第 50 卷 第 2 期：683-695　　高电压技术　　Vol.50, No.2: 683-695
2024 年 2 月 29 日　　High Voltage Engineering　　February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220691

基于单端分支系数的四端柔直环网线路保护方案

束洪春，任　敏，田鑫萃，李　涛
（昆明理工大学电力工程学院，昆明 650504）

摘　要：为提升直流线路保护在柔性直流环网中的速动性与可靠性，提出一种基于单端分支系数的保护方案。分析了不同故障位置下各换流阀提供的故障电流分量，并根据单端换流阀极线电流突变量构造分支系数，结果表明线路保护区内故障下的单端分支系数小于区外故障，利用该特征构造区内、外故障识别元件。在线路高阻接地致使主保护失效时，根据桥臂最大允许电流决定线路纵联后备保护的开放时限，以优化现有主、后备保护方案之间的时序配合方案，保障各种直流线路故障工况下，换流阀不间断运行。保护方案不依赖线路边界元件，算法简单，大量仿真结果表明，该方案有良好的耐受过渡电阻能力，能在换流阀闭锁前实现故障区域可靠识别。
关键词：柔性直流电网；分支系数；接地故障；故障电流解析；故障识别；保护时序配合

Line Protection Scheme for Four-terminal Flexible Direct Loop Network Based on Single-terminal Branch Coefficient

SHU Hongchun, REN Min, TIAN Xincui, LI Tao
(College of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: According to the requirements of DC line protection in flexible DC power grid in terms of speed and reliability, a protection scheme based on single terminal branching coefficient is proposed. The fault current components provided by each converter valve under different fault positions are analyzed, and the branching coefficient is constructed according to the variation of DC line current of single-ended. The results show that the single-termial branching coefficient under the fault in the line protection area is less than that that outside the area. This feature is used to realize the identification of fault area. When the main protection fails due to the high resistance grounding of the line, a longitudinal backup protection scheme using the maximum allowable current of the bridge arm to determine the opening time of the line protection is proposed, so that the problem of timing coordination between the existing main and backup protection schemes is solved, and the uninterrupted operation of the converter under various DC line fault conditions is realized. The protection scheme does not rely on boundary elements and the algorithm is simple. A large number of simulation results show that the scheme has a good ability to withstand the transition resistance and can reliably identify the fault area before the converter locked.
Key words: flexible DC power grid; branching coefficient; ground fault; fault current analysis; fault identification; protection sequence coordination

0　引言

随着不可再生能源的日益枯竭及环境压力不断增大，提高水能、风能等发电比例是大势所趋，清洁能源装机容量预计将在 2025 年达到总容量的 57.5%[1]。新能源发电具有间歇性和随机性特点，本地交流系统的消纳能力有限，此外清洁能源基地主要在西北和西南地区，而负荷中心主要集中在中部及东部沿海地区，能源资源和负荷中心呈逆向分布，从供电可靠性、输电距离与运行灵活度等方面考虑，采用架空线路输电的陆上柔性直流电网技术成为电力系统发展的重要方向[2-6]。架空线路工作环境较为恶劣，发生故障的概率较高，故障工况也较为复杂。在网状拓扑结构下，直流线路短路故障，所有换流站均向短路点馈入故障电流，给直流系统一次设备造成严重威胁[7-8]。

为应对柔性直流架空输电网络短路故障问题，大量文献利用平波电抗器等边界特征以构造直流线路保护方案。线路故障产生的初始行波在线路边界元件处多次折反射，形成丰富的故障频域信息，高频保护即利用线路边界元件对高频分量的反射作

基金资助项目：国家自然科学基金(52167011；52037003)；云南省重大科技专项计划(202002AF080001)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52167011, 52037003), the Major Special Science and Technology Project of Yunnan Province (202002AF080001).

用，根据线路侧获取的高频分量大小，或平抗两侧高低频能量的差异，实现故障区域识别[9-17]。相比于基于时域分析的保护方法，频域信息受过渡电阻的影响较小，但高频暂态特征的提取需要复杂的算法，如小波变换、希尔伯特变换、S 变换、傅里叶变换以及各种智能算法，在一定程度上影响保护的速动性[11]。文献[12]利用雷击、噪声与故障信号在小波时间熵分布特征差异构造直流线路保护方案，一定程度提高了保护的速动性，但处理数据的算法较为复杂。文献[13]通过小波变换提取区内、外故障高频暂态能量的差异，并利用平抗上的压降作为方向元件构造故障区域识别判据，该方法增强了耐受过渡电阻的能力。文献[14-15]提出基于小波模极值的直流线路保护方案，该方法在速动性和抗干扰能力方面有所提高。文献[16]基于直流线路边界元件的电气特性，将 Savitzky-Golay 滤波与直流线路的电流微分作为保护启动判据，提高了耐过渡电阻的能力。文献[17]利用多个特定频率电气故障分量的比值构造判据，实现单端量的全线速动保护。

部分文献提出不依赖线路边界元件的保护方案。文献[18-19]利用零模行波和线模行波之间的波速差异，结合数学形态学和行波突变方向构造保护判据。该方法在线路高阻接地下能改善保护动作的可靠性，但在线路近端故障下，其波前到达时间难以标定，存在一定的保护死区。文献[20]考虑了传输线频变效应，提出一种计算短路距离的线路保护方案，但该方法受线路参数误差的影响较大。文献[21]利用补偿电压瞬时值与测量电压瞬时值之比构造距离保护判据，减小了线路参数的影响，但引入差分算法扩大了噪声等干扰，且该方案最大耐受过渡电阻为 50 Ω。文献[22]利用不同故障位置线模电压衰减特性不一致的特性构造未失真因子构造保护识别判据，该保护不受边界元件、控制策略、分布电容的影响。文献[23]提出了基于行波高频分量互相关函数离散度的高压直流线路双端保护方法，该方法不受过渡电阻的影响，且可以实现故障定位。本文推导了柔直电网线路保护区、内外故障下，各换流阀提供的故障电流表达式，以估算线路保护测点处的故障电流发展趋势，在此基础上，利用单端换流阀连接线路的电流突变量构造分支系数，结果表明区内故障下的分支系数小于区外故障的分支系数，且该分支系数受过渡电阻影响小，利用该特征构造线路保护区内、外故障识别判据。若线路高阻接地使得主保护方案失效，提出一种根据桥臂最大允许电流决定线路保护开放时限的纵联后备保护方案，解决现有主、后备保护方案之间的时序配合问题，实现换流阀在各种故障工况下的不间断运行。保护方案不依赖线路边界元件，大量仿真验证了所提保护方案的可靠性。

1 四端柔直环网极线电流故障分量特征分析

四端柔性直流环网拓扑结构如图 1 所示。图 1 中，L_{dc} 为平波电抗器的电感，L_{12}—L_{34} 表示各条直流输电线路，f_1—f_8 为不同故障位置，M_{jk}(j、k=1、2、3、4，$j\neq k$)为线路保护的各个测点。

直流侧短路故障下，考虑到直流线路间存在强耦合，环形拓扑下的等效电路较复杂，难以精确求解直流电网的故障电流，因此采用 RLC 等效模型以分析闭锁前的故障电流发展趋势[24]。依频输电线路模型与 RL 线路模型下的故障电流如附录 A 图 A1 所示。图 A1 中，i_1 表示依频线路模型下的直流故障电流，i_2 表示 RL 线路模型下的直流故障电流。可以看出由于线路上行波的折反射，i_1 具有明显的波过程，而 i_2 为平滑的曲线，i_1 和 i_2 具有相同的增长演变趋势，且有较高的贴合度。

1.1 直流线路故障下极线电流特征分析

以图 1 中正极线路 L_{14} 的 f_1 处接地故障为例，由于换流阀闭锁前主要为换流阀子模块放电提供故障电流，交流系统在故障后几个毫秒内基本不影响直流侧短路电流，因此忽略交流系统对直流侧短路故障的影响，并忽略放电回路中电感的初始电流作用，根据叠加定理，MMC_1 供给故障电流的等效运算电路如图 2 所示。

图 2 中，U_{dc} 为稳态运行下的极线电压幅值；C_0 为换流阀子模块电容值；N 为换流阀相单元投入的子模块个数；L_0 为换流阀单个桥臂电感值；R_0 为

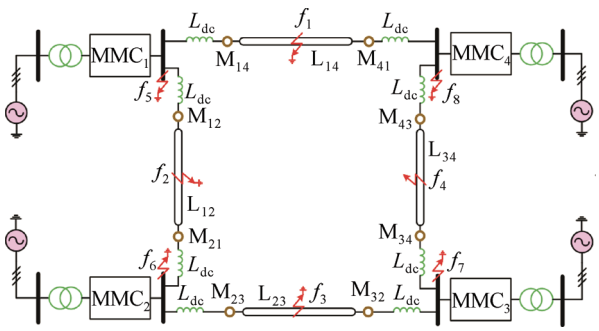


图 1 四端 MMC 直流电网拓扑结构

Fig.1 Topology of four-terminal MMC DC power grid

换流阀单个桥臂电阻值；L_{dc}为平波电抗器的电感；R_x为故障点距 MMC$_1$ 线路长度的等效电阻；L_x为故障点距 MMC$_1$ 线路长度的等效电感；R_{jk}(j、k=1、2、3、4，$j\neq k$)为非故障线路等效电阻；L_{jk}(j、k=1、2、3、4，$j\neq k$)为非故障线路等效电感；R_y为故障点距 MMC$_4$ 线路长度的等效电阻；L_y为故障点距 MMC$_4$ 线路长度的等效电感。对于换流站 MMC$_1$，主要关注的是连接 2 条线路出口处 M$_{12}$、M$_{14}$ 测点获取的故障电流信息，根据图 2 所示等效电路，上述 2 处测点的电流分别为：

$$\begin{cases} I_{a12}(s)= \\ \dfrac{Z_{\Sigma 14}(s)U_{dc}/s}{Z_{MMC}(s)Z_{\Sigma 12}(s)+Z_{MMC}(s)Z_{\Sigma 14}(s)+Z_{\Sigma 12}(s)Z_{\Sigma 14}(s)} \\ I_{a14}(s)= \\ \dfrac{Z_{\Sigma 12}(s)U_{dc}/s}{Z_{MMC}(s)Z_{\Sigma 12}(s)+Z_{MMC}(s)Z_{\Sigma 14}(s)+Z_{\Sigma 12}(s)Z_{\Sigma 14}(s)} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$Z_{MMC}(s)=\dfrac{2L_0 s}{3}+\dfrac{2R_0}{3}+\dfrac{N}{6C_0 s}$为换流阀等效阻抗，包含桥臂电感、桥臂等效电容和桥臂等效电阻；$Z_{\Sigma 14}(s)$为图 2 中虚线框所示支路的等效阻抗；$Z_{\Sigma 12}(s)$为图 2 中点划线框所示支路的等效阻抗。可以得到 $I_{12}(s)$的时域表达式为：

$$\begin{cases} i_{a12}(t)=\dfrac{1}{2\pi \mathrm{j}}\displaystyle\int_{\sigma-\mathrm{j}\infty}^{\sigma+\mathrm{j}\infty} I_{12}(s)\mathrm{e}^{st}\mathrm{d}s \\ i_{a14}(t)=\dfrac{1}{2\pi \mathrm{j}}\displaystyle\int_{\sigma-\mathrm{j}\infty}^{\sigma+\mathrm{j}\infty} I_{14}(s)\mathrm{e}^{st}\mathrm{d}s \end{cases} \tag{2}$$

式中：σ为正有限常数。利用拉氏变换将电路性状的微分方程变为代数方程求解有利于简化故障分析过程，但考虑到式(1)方程阶数高，计算式(2)中复变函数积分较复杂，可通过 MATALB 等数学软件获取其数值解，且由式(2)可知，电流故障分量在频域上的模量通过积分变换可得到其在时域上的大小，因此可根据故障电流频域上的幅值直观分析时域上故障电流大小。

对于不与故障线路相连的换流站提供故障电流，以 MMC$_2$ 为例，其作用下的等效运算电路如图 3 所示。

由图 3 可知 M$_{21}$、M$_{23}$ 测点处故障电流分别为：

$$\begin{cases} I_{b21}(s)= \\ \dfrac{Z_{\Sigma 23}(s)U_{dc}/s}{Z_{MMC}(s)Z_{\Sigma 21}(s)+Z_{MMC}(s)Z_{\Sigma 23}(s)+Z_{\Sigma 21}(s)Z_{\Sigma 23}(s)} \\ I_{b23}(s)= \\ \dfrac{Z_{\Sigma 21}(s)U_{dc}/s}{Z_{MMC}(s)Z_{\Sigma 21}(s)+Z_{MMC}(s)Z_{\Sigma 23}(s)+Z_{\Sigma 21}(s)Z_{\Sigma 23}(s)} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$Z_{\Sigma 21}(s)$为图 3 中虚线框所示支路的等效阻抗；$Z_{\Sigma 23}(s)$为图 3 中点划线框所示支路的等效阻抗。其余换流站激励作用下的故障电流均与上述分析过程相同。

1.2　换流站出口故障下极线电流特征分析

以图 1 中换流站 MMC$_1$ 出口 f_5 处接地故障为例，此时 MMC$_1$ 连接 2 条线路出口 M$_{12}$、M$_{14}$ 测点处于对端换流站与故障点形成的放电回路中，其中 MMC$_2$ 作用下的等效运算电路如图 4 所示。

由图 4 得到 MMC$_2$ 连接 2 条线路出口处的故障电流分量为：

$$\begin{cases} I'_{b21}(s)= \\ \dfrac{Z'_{\Sigma 23}(s)U_{dc}/s}{Z'_{MMC}(s)Z'_{\Sigma 21}(s)+Z'_{MMC}(s)Z'_{\Sigma 23}(s)+Z'_{\Sigma 21}(s)Z'_{\Sigma 23}(s)} \\ I'_{b23}(s)= \\ \dfrac{Z'_{\Sigma 21}(s)U_{dc}/s}{Z'_{MMC}(s)Z'_{\Sigma 21}(s)+Z'_{MMC}(s)Z'_{\Sigma 23}(s)+Z'_{\Sigma 21}(s)Z'_{\Sigma 23}(s)} \end{cases} \tag{4}$$

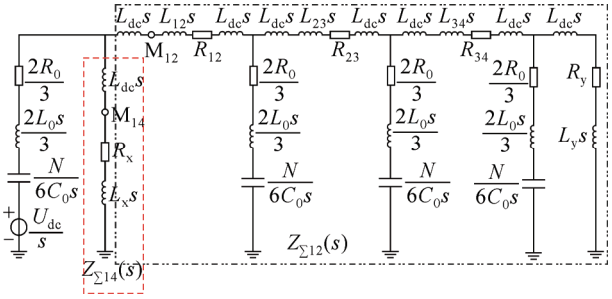


图 2　MMC$_1$ 等效激励作用下的运算电路

Fig.2　Operation circuit under equivalent excitation of MMC$_1$

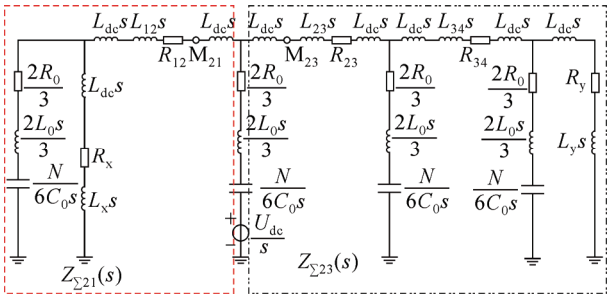


图 3　MMC$_2$ 等效激励作用下的运算电路

Fig.3　Operation circuit under MMC$_2$ equivalent excitation

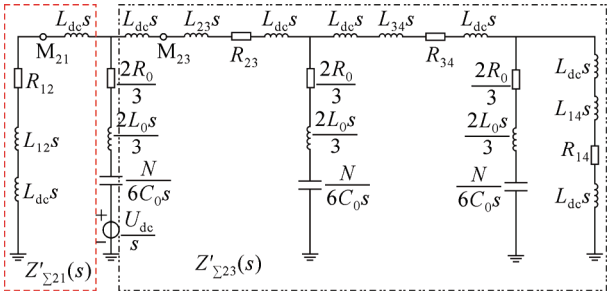


图 4　MMC$_2$ 等效激励作用下的运算电路

Fig.4　Operation circuit under MMC$_2$ equivalent excitation

式中：$Z'_{\Sigma 21}(s)$为图 4 中虚线框所示支路的等效阻抗；$Z'_{\Sigma 23}(s)$为图 4 中点划线框所示支路的等效阻抗。同样，换流站 MMC_3 等效激励作用下的运算电路如图 5 所示。

图 5 中，MMC_3 连接 2 条线路出口处的故障电流分量为：

$$\begin{cases} I'_{c32}(s)= \\ \dfrac{Z'_{\Sigma 34}(s)U_{dc}/s}{Z'_{MMC}(s)Z'_{\Sigma 32}(s)+Z'_{MMC}(s)Z'_{\Sigma 34}(s)+Z'_{\Sigma 32}(s)Z'_{\Sigma 34}(s)} \\ I'_{c34}(s)= \\ \dfrac{Z'_{\Sigma 32}(s)U_{dc}/s}{Z'_{MMC}(s)Z'_{\Sigma 32}(s)+Z'_{MMC}(s)Z'_{\Sigma 34}(s)+Z'_{\Sigma 32}(s)Z'_{\Sigma 34}(s)} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$Z'_{\Sigma 32}(s)$为图 5 中虚线框所示支路的等效阻抗；$Z'_{\Sigma 34}(s)$为图 5 中点划线框所示支路的等效阻抗。

1.3 直流侧故障下单端分支系数分析

直流侧单极接地故障下，由第 1.1 小节的分析可知，所有换流站均通过连接的 2 条直流输电线路向故障点放电，如图 6 所示。图 6 中，$I_{c32}(s)$、$I_{c34}(s)$分别为换流站 MMC_3 等效激励作用下，MMC_3 连接的 2 条直流线路电流；$I_{d41}(s)$、$I_{d43}(s)$分别为换流站 MMC_4 等效激励作用下，MMC_4 连接的 2 条直流线路电流。

线路 L_{14} 故障点 f_1 即为整个直流网络的电压最低点，各直流输电线路电流的突变方向也是确定的，对于张北直流输电工程，L_{12} 长 49.9 km，L_{14} 长 207.9 km，L_{23} 长 217.6 km，L_{34} 长 192.7 km，L_{dc}=200 mH。假定所有换流阀等效电容的附加激励 U_{dc}/s 相同，根据式(1)—式(5)，各条直流线路上故障电流分布如附录 A 图 A2 所示。以母线指向线路的电流方向为正，由图 A2 可知，存在一个不与故障线路相连的换流站，其连接 2 条线路上电流的突变方向相同，而其余 3 个换流站连接 2 条线路上电流的突变方向相反，且均指向故障点。以图 1 中正极直流线路 f_1 点故障为例，将仿真算例中具体参数代入第 1.1 小节故障电流推导式中，在 4 个换流站激励共同作用下，数值解与电磁暂态仿真结果进行对比验证，如附录 A 图 A3 所示，可以看出，故障后前 3 ms 内的故障电流计算值与仿真结果较相符。

图 6 中，上述 3 个换流站连接 2 条线路电流突变方向相反的换流站，满足如下关系：

$$\lambda_{21}=\frac{|i_{21}|}{|i_{23}|}=\frac{|i_{b21}+i_{c32}-i_{b23}|}{|i_{c32}-i_{b23}|}=1+\frac{i_{b21}}{i_{c32}-i_{b23}} \tag{6}$$

$$\lambda_{14}=\frac{|i_{14}|}{|i_{12}|}=\frac{|i_{a14}+i_{21}-i_{a12}|}{|i_{21}-i_{a12}|}=1+\frac{i_{a14}}{i_{21}-i_{a12}} \tag{7}$$

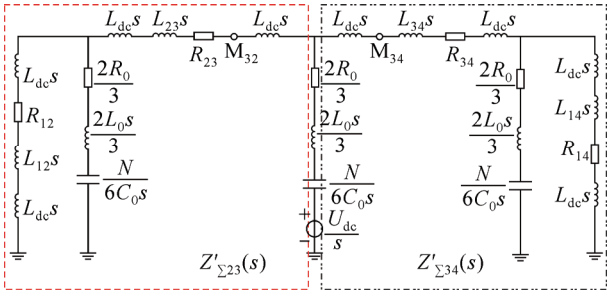


图 5 MMC_3 等效激励作用下的运算电路

Fig.5 Operation circuit under MMC_3 equivalent excitation

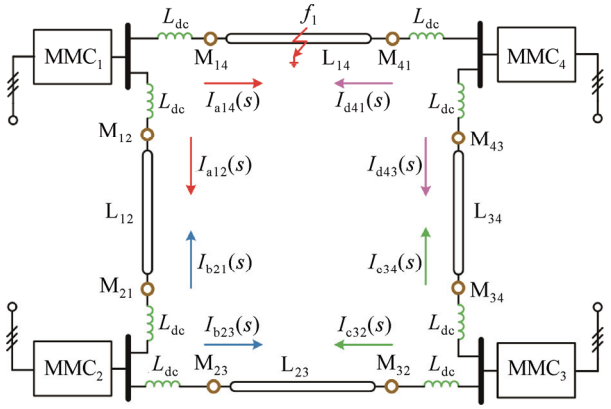


图 6 各激励共同作用下的故障电流分布

Fig.6 Fault current distribution under the joint action of various excitations

$$\lambda_{41}=\frac{|i_{41}|}{|i_{43}|}=\frac{|i_{d41}+i_{c34}-i_{d43}|}{|i_{c34}-i_{d43}|}=1+\frac{i_{d41}}{i_{c34}-i_{d43}} \tag{8}$$

定义 λ 为分支系数，线路故障下 i_{21}、i_{23} 分别为 MMC_2 换流站 M_{21}、M_{23} 测点电流时域分量；i_{14}、i_{12} 分别为 MMC_1 换流站 M_{14}、M_{12} 测点电流时域分量；i_{41}、i_{43} 分别为 MMC_4 换流站 M_{41}、M_{43} 测点电流时域分量。

由式(1)—式(8)可知，若各换流站等效激励 U_{dc}/s 相同，则 λ 仅与各换流站不同放电路径的等效阻抗有关。若在忽略线路的影响下，则 $|i_{23}|=|i_{c32}-i_{b23}|$ 理论上为 0，可知对于不与故障线路相连的换流站 MMC_2，λ_{21} 会远大于 λ_{14} 和 λ_{41}。正极线路 L_{14} 接地故障，换流站 MMC_1、MMC_2 线路出口测得电流如附录 A 图 A4 所示，可见换流站 MMC_2 线路出口测点 M_{23} 的电流突变量极小，而其他测点上电流突变量均明显增大，因此可利用单端分支系数特征，为识别换流站是否与故障线路相连提供依据。

若线路发生高阻接地故障，可将其等效视为该

换流阀内阻增大，由式(1)—式(8)可知，过渡电阻会影响极线电流突变量幅值，但并不影响 λ 大小，由图 2—图 5 可以看出，某一换流阀等效激励独立作用下，分支系数仅与 2 条等效支路阻抗大小有关，线路高阻故障下的仿真结果如第 3.5 小节所示。

若换流站出口处接地故障，各激励共同作用下的故障电流分布以及各直流线路电流突变方向分别如图 7 和附录 A 图 A5 所示。

由附录 A 图 A5 可知，MMC_3 连接 2 条线路上电流的突变方向相同，其余 2 个换流站则相反。与直流线路接地故障的分析类似，MMC_2、MMC_4 满足：

$$\lambda'_{21}=\frac{|i'_{21}|}{|i'_{23}|}=\frac{|i'_{b21}+i'_{c32}-i'_{b23}|}{|i'_{c32}-i'_{b23}|}=1+\frac{i'_{b21}}{i'_{c32}-i'_{b23}} \tag{9}$$

$$\lambda'_{41}=\frac{|i'_{41}|}{|i'_{43}|}=\frac{|i'_{d41}+i'_{c34}-i'_{d43}|}{|i'_{c34}-i'_{d43}|}=1+\frac{i'_{d41}}{i'_{c34}-i'_{d43}} \tag{10}$$

式中：i'_{b21}、i'_{b23} 分别为换流站 MMC_2 等效激励作用下 L_{21}、L_{23} 线路的电流时域分量；i'_{c32}、i'_{c34} 分别为换流站 MMC_2 等效激励作用下 L_{23}、L_{34} 线路的电流时域分量；i'_{d41}、i'_{d43} 分别为换流站 MMC_2 等效激励作用下 L_{14}、L_{34} 线路的电流时域分量。区外故障下 i'_{21}、i'_{23} 分别为 MMC_2 换流站 M_{21}、M_{23} 测点电流时域分量；i'_{41}、i'_{43} 分别为 MMC_4 换流站 M_{41}、M_{43} 测点电流时域分量。

以保护 M_{41} 为例，对比正向换流站出口故障 f_5 和直流线路 L_{14} 接地故障 f_1，可得：

$$\lambda'_{41}-\lambda_{41}=\frac{i'_{d41}}{i'_{c34}-i'_{d43}}-\frac{i_{d41}}{i_{c34}-i_{d43}} \tag{11}$$

将仿真部分中各参数代入式(11)，结果如附录 A 图 A6 所示，说明在 MMC_1 出口故障下，M_{41} 算得的分支系数大于线路 L_{14} 发生接地故障。

2　基于单端分支系数的四端柔直环网线路保护方案

2.1　启动元件

直流电压变化率对检测直流侧故障有较高的灵敏性，满足保护快速启动的要求，但其值受过渡电阻的影响较大，可能导致保护拒动，因此，采用直流电压变化率与低电压判据作为保护的启动元件[25]，即：

$$\begin{cases}\left|\dfrac{\mathrm{d}u_{\mathrm{dc}}(t)}{\mathrm{d}t}\right|>\Delta u_{\mathrm{dc,set}}\\ |u_{\mathrm{dc}}(t)|<u_{\mathrm{dc,set}}\end{cases} \tag{12}$$

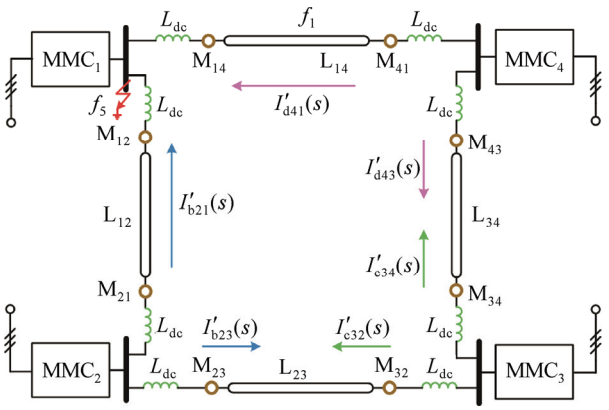


图 7　各激励共同作用下的故障电流分布

Fig.7　Fault current distribution under the joint action of various excitations

式中：$u_{\mathrm{dc}}(t)$为换流阀平抗出口处测得的极线电压瞬时值；$\Delta u_{\mathrm{dc,set}}$ 与 $u_{\mathrm{dc,set}}$ 分别为直流电压变化率与低电压判据的启动门槛值，$\Delta u_{\mathrm{dc,set}}$ 和 $u_{\mathrm{dc,set}}$ 应躲过非直流侧故障扰动引起的最大直流电压变化率和最低直流电压值。取极线对地电压大小为基准值，在参考柔性直流相关规范后[26]，取 $\Delta u_{\mathrm{dc,set}}$=0.08(p.u.)；$u_{\mathrm{dc,set}}$=0.85(p.u.)。满足任意判据时，保护启动。

2.2　选极元件

发生接地故障时，利用零模电流可准确识别故障极，而在对称运行工况下，直流系统中零模量在理论上为 0，有利于选极判据整定。采用零模电流突变量作为选极判据：

$$\begin{cases}i_0(t)=i_+(t)+i_-(t)>i_{0,\mathrm{set}}, & \text{正极故障}\\ i_0(t)=i_+(t)+i_-(t)<-i_{0,\mathrm{set}}, & \text{负极故障}\\ -i_{0,\mathrm{set}}<i_0(t)<i_{0,\mathrm{set}}\ \& & \\ |\Delta i_+(t)|>i_{\mathrm{set1}}\ \&\ |\Delta i_-(t)|>i_{\mathrm{set1}}, & \text{双极故障}\end{cases} \tag{13}$$

式中：$i_+(t)$和 $i_-(t)$分别为正、负极线电流；$i_{0,\mathrm{set}}$ 应躲过非单极接地故障下的最大不平衡电流，主要考虑为换流站连接交流系统三相短路对 $i_0(t)$扰动最大，以保护 M_{14} 为例，取极线电流大小为基准值，仿真算例结果为 0.135 kA(0.072(p.u.))，考虑一定裕度，设定该阈值为 0.1(p.u.)。若 $i_0(t)$未达到阈值，可识别为双极故障，为提高保护方案的可靠性，增加极线电流突变量判据，判断是否为双极故障或非故障扰动：

$$\begin{cases}|\Delta i_+(t)|=|i_+(t)-i_+(0)|\\ |\Delta i_-(t)|=|i_-(t)-i_-(0)|\end{cases} \tag{14}$$

式中：$i_+(0)$和 $i_-(0)$分别为正、负极线直流电流稳态值。式(13)中 i_{set1} 按躲过非直流侧故障下的最大扰动

电流整定，以保护 M_{14} 为例，仿真结果为 0.852 kA(0.455(p.u.))，考虑一定裕度，设定该阈值为 0.5(p.u.)。

2.3 故障区域识别

根据第 1 章，若发生直流线路接地故障，则存在 1 个不与故障线路相连的换流站，其连接 2 条线路的电流突变方向相同且为正；若发生换流站出口故障，其连接 2 条线路的电流突变方向相同且为负，即：

$$\text{正向区外故障：}\begin{cases}\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}(i_{jn}(t)-i_{jn}(0))>\varepsilon\\ \sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}(i_{jm}(t)-i_{jm}(0))>\varepsilon\end{cases}\tag{15}$$

$$\text{换流站出口故障：}\begin{cases}\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}(i_{jn}(t)-i_{jn}(0))<-\varepsilon\\ \sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}(i_{jm}(t)-i_{jm}(0))<-\varepsilon\end{cases}\tag{16}$$

式中：t_f 为保护元件启动时刻，Δt 为故障区域识别时窗长度，取为 0.5 ms；$i_{jn}(t)$和 $i_{jm}(t)$(j、n、m=1、2、3、4，$j\neq n\neq m$)分别为换流站 MMC_j 连接 2 条线路直流电流测量值；$i_{jn}(0)$和 $i_{jm}(0)$分别为对应 2 条线路直流电流稳态值；ε 以躲过稳态运行下极线最大不平衡电流整定，实际双极系统的最大不平衡电流约为 0.3%，系统噪声约 5%[27]，并考虑电流互感器(CT)的传变特性在内，取 ε=0.1(p.u.)。若满足式(15)，则该换流站连接的 2 条线路均识别为正向区外故障；若满足式(16)，则识别为换流站出口故障。若不满足式(15)、(16)，则根据换流站连接线路的分支系数大小，区别出换流站是否与故障线路相连。

基于幅值大小的动作判据受过渡电阻影响大，难以识别故障区域，而基于比值的动作判据有利于削弱过渡电阻的影响，但幅值过小的情况会使得比值结果不可信或导致误判。综上，利用单端极线电流突变量与分支系数构造一种复合判据：

$$\begin{cases}\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{jn(jm)}=\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}(i_{jn(jm)}(t)-i_{jn(jm)}(0))>i_{set2}\\ \lambda=\left|\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{jn(jm)}\right|\Big/\left|\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{jn(jm)}\right|<\lambda_{set}\end{cases}\tag{17}$$

式(17)中，利用积分消去噪声等干扰的影响。式(17)说明某一线路电流突变量积分值大于门槛值，且与分支系数小于整定值的情况下，识别为该线路故障，其中 i_{set2} 以躲过线路末端高阻接地故障下(R_s=500 Ω)的电流突变量积分值进行整定；λ_{set} 应以非连接线路接地故障下的最小值为基准，对于某个线路保护测点，其对应的工况为正向区外换流站出口故障，为保证保护方案在区内故障下可靠动作，取 K_{op}=0.9，即：

$$\lambda_{set}=K_{op}\lambda_{MMC}\tag{18}$$

式中：λ_{MMC} 对应保护测点正向区外换流站出口故障下算得的分支系数值。

在过渡电阻过大的情况下，认为上述保护方案失效，考虑到线路保护对速动性的需求主要源于换流阀开关器件的过流能力，最坏的结果即导致换流阀闭锁，而高阻故障对系统的冲击小，故障电流的上升率和幅值较低，因此提出一种根据换流阀桥臂电流幅值决定线路保护开放时限的纵联后备保护方案。该保护原理如图 8 所示。

图 8 中，M 为主保护识别结果，“1”即识别为本段线路故障；“0”为非本段线路故障；“Non”为主保护失效。i_{qb} 为桥臂电流[28]，$i_{qb,set}$ 以桥臂允许的最大电流 $I_{qb,max}$ 为基准进行整定，取 K_{rel}=0.8，即：

$$\begin{cases}i_{qb}=\frac{1}{2}i_v+\frac{1}{3}i_{dc}<i_{qb,set}\\ i_{qb,set}=K_{rel}I_{qb,max}\end{cases}\tag{19}$$

式中：i_v 为换流阀交流侧电流；i_{dc} 为换流阀直流出口电流。由图 8 可知，在主保护失效时，若桥臂电流未达到阈值，可开放线路后备保护，故障线路两端电流突变方向必然相同，而健全线路上无故障点，电流突变方向必然相反，即：

$$\begin{cases}\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{jk}=\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}(i_{jk}(t)-i_{jk}(0))>\varepsilon\\ \sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{jk}=\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}(i_{kj}(t)-i_{kj}(0))>\varepsilon\end{cases}\tag{20}$$

式中：j、k=1、2、3、4 且 $j\neq k$。可知故障线路两端测得电流应满足式(20)，而健全线路则不满足。定

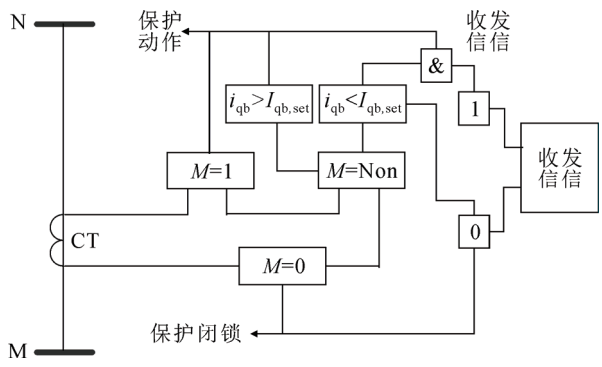


图 8 后备保护动作原理

Fig.8 Operation principle of backup protection

义本地极线电流满足式(20)，则向对端发送“1”，否则发送“0”，同时接受对端信号，即可识别是否为本段线路故障。若桥臂电流达到阈值，则不再等待对端信号到达，本地极线突变量满足式(20)，加速纵联后备保护动作，避免换流阀闭锁。

2.4　直流线路保护方案

综上所述，整体保护方案如图 9 所示。

线路保护启动后，取 1 ms 时窗下的极线电流计算直流电流突变量和零模电流量。由图 9 可知，当极线电流突变量过小导致主保护失效时，则会根据图 8 所示的后备保护完成对线路高阻故障识别。

3　仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 中建立图 1 所示的四端 MMC 直流环网，图 1 中 L_{12} 长 49.9 km，L_{14} 长 207.9 km，L_{23} 长 217.6 km，L_{34} 长 192.7 km，线路采用依频模型，系统参数如附录 B 表 B1 所示。根据第 2 章的整定原则，直流系统中线路保护的整定值如附录 B 表 B2 所示。以换流站 MMC_1 保护 M_{14} 为例，设置典型线路 L_{14} 故障 f_1，正向换流站出口故障 f_8，正向区外线路 L_{34} 故障 f_4，反向换流站出口故障 f_5。故障时刻 t_s=1 ms，算例仿真步长为 2 μs，采样频率设置为 10 kHz。

3.1　线路 L14 接地故障 f_1

正极线路 L_{14} 发生接地故障，仿真结果如附录 B 图 B1 所示。图 B1 中，t_0 为线路保护启动时刻，t_1 时刻完成故障识别。可以看出，MMC_1 连接线路电流突变方向相反，第 2 章分析指出，该突变方向指向故障点，因此保护初步识别为测点 M_{14} 正向故障。取保护启动后 1 ms 时窗下的极线电流，算得 $\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{14}=3.884\ \text{kA}>1.019\ \text{kA}$；$\lambda_{14}$=4.7<8.5，保护识别为区内故障。零模电流 i_0>0.188 kA，保护识别为正极故障。

3.2　正向换流站出口故障 f_8

换流站 MMC_4 出口处发生接地故障，仿真结果如附录 B 图 B2 所示。图 B2 中，i_{14} 和 i_{12} 突变方向相反，且 i_{14} 为正，同样初步识别为测点 M_{14} 正向故障。取保护启动后 1 ms 时窗下的极线电流，算得 $\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{14}=2.539\ \text{kA}>1.019\ \text{kA}$；$\lambda_{14}$=9.44>8.5，保护识别为正向区外故障。

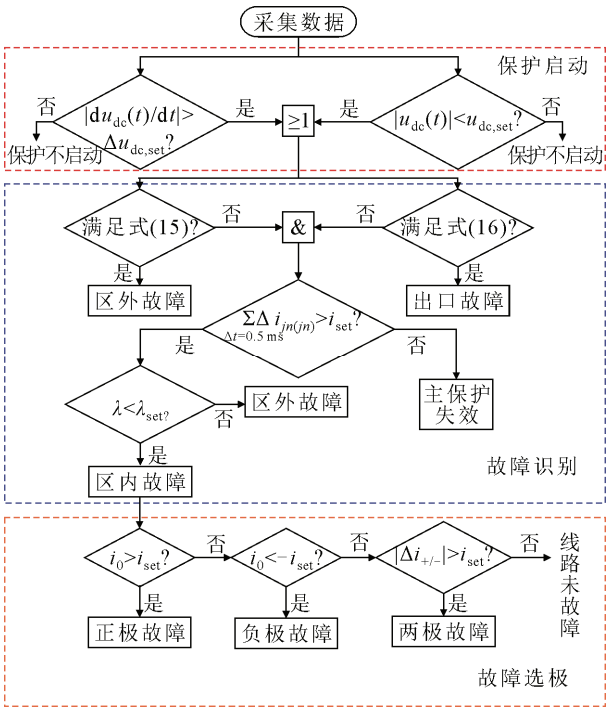


图 9　保护方案流程图

Fig.9　Flow chart of protection scheme

3.3　正向区外故障 f_4

附录 B 图 B3 给出了正极线路 L_{43} 发生接地故障时的仿真结果。由图 B3 可知，i_{14} 突变量大小满足阈值条件，且 λ_{14} 远大于整定值，取保护启动后 1 ms 时窗下的极线电流，算得 $\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{14}=2.265\ \text{kA}>1.019\ \text{kA}$；$\lambda_{14}$=14.4>8.5，识别为正向区外故障，线路保护不动作。

3.4　反向区外换流站出口故障 f_5

附录 B 图 B4 给出了换流站 MMC_1 出口发生接地故障的仿真结果。图 B4 中，ε_{12} 和 ε_{14} 分别为保护测点 M_{12} 和 M_{14} 处电流突变方向判据的门槛值，可以看出保护启动后，i_{12}、i_{14} 突变量均为负，$\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{12}=-1.844\ \text{kA}<-0.227\ \text{kA}$；$\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{14}=-3.871\ \text{kA}<-942\ \text{A}$。保护识别为反向换流站出口故障。

3.5　保护方案抗过渡电阻能力分析

设置正极直流线路 L_{14} 在 10%、30%、70%、90% 处接地故障，过渡电阻分别为 0、200、400、600 Ω。正向区外换流站出口 f_8 发生高阻故障的可能性低，一般考虑为金属性故障，因此本小节仅讨论线路故障带过渡电阻的情况。仿真结果如附录 B 图 B5 和表 1 所示。

表 1 不同故障距离、过渡电阻的仿真结果

Table 1 Simulation results of different fault distances and fault resistances

故障位置	过渡电阻/Ω	计算结果			保护识别结果
		$\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{14}$ /A	λ_{14}	i_0/A	
10%	0	4163	5.24	1476	1/+
	200	2220	5.36	753	1/+
	400	1501	5.34	499	1/+
	600	1151	5.65	378	1/+
30%	0	4053	4.95	1318	1/+
	200	2139	4.82	677	1/+
	400	1456	4.78	453	1/+
	600	1016	—	—	Non
70%	0	3915	4.58	1106	1/+
	200	1820	4.56	503	1/+
	400	1188	4.57	324	1/+
	600	878	—	—	Non
90%	0	3323	4.45	919	1/+
	200	1673	4.34	470	1/+
	400	1114	4.35	311	1/+
	600	829	—	—	Non
f_4	0	2265	14.4	—	0
	200	—	—	—	未启动
	400	—	—	—	未启动
	600	—	—	—	未启动

表 1 中，“1”即为区内故障，“+”为正极故障，“—”表示无计算结果，“Non”为主保护失效。根据图 B5 和表 1 可以看出，过渡电阻对电流突变量幅值有较大影响，但在 $\sum_{t=t_f}^{t_f+\Delta t}\Delta i_{14}$ 满足阈值条件下，对于直流线路上同一故障点，不同过渡电阻对 λ_{14} 基本没有影响，这验证了第 1 章中保护判据耐过渡电阻能力分析的正确性。距保护 M_{14} 线路长度>30%时，600 Ω 过渡电阻使得主保护方案失效，此时根据桥臂电流幅值开放纵联后备保护，30%距离、600 Ω 接地电阻下的桥臂电流仿真结果如附录 B 图 B6 所示。图 B6 中，i_{pj}(j=a、b、c)为上桥臂各相电流，i_{nj} 为下桥臂各相电流。可以看出，该故障工况使得桥臂电流略微增大，但远未到达桥臂最大允许电流阈值，因此可通过更长的时限，等待纵联信号抵达后识别故障区域，实现各种线路故障工况下，换流阀不闭锁运行。

3.6 保护方案比较

四端柔直电网由于有冗余回路，线路保护有特殊性，某一线路故障时，相邻非故障线路的电气量也会有变化，需要甄别，同时故障清除前，原则上最多有 1 个换流站因为过流而闭锁。为满足以上要求，一方面要求换流阀具备一定的故障电流耐受能力，尽可能不发生闭锁；另一方面，直流电网的保护系统应能快速检测与定位直流故障，目前直流系统保护装置检测和定位直流故障的最短时间为 3 ms，该时间也将作为张北直流电网保护系统的基本设计参数。

现有柔性直流输电线路的主保护主要采用单端量行波保护，西门子的行波保护方案是以变化率和变化量为基础，通过检测电压变化率、变化量和电流梯度来进行区内外故障的识别，行波保护方法与本文保护方法对比的结果如附录 B 图 B7 所示。由图 B7 可知，du/dt 受过渡电阻的影响较大，而采用分支系数这种比值形式的保护判据，较好地提高了耐过渡电阻的能力，一定程度上提高了直流线路保护的可靠性。

4 结论

提出一种基于单端分支系数的四端柔直环网线路保护方案，分析了各换流站向故障点提供的故障电流分量，得出线路保护区内故障下的单端分支系数小于正向区外故障，其他结论为：

1）单端分支系数与换流阀在不同放电路径的等效阻抗有关，耐受过渡电阻能力强，能有效识别区内、外故障。

2）保护方案不依赖线路边界元件，无需对特征量进一步信号提取处理，算法简单，保证了保护方案的速动性与可靠性。

3）线路高阻接地导致主保护失效时，根据桥臂电流幅值决定后备保护开放时限，解决主、后备保护方案之间存在的时序配合问题，实现各种线路故障下换流阀不间断运行。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 全球能源互联网发展合作组织. 中国“十四五”电力发展规划研究[R]. 北京：全球能源互联网发展合作组织，2020.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Research on power development of China in The Fourteenth Five-Year Plan[R]. Beijing, China: Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, 2020.

[2] 汤广福，王高勇，贺之渊，等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术，2018，44(7)：2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.

[3] 张　杰，纪江辉，张玉婵，等. 具备重合闸功能的经济型直流断路器研究[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1083-1091.
ZHANG Jie, JI Jianghui, ZHANG Yuchan, et al. Research on economical DC circuit breaker with reclosing function[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1083-1091.

[4] 俞永杰，邓伟成，陈　堃，等. 四端柔性直流电网物理平台研制及实验验证[J]. 高电压技术，2021，47(1)：178-186.
YU Yongjie, DENG Weicheng, CHEN Kun, et al. Development and experimental verification of four-terminal DC grid physical platform[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 178-186.

[5] 刘泽洪，郭贤珊. 含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3595-3603.
LIU Zehong, GUO Xianshan. Operating characteristics research and engineering application of voltage source converter based DC grid with renewable source connected[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3595-3603.

[6] 束洪春，王　璇，田鑫萃，等. 交流故障下永富直流换流器差动保护误动风险分析[J]. 高电压技术，2018，44(2)：478-487.
SHU Hongchun, WANG Xuan, TIAN Xincui, et al. Mal-operation risk analysis of Yongfu DC converter differential protection under AC fault[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 478-487.

[7] 王聪博，贾　科，毕天姝，等. 柔性直流配电系统故障后快速恢复方法研究[J]. 电网技术，2020，44(7)：2738-2744.
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Research on fast recovery method after fault for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2738-2744.

[8] 李　斌，马久欣，温伟杰，等. 适用于中压直流配电网的新型多端口机械式直流断路器[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2385-2392.
LI Bin, MA Jiuxin, WEN Weijie, et al. New type of multiport mechanical DC circuit breaker for medium voltage DC distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2385-2392.

[9] AN T, TANG G F, WANG W N. Research and application on multi-terminal and DC grids based on VSC-HVDC technology in China[J]. High Voltage, 2017, 2(1): 1-10.

[10] 余修勇，肖立业，林良真，等. 基于单端量的柔性直流电网故障识别方案[J]. 高电压技术，2018，44(2)：440-447.
YU Xiuyong, XIAO Liye, LIN Liangzhen, et al. Single-ended fast fault detection scheme for MMC-based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 440-447.

[11] 刘海金，李　斌，温伟杰，等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与展望[J]. 电网技术，2021，45(9)：3463-3477.
LIU Haijin, LI Bin, WEN Weijie, et al. Review and prospect on transmission line protection in flexible DC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3463-3477.

[12] 王　帅，毕天姝，贾　科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. 电网技术，2016，40(7)：2179-2185.
WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185.

[13] 李　斌，何佳伟，李　晔，等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报，2016，36(21)：5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.

[14] PSARAS V, TZELEPIS D, VOZIKIS D, et al. Non-unit protection for HVDC grids: an analytical approach for wavelet transform-based schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2634-2645.

[15] KONG M, PEI X Y, PANG H, et al. A lifting wavelet-based protection strategy against DC line faults for Zhangbei HVDC grid in China[C]// 19th European Conference on Power Electronics and Applications. Warsaw, Poland: IEEE, 2017: 1-11.

[16] 韦延方，王志杰，王　鹏，等. 基于限流电抗电压的柔性直流配电网故障保护方法[J]. 高电压技术，2022，48(12)：5068-5079.
WEI Yanfang, WANG Zhijie, WANG Peng, et al. Protection method for flexible DC distribution network faults based on current limiting reactance voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5068-5079.

[17] 戴志辉，赵中秋，王兴国，等. 基于直流滤波器多频率单端电气量的高压直流线路保护[J]. 高电压技术，2023，49(2)：702-712.
DAI Zhihui, ZHAO Zhongqiu, WANG Xingguo, et al. HVDC line protection based on DC filter multifrequency single-end electric parameters[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 702-712.

[18] 童　宁，林湘宁，张雪松，等. 不依赖于边界元件的架空型多端柔直电网就地测距式接地保护原理[J]. 中国电机工程学报，2019，39(7)：2049-2059.
TONG Ning, LIN Xiangning, ZHANG Xuesong, et al. Fault location based single-ended protection strategy for overhead VSC-MTDC independent on boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2049-2059.

[19] 陈　乐，彭咏泉，林湘宁，等. 面向接地故障辨识的半波长线路测距式超高速就地主保护新原理研究[J]. 电工技术学报，2019，34(24)：5234-5243.
CHEN Le, PENG Yongquan, LIN Xiangning, et al. New ultra high speed local measurement-based protection principle for half-wave transmission line ground fault identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5234-5243.

[20] SUONAN J L, ZHANG J K, JIAO Z B, et al. Distance protection for HVDC transmission lines considering frequency-dependent parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 723-732.

[21] 秦　瑜，文明浩，白　宇，等. 在线估计判据极值的高压直流线路新型距离保护[J]. 中国电机工程学报，2020，40(12)：3888-3896.
QIN Yu, WEN Minghao, BAI Yu, et al. A novel distance protection scheme for HVDC transmission lines based on criterion extremum online estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3888-3896.

[22] 张大海，武传健，和敬涵，等. 基于未失真因子的 LCC-MMC 混合直流输电线路保护方案[J]. 高电压技术，2022，48(1)：166-177.
ZHANG Dahai, WU Chuanjian, HE Jinghan, et al. Protection scheme for transmission lines of LCC-MMC hybrid HVDC system based on undistorted factor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 166-177.

[23] 张腾跃，韩昆仑，陈锋元，等. 基于行波高频分量互相关函数离散度的高压直流线路双端保护方法[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1254-1262.
ZHANG Tengyue, HAN Kunlun, CHEN Fengyuan, et al. Two-terminal protection method for HVDC transmission lines based on high-frequency cross-correlation function dispersion of traveling wave[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1254-1262.

[24] 许建中，赵成勇. 架空线路柔性直流电网故障分析与处理[M]. 北京：中国电力出版社，2019：5-14.
XU Jianzhong, ZHAO Chengyong. Fault analysis and treatment of overhead line flexible DC power network[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2019: 5-14.

[25] 王艳婷，张保会，范新凯. 柔性直流电网架空线路快速保护方案[J].

电力系统自动化，2016，40(21)：13-19.
WANG Yanting, ZHANG Baohui, FAN Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 13-19.

[26] 国家电网有限公司. 高压柔性直流输电控制保护装置技术规范 Q/GDW 11889—2018[S]. 北京：中国电力出版社，2020.
State Grid Corporation of China. Technical specification for the control and protection equipment of VSC HVDC transmission system: Q/GDW 11889—2018[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2020.

[27] 张晨浩，宋国兵，李　洋，等. 基于故障电压行波传播项指数系数的柔性直流输电线路单端行波保护原理[J]. 中国电机工程学报，2021，41(24)：8424-8436.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, LI Yang, et al. Principle of non-unit traveling wave protection for VSC-HVDC grids based on index of fault voltage traveling wave propagation term[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8424-8436.

[28] 徐　政，肖晃庆，张哲任，等. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2017：1-24.
XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren, et al. Flexible DC transmission system[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2017: 1-24.



束洪春
1961—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及 DSP 应用等
E-mail: kmshc@sina.com.cn

SHU Hongchun
Ph.D., Professor



田鑫萃(通信作者)
1985—，女，博士，教授
研究方向为新型继电保护与故障测距、高压直流线路控制与保护等
E-mail: 1105479731@qq.com

TIAN Xincui
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-05-07　修回日期　2023-04-15　　编辑　程子丰

附录 A

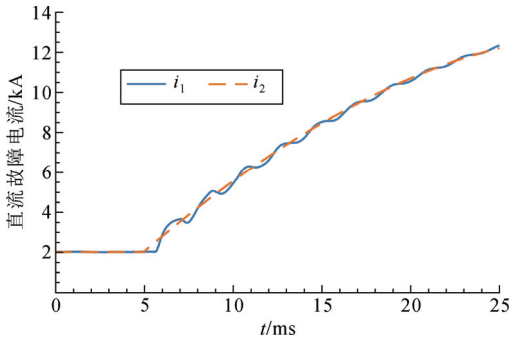


图 A1　两种不同线路模型下的短路故障电流对比

Fig.A1　Comparison of short-circuit fault current under two different line models

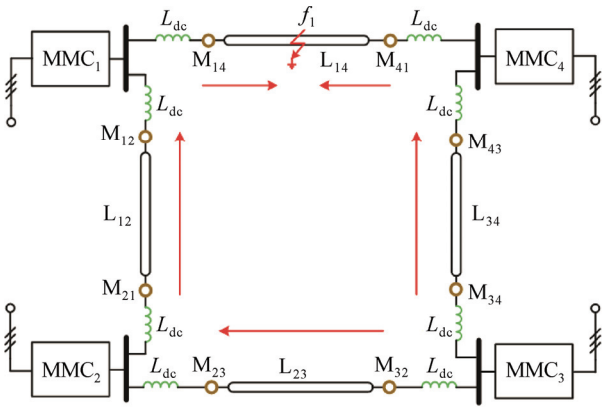
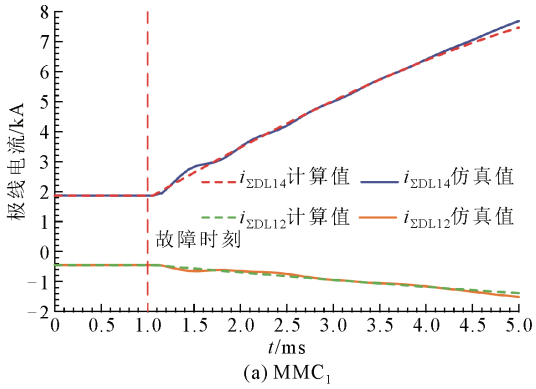
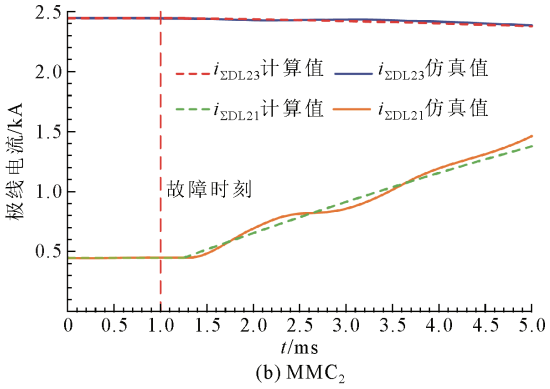


图 A2　各直流线路电流突变方向

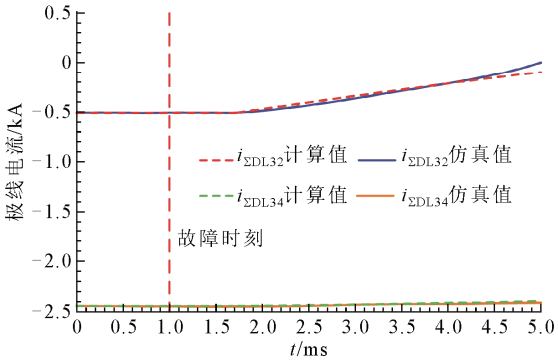
Fig.A2　Change direction of DC line current



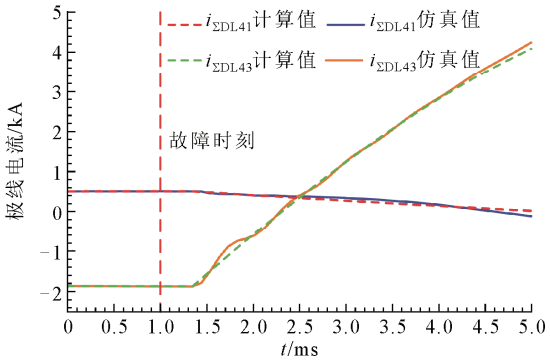
(a) MMC_1



(b) MMC_2



(c) MMC_3



(d) MMC_4

图 A3　正极直流线路 f_1 故障下的极线电流计算值与仿真值

Fig.A3　Calculation value and simulation value of pole line current under f_1 fault of positive DC line

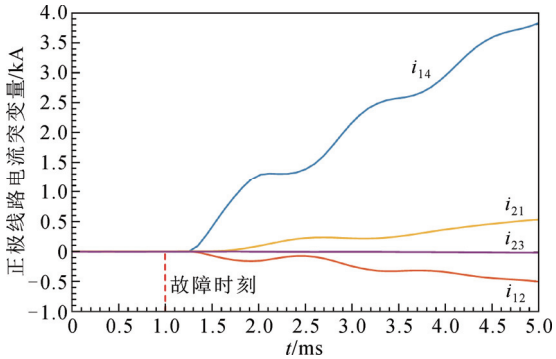


图 A4　MMC_1、MMC_2 连接线路电流突变量

Fig.A4　Current inrush of MMC_1 and MMC_2 connecting lines

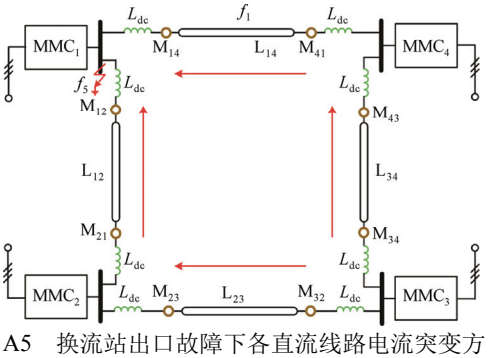


图 A5　换流站出口故障下各直流线路电流突变方向

Fig.A5　Change direction of DC line current under outlet fault of converter station

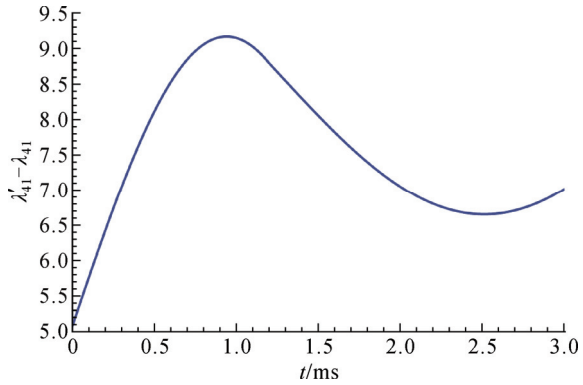


图 A6　M_{41} 在两种不同故障下的分支系数差

Fig.A6　Branching coefficient difference of M_{41} under two faults

附录 B

表 B1　四端 MMC 直流环网仿真模型参数

Table B1　Simulation model parameters of four terminal flexible DC loop network

参数	额定容量/MW	额定直流电压/kV	桥臂电感/mH	平波电抗器/mH	子模块电容值/mF	单个桥臂子模块数	交流侧线电压/kV
MMC_1	1500	500	75	200	10	200	330
MMC_2	1500	500	75	200	10	200	330
MMC_3	3000	500	75	200	10	200	330
MMC_4	3000	500	75	200	10	200	330

表 B2　四端 MMC 直流线路保护整定值

Table B2　Setting value of four terminal MMC DC line protection

线路保护	$\Delta u_{dc,set}$/(kV·ms^{-1})	$u_{dc,set}$/kV	$i_{0,set}$/A	i_{set1}/A	ε/A	i_{set2}/A	λ_{set}	$i_{qb,set}$/A
M_{12}	40	425	−45.4	227.3	227	1339	8.7	2520
M_{14}	40	425	188.4	942.5	942	1019	8.5	2520
M_{21}	40	425	45.4	227.3	227	1512	11.6	2520
M_{23}	40	425	244	1220	1220	1051	10.4	2520
M_{32}	40	425	−244	1220	1220	1089	10.6	2520
M_{34}	40	425	−40.4	202	202	1206	11.1	2520
M_{43}	40	425	40.4	202	202	1200	10.9	2520
M_{41}	40	425	−188.4	942.5	942	1086	10.3	2520

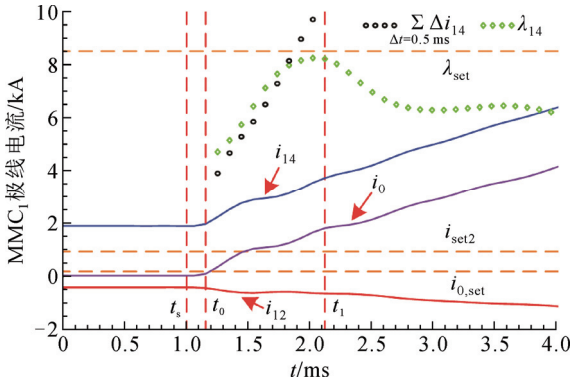


图 B1　f_1 故障下 MMC_1 线路保护特征量

Fig.B1　MMC_1 line protection characteristic quantity under f_1 fault

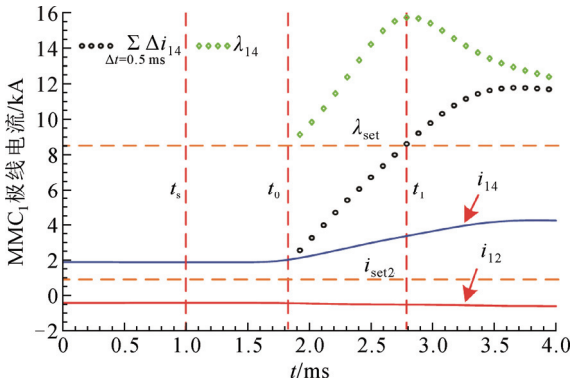


图 B2　f_8 故障下 MMC_1 线路保护特征量

Fig.B2　MMC_1 line protection characteristic quantity under f_8 fault

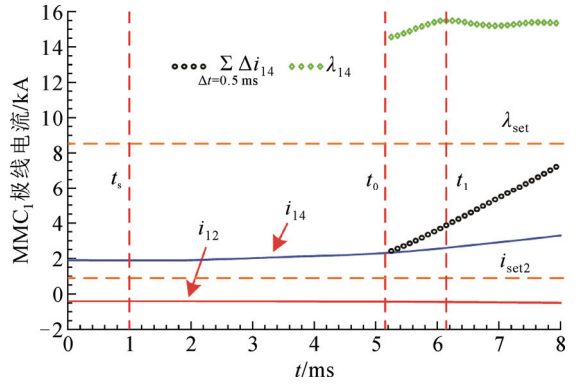


图 B3　f_4 故障下 MMC_1 线路保护特征量

Fig.B3　MMC_1 line protection characteristic quantity under f_4 fault

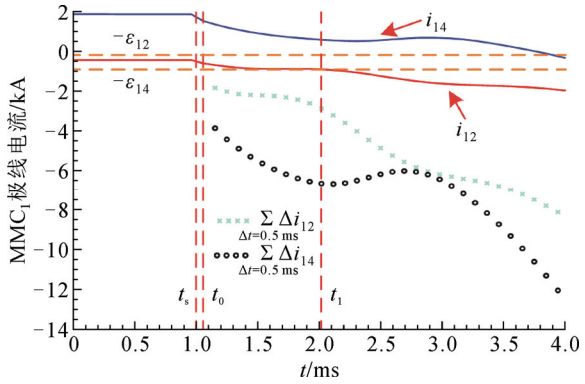


图 B4　f_5 故障下 MMC$_1$ 线路保护特征量

Fig.B4　MMC1 line protection characteristic quantity under f_5 fault

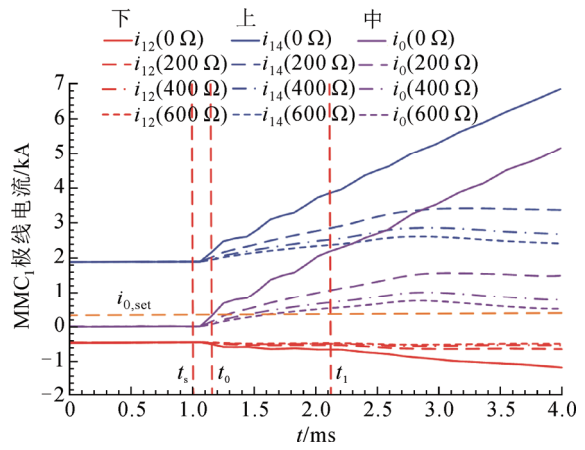


图 B5　L$_{14}$ 线长 10%故障下 MMC$_1$ 线路保护特征量

Fig.B5　MMC$_1$ line protection characteristic quantity under 10% fault of L$_{14}$ length

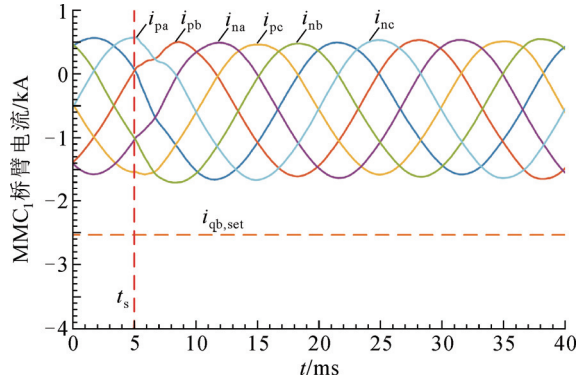
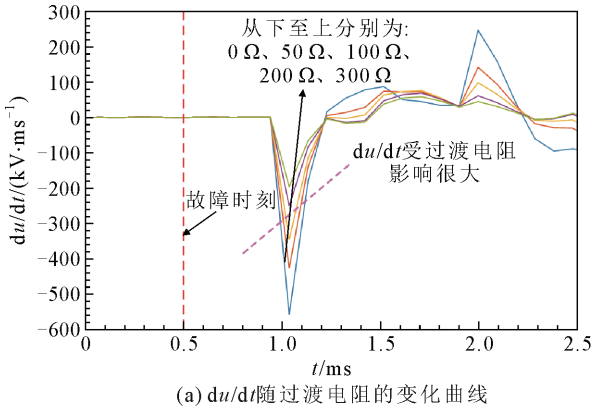
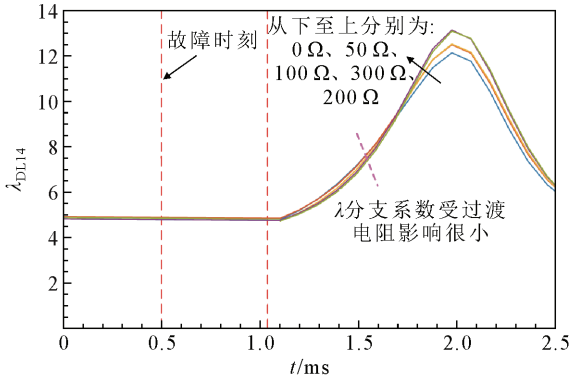


图 B6　30%线路长度高阻接地下 MMC$_1$ 桥臂电流

Fig.B6　MMC$_1$ bridge arm current with 30% length and high resistance grounding underground



(a) du/dt随过渡电阻的变化曲线



(b) 分支系数随过渡电阻的变化曲线

图 B7　分支系数与现有 du/dt 保护受过渡电阻的影响比较分析

Fig.B7　Comparison and analysis of branch coefficient and existing du/dt protection affected by transition resistance