

# 面向源-荷-储互动的全阻断型直流配网运行研究

陈国平<sup>1</sup>,王娟<sup>1</sup>,梁桢<sup>1</sup>,张志宇<sup>1</sup>,白海滨<sup>1</sup>,孙谦浩<sup>2</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100;

2. 清华大学电机系, 北京 海淀 100084)

**摘要:**全阻断型直流配电网是构建面向源-荷-储互动电力系统的重要方向。由于没有直流断路器的存在,全阻断型直流配电网的启动、模式切换及故障处理等控制策略均高度依赖于其所连接的源荷储的协调,且与传统直流配电网有所区别。然而,现有研究主要集中于拓扑探索与故障处理技术,而对于全阻断型直流配电网的整体运行缺乏直观的分析。鉴于此,以一个四端全阻断型直流配电网为例,提出了面向源-荷-储互动的全阻断型直流配电网在启动、稳态及故障三种状态下的控制策略,并分别对源荷储在不同策略中的作用进行了分析。同时,基于 Matlab/Simulink 模型,对全阻断型直流配电网的整体协调控制进行了仿真,以期带来对全阻断型直流配电网的直观认识。

**关键词:**源-荷-储互动;直流配电网;全阻断型换流器;混合模块化多电平换流器(MMC);协调控制

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23910

## Operation Research on the Full Fault-blocking Converter-based DC Distribution Network for Source-load-storage Interaction Application

CHEN Guoping<sup>1</sup>, WANG Juan<sup>1</sup>, LIANG Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyu<sup>1</sup>, BAI Haibin<sup>1</sup>, SUN Qianhao<sup>2</sup>

(1. State Grid Changji Power Supply Company, Changji 831100, Xinjiang, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The full fault-blocking converter (FFBC)-based DC power distribution network is an important direction of the power system with source-load-storage interaction. Since there is no DC breaker in FFBC-DC power distribution network, the start-up, mode switching and fault handling control strategies of FFBC-DC power distribution network are all highly dependent on the coordination of the connected source, load and storage, and different with that in traditional DC distribution network. However, the most researches of FFBC-DC power distribution network are mainly focused on the topology exploration and fault handling technology, resulting in the intuitive analysis on the operation control of FFBC-DC power distribution network is insufficient. In view of this, a four-terminal FFBC-DC power distribution network was taken as the case to analyze the operating characteristic. The control strategies of the fully blocked DC distribution network oriented to the interaction of source, load and storage in states of startup, steady state and fault were proposed, and the roles of source, load and storage in different strategies were analyzed respectively. Based on the Matlab/Simulink model, the coordinated control of the whole FFBC-DC power distribution network was simulated so as to bring an intuitive understanding of FFBC-DC power distribution network.

**Key words:** source-load-storage interaction; DC power distribution network; full fault-blocking converter (FFBC); hybrid modular multilevel converter(MMC); coordinated control

目前,随着用电量的快速增长,我国电网的源荷储网均进入了一个高速发展与变化的阶段<sup>[1]</sup>。首先,风电、光伏等清洁能源的接入比例不

断增加,提高了电源环节的直流化程度<sup>[2]</sup>;其次,消费电子设备、数据中心、电动汽车和规模化储能系统的使用,使得负荷侧的直流供电方式增

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51877116)

**作者简介:**陈国平(1968—),男,本科,副高级工程师,主要研究方向为电网规划及关键电气设备保护技术,Email:770577226@qq.com

**通讯作者:**孙谦浩(1993—),男,博士,助理研究员,主要研究方向为直流输配电网及其关键换流技术,Email:sxsunqianhao@163.com

多;最后,为减小电能传输的损耗、便捷电网新发展阶段源荷储设备的接入,基于电力电子换流器的直流组网技术被逐渐关注<sup>[3-4]</sup>。尤其是,与未来城市电网发展直接相关的直流配电网技术<sup>[5]</sup>,由于直接关乎城市供电的电能质量与稳定性,受到了国内外的广泛关注。

直流配电网根据处理直流故障方式的不同可以分为:基于无直流故障清除能力换流器与直流断路器的传统直流配电网和基于有直流故障清除能力换流器与隔离开关的全阻断型直流配电网<sup>[6]</sup>。二者均是面向解决源荷储互动问题的重要直流配电网组网方案。文献[7-8]定性地指出,相比于传统直流配网,全阻断(full fault-blocking converter, FFBC)型直流配网的故障处理速度更加迅速、供电质量更高、组网经济性更好。目前,关于传统直流配网的研究较为广泛,如文献[9-10]对含源荷储的直流配电网稳态控制与调度进行了研究;文献[11]对不同接线方式下的直流配电网潮流计算方法进行了探索;文献[12]对一个多端直流配电网的启停控制进行了分析,并指出基于直流断路器与换流设备的配合,多端直流配电网能够实现有效的启停。

然而,从现有的文献来看,关于FFBC型直流配电网的针对性研究仍涉及较少;尤其是关于FFBC型直流配电网的实例运行研究,几乎没有文献涉及。由于没有直流断路器的配合,FFBC型直流配电网的启停、稳态及故障协调控制均与传统直流配电网有所不同,且更依赖于所连接的源荷储的互动。鉴于此,为了对面向源荷储互动的FFBC型直流配电网有更深入的认识,本文基于一个四端直流配电网实例,对FFBC型直流配电网在源荷储互动下的启动方法、模式切换方法及直流故障处理方法进行了详细分析,并通过仿真验证了所提策略的正确性。

## 1 全阻断型直流配电网实例分析

图1为本文所研究的两端FFBC型多电压等级直流配电网拓扑。

系统中,完成交流与直流变换的AC/DC采用了全桥(full-bridge, FB)+半桥(half-bridge, HB)的混合型模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)结构;完成不同电压等级直流母线连接的直流变压器采用了文献[13]提出的具有直流故障自清除能力的电容交替投切型结构。

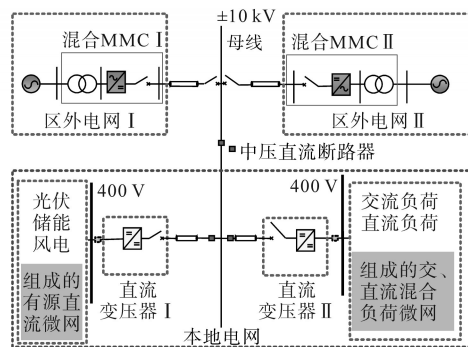


图1 四端全阻断型直流配电网拓扑

Fig.1 Topology of four-terminal FFBC-DC power distribution network

整个中压直流配电网通过电缆配电线连接了两个交流配电网、一个有源直流微网以及一个负荷微网。基于电压等级对供电半径及经济性的影响进行分析。图1的系统中,中压直流电压选取为 $\pm 10$  kV,低压直流电压选取为400 V。

在图1所示的FFBC型直流配网中,各关键换流设备能够实现的控制模式如表1所示。需要注意的是,由于不同工作模式所需要的外部条件不同,同一时刻混合MMC与直流变压器只能工作在固定的模式下。同时,负荷微网只能从直流配电网的中压吸收功率,而有源直流微网则既可以从直流配电网的中压吸收功率,又可以向电网发出功率。

表1 关键换流设备控制模式划分  
Tab.1 The operating mode of key converters

类别	设备	控制模式
网	混合 MMC I 混合 MMC II	控有/无功大小和方向 控直流电压-无功功率 控交流电压幅值相位
	直流变压器 I 直流变压器 II	控有功的大小和方向 控中压侧直流电压 控低压侧直流电压
源	光伏、风机 各自的换流设备	发出功率(需外部控制低 压直流母线电压,且功率 大小由自身决定)
	交流设备	MMC换流站的 换流变压器
荷	交、直流负荷	吸收功率(定值)
储	储能接口设备	控储能系统有功功率 控400 V母线电压

## 2 系统级运行控制策略分析

FFBC型直流配网的系统级控制策略主要包括:启动策略、稳态协调策略以及直流故障清除策略。基于图1所示的算例系统,本节提出了以上三方面的控制策略,并对源荷储系统在控制策

略中相应的互动进行了详细的分析。

### 2.1 黑启动控制策略分析

图2为FFBC型直流配电网黑启动原理示意图。

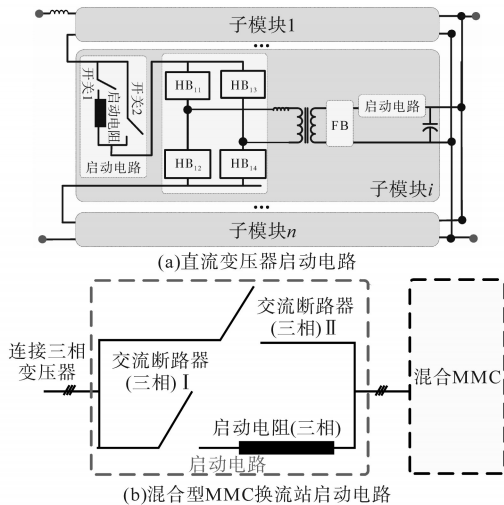


图2 FFBC型直流配电网黑启动电路

Fig.2 Starting schematic of FFBC-DC distribution power grid

FFBC型直流配电网抑制黑启动过程中电压与电流冲击的控制策略与传统直流配网有所不同,具体分析如下:

1) 闭合中压直流侧的所有隔离开关、母线连接直流断路器S,将各换流设备的中压直流侧与直流线路、中压直流母线连接为一个整体。

2) 利用区外交流电网 I, II 对中压侧换流设备进行预充电。首先,闭合直流变压器中各子模块串联侧启动电路的开关1(见图2a),使直流变压器的中压侧通过启动电阻与中压直流网络连接;然后投入两个混合型MMC换流站启动电路的交流断路器(三相) I(见图2b),通过区外交流电网 I, II 对换流设备的电容进行预充电。

3) 检测混合MMC中各子模块的电容电压,当其满足设定的条件时(本文的设定条件为所有子模块电容电压达到额定电压值的0.7倍左右),不控(半控)整流阶段完成,闭合交流断路器(三相) II(见图2b),断开交流断路器(三相) I;解锁两个混合型MMC换流站,使混合MMC换流站 I 工作在定电压模式,并控制中压直流母线达到 $\pm 10$  kV;混合MMC换流站 II 工作在定功率模式,并控制其有功与无功功率为0 MW,完成两个混合MMC换流站的启动。

4) 检测直流变压器中各模块中压侧的直流电容电压,当其能够提供开关管驱动电路的电压时,解锁所有子模块的中压侧开关管,使中压侧

的各HB子模块交替投入,保证所有HB子模块的电容电压稳定在直流母线电压的 $1/n$ ,  $n$ 为子模块数。

5) 闭合两个直流变压器中各模块中压侧的开关2(见图2a),断开开关1;闭合两个直流变压器中各模块低压侧的开关1,对直流变压器的低压侧电容进行预充电;当低压侧电容电压不控充电阶段完成后,解锁两个直流变压器的低压FB,分别使其工作在控低压侧直流电压模式,控制各自的低压侧直流达到400 V,以提供本地两个低压直流电网的母线电压。

6) 将有源直流微网中的光伏、风电及储能系统与负荷直流微网中的交、直流负荷通过低压直流开关接入本地低压直流网,完成整个FFBC型直流配网的黑启动。

基于上述分析可知,在所提黑启动策略中,区外交流电网是黑启动过程中的能量“源”,而有源直流微网由于处于黑启动策略的末端,在启动过程中与负荷直流微网均可以看作为与电网交互的“荷”。

### 2.2 稳态下的源荷储互动协调优化策略分析

图1所示的直流配电网的应用目的是,在满足负荷微网功率需求的前提下保证光伏与风机系统可发功率的全额输出。

鉴于上述目的,FFBC型直流配电网可实现的几种主要稳态方式如下。

#### 2.2.1 双端并网方式

双端并网方式是四端FFBC型直流配电网最为常见的运行方式。此时,网侧的四个换流设备均可以正常运行且所有的隔离开关与直流断路器均处于闭合状态。在此运行方式下,直流配网的中压电压由连接交流电网 I, II 的两个混合MMC进行控制;既可以采用主从控制,又可以采用下垂控制,具体由调度系统根据需求来进行混合MMC控制模式的选择。相应地,直流配网的低压部分电压分别由两个直流变压器控制。事实上,对于负荷直流微网,由于不存在能够支撑400 V母线的工作方式,直流变压器 II 只能工作在控低压模式;对于有源直流微网,其源荷在本方式下的作用,与具体的功率传输方向以及储能系统的荷电状态密切相关。

假设作为本地电网“源”的光伏与风电系统所发出功率分别为 $P_{源光}$ ,  $P_{源风}$ ,本地直流负荷微网的功率(在主从模式下还需加上区外定功率混

合MMC换流站从中压直流电网所吸收的功率)为 $P_{荷}$ ,储能系统的最大充、放电功率分别为 $P_{储充,M}$ 与 $P_{储放,M}$ ,则本地源、荷、储的功率分布将存在如下所示的四种情况:

$$\begin{cases} P_{源光} + P_{源风} - P_{荷} \geq P_{储充,M} & \text{A状态} \\ P_{储充,M} \geq P_{源光} + P_{源风} - P_{荷} \geq 0 & \text{B状态} \\ 0 \geq P_{源光} + P_{源风} - P_{荷} \geq -P_{储放,M} & \text{C状态} \\ -P_{储放,M} \geq P_{源光} + P_{源风} - P_{荷} & \text{D状态} \end{cases} \quad (1)$$

在式(1)的四种情况下,源、荷、储作用分别为:

**A状态:**储能系统的控制模式为定功率(功率值为 $P_{储充,M}$ )充电模式,在有源直流微网中等效为定功率的负荷节点;光伏与风机在有源直流微网中等效为功率随时间变化的电源节点;整个直流有源微网(含直流变压器 I)在FFBC型直流配电网中等效为一个功率随时间变化的电源节点。

**B状态:**储能系统的工作模式为定低压侧充电模式,在有源直流微网中等效为平衡节点;光伏与风机的作用与A状态相同,整个有源直流微网(含直流变压器 I)在直流配电网中等效定功率(功率值为 $P_{荷}$ )的电源节点。

**C状态:**储能系统的工作模式为定低压侧放电模式,其余系统在FFBC型直流配电网中的作用与B状态相同。

**D状态:**储能系统的工作模式为定功率(功率值为 $P_{储放,M}$ )放电模式,其各部分系统在FFBC直流配电网中的作用与A状态相同。

### 2.2.2 区外供电方式

当直流变压器 I 由于定期检修或故障等原因造成有源直流微网无法向本地负荷供电时,中压直流配电网将进入区外供电运行方式。此时,中压网络的控制及运行方式与两端并网稳态运行方式相同,只是缺少了有源直流微网所能够实现的源、荷、储互动优化功能。

### 2.2.3 新能源外送方式

当直流变压器 II 由于定期检修或故障等原因需要停运时,有源直流微网的盈余功率将外送到区外交流电网 II 与交流电网 II 中,本文称该模式为新能源外送模式。该模式下,正常运行换流设备的控制模式、源荷储互动协调优化策略均与两端并网方式相似,只是在互动协调过程中,式(1)的本地直流微网负荷功率为0 MW。

### 2.2.4 单端并网方式

当混合MMC<sub>1</sub>或混合MMC<sub>2</sub>中的一个由于检修、故障等停运时,直流配电网的功率平衡节点可由剩余的一个混合MMC所连接的区外电网承担,并由该MMC控制中压母线电压,从而保证直流配电网的正常运行。该模式下,正常运行换流设备的控制模式、源荷储互动协调优化策略均与两端并网方式相似。

### 2.2.5 有源直流微网与直流负荷微网的孤岛方式

当区外交流电网 I, II 由于MMC换流站或交流系统内故障等原因同时不能为直流配电网提供平衡功率时,直流配电网的有源直流微网与直流负荷微网部分将需要进入孤岛运行状态。此时,无论本地电网的功率分布处于式(1)中的何种状态,储能系统均工作在定中压侧直流电压模式,在孤岛系统中等效为平衡节点。

为实现上述五种方式的顺利切换,图3给出了FFBC型直流配电网实现运行方式切换的具体原则。

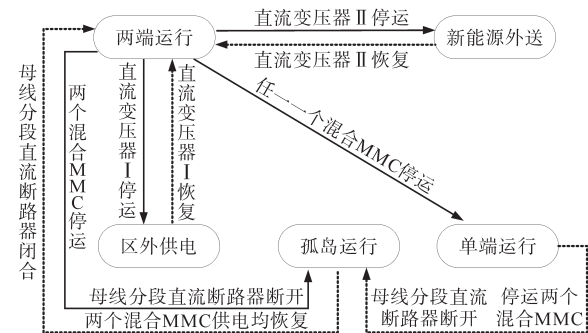


图3 运行方式切换原则示意图

Fig.3 The schematic of operation modes switching principle

## 2.3 直流故障清除策略分析

在FFBC型直流配电网中,由于换流器中压侧直流端口不存在直流断路器,因此当中压直流母线故障时,其故障特性与传统直流配网不同。

如图1所示,假设直流线路1出现了故障,当保护系统检测到直流故障后,立即闭锁所有换流器,阻断故障电流的来源;然后,当故障电流为0后,根据故障定位信息断开相应的隔离开关并恢复供电。由于故障清除得十分迅速,在故障清除期间,各换流器的电容电压并不存在明显的下降,因此当故障清除后,整个系统可以快速恢复,上述方法尤其适用于瞬时直流故障的清除。

## 3 仿真验证

为了对算例中的FFBC型直流配电网进行验

证与分析,在 Matlab/Simulink 中搭建了 FFBC 型直流配电网中压侧系统的详细仿真模型(有源直流微网与负荷直流微网中的相关源荷储系统在仿真中采用了详细接口换流器+受控电压源(或电阻)的等效模型),具体参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

Tab.2 Simulation parameters

设备	参数	
混合 MMC I / MMC II	容量	20 MW
	电压等级	10 kV (AC) 20 kV (DC)
	桥臂子模块个数	全桥(20 个) 半桥(20 个)
	子模块电容值	全桥(20 mF) 半桥(20 mF)
	调制方法	最大电平逼近
直流变压器 I	容量	5 MW
	电压等级	20 kV (MVDC) 400 V (LVDC)
	电容交替投切型 DAB串-并联个数	20 个
	子模块电容值	中压侧(3.3 mF) 低压侧(2.2 mF)
	开关频率	5 kHz
直流变压器 II	容量	2 MW
	电压等级	20 kV (MVDC) 400 V (LVDC)
	电容交替投切型 DAB串-并联个数	20 个
	子模块电容值	中压侧(2.2 mF) 低压侧(2 mF)
	开关频率	5 kHz

### 3.1 黑启动控制策略仿真验证

基于 Matlab/Simulink 模型,对 FFBC 型直流配电网的黑启动控制策略进行了仿真验证。

图 4 为本文算例的黑启动仿真结果曲线图。

图 4 中,0.01 s 时,闭合 FFBC 型直流配网中所有的隔离开关。0.05 s 时闭合混合 MMC I 与 II 换流站的交流侧充电断路器,投入交流侧充电电阻,对混合 MMC 进行不控整流方式下的预充电;为了减小解锁时的电压与电流冲击,在 0.1 s 时对混合 MMC I 与 II 换流站进行半控方式下的预充电,进一步提高 MMC 中各子模块的电容电压;当各子模块的电容电压值均为额定电压的 0.7 倍左右时,0.75 s 恢复 MMC 的不控充电状态。0.8 s 时闭合混合 MMC I 与 II 的充电电路旁路交流断路器。0.85 s 时解锁混合 MMC I 与 II,其中混合 MMC I 控制直流电压为 20 kV,混合 MMC II

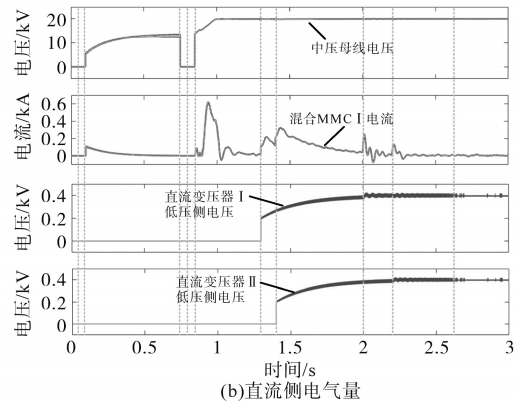
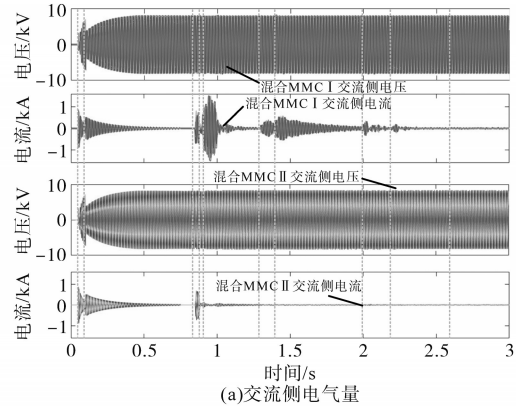


图 4 启动策略仿真验证

Fig.4 Simulation validation of the start-up strategy

控制功率为 0。

根据图 4 的仿真结果可知,尽管预充电过程中混合 MMC 的交流侧与直流侧电压电流均有波动,但波动值均未超过额定值,所以不会引起保护系统的动作。

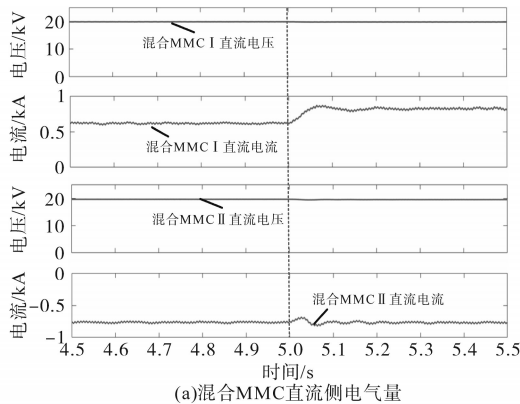
### 3.2 稳态控制策略仿真验证

基于 Matlab/Simulink 模型,对 FFBC 型直流配电网的稳态控制策略进行了仿真验证。

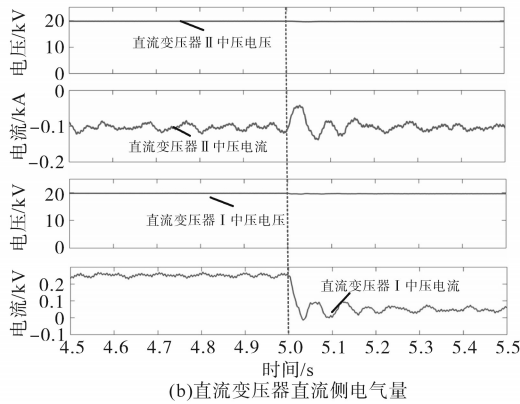
图 5 为本文算例的稳态运行仿真结果曲线图。

图 5 中,5 s 前,混合 MMC I 换流站控制 FFBC 中压直流配电网的中压母线电压为 20 kV,混合 MMC II 换流站从直流配电网中压侧吸收 15 MW 的有功功率。有源直流微网向外发出 5 MW 的功率,负荷直流微网吸收 2 MW 功率,其余 3 MW 功率流出本地电网,流向直流配电网的中压侧。5 s 时,有源直流微网向外发出功率降为 1 MW,负荷直流微网仍需吸收 2 MW 功率,这样,本地电网需要从区外电网(直流配电网的中压侧)吸收 1 MW 的功率。

图 5 的仿真结果说明所研究的全阻断型直流配电网在稳态运行时具有良好的功率特性,验证了其稳态运行控制策略的可行性。



(a)混合MMC直流侧电气量



(b)直流变压器直流侧电气量

图5 稳态运行仿真验证

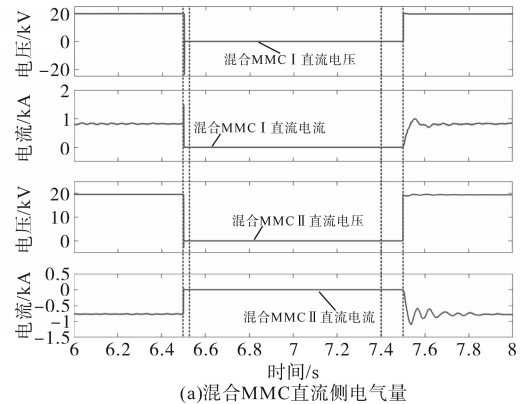
Fig.5 Simulation validation of the steady-state operation

### 3.3 直流故障清除策略仿真验证

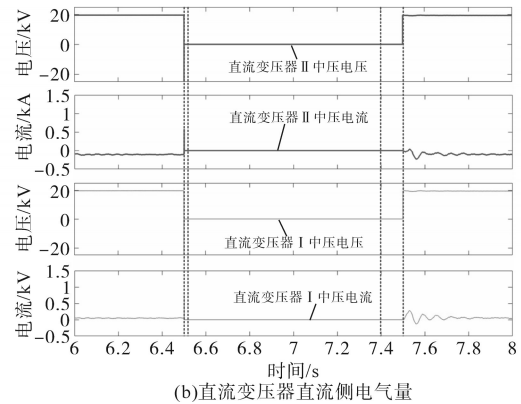
基于 Matlab/Simulink 模型,对 FFBC 型直流配电网的直流故障清除策略进行了仿真验证。

图6为本文算例的直流故障清除仿真结果。图6中,6.5 s时,中压直流线路双极故障发生在图1中的位置。混合 MMC I 换流站的过流(低压)保护将启动,并将故障闭锁脉冲发送至直流配电网中压侧的其他换流设备。6.500 5 s(即0.5 ms)后,控制管理系统闭锁直流配电网中的所有换流设备,6.52 s后断开直流配电网中的所有隔离开关。当直流线路中的故障消失或处理后(7 s时),7.4 s 闭合直流配网中的所有隔离开关,此时由于直流配电网中的所有换流设备均处于闭锁状态,直流配电网中的直流电流仍为0 A,7.5 s时,完全恢复系统供电。

事实上,在故障处理期间,直流配网也可以转为单端运行,即6.52 s时根据故障定位信息只断开直流线路 I 两端的隔离开关,并通过调度系统恢复单端运行。FFBC 型直流配电网的故障处理策略多样,且处理速度在几 ms 内,相比于传统的基于直流断路器(仅直流断路器的开关时间便为3~5 ms)的直流配网,故障处理特性更优。



(a)混合MMC直流侧电气量



(b)直流变压器直流侧电气量

图6 直流故障清除仿真验证

Fig.6 Simulation validation of the DC fault clearing process

## 4 结论

本文以一个四端全阻断型直流配电网为例,详细研究了其面向源荷储互动时在启动、稳态以及故障三种运行状态下的协调控制策略,并对源、荷、储系统在其中的作用进行了深入的分析。基于 Matlab/Simulink 仿真平台,对所提出的控制策略进行了仿真验证,仿真结果证明了所提系统级控制策略的有效性。

本文研究的主要目的是对全阻断型直流配电网的运行及控制进行实例分析,以期给研究者及工程实施人员带来对全阻断型直流配网整体的直观认识,从而进一步加深对全阻断型直流配网的理解。

### 参考文献

[1] 拜润卿,常平,刘文飞,等. 光热电站促进风电消纳的电力系统优化调度[J]. 电测与仪表,2020,57(22):1-6.  
BAI Runqing, CHANG Ping, LIU Wenfei, et al. Optimal dispatching of power system for promoting wind power accommodation by introducing CSP plant[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 1-6.

[2] 林健,王悦,张仪,等. 光伏发电系统抑制电网功率振荡的机

- 理研究[J]. 电气传动, 2021, 51(14): 62-67.
- LIN Jian, WANG Yue, ZHANG Yi, et al. Research on mechanism of photovoltaic system suppressing grid power oscillation[J]. Electric Drive, 2021, 51(14): 62-67.
- [3] 李力, 郭佩乾. 适用于多端柔性直流配电网的改进控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(12): 28-34.
- LI Li, GUO Peiqian. An advanced control strategy for flexible multi-terminal DC distribution network[J]. Electric Drive, 2021, 51(12): 28-34.
- [4] 张宝英, 金言, 王双, 等. 孤岛微电网储能单元视在功率均分方案[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 84-88.
- ZHANG Baoying, JIN Yan, WANG Shuang, et al. Apparent power sharing scheme for energy storage unit in islanded micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 84-88.
- [5] 孙谦浩, 王裕, 宋强, 等. 应用于直流配电网的双向全桥直流变换器比较分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 49-56.
- SUN Qianhao, WANG Yu, SONG Qiang, et al. Analysis and comparison of dual-active-bridge DC/DC converters in DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 49-56.
- [6] 李博通, 杨昕陆, 李斌, 等. 采用故障阻断型换流器的直流配电网故障处理技术综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 101-113.
- LI Botong, YANG Xinlu, LI Bin, et al. Overview on fault processing technology for DC distribution network based on fault blocking converter[J]. Automation of Electric Power System, 2020, 44(5): 101-113.
- [7] 李斌, 刘海金, 孔祥平, 等. 直流配电网运行控制策略分析及展望[J]. 电力建设, 2018, 39(11): 96-108.
- LI Bin, LIU Haijin, KONG Xiangping, et al. Analysis and prospect of control strategies for DC distribution systems[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 96-108.
- [8] 徐殿国, 张书鑫, 李彬彬. 电力系统柔性一次设备及其关键技术: 应用与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 2-22.
- XU Dianguo, ZHANG Shuxin, LI Binbin. Flexible primary equipment in power system and their key technologies: applications and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 2-22.
- [9] 杨雷. 基于多时间尺度多端直流配电网调控技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- YANG Lei. Research on the dispatch and control technique of multi-terminal DC distribution network based on the multi-time scale[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [10] GU Yunjie, XIANG Xin, LI Wuhua, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced re-liability and flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 5072-5080.
- [11] 王肖肖, 韩民晓, 曹文远, 等. 考虑不同接线方式的多电压等级直流配电网潮流计算方法[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2359-2368.
- WANG Xiaoxiao, HAN Minxiao, CAO Wenyuan, et al. Research on power flow calculation method for multi-voltage DC distribution network considering different connection modes[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2359-2368.
- [12] 季一润, 袁志昌, 孙谦浩, 等. 柔性直流配电网典型运行方式及切换方法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 8-15.
- JI Yirun, YUAN Zhichang, SUN Qianhao, et al. Typical operation mode and switching method of VSC-DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 8-15.
- [13] 孙谦浩, 李亚楼, 王静, 等. 基于钳位开关电容的高频模块化直流变压器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3633-3642.
- SUN Qianhao, LI Yalou, WANG Jing, et al. High-frequency modular DC transformer based on clamping switched capacitors[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3633-3642.
- [14] 冯谟可, 郭裕群, 许建中, 等. 混合型 MMC 启动策略及全桥子模块数目配置研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(6): 28-35.
- FENG Moke, GUO Yuqun, XU Jianzhong, et al. Study on the starting strategy of hybrid MMC and the number of submodules of the whole bridge[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2017, 44(6): 28-35.
- [15] 丁久东, 卢宇, 董云龙, 等. 半桥和全桥子模块混合型换流器的充电策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 71-75, 107.
- DING Jiudong, LU Yu, DONG Yunlong, et al. Charging strategies for hybrid converters based on half-bridge sub-module and full-bridge sub-module[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 71-75, 107.
- [16] 李笑倩. 基于 MMC 的高压大容量柔性直流输电关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- LI Xiaolian. Research on the key technologies of high voltage and high power HVDC based on MMC[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

收稿日期: 2021-07-30

修改稿日期: 2021-10-24