

基于卷积功率能量比的全直流风电系统汇集线路故障选线方法

李攀龙¹, 侯俊杰¹, 樊艳芳¹, 宋国兵^{1,2}, 吴小芳³, 刘梦瑶¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 711049;

3. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 全直流风电系统能够有效地解决交流电缆对地电容导致的无功功率及电压波动等问题, 逐渐成为研究热点之一。针对全直流风电系统汇集支路多, 相邻线路间的故障特征差异小和阈值整定等问题, 提出一种基于卷积功率能量比的全直流风电系统汇集线路故障选线方法。首先, 分析了故障线路与非故障线路的频域暂态功率幅值特征, 发现在特征频带下, 故障线路的暂态功率大于非故障线路。其次, 构造了一种时域故障特征量——卷积功率, 对频域暂态功率特征进行有效提取。同时, 为了提高耐受过渡电阻能力, 提出了各汇集线路与汇流母线出口处时域卷积功率能量比, 分析发现在特征频带内时域卷积功率能量比可以有效识别故障线路。结合故障启动判据、选极判据构成故障选线识别方案。最后, PSCAD/EMTDC 仿真结果表明: 所提选线方法可以正确识别全直流风电系统汇集线路中的故障线路, 在 80 Ω 过渡电阻和 20 dB 的噪声干扰下仍能有效识别故障, 且无需仿真整定。

关键词: 全直流风电系统; 故障选线; 特征频带; 卷积功率能量比

Fault line selection scheme for collection lines in the all-DC wind power systems based on convolutional power energy ratio

LI Panlong¹, HOU Junjie¹, FAN Yanfang¹, SONG Guobing^{1,2}, WU Xiaofang³, LIU Mengyao¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 711049, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: All-DC wind power systems can effectively address issues such as reactive power and voltage fluctuations caused by AC cable capacitance, making them a growing focus of research. To tackle challenges such as the large number of collection branches, small differences in fault characteristics between adjacent lines, and difficulties in threshold setting, this paper proposes a fault line selection method based on the convolutional power energy ratio for all-DC wind power systems. First, the characteristics of transient power amplitude in the frequency domain for faulted and non-faulted lines are analyzed, revealing that within a characteristic frequency band, the transient power of faulted lines is greater than that of the non-faulted lines. Second, convolution power, as a time-domain fault characteristic quantity, is constructed to effectively extract the frequency domain power characteristics. Additionally, to improve the ability to withstand transition resistance, a time-domain convolutional power energy ratio is proposed between each collection line and the outlet of the collection bus. Analysis shows that the time-domain convolutional power energy ratio can effectively identify the faulty line within the characteristic frequency band. Combined with fault initiation and fault pole selection criteria, a complete fault line selection scheme is developed. Finally, PSCAD/EMTDC simulation results show that the proposed method can correctly identify faulty lines in all-DC wind power systems under fault resistance of 80 Ω and noise interference of 20 dB, without the need for simulation-based threshold tuning.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1507000).

Key words: all-DC wind power system; fault line selection; characteristic frequency band; convolutional power energy ratio

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1507000); 国家自然科学基金项目资助(52442705); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2022D01C662); “天池英才”引进计划项目资助

0 引言

随着可再生能源在电力系统中的比重持续上升, 以及电力电子技术的快速发展, 风力发电作为清洁能源的重要组成部分, 其输送方式正经历着深刻变革。传统交流输电系统在远距离电力传输中面临无功功率补偿和电压稳定性等挑战, 这一技术瓶颈促使直流输电技术受到广泛关注^[1-2]。特别是在大规模风电并网场景下, 采用中压直流汇集系统可显著降低建设成本, 这种方案不仅省去了传统工频变压器, 还能有效减轻电缆系统的重量。在电力外送环节, 直流输电技术凭借其独特优势, 已成为大规模、远距离、大容量风电输送的首选方案^[3-4]。基于此, 采用直流汇集与直流送出相结合的大型风电场拓扑结构, 已成为未来风电开发最具发展潜力的技术路线^[5-6]。

全直流风电系统作为新型的研究领域, 缺乏实际工程案例和充足的数据支持, 相关研究数据仍需进一步积累, 其中线路故障检测技术是亟待突破的关键技术难题之一^[7]。因风电自身出力的间歇性和随机波动性造成故障特征不明确。全直流风电系统汇集区域有多条汇集线路, 当直流汇集线路发生故障时, 多个换流站向故障点放电, 故障电流激增, 相邻线路间的故障暂态特征微弱, 给故障线路的识别带来困难^[8]。目前关于全直流风电系统的研究主要集中于直流变压器及系统拓扑结构、暂稳态运行控制等方面, 鲜有面向全直流风电系统汇集线路的故障分析与保护方法研究。由于输电线路运行环境复杂多变, 故障发生概率较高, 线路故障时产生的急剧电流变化会对电力电子设备及系统运行稳定性造成严重影响。基于此, 本研究将重点探讨全直流风电系统汇集线路的故障识别方法。

现有的选线方法分为探测式选线方法和被动式选线方法。探测式选线方法利用电力电子器件向系统中注入信号。文献[9]利用电压源型换流器并联电容放电脉冲实现故障选线。文献[10-11]利用附加控制策略注入正弦信号, 从而计算零模阻抗或零模电流的幅值和相位, 进而识别故障线路, 不需要额外注入装置。但该方法是在换流器闭锁后才进行的, 保护动作时间较长。

被动式选线方法根据电气量的用法又分为行波选线方法、基于边界的选线方法和其他暂态量选线方法。

1) 基于行波选线方法。文献[12]利用故障线路与非故障线路行波初始波头的反极性关系进行选线; 文献[13]基于行波全景波形的时间、频率、幅值和极性等多维度特征信息实现故障线路识别。但

全直流风电系统汇集线路多且线路短, 存在折反射、波头识别困难和采样率高等问题。2) 基于边界的选线方法。文献[14]通过限流电抗器上的电压变化率和极性确定故障区间。文献[15]提出了利用线路两端的平波电抗器作为电流的高频边界, 检测高频电气量如功率或能量的差异, 以此识别区内、外故障。文献[16-17]利用小波包或者改进变分模态分解法提取电气量中的突变量, 以此识别故障线路。该方案抗干扰性能强, 高阻情况下仍然能够识别故障线路, 但是需要选择安装限流电抗器。文献[18]利用边界谐振的特点, 提取谐振点处的电流来识别故障线路, 单一谐振频率点提取不准确, 且阈值通过仿真整定。此类方法需要线路两端具有电抗器等边界元件, 而全直流风电系统汇集区域中限流电抗器只存在一侧, 需展开进一步研究。其他暂态量选线方法。文献[19]通过对比正负极电流经小波降噪后的残差绝对值之和的比值, 结合预设阈值判断, 实现单极接地故障线路的精准识别。文献[20]根据故障线路两端零模电流正相关, 非故障线路负相关这一特性识别故障线路。该方法抗干扰能力强, 但只研究了单极接地故障下的故障特征^[19-20]。文献[21]针对发生单极故障和极间故障的暂态电流变化率来识别故障线路。虽然判据简单, 无需通信, 但是其抗干扰能力弱且阈值通过仿真整定。

综上所述, 一方面探测式选线方法虽然故障特征明确, 但是保护动作时间长; 另一方面基于行波和边界的故障选线方法由于折反射过程极快以及限流电抗器特性在全直流风电系统不适用, 其余的保护方法受通信和阈值整定影响。

因此, 现有的选线方法存在依赖于边界、阈值通过仿真整定等问题, 需要结合全直流风电系统汇集线路的故障特性做进一步研究。

本文首先分析全直流风电系统的拓扑结构, 对不同故障区域下的频域暂态功率特性进行理论推导, 得出各条汇集线路暂态功率幅值大小; 其次, 为了有效提取频域信息, 构造了一种时域卷积功率; 在此基础上, 为了提高耐受过渡电阻能力, 提出一种基于卷积功率能量比的故障选线方法; 最后, 基于 PSCAD/EMTDC 的仿真结果验证了该保护方案的保护性能。

1 全直流风电系统汇集线路暂态功率特征分析

1.1 系统拓扑结构

全直流风电系统分为直流汇集和直流送出两个

部分, 图 1 所示红色虚线框内为直流汇集区域, 绿色虚线框内为高压直流送出区域, 蓝色实心圆圈为直流线路的测量点。本文以图 1 所示的全直流风电系统汇集区域作为研究对象, 在汇集区域中, 每条汇集线路通过直流电缆连接到 25 MW 的风电机组, 通过中压 DC/DC 升压后经汇集线路送至±30 kV 汇流母线, 然后经面对面型模块化多电平换流器(face-to-face modular multilevel converter, FTF-MMC)升压±500 kV 经过高压直流传输送至并网。考虑到直流线路发生故障后, 全控型电力电子器件耐流能力较弱, 因此在中压直流变压器(DC transformer, DCT)出口处加装限流电抗器以限制故障电流上升速度。

其中, DCT 采用隔离升压全桥变换结构, 这样的结构, 一方面, 铁芯双向极化, 利用率更好, 另一方面, 电路通过高频变压器实现双向隔离, 能够实现较大的升压比, 适应全直流风电并网系统的升压需求^[22-23]。面对面型模块化多电平换流器采用半桥子模块^[24]。

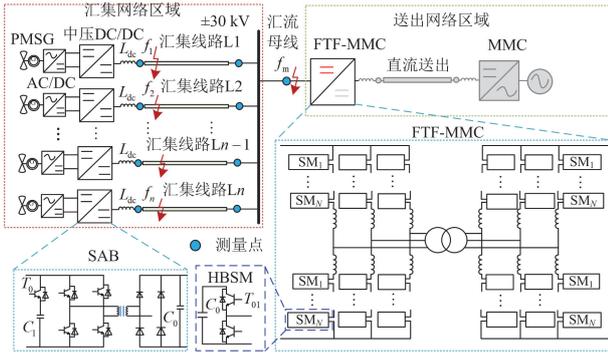


图 1 全直流风电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of the all-DC wind power systems

1.2 区内故障的暂态功率特征

当线路发生故障后, 系统响应可分为闭锁前的电容放电阶段和闭锁后的电感续流阶段^[21,23]。从简化故障分析的角度出发, 重点关注闭锁前的电容放电过程。由于该阶段会产生显著的故障电流, 可能对电力电子设备造成损害, 因此将风电机组侧换流器简化为直流电容模型。为确保系统安全, 保护应在电容放电阶段完成之前动作^[25]。因此有必要对该阶段的故障特性进行分析, 并以此为依据提出快速可靠的故障识别方法。

由于汇集线路较短, 因此可采用π模型等效, 直流变压器的电容远大于线路分布电容, 故可忽略线路分布电容的影响。以汇集线路 L1 上发生 f_1 故障为例, 利用叠加原理获得故障附加电路图, 由于

故障附加电压源在时域表现为正向阶跃信号, 频域表现为各频分量为正值, 又受到 H 桥二极管的反向阻断作用, 故障分量无法进入 DCT 内部, 故无须考虑风电机组侧对故障分量的影响^[18, 23]。汇集线路 L1 故障附加等效网络如图 2 所示。

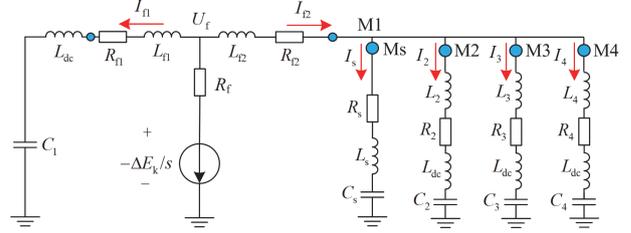


图 2 汇集线路 L1 故障附加等效网络

Fig. 2 Fault additional equivalent network of collecting branch L1

图 2 中: $C_i (i=1,2,3,4)$ 、 L_{dc} 分别为中压 DC/DC 出口等效电容和限流电抗器; R_{f1} 、 R_{f2} 、 L_{f1} 、 L_{f2} 分别为故障线路的电阻和电感; R_i 、 $L_i (i=1,2,3,4)$ 分别为非故障线路电阻和电感; I_{f2} 、 I_{f1} 为故障线路两侧电流; $I_i (i=1,2,3,4)$ 为汇集线路母线侧保护安装处测得的暂态电流; $U_{Mi} (i=1,2,3,4)$ 为汇集线路母线侧保护安装处测得的暂态电压; U_{Ms} 为汇流母线出口处的暂态电压; I_s 为汇流母线出口处的暂态电流; ΔE_k 为故障附加电压源; U_f 为故障点电压。

为了在下文的分析中简化故障特征量的表达式, 令

$$\begin{cases} Z_i(s) = R_i + s(L_i + L_{dc}) + 1/(sC_i) \\ Z_s(s) = R_s + sL_s + 1/(sC_s) \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_s 、 L_s 、 C_s 分别为 FTF-MMC 换流站的等效电阻、等效电感和等效电容; $R_s = 2(R_{am} + R_{on})/3$; $L_s = 2L_{am}/3$; $C_s = 6C_{sm}/N$, R_{am} 和 L_{am} 分别为桥臂电阻和电抗; R_{on} 为 FTF-MMC 换流站所有投入的通态电阻; C_{sm} 为子模块电容; $Z_i (i=1,2,3,4)$ 为线路阻抗; Z_s 为 FTF-MMC 等效阻抗。

复频域 s 与频率 f 存在的关系如式(2)^[26-27]所示。

$$s = j\omega = j2\pi f \quad (2)$$

如图 2 所示, 根据基尔霍夫电流和电压定理, 故障线的故障电流等于其余线路电流之和, 各汇集线路在汇流母线测点处的电压相等, 每条汇集线路阻抗近似相等。根据各汇集线路的电压电流关系, 计算各汇集线路母线测点的暂态功率。以汇集线路 L1 靠近母线侧测点 M1 为例, 其暂态功率 $P_{M1}(s)$ 为

$$P_{M1}(s) = I_{f2}(s)U_{M1}(s) = \frac{\frac{Z_i(s) // Z_s(s)}{3}}{\left((sL_{f2} + R_{f2}) + \frac{Z_i(s) // Z_s(s)}{3} \right)^2} U_f^2(s) \stackrel{s=j\omega}{=} \frac{\frac{Z_i(j\omega) // Z_s(j\omega)}{3}}{\left((j\omega L_{f2} + R_{f2}) + \frac{Z_i(j\omega) // Z_s(j\omega)}{3} \right)^2} U_f^2(j\omega) \quad (3)$$

式中, $P_{M1}(s)$ 为故障线路的暂态功率。

汇流母线出口处暂态功率 $P_{Ms}(s)$ 为

$$P_{Ms}(s) = I_s(s)U_{Ms}(s) = \frac{\left(\frac{Z_i(s) // Z_s(s)}{3} \right) \cdot \frac{Z_i(s)/3}{Z_i(s)/3 + Z_s(s)}}{\left((sL_{f2} + R_{f2}) + \frac{Z_i(s) // Z_s(s)}{3} \right)^2} U_f^2(s) \stackrel{s=j\omega}{=} \frac{\left(\frac{Z_i(j\omega) // Z_s(j\omega)}{3} \right) \cdot \frac{Z_i(j\omega)/3}{Z_i(j\omega)/3 + Z_s(j\omega)}}{\left((j\omega L_{f2} + R_{f2}) + \frac{Z_i(j\omega) // Z_s(j\omega)}{3} \right)^2} U_f^2(j\omega) \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知, 故障线路的暂态功率大小受到过渡电阻的影响。进一步对 $P_{M1}(s)$ 和 $P_{Ms}(s)$ 求比值, 可得

$$G_f(s) = \frac{|P_{M1}(s)|}{|P_{Ms}(s)|} = \frac{3Z_s(j\omega) + Z_i(j\omega)}{Z_i(j\omega)} = 1 + 3 \times \frac{Z_s(j\omega)}{Z_i(j\omega)} \quad (5)$$

类似地可以得到非故障线路 L_i 的暂态功率 $P_{Mi}(s) (i=2,3,4)$ 。同时, 为了提高耐过渡电阻能力, 对暂态功率 $P_{Mi}(s)$ 和 $P_{Ms}(s)$ 求比值, 可得式(6)。

$$G_i(s) = \frac{|P_{Mi}(s)|}{|P_{Ms}(s)|} = \frac{Z_s(j\omega)}{Z_i(j\omega)} \quad (6)$$

图 3 所示为汇集线路 L1 故障时各汇集线路的幅频特性曲线。与非故障线路和汇流母线出口处相

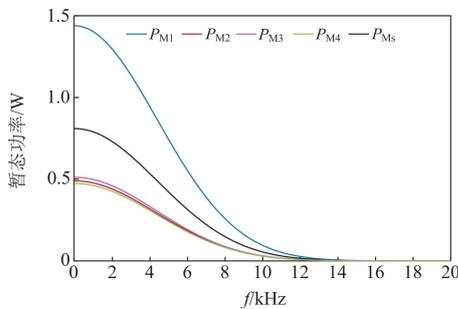


图 3 区内故障幅频特性曲线

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristic diagram of internal fault

比, 故障线路 L1 的暂态功率幅值是最大的。

1.3 区外故障暂态功率特征

以汇集线路 L2 上 f_2 处故障为例, 其故障附加等值网络如图 4 所示。

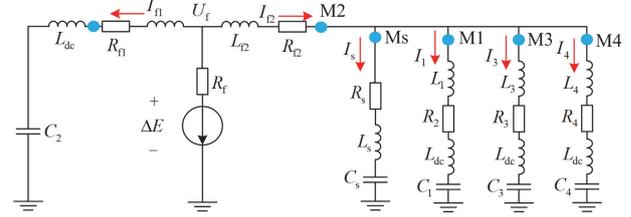


图 4 汇集线路 2 故障附加等值网络

Fig. 4 Fault additional equivalent network of collecting branch L2

由图 4 可分别得到各汇集线路的电压电流关系, 非故障线路的暂态功率 $P_{Mi}(s)$ 为:

$$P_{Mi}(s) = I_i(s)U_{Mi}(s) = \frac{\left(\frac{Z_i(s) // Z_s(s)}{3} \right) \cdot \frac{Z_s(s)}{Z_i(s) + 3Z_s(s)}}{\left((sL_{f2} + R_{f2}) + \frac{Z_i(s) // Z_s(s)}{3} \right)^2} U_f^2(s) \stackrel{s=j\omega}{=} \frac{\left(\frac{Z_i(j\omega) // Z_s(j\omega)}{3} \right) \cdot \frac{Z_s(j\omega)}{Z_i(j\omega) + 3Z_s(j\omega)}}{\left((j\omega L_{f2} + R_{f2}) + \frac{Z_i(j\omega) // Z_s(j\omega)}{3} \right)^2} U_f^2(j\omega) \quad (7)$$

式中, $P_{Mi} (i=1,3,4)$ 为非故障线路的暂态功率。

同理, 汇流母线出口处暂态功率 $P_{Ms}(s)$ 为

$$P_{Ms}(s) = I_s(s)U_{Ms}(s) = \frac{\left(\frac{Z_i(s) // Z_s(s)}{3} \right) \cdot \frac{Z_i(s)}{Z_i(s) + 3Z_s(s)}}{\left((sL_{f2} + R_{f2}) + \frac{Z_i(s) // Z_s(s)}{3} \right)^2} U_f^2(s) \stackrel{s=j\omega}{=} \frac{\left(\frac{Z_i(j\omega) // Z_s(j\omega)}{3} \right) \cdot \frac{Z_i(j\omega)}{Z_i(j\omega) + 3Z_s(j\omega)}}{\left((j\omega L_{f2} + R_{f2}) + \frac{Z_i(j\omega) // Z_s(j\omega)}{3} \right)^2} U_f^2(j\omega) \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知, 非故障线路的暂态功率幅值受过渡电阻的影响。进一步对 $P_{Mi}(s)$ 和 $P_{Ms}(s)$ 求比值, 可得:

$$G_i(s) = \frac{|P_{Mi}(s)|}{|P_{Ms}(s)|} = \frac{Z_s(j\omega)}{Z_i(j\omega)} \quad (9)$$

类似地, 可以得到故障线路 L2 的暂态功率为

$P_{M2}(s)$ 。同时,为了提高抗过渡电阻能力,对暂态功率 $P_{M2}(s)$ 和 $P_{Ms}(s)$ 求比值,可得式(4)。

$$G_f = \frac{|P_{M2}(s)|}{|P_{Ms}(s)|} = \frac{Z_i(j\omega) + 3Z_s(j\omega)}{Z_i(j\omega)} = 1 + \frac{3Z_s(j\omega)}{Z_i(j\omega)} \quad (10)$$

图 5 所示为当汇集线路 L2 故障时各汇集线路的幅频特性曲线,与非故障线路和母线处相比,故障线路 L2 的暂态功率幅值是最大的。

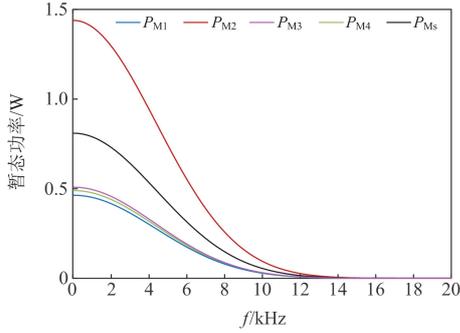


图 5 区外故障幅频特性曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic diagram of external fault

综上所述,当某一汇集线路发生故障时,故障线路的暂态功率大于非故障线路的暂态功率,以此区分故障线路与非故障线路。由式(5)、式(6)、式(9)和式(10)可知,利用暂态功率比来提高保护方法的抗干扰能力,即当某条汇集线路发生故障时,故障线路与汇流母线出口处的暂态功率比 G_f 大于非故障线路与汇流母线出口处的暂态功率比 G_i 。

2 故障暂态特征量提取

2.1 特征频带的选取

由上述分析可知,故障线路和汇流母线出口处暂态功率的比 G_f 、非故障线路和汇流母线出口处暂态功率的比 G_i 之间存在良好的区分度,但为了放大故障特征差异、减少数据量的传输,将对暂态功率比中存在的通项 $B(j\omega)$ 作进一步分析。

$$B(j\omega) = \frac{Z_s(j\omega)}{Z_i(j\omega)} \quad (11)$$

从式(1)和式(11)中可以看出,分子 Z_s 与分母 Z_i 存在一定的关系,如图 6 所示, Z_i 和 Z_s 的幅频特性曲线的交点为 f_0 , 当且仅当 $f = f_0$ 时,使得 $Z_s = Z_i$ 。

$$f_0 = \frac{R_i - R_s \pm \sqrt{(R_s - R_i)^2 - 4(L_s - L_i - L_{dc})(1/C_s - 1/C_i)}}{2\pi(L_s - L_i - L_{dc})} \quad (12)$$

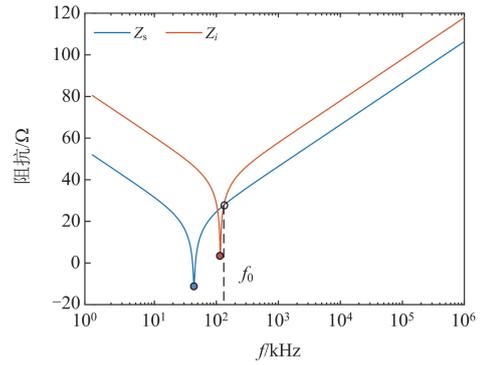


图 6 Z_s 与 Z_i 的幅频特性曲线

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic curves of Z_s and Z_i

如图 6 所示,FTF-MMC 自身谐振频率在 50 Hz 左右,线路阻抗的谐振点在 110 Hz 左右,选取的频率应避免换流器内部谐振^[23],造成环流过大损坏装置,同时线路阻抗和换流器阻抗幅频特性曲线的交点 f_0 在谐振点之后,因此选取的频带下限为 f_0 ,式(10)代入直流电缆模型参数和换流器参数计算得到 f_0 ,当 f 大于 $f > f_0$ 时, $Z_i > Z_s$,则故障线路与汇流母线出口处暂态功率比 $G_f > 1$;非故障线路与汇流母线出口处的暂态功率比 $G_i < 1$ 。由图 3 和图 5 可知,20 000 Hz 以上的频带暂态功率分量迅速衰减至 0,频带上限为 20 000 Hz。

$$f_0 \leq f \leq 20\,000 \text{ Hz} \quad (13)$$

在该频带中,能够使故障线路与非故障线路的暂态功率比差异特征明显,综合上述考虑,式(13)是本文选取特征频带。

2.2 卷积功率的构造

为了提取频域暂态功率特征,在时域中引入卷积功率的概念。频域下电压、电流的乘积,即为时域下电压、电流的卷积,通过卷积得到的功率称为卷积功率^[27]。卷积功率 $p(t)$ 的计算公式为

$$p(t) = u(t) * i(t) = \int_{t_0}^{t_0+T_n} u(\tau) i(t-\tau) d\tau \quad (14)$$

$$L[u(t) * i(t)] = U(s)I(s) \quad (15)$$

式中: $u(t)$ 、 $i(t)$ 分别为时域下的电压、电流; $U(s)$ 、 $I(s)$ 分别为频域下的电压、电流; $L[\cdot]$ 为拉普拉斯变换; t_0 和 T_n 分别为时间窗的起始时刻和长度; $u(\tau)$ 为在时间点 τ 的电压; $i(t-\tau)$ 为在时间点 $t-\tau$ 的电流;卷积功率的单位为伏安秒(V·A·s),即焦耳(J)。

实际工程中的信号采样不是连续信号而是离散信号,所以将式(14)进行离散化,有:

$$p(x) = \sum_{m=1}^N u(a) i(x-a) \quad 2 \leq x \leq 2N \quad (16)$$

式中: N 为数据窗内的采样点个数; $u(a)$ 和 $i(x-a)$

分别表示当前时刻 x 将过去 N 个采样点中第 a 个电压值和第 $x-a$ 个采样点对应的电流值。

卷积功率是频域暂态功率的时域形式, 相较于瞬时功率, 其可以更准确地反映功率的频域信息。本文利用卷积功率有效提取理论分析中的频域暂态功率特征^[28]。

2.3 卷积功率特征频带提取

如 1.4 节中所述, 特征频带下频域暂态功率比存在差异, 因此通过卷积功率比的大小可以可靠识别区内外故障。

常见的信号特征提取方法有很多, 本文引入 S 变换(Stockwell transform, ST)、小波变换(wavelet transform, WT)和短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)方法。下面对这 3 种时频分析方法的抗噪性能进行验证。以汇集线路 L1 发生金属性故障为例, 添加随机噪声, 比较 ST、WT 和 STFT 这 3 种算法的去噪性能。如表 1 所示以信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)作为第 1 评价指标, 均方误差(mean squared error, MSE)作为第 2 评价指标, 衡量不同算法的去噪效果差异, 若 SNR 愈大, MSE 愈小, 则去噪效果愈好^[29]。

表 1 比较 ST、WT 和 STFT 算法的去噪性能
Table 1 Comparison of denoising performance of ST, WT and STFT algorithms

算法	评价指标	
	SNR/dB	MSE/J
ST	31.03	0.38
WT	18.83	0.089
STFT	24.71	0.67

本文结合 SNR 和 MSE 的大小来区分去噪效果, 本文综合考虑选择 ST 算法作为提取特征频带方法, 原因如下: 一方面从表 1 可知, ST 算法的 SNR 为 31.03, 而 MSE 的 SNR 为 0.38, SNR 越大越好, MSE 越小越好。所以总体来看, S 变换对信号去噪效果比较好; 另一方面 S 变换是在小波变换和短时傅里叶变换基础上改进的一种时频分析方法, 相较于小波变换和短时傅里叶变换, S 变换的优势在于无须事先选取基函数, 而是通过高斯窗自适应调整, 从而解决了短时傅里叶变换中时间分辨率和频率分辨率无法同时满足的问题^[30]。

在实际工程中, 处理的信号一般是离散的, 离散形式的 S 变换定义为

$$S\left[uT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mu}{N}} \quad (17)$$

式中: u 表示时间, $0 \leq u \leq N-1$; n 为频率采样

点, $1 \leq u \leq N-1$; T 为采样时间间隔; $X(n)$ 为时域信号; m 代表位移量。

显然, S 变换中某特定频率的时间-幅值信息构成保护没有足够的可靠性, 且更易受到信号干扰的影响, 因此, 本文将每个采样时刻下的某一频带的幅值求和进行分析, 信号在 uT 时刻的某一频带的 S 变换幅值和定义为

$$S_p(uT, nf_c) = \sum_{n_1 \leq n \leq n_2} \text{abs}|S(uT, nf_c)| \quad (18)$$

式中: $n_1 f_c$ 为所选频带下限; $n_2 f_c$ 为所选频带上限; f_c 为频率间隔; $1 \leq n_1 \leq n \leq n_2 \leq N-1$; S_p 为特定频带下的卷积功率。

3 故障选线方案

3.1 启动判据

正常运行时, 直流输电线路的运行电压通常稳定在其额定电压附近。而当直流线路发生故障时, 会发生电压跌落和电流上升现象, 因此, 使用电压梯度方法作为保护启动的判据。

$$\Delta u_1(k) = \sum_{i=1}^3 u(k+i) - \sum_{i=1}^3 u(k-i) \quad (19)$$

式中: $u(k)$ 为第 k 个直流线模电压采样值; $\Delta u_1(k)$ 为第 k 个线模电压梯度值。

$$|\Delta u_1| > \Delta u_{\text{set}} \quad (20)$$

式中, Δu_{set} 为启动判据的整定阈值。由直流输电系统的设计规程可知, 在正常运行时, 容许的电压幅值波动量标么值不可以大于 0.02 p.u., 在考虑一定的裕度情况之下选取 Δu_{set} 为 1.5^[31]。如果连续 3 个采样点满足式(20)的启动条件时, 就进行下一步判定, 否则认为没有故障出现。

3.2 汇集线路选线判据

将特征频带下所有采样点的卷积功率幅值求和的平方, 得到线路特征频带下卷积功率的能量, 记为 E , 则有:

$$E = \left[\sum_{u=1}^{N-1} S_p(uT, nf_c) \right]^2 \quad (21)$$

当汇集线路发生故障时, 在特征频带内故障线路的卷积功率能量一定大于非故障线路; 故障线路与汇流母线出口处卷积功率能量比大于 1, 非故障线路与汇流母线出口处的卷积功率能量比小于 1, 利用比值无须仿真整定、避免传输大量数据并且减少通信时间。利用上述故障线路与非故障线路间的特征差异, 可以构造选线判据。

为提高故障识别的抗干扰能力, 利用数据窗内卷积功率能量比, 构造故障识别判据, 如式(22)所示。

$$G_i = \begin{cases} \frac{E_i}{E_s} > G_{set} \Rightarrow \text{故障线路} \\ \frac{E_i}{E_s} < G_{set} \Rightarrow \text{非故障线路} \end{cases} \quad (22)$$

式中： $E_i (i=1,2,3,4)$ 为汇集线路 L_i 卷积功率的能量； E_s 为汇流母线卷积功率的能量； G_{set} 为整定值，在特征频带下 G_{set} 为 1。

通过式(22)计算卷积功率能量比，若能量比 $G_i > 1$ ，则判定为故障线路；反之，判定为非故障线路。

3.3 故障选极判据

由于直流线路两极之间的耦合效应，当线路发生故障时，线路的健全极会产生感应电气量，故障极的电气量大于非故障极，且耦合作用的强度与频率有关；在高频范围内，耦合效应强，因此健全极和故障极的高频分量近似一致；在低频范围内，耦合作用较弱，因此故障极的低频分量比健全极的低频成分更大^[32]。因此考虑故障极的卷积功率明显大于非故障极的卷积功率，因此本文利用 S 变换提取低频带下的卷积功率来构造选极判据，选取的低频带上限为 1200 Hz，低频带下限为 f_0 。

$$\eta = \frac{\sum_{u=1}^N |S_{pp}(uT, nf_c)|}{\sum_{u=1}^N |S_{pn}(uT, nf_c)|} \quad (23)$$

式中： η 为低频带正负极卷积功率能量比值； $S_{pp}(t)$ 和 $S_{pn}(t)$ 分别为低频带下正极和负极卷积功率。

通过与整定值进行比较，实现保护动作，故障选极判据为

$$\begin{cases} \eta > k_{set1} & \Rightarrow \text{PGF} \\ k_{set2} \leq \eta \leq k_{set1} & \Rightarrow \text{PPF} \\ \eta < k_{set2} & \Rightarrow \text{NGF} \end{cases} \quad (24)$$

式中：PGF 为正极接地故障；PPF 为极间故障；NGF 为负极接地故障。通过大量仿真实验，选极判据的门槛值留有一定的裕度， k_{set1} 为 1.74， k_{set2} 取 0.57。考虑不同实际工程，门槛值可以进行相应调整^[33]。

3.4 故障识别流程

全直流风电系统汇集线路故障选线流程如图 7 所示。

当满足启动判据后，计算每条直流线路暂态电流电压的故障分量，当所采集到的信息满足式(21)时，计算各汇集线路的卷积功率，根据选线判据式(22)来判断哪条是故障线路，当满足选线判据要求时，可向线路所对应的直流断路器发出跳闸信号以

切断故障线路。

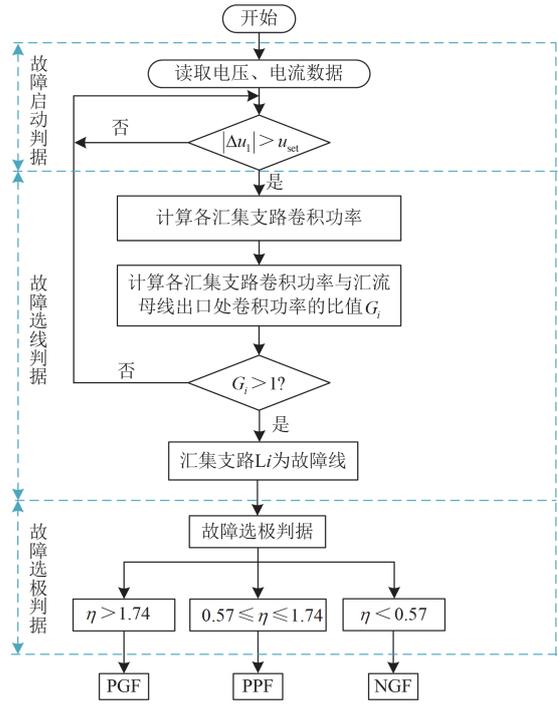


图 7 汇集线路选线流程图

Fig. 7 Line selection process of collection lines

4 仿真实验

利用 PSCAD/EMTDC 搭建如图 1 所示的全直流风电系统模型。搭建的模型设置为 4 条汇集线路，线路采用电缆依频模型，线路参数设置参考文献 [11,18,23]，系统参数如表 2 所示，数据采样频率设置为 100 kHz，数据窗口选择为 1 ms。

表 2 系统参数

Table 2 System parameters	
参数	取值
直流汇集电压/kV	±30
FTF-MMC 桥臂子模块个数	200
FTF-MMC 桥臂子模块电容/μF	300
FTF-MMC 桥臂子模块电感/mH	29
FTF-MMC 桥臂电阻/Ω	0.38
单位线路电感/(H/km)	0.0013
单位线路电阻/(Ω/km)	0.054
单位线路电容/(μF/km)	0.0073
单台风机容量/MW	25
DCT 出口并联电容/μF	15
DCT 出口限流电抗器/H	0.1
L1—L4 各线路长度/km	20

4.1 不同故障类型性能验证

为了验证不同故障类型下所提保护方案的性

能, 在汇集线路 L1—L4 分别设置发生正极金属性接地故障(PGF)、负极金属性接地故障(NGF)和极间故障(PPF), 不同故障类型下各汇集线路的卷积功率, 如图 8 所示。同时在 PGF、NGF 和 PPF 故障时, 验证选极判据。

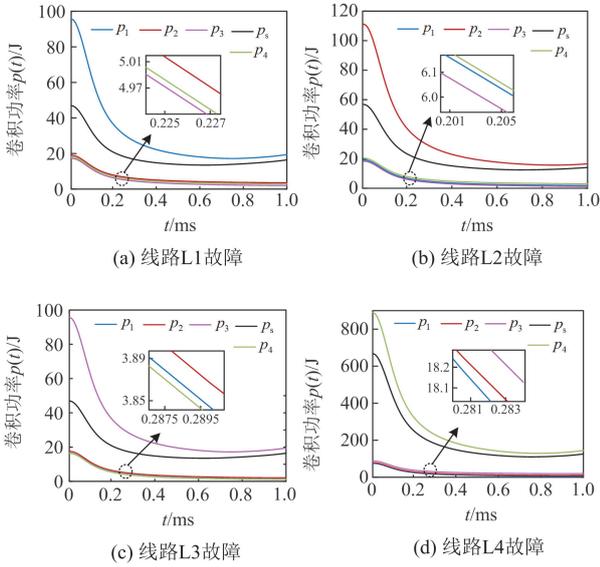


图 8 各汇集线路卷积功率图

Fig. 8 Convolutional power of each collection line

如图 8 所示, 故障线路的卷积功率能量大于非故障线路能量。根据式(21), 计算各汇集线路与汇流母线出口处卷积功率的能量比 $G_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 大于 1, 而非故障线路卷积功率的能量比小于 1, 由此判定出故障线路为 $L_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。不同故障类型和不同汇集线路故障仿真结果在表 3 中给出。当汇集线路 L1 故障时, 正极保护安装处的卷积功率能量明显大于负极卷积功率的能量, 正负极能量比 η 大于 k_{set1} , 保护判定为正极故障; 当汇集线路 L2 故障时, 正极保护安装处的卷积功率能量明显小于负极, η 小于 k_{set2} , 保护判定为负极故障; 当汇集线路 L4 故障时, 正极保护安装处的卷积功率能量与负极的比值 η 小于 k_{set1} 且大于 k_{set2} , 保护判定为极间故障。

表 3 不同线路故障的仿真结果

Table 3 Simulation results of different line faults

故障 线路	G_i				η	选线 结果
	线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4		
L1	3.03	0.078	0.0771	0.079	8.61	L1_PGF
L2	0.026	2.081	0.025	0.026	0.102	L2_NGF
L3	0.021	0.021	2.017	0.022	21.89	L3_PGF
L4	0.0086	0.0086	0.0087	1.601	1.44	L4_PPF

4.2 抗过渡电阻性能验证

在汇集线路 L1 上设置正极接地故障, 过渡电阻分别为 10、20、50、80 Ω , 故障距离分别设为 5、10、15 km, 模拟不同故障距离和过渡电阻对保护方法的影响, 如图 9 所示, 结果如表 4 所示。

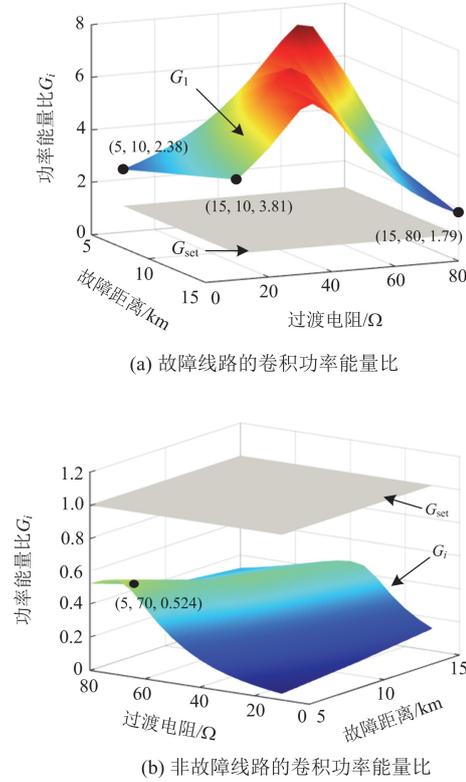


图 9 故障线路与非故障线路不同条件下的卷积功率能量比

Fig. 9 Convolutional power energy ratio of faulty and non-faulty lines under different conditions

表 4 不同条件下各汇集线的卷积功率能量比

Table 4 Convolutional power energy ratio of each collection line under different conditions

过渡 电阻/ Ω	故障 距离/km	G_i				η	选线结果
		线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4		
10	5	2.385	0.037	0.037	0.001	12.57	L1_PGF
	10	3.101	0.079	0.078	0.079	7.308	L1_PGF
	15	3.817	0.134	0.133	0.135	5.018	L1_PGF
20	5	2.84	0.062	0.062	0.062	9.949	L1_PGF
	10	3.90	0.135	0.135	0.135	6.142	L1_PGF
	15	4.90	0.234	0.230	0.234	4.387	L1_PGF
50	5	5.40	0.272	0.271	0.272	5.59	L1_PGF
	10	6.46	0.490	0.489	0.491	3.841	L1_PGF
	15	4.45	0.437	0.438	0.444	2.899	L1_PGF
80	5	5.36	0.523	0.523	0.523	3.490	L1_PGF
	10	2.59	0.368	0.368	0.369	2.525	L1_PGF
	15	1.79	0.321	0.322	0.325	1.93	L1_PGF

4.3 不同故障距离对保方法的性能验证

在汇集线路 L3 上分别设置过渡电阻为 0.01 Ω 和故障距离分别为 2、5、10、18 km 的负极接地故障。模拟不同故障距离对所提方法准确性的影响，如图 10 所示，仿真结果如表 5 所示。可知本文方法在不同故障距离下，仍能准确识别故障线路。

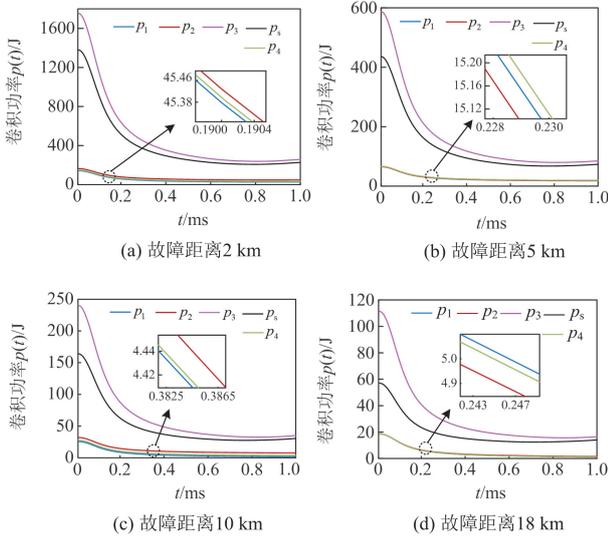


图 10 不同故障距离下各汇集线路卷积功率

Fig. 10 Convolutional power of each collection line under different fault distances

表 5 不同故障距离仿真结果

Table 5 Simulation results of different fault distances

故障 距离/km	G_i				η	选线 结果
	线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4		
2	0.0058	0.0058	1.48	0.0058	0.0065	L3_NFG
5	0.009	0.0094	1.626	0.0096	0.028	L3_NFG
10	0.0154	0.0154	1.828	0.0155	0.091	L3_NFG
18	0.048	0.048	2.58	0.051	0.128	L3_NFG

4.4 抗干扰性能验证

考虑实际工程中外界噪声和互感器传变误差对保护原理造成的干扰，本文利用随机高斯白噪声对原理的抗干扰性能进行验证，白噪声选取信号信噪比为 20、30、40 dB，过渡电阻为 0.01、50、80 Ω，分别对汇集线路 L2 发生正极接地故障的保护原理进行抗干扰能力验证，如图 11 所示，仿真结果如表 6 所示。

由图 11(b)可知，在不同噪声和过渡电阻下，故障线路中卷积功率能量比 G_f 的最小值都大于 1。如图 11(a)所示，非故障线路中卷积功率能量比 G_i 的最大值小于 1，仿真结果表明在信噪比为 20 dB 的噪声干扰和 80 Ω 的过渡电阻下，本文方法仍能可靠识

别故障线路。

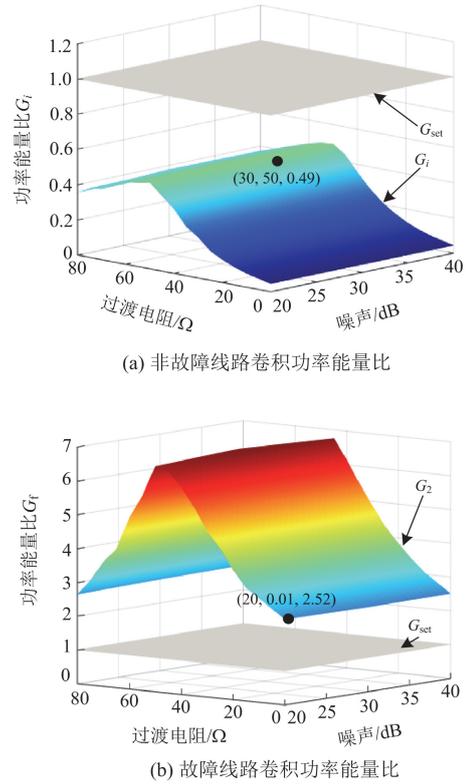


图 11 故障线路与非故障线路不同信噪比的性能仿真
Fig. 11 Performance simulation of different signal-to-noise ratios of faulty and non-faulty lines

表 6 不同噪声仿真结果

Table 6 Simulation results of different noises

噪声 干扰/dB	过渡 电阻/Ω	G_i				η	选线 结果
		线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4		
20	0.01	0.044	2.52	0.045	0.0019	13.6	L2_PGF
	50	0.488	6.69	0.519	0.5069	5.91	L2_PGF
	80	0.354	2.644	0.374	0.361	3.88	L3_PGF
30	0.01	0.043	2.49	0.045	0.043	13.9	L2_PGF
	50	0.496	6.79	0.505	0.503	5.88	L2_PGF
40	80	0.377	2.69	0.381	0.379	3.91	L2_PGF
	0.01	0.044	2.50	0.045	0.044	13.8	L2_PGF
50	50	0.490	6.65	0.495	0.495	5.85	L2_PGF
	80	0.373	2.723	0.379	0.375	3.9	L2_PGF

4.5 采样率影响分析

为充分验证采样率对本文所提方法性能的影响，以线路 L3 发生负极接地故障为例，分别设置采样率为 20、50、100 kHz，过渡电阻为 0.01、50、80 Ω 进行仿真模拟。选线结果如表 7 所示。

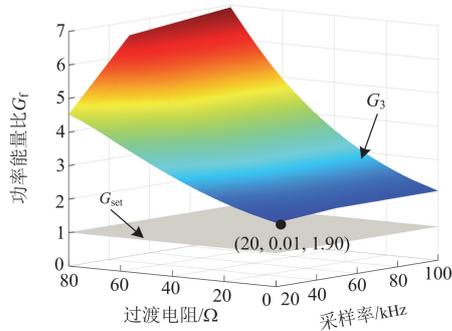
如图 12 所示，在不同采样率和过渡电阻下，故障线路的卷积功率能量比 G_f 均大于 1；非故障线路

的卷积功率能量比 $G_i < 1$, 仿真结果表明低采样率下能够有效识别故障线路与非故障线路。

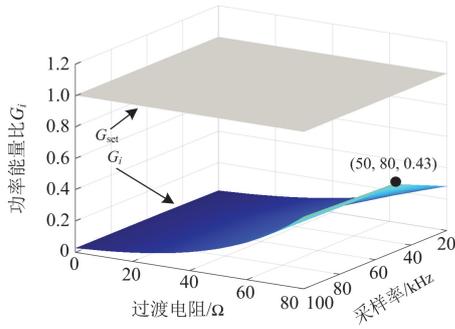
表 7 不同采样率的仿真结果

Table 7 Simulation results under different sampling frequency

采样率/ kHz	过渡 电阻/ Ω	G_i				η	选线 结果
		线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4		
20	0.01	0.0217	0.0211	1.90	0.0004	0.103	L3_NGF
	50	0.123	0.125	3.34	0.125	0.29	L3_NGF
	80	0.282	0.286	4.52	0.286	0.38	L3_NGF
50	0.01	0.025	0.025	2.051	0.025	0.102	L3_NGF
	50	0.162	0.166	4.10	0.166	0.292	L3_NGF
	80	0.435	0.444	6.58	0.444	0.382	L3_NGF
100	0.01	0.026	0.026	2.061	0.026	0.102	L3_NGF
	50	0.167	0.171	4.199	0.171	0.293	L3_NGF
	80	0.46	0.469	6.93	0.469	0.383	L3_NGF



(a) 故障线路卷积功率能量比



(b) 非故障线路卷积功率能量比

图 12 故障线路与非故障线路在不同采样率的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of faulty and non-faulty lines at different sampling frequencies

由表 7 数据可知, 受仿真模型条件约束及实际工程中电缆长度的限制, 高采样率可能显著增加硬件实现成本。所提方法在不同采样率与过渡电阻条件下均能准确判别故障线路。

4.6 与其他方法的对比

本文所提方法与现有方法比较如表 8 所示。

表 8 与现有方法比较结果

Table 8 Comparison results with existing schemes

方法	采样率/ kHz	抗过渡电 阻能力/ Ω	抗干扰 性能/dB	是否依 赖边界	是否依赖 仿真整定
文献[14]	200	10	30	是	是
文献[15]	20	50	30	是	否
文献[16]	20	20	40	否	是
文献[17]	20	20	30	否	是
文献[18]	100	20	—	否	是
本文方法	20	80	20	否	否

由表 8 数据可知, 现有的选线方法利用时域信息量变化率、极性等的较多, 缺乏必要的数学解析, 而本文所提方法从频域理论证明了暂态功率幅值的差异, 并构造了时域卷积功率特征量, 实现了频域信息的有效提取, 避免了阈值依赖于仿真整定的问题。相比其他方法, 本文方法受采样率、直流边界影响较小, 且无需仿真整定和通信。

5 结论

针对全直流风电系统汇集线路, 本文提出一种基于卷积功率能量比的故障选线方案。该保护方案具有以下优点。

1) 本文所提方法通过分析故障线路与非故障线路的频域暂态功率特性, 发现特定频带内故障线路的暂态功率显著高于非故障线路。基于时域卷积与频域乘积的对应关系, 构建时域卷积功率特征量, 实现了频域暂态功率特征的有效提取。

2) 本文所提方法利用 S 变换提取特征频带下的卷积功率, 提出了汇集线路与汇流母线出口处卷积功率能量比的选线判据, 提高耐受过渡电阻能力、无需通信和仿真整定。

3) 仿真结果表明, 本文所提方法能够耐受 80Ω 过渡电阻和 20 dB 噪声干扰, 受噪声、采样率、直流边界影响较小, 具有较强的鲁棒性。

参考文献

- [1] HAN Haiyang, LI Zhanlong, WANG Haiyun, et al. Design of a parallel All-DC wind power system with turbine-side Boost based on a new DC conversion[J]. IEEE Access, 2024, 12: 3054-3069.
- [2] FENG An, ZHAO Biao, CUI Bin, et al. Multi-functional DC collector for future all-DC offshore wind power system: concept, scheme, and implement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(8): 8134-8145.
- [3] 郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰. 基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 31-42.

GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie. Pilot protection

- method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(18): 31-42.
- [4] 陈田田, 赵振廷, 李银红. 不依赖边界元件的柔性直流电网反时限过流保护配置方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16): 48-58.
CHEN Tiantian, ZHAO Zhenting, LI Yinhong. Inverse time overcurrent protection configuration scheme for a flexible DC power grid independent of boundary components[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 48-58.
- [5] 蔡旭, 杨仁焯, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(21): 2-22.
CAI Xu, YANG Renxiao, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(21): 2-22.
- [6] 徐政. 海上风电送出主要方案及其关键技术问题[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(21): 1-10.
XU Zheng. Main schemes and key technical problems for grid integration of offshore wind farm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(21): 1-10.
- [7] 杜杰, 李子润, 李国杰. 海上风电直流汇集 DC/DC 系统实时仿真方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(7): 170-177.
DU Jie, LI Zirun, LI Guojie. Real-time simulation method for a DC/DC collection system in an offshore wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(7): 170-177.
- [8] 王艳婷, 莫文斌, 白明远, 等. 基于电压行波波形特征的柔性直流输电线路雷击识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(8): 31-44.
WANG Yanting, MO Wenbin, BAI Mingyuan, et al. Lightning interference identification method based on voltage traveling wave waveform characteristics for flexible DC transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(8): 31-44.
- [9] 谈竹奎, 徐玉韬, 吕黔苏, 等. 利用电容主动放电脉冲的直流配电网故障选线方法[J]. *广东电力*, 2018, 31(6): 139-146.
TAN Zhukui, XU Yutao, LÜ Qiansu, et al. Faulted line selection method for DC power distribution network by using active capacitance discharge pulse[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(6): 139-146.
- [10] 徐瑞东, 常仲学, 宋国兵, 等. 注入探测信号的直流配电网接地故障识别方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(11): 4269-4277.
XU Ruidong, CHANG Zhongxue, SONG Guobing, et al. Grounding fault identification method for DC distribution network based on detection signal injection[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4269-4277.
- [11] 王晨清, 陈实, 齐贝贝, 等. 基于波形相关性的直流配电网主动式接地故障选线[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(3): 2-10.
WANG Chenqing, CHEN Shi, QI Beibei, et al. An active grounding fault line selection method for DC distribution network based on waveform correlation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(3): 2-10.
- [12] 姜博, 董新洲, 施慎行, 等. 自适应时频窗行波选线方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(24): 6387-6397.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. A method of adaptive time frequency window traveling wave based fault feeder selection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(24): 6387-6397.
- [13] 邓丰, 梅龙军, 唐欣, 等. 基于时频域行波全景波形的配电网故障选线方法[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(13): 2861-2870.
DENG Feng, MEI Longjun, TANG Xin, et al. Faulty line selection method of distribution network based on time-frequency traveling wave panoramic waveform[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(13): 2861-2870.
- [14] 余修勇, 肖立业, 林良真, 等. 基于单端量的柔性直流配电网故障识别方案[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.
- [15] 贾科, 陈聪, 刘子奕, 等. 基于单端电流暂态量的柔性直流配电网保护及其整定[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(6): 144-152.
JIA Ke, CHEN Cong, LIU Ziyi, et al. Protection of flexible DC distribution network based on single-end current transient and its setting[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(6): 144-152.
- [16] 高淑萍, 吕宇星, 宋国兵, 等. 利用改进变分模态分解突变能量的直流配电网保护方法[J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(5): 159-170.
GAO Shuping, LÜ Yuxing, SONG Guobing, et al. A DC distribution network protection method based on improved VMD and abrupt energy[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(5): 159-170.
- [17] 胡亚辉, 韦延方, 王鹏, 等. 基于 PCA 和 EEMD 的柔性直流配电网故障选线算法[J]. *电源学报*, 2024, 22(2): 305-315.
HU Yahui, WEI Yanfang, WANG Peng, et al. Fault line selection algorithm for flexible DC distribution network based on PCA and EEMD[J]. *Journal of Power Supply*, 2024, 22(2): 305-315.
- [18] 李春, 赵玉勇, 吴方舟, 等. 基于高频谐振识别的光伏直流汇集支路故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 150-158.
LI Chun, ZHAO Yuyong, WU Fangzhou, et al. Fault location for photovoltaic DC collecting branch based on high frequency resonance identification[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15): 150-158.
- [19] 夏福良, 秦文萍, 陈武晖, 等. 基于正负极电流小波降噪残差和之比的多端柔性直流系统单极接地选线方案[J]. *高电压技术*, 2022, 48(3): 1032-1041.
XIA Fuliang, QIN Wenping, CHEN Wuhui, et al. Single-pole grounding line selection scheme for multi-terminal flexible DC system based on the ratio of positive and

- negative current wavelet noise reduction residual sum[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1032-1041.
- [20] 左鹏飞, 秦文萍, 夏福良, 等. 基于零模电流相关性的直流配电网单极接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 86-96.
ZUO Pengfei, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Single-pole ground selection method for DC distribution networks based on zero-mode current correlation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 86-96.
- [21] 丁华星, 邹贵彬, 王凤莲, 等. 一种适用于深远海全直流风电汇集网络的保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 15-25.
DING Huaxing, ZOU Guibin, WANG Fenglian, et al. A fault protection method of a DC collection network for an all-DC offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 15-25.
- [22] 朱瑞, 贾科, 赵其娟, 等. 光伏直流并网系统控保协同故障区段辨识方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2825-2835.
ZHU Rui, JIA Ke, ZHAO Qijuan, et al. Fault section identification of flexible DC collection system based on collaborated control-protection method[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2825-2835.
- [23] 贾科, 施志明, 朱瑞, 等. 基于边界谐振识别的光伏直流升压汇集系统的故障处理[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2144-2156.
JIA Ke, SHI Zhiming, ZHU Rui, et al. Fault processing of photovoltaic DC boost integration system based on boundary resonance identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2144-2156.
- [24] PÁEZ J D, FREY D, MANEIRO J, et al. Overview of DC-DC converters dedicated to HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 119-128.
- [25] 贾科, 施志明, 朱瑞, 等. 基于边界谐振识别的光伏直流升压汇集系统的故障处理[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2144-2156.
JIA Ke, SHI Zhiming, ZHU Rui, et al. Fault processing of photovoltaic DC boost integration system based on boundary resonance identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2144-2156.
- [26] 邓丰, 张振, 钟航, 等. 基于首行波主频分量的柔性直流输电线路单端量行波保护[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5797-5808.
DENG Feng, ZHANG Zhen, ZHONG Hang, et al. Single-ended traveling wave protection for flexible DC transmission lines based on the main frequency component of the initial traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5797-5808.
- [27] 李海锋, 褚倍钰, 梁远升, 等. 基于时域卷积功率差的多端混合高压直流线路快速纵联保护方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 175-182.
LI Haifeng, CHU Beiyu, LIANG Yuansheng, et al. Fast pilot protection method of multi-terminal hybrid HVDC line based on time-domain differential convolution power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 175-182.
- [28] CHEN X, LI H, WANG G, et al. A Convolution power-based protection scheme for hybrid multiterminal HVDC transmission systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 1655-1667.
- [29] 钟建军, 宋健, 由长喜, 等. 基于信噪比评价的阈值优选小波去噪法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(2): 259-263.
ZHONG Jianjun, SONG Jian, YOU Changxi, et al. Wavelet de-noising method with threshold selection rules based on SNR evaluations[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(2): 259-263.
- [30] 侯树杰. 时频分析方法对比及 S 变换在地震数据处理中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 44-46, 114.
HOU Shujie. Method comparison of time-frequency analysis and application of S transform in seismic data processing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(3): 44-46, 114.
- [31] 童晓阳, 权文杰, 李智, 等. 利用行波波改进编辑距离的柔性直流输电线路后备保护方案[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 294-303.
TONG Xiaoyang, QUAN Wenjie, LI Zhi, et al. Backup protection scheme for flexible DC transmission line by traveling wave waveform similarity based on improved editing distance[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 294-303.
- [32] 侯俊杰, 宋国兵, 常仲学, 等. 基于暂态功率的高压直流线路单端量保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 203-212.
HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. Transient power based single-end protection for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 203-212.
- [33] 李佳朋, 李宇骏, 袁泉添, 等. 远海风能集中接入的多端直流系统直流故障分析与故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 119-128.
LI Jiapeng, LI Yujun, YUAN Xiaotian, et al. DC fault analysis and detection for offshore wind farms integration via MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 119-128.

收稿日期: 2024-07-06; 修回日期: 2024-11-03

作者简介:

李攀龙(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 1311827390@qq.com

侯俊杰(1993—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 826686025@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: fyf3985@xju.edu.cn

(编辑 周金梅)