+\Delta t$ 之间插值到 $t_a$ ,并重新形成节点导纳矩阵。
- 3) 利用半步长后向欧拉法进行重新初始化过程。由于电感电压为突变量,近似认为 $v_L(t_a)=v_L(t_a+0.5\Delta t)$ ,即取半步长后电感电压计算结果至 $t_a$ ,同理可以取回电容电流。同时根据换路定理,保持 $t_a$ 原电感电流与电容电压换路前后保持不变,此时仿真时间点重新回到 $t_a$ ,即点2。此时若存在其他开关动作需重新进行步骤2)。

- 4) 进行重新同步化过程,引入变量 $x$ ,有

$$x = (t + \Delta t - t_a) / \Delta t \quad (7)$$

$x$  满足如下条件:

$$0 \leq x \leq 1 \quad (8)$$

- 5) 根据 $x$ 的取值分为2种情况,当( $0 \leq x \leq 1/2$ )时,用 $(x+1/2)\Delta t$ 代替 $\Delta t$ ,带入式(3)得

$$G_L = \theta(x+1/2)\Delta t / L \quad (9)$$

式(4)同理进行重写。对比式(9)与梯形法 $G_L$ ,为保持节点导纳矩阵不变,需满足如下条件:

$$(1/2+x)\theta = 1/2 \quad (10)$$

根据式(10)即可计算权重值 $\theta$ ,如图2所示,此时仿真进行到点3,然后进行半步长后向欧拉法积分至点4,最终恢复梯形法进行仿真。

- 6) 当 $1/2 \leq x \leq 1$ 时,与步骤5)类似,用 $x\Delta t$ 代替 $\Delta t$ ,带入式(3)得

$$G_L = \theta x \Delta t / L \quad (11)$$



同样为保证节点导纳矩阵不变,需满足

$$x\theta = 1/2 \quad (12)$$

权重值 $\theta$ 可以根据式(12)计算得,此时仿真至点1,而后进行两步半步长后向欧拉法,积分至点4。最终同样恢复梯形法进行仿真。

## 2.2 算法分析

文献[16]所设计算法采用权重法数值积分进行电力电子开关相关处理,但文献[16]设计的EMTP程序采用全局后向欧拉法作为主要数值积分方法,而本文的算法依托采用全局隐式梯形法的EMTP程序进行设计。根据本文1.1部分的分析,相比于采用全局后向欧拉法的EMTP程序,采用全局隐式梯形法的EMTP程序,整体计算精度更高。

后向欧拉法自带阻尼,在小步长情况下可以处理多重开关问题,并且可以进行强制型换向器件动作的仿真<sup>[7-8,17]</sup>。文献[16]所设计算法利用了该特点,忽略了重新初始化过程,在插值后直接进入重新同步化过程,因而文献[16]算法对步长的选择较敏感。本算法利用换路定理,采用半步长后向欧拉法对重新初始化过程进行处理,同时试探多重开关现象,降低了算法对步长的敏感程度,同时可以保证算法强制换向型器件以及多重开关的仿真。

在重新初始化过程中,根据文献[16]灵活改变步长的思路,若将其直接应用于全局隐式梯形法的EMTP程序中,为提高算法效率,需保证节点导纳矩阵不变,则等式(12)必须在满足式(8)的条件下计算得出权重值,易看出计算得出的权重值很难满足式(5)。因此本算法根据插值点采用分段设计,对仿真进行重新同步化,在此过程中保持节点导纳矩阵不变,保证了算法再同步效率。同时本算法采用三步以上后向欧拉法可以更为有效抑制高频开关引起的数值振荡<sup>[17]</sup>。但与文献[16]相比,算法流程复杂度提高,同时编程实现难度有所上升。

## 3 算例分析

EMTDC/PSCAD是目前国际上流行的电磁暂态仿真软件,主要应用于计算电力系统参数变化时,电参数随时间的变化规律。EMTDC/PSCAD以EMTP程序为基础,采用定步长计算,同样采用插值算法处理电力电子开关动作。本文即选取EMTDC/PSCAD的仿真结果与本文算法进行对比,以验证算法有效性。

### 3.1 算例1(双二极管换流电路)

如图4所示,双二极管换流电路是由自然换向器件构成的具有多重开关特征的最简单拓扑。图4中2个交流电压源等值反向,经过两二极管对负载

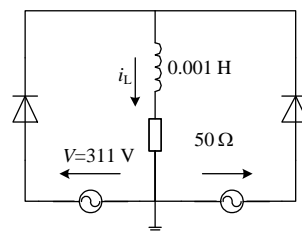


图4 双二极管换流电路

Fig. 4 Circuit of full-wave two-diode rectifier

供电,2个二极管在换流时刻交换导通状态。在本算例中,本文算法仿真步长为 $50\mu\text{s}$ ,并将结果与PSCAD仿真步长 $50\mu\text{s}$ 以及 $10\mu\text{s}$ 计算结果作比较。

图5给出了双二极管换流电路负载电流结果比较图。从图5(a)看,本文算法与PSCAD两种步长的仿真结果吻合度很高。从图5(b)的局部放大图来看,本文算法 $50\mu\text{s}$ 的仿真曲线更接近PSCAD $10\mu\text{s}$ 仿真结果。本算例可以验证,针对自然换向型器件的仿真,本文算法效率优于PSCAD。

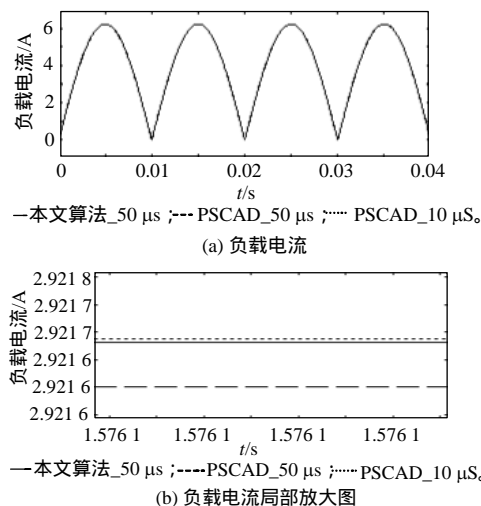


图5 双二极管换流电路仿真结果比较

Fig. 5 Results comparisons for full-wave two-diode rectifier

### 3.2 算例2(Buck降压斩波电路)

图6为DC/DC降压斩波电路。该电路同时包含强制换向型器件(IGBT),与自然换向型器件二极管,并且两种开关的导通关系构成具有因果关系。

在仿真过程中,当IGBT关断,电路中的电感电流由于不能突变,二极管会受到冲击而变为导通状态。此时需要仿真算法的重新初始化过程,否则会由于二极管不能正确导通而产生“熄火”现象。该算例是会产生“熄火”现象的典型拓扑。

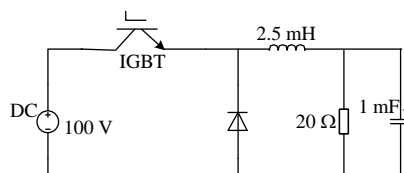


图6 Buck电路

Fig. 6 Circuit of Buck converter

在本算例中,全控型器件 IGBT 的 PWM 控制信号调制波频率为 2 kHz。PWM 控制信号调制波频率对仿真步长的选择存在影响,本文算法在本算例中仿真步长为  $10\ \mu\text{s}$ ,并与 PSCAD 仿真步长  $10\ \mu\text{s}$  和  $1\ \mu\text{s}$  计算结果比较,如图 7 所示。

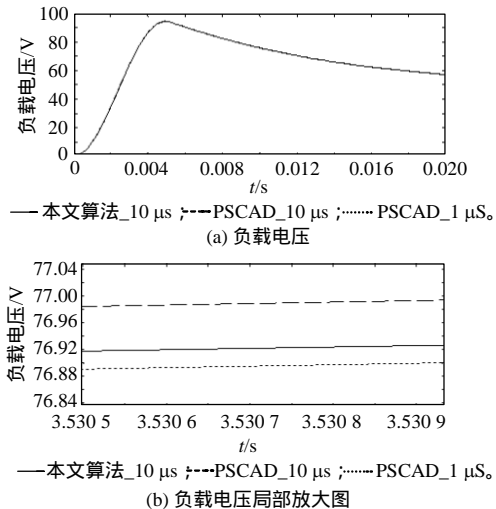


图 7 Buck 电路仿真结果比较

Fig. 7 Results comparisons for Buck converter

从图 7(a)来看,本文与 PSCAD 两种步长仿真结果吻合度很高,说明本算法可以有效解决由于 IGBT 等强制换向型器件所引起的系统内状态变量突变问题。如图 7(b)所示的局部放大图可以看出,本文算法的仿真结果更接近 PSCAD  $1\ \mu\text{s}$ ,说明本文算法具有较高的仿真效率。

### 3.3 算例 3(全控型桥式整流器)

算例 1 与算例 2 证明了本文算法可以很好解决自然换向型器件与强制型换向器件等电力电子开关对仿真中断所造成的影响。如图 8 所示整流桥是电力电子技术,如 FACTS 技术、VSC-MTDC 技术等,在电力系统中应用的基础拓扑结构,对其仿真具有重要应用意义。

本算例包含了非特征谐波、多重开关、以及由强制型开关器件引起的系统状态变量突变等电力电子开关仿真必须需要处理的典型问题。本算例中 PWM 调制波频率为 2 kHz。

图 9 为本文算法与 PSCAD  $1\ \mu\text{s}$  仿真结果对比图,本文算法选择  $5\ \mu\text{s}$  作为仿真步长。面对如图 8 复杂度与综合性大大提高的拓扑,本文算法仿真结

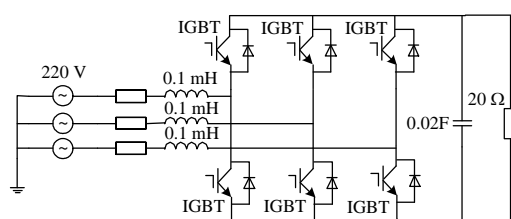


图 8 三相全控整流电路

Fig. 8 Circuit of three-phase full-controlled rectifier

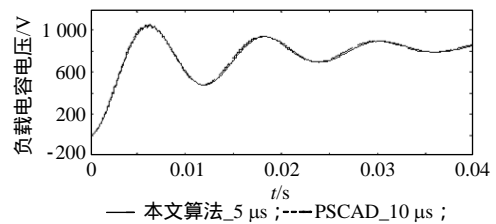


图 9 全控型桥式整流器仿真结果比较

Fig. 9 Results comparisons for three-phase full-controlled rectifier

果依旧可以以较大步长获得准确结果。

图 10 给出了仿真步长分别在  $1\ \mu\text{s}$ 、 $10\ \mu\text{s}$ 、 $15\ \mu\text{s}$  的仿真结果。从图 10 可以看出,本文算法对电力电子开关拓扑可以以较大步长进行仿真,仿真精度可以满足工程要求。

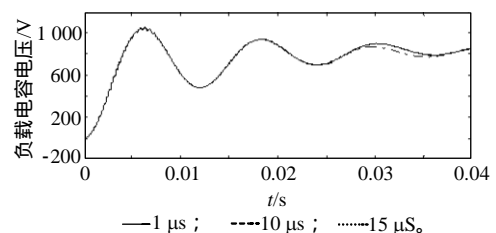


图 10 不同仿真步长负载电容电压比较

Fig. 10 Comparisons for three-phase full-controlled rectifier with different time-steps

仿真结果说明本算法可以较好地处理电力电子开关对于传统 EMTF 算法所产生的问题,具有良好的适应性与有效性。

### 3.4 算例 4(权重积分算法比较)

本文算法与文献[16]算法同样利用权重积分法进行重新同步化过程。本文算法与文献[16]不同之处在于,EMTP 程序采用全局隐式梯形法,考虑了强制换向型器件与自然换向型器件在仿真算法设计上的不同,并设计了多重开关检测过程。如图 11、12 即为本文算法与文献[16]所设计算法的仿真结果进行对比。

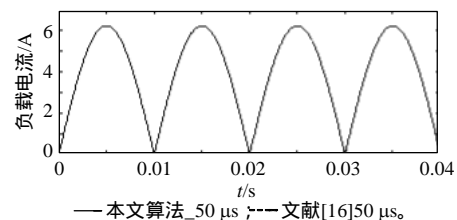


图 11 算例 1 结果比较

Fig. 11 Results comparisons for example 1

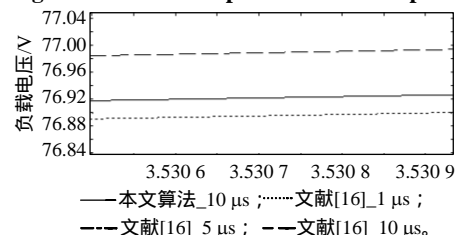


图 12 算例 2 结果比较

Fig. 12 Results comparisons for example 2

如图 11 所示,针对自然换向型器件的仿真,文献[16]与本文算法同样取得了较高精度的仿真结果。但当对存在强制换向型器件的拓扑进行仿真时,开关动作过程中会出现系统状态变量的突变,文献[16]中只对 GTO 单次开断过程进行了仿真验证。当电力电子器件存在高频反复开断过程时,文献[16]由于缺乏对重新初始化过程以及多重开关的处理,其所设计算法在较大步长条件下不能取得较好的仿真结果,如图 12 所示。文献[16]所设计算法只有当采用  $1\ \mu\text{s}$  时才能与本文所设计算法  $10\ \mu\text{s}$  取得较吻合的结果,当步长逐步增大时,仿真结果发生很大偏移。

## 4 结论

本文在传统定步长 EMTP 程序构架下,提出一种针对电力电子开关电路的仿真算法。该算法在开关动作处利用线性插值确定开关动作点的系统变量,继而利用半步长后向欧拉法进行仿真重新初始化过程,此过程解决了开关电路可能出现的多重开关问题。最后利用基于权重法的数值积分,采用分段方式,灵活改变仿真积分步长,直接积分至整步时间点,完成仿真的再同步过程。

相比于传统通过传统多次线性插值对电力电子开关动作进行仿真的算法,本算法只采用一次线性插值,简化了由电力电子开关动作引起的复杂处理过程,提高了计算速度,降低了编程复杂度。最后,本文通过 3 个不同的仿真算例,验证了算法的正确性和有效性,仿真结果表明,仿真算法具有较高的稳定性,同时算法精度可以满足计算要求。

本算法重新设计了仿真再同步化过程,这是实时仿真的关键步骤。利用相关硬件平台,将本算法拓展至实时仿真是下一阶段重要工作内容。

## 参考文献

- [1] 张文亮,汤涌,曾南超.多端高压直流输电技术及应用前景[J].电网技术,2010,34(9):1-6.  
Zhang Wenliang, Tang Yong, Zeng Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6(in Chinese).
- [2] 梁尤伟,胡志坚,陈允平.分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J].电网技术,2003,27(12):71-75.  
Liang Youwei, Hu Zhijian, Chen Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75(in Chinese).
- [3] 田芳,李亚楼,周孝信,等.电力系统全数字实时仿真装置[J].电网技术,2008,32(22):17-22.  
Tian Fang, Li Yalou, Zhou Xiaoxin, et al. Advanced digital power system simulator[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 17-22(in Chinese).
- [4] Gole A, Keri A, Nwankpa C, et al. Guidelines for modeling power electronics power engineering applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 505-514.
- [5] 王成山,高菲,李鹏,等.电力电子装置典型模型的适应性分析[J].电力系统自动化,2012,36(6):63-68.  
Wang Chengshan, Gao Fei, Li Peng, et al. Adaptability analysis of typical power electronic device models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 63-68(in Chinese).
- [6] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M].李永庄,林集明,曾绍华,译.北京:水利电力出版社,1991:14-17.
- [7] Marti H, Lin Jiming. Suppression of numerical oscillation in the EMTP[J]. IEEE Trans on Power System, 1989, 4(4): 739-747.
- [8] Lin Jiming. Implementation of the CDA procedure in the EMTP[J]. IEEE Trans on Power System, 1990, 5(2): 394-402.
- [9] Kelper B, Dessaint L, Al-Haddad K, et al. A comprehensive approach to fixed-step simulation of switched circuits[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(2): 216-224.
- [10] Kuffel P, Kent K, Irwin G. The implementation and effectiveness of linear interpolation within digital simulation[J]. Electrical Power & Energy System, 1997, 19(4): 221-227.
- [11] Irwin G D, Woodford D A, Gole A. Precision simulation of PWM controllers[C]//2001 international Conference on Power System Transients. Rio de Janeiro, Brazil: 2001 International Conference on Power System Transients, 2001: 161-165.
- [12] Zou M, Mahseredjian J, Joos G, et al. Interpolation and reinitialization in time-domain simulation of power electronics circuits[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(8): 688-694.
- [13] 王成山,李鹏,黄碧斌,等.一种计及多重开关的电力电子时域仿真插值算法[J].电工技术学报,2010,25(6):84-88.  
Wang Chengshan, Li Peng, Huang Bibin, et al. An interpolation algorithm for time-domain simulation of power electronics circuit considering multiple switching events[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 84-88(in Chinese).
- [14] Strunz K, Linares L, Marti J R, et al. Efficient and accurate representation of asynchronous network structure changing phenomena in digital real time simulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 586-592.
- [15] Araujo A E A, Dommel H W, Marti J R. Converter simulation with the EMTP: simultaneous solution and backtracking technique[C]//IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference. Athens, Greece: IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference, 1993: 941-945.
- [16] Strunz K. Flexible numerical integration for efficient representation of switching in real time electromagnetic transients simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1276-1283.
- [17] 刘文焯,汤涌,侯俊贤,等.考虑任意重时间发生的多步变步长电磁暂态仿真算法[J].中国电机工程学报,2009,29(34):9-15.  
Liu Wenzhuo, Tang Yong, Hou Junxian, et al. Simulation algorithm for multi variable-step electromagnetic transient considering multiple events[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 9-15(in Chinese).



黄宇鹏

收稿日期:2014-06-18。

作者简介:

黄宇鹏(1989),男,硕士,研究方向为电力系统仿真分析与算法研究;

汪可友(1979),通讯作者,男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统动态与稳定计算方法、柔性输电, E-mail: wangkeyou@sjtu.edu.cn;

李国杰(1965),男,博士,教授,主要研究方向为新能源控制与接入,微电网分析与控制。

(责任编辑 徐梅)