



高压直流输电系统中换相失败 Hypersim 仿真分析

林凌雪,张尧,钟庆,武志刚

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要: Hypersim 是一套功能强大、接口方便、适应性广的全数字实时仿真系统,它能为 HVDC 换相失败问题的研究提供快速、灵活和准确的电磁暂态仿真。基于 Hypersim 建立了单极 12 脉波 HVDC 系统的详细模型,并分析了一次系统和控制系统的具体结构。对逆变器交流母线发生单相接地短路和三相接地短路故障的情况进行了仿真计算,研究换相失败的判定依据。仿真结果表明,Hypersim 能够准确模拟 HVDC 系统发生换相失败情况,以及通过在控制系统中实施保护控制,能有效抑制换相失败的发生。

关键词: 高压直流输电系统; 换相失败; 电磁暂态仿真; Hypersim

中图分类号: TM 711; TM 721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)08-0033-05

换相失败是高压直流输电 HVDC 系统最常见的特有故障之一^[1-11]。因此,必须对 HVDC 系统换相失败故障原理及其影响因素进行深入了解,以制定相应的控制、保护措施。采用 Hypersim 中的详细模型对换流器及其控制系统进行准确有效的描述,建立了一个完整的单极 12 脉波 HVDC 系统,通过观察不同故障情况下 HVDC 系统发生换相失败的动态响应,分析换相失败对系统的影响。针对故障后系统发生的连续多次换相失败,在控制系统中设置了相应的保护模块,仿真实验验证了该换相失败保护的有效性。

1 Hypersim 特性介绍

Hypersim 是一个专门为电力系统暂态仿真而设计的程序包,它集硬件和软件为一体,可运行在不同

的平台如 Unix、Linux 或 Windows 下,可模拟交直流系统任意组合下的运行和干扰情况,包括各种设备故障、短路故障或多重故障等。其硬件采用基于共享存储器的多 CPU 超级并行处理计算机如 SGI Origin 或多 CPU 的并行计算用的 Sun Unix 工作站,可对大规模电力系统实现快速的离线仿真,也可与实际系统元件或控制装置形成闭环测试系统进行实时仿真。其软件包括 4 部分:图形用户界面(GUI)、代码生成器、波形显示及分析模块(Spectrum)和命令控制模块(CNTR)。用户可在 GUI 中构建仿真系统的结构图并设置系统元件的参数,仿真进行过程中也可根据试验要求修改元件参数;仿真进行前,应选择是进行实时仿真还是离线仿真,并确定仿真平台和仿真步长。代码生成器用于对系统网络进行拓扑分析,把系统分解为不同的子任务,并为每个子任务生成 C 代码,编译后的代码可在并行计算机上实时或离线运行。仿真执行前需选择各个元件的探测信号,

收稿日期:2006-09-20;修回日期:2007-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50337010)

+++++

在 Spectrum 模块中观测信号波形并对信号进行各种数学或频谱分析。CNTR 控制模块基于命令文本,执行与 GUI 指令相同的操作,一系列指令可在 CNTR 中预先编程后按顺序执行,无需任何用户干预。

Hypersim 提供了强大的电力系统模型库,可详细模拟几乎所有的电力系统元件,包括变压器饱和支路和避雷器、晶闸管等非线性元件,HVDC 和静态无功补偿(SVC)等 FACTS 设备。除了 Hypersim 内置的控制模块,复杂的控制系统也可预先在 Matlab/Simulink 中构建,或采用 C++ 语言在用户代码模块(UCB)中编写,再导入 Hypersim 的仿真系统中执行控制任务。EMTP 的数据文件可导入 Hypersim 中进行仿真和波形处理,Hypersim 文件也可导出转为 EMTP 的仿真文件。

执行仿真任务时,Hypersim 采用与 EMTP 一样的算法^[12],即利用传输信号的延迟对网络方程进行解耦,把网络分解成多个可在并行处理器上求解的子任务。每一仿真时步开始时,分别计算每一子任务,当仿真时步结束时,各子任务相互交换信息^[13]。数值算法方面,Hypersim 采用了固定步长隐式梯形法求解网络方程。

2 基于 Hypersim 的 HVDC 模型

现利用 Hypersim 对一个 12 脉波单极 HVDC 系统进行建模和仿真,如图 1 所示,整流侧和逆变侧交流系统的额定电压分别为 315 kV 和 230 kV,交流系统频率 60 Hz,HVDC 系统额定输送容量 1 000 MW,额定直流电压 500 kV,额定直流电流 2 kA,平波电抗器 $R=0.01\ \Omega$, $L=0.597\ 8\ \text{H}$ 。图中连接于整流器交流母线上的元件 POW 作为数据采集和开关动作的时间基准,为仿真提供了同步信号。在 Hypersim 中,每个仿真系统都必须设置这样一个元件,以便为设置系统扰动提供一个时间参考信号。HVDC 仿真系统的详细参数见表 1,图 2 为交流滤波器示意图。

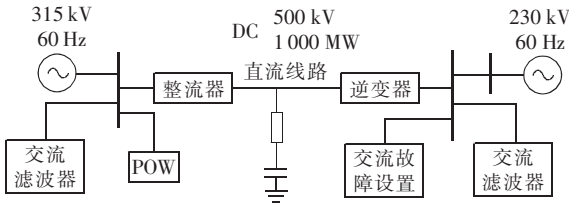


图 1 HVDC 系统的 Hypersim 仿真示意图

Fig.1 Simulation of HVDC system using Hypersim

表 1 HVDC 系统模型参数

Tab.1 Parameters of HVDC system model

类型	交流电压源	电源阻抗		变压器变比	角度限制
		R/Ω	L/H		
整流器	1.0 p.u. $\angle 22.18^\circ$	0.220	0.020 7	315 kV/211.2 kV	$\alpha=15^\circ$
逆变器	0.958 p.u. $\angle -23.14^\circ$	0.088	0.007 0	211.2 kV/230 kV	$\gamma=18^\circ$

表 2 交流滤波器参数

Tab.2 Parameters of AC filter

$C_{11}/\mu\text{F}$	$C_{21}/\mu\text{F}$	L_{21}/H	R_{21}/Ω	R_{22}/Ω	R_{23}/Ω
2.785	5.571	0.011 37	0.001	1×10^{-5}	83.32
6.268*	12.53*	0.005 05*	0.010*	1×10^{-5} *	37.03*
$C_{31}/\mu\text{F}$	$C_{32}/\mu\text{F}$	L_{31}/H	R_{31}/Ω	R_{32}/Ω	R_{33}/Ω
5.571	61.9	0.113 7	0.010	0.2976	261.85
12.53*	139.3*	0.050 5*	0.001*	0.132 3*	116.38*

注:数据中无 * 为整流器数据,有 * 为逆变器数据。

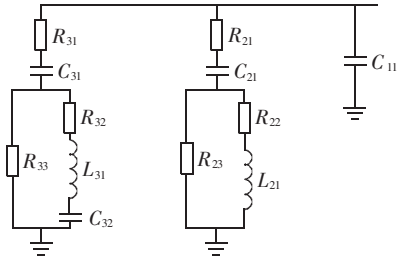


图 2 交流滤波器示意图

Fig.2 AC filters

2.1 一次系统模型

采用 2 个三相电压源分别表示整流侧和逆变侧的交流网络,网络的等值阻抗在电压源参数设置中给出,交流系统频率为 60 Hz。在整流器和逆变器的交流侧均设置了滤波器和电容无功补偿器,用于吸收由换流器产生的谐波和为换流单元提供无功功率。

整流侧的换流变压器是一个带抽头和解耦元件的三相饱和变压器。该变压器一次侧为中性点接地 Y 绕组,二次侧为中性点不接地的 Y 绕组和 Δ 绕组,模型中考虑了变压器的漏抗。逆变侧采用相同类型的换流变压器。采用 Hypersim 中的 12 脉波晶闸管模块表示换流器,实际上,换流器中每个阀都是由许多晶闸管串并联组成的,所以在换流器模型中还考虑了每个阀的 RC 并联缓冲电路。

直流线路采用直流电缆与两相 Marti 线路^[14]串联的线路模型表示,考虑了直流电缆的接地保护,同时也考虑了直流输电线与地线间的耦合关系;直流线路两端分别设置了两平波电抗。直流电缆和 Marti 线路的电气参数可以在 EMTP 的 CABLE / LINE 辅助模块中计算得到并且形成数据文件(*.pun),Hypersim 可通过链接直接导入该数据文件,也可在线路模块手动输入计算得到的线路参数。

2.2 控制系统模型

直流控制系统框图如图 3 所示。

控制系统的基本单元为同步和触发单元、变压器抽头控制单元、触发角 α 和熄弧角 γ 控制单元、系统保护控制单元等。

同步和触发单元用于计算触发角的大小并产生内部触发信号。除了内部的触发控制,换流器还可接收外部控制系统发出的触发信号。

变压器抽头控制直接控制换流变压器抽头的升高或降低,以使 α 角和 γ 角保持在设定的范围内。

调节单元的作用是通过调节 α 角的大小以控制

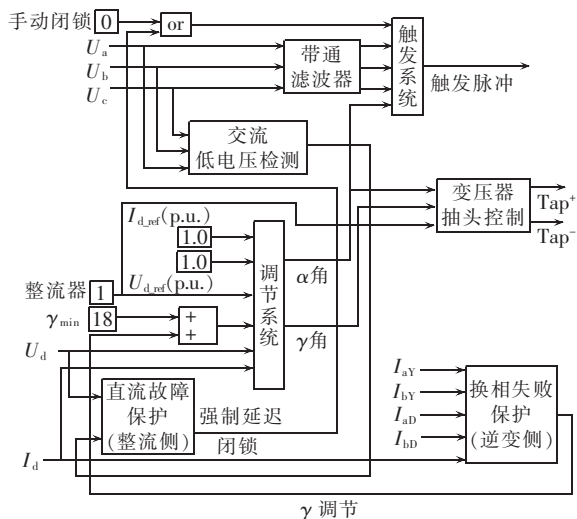


图 3 换流器的基本控制框图

Fig.3 Block diagram of converter control

直流电流和直流电压,并将逆变器的 γ 角限制于最小值。图 4 为调节单元的运行原理框图。

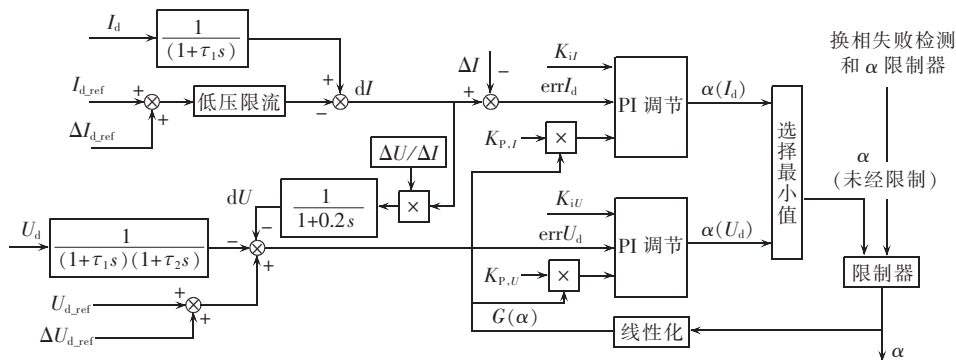


图 4 调节单元原理图

Fig.4 Block diagram of regulation unit

$\alpha_{\min}$ 模式下,逆变器运行于电压调节模式、电流补偿模式、电流调节模式或最小熄弧角 $\gamma_{\min}$ 模式。正常运行工况下,整流器控制电流而逆变器控制电压。如果交流电压下降,整流器运行于 $\alpha_{\min}$ 模式;当直流电流低于整流侧电流整定值时,逆变器转到电流补偿模式,此时电压按补偿模式 $\Delta U - \Delta I$ 特性进行调节(电压裕度值 $\Delta U = 0.05$ p.u., 电流裕度值 $\Delta I = 0.1$ p.u.)。如果电流继续下降,逆变器就会运行在电流调节模式下。当负荷增长或逆变侧交流系统发生故障导致直流电流持续上升时,逆变器会运行在 $\gamma_{\min}$ 模式下以限制电流的增长。

图 3 的控制系统中设置了 2 个保护模块:直流故障保护和换相失败保护。直流故障保护设在整流侧,当检测到直流系统发生故障时,整流器的触发角会调整并大于 90° ,整流器进入逆变状态直至直流故障清除。

换相失败保护设置在逆变侧。研究表明,正常运行情况下,换流器交流侧电流 (I_{ac}) 与直流侧电流 (I_d) 的标么值相等。换相失败期间,逆变器直流侧会有短路电流出现, I_d 迅速增大,直流电压 U_d 变为零,

单元中有 2 个比例-积分 PI (Proportional-Integral) 调节电路,分别用于调节直流电流和直流电压。PI 调节电路的传输方程为

$$H(s) = K_i/s + K_p G(\alpha) \quad (1)$$

式中 K_i 为积分增益; K_p 为比例增益; $G(\alpha)$ 为线性因数,是线性化环节的输出,线性化环节使得 PI 调节器以相同的速度随着 α 角变化而变化。

2 个 PI 调节电路的输出分别为 $\alpha(I_d)$ 和 $\alpha(U_d)$, 控制系统选择其中最小值作为 α 角的输出。 α 角的大小受 2 个控制环节的限制: α 限制和 $\Delta\alpha$ 限制。 α 限制环节给出了 α 角的上限和下限, $\Delta\alpha$ 限制环节则用于限制 α 角的变化率,以减小发生换相失败的概率,尤其是在 α 值很大的时候。

低压限流环节 VDCOL (Voltage Dependent Current - Order Limit) 用于减小低电压时直流电流的整定值,保证直流系统在故障情况下能快速稳定地恢复正常运行,并减少恢复过程中换相失败的发生。

整流器一般运行在电流调节模式和最小触发角

交流侧电流 I_{ac} 下降。所以,可通过比较 I_{ac} 和 I_d 的大小来检测换相失败的发生,判断依据为

$$I_d > I_{ac} \quad (2)$$

$$I_{ac} < I_{ac,cf} \quad (3)$$

$$I_{ac,cf} = 0.65 \text{ p.u.} \quad (4)$$

正常运行工况下, α 角的计算式如下:

$$\alpha = 180^\circ - (\gamma_{\min} + \mu) \quad (5)$$

式中 $\gamma_{\min}$ 为逆变器固有最小熄弧角; μ 为换相角。

当检测到换相失败时,控制器会立即增大 γ 角以调整 α 角的大小,如下式:

$$\alpha = 180^\circ - (\gamma_{\min} + \mu) - \gamma_{cf} \quad (6)$$

式中 γ_{cf} 为附加的熄弧角限制。

由此可知,逆变器触发时刻提前, α 角变小,偏离了容易发生换相失败的区间。

3 仿真结果和分析

在 Hypersim 中对该 HVDC 系统进行离线仿真系统模型参数见表 1、2。

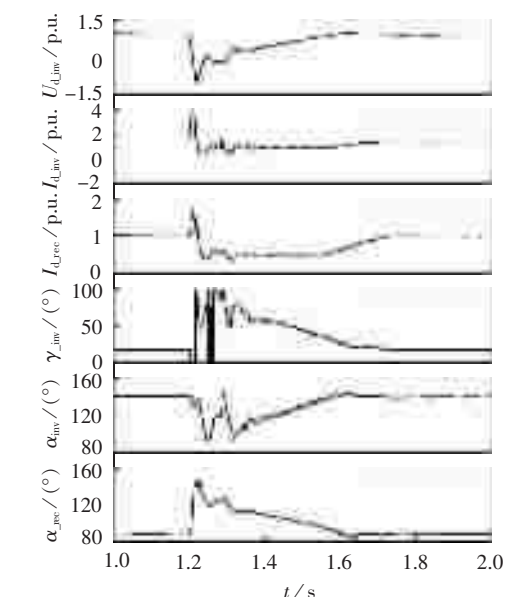
网络分析表明,该系统有 16 个节点,仿真步长

为 $64 \mu\text{s}$ 。为了准确模拟 HVDC 系统的实际运行特性,先闭锁两端换流器,当仿真开始、交流系统达到稳定运行状态时,再分别将换流器投入运行。

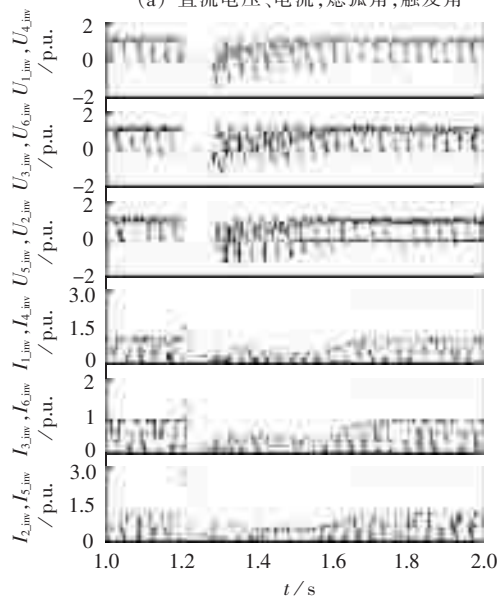
3.1 算例 1

逆变器换流母线上发生 5 个周期的三相短路故障,换相失败保护不启动。

$t=1.2 \text{ s}$ 时,逆变器的换流母线处发生三相接地故障,故障于 5 个周期后切除,如图 5 所示,直流系统发生了多次换相失败。由图 5(a)可知,发生换相失败时,直流电流突然升高,直流电压(U_{d_inv})下降到零。因为短路故障发生在逆变侧,所以逆变器端口的直流电流($I_{d_inv}=3.4 \text{ p.u.}$)高于整流器端口的直流电流($I_{d_rec}=1.7 \text{ p.u.}$)。逆变器的熄弧角变为零,触



(a) 直流电压、电流,熄弧角,触发角



(b) 逆变器阀 1~6 两端的电压、电流

图 5 逆变侧交流母线发生 5 个周期三相接地故障波形图

Fig.5 Waveforms of three-phase grounding fault for 5 cycles of inverter AC bus

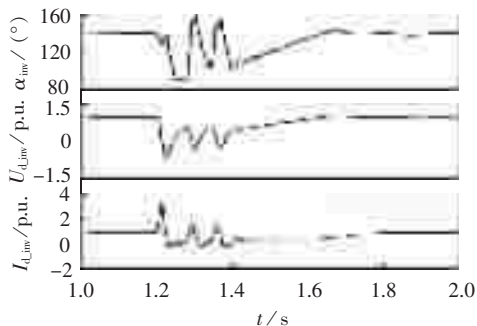
角下降到最小值 92° 。整流器的触发角变为 136° ,整流器运行于逆变状态下,此时直流电压处于负极性,并将直流线路中的能量返回到交流网络中。VDCOL 启动并将直流电流限制在最小值(I_{min})。故障消除的同时,直流系统开始恢复过程,在 VDCOL 的控制下,直流电流稳步上升,系统大概在 0.4 s 内恢复正常。

也可从阀间电压和流过阀的电流波形图中观察换相失败的发生,见图 5(b)。图中 $U_{1_inv} \sim U_{6_inv}$ 为逆变器中阀 1 到阀 6 两端的电压, $I_{1_inv} \sim I_{6_inv}$ 为流过各个阀的电流。可以看出,换相失败发生时,连接于同一相上的 2 个阀同时导通,2 个阀的电压瞬时为零而阀中出现短路电流。

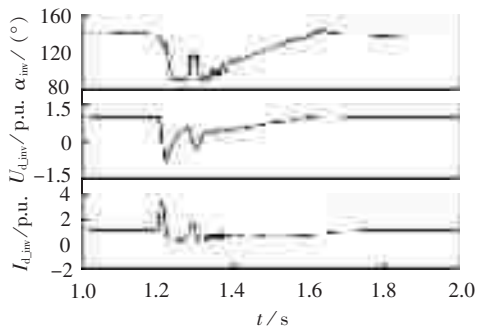
3.2 算例 2

逆变侧交流母线上发生 10 个周期的单相短路故障,启动换相失败保护。

为了验证换相失败保护模块的有效性,在逆变器交流母线处设置 10 个周期的单相接地故障,逆变器发生连续的换相失败。图 6(a)中没有施加任何换相失败保护,逆变器的触发角达到了其最大值,在该角度范围内换相失败极易发生。换相失败时电压(U_{d_inv})和电流(I_{d_inv})发生连续振荡。图 6(b)是启动换相失败保护后的系统波形图,触发角在保护模块的控制下明显变小,直流系统也避免了后续的换相失败,并快速稳定地恢复到正常运行状态。



(a) 无换相失败保护



(b) 启动换相失败保护

图 6 换相失败保护启动前后的仿真图

Fig.6 Simulative waveforms of commutation failure protection

4 结论

全数字仿真系统 Hypersim 可以提供详细 HVDC 系统的电磁暂态仿真,并能详细分析 HVDC 系统中

的换相失败情况。基于 Hypersim 建立的 HVDC 系统模型,设置不同的故障以验证该系统的动态响应特性,并观察系统各个参数在发生换相失败时的动态变化。在控制系统中设置了换相失败保护模块,用于防止换相失败及相继换相失败的发生,仿真结果验证了其有效性。基于 Hypersim 对换相失败的精确的仿真,可对 HVDC 换相失败问题进行更深入的研究并制定更有效的控制保护措施。

参考文献:

- [1] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [2] 欧开健,任震,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一):换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5-8.
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.
- [3] 任震,欧开健,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(二):避免换相失败的措施[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(6): 6-9.
REN Zhen, OU Kai-jian, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system, part 2: measures against commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 6-9.
- [4] 周长春,徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 18-21.
ZHOU Chang-chun, XU Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 18-21.
- [5] 浙江大学. 直流输电[M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- [6] SOOD V K, KHATRI V, JIN H. EMTP modeling of CIGRE benchmark based HVDC transmission system operating with weak AC systems[C]//Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth. Delhi, India: [s.n.], 1996: 426-432.
- [7] ZOU Gang, ZHENG Jian-chao, CHEN Xiang-xun. Study on commutation failure in a HVDC inverter[C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Beijing, China: [s.n.], 1998: 503-506.
- [8] ZHOU Chang-chun, XU Zheng. Study on commutation failure of

multi-infeed HVDC system [C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Kunming, China: [s.n.], 2002: 2462-2466.

- [9] ARRILLAGA J. The evolution of power transmission models to accommodate power electronics [C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Perth, Australia: [s.n.], 2000: I-IX.
- [10] 岳程燕,田芳,周孝信,等. 电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真接口原理[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 23-27.
YUE Cheng-yan, TIAN Fang, ZHOU Xiao-xin, et al. Principle of interfaces for hybrid simulation of power system electro-magnetic-electromechanical transient process[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 23-27.
- [11] SUGREE P, PUTCHONG U, VORATAS K. Fast simulation model for grid scheduling using Hypersim [C]//Processing of Winter Simulation Conference. New Orleans, Louisiana, USA: [s.n.], 2003: 1494-1500.
- [12] DOMMEL H W. EMTP theory book [M]. Portland: Bonneville Power Administration, 1986.
- [13] 周保荣,房大中, LAURENCE A S, 等. 全数字实时仿真器——HYPERSIM [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 79-82.
ZHOU Bao-rong, FANG Da-zhong, LAURENCE A S, et al. The fully digital real-time simulator — HYPERSIM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 79-82.
- [14] MARTI J R. Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations[J]. IEEE Trans on Power App and Systems, 1982, 101(1): 147-155.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

林凌雪(1979-),女,广东汕头人,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与稳定和电力系统实时仿真(E-mail: snowerlin@126.com);

张尧(1948-),男,广东廉江人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划;

钟庆(1978-),男,江西龙南人,博士,主要研究方向为电力系统及其自动化、电力电子技术在电力系统中的应用及其控制技术;

武志刚(1975-),男,吉林吉林人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统及其自动化、电力系统实时仿真、电压稳定等。

Commutation failure analysis of HVDC systems using Hypersim

LIN Ling-xue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, WU Zhi-gang

(College of Electric Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Hypersim is a widely used and fully digital simulator with powerful functions and convenient interfaces, which provides the fast, flexible and accurate electromagnetic transient simulation for the commutation failure study of HVDC system. A detailed 12-pulse monopolar HVDC system is established based on Hypersim, and the structures of primary system and control system are given. The single-phase and three-phase grounding faults of inverter AC bus are researched and the criteria of commutation failures are analyzed. Simulation results show that, Hypersim simulates the commutation failures of HVDC system accurately and the implementation of protective control may restrain the occurrence of commutation failures effectively.

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

Key words: HVDC system; commutation failure; electromagnetic transient simulation; Hypersim