第 52 卷 第 4 期：1869-1884 高电压技术 Vol.52, No.4: 1869-1884
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250480

源网协同限流下基于独立模量变换的柔性直流输电线路纵联保护

廖建权[1]，娄世方[1]，王少雄[1]，郑宗生[1]，王渝红[1]，王强钢[2]
（1. 四川大学电气工程学院，成都 610065；2. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学)，重庆 400044）

摘　要：源网协同限流可实现直流电网直流侧故障电流抑制。然而，限流使得故障电流特征劣化，导致传统线路纵联保护拒动。该文结合正负极独立运行的模量变换矩阵(简称独立模量变换 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$)，提出基于独立模量相似度的柔性直流输电线路纵联保护方法。首先，推导了源网协同限流下金属回流双极直流系统故障特性，构建 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 变换下不同故障复合模量等值网络。在此基础上，引入 Fréchet 距离衡量线路两侧模量电流的相似性，实现区内外故障可靠识别，并利用 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 变换构造故障选极判据；最后，综合故障识别和故障选极，设计了纵联保护的逻辑及流程。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了四端柔性直流电网仿真模型。仿真结果表明，所提保护方案识别区内外故障仅需 2 ms 时间窗，且受分布电容、故障限流、通信延时等因素影响较小；所提出的故障选极策略不受过渡电阻、故障限流影响，其灵敏性具有显著优势。

关键词：柔性直流输电线路；源网协同限流；极模变换；Fréchet 距离；纵联保护

Pilot Protection of Flexible DC Transmission Line Based on Independent Modulus Transformation Under Source-grid Coordinated Current Limiting

LIAO Jianquan[1], LOU Shifang[1], WANG Shaoxiong[1], ZHENG Zongsheng[1], WANG Yuhong[1], WANG Qianggang[2]
(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology(Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract：Source-grid coordinated current limiting can suppress DC-side fault currents in DC grids; however, it also deteriorates fault-current characteristics, which may cause conventional line pilot protection to fail. This paper proposes a pilot protection method for transmission lines in flexible DC grids based on the similarity of independent modal quantities by introducing a modal transformation matrix for independently operated positive and negative poles, referred to as the independent modal transformation $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$. Firstly, the fault characteristics of a bipolar DC system with metallic return under source-grid coordinated current limiting are derived, and equivalent networks of composite modal components for different fault conditions under the $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ transformation are established. On this basis, the Fréchet distance is introduced to measure the similarity of modal currents at both ends of the line, thereby enabling reliable discrimination between internal and external faults, while a faulted-pole selection criterion is constructed based on the $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ transformation. Finally, the logic and procedure of the pilot protection scheme are designed by integrating fault identification and faulted-pole selection. A four-terminal flexible DC grid simulation model is built in PSCAD/EMTDC. Simulation results show that the proposed protection scheme requires only a 2 ms time window to discriminate between internal and external faults and is only slightly affected by distributed capacitance, fault current limiting, and communication delay. The proposed faulted-pole selection criterion is unaffected by fault resistance and fault current limiting, and offers a significant sensitivity advantage.

Key words：flexible DC transmission lines; source-grid coordinated current limiting; pole-mode transformation; Fréchet distance; pilot protection

基金资助项目：国家自然科学基金(52207126；U22B6006)；四川省自然科学基金(2024NSFSC0869)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China(52207126, U22B6006), Natural Science Foundation of Sichuan Province (2024NSFSC0869).

0 引言

基于模块化多电平换流器(modular multilevel converters，MMC)的高压柔性直流输电技术具有无换相失败、运行方式灵活可控、传输距离远、线路损耗低、电能质量高等优点[1-2]，在光伏、海陆风电等大规模新能源接入场景中得到广泛应用[3-5]，是实现我国“双碳”目标的重要技术支撑。然而，柔性直流输电系统由于其本身的低惯性、弱阻尼、耐流能力不足等特征，当线路发生故障时，故障电流上升迅速、发展极快，易导致系统闭锁、停电范围扩大，严重威胁电网稳定运行。故障限流策略通过在故障初期有效抑制故障电流，从而防止系统闭锁和降低对直流断路器的开断能力要求[6]，在缓解设备冲击的同时，更为保护系统争取了宝贵的响应时间，有利于故障的快速、准确切除，提升系统的稳定性和保护性能。因此，抑制故障电流，同时快速、可靠地识别并清除故障成为柔性直流电网保护技术亟待解决的关键问题。

现有柔性直流输电系统的保护配置分为单端量保护和双端量保护 2 大类[7]。实际投入运行的直流输电线路单端量保护有行波保护和微分欠压保护，这些保护方案能够在故障发生后快速动作，但其抗噪声干扰和耐过渡电阻能力较弱，导致保护可靠性降低，且这类方案的保护范围可能存在死区[8]，限制了其应用范围。基于双端量的纵联保护能够提高保护可靠性，并具有绝对选择性，现有工程中采用的保护原理主要是电流差动保护。然而，电流差动保护受线路分布电容电流的影响，通常需要设置较大的延迟，无法满足保护的快速性要求[9]。

针对电流差动保护延时较大的问题，当前研究提出改进的差动保护[10-12]、方向纵联保护[13]、状态估计保护[14]和基于波形相似度的纵联保护[15-18]等方法。文献[10]提出基于频变参数模型补偿分布电容电流的差动保护方案，但算法复杂，计算量大，且对线路参数精度依赖较高；行波差动保护天然包含分布电容电流，具有快速性和准确性等特点，但在实际应用中仍面临时间同步、采样率要求高等问题[11-12]。文献[13]提出了一种方向纵联保护方案，该方案仅需传递方向信号，无需数据同步，大幅降低了硬件要求，但其依赖于线路边界原件，限制了适用范围。文献[14]提出了一种基于状态估计的保护策略，但其需要精确的模型参数，在模型精度不足的情况下，状态估计可能出现误差，进而影响保护动作的准确性和可靠性。

基于波形相似度的纵联保护主要关注线路两侧电流波形的变化差异，无需依赖电网的拓扑结构，且能够实现毫秒级的响应，在近年来得到了大量研究。文献[15-16]通过 Pearson 相关系数衡量故障时行波波形的相似性，以识别区内外故障；文献[17]则基于余弦相似度算法分析电流故障分量的波形相似度进行故障识别。这 2 类算法在相似性度量中对幅值突变的敏感性较弱，更侧重于波形的相对趋势或方向一致性，难以全面反映波形的变化差异。此外，在新能源弱出力等特殊运行工况下，可能会出现 0/C 或 0/0 等特殊计算情形，导致保护装置失效或误动[19]，限制了其在复杂场景下的适用性。文献[18]提出了一种基于 Hausdorff 距离的故障识别方法，通过比较零模差动电流的实测波形与理论模型计算值之间的相似性来判断故障。然而，Hausdorff 距离将波形视为无序点集，忽略了时间序列信息，缺乏对波形整体动态特征的有效评估。此外，该方法对局部异常点敏感，在噪声干扰等情况下容易产生误判或拒动。

除了在算法层面存在的问题之外，现有方法较少考虑限流[20]对保护性能的影响。源侧和网侧[21-23]限流措施会削弱故障特征，进而降低保护的可靠性和灵敏性，甚至可能导致保护拒动[24]。除了需要考虑限流对保护的影响外，还需要考虑系统的接地方式(金属回线接地或中性点直接接地)，采用合适的模量变换实现线路解耦。针对大地回流系统，文献[25]基于二阶极模变换矩阵，提出了改进的单端保护方案，然而，这类方案受过渡电阻影响较大，且无法适用于金属回流系统。针对金属回流系统，文献[26]采用二阶变换矩阵对线路进行解耦，然而二阶矩阵只考虑了正负极而忽略了中性线影响，其变换电压无法分析接地故障，具有局限性。文献[27]推导了适用于金属回流系统的 4 种极模变换矩阵并解释了其物理意义，构建了不同故障类型的复合模量等值网络。然而，文献[27]未针对不同模量变换在保护中的应用展开研究。

针对上述问题，本文在综合考虑故障限流的基础上，提出了一种基于独立模量变换($\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 变换)的柔性直流输电线路纵联保护方法。首先，分析了系统在源网协同限流策略下的故障特性，并通过 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 变换实现线路解耦。在此基础上，引入能够综合评估

波形相似性的 Fréchet 距离作为判据，通过比较线路两侧模量电流的相似性以识别区内、外故障，并结合极模变换，构建故障选极判据以确定故障极。最后，在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建仿真模型，验证了所提保护方案的可靠性与优越性。

1　源网协同限流下金属回流双极直流系统故障特性及其对保护的影响

金属回流双极直流系统的拓扑结构如图 1 所示，其中：FCL 为故障限流器(fault current limiter)；CLR 为限流电抗器(current limit reactor)；DCCB 为直流断路器(DC circuit breaker)；AC1、AC2 分别表示两侧交流系统；i_{1+}、i_{1-}、i_{1m}、i_{2+}、i_{2-}、i_{2m} 分别表示线路两侧各极电流，下标+、−、m 分别表示正极、负极、金属回线分量。

现有的限流策略主要分为源侧和网侧，虽各具优势，但均存在局限：源侧限流策略通过降低源侧电压实现限流，但该方式可能影响交流侧电气量，削弱故障后的系统恢复能力，同时影响非故障极的功率传输；网侧限流策略主要通过在线路中投入 FCL、CLR 等装置增加线路阻抗来实现限流。相比源侧限流，网侧限流可通过控制 FCL 的投切实现选择性限流，不影响非故障线路的运行，但存在成本高、易引发过度限流等问题。针对上述问题，源网协同限流通过协调配置源侧、网侧限流策略，充分利用系统限流能力，综合 2 种限流策略的优点，在故障初期协同抑制故障电流，缓解断路器开断压力，提升系统的工程可实施性与运行经济性。

在此基础上，本文进一步关注源网协同限流背景下的保护问题。由于限流措施将削弱故障暂态特征，使传统的保护方法可靠性下降，因此亟需设计故障限流工况下的保护方法。在以下内容中若无特殊说明，均默认系统运行于源网协同限流模式，并在此基础上开展保护策略设计与验证。

金属回流双极直流输电线路发生故障时，主要包括以下几种类型：正极对地故障(positive pole to ground, P-G)、负极对地故障(negative pole to ground, N-G)、正极对回线故障(positive pole to dedicated metallic return, P-M)、负极对回线故障(negative pole to dedicated metallic return, N-M)以及正极对负极故障(positive pole to negative pole, P-N)。

当输电线路发生故障时其限流过程主要分为 3 个阶段，如图 2 所示。

阶段 1(t_0~t_1阶段)：故障发生后，故障电流迅速上升。此阶段从故障发生到 FCL 和 MMC 调压动作开始之前，由于未采取任何限流措施，故障电流迅速上升，对设备及系统构成较大威胁。

阶段 2(t_1~t_2阶段)：FCL 和 MMC 作用，实现限流控制。此阶段内 FCL 和 MMC 调压装置协同作用，通过降低源侧电压和增加线路阻抗，有效减缓故障电流增长速度，实现限流目的。

阶段 3(t_2~t_3阶段)：DCCB 动作切除故障，故障电流下降至 0。当故障电流被有效限制后，DCCB 动作，迅速切除故障线路，故障电流急剧下降直至为 0，系统进入保护后的恢复阶段。

以正极接地故障为例进行分析，在采用源网协同限流策略时其等效模型如图 3 所示，其中：i_1、i_2 为线路电流；R_{M1}、L_{M1}、C_{M1}、R_{M2}、L_{M2}、C_{M2} 分别为线路两端 MMC 等效的电阻、电感、电容参数；L_1、L_2、R_1、R_2 分别为线路电感、电阻；L_{C1}、L_{C2} 为 CLR 参数；R_f 为接地电阻；m 为测量元件；u_{C1}、u_{C2} 为等效电容电压；u_{FCL1}、u_{FCL2} 分别为两侧投入

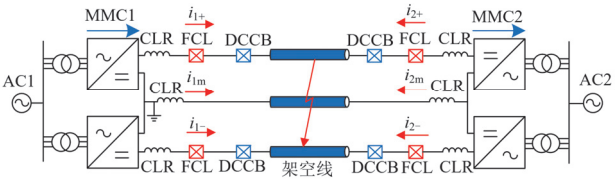


图 1　金属回流双极直流系统拓扑结构

Fig.1　Metal return bipolar DC system topology

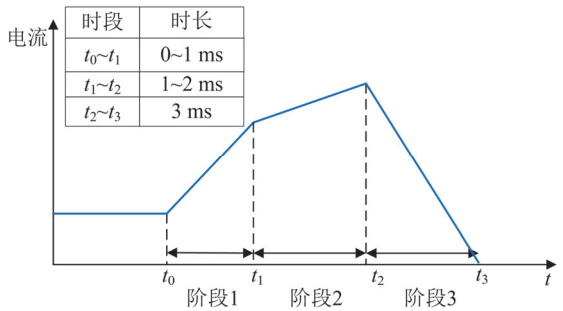


图 2　柔性直流输电线路限流过程

Fig.2　Current-limiting process of flexible DC transmission lines

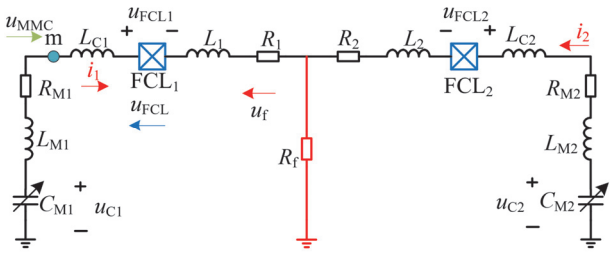


图 3　正极接地故障等效模型

Fig.3　Equivalent model of positive pole to ground fault

的 FCL 电压；u_{f}为故障行波；u_{MMC}、u_{FCL}分别为源侧、网侧限流产生的行波。

根据 KCL、KVL 可得：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}=\dfrac{u_{\mathrm{C1}}-i_1\left(R_{\mathrm{M1}}+R_1+R_{\mathrm{f}}\right)-i_2R_{\mathrm{f}}-u_{\mathrm{FCL1}}}{L_{\mathrm{M1}}+L_{\mathrm{C1}}+L_1}\\ \dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}=\dfrac{u_{\mathrm{C2}}-i_2\left(R_{\mathrm{M2}}+R_2+R_{\mathrm{f}}\right)-i_1R_{\mathrm{f}}-u_{\mathrm{FCL2}}}{L_{\mathrm{M2}}+L_{\mathrm{C2}}+L_2}\\ \dfrac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{i_1}{C_{\mathrm{M1}}/K_1}\\ \dfrac{\mathrm{d}u_2}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{i_2}{C_{\mathrm{M2}}/K_2}\end{cases}\tag{1}$$

式中：K_1、K_2为左右两端 MMC 调压系数。

以行波保护为例进行分析，在 m 处装设电压测量元件，通过分析区内外发生故障时行波波前陡度的差异进行故障整定。在源网协同限流时，其整定判据为：

$$\mathrm{d}\left(u_{\mathrm{f}}+u_{\mathrm{MMC}}+u_{\mathrm{FCL}}\right)/\mathrm{d}t>\Delta\tag{2}$$

式中：Δ为行波保护整定阈值，按躲过区外故障最严重情况时波电压的最大陡度整定。

图 4 为搭建的双端直流输电系统发生故障时，在采用限流源网协同限流策略时故障电流随调压系数和短路电阻的变化关系。由式(1)、图 4 可知，源侧和网侧的限流策略均会引起输电线路上的电压和电流变化，降低故障量的变化率和幅值，削弱故障特征，进而影响保护的可靠性与灵敏性。对于行波保护，由式(2)可知，限流措施削弱了故障行波特性，导致波电压陡度降低，进而降低了行波保护对区内故障的敏感性。因此，在采用故障限流策略后，需要重新评估保护整定判据，优化保护策略，以平衡限流效果与保护的可靠性、灵敏性之间的矛盾。

2 金属回流双极直流系统模量变换

金属回流双极直流系统存在复杂的极间耦合(见附录 A 图 A1，其中：R、L 分别为线路电阻、电感；C、G 分别为电容、电导；M 为极间互感；下标 1、2 分别表示系统左右两端量)，不同线路间的电气量相互影响，可能导致非故障线路的保护误动，为降低耦合影响并简化后续保护算法的建模与计算，可采用极模变换矩阵对极间量进行解耦。极模变换是一种线性变换方法，旨在将相互耦合的极量转换为相互独立的模量，使线路各模量之间相互独立且互不干扰。不同的模量代表不同的物理意义，采用不同的变换矩阵也会得到不同的结果。本文采

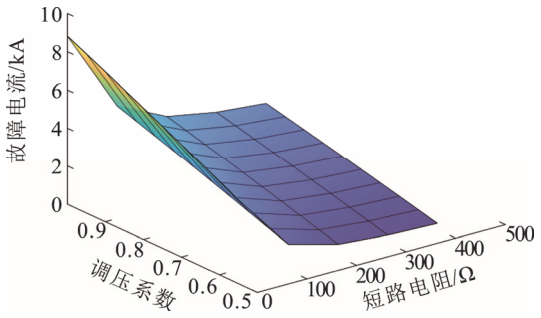


图 4 不同调压系数和短路电阻时的故障电流

Fig.4 Fault current at different regulation factors and short-circuit resistances

用基于正负极独立运行的 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 变换，分析金属回流双极直流系统的故障特性。$\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 极模变换矩阵式为：

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}x_+\\x_{\mathrm{m}}\\x_-\end{bmatrix}=\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0&1\\-1&-1&1\\0&1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_0\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_0\end{bmatrix}=\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}^{-1}\begin{bmatrix}x_+\\x_{\mathrm{m}}\\x_-\end{bmatrix}=\dfrac{1}{3}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&-1&2\\1&1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_+\\x_{\mathrm{m}}\\x_-\end{bmatrix}\end{cases}\tag{3}$$

式中：x 可表示电压或电流；下标 1、2、0 分别表示 1 模、2 模、0 模分量；下标+、−、m 分别表示正极、负极、金属回线分量。

在 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 变换下各模量电流的流通路径如附录 A 图 A2 所示，1 模系统表示正极独立运行的情况，2 模系统表示负极独立运行的情况，0 模系统则表示接地分量的运行状态。

假设输电系统除故障点外完全对称且为线性网络，满足叠加定理。以单端输电线路发生故障为例，当系统发生故障时，根据故障边界条件与模量变换矩阵，可推导出不同故障类型下的模量电流故障分量表达式，结果汇总如式(4)—(8)所示，其中：$u_{\mathrm{dc+}}$为正极故障前故障点的额定电压；i_{f1}、i_{f2}、i_{f0}分别为 1、2、0 模电流故障分量；R_+、L_+分别为正极线路电阻、电感；$M_{+\mathrm{m}}$为正极线路与金属回线之间的耦合电感。具体推导过程详见附录 B。

$$\text{P-G:}\quad\begin{cases}i_{\mathrm{f1}}(t)=\dfrac{2u_{\mathrm{dc+}}}{3(R_++R_{\mathrm{f}})}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_++R_{\mathrm{f}}}{L_+}t}\right)\\ i_{\mathrm{f2}}(t)=-\dfrac{u_{\mathrm{dc+}}}{3(R_++R_{\mathrm{f}})}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_++R_{\mathrm{f}}}{L_+}t}\right)\\ i_{\mathrm{f0}}(t)=\dfrac{u_{\mathrm{dc+}}}{3(R_++R_{\mathrm{f}})}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_++R_{\mathrm{f}}}{L_+}t}\right)\end{cases}\tag{4}$$

$$\text{N-G:}\quad \begin{cases} i_{\mathrm{f1}}(t)=\dfrac{u_{\mathrm{dc+}}}{3(R_{+}+R_{\mathrm{f}})}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{L_{+}}t}\right) \\ i_{\mathrm{f2}}(t)=-\dfrac{2u_{\mathrm{dc+}}}{3(R_{+}+R_{\mathrm{f}})}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{L_{+}}t}\right) \\ i_{\mathrm{f0}}(t)=-\dfrac{u_{\mathrm{dc+}}}{3(R_{+}+R_{\mathrm{f}})}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{L_{+}}t}\right) \end{cases} \tag{5}$$

$$\text{P-M:}\quad \begin{cases} i_{\mathrm{f1}}(t)=\dfrac{u_{\mathrm{dc+}}}{2R_{+}+R_{\mathrm{f}}}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{2R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{2(L_{+}-M_{+\mathrm{m}})}t}\right) \\ i_{\mathrm{f2}}(t)=0 \\ i_{\mathrm{f0}}(t)=0 \end{cases} \tag{6}$$

$$\text{N-M:}\quad \begin{cases} i_{\mathrm{f1}}(t)=0 \\ i_{\mathrm{f2}}(t)=-\dfrac{u_{\mathrm{dc+}}}{2R_{+}+R_{\mathrm{f}}}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{2R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{2(L_{+}-M_{+\mathrm{m}})}t}\right) \\ i_{\mathrm{f0}}(t)=0 \end{cases} \tag{7}$$

$$\text{P-N:}\quad \begin{cases} i_{\mathrm{f1}}(t)=\dfrac{2u_{\mathrm{dc+}}}{2R_{+}+R_{\mathrm{f}}}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{2R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{2(L_{+}-M_{+\mathrm{m}})}t}\right) \\ i_{\mathrm{f2}}(t)=-\dfrac{2u_{\mathrm{dc+}}}{2R_{+}+R_{\mathrm{f}}}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{2R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{2(L_{+}-M_{+\mathrm{m}})}t}\right) \\ i_{\mathrm{f0}}(t)=0 \end{cases} \tag{8}$$

3 基于独立模量变换和 Fréchet 距离的纵联保护方案设计

本文采用的 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 极模变换在故障选极方面具有显著优势。然而，其 1 模量无法反映负极对中性线故障，2 模量无法反映正极对中性线故障。因此，本文综合考虑1模和2模电气量进行保护方案设计：在实际保护过程中，先并行提取 1 模量与 2 模量的特征信息，并根据 1 模量识别 P-G、P-M 或 P-N 故障；根据 2 模量识别 N-G、N-M 或 P-N 故障。这样既能够覆盖所有故障类型，还能进一步提高保护性能和可靠性。

在本文所提保护方案中，利用受保护线路左侧的电压、电流等单端量进行故障启动、检测及选极判定，同时通过受保护线路的双端量保护实现故障识别与定位。通过将双端量保护与单端量选极相结合，本文提出的保护方案能够快速准确地实现故障识别与故障选极，从而提高保护系统的响应速度和动作可靠性。

3.1 故障启动

故障启动判据应具备良好的快速性和准确性，以便在故障发生后快速识别并触发保护机制。本文选择模量电压微分作为故障启动判据，并采用最大值型定值整定方法，选取每次仿真数据最大值集合中的最小值作为整定依据[28]，设置启动判据为：

$$\begin{cases} \left|\mathrm{d}u_1/\mathrm{d}t\right|>K_{\mathrm{set1}}=\dfrac{\min\left\{\max\left(\left|\mathrm{d}u_1/\mathrm{d}t\right|\right)\right\}}{K_{\mathrm{rel}}} \\ \left|\mathrm{d}u_2/\mathrm{d}t\right|>K_{\mathrm{set2}}=\dfrac{\min\left\{\max\left(\left|\mathrm{d}u_2/\mathrm{d}t\right|\right)\right\}}{K_{\mathrm{rel}}} \end{cases} \tag{9}$$

式中：u_1、u_2 分别为输电线路的 1 模、2 模电压；K_{set1}、K_{set2} 分别为 1 模、2 模电压保护启动阈值；K_{rel} 为可靠系数。

启动逻辑为：只要任意一个计算值满足上述判据，则保护启动。

3.2 故障检测

系统受到扰动或干扰时可能会导致保护误启动，因此需要设置故障检测元件来识别故障和扰动。本文采用欠压保护进行故障检测，当连续 5 个采样点满足欠电压判据才判断为故障，否则视为扰动。阈值同样按最大值型定值整定，设置判据为：

$$\begin{cases} \left|u_1\right|<U_{\mathrm{set1}}=\dfrac{\min\left\{\max\left(\left|u_1\right|\right)\right\}}{K_{\mathrm{rel}}} \\ \left|u_2\right|<U_{\mathrm{set2}}=\dfrac{\min\left\{\max\left(\left|u_2\right|\right)\right\}}{K_{\mathrm{rel}}} \end{cases} \tag{10}$$

式中：U_{set1}、U_{set2} 分别为 1 模、2 模故障检测整定阈值。

当任意一个模量电压值满足欠压判据时，则检测为故障，否则为扰动。由于故障启动、故障检测工程应用已经较为成熟，本文不再赘述。

3.3 故障限流

当柔性直流输电系统发生故障时，系统检测到电压或电流的异常变化，通过启动源侧、网侧的限流设备来限制故障电流。当前，关于柔性直流系统故障限流的研究已经相当深入，由于本文的研究重点为在考虑故障限流的基础上提出新的的保护方案，因此不再赘述。

3.4 故障识别

在柔性直流输电系统中，正常运行或发生区外故障时两端电流波形相似；而发生区内故障时两端电流波形具有显著差异。因此，本文通过引入 Fréchet 距离，并结合 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 极模变换，比较受保护线路两侧模量电流的相似性以识别区内外故障。

Fréchet距离是一种衡量2条曲线整体形状差异

的几何距离度量工具，其综合考虑了曲线上点的空间位置和时间顺序，能敏感地捕捉曲线整体变化特征，在比较曲线相似度方面具有独特的优势。该方法原理简单，计算量小，可靠性高，且抗干扰性强，已广泛应用于相关领域。Fréchet 距离定义为：假设 a、b 2 点分别沿轨迹 A、B 以 $\alpha(t)$、$\beta(t)$的速度出发，它们之间最大距离的下确界即为 Fréchet 距离，$t\in[0,1]$。其数学表达式为：

$$F(A,B)=\inf_{\alpha,\beta}\left(\max_{t\in[0,1]}\left(d(A(\alpha(t)),B(\beta(t)))\right)\right) \tag{11}$$

式中：inf(·)表示下确界；$A(\alpha(t))$、$B(\beta(t))$分别表示点 a、b 在 t 时刻的位置；d 为度量方式，本文选取欧氏距离作为度量方式。

对于任意的 2 条离散曲线，有：

$$\begin{cases}A=(a_1,\cdots,a_i,\cdots,a_m)\\B=(b_1,\cdots,b_j,\cdots,b_n)\end{cases} \tag{12}$$

式中：$i=1,2,\cdots,m$；$j=1,2,\cdots,n$；m 和 n 分别表示 A 和 B 中元素的个数。

计算 A、B 中任意 2 点之间的欧式距离，得到距离矩阵：

$$d_{ij}=\|a_i-b_i\|=\sqrt{(x_{a_i}-x_{b_i})^2+(y_{a_i}-y_{b_i})^2} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}d_{11}&d_{12}&\cdots&d_{1j}&\cdots&d_{1n}\\d_{21}&d_{22}&\cdots&d_{2j}&\cdots&d_{2n}\\\vdots&\vdots&&\vdots&&\vdots\\d_{i1}&d_{i2}&\cdots&d_{ij}&\cdots&d_{in}\\\vdots&\vdots&&\vdots&&\vdots\\d_{m1}&d_{m2}&\cdots&d_{mj}&\cdots&d_{mn}\end{bmatrix} \tag{14}$$

式中：d_{ij} 为 a_i 与 b_j 2 点之间的欧式距离；x_{a_i}、x_{b_i}、y_{a_i}、y_{b_i} 分别为 a_i、b_j 的横、纵坐标。

在计算 Fréchet 距离时，通过在距离矩阵 $\boldsymbol{D}$ 中遍历所有满足单调性与有向性约束的有效路径，即从起点 d_{11} 出发到达终点 d_{mn}，其中任意一点 d_{ij} 的下一步只能向右 $d_{(i+1)j}$、向下 $d_{i(j+1)}$或右下对角线 $d_{(i+1)(j+1)}$ 方向移动，形成有效路径。所有有效路径中的最大距离集合中的最小值即为 2 条曲线的 Fréchet 距离。

Fréchet 距离的物理意义可以理解为在保持时间顺序的条件下，2 条曲线对应点间最大偏离距离在所有遍历对应关系中的最小值，其不依赖于信号的瞬时幅值或极性匹配，因此适用于柔性直流系统中由于故障限流导致的电流波形变化缓慢、特征不明显等复杂场景，避免了传统算法由于新能源弱出力等情况导致的 0/0 或 0/C 等算法失效问题，在柔性直流系统中展现出更高的稳定性与适应性。

Fréchet 距离有效表征了 2 条曲线之间的相似度：2 条曲线越相似，Fréchet 距离值越小，最小值为 0；2 条曲线差异越大，计算得到的 Fréchet 距离则越大。

将 Fréchet 距离引入到柔性直流输电线路的保护中，通过计算线路两端系统的 1、2 模电流的 Fréchet 距离值以识别故障，设置判据为：

$$\begin{cases}F_1=F(i_{11},i_{21})>F_{\text{set1}}\\F_2=F(i_{12},i_{22})>F_{\text{set2}}\end{cases} \tag{15}$$

式中：i_{11}、i_{12} 分别为受保护线路左端 1 模、2 模电流；i_{21}、i_{22} 分别为受保护线路右端 1 模、2 模电流；F_1、F_2 分别为 1 模、2 模电流曲线的 Fréchet 距离计算值；F 为 2 条曲线之间的 Fréchet 距离；F_{set1}、F_{set1} 分别为 1 模、2 模电流 Fréchet 距离的整定阈值。

当其中任意一个满足判据即认为发生区内故障，否则为区外故障。本文基于大量典型运行工况的仿真计算得到 Fréchet 距离值，并通过统计分析合理设置故障识别阈值 F_{set1}、F_{set2}，确保判据的可靠性与稳定性。阈值设置为：

$$\begin{cases}F_{\text{set1}}=K_{\text{rel}}F_{\text{sim1}}\\F_{\text{set2}}=K_{\text{rel}}F_{\text{sim2}}\end{cases} \tag{16}$$

式中：F_{sim1}、F_{sim2} 分别为仿真得到的 1 模、2 模电流 Fréchet 距离值。。

3.5 故障选极

前文计算得到的发生不同故障时的模量电流故障分量关系式如表 1 所示，其中 $i_{\text{f+}}$、$i_{\text{f–}}$分别表示正极、负极线路故障电流。

当系统发生各种故障时，故障电流模量大小、极性、变化趋势都不尽相同，可根据其模量特征来判断故障类型以及进行故障选极。根据表 1 分析可知，当且仅当系统发生极对地故障时 0 模电流不为 0，发生 P-G 故障时 0 模电流呈正增长，负极接地故障时其 0 模电流呈负增长；而当系统发生极对金属回线或极对极故障时 0 模量为 0，发生 P-M 故障时 2 模量为 0，发生 N-M 时 1 模量为 0，发生 P-N 故障时 1、2 模量电流均不为 0。

表 1 模量电流故障分量

Table 1 Fault component of modulus current

故障类型	i_{f1}	i_{f2}	i_{f0}
P-G	$2i_{\text{f+}}/3$	$-i_{\text{f+}}/3$	$i_{\text{f+}}/3$
N-G	$-i_{\text{f–}}/3$	$2i_{\text{f–}}/3$	$i_{\text{f–}}/3$
P-M	$i_{\text{f+}}$	0	0
N-M	0	$i_{\text{f–}}$	0
P-N	$i_{\text{f+}}$	$-i_{\text{f+}}$	0

根据上述分析可知，$\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 变换下的故障模量特征不受外部条件影响，在故障选极方面具有显著优势。本文根据模量电流故障分量的特征构建的选极判据如表 2 所示，故障选极相平面如图 5 所示。

表 2 中，Δ_1、Δ_2、Δ_0 分别为 1 模、2 模、0 模电流设置的阈值，用于区分正常波动与故障响应。Δ_1、Δ_2 分别取系统正常运行时 1、2 模电流额定值的 10%；而系统正常运行时 0 模电流额定值为 0，因此 Δ_0 可取的小一些，根据仿真模型及典型运行工况，本文取 Δ_0 为 0.05 kA。阈值设置为：

$$\begin{cases}\Delta_1=0.1K_{\mathrm{rel}}I_1\\ \Delta_2=0.1K_{\mathrm{rel}}I_2\\ \Delta_0=0.05\ \mathrm{kA}\end{cases}\tag{17}$$

式中：I_1、I_2 分别为系统正常运行时 1、2 模电流额定值。

3.6 保护方案流程

根据前文所述的故障启动、故障检测、故障限流、故障识别和故障选极方法，本文提出如附录 B 图 B2 所示的保护方案。当系统检测到故障后保护启动，故障识别和故障选极模块同时并行动作以提高保护动作速度，当故障识别和故障检测模块共同发出动作信号时相应线路断路器动作，实现故障切除与系统隔离。

4 仿真验证

4.1 仿真模型

为验证所提保护方案的有效性，本文基于张北四端柔直电网的拓扑结构及参数，在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如附录 A 图 A3 所示的基于 MMC 的四端环形柔性直流电网，仿真系统参数见表 3。为更接近工程实际，输电线路模型采用依频模型，线路模型及参数如附录 A 图 A4 所示，4 条线路长度 L_1—L_4 分别为 219、66、227、126 km，线路配置 CLR、FCL、DCCB，正极、金属回线、负极线路参数完全一致，系统设置在 t_0=0.5 s 时发生故障，并于 t=0.501 s 时投入限流装置。本文电流正方向如附录 A 图 A3 所示，采用故障限流策略时源侧调压系数取 0.7，网侧电阻型 FCL 电阻设为 50 Ω。

本文的采样频率为 20 kHz，采样时间窗为 2 ms，选取北京—张北段线路作为受保护线路，分别设置区内故障 f_1、f_2、f_3 和区外故障 f_4、f_5 共 5 个故障位置，其中 f_1、f_3 位于 L_1 线路的两端，f_2 位于 L_1 线路的中点，f_4、f_5 分别位于 L_2、L_4 线路的首端。根据仿真结果以及式(16)、(17)，阈值整定见表 4。

4.2 限流的影响

以 f_2 处正极接地故障为例，设置故障电阻为 10 Ω，分析系统源侧、网侧限流时的故障特性。附录 A 图 A5 展示了系统采用不同限流策略时的仿真结果，本文在仿真中统一规定从左至右为电流的正方向，当线路发生故障后，由于故障电流的存在，故而即便在相同限流策略和故障条件下，两侧电流在变化趋势、幅值等动态特性上仍表现出显著差异。此外，故障点位置、线路分布电容等因素也可能进

表 2 故障选极判据

Table 2 Fault selection criteria

故障类型	1 模	2 模	0 模
P-G	—	—	$i_{\mathrm{f0}}>\Delta_0$
N-G	—	—	$i_{\mathrm{f0}}<-\Delta_0$
P-M	—	$\lvert i_{\mathrm{f2}}\rvert<\Delta_2$	$\lvert i_{\mathrm{f0}}\rvert<\Delta_0$
N-M	$\lvert i_{\mathrm{f1}}\rvert<\Delta_1$	—	$\lvert i_{\mathrm{f0}}\rvert<\Delta_0$
P-N	$i_{\mathrm{f1}}>\Delta_1$	$i_{\mathrm{f2}}<-\Delta_2$	$\lvert i_{\mathrm{f0}}\rvert<\Delta_0$

注：“—”表示其不作为判断条件。

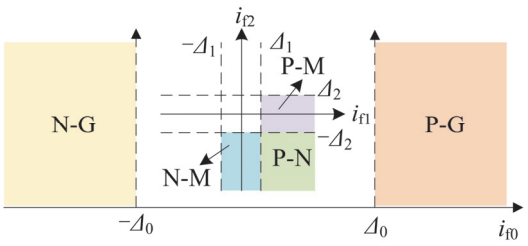


图 5 故障选极相平面

Fig.5 Fault current modulus phase plane

表 3 仿真系统参数

Table 3 Simulation system parameters

参数	MMC1	MMC2	MMC3	MMC4
换流器额定容量/MVA	3 000	3 000	1 500	1 500
直流侧额定电压/kV	±500	±500	±500	±500
交流侧额定电压/kV	500	220	220	500
变压器变比	525/260	230/260	230/260	525/260
变压器漏抗/pu	0.18	0.18	0.18	0.18
阀侧阻抗基准值/Ω	22.53	22.53	45.07	45.07
子模块电容/mF	15	15	7	7
桥臂电抗/mH	75	75	75	75
MMC 子模块数	233	233	233	233

表 4 阈值设置

Table 4 Threshold configuration

参数	F_{set1}	F_{set2}	Δ_1/kA	Δ_2/kA	Δ_0/kA
取值	0.31	0.31	0.25	0.25	0.05

一步加剧这一差异。由仿真结果可知，不同的故障限流方式导致系统电流响应有明显差异，进而可能会影响保护性能。本文保护方案计算的 Fréchet 距离仍在短时间内超过阈值，验证了所提保护算法在源网协同限流条件下具有良好的灵敏性和可靠性。

为进一步分析源网协同限流策略在不同功率工况下对保护性能的影响，本文在上述仿真基础上，选取额定容量为 2 000、3 000、4 000 MVA 3 种典型功率传输工况，对保护性能进行仿真分析，如图 6 所示。由于 Fréchet 距离的计算依赖于电流的故障分量轨迹特征，而非电流故障全量幅值。因此，线路不同传输功率对 Fréchet 距离的影响有限，仿真结果验证了所提策略在多种典型功率传输场景下的适应性与有效性。

4.3 不同故障位置的保护性能

为全面评估所提保护方案在不同故障类型与位置下的适应性与有效性，本文在故障点 f_1—f_5 处，分别设置 P-G、N-G、P-M、N-M、P-N 等故障类型进行仿真验证，过渡电阻取 10 Ω，均采用源网协同限流策略。f_2 位置仿真结果如附录 A 图 A6 所示，由仿真结果可知，所提的保护方案均能快速、准确地进行故障识别和故障选极，具有良好的鲁棒性、选择性与适应性。考虑到保护启动以及算法计算时间并检测到故障可在 2 ms 内完成，同时考虑通信时延为 1.5 ms，直流断路器动作时间为 3 ms 左右，总体而言，本保护方案可在 6.5 ms 内可靠动作，满足柔性直流输电系统对保护的速动性与可靠性要求，具备良好的工程应用前景。

4.4 过渡电阻和分布电容的影响

为了验证所提保护方案的耐过渡电阻能力，本文以线路中点 f_2 处故障为例进行分析，附录 A 图 A7 展示了过渡电阻为 800 Ω 时的仿真波形。在投入限流装置后，限流策略破坏了 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 变换模量电流的对称性关系，导致模量电流出现波动。该扰动虽导致 0 模量电流不再为 0，但其影响较小，可通过设置合理的阈值消除，不会影响故障选极判断。由理论分析和仿真可知，$\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 模量变换下不同类型故障的模量电流具有明确的“为 0”特征，结合此故障特征并通过合理设置阈值，可以实现对故障极性的稳定识别，不受过渡电阻变化的影响。仿真结果表明，所提保护方案能在 800 Ω 过渡电阻时快速检测故障并进行正确选极，具有较强的耐过渡电阻能力。

本文的仿真模型中输电线路采用依频模型，因此所有仿真均考虑了分布电容的影响。仿真结果表明所提的保护方案受分布电容的影响较小。

4.5 时间窗长的影响

为评估时间窗长度对本文所提保护性能的影响，以 f_2 处正极接地故障为例，设置故障电阻为 10 Ω，分别取 1、2、3、4、5 ms 的时间窗长计算 1 模电流的 Fréchet 距离，由图 7 可知，尽管时间窗长度不同，Fréchet 距离在各窗长条件下均明显超过阈值，但识别判据稳定，所提保护算法受时间窗长度影响较小。本文综合考虑识别精度与动作速度，选取采样时间窗长为 2 ms。

4.6 噪声的影响

为评估噪声对所提保护算法的影响，在 30 dB 信噪比条件下对电流信号叠加高斯噪声，以 f_2 处正极接地故障为例进行分析，过渡电阻取 10 Ω，仿真结果如附录 A 图 A8 所示。结果表明，所提保护方案在 30 dB 信噪比条件下能准确识别区内外故障并

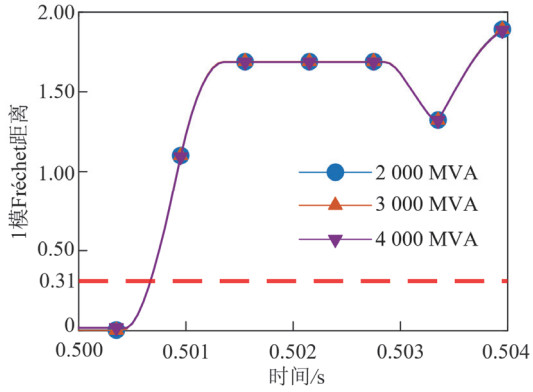


图 6 故障限流时不同传输容量的保护性能

Fig.6 Protection performance under different transmission capacities during fault current limitation

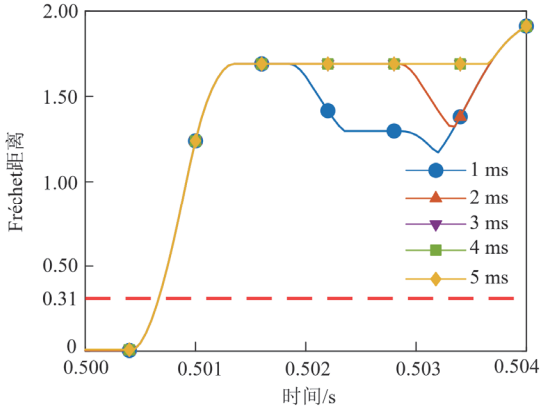


图 7 不同采样时间窗的保护性能

Fig.7 Protection performance for different sampling time windows

正确选极，具有较强的耐干扰能力。

4.7 通信延时的影响

由于本文所提纵联保护方案需要测量线路两端的电气量，因此需要考虑通信延时对保护方案的影响。电磁波在光纤中的传播速度为 2.08×108 m/s 左右，对于受保护的 219 km 长输电线路，应考虑 1 ms 左右的通信延时。此外，为评估所提保护策略在超长距离通信条件下的适应性，进一步考虑了 1.5、2、3、4、5 ms(对应线路长度在 1 000 km 以上)的通信延时的工况。在 f_2 处设置电阻为 10 Ω 的 P-G 故障，同时考虑通信延时，得到的 1 模电流仿真结果如附录 A 图 A9(a)所示。由于 Fréchet 距离本质上衡量的是 2 条曲线在给定时间窗内的整体偏离程度，具备较强的全局匹配能力。因此在通信延迟导致的波形错位情况下，Fréchet 距离依然能够识别出两端 1 模电流之间的波形差异，从而保证了故障的快速准确识别。

需要说明的是，本文阈值 0.31 是基于区外最严重故障时(区外发生 P-N 金属接地故障)的仿真结果，该阈值设置使得保护具有较强的耐过渡电阻能力，但未充分考虑发生区外故障时通信延迟的影响。为了提高保护方案在区外故障通信延迟环境下的鲁棒性与误判抑制能力，需要适当提高识别阈值，这将不可避免地削弱对区内高阻故障的识别灵敏性，降低保护方案的耐过渡电阻能力。附录 A 图 A9(b)为区外最严重故障且在通信延迟为 2 ms 条件下的仿真结果，设置阈值为 0.6，此时保护方案可识别到区内 400 Ω 正极接地故障。而在此阈值下保护方案依然可以识别 f_2 处过渡电阻为 10 Ω 的不同通信延迟时的 P-G 故障，如附录 A 图 A9(c)所示。仿真结果表明，即使在存在通信延迟的复杂工况下，只要合理设置阈值便可准确识别区内、外故障，验证了所提保护方案在复杂通信条件下的有效性与鲁棒性。

4.8 与其他保护算法对比

为验证所提保护方案的综合性能，与传统电流差动保护、Pearson 相关系数、余弦相似度等算法对比，由于后备保护需在主保护拒动时可靠动作，本文按躲过最严重区外故障的原则整定保护阈值，在保证区外故障不误动的前提下，提高其对区内故障的动作可靠性。可靠系数 K_{rel} 取 1.2，分别设置上述算法识别区内故障的判据为差动量 I>0.32、Pearson 相关系数 P<0.71、余弦相似度 C<0.70。在 f_2 位置设置过渡电阻 800 Ω 的正极接地故障，采用源网协同限流策略，以线路两侧 1 模电流作为输入信号，仿真波形如图 8 所示。

Pearson 相关系数、余弦相似度 2 类方法从统计相关性角度出发，依赖归一化处理来衡量信号之间的变化趋势或方向一致性，从而降低了对波形幅值变化的敏感性，更侧重于波形的相对变化关系，这可能导致在高阻故障等幅值减弱的工况下保护灵敏性下降。相比之下，本文采用的 Fréchet 距离方法综合考虑了波形的时序结构与整体空间形态变化，具备更强的形状差异辨识能力与抗干扰性能。由对比结果可知，即使在高阻故障和故障限流的复杂工况下，Fréchet 距离依然能够在短时间内准确识别故障，相较于其他算法展现出更强的可靠性与速动性。进一步地，本文将所提保护方法与文献[12-14]保护方法进行对比分析，比较结果如表 5 所示。由表 5 可知，本文所提保护方法在算法设计中系统地考虑了分布电容、噪声干扰、过渡电阻等影响因素以及故障选极能力，体现出良好的理论完备性与工程适应性。

5 结论

本文针对柔性直流输电系统在源网协同限流条件下故障特征弱化、传统纵联保护易拒动等问题，提出了一种基于独立模量变换与 Fréchet 距离的纵联保护方案。主要结论如下：

1）本文所提保护方案充分考虑源网协同限流的影响，仅需 2 ms 时间窗便能准确识别区内、外故障，整体保护动作时间不超过 6.5 ms，具有良好的速动性、可靠性和灵敏性。

2）基于 $\boldsymbol{T}_D$ 模量变换构建的复合模量等值网络有效实现了极间耦合的解耦；构建的选极策略不受过渡电阻和故障限流的影响，在故障选极方面具有显著的优势。

3）所提保护方案受时间窗长、分布电容、通信延时等因素影响较小，具有较强的耐过渡电阻和抗干扰能力。相较于其他保护方案，能在多种复杂工况下快速准确完成故障识别及故障选极，展现出较好的综合性能优势。

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

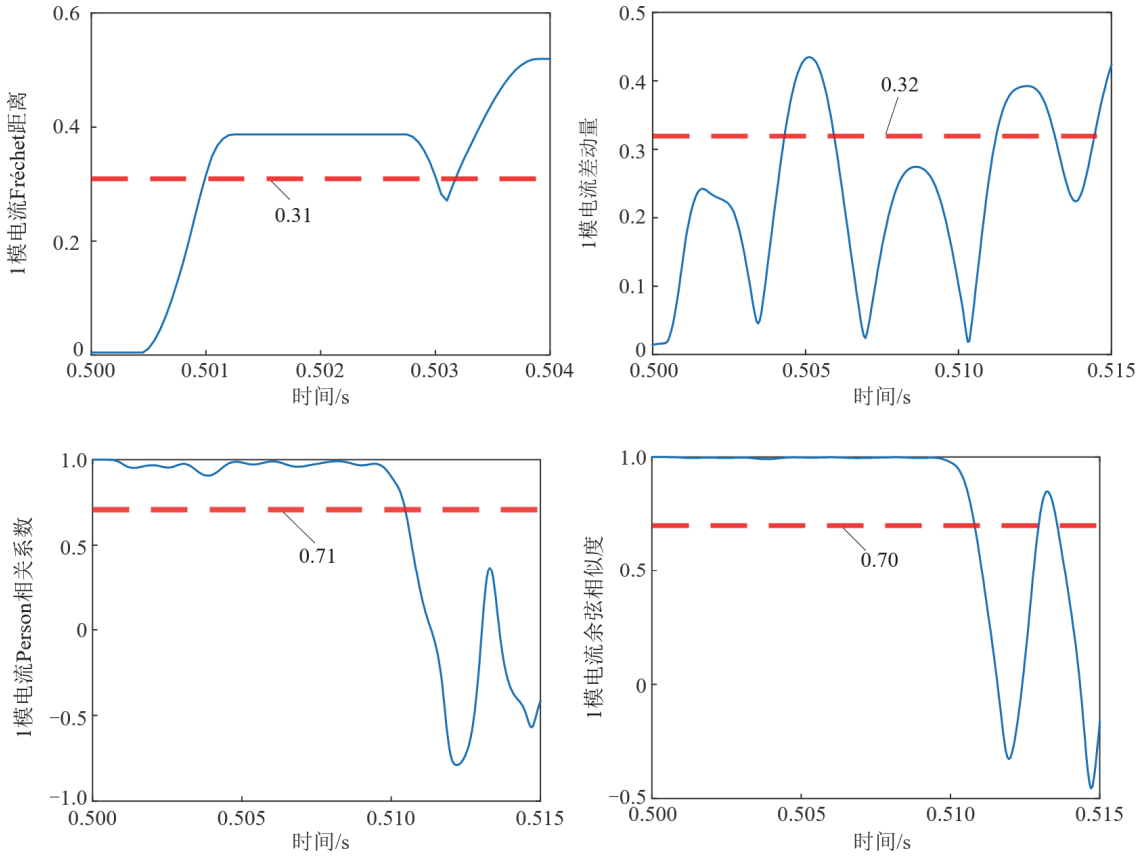


图 8 不同算法对比

Fig.8 Comparison of different algorithms

表 5 不同保护方法的比较

Table 5 Comparison of different protection methods

文献	考虑限流策略	考虑分布电容	考虑噪声干扰	耐受过渡电阻	故障选极
本文	是	是	是	大	是
文献[12]	否	是	是	小	是
文献[13]	否	是	否	小	是
文献[14]	否	是	否	较大	否

参考文献 References

[1] 徐 政. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2017.
XU Zheng. Voltage source converter based HVDC power transmission systems[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2017.

[2] 郭贤珊，厉 璇，王 庆，等. 特高压直流输电技术发展现状与思考[J]. 新型电力系统，2024，2(3)：237-250.
GUO Xianshan, LI Xuan, WANG Qing, et al. Status and thoughts on the development of ultra high voltage direct current(UHVDC) transmission technology[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(3): 237-250.

[3] 孙玉巍，王 童，付 超，等. 适用于海上风电分频输电的模块化多电平矩阵变换器故障穿越控制策略[J]. 高电压技术，2023，49(1)：19-30.
SUN Yuwei, WANG Tong, FU Chao, et al. Fault ride-through control strategy of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 19-30.

[4] 齐 磊，赵 巍，孙孝峰，等. 基于双重稳定约束的屋顶光伏逆变器分布式阻尼重构方案[J]. 高电压技术，2024，50(1)：394-405.
QI Lei, ZHAO Wei, SUN Xiaofeng, et al. Distributed damping reconstruction control scheme of rooftop photovoltaic inverters based on dual stability limitations[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 394-405.

[5] 熊浩清，何鹏飞，孙 冉，等. 双馈风电场无串补并网振荡场景及关键影响因素研究[J]. 高电压技术，2024，50(2)：660-672.
XIONG Haoqing, HE Pengfei, SUN Ran, et al. Oscillation scenarios of grid integrated wind farm with DFIGs without series compensation and effects of key factors[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 660-672.

[6] 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.

[7] 董新洲，汤兰西，施慎行，等. 柔性直流输电网线路保护配置方案[J]. 电网技术，2018，42(6)：1752-1759.
DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1752-1759.

[8] 戴志辉，牛宝仪，邱宏逸，等. 基于初始电流行波相位的多端混合直流线路单端保护方案[J]. 高电压技术，2024，50(2)：649-659.
DAI Zhihui, NIU Baoyi, QIU Hongyi, et al. Single-ended protection scheme for multi-terminal hybrid DC lines based on initial current traveling wave phase[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 649-659.

[9] 王洪彬，周念成，廖建权，等. 基于瞬时功率相平面的柔性直流电网后备保护[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1273-1283.
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, LIAO Jianquan, et al.

VSC-HVDC backup protection based on instantaneous power phase plane[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1273-1283.

[10] 宋国兵，蔡新雷，高淑萍，等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报，2011，31(22)：105-111.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Novel current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111.

[11] 董新洲，雷傲宇，汤兰西，等. 行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J]. 电力系统自动化，2018，42(19)：184-191.
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi, et al. Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 184-191.

[12] 薛士敏，孙亚冰，刘白冰，等. 基于 Marti 模型的柔性直流输电系统纵联行波差动保护[J]. 中国电机工程学报，2019，39(21)：6288-6299.
XUE Shimin, SUN Yabing, LIU Baibing, et al. Longitudinal travelling wave differential protection for flexible HVDC system based on Marti model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6288-6299.

[13] 何佳伟，李 斌，李 晔，等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报，2017，37(23)：6878-6887.
HE Jiawei, LI Bin, LI Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6878-6887.

[14] 曾 琦，曾维刚，廖建权，等. 免疫异常数据的金属回流双极直流配电线路状态估计保护方法[J]. 电力自动化设备，2025，45(1)：16-24.
ZENG Qi, ZENG Weigang, LIAO Jianquan, et al. State estimation protection method of metal return bipolar DC distribution line with immune abnormal data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(1): 16-24.

[15] CONG W, ZHANG H Z, KONG H, et al. Longitudinal protection method based on voltage wave comparison in AC/DC hybrid system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 1564-1572.

[16] 孔 飞，张保会，王艳婷. 基于行波波形相关性分析的直流输电线路纵联保护方案[J]. 电力系统自动化，2014，38(20)：108-114.
KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on waveform correlation analysis of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 108-114.

[17] 戴志辉，刘雪燕，刘自强，等. 基于电流故障分量的柔直配电线路纵联保护原理[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1684-1693.
DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Pilot protection scheme for flexible DC distribution grids based on superimposed current[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1684-1693.

[18] 戴志辉，刘雪燕，黄 敏，等. 基于相似度比较的环状柔直配电网线路单极接地故障保护[J]. 电力系统自动化，2019，43(23)：107-115.
DAI Zhihui, LIU Xueyan, HUANG Min, et al. Similarity comparison based single-pole grounding fault protection for lines in ring-shaped flexible DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 107-115.

[19] 王少雄，吕思辰，吕飞鹏，等. 基于 Fréchet 距离的集中式光伏场站送出线路纵联保护方法[J]. 电网技术，2025，49(4)：1648-1657.
WANG Shaoxiong, LÜ Sichen, LÜ Feipeng, et al. Fréchet distance based pilot protection method for centralized photovoltaic station transmission lines[J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1648-1657.

[20] 刘 剑，邰能灵，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.

[21] 倪斌业，向 往，周 猛，等. 半桥 MMC 型柔性直流电网自适应限流控制研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(17)：5609-5619.
NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on adaptive-current-limiting control of VSC-HVDC grid based on half-bridge MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5609-5619.

[22] WEI N Q, ZHOU N C, LIAO J Q, et al. A fault current limiter self-adapting activation strategy for flexible HVDC system based on fault severity assessment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(11): 11334-11345.

[23] 罗永捷，周丹莹，魏能峤，等. 基于源网限流贡献度配合的 MMC-HVDC 系统自适应故障限流策略[J]. 中国电机工程学报，2024，44(19)：7580-7592.
LUO Yongjie, ZHOU Danying, WEI Nengqiao, et al. A self-adapting fault current limiting strategy for flexible HVDC system based on source-network current limiting contribution coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7580-7592.

[24] CHEN K A, HE J H, LI M, et al. A similarity comparison based pilot protection scheme for VSC-HVDC grids considering fault current limiting strategy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(4): 1305-1315.

[25] LIAO J Q, ZHOU N C, WANG Q G. DC grid protection method based on phase planes of single-end common-and differential-mode components[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 299-310.

[26] GU Y J, LI W H, HE X N. Analysis and control of bipolar LVDC grid with DC symmetrical component method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 685-694.

[27] 周念成，董 宇，廖建权，等. 金属回流双极直流系统中的极模变换及其在故障分析中的应用[J]. 中国电机工程学报，2021，41(S1)：130-142.
ZHOU Niancheng, DONG Yu, LIAO Jianquan, et al. Pole-mode transformation of bipolar DC systems with metallic return and its application in fault analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 130-142.

[28] 高本锋，董沛毅，刘辛晔，等. 高压直流输电线路微分欠压保护特性与定值整定[J]. 电网技术，2015，39(8)：2303-2311.
GAO Benfeng, DONG Peiyi, LIU Xinye, et al. Research of HVDC transmission line differential under-voltage protection characteristics and value setting[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2303-2311.



廖建权
1994—，男，博士，副研究员，硕导
主要从事直流输/配电系统保护与控制、电力系统稳定分析与控制等方面的研究工作
E-mail: jquanliao@scu.edu.cn

LIAO Jianquan
Ph.D.
Associate professor



郑宗生(通信作者)
1989—，男，博士，副研究员，硕导
主要从事电力系统稳定与控制等方面的研究工作
E-mail: zongshengzheng@scu.edu.cn

ZHENG Zongsheng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2025-04-08 在线出版日期 2025-07-23 编辑 程子丰

附录 A

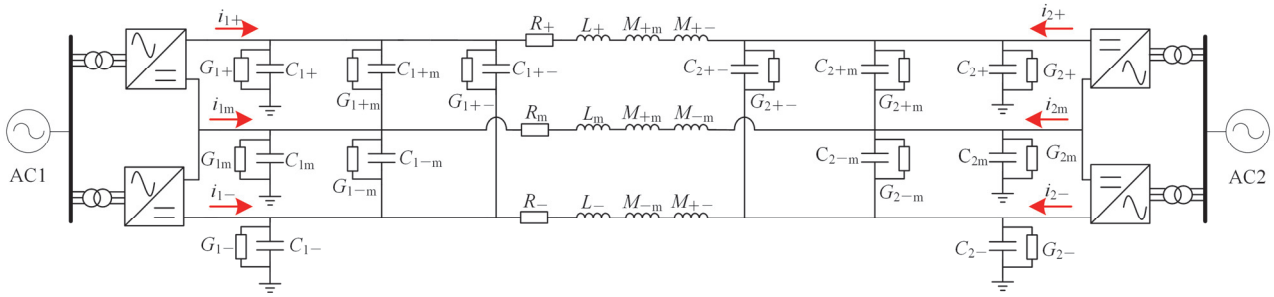


图 A1　金属回流双极直流系统模型

Fig.A1　Mode of metal return bipolar DC systems

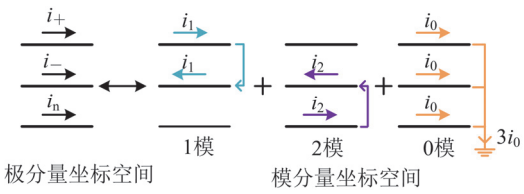


图 A2　T_D 变换下各模量电流流通路径

Fig.A2　Current flow path of each modulus under T_D transformation

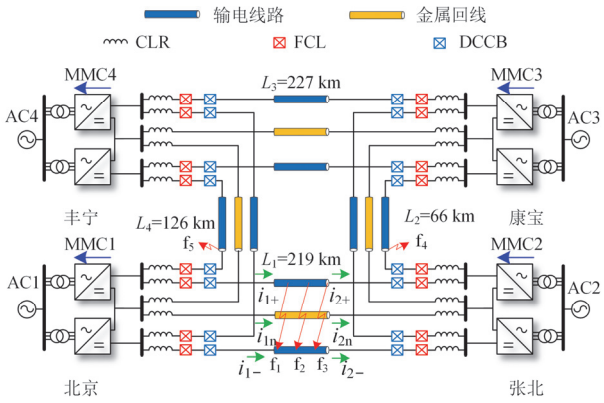


图 A3　四端环形柔性直流电网

Fig.A3　Four-terminal toroidal flexible DC grid

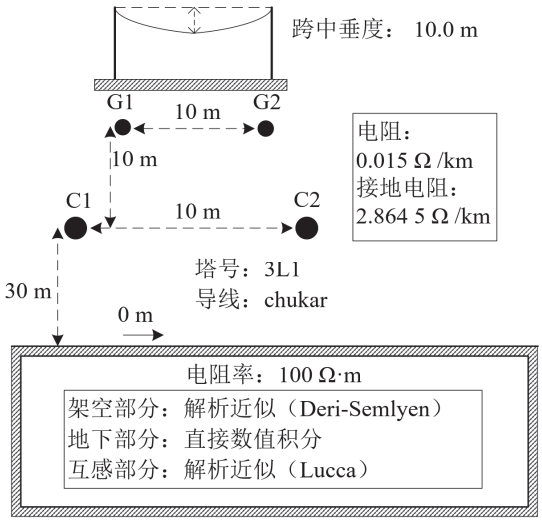


图 A4　直流输电线路参数

Fig.A4　Parameters of DC transmission line

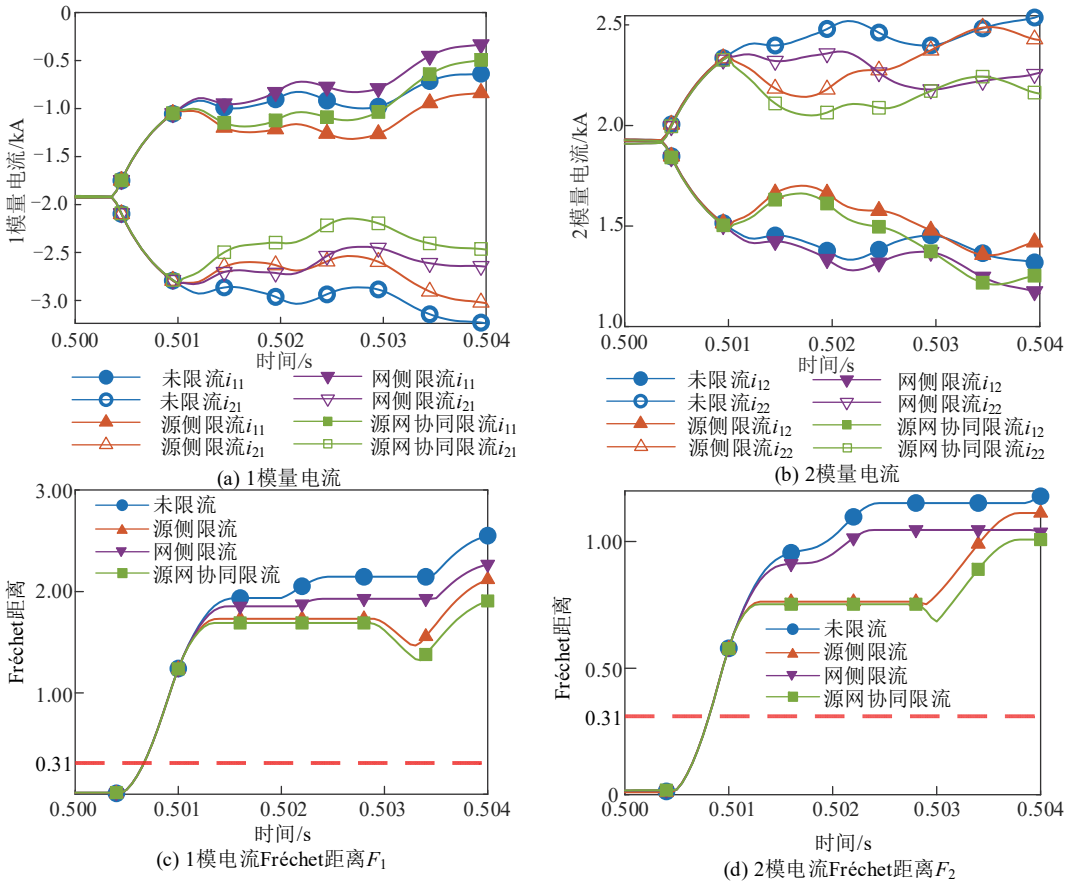


图 A5　不同限流策略的保护性能

Fig.A5　Protection performance of different current limiting strategies

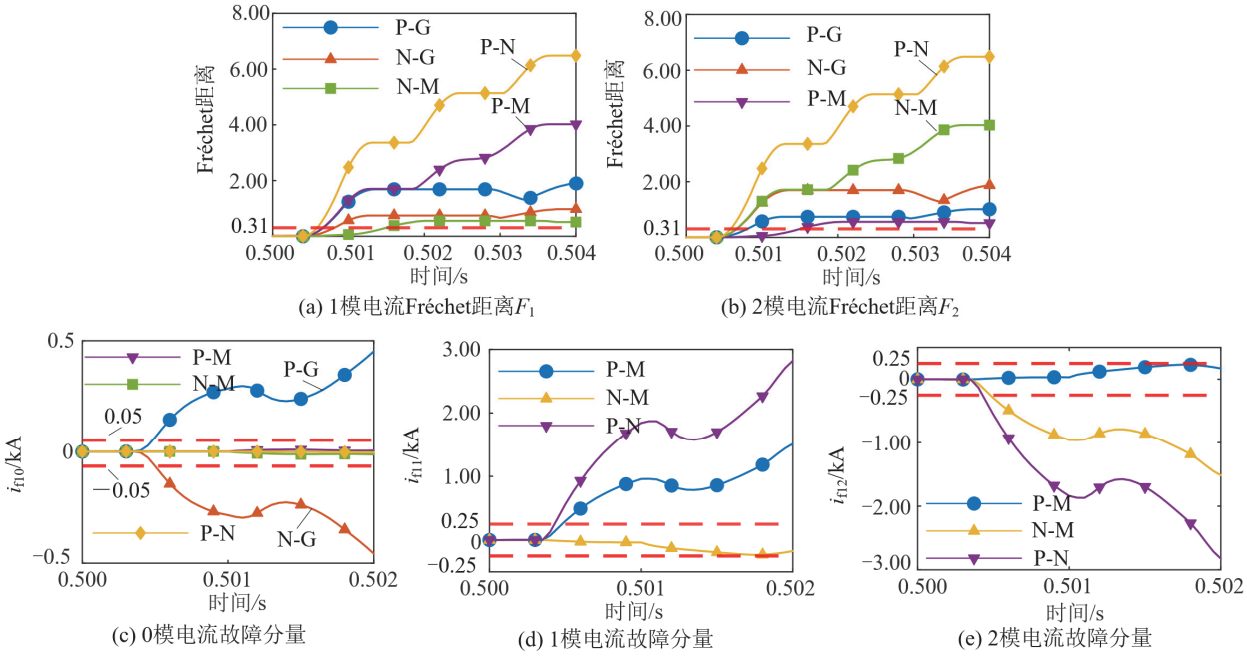
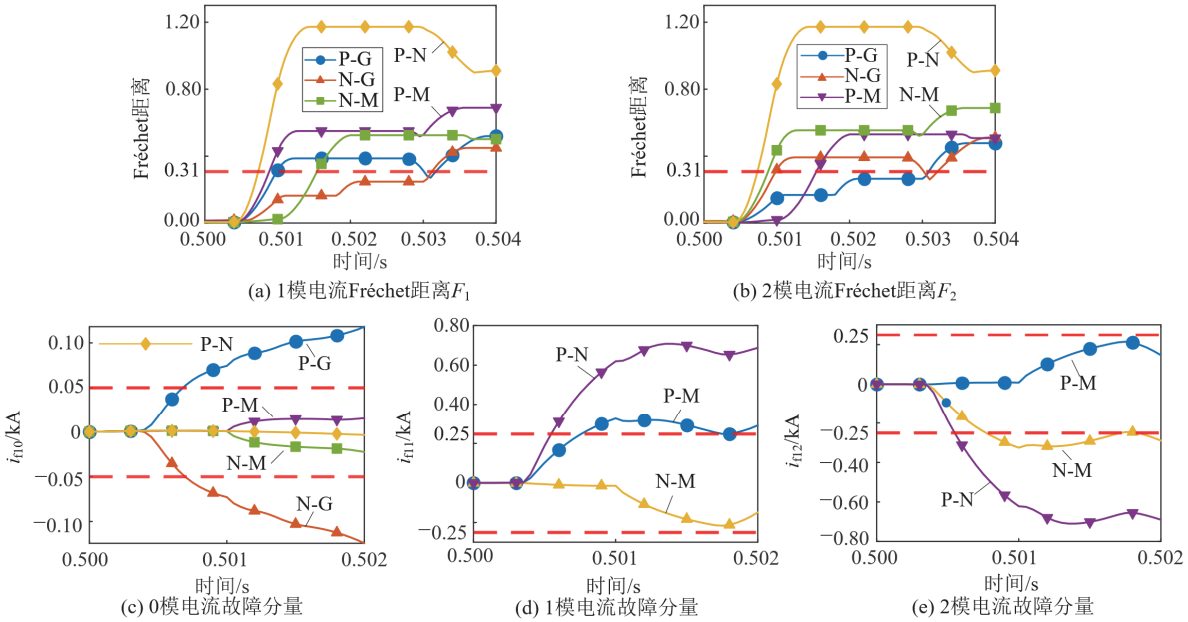


图 A6　f_2 位置故障仿真波形

Fig.A6　f_2 position fault simulation waveform

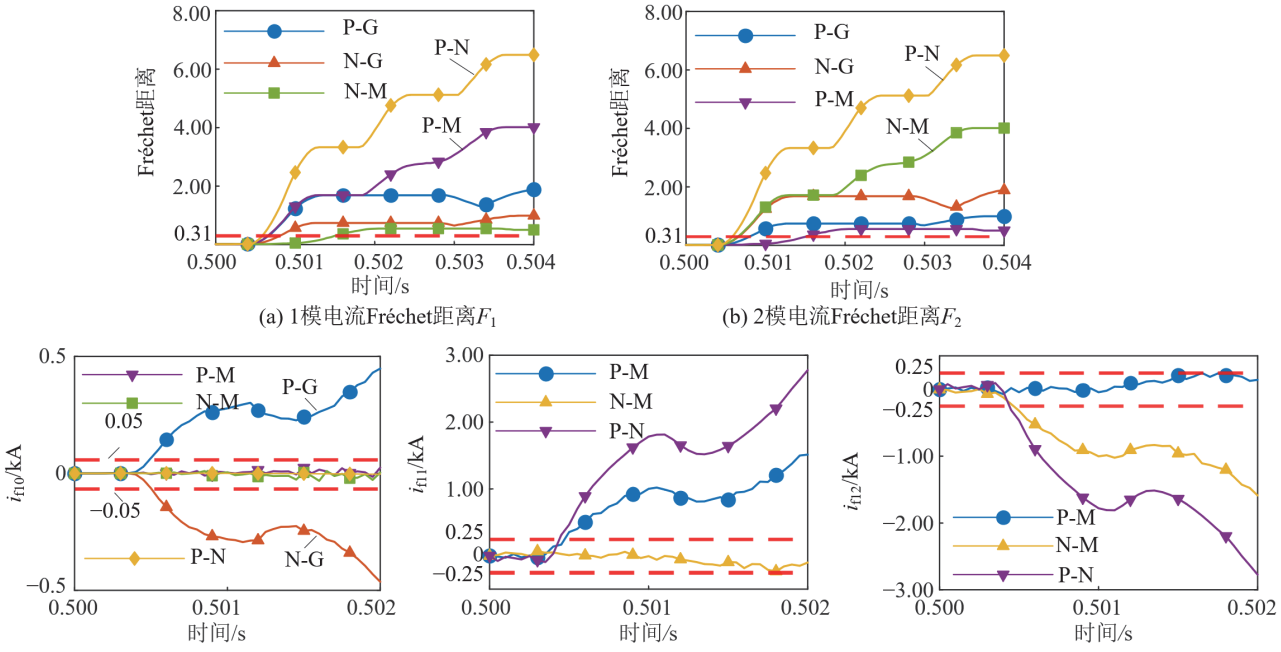


(a) 1模电流Fréchet距离F_1　(b) 2模电流Fréchet距离F_2

(c) 0模电流故障分量　(d) 1模电流故障分量　(e) 2模电流故障分量

图 A7　800 Ω过渡电阻仿真波形

Fig.A7　Simulated waveforms with 800 Ω transition resistance

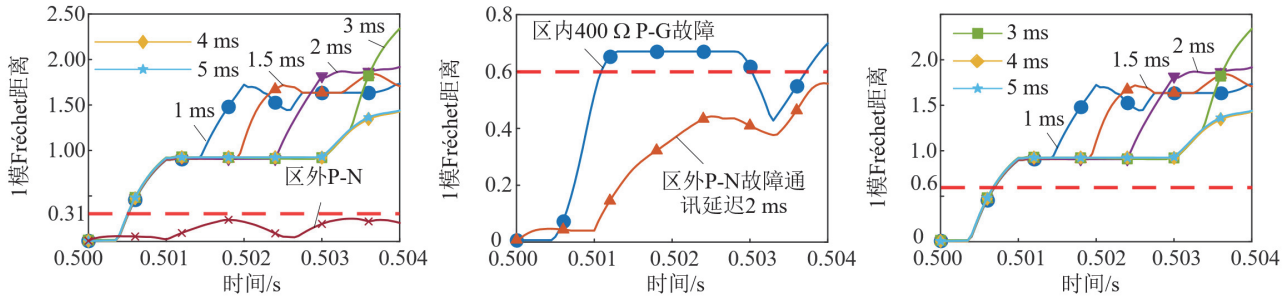


(a) 1模电流Fréchet距离F_1　(b) 2模电流Fréchet距离F_2

(c) 0模电流故障分量　(d) 1模电流故障分量　(e) 2模电流故障分量

图 A8　噪声干扰时仿真波形

Fig.A8　Simulated waveforms during noise interference



(a) 通信延时仿真结果　(b) 区外故障2 ms通信延迟仿真结果　(c) 区内f_2处P-G故障通信延迟仿真结果

图 A9　通信延时仿真结果

Fig.A9　Simulation result of communication delay

附录 B

不同故障类型下系统模量电流表达式推导如下。

将换流器等效为恒定电压源，通过 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 变换，对单端输电系统模分量网络应用戴维南定理，得到对故障点的复频域等值电路如图 B1 所示。其中：$U_{\mathrm{dc+}}$表示正极故障前故障点的额定电压；下标 1、2、0 分别代表 1 模、2 模、0 模分量；$Z_{1\Sigma}$、$Z_{2\Sigma}$、$Z_{0\Sigma}$分别为 1 模、2 模和 0 模等值阻抗，下标 f 表示故障发生处。

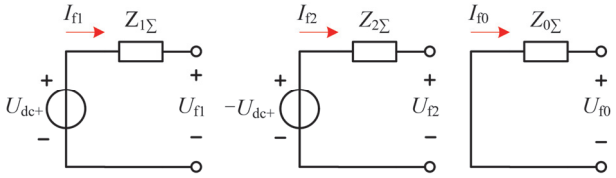


图 B1　各模分量网络对故障点的复频域等值电路

Fig.B1　Complex-frequency-domain equivalent circuits of each mode-component network to a fault point

由 KVL 得：

$$\begin{cases} U_{\mathrm{dc+}} - I_{\mathrm{f1}}Z_{1\Sigma} = U_{\mathrm{f1}} \\ -U_{\mathrm{dc+}} - I_{\mathrm{f2}}Z_{2\Sigma} = U_{\mathrm{f2}} \\ -I_{\mathrm{f0}}Z_{0\Sigma} = U_{\mathrm{f0}} \end{cases} \tag{B1}$$

当系统发生 P-G 故障时，其边界条件为：

$$\begin{cases} U_{\mathrm{f+}} = I_{\mathrm{f+}}R_{\mathrm{f}} \\ I_{\mathrm{fn}} = 0 \\ I_{\mathrm{f-}} = 0 \end{cases} \tag{B2}$$

在模分量坐标系下边界条件为：

$$\begin{cases} U_{\mathrm{f1}} + U_{\mathrm{f0}} = (I_{\mathrm{f1}} + I_{\mathrm{f0}})R_{\mathrm{f}} \\ -I_{\mathrm{f1}} - I_{\mathrm{f2}} + I_{\mathrm{f0}} = 0 \\ I_{\mathrm{f2}} + I_{\mathrm{f0}} = 0 \end{cases} \tag{B3}$$

联立式(B1)、(B2)、(B3)可得：

$$\begin{cases} U_{\mathrm{f1}}(s) = \dfrac{U_{\mathrm{dc+}}(Z_{0\Sigma} + 3R_{\mathrm{f}})}{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_{\mathrm{f}}} \\ U_{\mathrm{f2}}(s) = -\dfrac{2U_{\mathrm{dc+}}(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma})}{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_{\mathrm{f}}} - U_{\mathrm{f1}} \\ U_{\mathrm{f0}}(s) = -\dfrac{U_{\mathrm{dc+}}Z_{0\Sigma}}{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_{\mathrm{f}}} \end{cases} \tag{B4}$$

$$\begin{cases} I_{\mathrm{f1}} = \dfrac{2U_{\mathrm{dc+}}}{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_{\mathrm{f}}} \\ I_{\mathrm{f2}} = -\dfrac{U_{\mathrm{dc+}}}{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_{\mathrm{f}}} \\ I_{\mathrm{f0}} = \dfrac{U_{\mathrm{dc+}}}{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_{\mathrm{f}}} \end{cases} \tag{B5}$$

忽略对地电容和电导，由极模变换得到阻抗参数(由于线路参数对称，故用正极参数表示)：

$$\begin{cases} Z_{1\Sigma} = s(L_{+} - M_{+\mathrm{m}}) + R_{+} \\ Z_{2\Sigma} = s(L_{+} - M_{+\mathrm{m}}) + R_{+} \\ Z_{0\Sigma} = s(L_{+} + 2M_{+\mathrm{m}}) + R_{+} \end{cases} \tag{B6}$$

联立上式，经 Laplace 反变换得：

$$\begin{cases} i_{\mathrm{f1}}(t) = \dfrac{2u_{\mathrm{dc+}}}{3(R_{+} + R_{\mathrm{f}})}\left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{L_{+}}t}\right) \\ i_{\mathrm{f2}}(t) = -\dfrac{u_{\mathrm{dc+}}}{3(R_{+} + R_{\mathrm{f}})}\left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{L_{+}}t}\right) \\ i_{\mathrm{f0}}(t) = \dfrac{u_{\mathrm{dc+}}}{3(R_{+} + R_{\mathrm{f}})}\left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{R_{+}+R_{\mathrm{f}}}{L_{+}}t}\right) \end{cases} \tag{B7}$$

与此类似，可以采用相同的方法推导出不同故障类型下系统模量电流故障分量表达式，本文不再赘述。相关结果汇总于正文第 2 章。

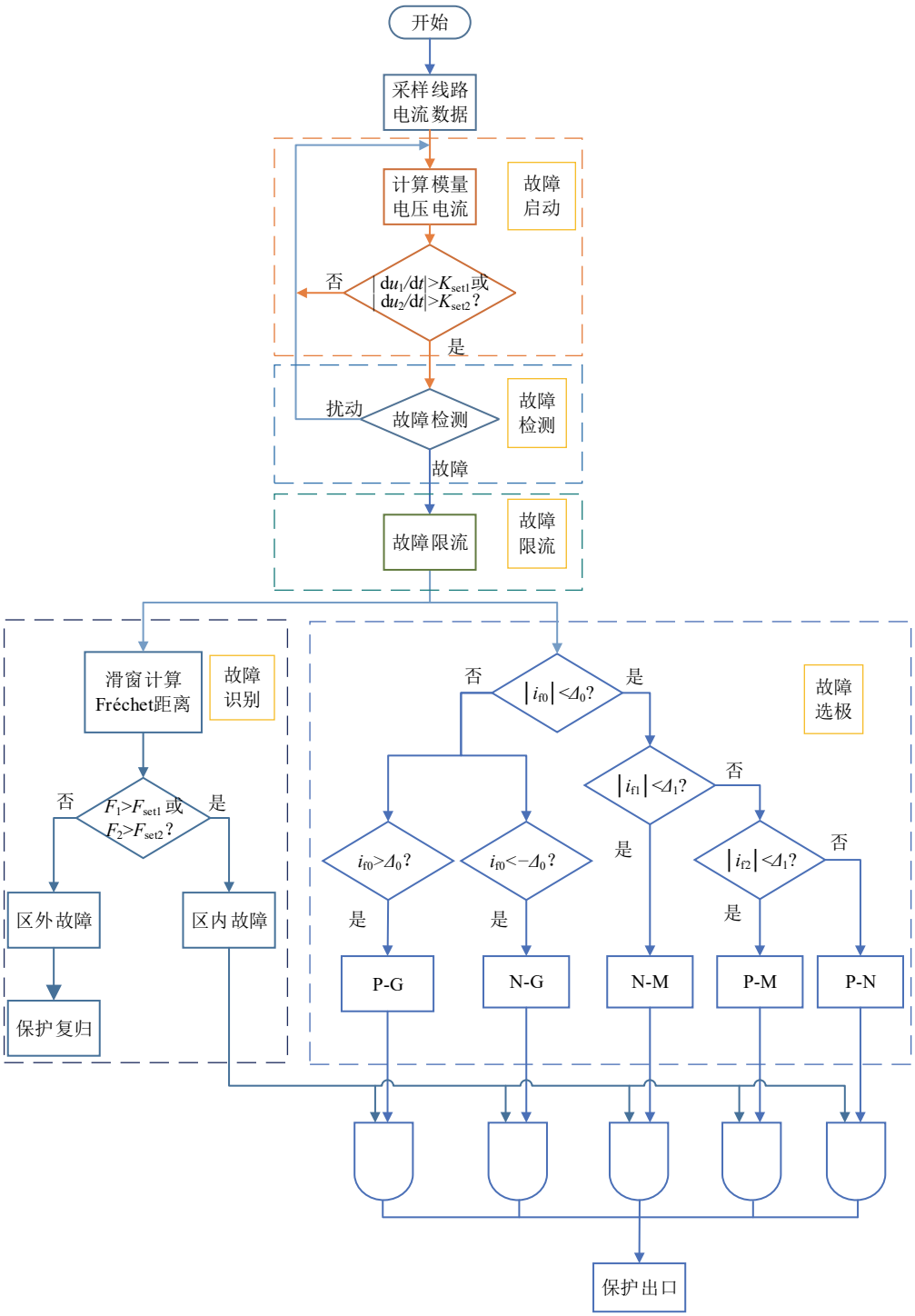


图 B2　保护流程图

Fig.B2　Protection flowchart