

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210657

计及行波折反射的柔性直流电网故障限流器参数优化

王鹤¹, 胡倩慈¹, 李筱婧², 边竞¹, 曹占辉¹

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;
2. 国网吉林省电力有限公司, 吉林 长春 132000)

摘要: 行波的折反射过程对故障暂态响应有重要影响, 目前对故障限流器(Fault Current Limiter, FCL)参数优化配置时, 均未考虑故障行波折反射过程对 FCL 参数选取的影响。因此, 提出了一种计及行波折反射的故障暂态响应时域分析方法, 并用此方法对混合阻感并联型 FCL 进行了参数优化。首先, 建立换流器故障等效模型, 对比不同限流阻抗类型的 FCL 对故障电流的抑制能力。其次, 推导了故障行波的频域和时域表达式, 根据彼得逊法则建立各个时序的等效模型从而准确求得故障电流。并以故障电流和 FCL 两端的电压应力为优化目标, 利用粒子群算法对 FCL 参数进行优化配置, 得到限流阻抗最优匹配值。最后, 通过在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建三端直流电网模型进行仿真对比。仿真结果验证了计及行波折反射的故障电流计算方法以及优化模型的准确性。

关键词: 高压直流; 故障限流器; 行波; 电压应力; 参数优化

Parameter optimization of a fault current limiter in a flexible DC power grid considering refraction and reflection of a traveling wave

WANG He¹, HU Qianci¹, LI Xiaojing², BIAN Jing¹, CAO Zhanhui¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. State Grid Jilin Electric Power Co. Ltd., Changchun 132000, China)

Abstract: The refraction and reflection process of traveling waves has an important influence on the fault transient process. Studies up to now, while optimizing the parameters of the fault current limiter (FCL), have not considered the influence brought by the refraction and reflection process of the fault traveling wave on the selection of FCL parameters. This paper proposes a time-domain analysis method of fault transient response considering traveling wave refraction and reflection and optimizes the parameters of the FCL with parallel resistance-inductance. First, an equivalent converter fault model is established, then the suppression effect on the fault current of the FCL using different current-limiting impedance types is compared. Secondly, the expressions of the fault traveling wave in the frequency and time domains are derived, and the equivalent models of each time sequence are established according to Peterson's rule to accurately calculate the fault current. The fault current and the voltage stress at both ends of the FCL are taken as the optimization objectives, and the parameters of the FCL are optimized using a particle swarm optimization algorithm to obtain the optimal matching value of the current limiting impedance. Finally, a three-terminal DC grid model is built in PSCAD/EMTDC for simulation comparison. The simulation results verify the accuracy of the fault current calculation method as well as the optimized model considering the traveling wave refracted reflection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2066208).

Key words: high voltage direct current; fault current limiter; traveling wave; voltage stress; parameter optimization

0 引言

柔性直流电网是实现风力发电和光伏发电等

可再生能源平滑接入、可靠送出及灵活消纳的重要手段^[1-4]。与交流电网相比, 直流电网呈现“低阻尼”、“低惯性”的特征, 导致故障电流发展更快、故障影响范围更广^[5-6]。直流故障发生瞬间, 子模块电容迅速向故障点放电, 使得直流电流迅速增大, 对直流输电系统造成严重危害^[7-8], 因此采取必要的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U2066208); 东北电力大学博士科研启动基金(BSJXM-2021204)

限流措施来抑制故障电流的快速增长意义重大^[9]。

当前, 可行的故障限流方法有闭锁换流器、安装潮流控制器等。但是闭锁换流器会导致功率传输中断, 对电网影响较大; 而潮流控制器容量较小, 且仅安装于少数线路上, 抑制效果不明显^[10-13]。因此, 通过在线路增加故障限流器(Fault Current Limiter, FCL)成为目前抑制故障电流的主要途径。

FCL 中限流阻抗起主要作用, 其参数选取对限流效果有重要影响, 因此有必要对其参数展开研究。文献[14-16]从换流器耐受过电流或直流断路器分断能力的角度出发, 对平波电抗器的参数进行优化, 但平波电抗器正常运行时也工作在线路中, 其参数选取过大易诱发电压振荡, 从而降低系统的稳定性。文献[17]对平波电抗器和电感型 FCL 进行优化配置, 但约束平波电抗器和 FCL 电感之和为 150 mH。文献[18]通过在直流线路两端串入限流电路来抑制故障电流的上升率及故障电流峰值。但上述文献均没有考虑故障情况下 FCL 两端的电压应力对其参数的影响, 电压应力越大, 成本越高。且均用集中参数模型来等效输电线路, 然后对故障电流进行分析计算。文献[19]虽然对 FCL 的限流过程进行了详细分析, 考虑了电压应力对 FCL 参数的影响, 但输电线路模型采用集中参数表示, 并未考虑故障行波的折反射过程。

而实际输电线路具有分布式参数特征, 线路发生短路故障后, 故障点会迅速向线路两端传播电压和电流行波^[20-21]。文献[22]考虑了故障行波现象, 提出一种新的故障电流计算方法, 此方法可求得任意拓扑结构的多端直流电网故障电流时域解。基于频域响应模型, 文献[23]研究了多个直流电网中的故障行为, 分析了高压直流系统参数对直流故障行波的影响。文献[24]提出了一种基于架空线等效模型的故障电流复频域计算方法, 主要分析了直流电网侧发生故障到断路器动作前的故障电流传播机理。但是, 当线路阻抗发生变化时, 行波将在阻抗变化处发生折反射, 而文献[22-24]均未考虑行波折反射过程, 这势必会降低故障电流计算的准确性。

在现有研究基础上, 本文提出了考虑行波折反射的直流故障电流计算方法, 进而对 FCL 限流阻抗参数进行优化配置。首先, 建立了换流器故障等效模型, 分析了不同限流阻抗类型的 FCL 对故障电流的抑制效果。其次, 分析了直流电网故障状态下行波的折反射过程, 推导出故障行波的频域与时域表达式, 根据彼得逊法则建立各个动作时序的等效电路模型。然后, 以直流断路器的分断电流和 FCL 的电压应力为优化目标, 利用粒子群算法对 FCL 限流

阻抗参数进行优化。最后, 在 PSCAD/EMTDC 电磁仿真软件中搭建三端直流电网模型进行仿真对比, 验证了本文考虑故障行波折反射的 FCL 参数优化方法的准确性与有效性。

1 MMC 等效故障电路模型及限流设备

1.1 MMC 故障等效电路模型

直流电网发生双极故障的前几个毫秒, 与子模块电容放电电流相比, 交流馈入的短路电流可忽略不计。本文以半桥型 MMC 为研究对象, 故障发生后, 未闭锁的 MMC 的等效放电回路如图 1 所示。图中 L_{dc} 为平波电抗器, R_{eq} 、 L_{eq} 和 C_{eq} 分别为简化后的 MMC 等效电阻、等效电抗和等效电容。

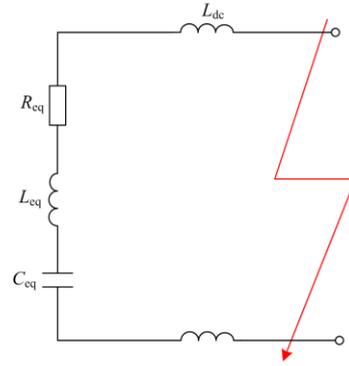


图 1 未闭锁的 MMC 故障等效电路

Fig. 1 Fault equivalent circuit before MMC blocking

因换流站不闭锁, 子模块仍会交替导通放电, 上下子模块电容相当于并联, 则有

$$\begin{cases} R_{eq} = \frac{2R_{arm}}{3} \\ L_{eq} = \frac{2L_{arm}}{3} \\ C_{eq} = \frac{6C_{SM}}{N} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_{arm} 、 L_{arm} 和 C_{SM} 分别表示桥臂等效电阻、桥臂电抗和子模块电容; R_{eq} 、 L_{eq} 和 C_{eq} 分别为简化后的 MMC 等效电阻、等效电抗和等效电容。

1.2 FCL 的选择

FCL 按原理可分为超导型和非超导型。其中超导型限流器所需投资成本及维修费用极高, 目前难以广泛应用于直流电网。而非超导型 FCL 仅在故障时期将限流阻抗串入故障回路来抑制故障电流, 且其制造成本低, 能更高效地抑制故障电流, 故本文采用非超导型 FCL 进行分析。

非超导型 FCL 拓扑包括故障转移支路和限流阻抗支路, 故障转移支路满足电流的双向流动, 且

能够在任意时刻关断，从而将故障电流转移至限流支路。当前，对 FCL 进行优化配置时，大多以纯电感 FCL 为研究对象，正常运行时平波电抗器也工作在线路中，故纯电感 FCL 参数选取不宜过大，否则会降低直流系统响应速度，易诱发电压振荡。此外，文献[19]研究表明，在电压应力的约束下，限流阻抗为纯电感时，其两端的电压应力随电感增大而迅速增大，导致 FCL 能够串入故障回路的限流电感极小，几乎没有限流能力。而若采用阻抗并联型 FCL，限流效果均明显优于限流阻抗为纯电感或电感与电阻串联形式的 FCL。为验证本文所提故障电流计算的准确性，本文将电阻 R_F 与电感 L_F 并联的 FCL 为例进行研究，并对其参数进行优化，其拓扑结构如图 2 所示。

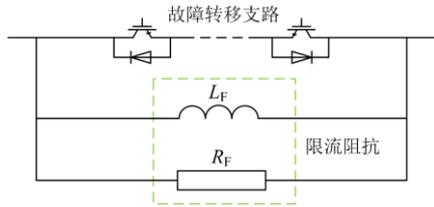


图 2 FCL 拓扑结构

Fig. 2 FCL topology

2 计及行波折射的直流电网故障解析

2.1 行波的频域表达式

因极间短路故障会产生更大的故障电流而危害更加严重，故本文将极间短路故障为例进行分析。

假设直流电网在 $Line_{i1}$ 发生极间短路故障，直流电网母线(Bus_i)侧的等效电路模型如图 3 所示，其中母线 Bus_i 上相邻线路表示为 $Line_{ij}$, $j \notin \{1, i\}$ 。初始故障行波 V_1^+ 传播到 Bus_i ，并产生反射波和折射

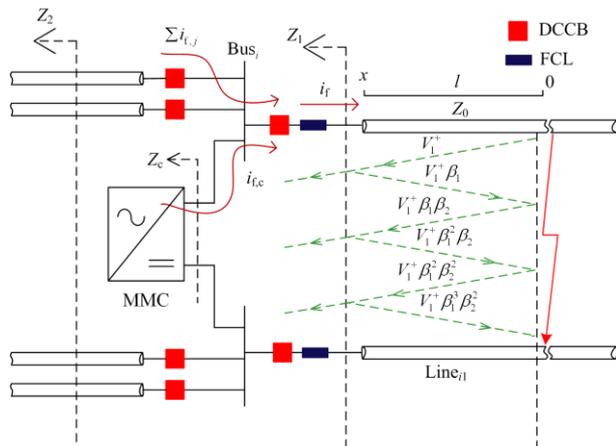


图 3 极间短路故障电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model during a pole-to-pole fault

波，导致终端电压快速下降，该行波现象对故障暂态过程有着重要的影响。下面将对这一行波现象进行详细分析。

图中 Z_1 、 Z_2 、 Z_c 分别表示故障线路左侧等效阻抗、相邻线路等效阻抗、换流器等效阻抗， Z_0 表示故障线路的波阻抗。

若传输线在距离母线 Bus_i 一定位置发生极间短路，对于均匀分布的有损传输线，图 3 线路 $Line_{i1}$ 上任意位置的电压 $u(x, t)$ 和电流 $i(x, t)$ 均为距离和时间的函数，可由电报方程表示。求解电报方程可得其频域表达式 $V(x)$ 和 $I(x)$ 分别为

$$\begin{cases} V(x) = V^+(x) + V^-(x) = V_0^+ e^{-\gamma x} + V_0^- e^{\gamma x} \\ I(x) = I^+(x) + I^-(x) = \frac{V_0^+ e^{-\gamma x}}{Z_0} - \frac{V_0^- e^{\gamma x}}{Z_0} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\gamma = \sqrt{Z(s)Y(s)}$ 表示传输线的传播系数； $Z_0 = \sqrt{Z(s)/Y(s)}$ 表示传输线的波阻抗； $Z(s)$ 和 $Y(s)$ 分别表示线路串联阻抗和并联导纳； $V^+(x)$ 和 $V^-(x)$ 分别表示正向电压行波和反向电压行波。

由于行波的高频特性，传输线阻抗可合理近似为 $Z(s) = L \cdot s + K\sqrt{s}$, K 为集肤效应系数。

假设在无限长度线路上，故障位置的初始电压为 V_0 ，反向行波 V^- 为零，则入射波频域表达式可表示为

$$V_1^+(x) = \frac{V_0}{s} \exp\left(-\frac{x}{c}s - \frac{Kx}{2Lc} s^{1/2}\right) \quad (3)$$

式中， $c = 1/\sqrt{LC}$ 是行波的传播速度。

利用式(3)可以计算出有限长度线路上的后续折射波。后续波的反射过程可用图 3 中绿色虚线表示。其中 β_1 、 β_2 分别表示故障线路终端和故障位置处的反射系数，分别表示为

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \\ \beta_2 = -1 \end{cases} \quad (4)$$

$$Z_1 = sL_{dc} + Z_c // Z_2 \quad (5)$$

在故障切除之前，故障线路终端处的电压为若干正向和反向行波的叠加，可表示为

$$V_{i1}(l) = \sum_{m=0}^{\infty} V_1^+ (1 + \beta_1)(1 + \beta_1 \beta_2)^m \quad (6)$$

虽然后续行波的表达式与频域反射系数可以由式(3)一式(5)直接写出，但对于直流电网，推导出式(6)的时域表达式难度极大。因此为了分析系统的暂态特性，本文将借助初始行波的频域表达式以及直流故障各个时序的等效电路对故障行波进行时域估计。

2.2 行波的时域估计

如图3所示,若在线路 Line_{i1} 发生极间故障,求解式(3),可得向 Bus_i 移动的初始行波电压的时域表达式如式(7)。

$$V_1(x,t) = V_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{K}{4L\sqrt{t-x/c}} \cdot \frac{x}{c}\right) \cdot u\left(t - \frac{x}{c}\right) \quad (7)$$

式中: $u(t)$ 为阶跃函数; $\operatorname{erfc}(t)$ 为互补误差函数。

初始故障行波到达线路终端,系统检测到故障。根据 FCL 和 DCCB 的投入情况,可将故障电流分析和计算分为四个阶段, FCL 和 DCCB 的动作时序如附图1所示。本文选用混合式高压直流断路器来切除故障^[25-28],其拓扑结构如附图2所示。

t_0 时刻发生故障, t_1 时刻初始故障行波到达线路保护终端。保护装置在 t_2 时刻检测到故障,此时迅速投入 FCL 并同时向 DCCB 发出跳闸信号,故障电流上升速率受到抑制, t_3 时刻 DCCB 进入耗能阶段,并在 t_4 时刻完成故障线路的切除。

(1) 故障传播阶段

第一阶段(t_0-t_1)为故障传播阶段,即故障行波传播至故障线路末端的时段。这一阶段与系统正常运行时情况相同,系统无法检测到故障。故障传播时间由故障位置与母线的距离来确定。

(2) 故障检测阶段

初始行波到达 Line_{i1} 终端时,图3的等效电路可由图4表示,其中 u_q 是到达线路终端的入射波。由彼得逊法则可知,等效电路由连接到 Bus_i 的并联支路组成,且将 u_q 的2倍作为电压源。

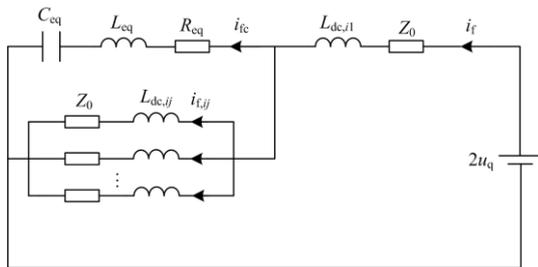


图4 故障检测阶段等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of fault detection stage

故障线路终端处的反射系数 β_1 可以用时域表示为

$$\beta_1 = \frac{u_q - Z_0 i_f}{u_q} \quad (8)$$

式中,故障电流 i_f 由换流器提供的电流和相邻线路的电流共同组成,分别表示为 i_{fc} 和 $i_{f,ij}$,由图4列写 KCL、KVL 方程可得

$$\begin{cases} i_f = i_{fc} + \sum_{j \neq \{1,i\}} i_{f,ij} = C_{eq} \frac{du_c}{dt} + \sum_{j \neq \{1,i\}} i_{f,ij} \\ 2u_q = Z_0 i_f + L_{dc,i1} \frac{di_f}{dt} + u_{Bus} \\ u_{Bus} = Z_0 i_{f,ij} + L_{dc,ij} \frac{di_{f,ij}}{dt} = L_{eq} \frac{di_{fc}}{dt} + R_{eq} i_{fc} + u_c \end{cases} \quad (9)$$

式中: u_{Bus} 表示母线处的电压; u_c 表示 C_{eq} 两端电压; 反射系数可以通过求解式(8)、式(9)得到,如图5蓝色实线所示。由图可知 β_1 随时间的增大而减小,故本文将它拟合为时间的线性函数,从而有助于故障行波时域表达式的计算,如图5中红色虚线所示。

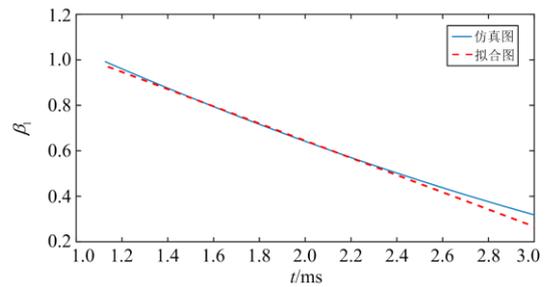


图5 故障线路终端的反射系数

Fig. 5 Reflection coefficient at the terminal of the faulty line

由于网络不变,其余行波均可采用此近似反射系数,因此,图3中所有入射电压波在故障线路终端的叠加可由式(10)表示。

$$u_q = \sum_{m=0}^{\infty} u_{mq} = \sum_{m=0}^{\infty} v_1(l+2ml,t)(\beta_1 \beta_2)^m \quad (10)$$

第二阶段(t_1-t_2)为故障检测阶段,行波抵达终端后,线路主保护将在3ms后完成故障识别并给 DCCB 发送分断信号,等效电路与图4相同。此阶段不只考虑第一个入射波,还要考虑 t_1-t_2 这一时间段内的所有入射波,可由式(10)计算得出。

(3) FCL 投入且 DCCB 未切断故障阶段

第三阶段(t_2-t_3)为 FCL 投入阶段,故障检测完成后, FCL 的 LCS 闭锁, FCL 投入使用,故障电流先流经 R_F 支路,然后逐渐向 L_F 支路转移,电流不会出现跳变。其等值电路如图6所示。DCCB 收到主保护动作指令后,将在3ms内完成分断。

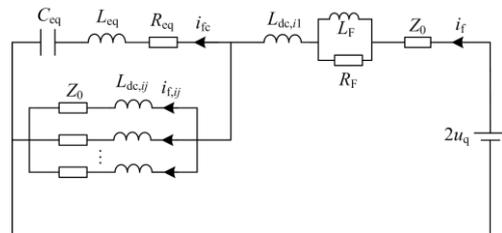


图6 投入 FCL 时的等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit after FCL operation

由等值电路可得

$$\begin{cases} 2u_q = Z_0 i_f + L_{dc,1} \frac{di_f}{dt} + R_F (i_f - i_F) + u_{Bus} \\ u_{Bus} = Z_0 i_{f,ij} + L_{dc,ij} \frac{di_{f,ij}}{dt} = L_{eq} \frac{di_{fc}}{dt} + R_{eq} i_{fc} + u_c \\ i_L + i_R = i_f \end{cases} \quad (11)$$

式中, i_R 和 i_F 分别表示流经 FCL 电阻支路和电感支路的故障电流。

(4) DCCB 切除阶段

第四阶段 ($t_3 - t_4$) 为 DCCB 切除故障阶段, 即 t_3 时刻 DCCB 进入耗能阶段开始切除故障, 避雷器阻抗的增加迫使故障电流迅速减小, 直至在 t_4 时刻电流降为零, 此时故障切除过程结束, 此过程通常需要 3~5 ms。此阶段的等效电路如图 7 所示。

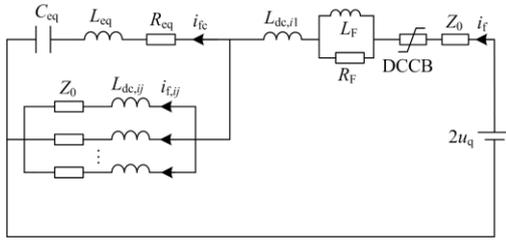


图 7 FCL 与 DCCB 均投入时的等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit when both FCL and DCCB are operating

由等值电路可得

$$\begin{cases} 2u_q = Z_0 i_f + L_{dc,1} \frac{di_f}{dt} + u_{DCCB} + R_F (i_f - i_F) + u_{Bus} \\ u_{Bus} = Z_0 i_{f,ij} + L_{dc,ij} \frac{di_{f,ij}}{dt} = L_{eq} \frac{di_{fc}}{dt} + R_{eq} i_{fc} + u_c \end{cases} \quad (12)$$

式中, u_{DCCB} 表示直流断路器两端的电压。

根据上述的故障分析, 可以求得故障期间的故障电流及 FCL 电压应力的最大值表达式, 进而用于 FCL 参数优化。

3 故障限流器的参数优化

3.1 数学优化模型

FCL 的主要作用是减小 DCCB 的分断电流, 从而降低断路器制造成本。FCL 限流阻抗参数对故障电流的抑制效果有直接影响, 但该参数同时受元件两端的电压应力约束。电压应力的大小可以表征将限流阻抗串入故障回路的难度, 电压应力越大, 成本越高。因此, 考虑直流断路器的切断能力及 FCL 的制造成本, 本文将故障点两端直流断路器的分断

电流之和 I_{CB} 、两端 FCL 的最大电压应力之和 U_{FCL} 作为优化目标函数, 且满足 DCCB 投入时的电流小于额定开断电流、故障限流器两端的电压应力小于 FCL 两端所能承受的最大电压应力, 则数学优化模型可表示为

$$x = \{L_F, R_F\} \quad (13)$$

$$F = \min \begin{cases} I_{CB}(x) = I_{CB1} + I_{CB2} \\ U_{FCL}(x) = U_{FCL1} + U_{FCL2} \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} i_{f,CB} < i_{CBN} \\ u_{FCL} < u_{FCL,max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: x 表示要优化的参数; $I_{CB}(i=1,2)$ 表示 DCCB 切断故障时故障点两端的电流; $U_{FCL}(i=1,2)$ 表示故障线路两端 FCL 投入之后的最大电压应力; $i_{f,CB}$ 表示 t_3 时刻直流断路器投入时的故障电流; i_{CBN} 表示直流断路器的额定开断电流; u_{FCL} 表示 FCL 两端的电压应力; $u_{FCL,max}$ 表示故障限流器两端所能承受的最大电压应力。

3.2 数学优化方法

本文建立的数学优化模型具有 DCCB 的开断电流、FCL 两端的电压应力两个优化目标。为获得更佳的优化配置结果, 本文采用粒子群算法来求解多目标优化配置问题。首先, 初始化粒子种群, 赋予每个粒子随机初始位置和速度, 根据适应度函数, 计算每个粒子的适应值。然后, 将每个粒子当前位置的适应值分别与其历史最佳位置 (pbest) 和全局最佳位置 (gbest) 的适应值进行比较, 若当前位置适应值高于 pbest 或 gbest, 则用当前位置更新 pbest 或 gbest 并更新粒子速度。若更新后的粒子未满足结束条件, 则重新计算适应值并继续更新速度和位置, 直至满足结束条件即可得最优解。

4 仿真分析

4.1 故障电流及电压应力仿真实验

为验证本文所提方法的正确性与有效性, 使用 PSCAD/EMTDC 建立如图 8 所示的三端直流电网, 将计算结果与 PSCAD 仿真模型得到的相应结果进行比较。本文所提计算方法同时适用于架空线与电缆, 下面仅以电缆为例进行仿真实验。图 8 中线路 12 的长度为 250 km, 线路 13 的长度为 100 km, 线路 23 的长度为 200 km。所有线路的故障限流器参数一致, $L_{dc}=30$ mH, $R_F=12 \Omega$, $L_F=120$ mH。换流器的参数如附表 1 所示, 电缆的参数如附表 2 所示, DCCB 的额定开断电流为 15 kA。本文设定故障检测时间为 3 ms, DCCB 的分闸时间也为 3 ms^[29]。

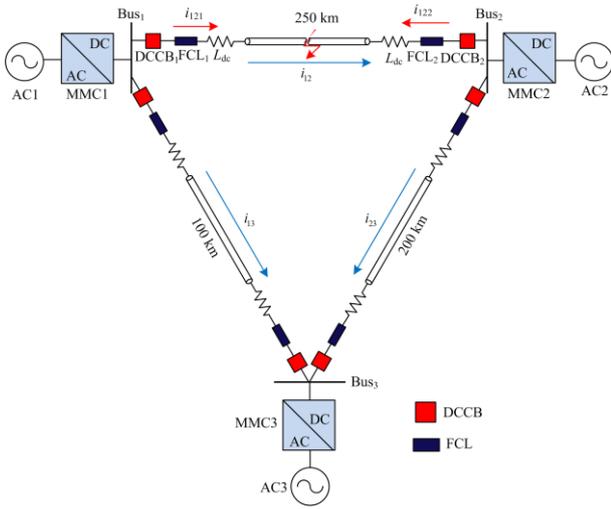
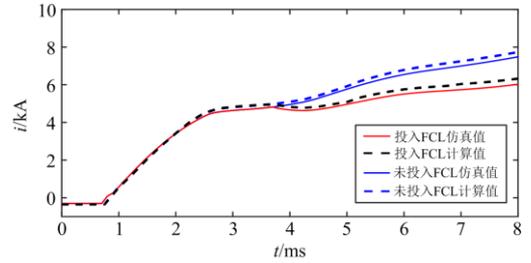


图 8 三端直流电网

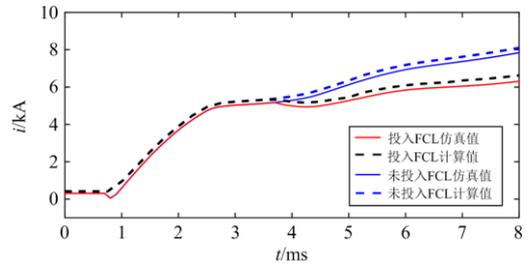
Fig. 8 Three-terminal DC power grid

假设 $t=0$ 时刻, 在线路 12 中点处发生极间短路故障, 故障线路的短路电流以及两端故障限流器的电压应力的变化情况分别如图 9 和图 10 所示。图 9(a)和图 9(b)分别表示是否使用 FCL 的故障电流 i_{121} 、 i_{122} , $0\sim 0.75$ ms 为故障行波的传播过程, 因此故障发生瞬间故障电流并不能发生突变。故障电流的计算值与仿真值变化情况基本一致, 表明等效电路及计算方法可以表征故障暂态特性。此外, FCL 投入后故障电流增长速率得到明显抑制, 从而可有效降低对直流断路器的耐流要求。图 9(c)表示不使用 FCL 时的故障位置左侧各点电压, 其中 v_1 为电缆首端电压, u_{bus1} 为直流母线电压, u_L 为 L_{dc} 两端电压。电压 u_{bus1} 与 v_1 变化趋势相同, 且 u_{bus1} 的变化速率始终小于 v_1 的变化速率, 在此主要分析 v_1 的变化情况。 $t=0.75$ ms 时故障行波到达线路末端并发生折反射, 电压 v_1 迅速下降, L_{dc} 两端电压与故障电流上升率成正比, 致 u_L 迅速增大。 $t=2.25$ ms 时, 反射波第一次返回到电缆首端并再次发生折反射, 故障电流的增长速率显著下降并趋于平缓, 电压 v_1 上升, u_L 下降。 $t=3.75$ ms 时, 反射波第二次返回到电缆首端, 故障电流增长速率再一次增加, 电压 v_1 下降, u_L 上升。同理, $t=5.25$ ms 时, 与 2.25 ms 时故障电流变化趋势相同, 由于行波传播过程中存在衰减, 故增长速率会更加平缓。 $t=6.75$ ms 时直流断路器耗能支路投入切除故障。图 9(d)表示使用 FCL 时故障位置左侧各点电压, v_2 表示 L_{dc} 左侧电压的变化情况, FCL 投入之前, v_1 、 u_{bus1} 和 u_L 三者的变化趋势与图 9(c)完全相同, 在此不再赘述。 $t=3.75$ ms 时投入 FCL 并在故障回路串入反向电压,

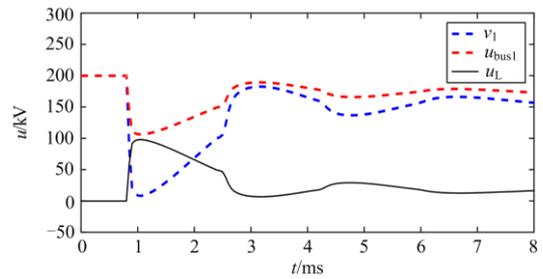
实现故障电流抑制。故障电流上升率降低使 u_L 减小, 但 FCL 可提供更大反向电压, 故 u_{bus1} 仍增大, 验证了 FCL 的投入使得故障电流得到有效抑制。



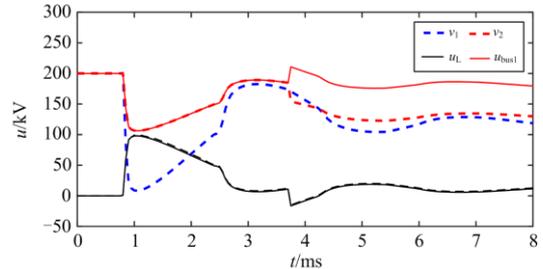
(a) 故障电流 i_{121}



(b) 故障电流 i_{122}



(c) 不投入 FCL 时的电压



(d) 投入 FCL 时的电压

图 9 故障电流的计算与仿真图

Fig. 9 Fault current calculation and simulation diagram

FCL₁、FCL₂ 投入使用后两端的电压应力如图 10(a)和图 10(b)所示。FCL 投入瞬间, 其两端电压迅速增加, 且此时电压应力最大。由于行波的折反射现象, 流过 R_F 的电流波动变化, 因此 FCL 两端电压应力也呈现波动变化。其中: 电压应力的下降过程表明此过程故障电流转移至 L_F 支路的速度大于故障电流的上升速度, R_F 支路的电流下降; 电压应力的上升过程同理。

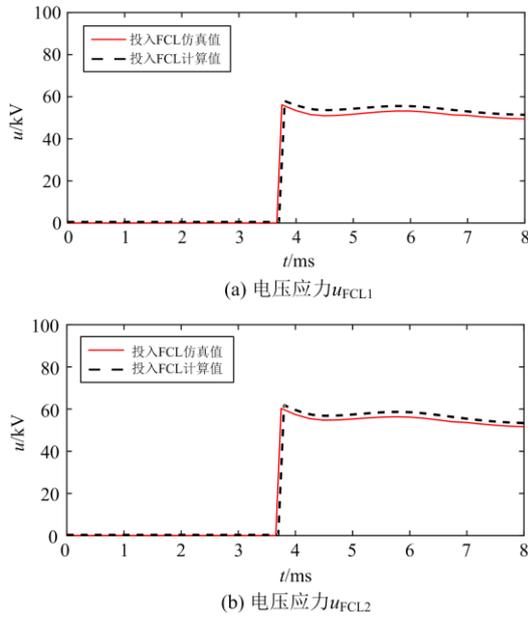


图 10 故障限流器电压应力的计算与仿真图

Fig. 10 Fault current and voltage stress of fault current limiter calculation and simulation diagram

4.2 FCL 限流阻抗参数优化

为了得到 FCL 限流阻抗的最佳配置, 仍以图 8 所示的故障状态为例, 利用粒子群算法求解上述优化目标, 要求 $i_{f,CB} < 6 \text{ kA}$, $u_{FCL,max} < 100 \text{ kV}$, 可得优化方法的 Pareto 最优解集, 如图 11 所示。可得参数最优匹配值为 $L_F=156 \text{ mH}$, $R_F=18.3 \Omega$, 对应的目标函数值分别为 $I_{CB}=10.77 \text{ kA}$, $U_{FCL}=177.83 \text{ kV}$ 。

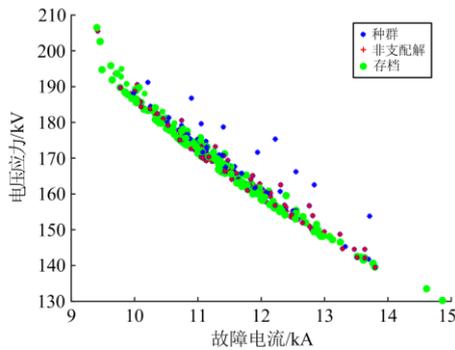


图 11 Pareto 最优解集空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of optimal Pareto solution set

将通过粒子群算法得到的故障限流器阻抗值代入 PSCAD/EMTDC 仿真模型中, 故障发生 3.75 ms 后, 故障限流器投入, 优化配置后的仿真结果如图 12 所示。

由图 12(a)和图 12(b)可知, 故障电流由换流器 (i_{MMCj} , $j=1,2$) 和相邻线路的电流 (i_{3j} , $j=1,2$) 共同

组成, 换流器提供的电流为故障电流的主要组成部分且与故障电流变化情况保持一致。相邻线路提供的电流相对较小, 但其占比可达到 27%, 对故障电流的贡献是不可忽略的。

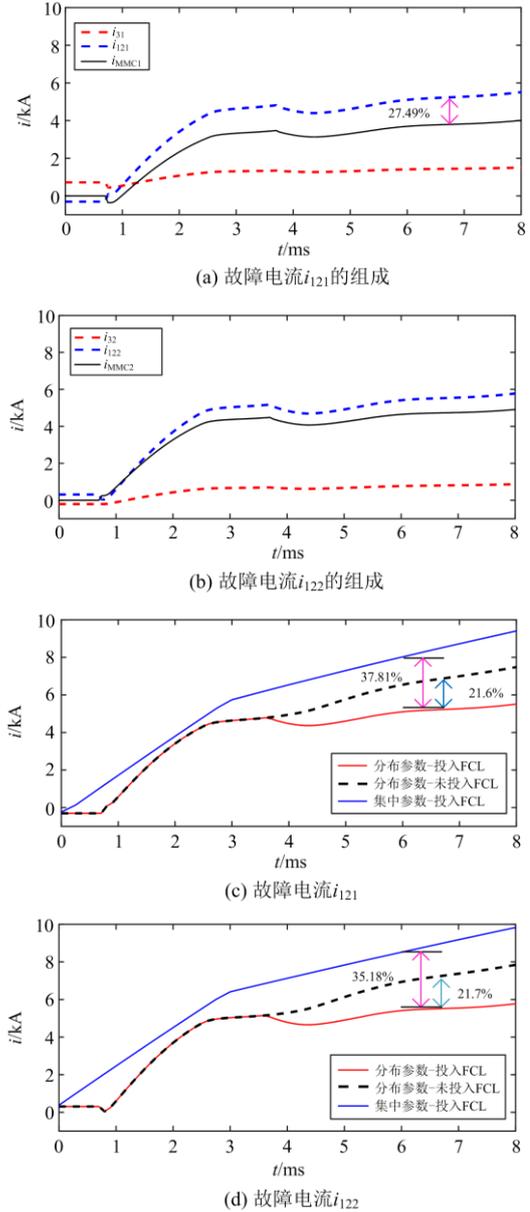


图 12 优化配置后的故障电流仿真图

Fig. 12 Simulation diagram of fault current after optimized configuration

由图 12(c)可知, 直流断路器切除故障时, 优化配置后的故障切除电流 i_{121} 比不投入 FCL 时下降了 21.6%。若输电线路用集中参数表示, 投入 FCL 的故障电流变化趋势如图 12(c)和图 12(d)中蓝色实线所示, 故障发生瞬间故障电流迅速上升, 系统立即检测到故障, 3 ms 时 FCL 投入, 故障电流增长速率

减小, 6 ms 时断路器切除故障。可以看出, 用集中参数表示输电线路不仅没有考虑初始行波到达线路末端的时间, 也未考虑行波在线路末端的折反射现象。DCCB 切除故障时的电流比实际线路模型高出 35% 以上, 偏差较大。

图 13 为输电线路分别用集中参数模型和相域频变模型(Frequency Dependent Phase model)表示时 FCL₁ 和 FCL₂ 两端的电压应力。FCL 投入瞬间两种模型的故障电流差值极大, 导致 FCL 两端的电压应力差值也较大。由分布参数值可以看出, 电压应力仍然呈现波动过程, 原因与 4.1 节 FCL 电压相同。而用集中参数表示输电线路并没有波动过程, 且无明显下降趋势, 可见忽略传输线的分布特性将引起较大的误差。

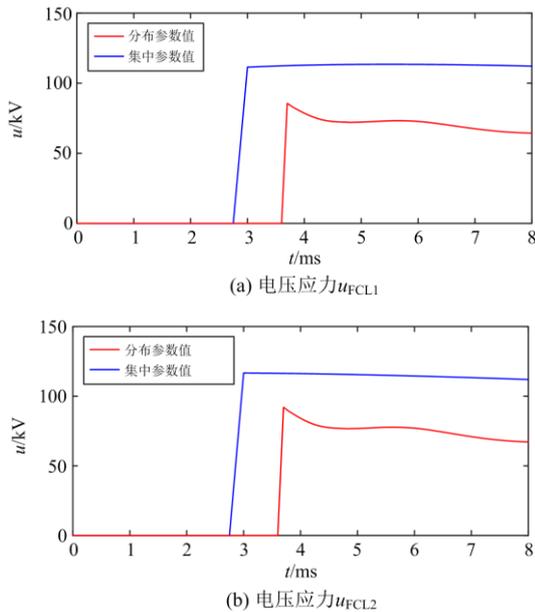


图 13 优化配置后的故障限流器电压应力仿真图

Fig. 13 Simulation diagram of voltage stress of fault current limiter after optimized configuration

5 结论

本文对含有故障限流器的直流电网发生极间短路时的故障暂态特性进行了分析, 考虑故障行波的折反射过程对故障限流器参数的影响, 提出了一种直流故障暂态响应的时域解析计算方法, 并运用此方法对故障限流器参数进行优化配置, 得出如下结论:

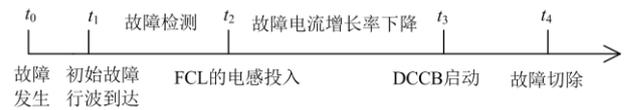
1) 分布参数表示输电线路模型能够更加精确地计算直流故障后的电压电流变化特性, 且在故障状态下, 计及行波折反射过程的故障电流计算结果与电磁暂态仿真结果基本拟合。

2) 故障状态下, 故障电流由故障线路所连换流器和相邻线路电流共同组成, 且相邻线路提供的电流占比可达 27%, 因此分析计算时不可将其忽略。

3) 本文所提故障限流器参数优化方法可在故障电流和故障限流器电压应力的约束下得到其限流阻抗最优匹配值, 且此优化方法适用于各种类型的故障限流器。

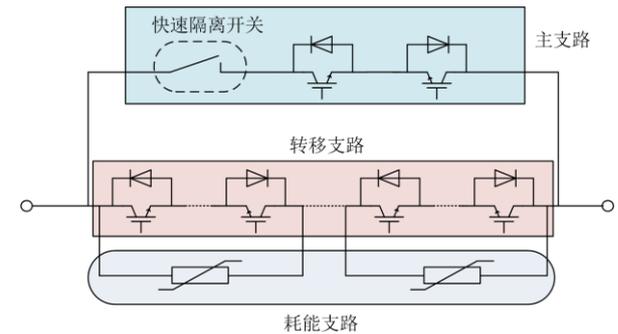
由于故障电流同时受到故障限流器和平波电抗器的抑制, 因此下一步将在基于总成本最优的前提下同时对这两个设备的参数进行优化配置。

附录



附图 1 故障限流器和直流断路器的动作时序

Attached Fig. 1 Action sequence of fault current limiter and DC circuit breaker



附图 2 混合式高压直流断路器拓扑结构

Attached Fig. 2 Hybrid high voltage DC circuit breaker topology

附表 1 三端直流电网站 MMC 参数

Attached Table 1 Parameter of each MMC in three-terminal DC grid

换流站	桥臂子模块个数	子模块电容/ μF	桥臂电抗/ mH	控制策略
MMC1	233	15 000	75	$U_{dc}=200 \text{ kV}$ $Q=0 \text{ Mvar}$
MMC2	233	15 000	75	$P=100 \text{ MW}$ $Q=0 \text{ Mvar}$
MMC3	233	15 000	75	$P=100 \text{ MW}$ $Q=0 \text{ Mvar}$

附表 2 电缆参数

Attached Table 2 Cable parameters

	外径/ mm	电阻率/ $(\Omega\cdot\text{m})$	相对介电常数	相对磁导率
导体	19.5	1.7×10^{-8}	—	1
绝缘层	48.7	—	4.1	1
护套	51.7	2.2×10^{-7}	—	1

参考文献

- [1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [2] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [3] 叶敏芝, 喻哲扬, 徐政. 欧洲柔性直流电网的规划及其仿真研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 66-75.
YE Minzhi, YU Zheyang, XU Zheng. Planning and simulation research of European VSC-HVDC grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 66-75.
- [4] 刘增训, 游沛羽, 周勤勇. 适用高比例新能源系统广域消纳的输电技术研究综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 59-70.
LIU Zengxun, YOU Peiyu, ZHOU Qinyong. Transmission technologies adapting to power systems with widely-consumed high-proportion renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 59-70.
- [5] RADMANESH H, FATHI S H, GHAREHPETIAN G B, et al. Bridge-type solid-state fault current limiter based on AC/DC reactor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 200-209.
- [6] 夏克鹏, 刘路路, 胡四全, 等. 混合式高压直流断路器快速限流优化方案及仿真分析[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(2): 171-179.
XIA Kepeng, LIU Lulu, HU Siquan, et al. Fast limit current optimization scheme and simulation analysis of hybrid HVDC circuit breaker[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 171-179.
- [7] CHOI H, JEONG I, CHOI H. Stability improvement of DC power system according to applied DC circuit breaker combined with fault current limitation characteristics of superconductivity[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(7): 1-4.
- [8] 张浩, 王先为, 马焕, 等. 基于 MMC 的直流电网短路电流分析及保护策略[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 93-100.
ZHANG Hao, WANG Xianwei, MA Huan, et al. Short circuit current analysis in DC Grid and its protection strategy based on modular multilevel converter[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 93-100.
- [9] 包宇喆, 陶春蓉, 梅志强, 等. 电阻型故障限流器电流转移特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 27-33.
BAO Yuzhe, TAO Chunrong, MEI Zhiqiang, et al. Research on the vacuum arc current commutation characteristic of the resistive fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 27-33.
- [10] 吴济东, 汪可友, 黄鑫, 等. 孤立直流微电网多 DC-DC 变换器分布式协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 76-83.
WU Jidong, WANG Keyou, HUANG Xin, et al. Distributed coordinated control scheme of parallel DC-DC converters in isolated DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 76-83.
- [11] 李国庆, 杨洋, 王鹤, 等. 直流电网的拓扑结构及潮流控制综述[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(2): 1-9.
LI Guoqing, YANG Yang, WANG He, et al. Overview of topology structure and power flow control of DC grid[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019, 39(2): 1-9.
- [12] 李国庆, 边竞, 王鹤, 等. 直流电网潮流分析与控制研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1067-1078.
LI Guoqing, BIAN Jing, WANG He, et al. Review on DC grids power flow analysis and control[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1067-1078.
- [13] 姚良忠, 崔红芬, 李官军, 等. 柔性直流电网串联直流潮流控制器及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 945-952.
YAO Liangzhong, CUI Hongfen, LI Guanjun, et al. Studies of series DC power flow controller and its control strategy in the VSC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 945-952.
- [14] 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): 219-233.
- [15] WANG Y Z, YUAN Z C, FU J, et al. A feasible coordination protection strategy for MMC-MTDC systems under DC faults[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 90: 103-111.
- [16] 邢超, 奚鑫泽, 何鑫, 等. 多端直流输电系统中限流电抗器配置研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2021-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210413.1623.002.html>.
XING Chao, XI Xinze, HE Xin, et al. Research on

- configuration of current limiting reactor in multi-terminal HVDC system[J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation*: 1-8[2021-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210413.1623.002.html>.
- [17] 朱思丞, 赵成勇, 李承昱, 等. 考虑故障限流器动作的直流电网限流电抗器优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(15): 142-149.
ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Optimal configuration of current-limiting reactor considering fault current limiter action in DC grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(15): 142-149.
- [18] 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.
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.
- [19] 魏能峤, 周念成, 罗永捷, 等. 基于电压应力分析的柔性直流换流站故障限流阻抗参数优化[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(5): 14-22.
WEI Nengqiao, ZHOU Niancheng, LUO Yongjie, et al. Parameter optimization for fault current limiting impedance of flexible DC converter station based on voltage stress analysis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(5): 14-22.
- [20] 汤兰西, 董新洲, 施慎行, 等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. *电网技术*, 2018, 42(10): 3176-3186.
TANG Lanxi, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(10): 3176-3186.
- [21] TANG L, DONG X, SHI S, et al. A new differential protection of transmission line based on equivalent travelling wave[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(3): 1359-1369.
- [22] BUCHER M K, FRANCK C M. Analytic approximation of fault current contributions from capacitive components in HVDC cable networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(1): 74-81.
- [23] MIAN W, BEERTEN J, VAN HERTEM D. Frequency domain based DC fault analysis for bipolar HVDC grids[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, 5(4): 548-559.
- [24] 俞永杰, 吕煜, 邓伟成, 等. 采用架空线等效模型的直流电网故障电流计算方法及实验验证[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(23): 7530-7539.
YU Yongjie, LÜ Yu, DENG Weicheng, et al. Fault current calculation method in complex frequency domain of MMC-HVDC grid using equivalent model of transmission line[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(23): 7530-7539.
- [25] 王振浩, 田奇, 成龙, 等. 混合式高压直流断路器暂态分断特性及其参数影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(18): 1-10.
WANG Zhenhao, TIAN Qi, CHENG Long, et al. Transient breaking characteristics and its parameter influence analysis of hybrid DC circuit breaker[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(18): 1-10.
- [26] HASAN S. A hybrid circuit breaker based on current commutation approach for multi-feeder DC railway substations[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, 5(2): 234-239.
- [27] 栗静男, 金晶, 郑峰. 基于超导限流器混合式直流断路器开断特性分析[J]. *广东电力*, 2020, 33(8): 1-10.
LI Jingnan, JIN Jing, ZHENG Feng. Breaking characteristic analysis of hybrid DC circuit breaker based on superconducting current limiter[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(8): 1-10.
- [28] 沙彦超, 蔡巍, 胡应宏, 等. 混合式高压直流断路器研究现状综述[J]. *高压电器*, 2019, 55(9): 64-70.
SHA Yanchao, CAI Wei, HU Yinghong, et al. Review of research status of hybrid HVDC circuit breakers[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(9): 64-70.
- [29] 裴翔羽, 汤广福, 庞辉, 等. 柔性直流电网线路保护与直流断路器优化协调配合策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(增刊 1): 11-18.
PEI Xiangyu, TANG Guangfu, PANG Hui, et al. Study on optimized coordination strategies between line protection and DC breakers for VSC-based DC grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(S1): 11-18.

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-16

作者简介:

王鹤(1983—), 男, 教授, 研究方向为柔性直流输电、新能源发电、电力系统通信; E-mail: wanghe_nedu@163.com

胡倩慈(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: neepu_hqc@163.com

边竞(1994—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为柔性直流输电系统建模与仿真。E-mail: bj_jjj@163.com

(编辑 魏小丽)