

柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践

古文基

(广西送变电建设有限责任公司, 广西 南宁 530031)

摘要:柔性直流传统的定有功功率控制模式依赖于调度运行人员下达调度控制指令,无法根据交流系统运行状态变化自动调整传输功率。柔性直流输电是基于电压源换流器原理的新型直流输电技术,近年来在国际上得到了广泛的关注和快速的发展,在风电送出、电网互联、无源网络供电和远距离大容量输电等场景实现了大量工程应用。

关键词:柔性直流输电技术;大电网;应用

中图分类号:TM721.1

文献标识码:A

文章编号:1004-7344(2023)16-0064-03

0 引言

柔性直流输电基于电压源型换流器,采用全控型功率器件,如 IGBT、IGCT 或 BIGT,利用电容器作为电压支撑元件。柔性直流通过控制阀侧电压与网侧电压的相角差来控制与电网交换的有功,通过控制阀侧电压与网侧电压的幅值差来控制与电网交换的无功。

1 柔性直流输电的基本原理

柔性直流可以独立控制输出电压的幅值和相位,因此实现了有功和无功的解耦控制;可以不依赖于电网实现整流逆变,为新能源电站并网提供所需要的电压和频率;没有换相失败现象,在电网发生故障时,可以全穿越交流系统故障,并且向电网提供动态无功支撑,提高电网安全稳定水平。在经济性方面,当前柔性直流换流站的单位造价较常规直流换流站高 20% 左右,主要设备的损耗率高 0.25% 左右。换流器是柔性直流输电系统的核心。工程中采用的换流器拓扑主要有两电平换流器、二极管箝位型三电平换流器和模块化多电平换流器(MMC)3种。由于谐波含量大、开关频率高、损耗大、多器件串联的动静态均压问题等,两电平和三电平拓扑的电压和输送容量提升困难。为此,MMC 应运而生,并迅速取代两电平和三电平拓扑,成为各项柔性直流工程的主流拓扑。MMC 由 6 个桥臂构成,每个桥臂由 N 个串联的子模块和桥臂电抗器组成^[1]。为了应对直流侧故障问题,箝位双子模块、半压箝位子模块、半桥和全桥混合等演化拓扑结构被提出。柔性直流工程中应用的子模块主要有半桥和全桥两种。

2 柔性直流输电技术应用实践

2.1 柔性直流输电技术的工程应用

2.1.1 柔性直流远距离架空线故障自清除技术

为实现直流线路瞬时性故障清除和重启动,受端

柔性直流换流器首次使用“全桥+半桥”的混合型 MMC 拓扑方案,采用主动降压控制方法,利用全桥子模块输出负压将直流电流控制为零,配合送端传统直流换流站的快速移相,可以在百 ms 级别实现直流线路故障快速自清除和重启动^[2]。在满足工程应用对直流侧故障自清除、快速重启动要求的同时,采用混合型 MMC 方案与采用全桥设计技术方案相比,能够降低 IGBT 器件用量,降低设备投资,同时还可以降低运行损耗。当直流线路故障检测系统检测到故障后,送端昆北站快速启动紧急移相策略,将触发角快速调整至 164°,柳州站和龙门站柔性直流换流站自动切换至定直流电流控制策略,控制目标值设置为零。通过该策略,柳州站和龙门站的直流电流在 10ms 内快速降低过零;经过设定的 400ms 去游离时间后,直流开始恢复功率,约 100ms 直流功率恢复至故障前的 90%。

2.1.2 多电压等级直流电网

目前的直流输电系统均为端对端、多端或直流电网结构,具有单一电压等级。直流电网具备冗余的输电通道,能够大范围实现多种能源类型的时空互补,是国内外研究的热点。我国于 2020 年建成世界上第一个直流电网工程,实现了直流组网的基础理论、控制保护、关键装备和系统集成的突破。为了适应未来更大规模、更大海域的海上风电基地送出需要,甚至连接不同电压等级的直流系统,多电压等级直流电网的概念近年来被提出。其系统结构、功率调节、故障隔离等技术还未得到系统研究,而且缺乏直流变压器和直流潮流控制器等核心装备支撑。现实来看,多电压等级直流电网在短期内尚无技术需求。就其技术特征而言,涉及的核心装备主要有直流断路器、直流变压器和直流潮流控制器等。依托南澳、舟山和张北工程,我国已经在直流

断路器方面取得了突破,电压等级可达 $\pm 535\text{kV}$,开断电流达到 25kA ,未来更高电压和开断能力还需进一步研发^[9]。直流变压器分为隔离型和非隔离型两类,但目前都处于低电压、小功率的示范应用阶段,适应输电系统需要的高压大容量直流变压器还处于拓扑结构、仿真计算和原理样机验证阶段。直流潮流控制器是直流电网中的潮流优化调节设备,当直流电网线路数量大于等于换流站数量时,可用于避免部分线路过载,优化网络线损,目前还处于拓扑原理和实验室样机论证阶段^[4]。

2.2 柔性直流输电换流阀塔电场分布与结构设计

具体内容如下:①顶部均压环不同管径下电场分布。仿真结果表明,不同管径下电场均能够满足要求,但增加管径的同时,需要考虑安装支撑板的长度。此外,顶部均压环圆直角处内侧的电场分布较弱,增加小均压环作用是增强其连接的绝缘子端部的场强,而连接处使用支撑板,其自身具备改善电场分布的能力。②板状与管状屏蔽系统的电场分布。通过对比目前工程中常用的板状与管状两种屏蔽系统的电场分布均衡性可以发现,两者电场分布相近,板状屏蔽系统的电场分布略优于管状屏蔽系统,其结构形式选取需结合生产制造成本与美观性进行取舍。③阀塔底部法兰周围电场分布。在阀塔底部法兰周围电场强度较强处主要集中在其相连接斜拉绝缘子鼓包处。通过仿真对比发现,通过给金属鼓包涂覆绝缘层或采用绝缘材料替代,可有效降低其电场强度。通过研究给出了柔直换流阀塔顶部均压环管径设计方法,并对比分析了两种工程常见屏蔽系统的优劣,提出了阀塔底部绝缘子鼓包电场分布特性改进方案,通过在张北柔性直流电网工程稳定运行,充分验证了上述分析及结构设计的合理性,并可指导后续工程阀塔结构设计,为后续工程设计提供了可靠支撑。

2.3 柔性直流换流站顺序控制方案

2.3.1 交流系统顺序控制的功能要求

交流系统一键顺控包括对母线、线路、变压器等设备的倒闸操作,实现“运行、热备用、冷备用”3种状态的转换操作。开关柜采用手动手车时,实现“运行、热备用”两种状态的转换操作。交流系统一键顺控应实现操作项目软件预制、操作任务模块式搭建、设备状态自动识别、防误联锁智能校核、操作步骤一键启动、操作过程视频联动等功能。监控系统按照预设程序与防误策略选择相应的操作任务,自动导出变电站操作票并按照步骤顺序执行操作;依据遥测、遥信、状态传感器信息等多重判据,确认设备实时状态信息,直至所有步骤

完成;采用防误双校核和设备状态双确认机制,确保操作控制安全可靠^[9]。

2.3.2 断路器“双确认”

断路器应满足双确认条件,其位置确认应采用“位置遥信+遥测”判据。位置遥信作为主要判据,采用分/合双位置辅助接点,分相断路器遥信量采用分相位置辅助接点。遥测量提供辅助判据,采用三相电流或电压。三相电流取自本间隔电流互感器,电压取自本间隔电压互感器或母线电压互感器。无法采用三相电流和电压时,应增加三相带电显示装置,采用三相带电显示装置信号作为辅助判据。当断路器位置遥信由合变分,且满足“三相电流由有流变无流、母线电压由有压变无压/母线三相带电显示装置信号由有电变无电、间隔电压由有压变无压/间隔三相带电显示装置信号由有电变无电”中的任一条件时,则确认断路器已分开。当断路器位置遥信由分变合,且满足“三相电流由无流变有流、母线电压由无压变有压/母线三相带电显示装置信号由无电变有电、间隔电压由无压变有压/间隔三相带电显示装置信号由无电变有电”中的任一条件时,则确认断路器已合上。

2.4 大容量远海风电柔性直流送出关键技术

2.4.1 直流电缆

海上风电柔性直流送出直流海缆主要采用交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆。随着XLPE绝缘材料和柔性直流输电技术的不断突破,XLPE绝缘直流电缆的电压等级和传输容量也在不断提高。以 $\pm 500\text{kV}/2000\text{MW}$ 直流系统为例,直流电缆通流要求为 2000A ,选用截面约 2500mm^2 的直流XLPE电缆可满足要求。目前国内外已具备 525kV 直流陆地电缆系统的生产制造能力,并正在开展 525kV 直流海底电缆系统的研发与试验。受电缆制造能力限制,在电缆技术取得进一步突破之前,单回海底电缆最大输送容量限制在 $2000\text{MW}\sim 3000\text{MW}$ 。海上风电送出用柔性直流系统采用双极接线可配置单独的金属中线电缆,金属中线电缆方案将增加一回电缆本体和路由,提高敷设造价,电缆总造价约为对称单极方案的1.35倍。双极接线不配置金属中线时,电缆发生故障将无法单极金属回线运行,可靠性优势不能得到充分发挥。

2.4.2 对称单极系统接地方式

随着海上风电柔直送出系统容量的提高,由于IGBT等功率器件的通流能力有限,可能导致功率器件的电流安全裕度小,不利于柔性直流输电系统的安全稳定运行。通过对调制波叠加三次谐波,可提高换流阀

直流电压利用率,从而增大换流器输出的最大交流电压,减小换流器电流应力,降低换流器损耗,提高换流器的安全裕度和故障穿越能力。对于采用三次谐波注入的模块化多电平换流器(MMC)型柔性直流系统,调制得到的交流相电压中包含三次谐波,输出线电压为正弦波。国内目前尚无采用谐波注入调制方式的对称单极柔性直流工程。对于对称单极系统,陆上换流站采用YNyn变压器、网侧直接接地,阀侧经接地阻抗接地。虽然回路中零序阻抗足够大,当直流极线上无零序回路时,直流极对地存在三次谐波电压,这将增加直流设备耐压成本。

2.5 在智能电网建设宏观领域的应用

在智能电网的建设和发展中,用户用电也需要实现智能化发展,使现代化智能小区得到建设。用户在用电过程中,对电能供应的质量及稳定可靠有较高要求,对此,需要应用电力工程技术。随着人们用电量的增加及电力市场改革的推进,电能供给方和需求方之间的沟通日益频繁,用户对智能用电的需求更加迫切,这进一步推动了电力工程技术在用电中的应用。用电工程中应用的电力工程技术有很多类型,比较常见的有智能计量电表、用电信息采集管理系统和智能化测量仪器等。在用电工程中应用电力工程技术,可以促进电费计价方式的转变,以及智能电气、智能家电使用,可以进一步提升电能使用效率;智能终端技术及高级测量仪器等的使用,促进了用电管理及服务水平的提升。

2.6 柔性直流输电系统中虚拟同步发电机技术

具体内容如下:①针对单端VSC采用VSG控制,该控制常设直流网络为恒功率源或直流电压源,或者设定负载为恒功率负载,系统的复杂度较低,控制方法也相对简单。对于两端的VSC-HVDC系统,设计了VSG技术的功率内环和电压外环控制结构,给出了虚拟惯性系数和阻尼系数以及电压控制器中的比例积分参数设计方法,但文中仅考虑了逆变侧的虚拟同步设计,将直流侧看作直流源,没有考虑整流侧换流站的同步化运行。在考虑VSG技术的研究重点主要是逆变环节,针对整流环节的虚拟同步电机控制较少,所以针对两端柔性直流输电系统中整流侧换流站进行了详尽的数学模型分析,建立了基于VSG技术的功率内环以及直流电压外环的控制方案,同时建立了VSG内环和电压外环的小信号模型,给出系统化的控制参数设计方法。在这一过程中,逆变侧采用定有功功率控制,等效为一个恒功率负载。②针对单端VSC采用VSG控制,

但在该控制方式下VSC站还考虑了直流网络电压的协调控制。传统的VSG控制策略下,当受端电网发生负荷扰动导致频率偏移时,送端换流器无法直接改变功率输出,只能通过通信的方法实现对受端电网的频率响应调节。而针对光伏经柔性直流输电送出的系统,提出一种改进控制方法,该方法在受端换流器中采用设置了频率波动死区的VSG控制,当受端电网频率波动范围大于死区范围时,受端换流器控制模式发生切换;当受端换流器切换控制模式从电网吸收的功率发生变化后,直流电压会因系统有功功率传输不平衡而发生变化,一旦直流电压的变化超过送端换流器设定裕值后,送端换流器也进行控制模式切换,改变送端交流系统的电压幅值,从而维持系统功率传输平衡以及直流电压的稳定。在VSC-HVDC系统受端换流站的控制中提出具有直流电压协调控制能力的VSG改进算法,进一步提高直流系统运行的可靠性。

3 结语

柔性交流输电技术是智能电网建设中的常用技术,在对交流输电的灵活控制和有效管理等方面发挥关键作用。柔性交流输电技术主要依托微电子技术、电力电子技术及相关通信控制技术,可以将拥有较高清洁度的新能源输入电网中,从而实现对各种能源的隔离。在智能电网建设中,积极促进柔性交流输电技术与智能电网的紧密结合,不仅能够合理调控智能电网中的各种参数,而且能够提升智能电网运营的安全稳定性,减少输电过程中的电能损耗,提升线路输送能力和输电水平。

参考文献

- [1] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22):1-8.
- [2] 刘泽洪,郭贤珊.含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践[J].电网技术,2020,44(9):3595-3603.
- [3] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
- [4] 许诤翔,刘威,刘树,等.电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J].电网技术,2022,46(9):3586-3595.
- [5] 张文秀.柔性直流输电技术应用、进步与期望[J].四川建材,2021,47(9):179-180.

作者简介:古文基(1986—),男,壮族,广西东兰人,本科,主要从事变电站施工安装技术与建设工程管理工作。