

# 多端直流输电技术及其发展

袁旭峰<sup>1,2</sup>,程时杰<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

**摘要:** 分析了多端直流输电系统的运行机理,概述了国内外多端直流输电的应用情况,并从多端直流输电系统的模型建立、控制策略、直流调制、潮流计算以及基于 VSC 的多端直流输电技术等几个方面综述了国内外在理论方面的研究成果,展望了多端直流输电技术的发展趋势,认为多端高压直流输电也是我国大区电网发展中值得考虑的一种电网互联模式和可供选择的输电方式。

**关键词:** 多端直流输电; 电压源换流器; 混合多端直流输电

**中图分类号:** TM721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)19-0061-07

## 0 引言

在大区电网互联中,交流电网主要局限在大区内部发展,而大区电网之间以直流电网互联,以利于实现大区电网间的非同步运行与隔离,克服容量过大的交流电力系统长距离互联所带来的稳定问题,改善大区电网的动态品质,提高大区电网的稳定性,已经逐渐成为人们的一种共识。然而,传统的直流输电大多为双端系统,仅能实现点对点的直流功率传送,当多个交流系统间采用直流互联时,需要多条直流输电线路,这将极大提高投资成本和运行费用。于是,多端直流输电 (Multi-terminal HVDC, 即 MT-DC) 系统便应运而生<sup>[1~3]</sup>。

MTDC 输电系统是指含有多个整流站或多个逆变站的直流输电系统。其最显著的特点在于能够实现多电源供电、多落点受电,提供一种更为灵活、快捷的输电方式。MTDC 输电系统主要应用于:由多个能源基地输送电能到远方的多个负荷中心;不能使用架空线路走廊的大城市或工业中心;直流输电线路中间分支接入负荷或电源;几个孤立的交流系统之间利用直流输电线路实现电网的非同期联络等。随着大功率电力电子全控开关器件技术的进一步发展,新型控制策略的研究、直流输电成本的逐步降低、以及电能质量要求的提高,基于常规的电流源换流器 (Current Source Converter, CSC) 和电压源型换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 的混合 MT-DC 输电技术、基于 FACTS 的 MTDC 输电技术、以及基于 VSC 的新型 MTDC 技术将得到快速发展,必将大大提高 MTDC 输电系统的运行可靠性和实用性,扩大 MTDC 输电系统的应用范围,为大区电网提供更多的新型互联模式,为大城市直流供电的多落点

受电提供新思路<sup>[4]</sup>,为其它形式的新能源接入电网提供新方法<sup>[5~6]</sup>,为优质电能库的建立提供新途径<sup>[7]</sup>。

目前高压直流输电在我国得到了很大的发展,同时也带来了许多新的课题。以南方电网为例,目前建成了“五交三直”的西电东送通道,即天生桥至广东三回、贵州至广东 500 kV 双回交流输电线路、和天生桥至广州、安顺至肇庆、三峡至广东 500 kV 直流输电线路,形成了一个多馈入直流输电系统。由于同一电网的在相邻区域里受电,必然在交直流输电系统之间,以及直流输电系统的各个回路之间产生相互影响,易于导致直流换相失败,甚至多回直流输电系统同时换相失败。如果在多回直流输电系统同时或相继发生换相失败,必然导致受电端接受的功率大幅度降低,对该端的交流系统稳定性产生极大影响。为解决南方电网中多电源供电、多落点受电的问题,提高系统的稳定性,有效克服重大灾难性事件的发生,探讨和研究 MTDC 输电技术,无疑具有极大的意义。

## 1 MTDC 输电系统的接线及调节方式<sup>[1~3]</sup>

### 1.1 MTDC 输电系统的接线方式

MTDC 输电系统是联系三个以上交流电网的直流系统。与双端直流输电系统只有一条直流传输线不同,MTDC 输电系统需要多条直流传输线,因此根据运行条件和设计要求的不同,可以组成多种拓扑结构的接线方式。总的来说,可以分为并联和串联两种接线方式。

#### (1) 并联型 MTDC 输电

所有换流站都并联连接,运行在同一直流电压下,直流输电网络既可以是放射形的,也可是网状

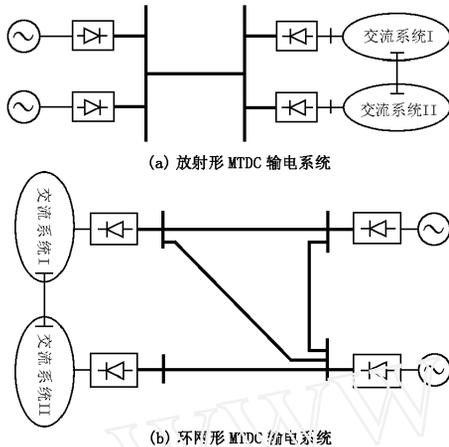


图 1 并联 MTDC 输电系统接线图

Fig 1 Sketch of parallel multiterminal HVDC system

的,或者是两者相组合。在并联 MTDC 输电系统中,换流站之间的功率分配主要靠改变换流站的电流来实现。其中,由一个换流站来控制直流电压,并维持电流及整个 MTDC 输电系统的功率平衡,其它换流站则按给定的电流(或功率)运行。图 1 即为并联 MTDC 输电系统单接线示意图。

## (2) 串联型 MTDC 输电系统

所谓串联型 MTDC 输电系统,指换流站串联连接,流过同一直流电流,直流线路只在一处接地,换流站之间的功率分配主要靠改变直流电压来实现。在串联型 MTDC 输电系统中,一般由一个换流站承担整个串联电路中直流电压的平衡,同时也起调节电流的作用。图 2 给出了一种这种接线方式的 MTDC 输电系统。从距离较远的发电厂,用直流输电系统把电力分送给大城市中几个配电网或一个大的配电网的几个馈电点,就是适宜采用这种输电系统的一个例子。

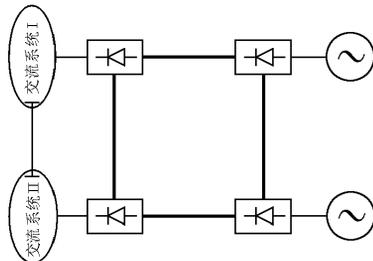


图 2 串联 MTDC 输电系统接线图

Fig 2 Sketch of series multiterminal HVDC system

当然,MTDC 输电系统的接线方式也可是混合接线方式,即既有串联又有并联的接线方式,这里不累赘。

与串联接线方式相比,并联接线方式直流输电的线路损耗较小,易于控制,进一步扩展的灵活性较高,具有相对最少的运行问题,因而在多数工程中被广泛接受。

## 1.2 MTDC 输电系统的调节方式和运行特性

当 MTDC 输电系统采用不同的接线方式时,其调节方式也各有不同。

### 1.2.1 并联型 MTDC 输电系统的基本调节方式

#### 1) 电流裕额控制的调节方式

该方式是双端直流输电系统定电流调节方式的延伸,即一个换流站控制整个直流网络的直流运行电压,其它所有的换流站都按定电流方式调节,使直流系统有稳定的运行点。

#### 2) 定电流定电压调节方式

采用方式 1 时,控制电压的换流站运行于定或定 特性上,因此当其交流侧电压波动时,将引起直流网络电压的变化。尽管换流变压器分接头的自动调节功能可以在一定程度上减少这种波动的范围,但是调节速度缓慢且不连续。如果系统对直流电压有严格的要求,必需在控制电压的换流站增设直流电压调节器,在正常运行时改为定电压调节。

#### 3) 限制电压调节方式

限制电压调节方式适合于换流站端数很多的情况,各换流站的特性由定电压和定电流(逆变站还有定 )等多段组成。由一个整流站控制直流系统的电压并将其保持在额定值,其余的换流站都运行在定电流工作方式下。如果控制直流电压的换流站发生故障而导致该端直流电压下降至其电压限制值时,则将控制直流电压交给其它站去完成,该站转为定直流电流控制方式运行。

当然,实际 MTDC 输电系统的调节方式可以采用其它调节方式或几种上述运行方式的混合方式。

### 1.2.2 串联型 MTDC 输电系统的基本调节方式

串联联接多端直流输电系统的特点是通过各个换流站和线路的直流电流相同,因此宜采用定电流运行方式运行。为了保证直流系统有稳定的运行点,常常选定一个换流站为定电流方式调节,其余换流站均按定 或定 调节。这种调节方式比较简单而且换流站无功功率消耗的总量也最小。

## 2 MTDC 输电系统的几个关键性问题

MTDC 输电系统是在双端直流输电的基础上发展起来的一种直流输电方式,因此,用于传统直流输电的技术大多可以应用于 MTDC 输电系统。但由

于 MTDC 输电网络拓扑结构和功能的特殊性,使其在模型的建立、潮流计算、稳定和可靠性分析、控制策略、谐波处理、交直流间的相互影响等方面均与两端直流输电存在较大的差异,需要进一步的探讨和分析。国内外关于 MTDC 输电技术的研究也主要集中在这些方面。以下将从建模与控制、潮流计算、直流调制以及稳定性分析等几个方面,对国内外 MTDC 输电技术的几个关键性问题进行综述。

### 2.1 MTDC 输电系统的建模及控制

在暂态稳定分析中,常用的 MTDC 输电模型有详细模型、准稳态模型和简化模型三种。

文献 [10] 介绍了在暂态稳定分析程序中采用的三种常用 MTDC 输电系统模型:详细模型、准稳态模型和简化模型。并指出详细模型是基于能够准确获取换流站、控制系统及直流输电网络的各种基本参数的情况下建立的模型,能用来分析交直流系统的动态性能,但其仿真速度较慢,收敛困难;准稳态模型则是在缺乏足够信息情况下建立的模型,它对系统模型进行了适当的简化,因此只能用于系统规划设计等几个方面,分析具体系统的稳定及动态特性时不够准确,甚至会产生错误结果;简化模型则是介于详细模型和准稳态模型之间的一种模型,它由换流站、控制系统(三级控制:协调控制、主站控制、极控制),以及考虑了动态性能的直流输电传输线模型构成,能较为准确地分析系统的稳态及动态性能。

文献 [11] 介绍了如何在 BMTF 中建立太平洋四端直流输电模型的方法。由于该系统是在原有的双极双端直流输电系统上扩建的,因此模型提出了五级控制思想,即双极控制、极控制、站控制、新旧系统的自适应控制和换流器控制。文献 [12] 建立了太平洋 4 端直流输电实际系统的详细仿真模型,其控制系统由四级控制实现,即双极控制、极控制、站控制和换流器控制。文献 [9] 描述了具备直流功率调制功能的 MTDC 输电系统的仿真模型,该模型为一个小信号小干扰线性化模型。其功率的调制,以及系统稳定性的实现是通过采用线性二次型最优控制理论实现的。采用小信号线性化方法建立数学模型的文献还有 [16],另外,文献也采用了协调控制的思想,由本地最优和协调补偿两级控制构成。

在文献 [17] 中,论文作者采用微分几何法,建立了交流 MTDC 输电系统的模型,并应用精确线性化方法,设计了相关的直流功率调制的非线性控制器,仿真结果验证了该方法的有效性。

文献 [5~6] 提出了基于 VSC (电压源逆变器) 的 MTDC 输电系统模型,并将其应用于风力发电中,取得了较好的仿真效果。

文献 [4] 建立了适用于大城市供电的 MTDC 输电系统模型,它实质上是一个混合 MTDC 输电系统模型。文献 [18] 完整地提出了混合 MTDC 输电系统的概念,并以此为基础建立了仿真模型。在该文献中,CSC (电流源换流器) 采用直流电流控制,VSC 采用直流电压控制,论文为此系统建立了相应的控制及保护方案。并进一步分析研究了系统的启动、允许正常状态以及故障状态运行时系统的动态特性。

由于 MTDC 输电系统具有接线方式多样性,直流功率潮流控制灵活性的特点。目前,MTDC 输电系统还没有统一的控制策略,针对不同的 MTDC 输电系统接线方式和潮流方式,其控制策略各有不同。总的来说,MTDC 输电系统的控制思想源于两端直流输电系统,但又有所区别,主要有:

1) 电流或电压平衡调节器。电流平衡调节器用以维持并联型 MTDC 输电系统中逆变站的总电流与整流站的总电流相等。电压平衡调节器用以维持串联型 MTDC 输电系统总电压平衡。图 3 所示为并联式 MTDC 输电系统电流平衡的示意图 [10, 13~15]。

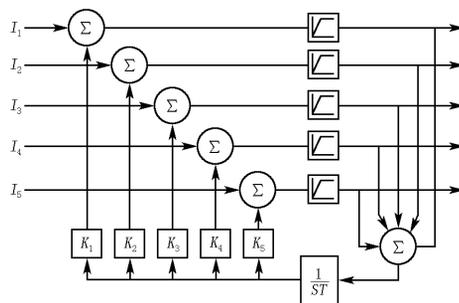


图 3 并联 MTDC 输电系统电流平衡示意图

Fig 3 Current order balancing for the parallel MTDC transmission system

2) 直流功率倾斜速率设定。当直流系统中有两个以上换流站与潮流变化有关时,需要根据各个换流站间功率调制实际情况以及换流站最大容量进行直流功率斜率的调节。目前,这个问题成为限制多端直流输电系统应用的主要瓶颈。

3) 直流电压的控制。MTDC 输电系统的直流电压可以根据实际运行情况由不同的逆变站进行控制,以保证整个 MTDC 输电系统运行在额定电压的范围内。

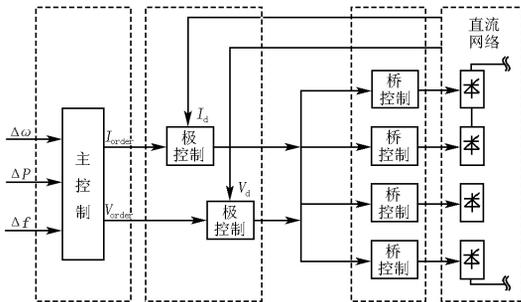


图 4 M TDC输电系统分级控制示意图

Fig 4 Hierarchical control model for the M TDC transmission system

4) 换流站过载协调管理。在一个或多个换流站过载时,可将其负荷减小或转移至其它换流站,以保证换流站的运行安全。

5) 故障恢复过程中的功率配置策略。在故障恢复过程中,各个换流站传送的功率往往会发生变化,需要重新进行分配。

此外,如图 4 所示,所有的 M TDC 输电系统都采用分级协调控制策略<sup>[8-13]</sup>。

## 2.2 M TDC 输电系统的潮流计算

M TDC 输电系统潮流计算方法与双端系统相同,也分为交替求解以及联立求解两种。但是由于 M TDC 输电系统的直流端与双端直流输电系统直流端的控制策略不尽相同。而且 M TDC 输电系统接线方式复杂,换流站数量较多,系统的约束条件和维数都大大增加,因此常规的交直流潮流计算方法有一定的局限性,需要根据 M TDC 输电系统的实际情况进行改进,主要有以下几个方面:

1) 直流输电网络方程。不同于双端 HVDC 输电系统的一条直流线路,M TDC 输电系统中含有多条直流输电线路,因此在进行潮流计算时,需要根据其接线方式构建相应的直流输电网络。

2) 换流站间的协调控制。由于控制和结构上的复杂性,M TDC 输电系统需要在各个换流站之间进行协调控制,故潮流计算中也必须考虑到这一点。

3) 模式转换。为了保证 M TDC 输电系统在故障或干扰状态下的正常运行,直流电压的控制往往会从一个端转向另一个端。这种情况在直流潮流计算时也必须加以考虑。

文献[19]把交直流系统潮流计算的顺序法应用于 M TDC 输电系统,交流系统和直流系统各自采用牛顿迭代法计算,其中直流端,根据不同的控制要求,求解对应节点电压平衡方程,进而构成直流系统潮流牛顿迭代法的修正方程式,然后再采用顺序法

联立求解潮流。

文献[20]提出了一种改进的交直流系统潮流交替解法。与文献[19]提出顺序求解法不同,根据直流系统的特点建立相应的电导网络方程,结合快速解耦,对交直流系统之间的耦合进行解耦,从而改善了传统的交替求解法,提高了算法的收敛性。文献[21]以多端口网络理论和诺顿等值定理为基础,提出了一种新的电力系统多端直流潮流算法,这种算法的优点在于它不仅可以处理多种变流器控制与运行方式,而且可以方便地处理与高压直流输电相关的特殊限制,如变压器分接头的离散调节、上下分接头限制、变流器电流限制、换流阀触发角限制等等。论文通过仿真说明了算法的有效性。总的来说,该算法仍然属于交替求解潮流算法。

文献[22][23]提出了一种将负荷等价法应用于 M TDC 输电系统潮流计算的方法,并在文献[24]中对算法的收敛性进行了研究。文献[25]提出了一种基于 M TDC 输电系统的优化潮流计算方法。该方法分别建立了交流和三端直流潮流计算的边界模型,然后采用 SGRA (Sequential Gradient Restoration Algorithm) 算法,对并联型和串联型 M TDC 输电系统潮流进行了全局优化计算。文献[26]提出了一种基于不同控制方式的定界限法,并将其应用于 M TDC 输电系统的潮流计算。

总的来说,M TDC 输电系统潮流计算方法较传统的方法没有本质的改变,只是在原有算法基础上的改进。

## 2.3 M TDC 输电系统的直流调制技术

直流输电系统的调制功能是指利用直流输电系统所连接交流系统的某些运行参数的变化,对直流功率或直流电源、直流电压、换流器吸收的无功功率进行自动调制,充分发挥直流系统的快速可控性,用以改善交流系统运行性能的控制功能<sup>[10,27]</sup>。直流调制也称为附加控制,常用的调制功能包括有功功率调制、频率调制、无功功率调制、阻尼调制等几种类型。直流调制的控制在主控制或极控制中实现。

文献[8]指出,M TDC 输电系统的每一端都可以进行直流调制,因而可以为系统的稳定运行提供更大的灵活性。当 M TDC 输电系统进行直流调制时,必然产生直流输电网络电流的变化,而电压设定端可以维持直流电流的平衡,也可以通过主控制命令改变其它端口的电流,进而维持电流平衡。文献[28]针对一个假定的 M TDC 输电系统,进行了无功功率调制(调制)与大功率(有功功率)的控制设计,仿

真结果表明直流调制能有效地克服交流系统的扰动,提高系统的稳定性。文献[27]根据小信号线性化原理,设计了一个直流调制控制器(MDMC),仿真结果表明,该控制器在阻尼的调制上非常有效。文献[15]对SACO I系统和魁北克—新英格兰两个系统的频率调制进行了分析。SACO I在科西嘉站采用的双环频率控制,主环采用比例控制把频率控制在某一范围内,副环采用积分控制功率等级,进而将系统频率稳定在50Hz。魁北克系统同样采用了双环控制,但一个环采用死区控制暂态频率,另一个环采用稳态频率控制。

#### 2.4 MTDC输电系统的稳定性分析

文献[29]将MTDC输电系统在工作点附近进行线性化,进而建立整个系统的线性状态方程,然后采用特征值分析法对系统的稳定性进行了研究。

文献[30][34]分析了多端直流输电系统在连接弱交流系统,以及从一种运行模式向另一种运行模式切换时,造成系统不稳定的两个主要原因:一是逆变器运行在CEA控制模式或整流器运行在CA模式时,系统呈现负阻特性;二是交流侧接入的电容器组使得系统的短路比(SCR)减小。最后,作者提出用电压稳定因数(Voltage Stability Factor, VSF)来评价系统的稳定性。如果VSF为负,则系统不稳定;如果VSF为正,但过大,系统虽然稳定,但是暂态特性差,系统容易波动。只有将VSF控制在一定的范围,系统才能保持稳定的同时获得较好的暂态特性。

文献[28]指出采用功率调制手段,MTDC输电系统技术将大大加强互联大系统的稳定性。并对美国南部电网的MTDC输电系统进行了仿真,研究结果表明,采用有功和无功功率调制能极大地改善系统的阻尼性能。

文献[27]中,提出采用比较灵敏度系数(Comparable Sensitivity)评估MTDC输电系统的动态稳定性,进而证明MTDC输电系统能够增强电力系统对低频震荡的阻尼、提高交流系统的传输功率极限,并分析了其影响因素。

### 3 MTDC输电系统的发展方向

传统的HVDC输电系统换流器存在以下缺点:

1)由于根据电网换流,故只能工作在有源逆变状态,不能接入无源系统。而且它对交流系统的强度较为敏感,一旦交流系统发生干扰,就容易换相失败。

2)无功消耗大,虽然可以通过改变触发角或熄弧角实现对无功功率的控制,但对无功功率的控制不能独立于对有功功率的控制。这导致系统电压不稳定,使对电力系统的动态控制相当困难。

3)谐波含量高,输出电压和电流的波形均存在很大的谐波分量,需要在换流站安装各种等级的滤波装置来滤除谐波,增加了成本。

这些缺点是由于晶闸管自身的内在缺陷所致,难以克服。与之相反,由全控型开关器件构成的VSC-HVDC则可克服上述缺陷,目前价格昂贵是一个影响其大规模应用的原因。为了获取最大的经济和技术效益,充分利用VSC换流器和CSC换流器各自的优点,作者认为关于MTDC输电技术,可在如下三个方向上开展研究。

#### 1) VSC-MTDC输电系统技术<sup>[4~7][35~37]</sup>。

具有快速自关断能力的大功率电力电子半导体器件,如GTO、IGBT、MPT的进一步发展,使研究具有强迫换相能力的、基于VSC的HVDC输电系统得以迅速发展并成功实现了商业运行<sup>[31]</sup>。与传统的基于电流源换流器(CSC)的HVDC比较,VSC-HVDC有许多优点,例如,其受端可以是低短路比的交流系统,也可以是无源系统<sup>[32]</sup>。另一个典型特征是,VSC-HVDC输电系统具有STATCOM功能,即可以通过控制交流母线电压来连续调节它对受端系统的无功支持,有利于提高系统的稳定性<sup>[32]</sup>。

因此,基于VSC的MTDC技术应该是MTDC输电系统技术的首选技术。如前面所述,虽然VSC-MTDC输电系统在许多方面的应用已经得到了研究<sup>[4~7]</sup>,并已经在试验中取得了成功<sup>[33]</sup>。但是VSC-MTDC输电系统的拓扑结构、运行方式、潮流计算、故障保护、控制策略、以及如何减小高频PWM控制的开关损耗等仍需深入研究。

2)混合MTDC输电技术。利用原有的直流输电系统,结合现有的新技术,构成混合MTDC输电系统,这在技术上也具有相当大的竞争力。早在1994年,文献[38][39]就提出了混合HVDC的设想。众所周知,世界上绝大多数直流输电系统都是基于晶闸管的电流源双端直流输电系统。如果在传统HVDC的基础上,接入VSC换流站,将系统扩展为Hybrid MTDC输电系统,必然可以实现用直流输电系统向弱交流系统、负荷密集的大城市、甚至无源系统输送功率<sup>[40]</sup>;也可以使用直流输电系统从其他形式的新型能源中心,如风力、太阳能发电等获取电能。

3)与 FACTS技术相结合。FACTS技术是一项基于电力电子技术与现代控制技术,对交流输电系统的阻抗、电压及相位进行灵活快速调节的输电技术,可实现对交流输电功率潮流的灵活控制,大幅度提高电力系统的稳定水平。由此可知,在 HVDC的换流站接入 FACTS设备,能有效地克服交流侧扰动所产生的、传统 HVDC输电系统不能克服的影响,极大地改善传统 HVDC输电系统的性能<sup>[41]</sup>。无疑,将 MTDC输电技术与 FACTS技术结合,必然可以大大提高系统的稳定性和可靠性,增强系统传输电能的灵活性。

#### 参考文献:

- [1] 浙江大学直流输电组. 直流输电 [M]. 北京:水利电力出版社, 1982  
Zhejiang University HVDC Group. Direct Current Power Transmission[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1982
- [2] Kundur P. 电力系统稳定与控制 [M]. 北京:中国电力出版社, 2002  
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002
- [3] 李兴源. 高压直流输电运行及控制 [M]. 北京:科学出版社, 1998  
LIXing-yuan Operation and Control of HVDC Transmission System[M]. Beijing: Science Press, 1998
- [4] Jiang H, Ekstrom A. Multiterminal HVDC Systems in Urban Areas of Large Cities[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1278-1284.
- [5] LU Wei-xing, Ooi B T. Multi-terminal DC Transmission System for Wind-farms[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2001. 1091-1096
- [6] LU Wei-xing, Ooi B T. Optimal Acquisition and Aggregation of Offshore Wind Power by Multiterminal Voltage-Source HVDC [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(1): 201-206
- [7] LU Wei-xing, Ooi B T. Premium Quality Power Park Based on Multi-Terminal HVDC [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 719-724.
- [8] Lefebvre S, Wong W K, Reeve J, et al. Considerations for Modeling MTDC Systems in Transient Stability Programs[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991. 397-404.
- [9] Ngan H W, David A K, Lo K L. Modelling of A Distributed Computer Controlled Multiterminal HVDC System for Dynamic Simulation[A]. Advances in Power System Control, Operation and Management International Conference 1991. 599-604.
- [10] Lefebvre S, Wong W K, Reeve J, et al. Experience with Modeling MTDC Systems in Transient Stability Programs [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(1): 405-413.
- [11] Hammad A, Minghetti R, Hasler H, et al. Modelling of the Pacific Intertie 4-Terminal HVDC Scheme in EMTP [A]. International Conference on AC and DC Power Transmission London: 1991. 362-367.
- [12] Hammad A, Minghetti R, Hasler J, et al. Controls Modelling and Verification for The Pacific Intertie HVDC 4-Terminal Scheme [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(1): 367-375.
- [13] Santos M. A, de Oliveira J C, de Moraes A J, et al. Methodology for Control and Analysis of a Series Multiterminal DC System [A]. 1998 International Conference on Proceedings of Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth 1998. 855-860.
- [14] Chapman D G, Gulachenski E M, Doe S, et al. Test Experience with Multiterminal HVDC Load Flow and Stability Programs[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1173-1181.
- [15] Long W F, Reeve J, McNichol J R, et al. Application Aspects of Multiterminal DC Power Transmission [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 15(4): 2084-2098.
- [16] Ngan H W, David A K, Lo K L. Multiterminal HVDC System Control Using a Distributed Computing Technique [A]. International Conference on AC and DC Power Transmission London: 1991. 114-119.
- [17] Ding J M, Dai X J. Control of AC/Multiterminal DC Power systems by Differential Geometric Approach [A]. Circuits and Systems, Proceedings of the 35th Midwest Symposium. 1992. 524-527.
- [18] Nosaka N, Tsubota Y, Matsukawa K, et al. Simulation Studies on a Control and Protection Scheme for Hybrid Multi-terminal HVDC Systems [A]. IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting 1999. 1079-1084.
- [19] 汪馥英. 多端 DC-AC的潮流计算 [J]. 华中理工大学学报, 1990, 18(6): 81-86  
WANG Fu-ying Load Flow Calculation for a Multi-terminal DC-AC System [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1990, 18(6): 81-86
- [20] 闫晓霞. 一种多端交直流混合输电系统的潮流算法 [J]. 电力学报, 1997, 12(2): 32-36  
YAN Xiao-xia An Algorithm for Power Flow in Multiter-

- minimal AC/DC Transmission System [J]. Journal of Electric Power, 1997, 12(2): 32-36
- [21] 陆进军, 黄家裕. 一种高效灵活的电力系统多端直流潮流算法 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 48-50  
LU Jin-jun, HUANG Jia-yu. A Versatile Multiterminal HVDC Power Flow Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 48-50
- [22] 丁奇峰, 张伯明, 张毅威, 等. 一种计算多端交直流系统潮流的新方法 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 14-18  
DING Qi-feng, ZHANG Bo-ming, ZHANG Yi-wei, et al. A New Approach to AC/MTDC Power Flow Computation [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 14-18
- [23] DING Qi-feng, ZHANG Bo-ming. A New Approach to AC/MTDC Power Flow [A]. Int Conf on Advances of Power System Control, Operation and Management Hongkong: 1997. 689-694.
- [24] DING Qi-feng, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. The Convergence Analysis of the AC/MTDC System Power Flow [A]. International Conference on Power System Technology, POWERCON 98 1998. 776-780.
- [25] de Martinis U, Gagliardi F, Losi A, et al. Optimal load Flow for Electrical Power Systems With Multiterminal HVDC Links [J]. IEEE Proc on Gener, Transm and Distrib, 1990, 137(2): 139-145.
- [26] Padiyar K R, Raman V K. A General Method for Power Flow Analysis in MTDC Systems [A]. Proceedings of Annual Convention and Exhibition of the IEEE India: 1990. 146-150.
- [27] ZHENG Han-chu, CHEN Shou-sun, NI Yi-xin, et al. A Study of Multi-Terminal DC Modulation Control [A]. IEEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management Hong Kong: 1991. 615-620.
- [28] Lee R L, Zollman D, Tang J F, et al. Enhancement of AC/DC System Performance by Modulation of a Proposed Multiterminal DC System in the Southwestern U. S [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(1): 307-316
- [29] Padiyar K R, Geetha M K. Study of Torsional Interactions in Multi-Terminal DC Systems Through Small Signal Stability Analysis [A]. International Conference on AC and DC Power Transmission London: 1991. 411-413.
- [30] Dash P K, Panigrahi A K, Mohanty A K. Analysis of Feasibility and Voltage Instability in Two and Multiterminal HVDC Systems [A]. International Conference on TENCON 89, Fourth IEEE Region 1989. 936-941.
- [31] Axelsson U, Holm A, Liljegren C, et al. Gotland HVDC Light Transmission—World's First Commercial Small Scale DC Transmission [A]. CRED Conference. 1999.
- [32] Schettler F, Huang H, Christl N. HVDC Transmission Systems Using Voltage Sourced Converters—Design and Applications [A]. IEEE Summer Meeting, SM-260 Conference Proceedings 2000. 715-720.
- [33] Nakajima T. Operating Experiences of STATCOMs and a Three-terminal HVDC System Using Voltage Sourced Converters in Japan [A]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition IEEE/PES Asia Pacific: 2002. 1387-1392.
- [34] Joetten R, Ring H, Wess T H. Stability and Safety Margins of a Weak Station within a Multiterminal HVDC System [A]. International Conference on AC and DC Power Trans London: 1991. 108-113.
- [35] Ooi Boon-Teck, WANG Xiao. Boost Type PWM HVDC Transmission System [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1557-1563.
- [36] TANG Lian-xiang, Ooi B T. Protection of VSC-Multi-Terminal HVDC against DC Faults [A]. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference 2002. 719-724.
- [37] LU Wei-xing, Ooi B T. DC Overvoltage Control During Loss of Converter in Multiterminal Voltage-Source Converter-Based HVDC (M-VSC-HVDC) [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 915-920.
- [38] Zhao Z, Iravani M R. Application of GTO Voltage Source Inverter in a Hybrid HVDC Link [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(1): 369-377.
- [39] Zhao Z, Iravani M R. Application of GTO Voltage-source Inverter for Tapping HVDC Power [J]. IEEE Proc on Gener, Transm and Distrib, 1994, 141(1): 19-26.
- [40] Yuan X F, CHENG Shi-jie. Performance Analysis of a Hybrid Multi-terminal HVDC System. Electrical Machines and Systems [A]. Proceedings of the Eighth International Conference on ICEMS 2005. 2169-2174.
- [41] Andersen B R, XU Lie. Hybrid HVDC System for Power Transmission to Island Networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1884-1891.

收稿日期: 2006-03-21; 修回日期: 2006-04-26

作者简介:

袁旭峰 (1976 - ), 男, 博士研究生, 研究方向为高压直流输电的运行与控制及 FACTS 技术在电力系统中的应用; Email: xeyuan@gzu.edu.cn

程时杰 (1945 - ), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用。

(下转第 70 页 continued on page 70)

控制软件采用 Visual C++ 编译而成, VC 中也提供了多种对时间控制的函数, 软件中用了两种。一是利用 Windows 的 WM—TIMER 消息映射来进行简单的时间控制, 用于时间显示, 方法为首先影射 WM—TIMER 消息并利用 SetTimer(1, 1000, NULL) 语句设置时间间隔, 这里时间间隔设为 1 000 ms, 然后再响应消息函数 OnTimer(UNT nDEvent) { ..... }, 最后当不需要时使用 KillTimer() 使系统不再响应 WM—TIMER 消息。软件中时间的精确测量采用 QueryPerformanceFrequency() 函数和 QueryPerformanceCounter() 函数。方法为首先定义三个变量,

```
__int64 frequency, time1, time2;
```

然后获得机器内部计时器的时钟频率

```
QueryPerformanceFrequency ( (LARGE_INTEGER *) &frequency );
```

开始时首先获得一个值,

```
QueryPerformanceCounter ( (LARGE_INTEGER *) &time1 );
```

需要测量时再获得另一值 time2, 然后利用下式计算:

$$time = (float) (Time2 - Time1) / frequency;$$

time 即为执行以上两语句时经历的时间

### 3 结论

微型继电器保护测试仪的软件基于 Windows 操作系统, 采用面向对象的编程方法编制而成, 优点是界面友好, 易于学习和操作, 便于根据用户需求扩展测试模块。本系统经中国计量研究科学院测试表明, 其精度符合电力部继电器保护微型实验装置技术条件的规定, 具有一定的科学性和先进性。

### 参考文献:

- [1] 微型继电器保护测试仪开发文档 [Z]. 2002 Development Document of Test Instrument for Microcomputer Based Relay Protection [Z]. 2002
- [2] 侯捷. 深入浅出 MFC [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2004.  
HOU Jie. Inside MFC [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

收稿日期: 2006-04-03

作者简介:

李胜利 (1975 - ), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机应用与软件开发工作。E-mail: wjxylsl@163.com

### Design of the test instrument for microcomputer-based relay protection

LI Sheng-li

(Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China)

**Abstract:** The design and development of a test instrument for microcomputer-based relay protection are introduced. The instrument consists of one PC and one test device of relay protection. The PC manipulates and controls the test device by running aligned software. Core part of the system in the test device is used to generate, enlarge wave and transfer actuating signals to PC after receiving it. Based on Windows, the software of the instrument is programmed with object-oriented technique. It has friendly interface and is used easily. The precision can meet the demands of relay protection by properly increasing priority of the test thread and using high precision function of time control.

**Key words:** relay protection; test instrument; Windows platform

(上接第 67 页 continued from page 67)

### Multi-terminal HVDC transmission technology and its development

YUAN Xu-feng<sup>1,2</sup>, CHENG Shi-jie<sup>1</sup>

(1. College of Electric and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. College of Electric Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

**Abstract:** Operation principle of the multi-terminal HVDC (MTDC) transmission technology and its application situation are analyzed in this paper. Theoretical researches on the MTDC transmission system, including its mathematic modeling, the control scheme, the power flow, the DC modulation, the stability, and the MTDC based on voltage source converter, are all summarized. Trends of research about the MTDC transmission system are also described. It is believed that MTDC transmission technology will become another useful alternative for the interconnection of the regional power systems in China.

**Key words:** multi-terminal HVDC; VSC; hybrid MTDC