

# 现代控制在高压直流输电系统中的应用及其发展

钟庆, 张尧, 杨金明, 武志刚, 熊文

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 直流输电系统 HVDC (High Voltage Direct - Current Power Transmission)的控制问题对电力系统的安全稳定运行具有深远的影响,但其系统本身所具有的强非线性特性,需要先进的控制技术以提高系统的性能。在总结传统控制策略的基础上,综述了现代控制在高压直流输电系统中的应用研究现状,分析了各种控制算法在直流输电系统中应用优势和缺陷。针对多馈入直流输电系统出现后面临的更为复杂的问题,如直流系统间的电磁耦合关系、系统内部的协调优化问题等,给出今后发展的趋势和需要关注的问题。

**关键词:** 直流输电; 现代控制技术; 多馈入系统

**中图分类号:** TM721 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)09-0080-07

## 0 概述

西电东送,区域联网是我国能源发展的重要战略,直流输电功率调节迅速灵活,输电距离不受同步运行的稳定性限制,是较理想的远距离大功率输电方式,其运行控制性能对电力系统的安全稳定运行影响深远。如果能够充分发挥直流系统快速调节和具有一定过载能力的特点,则可提高交流系统的稳定性或抑制交流系统的振荡。直流输电系统和交流输电系统一样,也是一个典型的非线性系统,所以常规 P 控制方式在系统工作点变化或受到大扰动情况下,往往不能保证系统的性能,但如果需要充分利用直流系统调节灵活、响应速度快的特点,必须采用先进控制技术,提高控制系统的对交流参数变动和扰动的鲁棒性和适应性。随着天广直流线路、三广直流线路的投入运行,南方电网已经形成了多条直流输电线路和交流输电线路并列运行的情况,多条直流输电线路和交流输电线路共同给南方电网输电。按照发展规划南方电网将在 2015 年,落在南方电网的直流输电线路将达到 7 条,成为世界上最大的“含有多馈入直流输电系统的互联电网”。新情况的出现将对直流输电控制系统提出了更高的要求,如多换流站之间的电磁耦合、全局协调优化等问题,因此现代控制在直流输电系统中的应用将有更为广阔的空间。

近年来,国内外学者对 HVDC 系统的控制问题

研究获得了大量的研究成果,本文在分析直流输电系统常规控制策略的优点和缺点的基础上,以控制理论方法为脉络,对现代控制在直流输电系统中的应用研究成果进行系统化的综述,并发现大多数的研究结果都是以单 HVDC 系统或交直流并列输电系统为研究对象,而对大容量多落点的直流输电系统的研究较少,也欠缺具体的控制经验,所以作者根据自己的观点,给出了现代控制在直流输电系统中应用的发展趋势和需要关注的问题。

## 1 直流输电系统的常规控制策略

高压直流输电系统由整流和逆变部分构成,中间由直流输电线路连接,其系统内部的可控变量一般为两侧换流器的触发导通角、换流变压器的中间抽头位置、无功补偿装置(或交流滤波装置)的投切控制。传统的控制方式都是以定电流调节和定电压调节为基础,通过改变系统的电流和电压的整定值,获得换流器导通角的信号,发出触发脉冲,实现预期的控制效果。

通常在系统稳定运行情况下,整流侧采用定直流电流(CC)控制,逆变侧采用定熄弧角(CEA)控制,便能满足输送一定功率的要求。除此之外,针对不同的情况还有不同的控制方式可供选择,如整流侧最小触发角控制,逆变侧定电压控制、逆变侧定直流电流控制、逆变侧定功率因数控制等以及相互之间的组合情况。尤其针对交流电压偏低情况下,提出的电压限制电流控制(VDCOL)能进一步提高系统故障情况下,防止逆变侧换流器换向失败的控制方法。上述方法的具体组合情况和原理可以参看文

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50337010),高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20020561004),华南理工大学自然科学基金(5050390)

献[1]。当系统稳态运行或仅存在小扰动情况下,上述控制策略一般能较好地满足系统运行的需要,但上述控制方式同样存在以下的不足:在系统运行点变化较大或大扰动发生时,系统的PI调节策略常常不能保证系统的性能;由于直流输电系统的地理跨度大,输电距离长,造成两端之间的通信难度大,要实现整流侧和逆变侧相互协调还有一定的困难;在传统控制策略下,直流系统往往不能为发电机提供同步功率,相反还会对发电机提供负的阻尼转矩,因而无助于交流系统的稳定;当整流侧采用定功率控制时,由于功率的给定值是由上一级的控制系统形成,其时延、判断、比较和计算等环节响应速度慢,对需要快速功率支援的弱交流系统的稳定帮助不大<sup>[1]</sup>。

鉴于以上情况,早期的研究人员将最优控制、自适应控制等现代控制方法应用于高压直流输电系统中。早在上世纪70年代,最优控制方法就已经在高压直流输电系统中获得了应用。文献[2]将最优控制方法应用于高压直流输电系统中,能够通过最优控制算法给出系统运行的最优控制策略,但该控制策略只能是在某一固定的工作点附近,当系统的运行工作点发生变化或有较大扰动发生时,就不能保证系统的最优性能。Bang-bang控制也应用于单机无穷大交直流并联电力系统中,该算法可以改善系统的暂态稳定性,但是由于大型电力系统的模型复杂,使该算法无法在实际复杂的电力系统中得到应用。自适应控制算法在上世纪70、80年代的兴起,也在高压直流输电系统控制器中得到应用。文献[3]采用类似于模型参考的方法,通过设计阶段大量的仿真结果,针对不同扰动情况出现,事先确定好不同控制参数,保证系统在大扰动发生时仍具有良好的动态性能。该方法需要事先针对某一具体的系统进行大量的仿真计算,提出不同的控制参数。之后,自校正控制方法也获得了应用。J. E. R. Alves等人针对高压直流输电系统设计了自校正数字控制器<sup>[4]</sup>,改变原有控制器定增益的结构,可以根据对系统参数的辨识,修正控制器的参数,使系统的等效阻尼系数为0.707,获得最佳的动态响应结果。该方法也是针对某一特定的直流输电系统,必须依靠有比较准确的数学模型和辨识算法,才能获得良好的控制效果。

随着现代控制技术的不断发展,新的控制算法的不断提出和控制理论不断丰富,使得现代控制技术在电力系统这一复杂系统中的应用更加广泛和

实用。针对交直流输电这一典型的强非线性、强耦合,并且换流阀动态模型尚未完全清楚的系统,将给现代控制技术带来更广阔的应用空间,本文的下一部分将对近来的研究成果进行综述,并根据笔者的一些研究工作体会,给出笔者自己的观点。

## 2 直流输电系统的现代控制策略

### 2.1 非线性控制在直流输电系统中的应用

随着卢强等人将非线性控制应用在电力系统中,并且首先将微分几何的方法用于HVDC系统一阶仿射模型的非线性反馈线性化控制器的设计中,并仿真证明了该方法的可行性和有效性<sup>[5]</sup>,国内外的研究学者对非线性控制在电力系统中的应用进行了大量的研究。针对HVDC这一典型的非线性系统,采用非线性控制方法能够获得良好的动态性能,并且能克服传统控制方法在工作点变化或出现大扰动情况下对系统控制欠佳的缺点。

文献[6]就HVDC系统建立了三阶非线性动态模型,采用逆系统的方法设计换流器在正常工作情况下的非线性控制器。控制器在模型线性化的基础上采用二次型最优控制律,设计了控制策略,并给出了闭环系统稳定的充要条件。考虑控制器输出的时延效应,常乃超等人提出采用关联度方法的非线性控制律设计方法,在文献[7]的三阶模型中加入两个一阶模型,模拟触发延时,并在HVDC基本控制方式下,设计控制器,获得良好的仿真效果,但是未对其他控制模式下,HVDC系统的控制器该如何设计进行研究。李兴源等人将非线性控制方法在HVDC系统中应用研究进一步加深,采用观测解耦状态空间模型,然后最优变目标策略(OVAS)推导出HVDC联络线的紧急控制策略,OVAS是从电力系统紧急控制中的最优控制策略(OAS)改进而来,能够改善故障时刻的动态响应。文[8]将非线性变结构控制应用于HVDC系统逆变侧中的定无功电流控制,能改善传统定熄弧角控制中换向失败问题和传统定直流电压控制中无功消耗过大的问题,利用精确反馈线性化方法建立HVDC的模型,然后用变结构控制的设计方法设计滑动面,实现逆变侧的定无功电流控制。由于电力系统是一个典型的非线性系统,对该系统的控制涉及到多个状态变量和控制变量,文献[9]中采用多输入多输出系统反馈线性化方法,采用非线性控制理论中最新提出的M微分和M括号的方法,设计系统的控制律,该方法考虑负荷同时为非线性的情况下,提高系统的稳定性,

并能通过  $M$  微分和  $M$  括号的方法,更容易获得控制律。

非线性控制对于 HVDC 这一典型的非线性系统而言,能够更简单的设计出控制器,并可以解决系统模型中其他的不确定性问题。但是习惯在 HVDC 系统中采用的反馈线性化方法是基于非线性项的精确抵消,要求全部状态可测以及参数已知。实际中的物理模型是受不确定性因素影响而变化的,常常不能精确知道,同时该方法不能保证系统的全局稳定性,所以还必须从控制器的鲁棒性和稳定性出发,进一步研究该控制问题。另外,现在的研究成果过多的还是基于一个 HVDC 回路的交直流混合系统,当系统为多馈入直流输电系统时,非线性特性将会更加复杂,如何采用非线性控制的方法对多端直流输电的交直流混合系统进行控制,是今后研究的一个重点方向之一。最后,现有的非线性控制的研究成果还过多地停留在实验或仿真阶段,尚无法实用化。

## 2.2 鲁棒控制在直流输电系统中的应用

电力系统具有强不确定性和随机性,参数变动大、系统庞大、模型复杂的特点,由于运行方式的变化或者故障的发生,经常导致系统参数大范围的变化。因此要求电力系统中的控制器必须能够适应这种变化,保持系统良好的性能,也就是说,需要具有强的鲁棒性<sup>[10]</sup>。

鲁棒控制在直流输电系统,能够在系统参数变化(如运行方式改变等)、存在未建模动态(如换流阀动态模型等)和未知函数(如故障发生等)情况下,保持系统稳定和动态性能。国外关于鲁棒控制在直流输电系统中的研究在上世纪 90 年代中期开展的比较多<sup>[11~13]</sup>。而近期国内的研究学者也很关注鲁棒控制在交直流输电系统中的应用。文献[14]中,提出交直流输电系统的非线性鲁棒控制算法,考虑双端直流输电系统之间的直流调制问题。以发电机转子相对运动角、相对转速和直流传输功率为状态变量,建立系统的非线性模型,采用自适应逆推方法,获得直流调制系统的调制给定控制规律,使该含有众多不确定参数的系统能够大范围内渐进收敛稳定。高压直流输电是一个大功率远距离输电的系统,在地域分布上具有广阔性,在控制上仅仅依靠本地的信息是不够的,需要采用分散式的控制器。文献[15]采用换流站两端的触发角和燃弧角作为其中的状态变量,研究其分散式鲁棒自适应控制律,采用 Backstepping 算法进行控制律的构造,由于引

入了自适应的非线性阻尼项,可以抑制非线性不确定参数及未知外界干扰的影响,整个控制律的设计过程中,只涉及到一个自适应参数,具有较快的响应速度。同样对该系统可以采用输出反馈的方法设计控制律,能够使控制器具有更多的信息输入,并且方便鲁棒控制器中状态观测器的设计<sup>[16]</sup>。

鲁棒控制算法与传统 P 控制等算法相比较,能够有效抑制系统非线性不确定性和未知的外界干扰对系统造成的影响,具有更强的适应能力,并且能够直接考虑系统的非线性特性,而无需考虑系统的线性化模型,所以更能适应于 HVDC 的强非线性系统中。虽然控制算法在设计过程显得比较复杂,但是鲁棒控制算法对控制对象的要求很低,设计出的控制律也相当简单,因此是提高控制性能的一个重要方法。

## 2.3 智能控制在直流输电系统中的应用

智能控制可以对没有准确数学模型或者数学模型极其复杂、一般控制方法不能进行有效控制的系统加以控制,在近年来获得了飞速的发展,主要发展包括有模糊控制、神经网络和遗传算法等。

模糊控制主要利用模糊理论,通过模糊化、模糊推理与模糊判决三个步骤来实现对系统的控制。文献[17]中采用模糊自校正控制方法,结合模糊理论与自校正控制理论,调整传统 P 控制器的参数,使参数具有更大的适应性,能够满足工作点变动的需要。A. Daneshpooy 等人考虑传统 P 控制具有只保证工作点附近最优和有输出限制的缺点,将传统控制方式的变更变为通过模糊规则进行变更,能够使控制器的增益、时间常数和控制误差不会突变。控制规则通过引入两个系数  $\mu_{cc}$  和  $\mu_{EA}$  来确定控制方式,而两个系数是由直流电流的误差信号和燃弧角的误差信号通过模糊规则推导而来,再由这四个参数一起通过模糊推理获得 P 控制的参数<sup>[18]</sup>。文中作者承认其他的控制方法也许可以获得同样的控制效果,但是却不如模糊控制算法来得直接。文献[19, 20]提出了改善交直流输电系统稳定性的模糊控制器,使用模糊逻辑的方法平滑调节直流输电线路的传输功率,使 HVDC 能够提供平抑联络线路振荡的阻尼功率,系统将自适应的稳定于故障后的平衡点,克服传统控制方法不能提供阻尼功率,甚至提供负阻尼功率的缺点。

神经网络主要依靠模拟人类神经元的构造,通过多个神经元组合成一个复杂的网络,能够通过自学习功能模拟强非线性系统。神经网络用于 HVDC

系统的直流电流控制,和传统的 P 控制性能进行比较,具有在大的运行范围内具有最优性能,可以在线调整参数和学习先验知识的优点<sup>[21]</sup>。文献 [22] 中采用 3 层 BP 网络的在线学习的方法,直流电流的给定值、实测值和两者的误差作为输入,通过权重的调整,输出触发角的值。与传统的 PI 控制相比,神经网络控制能够提高系统的阻尼以及控制器的适应性和鲁棒性,虽然仿真是在 HVDC 线性模型的基础上进行的,但是也可以看出神经网络控制器的优势所在,仍然需对非线性模型下如何选取函数和权重进行研究。P. K. Dash 等人结合反馈线性化方法,将 HVDC 模型进行线性化后,再采用神经网络进行参数辨识,以修正近似线性系统的参数,使线性化后的系统更加接近非线性系统的实际情况,能够提高所设计控制器的适应范围,尤其是在交流系统故障情况下,系统参数变动较大时,使控制系统具有良好的适应性<sup>[23]</sup>。神经网络同时还在 HVDC 系统中的故障辨识中有广泛的应用<sup>[24]</sup>。

遗传算法 (GAs) 是通过模拟物种进化中的优胜劣汰原理,来实现系统的优化,一般用于复杂的多维优化问题。在 HVDC 系统的控制器设计中,GA 主要应用于控制器参数的优化上,以使系统的性能最优<sup>[25]</sup>。文献 [26] 采用改进遗传算法 (MGA),优化传统 HVDC 的 PD 控制器的参数,能够提高故障后交直流输电系统的暂态稳定性。在 HVDC 的附加次同步阻尼控制器的设计过程中,以特征值尽量位于远离虚轴的左半平面为目标,用遗传算法解决控制器参数优化的极大极小值问题,能够获得比传统极点配置方法更为简便的设计过程,并提高控制系统的鲁棒性,能够有效抑制由于直流输电系统导致的次同步振荡问题的发生<sup>[27]</sup>。该设计方法能够保证控制在较宽的运行条件下给次同步振荡提供足够的阻尼,提高系统的稳定性。

以上三种智能控制算法能够针对直流输电系统模型复杂或存在未建模动态等特点,使直流输电系统能够在工作点变化较大或受到大扰动的情况下获得较优的控制性能。模糊控制的思想,能够很好地利用工程实际经验,并且对于模型比较复杂的系统有很好的应用前景。模糊控制与其它控制方法相结合能够改善其他方法的性能,如将模糊控制与自适应控制、神经网络控制结合等。随着智能控制的不断发展,除遗传算法外,不断有新的优化算法出现,如蚁群算法等,将其应用于 HVDC 控制器的参数选取优化中,能够提高遗传算法收敛慢的缺点,提高系

统的控制性能,充分发挥 HVDC 动态调节的作用。

#### 2.4 综合协调控制在直流输电系统中的应用

交直流输电系统在一个电网内同时存在,采用直流系统的附加控制能有效地阻尼电力系统振荡,对于提高电力系统运行的安全性和稳定性起到有效作用。当多馈入直流输电系统出现后,如果采用局部或无协调的控制策略,就容易使各系统之间出现不稳定的相互作用,如何协调其相互之间的关系,是目前的一个研究热点。另外直流系统本身就存在有整流、逆变、直流输电线路和无功补偿装置等多个环节,并且其地理分布具有广阔性,如何协调其之间的相互作用,使 HVDC 系统能传输更多的有功功率,而无需系统提供更多的无功需求,也需要对整个系统进行协调和优化。

当交流和直流系统并联运行时,直流系统具有响应快速的优点,所以文献 [28] 采用在线辨识的方法,利用现代控制技术中的最优控制技术,确定了全局的协调控制策略,充分利用直流系统快速调制的作用,能够抑制因系统阻尼不足造成的第一周波振荡和低频振荡,并采用小模型的方式对其进行验证,充分证明了控制的效果,同时提出由于测量的误差或工作点重大变动时的处理方法。文献 [29] 考虑 HVDC 系统的换流站和发电站的协调控制,提出自动频率调节器 (AFR),保证送端频率。文献 [30] 提出多馈入直流输电系统的协调恢复策略,在传统控制策略中加入一个前馈回路以便在直流系统 2 个控制端的被控变量间实现协调控制,在交流故障被切除后,利用最大梯度下降法对各直流子系统的重启动时间进行优化。随着中国南方电网的发展,已经形成多条直流输电线路和交流线路同时提供西电东送的通道,是一个典型的多馈入直流输电系统 (MDC),所以针对南方电网的协调控制是国内外关于直流输电研究的重点问题之一,其中直流输电系统中的协调恢复策略<sup>[31]</sup>和直流调制协调优化问题都已经有了初步的研究<sup>[32]</sup>。针对南方电网,文献 [32] 给出直流调制的协调优化算法,把这一问题归结为一个非线性规划问题,以与直流输电系统并联的交流联络线上的有功功率变化率矢量最小为目标函数,进行优化,以减少系统之间的功率振荡,并以南方电网为实例进行验证。

多馈入直流输电系统,结构相对较新,而且出现时间不长,所以国内外在这方面的协调优化控制方面所做的研究工作不多,而且系统性不强,所以该方面的研究也是近年来的研究重点之一,尤其是对

中国的研究者而言,具有南方电网和华东电网两个典型的应用实例,应该加强这方面的研究并使其实用化。新技术的不断出现,如广域测量方法,通信网络的不断完善,如光纤网的形成,有利于系统同时采集不同地域的相关参数,将能使全局的协调优化成为可能。

### 3 结论与展望

HVDC系统是典型的非线性复杂系统,其控制问题一直以来都是工程界关注的重点之一,现有的成果已对单直流输电系统和交直流混合输电系统有了较深入的研究,与多种现代控制技术相结合,如最优控制、自适应控制、非线性控制、鲁棒控制、智能控制等,获得了良好的控制性能,虽然大部分研究仍然处于仿真研究或实验室研究阶段,并未真正投入实用阶段,但是这些研究结果为直流输电系统的安全稳定运行和规划奠定了充分的理论基础。

随着电力系统的不断发展,越来越多的直流输电线路投入运行,多馈入直流输电的情况的出现,使系统变得更为复杂,需要考虑更多因素,如直流系统对交流系统稳定的影响,包括功角稳定和电压稳定问题,尤其对电压稳定问题的影响需要关注;多端直流系统之间的电磁耦合关系;直流输电系统与交流输电系统之间的协调;各个直流输电系统之间的协调控制;直流输电系统与无功补偿系统的协调综合控制。另外一个研究方向是拓展 HVDC系统中的控制算法,如无源性控制、容错控制等,这些算法在其他机电系统中都有成功的应用,可以利用其优点提高直流系统的控制性能或简化控制器的设计。中国的南方电网和华东电网按其规划发展都最终成为多馈入交直流输电系统,为该研究提供了具体的应用对象,我国的科研工作者应利用现有的条件,将研究工作与具体对象紧密结合,提高研究成果的实用化,提高整体研究水平。

#### 参考文献:

- [1] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. McGraw-Hill Companies, Inc, 1994.
- [2] Dash P K, Puthal B, et al Transient Stability and Optimal Control of Parallel AC/DC Power System[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(3): 811-820.
- [3] Rostamkolai N, Phadke A G, Long W F, et al An Adaptive Optimal Control Strategy for Dynamic Stability Enhancement of AC/DC Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(3): 1139-1145.
- [4] Alves J E R, Pibott L A S, Watanabe E H. An Adaptive Digital Controller Applied to HVDC Transmission[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4): 1851-1859.
- [5] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [6] LU Qiang, SUN Yuan-zhang Nonlinear Control of Electric Power Systems[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [6] 李兴源,刘红超,邱晓燕,等. 改善暂态稳定性的HVDC非线性控制策略[J]. 电力系统自动化,2002, 26(14): 15-19.
- [6] LI Xing-yuan, LU Hong-chao, QU Xiao-yan, et al A Nonlinear Control Strategy of HVDC for Improving Transient Stability of Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(14): 15-19.
- [7] Li X Y. A Nonlinear Emergency Control Strategy for HVDC Transmission Systems[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67: 153-159.
- [8] 陈凌云,李兴源,刘红超. 高压直流输电系统非线性变结构控制器的设计[J]. 电力系统自动化,2003, 27(4): 6-9.
- [8] CHEN Ling-yun, LI Xing-yuan, LU Hong-chao Design of Nonlinear Variable-Structure Controller in HVDC Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 6-9.
- [9] XU Guang-hu, WANG Jie, CHEN Chen Feedback Stabilization for AC/DC Power System with Nonlinear Loads[J]. Electric Power Systems Research, 2005: 247-255.
- [10] Hauer J F. Robust Damping Controls for Large Power Systems[J]. IEEE Control System Magazine, 1989: 12-18.
- [11] Reeve J, Sultan M. Robust Adaptive Control of HVDC Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3): 1487-1493.
- [12] Venkataraman S, Khanmash M H, Vittal V. Analysis and Synthesis of HVDC Controls for Robust Stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 1933-1938.
- [13] Dash P K, Liew A C, Routray A. Design of Robust Controllers for HVDC Links in AC/DC Power Systems[J]. Electric Power Systems Research, 1995: 201-209.
- [14] 李文磊,王明顺,刘晓平,等. 交直流并联输电系统的非线性鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2002, 17(S1): 785-787.
- [14] LI Wen-lei, WANG Ming-shun, LU Xiao-ping, et al Nonlinear Robust Control for Parallel AC/DC Trans Systems[J]. Control and Decision, 2002, 17(S1): 785-

- 787.
- [15] 朱明,刘玉生,李兴源,等. 高压直流换流站分散鲁棒自适应控制器的设计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 41-44.  
ZHU Ming, LIU Yu-sheng, LI Xing-yuan, et al Design of Decentralized Robust Adaptive Controllers for HVDC Converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 41-44.
- [16] 汤建华,刘玉生,李兴源. 高压直流输电系统换流站鲁棒自适应输出反馈控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 32-36.  
TANG Jian-hua, LIU Yu-sheng, LI Xing-yuan Robust Self-adaptive Output-feedback Control for HVDC Converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 32-36.
- [17] Routray A, Dash P K, Panda S K A Fuzzy Self-Tuning PI Controller for HVDC Links [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(5): 669-679.
- [18] Daneshpooy A, Gole A M, Chapman D G Fuzzy Logic Control for HVDC Transmission [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(4): 1690-1697.
- [19] 房大中,杨晓东,宋文南. 提高交直流电力系统稳定性的 HVDC模糊逻辑控制器[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(3): 23-27.  
FANG Da-zhong, YANG Xiao-dong, SONG Wen-nan A Fuzzy Logic Controller for the HVDC System to Enhance Stability of AC/DC Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 23-27.
- [20] Chung T S, FANG Da-zhong Fuzzy logic Controller for Enhancing Oscillatory Stability of AC/DC Interconnected Power System [J]. Electric Power Systems Research, 2002: 221-226.
- [21] Sood V K, Kandil N, Patel R V, et al Comparative Evaluation of Neural Network Based and PI Current Controllers for HVDC Transmission [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1994, 9(3): 288-296.
- [22] Narendra K G, Sood V K, Khorasani K, et al Investigation into an Artificial Neural Network Based On-line Current Controller for an HVDC Transmission Link [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1425-1431.
- [23] Dash P K, Routray A, Mishra S A Neural Network Based Feedback Linearizing Controller for HVDC Links [J]. Electric Power Systems Research, 1999: 125-132.
- [24] Bawane N, Kothari A G Artificial Neural Network Based Fault Identification of HVDC Converter [A]. Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives 2003. 24-26.
- [25] Reformat M, Kuffel E, Woodford D, et al Application of Genetic Algorithms for Control Design in Power Systems [J]. IEE Proc—Gener, Transm, and Distrib, 1998, 145(4): 345-354.
- [26] Wang Y P, Watson N R, Chong H H. Modified Genetic Algorithm Approach to Design an Optimal PD Controller for AC/DC Transmission Systems [J]. Electric Power and Energy Systems, 2002, 24: 59-69.
- [27] 江全元,程时杰,曹一家. 基于遗传算法的 HVDC附加次同步阻尼控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 87-91.  
JIANG Quan-yuan, CHENG Shi-jie, CAO Yi-jia Design of HVDC Supplementary Subsynchronous Damping Controller Using Genetic Algorithms [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 87-91.
- [28] To KW V, David A K, Hammad A E A Robust Coordinated Control Scheme for HVDC Transmission with Parallel AC Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3): 1710-1716.
- [29] Ishiguro F, Matsumoto T, Nobayashi M, et al HVDC Rectifier Control Coordinated with Generator Station in Radial Operation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 851-857.
- [30] 杨卫东,徐政,韩祯祥. 多馈入直流输电系统的协调恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(11): 63-66.  
YANG Wei-dong, XU Zheng, HAN Zhen-xiang Coordinated Recovery Strategy for Multi-infeed HVDC Systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(11): 63-66.
- [31] 杨卫东,薛禹胜,荆勇,等. 南方电网中多个直流系统间的协调功率恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 67-70.  
YANG Wei-dong, XUE Yu-sheng, JING Yong, et al A Coordinated Recovery Strategy for 3 HVDC Systems Involved in the South Power Grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 67-70.
- [32] 刘红超,李兴源,王路,等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.  
LIU Hong-chao, LI Xing-yuan, WANG Lu, et al Coordination and Optimization of HVDC Modulations in Multi-infeed HVDC Transmission System [J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 5-9.

收稿日期: 2005-10-14; 修回日期: 2005-11-26

作者简介:

钟庆(1978-),男,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; Email: epqzhong@scut.edu.cn

张尧(1948-),男,教授,博士,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。

### Review on application and development of modern control technologies in HVDC systems

ZHONG Qing, ZHANG Yao, YANG Jin-ming, WU Zhi-gang, XING Wen  
(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The controls of HVDC have an important influence on the security and stability of the power systems. As a strictly nonlinear system, HVDC needs modern control theories to improve the performance of the system. Based on analysis of traditional control strategies, this paper reviews the recent researches of the application of the modern control technologies into the HVDC systems. Every control strategy has its own advantages and defects. The absence of multi-infeed HVDC systems results in many complex problems, such as the electromagnetic coupling between HVDCs and the coordination of the components in the systems. The directions of development and matters with attention are put forward in the final part of the paper.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010), Research Fund for Doctoral Program of Higher Education (No. 20020561004), and National Natural Science Youth Foundation of South China University of Technology (No. 5050390).

**Key words:** HVDC; modern control technologies; multi-infeed systems

(上接第 59 页 continued from page 59)

### Voltage-eligibility-rate MIS based on WAN

YANG Yu-qin, LU Guo-xian, QU Ji-fu  
(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This paper first analyzes the current situation of domestic qualified voltage ratio management information system (MIS) and points out the problems that still exist. The present system cannot satisfy the requirement of openness and security in the wide area network (WAN). This paper develops a new method of voltage qualified rate MIS based on WAN and it also details the system's function and feature. Based on WAN, the qualified voltage ratio data can be reported to leaders, examined and rejected to achieve system data-integration. The design of permission and object-oriented database technique guarantee security of data and openness of the system. The practical running experience indicates that the level of voltage management in power corporations can be improved very much by the system.

**Key words:** WAN; data-integration; MIS

(上接第 63 页 continued from page 63)

### New method for analysing the harmonics on PCC

CHEN Bin<sup>1</sup>, TANG Yun-long<sup>2</sup>, XU Liming<sup>2</sup>, ZHANG Hong-yue<sup>2</sup>  
(1. The Surveillance and Test Station for Project Quality, Shenzhen 518081, China;  
2. XJ-Hitachi Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** To identify the harmonic contribution of utility and customer on PCC correctly, this paper proposes a new decomposition way of harmonic component and an advanced Norton model. This paper details the component of harmonics in PCC with all aspects. It can lay a foundation to manage the customer who yields harmonics.

**Key words:** PCC; harmonic; Norton model