

DTS 中长距离输电线路的电磁暂态仿真

戴仁昶¹, Kevin K. W. Chan², Laurence A. Snider², 张伯明¹

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2. 香港理工大学 电机工程系, 中国香港特别行政区)

ELECTROMAGNETIC TRANSIENT STABILITY SIMULATION OF LONG DISTANCE TRANSMISSION LINE IN DTS

DAI Ren-chang¹, Kevin K. W. Chan², Laurence A. Snider², ZHANG Bo-ming¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China)

ABSTRACT: In this paper a method for electromagnetic transient simulation of long distance high voltage alternating current (HVAC) power transmission line with uniform distributed parameters is put forward and the presented method is applied to dispatcher training simulator (DTS). To ensure the speed and accuracy of simulation an electromagnetic transient model for long distance HVAC transmission line with uniform distributed parameters is adopted and the hybrid transient simulation method in ordinary electromechanical transient model is still applied to the simulation of other parts of the power network. The results from simple calculation examples and practical examples show that the presented method is correct and effective.

KEY WORDS: electromagnetic transient stability; EMTP; distributed parameters

摘要: 提出了一种对高压交流长距离输电线路进行电磁暂态模拟的方法, 并将其用于调度员培训仿真器 (DTS) 中。为保证 DTS 仿真的精度和速度, 采用了对高压交流长距离均匀传输线采用电磁暂态模型、网络其他部分仍然采用常规机电暂态模型的混合暂态仿真方法。简单算例和实际算例结果证实了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 电磁暂态; EMTP; 分布参数

中图分类号: TM743 文献标识码: A

1 概述

为提高电力系统的可靠性, 常常将几个子系统互联起来, 使得系统规模和覆盖范围越来越大, 由于一次能源分布不均, 电厂和负荷中心往往相

距甚远, 尤其在国内, 一次能源主要集中在西部而负荷中心又主要在东部, 就必须采用高压远距离输电。虽然直流系统在远距离输电、异频联网、系统互联、跨海输电等方面有相当的优势, 但考虑到造价和灵活控制等方面的因素, 高压远距离交流输电和直流输电将会长期并存, 相互竞争。在一般的电力系统暂态稳定仿真中都是将高压交流输电线路等值为型电路, 这种等值电路计算简单, 且输电线路较短时有足够的精度, 因此得到广泛的应用; 但是对于长距离输电线路, 当其长度 $d > 0.01l$ (l 为一定频率下的波长) 时, 就需要采用分布参数模型来表达, 并且在系统出现故障或受到操作扰动时, 应考虑长距离输电线路的电磁暂态过程。

最常用的电磁暂态仿真工具是 EMTP 和 MATLAB Power System BlockSet, 它们都提供了电力系统大多数元件的精确表达, 但其精确性是以较低的效率为代价的, 并且很难与原有的机电暂态仿真程序进行数据交换从而有效地嵌入到调度员培训仿真器 (DTS) 中。因此, 为了均衡计算精度和效率之间的矛盾, 本文研究了交流均匀传输线的电磁暂态 (Electromagnetic Transient, EMT) 模型, 并与原有机电暂态仿真程序 (Transient Stability Program, TSP) 相结合, 利用 EMT 模型的精确性仿真长距离交流均匀传输线, 利用 TSP 的快速性仿真其余系统。为实现这一点, 就必须解决均匀传输线电磁暂态模型和与机电暂态程序接口两方面的问题。

基金项目: 国家重点基础研究专项经费 (G1998020313) 和香港政府大学研究基金 (PolyU5118/00E) 资助

2 长距离均匀传输线电磁暂态模型

2.1 概述

能精确描述分布参数均匀传输线电磁暂态过程的模型是波动方程，但对于实际电力系统，很难得到这一方程在时间域的解，因此，均匀传输线常常根据不同的条件被模拟为相应的等值电路^[1-3]。这些等值电路的共同特点都是利用了特性阻抗和传输时间常数两个特征量，而避免使用反射系数。如下将分别叙述单相传输线和多相传输线的电磁暂态模型。

2.2 单相传输线^[2]

对于单相传输线，其微分单元如图 1 所示。

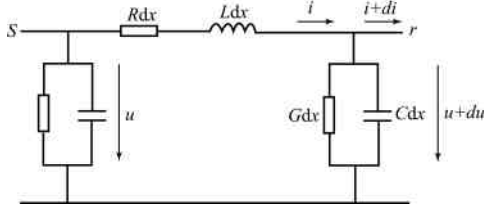


图 1 均匀传输线微分单元电路
Fig. 1 Differential unit circuit of single-phase transmission line

相应的电磁暂态过程的电压电流波动方程为：

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = ZY \quad (1)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = YZU \quad (2)$$

其中 $Z = R(\omega) + j\omega L(\omega)$ ， $Y = G(\omega) + j\omega C(\omega)$ ，都是频率的函数，但在电力系统研究的频率范围内， G, C 可以假设为常数。由于电路中的参数是频率的函数，需要采用卷积积分和部分因式展开^[4]，才能得到时间域的解，计算十分复杂和耗时，但当计算的时间步长 Δt 小于传输时间常数 t 时，可以通过如图 2 所示的解耦电路进行简化^[2]。

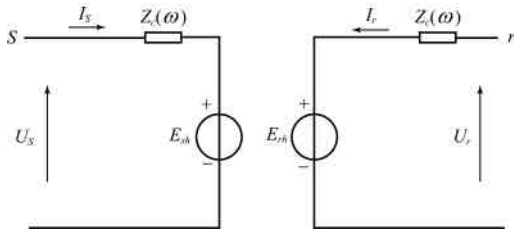


图 2 单相传输线的暂态模型

描述它的方程的复频域形式为：

$$E_{sh}(s) = (U_r(s) + Z_c(s)I_r(s))e^{-st} \quad (3)$$

$$E_{rh}(s) = (U_s(s) + Z_c(s)I_s(s))e^{-st} \quad (4)$$

进一步，对于无损线路，即 $R = G = 0$ 则

$Z_c(s) = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 为实数，从而：

$$e_{sh}(t) = u_r(t-t) + Z_c i_r(t-t), \quad (5)$$

$$e_{rh}(t) = u_s(t-t) + Z_c i_s(t-t) \quad (6)$$

当 $Rl \ll Z_c$ 时，上式有较高的精确度，对于完全换位传输线，也可以用上式近似求解。

对于有损耗线路，由于 $Z_c(s)$ 不是常数，求解 $E_{sh}(s)$ 和 $E_{rh}(s)$ 的原函数要用卷积积分，计算十分困难，可以采用集中电阻表达线路损耗，并与无损线路串联的方式进行简化求解，其模型如图 3 所示。

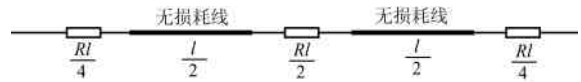


图 3 单相有损耗传输线的简化模型

Fig. 3 Sketch map of single-phase loss transmission line

进一步得到有损耗均匀传输线的等值电路如图 4 所示^[1]。

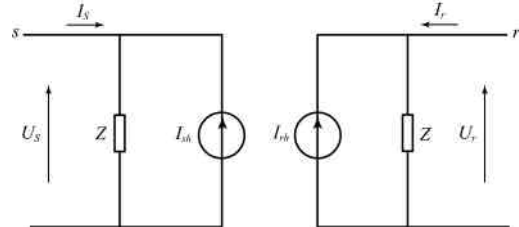


图 4 单相有损耗传输线电磁暂态模型

Fig. 4 Transient model of single-phase loss transmission line

$$I_{sh}(t) = \left(\frac{1+h}{2} \right) \left[\frac{1}{Z} U_r(t-t) + hi_r(t-t) \right] + \left(\frac{1-h}{2} \right) \left[\frac{1}{Z} U_s(t-t) + hi_s(t-t) \right] \quad (7)$$

$$I_{rh}(t) = \left(\frac{1+h}{2} \right) \left[\frac{1}{Z} U_s(t-t) + hi_s(t-t) \right] + \left(\frac{1-h}{2} \right) \left[\frac{1}{Z} U_r(t-t) + hi_r(t-t) \right] \quad (8)$$

式中 $Z = Z_c + \frac{R}{4}$ ； $h = \frac{Z_c - \frac{R}{4}}{Z_c + \frac{R}{4}}$ ； $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ；

$t = l\sqrt{LC}$ 。

2.3 多相传输线

实际电力系统中的传输线都是多相线。由于多相线相与相之间，相与地之间的电容和电感相互耦合，因此不能将图 4 的模型直接推广到多相线，此时，只能通过变换矩阵求出解耦后的模态，以及相应的特征阻抗和传播常数，再利用 2.1 节中单相线的求解方法进行计算^[4]，由于篇幅有限，具体方法不再赘述。对于多回线或带地线的传输线也可以类似

求解。

3 EMT 和 TSP 的相互等值

在均匀传输线的电磁暂态模型下，描述它的电量都是非正弦的时间的函数。而机电暂态稳定计算中，则假定各电量为一定频率下的正弦函数并用相应的相量来表达。因此，要将电磁暂态模型下的均匀传输线与机电暂态仿真程序结合起来，必须建立 EMT 和 TSP 之间的接口以协调时域和频域变量。

电磁暂态 (EMT) 模型下的均匀传输线与系统其余部分 (TSP) 之间的关系如图 5 所示。



图 5 TSP 与 EMT 的关系示意图

Fig. 5 The relationship between EMT and TSP

其中，系统一为电磁暂态 (EMT) 模型下的均匀传输线，系统二为其余部分系统。如图 5 所示，在电磁暂态模型下，各电量都是时间的函数，诸如分界母线的电流 $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ 和分界母线上的电压 $u_a(t), u_b(t), u_c(t)$ 都是畸变的非正弦波，不能用相量来表达。而 TSP 计算时采用的恰恰是相量，因此应将 EMT 计算出来的时域量转变为频域相量作为 TSP 的输入，而 TSP 计算出来的频域量再转换为时域量作为 EMT 的输入，如此反复迭代直到分界母线电压收敛，然后进行下一时步的仿真计算。

均匀传输线的传输时间常数远远小于 TSP 的仿真时间步长，因此为加快计算速度必须采用不同的时间步长来进行协调，如图 6 所示。

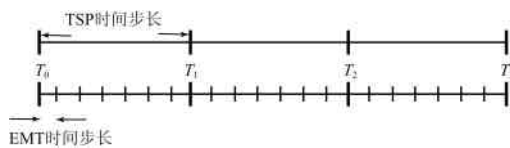


图 6 TSP 与 EMT 的积分逻辑

Fig. 6 The integral logic of TSP and EMT

即，EMT 每积分 n 步，TSP 才积分 1 步，在这 n 步中相应的 TSP 值由插值得到。

(1) EMT 对 TSP 的等值

EMT 的计算结果是时域非工频非正弦量 $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ ，要转换为 TSP 的频域工频正弦注入量 $I \angle \varphi$ 是关键，精确的做法是将 $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ 傅立叶展开为

$$i_a(t) = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \sin k\omega t + b_k \cos k\omega t) \quad (9)$$

b, c 同理，然后分别将 a, b, c 三相各谐波分量

i_{ak}, i_{bk}, i_{ck} 转换为该频率下的正、负、零序分量作为 TSP 的注入量，相应地 TSP 建立各倍频下的参数模型，然后依次求解并叠加。很明显，这种方法非常烦琐且 TSP 的各倍频参数很难得到。因此有必要作如下简化：

将边界母线向交流系统侧外推一层^[5]，使边界母线上的电压畸变不至于太严重，取较小的 TSP 时步，并假设 EMT 与 TSP 交接时刻 (T_1, T_2, T_3 等时刻) 的时域量满足正弦规律。根据上述假设，利用最小二乘进行曲线拟合得到与 $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ 相对应的等值矢量 $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ ，以 $i_a(t)$ 为例，令

$$E = \min \sum_{k=1}^n (I_m \sin(\omega t_k + \mathbf{j} I) - i_a(t_k))^2 \quad (10)$$

求解方程(10)得出 $\dot{I}_a = I_m \angle \mathbf{j} I$ ，同理可以得到 \dot{I}_b, \dot{I}_c 。a, b, c 三相的电流得到后，可以计算出相应的正、负、零序分量，从而得到 EMT 对 TSP 的等值注入电流。如图 7 所示。

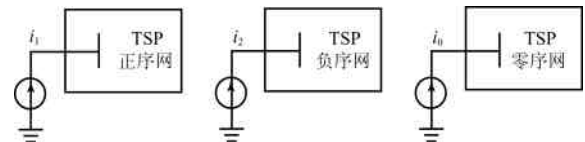


图 7 等值电流源

Fig. 7 Equivalent current source of EMT to TSP

(2) TSP 对 EMT 的等值

TSP 对 EMT 的等值相对简单，当采用交替迭代法求解时，连接电磁暂态模型的母线电压对电磁暂态模型的等值为幅值和相角变化的正弦电压源，这些母线上的三相电压 $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 在交接时刻 (T_1, T_2, T_3 等时刻) 是已知的，在交接时刻之间的其他时刻 t 的电压 $\dot{U}_a(t), \dot{U}_b(t), \dot{U}_c(t)$ 可以通过线性插值得到，则在任意时刻 t 可将 TSP 等效为如下正弦电压源

$$\begin{aligned} u_a(t) &= U_a(t) \sin(\omega t + \mathbf{j} \varphi_a) \\ u_b(t) &= U_b(t) \sin(\omega t + \mathbf{j} \varphi_b) \\ u_c(t) &= U_c(t) \sin(\omega t + \mathbf{j} \varphi_c) \end{aligned}$$

然后，将其等值为相应的电压源，再利用模相变换方法将三相传输线解耦后分别计算它们的电磁暂态过程，最后，利用模相变换逆矩阵得到三相的电量。

4 算例分析

为校验该方法的有效性，本节首先对一个简单系统进行模拟，并与 EMTP 和 MATLAB Power System BlockSet 的结果进行比较。然后对实际系统中的一条长距离传输线采用电磁暂态模型进行仿

真。

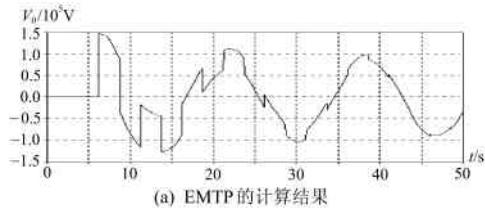
(1) 单相测试系统

测试系统的接线如图 8 所示。

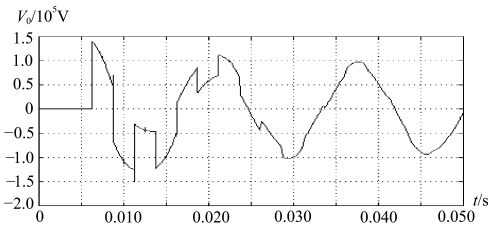


图 8 简单测试系统的接线图
Fig. 8 Test system 1

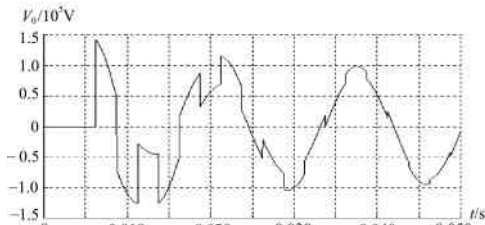
系统参数为 $V_s(t)=81.33\sin(2\pi ft)\text{kV}$, $f=60\text{Hz}$, $R_0=0.2568\Omega/\text{km}$, $L_0=2.0\times 10^{-3}\text{H}/\text{km}$, $C_0=8.6\times 10^{-9}\text{F}/\text{km}$, $R_s=10.0\Omega$, $Length=300\text{km}$ 。开关初始状态为开, 经 0.005 s 合上, 传输线末端电压 V_0 的输出结果如图 9 所示:



(a) EMTP 的计算结果



(b) MATLAB 的计算结果



(c) 本文的计算结果

图 9 传输线末端开路电压 V_0

Fig. 9 Output voltage V_0

(2) 实际系统

吉林省网松东乙线分布参数为

$R_l=0.01273\Omega/\text{km}$, $L_0=0.9337\times 10^{-3}\text{H}/\text{km}$, $C_0=12.74\times 10^{-9}\text{F}/\text{km}$, $Length=155.224\text{km}$ 。

设系统 0.005 s 时在松东甲线中点发生三相短路, 则松东乙线首端 A 相电流如图 10 所示。

为便于与常规 π 型等值电路模型下的结果进行比较, 图中虚线所示为 π 型等值电路模型下松东乙线首端 A 相电流的变化曲线, 实线为电磁暂态模型下计算结果。从图中可以看出, 在扰动初期, 考虑电磁暂态过程影响和 π 型等值电路模型下的电流变化曲线有很大的不同, 经过数十毫秒后, 二者趋于

一致, 并基本满足正弦变化规律。

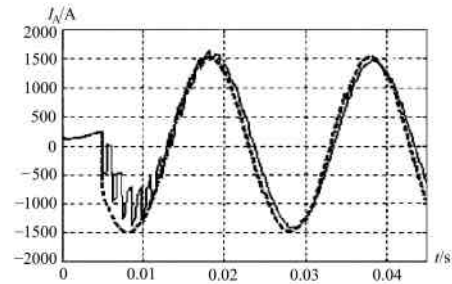


图 10 松东乙线首端 A 相电流

Fig. 10 Current in phase A of a certain transmission line

5 结论

本文建立了电磁暂态和机电暂态的综合仿真方法, 利用这种方法可以兼顾 EMT 模型的精确性和机电暂态仿真的快速性。在本文的最后, 利用测试系统和实际系统针对长距离均匀传输线的电磁暂态模型检验了该方法的有效性, 为对 HVDC 和 FACTS 设备的电磁暂态稳定研究奠定了一定的基础。

参考文献

- [1] Dommel H . Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiple networks[J] . IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , 1969 , 88(4) : 388-399 .
- [2] Marti J R , Marti L , Dommel H W . Transmission line models for steady-state and transients analysis[C] . Proceedings of Joint Inter-national Power Conference APT , 1993 : 744-750 .
- [3] Marti J R . Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation[J] . IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , 1982 , PAS-101(1) : 147-155 .
- [4] Dommel H W . EMTP theory book[M] . Microtran Power System Analysis Corporation , Vancouver , British Columbia , 1992 .
- [5] Reeve J , Adapa R . A new approach to dynamic analysis of AC networks incorporating detailed modeling of DC systems , part I : principles and implementation[J] . IEEE Transactions On Power Delivery , 1988 , 3(4) : 2005-2011 .

收稿日期: 2001-10-23。

作者简介:

戴仁昶 (1974-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统动态稳定分析和故障计算;

Kevin K. W. Chan, 男, 博士, 讲师, 主要研究领域为电力系统稳定和安全评估, 电力系统实时仿真以及分布并行计算;

Laurence A. Snider, 男, 博士, 高级讲师, 主要研究领域为电力系统实时仿真, 电力电子应用, 电能质量以及绝缘技术;

张伯明 (1948-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行、分析和控制的研究和教学工作。

(编辑 杨天和)