

# 舟山多端柔性直流输电系统控制策略分析

胡欣, 李兴源, 朱瑞可

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 根据多端柔性直流输电系统的数学模型和控制策略搭建出 PSCAD/EMTDC 的多端头型直流输电系统仿真模型, 并针对舟山多端柔性直流输电工程进行了分析, 绘制了舟山工程的拓扑机构, 并提出相应的控制策略。通过仿真验证舟山系统采用电压偏差控制、无源孤岛控制以及无功功率和交流电压斜率偏差控制时, 能够提高舟山系统在远方电压降落时稳定运行的能力, 增强了舟山系统运行的可靠性和灵活性。

**关键词:** 柔性直流输电 (VSC-HVDC); 多端直流输电 (VSC-MTDC); 控制策略; PSCAD/EMTDC

**Abstract:** Based on the mathematical models and control strategies of flexible multi-terminal HVDC transmission systems, the simulation model of multi-end DC transmission system is established by PSCAD / EMTDC. The flexible multi-terminal HVDC transmission project in Zhoushan is analyzed to draw the topology agency of Zhoushan project, and the corresponding control strategies are proposed. The control strategies adopted in Zhoushan project are verified by the simulation such as voltage bias control, passive island control, reactive power control and AC voltage slope deviation control, which can improve the ability of stable operation during voltage drop in the distance and enhance the reliability and flexibility of system operation in Zhoushan.

**Key words:** flexible HVDC (VSC-HVDC); MTDC (VSC-MTDC); control strategy; PSCAD / EMTDC

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)04-0027-04

## 0 引言

近年来, 随着包括风力和太阳能等可再生能源的分布式发电的兴起, 以及将直流并网用于海上风电场的技术日趋成熟, 多端直流输电技术受到了越来越多的关注<sup>[1-7]</sup>。多端直流输电系统是由 3 个或 3 个以上的换流站以及连接换流站之间的高压直流输电线路组成, 能够实现多电源供电、多落点受电, 与传统的两端直流输电相比运行方式更加灵活、便捷, 是直流输电的发展方向<sup>[8-12]</sup>。

随着电力电子技术的发展, 半导体开关器件从早期的半控晶闸管发展到了现在的全控型开关, 其性能优越性大幅提升。目前在用的晶闸管有: 双极型晶体管 (bipolar junction transistor, BJT)、绝缘栅双极晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT)、门极管段晶闸管 (gate turn-off thyristor, GTO)、场控晶闸管 (Mos controlled thyristor, MCT) 等。半导体开关器件的进步促进了电力电子变流技术的发展, 这就在很大程度上提高了柔性直流输电技术的进步,

尤其是电压源型换流器的出现, 使得这种基于电压源型换流器的高压直流输电技术成为了新的输电方法, 产生通过脉宽调制 (plus width modulation, PWM) 控制的 VSC 进行直流输电的概念, 这就是新一代的直流输电技术柔性直流输电<sup>[1-3]</sup> (VSC-HVDC)。在 VSC-HVDC 中, 用全控型器件代替了原来的半控型器件, 使系统能对有功功率和无功功率进行同时和独立的传输, 同时还能实现对无源网络供电。VSC-HVDC 输电技术克服了传统的直流输电技术的不足, 扩展了直流输电的应用领域。

随着世界能源紧缺和环境问题日益严重, 中国开始大力推广和开发风能、太阳能灯可再生清洁能源, 来优化能源结构。然而风能和太阳能分散性、小型化、远离负荷中心的特点制约了风电利用规模的扩大, 妨碍了传统交流输电技术和 CSC-HVDC 输电技术的联网。同时, 城市配电网的快速扩容要求有限的输电线路能够输送更多的电能, 另一方面, 大量配电网转入地下, 给中国电网发展造成很大的问题。

VSC-HVDC 输电技术能够有效解决上述问

题,并且已在实际工程中得到应用,尤其是在分布式发电系统接入大电网、城市直流配电网改造、孤岛供电、异步大电网互联等领域 VSC-HVDC 输电系统取得了良好的效果。然而,当 VSC-HVDC 两端输电系统中一段 VSC 发生故障后,系统将被迫处于瘫痪状态,给系统造成了严重影响。VSC 在系统潮流翻转式保持极性不变,这个特点可以使运行方式更加灵活,控制更加多样。多端柔性直流输电系统(VSC-multi terminal HVDC, VSC-MTDC)应运而生,VSC-MTDC 可以用于的领域包括:大规模新型能源输到远方负荷送电;向弱交流系统、不同区域间电力市场交易;负荷密集的大城市甚至是无源网络供电等。VSC-MTDC 仍然处于理论研究和模拟实验阶段,尚没有工程应用。目前对 VSC-MTDC 的研究多集中在多个换流器的并联运行稳定性,系统的故障穿越能力,换流器间的功率分配等方面,因此,VSC-MTDC 的协调控制策略称为为了最为关键的问题。

目前国内外学者对 VSC-HVDC 输电技术的研究主要集中在系统建模和控制策略两个方面。VSC-HVDC 系统的控制策略分为直接电流控制和间接电力控制两类。间接电流<sup>[4-9]</sup>控制优点是结构简单,容易实现,缺点是动态响应慢,无功量和有功量相互耦合,并且无法直接实现电流限流的保护,在现实应用存在使用困难。直接电流控制策略采用电流闭环控制,使电流能够快速响应,并实现限流保护,有功和无功的解耦控制,因此直接电流控制得到了广泛地关注和快速发展。文献[10]在 d-q 同步旋转坐标系下建立了 VSC-HVDC 的连续时间状态空间模型,研究 d-q 轴解耦控制策略,设计了不完全微分的 PI 有功和电压控制器。文献[11]通过  $\alpha-\beta$  坐标系,建立了二极管钳位式三电平拓扑结构的变流器数学模型,推导了正负序分离算法并提出了相应的控制策略,着重分析了离散性迟滞对控制器性能的影响。文献[12]推导了二极管钳位式三电平拓扑结构的 VSC 背靠背直流输电系统在 d-q 坐标系下的数学模型,设计了 VSC 内环和外环控制器。文献[13]推导了 d-q 同步旋转坐标系下 VSC-HVDC 的稳态模型,根据逆系统理论设计了 VSC-HVDC 非线性系统的线性化控制无源网络或者弱交流网络供电。文献[14]研究了 VSC-HVDC 系统对有源和无源网络供电时的控制策略,运用

PSCAD/EMTDC 软件,仿真验证了不同控制策略的动态响应特性。文献[15-16]建立了 VSC-HVDC 向无源网络供电的 Matlab 仿真模型,仿真验证分析了无源网络侧的定交流电压控制策略。

针对舟山多端柔性直流输电工程进行了分析,绘制了舟山工程的拓扑机构,并提出相应的控制策略。通过仿真验证舟山系统采用电压偏差控制、无源孤岛控制以及无功功率和交流电压斜率偏差控制时,能够提高舟山系统在交流故障、换流站退出、孤岛运行以及远方电压降落时稳定运行的能力,增强了舟山系统运行的可靠性和灵活性。

## 1 舟山 VSC-MTDC 工程

舟山地区电网规模较小,短路容量不高,大容量风电集中送出后对该区域电网有一定影响。舟山电网系统实现岛屿间联网时,要充分考虑风电场的影响。风电场的接入采用传统交流接入方式时,随着传输距离的增加,输电线路电压降落较大,需要大量补充无功,这将严重制约其功率输送能力。采用全控器件的柔性高压直流输电(VSC-HVDC)方式,可以对风电输出功率进行快速、灵活控制的同时还能够动态补偿风电场系统无功功率,稳定并网母线电压,能直接连接短路容量小的弱交流系统,甚至向无源网络供电等特点,较为适合岛屿众多、岛屿间距离较远、同时又包含一定容量风电场的舟山电网系统<sup>[17]</sup>。

舟山电网的风电场多集中于定海、衢山和泗礁。若采用 VSC-HVDC 将各个包含风场的岛屿电网系统接入主电网时,虽然 VSC 可以独立控制有功和无功潮流,控制结构简单可靠,但是仍有不足:①每个岛屿接入电网都需要一套完整的直流输电系统,造价较高;②风电场作为间歇性、多变化的电源,在大容量分散接入电网时,受端电网对多馈入直流系统支撑能力不足,不利于系统安全稳定运行;③两端直流输电系统,其控制方式相对简单、可靠,但是它在灵活性、经济性、可靠性等方面仍存在许多不足之处。而 VSC-MTDC 系统能够在必要时对本地电网提供频率支撑,解决高风电渗透率对系统的不利影响,有利于建设“电网友好型”风电场。因此通过 VSC-MTDC 系统汇集风电功率,联合舟山电厂的火电功率重新分配潮流,从而实现岛屿间联网,成为

了最佳方案。

本工程在舟山本岛、岱山岛、衢山岛、洋山岛及泗礁岛分别建设定海换流站、岱山换流站、衢山换流站、洋山换流站和泗礁换流站,并通过构建 5 端柔性直流输电系统实现各岛屿电网连接。

### 1.1 舟山 VSC - MTDC 拓扑结构

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中构建了舟山工程的仿真模型,其拓扑结构如图 1 所示。

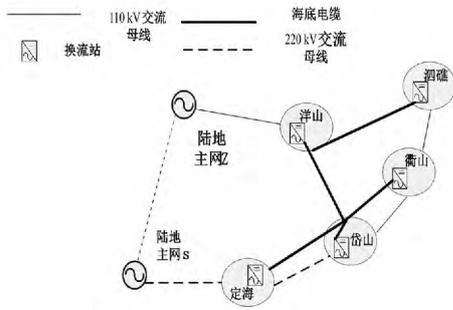


图 1 发电机转速运行示意图

图 1 中定海、岱山、衢山、泗礁、洋山 5 个换流站分别同 5 个岛屿的交流电网相连,其中定海换流站通过 220 kV 的交流线路同陆地主网相连,岱山换流站通过 220 kV 的交流线路同定海站相连,并通过 110 kV 线路与衢山换流站相连,泗礁换流站和衢山换流站之间通过 110 kV 线路相连,洋山换流站与陆地主网 S 无直接电气联系,是通过 110 kV 线路同陆地主网 Z 相连,陆地主网 S 和 Z 通过 500 kV 网络相连。

### 1.2 舟山 VSC - MTDC 拓扑结构

舟山多端柔性直流输电系统中,当系统正常运行时,此时定海站作为系统的主导站,系统中 5 个换流站的交直流系统基本参数如表 1 所示。

表 1 正常运行时换流站交直流系统参数

换流站	额定直流电压/kV	额定直流电压/kV	额定直流电流/kA	交流系统标称电压/kV
定海	400	±400	1.0	220
岱山	300	±400	0.75	220
衢山	100	±400	0.25	110
泗礁	100	±400	0.25	110
洋山	100	±400	0.25	110

柔性直流输电系统中,联结变压器的作用是使系统交流电压变换到与换流器直流侧电压相匹配的二次侧电压,使换流站工作在最佳的电压范围之内,从而减小输出电流和电压中谐波的含量。本工程中各换流站均采用三相三绕组变压器,第三绕组用于

提供站用电源。

桥臂电抗器在多端柔性直流输电系统中起到联结交流系统与直流系统的纽带作用,本模型采用 5 端换流站每相上下桥臂各安装 1 台,共 6 台。其中定海换流站电感值为 9 Mh、岱山为 120 Mh、衢山、洋山、泗礁均为 360 Mh。

此外,各换流站负荷分别为岱山 150 MW、衢山 50 MW、泗礁 75 MW、洋山 60 MW

## 2 舟山控制系统设计

控制系统是舟山柔性直流输电系统的核心组成部分,直接关系到柔性直流输电运行的性能、安全、效益。相比于两端柔性直流输电系统,多端柔性直流输电系统的协调控制策略更为复杂,需要考虑多端系统之间的直流电压协调稳定。

### 2.1 舟山系统控制策略分析

多端柔性直流输电系统的主要控制策略中,系统中换流站应该同时具备有功功率类或无功功率类的控制量,根据交直流电网实际情况,模型中舟山 5 端柔性直流中有功类控制方式定海站和岱山站具备定直流电压控制的能力,要具备直流电压控制方式,岱山、衢山、泗礁、洋山换流站采用定有功功率控制。无功控制类采取无功功率和交流电压斜率偏差控制策略。

采用无功功率和交流电压斜率偏差控制的优点是:具备交流电压斜率控制器的换流站能够迅速地响应网络的潮流变化做出响应,调整其无功功率,因此这种控制方式比较适合应用于潮流频繁变化的柔性直流输电系统中。

当系统发生故障时,系统中各个换流站可以根据自身的无功功率容量调节自身无功功率的送出,能够对系统需求的无功功率进行合理的分配,有利于维持系统的稳定性,降低系统故障引发的振荡。此外,当换流站同交流系统失去电气联系后,换流站无功类控制自动转换为定交流电压控制。

### 2.2 舟山系统控制器设计

针对无功控制类提出交流电压斜率控制策略,即在 PI 型控制器的参考交流电压叠加一个辅助控制量,从而有

$$u_{qref}^* = u_{qref} + kQ_q \quad (1)$$

$$\Delta u_q = u_{qref} + kQ_q - u_{qref}^* \quad (2)$$

进入稳态时,柔性直流输电接入点的交流电压

由下式决定。

$$\Delta u_q = u_{qref}^* - u_q = 0 \quad (3)$$

$$u_q = u_{qref}^* = u_{qref} + kQ_q \quad (4)$$

其中,调节斜率  $k$  满足

$$k = \frac{\Delta u_{qmax}^+}{Q_{qmax}^+} = \frac{\Delta u_{qmax}^-}{Q_{qmax}^-} \quad (5)$$

式中,  $Q_{qmax}^+$  为最大感性输出无功功率;  $\Delta u_{qmax}^+$  为端电压与额定值之间的增加值;  $Q_{qmax}^-$  为在最大容性输出无功功率;  $\Delta u_{qmax}^-$  为端电压同额定值之间的减量。

无功功率和交流电压斜率控制策略通过多个换流站来稳定交流电压,所有具备功率调节能力的换流器都参与功率调节。采用无功功率和交流电压斜率控制策略的换流站可以根据其所测得的交流电压的数值时刻调整其无功功率的设定值,以满足交流输电网络对无功功率的需求,能够迅速地实现无功功率快速平衡的分配,并且各换流站之间不需要通信,也不需要进行控制模式的切换。图 1 中换流站的外环控制器都采用无功功率和交流电压斜率控制器。当换流站的无功功率变化的时候,换流站会沿着各自的斜率曲线搜寻新的运行点以满足交流系统功率的平衡。控制特性图和控制器结构分别如图 2 图 3 所示。

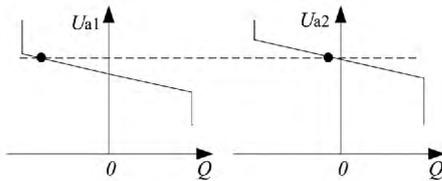


图 2 交流电压斜率控制特性图

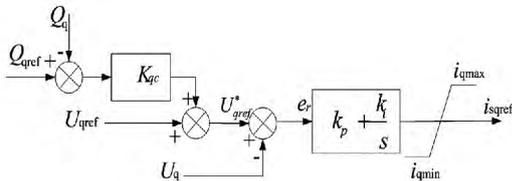


图 3 基于交流电压斜率控制的外环控制器

由上分析,舟山系统各个换流站直流类功率采取的控制方式:定海站为定直流电压;岱山站为有功功率/定直流电压;衢山、泗礁和洋山站均采用定有功功率/孤岛控制方式。无功功率类采取的控制方式为:5 个换流站均采用定交流电压斜率方式。

### 3 仿真分析

为了验证舟山系统控制策略的实用性,对舟山

系统远方电压降落情况进行了仿真验证。系统 1.5 s 时远方电网电压降落,仿真结果如图 4 ~ 图 6 所示。

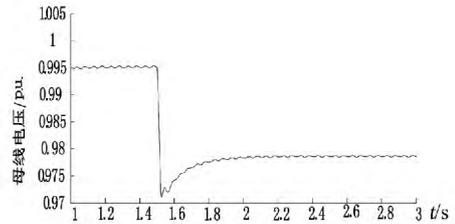


图 4 远方电网电压降落 220 kV 母线电压

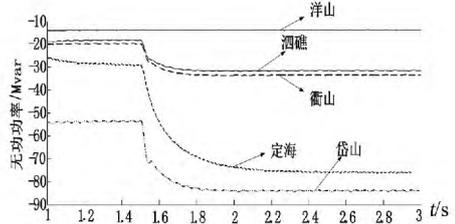


图 5 远方电网电压降落各换流站无功功率

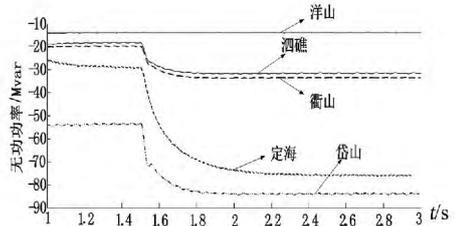


图 6 远方电网电压降落各换流站直流功率

按照式(5)所示的曲线对各个换流站的无功和交流电压斜率进行设定。系统中各换流站调节斜率:定海站为 1/30(即交流电压每变化 1% 时无功功率变化 30 Mvar);岱山为 1/20;泗礁为 1/10;衢山为 1/10。

由图 4 可知电压由 0.995 跌落到 0.978 系统电压降为 3.15% 此时对应的各换流站无功功率变化分别为定海站 51.3 Mvar;岱山站 34.2 Mvar;衢山站 17.1 Mvar;泗礁站 17.1 Mvar。

分析图 5(忽略各换流器中的滤波器和无功补偿装置影响)可知,各换流站无功功率变化值同计算结果相同,实现了系统无功功率的合理分配。分析图 5 可知当远方电网电压降落时系统直流功率传输没有受到影响,实现了系统有功和无功的单独传输,验证了无功功率和交流电压斜率偏差控制的实用性和有效性。

### 4 结 语

(下转第 45 页)

[7] Seguro J V , Lambert T W. Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,2000 ,85( 1) : 75 - 84.

[8] 苏勋文,米增强. 基于运行数据的风电机组建模方法 [J]. 电力系统保护与控制 2010 ,38(9) :49 - 55.

[9] Faruqui A , George S. Quantifying Customer Response to Dynamic Pricing [J]. The Electricity Journal ,2005 ,18 ( 4) : 53 - 63.

[10] King C , Chatterjee S. Predicting California Demand Response [J]. Public Utilities Fortnightly , 2003 , 141

( 13) : 27 - 32.

作者简介:

李 阳(1987), 硕士研究生, 主要从事电力系统规划与分析、新能源技术方面的研究;

蒋正华(1993), 本科, 主要从事电力系统规划与分析、电力系统风险评估等方面的研究;

徐 蔚(1984), 硕士研究生, 主要从事电力系统规划与分析、新能源技术方面的研究;

周 杨(1987), 硕士研究生, 主要从事电力系统规划分析、新能源技术方面的研究。

( 收稿日期: 2014 - 05 - 04)

( 上接第 30 页)

针对舟山多端柔性直流输电工程进行了分析, 绘制了舟山工程的拓扑机构, 并提出相应的控制策略。通过仿真验证舟山系统采用电压偏差控制、无源孤岛控制以及无功功率和交流电压斜率偏差控制时, 能够提高舟山系统在交流故障, 换流站退出, 孤岛运行以及远方电压降落时稳定运行的能力, 增强了舟山系统运行的可靠性和灵活性。

参考文献

[1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[2] 张欢, 刘天琪, 李兴源, 等. 新型多端直流输电技术研究 [J]. 四川电力技术, 2007, 30( 6) : 1 - 5.

[3] 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.

[4] 饶宏, 黄莹, 陈名, 等. 中海油文昌柔性直流输电系统启停仿真分析 [J]. 南方电网技术, 2011 , 5( 4) : 5 - 9.

[5] Nikolas Flourentzou , Vassilios G. Agelidis. Georgios D. Demetriades. VSC - Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview. IEEE Transactions on Power Electronics , 2009 , 24( 3) : 592 - 602.

[6] 赵成勇, 李广凯, 孙营. 双馈入直流输电系统中 VSC - HVDC 的控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008 , 28( 7) : 97 - 103.

[7] 李兴源, 陈凌云, 颜泉, 等. 多馈入高压直流输电系统非线性附加控制器的设计 [J]. 中国电机工程学报, 2005 , 25( 15) : 16 - 19.

[8] 李兴源, 邵震霞, 汤广福. 多馈入高正直流输电系统的分散协调控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005 , 25 ( 16) : 8 - 12.

[9] Gunnar Asplund , Kjell Eriksson , Birger Druggr. Electric

Power Transmission to Distant Loads by HVDC Light [C]. Distribution 2000 Sydney , Australia , 2000; 1 - 7

[10] Anna - Karin Skytt , Per Holmberg , Lars - Erik Juhlin. HVDC Light for Connection of Wind Farm [C]. Second International Workshop on Transmission Network for Off-shore Wind Farm , Royal Institute of Technology Stockholm , Sweden , 2001: 1 - 6.

[11] 郭小江, 马世英, 申洪, 等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2012 , 36( 15) : 107 - 115.

[12] 王国强, 王志新, 张华强, 等. 基于 DPC 的海上风场 VSC - HVDC 变流器控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2011 , 31( 7) : 115 - 119.

[13] 陈霞, 林卫星, 孙海顺, 等. 基于多端直流输电的风电并网技术 [J]. 电工技术学报, 2011 , 26( 7) : 60 - 67.

[14] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展 [J]. 电网技术, 2008 , 32 ( 22) : 39 - 44.

[15] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[16] VSC - HVDC 的风电场联网技术研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2007.

[17] 吴浩, 徐重力, 张杰峰, 等. 舟山多端柔性直流输电技术及应用 [J]. 智能电网. 2013 , 1( 2) : 22 - 26

作者简介:

胡 欣(1987), 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电系统;

李兴源(1945), 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统稳定与控制;

朱瑞可(1988), 博士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。

( 收稿日期: 2014 - 04 - 23)