

# 复杂多端柔性直流电网源网限流设备协同优化配置

梅 军,陈萧宇,朱鹏飞,严凌霄,张丙天

(东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

**摘要:**利用源网限流设备协同优化配置解决复杂多端柔性直流电网的故障电流抑制难题,成为相关领域的研究热点。首先,结合模块化多电平换流器(MMC)与电网的耦合程度,提出适用于复杂多端柔性直流电网的区域划分原则,以提高多端柔性直流电网限流设备参数优化的计算效率;然后,根据各区域的限流需求,结合MMC、直流变压器、限流电抗器及故障限流器等关键源网设备的限流机理,提出各区域典型限流设备的配置方案;在此基础上,对不同区域限流设备参数进行分级优化;最后,基于PSCAD/EMTDC平台搭建六端直流电网,结合具体故障限流器拓扑,仿真验证所提源网限流设备参数分级优化方法的有效性。仿真结果表明,所提方法能够实现源网设备协同限流,减轻网侧设备的限流压力,同时提高设备参数优化的计算效率。

**关键词:**模块化多电平换流器;限流设备;区域划分;分级优化;协同优化配置;多端柔性直流电网

**中图分类号:**TM 721.1;TM 762

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202202002

## 0 引言

基于模块化多电平换流器MMC(Modular Multi-level Converter)的柔性直流输电技术因具有可灵活控制有功/无功功率、利于新能源接入、无换相失败等优点,成为解决远距离、大容量输电以及特大型交直流混合电网互联的重要技术手段<sup>[1]</sup>。然而,由于柔性直流电网自身具有低惯性、弱阻尼特性,发生直流故障时存在故障过流严重、故障隔离与网络自愈困难、供电可靠性差等一系列问题<sup>[2]</sup>。如何充分发挥直流断路器DCCB(Direct Current Circuit Breaker)与源网两侧关键限流设备的协同限流能力,实现多种限流设备的空间配置与参数协同优化,以有效提高复杂多端柔性直流电网对直流故障的穿越能力及供电可靠性<sup>[3]</sup>,是未来交直流混联电网大规模应用的关键。

目前,实际工程中主要采用DCCB配合限流电抗器CLR(Current Limiting Reactor)的优化限流方案,文献[4-6]提出了CLR的优化配置方法,但都是针对特定电网结构,不具有普适性。此外CLR不宜过大,否则会降低系统的动态性能,故CLR需要与其他设备(如故障限流器FCL(Fault Current Limiter))协同配合限流,以满足DCCB开断容量限制需要。FCL主要分为超导FCL和固态FCL这2类,后者又可分为电感式FCL和电容式FCL。其中超导FCL的理论限流效果较好,但对功率电阻的要求极高<sup>[7]</sup>,在实际工程中难以满足其要求。同时由文献[8]可知,电感式FCL具有更好的限制故障电流上升速率的性

能。因此,本文研究采用一种基于文献[9]改进的电感式磁耦合故障限流器MCFCL(Magnetic Coupling Fault Current Limiter),以减少电力电子器件数量,提高设备经济性。

文献[10]根据超导FCL在直流故障期间的限流特性,提出了超导FCL与DCCB的协调配合方案,然而由于超导FCL的成本过高,目前不适用于高压直流系统;文献[11]针对四端柔性直流电网的短路故障,根据不同的目标函数和约束条件,研究了CLR与FCL的协同优化方法;文献[12]针对六端柔性直流电网提出了CLR与电容式FCL的多目标优化配置方法。上述研究表明,目前关于限流设备的协同优化方案主要针对简单环形电网,并不能适应未来多端柔性直流电网网架结构的复杂性,且采取的限流手段相对单一,主要集中于DCCB与网侧CLR以及FCL相互参数的协同优化,关于源网设备参数协同优化的研究鲜有报道。

然而,随着近年来柔性直流电网故障限流技术的快速发展,具有故障自清除能力的MMC拓扑结构,如全桥子模块FBSM(Full-Bridge Sub-Module)、箝位双子模块CDSM(Clamp Double Sub-Module)、半全混合型MMC<sup>[13]</sup>,逐渐被用于限制故障电流。此外,文献[14]提出了混合型MMC的主动限流控制策略。然而,基于混合型MMC的限流策略并不适用于半桥型MMC,为了进一步利用半桥型MMC的限流能力,文献[15]提出了半桥型MMC的紧急限流控制策略。考虑到全桥子模块和箝位双子模块的成本较高,在实际直流工程中MMC一般可采用半桥型MMC、基于紧急控制策略的半桥型MMC和基于主动限流控制策略的混合型MMC这3种类型。作为另一重要源侧设备,直流变压器DCT(DC Transformer)

收稿日期:2021-09-16;修回日期:2021-12-08

在线出版日期:2022-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077037)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077037)

具有模块多重化结构和模块化多电平结构<sup>[16]</sup>,同样可以与DCCB、CLR和FCL等设备进行配合,在抑制故障电流的同时实现无闭锁故障穿越。

综合上述分析可知,如何充分发挥源网关键限流设备的协同限流能力,制定源网多种设备配置与参数优化协同限流规则,以提高复杂多端柔性直流电网的供电可靠性、设备参数优化的计算效率,是直流技术发展的一个重要研究方向。为此,本文首先基于MMC与电网之间的耦合程度,提出了适用于复杂多端柔性直流电网的区域划分原则,将电网划分为低耦合区域和高耦合区域,在此基础上实现多种限流设备的空间配置与参数分级优化;然后,根据各区域的限流需求,结合MMC、DCT、CLR以及FCL等源网关键设备的限流机理和主要限流策略,提出各区域的典型限流设备配置方案;在此基础上,分级优化各区域设备参数,实现源网设备协同限流,同时提高整体优化的计算效率;最后,在PSCAD/EMTDC平台中搭建六端对称单极直流电网模型,结合具体的FCL拓扑,通过仿真验证所提限流设备配置方案和分级优化源网设备参数方法的有效性。

## 1 限流设备空间配置

### 1.1 区域划分原则

对复杂多端柔性直流电网中的多种限流设备进行协同优化配置首先要解决限流手段的空间位置优化问题,制定源网多种限流设备的空间配置规则,也是后续实现限流性能参数优化的基础与关键。按照拓扑结构,复杂多端柔性直流电网大体可分为环状、星形和端对端及其组合等结构,具体拓扑结构示意图如图1所示。

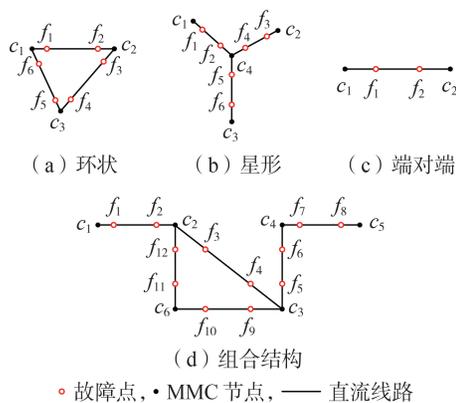


图1 复杂多端直流电网的典型拓扑结构示意图

Fig.1 Typical topology structure diagram of complex multi-terminal DC power grid

限流设备协同优化配置的最终原则是:在实现柔性直流电网对故障点可靠隔离的同时,尽可能保证非故障网络安全、可靠运行。为此,本文根据源网

设备的限流特点以及故障点对直流线路连接的解耦作用,制定适用于复杂多端柔性直流电网限流功能空间优化配置的区域划分原则,具体如下。

1)若MMC节点只与1条直流线路相连,则其与电网的耦合程度低(通常指单末端MMC),当该线路发生故障时,将导致MMC与电网解耦,电网中其他MMC无法与该MMC形成馈流回路,将该MMC节点的相邻区域定义为低耦合区域。

该区域属于单末端MMC,其相连线路发生故障后,故障电流特征相对简单,可通过CLR直接限制故障电流,再利用DCCB隔离故障电流。或者考虑到交流侧无功功率的支撑需求,可采用基于主动限流控制策略的混合型MMC来限制故障电流。因此,针对该区域提出以下2种典型限流设备配置方案:方案①为半桥型MMC+CLR+DCCB;方案②为基于主动限流控制策略的混合型MMC+CLR+隔离开关。

2)若MMC节点有2条及以上的输出线路,则其与电网耦合紧密,当与该MMC相邻的某条线路发生故障时,电网中其他MMC仍可与该MMC形成馈流回路,如连接环状网络和星形网络的MMC节点,将该MMC节点的相邻区域定义为高耦合区域。

当该区域发生直流故障时,可采用CLR、FCL、DCCB、DCT和MMC协同限制故障电流。若采用基于主动限流控制策略的混合型MMC,可通过主动限流控制策略限制故障电流,其连接的直流线路只需配置隔离开关和CLR;而若采用半桥型MMC,则其所连接的直流线路应配置CLR、FCL和DCCB。此外,为了避免高、低电压侧的相互作用,可在电网中配置DCT,且DCT在直流电网中应配置在相同的电压水平下。DCT主要有以下2种配置方案:①为了节省空间,DCT与MMC(MMC可采用半桥型MMC、基于紧急控制策略的半桥型MMC和基于主动限流控制策略的混合型MMC这3种类型)并联接入直流电网;②DCT从远端连接到直流电网,其连接的直流线路应配置CLR、FCL和DCCB。基于上述分析,高耦合区域的7种典型限流设备配置方案(方案1—7)见附录A图A1。

结合上述区域划分原则,图1所示电网的区域划分结果如图2所示(图中节点编号同图1中)。对区域进行划分主要有以下2个优点。①提高全局优化计算效率。相较而言,低耦合区域属单端MMC,故障电流特性简单,可首先根据单端MMC故障电流的计算解析式确定该区域设备的参数,减少后续优化过程中的不确定因素。基于此,采用多目标优化选取高耦合区域设备的参数。分级优化设备参数,可以提高整体优化的计算效率。以不采用分级优化的计算效率为基准,对图1所示电网拓扑结构进行区域划分后,其优化计算效率结果如附录A图A2所

示。对于含有  $n$  端 MMC 的多端柔性直流电网而言,经区域划分后若有  $m$  端 MMC 及相邻区域属于低耦合区域,则优化计算效率可提高  $m/(2n)$ 。②明确不同区域的限流设备配置方案。结合复杂多端柔性直流电网中不同区域的限流需求、关键限流设备的限流机理及工程需求,对低耦合区域提出了2种典型限流设备配置方案,对高耦合区域提出了7种典型限流设备配置方案。然而,在实际工程中,具体采用何种配置方案取决于发生直流故障后直流电网的重启需求、工程成本等诸多因素。

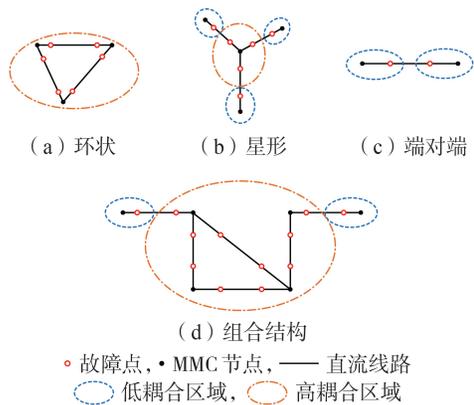


图2 区域划分结果

Fig.2 Regional division results

综合上述分析,对于复杂多端直流电网,其基于区域划分原则的源网限流设备分级优化流程图如附录A图A3所示。

## 1.2 六端直流电网限流设备的空间配置

为了分析上述基于区域划分原则的源网限流设备分级优化方法的有效性,在PSCAD/EMTDC平台搭建如附录A图A4所示的六端直流电网。图中,MMC节点  $c_2$  为  $\pm 500$  kV 恒压站,其他MMC节点为定功率站;基于模块化多电平结构的DCT与MMC节点  $c_2$  并行连接,其等效模型与MMC相同。MMC参数如下:桥臂电感  $L_0 = 52.9$  mH, MMC每相使用的子模块数量  $N = 440$ ,子模块电容  $C_0 = 16000$   $\mu$ F,单相桥臂等效电阻  $R_0 = 0.572$   $\Omega$ 。直流线路参数如下:架空线路单位长度电阻为  $0.0099$   $\Omega/\text{km}$ ,单位长度电感为  $1.0490$  mH/km。

该六端直流电网的区域划分结果如附录A图A4所示。MMC节点  $c_4$  和  $c_6$  及其相邻区域被划分为低耦合区域,可采用上述低耦合区域的配置方案①和方案②。其他MMC节点及其相邻区域被划分为高耦合区域,该区域内的MMC可采用半桥型MMC、基于紧急控制策略的半桥型MMC和基于主动限流控制策略的混合型MMC这3种类型。然而,考虑到设备的成本问题,实际直流电网中的高耦合区域大多采用半桥型MMC,所以本文针对高耦合区域主要讨论半桥型MMC与网侧设备协同限流的情况。故

六端直流电网中高耦合区域的限流设备配置方案可选用方案1和方案5(将其记为方案A),或方案4和方案7(将其记为方案B)。方案A选用半桥型MMC,通过网侧CLR和FCL设备限流;方案B采用基于紧急限流控制策略的半桥型MMC<sup>[15]</sup>,通过减少发生故障时桥臂投入的子模块数量来降低直流电压,从而抑制故障电流。但该方案的限流效果有限,且压降低会导致MMC交流侧电流浪涌。因此,本文提出在源侧限流策略的基础上协同优化降压系数  $k$  (取值范围为  $0 \sim 1$ )、CLR和FCL的源网设备协同限流设备配置方案B。

## 2 考虑CLR与MCFCL的直流线路故障电流计算建模

准确计算直流线路故障电流可为后续限流设备的参数优化计算提供基础。

### 2.1 直流电网故障保护时序和MCFCL拓扑结构

为了接近实际情况,对网侧限流设备的分析主要围绕FCL的具体拓扑,即改进的MCFCL。与文献[9]所提MCFCL不同,本文中改进的MCFCL在二次侧回路中减少了50%的绝缘栅双极晶体管(IGBT)使用数量,但工作原理相同,极大地提高了IGBT的利用率和设备的经济性,所以改进的MCFCL更具有工程实用价值。

此外,高压直流电网的直流故障保护时序是准确计算故障电流前提,因此本文结合改进的MCFCL和混合型DCCB<sup>[10]</sup>对故障保护时序进行分析,假设  $t_0$  时刻电网的直流线路发生故障,大约经过  $3$  ms 的故障主保护动作时间,  $t_1$  时刻MCFCL和DCCB接收到动作指令。当  $t_2$  时刻故障点某一侧MCFCL上的电压小于金属氧化物避雷器(MOA)的额定电压时,该侧MCFCL完全投入。  $t_3$  时刻另一侧MCFCL中的MOA退出,两侧MCFCL完全投入。  $t_4$  时刻DCCB中主断路器动作,  $t_5$  时刻电流衰减至  $0$ ,故障被隔离。直流电网故障动作保护时序图如图3所示。由图可以看出,故障发生后需要约  $3$  ms 的保护动作时间, DCCB大约在故障发生  $6$  ms 后完成动作<sup>[5,11-12]</sup>。因此,本文将重点研究直流故障发生后  $6$  ms 内设备参数配置对故障电流的影响。

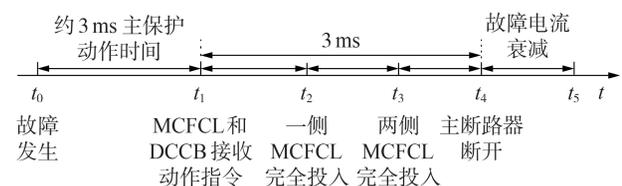


图3 直流电网故障保护动作时序图

Fig.3 Fault protection action sequence diagram of DC power grid

改进的 MCFCL 拓扑结构和简化等效模型如附录 A 图 A5 所示(由于变压器的漏电阻很小,在优化建模中可将其忽略),其动作时序如附录 A 图 A6 所示,主要分为以下 3 个阶段。

1)当 MCFCL 正常运行时,IGBT 导通,电流流路径如图 A5(b)中的蓝线和绿线所示。此时,MCFCL 的等效电感  $L_{eq}=L_{F1}+L_{F2} // L_{F3}$  ( $L_{F1}=L_1-M$  为 MCFCL 一次侧绕组漏感,  $L_{F2}=M$  为励磁电感,  $L_{F3}=L_2-M$  为将 MCFCL 二次侧漏感折算到一次侧的值,  $L_1$ 、 $L_2$  分别为 MCFCL 一次侧、二次侧绕组漏感,  $M$  为一、二次侧绕组之间的互感),考虑到  $L_{F2} // L_{F3}$  远小于  $L_{F1}$ ,则  $L_{eq}$  近似等于  $L_{F1}$ 。

2)假设  $t_0$  时刻发生故障,  $t_1$  时刻检测到故障, MCFCL 接收到工作信号, IGBT 关断,故障电流流经图 A5(b)中的蓝线、黄线。  $t_1-t_{1a}$  对电容进行充电(电阻为电容提供放电路径);  $t_{1a}$  时刻后,故障电流流经图 A5(b)中的蓝线、红线, MOA 开始吸收能量。  $t_1-t_2$  时段内  $L_{F1} < L_{eq} \ll L_{F1} + L_{F2}$ 。

3)MOA 的漏电流在  $t_2$  时刻后可忽略, MCFCL 的二次侧呈高阻抗或开路。因此,在  $t_2$  时刻后,  $L_{eq}=L_{F1}+L_{F2}$ 。

上述 3 个阶段 MCFCL 的解析式分别如式(1)~(3)所示。

$$\begin{cases} U_{dc} = L_{F1} \frac{di_1(t)}{dt} + L_{F2} \frac{d(i_1(t) - i_3(t))}{dt} \\ 0 = L_{F3} \frac{di_3(t)}{dt} - L_{F2} \frac{d(i_1(t) - i_3(t))}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{dc} = L_{F1} \frac{di_1(t)}{dt} + L_{F2} \frac{d(i_1(t) - i_3(t))}{dt} \\ 0 = L_{F3} \frac{di_3(t)}{dt} - L_{F2} \frac{d(i_1(t) - i_3(t))}{dt} + U_{MOA} \end{cases} \quad (2)$$

$$U_{dc} = L_{F1} \frac{di_1(t)}{dt} + L_{F2} \frac{di_1(t)}{dt} \quad (3)$$

式中:  $U_{dc}$  为一次侧直流电压;  $i_1(t)$  为一次侧绕组电流;  $i_3(t)$  为将二次侧绕组电流  $i_2(t)$  折算到一次侧的电流值,  $i_3(t) = -n'i_2(t)$ ,  $n' = L_1/L_2$  为 MCFCL 一、二次侧绕组之间的电压比值;  $U_{MOA}$  为 MOA 的箝位电压。

MCFCL 的等效电路如图 4 所示。图中,  $i$  为故障电流;  $i_F$  为流经  $L_{F2}$  的电流;  $i_{MOA}$  为流经 MOA 的电流。MCFCL 的限流电感主要包括  $L_{F1}$  和  $L_{F2}$ ,  $L_{F1}$  的运行方式与 CLR 相同,而  $L_{F2}$  仅在发生直流故障时投入直流线路。  $L_{F1}$  在  $t_0$  时刻之前投入故障线路,结合图 3 所示时序图可以看出:  $t_1-t_2$  期间,故障线路一侧 MCFCL 快速投入运行,且该侧 MCFCL 在  $t_2$  时刻完全投入故障线路,可忽略该侧 MCFCL 的  $i_{MOA}$ ,故此时故障电流  $i=i_F$ ;  $t_2-t_3$  期间,故障线路另一侧的 MCFCL 投入运行,故障线路两侧的 MCFCL 在  $t_3$  时刻全部投入运行。

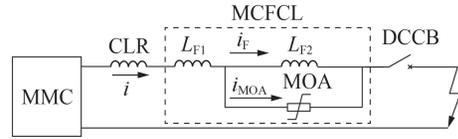


图 4 MCFCL 的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of MCFCL

## 2.2 故障电流计算

本文考虑最严重的直流故障情况,即直流线路发生极间短路故障时的故障电流计算。在故障发生初期, MMC 直流侧故障电流以子模块电容放电电流为主, MMC 闭锁前可等效为 RLC 二阶放电电路。对于图 A4 所示的六端直流电网而言,若故障点  $f_1$  处发生极间短路故障,则发生故障后直流电网的等效模型如附录 A 图 A7 所示。为了便于计算分析,将直流线路简化为串联 RL 电路, DCCB 与 MCFCL 故障点的过渡电阻和通态电阻之和小于直流线路等效电阻,因此可忽略不计。

根据故障线路两侧 MCFCL 的动作时序,分步列写网络状态方程<sup>[17-18]</sup>以计算故障电流。假设 2 s 时故障点  $f_1$  发生极间短路故障,直流线路首、末端均配置了 0.1 H 的 CLR,故障线路两端 MCFCL 的  $L_{F1}$  和  $L_{F2}$  均为 0.1 H。直流线路故障电流的仿真和计算结果对比如图 5 所示(图中  $i_{15}$ 、 $i_{56}$ 、 $i_{02}$ 、 $i_{10}$ 、 $i_{22}$ 、 $i_{23}$ 、 $i_{34}$ 、 $i_{31}$  分别为图 A7 中对应线路上故障电流的计算结果,  $i_{15}^*$ 、 $i_{56}^*$ 、 $i_{02}^*$ 、 $i_{10}^*$ 、 $i_{22}^*$ 、 $i_{23}^*$ 、 $i_{34}^*$ 、 $i_{31}^*$  为仿真结果)。由图可知,故障发生后 6 ms 内,经 MATLAB 计算的直流线路故障电流与仿真得到的直流线路故障电流吻合较好,这为后续求解数学优化模型、定量计算优化目标与约束条件奠定了基础。

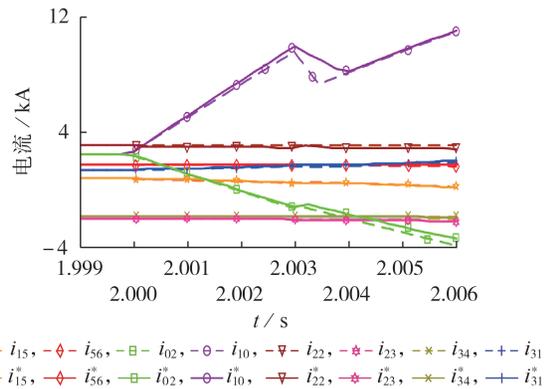


图 5 直流线路故障电流的仿真和计算结果对比

Fig.5 Comparison of DC line fault current between simulative results and calculative results

## 3 不同区域限流设备参数的分级优化

### 3.1 低耦合区域限流设备参数选取

对于低耦合区域的 2 种限流设备配置方案,在故障发生后的数毫秒内,即  $t_1$  时刻前主要靠 CLR 限

流。在满足系统故障穿越的条件下尽可能减少CLR的配置,既可提高系统性能,又能减少投资成本。同时因低耦合区域MMC在故障发生后与电网解耦,属单端MMC。单端MMC故障电流的变化规律如下:

$$i_{dc} = \sqrt{U_{dc}^2 C_{eq} / (L'_{eq} + 2L_R) + I_1^2} e^{-\delta_1 t} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) I_1 \quad (4)$$

$$\delta_1 = R_{eq} / [2(L'_{eq} + 2L_R)] \quad (5)$$

$$\omega_1 = \sqrt{1 / [(L'_{eq} + 2L_R) C_{eq}]} \quad (6)$$

$$\alpha_1 = \arctan \left[ (I_1 / U_{dc}) \sqrt{(L'_{eq} + 2L_R) / C_{eq}} \right] \quad (7)$$

$$i_{arm} = |i_{dc}(t)| / 3 + I_a / 2 \quad (8)$$

式中:  $i_{dc}$  为故障线路电流;  $I_1$  为故障发生前线路电流;  $i_{arm}$  为桥臂电流;  $L_R$  为直流线路所配置CLR的电感值;  $I_a$  为交流电流幅值;  $C_{eq} = 6C_0 / N$ ;  $R_{eq} = 2R_0 / 3$ ;  $L'_{eq} = 2L_0 / 3$ 。

根据单端MMC故障电流的变化规律确定低耦合区域2种限流设备配置方案中的CLR。根据限流功能需求:方案①只需确保CLR满足DCCB的最大开断电流  $I_{Dmax}$  (本文中取为15 kA) 要求,即根据式(4)~(7)确定方案①中的CLR;方案②只需确保CLR满足故障后MMC在采取主动限流控制策略前(故障发生后的前3 ms内)不闭锁,即根据式(8)确定方案②中的CLR。

因此,对于六端直流电网中属于低耦合区域的故障点  $f_8$  和  $f_{12}$ ,可根据式(4)~(8)确定2个故障点相邻CLR的电感值分别为240.0、18.3 mH。

### 3.2 高耦合区域限流设备参数优化

#### 3.2.1 优化目标函数

在确定低耦合区域的CLR后,采用多目标优化算法优化高耦合区域限流设备参数,实现“先低后高”分级优化。本文对六端直流电网的高耦合区域采用方案A和方案B,并对比分析2种方案的限流效果。

在综合考虑限流效果和系统性能要求的基础上,高耦合区域的优化目标函数  $m'$  如式(9)所示。

$$m' = \min \{ m_1, m_2, m_3 \} = \min \left\{ \frac{1}{12} \sum_{q=1}^{12} \frac{|I_q(t_4)|}{I_{Dmax}}, \sum_{q=1}^{12} L_{Rq} + \sum_{j=1}^{N_F} L_{F1j}, \sum_{j=1}^{N_F} L_{F2j} \right\} \quad (9)$$

式中:  $I_q(t_4)$  为  $t_4$  时刻故障点  $f_q$  近端的故障电流;  $N_F$  为直流电网中配置的MCFCL数量;  $L_{Rq}$  为故障点  $f_q$  对应直流线路所配置CLR的电感值;  $L_{F1j}$ 、 $L_{F2j}$  分别为第  $j$  个MCFCL一次侧绕组漏感、励磁电感。

为了保证DCCB能够可靠切断故障电流,直流电网发生双极短路故障后,流过故障点近端的故障电流应始终小于DCCB的最大开断电流  $I_{Dmax}$ ,将所有故障情况下流过故障点近端的故障电流与  $I_{Dmax}$  占比

的平均值作为反映直流电网全局限流效果的指标  $m_1$ 。  $m_1$  的值越小,表明限流效果越好。在满足限流需求的条件下,尽可能减少系统配置CLR的总数量既可以提高系统性能,又能减少设备投资成本。同时由于FCL成本昂贵,如何在保证限流效果的同时减少其配置数量和阻抗值是亟待解决的问题。故本文定义  $m_2$  为全网CLR的总电感值与  $L_{F1}$  之和,  $m_3$  为全网的  $L_{F2}$  之和。  $m_2$  和  $m_3$  用于降低限流设备的成本。

另外,为了保护DCCB,流过故障点所在位置对应DCCB的故障电流应被抑制在DCCB的最大开断电流以内,故  $I_q(t_4)$  应不大于  $I_{Dmax}$ ;为了保证非故障区域电网的正常运行,MMC的桥臂电流  $i_{armq}$  应不大于IGBT额定电流(3 kA)的2倍;为了防止过大的电压跌落使交流侧电流激增,MMC出口电压  $U_{dcq}$  应约束在一定的范围内,本文取MMC出口电压应大于等于电网额定电压  $U_{den}$  的70%<sup>[6]</sup>。同时,为了保持直流电网的动态性能,提高系统可靠性,应对电感参数加以限制。综上,约束条件如式(10)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq |I_q(t_4)| / I_{Dmax} \leq 1 \\ 0 \leq i_{armq} \leq 6 \text{ kA} \\ U_{dcq} \geq 0.7 U_{den} \\ 0.1 \text{ H} \leq L_{Cq} = L_{Rq} + L_{F1j} \leq 0.4 \text{ H}, \quad 0.1 \text{ H} \leq L_{F2j} \leq 0.2 \text{ H} \end{cases} \quad (10)$$

此外,对于采用基于紧急限流控制策略的半桥型MMC的方案B,如1.2节所述,除了需考虑式(10)所示约束条件外,还需考虑降压系数  $k$  的约束。下面推导说明  $k$  与MMC交流侧电流之间的关系。MMC单相交流等效电路如附录A图A8所示。  $k$  与交流电流  $i_r$  ( $r \in \{a, b, c\}$ ) 之间的关系式为:

$$0.5i_r R_0 / 2 + 0.5R_0 di_r / dt + 0.5U_{dc} = v_r + u_{pr} \quad (11)$$

$$u_{pr} = kU_{dc} / 2 \quad (12)$$

$$i_r(t) = Ae^{-t/\tau} + e^{-2t/\tau} (1-k)U_{dc} R_0 / 2 + B / (\omega^2 \tau^2 + 1) \quad (13)$$

$$A = i_r(t_0) e^{t_0/\tau} - (1-k)U_{dc} R_0 / 2 + B / [(\omega^2 \tau^2 + 1) e^{-t_0/\tau}] \quad (14)$$

$$B = 2R_0 V_r \cos(\omega t) - 2\tau R_0 V_r \omega \sin(\omega t) \quad (15)$$

式中:  $u_{pr}$  为上桥臂电压;  $v_r = V_r \cos(\omega t)$  为  $r$  相交流电压,  $V_r$  为电压幅值,  $\omega$  为稳态交流电流的角频率;  $\tau = L_0 / R_0$ ;  $i_r(t_0)$  为故障发生的  $t_0$  时刻  $r$  相交流侧电流。

可以看出,  $i_r$  随着  $k$  的减小而增大。以单端MMC为例,假设2 s时发生直流极间短路故障,出口电压和交流电流分别如附录A图A9和图A10所示。由图可以看出,直流故障发生后6 ms内,当直流电压大于  $0.7 U_{den}$  时,交流电流稳定。因此,  $k$  的约束范围为:

$$0.7 \leq k \leq 1 \quad (16)$$

#### 3.2.2 高耦合区域限流设备优化配置结果

结合上述多目标函数以及约束条件,采用基于帕累托(Pareto)最优解集的非支配排序遗传算法(NSGA-II)<sup>[19]</sup>进行多目标优化求解。设置种群进化

次数为 200,初始种群规模为 500,式(10)中  $L_{C_0}$  的上、下限值分别为 0.4、0.1 H,  $L_{F_2}$  的上、下限值分别为 0.2、0.1 H。可得方案 A 和方案 B 的优化结果分别如附录 A 图 A11 和图 A12 所示。由图可知:对于仅采用网侧设备限流的方案 A 而言,CLR 和 FCL 的配置数量越大,限流效果越好;对于采用基于紧急限流控制策略的源网设备协同限流方案 B 而言,随着降压系数  $k$  减小,网侧配置 CLR 和 FCL 的需求减小,这减轻了网侧设备的限流压力,实现了源网设备协同限流。

为了从优化结果中选择最优折中解,采用模糊隶属度函数定义标准化满意度  $\mu^{[11,20]}$ ,如式(17)和式(18)所示。模糊隶属度函数是通过比较满意度,从 Pareto 最优解集中选择最优折中解的一种方法。 $\mu$  值越大,表明相应的配置方案越好。

$$\mu = \frac{1}{3} \sum_{l=1}^3 \mu_l \quad (17)$$

$$\mu_l = \begin{cases} 1 & m_l \leq m_{l, \min} \\ \frac{m_{l, \max} - m_l}{m_{l, \max} - m_{l, \min}} & m_{l, \min} < m_l < m_{l, \max} \\ 0 & m_l \geq m_{l, \max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\mu_l$  为第  $l$  个目标函数的标准化满意度; $m_l$  为第  $l$  个目标函数值; $m_{l, \max}$ 、 $m_{l, \min}$  分别为第  $l$  个目标函数的上、下限。

基于 NSGA- II 和模糊度函数,可得方案 A 和方案 B 的部分优化配置结果如附录 B 表 B1—B4 所示。方案 A 和方案 B 的限流效果和标准化满意度结果如表 1 所示。由表可以看出,在不同的 MCFCL 配置数量下,方案 B 的  $\mu$  值均大于方案 A 的  $\mu$  值,表明方案 B 的配置结果优于方案 A。方案 A 的最优折中解  $\mu=0.729$  对应的限流效果指标  $m_1$  和 MCFCL 配置台数分别为 0.738 和 5。采用紧急限流控制策略的方案 B 的最优折中解  $\mu=0.753$  对应的限流效果指标  $m_1$  和 MCFCL 配置台数分别为 0.681 和 4。优化结果表明,采用基于紧急限流控制策略的半桥型 MMC 可进一步提高标准化满意度  $\mu$  和限流效果,减少 MCFCL 配置数量,减轻网侧设备的限流压力,实现源网设备协同限流。

表 1 方案 A 和方案 B 的限流效果指标与标准化满意度结果

Table 1 Current limiting effect index and standardized satisfaction degree results of Scheme A and Scheme B

MCFCL 配置台数	方案 A		方案 B	
	$m_1$	$\mu$	$m_1$	$\mu$
4	—	—	0.681	0.753
5	0.738	0.729	0.659	0.744
6	0.728	0.710	0.636	0.725
7	0.689	0.668	0.611	0.683
8	0.665	0.632	—	—

### 4 仿真验证

采用附录 B 表 B3 和表 B4 中  $\mu$  取最大值时对应的最优折中配置方案进行仿真,以验证六端直流电网源网设备协同限流方案和限流设备参数分级优化的有效性。假设 2 s 时发生极间短路故障, MCFCL 和限流控制策略在 2.003 s 时动作, DCCB 在 2.006 s 时动作,因篇幅有限,以故障点  $f_1$  发生故障为例进行说明,当  $f_1$  发生故障时,故障线路电流如图 6 所示(图中  $i'$  为 MMC<sub>1</sub> 流向故障点  $f_1$  的电流,  $i''$  为故障点  $f_1$  流向 MMC<sub>2</sub> 的电流),故障点近端 MMC<sub>1</sub> 的桥臂电流如图 7 所示,故障点  $f_1$  相邻两侧 MMC 出口电压和功率如图 8 所示。

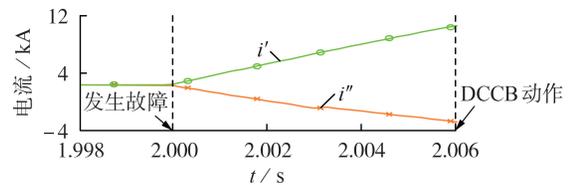


图 6 故障线路电流  
Fig.6 Fault line current

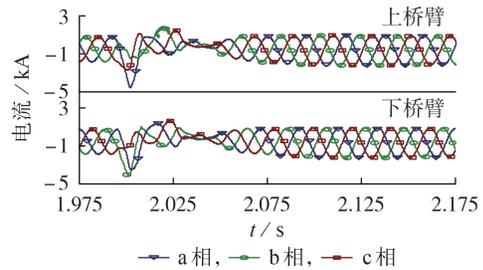


图 7 桥臂电流  
Fig.7 Bridge arm current

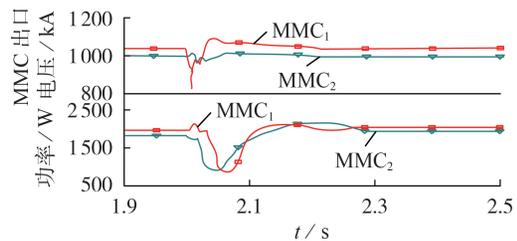


图 8 故障点相邻两侧 MMC 出口电压及功率  
Fig.8 Output voltage and power of MMC on both sides adjacent to fault point

其他故障点发生故障时的仿真结果如附录 B 表 B5 所示。由表可知,在源网设备协同限流的最优折中解配置方案下,故障点  $f_1$ — $f_{12}$  发生故障时,故障发生后 6 ms 内,故障线路上的故障电流均小于 DCCB 的最大开断电流 (15 kA),连接故障点的 MMC 桥臂电流不触发过流保护阈值 (6 kA),连接故障点的 MMC 出口电压保持在系统额定电压 (700 kV) 的 70% 以上,均满足约束条件,验证了最优折中解配

置方案的正确性。综合而言,本文对基于紧急限流控制策略的源网设备参数进行协同优化配置,不会造成交流阀侧故障电流激增进而导致MMC闭锁的问题,在实现源网设备协同限流的同时,实现了故障穿越,并能维持电网正常运行。

## 5 结论

本文根据MMC与直流电网的耦合程度,提出了适用于复杂多端柔性直流电网的区域划分原则。然后,根据不同区域的限流需求、主要限流控制策略以及MMC、DCT、FCL和CLR的限流机理,提出了源网限流设备的配置方案,所得主要结论如下。

1)针对复杂多端柔性直流电网,提出了区域划分原则;在此基础上,实现了不同区域限流设备参数的分级优化,提高了复杂多端柔性直流电网限流设备参数整体优化的计算效率,以六端直流电网为例,优化计算效率提高了16.7%。

2)采用基于紧急限流控制策略的源网设备协同优化,提高了限流效果,减少了FCL配置数量,减轻了网侧限流压力,实现了源网设备协同限流,同时能维持电网正常运行。

3)本文方法可为复杂多端柔性直流电网源网限流设备的分级协同优化配置提供理论依据。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 刘剑,何雨微,徐祥海,等. 柔性直流电网故障限流技术分析与探讨[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.
- [2] 胡文旺,唐志军,林国栋,等. 柔性直流输电工程系统调试技术应用、分析与改进[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):197-203,210.  
HU Wenwang, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. Application, analysis and improvement of system commissioning technology for flexible DC transmission project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 197-203, 210.
- [3] 孙栩,王华伟,雷霄,等. 架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):219-223.  
SUN Xu, WANG Huawei, LEI Xiao, et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 219-223.
- [4] KONTOS E, RODRIGUES S, PINTO R T, et al. Optimization of limiting reactors design for DC fault protection of multi-terminal HVDC networks[C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014:5347-5354.
- [5] 李岩,龚雁峰. 多端直流电网限流电抗器的优化设计方案[J]. 电力系统自动化,2018,42(23):120-126.  
LI Yan, GONG Yanfeng. Optimal design scheme of current limiting reactor for multi-terminal DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 120-126.
- [6] 李国庆,边竞,王鹤,等. 考虑直流电抗器的电容型限流器特性

及优化配置[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):23-29.

LI Guoqing, BIAN Jing, WANG He, et al. Characteristics and optimal configuration of capacitive current limiter considering DC reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5):23-29.

- [7] TSENG H T, JIANG W Z, LAI J S. A modified bridge switch-type flux-coupling nonsuperconducting fault current limiter for suppression of fault transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6):2624-2633.
- [8] LI B, WANG C Q, WEI Z Q, et al. Technical requirements of the DC superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4):1-5.
- [9] NIE Z P, YU Z Q, GAN Z Z, et al. Fundamental and analysis of a novel magnetic coupling fault current limiter for VSC DC grids[C]//2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid (EGRID). Xiamen, China: IEEE, 2019:1-6.
- [10] 赵坚鹏,赵成勇,许建中,等. 直流电网中超导限流器与高压直流断路器的协调配合方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):121-128.  
ZHAO Jianpeng, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. Coordination between superconducting current limiter and high voltage DC circuit breaker in DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 121-128.
- [11] MEI J, FAN G Y, GE R, et al. Research on coordination and optimal configuration of current limiting devices in HVDC grids[J]. IEEE Access, 2019, 7:106727-106739.
- [12] 蒋纯冰,赵成勇. 直流电抗器与电容型限流器多目标优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(10):149-156.  
JIANG Chunbing, ZHAO Chengyong. Multi-objective optimal configuration method for DC reactor and capacitive current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 149-156.
- [13] 李国庆,杨勇,辛业春,等. 一种具有故障阻断能力的改进混合型半桥MMC[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):166-173.  
LI Guoqing, YANG Yong, XIN Yechun, et al. Modified hybrid half bridge MMC with fault blocking capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 166-173.
- [14] 周猛,向往,林卫星,等. 柔性直流电网直流线路故障主动限流控制[J]. 电网技术,2018,42(7):2062-2072.  
ZHOU Meng, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Active current-limiting control to handle overhead line fault in DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2062-2072.
- [15] 倪斌业,向往,周猛,等. 柔性直流电网紧急限流控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(11):3527-3537.  
NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on the emergency current-limiting control in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3527-3537.
- [16] PÁEZ J D, FREY D, MANEIRO J, et al. Overview of DC-DC converters dedicated to HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):119-128.
- [17] LI C Y, ZHAO C Y, XU J Z, et al. A pole-to-pole short-circuit fault current calculation method for DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4943-4953.
- [18] 朱思丞,赵成勇,李承昱,等. 含直流故障限流装置动作的直流电网故障电流计算方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):469-478,644.  
ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. The DC fault current calculation of DC fault current limiter action included in bipolar MMC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 469-478, 644.
- [19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist

multiobjective genetic algorithm: NSGA- II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.

- [20] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5):1079-1088.

LIU Wenying, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5):1079-1088.

#### 作者简介:



梅 军

梅 军(1971—),男,副教授,博士,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电能质量、光伏发电和数字化变电站等(E-mail:mei\_jun@seu.edu.cn);

陈萧宇(1996—),女,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为柔性直流电网输电技术(E-mail:2235835123@qq.com)。

(编辑 陆丹)

## Collaborative optimal configuration of current limiting devices at source and network sides in complex multi-terminal flexible DC power grid

MEI Jun, CHEN Xiaoyu, ZHU Pengfei, YAN Lingxiao, ZHANG Bingtian

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** To solve the problem of fault current suppression in complex multi-terminal flexible DC power grid by using the collaborative optimal configuration of current limiting devices at source and network sides has become a research hotspot in related fields. Firstly, according to the coupling degree of MMC (Modular Multi-level Converter) and power grid, the regional division principle suitable for complex multi-terminal flexible DC power grid is proposed to improve the calculation efficiency of parameter optimization of current limiting devices in the multi-terminal flexible DC power grid. Then, according to the current limiting requirements of each region, combined with the current limiting mechanism of key devices at source and network sides, such as MMC, DC transformer, current limiting reactor, fault current limiter, and so on, the typical configuration schemes of current limiting devices in each region are proposed. On this basis, the parameters of current limiting devices in different areas are hierarchically optimized. Finally, a six-terminal DC power grid is built based on PSCAD/EMTDC platform, and combined with the specific topology structures of fault current limiter, the effectiveness of the proposed hierarchical optimization method for current limiting device parameters at source and network sides is verified. The simulative results show that the proposed method can realize the collaborative current limiting of devices at source and network sides, reduce the current limiting pressure of devices at network side, and improve the calculation efficiency of device parameter optimization.

**Key words:** modular multi-level converter; current limiting devices; regional division; hierarchical optimization; collaborative optimal configuration; multi-terminal flexible DC power grid

# 附录 A

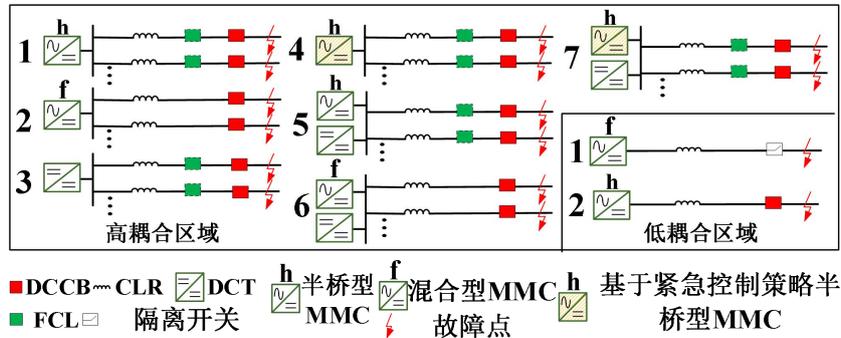


图 A1 典型限流设备配置方案

Fig.A1 Typical configuration schemes of current limiting devices

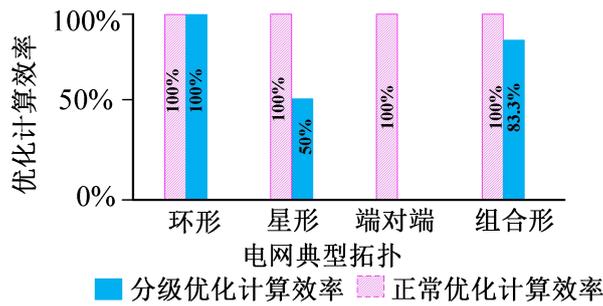


图 A2 优化计算效率

Fig.A2 Optimized computational efficiency

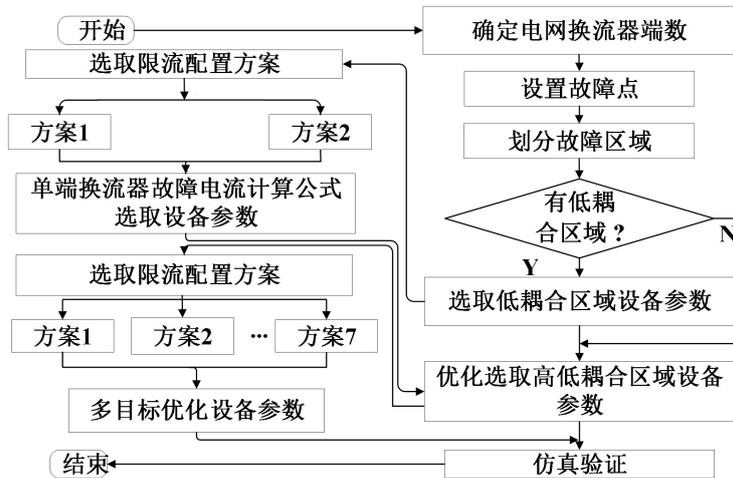


图 A3 分级优化流程图

Fig.A3 Flowchart of hierarchical optimization

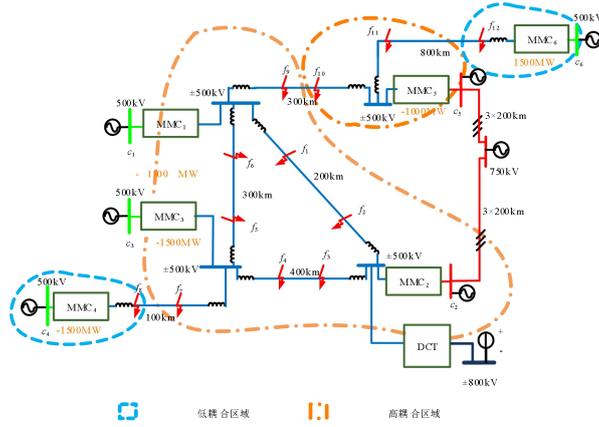
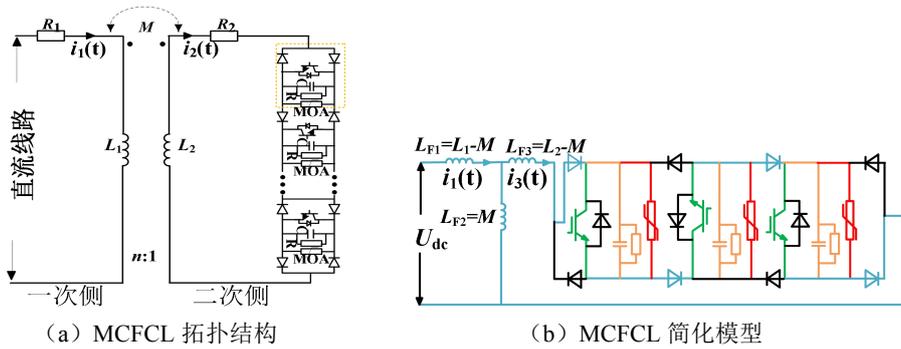


图 A4 六端直流电网模型

Fig.A4 Model of six-terminal MMC-HVDC power grid



(a) MCFCL 拓扑结构

(b) MCFCL 简化模型

图 A5 改进的 MCFCL 拓扑结构和简化模型

Fig.A5 Topology structure and simplified model of improved MCFCL

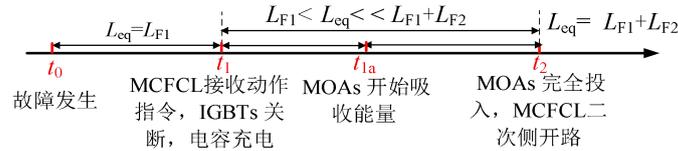


图 A6 MCFCL 动作时序图

Fig.A6 Action sequence diagram of MCFCL

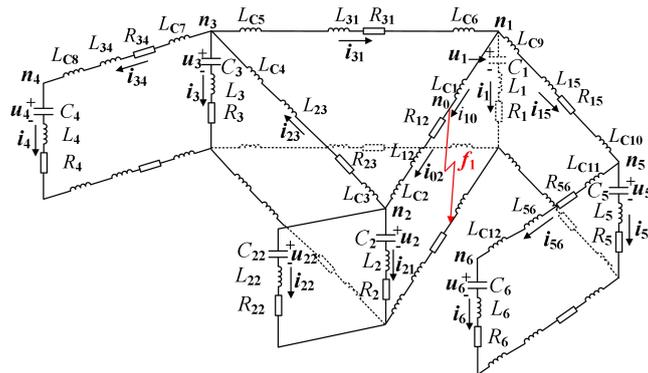


图 A7 发生故障后直流电网的等效模型

Fig.A7 Equivalent model of MMC-HVDC power grid with fault

图中,  $L_{C_i} (i=1, 2, \dots, 12)$  为直流线路所配置 CLR( $L_R$ )和相应 MCFCL 中  $L_{F1}$  值, 若直流线路没有配置 MCFCL, 则  $L_{C_i}$  表示直流线路所配置 CLR 值;  $R_{qj}$  和  $L_{qj} (q,j=1, 2, \dots, 6)$  分别为直流线路电阻和电感;  $R_j$ 、 $L_j$ 、 $C_j$  分别为 MMC 的等效电阻、电感、电容;  $n_0$  为故障点位置。

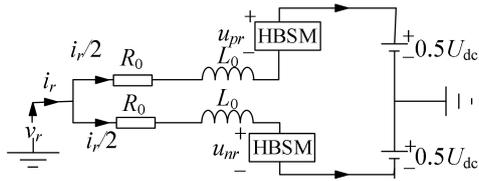


图 A8 MMC 单相交流等效电路  
Fig.A8 Single-phase AC equivalent circuit of MMC

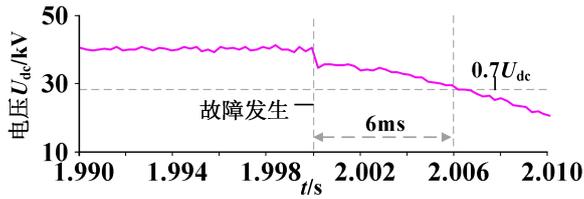


图 A9 单端 MMC 故障时的出口电压  
Fig.A9 Outlet voltage when single MMC occurs fault

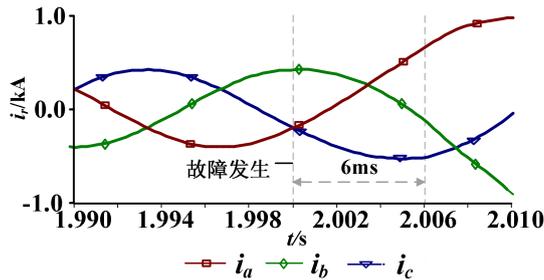


图 A10 MMC 交流电流  
Fig.A10 AC current of MMC

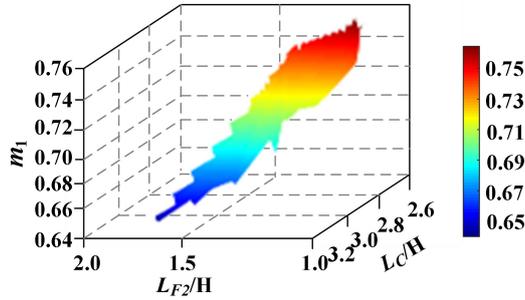


图 A11 方案 A 的优化结果  
Fig.A11 Optimization results of Scheme A

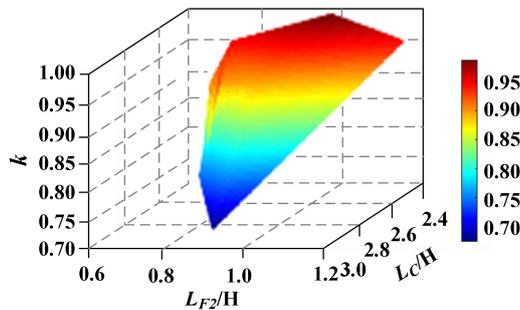


图 A12 方案 B 的优化结果  
Fig.A12 Optimization results of Scheme B

## 附录 B

表 B1 多目标优化下方案 A 的部分优化结果

Table B1 Partial optimization results of Scheme A under multi-objective optimization

MCFCL 配置数量/台	$\mu$	$L_{C1}/\text{mH}$	$L_{C2}/\text{mH}$	$L_{C3}/\text{mH}$	$L_{C4}/\text{mH}$	$L_{C5}/\text{mH}$	$L_{C6}/\text{mH}$	$L_{C7}/\text{mH}$	$L_{C8}/\text{mH}$	$L_{C9}/\text{mH}$	$L_{C10}/\text{mH}$	$L_{C11}/\text{mH}$	$L_{C12}/\text{mH}$
5	0.729	137	283	329	121	359	320	248	240	276	169	235	83
6	0.710	129	184	324	114	352	312	237	240	273	175	239	83
7	0.668	127	179	338	110	374	316	244	240	270	170	234	83
8	0.632	129	196	323	125	351	312	237	240	273	184	243	83

表 B2 多目标优化下方案 A 的部分优化结果

Table B2 Partial optimization results of Scheme A under multi-objective optimization

MCFCL 配置数量/台	$\mu$	$L_{F21}/\text{mH}$	$L_{F22}/\text{mH}$	$L_{F23}/\text{mH}$	$L_{F24}/\text{mH}$	$L_{F25}/\text{mH}$	$L_{F26}/\text{mH}$	$L_{F27}/\text{mH}$	$L_{F28}/\text{mH}$	$L_{F29}/\text{mH}$	$L_{F210}/\text{mH}$	$L_{F211}/\text{mH}$	$L_{F212}/\text{mH}$
5	0.729	152	0	0	108	0	0	167	0	0	182	146	0
6	0.710	183	0	0	142	0	157	143	0	0	134	124	0
7	0.668	148	152	0	157	133	0	181	0	0	104	198	0
8	0.632	178	148	0	186	136	141	120	0	0	150	171	0

表 B3 多目标优化下方案 B 的部分优化结果

Table B3 Partial optimization results of Scheme B under multi-objective optimization

MCFCL 配置数量/台	$\mu$ (k)	$L_{C1}/\text{mH}$	$L_{C2}/\text{mH}$	$L_{C3}/\text{mH}$	$L_{C4}/\text{mH}$	$L_{C5}/\text{mH}$	$L_{C6}/\text{mH}$	$L_{C7}/\text{mH}$	$L_{C8}/\text{mH}$	$L_{C9}/\text{mH}$	$L_{C10}/\text{mH}$	$L_{C11}/\text{mH}$	$L_{C12}/\text{mH}$
4	0.753 (0.855)	330	268	155	248	254	394	352	240	382	299	218	83
5	0.744 (0.701)	302	230	287	177	154	227	183	240	378	365	215	83
6	0.725 (0.797)	310	147	253	298	292	242	239	240	230	367	210	83
7	0.683 (0.715)	291	235	393	170	129	214	248	240	268	386	244	83

表 B4 多目标优化下方案 B 的部分优化结果

Table B4 Partial optimization results of Scheme A under multi-objective optimization

MCFCL 配置数量/台	$\mu$ (k)	$L_{F21}/\text{mH}$	$L_{F22}/\text{mH}$	$L_{F23}/\text{mH}$	$L_{F24}/\text{mH}$	$L_{F25}/\text{mH}$	$L_{F26}/\text{mH}$	$L_{F27}/\text{mH}$	$L_{F28}/\text{mH}$	$L_{F29}/\text{mH}$	$L_{F210}/\text{mH}$	$L_{F211}/\text{mH}$	$L_{F212}/\text{mH}$
4	0.753 (0.855)	0	148	123	139	0	0	0	0	0	189	0	0
5	0.744 (0.701)	0	127	0	195	163	0	138	0	0	0	160	0
6	0.725 (0.797)	0	142	140	144	141	0	137	0	0	0	164	0
7	0.683 (0.715)	141	126	0	165	193	164	0	0	150	101	0	0

表 B5 最优折中方案下故障电流和直流电压的仿真结果

Table B5 Simulative results of fault current and DC voltage under optimal compromise scheme

故障点	故障发生后 6ms 故障点两侧	换流站桥臂故障电流	换流站出口 6ms 之内
	故障电流大小/kA	6ms 之内最大值/kA	直流电压最小值/kV
$f_1$	10.90, 3.67	4.76	844
$f_2$	8.44, 7.35	4.78	855
$f_3$	8.03, 5.25	4.92	880
$f_4$	9.19, 2.88	4.94	925
$f_5$	12.6, 2.85	5.87	924
$f_6$	6.24, 6.10	4.63	891
$f_7$	10.80, 6.56	5.08	911
$f_8$	13.57, 4.57	4.36	1043
$f_9$	8.26, 3.02	4.73	885
$f_{10}$	5.39, 4.71	3.72	881
$f_{11}$	13.75, 1.27	5.68	733
$f_{12}$	11.71, 2.91	4.85	706