

新型直流输电数学模型和控制方式研究综述

唐健, 刘天琪, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610051)

摘要: 随着我国电网的不断发展, HVDC在电力系统中的作用越来越显著。但传统 HVDC存在换相失败和在运行中对系统无功需求量大等缺点。新型直流输电作为一种新技术能弥补传统直流输电的部分缺陷, 其应用和发展潜力得到了研究人员的广泛关注。为了进一步推动 VSC-HVDC在电力系统中的研究和应用, 该文从数学模型和控制方式两方面综述了新型直流输电研究的主要成果, 总结了其应用研究现状, 并对存在问题和进一步研究方向进行了展望。

关键词: HVDC; VSC-HVDC; 数学模型; 控制方式

中图分类号: TM726.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)14-0075-06

0 引言

输电技术随着科技发展而进步, 其发展经过了一个直流, 交流, 直流+交流的过程。交流曾在很长一段时间主导了输电方式。但由于稳定性和输电容量的限制, 人们开始寻找新的更大容量, 更高效率的输电方式。在这种情况下, CSC-HVDC (Current Source Converter-High Voltage Direct Current Transmission) 开始进入实用^[1,2], 并在大容量输电中, 抑制低频振荡和系统互联中也起着重要作用。在应用中, CSC-HVDC也逐渐暴露出其固有缺陷, 如: 不能向无源系统供电; 在向短路容量不足的系统供电时易发生换相失败; 换流器本身为一谐波源, 需要配置专门的滤波装置, 增加了设备投资和占地面积; 同时运行过程中吸收较多的无功功率等。

在克服这些缺点, 并利用 CSC-HVDC的优点的过程中, 出现了 VSC-HVDC (Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current Transmission) 这种新型直流输电方式。人们称 CSC-HVDC为传统直流输电, VSC-HVDC为新型直流输电。本文就前人对 VSC-HVDC数学模型和控制方式所作研究进行总结, 并介绍其应用研究现状, 以促进这种新技术的发展。

1 VSC-HVDC的原理及特点

1.1 结构及控制原理

基金项目: 许继电力科技专项资助基金项目; 973项目 (2004CB217909); 自然科学基金资助项目 (50577044)

如图 1所示, 常用的两端 VSC-HVDC的主要部件包括: 电压源换流器 (VSC), 绝缘栅双极晶体管 (IGBT), 脉宽调制 (PWM), 控制系统。

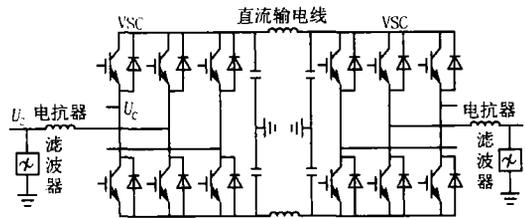


图 1 两端 VSC-HVDC的典型结构

Fig 1 Typical structure of double-end VSC-HVDC

VSC-HVDC的基本控制原理:

$$P = \frac{U_c U_s}{X_T} \sin \delta$$
$$Q = \frac{U_s}{X_T} (U_c \cos \delta - U_s) \quad (1)$$

其中: U_c 为换流器输出电压的基波分量; U_s 为交流母线电压基波分量; δ 为 U_c 和 U_s 之间的相角差, X_T 为换流电抗器的电抗。从式 (1) 中可看出, 通过控制 U_c , 就可以方便地控制线路输送有功功率和 VSC-HVDC 向系统所提供无功功率。采用 PWM 技术时, U_c 正比于 PWM 调制度 M , 是 PWM 调制波相角, 所以利用 PWM 调制度 M 和 PWM 调制波相角就能同时控制有功功率和无功功率, 并且有功和无功可以独立调节。其中 δ 可在四个相限内变化, 随着 δ 所在相限不同, 所提供无功功率可以为感性无功或是容性无功, 这样就可以灵活调节 VSC-HVDC 以满足系统对无功功率的需求。

1.2 VSC-HVDC的优势

虽然新型直流输电也存在换流器上功率损耗较大,换流器造价较高,现有容量只能达到几十兆瓦,还只限于中小容量系统中应用等缺点,但与传统直流输电相比,新型直流输电有以下优点:

1) 在应用到低短路比电力系统中不需要外加无功补偿设备,如静止电容或同步调相机。

2) 能够独立地调节直流线路上有功和每个终端处的无功,可为交流系统提供无功支持,有利于交流系统电压稳定^[3]。

3) 在电力系统发生故障而引起系统电压下降或波形突变时,也不会发生换相失败。不依赖于交流系统去维持电压和频率稳定,与传统 HVDC 相比,短路容量并不重要^[4,5]。

4) 功率反转时直流电压极性不变,有利于构成多端直流系统。

5) 通常采用 PWM 技术,开关频率较高,谐波成分低于传统直流输电。

1.3 VSC-HVDC的基本控制方式及特点

VSC-HVDC基本控制方式可分为三类:

定直流电压控制,控制直流母线电压和输送到交流侧的无功功率;定直流电流(功率)控制,控制直流电流(或功率)和输送到交流侧的无功功率;定交流电压控制,控制交流电压。

第一、二种方式适用于与有源交流网络相联的情况;第三种方式适用于对无源网络供电,如向城市电网或向边远地区供电。

针对不同系统情况可以用不同控制方式组合来满足要求,与只能向有源网络供电的 CSC-HVDC 相比较,VSC-HVDC的应用范围大大拓宽了。

新型直流输电有着与传统直流输电不同的特性。首先其换流器控制量不象传统直流输电只有晶闸管触发角,而是同时有电压幅值,电压相角和频率三个可控量;其次,换流器输入输出间可以实现解耦。这些特点增加了 VSC-HVDC 控制的灵活性同时也使其控制规律不同于 CSC-HVDC。

2 VSC-HVDC的数学模型

建立新型直流输电系统的数学模型是对其进行分析研究的基础。

文献[6]根据电压源换流器有两个控制自由度的特点建立了稳态模型,这种模型确定了电压源换流器中两个控制量分别控制两个被控量的近似解耦关系,得到含 VSC-HVDC 多机系统的状态方程。

另一种准稳态模型是将 VSC-HVDC 两端节点

等效为两个有源节点,通过修改系统导纳阵得到多机系统中 VSC-HVDC 的数学模型^[7]。这种模型利用了电压源换流器中控制量(PWM 相位与调制度)和两个输出(VSC 所发出无功和直流电压或直流电流)间近似解耦关系,简化了控制器设计。

为了对加入了 VSC-HVDC 的系统进行潮流计算,文献[4]在稳态模型的基础上导出其适用于牛顿法潮流计算的数学模型,提出了一种交直流混合系统潮流交替算法。但这种算法求解次数与换流器注入交流母线最大无功功率有关,若该值不满足控制要求,会引起数值振荡,增加迭代次数。文献[8,9]中提出了多端 VSC-HVDC 潮流计算模型。对 M 和 不同组合列出四种运行控制方案,对每种方案给出了交直流潮流交替求解接口方程,提高了算法灵活性。针对考虑系统详细程度不同(所有换流器都位于一个换流站中的模型和包括了直流网络的详细模型)提出了稳态潮流计算模型,并将这两种模型应用到牛顿潮流算法中,计算结果表明应用了所提出两种稳态模型后,牛顿潮流算法在一个平滑的初始条件下也能进行有效计算。

上述模型中都忽略了 VSC-HVDC 内部元件动态特性,影响了模型精度,不能用于对换流器详细动态特征分析。文献[3]提出了适用于 EMT 程序,潮流计算和暂态稳定计算的 VSC 换流器模型,但没有考虑稳态模型。

将开关函数建模方法用于 VSC-HVDC 建模,突破了以往研究中稳态建模不考虑换流器内部动态过程的局限性^[10]。用开关函数模拟阀通断过程,对开关函数没有加任何限制,可以用于各种调制方式和控制策略,该方法能给出换流器内部状态。但所求出系统模型不是状态方程形式,不便于应用控制理论求解。

文献[11]针对采用 PWM 方式的换流器建立了 VSC-HVDC 动态模型和稳态模型,并进行 dq0 变换,便于 P、Q 解耦控制。但这种方法只对普通 PWM 方式进行了考虑,对其他脉宽调制方式考虑得不够。

3 VSC-HVDC的控制方式

要发挥新型直流输电的优势,需要设计与 VSC-HVDC 自身特点相适应的控制器。

3.1 协调控制研究

不论是两端 VSC-HVDC 还是多端 VSC-HVDC,系统正常运行需要各终端间协调运行。

对于两端 VSC-HVDC 系统,将控制系统分为主

站和终端站,用主站实现直流线路终端站间协调,运行中正常控制都由两个终端站实现,并用电压边界方法(类似于传统直流输电中的电流边界)实现了两站间功率平衡^[5]。其优点是各终端可独立运行而不需要大量数据交换。文献[12]运用线性最优理论对新型直流输电和发电机励磁调节系统进行协调控制,改善了系统在扰动或故障后快速恢复正常运行的能力,且对系统参数变化具有一定鲁棒性。但在控制设计过程中忽略了换流器内部开关过程,影响了控制精度。为了减小协调控制对实时通信量的要求,将分散协调控制方式应用于含VSC-HVDC的交直流输电系统中,将系统分为交流和直流两个独立子系统,并结合逆系统线性化方法分别进行控制设计,使系统在较大范围内有良好的动态特性^[13]。但进行子系统划分的前提是维持整流侧交流电压及相位为需要值,而在实际运行中两个量很难维持不变,所以控制效果也会受到影响。

新型直流输电直流电压波动很小且潮流反向时电压极性不变的特性适于建立多端直流输电系统,以提高系统运行灵活性。

维持多端系统中直流电压可以有单点控制方式和多点控制方式。只在一个终端站处进行直流电压控制的单点控制方式不能充分利用各换流站容量,同时各换流站间协调也较困难。为了克服这种控制方式的缺点,将多端直流输电控制系统分层为主站控制和终端站控制,用主站控制直流电压,并根据系统要求进行其终端站间功率分配,系统协调后的功率缺额由主站进行补偿^[14]。这种控制方式对参数变化有一定鲁棒性,但主站调节容量不足时电压就会发生波动。文献[11]提出让所有具有调节能力的换流器站以带电压下降特性的直流电压控制方式工作,其余换流器工作在恒直流电流或恒直流电压控制方式,这样增加了系统中调节容量,提高了系统对运行情况变化的承受能力。但电压下降特性斜率必须与换流站容量配合,否则会引起直流电压波动。

3.2 解耦控制研究

VSC-HVDC的一个重要控制特性是P和Q可以进行解耦控制。文献[13]提出主站和终端站都对有功和无功进行解耦控制,一个换流站负责控制直流电压提高了直流电压稳定性。仿真结果显示在大扰动后,系统能快速恢复正常运行。文献[7]在考虑电感电流得到瞬态系统模型的基础上,用交直流轴电流解耦方法设计控制策略。将这种控制策略应用于系统中,系统在发生大扰动后能迅速恢复稳定

运行,且电压和频率变化不大。

在新型直流输电功率传输关系中存在三角函数关系,被控量和控制量间不是线性关系。通过坐标变换,得到功率传输方程的直角坐标形式^[15]。交换后功率传输与设定控制变量间关系可分别用一次和二次曲线来表示,输入输出变量间耦合作用比交换前有规律,但耦合关系仍然隐含存在。

新型直流输电可用于无源网络是其优势,而无源网络中经常存在不对称运行的情况。对不对称运行进行分析时常用方法是将控制器分解为正序环和负序环。而对电压和电流进行正序和负序分解会引起延时效应,影响控制效果。为了消除这种影响,提出由主控制器和辅助控制器组成控制系统,主控制器在正序框架下进行d-q解耦控制,辅助控制器在负序框架下对负序电流进行交叉耦合控制^[16]。仿真结果显示在对称和不对称负荷情况下,系统中电压,电流,功率波形均有明显改善。

3.3 非线性控制理论应用

与交流系统联接的VSC-HVDC具有非线性,非解耦的特点。非线性控制理论中逆系统设计方法可以有效克服耦合和非线性影响,适于在VSC-HVDC中应用。系统逆模型用线性插值方法拟合出,设计了由逆模型控制器和PI控制器组成的非线性控制器^[6]。模型可通过实时计算得到,但插值方法对模型精度有影响。为使系统在较大振动时有好的动态响应特性提出了逆系统线性化方法,并实现了换流站有功和无功解耦控制^[15,18]。

4 应用研究现状

VSC-HVDC作为一种新型的输电方式,可以大大拓宽直流输电的应用范围。现有应用实例主要是弱交流系统互联、边远地区供电以及系统的无功支持^[20,21]。新型直流输电的其他应用研究还包括:

向无源网络供电,如城市、海岛,对无源网络供电的性能经过仿真试验进行了验证^[17,19]。考虑到城市的无源特性,采用VSC-HVDC是一种很好的选择^[20,21]。文献[22]把VSC-HVDC应用到城市供电中,并由仿真表明这种方式在中压和低压配电系统中可以进行稳态和动态电压控制,在向不对称负荷供电时也能提高电能质量。文献[23]对两端均为有源网络的系统进行了仿真。

由于VSC-HVDC的高度可控性,可以在改善电力系统运行性能方面起到积极作用。通过向系统提供同步和阻尼功率的方法,可以使系统在暂态过程

后能快速地到达稳态^[24]。将 CSC和 VSC在直流侧串联,将 VSC作为一个有源滤波器来消除 CSC产生的谐波^[25],用 PWM技术来控制故障发生后产生的过电流^[26]。特别值得引起重视的是如果加以合理的控制在交流侧不平衡的条件下,VSC-HVDC仍能获得良好的运行性能,而对于传统的 HVDC在这种条件下有换相失败的危险^[16,22]。在抑制电力系统中的次同步振荡方面新型直流输电也能起有效作用^[27]。由于 VSC-HVDC内在的电压支持能力,在背靠背的异步联接中能增加线路的传输能力^[28]。

5 存在的问题及研究方向

要实现上述 VSC-HVDC 优异的运行性能对数学模型和控制方式提出了更高的要求。

对 VSC-HVDC的分析需要其在各种运行条件下完善的稳态模型和在不同故障后的暂态模型。稳态研究和暂态研究对模型有不同要求,为了满足研究的需要,同时兼顾模型精确程度和计算简便程度,新的 VSC-HVDC模型的建立是今后要解决的问题。

如何在计及 VSC-HVDC的影响后,有效地将其潮流模型集成到现有潮流算法和潮流程序中,既提高计算速度和精度也能充分利用减小编程工作量也亟需深入研究。

新型直流输电自身特点决定了适用于传统直流输电的控制方式不能直接用于 VSC-HVDC,所以如何把控制效果已在传统直流输电中得到了验证的控制规律合理地移植到新型直流输电中,这是值得思考的问题。

除了以上提到的问题外,VSC-HVDC在以下三个方面值得进一步研究。

1) VSC-HVDC和 CSC-HVDC结合进行大容量远距离输电的技术问题

VSC-HVDC是一种新型的高度可控的输电方式,如果其容量能满足大容量输电的需要,且其开关损耗能够减小到满足工程需要的程度,就能够应用于大容量输电工程。出于技术和经济方面的考虑,将 CSC-HVDC和 VSC-HVDC联合起来进行直流输电是一个有前景的选择。这样可以利用传统直流输电现有设备和丰富运行经验,也能利用新型直流输电在防止换相失败等方面的技术优势。

2) VSC-HVDC在风力发电中的应用

风力发电是当前已经投入实际运行的分布式发电形式。风力发电其出力受自然条件的制约,是一个随机波动过程,如果直接接入电网,其出力波动会

对电网的稳定运行造成不利影响。将风力发电装置、储能装置(超导储能或飞轮储能装置)和 VSC-HVDC相结合,由 VSC-HVDC作为接口,通过对发电、储能进行协调控制以实现将风力发电平滑接入电网,消除其出力波动对电网的冲击。

3) VSC-HVDC技术在配电网中的应用

分布式电源灵活布置的特性可以作为城市变电站的备用电源,也能为变电站母线提供电压支持。在分布式电源灵活接入电网的过程中需要接口以实现可控和平滑地接入,新型直流输电技术的可控性满足这一要求。

6 结论

VSC-HVDC作为一种新技术,其技术特性尚未得到完全认识。随着电力市场化进程的进行,电力系统对运行的灵活性和安全性的要求不断提高。而 VSC-HVDC高度可控的特性,定能在电力系统中发挥更大的作用。本文重点考虑了数学模型和控制方式,并从应用的角度对 VSC-HVDC的研究现状进行了总结,对值得进一步研究的问题进行了展望,以促进这种新技术在电力系统中的应用和发展。

参考文献:

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1998.
LI Xing-yuan. The Operation and Control of HVDC System [M]. Beijing: The Scientific and Technological Press, 1998.
- [2] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
The HVDC Transmission Research Team of Zhejiang University. HVDC [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [3] Kosterev D N. Modeling Synchronous Voltage Source Converters in Transmission System Planning Studies [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2): 947-952.
- [4] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC稳态特性与潮流算法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 1-5.
ZHENG Chao, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei, et al. Study on the Steady Characteristic and Algorithm of Power Flow for VSC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5.
- [5] Sakamoto K, Yajima M. Development of a Control System for a High-Performance Self-Commutated AC/DC Converter [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(1):

- 225-232
- [6] 张桂斌,徐政,王广柱. 基于VSC的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22
ZHANG Gui-bin, XU Zheng, WANG Guang-zhu Steady-State Model and Its Nonlinear Control of VSC-HVDC System[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22
- [7] 胡兆庆,毛承雄,陆继明. 适用于电压源型高压直流输电的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 39-44
HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Jiming A Novel Control Strategy for Voltage Sourced Converters Based HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 39-44
- [8] 陈谦,唐国庆,王浔. 多端VSC-HVDC系统交直流潮流计算[J]. 电力系统自动化设备, 2005, 25(6): 1-6
CHEN Qian, TANG Guo-qing, WANG Xun AC-DC Power Flow Algorithm for Multi-terminal VSC-HVDC Systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 1-6
- [9] ZHANG Xiao-ping Multi-terminal Voltage-Sourced Converter Based HVDC Models for Power Flow Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1877-1884
- [10] 郑超,周孝信,李若梅. 新型高压直流输电的开关函数建模与分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 32-35
ZHENG Chao, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei Modeling and Analysis for VSC-HVDC Using the Switching Function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 32-35
- [11] 陈谦,唐国庆,胡铭. 采用dq0坐标的VSC-HVDC稳态模型与控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 61-66
CHEN Qian, TANG Guo-qing, HU Ming Steady-State Model and Controller Design of a VSC-HVDC Converter Based on dq0-Axis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 61-66
- [12] 胡兆庆,毛承雄,陆继明,等. 一种优化协调控制策略在VSC HVDC中应用[J]. 继电器, 2005, 66(4): 1-5
HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Jiming, et al Application of an Optimal Coordinated Control Strategy to VSC HVDC[J]. Relay, 2005, 66(4): 1-5
- [13] 李国栋,毛承雄,陆继明,等. AC/DC混合输电系统分散协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 37-32
LI Guo-dong, MAO Cheng-xiong, LU Jiming, et al Decentralized Coordinated Control of the AC/DC Hybrid Transmission System [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 37-32
- [14] 胡兆庆,毛承雄,陆继明. 新型多端高压直流传输系统应用及其控制[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 31-33
HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Jiming Application and Control Strategy of New Multi-Terminal HVDC System[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 31-33
- [15] 赵成勇,李金丰,李广凯. 基于有功和无功独立调节的VSC-HVDC控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 20-24
ZHAO Cheng-yong, LI Jin-feng, LI Guang-kai VSC-HVDC Control Strategy Based on Respective Adjustment of Active and Reactive Power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 20-24
- [16] XU Lie VSC Transmission Operating Under Unbalanced AC Conditions-Analysis and Control Design [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 427-434
- [17] 刘波,丁明,吴红斌. 轻型高压直流输电系统MATLAB仿真[J]. 合肥工业大学学报, 2005, 28(6): 624-627
LIU Bo, DING Ming, WU Hong-bin MATLAB Simulation of HVDC Light System [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2005, 28(6): 624-627
- [18] 李国栋,毛承雄,陆继明,等. 基于逆系统理论的VSC-HVDC新型控制[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 45-48
LI Guo-dong, MAO Cheng-xiong, LU Jiming, et al New Control of VSC-HVDC Based on the Inverse System Theory[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 45-48
- [19] 梁海峰,李庚银,李光凯,等. 向无源网络供电的VSC-HVDC系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 46-50
LIANG Hai-feng, LI Geng-yin, LI Guang-kai, et al Simulation Study of VSC-HVDC System Connected to Passive Network[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 46-50
- [20] 文俊,张一工,韩民晓,等. 轻型直流输电——一种新一代的HVDC技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51
WEN Jun, ZHANG Yi-gong, HAN Min-xiao, et al HVDC Based on Voltage Source Converter——a New Generation of HVDC Technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51
- [21] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81
LI Geng-yin, LYU Peng-fei, LI Guang-kai, et al Development and Prospect for HVDC Light[J]. Automation of E-

- lectric Power Systems, 2003, 27 (4): 77-81.
- [22] JANG Hong-bo Multi-terminal HVDC Systems in Urban Areas of Large Cities[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13 (4): 1278-1284.
- [23] 张凯, 李庚银, 梁海峰, 等. 基于电压源换流器 HVDC 系统稳态控制及仿真 [J]. 电力系统自动化设备, 2005, 25 (3): 79-82
ZHANG Kai, LI Geng-yin, LIANG Hai-feng, et al Steady-State Control Strategy and Simulation of VSC-HVDC[J]. Power System Automation Equipment, 2005, 25 (3): 79-82.
- [24] Fawzi A, Jowder R. VSC-HVDC Station with SSSC Characteristic[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19 (4): 1053-1059.
- [25] JANG Hong-bo, Ekstrom A. Harmonic Cancellation of a Hybrid Converter[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13 (4): 1292-1296.
- [26] Jiang Y, Ekstrom A. Applying PWM to Control Over-currents at Unbalanced Faults of Forced-Commutated VSCS Used as Static VAR Compensators [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12 (1): 273-278.
- [27] Jiang-Hafner Y, Duchon H, Linden K Improvement of Sub-synchronous Torsional Damping Using VSC HVDC [A]. IEEE 2002 998-1013.
- [28] Huang Z, Ooi B T, Dessaint L A, et al Exploiting Voltage Support of Voltage-Source HVDC [J]. IEEE, 2003: 252-256.

收稿日期: 2006-01-03; 修回日期: 2006-03-03

作者简介:

唐健 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统稳定与控制方面研究; E-mail: agtj2004@163.com

刘天琪 (1962-), 女, 博士, 教授, IEEE 会员, 研究方向为电力系统稳定与控制, 高压直流输电和调度自动化;

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作。

Current development on the mathematic model and control of VSC-HVDC

TANG Jian, LU Tian-qi, LI Xing-yuan

(School of Electric Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610051, China)

Abstract: With the rapid development of the power grid, HVDC is becoming more and more important in China. But conventional HVDC has the shortcomings such as the possibility of commutation failure, and the demand of vast amount of reactive power during operation. As a new technology, VSC-HVDC can make up the mentioned weaknesses of conventional HVDC, so it attracts the interests of researchers all around the world. To promote the further study of VSC-HVDC in power system, the main fruits of VSC-HVDC are surveyed in mathematical model and control strategy respectively, its present applications are summarized, and its existing problems and research development are discussed.

Key words: HVDC; VSC-HVDC; mathematical model; control strategy

(上接第 64 页 continued from page 64)

New solutions of abnormal settings of WKBC I device under-voltage protection for electric power capacitor

ZHU Tao-ye^{1,2}, ZHANG Xue-zhuang¹, GUO You-gu³

(1. College of Information and Physical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Computer and Communication Engineering College, Changsha Science and Technology University, Changsha 410077, China;

3. College of information and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: It is very important to design a better new method that achieves technique amelioration of abnormal settings of WKBC I under-voltage protection for electric power capacitor under normal electric power transmission to transformer substation of the device working. An effectual method has been obtained through analyzing the other one important parameter (operation reference voltage) that affects the capacitor under-voltage protection operation in under-voltage bound model on reference [1]. On-site experience shows that the new method is successful in meeting the user's need to WKBC I device in transformer substation.

Key words: relay protection; electric power capacitor; under-voltage protection; restriction model