

# VSC 直流侧故障限流方案及其特性分析

狄雅,张金华,钱阳

(南京工程学院 电力工程学院,江苏 南京 211167)

**摘要:** 直流配电网中,电压源型换流器(VSC)直流侧线路发生严重金属性短路故障时,故障电流具有上升速度快、峰值大的特点,搭配直流断路器隔离故障时,大大增加了对直流断路器速动性和开断能力的要求。基于VSC双极短路故障特征,提出了在直流线路中串入剩余电流动作保护器(RCD)电流峰值抑制电路的故障限流方案,该限流电路通过控制晶闸管的开断不仅可以截断直流侧电容向故障点的放电回路,还可以有效降低故障电流峰值,并能限制故障稳态电流为给定参考值。利用PSCAD/EMTDC仿真平台对VSC双极短路故障及所提限流方案进行仿真测试,并与其他两种故障限流方案的效果进行比较,验证了所提基于RCD电流峰值抑制电路这一故障限流方案的优越性。

**关键词:** 电压源型换流器;故障限流;剩余电流动作保护器电流峰值抑制电路

**中图分类号:** TM744 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25126

## Analysis of a Fault Current Limiting Scheme for VSC DC Side Fault

DI Ya, ZHANG Jinhua, QIAN Yang

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

**Abstract:** In DC power grid, when serious metallic short circuit fault occurs in the DC side line of voltage source converter (VSC), the fault current has the characteristics of a fast rising speed and a large peak. The DC circuit breaker is used to isolate the fault, which greatly increases the requirements for the quick action and breaking capacity of the DC circuit breaker. Based on the VSC bipolar short circuit fault characteristics, a fault current limiting scheme with residual current operated protective device (RCD) current peak suppression circuit in series with the DC line was proposed. The current limiting circuit, which controlled the opening and closing of the thyristor, not only interrupted the discharge loop of the DC side capacitor to the fault point, but also effectively reduced the peak fault current and limited the fault steady state current to a given reference value. The PSCAD/EMTDC simulation platform was used to test the VSC bipolar short circuit fault and the proposed current limiting scheme, and the effectiveness of the proposed scheme was compared with that of the other two fault current limiting schemes, which verified the superiority of the proposed scheme based on energy transfer circuit.

**Key words:** voltage source converter (VSC); fault current limiting; residual current operated protective device (RCD) current peak suppresses circuit

电压源型换流器(voltage source converter, VSC)因具有成本较低、能够独立控制有功和无功功率、不存在换相失败等优点<sup>[1-2]</sup>,广泛应用于直流输电领域。当VSC直流侧线路发生故障时,由于换流器出口处稳压电容的存在,故障电流会迅速增大,对换流器中耐过电流能力较弱的电力电子器件造成巨大冲击,同时对直流断路器的分断能力和速动性提出了较高的要求<sup>[3-4]</sup>。因此,研究VSC故障电流限制方案对降低故障电流上升

速率及峰值具有重要意义。

目前关于VSC直流侧故障限流的方法<sup>[5-9]</sup>可归纳为两大类。一类是改变VSC故障控制策略实现故障限流,如文献[5]在VSC控制回路中引入与直流侧电流微分成正比的前馈项,故障后该项发挥作用限制故障电流,但该方案仅适用于IGBT闭锁前的短暂时段,限流效果有限。另一类是增设故障限流电路来降低故障电流。文献[6]提出了一种电感并联吸能电阻的限流方案,将电感串

**基金项目:** 国家自然科学基金(52107098);南京工程学院引进人才科研启动基金(YKJ201965)

**作者简介:** 狄雅(1998—),女,硕士研究生,Email: 19850860998@126.com

联在换流器出口处能有效减小故障电流的峰值和上升速率,增设吸能电阻以消耗电感上储存的能量,缩短故障电流熄灭时间,减少直流断路器吸收能量。文献[7-8]在VSC直流侧出口处增设电阻型超导限流器,正常运行时表现为零阻或极小阻值,故障后可在几毫秒内过渡为大电阻,限流效果明显。但超导装置需要配套相应的超导材料或技术,方案的经济性和实用性相对较差。文献[9]提出采用绝缘栅双极晶闸管与二极管并联在电容所在支路中,在直流侧发生故障时,切断电容放电回路,但该方法无法限制故障稳态电流。

由以上分析可见,为了在故障后全时域均获得较好的限流效果,宜采用换流器直流侧装设合理的故障限流器的限流方案。为此,本文提出一种基于RCD的故障限流方案,通过在VSC出口处串联一个可控投切的RCD电流峰值抑制电路,将直流侧电容能量及交流侧输送能量进行截断和消耗,从而降低流过线路的故障电流。PSCAD仿真验证所提方案的有效性,并与其他两种故障限流方案进行效果比较。

### 1 VSC 直流侧极间短路故障特性分析

两电平VSC广泛应用于中低压直流配电网和直流微网中,其电路结构如图1所示。采用脉宽调制(PWM)控制方式控制交流侧换流器出口处电压的幅值和相位,从而调节换流器与交流侧系统之间传输的有功和无功功率<sup>[10]</sup>。

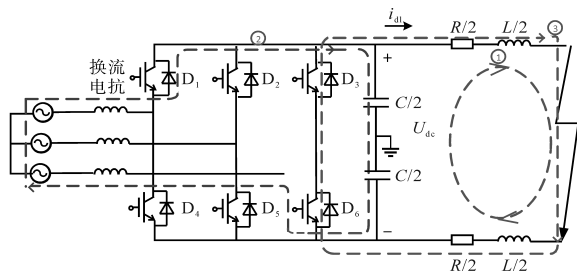


图1 两电平VSC电路结构及故障电流通路

Fig.1 Two-level VSC circuit structure and fault current path

VSC直流侧故障有接地故障、断线故障、极间短路故障,其中极间短路故障对换流器等设备的危害最为严重。当VSC直流侧线路发生极间短路故障时,故障电流通路具有阶段性特征<sup>[11-12]</sup>,如图1中虚线所示。第一个阶段:直流侧负载被短路后,VSC直流侧并联电容迅速向故障点放电,形成RLC二阶放电回路(通路①)。电容电压 $U_{dc}$ 衰减,直流侧故障电流 $i_{dl}$ 迅速增大,IGBT很快

达到过电流限值而闭锁。第二个阶段:当电容电压下降到交流侧线电压时,二极管承受正向电压开始交替导通,进入不可控整流电路阶段(通路②)。此时直流侧电容与交流侧系统同时向故障点馈能。若回路阻抗满足 $R > 2\sqrt{L/C}$ ,电容电压不会振荡过零,电路最终将达到三相不可控整流稳态运行。若 $R < 2\sqrt{L/C}$ ,电容电压会振荡过零,此时交流侧二极管全部导通,电容电压被钳位为零,进入第三个阶段:直流侧电感续流,流过所有二极管(通路③),交流侧相当于发生三相短路。电感放电结束后,二极管电流中的正弦分量变为0,交流侧不再三相短路,二极管全部导通阶段结束,整个VSC将会达到一个二极管自然换相导通的新稳态,直流侧电压和故障电流逐渐变小并达到一个新的稳定值。

故障期间VSC直流侧 $i_{dl}$ 、直流侧电压 $U_{dc}$ 、交流侧二极管电流 $i_{Dj}$ 的典型波形如图2所示。由图2中可知,直流侧电容在VSC直流线路发生故障后(即 $t_0$ 时刻)迅速开始放电,几毫秒内故障电流便能达到最大值,随着电容持续放电,在 $t_1$ 时刻电容电压下降至零。在 $t_1-t_2$ 阶段,也就是上文中故障电流通路中的第三个阶段,交流侧二极管全部导通,流过二极管的电流达到正常运行时的十几倍。直流侧故障电流值逐渐趋于稳定,VSC达到新稳态。

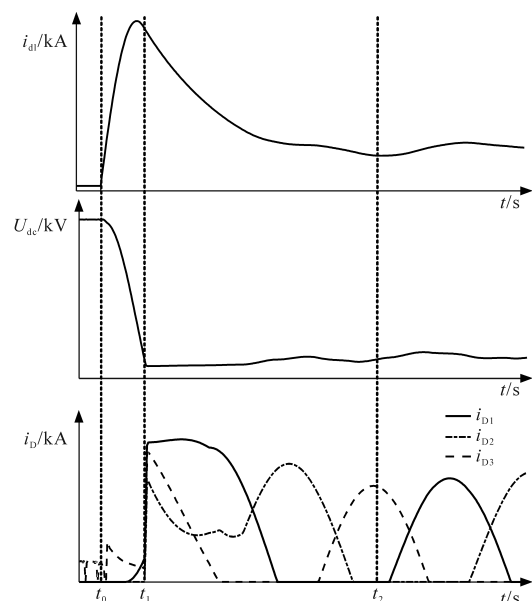


图2 VSC直流侧电流电压变化曲线

Fig.2 Waveforms of current and voltage in the DC side of VSC

由以上分析可知,VSC直流侧发生双极短路故障过程迅速,且故障电流峰值较大。VSC内部

二极管在第三个阶段同时受到交流侧三相短路电流和直流侧电感续流的双重冲击而急剧过流。此外,直流侧电压的快速跌落还会引起交流侧短暂时过电流。极大的故障电流无论对换流器件还是断路器的性能都提出了较高的要求。

## 2 基于RCD的电流峰值抑制电路的故障限流方案

为降低VSC直流侧故障时的故障电流峰值,故障限流方案如图3所示,本文在VSC直流侧出口处增设RCD电流峰值抑制电路进行故障限流。系统中未发生故障时,可控开关器件V始终导通,RCD电流峰值吸收支路处于旁路状态。当故障发生后,控制投切RCD电流峰值支路串联在直流侧电容C放电回路中,使得直流侧电流 $i_{dl}$ 被控制为给定的限值。

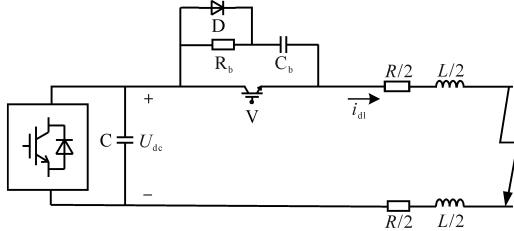


图3 基于RCD电流峰值抑制电路的故障限流方案

Fig.3 Fault current limiting scheme based on RCD current peak suppression circuit

图3中电流峰值抑制电路的工作原理如下:当V关断时,直流侧电容的放电回路被RCD吸收电路中的电容 $C_b$ 所阻断,故直流电容在V关断的这一周期内无法向故障处放电。而VSC交流侧向故障处输出的电流则全部被电容 $C_b$ 吸收。当V导通时,RCD吸收电路中电容 $C_b$ 吸收的能量再通过 $R_b$ 来消耗。RCD设计选型方法如下:

$$\begin{cases} C_b \geq L_{\Sigma} i_{dl,n}^2 / U_{dc,n}^2 \\ 2\sqrt{L_{\Sigma} / C_b} \leq R_b \leq 1 / (3C_b f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $L_{\Sigma}$ 为直流故障回路电感总和; $i_{dl,n}$ 为直流侧电流额定值; $U_{dc,n}$ 为直流电压额定值; $f$ 为系统频率。

RCD电流峰值抑制电路的限流控制框图如图4所示。 $Q$ 为开关V的控制信号, $ctrl$ 为启动限流控制的触发信号,将直流侧电流与限定值进行比较,高于限定值时,RCD电流峰值抑制电路才会被启动。当VSC正常运行时,触发信号 $ctrl=0$ ,定电流控制输入为0,开关V导通,RCD电流峰值电路不投入使用。当VSC发生双极短路故障时,

触发信号 $ctrl$ 由0变为1,此时直流侧电流 $i_{dl}$ 与限定值 $i_{dl}^*$ 进行比较,偏差信号经PI调节后得到调制信号 $D$ ,再与三角载波比较后输出触发信号 $Q_1$ 。通过控制开关V的导通和关断,直流侧电流 $i_{dl}$ 最终稳定在 $i_{dl}^*$ 。

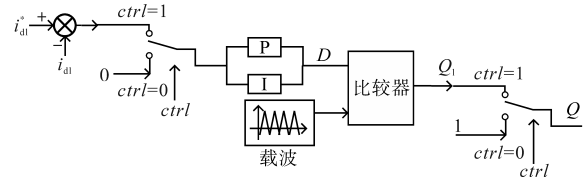


图4 故障限流电流的控制框图

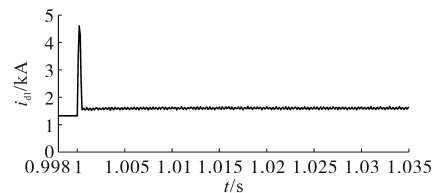
Fig.4 Control block diagram of the fault current limiting circuit

需要说明的是,在触发电路中,为了防止RCD电流峰值抑制电路在正常情况下误动,可考虑直流侧负载在 $\pm 10\%$ 波动下的值来设定电平比较器的阈值。

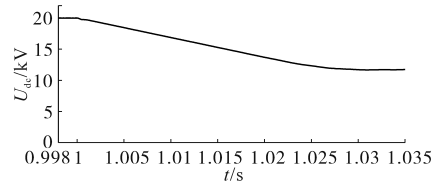
## 3 仿真实验

为分析验证所提VSC故障限流方案的性能,在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建了图3所示的含RCD电流峰值抑制电路的两电平VSC仿真模型,相关参数如下:换流器额定功率100 MW,直流侧电压 $\pm 10$  kV,直流电容5 mF,直流线路单位长度阻抗参数 $r_0=0.004 \Omega/\text{km}$ , $L_0=0.04 \text{ mH}/\text{km}$ ;能量转移限流电路中 $R_b=15 \Omega$ , $C_b=0.04 \text{ mF}$ 。故障后限流参考值 $i_{dl}^*$ 设置为1.2倍额定电流。

仿真距换流器出口10 km处发生金属性双极短路故障,故障发生时刻为 $t=1 \text{ s}$ ,故障发生1 ms后IGBT闭锁,故障持续0.2 s。VSC直流侧电流、电压的仿真波形如图5所示。



(a)VSC直流侧电流



(b)VSC直流侧电压

图5 采用基于RCD电流峰值抑制电路的故障限流方案时的电流电压波形

Fig.5 Current and voltage waveforms using a fault current limit scheme based on RCD current peak suppression circuit

与未经限流时的故障波形对比,采用基于RCD电流峰值抑制电路的故障限流方案后,故障电流峰值从42.985 kA降至4.533 kA,短路电流抑制率达到89.45%,直流电流稳定为限值1.6 kA。同时,由于可控开关器件V关断时,电容放电通道被阻断,交流电源可对直流电容重新充电,减缓了直流侧电压的下降速率。最终,直流电压稳定输出在11.916 kV左右。

为进一步说明本文所提故障限流方案的性能,以文献[8]所提的基于改进控制策略的故障限流方案以及文献[10]所提的基于电阻型超导限流器(R-SFCL)的故障限流方案为代表,对3种方案的性能进行对比分析。仿真中,文献[8]方法中的虚拟电阻表达式如下:

$$R_{vir} = \frac{sT_1}{1 + sT_2} i_{dl} \quad (2)$$

其中

$$T_1 = \frac{P_n L_\Sigma}{i_{dl,n} U_{dc,n}}$$

式中: $P_n$ 为换流器的额定功率; $L_\Sigma$ 为直流故障回路电感总和; $T_2$ 为一阶惯性系数,取值为开关截止频率的1/10。

文献[10]方法中的超导电阻采用的表达式为

$$R_{sc} = R_{max} (1 - e^{-\frac{t-t_c}{T_{sc}}}) \quad (3)$$

式中: $R_{max}$ 为超导限流器的最大电阻; $t_c$ 为超导限流器失超时间; $T_{sc}$ 为超导电阻从0到最大阻值的过渡时间,设置为0.001 s。

在VSC直流侧发生双极短路故障时,故障电流从故障发生到进入电感续流阶段,故障回路中电阻往往仅有几毫欧,因此串入0.6~3 Ω的电阻即可使故障电流的得到充分的抑制,分别设置最大电阻为0.6 Ω, 1.0 Ω, 1.4 Ω, 1.8 Ω, 2.2 Ω, 2.6 Ω, 3 Ω的R-SFCL串入VSC出口处,进行限流效果对比,系统短路电流变化情况如图6所示,短路电流峰值对比如表1所示。

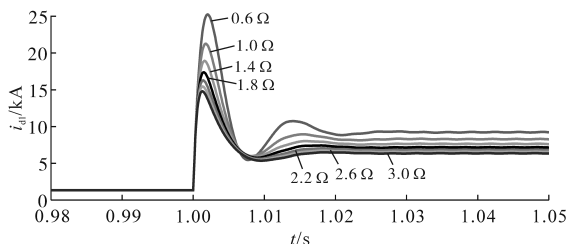


图6 不同失超电阻故障电流波形

Fig.6 Fault current waveforms of different quench resistors

表1 短路电流峰值对比

Tab.1 Short-circuit current peak comparison

R-SFCL最大阻值/Ω	短路电流峰值 $I_{dc}$ /kA	短路电流抑制率/%
0.6	25.229	41.53
1	21.249	50.75
1.4	18.925	56.14
1.8	17.37	59.74
2.2	16.268	62.29
2.6	15.42	64.26
3	14.775	65.76

接入最大电阻为0.6 Ω, 1.0 Ω, 1.4 Ω, 1.8 Ω, 2.2 Ω, 2.6 Ω, 3 Ω的电阻型超导限流器(R-SFCL)时,短路电流峰值分别在故障发生后2.1 ms, 1.8 ms, 1.6 ms, 1.5 ms, 1.4 ms, 1.3 ms, 1.3 ms时达到峰值,在故障发生28 ms后均达到稳定值,分别为9.212 kA, 8.307 kA, 7.678 kA, 7.176 kA, 6.818 kA, 6.549 kA, 6.343 kA。超导电阻最大值 $R_{max}$ 的取值决定了限流效果,由图6和表1可以看出电阻越大,限流效果越好,但随着 $R_{max}$ 的增大,限流效果越来越不明显。因此,综合考虑系统的建设成本和对系统动态特性的影响,本文选取2.2 Ω作为R-SFCL的最大电阻。3种故障隔离方案下VSC直流侧电压、电流波形以及无限流措施时的电压电流波形如图7所示。

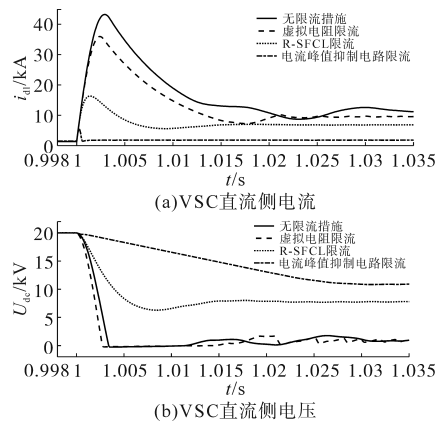


图7 3种故障限流方案效果对比

Fig.7 Results comparison of three fault current limiting schemes

分析图7可知,文献[8]的虚拟电阻限流方案在换流器闭锁前的1 ms内发生作用,能够控制有功电流反向流动,减少了直流电容向故障点放电,在故障发生后2 ms时故障电流的峰值被降至35.937 kA,短路电流抑制率为16.86%。由于直流侧电容还向交流侧馈能,直流电压下降速度相比于无限流措施加快,且最终也降为0 kV。

采用文献[10]的电阻型超导限流器(R-SFCL)限流方案时,在IGBT闭锁后的1.3 ms时,直流侧

故障电流峰值减少至16.268 kA,短路电流抑制率为62.29%,限流效果明显。故障回路中的阻尼系数增大,直流电压不再振荡过零,由仿真图可知,直流侧电压在经过14 ms后达到稳定值7.773 kV,下降速度与无限流措施相比明显变缓。

相比于其他两种限流方案,无论直流断路器何时动作隔离故障,采用基于RCD电流峰值抑制方案时故障电流均小于其他两种方案,降低了对直流断路器开断能力的要求,且直流电压也能稳定在一个较高的电压值。

## 4 结论

通过对典型的两电平电压源换流器直流侧双极短路故障特征进行分析,可知并联电容放电是导致直流侧故障电流激增和直流电压骤降的主要原因。提出在VSC直流侧电容放电回路中串联一种可控投切的电流峰值抑制电路的故障限流方案,并得到如下结论:

1) 针对换流器的故障隔离方案应该在直流侧电容全部放电前完成,若仅依赖直流断路器对故障进行隔离,不仅对其开断容量和速动性要求较高,其成本也会不断增加,因此,从经济性和可靠性角度出发需要合适的限流器进行配合。

2) 本文所提方案能够快速对故障进行响应,且能显著降低故障暂态电流峰值,具有故障稳态电流可控的优点。经与其他两种典型故障限流方案进行效果对比分析,发现所提方案具有更明显的故障电流峰值抑制和直流电压维稳效果。且从直流断路器以及自身限流成本而言具有良好的经济性。

### 参考文献

- [1] 曾杰,张弛,袁志昌,等. 实现分区均衡的直流配电系统控制方法研究[J]. 电气传动,2019,49(9):46-51.  
ZENG Jie,ZHANG Chi,YUAN Zhichang, et al. Research on control strategy of DC distribution grid with balanced load ratio between connected AC zones[J]. Electric Drive,2019,49(9):46-51.
- [2] 刘剑,邵能灵,范春菊,等. 多端VSC-HVDC直流线路故障限流及限流特性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5122-5133,5393.  
LIU Jian,TAI Nengling,FAN Chunju, et al. Fault current limitation and analysis of current limiting characteristic for multi-terminal VSC-HVDC DC lines[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(19):5122-5133,5393.
- [3] 王军龙,叶磊,程兰芳,等. 兼备直流故障限流及开断功能的新型直流电网关键设备[J]. 电气传动,2022,52(2):40-44,52.  
WANG Junlong, YE Lei, CHENG Lanfang, et al. New type of key equipment with DC fault current limiting and breaking function of DC grid[J]. Electric Drive,2022,52(2):40-44,52.
- [4] 李斌,何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(12):3026-3036.  
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(12):3026-3036.
- [5] 唐欣,海帆,湛若水. 直流配电网中送端换流器的故障限流控制策略[J]. 高电压技术,2021,47(10):3424-3429.  
TANG Xin, HAI Fan, ZHAN Ruoshui. Fault current limiting control strategy of feeder converter in DC distribution network[J]. High Voltage Engineering,2021,47(10):3424-3429.
- [6] 刘剑,何雨微,徐祥海,等. 柔性直流电网故障限流技术与探讨[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):9-16.  
LIU Jian, HE Yuwei, XU Xianghai, et al. Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):9-16.
- [7] 吴跃斌,祁天星,马涛,等. 直流微电网故障限流特性分析[J]. 电网与清洁能源,2021,37(6):18-28.  
WU Yuebin, QI Tianxing, MA Tao, et al. Analysis of fault current limiting characteristics of DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy,2021,37(6):18-28.
- [8] 金晶,殷勤. 含电阻型超导限流器的南澳柔性直流系统故障特性分析[J]. 高压电器,2020,56(12):286-291.  
JIN Jing, Yin Qin. Fault characteristics analysis of Nan'ao flexible DC system with resistance superconducting current limiter [J]. High Voltage Engineering,2020,56(12):286-291.
- [9] 卓超然,张笑天,张雄,等. 支撑电容可分离的直流变压器短路故障电流限流控制方法[J]. 电工技术学报,2022,37(2):424-432.  
ZHUO Chaoran, ZHANG Xiaotian, ZHANG Xiong, et al. Short-circuit fault current limiting control method of DC transformer with separable supporting capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(2):424-432.
- [10] LIU J, TAI N L, FAN C J, et al. A hybrid current-limiting circuit for DC line fault in multiterminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(7):5595-5607.
- [11] 胡竟亮,高一波,严玉婷,等. 电压源换流器直流侧短路故障特性分析[J]. 机电工程,2014,31(4):512-516,544.  
HU Jingjing, GAO Yibo, YAN Yuting, et al. DC side short-circuit fault analysis of VSC[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2014,31(4):512-516,544.
- [12] 毕天姝,李猛,贾科,等. 直流配电网保护技术评述[J]. 南方电网技术,2016,10(3):53-57,6.  
BI Tianshu, LI Meng, JIA Ke, et al. Review of DC distribution network protection technology[J]. Southern Power System Technology,2016,10(3):53-57,6.

收稿日期:2023-05-10

修改稿日期:2023-08-03