

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

王冰冰¹, 刘忠², 梅军¹, 薛钟兵², 范光耀¹, 葛锐¹, 陈武¹, 徐伟凡²

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网扬州供电公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:提出一种适用于柔性直流配电网的故障快速恢复策略。首先提出了一种储能内置式换流器(ESBC)的拓扑结构,并对双极短路故障状态下ESBC闭锁前后的子模块电容电压和故障电流的暂态特性进行分析。进而提出基于储能的故障快速恢复策略,改进故障恢复时序,并提出子模块分阶段充放电策略以抑制冲击电流。最后将提出的协调控制策略与直流配电网相结合,实现在换流器闭锁期间,储能能为重要负荷提供功率以保障其在故障清除期间不间断供电的同时,对闭锁期间的子模块电容电压进行调节以使其在解锁前达到额定值,减小换流器解锁时的电压波动,为换流器重启动缩短时间。在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建了仿真模型,验证了所提策略的有效性。

关键词:柔性直流配电网;故障快速恢复;储能内置式换流器;双极短路故障;不间断供电

中图分类号:TM 46; TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008028

0 引言

相较于传统的交流配电网,直流配电网具有供电可靠性高、线损低、谐波含量低、方便新能源电力接入等优点,在实现新能源并网、城市配电网、海上平台供电等领域具有广阔的应用前景^[1-5]。

直流配电网在双极短路故障下的故障处理能力是衡量其性能的重要指标^[6]。目前直流配电网中发生直流短路故障时的处理方式主要有3种^[7],分别为交流断路器加直流隔离开关、加装直流断路器和具有故障自清除能力的换流器加直流隔离开关。交流断路器加直流隔离开关的方式存在响应速度慢、动作时序复杂等问题^[8];而目前直流断路器存在着灭弧困难、运行损耗大、造价高等问题^[9-10];故障自清除功能的换流器加直流隔离开关的方式具有响应速度快、工程造价低等优势,十分适用于电压等级较低、容量较小的无直流断路器配置的直流配电网,也是本文的主要研究对象。

直流配电网节点众多,负荷类型复杂多样,尤其对于数据中心等对电能质量和供电可靠性要求较高的敏感性负荷而言,其对电压暂降和短时功率中斷的恢复要求更高。另外,由于直流配电网中存在众多由电力电子器件组成的换流器,如模块化多电平换流器MMC(Modular Multilevel Converter)等,MMC

闭锁期间子模块电容电压偏离额定值,直接解锁会产生冲击电流,导致MMC存在二次过流的风险^[11]。

直流配电网发生故障后的处理过程可归纳为4个阶段^[8,12-13]:换流器故障检测和响应、故障识别和隔离、故障恢复以及系统恢复稳态运行。其中,直流配电网的故障恢复是直流配电网恢复稳态运行的关键。目前,关于直流配电网的故障恢复已有如下研究:文献[11]提出一种针对MMC重启时的冲击电流抑制策略,虽然有效抑制了重启时由于子模块电容电压不均引起的冲击电流和电压波动,但会造成系统恢复时间变长;文献[13]介绍了一种直流故障后的恢复方法,但该方法依靠交流断路器隔离故障电流,故障处理时间长,系统将承受较长时间的过流危害;文献[14-15]通过加速直流侧故障电流的衰减来缩短故障恢复时间,但无法改善解锁后的重启过程。

由以上文献可知,目前直流配电网故障恢复主要依靠配电网自身的自励方式,并且存在故障处理时间长、重启时电压波动大等问题。当多端直流系统合环运行时,顺序解锁使启动时间达数秒,并且存在启动失败的问题^[16]。而目前直流配电网大都配置有储能,以平抑由于分布式电源的接入带来的电能质量问题,并且为重要负荷提供短期功率支撑^[17-18],因此可以考虑利用储能的他励方式实现故障快速恢复。但利用现有的直流母线上连接储能的结构来实现故障快速恢复存在的问题有:①发生故障时,储能同样存在放电回路,使故障电流演化更加复杂;②储能本身存在故障后的重启问题,降低了快速恢复的效果;③储能与换流器之间需要协调配合,增加了控制系统设计的复杂性。

本文以两端型直流配电网为研究对象,采用储

收稿日期:2020-02-02; **修回日期:**2020-06-19

基金项目:国家电网公司科技项目(无直流断路器的直流配电网故障检测及穿越技术研究)(SGJSYZ00FCJS1900339)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Research on the Fault Detection and Ride-through Methods of DC Distribution Network without DC Circuit Breaker)(SGJSYZ00FCJS1900339)

能内置式换流器ESBC(Energy Storage Built-in Converter)作为并网换流器。首先分析了ESBC在配电网不同运行方式下的控制模式,并对发生双极短路故障时ESBC的暂态特性进行分析;进而对故障发生后配电网系统的协调控制策略进行研究;在此基础上提出基于储能的故障快速恢复策略,利用储能与ESBC之间的协调配合技术,实现ESBC闭锁期间重要负荷的不间断供电和故障快速恢复。

1 柔性直流配电网典型拓扑结构和系统配置

1.1 拓扑结构

本文研究的无直流断路器的典型两端型柔性直流配电网拓扑如附录中图A1所示。图中,直流配电网系统与交流大电网相连的2个换流站(MMC₁和MMC₂)采用具有故障自清除能力的换流器;S₁—S₇为快速隔离开关;S为联络开关。

在实际的工程应用中,两端型配电网有2种运行方式:一种是开环运行,MMC₁和MMC₂均采用定直流电压控制模式,S处于断开状态,这种方式由于2个换流站之间平时无能量交换,并不能体现出直流系统联接异步电网的性能优势;另一种是合环运行,此时S导通,实现“手拉手”型的供电结构,相比于开环运行的方式,供电可靠性较高。

1.2 故障恢复方法

1.2.1 直流母线上发生故障

两端型直流配电网开环运行时,直流母线上发生故障,如图A1中F₁处,故障发生后的协调控制过程如下^[12]。

(1)故障初期[t₀,t₁):故障发生初期,各项电气量指标(直流母线电流、桥臂电流等)还未超过设定值,系统仍正常运行,ESBC子模块电容通过故障点放电,系统未达到过流保护的阈值,换流器未闭锁。

(2)故障处理[t₁,t₃):控制保护系统检测到故障后经过一定时间延迟,向ESBC发出闭锁指令,ESBC中的全桥子模块FBSM(Full Bridge Sub-Module)反向接入故障回路中,快速阻断故障电流;保护系统迅速检测和定位故障点,F₁两端的快速隔离开关S₂和S₃开断,将故障点隔离。

(3)故障恢复[t₃,t₄):故障点被隔离后,通过解锁MMC₁,恢复上游区域S₁和S₂之间的供电;闭合S,由MMC₂恢复下游区域S₃和S₄之间的供电,使系统尽可能恢复已经失电的非故障区域的负荷。

(4)稳态运行(t₄之后):系统恢复正常运行,并修复被隔离的故障区域,尽可能恢复直流配电网系统的初始网络架构。

两端型配电网在直流母线上发生双极短路故障时故障处理和恢复的时序如附录中图A2所示。在

故障恢复过程中,需要解锁MMC₁以恢复失电区域的供电,需要闭合S以恢复故障区域下游的供电,从而最大限度地保证配电网系统安全稳定运行。

闭环运行时,S处于闭合状态。MMC₁采用定直流电压控制,MMC₂采用定功率控制。F₁处发生故障时,两端换流站均会出现过流停运。由于故障发生在直流母线上,因此故障被隔离后,两端换流站只能采取单站分别独立运行的开环方式,直到故障被清除,故障处理和恢复时的处理方式与开环运行时MMC₁的处理方式相同。

1.2.2 供电支路上发生故障

开环运行时,当供电支路上发生故障,如图A1中F₂处,故障发生后的协调控制过程与开环运行时直流母线上发生故障时类似。故障被隔离后,MMC₁仍可通过直流母线向非故障区域供电,因此不存在故障恢复时的转供问题。

闭环运行时,两端换流站由于过流而闭锁,但由于故障发生在支路上,因此故障被隔离后系统仍可以闭环方式运行。故障被隔离后,首先启动MMC₁,待直流电压稳定后,再启动MMC₂,完成故障后的恢复,故障处理和恢复的时序如附录中图A3所示。可以看出,闭环运行方式下供电支路上发生故障时,两端换流站均会由于过流而停运闭锁,之后将首先断开S₇,然后执行全网重启策略。这种故障后重启方式的快速性对提高多端柔性直流配电网供电可靠性至关重要。

1.3 ESBC原理

将MMC与储能相结合,应用在直流配电网中,可以实现动态电压恢复、保证重要负荷供电不间断的功能^[19-20],其拓扑结构如图1所示,具有的优点有:①由于采用了内置结构,可省去DC/DC输入侧高压电容及旁路开关,节约了成本,有利于实现换流站的紧凑化设计;②避免中压母线短路故障下,储能高压侧串联电容的持续放电问题,无需增加额外器件。图中,u_j(j=a,b,c)为交流电网电压;i_j为交流电网电流;U_{a1}、U_{a2}分别为中压、低压侧直流电压;u_{ua}、u_{ua}分别为a相上、下桥臂电压;i_{ua}、i_{ua}分别为a相上、下桥臂电流;L_{ac}为交流侧电感。

ESBC的主体为全桥型模块化多电平换流器FBMMC(Full Bridge Modular Multilevel Converter),每相桥臂由2N个FBSM及相应的桥臂电阻R、桥臂电感L构成;每个FBSM的输出电容上接一个双有源全桥DAB(Dual Active Bridge)结构,DAB经并联输出后作为低压侧直流线路的出口并与储能相连。

2 ESBC工作模式分析

为了实现ESBC在直流配电网不同工况下的有效控制,需要分别制定不同的工作模式。针对ESBC

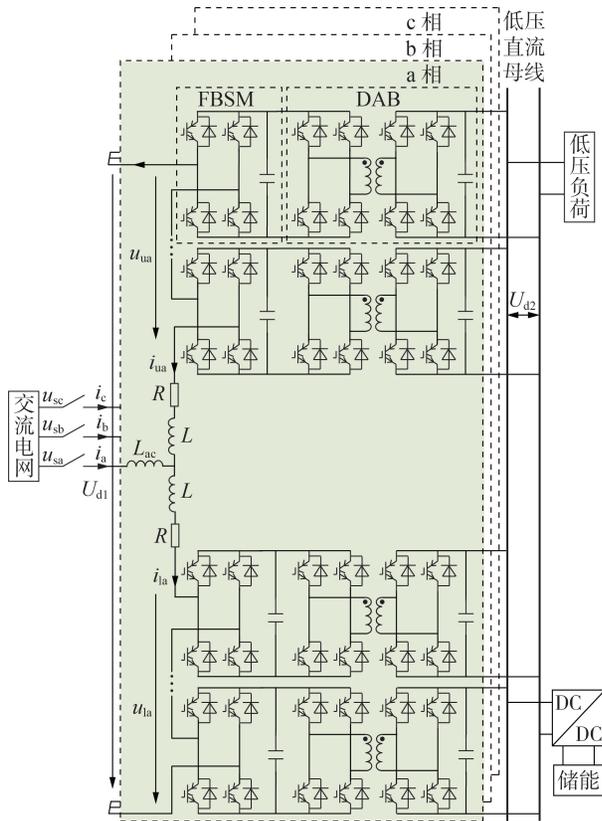


图 1 ESBC 拓扑结构

Fig.1 Topology of ESBC

的工作模式,可分为正常运行和故障处理 2 种场景进行分析。

2.1 正常运行模式

系统处于正常运行模式时,ESBC 从交流侧吸收功率,经过 FBMMC 整流和直流变换器作用后,为低压侧负载供电。

储能作为能量转换装置,在母线电压跌落或者短时功率缺失时向直流系统输送功率,以增强配电网系统的可靠性。控制策略如附录中图 A4 所示。

ESBC 实时监测 FBSM 的电容电压 u_{sm} 。当 u_{sm} 在 $[0.98, 1.02]$ p.u. 范围内时,储能不工作;在 $[0.95, 0.98]$ p.u. 和 $(1.02, 1.05]$ p.u. 范围内时,下垂特性工作;在 $[0.80, 0.95]$ p.u. 和 $(1.05, 1.20]$ p.u. 范围内时,储能以最大电流方式输出;若超出以上范围,则系统闭锁。如果考虑电容电压的波动性以及和保护配合的需要,以上范围可适当调整。

2.2 故障处理模式

ESBC 中含有 FBSM,可以在没有直流断路器的参与下,实现故障点的隔离和自清除。本文以直流故障中最严重的双极短路故障为研究对象,以 F_1 处故障为例。故障发生后,保护系统检测桥臂电流与母线电流等参考量超过设定值时,经过一定的延时后发出闭锁指令,闭锁 ESBC。信息传感器的检测时间约为 $100 \mu\text{s}$,控制系统经过 2 个控制周期(约

$100 \mu\text{s}$)发出闭锁指令,延迟时间设置为 $200 \mu\text{s}$ ^[21]。

系统的故障特征分析可以分为 ESBC 闭锁前和闭锁后 2 个过程进行分析。

故障发生初期,ESBC 仍处于正常投切方式。故障电流主要由交流系统馈入的电流、子模块电容的放电电流以及储能回路的放电电流(取决于电容电压及储能回路是否投入)组成,其中由子模块电容的放电电流以及储能回路的放电电流组成的直流馈入占主导地位。由于 IGBT 的投切频率很高,则每相桥臂可等效为 2 组电容值为 C_{sm}/N (单个桥臂的等效电容值)的并联,其值为 $2C_{sm}/N$ ^[21]。上、下桥臂电阻和电感等效为串联,其值分别为 $2R$ 和 $2L$,总的故障电流通路可等效为如附录中图 A5 所示的 RLC 二阶放电回路,图中 L_0 和 R_0 分别为 ESBC 闭锁前直流侧的等效电感和电阻。由于 ESBC 的过流时间很短,储能对故障点的放电可以等效成大小为 $3I_{B,max}$ 的恒流源。

设 t_0 时刻发生故障,得到 ESBC 发生直流双极短路故障时的电容电压 u_c 和故障回路放电电流 i_t 的数学表达式为:

$$\begin{cases} u_c(t) = e^{-t/\tau} \left[U_{d1} \sin(\omega t + \beta) - I_{d1} \sqrt{\frac{L_e}{C_e}} \sin(\omega t) \right] \\ i_t(t) = e^{-t/\tau} \left[U_{d1} \sqrt{\frac{C_e}{L_e}} \sin(\omega t) - I_{d1} \sin(\omega t - \beta) \right] + 3I_{B,max} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $L_e = 2L/3 + L_0$ 、 $C_e = 6C_{sm}/N$ 分别为 ESBC 闭锁前故障电流通路的等效电感和等效电容; $U_{d1} = u_c(t_0+) = u_c(t_0-)$ 、 $I_{d1} = i_t(t_0+) = i_t(t_0-)$ 分别为故障发生时直流电压、直流电流初始值; $\tau = 2L_e/R_e$ 为等效电路的时间常数, $R_e = 2R/3 + R_0$ 为 ESBC 闭锁前故障电流通路的等效电阻; $\omega = \sqrt{1/(L_e C_e) - [R_e/(2L_e)]^2}$ 为等效放电电路的角频率; $\beta = \arctan(2\omega L_e/R_e)$ 为放电电流的初始相角; $I_{B,max}$ 为储能装置的最大放电电流。

可知,发生直流双极短路故障时,子模块电容在闭锁前的放电为振荡放电的过程,故障发生后直流侧故障电流在短时间内激增,子模块电容迅速放电造成桥臂电流及母线电流迅速增大。

当保护系统检测到 ESBC 桥臂电流或直流母线电流超过阈值后,发出闭锁指令,同时闭锁 FBMMC 和 DAB 中所有的 IGBT。故障判定条件为:①桥臂电流超过额定值的 2 倍;②直流母线电流超过额定值的 3 倍^[21-22];③子模块电容电压波动大于 $\pm 50\%$ 。短路电流通过桥臂电感、直流电抗器及续流二极管向子模块电容充电。每相上、下 2 个桥臂等效为串联结构,每相等值电容为 $C_{sm}/(2N)$ 。由于二极管的单向导通特性,所有桥臂的子模块电容反向串联在电

路中,ESBC闭锁后的等效故障电流通路及其简化电路如附录中图A6所示。

设 t_1 时刻ESBC与DAB闭锁,则ESBC闭锁后的电容电压 u_c 和故障回路电流 i_f 的解析式为:

$$\begin{cases} u_c(t) = e^{-\lambda t} \left[U_f \sin(\varphi t + \beta_b) - I_f \sqrt{\frac{L_e}{C_{e1}}} \sin(\varphi t) \right] \\ i_f(t) = e^{-\lambda t} \left[U_f \sqrt{\frac{C_{e1}}{L_e}} \sin(\varphi t) - I_f \sin(\varphi t - \beta_b) \right] \end{cases} \quad (2)$$

其中, $C_{e1}=3C_{SM}/(2N)$ 为ESBC闭锁后故障电流通路的等效电容; $U_f=u_c(t_1+)=u_c(t_1-)$ 、 $I_f=i_f(t_1+)=i_f(t_1-)$ 分别为闭锁时的电容电压、故障电流初始值; $\varphi=\sqrt{1/(L_e C_{e1})-[R_e/(2L_e)]^2}$ 为等效充电电路的角频率; $\beta_b=\arctan(2\varphi L_e/R_e)$ 为充电电流的初始相角。

在实际工程中,故障衰减时间很短,因此可忽略衰减项 $e^{-\lambda t}$,则可得到最终等效电路的电容电压最大值为:

$$u_{Cmax} = \sqrt{U_f^2 + \frac{L_e I_f^2}{C_{e1}}} \quad (3)$$

ESBC闭锁后,故障电流通过故障回路向子模块电容充电,故障电流迅速下降到0,并保持0不变直至ESBC重启解锁。ESBC在闭锁期间能够有效地隔离故障并通过反向充电回路实现直流侧故障清除。闭锁期间子模块电压的最大值与换流站闭锁时的电容电压值和故障电流值有关,并且与故障回路的电感参数和子模块电容参数有关。但由于闭锁时每个桥臂放电情况的不同和子模块参数的差异,ESBC闭锁后子模块电容电压之间存在差异,解锁时会带来电流冲击,使桥臂承受二次过流的风险。

2.3 基于储能的故障快速恢复策略

由1.3节介绍的ESBC拓扑结构可知,储能配置在ESBC和低压负荷之间,因此,利用储能装置的间歇性工作特性,在ESBC闭锁期间,储能可以不经ESBC而直接向负荷提供功率支撑,从而保证低压侧电压恒定和重要负荷的不间断供电;而另一方面,故障被隔离后,储能通过DAB对FBSM的电容进行电压调节控制,使子模块电容电压迅速恢复到稳定运行时的额定值 U_{Cref} 。从而在系统重启时实现快速恢复,如附录中图A7所示。

在ESBC闭锁后的故障清除时间内,通过解锁DAB中的IGBT,储能可通过DAB对FBSM的子模块进行平衡控制,使子模块电压在ESBC解锁前达到平衡,重新启动时将使电压波动大幅减小。

3 故障快速恢复策略

将基于储能的故障快速恢复策略与直流配电网故障后的恢复方法结合,并对其进行改进,以实现直

流配电网的故障后快速恢复。

3.1 直流母线上发生故障时的快速恢复策略

两端型直流配电网开环运行时,直流母线上发生故障,如图A1中 F_1 处。MMC₁将由于过流而闭锁,为了加快故障后的恢复过程,ESBC闭锁后,控制储能对FBSM的子模块电容电压进行平衡控制,故障点隔离可以和子模块电容电压再平衡过程同时进行,当接收到解锁指令后,ESBC可以通过建立直流电压迅速到达稳态,通过重启时序的调节使重启时间缩短,达到故障快速恢复的目的。改进后的快速重启策略的时序图如图2所示。

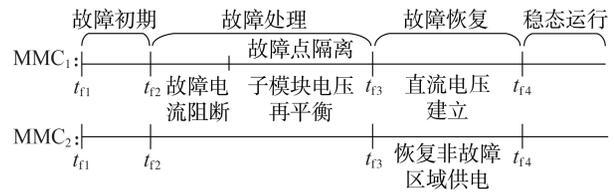


图2 直流母线上发生故障时的故障快速恢复时序图 (开环运行)

Fig.2 Sequence diagram of fast recovery when fault occurs at DC bus(open-loop operation)

闭环运行时,采用快速恢复策略时的故障处理和恢复方法与开环时的MMC₁的处理方式相同。

3.2 供电支路上发生故障时的快速恢复策略

开环运行时,当供电支路上发生故障,如图A1中 F_2 处,故障发生后的协调控制过程与开环运行时直流母线上发生故障时类似,区别仅在于 F_2 处发生故障时不存在故障恢复时的转供问题。

闭环运行时,两端换流站均会由于过流而闭锁。故障被隔离后,采用基于储能的故障快速恢复策略可以使子模块电容电压在MMC₁和MMC₂解锁前达到额定值,实现两站同时解锁,减少了重启动步骤的同时,大幅减少了直流配电网系统重启动需要的时间。故障处理和恢复时序图如图3所示。

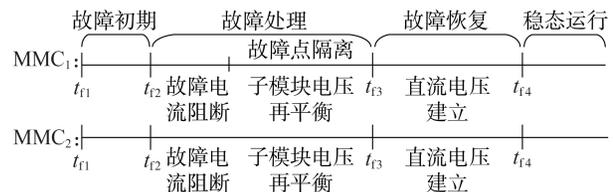


图3 供电支路上发生故障时的故障快速恢复时序图 (闭环运行)

Fig.3 Sequence diagram of fast recovery when fault occurs at power supply branch(closed-loop operation)

3.3 桥臂子模块分阶段充放电策略

在ESBC放电和闭锁期间,系统杂散参数的影响和子模块在放电期间的投切情况不同等,导致子模块电容电压之间存在差异。利用储能对高于正常

运行值 U_{Cref} 的子模块进行放电,而对低于 U_{Cref} 的子模块进行充电。经储能的平衡作用最终使所有子模块的电容器电压均稳定在 U_{Cref} 附近。但如果将子模块同时投入,由于子模块电容器电压值之间的差异,同时导通势必会在桥臂之间形成瞬时电流冲击,使子模块电容和参与工作的 IGBT 器件承受过流。

因此,本文提出分阶段充放电的策略。系统闭锁后,检测所有子模块的电容器电压,最小值记为 U_{Cmin} ,最大值记为 U_{Cmax} 。则子模块电容器电压 U_c 可以表示为:

$$U_c = \begin{cases} k_1(t)U_{Cref} & U_c \in [U_{Cmin}, U_{Cref}] \\ k_2(t)U_{Cref} & U_c \in (U_{Cref}, U_{Cmax}] \end{cases} \quad (4)$$

其中, $k_1(t)$ 和 $k_2(t)$ 为充放电过程中的缓冲函数,分别如附录 B 中式 (B1) 和 (B2) 所示, k_{c1} 和 k_{c2} 为闭锁后到储能开始充电前子模块电容器电压与额定值的比值, M_s 为储能充电时的充电函数, t_{c1} 为储能启动充电时刻, t_{c2} 为电压值在 $[U_{Cmin}, U_{Cref}]$ 区间的子模块充电结束时刻, t_{c3} 为电压值在 $(U_{Cref}, U_{Cmax}]$ 区间的子模块充电结束时刻,即整个充电过程的结束时刻。

$t=t_{c1}$ 时,储能开始充电,先对子模块电压低于 U_{Cref} 的子模块充电,即第一阶段充电; $t=t_{c2}$ 时,第一阶段充电完成,开始对子模块电压高于 U_{Cref} 的子模块放电,即第二阶段放电; $t=t_{c3}$ 时,第二阶段放电完成,此时所有桥臂的子模块电容器电压均稳定在 U_{Cref} 附近。在第二阶段的子模块放电过程中,储能装置吸收电能,补充在第一阶段充电过程中消耗的功率。

3.3.1 子模块充电阶段

第一阶段充电开始时,储能通过 DAB 首先对低于 U_{Cref} 的子模块进行充电。DAB 采用闭环控制,实时采集子模块电容器的电压值与 U_{Cref} 进行比较,经过 PI 调节器得到 DAB 的移相角 θ ,驱动开关管工作,控制框图如附录 C 中图 C1 所示^[23]。

3.3.2 子模块放电阶段

在子模块放电阶段,子模块电容通过 DAB 向储能返送电能,为了维持低压侧直流电压的恒定,对于 DAB 的控制,一方面要实现内部的均流以实现平衡控制,另一方面要实现直流输出电压的恒定,相应的控制框图如附录 C 中图 C2 所示。采用闭环控制,将低压侧电压参考值 U_{d2ref} 与实际值 U_{d2} 进行比较,经过 PI 调节后得到每个 DAB 模块的公共参考电流 i_{ref} ,进而分别与每个 DAB 模块的电流输出值 i_1, i_2, \dots, i_n 进行比较,最后经 PI 调节得到每个 DAB 模块的移相角 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$,实现 DAB 并联输出时的均流控制和低压侧直流电压控制。

综上,通过系统的控制保护策略和储能快速恢复策略协调,可以在不需要开断交流断路器和直流断路器参与的情况下实现故障的快速隔离和故障后

的系统快速恢复。

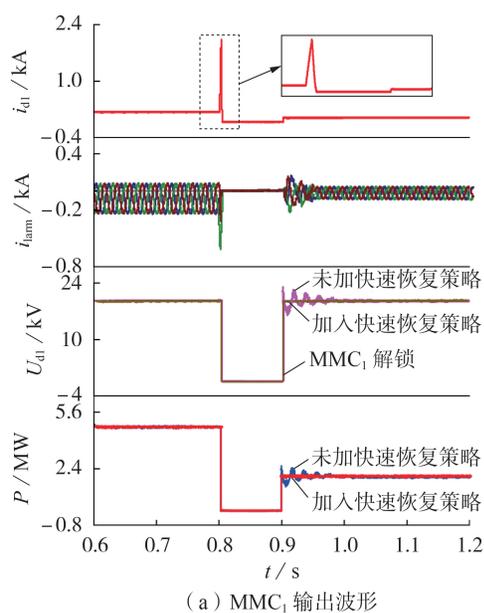
4 仿真验证

为了验证本文提出的故障快速恢复策略的有效性,在 PSCAD / EMTDC 中搭建了如图 A1 所示的两端型系统,其中 MMC₁ 和 MMC₂ 采用 1.3 节介绍的 ESBC 结构。其中,交流电压为 10 kV,直流母线电压为 ± 10 kV,低压侧直流电压为 750 V,换流站额定功率为 20 MW,单个桥臂子模块个数设为 8。

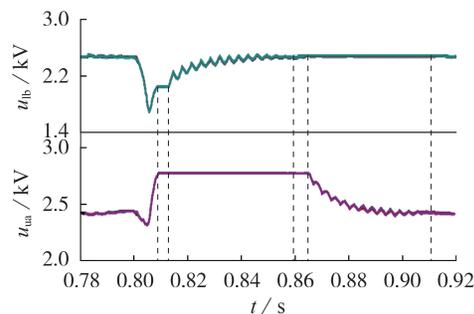
4.1 开环运行时直流母线发生故障时的系统仿真

开环运行情况下,当直流母线发生故障时,两端型直流配电网只需闭锁其中一端换流站即可。

初始时系统正常运行, $t=0.8$ s 时,设 MMC₁ 供电区域的直流母线 F_1 处发生了双极短路故障,短路电阻为 0.01Ω 。仿真结果如图 4 所示。图中, i_{d1} 为直流电流; i_{lamm} 为下桥臂电流; P 为 MMC₁ 输出有功功率; u_{lb} 为 b 相下桥臂电压。故障发生后,直流母线电流在约 2.5 ms 内迅速上升至 2 kA,桥臂电流激增至正常运行时的约 2.7 倍,如图 4(a) 所示,系统检测到桥臂



(a) MMC₁ 输出波形



(b) MMC₁ 子模块电容器电压

图 4 直流母线发生故障时的仿真波形(开环运行)

Fig.4 Simulative waveforms when fault occurs at DC bus (open-loop operation)

电流大于0.6 kA时,经过130 μ s的延时发出闭锁指令,MMC₁迅速闭锁;ESBC闭锁后,直流侧故障电流急速下降,经过约1.8 ms下降到0。ESBC闭锁后,子模块电容电压偏离正常运行值,解锁时,直流母线电压出现波动,整个波动过程持续约75 ms,造成配电网系统的不稳定。采用基于储能的故障快速恢复策略后,在ESBC闭锁期间,储能通过DAB对FBSM的电容进行电压平衡控制,在ESBC解锁前将子模块的电压控制在额定值附近,解锁时,系统在短时间内到达稳态并恢复正常运行。

本文提出的子模块分阶段充放电策略的仿真波形如图4(b)所示,选取a相上桥臂和b相下桥臂进行分析。ESBC闭锁后,启动子模块分阶段充放电策略,先为子模块电压低于 U_{Cref} 的子模块进行充电,如图4(b)中的b相下桥臂,经过约40 ms充电完成,第一阶段充电完成,然后启动第二阶段放电,如图4(b)中的a相上桥臂,经过约40 ms放电完成,第二阶段放电完成。这样,在ESBC解锁前,所有子模块的电容电压均稳定在 U_{Cref} 附近,有效抑制了重启时的电压波动。

4.2 闭环运行时供电支路发生故障时的系统仿真

闭环运行时,MMC₁采取定直流电压控制,MMC₂采取定有功功率控制。假设供电支路 F_2 处在 $t=0.8$ s时发生了双极短路故障,短路电阻为0.01 Ω 。过流特性与开环运行时相同。换流站闭锁后,经过100 ms的延时解锁主站MMC₁,再经过100 ms延时解锁从站MMC₂。2个ESBC交流侧电流与开环运行发生故障时基本类似,仅在解锁时间上有差别。

图5为采用快速恢复策略前后直流母线电流和电压的仿真波形。可以看到,2个换流站几乎在同一时间内过流闭锁。未采用快速恢复策略时,MMC₁解锁和MMC₂解锁时均会造成直流母线电压波动,系统从解锁到达到稳态的时间约为175 ms;采用基于储能的快速恢复策略后,由于2个换流站的子模块电容电压在解锁前均已达到额定值,因此可以同时解锁,解锁后电压在很短的时间内达到稳态,不仅

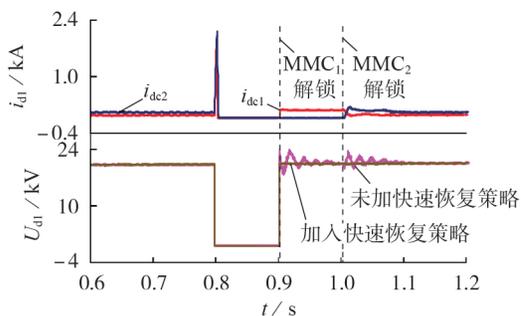


图5 供电支路发生故障时的仿真波形(闭环运行)

Fig.5 Simulative waveforms when fault occurs at power supply branch(closed-loop operation)

大幅缩短了重启时间,而且简化了重启的时序。

由以上仿真分析可知,发生直流侧双极短路故障时,采用ESBC的直流配电网系统可以通过闭锁ESBC实现故障的隔离和清除,无需在线路中配置直流断路器;当ESBC闭锁后,子模块电容电压偏离额定值,采用基于储能的快速恢复策略,在实现重要负荷的不间断供电的同时,储能经过DAB可以在较短时间内使FBSM的电容值稳定在额定值附近,实现ESBC的子模块电容电压再平衡,有效地平抑了电容电压波动,从而实现配电网系统的故障快速恢复,调节时间短,调制方式可靠。随着配电网系统规模的扩大,快速恢复策略的优势更明显。

5 结论

(1)对典型两端型柔性中压直流配电网进行了研究。分析了采用FBMMC作为主体的ESBC在配电网正常运行和故障时的运行特性,并分析了其在故障状态下的暂态特性。发生故障后,ESBC可以通过自身具有的拓扑优势实现故障隔离和清除,在此基础上研究了直流短路故障发生后配电网系统的协调控制策略,通过两端型拓扑结构之间的协调控制策略,可以最大限度地恢复非故障区域的供电,尽可能地减少由于直流故障造成的影响和损失。

(2)针对ESBC,提出一种基于储能的直流短路故障快速恢复策略。该方法通过调整故障后系统的控制时序并采用分阶段充放电策略,实现重要负荷的不间断供电和故障后的快速恢复,本文提出的策略可以有效缩短系统的故障恢复时间,减少直流母线上的电压波动,增强配电网系统的可靠性。随着配电网规模的扩大,快速恢复策略可以实现多个换流站同时解锁,节省了顺序解锁需要的时间,快速恢复的效果将更加明显。

需要指出的是,采用这种拓扑结构会增加电力电子器件的使用数量,但对于负荷较轻、容量要求较小的直流配电网而言,使用该拓扑结构具有一定的可行性。

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] 叶琳浩,刘泽槐,张勇军,等. 智能用电技术背景下的配电网运行规划研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):154-163.
YE Linhao, LIU Zehuai, ZHANG Yongjun, et al. Review on operation and planning of distribution network in background of smart power utilization technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 154-163.

- [3] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [4] 杜翼, 江道灼, 尹瑞, 等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 139-145.
DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-145.
- [5] HUANG A, CROW M, HEYDT G, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [6] LIANG D, QIN C, WANG S, et al. Reliability evaluation of DC distribution power network[C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin, China: IEEE, 2018: 654-658.
- [7] 罗飞, 焦在滨, 马钊, 等. 直流配电网故障分析和继电保护综述[J]. 供用电, 2018, 35(6): 3-11.
LUO Fei, JIAO Zaibin, MA Zhao, et al. Review of fault analysis and relay protection of DC distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 3-11.
- [8] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [9] JOVICIC D, HERTEM V, LINDEN K, et al. Feasibility of DC transmission networks[C]//2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Manchester, UK: IEEE, 2011: 1-8.
- [10] 孙鹏飞, 贺春光, 邵华, 等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.
- [11] 李进. 模块化多电平变流器直流侧短路电流清除技术[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
LI Jin. DC short circuit current clearing technology for modular multilevel converter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [12] 韩纪恒, 陈羽, 孙永健, 等. 直流配电网故障恢复方法分析[J]. 山东工业技术, 2018(12): 158-159.
HAN Qihuan, CHEN Yu, SUN Yongjian, et al. Analysis of fault recovery method for DC distribution network[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(12): 158-159.
- [13] TANG L, OOI B. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [14] 王江天, 王兴国, 马静, 等. 双极 MMC-HVDC 系统故障限流及换流器快速重启策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊1): 21-29.
WANG Jiangtian, WANG Xingguo, MA Jing, et al. Research on fault current limiting and fast restart strategy for the bipolar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(Supplement 1): 21-29.
- [15] 郭晓茜, 崔翔, 齐磊. 架空线双极 MMC-HVDC 系统直流短路故障分析和保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2177-2185.
GUO Xiaolian, CUI Xiang, QI Lei. DC short-circuit fault analysis and protection for the overhead line bipolar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2177-2185.
- [16] 裴鹏, 杨美娟, 章姝俊, 等. MMC-MTDC 系统协调启动控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1800-1807.
QIU Peng, YANG Meijuan, ZHANG Shujun, et al. Coordinated start-up strategy for MMC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1800-1807.
- [17] 贾雨龙, 米增强, 刘力卿, 等. 分布式储能系统接入配电网的容量配置和有序布点综合优化方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 1-7.
JIA Yulong, MI Zengqiang, LIU Liqing, et al. Comprehensive optimization method of capacity configuration and ordered installation for distributed energy storage system accessing distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 1-7.
- [18] ROOT C, PRESUME H, PROUDFOOT D, et al. Using battery energy storage to reduce renewable resource curtailment[C]//2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington DC, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [19] 杨涛, 刘君, 曾华荣, 等. 一种适用于 10 kV 配电网的混合式电力电子变压器仿真研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(22): 22-29, 49.
YANG Tao, LIU Jun, ZENG Huarong, et al. Research on hybrid power electronic transformer applied to 10 kV distribution grid[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(22): 22-29, 49.
- [20] 刘闯, 何达成, 徐鑫哲. 面向直流配电网尾端功率变换的组合式直流变压器研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 43-50.
LIU Chuang, HE Dacheng, XU Xinzhe. Assembled DC transformer applied to DC distribution tail power conversion[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 43-50.
- [21] 罗永捷, 李耀华, 李子欣, 等. 全桥型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越控制保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1933-1943.
LUO Yongjie, LI Yaohua, LI Zixin, et al. DC short-circuit fault ride-through control strategy of full-bridge MMC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1933-1943.
- [22] 王一, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2312-2319.
WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2312-2319.
- [23] 季振东, 李东野, 孙毅超, 等. 一种三相级联型电力电子变压器及其控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(8): 32-39, 47.
JI Zhendong, LI Dongye, SUN Yichao, et al. Research on a three-phase cascaded power electronic transformer and its control strategy[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(8): 32-39, 47.

作者简介:



王冰冰

王冰冰(1992—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为柔性直流配电网技术(E-mail:iceplease@163.com);

梅军(1971—),男,江苏淮安人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中应用、电能质量、光伏发电和数字化变电站等(E-mail:mei_jun@seu.edu.cn)。

(编辑 李莉)

(下转第 39 页 continued on page 39)

inspired transfer learning for self-organizing optimal carbon-energy combined-flow[J]. Control Theory & Applications,2018, 35(5):668-681.

- [22] 孟祥萍,王圣铤,王欣欣. 基于蚁群算法和轮盘算法的多Agent Q学习[J]. 计算机工程与应用,2009,45(16):60-62. MENG Xiangping,WANG Shengbin,WANG Xinxin. Multiagent Q-learning based on ant colony algorithm and roulette algorithm[J]. Computer Engineering and Applications,2009,45(16):60-62.
- [23] FANG K T,LIN D K J,WINKER P,et al. Uniform design: theory and application[J]. Technometrics,2000,42(3):237-248.

作者简介:



王梓耀

王梓耀(1996—),男,广东汕头人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性评估(**E-mail**:ziyaowang100@sina.com);

余涛(1974—),男,广东广州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为复杂电力系统的非线性控制理论与仿真(**E-mail**:taoyu1@scut.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Double Q planning model for medium voltage distribution network based on Elite Ant-Q algorithm

WANG Ziyao, CHEN Junbin, LIN Dan, ZENG Guangxuan, YU Tao

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to effectively apply the refined geographic and load information provided by digital technology, according to the basic characteristics of medium voltage distribution network, the components in distribution network are abstracted into nodes and branches of the graph theory, and a novel double Q planning model for large-scale medium voltage distribution network is built, which takes the economy and reliability as its objectives. The 0-1 variable encoding mode is transformed into sequence integer encoding mode, which reduces the solving complexity. The EAQ (Elite Ant-Q) algorithm is proposed and used to solve the radial network, the tie lines are set according to the shortest path method and connection priority principle, and the optimal closed-loop network is obtained by repeated iterations. The case results of a newly built park in Guangzhou verify the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Key words: large-scale distribution network planning; double Q planning model; EAQ algorithm; sequence coding; shortest path method; closed-loop design

(上接第 23 页 continued from page 23)

Fast recovery strategy of flexible DC distribution network based on energy storage built-in converter after fault

WANG Bingbing¹, LIU Zhong², MEI Jun¹, XUE Zhongbing², FAN Guangyao¹, GE Rui¹,
CHEN Wu¹, XU Weifan²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225000, China)

Abstract: A fast recovery strategy after fault suitable for flexible DC distribution network is proposed. Firstly, the topology of ESBC (Energy Storage Built-in Converter) is proposed, and the transient characteristics of the capacitor voltage and fault current of sub-module under the pole-to-pole short circuit fault condition before and after ESBC blocking are analyzed. Furthermore, the fast recovery strategy after fault based on energy storage is proposed to improve the recovery sequence, and the staged charging and discharging strategy is proposed to suppress the impulse current. Finally, the proposed coordinated control strategy is combined with the DC distribution network, which realizes that during the closing period of converter, the energy storage provides power for the important load to guarantee the uninterrupted power supply during fault clearance period, and meanwhile adjusts the capacitor voltage of sub-module during blocking period to reach the rated value before unlocking, so as to reduce the voltage fluctuation when the converter is unlocked, and shorten the restart time of converter. The effectiveness of the proposed strategy is verified by the simulation model in PSCAD/EMTDC.

Key words: flexible DC distribution network; fast recovery after fault; energy storage built-in converter; pole-to-pole short circuit fault; uninterrupted power supply

附录 A

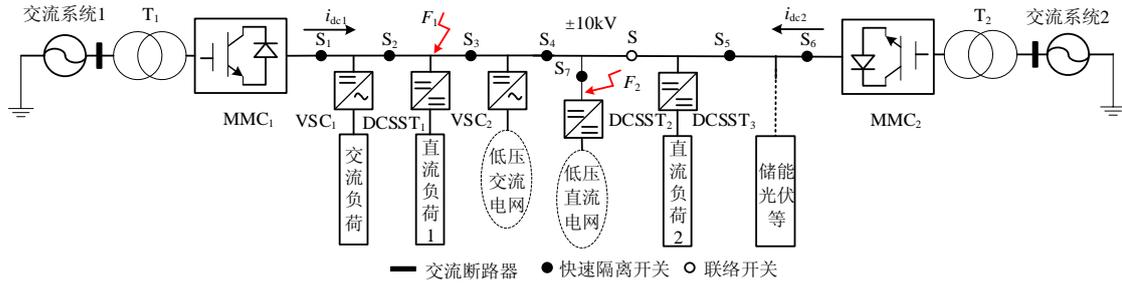


图 A1 两端型直流配电网拓扑结构

Fig.A1 Topology of two-terminal DC distribution network

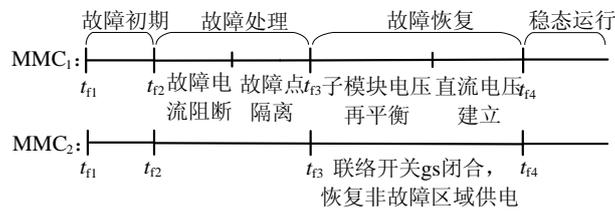


图 A2 直流母线上发生故障时的故障处理和恢复时序图（开环运行）

Fig.A2 Sequence diagram of fault handling and recovery when fault occurs at DC bus (open-loop operation)

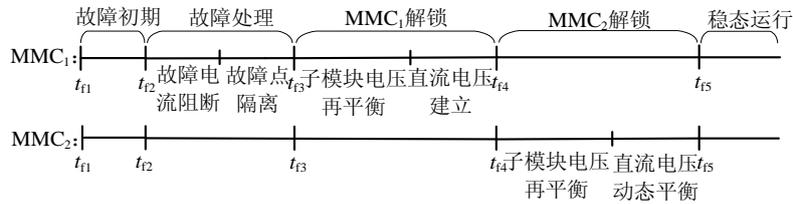


图 A3 供电支路上发生故障时的故障处理和恢复时序图（闭环运行）

Fig.A3 Sequence diagram of fault handling and recovery when fault occurs at power supply branch (closed-loop operation)

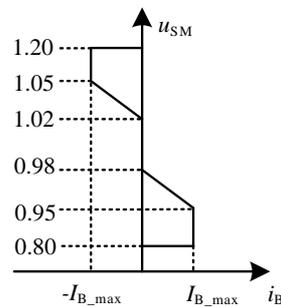


图 A4 ESBC 中储能控制策略

Fig.A4 Energy storage control strategy in ESBC

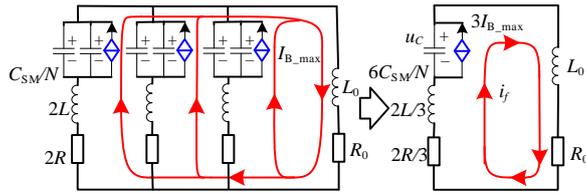


图 A5 ESBC 闭锁前的故障电流通路及其等效电路

Fig.A5 Fault current path and its equivalent circuit before ESBC blocking

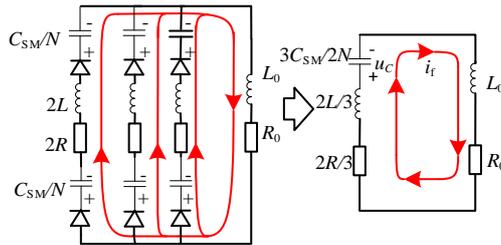


图 A6 ESBC 闭锁后的故障电流通路及其等效电路

Fig.A6 Fault current path and its equivalent circuit after ESBC blocking

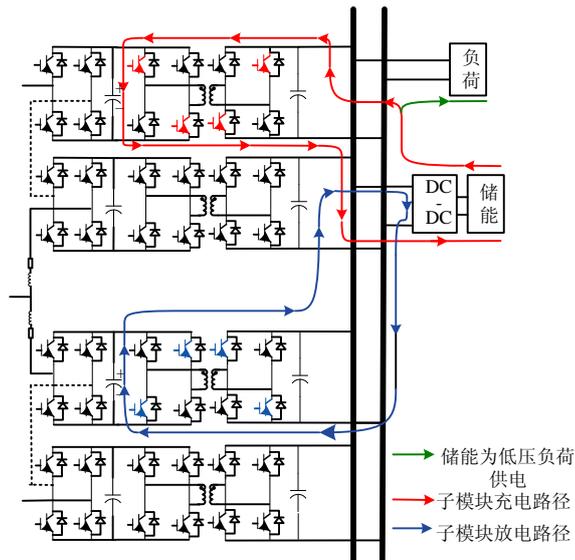


图 A7 基于储能的故障快速重启策略示意图

Fig.A7 Schematic diagram of fast restart strategy after fault based on energy storage

附录 B

$$k_1(t) = \begin{cases} k_{C1} & t \leq t_{C1} \\ \frac{t-t_{C1}}{t_{C2}-t_{C1}} M_s & t_{C1} < t < t_{C2} \\ 1 & t \geq t_{C2} \end{cases} \quad (\text{B1})$$

$$k_2(t) = \begin{cases} k_{C2} & t \leq t_{C2} \\ \frac{t-t_{C2}}{t_{C3}-t_{C2}} M_s & t_{C2} < t < t_{C3} \\ 1 & t \geq t_{C3} \end{cases} \quad (\text{B2})$$

附录 C

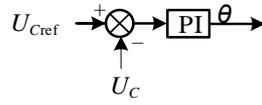


图 C1 子模块充电阶段 DAB 控制框图

Fig.C1 Control block diagram of DAB during submodule charging stage

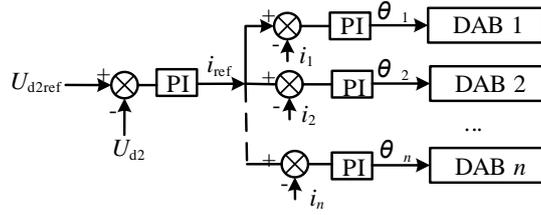


图 C2 子模块放电阶段 DAB 控制框图

Fig.C2 Control block diagram of DAB during submodule discharging stage