

基于EMTP / ATP的HVDC整流器 建模及仿真

吴磊¹, 王银乐¹, 张小宁²

(1. 华东交通大学 电气学院, 江西 南昌 330013;

2. 中国石化胜利石油管理局, 山东 东营 257000)

摘要: 基于 EMTP/ATP 程序研究高压直流输电(HVDC)换流器的暂态特性,需要建立控制及电气元件的详细模型,同时,在进行仿真研究时,尤其是当 HVDC 换流器与弱交流系统相联时,需特别注意电磁暂态过程本身所具有的复杂特性。基于 EMTP 程序,并考虑到 HVDC 联于弱交流系统时的情况,建立了详细的 HVDC 整流器仿真模型,包括门极触发单元(GFU)、电流控制器、阀缓冲电路等,同时,为缩短仿真初始化时间,还在电流控制器中引入了延迟阶跃信号 DS。最后,基于 CIGRE 标准模型对所建立的 HVDC 整流器 EMTP 仿真模型进行了测试,仿真结果表明,系统对于正常的电流调节及突发故障均表现出良好的动态性能。

关键词: 高压直流输电; 换流器建模; 电磁暂态; 弱交流; 仿真

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0047-04

0 引言

高压直流输电(HVDC)的各种控制策略最终都是通过对换流器的控制实现,而对于换流器的控制则是由触发脉冲序列完成^[1-4]。通过换流器触发脉冲控制系统控制换流阀的触发时刻,使换流器工作于所要求的控制方式,如整流侧的定电流控制(CC)、逆变侧的定熄弧角控制(CEA)等^[5-6],因此,门极触发单元 GFU(Gate Firing Unit)是 HVDC 换流器建模中的重要环节。本文基于 dq 变换方法,设计了一个门极触发单元,并给出电磁暂态程序(EMTP)仿真试验结果。

对于电磁暂态仿真而言,系统的稳态运行点不仅包括基波量的稳态运行点,还包括了谐波量的稳态运行点,因此其初始化过程比较复杂[7-11]。本文运用一简单方法减少初始化过程的时间。

1 HVDC 整流器的 EMTF 模型

1.1 门极触发单元

在 HVDC 换流器中常需采用压控振荡器(VCO), 通过它为换流阀提供等间隔触发脉冲, 并可消除在阀触发期间同步交流母线上电压畸变的影响, 通常称之为锁相环(PLL)触发或等间隔触发方法^[12]。当换流站联于短路比(SCRs)低于 3 的弱交流系统时, 该方法可确保换流器的成功换相和正常运行。本文建立了一个典型 GFU 的模型, 并给出了其仿真试验结果。 dq 型触发控制单元早已在电机驱动控制中得

到应用, dq 变换的本质是对三相系统进行解耦处理, 通过一个变换矩阵三相坐标系统变换为正交的两相系统^[13-14]。其最大优点是可以消除交流母线的扰动及谐波引起的电压畸变对换流器控制的影响^[15]。

dq 型触发单元框图及对应信号波形分别示于图 1 和图 2(幅值大的为 U_{syn} , 小的为 U_{com} ; 后同)。

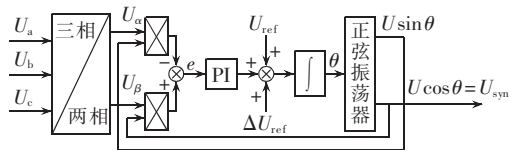
图 1 dq 型门极触发单元框图

Fig.1 Block diagram of dq GFU

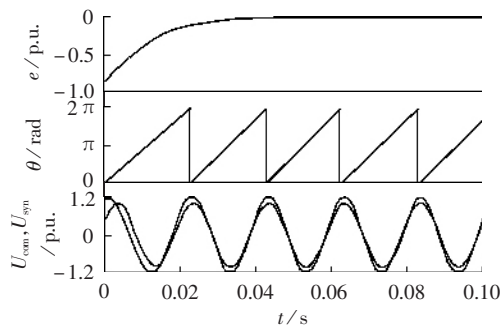
图 2 dq 门极触发单元信号波形

Fig.2 Waveforms for dq GFU

通过式(1)(2),可将三相换相电压 U_a 、 U_b 和 U_c 变换为 dq 轴电压 U_α 和 U_β 。

$$U_{\alpha} = \frac{2}{3}U_a - \frac{1}{3}U_b - \frac{1}{3}U_c \quad (1)$$

$$U_{\beta}=(U_b-U_c)/\sqrt{3} \quad (2)$$

$$e = -U_\alpha U \sin \theta + U_\beta U \cos \theta \quad (3)$$

dq 型门极触发单元的工作原理如下:误差信号 e 送入 PI 控制器,为 VCO 产生一个参考输入,信号 ΔU_{ref} 负责对该参考值进行调制,VCO 的中心频率 (50 Hz) 则由固定偏置电压 U_{ref} 确定。VCO 的输出为 θ 角,其波形为锯齿波, θ 经由正弦振荡器产生正弦和余弦电压信号,并反馈到乘法器,进而生成误差信号 e 。系统稳态运行时,误差信号 e 为零,正弦余弦振荡器的输出与换相电压同步。图 2 中,对输出 U_{syn} 和 U_{com} 进行了对比,需要指出的是:为了能清楚地观察 2 个信号的相位关系,将 U_{syn} 的幅值增加了 20%。 dq 触发单元闭环传递函数为

$$G(s) = K_{pi} \frac{1 + s\tau_{pi}}{s\tau_{pi}} \frac{1}{s\tau_i} \quad (4)$$

式中 K_{pi} 和 τ_{pi} 分别为 PI 控制器的增益和时间常数; τ_i 为输出 θ 前积分环节的时间常数。

当交流母线发生三相故障而导致换相母线失压时,触发控制单元中各信号的波形见图 3。故障期间,正弦振荡器输出信号的频率为中心频率 (50 Hz)。

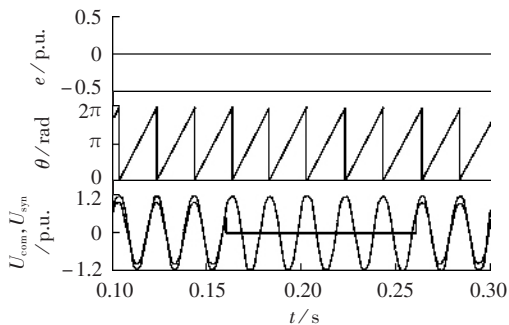


图 3 换相母线失压时 dq GFU 信号波形

Fig.3 Waveforms of dq GFU during the loss of commutation voltage

当换相母线电压中含有 30% 的 3 次谐波注入时, dq 触发单元中各信号的波形如图 4 所示。正弦振荡器的输出电压 U_{syn} 中不含谐波分量,且与换相母线电压基波分量同步。

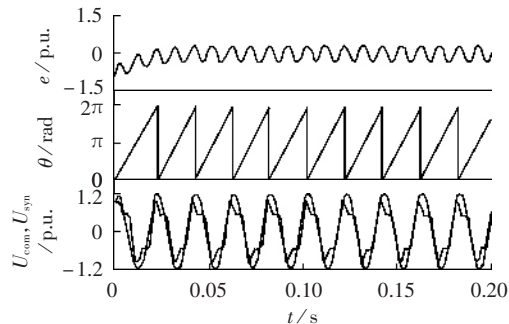


图 4 谐波干扰试验

Fig.4 Harmonic distortion test

1.2 HVDC 整流侧定电流控制

图 5 所示为基于 CIGRE 标准整流器模型的 HVDC 系统,整流侧联于短路比为 2.5 的弱交流系统。因采用 6 脉波整流器,需要安装交流滤波器滤除 5 次和 7 次谐波。交流及直流系统的详细数据见文献[7]。

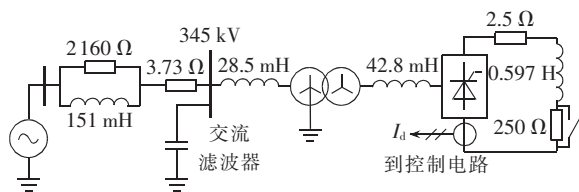


图 5 CIGRE 高压直流输电标准模型

Fig.5 CIGRE benchmark HVDC system model

电流控制器框图如图 6 所示。

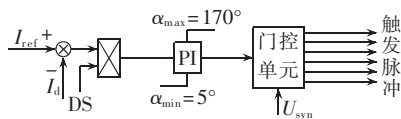


图 6 电流控制器框图

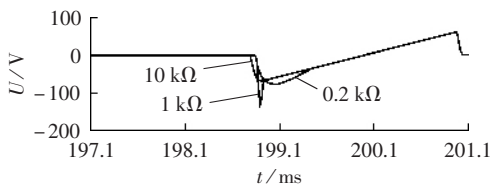
Fig.6 Block diagram of current controller

直流电流的测量值 I_d 与参考值 I_{ref} 比较得到误差信号,而后送入乘法器。乘法器的另一个输入是延迟阶跃信号 DS(在 0.02 s 由 0 阶跃到 1)。PI 控制器输出为触发延迟角 α 整定值,其值被限幅在 $5^\circ \sim 170^\circ$ 。在基于该控制器对系统进行仿真试验时,没有采用低压限流环节 (VDCOL)。

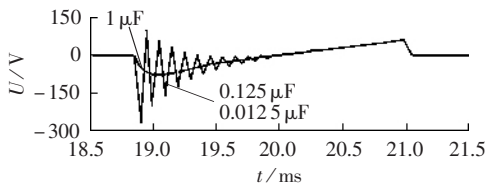
1.3 缓冲电路的作用

换流阀的缓冲器由一个 RC 电路构成^[16],缓冲电路中的 R 分别取 0.2、1.0、10 k Ω 时,对阀电压的影响如图 7(a)所示。由图可见,当 R 取 0.2 k Ω 时,阀电压 U 会产生较大振荡,通过对比分析可知, R 的最优值应为 10 k Ω 。

而当缓冲器中 C 分别取 0.0125、0.125、1.0 μF 时阀电压波形如图 7(b)所示。显然, C 的取值对阀两端电压影响不大,此处选定 C 值为 1.0 μF 。



(a) R 取不同值



(b) C 取不同值

图 7 R 及 C 对阀电压的作用

Fig.7 Valve voltage vs. R and C

通过选择适当的 R 和 C 值,即可为换流阀提供合格的换相电压。但应注意,在进行仿真实验时,换流阀常被看作一个理想化 EMTP 开关器件,因此,所选取的缓冲电路参数 R 和 C 的值,可能与实际换流器中阀缓冲电路参数值不一致。

1.4 初始化

图 8 为采用延时阶跃信号前后的直流电流波形

(分别对应 i_{d1} 和 i_{d2}),可见,定电流控制器的输入环节中未采用延迟阶跃信号时, dq 型 GFU 的仿真初始化时间为 0.13 s。采用延迟阶跃信号的目的,是为了在系统启动阶段使误差信号 e 输入 PI 控制器的数值为 0,此时在限幅环节作用下,触发延迟角 α 保持在允许的最低限值 $\alpha_{\min}$,直到电流从零上升到额定值后,定电流控制器的 PI 环节开始发挥调节作用,由此可缩短直流电流响应的稳定时间,从而达到减少仿真初始化时间的目的。由图 8 可见,在引入延迟阶跃信号后,仿真初始化时间减少至 0.08 s,这将有助于节省内存空间并缩短整个仿真时间。

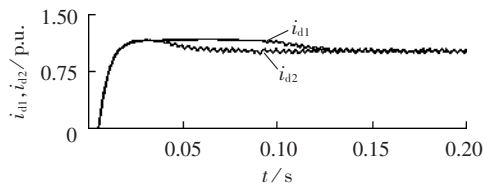


图 8 延时阶跃信号对系统初始化的作用

Fig.8 Effect of delayed step signal on system initialization

2 仿真试验

为考察系统的动态性能及控制效果,在建立了详细的 HVDC 整流器模型后,本文针对如下 2 种情况进行了仿真试验:

- 直流电流参考值从 1.0 p.u. 跃减至 0.88 p.u., 0.2 s 后再恢复(跃升)到 1.0 p.u.;
- 换流母线发生单相接地故障。

图 9 所示为电流参考值跃减 12% 时,系统各参数的响应曲线,包括直流侧电流 I_d 、触发延迟角 α 、同步电压信号 U_{syn} 以及换相电压 U_{com} 。整个过程相当于发生了 2 次阶跃变化(I_{ref} 由 1 p.u. 跃减到 0.88 p.u., 而后又从 0.88 p.u. 跃升到 1 p.u.),由图 9 可以看到,系统响应稳定,控制效果良好, dq 门极触发单元几乎没有延时地与交流换相电压保持了同步。

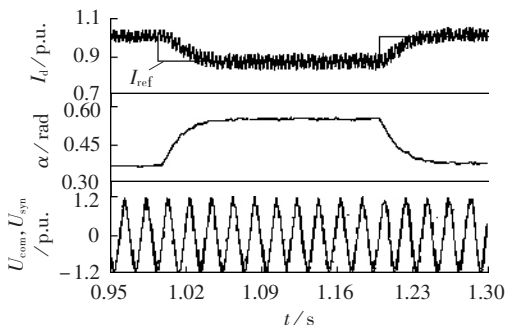


图 9 I_{ref} 跃减 12% 时系统动态响应

Fig.9 System dynamic response to 12% step decrease of I_{ref}

图 10 所示为整流侧交流母线发生单相故障时,系统各参数的响应曲线。由于交流系统发生了不对称故障以及换流器的调制作用,使得直流电流中含有较大的 2 次谐波分量^[17]。由图中可见,在故障期间,2 次谐波分量的存在并没有对 dq 型触发单元的运行产生太大影响,其输出电压信号仍能较好地保持同

步。三相短路情况下所得仿真试验结果也非常理想,此处不作详述。

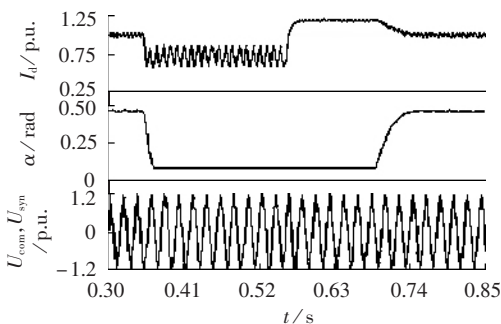


图 10 换流母线单相接地时系统动态响应

Fig.10 System dynamic response to single phase grounding of commutation bus

3 结论

本文基于 EMT/ATP 程序建立了 HVDC 整流器的仿真模型,包括换流器的 GFU、阀缓冲电路以及直流电流控制器等。其中 GFU 是关键的核心部分。从仿真结果看,本文设计的 GFU 具有较强的抗干扰能力,在各种情况下均能很好地与换流母线电压保持同步,从而保证了对换流器工作方式的有效控制。而阀缓冲电路也会对换流器的运行特性产生重要影响,这一点在工程上应引起足够重视。同时,为了缩短仿真时间,本文在电流控制器中引入了一个延迟阶跃信号 DS,实现了仿真过程的快速初始化。本文所做的工作为进一步进行更为复杂的交直流电力系统稳定与控制研究打下了基础。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 张诚,廖勇,孙才新. 三峡交直流混合输电系统谐波的仿真分析和计算[J]. 电力系统自动化,2003,27(24):47-49.
ZHANG Cheng, LIAO Yong, SUN Cai-xin. Simulation and calculation of harmonics for Three Gorges AC and DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 47-49.
- [3] 李函,韩英铎,王仲鸿. 利用混合实时仿真器测试 HVDC 控制与保护[J]. 电力系统自动化,2000,24(17):28-31.
LI Han, HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong. Verification of HVDC controller using an advanced hybrid real-time simulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 28-31.
- [4] 欧开健,任震,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)[J]. 电力自动化设备,2003,23(5):5-8,25.
OU Kai-jian, REN Zhen, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system. Part 1: commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8, 25.
- [5] 陶瑜,龙英,韩伟. 高压直流输电控制保护技术的发展与现状[J]. 高电压技术,2004,30(11):8-10,17.
TAO Yu, LONG Ying, HAN Wei. Status and development of HVDC control and protection[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 8-10, 17.
- [6] BALZER G, MULLER H. Capacitor commutated converters for high power HVDC transmission[C]//Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission. [S.l.]: IEE, 2001: 60-65.
- [7] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社

- 社,2004.
- [8] 束洪春,司大军,陈学允. 复杂电力系统电气故障电磁暂态数字计算方法研究[J]. 电网技术,2003,27(12):31-36.
- SHU Hong - chun,SI Da - jun,CHEN Xue - yun. A new electromagnetic transients simulation method for electric faults complex power system[J]. Power System Technology,2003,27(12):31-36.
- [9] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄,林集明,曾昭华,译. 北京:水利电力出版社,1991.
- [10] HAMMONS T J,TANG H J,EHRHARD S. Performance of HVDC converters in enhancing transient stability of power systems and in the torsional stressing of generator shafts due to balanced and unbalanced operation of the rectifier[J]. Electric Machines and Power Systems,1999,27(10):1113-1127.
- [11] ABDEL-SALAM M,SEDDIK H. Transient analysis of HVDC power transmission systems[J]. European Transactions on Electrical Power,2004,14(3):131-149.
- [12] JOVCIC D,PAHALAWATHTHA N,ZAVAHIR M. Analytical modelling of HVDC-HVAC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(2):506-511.
- [13] TAVARES M C,PISSOLATO J,PORTELA C M. New mode-domain representation of transmission line—Clarke transformation[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. [S.l.]:IEEE,1998:497-500.
- [14] EMANUEL A E,MILANEZ D L. Clarke's alpha,beta and zero components:a possible approach for the conceptual design of instrumentation compatible with IEEE Std. 1459-2000 [C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference. Como, Italy:[s.n.],2004:1614-1619.
- [15] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [16] MOHAN N,UNDELAND T M,ROBBINS W P. Power electronics:converter,applications and design[M]. 3rd ed. New York, USA:John Wiley & Sons Inc,2003.
- [17] RIEDEL P. Harmonic voltage and current transfer,and AC and DC side impedances of HVDC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(3):2095-2099.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

吴磊(1975-),男,山东东营人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:greatgrizzly@163.com;liapunov@tom.com);

王银乐(1959-),男,陕西西安人,副教授,研究方向为电力系统继电保护;

张小宁(1963-),男,陕西西安人,高级工程师,研究方向为电力系统运行与控制。

Modeling and simulation of HVDC rectifier based on EMTP/ATP

WU Lei¹,WANG Yin-le¹,ZHANG Xiao-ning²

(1. School of Electrical Engineering,East China Jiaotong University,
Nanchang 330013,China;2. Shengli Petroleum Administration Bureau,
Sinopec Corp.,Dongying 257000,China)

Abstract: The detailed modeling of controls and power system elements is required in the transient performance study of HVDC(High Voltage DC transmission) converter using EMTP/ATP. Furthermore, inherent complexities of EMTP should be carefully considered during simulation,particularly when the HVDC converter is operated with a weak AC system,for which a detailed HVDC rectifier simulation model is established based on EMTP/ATP,including gate firing unit,current controller and valve snubber. A delayed step signal DS is introduced in the current controller to shorten the initialization time. The HVDC rectifier simulation model is tested on CIGRE benchmark model. Simulation results show that good dynamic performance can be expected for both ordinary current control and accidental fault.

Key words: HVDC; rectifier; EMTP; weak AC; simulation