

模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术

刘 栋, 汤广福, 贺之渊, 赵 岩, 庞 辉

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 针对基于模块化多电平换流器的柔性直流输电(MMC-HVDC), 提出了基于数字-模拟混合建模的实时仿真平台, 介绍了其系统构成、等效原理、模拟比计算原则及其在我国首套工程开发中的应用。该平台包括相应的数字化系统模型、49 电平 MMC 物理模拟装置、数字和模拟仿真平台接口, 能够完成对实际工程中的换流阀基电子控制器(VBC)和换流站极控制保护(PCP)系统进行实时的全功能仿真验证。通过对上海南汇柔性直流输电示范工程进行故障态仿真, 得出了相应的试验结果, 并与电磁暂态仿真软件 PSCAD 的仿真结果进行了对比, 证明了该系统为 MMC-HVDC 的动态特性和控制保护平台提供实时在线验证的有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 高压直流输电; 仿真; 物理模拟; 等效机理

中图分类号: TM 72; TM 743

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.012

0 引言

基于电压源换流器的柔性直流输电(VSC-HVDC)系统具有可向孤岛供电、不会出现换相失败、提高风电场低电压穿越能力、能够灵活控制输出功率等优点^[1-2]。近年来, 随着可再生能源发电的迅速发展及模块化多电平换流器(MMC)技术在柔性直流输电中的应用, 其工程应用数量和规模在世界范围内得到了极大的增长, 未来可能形成柔性直流与超高压甚至特高压常规直流和交流系统同步构架运行的格局。在这样复杂的系统下, 需要对柔性直流输电的系统构架、主电路参数设计进行全面分析, 尤其是对工程的控制保护系统控制策略和硬件平台进行实时仿真试验, 以充分满足大电网安全可靠运行的要求。

实时数字仿真系统已广泛应用于传统超高压系统的在线仿真研究^[3], 这类数字仿真系统硬件通常采用基于共享存储器的多 CPU 并行计算机, 核心程序包含丰富的电力系统及控制系统元器件模型^[4-5]。以 RTDS 为例, 其仿真步长为 20~70 μs , 包含的数据转换软件能将 PSS/E 和 EMTDC 格式的数据和模型转化为 PSCAD 格式, 可实时仿真大型交直流混合系统的电磁和机电暂态现象。

但对基于 MMC 的柔性直流输电(MMC-HVDC)系统而言, 由于其换流器由数百甚至数千个独立控制

的电压源子模块组成, 在运行过程中, 每个子模块的投切都是随机的, 难以对其出口特性进行等值^[6-9], 且求解等值网络变量的导纳矩阵规模过大, 难以保证精度^[10-11]。此外, 换流器每个子模块与阀基控制器 VBC (Valve Based Controller) 之间通过独立的光纤进行通信, 信道多、数据量大, 难以通过现有的仿真接口进行转换, 因此需要开发新的仿真系统。

在此背景下, 本文开展了 MMC-HVDC 系统的数模混合式实时仿真平台的研究。该系统可用于精确验证具有较多电平数(40 以上)换流阀的 MMC-HVDC 系统及控制保护平台设计, 从而检验工程的主电路参数设计、控制器性能和交直流系统的动态特性。平台主要由物理模拟的换流站设备模型(包括换流变压器、交直流开关场、49 电平电压源换流器、交直流线路)、数字实时仿真平台、数模接口、VBC 等组成^[12]。目前该系统已完成对上海南汇风电场 20 MW 柔性直流送出工程阀控和站控系统的实时仿真试验, 试验结果直接用于工程控制器的修正。

1 MMC 的主电路结构

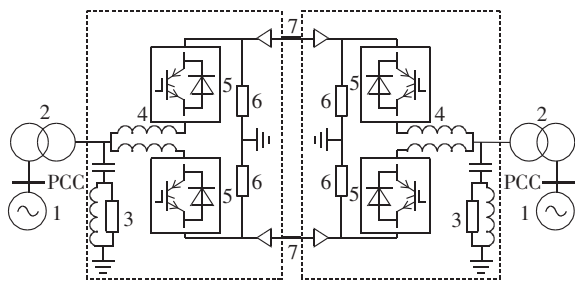
图 1 为双端 MMC-HVDC 系统的结构。换流站设备由变压器、换流电抗器、49 电平换流器、直流接地装置和直流电缆等部分组成。当换流器输出电平数高于 29 时, 交流系统一般不需要滤波器。换流站与交流系统联结处的母线称为 PCC 母线。

与基于 IGBT 串联阀的两电平或三电平换流器相比, MMC 结构使换流器开关状态增加, 且相间存在储能元件导致相间故障特性和环流特性更复杂^[13-15], 但避开了 IGBT 串联动态均压控制的难点。MMC 主电路结构如图 2 所示。

收稿日期: 2012-02-24; 修回日期: 2012-12-01

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGKJKJ[2010]253); 中央国有资本经营预算重大技术创新及产业化资金项目(PF71-10-006)

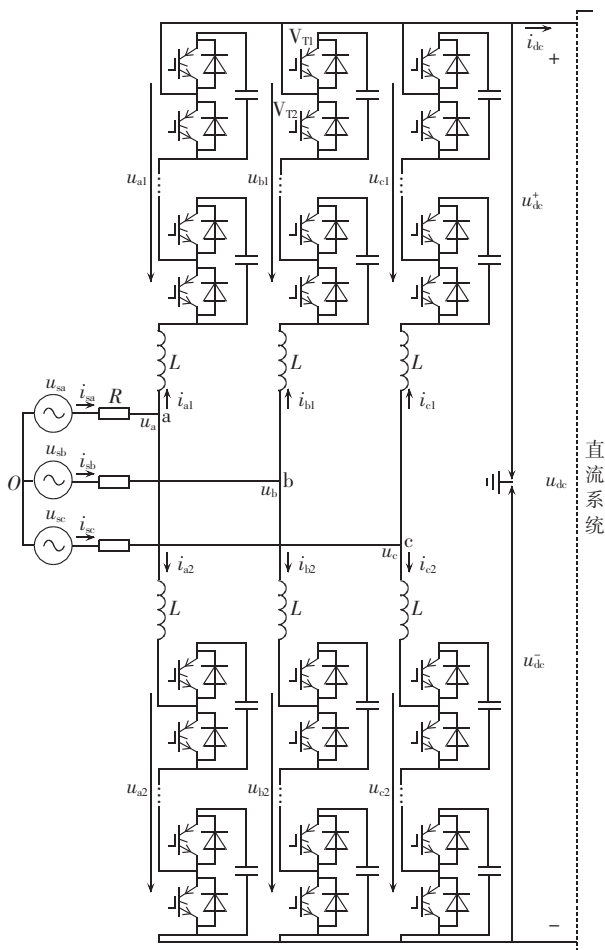
Project supported by the Science and Technology Project of SGCC (SGKJKJ[2010]253) and the Central State-Owned Capital Management Budget for Important Technical Innovation and Industrialization Fund(PF71-10-006)



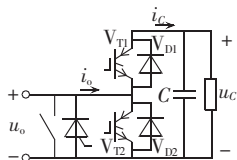
1 两端交流系统,2 联结变压器,3 交流滤波器(可不用)
4 换流电抗器,5 换流阀,6 直直接地装置,7 直流电缆

图 1 两端 MMC-HVDC 系统典型结构图

Fig.1 Typical structure of bipolar MMC-HVDC



(a) 换流器及交流系统等值图



(b) 单一子模块结构及电压电流参考方向

图 2 MMC 主电路结构图

Fig.2 Main circuit of MMC

图 2(a)中, L 为桥臂电抗的电感; R 为变压器、电抗和桥臂损耗的等效电阻; $i=a,b,c$;则 u_{si} 和 i_{si} 分别为系统侧相电压和电流值; u_i 为换流器交流侧出

口电压; u_{i1} 和 u_{i2} 分别为换流器各相上、下桥臂输出电压; i_{i1} 和 i_{i2} 为上、下桥臂电流; u_{dc}^+ 、 u_{dc}^- 分别为直流侧正、负极对地电压。分析图 2(b)中子模块,令 S_{ik1} 、 S_{ik2} ($i=a,b,c;k=1,\dots,n$) 分别为各相上、下桥臂第 k 个子模块开关状态,在一个工作周期内其取值如式(1)所示。

$$S_{ik1}(t)=\begin{cases} 1 & t_1 < t < t_2 \quad V_{T2} \text{ 关断}, V_{T1} \text{ 导通} \\ 0 & \text{其他} \quad V_{T2} \text{ 导通}, V_{T1} \text{ 关断} \end{cases} \quad (1)$$

按图 2(b)所示参考方向,可知各相上、下桥臂子模块电容电压分别为:

$$C \frac{du_{Cik1}}{dt} = -S_{ik1} i_{i1} \quad (2)$$

$$C \frac{du_{Cik2}}{dt} = S_{ik2} i_{i2} \quad (3)$$

u_{Cik1} 、 u_{Cik2} 分别为对应子模块电容电压幅值,其积分形式为:

$$u_{Cik1} = u_{Cik1}^0 - \frac{S_{ik1}}{C} \int_0^t i_{i1} dt \quad (4)$$

$$u_{Cik2} = u_{Cik2}^0 + \frac{S_{ik2}}{C} \int_0^t i_{i2} dt \quad (5)$$

在式(4)、(5)中, S_{ik1} 、 S_{ik2} 的取值由 MMC 的调制算法求出; u_{Cik1}^0 、 u_{Cik2}^0 ($i=a,b,c$) 分别为变流器上、下桥臂子模块 $t=0$ 时刻的电容电压。

2 实时仿真平台工作原理及结构

2.1 仿真平台的试验对象

为研究 MMC-HVDC 及其相连风电场和交流系统的稳态和动态特性,需要进行如下试验。

a. 对直流系统不同运行方式下的基本启停流程和保护动作逻辑进行试验。

b. 控制策略验证和参数优化研究。对直流系统不同运行方式下的内外环控制策略进行试验研究,包括电流内环和功率外环控制器的响应速度、鲁棒性、非线性因素(如测量和计算延迟、开关死区的影响)以及控制系统的相角和增益裕量等。

c. 交直流系统的相互影响研究。对发生典型故障时交直流系统相互影响进行研究,主要包括验证低电压穿越能力、模拟直流单极接地、直流线路双极短路、换流器阀间闪络、电抗器交流侧短路等。

d. 对换流器 VBC 的长期运行可靠性、主冗切换逻辑等进行验证。

2.2 物理仿真部分

换流器中各种均压均流算法的投入,使得第 1 节中每个子模块的 S_{ik1} 和 S_{ik2} 都是独立的。每个子模块还需要上报电容电压、IGBT/晶闸管的开关状态和器件温度,接收 VBC 发出的开关指令,这些状态完全独立,需要占用大量通信字宽和 CPU 进程,因此现有的数字仿真平台均无法进行实时仿真。

为此采用物理方式构建低压 49 电平 MMC, 完成对 VBC 和直流极控制保护 (PCP) 的实体试验。其中, PCP 完成测量、功率控制指令计算和 MMC 电压参考波生成; VBC 负责接收 PCP 的控制指令, 实现对 PCP 下发参考波的调制, 进行换流阀的电压电流平衡控制, 将阀状态上报给 PCP。物理仿真平台采用具有优良频率和损耗特性的场效应管模拟实际的 IGBT 和晶闸管特性。子模块电压测量由 Analog Devices 公司的单通道流水线 AD 芯片 AD9221 完成, 其最高采样频率为 1.5 MHz。模拟子模块采用一去一回单工方式和异步串行通信规约与实际 VBC 匹配。

模拟仿真平台还完成双端 MMC-HVDC 交直流场及线路的物理模拟, 包括换流电抗器、 ± 30 kV 直流线路、36.5 kV / 31 kV 换流变压器、断路器及其相关测量和控制系统等, 按照等惯性时间常数法成比例缩小系统参数, 其时间轴比例为 1。

2.3 数字仿真部分

在模拟仿真平台侧, 依据替代定理, 数字仿真平台实现的交流系统网络以戴维南等值电路表示, 包括电压放大器和串联的等值电阻 R_E , 后者的大小决定于数字系统的计算程序仿真步长和结构。在数字仿真侧, 依据替代定理, 模拟部分用诺顿等值电路表示, 为一条纯数字形式支路, 包括串联的等值电流源和并联电阻, 在每一步长中, 电流通过电流测量环节和 A/D 转换输入到实时数字仿真平台中。

实时数字仿真部分完成对柔性直流输电系统连接的风电场和 220 kV 以下交流网络的实时模拟。实时仿真的建模和解法基于节点分析技术, 在每一步长点将等值的系统元件转化为电流源与等值电阻并联的诺顿等值模型, 将构成的暂态等值电路的节点导纳矩阵的逆矩阵乘以节点注入电流矢量, 从而确定节点瞬时电压值。

2.4 数字-物理接口部分

由于模拟仿真平台为弱功率子系统, 而数字仿真输出/输入为数字信号, 故设计两者的硬件接口实现如图 3 所示。

数字子系统侧接口处节点电压由仿真程序计算得到后经 D/A 转换送出, 通过功率放大器送入模拟部分。同时模拟侧接口处支路的电流经电流互感器测量后作为反馈经 A/D 转换注入数字仿真系统。由于模拟仿真平台的元器件功率较小, 电压放大器即可驱动和吸收能量。而对于具有 300 个以上等值子模块的换流器, 其电压建立和子模块控制器电路无法采用高位取能, 须用外部低压电源供能方式, 通过隔离的 24 V 开关电源为子模块控制器供电。

整个系统结构如图 4 所示。

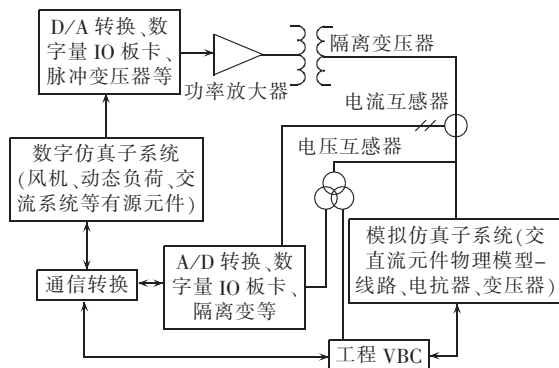


图 3 数字和模拟仿真子系统接口

Fig.3 Interface between digital and physical subsystems

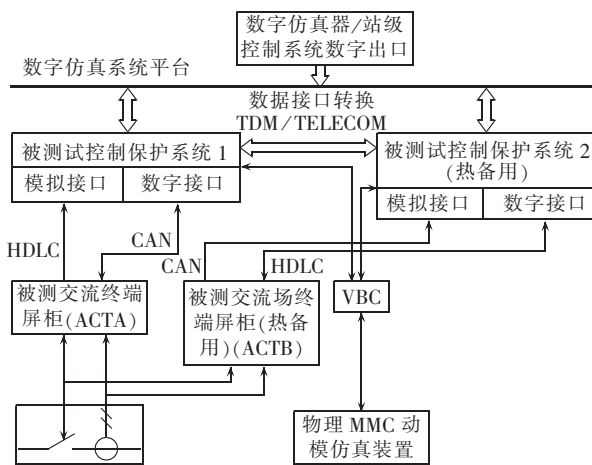


图 4 带有 VBC 和 PCP 的仿真系统平台结构

Fig.4 Structure of real-time simulation system with VBC and PCP

3 仿真试验建立过程

3.1 仿真系统建立步骤

首先对原始电网进行分割, 确定数字仿真程序和模拟仿真装置任务的划分和接口; 再对由数字仿真完成的网络结构进行动态等值化简, 以使化简后的电网规模与算法相适应, 并完成实时仿真程序; 然后确定系统模拟比, 计算模拟元件参数并分析杂散参数的影响, 适当加以补偿; 连接电压和电流互感器建立相应的测量和监控, 调整数模转换接口的信号比; 完成对录波系统的调试, 并建立相应的数据库; 最后完成 VBC、PCP 与模拟仿真平台的连接与通信测试, 完成试验后与离线程序的系统稳态和动态特性进行比较, 分析差异产生的原因。

3.2 仿真平台模拟比的选择

合理选择交直流系统模拟比是系统仿真建模和试验的前提, 计算的结果应既满足电路功率特性的约束, 又满足相似性原理与等惯性时间常数法。

3.2.1 设备的合理工作范围 and 安全性

在正常运行时, 潮流最轻的设备通过的工频电流不低于最小工作电流, 以保证精度; 适当提高模拟

电压基准值,有利于降低故障电流;按照运行方式的要求确定边界条件,例如要求换流站具有吸收最大感性无功的能力时,边界条件为:

$$\begin{cases} \frac{U_s^*}{\sqrt{R^{*2}+X^{*2}}} - \frac{U_s^* U_{Cmin}^*}{\sqrt{R^{*2}+X^{*2}}} \geq U_s^* I_{smax}^* \\ \frac{U_s^* U_{Cmin}^*}{\sqrt{R^{*2}+X^{*2}}} - \frac{U_s^*}{\sqrt{R^{*2}+X^{*2}}} \geq 0 \\ \frac{U_s^* U_{Cmin}^*}{\sqrt{R^{*2}+X^{*2}}} - \frac{U_s^* U_{Cmin}^*}{\sqrt{R^{*2}+X^{*2}}} \geq U_s^* I_{smax}^* \end{cases} \quad (6)$$

其中, U_s^* 、 I_{smax}^* 、 U_{Cmin}^* 、 U_{Cmax}^* 、 R^* 、 X^* 分别为交流电压、电流、换流器出口电压最小值和最大值、变压器和电抗等效电阻和电抗的标么值。

联结变压器阀侧额定电压取值为:

$$U_v = \frac{\mu U_{dc}(M_{max} - M_{min})}{\sqrt{2} k_i X^* \sqrt{R^{*2} + X^{*2}}} \quad (7)$$

其中, μ 为直流电压利用率; M 为调制比; $I_{smax}^* = k_i I_{sN}^* = k_i$, 通常取电流系数 $k_i \in (1, 1.2 \sim 1.3)$ 。

3.2.2 系统模拟比的选择顺序

建模时首先分别选定交流和直流系统的容量模拟比,其中直流系统模拟比的选择需要考虑直流建策策略、换流阀中弱电开关正常解锁需要的最小工作电流等,再分别选择合适的系统电压比和电流比,而系统的阻抗、电感和电容的模拟比随之确定。容量比和电压比选择方式为:

$$N_s = \frac{S_{sim}}{S_{eng}}, \quad N_U = \frac{U_{sim}}{U_{eng}} \quad (8)$$

电流比和电抗比随之确定:

$$\begin{cases} N_I = \frac{N_s}{N_U} \\ N_Z = \frac{N_U}{N_I} \end{cases} \quad (9)$$

其中, S_{sim} 、 S_{eng} 、 U_{sim} 、 U_{eng} 分别为仿真平台容量、工程实际容量、仿真平台交流电压、实际工程电压值。

在以上计算基础上,调整控制器的参数,可获取等效的动态特性。

4 仿真平台在工程设计中的应用

4.1 仿真系统建模

目前该系统已完成对上海南汇风电场 20 MW 示范工程的实时仿真试验。试验中部分实时数字仿真过程由物理仿真平台完成。

南汇柔性直流输电示范工程直流额定电压为 ± 30 kV, 直流电流为 300 A; 换流器容量为 18 MV·A, 为三相六桥臂 49 电平结构。送端站南汇风电场电压等级 35/10 kV, 配置 2×20 MV·A 升压变, 11 台 1.5 MW 的风机分别接入 10 kV 分段母线。功率受端南汇站交流电压等级为 220/110/35 kV。仿真试验中模拟仿真平台参数为: 变压器为 DYn-11 接法, 二

次侧中性点通过电阻接地, 阀侧电压线为 145 V; 短路阻抗比为 0.08; 桥臂电抗器标么值为 0.17; 换流器为 49 电平; 直流电压为 ± 140 V。

4.2 仿真应用

以直流母线双极短路试验为例, 用实时仿真平台验证该故障态 PSCAD 离线仿真的正确性、控制保护逻辑的可靠性和 VBC 的功能性, 如 PCP 主保护策略及响应速度、阀控系统闭锁子模块的时序等。图 5 为直流双极短路示意图及短路电流方向。

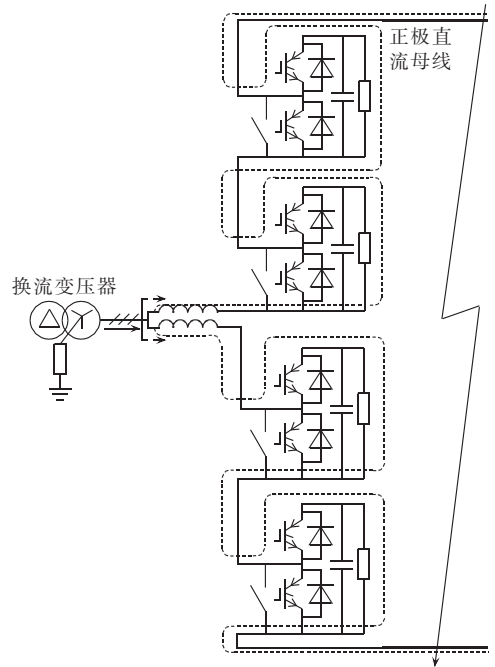


图 5 直流双极短路及短路电流方向

Fig.5 Current direction under DC bipolar short circuit

两站正常运行情况下(送端采用定有功功率、定无功控制, 受端定直流电压、定无功控制), 两极短路后换流站电容均通过故障点放电, 同时交流系统通过故障点形成三相短路, 此时阀承受交流电流与电容放电电流的叠加。显然电容放电电流主要与电感参数相关, 不考虑损耗, 设所有的电容能量转换为电感容量, 见式(10)。

$$n \frac{1}{2} C U_0^2 = \frac{1}{2} L i_d^2 \Rightarrow i_d = \sqrt{\frac{n C U_0^2}{L}} \quad (10)$$

此时的交流短路电流为:

$$I_s = \frac{E_0}{X_s + X_c} \quad (11)$$

其中, n 为桥臂电平数, X_s 为交流系统等值阻抗, i_d 为桥臂电流。

计算可得, 如果直流欠压保护和换流器过流保护未能可靠动作, 则放电电流在 16 ms 时达到最大, 桥臂电流为放电电流叠加交流短路电流的一半, 后者在 10 ms 时达到最大, 按照最大叠加计算桥臂电流最大值为 2.514 kA, 远超过换流器的承受能力, 因此必

须对工程的控制保护逻辑和动作可靠性进行验证。

按照 4.1 节参数调整仿真平台,试验开始后,依次合交流断路器使换流器和直流线路自然充电,旁路充电电阻,直流电压控制站解锁换流器。完成顺控启动流程后,建立等效直流电压 60 kV,进入稳定运行工况。启动控制流程如图 6 所示。

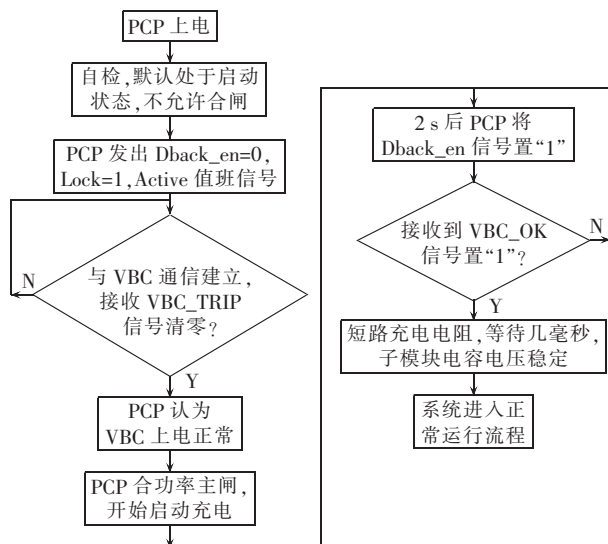
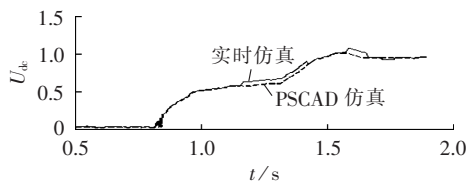


图 6 实时仿真平台对 PCP 顺序控制启动流程的测试

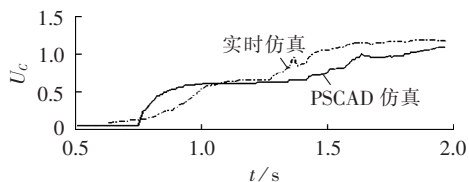
Fig.6 Test of PCP sequential control startup by real-time simulation system

图中, Dback_en 为 VBC 允许检测换流器子模块电压, Lock 为 PCP 向 VBC 发出的闭锁命令信号, VBC_TRIP 为 VBC 向 PCP 上报的故障闭锁信号。

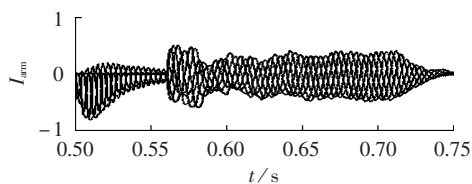
图 7 为 PSCAD 和实时仿真试验平台顺序启动充电的暂态过程对比(纵轴为标么值),其中直流电压



(a) 直流电压上升波形



(b) 子模块电压上升波形



(c) 功率送电站解锁前后桥臂电流波形

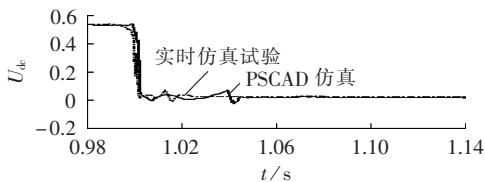
图 7 顺序启动试验暂态波形

Fig.7 Transient waveforms of PCP sequential control startup

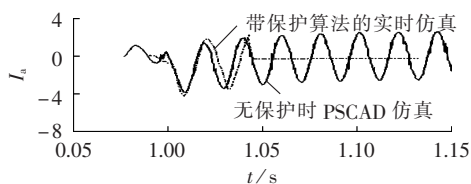
上升波形具有很高的相似度;子模块电压上升波形与离线仿真波相比,存在一定的误差,这是由于功率电力电子器件的模型很难用 PSCAD 精确描述,但满足电压控制要求;图 7(c)为实时仿真平台功率送电站解锁前后桥臂电流波形,可见 6 个桥臂电流波形具有良好的对称性。

双站均完成充电后,在模拟风场站送出有功 10 MW、定交流电压控制参考值 35 kV 时,将直流正负极母线永久性短路。发生故障后要求 VBC 立即闭锁换流器并开通旁路晶闸管,同时交流跳闸以切断交流电流的持续馈入。

图 8(a)中,短路后电压迅速跌落,试验波形和 PSCAD 仿真非常接近,考虑到电压测量点到短路点有一定电气距离,故实测电压出现小幅振荡。图 8(b)中系统 a 相电流峰值半周期后过 4 倍标么值,过流 3 ms 内 VBC 先闭锁,10 ms 后 PCP 保护动作,发 VBC_TRIP 指令、跳闸、触发晶闸管,实现了对主电路设备的保护。而无保护的 PSCAD 仿真则显示为持续过流,必然造成主电气设备的损坏。



(a) 正负极直流电压跌落波形对比



(b) 短路后 a 相交流电流波形对比

图 8 双极短路时直流电压和交流电流仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms of DC voltage and AC current under bipolar short circuit

该试验可证明在严重的直流双极短路故障状态下,实时仿真平台的交流电流和直流电压波形与 PSCAD 仿真在响应速度、幅值特性上具有很高的相似性,该平台能够对离线仿真结果进行复核,更重要的是对我国首套柔性直流工程的站控和阀控系统进行了在线测试,证明了被测 PCP 和 VBC 系统直流短路和过流保护逻辑正确,主保护能够可靠动作。

5 结论

目前世界范围内,柔性直流输电的电压等级和规模越来越大,随着工程容量的不断提升,MMC-HVDC 技术体现出越来越大的优势。随着上海示范工程在我国的实施,多电平数、交直流混合、且能够对站控阀控系统进行闭环验证的实时仿真系统,体现了良

好的前景。

该系统采用的 49 电平换流器物理模型,具有很高的等效精度,驱动功率小,且能够和工程用 VBC 进行全规模实时通信。

该模拟实时仿真平台建立过程中采用了多项关键技术,包括换流阀的物理模型、交直流系统的划分、数模仿真子系统的划分以及多种模型元件的选择等。

参考文献:

- [1] 汤广福,贺之渊,徐政,等. 电压源型换流器直流输电基础理论研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2008.
- [2] 宋小权,孙苓生. 基于 CPLD 和 DSP 的轻型直流输电换流器控制器设计[J]. 电力自动化设备,2007,27(3):86-88.
SONG Xiaoquan,SUN Lingsheng. Design of the converter controller for flexible HVDC dynamic simulator based on CPLD and DSP[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(3):86-88.
- [3] 郑超,周孝信,李若梅. 电压源换流器式高压直流输电的动态建模与暂态仿真[J]. 电网技术,2005,29(16):1-5.
ZHENG Chao,ZHOU Xiaoxin,LI Ruomei. Dynamic modeling and transient simulation for voltage source converter based HVDC[J]. Power System Technology,2005,29(16):1-5.
- [4] 王明新. 高压直流输电模拟装置的作用[J]. 电网技术,2001,25(12):64-66.
WANG Mingxin. Action of HVDC transmission simulator [J]. Power System Technology,2001,25(12):64-66.
- [5] 丁冠军,丁明,汤广福,等. VSC-HVDC 领域新型模块化多电平 VSC 拓扑本质机理及其调制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(36):1-8.
DING Guanjin,DING Ming,TANG Guangfu,et al. Research on the topology essential mechanism and modulation scheme of new modular multilevel VSC in the field of VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(36):1-8.
- [6] 李响,王志新,刘文晋. 海上风电柔性直流输电变流器的研究与开发[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):10-15.
LI Xiang,WANG Zhixin,LIU Wenjin. Research and development of the DC converter for wind power on the sea[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):10-15.
- [7] SIEMASZKO D,ANTONOPOULOS A,ILVES K,et al. Evaluation of control and modulation methods for modular multilevel converters[C]//Proceedings of International Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo,Japan:Institute of Electrical and Electronics Engineers,2010:746-753.
- [8] 胡兆庆,毛承雄,陆继明. 一种新的优化协调控制在轻型直流输电中的应用[J]. 中国电机工程学报,2005,25(8):41-49.
HU Zhaoqing,MAO Chengxiong,LU Jiming. Application of a novel optimal coordinated control to HVDC light[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(8):41-49.
- [9] 刘云,印永华,曾南超,等. 数模混合式高压直流输电仿真系统的建立[J]. 电力系统自动化,2006,30(18):38-44.
LIU Yun,YIN Yonghua,ZENG Nanchao,et al. Model establishment of digital/analog HVDC simulation system [J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(18):38-44.
- [10] 陈海荣,徐政. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报,2006,26(23):42-48.

CHEN Hairong,XU Zheng. Control design for VSC-HVDC supplying passive network[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(23):42-48.

- [11] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
WANG Shanshan,ZHOU Xiaoxin,TANG Guangfu,et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):1-7.
- [12] 杨杰,郑健超,汤广福,等. 电压源换相 HVDC 站内交流母线故障特性及保护配合[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):6-11.
YANG Jie,ZHENG Jianchao,TANG Guangfu,et al. Internal AC bus fault characteristics of VSC-HVDC system and protection coordination[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(16):6-11.
- [13] 朱永亮,马惠,张宗谦. 三相高功率因数 PWM 整流器双闭环控制系统设计[J]. 电力自动化设备,2006,26(11):87-91.
ZHU Yongliang,MA Hui,ZHANG Zonglian. Dual closed-loop control of three phases high power factor PWM rectifier [J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(11):87-91.
- [14] WANG X,GLESBRECHET J,WOODFORD D A,et al. Enhanced performance of a conventional HVDC analogue simulator with a real-time simulator[C]//Proceeding of the 1993 Power System Computation Conference. Avignon,France:[s.n.],1993:663-669.
- [15] DOMMEL H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multi-phase networks[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1969,88(2):734-741.
- [16] 李响,王志新,刘文晋. 海上风电柔性直流输电变流器的研究与开发[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):10-14,20.
LI Xiang,WANG Zhixin,LIU Wenjin. Flexible direct current transmission converter for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):10-14,20.
- [17] 殷自力,梁海峰,李庚银,等. 基于模糊自适应 PI 控制的柔性直流输电系统实验研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(7):49-53.
YIN Zili,LIANG Haifeng,LI Gengyin,et al. Experimental study of VSC-HVDC under fuzzy adaptive PI control[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(7):49-53.
- [18] 黄川,王志新,王国强. 基于 MMC 的海上风电场柔性直流输电变流器仿真[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):23-27.
HUANG Chuan,WANG Zhixin,WANG Guoqiang. Simulation of MMC-based converter for flexible direct current transmission of offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):23-27.

作者简介:

刘 栋(1982-),男,安徽宿州人,博士研究生,研究方向为电压源换相柔性直流输电控制策略及试验方法等(E-mail:liudong@sgri.sgcc.com.cn);

汤广福(1966-),男,安徽六安人,教授级高级工程师,博士研究生导师,研究方向为 FACTS/HVDC 及其相关试验方法;

刘 栋 贺之渊(1977-),男,河南南阳人,高级工程师,博士,研究方向为 FACTS/HVDC 及其相关试验方法。

(下转第 80 页 continued on page 80)

Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]:IEEE,2005: 1322-1327.

- [20] LU Weixing. Control and application of multi-terminal HVDC based on voltage-source converter[D]. Montreal,Canada:McGill University,2003.

作者简介:

任敬国(1986-),男,山东利津人,博士研究生,主要研究

方向为基于电压源换流器的高压直流输电技术的控制与应用(E-mail: rjg@mail.sdu.edu.cn);

李可军(1972-),男,山东高密人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量、灵活交流输电及其智能控制(E-mail: lkjun@sdu.edu.cn);

赵建国(1955-),男,山东乳山人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统调度自动化、电力电子与电力传动等方面的研究工作。

***N*-1 principle based steady-state control of VSC-MTDC transmission system**

REN Jingguo¹, LI Kejun¹, ZHAO Jianguo^{1,2}, NIU Lin², LIANG Yongliang¹, GUO Qiwei¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. State Grid of China Technology College, Ji'nan 250002, China)

Abstract: The requirements for maintaining VSC-MTDC transmission system safe and stable are analyzed, and the hierarchical structure of control system and the calculation of DC power flow are outlined. An *N*-1 principle based control strategy is proposed for the steady-state operation of MTDC transmission system. Based on the continuous DC power flow calculation and the DC voltage and power limits, the control strategy coping with the single converter loss is designed, the specified steps of reference value calculation is presented and the existence of solution is discussed. When there is no solution, the way to optimize the active power reference is proposed and an evaluation index is defined for searching the optimal active power references after optimization. A typical five-terminal DC system is introduced and MATLAB programming is applied to verify the feasibility and accuracy of the proposed strategy. Results show that the proposed control strategy provides VSC-MTDC transmission system with reliable and safe references.

Key words: DC power transmission; VSC-HVDC; MTDC; *N*-1 principle; steady-state control

(上接第 73 页 continued from page 73)

Hybrid real-time simulation technology for MMC-HVDC

LIU Dong, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, ZHAO Yan, PANG Hui

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: A hybrid real-time simulation platform with digital and physical subsystems is proposed for the MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter based HVDC). Its system structure, equivalent principle and simulation ratio calculation are introduced, as well as its first application in engineering development. Composed of the digital system model, 49-level MMC physical simulation device, digital-analog communication interface, it carries out the total functional simulation in real time to verify the actual VBC (Valve Based Controller) and converter PCP (Pole Control Protection) system. It is applied to the fault state simulation of Shanghai Nanhui HVDC pilot project and the simulative results are compared with the test results by PSCAD, which proves the effectiveness of the introduced platform in the online real-time verification of the dynamic performance and control-protection platform of MMC-HVDC.

Key words: modular multilevel converter; HVDC power transmission; computer simulation; physical simulation; equivalent principle