

多端柔性直流电网工程用直流转换开关设计

杨帆, 王浩, 王杰峰, 任军辉, 李璐

(西安西电电力系统有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 直流转换开关是柔性直流电网中可实现故障隔离及运行方式转换的重要设备, 其运行工况与常规直流输电工程存在差别。首先对柔性直流电网与常规直流输电中的直流转换开关配置进行了介绍, 对其在各自系统中的作用进行了对比分析; 然后对直流转换开关转换过程进行了分析, 提出了各部件的关键技术要求; 最后对其关键运行工况进行了仿真分析, 完成了柔性直流电网工程用直流转换开关的设计。对柔性直流系统用直流转换开关设计具有一定的借鉴作用。

关键词: 柔性直流电网; 直流转换开关; 开断装置; 振荡回路; 仿真计算

Design of DC transfer switch in multi-terminal VSC-based HVDC grid project

YANG Fan, WANG Hao, WANG Jiefeng, REN Junhui, LI Lu

(Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: The DC transfer switch is an important device for fault isolation and operation mode conversion in multi-terminal VSC-based HVDC power grid, which is different from the operating conditions in classical HVDC power transmission projects. The configuration of DC transfer switch in VSC-based HVDC grid and classical DC power transmissions is first introduced, the functions in VSC and classical HVDC systems are compared. Then the key requirements of each component of DC transfer switch are analyzed. Finally the key operating conditions are simulated, and the design of the DC transfer switch for four terminals VSC-based power grid is completed. It has certain reference for the design of the switch in flexible DC system.

Key words: VSC-based HVDC grid; DC transfer switches; breaker; LC circuit; simulation

0 引言

柔性直流输电是以全控型电力电子器件为基础, 电压源换流阀为核心, 采用新型调制技术的直流输电技术^[1]。柔性直流输电具有输出电压波形好、能够快速独立控制有功与无功功率、快速实现潮流反转、无换相失败及运行方式更加灵活的特点^[2]。这些特点使得柔性直流输电技术在可再生能源发电并网、孤岛和城市供电及风力发电并网等方面

得到了广泛应用^[3]。

目前, 国内建设并投运多个柔性直流输电工程, 包括广东南澳三端柔性直流输电工程^[4-5]、浙江舟山海岛多端柔性直流输电工程^[6-8]、上海南汇柔性直流输电示范工程^[9-10]和大连跨海柔性直流输电科技示范工程^[11-12]等。这些工程以多端柔性直流工程为主, 并没有形成直流电网。

柔性直流电网试验示范工程在多端直流

工程的基础上，首次构建柔性直流电网。相对于多端直流工程，直流电网中的每个换流站间都有多条传输线路^[13]，提高了整个系统的运行可靠性，同时运行方式更加多样复杂。直流转换开关作为运行方式转换的关键设备^[14]，对其更为复杂的运行工况提出了新的要求。

本文首先对直流转换开关在柔性直流电网和常规端对端直流输电工程中的功能进行了对比分析，开展了满足柔性直流电网运行需求的直流转换开关设计，并阐述了设计的合理性。

1 柔性直流电网工程与常规直流工程中直流转换开关功能对比

四端柔性直流电网工程中直流转换开关配置如图1所示。

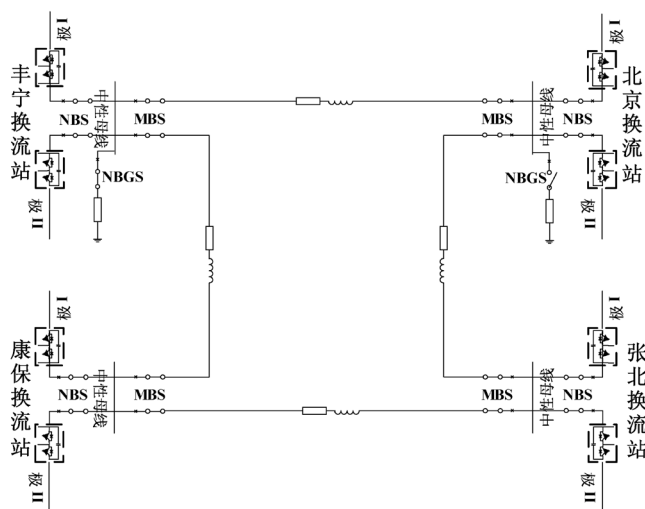


图1 四端柔性直流电网工程转换开关配置示意图

Fig. 1 Configuration of transfer switch single line diagram in four terminal flexible DC power grid project

四端柔性直流电网工程中每个换流站的每个换流器单元配置一台中性母线开关（NBS）。四端柔性直流电网采用金属回线接线方式，在金属回线上每站需配置两台金属回线开关（MBS），分别与相邻的另外两站相连。柔性直流电网系统可选择在其中某一站接地，为提高系统可靠性，其中两

站中性母线区域配置一台中性线接地开关（NBGS），接地点可在这两站之间相互切换。北京和丰宁站配置有NBGS，其他两站不配置NBGS。

四端柔性直流电网正常运行时，所有换流站的NBS、MBS以及北京或丰宁一个站的NBGS应处于合闸位置，为系统提供零电位点。

常规高压直流输电工程直流转换开关配置如图2所示。在整流侧配置有金属回线转换开关（MRTB）、大地回线转换开关（ERTB）、中性母线开关（NBS）和中性母线接地开关（NBGS），在逆变侧配置有中性母线开关（NBS）和中性母线接地开关（NBGS）。系统正常运行时，MRTB和NBS处于合闸状态，而ERTB和NBGS需要处于分闸状态^[15-17]。

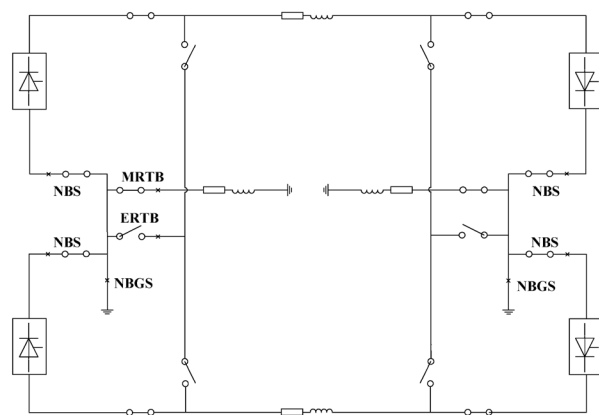


图2 常规直流输电工程转换开关配置示意图

Fig. 2 Configuration of DC transfer switches in the classical HVDC transmission project

柔性直流电网工程采用金属回线的接线方式，与常规直流输电工程采用接地极接线方式存在差别，所以柔性直流电网工程中未配置与大地回路相关MRTB和ERTB，而配置了MBS。两种工程的配置与工况对比如表1所示。

由图1和图2以及表1中可以看出，柔性直流电网工程直流转换开关与常规直流工程中直流转换开关配置和运行工况不同。

表1 柔性直流电网与常规直流输电工程直流转换开关配置和运行工况对比

Tab. 1 Configuration and Operating conditions of DC transfer switches between VSC-based HVDC power grid and classical DC transmission project

开关类型	常规直流输电工程	柔性直流电网试验示范工程
MRTB/ERTB	主要用于实现直流输电系统单极大地回路运行方式与单极金属回路运行方式之间的转换	未采用接地极的接线方式，未配置MRTB/ERTB直流转换开关
NBS	双极正常运行条件下，一个极换流器内接地故障时，故障极投旁通对闭锁。需要NBS将从正常极、故障通路和闭锁极极线流过的直流电流转换到接地极引线。故障时会在转换开关中产生一个暂态过电流，在暂态电流衰减前NBS不会断开	NBS主要用于实现单换流单元退出/投入，正常双极运行与单极运行间转换，将故障电流转移至金属回线以切除故障，以及在换流器闭锁后断开故障续流回路中的衰减电流以切除故障。在NBS开始分闸操作之前，其运行电流应在额定电流及以下
MBS	国内常规直流输电工程一般采用接地极接线方式，不采用金属回线接线方式，不配置此类型转换开关	MBS主要用于实现某金属回线退出/投入，将故障电流从某金属回线转移至其他金属回线以切除故障，以及在换流器闭锁后断开故障续流回路中的衰减电流以切除故障。在MBS开始分闸操作之前，其运行电流应在额定电流及以下
NBGS	NBGS最重要的作用是作为一个快速合闸开关，40 ms内可将中性点母线通过站上的接地系统重新连接到大回路，避免双极系统停运。当地极引线可以重新使用时，NBGS要能够将不平衡电流从站接地系统转换到地极引线中	NBGS主要用于实现接地站在线更换。在NBGS开始转换操作之前，其运行电流应在额定电流及以下。在特定的情况下（例如金属回线断线），NBGS还应可快速的提供接地点，避免中性线区域出现过电压导致系统停运

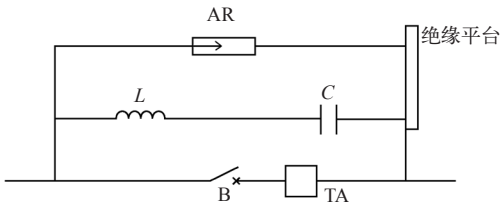


图3 无源型直流转换开关示意图
Fig. 3 Passive transfer switches

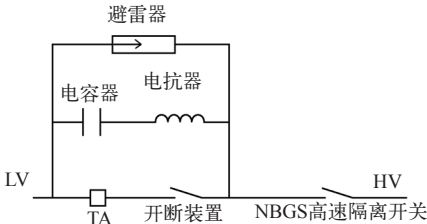


图4 NBGS示意图
Fig. 4 NBGS transfer switches

2 直流转换开关设计

与常规直流工程直流转换开关相同，柔性直流电网工程用直流转换开关NBS和MBS采用无源型直流转换开关的结构如图3所示。NBGS采用由高速隔离开关和无源型直流转换开关串联的结构如图4所示。

无源型直流转换开关由SF₆开断装置B，与电容器C、避雷器AR和电抗器L（如果有）一起组成，TA用于判断开断装置B是否熄弧。图3中，电容器、电抗器和避雷器安装在绝缘平台上，避雷器回路、电容器与电抗器回路分别与SF₆开断装置并联。

电容器与电抗器串联，再与SF₆开断装置并联建立振荡回路。多数情况下电路中的杂散电感可以满足振荡的要求^[18]。转换过程分为两个阶段：灭弧过程和灭弧后。开断装置燃弧过程中，振荡回路在电弧的作用下

产生振荡电流。振荡电流叠加直流电流过零时，开断装置中的电弧熄灭。灭弧后，直流电流将流经电容器继续导通，使电容充电至一定电压（此电压定义为转换电压），直至并联避雷器动作。转换电压的高低由与开断装置并联的避雷器伏安特性决定，转换电压越高，直流电流转换速度越快。在转换过程中，避雷器吸收回路中存储的能量^[19-20]。

2.1 开断装置电流过零过程分析

无论是柔性直流电网工程还是常规直流工程，每个工程中各类型转换开关所在回路均有所不同，在开断过程中，由于外电路阻抗及避雷器阻抗相比于开断装置自身阻抗较大，外电路对转换开关开断装置熄弧过程影响很小，主要对开断装置熄弧之后的转换/开断过程有影响。

下面将对熄弧过程进行简单的分析，并对直流转换开关各部件提出明确的设计要求。

转换开关振荡原理如图5所示。图5中， LC 振荡回路与开断装置组成二阶电路， R 为 LC 回路的等效电阻。

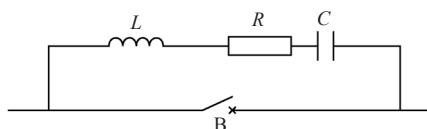


图5 转换开关振荡原理

Fig. 5 Principle oscillation of transfer switches

流过 LC 回路的电流为 I_{LC} ，外电路直流电流为 I_d ，则流过开断装置B的电流 $I_{BRK}=I_d-I_{LC}$ 。

假设开断装置拉开后其两端电弧电压为 u_{arc} ，则有

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = u_{arc} \quad (1)$$

开断装置电流过零熄弧所需具备的约束条件如下：

1) 要想获得振荡电流，二阶电路需处于欠阻尼状态，即有

$$R < \sqrt{L/C} \quad (2)$$

2) 一定时间内 LC 回路振荡电流幅值应超过直流电流，才可使流过开断装置的电流过零完成熄弧，则电容器两端电压为

$$u_C = u_{arc} |Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta)| \quad (3)$$

式中， $\delta = R/2L$ ； $\omega = \sqrt{(R/2L)^2 - (1/LC)}$ ； $\beta = \arctan(\omega/\delta)$ ； $A = U_0 \omega_0/\omega$ ； $\omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2}$

LC 回路电流为

$$I_{LC} = C(du/dt) \quad (4)$$

当 LC 振荡电流幅值大于直流电流时，开断装置电流过零可完成熄弧，则有

$$I_{LC} = C \frac{du_{arc}}{dt} + C \frac{d(Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta))}{dt} > I_d \quad (5)$$

由此， LC 回路中电容值越大，振荡回路电流幅值越大，振荡频率越高。开断装置电弧电压随时间变化越大，振荡幅值越大。该结论可对 LC 振荡回路的电容电感值的选取以及开断装置的设计进行指导。

2.2 LC 振荡回路设计要求

LC 振荡回路选取应在开断装置燃弧过程

中产生足够的振荡电流，使开断装置上的电流产生过零点熄弧；在开断装置熄弧后，电容值的选取还应考虑直流电流流过 LC 回路时直流转换开关端间电压的上升率不应过高，避免过高的电压上升率引起开断装置重击穿。

在满足以上要求的基础上， LC 回路的电容和电抗参考了以往工程的经验，又进一步进行了试验验证。在转换（开断）5 kA的直流电流可配置60 μ F的电容器，考虑到采用连接导线的杂散电抗不单独配置电抗器， LC 振荡频率在4 600 Hz左右。

在转换过程中，电容器需承受短时的直流电压，该直流电压略高于避雷器的保护电压，持续时间一般为几百毫秒。需要特别说明的一点是，对于NBS直流转换开关电容器来说，由于MMC功率模块二极管的电压嵌位，在完成直流电流转换/开断之后，电容器还需承受短时的不大于避雷器保护水平的直流电压。

2.3 开断装置B设计要求

由前文分析以及直流转换开关在系统中的功能要求可知，开断装置应满足以下要求：

1) 在一定电流下，其电弧电压幅值及随时间的变化率应尽可能的大。

2) 开断装置 dv/dt 耐受能力要达到一定的要求。

3) 对于NBS和MBS开断装置，可具备单次储能C-O-C的操作循环；对于NBGS高速隔离开关，应具备C-O的操作循环；对于NBGS转换开关开断装置，应具备O-C的操作循环。

4) 转换开关用开断装置之间应具备联锁功能。例如在MBS转换之前，应判断与MBS并联的金属回线是否处于投运状态，如果未有电流通过并联的金属回线，则不可执行MBS分闸命令。

依照以上要求，直流转换开关用开断装置采用双断口的SF₆交流断路器，机构为液压碟簧，额定直流电压为100 kV。

2.4 避雷器的选取

避雷器由氧化锌电阻片（MOV）串并联组成。在转换过程中，能量主要依靠避雷器来吸收，避雷器特性曲线的拐点水平决定直流转换开关的转换电压大小。

避雷器的转换电压影响转换时间，转换电压越高，转换时间越短。避雷器的转换电压还应与直流系统中性线区域最大直流电压和避雷器保护水平相配合。避雷器的转换电压决定直流转换开关端间绝缘水平，基于避雷器伏安特性综合考虑开关制造成本，选取转换电压为140 kV。由此决定了直流转换开关端间的绝缘水平。

转换电流和转换电路中的阻抗值决定避

雷器额定吸收能量大小。

3 仿真计算

本节对柔性直流电网中的各类型直流转换开关最苛运行工况进行了仿真计算。

四端柔性直流电网额定运行参数如表2所示，各直流转换开关最苛运行工况如表3所示，计算结果如表4所示。

表2 四端柔性直流电网额定运行参数

Tab. 2 Rated operation parameters of four terminal flexible DC power grid

额定直流电压/kV	张北站额定容量/MW	北京站额定容量/MW	丰宁站额定容量/MW	康保站额定容量/MW
±500	3 000	3 000	1 500	1 500

表3 各类型直流转换开关最苛运行工况

Tab. 3 The key operating conditions of DC transfer switches

故障前系统运行情况		故障	故障后动作
NBS	①系统单极额定功率运行：至少康保、丰宁站极线投入运行；	①康保至丰宁极线末端与金属线发生短路； ②康保侧极线直流断路器拒动，丰宁侧极线直流断路器正常动作	①康保站正极换流器闭锁，进线交流断路器分闸； ②因康保站正极续流二极管的存在，故障电流续流且衰减较慢。故障电流衰减至5 kA，康保站正极NBS拉开
	②金属回线层开环运行：康保至丰宁段金属回线未投入；		
	③丰宁站接地		
MBS	①系统单极开环满功率运行：康保至丰宁段极线未投入；	康保至丰宁金属回线发生接地故障	拉开康保侧金属回线侧的MBS，将流过康保至丰宁金属回线的电流转移至其他金属回线
	②所有金属回线正常运行；		
	③丰宁站接地		
NBGS	①系统单极满功率运行；		
	②金属回线开环运行：北京至丰宁段金属回线未投入；		
	③初始状态：北京站接地（北京站NBGS处于合闸状态）；		
	④闭合丰宁站NBGS开关，形成的大地回路与金属回线通路并联通流。		
	⑤拉开北京站NBGS，将大地通路里的电流转移至金属回线		

表4 各类型直流转换开关开断装置熄弧后仿真结果

Tab. 4 Simulation result of DC transfer switches

开关类型	NBS	MBS	NBGS
转换/开断电流要求/kA	5	5	5
转换过程中端间最大电压即避雷器残压/kV	139.2	139.2	129.6
避雷器电流峰值/kA	5.20	5.13	0.36
避雷器能量/MJ	8.8	5.8	0.2
电容器电压峰值/kV	139.4	139.4	129.6
电容器电流峰值/kA	5.01	5.02	1.39
转换时间/ms	29	24	10

与以往常规直流转换开关不同的是，柔性直流电网换流站NBS在开断故障续流电流时，由于二极管的电压嵌位作用，转换完成后电容器将在较高的电压下维持一段时间，在直流系统条件下对三种类型直流转换开关NBS、MBS和NBGS的开断/转换过程进行仿真分析，仿真波形如图6～图8所示。正常情况下电容器电压可通过放电电阻衰减至零。

4 结束语

本文通过对换流器工作原理及其运行特

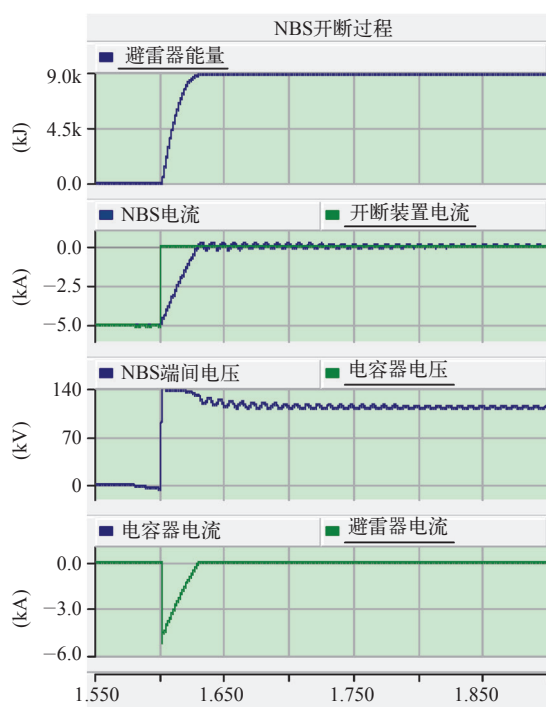


图6 NBS开断过程仿真波形

Fig. 6 NBS breaking process simulation waveform

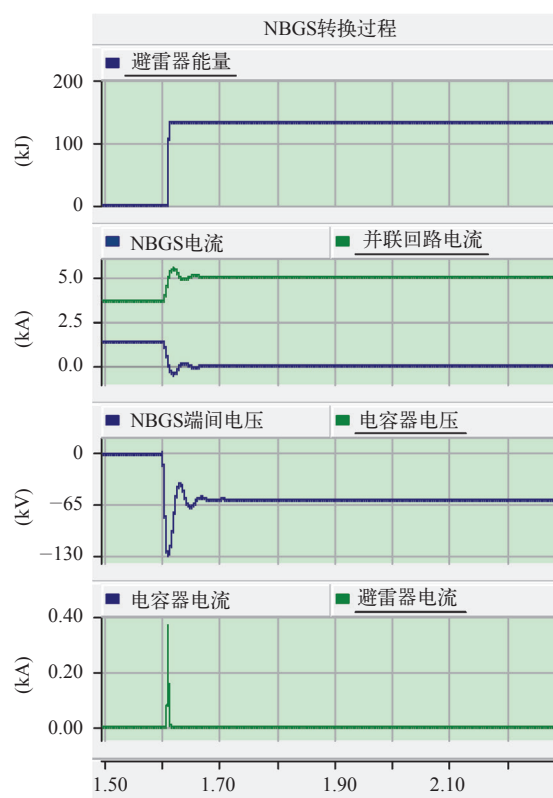


图8 NBGS转换过程仿真波形

Fig. 8 NBGS transfer process simulation waveform

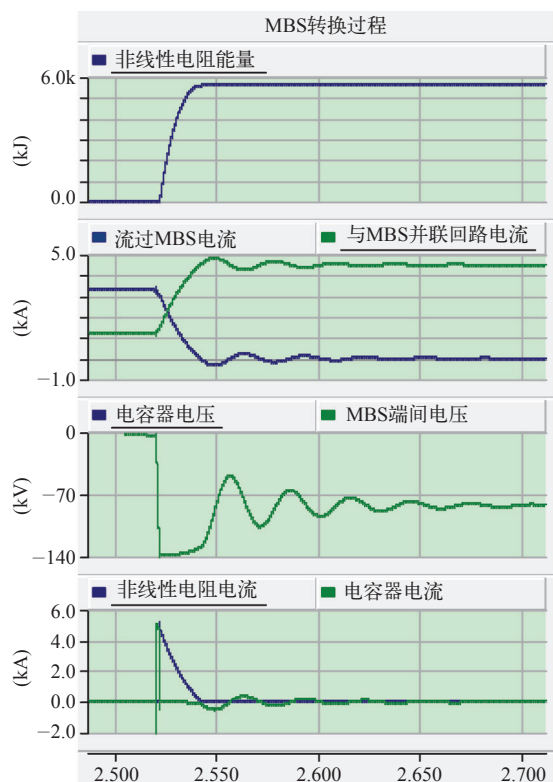


图7 MBS转换过程仿真波形

Fig. 7 MBS transfer process simulation waveform

性分析得出：四端柔性直流电网工程用直流转换开关与常规直流工程用转换开关工作原理相同，但运行工况存在差异。以选取的开断装置、辅助回路设备和避雷器参数为基础，在直流系统条件下对三种类型直流转换开关NBS、MBS和NBGS的开断/转换过程进行仿真分析。通过计算可知，各开关在最苛的开断/转换过程中，避雷器吸收能量分别为8.8 MJ、5.8 MJ和0.2 MJ。据此来合理配置避雷器电气参数和数量，保证系统安全可靠运行。

参考文献

- [1] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 1-25.
- [2] 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.
- [3] 刘亚磊, 李兴源, 曾琦, 等. 多端多电平柔性直流系统在海上风电场中的应用[J]. 电力系统保护

- 与控制, 2013, 41(21): 9-14.
- [4] 李扶中, 周敏, 贺艳芝, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程电网接入与换流站设计[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 58-62.
- [5] 杨柳, 黎小林, 许树楷, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 63-67.
- [6] 高强, 林烨, 黄立超, 等. 舟山多端柔性直流输电工程综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 33-38.
- [7] 余世峰, 马为民, 聂定珍, 等. 舟山多端柔性直流工程过电压与绝缘配合[J]. 电力建设, 2014, 35(3): 7-12.
- [8] 马玉龙, 马为民, 陈东. 舟山多端柔性直流工程系统方案[J]. 电力建设, 2014, 35(3): 1-6.
- [9] 蒋晓娟, 姜芸, 尹毅, 孔祥海等. 上海南汇风电场柔性直流输电示范工程研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1132-1139.
- [10] 乔卫东, 毛颖科. 上海柔性直流输电示范工程综述[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1137-1140.
- [11] 马为民, 蒋维勇, 李亚男. 大连柔性直流输电工程的系统设计[J]. 电力建设, 2013, 34(5): 1-5.
- [12] 葛维春, 顾洪群, 贺之渊. 大连跨海柔性直流输电科技示范工程综述[J]. 东北电力技术, 2012, 33(2): 1-4.
- [13] 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.
- [14] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 71-79.
- [15] 高压直流转换开关: GB/T 25309—2010[S].
- [16] ANDERSSON D, HENRIKSSON A. Passive and active DC breakers in the three Gorges-Changzhou HVDC project [C]. Proceedings of the International Conference on Power Systems, Wuhan, China, CIGRE, 2001: 391-395.
- [17] 张万荣, 苟锐锋, 赵伯楠, 等. 直流断路器转移直流电流过程的仿真计算研究[J]. 高压电器, 2002, 38(2): 1-4.
- [18] 马元社, 李宾宾, 王蔚华, 等. 高压直流断路器振荡回路特性[J]. 南方电网技术, 2011, 5(3): 10-13.
- [19] 厉天威, 王浩, 项阳, 等. 高压直流工程直流转换开关分析与仿真[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 33-36.
- [20] 彭畅, 温家良, 马国华, 等. 特高压直流输电系统中直流转换开关的电流转换分析和仿真[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 1-7.

作者简介



杨帆

杨帆(1983—), 女, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电系统研究。

王浩(1984—), 男, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电系统研究。

(收稿日期: 2019-03-19) **EA**