

# 海上柔性直流输电工程直流电压等级确定方法

陈鹏,周国梁,马亮,杨金根,梁言桥,周思远

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司,湖北 武汉 430071)

**摘要:**随着海上风电机组大型化以及投资规模的不断扩大和建设成本逐渐下降,近海风电资源日趋紧张,基于柔性直流输电技术的大规模、远距离海上风电送出工程得到了较大的应用。在海上风电柔性直流输电工程中,直流电压等级是体现输送能力的重要技术参数。文中基于IGBT器件的稳态和暂态通流能力以及直流海缆载流量限制要求,提出了一种海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定方法。并在此基础上,以某900 MW海上风电柔性直流输电工程为例,给出了工程案例的直流电压等级确定流程。所提出的海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定方法,有利于降低工程建设成本并推进中国远海风电大规模集约开发与并网技术的发展。

**关键词:**海上风电;柔性直流输电;IGBT器件;直流海缆;直流电压等级

中图分类号:TM 853 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0061-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220311

## Method of DC Voltage Level Determination for Offshore VSC-HVDC Transmission Project

CHEN Peng, ZHOU Guoliang, MA Liang, YANG Jingen, LIANG Yanqiao, ZHOU Siyuan

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:** With the increasing of the scale of offshore wind turbines and investment and the gradual decline of construction costs, offshore wind power resources are becoming increasingly scarce. Large-scale and long-distance offshore wind power transmission project based on voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) technology have been widely deployed. In offshore wind power VSC-HVDC transmission project, the DC voltage level is an important technical parameter to reflect the transmission capacity. Based on the limitation requirements of steady-state and the transient ampacity of IGBT devices as well as DC marine cables, a method for determining DC voltage level of offshore wind power VSC-HVDC transmission project is proposed. On this basis, taking a 900 MW offshore wind power VSC-HVDC transmission project for example, the process of determining DC voltage level of the engineering case is given. The proposed method is conducive to reducing construction costs, which is of great significance to promote the large-scale intensive development of offshore wind power and the development of grid integration technologies.

**Key words:** offshore wind power; VSC-HVDC transmission; IGBT devices; DC marine cable; DC voltage level

## 0 引言

海上风电具有风能资源稳定性强、年利用小时高等显著特点,近年来海上风力发电技术在全球各地飞速发展<sup>[1-3]</sup>。目前海上风电并网输电主要有两种典型方式:高压交流输电和柔性直流输电。高压交流输电主要是通过建设海上交流升压站,汇集海上风电场的电能并送至陆上的电网,适用于规模小、

近距离风电场的电能送出。随着海上风电机组大型化、投资规模的不断扩大和建设成本逐渐下降,近海风电资源日趋紧张。基于柔性直流输电技术的大规模、远距离海上风电送出工程已成为了海上风电发展和研究的热点,在欧洲北海地区的海上风电输电工程中得到了较广泛的应用<sup>[4]</sup>。

在海上风电柔性直流输电工程主要由海上换流站、陆上换流站和直流海缆等部分构成。一般情况下,海上换流站和直流海缆的投资成本占据了整个

海上风电柔性直流输电工程投资总成本的 70% 以上,是大容量、远距离海上风电柔性直流输电工程的关键设施<sup>[5]</sup>。

在工程建设前期,直流电压等级是海上风电柔性直流输电工程的重要技术参数。对于海上换流站核心电气设备换流阀来说,在绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT) 器件额定电压确定的情况下,直流电压等级直接影响了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC) 子模块的级联个数,与换流阀的制造成本几乎成线性关系;另一方面,直流电压等级及其过电压水平很大程度上决定了海上换流站的体积质量,从而成为了决定海上换流站平台建造的关键因素。此外,在工程额定输送容量确定的情况下,直流电压等级也是影响直流海缆的绝缘厚度和制造难度的关键参数,能够直接决定直流海缆的生产制造成本。因此,选择合适的直流电压等级,确定直流电压等级范围,对于工程的实施建设和成本的把控具有重要意义<sup>[6]</sup>。

目前,国内暂无成熟的海上风电柔性直流输电工程的设计和建设经验,尚处于探索和起步阶段。针对确定海上风电柔性直流输电工程电压等级的方法还研究得较少,特别是从 IGBT 器件参数、直流海缆选型等方面对海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定的研究工作。

下面针对现有技术的不足,基于 IGBT 器件稳态电流运行区间,给出了海上风电柔性直流输电工程的直流电压取值范围,并根据 IGBT 暂态电流限值,对直流电压取值范围进行修正。进一步根据直流海缆载流量限值要求,确定工程的直流电压等级。并在此基础上,以某 900 MW 海上风电柔性直流输电工程为例,给出了工程案例的直流电压等级确定流程。

## 1 海上柔性直流换流站电气主接线

现阶段大容量柔性直流输电工程主要采用损耗、谐波更低、大电平数目的 MMC 的拓扑结构,其换流单元及直流侧接线方式主要采用对称单极接线(伪双极)和对称双极接线(真双极),具体接线方式的选择与两端换流站的交流系统规模和条件、柔性直流输电系统的可靠性、工程建设成本等因素有关<sup>[7-9]</sup>。

针对海上风电柔性直流输电工程来说,对称双极接线方式可靠性较高,运行方式较灵活。但对称双极接线的电气设备较多,换流变压器需考虑直流偏置电压,且直流线路需增加一回中性线海缆,海上柔性直流换流站和直流海缆的投资费用均较高。受海上柔性直流换流站的平台尺寸和重量限制,以及直流海缆对工程造价的影响,海上风电柔性直流输电工程通常采用对称单极接线形式。海上柔性直流换流站典型的对称单极接线方式如图 1 所示,该接线方式为单个换流单元构成的双极系统,通过交流侧中性点接地,呈现出了对称的正、负极性的直流线路。

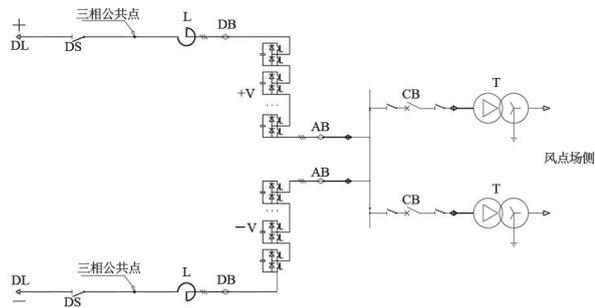


图 1 海上柔性直流换流站电气主接线

图 1 中:T 为换流变压器;CB 为交流断路器;AB 为交流穿墙套管;V 为换流阀;DB 为直流穿墙套管;L 为桥臂电抗器;DS 为直流隔离开关;DL 为直流海缆终端。

## 2 直流电压等级确定方法

### 2.1 IGBT 稳态运行条件限制

IGBT 是海上风电柔性直流输电工程中的核心部件,因此,要保障其安全、稳定、高效地运行,IGBT 器件的电气参数限制对工程设计有着举足轻重的影响。IGBT 器件的稳态和暂态通流能力以及耐受电压等参数会影响输电系统的功率传输,从而对直流电压等级选择产生影响。

为了避免 IGBT 长时间运行在额定电流下而出现故障,定义  $\lambda$  为每个 IGBT 器件的稳态电流经济运行系数,记为  $\lambda = i_{\text{arm\_rms}} / i_e$ ,其中: $i_{\text{arm\_rms}}$  为换流阀桥臂工作电流; $i_e$  为 IGBT 器件的额定电流。 $\lambda$  根据工程经验取值通常在 0.50~0.65。

根据海上风电柔性直流输电工程的直流输送容量  $P_e$ ,可以计算出直流极线电流  $i_{dc}$  和联接变压器网侧功率  $S_e$ ,如式(1)所示。

$$\begin{cases} i_{dc} = P_e / U_{dc} \\ S_e = P_e / \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_{dc}$  为正负极间电压;  $\cos \varphi$  为联接变压器网侧功率因数, 通常  $0.9 \leq \cos \varphi \leq 1.0$ , 并具备发出和吸收无功功率的能力;  $U_{dc}$  为正负极间电压。

联接变压器阀侧电压  $U_v$  和基频电流  $i_{v(1)}$  的表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} U_v = \frac{\sqrt{3}M \times U_{dc}}{2\sqrt{2}} \\ i_{v(1)} = \frac{P_e}{\sqrt{3}U_v \cos \varphi} = \frac{2\sqrt{2}P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $M$  为换流器调制比, 通常  $0.75 \leq M \leq 0.95$ 。

考虑到 IGBT 桥臂电流中, 占主要组成部分的是直流分量、基波分量  $i_{v(1)}$  和二倍频分量  $i_{v(2)}$ , 所以 IGBT 桥臂电流稳态有效值可以表达为<sup>[10-11]</sup>

$$i_{arm\_rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \times i_{dc}\right)^2 + \frac{1}{4} \times i_{v(1)}^2 + \frac{1}{4} \times i_{v(2)}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \times \frac{P_e}{U_{dc}}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{2\sqrt{2}P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{2\sqrt{2}k_{(2)}P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi}\right)^2} \quad (3)$$

式中,  $k_{(2)}$  为桥臂电流二倍频分量相对基波分量的比例, 通常  $k_{(2)} \leq 0.3$ 。

根据式(3)可以推导出  $U_{dc}$  的表达式为

$$U_{dc} = \frac{\sqrt{(M \cos \varphi)^2 + 2(1 + k_{(2)}^2)P_e}}{3\lambda M i_e \cos \varphi} \quad (4)$$

因此, 可以根据  $\lambda$  的取值范围, 推导出  $U_{dc}$  的取值范围, 记为  $R_1$ 。

## 2.2 暂态运行条件限制

根据 2.1 节的推导内容可知, IGBT 桥臂电流稳态峰值  $i_{p\_arm}$  可以表达为

$$i_{p\_arm} = \frac{1}{3} \times i_{dc} + \frac{\sqrt{2}}{2} \times i_{v(1)} + \frac{\sqrt{2}}{2} \times i_{v(2)} = \frac{1}{3} \times \frac{P_e}{U_{dc}} + \frac{2P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi} + \frac{2k_{(2)}P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi} \quad (5)$$

因此, 阀基过流保护动作值为

$$i_{DZ\_arm} = k_{VBC} \times i_{p\_arm} \quad (6)$$

式中,  $k_{VBC}$  为可靠系数, 数值在 1.20~1.25。

发生换流站正、负极间故障时, 故障发生后到 IGBT 闭锁前, 上、下桥臂的子模块电容放电, 形成故障回路路径, 子模块电容、桥臂电抗器及线路阻抗组

成 RLC 振荡回路, 流经子模块的故障电流从故障发生时时刻起迅速增大, 故障电流  $i_{fault}$  上升率为

$$\frac{di_{fault}}{dt} = \frac{U_{dc}}{2 \times L_{arm}} \quad (7)$$

IGBT 闭锁后到交流系统跳开断路器结束, 子模块电容从短路故障回路中退出, 流经子模块的故障电流路径遵循 LR 一阶放电原理, 从 IGBT 闭锁时刻开始起, 故障电流不断减小, 换流站正、负极间故障的桥臂暂态故障电流可表达为

$$i_{fault} = i_{DZ\_arm} + t_p \times \frac{U_{dc}}{2 \times L_{arm}} \quad (8)$$

式中:  $t_p$  为阀基过流保护延迟时间;  $L_{arm}$  为单相桥臂电感。

根据第 2.1 节中所求出  $U_{dc}$  所属的  $R_1$  范围、阀基过流保护动作值及其延迟时间以及桥臂电抗器的电感值等, 可以求出每个 IGBT 器件在稳态电流经济运行区间内对应的桥臂暂态故障电流  $i_{fault}$  的范围, 记为  $R_2$ 。

根据 IGBT 器件暂态电流限制要求, 桥臂暂态故障电流应该小于暂态电流限值  $i_{fault\_max}$ 。因此可以根据范围  $R_2$ , 选取满足条件的 IGBT 器件。具体来说, 若待选 IGBT 器件满足条件  $\inf(R_2) < i_{fault\_max} < \sup(R_2)$ , 则可尝试调整  $U_{dc}$  的范围为  $R_1'$ , 得到新的桥臂暂态故障电流  $i_{fault}$  的范围, 记为  $R_2'$ , 使得  $\sup(R_2') < i_{fault\_max}$ , 此时可选取该器件; 若待选 IGBT 器件满足条件  $\sup(R_2) < i_{fault\_max}$ , 则可以选用该器件,  $U_{dc}$  的范围  $R_1$  保持不变, 并记  $R_1' = R_1$ ; 若待选 IGBT 器件满足条件  $\inf(R_2) > i_{fault\_max}$ , 则弃用该 IGBT 器件。

同时, 注意到  $i_{fault} < i_{fault\_max}$ , 将式(5)、式(6)、式(8)进行联立, 可得  $U_{dc}$  的自然范围  $R_N$ , 表达式如式(9)所示。

$$\begin{cases} R_N = \left( \frac{i_{fault\_max} - \sqrt{i_{fault\_max}^2 - 4AC}}{2A}, \frac{i_{fault\_max} + \sqrt{i_{fault\_max}^2 - 4AC}}{2A} \right) \\ A = \frac{t_p}{2L_{arm}}, C = k_{VBC} \times \left( \frac{1}{3} \times P_e + \frac{2P_e}{3M \cos \varphi} + \frac{2k_{(2)}P_e}{3M \cos \varphi} \right) \end{cases} \quad (9)$$

对  $R_1'$  和  $R_N$  求交集, 可以得到直流侧电压  $U_{dc}$  的取值范围  $R$ 。

## 2.3 直流海缆载流量限制

直流海缆在运行时, 各结构部分中产生的损耗热量向周围媒质散发, 将使周围媒质的温度升高。

由于高压直流海缆不存在交变的电磁场,故电缆线路的绝缘损耗可忽略,金属护套和铠装上几乎不产生损耗,其损耗主要是线芯的电阻损耗。单芯直流海缆额定载流量与导体温升及电缆结构中各部分等效热阻有关<sup>[12]</sup>。

当温度升高,使绝缘的温度等于直流海缆最高允许长期工作温度,此时流过直流海缆的负载电流称为海缆的长期容许电流。若直流海缆的长期容许电流大于或等于海上风电柔性直流输电工程的额定直流电流,则认为直流海缆可满足系统输送容量的要求。

在直流海缆选型过程中,若存在多种电压等级的直流海缆满足要求,则可选取直流电压等级最低的直流海缆,作为海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级。

## 2.4 直流电压等级确定流程

综上所述,海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定方法流程如图 2 所示。

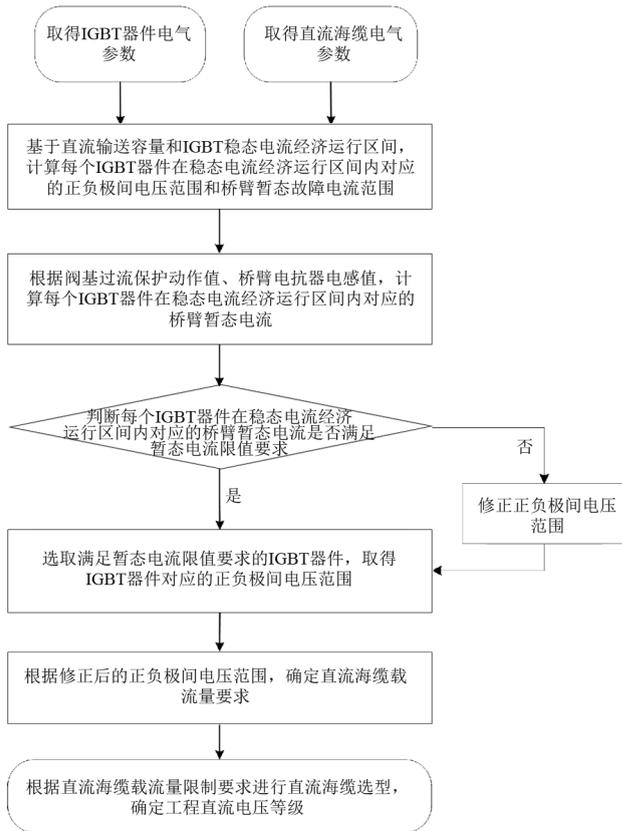


图 2 直流电压等级确定方法流程

## 3 工程实例分析

以某 900 MW 的海上风电柔性直流输电工程为例,对所提出的海上风电柔性直流输电工程的直流

电压等级确定方法进行进一步说明。

经调研,现阶段 IGBT 器件的主要电气参数包括额定电流和暂态电流限值,如表 1 所示;直流海缆的主要电气参数包括直流电压等级和最大导体截面对应的直流海缆载流量,如表 2 所示。

表 1 IGBT 器件电气参数

额定电流/A	暂态电流限值/A
1500	3000
2000	4000
3000	6000

表 2 直流海缆最大导体截面的载流量

直流电压等级/kV	最大导体截面/mm <sup>2</sup>	直流海缆最大载流量/A
±250	2500	2000
±320	2500	1875
±400	2500	1750

取联接变压器网侧功率因数  $\cos \varphi$  为 0.95,换流器调制比  $M$  为 0.85,桥臂电流二倍频分量相对桥臂电流基频分量  $k_{(2)}$  取 0.3,稳态电流经济运行系数  $\lambda$  取 0.50~0.65,阀基过流保护动作值可靠系数  $k_{\text{VBC}}$  取 1.2,  $t_p$  取 155  $\mu\text{s}$ ,  $L_{\text{arm}}$  取 60 mH。

根据上述参数,可以通过计算求出 IGBT 器件对应的工程直流电压范围,并进一步地计算每个 IGBT 器件在稳态电流经济运行区间内对应的桥臂暂态故障电流  $i_{\text{fault}}$  的范围。结果如表 3 所示。

表 3 IGBT 器件在稳态电流经济运行区间内的直流电压和桥臂暂态故障电流

输送容量/MW	额定电流/A	正负极间电压 $U_{\text{dc}}$ /kV	桥臂暂态故障电流/A
900	1500	641.2~833.6	2 899.1~3 197.3
900	2000	480.9~625.2	3 237.3~3 779.9
900	3000	320.6~416.8	4 183.0~5 152.2

由表 1 和表 3 可知,直流输送容量 900 MW,采用额定电流 1500 A 的 IGBT 器件,其暂态电流限值 3000 A 位于稳态电流经济运行区间内对应的桥臂暂态故障电流范围的最小值与最大值之间。据此可求得  $U_{\text{dc}}$  的范围在 746.0~1 576.6 kV,将此范围与表 3 中的  $U_{\text{dc}}$  范围求交集,修正后  $U_{\text{dc}}$  的范围为 746.0~833.6 kV,从而使得  $\sup(i_{\text{fault}}) < i_{\text{fault\_max}}$ ,满足工程应用需要。

采用额定电流 2000 A 和 3000 A 的 IGBT 器件,其在稳态电流经济运行区间内对应的桥臂暂态故障电流  $i_{\text{fault}}$  的最大值均小于暂态电流限值  $i_{\text{fault\_max}}$ ,故其均能够满足工程应用要求。

根据直流输送容量和修正后的 IGBT 器件在稳态电流经济运行区间内对应的正负极间电压的范围,计算直流海缆载流量要求,如表 4 所示。

表4 IGBT 器件在稳态电流经济运行区间内  
直流海缆载流量要求

输送容量/MW	额定电流/A	正负极间电压 $U_{dc}/kV$	直流海缆载流量/A
900	1500	746.0~833.6	1 079.6~1 206.4
900	2000	480.9~625.2	1 439.5~1 871.4
900	3000	320.6~416.8	2 159.3~2 807.0

根据表4所示的直流海缆载流量要求,结合取得的供选用的直流海缆的最大导体截面对应的直流海缆载流量,进行直流海缆选型。若有多种电压等级的直流海缆满足要求,选取直流电压等级最低的直流海缆。最终选择的直流海缆的直流电压等级即为海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级。针对表4直流电压和载流量要求进行直流海缆选型,根据表2收集的直流海缆参数可知:采用额定电流1500 A的IGBT器件,正负极间电压范围为746.0~833.6 kV,需选用直流电压等级为 $\pm 400$  kV的直流海缆,载流量为1 079.6~1 206.4 A,小于直流海缆最大载流量1750 A,可用;采用额定电流2000 A的IGBT器件,正负极间电压范围为480.9~625.2 kV,需选用直流电压等级为 $\pm 250$  kV的直流海缆,直流电流范围为1 439.5~1 871.4 A,小于直流海缆最大载流量2000 A,可用;采用额定电流3000 A的IGBT器件,正负极间电压范围为320.6~416.8 kV,直流电流范围为2 159.3~2 807.0 A,无符合的直流海缆,该IGBT器件弃用。

由于海上换流站直流电压等级越低,换流单元和直流场的过电压水平越低,海上换流站的体积和重量越小;再次,直流电压等级越低,直流海缆的绝缘要求越低,直流海缆的制造成本较小。因此,额定输送容量900 MW的海上风电柔性直流输电工程,推荐正负极间电压 $U_{dc}$ 为直流电压采用500 kV,即 $\pm 250$  kV直流电压等级。

## 4 结 论

上面基于实际工程建设经验,提出了一种应用于海上风电柔性直流输电工程中的直流侧电压等级确定方法。

基于IGBT器件稳态电流运行区间,给出了海上风电柔性直流输电工程的直流电压取值范围,并根据IGBT暂态电流限值,对直流电压取值范围进行修正。进一步根据直流海缆载流量限值要求,

确定工程的直流电压等级。并在此基础上,以某900 MW海上风电柔性直流输电工程为例,给出了工程案例的直流电压等级确定流程。

所提出的海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定方法,能够为海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定提供有效的计算方法,有利于降低工程建设成本,加快远海风电柔性直流输电工程建设。

## 参考文献

- [1] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,53(7):55-71.
- [2] 郑黎明,贾科,侯来运,等.基于奇异值分解的海上风电接入柔直系统的交流线路保护[J].中国电机工程学报,2020,40(增刊1):75-83.
- [3] 李景.用于海上风电并网的VSC-HVDC系统控制策略研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [4] 徐政.柔性直流输电系统(2版)[M].北京:机械工业出版社,2016:179-193.
- [5] 李健涛.海上风电场接入柔性直流电网的故障穿越策略研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [6] 李浩原,周国梁,李文津,等.海上风电送出交流高压单芯电缆并联通流特性研究[J].四川电力技术,2020,43(1):12-16.
- [7] 龚英明.高压直流同步触发控制对后续换相失败的影响研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [8] 赵毓君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2011.
- [9] Hong RAO, Yuebin ZHOU, Shukai XU, et al. Key technologies of ultra-high voltage hybrid LCC-VSC MTDC systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019,5(3):365-373.
- [10] 管敏渊.基于模块化多电平换流器的直流输电系统控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [11] 王姗姗,周孝信,汤广福,等.模块化多电平换流器HVDC直流双极短路子模块过电流分析[J].中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
- [12] 卢毓欣,赵晓斌,李岩,等.海上风电送出用柔性直流换流站电气主接线[J].南方电网技术,2020,14(12):25-31.

## 作者简介:

陈鹏(1991),男,硕士,工程师,主要从事高压直流输电和柔性直流输电技术方面的研究工作。

(收稿日期:2021-12-21)