

轻型高压直流输电 HVDC-VSC 动态建模与仿真

刘志坚, 王永治, 束洪春

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 引入时变动态相量法对高压直流系统建模, 可以直接从系统时域微分方程建立相应的动态相量模型. 通过截取相关变量对应的时变傅立叶级数的重要项对系统模型进行简化, 从而达到提高仿真速度的目的. 通过对一个简单的 HVDC-VSC (电压源换流) 系统建模, 介绍了时变动态相量法的建模过程, 最后给出了具体的算例. 证明了时变动态相量法在电力系统建模中是精确而有效的.

关键词: 动态相量; 傅立叶变换; 高压直流输电

中图分类号: TM 743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X (2007) 05-0082-05

Dynamic Modeling and Simulation of Light HVDC-VSC

LU Zhi-jian, WANG Yong-zhi, SHU Hong-chun

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051)

Abstract A newly developed method-dynamic phase method is presented. Dynamic phase models can be obtained directly, which is a state-space models from the differential equation. Using the method, much time of emulation can be saved. Through typical test examples of HVDC-VSC system and their emulation result, the process of dynamic phase models is introduced and the effectiveness and accuracy of this model are verified.

Key words dynamic phasors, Fourier transform, high-voltage direct current transmission

0 引言

时域微分方程虽然可以精确描述晶闸管、GTO 的开关的动态特性, 但其引起系统变拓扑、非线性的特性给分析带来困难. 电子换流装置具有快速可控性及其引起的快速暂态过程, 如果采用只考虑一般特性的准稳态模型, 会给分析带来较大误差. 采用时变动态相量法, 对这类器件进行必要的化简则可使建模相对容易, 利于问题的解决. 首次采用动态相量法对由 GTO (门极可关断晶闸管) 和 VSC 组成的 HVDC 系统进行建模. 证明了该方法的有效性和正确性.

1 时变动态相量法

动态相量的概念在 1991 年首次提出^[1], 1994 年引入到电力系统分析中^[2]. 根据研究需要只考虑系统中占主导的频率分量, 把电力系统的电压电流描述为“时变傅立叶级数”. 这是动态相量法的基础.

时域中, 表示为 $f_r(\tau)$ 的波形在任意 $\tau \in (t-T, t)$ 中, 用时变傅立叶级数可表示为:

$$f_r(\tau) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_k(t) e^{k\omega_s \tau} \quad (1)$$

式子中 $\omega_s = 2\pi/T$, $C_k(t)$ 是时变傅立叶系数, 在动态相量中定义为相. 不同次数 k 的傅立叶系数称之为第 k 相. 可由下式得到:

收稿日期: 2007-04-02

第一作者简介: 刘志坚 (1975-), 男, 讲师. 主要研究方向: FACTS 技术, 电力系统稳定, 高压直流输电技术.

E-mail: alzj0637@sina.com

$$C_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(\tau) e^{jk\omega_s \tau} d\tau = \langle f \rangle_k(t) \quad k = 0 \pm 1 \pm 2 \dots \quad (2)$$

它是时间 t 的函数, 并且当 $k \geq 0$ 和 $k \leq 0$ 时 C_k 和 C_{-k} 是共轭复数. 在实际应用中, 根据研究的需要用占系统主导频率的“相”近似模拟相关器件的特性, 达到简化模型的目的. 将这些相量作为状态变量, 可得到系统新的状态空间模型.

为叙述简便, 用 $\langle f \rangle_k(t)$ 表示定积分 $\frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(\tau) e^{jk\omega_s \tau} d\tau$ 略去时间下表 t 记为 $\langle f \rangle_k$.

动态相量法的 2 个主要特性: 乘积特性和微分特性

$x(t)$ 和 $y(t)$ 是 2 个时域信号, 它们的乘积的动态相量为:

$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \quad (3)$$

对于时域信号 $x(t)$ 的第 k 阶动态相量, 它的微分形式为:

$$\frac{dX_k}{dt}(t) = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k + jk\omega_s X_k(t) \quad (4)$$

2 HVDC-VSC 的动态相量法建模

2.1 HVDC-VSC 系统

一个典型的 HVDC-VSC 系统由整流器和逆变器通过直流线路连接而成. 其等效简化电路如图 1 所示.

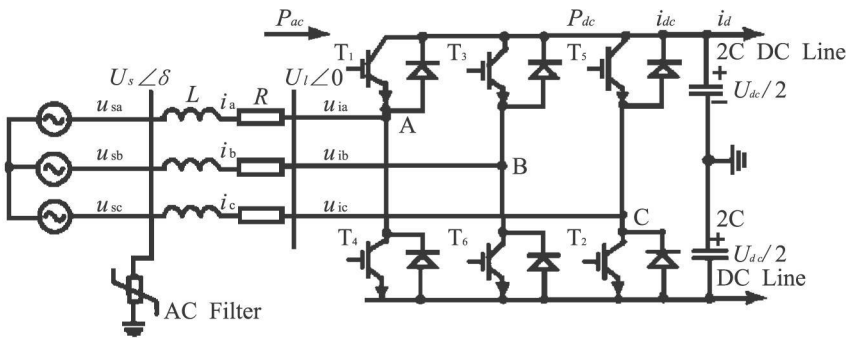


图1 HVDC-VSC 一端的电路模型
Fig.1 HVDC-VSC One Terminal Model

其中 u_{ia} 和 u_{ib} , u_{ic} 为整流侧交流母线三相电压; L 为换相电感; $T_1 \sim T_6$ 是自换相元件. 在分析中作如下假设:

- (1) 不考虑谐波及中性点偏移的影响, 交流系统是三相平衡, 且频率单一;
- (2) 不考虑直流电流的波纹, 即直流电流是恒流;
- (3) 不考虑直流线路的分布参数特性;
- (4) 换流器 (整流器, 逆变器) 等间隔依次轮流触发, 相隔 $\frac{1}{6}$ 周期.

2.2 HVDC 时域动态模型

以整流侧为例, 设交流侧电压三相平衡, 相电压瞬时值的表达式为:

$$\left. \begin{aligned} v_a(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}}E \cos(\omega t + \alpha) \\ v_b(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}}E \cos(\omega t + \alpha - 120^\circ) \\ v_c(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}}E \cos(\omega t + \alpha + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

α 相初相角取时间坐标零点, α 为晶闸管触发角, E 为线电压有效值. 对包含换流器的电路, 可表示为特殊的线性电路, 对应每种不同的阀导通组合, 可处理为不同的线性电路. 在 HVDC 中, 每个阀的导通状态可分为导通、截止和换相. 因此, 正确分析阀的状态, 并得出相关的动态相量是建模的关键.

设 S_{ua} 、 S_{ub} 和 S_{uc} 是电压开关函数, S_{ia} 、 S_{ib} 和 S_{ic} 是电流开关函数. 根据调制理论, 换流桥直流侧的电压和交流侧的三相电流可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} v_{dc}(t) &= S_{ua}(t) \cdot v_a + S_{ub}(t) \cdot v_b + S_{uc}(t) \cdot v_c \\ i_a(t) &= S_{ia}(t) \cdot i_{dc}(t) \\ i_b(t) &= S_{ib}(t) \cdot i_{dc}(t) \\ i_c(t) &= S_{ic}(t) \cdot i_{dc}(t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据动态相量的特性, 交流侧只考虑其中的基频分量, 直流侧只考虑其中的直流分量. 得

$$\left. \begin{aligned} V_{dc0} &= \langle V_{dc} \rangle_0 = \frac{1}{4} \left[S_{ua1} \cdot \bar{V}_{a1} + S_{ua1} \cdot V_{a1} + S_{ub1} \cdot \bar{V}_{b1} + S_{ub1} \cdot V_{b1} + S_{uc1} \cdot \bar{V}_{c1} + S_{uc1} \cdot V_{c1} \right] \\ I_{a1} &= S_{ia1} \cdot I_{dc0} \\ I_{b1} &= S_{ib1} \cdot I_{dc0} \\ I_{c1} &= S_{ic1} \cdot I_{dc0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

2.3 开关函数的分析

当换相角较小时可以忽略, 电压、电流的开关函数的波形相同. 此时 a 相的开关函数如图 2 所示.

当换相角较小时, 由图 1 根据傅立叶分析, a 相电流、电压开关函数的表达式为:

$$S_a(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\cos\omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \dots \right] \quad (8)$$

b 、 c 相以此类似, 分别滞后 $S_a(t)$ 120° . 时间坐标零点取图 2 中 $t=0$

α 、 b 、 c 三相电压、电流开关函数的基频分量为

$$\left. \begin{aligned} S_{a1} &= \frac{2\sqrt{\pi}}{3} \\ S_{b1} &= \frac{2\sqrt{\pi}}{3} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \\ S_{c1} &= \frac{2\sqrt{\pi}}{3} e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

以 a 相为例分析, 则 a 相的电压基频分量为

$$V_{a1} = \sqrt{\frac{2}{3}}E e^{j\alpha} \quad (10)$$

则 b 、 c 相的电压基频分量为

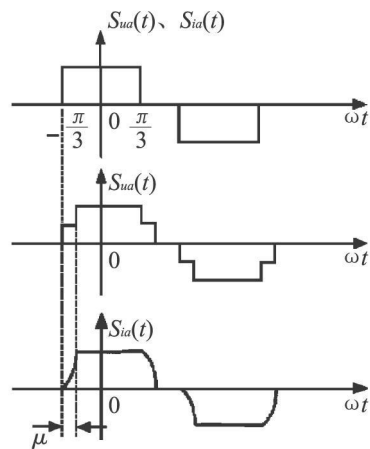


图2 A相开关函数 S_{ua} 、 S_{ia} 状态示意图
Fig.2 Waveform of A Phase Switching Function S_{ua} 、 S_{ia}

$$\begin{aligned} V_{b1} &= \sqrt{\frac{2}{3}} E e^{j(\alpha - \frac{2}{3}\pi)} \\ V_{c1} &= \sqrt{\frac{2}{3}} E e^{j(\alpha + \frac{2}{3}\pi)} \end{aligned} \tag{11}$$

将式 (13), (14), (15) 代入式 (11) 可得 V_{d0} (16) 式和 I_{a1} 、 I_{b1} 、 I_{c1}

$$\begin{aligned} V_{d0} &= \frac{1}{4} \left[\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{3}} e^{-j\pi} + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{3}} e^{j\pi} + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \cdot \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{3}} e^{-j(\alpha - \frac{2}{3}\pi)} + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{3}} e^{j(\alpha - \frac{2\pi}{3})} + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{3}} e^{-j(\alpha + \frac{2}{3}\pi)} + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{3}} e^{-j(\alpha + \frac{2}{3}\pi)} \right] = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos\alpha \\ \left. \begin{aligned} I_{a1} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_{dc0} \\ I_{b1} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \cdot I_{dc0} \\ I_{c1} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot I_{dc0} \end{aligned} \right\} \tag{12} \end{aligned}$$

当换相角较大时就不能忽略, 其分析过程如上一致.

对于单条直流线路部分有

$$(2L_d) \frac{di_d}{dt} + r_d i_d = v_{dRec} - v_{dInc} \tag{13}$$

L_d 是平波电抗, r_d 直流线路阻抗. 改写成相量形式

$$\frac{dI_0}{dt} = \left[V_{dRec} - V_{dInc} - r_d I_{d0} \right] / 2L_d \tag{14}$$

VSC 的控制原理是将 2 个直流电容的储能交替转换, 因此模型中需要相同的 2 条直流输电线路, 这与常规的 HVDC 以 1 条输电线路和大地作为回路有区别.

最后整理得 HVDC VSC 完整的动态相量模型. 由于交流侧三相对称, 其三相模型可用 A 相来表示. 在正常触发情况下可用开关函数 S_{av} 和 S_{ai} 来表示这样可以简化模型.

对于逆变侧的分析和整流侧的分析是一致的. 最后整理的 HVDC 完整的动态相量模型.

$$\left\{ \begin{aligned} V_{d0} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos\alpha \\ I_{a1} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_{dc0} \\ I_{b1} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \cdot I_{dc0} \\ I_{c1} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot I_{dc0} \end{aligned} \right. \tag{15}$$

3 算例仿真

仿真系统为图 3 所示一简单的单桥六脉冲 HVDC VSC 系统. 左边部分是交流送端, 右边是受端, $V_{dRec} = 62.5\text{kV}$, $\omega = 2\pi \cdot 60$ 中间是直流输电线路 DC 电压 110kV, 直流电容 $500\mu\text{F}$, $r_d = 0.5\Omega$, $L_d = 0.1\text{H}$, 平波电抗 $L_r = 0.005\text{H}$.

控制系统参数为: 整流侧为简单的 PI 定电流调节; 逆变侧为定电压调节. 应用推导的动态相量模型,

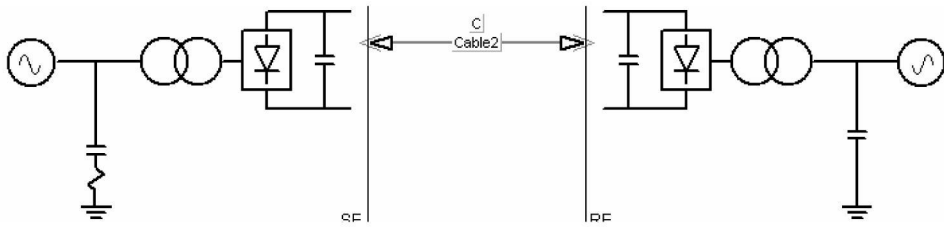


图3 简单单桥六脉冲HVDC输电系统

Fig.3 A Simple 6-pulse HVDC Transmission System

在 MATLAB的 Simulink 中建模, 实现简单的 HVDC VSC 系统仿真.

图 4对正常运行情况下, 动态相量模型和 EMTP 模型进行了对比.

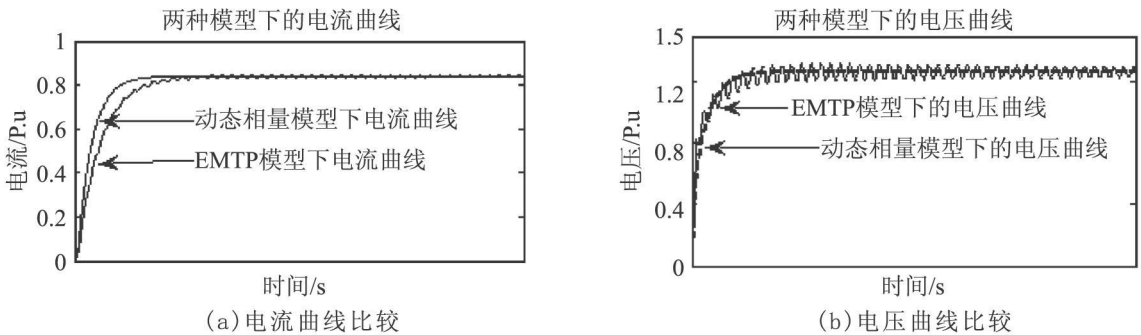


图4 算例电流、电压仿真结果

Fig.4 Computer Test Result of DC Current And Voltage

从上面的对比中, 我们可以看到详细时域模型下的 EMTP电压电流的“包络线”的“中线”和动态相量模型下的电压电流非常近似. 在某些情况下, 动态相量模型可以替代详细的时域模型进行研究.

为了验证动态相量模型的有效性, 对算例所示系统进行了典型的直流线路接地故障, 故障点在线路 90% 处, 并将结果和 EMTP 仿真结果比较.

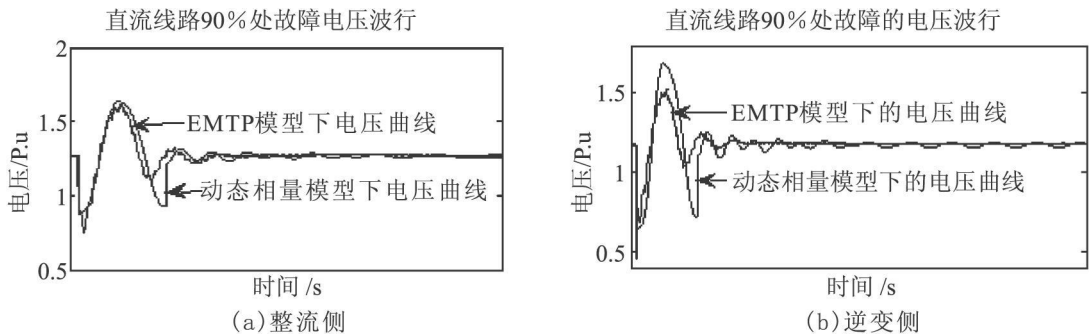


图5 发生扰动的仿真结果

Fig.5 Computer Test Under Fault Of HVDC Line

从图 5中, 可以看到在高压直流线路上发生扰动时, 动态相量模型的仿真结果和 EMTP模型下的结果吻合, 可以描述各个变量的动态变化过程, 图中曲线不重合的地方是动态相量模型对傅立叶时变系数截取不同的结果. 动态相量模型很好地反映了电压变化的趋势, 而且有必要的工程精度, 同时也保持了系统的非线性, 正确地反映了系统的动态过程.

(下转第 90页)

5 结 语

1) 底流流态为淹没射流和淹没水跃的混合流态, 沿主流方向可分为淹没射流区、冲击区、附壁射流区, 并在主流的上下方分别出现了面部漩涡和底部漩涡。

2) 在入池能量不变的情况下, 随着水流入池角度的增大, 跌坎型底流消能工消力池内的临底流速和底板时均动水压力也相应增大; 随着坎深的增大, 消力池底板最大临底流速降低, 临底流速梯度减小, 底板时均动水压力减小。

3) 跌坎型底流消能工能有效改善消力池内的水力学指标, 保证底流消能流态和较高的消能率, 坎深和入池角度存在最优组合, 对于坎深和入池角度之间最优关系的确定, 还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张功育, 汤健, 王海军, 等. 跌坎式底流消能工的消能机理分析与研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2005, 6: 43-45.
- [2] 孙双科, 柳海涛, 夏庆福, 王晓松. 跌坎型底流消力池水力特性与优化研究 [J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1118-1193.
- [3] 曾雄辉, 程浩, 李延农. 向家坝水电站泄洪消能方案构思与初步研究 [J]. 水力发电, 2004(4): 21-23.
- [4] 张建民, 王玉蓉, 杨永全, 等. 水平多股淹没射流水力特性及消能分析 [J]. 水科学进展, 2005, 1: 18-22.
- [5] 余常昭. 紊动射流 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [6] 吴持恭. 水力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.

(上接第 86 页)

4 结 论

本文对 HVDC 输电系统利用动态相量法建模进行了研究, 并对比了仿真结果, 可得出如下结论:

- 1) HVDC 的动态相量模型可以很好地反映模型的主要动态特性;
- 2) 推导时需要根据研究需要调整傅立叶系数的截取, 以便在系统模型的复杂程度和仿真精度之间取舍;
- 3) 动态相量法建模是一种比时域模型简单易用, 计算速度快的准确模型;
- 4) 动态相量建模还需要解决和其他电磁暂态模型和机电暂态模型的接口问题, 这样才能为电力系统稳定和暂态分析提供优良的工具。

参考文献:

- [1] 戚庆茹, 焦连伟. 高压直流输电动态相量建模与仿真 [J]. 中国机电工程学报, 2003(12): 28-32.
- [2] Vijay K. Sood(加). 高压直流输电与柔性交流输电控制装置 - 静止换流器在电力系统中的应用 [M]. 徐政译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 李维波. MATLAB 在电气工程中的应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [4] 王锡凡. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 何瑞文, 蔡泽祥. 基于傅立叶系数的动态相量建模 [J]. 机电工程学报, 2004(33): 76-81.
- [6] 田芳. 含晶闸管元件的电力系统小干扰稳定分析: [学位论文] [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.
- [7] 何瑞文. 基于动态相量理论的 TCSC 建模及其在电力系统动态分析中的应用: [学位论文] [D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [8] 戚庆茹. 动态相量理论在现代电力系统仿真中的应用: [学位论文] [D]. 北京: 清华大学, 2004.