

DOI: 10.7667/PSPC171781

交直流混合微电网系统设计与控制架构分析

冯恽彬, 汪科, 葛晓慧, 张雪松

(国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 微电网是实现大规模分布式电源接入配电网的重要技术途径和手段, 其中交直流混合微电网综合了交流微电网和直流微电网各自的优势, 已经成为微电网技术发展的重要方向。以国家 863 项目示范工程“交直流混联微电网上虞示范站”为背景, 从拓扑结构设计、关键研发设备和分层控制架构等方面介绍其主要技术特征。重点阐述了该交直流混合微电网的协调控制策略, 包括四种运行模式和八种模式切换流程, 并结合实际运行结果进行验证。运行实践表明, 示范工程能够显著提高负荷的供电可靠性, 促进高比例分布式电源就地消纳, 对未来交直流混合微电网技术的发展具有一定指导意义。

关键词: 交直流微电网; 示范工程; 系统设计; 分层控制架构; 协调控制策略

System design and control framework analysis of hybrid AC-DC microgrid

FENG Yibin, WANG Ke, GE Xiaohui, ZHANG Xuesong

(Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Microgrid provides a promising solution for large scale penetration of Distributed Generations (DGs) into the distribution network. Particularly, the hybrid AC-DC microgrid with the advantages of both AC and DC microgrids has become an important direction for the development of microgrid technology. Based on the demonstration project of 863 Program named Hybrid AC-DC Microgrid Shangyu Demonstration Substation, the main technical features of the demonstration hybrid microgrid are introduced, including topology design, key equipment and hierarchical control framework. The coordination control strategy is described in detail, including four operation modes and eight mode transition processes. The operation result shows that the demonstration project can significantly improve the reliability of power supply and accommodate high penetration of DGs, which is of certain guiding significance for the future development of hybrid AC-DC microgrid technology.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050104).

Key words: hybrid AC-DC microgrid; demonstration project; system design; hierarchical control framework; coordination control strategy

0 引言

在大规模分布式可再生能源蓬勃发展的背景下, 微电网作为一种分布式电源的有效接入和管理方式, 已经成为现代电网的重要发展方向^[1-4]。国家发展和改革委员会、国家能源局近期连续印发《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》^[5]、《推进并网型微电网建设试行办法》^[6]等文件, 从政策层面统一了微电网的发展理念、规范了微电网的保障机制、明确了微电网参与电力市场的主体地位,

有利于促进并规范微电网健康发展。

近年来, 随着光伏、电动汽车、数据中心等直流电源和直流负荷的广泛应用, 直流系统在新一代电网中的优势凸显^[7-8]。因此, 兼顾传统交流特性和新型直流特性的交直流混合微电网技术引起了广泛关注^[9-11]。目前, 国内外学者从拓扑结构、优化配置、协调控制和故障保护等方面对交直流微电网展开了深入研究。文献[12]按照交流微电网、直流微电网和大电网之间的连接关系, 将交直流混合微电网拓扑结构总结为三类: 交流耦合型、交流解耦型和多端互联型。文献[13]以降低单位发电成本、换流损耗, 提高自平衡率为优化配置目标, 得到不同

基金项目: 国家 863 高技术基金项目资助 (2015AA050104)

直流负荷下的优化配置结果,发现交直流混合微电网具有更好的经济性。文献[14-15]利用标么化思想将交流下垂控制与直流下垂控制统一起来,进而调节交直流接口变流器的功率传输,实现混合微电网系统的协调控制。

示范工程是对上述微电网技术和研究成果的集中展示,对微电网的实际应用和推广具有重要意义。目前,全球规划、在建及投运的微电网示范工程已超过400个^[16]。我国在国家政策法规的鼓励引导下,近些年也建成了一批微电网示范项目^[17-18],例如,西藏阿里、青海玉树等边远地区微电网,浙江东福山岛、鹿西岛、广东东澳岛等海岛型微电网以及天津生态城、江苏大丰等城市微电网。

纵观上述微电网示范工程,基本上都是以交流供电为主。为了满足当前直流型电源和负荷的发展需求、促进高比例分布式电源就地消纳,浙江省电力有限公司依托国家863项目“高密度分布式能源接入交直流混合微电网关键技术”建成了“交直流混联微网上虞示范站”工程(以下简称上虞微电网示范工程)。本文以该示范工程为背景,从系统拓扑结构、关键研发设备、分层控制架构等方面对示范工程的主要技术特点进行了介绍,并提出一种适用于交直流混合微电网的协调控制策略。该策略根据母联开关的通断状态,将系统分成四种运行模式,通过协调控制器的二次调节,实现系统电压、频率的快速恢复以及电流在各变流器间的均分;同时实现系统在不同运行模式之间的平滑切换,保证微电网的灵活稳定运行。通过示范工程的建设,提高了示范地区分布式电源的利用效率,增强了供电可靠性,为未来交直流混合微电网技术的发展应用提供了理论和实践经验,具有很强的示范和引领作用。

1 示范工程概述

上虞微电网示范工程位于浙江省绍兴市上虞经济开发区——浙江世纪华通工业园区内(如图1所示)。世纪华通公司主要从事汽车零部件的研发和制造工作,厂区内的生产性负荷以注塑机为主,是一种带有前级交流-直流-交流变频装置的大功率变频电机,总容量达10 MW。此外,厂内已有由光伏厂家投资建设的2.35 MW屋顶分布式光伏系统。

综上所述,工程落地点世纪华通的厂内注塑机本质上是一种直流逆变型负荷,而原有的屋顶光伏需要经过逆变、升压、降压后才能实现电能利用。为此,如图2所示,本项目工程所建设的交直流混合微电网系统通过技术改造,直接利用直流母线连接注塑机负荷和光伏电源,减少电能转换的中间环

节,提高能源利用效率,同时利用微电网的高级应用策略为其提供可靠和高质量的电能保障,对确保企业稳定高效生产、保证光伏厂家发电利益具有重要意义。



图1 示范工程现场

Fig. 1 A field photograph of the demonstration project

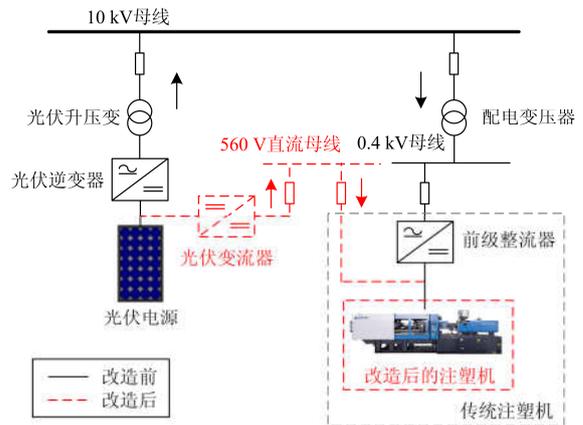


图2 改造前后电能转换环节示意图

Fig. 2 Schematic diagram of power conversion before and after reconstruction

2 示范工程系统设计

2.1 设计目标

上虞微电网示范工程是一个并网型微电网,具有部分子系统离网运行的能力。其建设的主要目标是在保证负荷稳定可靠供电的基础上,实现新能源的最大化利用。因此在工程设计时确立以下设计目标:(1)实现微电网内直流负荷高可靠性供电,功率渗透率>100%;(2)实现交直流混合微网多模式稳定运行、模式间平滑切换;(3)实现微电网多种运行模式下的协调控制、能量优化。

2.2 拓扑结构设计

在设计示范工程拓扑结构时,充分考虑了现场分布式电源和交直流负荷的分布特性,并尽量采用改造和改接的方式,最大程度减小工程建设对企业的影响。考虑到系统主要运行在并网模式下,且仅

在外部电网故障时需要保障重要负荷供电, 在综合分析现场情况、实际需求和规划方案后, 设计上虞交直流混合微电网示范工程拓扑结构如图 3 所示。

该微电网系统采用多交流/直流母线混联结构: 交流侧分为 I、II 两段母线, 额定电压 10 kV, 通过母联开关 KG1 连接; 直流侧同样分为 I、II 两段母线, 额定电压 560 V, 通过母联开关 KG2(直流断路器)连接; 交直流系统间通过 3 台潮流控制器和 1 台电力电子变压器实现功率交互。微电网中的分布式电源渗透率较高, 且以原有的光伏为主, 其中 850 kW 分散接入两段直流母线, 剩余 1 500 kW 接入交流母线; 配置 2 台 5 kW 风力发电机和 1 套 250 kW/1 MWh 铅炭电池储能系统。直流侧负荷主要包括 10 台 50 kW 注塑机、50 kW LED 照明和 4 个 60 kW 电动汽车充电桩, 总容量与直流侧的分布

式电源大致相当; 交流侧负荷主要为站用负荷和厂内原有交流负荷等。为了提高微电网系统的供电质量, 交流系统和直流系统还各配置有电能质量治理装置。在子系统设计中, 左侧子系统为并网型, 接入充电桩和试验型注塑机等非重要负荷; 右侧子系统除了运行在并网模式, 还能短时间孤岛运行, 接入站用负荷、LED 照明和生产型注塑机等重要负荷。

多母线混联的系统结构保证了微电网的灵活多样运行: 正常情况下, KG1、KG2 闭合, 整个系统处于并网模式, 实现公共连接点潮流的多种模式控制; 在微电网内部发生故障或需要检修时, 可以通过断开 KG1 或 KG2, 改变系统运行模式, 保障非停电区域正常供电; 当外电网发生故障停电时, 右侧子系统能够依靠分布式电源和储能实现部分交直流网络独立稳定运行, 保证重要负荷的短时供电。

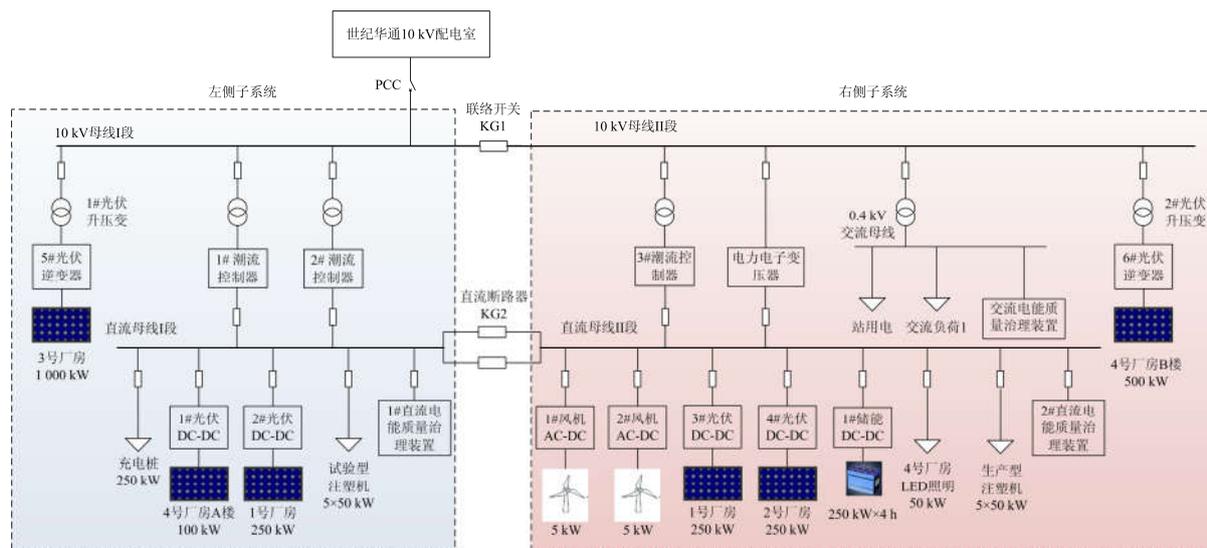


图 3 上虞微电网示范工程拓扑结构图

Fig. 3 Structure of Shangyu demonstration microgrid project

2.3 关键设备

(1) 潮流控制器

潮流控制器是一种连接交流系统和直流系统的电能变换装置, 主要用于控制混合微电网内部的能量流动, 其交流侧通过 270 V/10 kV 隔离变压器接入交流母线, 直流侧直接接入到 560 V 直流母线。

潮流控制器的拓扑结构如图 4 所示, 采用三相半桥结构, 交流侧为 LCL 滤波器, 以抑制交流谐波输出。为了满足微电网保护对故障穿越的要求, 潮流控制器对直流侧结构进行了改进, 增加了图 4 框图中的辅助电路, 包括一对 IGBT 管、续流二极管和滤波电感。其中 IGBT 管作为电子开关在系统正

常运行时始终保持导通状态, 当直流母线发生短路时能够快速关断以保护潮流控制器内部元件; 在故障期间, 潮流控制器通过控制 IGBT 的占空比可以向直流侧注入恒定的小电流, 以便在故障消除后迅速恢复直流母线电压; 续流二极管主要用于 IGBT 管关断后母线侧的续流; 滤波电感在稳态时能够平滑潮流控制器的输出电流, 在故障发生时限制短路电路的上升速率, 以保证 IGBT 能安全关断。

根据示范工程的现场需求, 潮流控制器共设计有三种运行模式: 直流电压下垂模式、定功率模式和交流电压模式。其中交流电压控制基于虚拟同步机技术, 能实现并网之间的平滑切换。

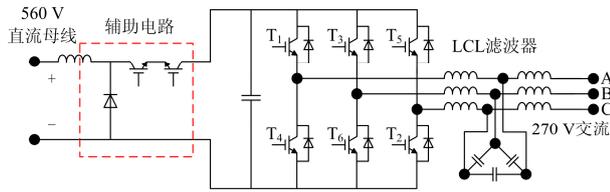


图4 潮流控制器拓扑结构
Fig. 4 Structure of power flow controller

(2) 电力电子变压器

电力电子变压器是一种利用高频隔离变压器替代传统工频变压器的新型交直流电能变换装置^[19]，其拓扑结构如图5所示。

电力电子变压器可以分为两个部分：高压输入级 AC-DC 和隔离变换级 DC-DC。其中 AC-DC 采用 MMC 结构，直接将交流侧 10 kV 电压转变成 20 kV 直流；DC-DC 部分是基于输入串联输出并联的高频隔离结构，各个子模块均分前级整流得到的高压直流，并经过 H 桥电路转变为高频交流电压，经过高频隔离变压器降压后，在副边将电压重新还原为直流。隔离变换级 DC-DC 变流器采用了双向 LLC 谐振软开关技术^[20]，能够降低器件损耗、减小设备体积，中间的高频隔离变压器也实现了高、低压侧的电气隔离。

在示范工程中，电力电子变压器共设计有两种运行模式：直流电压下垂模式和定功率模式。

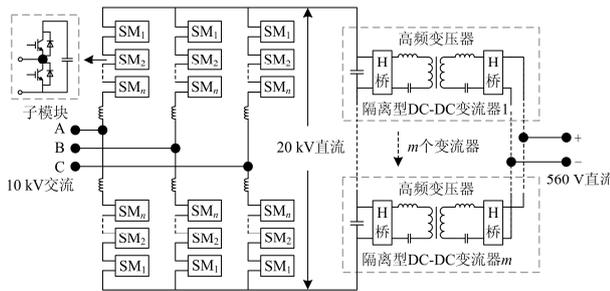


图5 电力电子变压器拓扑结构
Fig. 5 Structure of power electronic transformer

3 分层控制架构

上虞微电网示范工程中，各分布式电源、储能和负荷均通过相应的电力电子装置接入交流或直流母线。为了实现系统在不同运行模式下的稳定高效运行，设计了一种适用于交直流混合微电网的分层控制结构。按照时间尺度、控制目标的不同，将控制系统分为3层：就地设备层、协调控制层和优化调度层。整个控制系统完全基于 IEC61850 协议，可实现全网信息快速传递与共享，具体控制架构如图6所示。

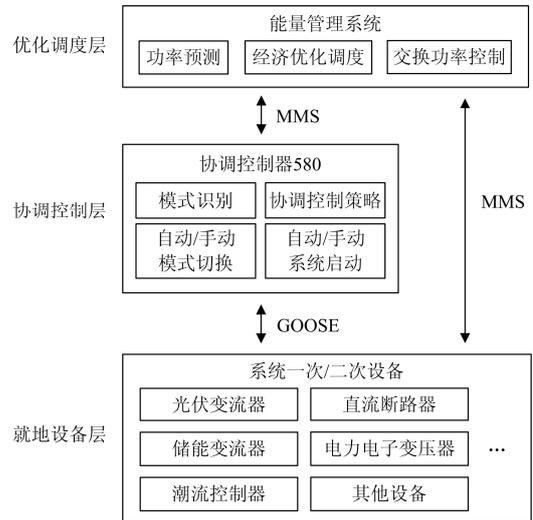


图6 上虞微电网示范工程控制架构
Fig. 6 Control framework of Shangyu demonstration microgrid project

3.1 就地设备层

就地设备层主要包括潮流控制器、电力电子变压器、光伏变流器、储能变流器、电池管理系统、测控保护装置等系统一次/二次设备，仅利用本地信息实现基本控制目标。该层的主要目标是维持交流母线电压频率稳定、实现系统功率平衡。

为了简化系统控制逻辑，实现设备“即插即用”，设计各电力电子装置始终保持同一种运行状态，并向上层协调控制器开放遥调接口，以配合高级应用策略的实施。各装置具体运行模式和遥调量如表1所示。

表1 变流器运行模式和遥调量
Table 1 Converter operation mode and remote regulating information

设备名称	运行模式	遥调量
1#、2#潮流控制器	直流电压	直流电压幅值偏移/V
	下垂控制	有功功率设定/kW
3#潮流控制器	交流电压	频率偏移/Hz
	控制	有功功率设定/kW
电力电子变压器	定功率控制	有功功率设定/kW
1#-4#光伏 DC-DC	MPPT 控制	有功功率限值/kW
	直流电压	直流电压幅值偏移/V
储能 DC-DC	下垂控制	有功功率设定/kW
5#、6#光伏逆变器	MPPT 控制	—
1#、2#风机 DC-DC	MPPT 控制	—

由表1可知，上虞微电网示范工程中，交流 I 段、II 段母线电压由大电网提供，直流母线 I 段上的电压源为 1#、2#潮流控制器，直流母线 II 段上的电压源为储能变流器。当 KG2 闭合时，直流系统电

压由 1#、2#潮流控制器和储能变流器 3 台设备共同调节, 大大增强了系统的抗冲击能力。当 KG1 断开时, 交流母线 II 段离网, 此时 3#潮流控制器基于虚拟同步机特性自动维持母线电压稳定。各类分布式电源变流器均采用 MPPT 控制, 以最大限度利用可再生能源。

3.2 协调控制层

协调控制层是微电网的执行核心, 主要基于微电网协调控制器 CSD-580 实现基本功能, 包括运行模式识别、协调控制和模式切换等。CSD-580 通过 IEC61850 通用面向对象变电站事件(GOOSE)协议实时采集就地设备信息及 GOOSE 模拟量, 并根据协调控制策略向底层设备下发遥调指令, 同时也用于转发上层优化调度指令等。

协调控制层的主要控制目标是解决由传统下垂控制引起的稳态电压频率偏差和多机均流问题^[21], 在系统进行模式切换时, 主动调节母联开关 KG1 和 KG2 上的功率, 实现系统在不同运行模式间的平滑切换。

3.3 优化调度层

优化调度层主要基于能量管理系统 MEMS-8000 实现其基本功能, 包括光伏/负荷功率预测、微电网交换功率控制和经济优化调度等。MEMS-8000 系统是根据示范工程实际需求开发的微电网高级应用策略, 通过优化算法能显著提高微电网综合效益水平和可再生能源的利用率, 解决交直流微电网与配电网协调、交-直潮流断面分散协调、源荷互动协调、源源互动协调等复杂问题。

4 协调控制策略

4.1 系统运行模式

协调控制策略是保证微电网稳定运行的关键。由图 3 可知, 上虞微电网示范工程采用多交直流母线混联结构, 根据 KG1 和 KG2 的通断情况, 整个微电网系统可以分为四种运行模式, 如表 2 所示。

表 2 系统运行模式划分

Table 2 Division of operation modes

KG1 状态	KG2 状态	运行模式
闭合	闭合	并网模式
断开	闭合	交流分段模式
闭合	断开	直流分段模式
断开	断开	孤岛模式

下面将分别针对这四种运行模式, 详细介绍微电网协调控制策略。

1) 并网模式

并网模式中, 直流母线 I 段、II 段电压由 1#、2#潮流控制器和储能通过下垂控制共同调节。协调控制策略设计如下。

(1) 直流电压恢复: 向 1#、2#潮流控制器和储能下发直流电压幅值偏移指令, 将直流母线电压恢复到 560 V。

(2) 多机均流控制: 向 1#、2#、3#潮流控制器和电力电子变压器下发有功功率设定指令, 实现四台设备均流控制。

(3) 储能充放电控制: 根据上层优化调度策略向储能下发有功功率设定指令, 调节储能充放电功率。

2) 交流分段模式

交流分段模式中, 交流母线 II 段电压由 3#潮流控制器调节, 直流母线 I 段、II 段电压由 1#、2#潮流控制器和储能通过下垂控制共同调节。协调控制策略设计如下。

(1) 直流电压恢复: 向 1#、2#潮流控制器和储能下发直流电压幅值偏移指令, 将直流母线电压恢复到 560 V。

(2) 交流频率恢复: 向 3#潮流控制器下发交流电压幅值、频率偏移指令, 将交流母线 II 段电压幅值和频率恢复到额定值。

(3) 多机均流控制: 向 1#、2#潮流控制器和储能下发有功功率设定指令, 实现三台设备均流控制; 向电力电子变压器下发有功功率设定指令, 使其与 3#潮流控制器电流均流。

3) 直流分段模式

直流分段模式中, 直流母线 I 段电压由 1#、2#潮流控制器通过下垂控制共同调节, 直流母线 II 段电压由储能调节。协调控制策略设计如下。

(1) 直流电压恢复: 向 1#、2#潮流控制器下发直流电压幅值偏移指令, 将直流母线 I 段电压恢复到 560 V; 向储能下发直流电压幅值偏移指令, 将直流母线 II 段电压恢复到 560 V。

(2) 多机均流控制: 向 1#、2#潮流控制器下发有功功率设定指令, 实现两台设备均流控制; 向 3#潮流控制器和电力电子变压器下发有功功率设定指令, 实现两台设备均流控制。

(3) 储能充放电控制: 根据上层优化调度策略向储能下发有功功率设定指令, 调节储能充放电功率。

4) 孤岛模式

孤岛模式中, 交流母线 II 段电压由 3#潮流控制器调节, 直流母线 I 段电压由 1#、2#潮流控制器通过下垂控制共同调节, 直流母线 II 段电压由储能调节。协调控制策略设计如下。

(1) 直流电压恢复: 向 1#、2#潮流控制器下发

直流电压幅值偏移指令, 将直流母线 I 段电压恢复到 560 V; 向储能下发直流电压幅值偏移指令, 将直流母线 II 段电压恢复到 560 V。

(2) 交流电压恢复: 向 3#潮流控制器下发交流电压幅值、频率偏移指令, 将交流母线 II 段电压幅值和频率恢复到额定值。

(3) 多机均流控制: 向 1#、2#潮流控制器下发有功功率设定指令, 实现两台设备均流控制; 向电力电子变压器下发有功功率设定指令, 使其与 3#潮流控制器电流均流。

(4) 储能充放电控制: 当储能 SOC > 80%, 线性调节 3#、4#光伏有功功率限值, 防止 SOC 过高。

4.2 模式切换

微电网模式切换是指母联开关 KG1 或 KG2 状态变化引起系统运行模式发生转变的过程。由于在就地设备层, 各电压源型变流器均采用下垂控制策略, 微电网在模式切换过程中主要进行电压调节、功率再分配和交流同期等控制, 无需更改底层设备的运行模式, 使得模式切换控制较为便捷, 也极大地提高了系统运行的可靠性。

为了实现系统在四种模式之间的平滑切换, 示范工程相应设计了 8 种模式切换逻辑, 如图 7 所示。

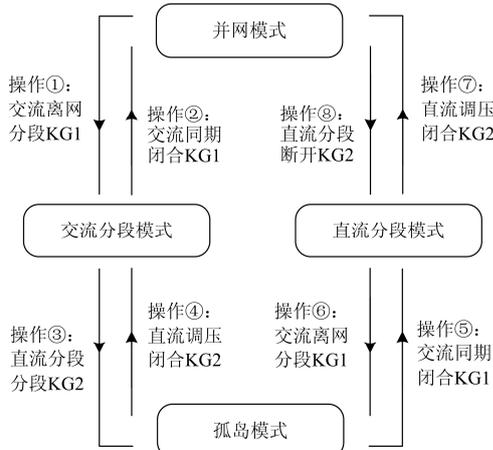


图 7 模式切换逻辑图

Fig. 7 Logic diagram of mode transition

由图 7 可得, 模式切换策略按照对开关状态的操作可以简化为四种: 交流离网、交流同期、直流分段和直流调压。具体逻辑如下:

(1) 交流离网操作(操作①和操作⑥): 同步调节 3#潮流控制器和电力电子变压器的交换功率, 以逐渐减少联络开关 KG1 上的功率, 最后断开 KG1。

(2) 交流同期操作(操作②和操作⑤): 利用 3#潮流控制器实现交流母线 II 段和 I 段同期控制, 最后闭合 KG1。

(3) 直流分段操作(操作③和操作⑧): 操作③和操作⑧的实现过程略有不同。操作③是通过调节储能功率以逐步减少流过 KG2 的功率, 最后断开 KG2; 操作⑧则是利用 3#潮流控制器和电力电子变压器吸收 KG2 上的功率, 最后实现 KG2 分断。

(4) 直流调压操作(操作④和操作⑦): 调节储能端口电压, 使直流母线 II 段与 I 段电压相同, 最后闭合 KG2。

4.3 控制策略实例

协调控制测试: 图 8 为示范工程在并网模式运行时, 直流母线电压和各直流支路电流波形。由图可知, 受光照强度变化的影响, 光伏输出电流发生波动, 此时直流母线上的调压设备(1#、2#潮流控制器和储能)迅速响应, 以平抑系统功率波动。在微电网协调控制策略的调节下, 直流母线电压幅值始终维持在 560 V 左右, 功率控制型设备(3#潮流控制器和电力电子变压器)通过二次调节逐步实现与 1#、2#潮流控制器的 4 台均流控制, 储能功率根据优化调度策略维持在 0 kW 左右。

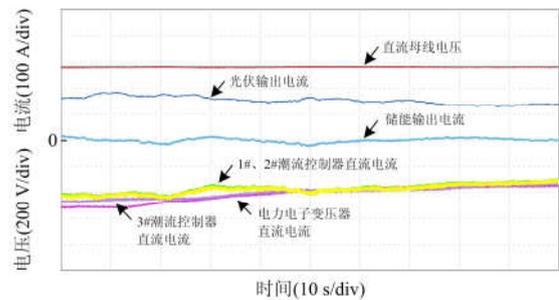


图 8 协调控制测试

Fig. 8 Coordination control test

模式切换测试: 图 9 为示范工程从并网模式切换到交流分段模式时, 直流母线电压和各直流支路电流波形。由图易得, 模式切换前, 系统处于并网状态, 1#、2#、3#潮流控制器和电力电子变压器 4 台设备均流, 储能功率维持在 0 kW。模式切换开始后, 利用上层模式切换策略, 系统通过二次调节, 在 10 s 左右完成 1#、2#潮流控制器和储能 3 台均流、3#潮流控制器和电力电子变压器 2 台均流, 且通过逐步调整两者功率使得流过 KG1 上的功率接近于 0。KG1 断开时, 系统几乎没有功率冲击。整个模式切换过程中, 直流母线电压始终维持在 560 V 左右。

系统故障下不间断供电实例: 2017 年 8 月 1 日 17 时 58 分, 上虞交直流微电网处于并网运行模式, 世纪华通厂区 10 kV 专线发生 B 相接地故障。19 时 03 分, 由于长时间没有定位到故障点, 上虞市供

电公司断开该 10 kV 线路, 导致世纪华通厂区停电。此时, 示范工程交流母线 I 段、II 段失电, 而直流母线 I 段、II 段在发生小幅波动后恢复正常, 继续向厂内 LED 照明和注塑机负荷提供电能。微电网协调控制器在检测到电网失电后, 自动断开联络开关 KG1, 并重启 3#潮流控制器和电力电子变压器, 于 30 s 后重新建立交流母线 II 段电压, 向站用负荷和厂内交流负荷供电。该停电事故故障录波如图 10 所示。当外部电网重新恢复供电后, 该交直流混合微电网能够通过模式切换重新回到并网运行状态。

该事故充分说明了微电网的优势所在。示范工程的建设能够为负荷提供高可靠性、高质量的电能供应, 能充分保证分布式电源的就地消纳。

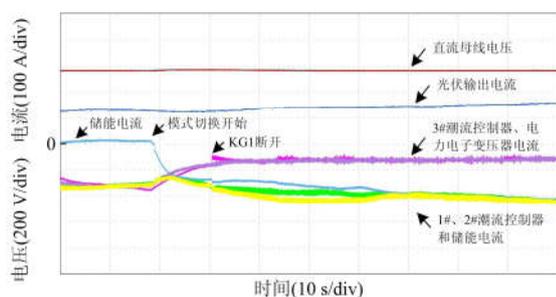


图 9 模式切换测试

Fig. 9 Mode transition test

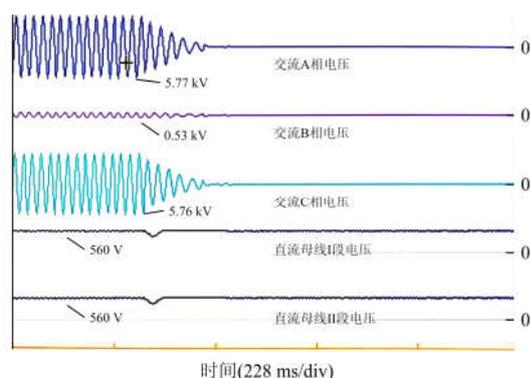


图 10 故障录波图

Fig. 10 A graph of fault recorder

5 结论

上虞微电网示范工程已于 2017 年 8 月 26 日正式投运, 系统运行平稳。工程所研发的潮流控制器、电力电子变压器等关键设备运行状态良好; 应用于示范工程的协调控制策略, 有效提高了系统运行的灵活性, 保证了运行模式的平滑切换。

该项目的实施, 减少了原世纪华通厂内因交直流转换而产生的电能损耗, 为企业带来了可观的经济效益。同时, 该项目为高比例分布式电源接入交

直流混合微电网提供了系统化的解决方案, 积累了工程经验, 为可再生能源的高效利用探索了一种合适的推广模式。

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 16-21.
CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research of operation control of microgrid based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.
- [3] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids: an overview of ongoing research, development and demonstration projects[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [4] HU Bo, WANG He, YAO Sen. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 70-80. DOI: 10.1186/s41601-017-0037-1.
- [5] 国家能源局. 国家能源局关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见: 国能新能[2015]265号[S].
- [6] 国家发展改革委, 国家能源局. 推进并网型微电网建设试行办法: 发改能源[2017]1339号[S].
- [7] 郭力, 冯悻彬, 李霞林, 等. 直流微电网稳定性分析及阻尼控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 927-936.
GUO Li, FENG Yibin, LI Xialin, et al. Stability analysis and research of active damping method for DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 927-936.
- [8] 张学, 裴玮, 邓卫, 等. 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5553-5562.
ZHANG Xue, PEI Wei, DENG Wei, et al. Energy management and coordinated control method for multi-source/multi-load DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5553-5562.
- [9] 任志航, 李民, 马凯琪, 等. 交直流混合微电网微元建模与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 82-88.
REN Zhihang, LI Min, MA Kaiqi, et al. Modeling & control of hybrid AC/DC micro-grid micro components[J].

Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 82-88.

[10] NEJABATKHAH F, LI Yunwei. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7072-7089.

[11] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.

[12] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2756-2767.
ZHU Yongqiang, JIA Lihu, CAI Bingqian, et al. Overview on topologies and basic control strategies for hybrid AC/DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2756-2767.

[13] 汪湘晋, 赵波, 吴红斌, 等. 并网型交直流混合微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 55-62.
WANG Xiangjin, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal sizing analysis of grid-connected hybrid AC-DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 55-62.

[14] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.

[15] EGHTEGARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.

[16] Navigant Research. More than 400 microgrid projects are under development worldwide[EB/OL]. [2013-04-02.] [http:// www.navigantresearch.com/newsroom/more-than-400-microgrid-projects-are-under-development-worldwide](http://www.navigantresearch.com/newsroom/more-than-400-microgrid-projects-are-under-development-worldwide).

[17] 王成山, 周越. 微电网示范工程综述[J]. 供用电, 2015(1): 16-21.
WANG Chengshan, ZHOU Yue. Overview on microgrid demonstration projects[J]. Distribution & Utilization, 2015(1): 16-21.

[18] 李鹏, 张雪松, 赵波, 等. 多微网多并网点结构微网设计和模式切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 172-178.
LI Peng, ZHANG Xuesong, ZHAO Bo, et al. Structural design and mode switching control strategies of multi-microgrid with several PCCs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 172-178.

[19] 尹平平, 王伟华. 基于 FPGA 的直流变压器实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 140-145.
YIN Pingping, WANG Weihua. FPGA based real time simulation and research of DCSST[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 140-145.

[20] 陈启超, 王建曠, 纪延超. 基于 LLC 谐振变换器的电力电子变压器[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 41-46.
CHEN Qichao, WANG Jianze, JI Yanchao. Power electronic transformer based on LLC resonant converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 41-46.

[21] 苏虎, 曹炜, 孙静, 等. 基于改进下垂控制的微网协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 92-98.
SU Hu, CAO Wei, SUN Jing, et al. Micro-grid coordinated control strategy based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 92-98.

收稿日期: 2017-12-07; 修回日期: 2018-03-27

作者简介:

冯恽彬(1990—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为分布式发电与微电网运行控制; E-mail: fyb728@163.com

汪科(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为分布式电源与微电网能量管理; E-mail: wankery@163.com

葛晓慧(1981—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电及其并网技术。

(编辑 许威)