

无插值仿真平台中抑制数值振荡的阻尼电路设计方法

姬煜轲, 许建中, 徐延明, 赵成勇

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 阐述及复现了普遍存在于电磁暂态仿真中的数值振荡问题, 罗列了现有电磁暂态仿真程序应对此问题的解决方法, 并从应用场合、计算代价、编程复杂度等多个方面分析了局限性。在此基础上提出了一种适用于无插值功能的仿真平台中的用于抑制数值振荡的 RC 阻尼电路设计方法。从数值振荡的机理入手分析其有效性, 提出了描述数值振荡剧烈程度的量化函数, 并将其与 Simplex 算法相结合对 RC 电路的配置进行优化, 大幅提高了阻尼电路对数值振荡的抑制效果。结合不同仿真步长下的多次测试, 对仿真步长、数值振荡和阻尼电路三者之间的关系进行了进一步分析。

关键词: 数值振荡; 电磁暂态; 梯形积分法; RC 阻尼电路; Simplex 算法; 量化函数

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.022

0 引言

目前, 电力系统电磁暂态仿真计算软件多种多样, 应用的场合也不尽相同。针对不同类型的应用需求, 大体上可以分为离线仿真平台和实时仿真器。离线仿真平台包括各种常见的软件包, 如 PSCAD/EMTDC、EMTP-RV^[1]、ATP、MicroTran 等。实时仿真器的代表主要有 RTDS、RT-LAB 等, 被广泛应用于工业和学术界。尽管应用场所不同, 但不论是离线仿真还是实时仿真所采用的积分方法大都是隐式梯形积分法^[2]。隐式梯形积分法具有精度高、稳定性好等优点, 但由于其积分特点的影响, 在仿真过程中, 开关和器件动作以及网络结构发生变化, 会引起电感、电容等储能元件的非状态变量在事件发生后在真解附近不正常地摆动, 也即电磁暂态仿真中的数值振荡现象^[3-4]。

针对此类问题国内外提出了许多解决方案, 文献^[5]分别采用求解非状态变量法和阻尼法尝试解决该问题, 结果发现求解非状态变量的效果要好于阻尼法, 但较为复杂, 计算量较大, 如果对大规模交直流电网^[6-8]进行仿真, 此方法无疑会大幅增加计算负担, 严重影响仿真效率。文献^[9]采用改进的节点分析法, 对非线性元件离散化使其变为线性元件再进行求解, 从而获得较为准确的非状态变量的解, 但此种方法会引进牛顿-拉夫逊迭代, 如果仿真规模扩大, 其复杂度和庞大的计算量同样会严重影响仿真速度。

EMTP 的 3.0 版本采用临界阻尼调整法 CDA (Critical Damping Adjustment) 技术消除数值振荡, 但是仿真波形中会出现一些处理痕迹, 消除效果不是很理想^[4]。PSCAD 的 V4.0 版本采用半步长插值来解决数值振荡问题, 取得不错的效果, 但此种方法只能用于离线仿真, 实时仿真中振荡问题无法用插值来解决^[10]。

现有的实时仿真器中大多采用外加阻尼电路的方法来抑制数值振荡, 该方法具有 2 个优点: 不需要对积分方法进行改动; 既可用于实时仿真来抑制振荡提高仿真精度, 也可用于离线仿真替代插值来提高仿真速度。而此方法的关键在于如何选取合适的 R_{snb} 、 C_{snb} 值以获得最佳的振荡抑制效果。本文将以 RC 电路为基础, 以 PSCAD 为平台, 通过 Simplex 优化算法并设计恰当的优化目标函数来获得最优的阻尼电路 R_{snb} 和 C_{snb} 的值。

1 数值振荡问题的实质及现象

1.1 数值振荡问题的实质

已有大量文献对数值振荡问题进行了分析及介绍, 本文将通过一个简单的 RL 非线性电路重现该电磁暂态仿真中的基础问题。

以图 1 所示的 RL 电路进行分析, 此处的二极管相当于一个开关 S, i_L 为电感的瞬时电流。假设在 $t < t_0$ 时, $i_L > 0$, 此时二极管处于正向导通状态, 相当于 S 闭合。 $t = t_0$ 时刻, 二极管承受反向电压, i_L 反向流经极大的二极管关断电阻, 相当于开路。电感的微分方程为:

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

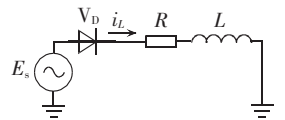


图 1 RL 测试电路
Fig.1 RL test circuit

收稿日期: 2015-07-17; 修回日期: 2016-05-24
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177042); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA050105)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177042) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2013AA050105)

应用梯形积分法写成如下离散化的形式:

$$i(t+\Delta t)=i(t)+\frac{1}{2L}[u_L(t+\Delta t)+u_L(t)] \quad (2)$$

如果二极管在 $t_0+\Delta t$ 时刻关断, 电流 $i(t_0+\Delta t)=0$, 那么 $t_0+\Delta t$ 与 $t_0+2\Delta t$ 时刻的关系式如下:

$$0=\frac{1}{2L}[u_L(t_0+2\Delta t)+u_L(t_0+\Delta t)] \quad (3)$$

即 $u_L(t_0+2\Delta t)=-u_L(t_0+\Delta t)$, 因此这就会产生一个持续的电感电压的数值振荡。

1.2 数值振荡问题的仿真再现

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的 RL 测试电路, 取交流电压有效值为 100 V, 电阻 R 为 $1\ \Omega$, 电感 L 为 $0.1\ \text{H}$ 。仿真步长和画图步长均为 $20\ \mu\text{s}$, 总仿真时长为 $0.16\ \text{s}$ 。本文所画波形均以标么值显示, 电压基准值为 150 V, 电流基准值为 10 A。

本文所用的仿真平台为 PSCAD/EMTDC 的 V4.0 版本, 通过对其内置仿真数值振荡抑制功能的投/退进行设置, 关闭该功能进行仿真, 即可对数值振荡的表象进行复现。

如图 2 所示, 电感电压 u_L 在电感电流 i_L 过零点处出现了振荡的现象。正如前文对数值振荡实质的分析所示, 交流电流的过零变化会导致二极管的导通与关断, 整个电路的拓扑结构也随之变化, 而此时的电路中储能元件的状态变量是不能突变的, 从而引起了非状态变量的振荡。

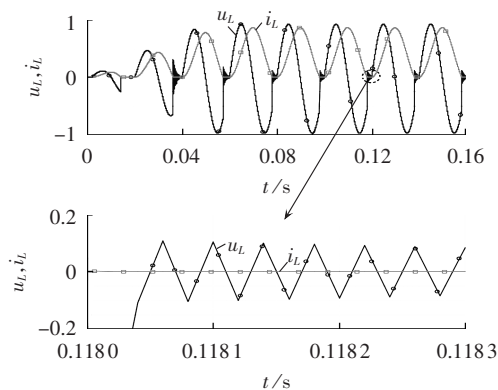


图 2 发生数值振荡时的电感电压 u_L 和电感电流 i_L

Fig.2 Waveforms of u_L and i_L when numerical oscillation occurs

2 抑制数值振荡的方法

2.1 已有的解决方法

后退欧拉法计算某一时刻的状态无需用到上一时刻的非状态变量, 从根本上避免了非状态变量具有传递性和对称性的数值振荡问题。在暂态仿真计算中一般与其他积分方法结合使用。如在网络突变的开始几个步长使用后退欧拉法, 然后再用梯形积分法进行积分。这样做一定程度上抑制了数值振荡, 但是后退欧拉法精度不高, 积分方法的相互切换

会使编程复杂, 切换时刻的寻找判断更会造成多余的计算负担, 影响仿真速度。文献[11]提出的 CDA 技术就是通过在间断点改用 2 个半步长的后退欧拉法解决数值振荡问题, 仿真软件 NETOMAC 就是采用这种方式[12]。

也有文献提出将网络结构变化之后的非状态变量准确求解, 以此来达到抑制振荡的目的, 但此方法带来的计算量过大, 并不适用于仿真规模较大的实际系统[5]。

PSCAD 中对于数值振荡的抑制策略是通过其自身的插值功能, 在非状态变量发生振荡时进行半步长回退插值, 以此来找到非状态变量的真解[10], 如图 3 所示。该方法原理简单, 没有改变积分策略, 不会增加太多的计算量, 但是其依靠的基础是插值功能, 这也就意味着在没有插值功能的实时仿真领域, 该方法无从谈起。此外, 当仿真大规模的实际系统时, 插值次数的累积势必会拖慢仿真速度, 降低仿真效率。

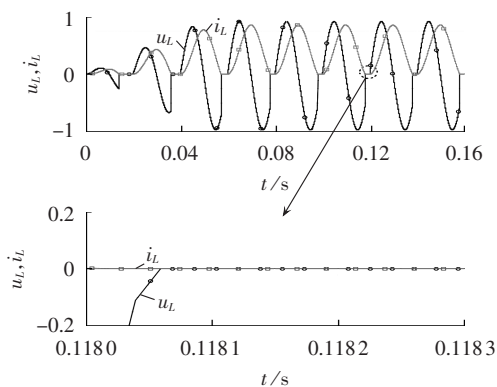


图 3 数值振荡被消除时的电感电压 u_L 和电感电流 i_L

Fig.3 Waveforms of u_L and i_L when numerical oscillation is suppressed

2.2 振荡过程的再分析

仔细观察图 2 可知, 数值振荡在起初进行近似的等幅振荡, 但随着振荡的进行, 振荡的幅值是逐渐衰减的。事实上, 数值振荡衰减的速度是与二极管关断电阻的数值大小直接相关的[10]。为了说明此问题, 将 RL 电路的频域方程列写如下:

$$I_L = \frac{E_s}{R_d + R + j\omega L} \quad (4)$$

其中, E_s 为电源电压; R 为电路电阻; R_d 为二极管电阻; L 为电路电感。可以看到, 当网络拓扑发生变化, 即当二极管由导通变为关断时, R_d 变为断态电阻, 一般为 $10\ \text{M}\Omega$, 那么可以认为此时的电感电流值近似为 0。结合式(2)、(3)可知, 电流值越趋近于 0, 那么振荡的效果将会越明显, 也即振荡产生的原因转化为二极管由很小的通态电阻变为很大的断态电

阻。振荡发生之后,尽管电流很小,但是随着电感上的能量通过电阻慢慢地释放,数值振荡的效果也在逐步衰减,直至二极管承受正向压降重新导通,数值振荡的效果完全消失。

由此受到启发,早期用于抑制数值振荡的 RC 阻尼电路恰好可以解决这个问题。通过在二极管两端并联 RC 阻尼电路,对其进行合适的取值,就可以达到数值振荡抑制的效果。

2.3 RC 电路的引入

将 RC 串联电路并联在二极管两端,如图 4 所示。此时的 RL 电路的频域方程将变为式(5)。

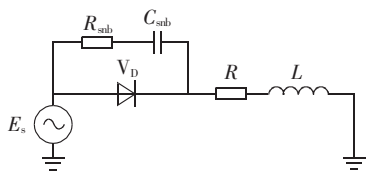


图 4 加入 RC 阻尼电路的 RL 测试电路

Fig.4 RL test circuit with RC damping circuit

$$I_L = \frac{E_s}{R_d // \left(R_{sn} + \frac{1}{j\omega C_{sn}} \right) + R + j\omega L} \quad (5)$$

其中, R_{sn} 为阻尼电路的电阻值; C_{sn} 为阻尼电路的电容值。当二极管处于导通状态时,由于二极管通态电阻很小,并联的 RC 电路被短路;当二极管承受反向压降处于关断时,并联的 RC 电路相当于给急剧下降的电感电流提供了一个临时的通路。 R_{sn} 的值远远小于二极管断态电阻, C_{sn} 的加入更是缓和了电感电压在电流瞬间下降时的波动,因此,在二极管等开关器件两端并联 RC 电路是一个值得尝试并深入研究的解决方向。

3 RC 电路的配置及优化

3.1 RC 电路的初值选取

对于二极管或其他开关器件而言,目前存在多种对其开通或关断状态的仿真建模方法。在对步长要求不高(仿真步长一般大于 $10 \mu s$)的离线仿真平台中,开关的建模通常是设置 2 个不同大小的电阻(二值电阻,即 R_{on} 、 R_{off}),通过对其阻值的切换来仿真开关导通或关断的状态。而在步长相对较小(仿真步长一般小于 $5 \mu s$)的实时仿真中,考虑计算复杂度、计算精度以及计算效率三者之间的辩证关系,一般不采用二值电阻的方法^[13],普遍采用的是 L/C 等值开关模型,该方法能提高仿真效率,但储能元件的引入会产生虚功率损耗的问题。由于开关的具体建模并非本文的研究重点,同时也为了能客观、清晰地分析 RC 电路的相关机理,本文选取较为成熟的二值电阻建模手段作为此处二极管开关建模的方法。

由相关文献可知,在定步长的电磁仿真程序中,

无法准确定位二极管等半导体器件的开关时刻会引起仿真中的插值问题。虽然数值振荡的产生与插值问题并没有直接关系,但插值问题的引入势必会影响数值振荡的剧烈程度。为了避免插值问题的引入而产生分析上不必要的工作量,这里通过 PSCAD 内置的二次回插功能来计算开关准确动作的时刻,即所考虑的仿真算例中不存在插值问题的影响。

基于上述分析,本文将针对二极管导通和关断 2 个状态来对 R_{sn} 、 C_{sn} 的取值进行讨论。

(1) R_{sn} 的取值。

基于二值电阻的理论,二极管导通电阻很小,一般取 $R_{on} = 0.01 \Omega$; 二极管关断电阻很大,一般取 $R_{off} = 1 M\Omega$ 。显然,不论二极管处于通断哪种状态,RC 阻尼电路都应尽量减少其对二极管造成的影响,即: R_{sn} 不应过小,以免在二极管导通时分流或者是二极管关断时通流; R_{sn} 也不应过大,否则将和 R_{off} 的作用类似,以至于削弱暂态阻尼功能的效果。基于以上分析,这里将 R_{sn} 的初值粗略地取为 $5 k\Omega$,恰好处于 0.01Ω 和 $10 M\Omega$ 的数量级之间。

(2) C_{sn} 的取值。

值得一提的是,RC 阻尼电路的设计初衷要求其阻尼作用在二极管由导通变为关断后的 1 个或几个仿真步长内就要得到充分的体现,有较高的时效性。这说明 C_{sn} 的取值将和仿真步长的大小有着直接关系。首先应用梯形积分法来对电感电压 u_L 进行分析。

$$u_L(t + \Delta t) = \frac{2L}{\Delta t} i(t + \Delta t) - \frac{2L}{\Delta t} i(t) - u_L(t) \quad (6)$$

受文献[14]的启发,本文尝试对电路进行变换,将原电路变换为一个电阻和历史电压源串联的等效电路。

$$\begin{cases} R_L = \frac{2L}{\Delta t} \\ U_{LEQ}(t) = \frac{2L}{\Delta t} i(t) + u_L(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中, R_L 为电感的等效电阻; U_{LEQ} 为电感的等效历史电压源,其值由上一时刻的电感电压、电感电流和等效电阻决定。借助式(7)可以将式(6)变形为:

$$u_L(t + \Delta t) = R_L i(t + \Delta t) - U_{LEQ}(t) \quad (8)$$

这样,就得到了由一个受控电压源和一个等效电阻组成的串联电路,即电感支路的戴维南等效电路,具体变形过程如图 5 所示。通过变形之后的戴维南等效电路可以清楚地看到,当二极管由导通变为关断时,如果电流 i 为零,那么 R_L 不会产生压降,于是 $u_L(t + \Delta t) = -U_{LEQ}$,即 $u_L(t)$ 的相反数,如此下去,

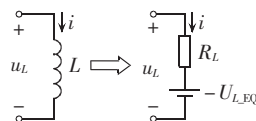


图 5 电感支路的戴维南变形
Fig.5 Thevenin deformation of inductor branch

数值振荡问题就会产生。阻尼电路的投入,就是使得电路拓扑变化瞬间电流并非真正为 0。通过这个非 0 的电流将电感电压快速收敛到 0。

接下来,对二极管两端的电压 u_D (也是阻尼电路两端电压 u_{SNB}) 进行列式分析,继续寻找仿真步长 Δt 、 C_{snb} 以及关断瞬间电流 i 三者之间的关系。

$$u_D(t+\Delta t)=u_{\text{SNB}}(t+\Delta t) \quad (9)$$

$$u_{\text{SNB}}(t+\Delta t)=R_{\text{snb}}i(t+\Delta t)+\frac{\Delta t}{2C_{\text{snb}}}i(t+\Delta t)+\frac{\Delta t}{2C_{\text{snb}}}i(t)+u_{C_{\text{snb}}}(t) \quad (10)$$

$$\begin{cases} R_{\text{SNB}}=R_{\text{snb}}+\frac{\Delta t}{2C_{\text{snb}}} \\ U_{\text{SNB,EQ}}(t)=\frac{\Delta t}{2C_{\text{snb}}}i(t)+u_{C_{\text{snb}}}(t) \end{cases} \quad (11)$$

其中, R_{SNB} 为阻尼电路的等效电阻; $U_{\text{SNB,EQ}}$ 为阻尼电路的等效历史电压源,其值由上一时刻的电容电压、电容电流、阻尼电阻和仿真步长决定。同理,借助式 (11) 可以将式 (10) 变形为:

$$u_{\text{SNB}}(t+\Delta t)=R_{\text{SNB}}i(t+\Delta t)+U_{\text{SNB,EQ}}(t) \quad (12)$$

仿照电感支路的戴维南等效变换,依据式 (9)—(12) 将阻尼电路与二极管的并联电路进行变换,为了分析需要,这里仅考虑二极管反向关断时的情况,即二极管支路断开的情况。具体变换过程如图 6 所示。

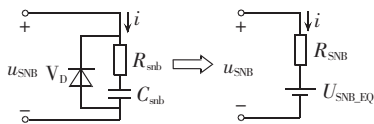


图 6 阻尼电路的戴维南变形
Fig.6 Thevenin deformation of damping circuit

由图 6 可以看出,在关断瞬间,二极管两端的电压也可等效为一个等效电阻 R_{SNB} 和一个等效历史电压源 $U_{\text{SNB,EQ}}$ 的串联。可以发现,为了使电流 $i(t+\Delta t)$ 不真正为零, R_{SNB} 应和 R_{snb} 取同样数量级,不应太大,又因为这里讨论的仿真情形主要是步长大于 $10 \mu\text{s}$ 的离线仿真,故这里 C_{snb} 的初值粗略地选取为 $0.02 \mu\text{F}$ 。可以推断,随着后期优化工作的进行,为了体现 RC 阻尼电路的效果, C_{snb} 值的选取将会向上收敛,因为此时 $C_{\text{snb}}=0.02 \mu\text{F}$ 的初值是一个近似于开路的保守配置,而为了抑制电感电压不正常的波动,电容 C_{snb} 的值就应该足够大来抑制其波动。当然, C_{snb} 的取值也不应太大,因为一旦超过一定范围,阻尼电路就相当于对高频电流呈现一个短路的状态,即使后期加入优化算法,也有可能无法收敛到其准确值。

3.2 RC 电路的参数优化

在将 R_{snb} 、 C_{snb} 的初值大概确定之后,接下来需要

做的工作就是将所取得的 R_{snb} 和 C_{snb} 的值进行不断的优化,使数值振荡抑制的效果满足要求。

本文的思路是:采用 PSCAD 中的 optimum run 优化模块中的 Simplex 算法,与自定义编写的用于描述振荡抑制效果的量化函数 SUM 进行结合,由计算机多次迭代,最终得到一组满足要求的 R_{snb} 、 C_{snb} 的值。

3.3 Simplex 算法

PSCAD 中的 optimum run 模块是由 A. M. Gole、S. Filizadeh 等学者于 2005 年左右提出并且研发的^[15-16]。该模块一共包含 4 种优化算法。

(1)Golden Intersection 算法,适合于单一实型变量的优化,主要用于寻找几何图形上的通常意义的黄金比例,即黄金分割线。而阻尼电路通常是要对 R_{snb} 和 C_{snb} 2 个实型变量进行优化,将黄金分割优化算法用在这里显然是不合适的。

(2)Genetic Algorithm,通常是对实型、整形以及二进制数一同进行优化,是一种适应于随机优化的算法。最早 John Holland 应用此优化算法对染色体的分裂繁殖进行研究,就其中的染色体交叉组合以及基因变异等问题能有效地求解其解的巨大空间。显然,Genetic Algorithm 用在 RC 阻尼电路的优化也是不合适的。

(3)Hooke-Jeeves,适用于多个实型变量的优化配置,但是收敛速度一般,需要较多次的迭代。

(4)Simplex,适用于多个变量的迭代,该方法沿可视化固体的多面体边缘进行迭代,寻求最优解。该方法收敛速度快,迭代次数较 Hooke-Jeeves 少,故选其作为 RC 阻尼电路参数优化配置的主要优化算法。

应用 optimum run 中的 Simplex 算法进行 RC 阻尼电路的优化配置。迭代求解 R_{snb} 和 C_{snb} 的最优配置的逻辑流程如图 7 所示。

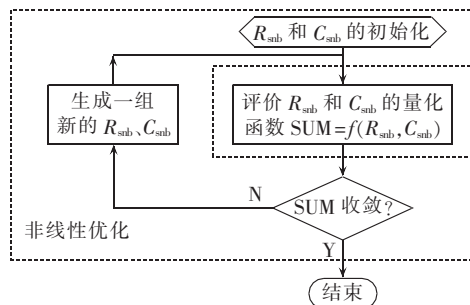


图 7 RC 阻尼电路的优化流程图
Fig.7 Flowchart of RC damping circuit optimization

3.4 量化函数 SUM

量化函数 SUM 反映不同 R_{snb} 、 C_{snb} 值下数值振荡抑制的效果,也是 Simplex 算法优化 R_{snb} 、 C_{snb} 的依据。因此,量化函数是否合理、准确,将直接影响到 R_{snb} 、

C_{snb} 的优化是否收敛、高效。

从图 2 可以发现,数值振荡的表现主要是在电流过零点之后电感电压出现的等幅振荡,即电感电压的波动直接反映了数值振荡的程度。因此,设计如下量化函数:

$$SUM = \sum_{k=1}^n |u_L(t_0 + k \Delta t)| \quad (13)$$

其中,假设数值振荡持续了 $n\Delta t$ 的时间。

经过实际验证发现,直接对电感电压取绝对值求和的方法虽然简单,但所得 Simplex 优化效果并不明显,优化速度慢,有时甚至会出现不收敛的情况。基于此,对量化函数改进如下:

$$SUM = \sum_{k=1}^n u_L^2(t_0 + k \Delta t) \quad (14)$$

确定了量化函数,接下来要做的就是将其和 optimum run 模块结合起来,有机地嵌入仿真电路中,通过测量变化的 SUM 值不断地更新 R_{snb} 、 C_{snb} 的值,迭代优化得到其最优解。本文设计了由 Fortran 语言编写的自定义模块,能够自动检测电感电流过零点时刻的变化,准确地记录下数值振荡发生时刻所有电感电压出现不正常波动的点,具体程序流程如图 8 所示。

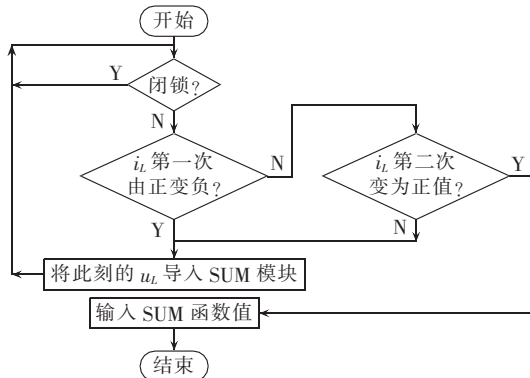


图 8 量化函数 SUM 的功能流程图
Fig.8 Flowchart of SUM function

4 不同步长下的优化算例

4.1 小步长下的优化仿真

设计如图 4 所示的带有 RC 阻尼电路的 RL 测试电路,元件参数与图 1 所示电路一致,仿真步长和画图步长均为 $20 \mu s$,总仿真时间为 $0.16 s$ 。 R_{snb} 的初值选取为 $5 k\Omega$, C_{snb} 的初值选取为 $0.02 \mu F$ 。

为了体现 Simplex 优化算法的效果,这里将呈现出 R_{snb} 、 C_{snb} 未经优化的数值振荡抑制效果和 R_{snb} 、 C_{snb} 经过优化的数值振荡优化效果,分别如图 9 和图 10 所示。优化后的 R_{snb} 为 $10.24 k\Omega$, C_{snb} 为 $19.83 mF$,SUM 函数的值为 16.5 。

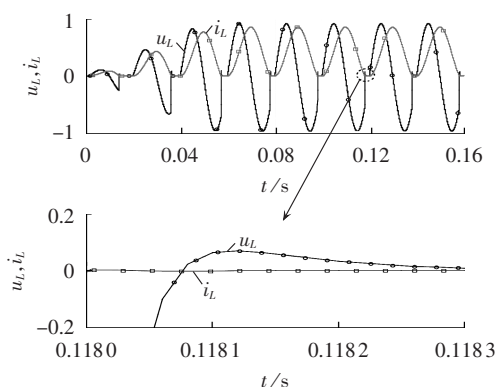


图 9 发生数值振荡时的电感电压 u_L 和电感电流 i_L (R_{snb} 、 C_{snb} 未经优化, $\Delta t = 20 \mu s$)
Fig.9 Waveforms of u_L and i_L when numerical oscillation occurs (initial R_{snb} and C_{snb} , $\Delta t = 20 \mu s$)

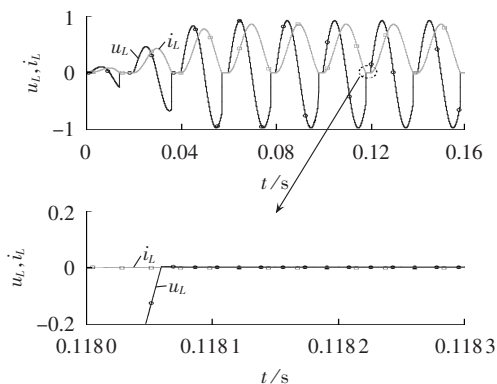


图 10 发生数值振荡时的电感电压 u_L 和电感电流 i_L (R_{snb} 、 C_{snb} 经过优化, $\Delta t = 20 \mu s$)
Fig.10 Waveforms of u_L and i_L when numerical oscillation occurs (optimizational R_{snb} and C_{snb} , $\Delta t = 20 \mu s$)

4.2 大步长下的优化仿真

取仿真步长和画图步长均为 $80 \mu s$,同样分别进行 R_{snb} 、 C_{snb} 未经优化的振荡仿真和 R_{snb} 、 C_{snb} 经过优化的振荡仿真,具体波形分别如图 11 和图 12 所示。优化后的 R_{snb} 为 $5.01 k\Omega$, C_{snb} 为 $20.39 \mu F$,SUM 函数的值为 60 。

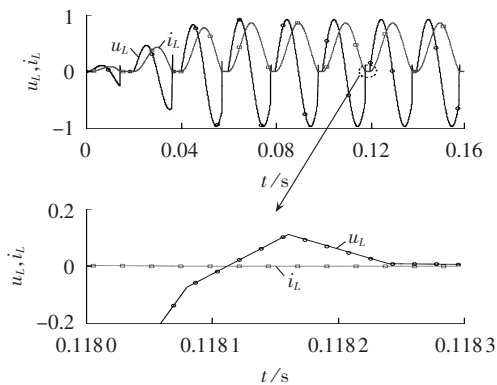


图 11 发生数值振荡时的电感电压 u_L 和电感电流 i_L (R_{snb} 、 C_{snb} 未经优化, $\Delta t = 80 \mu s$)
Fig.11 Waveforms of u_L and i_L when numerical oscillation occurs (initial R_{snb} and C_{snb} , $\Delta t = 80 \mu s$)

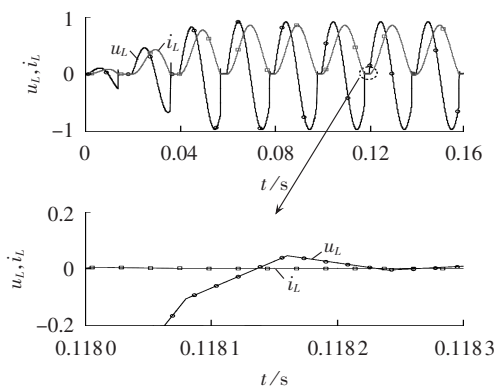


图 12 发生数值振荡时的电感电压 u_L 和电感电流 i_L (R_{snb} 、 C_{snb} 经过优化, $\Delta t=80\text{ }\mu\text{s}$)

Fig.12 Waveforms of u_L and i_L when numerical oscillation occurs (optimizational R_{snb} and C_{snb} , $\Delta t=80\text{ }\mu\text{s}$)

5 优化结果数据分析

为了更加清晰地观察 RC 阻尼电路对数值振荡抑制的效果,更加直观地对比不同步长下、不同 R_{snb} 和 C_{snb} 取值下的抑制效果的优劣,将先前所有关于 RL 电路的仿真结果进行汇总,结果如表 1 所示。表 1 中,算例 1 和算例 2 均投入 RC 阻尼电路来对数值振荡进行抑制且均未启用 PSCAD 自带振荡抑制功能,区别在于算例 1 中 R_{snb} 和 C_{snb} 未经优化,算例 2 中 R_{snb} 和 C_{snb} 经过优化;算例 3 和算例 4 均不投入 RC 阻尼电路,区别在于算例 3 未启用 PSCAD 自带振荡抑制功能而算例 4 启用了该功能,故不涉及 RC 优化的问题。

表 1 不同情况下的 RC 阻尼电路对数值振荡的抑制效果比较

Table 1 Comparison of numerical oscillation depression effect by RC circuit among different conditions

仿真步	SUM				R_{sh}/Ω		$C_{\text{sh}}/\mu\text{F}$	
长/ μs	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4	算例 1	算例 2	算例 1	算例 2
20	682	16.5	6417	0.00172	5000	10240	0.02	19830
80	267.62	60	4372	0.165	5000	5010	0.02	20.39

注:算例 2 启用 Simplex 于第 63 次迭代至最优解;算例 1、3、4 均未启用 Simplex。

在步长不变的情况下,通过对比算例 1、算例 2、算例 3 和算例 4 的量化函数可知,当关闭 PSCAD 内部自带的插值功能后,数值振荡的确发生了,RC 阻尼电路的引入也确实起到了一定的抑制效果。进一步对比算例 1 和算例 2 的具体数据可以发现,通过 optimum run 模块,运用 Simplex 优化算法对 R_{snb} 、 C_{snb} 的具体取值进行优化,量化函数 SUM 的值有了明显降低,即数值振荡抑制的效果得到了大幅度的优化。

通过对比算例 3 在 2 个不同仿真步长下的结果,可以发现,对应着 $20\text{ }\mu\text{s}$ 步长的仿真量化函数值

SUM₂₀ 比对应着 $80\text{ }\mu\text{s}$ 仿真步长的量化函数值 SUM₈₀ 增加了 46.7%,但 SUM₂₀ 对应点的个数 n_{20} 是 SUM₈₀ 对应点的个数 n_{80} 的 4 倍,这说明对应着 $20\text{ }\mu\text{s}$ 步长的每个仿真节点的电感电压要远小于对应着 $80\text{ }\mu\text{s}$ 步长的每个仿真节点的电感电压,即随着仿真步长的减小,数值振荡的剧烈程度是显著下降的。再进一步观察算例 2 和算例 3 的仿真结果可以发现:当 R_{snb} 、 C_{snb} 的值经过优化之后,量化函数的值 SUM₂₀ 甚至比 SUM₈₀ 还要小。这说明仿真步长的减小,可以进一步提升 RC 阻尼电路对于数值振荡的优化效果。

6 结论

数值振荡是电磁暂态仿真中一个较为普遍的问题,本文从机理上分析了无插值功能仿真平台中数值振荡问题的本质,针对 RC 阻尼电路抑制数值振荡时初值问题选取和参数优化问题展开了研究,得到如下结论:

- (1)应用梯形积分法则对储能元件 L 以及 RC 电路进行戴维南等效变换,通过分析仿真步长 Δt ,开关二值电阻 R_{on} 、 R_{off} 以及阻尼电路参数之间的数值关系,设计了阻尼电路参数的初值;
- (2)采用 Simplex 算法与本文提出的量化函数相结合,对 R_{snb} 、 C_{snb} 的取值进行了进一步优化;
- (3)在 PSCAD 中搭建 RL 测试电路,进行了多工况的测试,验证了经过优化的 RC 阻尼电路对数值振荡抑制的有效性,为阻尼电路的进一步研究奠定了基础;

(4)仿真发现,数值振荡现象与仿真步长有着紧密的关系,在小步长的情况下,RC 电路对数值振荡抑制的效果会更加理想,这也为解决实时仿真中数值振荡问题提供了一个可行、可靠的新途径。

参考文献:

[1] MAHSEREDJIAN J, LEFEBVRE S, MUKHEDKAR D. Power converter simulation module connected to EMTF [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 2(6): 501-510.

[2] 刘文焯, 汤涌, 侯俊贤, 等. 考虑任意重事件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.

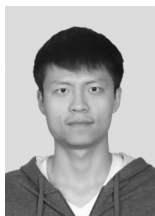
[3] 张瑛, 王胜辉, 袁宏. 电力系统仿真计算中的数值振荡问题[J]. 东北电力技术, 1999(4): 11-13.

ZHANG Ying, WANG Shenghui, YUAN Hong. Numerical oscillation in power system simulation[J]. Northeast Electric Power Technology, 1999(4): 11-13.

[4] 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]. 中国电机工程学报, 2010, 25(6): 83-88.

- WANG Chengshan, LI Peng, HUANG Bibin, et al. An interpolation algorithm for time-domain simulation of power electronics circuit considering multiple switching events [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 25(6): 83-88.
- [5] 王毅, 刘百芬, 章华, 等. 消除电力系统故障仿真中数值振荡的方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(5): 128-130.
- WANG Yi, LIU Baifen, ZHANG Hua, et al. Study of eliminating numerical oscillations in power system simulation [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24(5): 128-130.
- [6] 魏亮, 王渝红, 李兴源, 等. 高压直流输电送端孤岛运行附加频率控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 143-148.
- WEI Liang, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Progresses on algorithm of electromagnetic transient simulation for electric power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 143-148.
- [7] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 多馈入直流输电系统谐波交互影响分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 105-110.
- YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Harmonic interaction analysis for multi-infeed HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 105-110.
- [8] 江斌开, 王志新, 陆斌锋, 等. 基于P-DPC的多端直流输电控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 11-16.
- JIANG Binkai, WANG Zhixin, LU Binfeng, et al. MTDC converter control based on P-DPC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 11-16.
- [9] 商莹, 于玉铭, 邹振宇, 等. 非线性电路暂态仿真中消除数值振荡的改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 142-146.
- SHANG Ying, YU Yuming, ZOU Zhenyu, et al. An advanced method of non-linear circuit eliminating numerical oscillations in electromagnetic transient simulation [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 142-146.
- [10] WATSON N, ARRILLAGA J. Power systems electromagnetic transients simulation [M]. London, UK: IET Press, 2003: 221-230.
- [11] MARTI J R, LIN Jiming. Suppression of numerical oscillation in the EMTP [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 739-747.
- [12] 张益, 周群. 电力系统数字仿真中的数值振荡及对策[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(12): 1545-1549.
- ZHANG Yi, ZHOU Qun. Numerical oscillation and its countermeasures in power system simulation [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(12): 128-130.
- [13] 穆清, 周孝信, 王祥旭, 等. 面向实时仿真的小步长开关误差分析和参数设置[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 121-129.
- MU Qing, ZHOU Xiaoxin, WANG Xiangxu, et al. Error analysis and parameters of switches in small step simulation for real-time simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 121-129.
- [14] 许建中, 赵成勇, 刘文静. 超大规模 MMC 电磁暂态仿真提速模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 114-120.
- XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, LIU Wenjing. Accelerated model of ultra-large scale MMC in electromagnetic transient simulations [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 114-120.
- [15] GOLE A M, FILIZADEH S, MENZIES R W, et al. Optimization-enabled electromagnetic transient simulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 512-518.
- [16] GOLE A M, FILIZADEH S, WILSON P L. Inclusion of robustness into design using optimization-enabled transient simulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1991-1997.

作者简介:



姬煜轲

姬煜轲(1992—),男,河南平顶山人,硕士研究生,研究方向为直流输电(E-mail: jiyuke2014@qq.com);

许建中(1987—),男,山西临汾人,讲师,博士,研究方向为柔性直流输电(E-mail: xujianzhong2005@163.com);

徐延明(1990—),男,浙江嘉兴人,硕士生,研究方向为直流输电;

赵成勇(1964—),男,浙江丽水人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为柔性直流输电、高压直流输电。

Design of damping circuit for depressing numerical oscillation in interpolation-free simulation environment

Ji Yuke, XU Jianzhong, XU Yanming, ZHAO Chengyong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The numerical oscillation widely existing in the electromagnetic transient simulation is introduced and reconstructed, the solutions of existing electromagnetic transient programs to depressing it are listed, and their limitations are analyzed in the application condition, computational cost and programing complexity, based on which, a method of RC damping circuit design is proposed to depress the numerical oscillation in the interpolation-free simulation environment. Its effectiveness is analyzed by studying the mechanism of numerical oscillation and a quantitative function is proposed to describe the intensity of numerical oscillation, which is combined with the Simplex algorithm to optimize the configuration of RC circuit for enhancing the effect of oscillation suppression. The relations among simulation step length, numerical oscillation and RC damping circuit are analyzed based on the simulative results for different simulation step lengths.

Key words: numerical oscillation; electromagnetic transient; trapezoidal integral method; RC damping circuit; Simplex algorithm; quantitative function