

# 柔性直流输电系统控制研究综述

李兴源, 曾琦, 王渝红, 张英敏

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

**摘要:** 柔性直流输电作为新一代直流输电技术, 目前被认为是实现新能源并网和直流电网的极具潜力的输电方式, 也是构建未来智能化输电网络的关键技术。柔性直流输电系统的控制是影响输电系统运行性能的关键因素之一。为此, 针对柔性直流输电系统控制进行研究, 首先概述了两端柔性直流输电系统接线及控制方式, 着重分析了多端柔性直流输电系统的拓扑结构及其优缺点, 介绍了多端柔性直流系统协调控制和功率优化控制的主要方法。然后讨论了柔性直流输电系统附加控制的多种方法, 并分析了风电接入下柔性直流输电系统的控制。最后对未来直流电网构建中柔性直流输电控制技术的研究方向提出了一些建议, 为后续的研究工作提供参考。

**关键词:** 柔性直流输电; 拓扑结构; 系统控制; 协调控制; 附加控制; 阻尼控制; 风电并网

## Control Strategies of Voltage Source Converter Based Direct Current Transmission System

LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, ZHANG Yingmin

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** As a new generation of HVDC technology, VSC-based HVDC (VSC-HVDC) is regarded as the most promising way for renewable energy integration and for DC grid constitution. It is the key technology of building an intelligent power transmission network. Control strategy of VSC-HVDC is one of the most important factors affecting the operation performances of power system. Aiming at the study of control strategies of VSC-HVDC system, we analyze the topology and control both in two-terminal and multi-terminal VSC-HVDC systems, and discuss the merits and demerits of VSC-MTDC cases. Then, we introduce the main methods of coordinate control and optimal control. In the meantime, we discuss the supplementary control methods and the control schemes of VSC-MTDC for wind power integration. Finally, we put forward some suggestions about the research aspects of VSC-HVDC's control technology in the construction of DC grid to provide reference for further research.

**Key words:** VSC based HVDC; topology; system control; coordinated control; supplementary control; damping control; wind power integration

## 0 引言

在全球能源互联的大电网发展的背景下, 一方面需要大力开发利用可再生能源, 通过转变能源生产、配置和消费方式, 优化能源结构, 提高能源效率, 实现清洁发展<sup>[1]</sup>。另一方面也需要在不降低电力系统运行可靠性的前提下, 更有效地利用输电网络, 最大限度地提高线路的输送能力。将电力电子器件应用于电力系统的柔性输电方式, 随着电力电子器件的快速发展, 极大的促进了线路输送功率的提高和可再生能源的接入。

柔性交流输电系统 (flexible AC transmission

system, FACTS) 通过在输电系统的主要位置安装电力电子装置, 对输电系统中的主要参数(如电压、电抗等)进行灵活快速的适时控制, 以达到提高输电线路的功率极限和系统的稳定性及可靠性的目的。其中静止无功补偿器 (SVC)、晶闸管控制制动电阻器 (TCBR)、静止同步补偿器 (STATCOM) 等并联装置, 通过调节无功或电压来提高输送容量和改善系统稳定性; 晶闸管控制串联电容器 (TCSC)、晶闸管控制串联电抗器 (TCSR)、静止同步串联补偿器 (SSSC) 等串联装置, 通过改变电抗来改变系统的有功潮流分布; 此外, 统一潮流控制器 (UPFC) 等综合控制装置, 利用全控型器件对电网的多个电气量进行协调控制, 综合了串、并联装置的功能和特点, 在工程中也得到了较多的实际应用。

FACTS 虽然在一定程度上提高了输电效率, 但

基金资助项目: 国家电网公司科技项目 (SGRIZLKJ[2015]457)。  
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (SGRIZLKJ[2015]457).

仍然无法消除功率稳定极限公式中功角对输电能力的限制。而高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)方式不受功角影响,在远距离大容量输电中优势明显。伴随电力电子器件的发展,高压直流输电技术也经历了采用汞弧阀换流时期、晶闸管换流阀时期以及采用绝缘栅双极晶体管换流阀(IGBT)的时期<sup>[2]</sup>。其中前两个阶段采用汞弧阀、晶闸管类半控器件,在潮流反转时电流方向不变,电压极性反向,是基于电流源型换流器的 HVDC (current source converter based HVDC, LCC-HVDC)。LCC-HVDC 谐波问题突出,有换相失败风险,且消耗无功功率,在受端接入弱交流系统或是在风电、光伏等分布式电源接入时,运行特性受到极大影响。采用 IGBT 全控器件的 HVDC,在潮流反向时电压方向不变,电流反向,是基于电压源型换流器的 HVDC,称为柔性直流输电(voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC)。与 LCC-HVDC 相比,柔性直流输电方式输出电压电流谐波含量低,不存在换相失败风险,有功无功可实现快速解耦控制。尤其是它具有的高度可控性和良好适应性的特点,使其在可再生能源并网、多端直流网络构建、弱系统联网等场合具有显著的优势,是构建未来智能化输电网络的关键技术<sup>[3-5]</sup>。截至 2015 年世界范围内已建成并投运的柔性直流输电工程达 25 条,在建的工程也达到 15 条。欧洲正规划建设以柔性直流为主的连接欧洲、北非及中东的多端直流输电网络的超级电网。英国也在规划建设多端柔性直流输电网络,以满足大规模海上风电接入的需求<sup>[3]</sup>。欧洲风能发展规划(European Wind Initiative, EWI)则提出了到 2050 年欧洲 50% 的电力供应将来自于风电的发展规划<sup>[6]</sup>。我国目前已建成南汇、厦门两端以及南澳三端、舟山五端柔性直流输电工程。未来随着西电东送规模的进一步扩大,三北地区、西部、东部沿海的风电、太阳能、水电将被大力开发,预计到 2020 年我国风电规模将超过 150 GW,光伏发电总装机容量将达到 35 GW 以上。这些柔性直流输电工程的规划和投运,以及大规模可再生能源的接入,对柔性直流输电系统的运行和控制都提出了新的要求。

利用柔性直流输电系统具有高度可控性的特点,通过对其协调控制,不仅可以实现直流系统的功率协调分配,还可以通过附加控制辅助交流系统达到安全稳定运行。本文主要针对柔性直流输电系

统控制进行研究。着重概述了多端柔性直流输电系统的拓扑及其优缺点,介绍了多端柔性直流输电系统实现功率协调控制和功率优化控制的主要方法。同时总结了柔性直流输电系统附加控制的多种方法,最后分析了风电接入下的柔性直流输电系统的控制。

## 1 柔性直流输电系统拓扑及控制

### 1.1 VSC-HVDC 系统拓扑及控制

从广义上讲,VSC-HVDC 指柔性直流输电系统,然而为了区分,通常将两端柔性直流输电系统称作 VSC-HVDC,而将多端柔性直流系统称作 VSC-MTDC。VSC-HVDC 系统拓扑结构较为简单,两端换流站通过点对点连接实现有功功率的传输。早期出现的柔性直流输电工程多为这种两端结构。对于两端 VSC-HVDC 而言,系统拓扑的主要区别在于直流侧的接线方式不同。常见的直流侧接线方式见图 1。

单级大地回线接线方式如图 1(a)所示,系统直流侧只有一根导线,利用大地作为返回线,构成直流闭环回路。该接线方式可以减少线路造价,降低运行损耗,但对接地极附近的金属设备有腐蚀作用,不利于系统安全运行。为避免大地回线产生的电解腐蚀,提高运行安全性,可用一根金属线代替大地

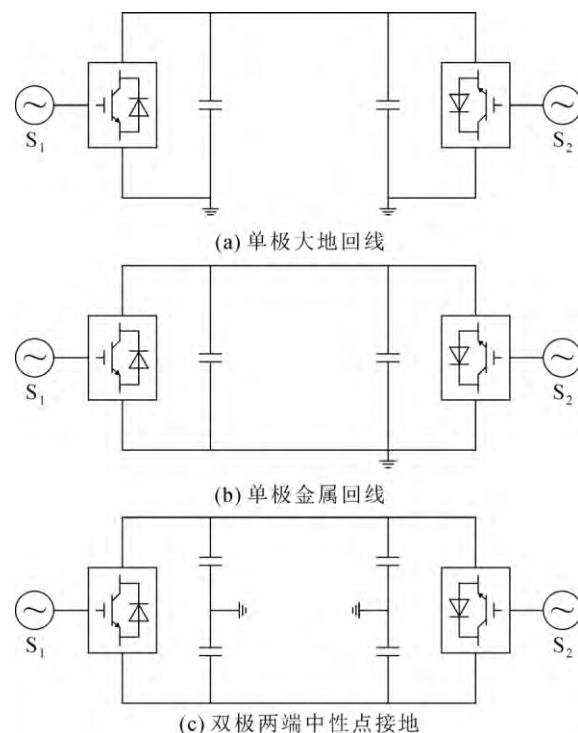


图 1 直流系统接线方式

Fig.1 Connection mode of DC system

回线, 构成单极金属回线接线方式, 如图 1(b) 所示。该接线方式通常应用于电压不高、输送功率不大的情况。两端换流站直流侧中点可靠接地, 则构成双极两端中性点接地方式, 如图 1(c) 所示。若直流输电线路故障, 可通过特定控制将接线方式调整为单极大地回线方式, 提高了系统运行的可靠性和灵活性。

柔性直流系统中, 各换流站可独立控制有功和无功这两类物理量。其中有功类物理量包括直流电压、直流电流和交流频率, 无功类物理量包括无功功率和交流电压。在两端柔性直流系统中, 必须有一端换流站采用定直流电压方式以保证系统的功率平衡, 另一端换流站根据不同应用场合, 如强交流系统、弱交流系统或无源网络, 选取一组合适的有功和无功控制, 构成整个直流系统的控制策略。风电场侧换流站需采用定频率控制; 无源网络侧换流站需采用定频率和定交流电压控制方式; 两端互联型 VSC-HVDC 系统的控制方式则较为灵活, 一般采用一端定有功和无功功率, 另一端定直流电压和无功功率即可。

## 1.2 VSC-MTDC 系统拓扑及控制

在两端基础上发展而来的多端柔性直流输电系统, 含有多个整流站或多个逆变站, 能够实现多电源供电和多落点受电, 且可采用不同拓扑结构形成直流网络, 极大地提高了直流输电系统的操作灵活性和系统可靠性, 同时也利于大规模直流电网的后期扩展。VSC-MTDC 的拓扑结构与系统控制策略和运行特性密切相关。多端柔性直流系统采用不同的拓扑结构, 其运行可靠性、经济性和控制灵活性有较大差别, 同时需要有合适的系统控制策略配合。

### 1.2.1 VSC-MTDC 系统拓扑

目前对于 VSC-MTDC 系统拓扑结构的评价, 还未制定统一标准, 主要考虑经济和技术两方面因素。经济因素包括直流断路器和隔离开关数量、直流线路长度、换流站和线路容量、通讯设施等; 技术因素包括运行可靠性和灵活性、系统可扩展性、故障冗余性等。同时有文献指出评价系统拓扑结构时也应考虑到稳态运行损耗和故障电流对系统的影响<sup>[7-8]</sup>。文献[9]将多端直流系统拓扑分为串联型和并联型, 其中并联型包括星形拓扑、环形拓扑和星形-中央环形拓扑等。

多端直流系统串联型拓扑如图 2 所示。换流站通过正负极直流线路串联构成环形, 各 VSC 以同一

直流电流运行。换流站间有功分配依靠改变直流电压来实现, 并由其中某一换流站调节系统闭环直流电流, 承担系统直流电压的平衡。串联型拓扑结构不需直流断路器, 所用直流线路较短, 但该拓扑缺陷明显。系统控制复杂, 运行不灵活; 一旦直流线路发生永久性故障, 则所有换流站交流侧断路器跳开, 直流系统立即停运, 且系统故障恢复速度慢; 各换流站受压不一致, 对设备耐压和绝缘要求高, 使得系统难以扩展。

并联型拓扑的 VSC-MTDC 系统故障恢复快, 换流站电压等级相同, 利于电网扩展。其中星形拓扑结构如图 3 所示, 各换流站通过直流线路汇集到中心节点构成辐射状直流网络。星形拓扑结构的优点是系统直流线路总长短且单一线路容量小, 具有经济优势; 拓扑结构简单, 系统易于扩展; 各直流线路配置直流断路器, 故障后不会扩大影响范围且系统恢复速度快。但星形拓扑结构也有较大缺点, 若中心节点发生故障会引起所有直流断路器动作, 导致直流系统停运, 运行可靠性较低; 该拓扑也限制了系统潮流分配的灵活性。

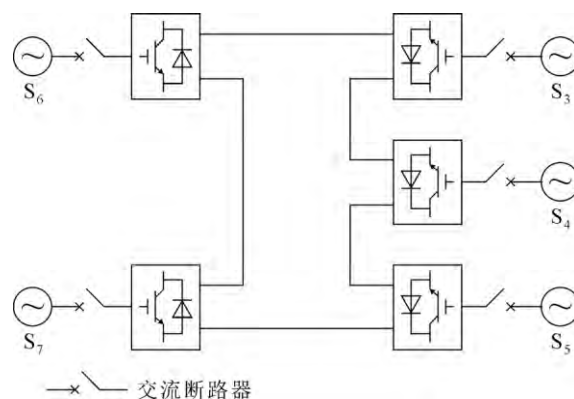


图 2 串联型拓扑结构

Fig.2 Series topology

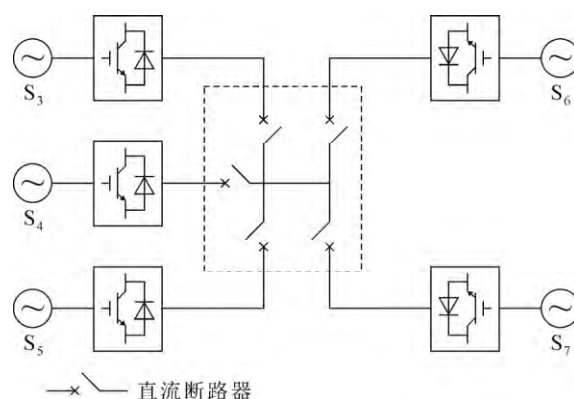


图 3 星形拓扑结构

Fig.3 Star topology

VSC-MTDC 系统环形拓扑结构如图 4 所示,各换流站配置一个直流断路器和隔离开关,并通过直流输电线路并联构成一个环形拓扑。系统正常运行时环形拓扑处于闭环状态;线路某点故障时,离故障点最近的两端直流断路器跳开,使闭环拓扑处于开环结构。此时某一换流站退出运行,待故障电流衰减至零,断开离故障点最近的隔离刀闸,此隔离刀闸和其中一个跳开的断路器将故障点隔离,而另一个跳开的断路器重新合闸,则退出的换流站重新投入运行。环形拓扑结构能够保证系统在故障情况下不仅可切除故障线路,而且不损失系统输送功率,继续保持系统稳定运行,控制灵活性较高。但大量使用直流断路器和隔离开关,直流线路的容量冗余过大均增加了建设成本;换流站间快速通信和众多直流断路器的保护动作,提高了系统控制难度而降低了运行可靠性。

VSC-MTDC 系统星形-中央环形拓扑结构如图 5 所示,该拓扑结构是在星形拓扑结构基础上,用直流断路器组合而成的环网替代原有的中心节点。星形-中央环形拓扑综合了星形和环形拓扑的优点,避免了环形拓扑因中心节点故障而导致系统停运的问题,也降低了环型拓扑因直流线路过长和容量冗余过大带来的成本压力。但星形-中央环形拓扑仍存在一定的缺点,直流断路器组成的环网需配置安放平台,增加了建设成本;故障线路切除后,中心环网解列,降低了系统潮流分配的灵活性;中心环网的直流线路需考虑系统总功率,容量冗余较大。

### 1.2.2 VSC-MTDC 系统控制策略

VSC-MTDC 的系统控制策略由各换流器的不同控制模式共同确定,其中换流器有 3 种基本控制模式,分别为定直流电压控制、定有功功率控制和电压斜率控制,如图 6 所示。图中,  $U_{dc1}$ 、 $U_{dc2}$ 、 $U_{dc3}$  为直流电压,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  为有功功率。

VSC-MTDC 系统中直流电压,反映了系统的有功平衡情况,所以维持系统直流电压稳定是 VSC-MTDC 系统控制的核心问题之一<sup>[10]</sup>。因此,按照直流电压稳定控制方式可将 VSC-MTDC 系统控制分为单点直流电压控制 and 多点直流电压控制,具体控制分类如图 7 所示。

主从控制将某一换流站作为主导站,采用定直流电压控制并平衡系统有功,其他换流站采用定有功功率控制<sup>[11]</sup>。一旦主导站功率越限或退出运行,系统将不能继续维持直流电压稳定<sup>[12]</sup>。虽然主从控

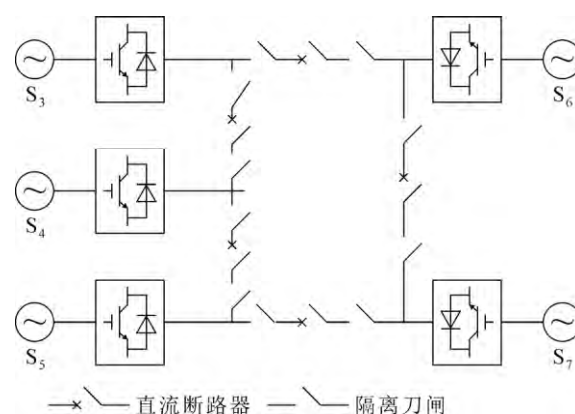


图 4 环形拓扑结构

Fig.4 Ring topology

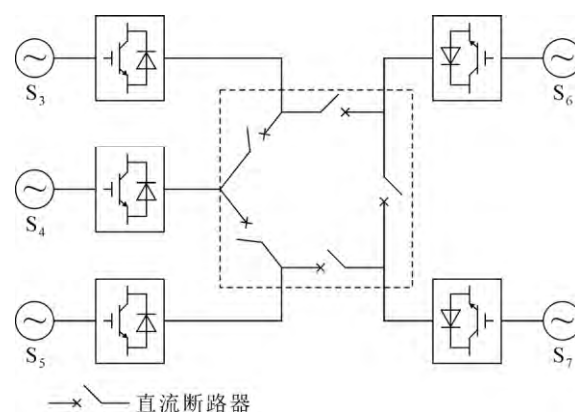


图 5 星形-中央环形拓扑结构

Fig.5 Star-central ring topology

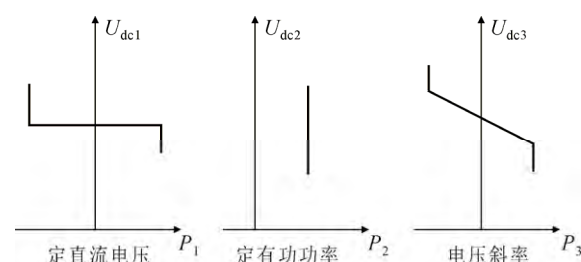


图 6 换流站基本控制模式

Fig.6 Basic control mode of VSC

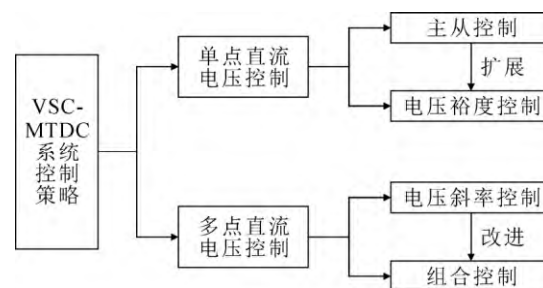


图 7 VSC-MTDC 系统控制分类

Fig.7 Classification of VSC-MTDC system control methods

制结构简单, 但依赖上层控制, 对实时精确通讯有较高要求, 系统运行可靠性较低<sup>[13-14]</sup>。直流电压裕度控制是对主从控制的一种扩展, 它无需站间通信, 当主导站失去稳定直流电压能力后, 备用换流站检测出系统直流电压偏差大于设定值, 则该站从定功率控制自动转换为定直流电压控制, 继续维持系统直流电压稳定<sup>[15]</sup>。电压裕度控制避免了单一换流站承担系统不平衡功率<sup>[16]</sup>, 但同一时刻仍只有单个换流站参与功率调节, 系统动态响应速度慢, 而且引入直流电压优先级后, 直流电压偏差裕度过小易引起系统失稳<sup>[17]</sup>, 过大又使得系统后期的扩展更为困难<sup>[18]</sup>。电压斜率控制是一种多点直流电压控制, 各换流站根据测量的直流电压, 按不同 P-V 运行曲线调节功率输出<sup>[19]</sup>。电压斜率控制由几个换流站共同调节系统不平衡功率, 系统动态响应速度快, 运行可靠性高, 但不能精确控制换流站有功输出, 且有功功率输出的改变所引起的系统直流电压的波动较大, 直流电压控制刚性较差<sup>[18]</sup>。

为提高运行可靠性并避免上述基本控制方式的缺陷, 换流站可结合各类控制方式的特点, 采用改进的组合协调控制策略。文献[20]中辅助换流站采用定功率和电压斜率混合控制, 在主导站功率越限后, 辅助站能分担一定的功率缺额。文献[21]中辅助站采用电压斜率控制, 次辅助站采用混合控制, 这种控制方式基于本地电压信号, 不需换流站间通信。但这两种控制方式中, 如果主导站退出运行后, 系统出现较大功率缺额, 而辅助站所能调节的功率如果不足以弥补该功率缺额, 则会导致系统功率失衡, 不能继续维持直流电压稳定。文献[22]利用多代理技术设计 3 层控制系统, 其中底层 Agent 采用直流电压偏差控制, 该控制对系统实时通信的要求较高。文献[23]根据扰动类型和扰动程度将系统运行分为自由、下垂和限流 3 种运行模式, 以避免直流电压频繁波动, 但扰动的判断和分析增加了系统控制难度, 同时多种运行模式的切换易造成系统功率振荡。文献[24]提出自律分散思想, 结合电压裕度和电压斜率控制, 减小模式切换过程产生的直流电压超调量。文献[25]引入两个电压斜率系数修正运行曲线, 缩短了模式切换的暂态过程。文献[26-27]推导换流站直流电压和输出功率关系式, 给出 P-V 运行特性曲线拐点的计算方法, 以确定不同控制模式所对应的直流电压运行范围。文献[28]提出一种适用于直流配网的 P-U-I 控制策略, 在电压环外增

加功率环, 以解决换流站内复杂控制模式切换所引起的系统功率振荡等问题。

维持 VSC-MTDC 系统直流电压稳定的同时, 换流站间不平衡功率也应得到合理分配, 即换流站应选取合理的下垂系数。文献[29]证明了系统稳定运行的前提条件是 P-V 下垂特性曲线为单调递增的连续函数, 并给出下垂特性曲线的调节范围。文献[30]通过分析电压下垂系数对功率分配的影响, 构建功率对电压的雅克比矩阵, 揭示了换流站直流电压变化与功率变化的本质联系。文献[31]通过引入功率影响因子实现下垂系数的闭环控制, 减小调节换流站的直流电压偏差值。此外, 如果进一步考虑系统实际运行工况, 可以通过功率特性曲线<sup>[32]</sup>或是引入公共直流参考电压<sup>[33]</sup>确定有功附加信号, 进而计算下垂系数; 也可以通过检测直流电压偏差程度<sup>[34]</sup>或是各换流站功率裕量<sup>[35-36]</sup>计算下垂系数。这类控制方法根据各换流站实际功率裕量和直流电压裕量实时计算直流电压下垂系数, 可实现换流站下垂控制的自适应调节。

综上所述, VSC-MTDC 系统控制的 2 个核心问题是直流电压稳定控制和换流站间功率的合理分配。改进的组合协调控制策略能保证系统在不同工况下继续维持直流电压稳定; 在此基础上, 通过不同方法调节换流站下垂系数, 从而调整换流站间功率的分配, 以保证 VSC-MTDC 系统更加可靠、经济运行。

### 1.3 VSC-MTDC 系统潮流优化控制

求解直流网络最优潮流即是确定各换流器最佳稳态运行点。文献[37]对各换流站不同控制模式和指令值进行初始化, 根据系统约束条件不断修正各换流站控制模式和运行点, 直至得到合适的稳态工作点。文献[38]基于电压灵敏度指标, 给出当非主导站停运直流电压指令值无解情况下有功指令值调整的优化计算方法。文献[39]采取多级电压偏差控制, 提出优化指令值评价指标, 给出任一换流站停运情况下求解电压裕度和功率优化指令值的方法。文献[40]根据换流器剩余容量和实际负荷情况, 修正换流站下垂系数, 调整网络潮流分配, 提高了各换流站的利用率。文献[41]给出换流站和直流线路损耗模型, 文献[42]以直流网络线路损耗为优化目标, 文献[43]以直流线路损耗和换流站损耗为优化目标, 对直流网络潮流进行优化, 求解各换流站最优电压下垂系数。文献[44-45]以交流线路损耗、

直流线路损耗和换流站损耗之和为目标, 分别给出交直流混合系统的潮流优化计算方法。

## 2 柔性直流输电系统附加控制

柔性直流输电具有快速的动态响应特性并且能独立控制有功和无功功率, 这使其在正常输送功率的同时还可以实现一些附加控制功能。其中, 利用 VSC 换流站提供频率支撑和进行阻尼控制是两种主要的附加控制方式。

### 2.1 频率支撑

保持发电功率和负荷功率平衡是保证电力系统稳定运行的前提。在弱交流系统中, 功率不平衡会导致很大的频率偏移。VSC 换流站可快速控制有功功率的传输, 因此可以利用附加控制实现为弱交流电网提供频率支撑的目的。

文献[46]针对采用 VSC-MTDC 实现异步互联的电力系统, 提出一种能够实现一次调频的分散控制策略。文献[47]在文献[46]提出的控制策略的基础上进行了改进, 采用协调控制方法使交流系统频率稳定到正常水平。文献[48]提出了适合风电场接入的定有功功率和频率辅助控制策略。风速变化情况下, 能自动调节风电场侧换流站的有功功率参考值, 通过频率辅助控制使风电场频率稳定在  $50 \pm 0.25$  Hz 范围内。文献[49]针对 VSC-HVDC 互联的电力系统, 提出一端交流系统发生较大频率变化时, 另一端系统可通过 VSC-HVDC 进行频率调整的附加频率控制策略。文献[50]将文献[49]中的附加频率控制方法与直流电压协调控制相结合, 使 VSC-MTDC 互联的电力系统在一端交流系统频率有较大变化时, 其余端所连接交流系统共同参与功率支援, 能最大程度地减小功率不平衡引起的频率偏移。

### 2.2 阻尼控制

电压源型换流器较传统 LCC-HVDC 功率控制更为灵活、快速, 因此通过附加功率调制改善系统弱阻尼特性可取得很好的控制效果。利用 VSC-HVDC 的附加功率调制提高系统阻尼已有大量研究, 控制器设计方法主要有极点配置法、最优控制、能量函数法、非线性变结构控制、人工智能等。

#### 2.2.1 极点配置法

极点配置法是利用反馈, 将系统闭环极点移动到期望的位置, 以达到提高系统阻尼的一种控制方法。此类控制方法首先是需要获得系统传递函数模

型, 然后根据根轨迹法、留数法进行相位补偿和增益设计。文献[51-52]均是针对以 VSC-HVDC 有调整定值为输入、以交流线路功率为输出信号的系统模型, 采用根轨迹法进行的控制器相位和增益设计。不同之处在于, 文献[51]所用到的系统模型是利用 Prony 辨识算法获得的, 文献[52]所用到的模型是通过数学方法建立, 并在系统运行点附近将其线性化而获得系统的小信号模型。文献[53]采用留数分析法进行相位补偿设计, 设计了 PSS 结构的 VSC-HVDC 有功附加阻尼控制器, 并将不同控制器增益的控制效果进行了对比。以上方法均是采用极点配置法的简单设计。

文献[54]考虑到系统的多重运行模态, 采用区域极点配置方法, 设计了多重模型阻尼控制器, 保证了系统大范围运行情况下控制器的阻尼性能。文献[55]考虑到严重故障下控制器限幅的影响, 在故障过程中引入故障恢复信号, 并与采用基于根轨迹的极点配置法设计附加阻尼控制器输出叠加控制, 使直流调制过程为自由振动衰减, 减小了严重故障时限幅环节对故障初期控制器阻尼性能的影响。文献[56]提出同时利用 VSC-HVDC 系统的有功、无功以及 PSS 提高系统阻尼, 并采用参数约束线性优化方法对个控制器参数进行优化, 完成了多控制器的协调设计。文献[57]分析了自动电压调节器对基于相位补偿原理的 PSS 结构的阻尼控制器的相互影响, 并提出了 AVR 与阻尼控制器的参数协调方法。

极点配置法设计附加阻尼控制的优点是设计过程简单, 并能达到较好的控制效果; 缺点是无论是采用辨识模型还是建立小信号模型, 都依赖于系统具体的运行状态, 在系统运行状态有大的变化时控制效果会受到较大的影响。

#### 2.2.2 线性最优控制

线性最优控制是寻找恰当的控制规律使指定的性能目标达到最大或者最小的一种控制方法。最常用且技术最成熟的线性最优控制是二次型性能指标最优控制。文献[58-59]推导了多机系统的数学模型, 并采用线性最优二次型理论设计了附加阻尼控制器, 控制器需以状态反馈的形式实现, 由于状态变量较多, 因此实现较复杂。文献[60]近似定性的分析了 VSC-HVDC 与发电机存在紧耦合的系统中, 快速功率控制导致系统出现阻尼减弱或负阻尼现象的机理, 并选取易于获取的部分输出量反馈设计了最优控制器。文献[61]针对多个目标振荡模态, 采



用线性二次高斯最优控制理论设计了多输入单输出 (multi input single output, MISO) 广域阻尼控制器, 通过对 VSC-HVDC 系统的有功进行控制, 使多个目标振荡模态阻尼均达到设计要求。文中还尝试将 MISO 阻尼控制器拓展为多输入多输出阻尼控制器, 同时控制 VSC-HVDC 系统的有功和无功以提高系统阻尼, 但控制效果较 MISO 控制器并没有明显改善。

### 2.2.3 能量函数法

能量函数法是通过构建系统暂态能量函数, 寻找使暂态能量持续下降的控制规律的一种控制方法。文献[62]将 VSC-HVDC 简化为注入模型, 根据控制 Lyapunov 函数方法设计了有功阻尼控制器, 并采用留数分析理论设计了有功和无功附加阻尼控制器。文中指出, 当交流传输线轻载时, 单独的有功附加控制能达到提高系统稳定性的效果; 当交流传输线重载时, 需要有功和无功附加控制同时投入时才能保证系统稳定。但文中没有提到如何协调多个控制器的参数。文献[63]在李雅普诺夫能量函数法的基础上, 推导出了能够使系统振荡能量快速衰减的有功和频率、无功和电压之间的纯比例调节规律。这使得 VSC-HVDC 附加功率调制阻尼控制器的设计变得尤为简便。文献[64]进一步分析了在提升系统输送功率时选用含附加阻尼控制的 VSC-HVDC 系统相比于新增交流传输线路对提升系统稳定性的优点。文献[65]推导了交直流互联系统中使暂态能量持续下降的 VSC-HVDC 无功调制规律, 并据此设计了双侧模糊无功阻尼控制器, 提升了 VSC-HVDC 系统的调制容量。

### 2.2.4 非线性变结构控制

非线性变结构控制是指利用高速开关和切换函数将系统相轨迹按某一趋近律驱动到指定的超平面上, 系统在超平面上的滑动模态满足渐近稳定条件<sup>[66]</sup>。滑模变结构控制的系统动态过程包含切换面外的趋近模态、切换面上的滑动模态 2 个阶段。选择恰当的趋近规律和切换面决定了滑模控制的品质。由于滑模控制采用的是非连续控制方式, 因此在系统状态接近滑模面时易出现高频颤振现象<sup>[67]</sup>。文献[68]针对 VSC-HVDC 系统的有功和无功控制, 分别设计了基于李雅普诺夫函数的滑模控制器和基于超扭曲算法的二阶滑模控制器, 能够很好地抑制电力系统低频振荡。文献[69]针对 VSC-MTDC 有功调制, 设计了滑模鲁棒控制器, 抑制电力系统受扰

后的功率振荡。

### 2.2.5 模糊控制

模糊控制作为人工智能的一种, 可以实现非精确系统的控制。模糊控制的难点在于模糊规则的设置, 一般根据经验反复调试设计, 如果能推导出部分控制规律则可以简化模糊规则的建立工作。文献[70]采用模糊逻辑方法设计了两换流站的有功和无功附加阻尼控制器, 模糊规则完全依靠经验反复调整建立, 控制效果并不是太好。文献[65]则是根据推导出的控制规律建立模糊规则, 简化了模糊控制的设计工作。文献[71]提出了一种抑制低频振荡的 PSS 与 VSC-HVDC 附加阻尼控制器的联合设计方法。首先采用模糊逻辑方法设计模糊 PSS 参数, 然后针对加入模糊 PSS 的系统, 采用混沌优化算法设计全局最优的 VSC-HVDC 输出反馈控制器参数。

### 2.2.6 其他控制方法

文献[72]采用 bang-bang 控制设计了混合调制控制策略, 能有效抑制系统振荡。文献[73]考虑到电力系统的非线性特性, 采用线性变参数方法设立了非线性变增益附加阻尼控制器, 使系统运行条件大范围变化的情况下仍然保持较好的阻尼性能。文献[74]采用模型预测控制方法, 以每个采样周期内系统频率偏差最小化为控制目标, 通过实时调整换流站输出的有功和无功功率, 使系统振荡快速衰减。文献[75]对多端直流不同换流站参与有功调制提升系统阻尼的机理进行了推导, 并指出量两端换流站同时进行有功调制且调制功率符号相反时控制效果最优。文献[76]采用基于线性矩阵不等式的鲁棒控制理论, 利用 VSC-HVDC 的有功、无功等多个控制量设计了多输入多输出鲁棒阻尼控制器, 并采用同伦理论将其转换为了多个单输入单输出鲁棒阻尼控制器, 提升了 VSC-HVDC 系统的调制能力并实现了多附加控制器的解耦设计。

## 3 风电接入下的 VSC-HVDC 系统控制

风电场输出的瞬时功率存在大范围的随机波动, 常规双闭环的 PI 解耦控制方法 VSC-HVDC 跟踪风电场侧的功率, 维持电压和频率稳定存在一定的困难。此外, VSC-HVDC 接入方式下, 使风电场和交流电网进行了解耦, 导致风电场侧的惯量减小。很小的系统惯量将导致系统在负荷波动和故障情况下的频率稳定性很低; 同时, 风电的不确定性, 采用直流输入接入电网会导致直流系统和受端交流系

统的不稳定。因此,需要完善具有良好动态性能的变流器控制方法和先进的协调控制技术,以提高风电并网稳定性。

### 3.1 风电接入下的 VSC-HVDC 变流器控制

VSC-HVDC 换流器是一个具有非线性强耦合特性的多输入多输出控制系统。对于该控制系统,基于同步旋转坐标系下的电压矢量 PI 双闭环前馈解耦控制是经典的控制方法。然而,风电场功率、电压、频率等的波动较大,这导致对 PI 控制器的参数整定要求很高。为提高变流器的动、静态性能,简化控制器参数整定,一些学者提出的新型变流器控制策略。

文献[77]将基于虚拟磁链的直接功率控制(direct power control, DPC)方法应用于海上风电场 VSC-HVDC 输电的变流器控制中,通过虚拟磁链技术计算系统瞬时有功和无功功率,使两端变流器可无电压传感器运行,降低了系统的成本,并提高了系统可靠性。此外,控制系统只需要整定一个 PI 参数,简化了系统调试工作。文献[78-79]利用非线性系统的无源性理论,以拉格朗日方程表示两相旋转坐标系下的变流器数学模型,选取误差能量函数作为存储函数,并在控制方程中加入阻尼项,使系统能量快速耗散并满足渐近稳定条件。而传统双闭环 PI 控制本身不具有增加阻尼这一功能,且内外环的 PI 参数难以调整到最优值,因此该控制方法动、静态性能均优于传统双闭环 PI 控制器。文献[80]提出了一种数字预测电流控制方法,快速跟踪输入电流,并可根据品质方程快速确定电压矢量最优参考值。该预测控制方法能够快速消除系统静差、离散误差,提高了风电接入下变流器的鲁棒性。文献[81]基于无拍差预测控制理论,对开关周期内的瞬时有功和无功进行预测,并根据瞬时功率反推,下一周期的电压参考值,消除了开关周期结束后的静态功率跟踪误差,实现了变流器预测直接功率控制。滑模变结构控制能够解决非线性系统的参数扰动和负载变化等问题、提高系统的鲁棒性,但不可避免参数摄动时产生的颤振<sup>[82]</sup>。文献[83]设计 VSC-HVDC 变流器滑模控制器时,将比例-积分-微分神经网络(proportional-integral-derivative neural-network, PIDNN)应用到对滑模面的参数在线训练和控制中,提高了系统的鲁棒性和自适应性,并消除了系统颤振。

在常规的变流器控制方式下,风电场经 VSC 换流站接入时会引起电力系统的低惯量、欠阻尼。为

改善这一现象,学者们将虚拟同步发电机(VSG)技术应用于变流器控制中<sup>[84-86]</sup>,使逆变器模拟同步发电机运行,从而改善了分布式电源经 VSC-HVDC 并网时系统的稳定性。此外,比例谐振(proportion plus resonant, PR)控制也是变流器控制中的一个研究热点。采用 PR 控制器进行矢量电流控制,可以实现交流信号无静差控制,从而达到改善并网变流器在不对称故障下动态性能的目的<sup>[87]</sup>。文献[88]采用粒子群算法优化 PR 控制器的参数,综合考虑有功和无功波动的抑制,在电网电压不平衡的情况下,能够将有功(或无功)波动限制在限定范围,同时最小化无功(或有功)波动。文献[89]将比例谐振控制器应用于 MMC-HVDC 系统的环流抑制,并通过增加桥臂电流比例负反馈环节对环流抑制控制器进行优化,提高了系统稳定性和环流快速抑制能力。上述各种变流器控制方法在一定的控制目标下均有较好性能优势,可针对不同的控制要求选择恰当的控制方法。在工程应用方面,PI 双闭环控制仍是最经典最可靠的控制方式,上述各种新型控制方法在实际工程中的应用效果还有待进一步的验证。

### 3.2 风电接入下的 VSC-HVDC 系统控制

风力发电的波动性和间歇性行为都具有很强的不确定性<sup>[90]</sup>,这对电力系统的频率稳定、电压稳定等都将产生不利影响。为提高风电并网下系统的稳定性,一些学者提出了各种附加控制和协调控制策略。

文献[91]提出适合海上风电场并网的串联型多端 VSC-HVDC 电路拓扑,并提出风机侧采用最大功率追踪,系统侧采用一台逆变器采用直流电流优化控制,其余变流器进行电压控制的协调控制策略。针对大型风电基地功率外送的 MTDC 系统,为提高大扰动下的统功率和电压稳定性,文献[92]提出了可在无限大电压源控制、定功率控制、定直流电压控制和内部限流模式间进行自动切换的协调控制策略。文献[93-94]分析了风电并网的 VSC-MTDC 中电压-电流的特性,并针对正常和故障条件下 VSC-MTDC 的电压-电流特性设计出一种控制系统。针对风电经 VSC-HVDC 接入下的系统惯量不足,文献[95]提出通过对电网侧直流电容和双馈风机转子动能的协调产生系统惯量的协调控制策略,该控制策略能为系统提供大范围的惯量支撑。文献[96]提出了一种适用于大规模风电并网的六端柔性直流输电系统拓扑,并设计了送端 VSC 交流电压控



制、受端 VSC 直流电压下垂控制的协调控制策略。文献[97]提出适用于送端风电分散并网的交流电压下垂控制策略, 能保证负荷波动下并网系统的稳定性和提高风电场对受端系统电压暂降的抗干扰能力。文献[98]提出送端换流站定交流电压和定频率的组合控制策略, 使风电场保持最大功率输出并提高了风电场侧交流系统的频率稳定性。

风电场经 VSC-HVDC 并网的故障穿越能力是衡量风电并网系统运行可靠性的一个重要指标。提高风电并网的故障穿越能力是风电并网协调控制的一个重要研究方向。经 VSC-HVDC 并网的风电场要实现故障穿越关键就是要再故障期间保持两端系统的功率平衡。文献[99]提出一种利用风电机组惯量提高系统故障穿越能力的方法。通过附加控制产生虚拟惯量作为一个控制参数, WFCVSC 根据直流电压波动量改变电压频率, 将功率不平衡信息传送到风电场, 风电机组根据频率变化调整输出功率, 实现功率平衡。文献[100]提出一种能够保障电力系统在波动的风电穿透率下安全稳定运行的控制方案。文献[101]提出一种低电压穿越协调控制策略, 在低电压穿越期间控制两端换流站提供无功支撑, 并采用基于电压的功率控制算法快速减小风电场输出功率以保持直流电压稳定。

在风电接入场景下提出的各种控制策略都能够起到各自的控制目标, 而对于未来容量更大、结构更为复杂的多端 VSC-MTDC 系统, 各种控制策略的综合选用亦是一个值得研究的重要方向。

## 4 结论

柔性直流输电相比于传统直流输电具有诸多优势, 是未来构建直流电网的重要组成部分, 其控制技术的发展决定了柔性输电技术的发展前景。

1) 多端柔性直流接入交流电网后, 针对交直流混合系统的协调控制和潮流优化需进一步分析和研究。目前 VSC-MTDC 的协调控制多是在稳定直流电压的条件下实现功率的协调分配, 可以考虑进一步协调电压稳定和功率分配, 以及考虑多换流站潮流快速控制及其与交流电网协同控制方式。此外, VSC 换流站输出无功功率可调, 对系统交流电压有一定支撑作用, 改变换流站运行模式, 进一步挖掘换流站无功输出能力, 有利于系统特定紧急控制目标的实现。

2) 目前, 柔性直流输电的附加阻尼控制的研究

多针对小区域、单条直流进行设计, 当直流和交流网络很复杂时很难达到控制目的。同时, 采用广域信号进行多控制器设计时的延时和通信中断也少有文献提出非常有效的解决办法。针对多区域复杂交直流网络的广域协同阻尼控制方法还有待进一步研究。

3) 未来风电接入容量在整个电网中所占比例将会增大数倍。风电并网的容量和密集程度都将给电网的安全稳定运行带来极大的挑战。柔性输电的控制方式研究应考虑复杂多变直流电网结构和大容量密集分布风电场功率随机性的影响, 减小风电并网下的频率、电压波动, 提高系统惯性水平。

## 参考文献 References

- [1] 邱晓燕, 沙熠, 宁雪姣, 等. 大规模风电接入的智能电网多类型柔性负荷分级优化调度[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2084-2091. QIU Xiaoyan, SHA Yi, NING Xuejiao, *et al.* Hierarchical optimization of multi-type flexible load in smart grid with large-scale wind generation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2084-2091.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2011. ZHAO Wanjuan. Engineering techniques of HVDC[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Electric Press, 2011.
- [3] 王成山, 罗凤章, 张天宇, 等. 城市电网智能化关键技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2017-2027. WANG Chengshan, LUO Fengzhang, ZHANG Tianyu, *et al.* Review on key technologies of smart urban power network[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2017-2027.
- [4] 马为民, 吴方劼, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439. MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, *et al.* Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [5] 饶宏, 张东辉, 赵晓斌, 等. 特高压直流输电的实践和分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2481-2488. RAO Hong, ZHANG Donghui, ZHAO Xiaobin, *et al.* Practice and analyses of UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2481-2488.
- [6] Bianchi F D, Domínguez-García J L, Gomis-Bellmunt O. Control of multi-terminal HVDC networks towards wind power integration: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 55: 1055-1068.
- [7] Kontos E, Pinto R T, Rodrigues S, *et al.* Impact of HVDC transmission system topology on multiterminal DC network faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 844-851.
- [8] Bucher M K, Wiget R, Andersson G, *et al.* Multiterminal HVDC networks—what is the preferred topology?[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 406-413.
- [9] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17. TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

- [10] 朱瑞可, 李兴源, 应大力. VSC-MTDC 互联系统频率稳定控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2729-2734.  
ZHU Ruike, LI Xingyuan, YING Dali. A frequency stability control strategy for interconnected VSC-MTDC transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2729-2734.
- [11] Lu W X, Ooi B T. Optimal acquisition and aggregation of offshore wind power by multiterminal voltage-source HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 201-206.
- [12] Bellmunt O G, Liang J, Ekanayake J, *et al.* Topologies of multiterminal HVDC-VSC transmission for large offshore wind farms[J]. Electric Power System Research, 2011, 81(2): 271-281.
- [13] Vrana T K, Beerten J, Belmans R, *et al.* A classification of DC node voltage control methods for HVDC grids[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 103(8): 137-144.
- [14] Wang W Y, Barnes M. Power flow algorithms for multi-terminal VSC-HVDC with droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1721-1730.
- [15] Lu W X, Ooi B T. DC overvoltage control during loss of converter in multiterminal voltage-source converter-based HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 915-920.
- [16] Haileselassie T M, Molinas M. Multi-terminal VSC-HVDC system for integration of offshore wind farms and green electrification of platforms in the North Sea[C]. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics. Espoo, Finland: [s.n.], 2008: 1-8.
- [17] Dierckxsens C, Srivastava K, Reza M, *et al.* A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 82(1): 54-58.
- [18] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-131.  
TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, *et al.* A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 125-131.
- [19] Pinto R T, Bauer P, Rodrigues S F, *et al.* A novel distributed direct-voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2429-2438.
- [20] 阮思桦, 李国杰, 孙元章. 多端电压源型直流输电系统的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 57-60.  
RUAN Siyu, LI Guojie, SUN Yuanzhang. A control strategy for multi-infeed VSC-HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 57-60.
- [21] 丁涛, 张承学, 孙元博. 基于本地信号的 VSC-MTDC 输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 44-48.  
DING Tao, ZHANG Chengxue, SUN Yuanbo. A control strategy based on local signal measuring for VSC-MTDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 44-48.
- [22] 吴俊宏, 艾芊, 章健, 等. 基于多代理技术的 VSC-MTDC 控制系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 85-88.  
WU Junhong, AI Qian, ZHANG Jian, *et al.* A VSC-MTDC control system based on multi-agent technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 85-88.
- [23] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 多端电压源型直流系统的功率协调控制技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 130-135.  
FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, *et al.* Coordinated power control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 130-135.
- [24] 熊凌飞, 韩明晓. 基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1586-1592.  
XIONG Lingfei, HAN Mingxiao. A novel combined control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1586-1592.
- [25] 孙黎霞, 陈宇, 宋洪刚, 等. 适用于 VSC-MTDC 的改进直流电压下垂控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1037-1043.  
SUN Lixia, CHEN Yu, SONG Honggang, *et al.* Improved voltage droop control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1037-1043.
- [26] 任敬国, 李可军, 刘合金, 等. 基于改进定有功功率控制特性的 VSC-MTDC 系统仿真[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 133-139.  
REN Jingguo, LI Kejun, LIU Hejin, *et al.* Coordinated control strategy of VSC-MTDC system based on improved DC voltage-active power characteristic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 133-139.
- [27] 任敬国, 李可军, 张春辉, 等. 基于直流电压-有功功率特性的 VSC-MTDC 协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 8-15.  
REN Jingguo, LI Kejun, ZHANG Chunhui, *et al.* A coordinated control strategy for VSC-MTDC system based on DC voltage-active power characteristic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 8-15.
- [28] 季一润, 袁志昌, 赵剑锋, 等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 335-341.  
JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, *et al.* A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 335-341.
- [29] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统下垂控制 P-V 特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 408-415.  
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, *et al.* Time-domain analysis of P-V characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29 (Supplement 1): 408-415.
- [30] Haileselassie T M, Uhlen K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [31] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 1-11.  
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, *et al.* DC voltage adaptive droop control of multi-terminal HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 1-11.
- [32] 任敬国, 李可军, 牛林, 等. 基于附加信号的 VSC-HVDC 系统改进有功功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 46-51.  
REN Jingguo, LI Kejun, NIU Lin, *et al.* Advanced active power control strategy based on additional signal for VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 46-51.
- [33] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.  
YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, *et al.* An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.
- [34] 刘瑜超, 武健, 刘怀远, 等. 基于自适应下垂调节的 VSC-MTDC 功率协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 40-48.  
LIU Yuchao, WU Jian, LIU Huaiyuan, *et al.* Effective power sharing based on adaptive droop control method in VSC multi-terminal DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 40-48.
- [35] 朱瑞可, 王渝红, 李兴源, 等. VSC-MTDC 系统直流电压自适应斜率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 63-68.  
ZHU Ruike, WANG Yuhong, LI Xingyuan, *et al.* An adaptive DC voltage droop control strategy for the VSC-MTDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 63-68.

- [36] 陈实, 朱瑞可, 李兴源, 等. 基于 VSC-MTDC 的风电场并网控制策略研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014, 46(2): 147-152. CHEN Shi, ZHU Ruike, LI Xingyuan, *et al.* Research on control strategy for interconnection of wind farms by VSC-MTDC[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(2): 147-152.
- [37] 任敬国, 李可军, 赵建国, 等. VSC-MTDC 输电系统的直流侧运行特性分析与稳态工作点计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 786-795. REN Jingguo, LI Kejun, ZHAO Jianguo, *et al.* DC operating characteristic analysis and steady-state point calculation of VSC-MTDC Transmission System[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 786-795.
- [38] Lu W, Ooi B T. DC voltage limit compliance in voltage-source converter based multi-terminal HVDC[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2005: 1322-1327.
- [39] 任敬国, 李可军, 赵建国, 等. 基于 N-1 准则的 VSC-MTDC 输电系统稳态调控方案[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 74-80. REN Jingguo, LI Kejun, ZHAO Jianguo, *et al.* N-1 principle based steady-state control of VSC-MTDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 74-80.
- [40] Chaudhuri N R, Chaudhuri B. Adaptive droop control for effective power sharing in multi-terminal DC (MTDC) grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 21-29.
- [41] Daelemans G, Srivastava K, Reza M, *et al.* Minimization of steady-state losses in meshed networks using VSC HVDC[C]. 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting. Calgary, Canada: IEEE, 2009: 1-5.
- [42] Aragüés-Peñalba M, Egea-Alvarez A, Gomis-Bellmunt O, *et al.* Optimum voltage control for loss minimization in HVDC multi-terminal transmission systems for large offshore wind farms[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 89(4): 54-63.
- [43] Aragüés-Peñalba M, Egea-Alvarez A, Arellano S G, *et al.* Droop control for loss minimization in HVDC multi-terminal transmission systems for large offshore wind farms[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 112: 48-55.
- [44] Feng W, Tjernberg L B, Mannikoff A, *et al.* An extended OPF incorporating multi-terminal VSC-HVDC and its application on transmission loss evaluation[C]. 2013 IEEE Power Tech (POWERTECH). Grenoble, France: IEEE, 2013: 1-6.
- [45] Cao J, Du W, Wang H F, *et al.* Minimization of transmission loss in meshed AC/DC grids with VSC-MTDC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3047-3055.
- [46] Dai J, Phulpin Y, Sarlette A, *et al.* Coordinated primary frequency control among non-synchronous systems connected by a multi-terminal high-voltage direct current grid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(2): 99-108.
- [47] Sarlette A, Dai J, Phulpin Y, *et al.* Cooperative frequency control with a multi-terminal high-voltage DC network[J]. Automatica, 2012, 48(12): 3128-3134.
- [48] 范心明, 管霖, 何健明. 多电平柔性直流输电定有功功率与频率辅助控制[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 182-186. FAN Xinming, GUAN Lin, HE Jianming. Constant active power and frequency auxiliary control for multilevel VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 182-186.
- [49] 朱瑞可, 王渝红, 李兴源, 等. 用于 VSC-HVDC 互联系统的附加频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 81-87. ZHU Ruike, WANG Yuhong, LI Xingyuan, *et al.* An additional frequency control strategy for interconnected systems through VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 81-87.
- [50] 朱瑞可, 李兴源, 应大力. VSC-MTDC 互联系统频率稳定控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2729-2734. ZHU Ruike, LI Xingyuan, YING Dali. A frequency stability control strategy for interconnected VSC-MTDC transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2729-2734.
- [51] 郑超, 周孝信. 基于普罗尼辨识的 VSC-HVDC 附加阻尼控制器设计[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 25-30. ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin. Design of additional damping controller for VSC based HVDC transmission system by use of Prony identification method[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 25-30.
- [52] 郑超, 周孝信. 基于电压源换流器的高压直流输电小信号动态建模及其阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 7-12. ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin. Small signal dynamic modeling and damping controller designing for VSC based HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 7-12.
- [53] Hadjikypris M, Terzija V. Active power modulation assisting controller scheme implemented on a VSC-HVDC link establishing effective damping of low frequency power oscillations[C]. Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International. Dubrovnik, Croatia: IEEE International, 2014: 295-302.
- [54] 宋瑞华, 周孝信. 基于 LMI 方法的 VSC-HVDC 多重模型阻尼控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 16-20. SONG Ruihua, ZHOU Xiaoxin. Design of VSC-HVDC multi-model damping controller based on LMI method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 16-20.
- [55] 王振浩, 李洋, 高凯, 等. 引入故障恢复信号的 VSC-HVDC 附加阻尼控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 34-40. WANG Zhenhao, LI Yang, GAO Kai, *et al.* Study of using fault recovery signal for additional damping controller of VSC-based HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 34-40.
- [56] 李国杰, 马峰. PSS 与 VSC-HVDC 附加阻尼控制器参数协调优化设计[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 39-43. LI Guojie, MA Feng. A coordinated tuning algorithm for power system stabilizer and supplementary damping controller of VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 39-43.
- [57] Zeni L, Eriksson R, Goumalatsos S, *et al.* Power oscillation damping from VSC-HVDC connected offshore wind power plants[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 829-838.
- [58] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 一种优化控制策略在基于电压源换流器 HVDC 系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 38-41. HU Zhaoqing, MAO Chengxiong, LU Jiming. Application of an optimal control strategy to new type of HVDC system based on voltage source converters[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 38-41.
- [59] 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.
- [60] 宋瑞华, 周孝信. 基于电压源换流器的高压直流输电系统的阻尼特性与阻尼控制[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 17-21. SONG Ruihua, ZHOU Xiaoxin. Research on VSC-HVDC damping characteristics and damping control[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 17-21.

- [61] Preece R, Milanovic J V, Almutairi A M, *et al.* Damping of inter-area oscillations in mixed AC/DC networks using WAMS based supplementary controller[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1160-1169.
- [62] Latorre H F, Ghandhari M, Söder L. Active and reactive power control of a VSC-HVDC[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(10): 1756-1763.
- [63] Ruan S Y, Li G J, Ooi B T, *et al.* Power system damping from energy function analysis implemented by voltage-source-converter stations[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(8): 1353-1360.
- [64] Latorre H F, Ghandhari M. Improvement of power system stability by using a VSC-HVDC[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(2): 332-339.
- [65] 刘凯, 张英敏, 李兴源, 等. 基于振荡暂态能量下降的 VSC-HVDC 双侧模糊无功阻尼控制器设计[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1030-1036.
- LIU Kai, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan, *et al.* Design of VSC-HVDC bilateral fuzzy logic reactive power damping controller based on oscillation transient energy decrease[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1030-1036.
- [66] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
- LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, *et al.* Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.
- [67] Utkin V I. Sliding mode control design principles and applications to electric drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 23-36.
- [68] Dash P K, Nayak N. Nonlinear control of voltage source converters in AC-DC power system[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 1268-1285.
- [69] Tang G, Xu Z, Dong H, *et al.* Sliding mode robust control based active-power modulation of multi-terminal HVDC transmissions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1614-1623.
- [70] Li S, Zhang J H, Zhang G H, *et al.* Design of integrative fuzzy logic damping controller of VSC-HVDC[C]. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle, WA, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [71] Farhang P, Tirtashi M R S, Noroozian R, *et al.* Combined design of VSC-HVDC and PSS controllers for LFO damping enhancement[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2014, 36(4): 529-540.
- [72] 陈蔓, 陆继明, 毛承雄, 等. 一种利用 VSC-HVDC 提高发电机阻尼的新控制策略[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 62-67.
- CHEN Man, LU Jiming, MAO Chengxiong, *et al.* A new control strategy using VSC-HVDC to improve generator damping[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 62-67.
- [73] 马锋, 李国杰, 阮思烨, 等. 基于线性变参数方法的 VSC-HVDC 变增益附加阻尼控制器设计[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 73-77.
- MA Feng, LI Guojie, RUAN Siye, *et al.* Design of VSC-HVDC supplementary damping controller using linear parameter varying approach[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 73-77.
- [74] Fuchs A, Imhof M, Demiray T, *et al.* Stabilization of large power systems using VSC-HVDC and model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 480-488.
- [75] Harnefors L, Johansson N, Zhang L, *et al.* Interarea oscillation damping using active-power modulation of multiterminal HVDC transmissions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2529-2538.
- [76] 张英敏, 刘凯, 李兴源, 等. 基于同伦变换的 VSC-HVDC 分散协调鲁棒阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2093-2102.
- ZHANG Yingmin, LIU Kai, LI Xingyuan, *et al.* Design of decentralized robust damping controller for VSC-HVDC transmission system based on homotopic transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2093-2102.
- [77] 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.
- WANG Guoqiang, WANG Zhixin, ZHANG Huaqiang, *et al.* DPC-based control strategy of VSC-HVDC converter for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 115-119.
- [78] 王国强, 王志新, 张学燕. 海上风电场柔性直流输电变流器的无源性控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 11-15.
- WANG Guoqiang, WANG Zhixin, ZHANG Xueyan. Passivity control of VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 11-15.
- [79] 范心明, 管霖, 何健明, 等. 风电接入下柔性直流输电的无源解耦控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 311-319.
- FAN Xinming, GUAN Lin, HE Jianming, *et al.* Decoupling passivity control of VSC-HVDC connected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 311-319.
- [80] 李爽, 王志新, 王国强. VSC-HVDC 海上风电输电变流器预测电流控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(9): 1516-1523.
- LI Shuang, WANG Zhixin, WANG Guoqiang. Research of digital predictive current control for wind power VSC-HVDC[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(9): 1516-1523.
- [81] 李爽, 王志新, 王国强. 海上风电柔性直流输电变流器 P-DPC 控制研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 264-270.
- LI Shuang, WANG Zhixin, WANG Guoqiang. Predictive direct power control strategy for offshore wind power VSC-HVDC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 264-270.
- [82] 童克文, 张兴, 张昱, 等. 基于新型趋近律的永磁同步电动机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 102-106.
- TONG Kewen, ZHANG Xing, ZHANG Yu, *et al.* Sliding mode variable structure control of permanent magnet synchronous machine based on a novel reaching law[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 102-106.
- [83] 李爽, 王志新, 王国强, 等. 三电平海上风电柔性直流输电变流器的 PID 神经网络滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 20-28.
- LI Shuang, WANG Zhixin, WANG Guoqiang, *et al.* PID neural network sliding-mode controller for three-level offshore wind power VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 20-28.
- [84] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
- ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, *et al.* Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [85] 侍乔明, 王刚, 付立军, 等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 783-790.
- SHI Qiaoming, WANG Gang, FU Lijun, *et al.* A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 783-790.
- [86] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.
- WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, *et al.* Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J].

- Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.
- [87] 张建波, 赵成勇, 敬华兵. 比例谐振控制器在 MMC-HVDC 控制中的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 53-62.  
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, JING Huabing. Simulating research of proportional resonant controllers in MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 53-62.
- [88] 孙黎霞, 王哲, 朱鹏飞, 等. 电网电压不平衡时 VSC-HVDC 优化控制策略[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 47-55.  
SUN Lixia, WANG Zhe, ZHU Pengfei, *et al.* Optimization control strategy for VSC-HVDC with unbalanced grid voltage conditions[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 47-55.
- [89] 苑宾, 许建中, 赵成勇, 等. 模块化多电平换流器 PR 环流抑制器优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2567-2575.  
YUAN Bin, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, *et al.* Optimal design of PR circulating current suppressing controllers for modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2567-2575.
- [90] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.  
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, *et al.* A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [91] 李响, 韩民晓. 海上风电串联多端 VSC-HVDC 协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 42-48.  
LI Xiang, HAN Minxiao. A coordinated control strategy of series multi-terminal VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 42-48.
- [92] 孙文博, 徐华利, 付媛, 等. 应用于大型风电基地功率外送的多端直流输电系统协调控制[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1596-1601.  
SUN Wenbo, XU Huali, FU Yuan, *et al.* Coordinated control of multi-terminal DC transmission system to send out power from large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1596-1601.
- [93] Gomis-Bellmunt O, Liang J, Ekanayake J, *et al.* Voltage-current characteristics of multiterminal HVDC-VSC for offshore wind farms[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2): 440-450.
- [94] Liang J, Gomis-Bellmunt O, Ekanayake J, *et al.* A multi-terminal HVDC transmission system for offshore wind farms with induction generators[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 54-62.
- [95] Li Y J, Zhang Z R, Yang Y, *et al.* Coordinated control of wind farm and VSC-HVDC system using capacitor energy and kinetic energy to improve inertia level of power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 59(7): 79-92.
- [96] 李程昊, 詹鹏, 文劲宇, 等. 适用于大规模风电并网的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 1-7.  
LI Chenghao, ZHAN Peng, WEN Jinyu, *et al.* A multi-terminal VSC-HVDC system control strategy for large wind farms integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 1-7.
- [97] 田园园, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于 VSC-HVDC 的风电分散并网下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 103-109.  
TIAN Yuanyuan, LIAO Qingfen, LIU Dichen, *et al.* Droop control strategy for wind power decentralized integration based on VSC-HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 103-109.
- [98] 潘伟, 李勇, 曹一家, 等. 用于大规模集中式风电电网的 VSC-HVDC 频率控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 94-99.  
PAN Wei, LI Yong, CAO Yijia, *et al.* Frequency control of grid-connection system based on VSC-HVDC for large-scale centralized wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 94-99.
- [99] 王毅, 付媛, 苏小晴, 等. 基于 VSC-HVDC 联网的风电场故障穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 150-159.  
WANG Yi, FU Yuan, SU Xiaoping, *et al.* Fault ride-through control strategy of wind farm integrated with VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 150-159.
- [100] 杨涛, 刘国平, 黄森, 等. 双馈风电场柔性高压直流输电并网控制策略[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(1): 1-11.  
YANG Tao, LIU Guoping, HUANG Miao, *et al.* A new control design for grid integration of DFIG wind farm with VSC-HVDC[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(1): 1-11.
- [101] 章心因, 胡敏强, 吴在军, 等. 基于 VSC-HVDC 的风力发电系统低电压穿越协调控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 138-143.  
ZHANG Xinyin, HU Minqiang, WU Zaijun, *et al.* Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 138-143.



LI Xingyuan

Ph.D., Professor



ZENG Qi

Ph.D. candidate

Corresponding author

李兴源

1945—, 男, 博士, 教授, 博导, IEEE 高级会员  
研究方向为电力系统稳定和控制、高压直流输电、  
柔性直流输电

曾琦(通信作者)

1977—, 女, 博士生, 讲师  
研究方向为电力系统稳定和控制、高压直流输电、  
柔性直流输电

收稿日期 2016-08-20 修回日期 2016-09-14 编辑 陈蔓