

高压直流建模研究的相关问题

毛晓明^{1,2}, 张 尧², 张 艳¹

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090;

2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 总结了电力系统稳定性分析中高压直流输电系统的一般性建模方法; 讨论了直流模型的分类及模型的适用性; 分析了常用商用电力系统分析软件中的直流模型, 建议开发商适当增加内置直流模型与用户自定义模块间的接口, 以拓展直流模型的适用范围; 重点分析了基于采样数据建模方法和动态相量理论对直流换流器准稳模型的改进。认为采样数据建模方法建立了适合于电力系统次同步振荡研究的换流器小信号模型, 但不能用于电力系统暂态稳定仿真计算中; 动态相量法推导了换流器的大信号模型, 但仍不能正确反映换相失败现象和不对称工作条件下高压直流系统的动态行为。认为在大规模交直流电力系统的暂态稳定性研究中, 机电-电磁混合仿真思路较有潜力, 而其关键问题在于各种扰动下电磁暂态仿真范围的合理确定。

关键词: 高压直流; 建模; 采样数据法; 动态相量法

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0014-04

高压直流(HVDC)在远距离大容量输电和大区电网互联方面都得到了广泛应用^[1]。截至 2006 年, 我国已有 6 项高压直流工程投入运行, 规划中的直流工程多达 20 多项, 我国正逐步建立全世界最大的含有多馈入直流输电系统的互联电网。交直流混合电网中, 随着直流输电容量提高, 直流系统的运行控制特性对电网安全稳定运行所造成的影响程度和影响层面越来越突出。数字仿真模型能否准确反映直流系统的真实动态特性将直接影响仿真分析结果的可信度和由此所制定控制策略的正确性。

在此, 对高压直流建模领域最新的研究进展进行讨论, 重点分析在改进直流换流器准稳模型时所进行的工作, 指出现有成果的贡献和存在的主要问题, 并对进一步的工作进行展望。

1 一般方法及模型分类

电力系统稳定性分析中, 直流系统建模要求考虑换流器模型、交直流网络模型、交直流系统的接口和直流系统控制模型^[2]。一般方法是把交流和直流网络分别处理, 并通过换流器模型接口。交流网络一般采用表征正序基频分量的相量模型, 直流线路可用电阻、惯性环节或电磁暂态模型。通过对高压直流控制系统的描述, 直流系统最终等值为换流母线上的等值负荷, 交流系统则为直流线路提供等值电压源。由于换流器一般采取准稳模型, 文献[2]根据模型对直流线路和控制动态的仿真精确程度不同, 将直流模型分为简单模型、响应模型和详细模型。

简单模型将 HVDC 表示为换流站换流母线处注

入的恒定有功和无功功率, 或用静态换流器方程和直流控制的定电流、定熄弧角、定电压等功能效应表示, 不计直流控制的动态。该模型完全用代数方程表示, 交、直流系统的接口可按潮流分析的方式处理。

响应模型忽略直流线路和极控制的动态过程, 假定极控制瞬时完成, 用准稳态方程描述换流器, 用电阻表示直流线路, 用控制系统的总效果(在常见的直流控制方式间进行切换)而不是硬件的实际特性表示控制功能。其核心是构造控制模式的切换算法。

详细模型计及直流线路的动态效应; 用动态模型详细描述换流器的各种闭环控制, 考虑换流器的角度限制, 基于切换逻辑自动实现控制模式的转换; 采用换相电压幅值或逆变器熄弧角对换相失败作一般性预报。建立详细模型需对复杂的直流控制回路进行简化、分解和综合, 控制参数的设置较复杂, 给建模造成了一定困难。

2 模型的适用性

文献[3]通过实例讨论了直流换流器准稳模型的不足, 指出准稳模型在交流系统不对称故障期间不适用。目前, 电力系统中普遍使用的机电暂态仿真程序对交直流系统不对称故障期间的仿真计算是不严格和不精确的。假定换流站交流母线电压跌落到某值即发生换相失败, 交流系统故障切除后凭经验估计直流系统的恢复时间带有很大的主观随意性, 是不科学和不可靠的。交流系统故障时直流输电系统的动态响应特性, 必须在仿真过程中通过对直流输电系统及其控制器的行为精确仿真计算才能得出。

文献[4]进一步对直流模型的适用性进行了讨论, 主要结论有 3 点。

a. 简单模型既不考虑直流控制的动态,也不考虑其控制方式的切换,仅适用于扰动距离直流换流站较远的场合。

b. 响应模型能够反映直流系统的总体控制效果,适用于包括调制研究在内的绝大多数应用场合;由于模型依靠所构造的切换算法实现控制方式的转换,对直流系统复杂控制环节的描述不尽充分,故在研究大扰动后、直流系统换相失败或闭锁之后的恢复行为时精度不足。

c. 详细模型较好地反映了电力系统暂态过程中各种直流控制器之间的切换方式和直流系统稳定工作点的建立过程,适用于大扰动后、直流系统换相失败或闭锁之后的恢复行为研究,尤其是实际直流工程的控制设计。但其存在建模复杂的缺点;由于对换流器采取了准稳模型,详细模型仍不能准确模拟换流站附近不对称工作条件引起的直流系统动态行为,也不适用于换相失败研究。

上述研究成果有助于掌握直流建模的基本方法,认识换流器准稳模型的不足,并根据研究目的合理选择直流模型。

3 机电暂态仿真程序中的直流模型

国内较有影响的适用于大规模交直流电力系统机电暂态仿真研究的商用程序包括:美国 PTI 公司的 PSS/E^[5]、西门子公司的 NETOMAC^[6]、中国电力科学研究院的 BPA^①和 PSASP^②。除 NETOMAC 外,这些程序均提供了内置缺省的直流系统仿真模型。

NETOMAC 软件具有电磁-机电混合仿真功能,采用面向模块的仿真语言,提供了 80 种控制模块,用户可以根据需要自行搭建详细程度不同的直流模型,并可计及直流线路的详细动态^[6],具有非常开放的用户自定义功能。然而,利用 NETOMAC 搭建直流模型对程序使用者的要求较高,比较费时、费力。

PSS/E、PSASP 及 BPA 均提供了详细程度不同的 2 种内置缺省直流模型。它们的简化模型属于响应模型范畴,不考虑换流站各控制器的动态,采用一定的切换算法表征整个直流系统的控制效果。其详细模型则一般考虑了换流站基本控制环节的动态特性,包括电流控制、电压控制、熄弧角控制等。用户可调节主要的控制参数,如控制增益、时间常数等。

文献[2]指出逆变站的熄弧角(电压)控制和电流控制之间应设计一段具有正斜率的控制特性,否则可能导致直流控制不稳定,文献[4]的仿真结果证明了这一结论。然而无论简化或详细模型,PSASP(6.1 版)和 BPA(2.1 版)内置直流模型都不具有这一特性,笔者以为这是目前商用软件直流模型需要改进的问题之一。PSS/E 直流模型的极控制算法不详^[5],此处不作评论。

此外,目前世界范围内直流输电的控制系统还没有标准化。不同直流输电设备供应商所采用的直流控制系统不同;不同直流输电工程中的直流控制

器也不同。采用程序缺省的直流输电系统功能模块,通常并不能完全正确反映实际直流输电系统的特性^[3]。文献[4]采用安顺-肇庆直流工程制造商提供的直流模型与一种详细直流模型进行了仿真对比,分析结果正说明了这一点。所以,笔者认为,商用软件在提供比较详细的内置直流模型的同时,如果能够多提供一些用户自定义功能与模型内置模块间的接口,使用户能够更方便地加入特定的控制模块并修改控制切换逻辑,将为用户带来极大的方便,有效拓展直流模型的适用范围。

4 对换流器准稳模型的改进

上述商用软件的直流模型中,直流换流器均采用准稳模型。对准稳模型进行改进是当前直流建模的另一研究热点。其中,用采样-数据建模方法^[7-8]和动态相量法^[9-10]模拟换流器动态较有代表性。

换流器准稳模型是在三相交流电压对称、正弦,换流器本身运行对称、平衡,直流电流、电压平直的情况下,表征交流系统电压、功率与直流系统电压、电流、运行角度间关系的一组方程式^[3]。因模型导出基于上述假设条件,相应限制了模型的适用范围:只适用于低频段小扰动分析;仅在交流系统对称稳态运行时能给出正确仿真结果;不能反映换相失败。

4.1 采样-数据建模

针对换流器准稳模型只适用于低频段小扰动分析这一缺陷,文献[7-8]采用采样-数据建模方法建立了换流器的小信号线性化模型。根据直流系统的运行原理,文献[7-8]在 1 个工频周期中,对六脉动和十二脉动换流桥分别间隔 60° 和 30° 列写状态方程,每段考虑 1 次换相过程,详细计及了换相前、换相后和换相过程中开关动作对系统状态变量的影响,并将离散的状态方程连续化。

这种经连续化与线性化的高压直流换流器小信号模型考虑了晶闸管的开关时变特性,理论推导严格。对于六脉动换流桥,模型的适用频率范围可达 0~3 倍工频频率;对于十二脉动换流桥,则达 0~6 倍工频频率,具有高频有效性,可以进行含有换流站的交直流系统次同步振荡分析,解决了次同步振荡分析中换流器小信号模型不易建立的难题。

然而,由于线性化模型在大扰动时不能很好地反映系统复杂的动态特性;模型在换流器对称、平衡的情况下导出,所以不能用于暂态稳定仿真计算中。

4.2 动态相量建模

文献[9]首次将动态相量法引入直流换流器的建模中,并建立了换流器的大信号数学模型。

“动态相量”是在给定波形上的“滑动窗”基于时间的傅里叶级数^[9-10]。对于时域中以 T 为周期的函

① 中国电力科学研究院. BPA 暂态稳定程序用户手册(2.1 版). 北京, 2000.

② 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序基础数据库用户手册(6.1 版). 北京, 2001.

数 $x(\tau)$, 在区间 $\tau \in (t-T, t]$ 上可以表示为傅里叶级数的形式:

$$x(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k(t) e^{jk\omega_s \tau} \quad (1)$$

式中 $\omega_s = 2\pi/T$; $X_k(t)$ 是一系列时变的傅里叶复系数, 称为动态相量。

$X_k(t)$ 第 k 阶系数由平均运算得到:

$$X_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\omega_s \tau} d\tau = \langle x \rangle_k(t) \quad (2)$$

动态相量法的建模思路是: 对对象的时域模型采取平均运算, 忽略原始状态变量对应动态相量级数中不重要的项, 只保留感兴趣的相量作为状态变量, 从而获得系统新的状态空间模型。这种“定制的”模型便于研究者根据对象的具体情况保留相应的基波及谐波成分。新模型中, 状态变量不再是电压、电流等变量的瞬时值, 而是原始波形中基波及谐波分量所对应的相量, 所以动态相量模型在仿真中可以采取较大的步长, 有效地提高计算速度, 成为介于准稳模型和详细电磁暂态模型之间的一种相量模型。不过, 动态相量模型会显著增加微分方程的个数。所保留的谐波分量越多, 方程个数增加也越多。当动态相量模型的精度提高到一定程度时, 其采取大步长计算所节省的时间会被增加的微分方程个数抵消, 使得仿真速度与时域仿真相当^[11]。

文献[9]在直流换流器的建模中只保留了交流系统的基波分量和直流系统的直流分量。文献[10]进一步实现了动态相量模型与传统机电暂态相量模型的接口。作为新理论在直流建模研究中的初步探索, 这些成果无疑十分有意义。可以预见, 以双桥直流换流器为例, 如果对交直流系统中的交流量增加考虑 11 和 13 次特征谐波分量, 对直流量增加考虑 12 次谐波分量, 在换流器正常换相的情况下, 动态相量模型与电磁暂态模型的仿真结果将更接近。

然而, 通过动态相量法改进换流器准稳模型的初衷在于从基于器件的模型出发, 通过分析直流电流、电压动态过程和提取缓变状态, 导出能较好反映换相失败的直流系统机电暂态模型, 作为交直流混合输电系统稳定分析及控制设计的基础, 即反映换相失败和不对称工况下直流系统的动态是进行这项研究的关键所在。目前的研究虽然取得了阶段性成果, 但距离研究目标尚有一定差距。

动态相量法在电力电子器件的建模中, 将开关的通断用开关函数表示^[12]。所以, 当开关的通、断时刻事先完全确定时, 动态相量模型可以很精确地反映器件的动态特性并计及谐波特性。对于存在换相过程的高压直流输电系统, 文献[9]采取换流器准稳模型计算出对称、稳态工况下的换相角, 给出开关函数的波形, 进而推导了对应的动态相量级数形式。这种处理方式在直流系统稳态运行工况下是合理的, 文献[9]的仿真结果证实了这一点。但直流系统存在动态过程甚至发生换相失败时, 换流器的运行工

况是复杂的, 开关函数的波形是时变的, 甚至是完全未知的, 按照事先假定的开关函数进行仿真, 将无法反映直流系统的真实动态。

事实上, 文献[9]所建立的考虑交流系统基波分量及直流系统直流分量的换流器动态相量模型并没有比准稳模型提供更多的信息, 其计算速度还慢于准稳模型^[10]。

4.3 讨论

可见, 采样-数据建模方法拓宽了直流准稳模型的频谱适用范围, 但其仅为小信号模型。动态相量法推导了换流器的大信号模型, 但并未对换流器准稳模型做出实质性改进, 仍不能正确反映不对称工作条件下高压直流系统的动态特性和换相失败现象。

动态相量法的进一步研究中, 除开关函数的处理困难较大外, 为反映交流系统的不对称工作状态和直流系统可能发生的换相失败, 采用动态相量的序分量形式及计入谐波分量是必然的^[13]。然而, 将动态相量模型中各谐波动态相量叠加, 只能得到原始时域波形的包络线, 并不能得到变量的瞬时值, 依靠这种包络线在线判断发生换相失败的可能性十分困难。此外, 传统的电力系统机电暂态仿真中, 电力网络采取了基频相量模型。只计及正序基频分量的动态相量模型与传统相量的接口只需考虑由于参考坐标轴不同而造成的相量间的角度差^[10], 其接口是方便的。但当动态相量模型中计入了谐波及序分量时, 其与正序基频相量在接口上也将变得困难。这种情形与机电-电磁接口困难十分类似, 即基频相量与含有谐波和序分量的电气量存在接口困难。当然, 如果交、直流系统均采用计及了谐波和序分量的动态相量模型, 接口难题可以解决, 但会严重影响仿真速度。

综上所述, 正确反映近距离直流多落点交直流混合电网中不对称工作条件引起的直流系统动态和直流系统换相失败现象, 至少在短期内仍将十分困难。一个解决思路是从理论上寻求新方法, 这种新方法必须能真实反映不同工况下换流器的换相过程。此外, 笔者以为, 随着计算技术飞速发展, 文献[2]提到的“机电-电磁混合仿真”思路较有潜力, 即换流站附近采取电磁暂态仿真, 其他区域采取机电暂态仿真模型, 其电磁暂态仿真范围依照谐波分量的衰减情况确定, 而在 2 种模型的接口处提取电磁暂态模型的基频分量与机电模型接口。此时的关键问题在于不同扰动下电磁暂态仿真范围的合理确定。

5 结语

总结了直流输电系统的基本建模方法, 讨论了近年来高压直流建模研究的进展。介绍了直流模型的分类及模型的适用性, 分析了常用电力系统机电暂态分析软件中内置直流模型的不足。重点讨论了基于采样-数据建模方法和动态相量理论对直流换流器准稳模型的改进。认为采样-数据建模方法建立了适用于电力系统次同步振荡研究的换流器小信

号模型,但能正确反映不对称工作条件下高压直流动态特性和换相失败的直流模型尚未获得,并认为在大规模交直流电力系统的暂态稳定性研究中,机电-电磁混合仿真思路较有潜力。

参考文献:

- [1] 汤广福. 2004 年国际大电网会议系列报道——高压直流输电和电力电子技术发展现状及展望[J]. 电力系统自动化,2005,29(7):1-5.
TANG Guang-fu. A review of 2004 CIGRE on application status and perspective in HVDC and power electronics [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(7):1-5.
- [2] KUNDER P. 电力系统稳定与控制[M]. 周孝信,宋永华,李兴源,等,译. 北京:中国电力出版社,2002.
- [3] 徐政,蔡晔,刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J]. 电力系统自动化,2002,26(15):4-8.
XU Zheng,CAI Ye,LIU Guo-ping. Some problems in the simulation of large-scale AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(15):4-8.
- [4] 毛晓明,管霖,张尧,等. 含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流建模研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):68-73.
MAO Xiao-ming,GUAN Lin,ZHANG Yao,et al. Researches on HVDC modeling for AC/DC hybrid grid with multi-infeed HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):68-73.
- [5] 黄莹,徐政,贺辉. 电力系统仿真软件 PSS/E 的直流系统模型及其仿真研究[J]. 电网技术,2004,28(5):25-29.
HUANG Ying,XU Zheng,HE Hui. HVDC models of PSS/E and their applicability in simulations[J]. Power System Technology,2004,28(5):25-29.
- [6] 杨卫东,徐政,韩祯祥. NETOMAC 在直流输电系统仿真研究中的应用[J]. 电力自动化设备,2001,21(4):10-14.
YANG Wei-dong,XU Zheng,HAN Zhen-xiang. Application of NETOMAC on HVDC system simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(4):10-14.
- [7] 杨秀,陈陈. 高压直流输电的采样数据动态建模[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):30-34.
YANG Xiu,CHEN Chen. Sampling-data approach for HVDC dynamic modeling[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(7):30-34.
- [8] 杨秀,陈陈. 基于采样数据模型的高压直流输电动态特性分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):7-11,136.
YANG Xiu,CHEN Chen. HVDC dynamic characteristic analysis based on sampled-data model[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(10):7-11,136.
- [9] 戚庆茹,焦连伟,严正,等. 高压直流输电动态相量建模与仿真[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):28-32.
QI Qing-ru,JIAO Lian-wei,YAN Zheng,et al. Modeling and simulation of HVDC with dynamic phasors[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(12):28-32.
- [10] ZHU Hao-jun,CAI Ze-xiang,LIU Hao-ming,et al. Hybrid-model transient stability simulation using dynamic phasors based HVDC system model[J]. Electric Power System Research,2006,76(6/7):582-591.
- [11] 何瑞文,蔡泽祥. 结合谐波特征的可控串补动态相量法建模与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):28-32.
HE Rui-wen,CAI Ze-xiang. Modeling and analysis of thyristor-controlled series capacitor with dynamic phasors considering harmonic characteristics[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):28-32.
- [12] 戚庆茹,焦连伟,陈寿孙,等. 运用动态相量法对电力电子装置建模与仿真初探[J]. 电力系统自动化,2003,27(9):6-10.
QI Qing-ru,JIAO Lian-wei,CHEN Shou-sun,et al. Application of the dynamic phasors in modeling and simulation of electronic converters [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(9):6-10.
- [13] STEFANOV P C,STANKOVIC A M. Modeling of UPFC operation under unbalanced conditions with dynamic phasors[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(2):395-403.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

毛晓明(1971-),女,湖北武汉人,副教授,博士,研究方向为交直流电力系统分析、运行与控制(E-mail:mxmsunny@163.com)。

Survey on HVDC system modeling

MAO Xiao-ming^{1,2},ZHANG Yao¹,ZHANG Yan²

(1. Guangdong University of Technology,Guangzhou 510090,China;

2. South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract: The general HVDC(High Voltage Direct Current) modeling methods in power system stability study are summarized and the classifications of HVDC models are discussed with their applicability. The HVDC models used in commercial power system analysis software packages are studied and it is suggested to add the interface between the embedded model and user-defined block for widening the application range. The improvements of DC converter quasi-steady model by sampled data approach and dynamic phasor theory are emphasized. It is indicated that, the small-signal model established by sampled data approach suitable for sub-synchronous oscillation studies could not be used to power system transient stability simulation and the large-signal model developed by dynamic phasor theory could not precisely reflect commutation failures and the dynamic performance of HVDC system under asymmetrical working conditions. It is pointed out that,the hybrid electromechanical and electromagnetic simulation is more potential and its key technique is the determination of proper simulation ranges under various disturbances.

This project is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China(50337010).

Key words: HVDC; modeling; sampled data approach; dynamic phasor theory