

# 含DAB型直流变换器的中低压直流配电系统 极间短路故障穿越方法

王守相<sup>1,2</sup>,王振宇<sup>1,2</sup>,刘琪<sup>1,2</sup>,赵倩宇<sup>1,2</sup>,张文煜<sup>3</sup>,刘宏勇<sup>3</sup>

(1. 天津大学 教育部智能电网重点实验室,天津 300072;2. 天津市电力系统仿真控制重点实验室,天津 300072;  
3. 国网冀北张家口风光储输新能源有限公司,河北 张家口 075000)

**摘要:**极间短路故障是直流配电系统中最为严重的故障类型,当含双有源桥(DAB)型直流变换器的直流配电系统中压侧发生极间短路故障时,DAB闭锁,低压侧电压大幅下跌,故障清除后恢复速度较慢。为解决上述问题,提出了一种新型故障穿越方法。通过对传统DAB结构进行改进,增设故障电流阻断模块和补偿电容支路,能在故障发生后迅速识别、切断故障并投入补偿电容。故障持续期间,DAB无需闭锁,依靠模块电容以及补偿电容向低压侧负荷进行供电,有效改善了低压侧电压跌落。故障清除后电容能够快速充电至正常运行状态。PSCAD/EMTDC平台中的仿真结果验证了所提方法能够有效减小中压侧极间短路故障对于负荷的影响,并且具有良好的故障恢复特性。

**关键词:**直流配电系统;极间短路故障;DAB型直流变换器;故障穿越;故障电流阻断模块;补偿电容支路

**中图分类号:**TM 46

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202203029

## 0 引言

近年来,随着能源互联网建设的加快推进及电力电子技术的快速发展,柔性直流配电网逐渐成为国内外学者的研究重点<sup>[1-2]</sup>。相较传统交流配电网,柔性直流配电网具有供电容量大、线路损耗小、电能质量好、无需无功补偿、适用于各类电源和负载接入等优点<sup>[3]</sup>,可以有效提高供电容量与电能质量,快速独立地控制有功、无功功率,降低电能损耗和运行成本,协调大电网与分布式电源之间的矛盾,充分发挥分布式能源的价值和效益<sup>[4]</sup>。

直流电力电子变压器是直流配电网的核心设备<sup>[5]</sup>,能够实现中高压直流配电网和低压直流微电网的电压变换、能量交换、电气隔离等<sup>[6]</sup>。双有源桥DAB(Dual Active Bridge)型直流变换器具有电气隔离、动态响应速度快、功率密度高等优点<sup>[7-8]</sup>,被广泛应用于直流配电系统变压器。直流系统故障类型主要分为极间短路故障、单极接地故障和断线故障<sup>[9]</sup>,其中直流极间短路故障是危害最为严重的故障类型,对直流配电系统将造成严重损害<sup>[10]</sup>。由于DAB高、低压侧均存在集中电容,当发生外部故障时,电容迅速放电,电容电压大幅下跌,故障清除后,电容须重新充电才能完成重启<sup>[11]</sup>,研究DAB短路后的故障穿越方法对维持直流配电网稳定运行以及提高负荷供电可靠性具有重要意义。

文献[12]提出了一种输入侧间接串联、输出侧并联的直流变换器拓扑,可有效避免中压侧电容的快速放电问题,但增大了器件电压应力和控制复杂度,且故障后低压侧负荷电压会有较大程度跌落。文献[13]提出一种改进型输入串联输出并联(ISOP)拓扑,采用中、低压2侧故障电流阻断及限流控制配合实现系统故障穿越,但中压侧故障穿越效果一般,负荷电压仍有较大幅度跌落。文献[14]提出通过在DAB前级增加半桥开关管,可以在故障后完全切断与直流母线的电气连接,无需增加额外的直流断路器,但是未涉及故障穿越过程中低压侧配合逻辑分析。文献[15]提出了一种基于储能的故障快速恢复策略,利用储能与换流器之间的协调配合技术,实现换流器闭锁期间重要负荷的不间断供电和故障快速恢复,但增加了投资运行成本。文献[16]提出了一种基于储能单元改进下垂控制的故障穿越控制策略,可以有效缩短电压调节时间,但短时间内仍会产生较大电压波动,且当故障持续时间增加时,电压调节效果将变差。文献[17]提出了一种基于控制保护协同的直流配电系统线路保护方法,解决了变换器快速闭锁后无法给保护提供有效故障信息的问题,但仅分析了DAB输出侧的故障。文献[18]提出了一种直流配电线路故障测距方法,推导了故障距离与系统参数及谐波电流间的函数关系,通过对故障后RLC谐振阶段的电容放电电流进行频谱分析,从而实现故障测距,但并未涉及中低压的故障穿越。文献[19]提出了一种新型模块化多电平换流器(MMC)与DAB相结合的直流变换器拓扑,同时利用线路阻抗限制短路电流,可以在故障后进行自动限流,但其

收稿日期:2021-11-15;修回日期:2022-01-27

在线出版日期:2022-03-25

基金项目:河北省省级科技计划项目(20312102D)

Project supported by the Provincial S&T Program of Hebei Province(20312102D)

只能以三电平模式工作,且未给出故障后中低压的配合方法。文献[20]在DAB输入侧增设了全桥模块,通过对控制方式的优化与选择,合理减小重合闸时高压侧电压实际值与参考值的差值来达到抑制冲击电流的效果,但其拓扑结构及控制方式较为复杂。

本文针对含DAB型直流变压器的中低压直流配电系统,首先研究了中压侧极间短路的故障特性和DAB中压侧模块电容放电机理,随后针对短路后电容迅速放电,极间电压大幅下降影响负荷稳定供电这一问题提出了一种新型故障穿越方法:通过增设故障电流阻断模块和补偿电容支路对DAB结构进行改进,所提方法能够在故障后迅速识别并切断故障电流通路,同时同步投入补偿电容,故障持续期间,依靠中压侧模块电容剩余电量以及补偿电容电量向低压侧负荷进行短期持续供电,缓解低压侧电压跌落,最大限度地降低中压侧极间短路故障对于负荷的影响;另一方面,由于故障后电容短路放电回路被迅速切断,电容电量损失较小,故障清除后能够快速充电至正常运行状态,故障恢复特性较好。

## 1 极间短路故障机理

含DAB型直流变压器的典型中低压直流配电系统如图1所示。图中: $C_H$ 、 $C_L$ 分别为DAB中、低压侧模块电容; $L_S$ 为回路电感。中压侧电压等级为 $\pm 10$  kV,采用双端“手拉手”型拓扑结构,通过2台MMC与交流主网相连接,低压侧电压等级为 $\pm 375$  V,通过DAB型DC/DC变换器与中压直流母线连接,DAB低压侧供给负荷用电。

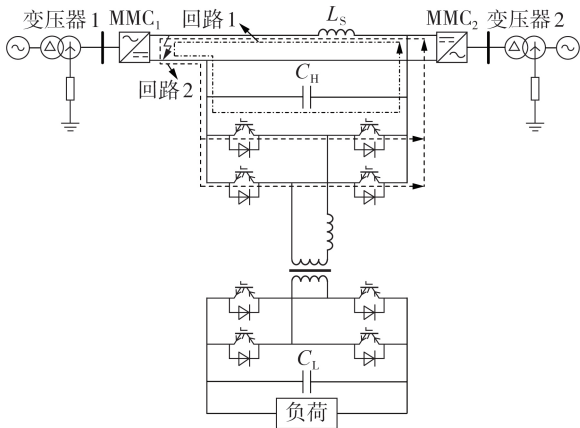


图1 含DAB型直流变压器的典型中低压直流配电系统拓扑结构

Fig.1 Topology structure of typical medium- and low-voltage DC distribution system with DAB-type DC transformer

中压侧发生极间短路故障后,DAB中压侧模块电容将通过短路点迅速放电,当端口电流、电压超过一定范围时,DAB内部电力电子模块会迅速闭锁,由

于DAB模块中高频变压器的电气隔离作用,影响直流端口故障特性的主要来源是DAB模块中靠近故障点的一侧,可将极间故障发展过程分为2个阶段。

1)第一阶段,电容放电阶段。该过程如图1中回路1所示,故障发生后,电容开始向外电路放电,当电容电压为正值时,向H桥内的反并联二极管两端施加负电压,正向电流无法导通,此时模块电容、回路电感以及过渡电阻构成RLC串联谐振电路,电容中的能量将被电感所吸收。

2)第二阶段,电感续流阶段。该过程如图1中回路2所示,电容电压下降为0后,不再放电,当电容电压第一次经过零点后,二极管将满足导通条件,此时电感电流将经过H桥的反并联二极管进行续流,电容支路被旁路,短路电流进入电感续流阶段,该阶段电感通过放电回路持续放电,直至短路电流消失。

假设电容 $C_H$ 的电压为 $U_C$ ,回路故障电流为 $I_{dc}$ ,故障后回路1的基尔霍夫电压定律(KVL)方程为:

$$L_S C_H d^2 U_C / dt^2 + R_f C_H dU_C / dt + U_C = 0 \quad (1)$$

式中: $R_f$ 为过渡电阻; $t$ 为时间。

通常,实际系统中, $R_f \ll \sqrt{L_S / C_H}$ ,因此电容短路放电过程是一个已知电路初始条件的2阶欠阻尼振荡衰减过程,电容电压和回路电流初始条件可以表示为:

$$\begin{cases} U_C(0^-) = U_C(0^+) = U_C \\ I_{dc}(0^-) = I_{dc}(0^+) = I_{dc} \end{cases} \quad (2)$$

因此电容电压以及回路电流可以分别表示为:

$$U_C(t) = U_C \omega_0 / \omega_d e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t - \theta) \quad (3)$$

$$I_{dc}(t) = U_C / (\omega_d L_S) e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \alpha = R_f / (2L_S) \\ \omega_0 = 1 / \sqrt{L_S C_H} \\ \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \\ \theta = \arctan(\alpha / \omega_d) \end{cases} \quad (5)$$

由式(3)可知,电容电压过零点时间 $t_1$ (即第一阶段RLC串联谐振结束时间)为:

$$t_1 = (\theta + \pi/2) / \omega_d \quad (6)$$

可见,电容放电只经历了极短的时间,随后电容电压经过零点,二极管导通续流。

在电感续流阶段,故障电流可以表示为:

$$I_{dc}(t) = I_{dc_1} e^{-t/\tau} \quad (7)$$

式中: $I_{dc_1}$ 为 $t_1$ 时刻回路电流; $\tau = L_S / (R_f + R_{VD})$ , $R_{VD}$ 为二极管正向导通电阻。

## 2 故障穿越方法

由前文分析可知,极间短路故障后电容迅速放电,电容电压大幅跌落,对负荷稳定供电造成影响,针对这一问题,提出了一种基于中压侧故障快速识



别与故障电流阻断的极间短路故障穿越方法。

由于中压侧发生极间短路故障后,极间电压迅速降为0,在DAB中压侧设置故障快速检测装置,当检测到极间电压下降到一定阈值后迅速投入故障电流阻断装置,阻断电容向中压侧故障点放电,缓解电容电压的跌落;同时将电容补偿支路同步投入,故障期间DAB内部电力电子模块无需闭锁,由中压侧模块电容剩余电量以及补偿电容电量向低压侧提供能量,减小低压负荷侧电压波动幅度。由于中压侧模块电容电量没有通过故障点完全放电,故障恢复后,电容充电过程大幅缩短。故障电流阻断模块与电容补偿支路如附录A图A1所示。

### 2.1 故障识别

由前文分析可知,中压侧极间短路故障发生后,极间电压迅速跌落至0,故障清除后,电压能够重新恢复,在DAB中压输入侧设置直流电压不平衡保护,判据为:

$$\begin{cases} U_{dc} < U_{set} \\ U_{set} = 0.5U_{Base} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $U_{dc}$ 为直流线路极间电压; $U_{set}$ 为直流电压不平衡保护动作的阈值; $U_{Base}=20\text{ kV}$ ,为直流线路极间额定电压。考虑保护的可靠性等因素,取动作阈值为直流线路极间额定电压的一半。单极接地短路故障发生后,极间电压不会发生变化,故该保护只反映直流线路的对称故障,正常运行及不对称故障时保护不会动作。

### 2.2 故障电流阻断

DAB中压侧故障电流阻断装置见图2。故障电流阻断模块采用绝缘栅双极型晶体管(IGBT)与二极管反并联结构,并在IGBT支路设置限流电感 $L_c$ 和限流电阻 $R_c$ ,考虑到单个IGBT的耐压能力较低,可使用 $n$ 个IGBT( $Q_{c1}, Q_{c2}, \dots, Q_{cn}$ )串联均压的形式。选用目前较为成熟的4500 V电压等级的IGBT,为满足耐压水平要求,IGBT串联数量设置为5个。

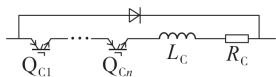


图2 DAB中压侧故障电流阻断装置  
Fig.2 Fault current blocking device  
at medium-voltage side of DAB

阻断过程主要分为3个阶段。

1)故障前阶段。正常运行时, $Q_c$ 始终保持导通状态,中压侧电流可通过二极管正向导通支路以及IGBT支路对DAB模块电容充电和对负荷输送功率。

2)故障后初始阶段。当电压不平衡保护识别中压侧极间短路故障时,迅速给 $Q_c$ 施加关断信号,由于二极管反向阻断的作用,电容放电电流只能通过IGBT支路馈入中压侧短路点,通过对IGBT开断的

控制即可迅速切断电容放电电流。由前文分析及式(4)、(5)可知:在IGBT支路设置限流电感和限流电阻,能够有效降低闭锁前电容放电速率与峰值,从而给阻断装置的投入留有一定时间裕度;另一方面,由于系统启动初期受电容充放电电流的影响,阻断模块内部容易形成电感续流环流,加入限流电阻能够加速续流衰减,减小电感续流环流对回路的影响。

3)故障清除后恢复阶段。中压侧故障清除后,当极间电压高于保护动作门槛值时, $Q_c$ 重新导通,电容开始充电,系统逐渐恢复至正常运行状态。

### 2.3 电容补偿支路

电容补偿支路如附录A图A1框2中支路所示,同样采用IGBT与二极管反并联的结构。正常运行时,电容补偿支路IGBT( $Q_s$ )导通,补偿电容充电,待充电完成后将 $Q_s$ 断开;故障发生后,电流阻断模块在投入的同时给 $Q_s$ 施加导通信号,投入补偿电容,其与中压侧模块电容共同向低压侧负荷供电,减小电压下降幅度,维持负荷供电稳定性,故障恢复后补偿支路自动断开。

### 2.4 DAB输出侧分析

正常运行期间,直流中压侧通过DAB向低压负荷侧输送功率。中压侧极间短路故障发生后,在阻断模块投入前,中压侧模块电容通过短路点放电,电容电压迅速下降,由于阻断模块中反向二极管的存在,电容放电仅能通过具有限流电感的IGBT支路进行,电容放电速度大幅减缓。在故障发生后至阻断前这一阶段,中压侧不再向低压侧输送能量,回路中存在电感续流,呈衰减趋势。由于整个故障期间DAB内部电力电子模块均不闭锁,正常导通运行,低压侧电压也有所下降。

随后,当阻断模块以及补偿支路被投入后,电容放电回路被切断,中压侧电压不再跌落,由于限流电感的存在,模块电容仅损失了少量电量,DAB依靠模块电容剩余电量以及补偿电容所储存的电量转而向低压侧进行供电,随后,在DAB对电压的控制下,低压侧电压趋于稳定。

故障切除后,中压侧对电容重新充电,当极间电压上升至保护动作门槛值以上时,阻断模块导通,补偿支路被切除,中压侧对电容充电的同时重新对低压侧提供能量,低压侧电压逐渐恢复至正常运行水平。

### 2.5 故障穿越过程

中压侧极间短路故障发生后,正、负极线路直接相连,极间电压急剧下降为0,中压侧模块电容通过短路点形成放电回路。设故障穿越电压为20 kV,故障持续时间为0.4 s,故障穿越流程见附录A图A2。

当电压不平衡监测装置检测到中压侧极间电压下降至保护动作门槛值以下时,给故障电流阻断装置施加闭锁信号,将其投入,切断电容的放电回路。

阻断模块投入的同时对电容补偿支路施加导通信号,将补偿电容投入。在故障持续期间,DAB内部电力电子模块无需闭锁,始终保持正常运行导通状态,由模块电容剩余电量以及补偿电容共同向低压侧提供电能,维持低压负荷用电需求,减小电压波动。

故障清除后,中压侧电压逐渐恢复,当电压不平衡监测装置检测到中压侧极间电压上升至保护动作门槛值以上时,给故障电流阻断装置施加导通信号,中压侧对电容重新充电,同时断开电容补偿支路。由于中压侧电容并没有完全放电,故障恢复后充电速度较快,同时,由于电容补偿支路的断开,充电过程进一步加快,有利于中压侧对电容快速重新充电。

所提方法能够在中压侧发生极间短路故障后DAB输入侧电压跌落至0的情况下,通过快速切断放电电流并投入补偿支路,依靠中压侧电容所携带电量,实现故障持续期间低压负荷侧不间断供电。

## 2.6 器件取值与供能分析

### 2.6.1 限流电感与限流电阻的取值

考虑到保护识别与动作时间,大约可在故障发生后4 ms时,将信号传递至阻断模块及补偿支路,同时,为减小低压负荷侧电压波动,在故障阻断前,要求将中压侧模块电容的电压跌落控制在5%以内,即 $\Delta U_c < 0.05U_c$ ,因此,将回路基本数据代入式(3)可计算得到回路总电感应满足:

$$L_s + L_c > 13.1 \text{ mH} \quad (9)$$

由于线路电感 $L_s$ 约为1 mH,阻断模块中限流电感感应满足:

$$L_c > 12.1 \text{ mH} \quad (10)$$

考虑阻断模块内部微弱环流以及通信时间的影响,并留有一定裕度,本文中阻断模块限流电感取值为12.8 mH。限流电阻主要作用为消除内部环流,为减小其功率损耗以及对正常工作时电容充放电影响,取值较小即可,本文选取为0.12  $\Omega$ 。

### 2.6.2 补偿电容的取值

本文提出的极间短路故障穿越策略中,利用中压侧模块电容以及补偿电容在故障持续期间对低压负荷侧进行持续供能。本文中负荷额定功率为56 kW,假定负荷在故障期间始终维持在额定功率不变,故障持续时间为0.4 s,为保证低压侧电压稳定性并提高故障恢复后电容充电速度,本文在故障持续期间控制中压侧电容电压跌落不超过10%。因此,当忽略能量在DAB内部电力电子模块以及线路上的损耗时,补偿电容应满足:

$$\frac{1}{2} (C_H + C_S) (\Delta U)^2 > P_{\text{load}} \Delta t \quad (11)$$

式中: $\Delta U$ 为中压侧电容电压跌落值; $P_{\text{load}}$ 为负荷功率; $\Delta t$ 为时间变化量。计算得到补偿电容应大于0,即仅依靠中压侧原始模块电容即可满足要求。进一步,

为保证极端情形下所提方法仍具有可行性,要求在负载提高50%、故障持续时间延长50%的情形下,仍能满足要求。计算得到补偿电容 $C_S > 13\ 200 \mu\text{F}$ ,考虑一定裕度,选取补偿电容数值为14 000  $\mu\text{F}$ 。在实际工程中可根据负载具体情形和要求以及中压侧模块电容数值对补偿电容值进行优选。

## 3 仿真分析

本文针对图1所示的典型双端柔性中压直流配电网,基于PSCAD/EMTDC平台进行仿真分析。直流中压侧额定电压为 $\pm 10 \text{ kV}$ ,低压侧额定电压为 $\pm 375 \text{ V}$ ,负荷额定功率为56 kW,DAB中压侧模块电容为12 000  $\mu\text{F}$ 。在DAB中压侧入口处设置极间短路故障,设置故障在第2 s时发生,故障发生2 ms后换流阀闭锁,第2.4 s时故障切除,系统恢复运行。分3种情形展开仿真分析,验证所提方法有效性。

### 3.1 情形1:基于传统DAB型直流变换器的仿真分析

基于传统DAB型直流变换器的双端直流配电网中低压侧故障电压波形如图3所示。图中, $U_p$ 、 $U_N$ 分别为正极对地电压、负极对地电压。可以看出,故障发生后直流中压侧正、负极对地电压以及极间电压迅速降为0。故障恢复后,经较长时间电容充电过程,电压恢复正常。故障发生后DAB内部电力电子模块迅速闭锁,低压侧正、负极对地电压以及极间电压经一定时间的放电过程降为0,故障恢复后同样需较长时间才能恢复至正常运行电压水平。

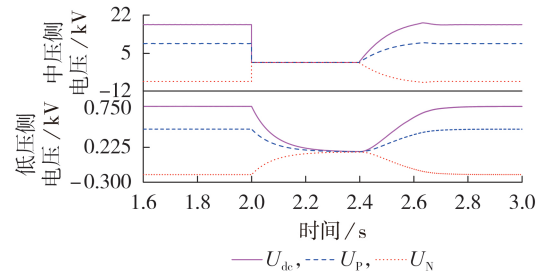


图3 直流中、低压侧电压波形

Fig.3 Waveforms of DC voltage at medium- and low-voltage side

直流低压侧电流如图4所示。由图可见,低压侧电流波形与极间电压波形基本一致,故障后逐渐降为0,故障恢复时缓慢上升至正常运行水平。

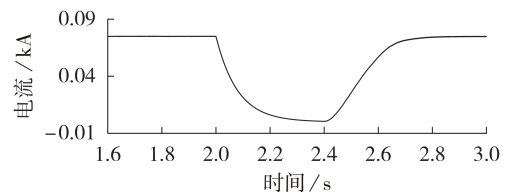


图4 直流低压侧电流波形

Fig.4 Waveform of DC current at low-voltage side

DAB中高频变压器输入、输出侧电压波形和电



流波形分别如图 5、6 所示。由图可知:由于 DAB 频率为 2500 Hz,高频变压器的输入、输出侧电压波形基本一致,故障后迅速变为 0,故障恢复时波幅缓慢恢复至正常运行状态;输入、输出侧电流波形也基本一致,故障后迅速变为 0,故障恢复时波幅大小缓慢恢复至正常运行水平,但整体波形向下平移。

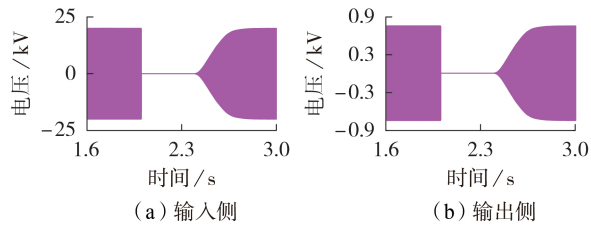


图 5 高频变压器输入、输出侧电压波形

Fig.5 Voltage waveforms of high frequency transformer at input and output sides

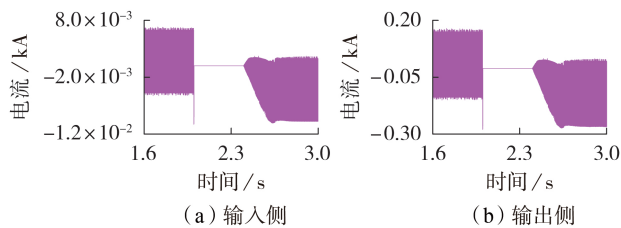


图 6 高频变压器输入、输出侧电流波形

Fig.6 Current waveforms of high frequency transformer at input and output sides

### 3.2 情形 2:仅加入阻断模块后的仿真分析

故障发生后,当电压不平衡监测装置检测到中压侧极间电压下降至保护动作门槛值以下时,给故障电流阻断装置施加闭锁信号。

直流中、低压侧故障电压以及电容电压如附录 A 图 A3 所示。由图可知,故障发生后中压侧正、负极对地电压及极间电压迅速降为 0,故障恢复后电压很快恢复正常,电容电压充电过程较情形 1 下明显缩短。由于故障发生后阻断模块的迅速投入,DAB 中压侧模块电容电压仅存在小幅下降(约 3%),DAB 内部电力电子模块无需闭锁,继续由中压侧模块电容向低压侧持续供电,由于模块电容为完全放电,故障恢复过程中电容充电时间大幅减小;故障期间低压侧极间电压仅有小幅下降,但没有下降至 0,这一结果较传统 DAB 型直流变换器故障穿越效果有了极大的提升。

直流低压侧电流如附录 A 图 A4 所示。可以看出,低压侧电流波形与极间电压波形基本一致,故障期间仅有较小波动,故障恢复时很快恢复至正常运行水平。DAB 中,高频变压器输入、输出侧电压波形和电流波形分别如附录 A 图 A5、A6 所示。由图可知:高频变压器的输入、输出侧电压波形基本一致,故障期间波幅均有小幅缩减;输入、输出侧电流波形

也基本一致,故障期间有高频方波整体波形有一定向上平移。

### 3.3 情形 3:同步投入补偿电容后的仿真分析

在情形 2 的基础上,在故障发生后,故障电流阻断模块迅速投入的同时,将补偿电容投入。

直流中、低压侧故障电压以及电容电压如附录 A 图 A7 所示。由图可知,中压侧极间电压故障恢复建压速度较情形 2 有了进一步提升。故障发生后,阻断模块以及补偿电容迅速同步投入,DAB 中压侧模块电容电压降幅较情形 2 中仿真结果进一步减小,故障期间,在 DAB 电压控制下,低压侧电压几乎无明显变化,仅在故障恢复时有较小波动,故障恢复速度也进一步提高。

直流低压侧电流如附录 A 图 A8 所示。由图可知,低压侧电流波形与极间电压波形基本一致,故障期间无明显变化,故障恢复时有较小波动。DAB 中高频变压器输入、输出侧电压波形和电流波形分别如附录 A 图 A9、A10 所示。由图可知:高频变压器的输入、输出侧电压波形基本一致,故障期间无明显变化;输入、输出侧电流波形也基本一致,故障期间高频方波波形整体向上平移。

对比 3 种情形下高频变压器电压、电流,可以看出加入阻断模块与补偿电容后故障时对 DAB 侧高频量无明显影响。故障发生后 3 种情形下低压侧极间电压波形如附录 A 图 A11 所示。由图可知,3 种情形下故障期间低压侧极间电压降幅逐渐减小,故障恢复速度逐渐提升。这一结果表明本文所提故障穿越方法对减小低压侧电压下降幅度、维持故障持续期间低压侧负荷供电、加速故障恢复过程有着较为明显的效果。

附录 A 图 A12 为阻断模块中单个  $Q_c$  在动作前后承压情况,可以看出,正常运行期间  $Q_c$  不承受电压,故障投入期间单个  $Q_c$  所承受电压约为 3.8 kV,在其正常允许的电压承受范围内。

### 3.4 故障穿越方法可靠性分析

在实际工程中,故障检测时间、故障切除时间以及负载情况均有可能出现变化,因此对不同情形下本文所提方法的可靠性进行分析。

#### 3.4.1 故障检测时间延迟 2 ms

附录 A 图 A13 为故障检测时间延迟 2 ms 时直流低压侧电压波形。由图可知,故障检测时间延迟 2 ms 时,低压侧电压波动较未延迟情形下变大,这主要是由于阻断模块投入延迟,中压侧电容电压降幅变大,低压侧电压波动也有所增大,可根据 2.6 节中对限流电感的取值方法,增大限流电感至 30 mH,即可使电压降幅满足要求,如附录 A 图 A14 所示。由图可知,通过增大限流电感,能有效控制电压跌落水平,所提方法仍具有较好的可靠性,同时也证明了所

提方法具有较好的灵活性和适应性。

### 3.4.2 故障切除时间延迟0.2 s

附录A图A15为故障切除时间延迟0.2 s时直流低压侧电压波形。由图可知,故障切除时间延迟0.2 s对低压侧电压无较大影响,该情形下所提方法仍具有较好的可靠性。

### 3.4.3 负载提高50%

附录A图A16为负载提高50%时直流低压侧电压波形。由图可知,负载提高50%后对低压侧电压无较大影响,该情形下所提方法仍具有较好的可靠性。

综上,本文所提方法在故障检测时间延迟、故障切除时间延迟以及负载增大的情形下均具有较好的可靠性和适应性。

## 3.5 故障穿越方法性能对比

针对文献[17,19]所采用的方法与本文所提方法在中压侧极间短路故障时的故障穿越效果、故障恢复时长以及方法经济性方面对比如表1所示。由表可知,本文所提方法能够有效减小中压侧极间短路故障对于低压侧负荷的影响,并且具有良好的故障恢复特性和经济性。

表1 故障穿越方法性能对比

Table 1 Performance comparison of fault ride through methods

方法	负荷侧电压变化	故障恢复速度	经济性
文献[17]方法	有较大跌落	较快	较差
文献[19]方法	有较大跌落	较慢	较差
本文所提方法	无较大波动	较快	较优

## 4 结论

本文针对含DAB型直流变压器的中低压直流配电系统,研究了中压侧极间短路故障机理,提出了一种新型故障穿越方法,并在PSCAD/EMTDC平台进行了仿真分析,验证了本文所提方法的有效性,得到结论如下。

1)通过对传统DAB型直流变换器结构进行改进,增设故障电流阻断模块和补偿电容支路,能在故障发生后迅速识别,切断故障电流通路并投入补偿电容。故障持续期间依靠中压侧模块电容剩余电量以及补偿电容电量向低压侧负荷进行短期持续供电,能有效降低低压侧电压跌落,减小中压侧极间短路故障对于负荷的影响。

2)由于故障后中压侧模块电容短路放电回路被迅速切断,电容电量损失较小,故障清除后能够快速充电至正常运行状态,所提方法较传统故障后DAB闭锁,恢复后电容重新充电的方法有更好的故障恢复特性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):98-104.  
JIANG Daozhuo,ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):98-104.
- [2] 王守相,刘琪,薛士敏,等. 直流配电系统控制与保护协同关键技术及展望[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):23-30.  
WANG Shouxiang,LIU Qi,XUE Shimin,et al. Key technologies and prospect for coordinated control and protection in DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(23):23-30.
- [3] 戴志辉,刘雪燕,刘自强,等. 基于限流电抗电压积分值的环状柔性直流配电网保护方案[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):104-112.  
DAI Zhihui,LIU Xueyan,LIU Ziqiang,et al. Protection scheme for ring flexible DC distribution grids based on integration of current-limiting reactance voltage[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(12):104-112.
- [4] QIAO L,LI X L,HUANG D,et al. Coordinated control for medium voltage DC distribution centers with flexibly inter-linked multiple microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2019,7(3):599-611.
- [5] 赵彪,安峰,宋强,等. 双有源桥式直流变压器发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1):288-298,418.  
ZHAO Biao,AN Feng,SONG Qiang,et al. Development and application of DC transformer based on dual-active-bridge[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(1):288-298,418.
- [6] 姜瀚瀚,彭克,徐丙垠,等. 直流配电系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):219-231.  
JIANG Songhan,PENG Ke,XU Bingyin,et al. Current situation and prospect of demonstration projects of DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(5):219-231.
- [7] 刘贝,涂春鸣,肖凡,等. 中低压直流变压器拓扑与控制综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):232-246.  
LIU Bei,TU Chunming,XIAO Fan,et al. Review of topology and control strategy of medium- and low-voltage DC transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(5):232-246.
- [8] 熊雄,季宇,李蕊,等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6802-6813,7115.  
XIONG Xiong,JI Yu,LI Rui,et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(23):6802-6813,7115.
- [9] LI B,HE J W,TIAN J,et al. DC fault analysis for modular multilevel converter-based system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2017,5(2):275-282.
- [10] SONG G B,WANG T,HUSSAIN K S T. DC line fault identification based on pulse injection from hybrid HVDC breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2019,34(1):271-280.
- [11] 祁晓敏,裴玮,李鲁阳,等. 基于DAB直流变压器的多电压等级交直流混合配电网故障特性分析[J]. 中国电机工程学报,2019,39(6):1582-1591,1855.  
QI Xiaomin,PEI Wei,LI Luyang,et al. Fault characteristic analysis of dual active bridge converter based multi-voltage-level AC/DC hybrid distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(6):1582-1591,1855.
- [12] 马大俊,陈武,薛晨炆,等. 低压直流母线AC-DC电力电子变压器及其短路故障穿越方法[J]. 电力系统自动化,2019,43

- (8):158-166.  
MA Dajun, CHEN Wu, XUE Chenyang, et al. AC-DC power electronic transformer with low-voltage DC bus and strategy of short-circuit fault ride-through [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 158-166.
- [13] 张中锋, 谢晔源, 杨晨, 等. 配网直流变压器双极短路故障穿越方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 16-21, 41.  
ZHANG Zhongfeng, XIE Yeyuan, YANG Chen, et al. Bipolar short-circuit fault ride-through method of DC transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 16-21, 41.
- [14] 李建国, 赵彪, 宋强, 等. 适用于中压直流配网的多电平直流链固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3717-3726.  
LI Jianguo, ZHAO Biao, SONG Qiang, et al. DC solid state transformer based on multilevel DC link for medium-voltage DC distribution application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3717-3726.
- [15] 王冰冰, 刘忠, 梅军, 等. 基于储能内置式换流器的柔性直流配电网故障快速恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 17-23.  
WANG Bingbing, LIU Zhong, MEI Jun, et al. Fast recovery strategy of flexible DC distribution network based on energy storage built-in converter after fault [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 17-23.
- [16] 冀婉玉, 董玮, 张建军. 高渗透率光伏发电的直流微电网故障穿越控制策略研究[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 70-76.  
JI Wanyu, DONG Wei, ZHANG Junjun. Research on fault ride-through control strategy for DC microgrid with high-permeability photovoltaic power generation [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 70-76.
- [17] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于控保协同的多端柔性直流配电系统线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2559-2568.  
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Line protection for multi-terminal flexible DC distribution system based on con-
- trol and protection coordination [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2559-2568.
- [18] 徐峰, 范春菊, 孙秋, 等. 含电力电子变压器的直流配电线路双端故障测距方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 73-80.  
XU Feng, FAN Chunju, SUN Qiu, et al. Dual-terminal fault location method for DC distribution lines with power electronic transformer [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10): 73-80.
- [19] 乔扬, 张笑天, 杨旭. 具有短路限流能力的大变比DC/DC变换器[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 47-52.  
QIAO Yang, ZHANG Xiaotian, YANG Xu. Large-step-ratio DC/DC converter with capability of short-circuit current limiting [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 47-52.
- [20] 涂春鸣, 葛钦, 肖凡, 等. 基于光伏电源支撑的多端口固态变压器故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(16): 3498-3508.  
TU Chunming, GE Qin, XIAO Fan, et al. Fault ride-through control strategy of solid state transformer with PV power generation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(16): 3498-3508.

#### 作者简介:



王守相

王守相(1973—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为智能配电系统分析、分布式发电系统分析与仿真(E-mail: sxwang@tju.edu.cn);

王振宇(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为交直流混合配电系统仿真分析(E-mail: 1106371998@qq.com);

刘琪(1992—),男,博士研究生,主要研究方向为交直流混合配电系统建模与仿真分析(E-mail: liuqi1619@163.com)。

(编辑 王欣竹)

## Inter-pole short circuit fault ride through method for medium- and low-voltage DC distribution system with DAB-type DC converter

WANG Shouxiang<sup>1,2</sup>, WANG Zhenyu<sup>1,2</sup>, LIU Qi<sup>1,2</sup>, ZHAO Qianyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenyu<sup>3</sup>, LIU Hongyong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

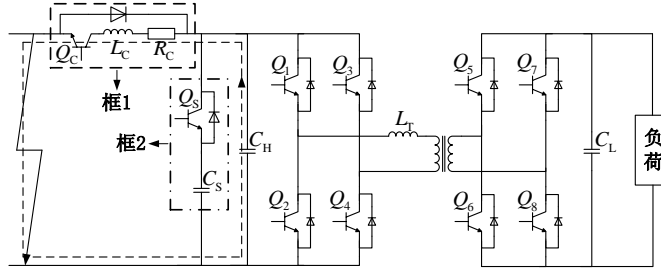
2. Tianjin Key Laboratory of Power System Simulation and Control, Tianjin 300072, China;

3. State Grid Jibei Zhangjiakou Wind and Solar Power Energy Demonstration Station Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** Inter-pole short circuit fault is the most serious fault type in DC distribution system. In the DC distribution system with DAB(Dual Active Bridge)-type DC converter, when inter-pole short circuit fault occurs at medium-voltage side, DAB blocks, the voltage at low-voltage side drops sharply, and the recovery speed is slow after the fault is cleared. To solve the above problems, a new fault ride through method is proposed. By improving the traditional DAB structure and adding fault current blocking module and compensation capacitor branch, the fault can be quickly identified and cut off right after the fault, and the compensation capacitor is also put into operation. During the fault duration, the DAB does not need to block, and relies on the module capacitor and the compensation capacitor to supply power to the low-voltage side load. It can effectively reduce the voltage drop at low-voltage side, and the capacitor can be quickly charged to the normal operation state after the fault is cleared. The simulative results on PSCAD/EMTDC platform show that the proposed method can effectively reduce the impact of inter-pole short circuit fault on load at medium-voltage side, and has good fault recovery characteristics.

**Key words:** DC distribution system; inter-pole short circuit fault; DAB-type DC converter; fault ride through; fault current blocking module; compensation capacitor branch

## 附录 A



注：框 1、2 分别为故障电流阻断模块、电容补偿支路。

图 A1 改进型 DAB 拓扑结构

Fig.A1 Topology structure of improved DAB

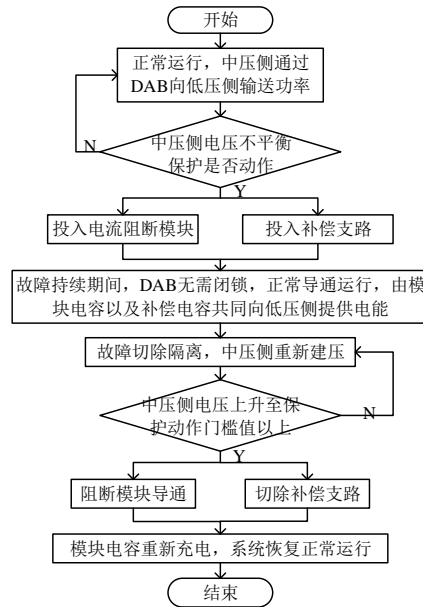


图 A2 故障穿越流程图

Fig.A2 Flowchart of fault ride through

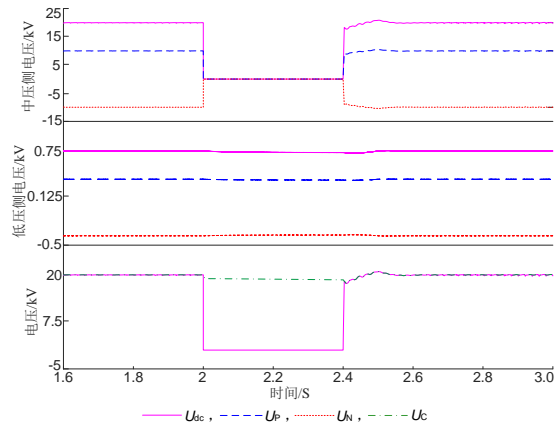


图 A3 直流中、低压侧故障电压以及电容电压波形

Fig.A3 Waveforms of fault voltage at DC medium- and low-voltage side and capacitor voltage



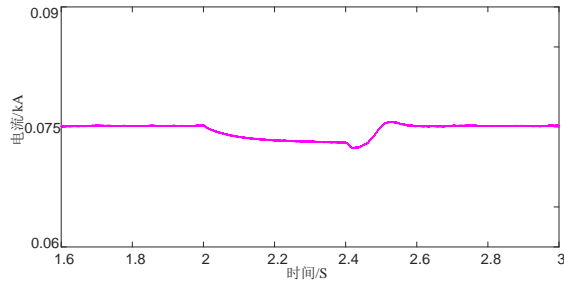


图 A4 直流低压侧电流波形

Fig.A4 Waveform of current at DC low-voltage side

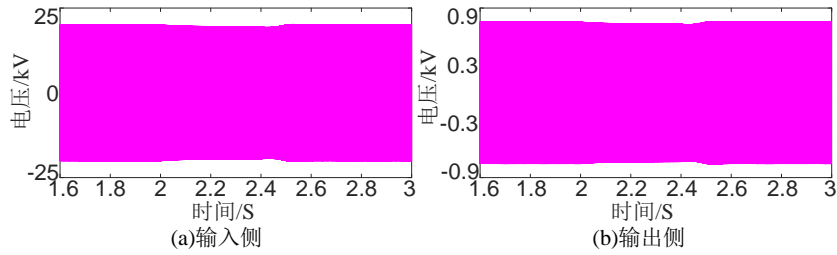


图 A5 高频变压器输入、输出侧电压波形

Fig.A5 Voltage waveforms of high frequency transformer at input and output side

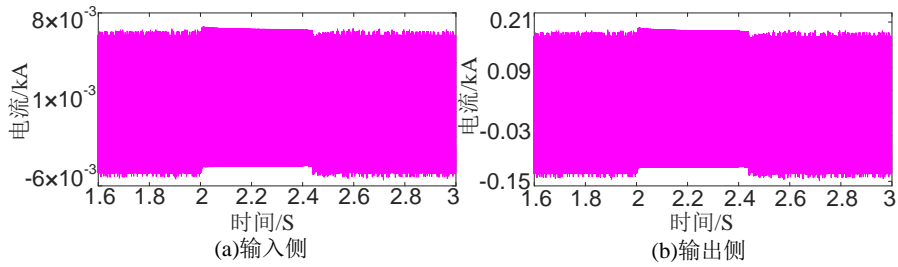


图 A6 高频变压器输入、输出侧电流波形

Fig.A6 Current waveforms of high frequency transformer at input and output side

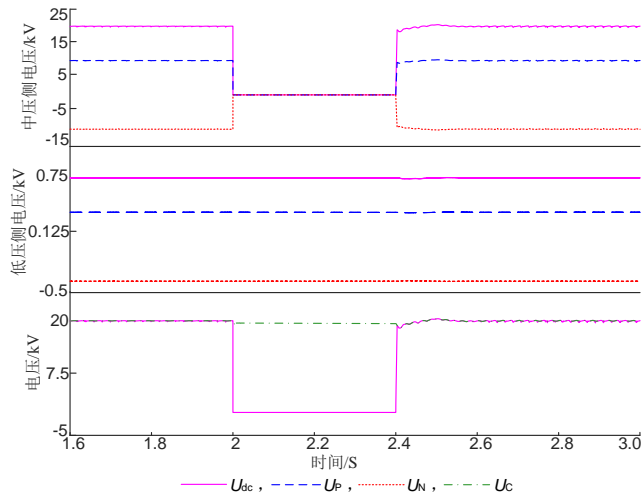


图 A7 直流中、低压侧故障电压以及电容电压波形

Fig.A7 Waveforms of fault voltage at DC medium- and low-voltage side and capacitor voltage

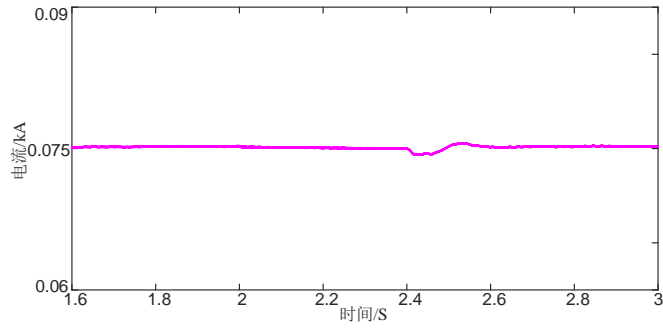


图 A8 直流低压侧电流波形

Fig.A8 Waveform of current at DC low-voltage side

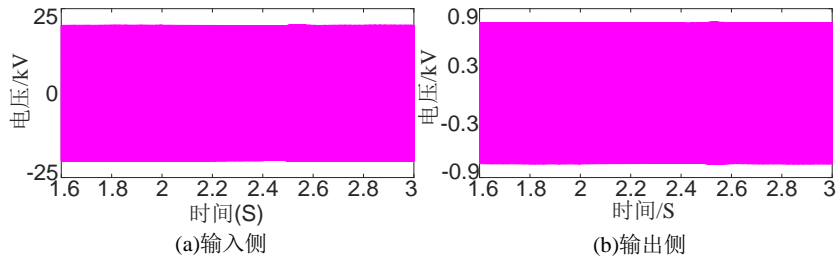


图 A9 高频变压器输入、输出侧电压波形

Fig.A9 Voltage waveform of high frequency transformer at input and output side

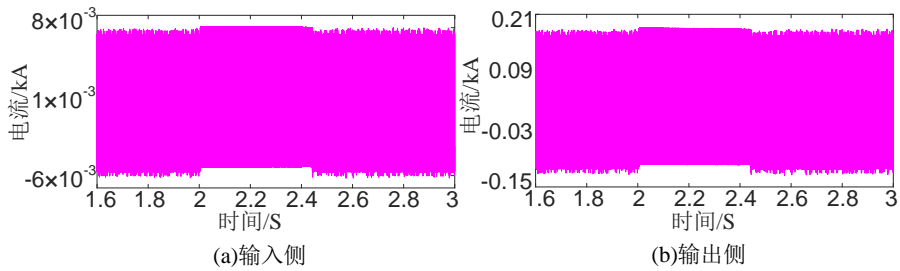
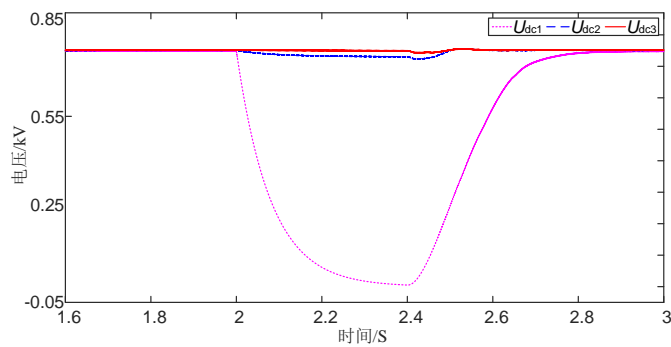


图 A10 高频变压器输入、输出侧电流波形

Fig.A10 Current waveforms of high frequency transformer at input and output side



注:  $U_{dc1}$  —  $U_{dc3}$  分别为情形 1—3 下低压侧极间电压。

图 A11 3 种情形下低压侧极间电压波形

Fig.A11 Inter pole voltage waveform at low voltage side under three conditions

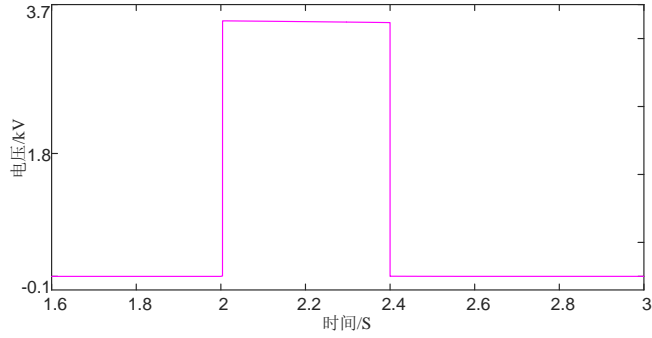


图 A12 单个  $Q_C$  动作前、后所承受电压

Fig.A12 Withstand voltage of single  $Q_C$  before and after action

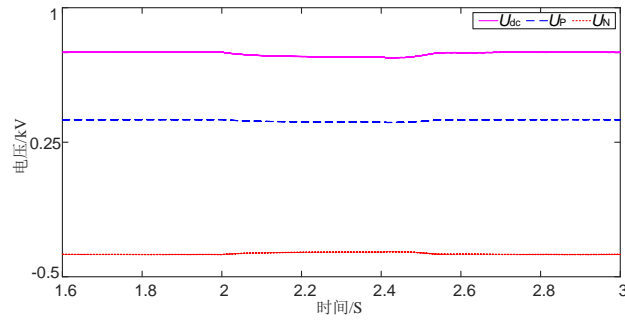


图 A13 故障检测延迟 2 ms 时直流低压侧电压波形

Fig.A13 Voltage waveform at DC low-voltage side with fault detection delay of 2 ms

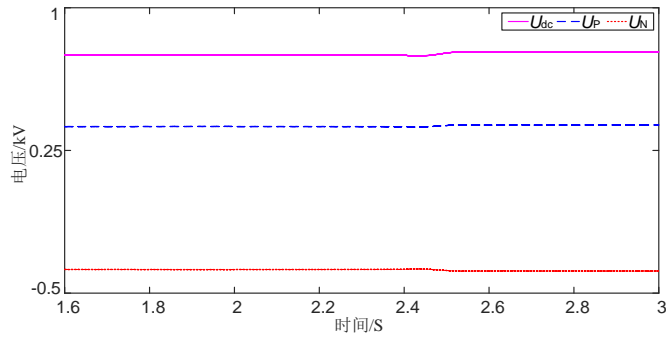


图 A14 增大电感后直流低压侧电压波形

Fig.A14 Voltage waveforms of DC low-voltage side after increasing inductance

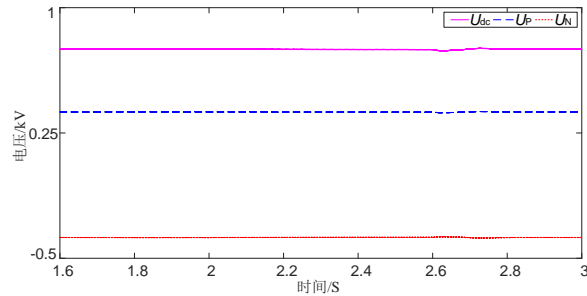


图 A15 故障切除延迟 0.2 s 时直流低压侧电压波形

Fig.A15 Voltage waveform at DC low-voltage side with fault removal delay of 0.2 s



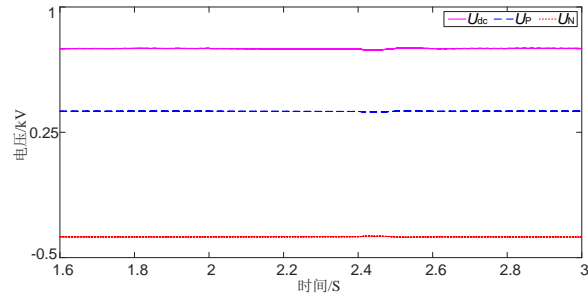


图 A16 负载提高 50%时直流低压侧电压波形

Fig.A16 Voltage waveforms at DC low-voltage side when load is increased by 50%