适用于UPFC接入线路的主动注入式故障测距方法

郑 涛,王赟鹏,马家璇,宋祥艳

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:针对统一潮流控制器(UPFC)接入线路场景下传统被动式故障测距方法的精度难以保障的问题,提出 基于控制与保护协同思想的主动注入式UPFC接入线路故障测距方法。该方法在接入线路故障隔离后,充分 利用基于模块化多电平换流器的统一潮流控制器的高度可控性,将串联侧模块化多电平换流器切换至附加 控制模式,向接入线路主动注入特征电压,进而通过单端量的解微分方程算法实现故障测距。所提方法将 UPFC作为信号源,向接入线路单侧注入电气信号构建故障测距方程,可解决被动式故障测距方法易受UPFC 运行特性和过渡电阻影响的问题,提高故障测距的准确性和可靠性。最后,在PSCAD/EMTDC 仿真平台搭 建UPFC 接入线路模型,仿真结果验证了所提故障测距方法的可行性和有效性。

关键词:统一潮流控制器;输电线路;故障测距;主动注入

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202203018

0 引言

我国能源开发与电力负荷中心呈现逆向分布特征,通过大容量、远距离特高压直流输电技术实现 "西电东送,北电南供",成为优化能源配置、提高能源利用率,早日达成2060年实现碳中和目标的有效 方案之一,而特高压直流的接入使得系统架构愈 加复杂的受端交流电网面临潮流分布不均、输电线 路过载运行等风险^[1]。为应对电网发展变化新态势 带来的挑战,进一步提高交流电网潮流调节能力与 电压支撑能力对电力系统的安全稳定运行具有重要 意义^[23]。

作为新一代柔性交流输电系统(FACTS)装置 的典型代表,统一潮流控制器UPFC(Unified Power Flow Controller)可灵活控制线路潮流,提高断面输 送功率极限;同时可为交流母线提供动态无功支 撑,提高电力系统稳定性^[46];而基于模块化多电平 换流器(MMC)的统一潮流控制器(MMC-UPFC)凭借 MMC具有的有功、无功独立控制以及模块化设计等 优势获得了学术界的广泛关注,并已在我国江苏省 南京西环网与苏州南部电网实现高电压、大容量输 电场合的工程应用^[78]。当UPFC接入的交流线路发 生永久性故障时,如何实现快速、精准的故障测距, 成为减小故障巡查难度,缩短故障巡线时间,加快 恢复接入线路供电能力和UPFC潮流调节功能,并

收稿日期:2021-08-24;修回日期:2022-01-21 在线出版日期:2022-03-28

基金项目:国家电网公司科技项目(百分百非水可再生能源电 网保护适应性分析及新原理研究)(5100-202140339A-0-0-00) Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Adaptability Analysis and New Principle Study of 100% Non-water Renewable Energy Grid Protection)(5100-202140339A-0-0-00) 进一步为其接入电网提供稳定运行保障的关键。

现有的传统交流线路故障测距方法利用被动式 的故障信息测量故障距离,从原理上可分为故障分 析测距法和行波测距法两大类。故障分析测距法利 用测量电压、电流数据列写故障回路方程,计算故障 距离。若采用基于单端电气量的故障分析法进行故 障测距,由于对端系统对故障点电流具有助增作用, 在发生非金属性短路故障时,其测距精度将明显下 降;而采用双端电气量进行故障测距可避免对端系 统电流助增的影响,但需要两端采样数据严格同步, 文献[9]指出,即使采用GPS同步采样,实际现场中 电压互感器、电流互感器和保护装置对电压、电流的 传输仍具有一定的时延,因此两端很难做到真正意 义上的数据同步。行波测距法利用故障点产生暂态 行波向线路两端传输的特性,通过检测故障行波到 达保护测点的时间进而计算故障距离[10-12]。但是由 于故障行波传播速度快,为准确捕捉波头,单端量和 双端量行波测距方案均对采样频率有较高的要求, 且其易受过渡电阻和故障初始角的影响^[13]。

此外,UPFC的接入还会使得传统被动式故障测 距法的性能进一步劣化。具体而言,由于UPFC串 联侧等效为可控电压源,其改变了接入线路均匀分 布的特点^[14],且UPFC的多种运行方式随着电网潮 流调控需求而变化^[4],同时接入线路的故障类型、故 障严重程度和故障持续时间等多重因素均会影响 UPFC的电压、电流输出^[5],因此UPFC接入线路的故 障情景更为复杂,基于求解故障回路方程原理的故 障分析测距法将面临严峻挑战。对于行波测距法而 言,由于实际UPFC工程中的接入线路长度较短,行 波波头将更加难以捕捉和采集,同时线路故障行波 会首先在UPFC串联侧发生折反射^[15],使得母线处 的故障行波成分更为复杂,解析更为困难,因此行波 测距法在UPFC 接入线路故障场景下的应用效果有待进一步验证。

电力电子装置具有高度可控性的独特优势,利 用控制与保护的协同配合(下文简称控保协同)提高 保护的可靠性与灵敏性,成为电力电子化电力系统 保护研究的重要思路^{16]},而基于控保协同思想的故 障测距方案已在柔性直流输电场景获得了广泛关 注。文献[17]在混合式 MMC 直流输电系统故障穿 越控制的基础上,提出通过主动注入探测信号实现 直流故障定位,避免了传统单端量故障测距法易受 对端系统影响的问题,但其对两端换流站控制系统 的性能要求较高。文献[18-19]通过改变换流器桥 臂半桥子模块投入数量在直流线路上产生脉冲信 号,利用行波原理实现故障测距,可解决传统行波测 距法易受过渡电阻影响等问题,但其对采样频率的 要求较高。文献[20]针对真双极接线型柔性直流输 电系统提出了基于主动谐波注入的故障测距方案, 以解决接地极线路电气量微弱导致故障测距困难的 问题,但注入的谐波会使正常运行的直流电压产生 一定的波动。以上文献均聚焦柔性直流输电系统, 其利用换流器的高可控性优势,通过注入信号实现 故障测距,为解决电力电子装置接入系统的复杂场 景下的故障测距问题提供了新的解决思路。

本文针对 UPFC 接入线路场景下传统被动式 故障测距方案存在可靠性不足的问题,充分利用 MMC-UPFC 的高度可控性,提出适用于其接入线路 的主动注入式故障测距方法,该方法在 UPFC 接入线路 的主动注入式故障测距方法,该方法在 UPFC 接入线路 路故障隔离后,通过切换串联侧 MMC 控制方式向接 入线路主动注入特征电压,进而仅利用单端电气量 即可进行故障测距。本文所提方法既可解决 UPFC 串联侧输出特性对传统被动式故障测距的干扰,又 可消除对侧电源对故障点电流的助增作用,提高了 故障测距的准确性。最后,利用 PSCAD / EMTDC 搭 建的 UPFC 接入线路仿真模型验证了本文所提方法 的有效性。

1 MMC-UPFC基本结构及故障测距原理

1.1 MMC-UPFC基本结构

MMC-UPFC基本结构如附录A图A1所示,其可 分为并联侧和串联侧两部分。并联侧为MMC₁经并 联变压器接入交流母线,串联侧为MMC₂经串联变 压器接入交流线路,同时串、并联侧的MMC直接采 用背靠背的直流侧连接方式,以实现两侧换流器的 功率交换。UPFC接入的交流线路首端配置断路器 QF₁,用于隔离故障线路;串联变压器网侧配置断路 器QF₂和旁路开关QS₃,可在UPFC串联侧长时间停 运时,旁路整个串联侧装置;同时串联变压器接入交 流线路侧两端配置旁路开关QS₁,QS₂和接地开关 QE₁、QE₂,用于在串联变压器停运检修时隔断其与 接入交流线路之间的联系。串联变压器阀侧配有晶 闸管旁路开关TBS(Thyristor Bypass Switch),可在 交流侧发生故障时快速旁路串联侧换流器。

1.2 UPFC 接入线路等效电路

UPFC 接入线路等效电路如附录 A 图 A2 所示。 UPFC 并联侧等效为可控电流源 *I*_{sh},经并联变压器 T_{sh}向接入母线发出或吸收无功功率,维持其电压稳 定;串联侧等效为可控电压源,经串联变压器 T_{se}向 交流接入线路注入工频电压,即UPFC串联电压 *U*_{se}, 通过改变 *U*_{se}的幅值和相角便可灵活控制线路传输 功率。

1.3 UPFC 接入线路故障测距原理

传统的单端量故障测距方法利用单端故障电 压、电流信号构成故障测距方程,其在故障点存在过 渡电阻的场景下,由于流过过渡电阻的电流为两端 交流系统提供的短路电流之和,受对端电源的影响, 传统单端量故障测距方法将产生较大的测距误差。 同时,在UPFC接入线路场景下,传统的故障测距方 法中的故障回路还将包含UPFC串联电压U_{se},接入 线路不再呈现为均匀分布的特性,同时故障情况 下串联电压U_{se}还会受到UPFC运行方式及外在故 障条件的多重影响而更加复杂多变,因此,UPFC的 接入将进一步影响传统被动式故障测距方法的应用 效果。

图1为本文所提适用于UPFC接入线路的主动 注入式故障测距方法示意图,图中*R*_r为故障点过渡 电阻。接入线路发生短路故障后,线路两端的交流 断路器QF₁、QF₂三相跳闸;然后将UPFC串联变压器 网侧接地开关QE₁合闸,串联侧MMC切换至附加控 制模式,通过串联变压器的耦合,接入线路主动注入 特征电压,其可在故障点与接地开关QE₁之间构成 测距回路,进而可通过特征电压与电流之间的关系 求解出故障距离。



图 1 UPFC 接入线路的主动注入式故障测距示意图 Fig.1 Schematic diagram of fault locating method based on active injection for transmission line equipped with UPFC

现有的UPFC示范工程均用于解决密集负荷中 心所在区域电网潮流分布不均等问题,其接入线路 的长度一般为几十千米,文献[21-22]指出,长度为 300 km以下的高压输电线路,利用解微分方程算法 (R-L算法)配合低通滤波器即可满足故障测距 需求。因此,本文在UPFC主动注入特征电压后,采 用单端量的解微分方程算法计算其接入线路故障 距离。

本文所提适用于UPFC接入线路的主动注入式 故障测距方法充分利用了UPFC的高度可控性,将 UPFC作为信号源,与故障点形成单一回路,该方法 不仅可消除UPFC串联侧等效电压对传统被动式故 障测距方法的干扰,而且理论上不受过渡电阻的影 响,具有较高的故障测距精度。

2 特征电压主动注入原理

2.1 特征电压注入方式

MMC-UPFC串、并联侧均采用如附录A图A3所示的半桥子模块型MMC,其三相上、下各桥臂均由n 个半桥子模块与桥臂电感L_{am}串联而成,子模块电 容电压为U_e,正常运行状态下,为维持直流电压稳 定,同一相上、下桥臂投入的子模块数量N满足:

$$U_{\rm dc} = (n_{\rm p} + n_{\rm n})U_{\rm c} = NU_{\rm c} \tag{1}$$

式中: U_{dc} 为直流侧电压; n_{p} 、 n_{n} 分别为上、下桥臂子 模块投入数量。

若忽略桥臂电感电压,则MMC各相上、下桥臂 电压与直流侧电压、交流侧各相电压之间满足:

$$\begin{cases}
 u_{pj} = \frac{1}{2} U_{dc} - u_{j} \\
 u_{nj} = u_{j} + \frac{1}{2} U_{dc}
\end{cases}$$
(2)

式中: $u_{\mu j}, u_{\eta j}, u_{j}$ (j=a,b,c)分别为j相上、下桥臂电压和交流侧电压。

将式(2)方程组中的2个公式相减,可以得到各 相交流侧电压与上、下桥臂电压之间满足:

$$u_{j} = \frac{1}{2} \left(u_{nj} - u_{pj} \right)$$
 (3)

UPFC并联侧MMC采用定直流电压和定无功功 率控制,其在UPFC接入线路故障后可持续运行,向 接入母线发出无功功率,并保持直流侧电压的稳 定^[23],串、并联侧MMC可实现功率交换,并联侧为串 联侧向接入线路注入信号提高能量来源。

对于串联侧 MMC,由式(3)可知,串联侧 MMC 可直接通过改变上、下桥臂电压进而输出指定的三 相交流侧电压。特征电压主动注入控制框图如图 2 所示。图中, u_{ref_b}和 u_{ref_c}分别为a、b、c 相参考电 压; u_{ref_j}, u_{ref_j}分别为j相上、下桥臂参考电压。MMC 采用最近电平调制方式,输入设定的特征电压参考 值 u_{ref_o},便可得到各相上、下桥臂子模块投入数量, 如式(4)所示。将式(4)所得结果输入桥臂调制与均 压控制中,通过串联变压器的耦合,接入线路便可主 动注入三相交流特征电压。



图2 特征电压主动注入控制框图

Fig.2 Block diagram of active injection control of characteristic voltage

$$\begin{cases} n_{p} = \frac{N}{2} - \operatorname{round}\left(\frac{u_{\text{ref_o}}}{U_{c}}\right) \\ n_{n} = \frac{N}{2} + \operatorname{round}\left(\frac{u_{\text{ref_o}}}{U_{c}}\right) \end{cases}$$
(4)

式中:round(x)表示取与x最接近的整数。

2.2 特征电压幅值的选择

特征电压幅值越大,越有利于特征信号的获取; 同时应考虑在极端短路故障场景下注入幅值较大的 电压后可能造成换流器过流闭锁。因此,应从故障 测距需求与电力电子装置耐受电流能力限制两方面 综合考虑特征电压幅值的选择。文献[17,19]指出 在数百千伏的直流输电线路故障测距场景中,注入 特征信号的幅值不宜超过直流线路额定电压的 15%,且对于长度小于500km的线路,建议注入电压 的幅值为额定电压的2%~10%,可将其作为特征电 压幅值选择的依据。以国内某500 kV MMC-UPFC实 际工程参数为例^[4],接入线路的电压等级为500 kV, 线路长度为40 km,由于线路长度较短,所以选择 接入线路额定电压的约2%作为注入特征电压幅 值,串联变压器网侧输出的最大额定相电压幅值 U_{Ns}=35.5 kV, 故设置主动注入特征电压控制下, 串 联变压器网侧电压指令值的幅值 U_{ref} = 0.2 U_{Nse} 。

2.3 特征电压频率的选择

选择特征电压频率时应考虑以下三方面的 因素。

1)硬件方面:交流特征电压频率应小于采样频 率,以保证保护装置能够可靠获得注入电压信号;另 外,交流特征电压频率还应小于MMC的子模块控制 频率,以保证信号注入的有效性。

2)外界干扰的影响:特征电压频率应尽量避开 整数次谐波频率,以避免特殊情况下外部系统可能 产生的整数次谐波干扰故障测距结果。

3)线路参数的影响:注入电压的频率越低,线路 分布电容容抗越大,故可选择较低的特征电压频率, 以减小线路分布电容的影响。就短线路而言,线路 分布电容对传统工频50 Hz 解微分方程故障测距算 法的影响可通过低通滤波器滤除;当频率低于50 Hz 时,分布电容的影响将进一步减小,同时考虑到高压 输电线路阻抗的电阻分量较小,主要由电感分量构 成,注入电压的频率越低,线路感抗越小,对于近端 金属性短路故障,可能产生较大的电流,因此,兼顾 分布电容影响与电力电子耐受能力两方面因素,本 文选择注入电压的频率为50 Hz。

3 主动注入式故障测距方法

3.1 故障选相

在 UPFC 接入线路主动注入特征电压后,首先 要进行故障选相,进而选用对应的故障测距方程计 算故障距离。图 3 为 UPFC 接入线路在不同类型的 短路故障场景下的主动注入故障回路示意图。





对于故障相线路,如图3中虚线所示,注入的特征电压将在接地开关QE₁与故障点之间形成通路, 产生明显的特征电流;而对于非故障相线路,注入的 特征电压将处于开路状态,不会产生特征电流。因 此,可通过判断接入线路是否产生特征电流选出故 障相线路。

本文采用积分算法提取特征电流信号,提高故障选相的准确性,特征电流积分*S*。如式(5)所示。

$$S_{\varphi} = \int_{t_s}^{t_s+1} \left| i_{\varphi} \right| dt \quad \varphi = A, B, C$$
(5)

式中: i_{φ} 为UPFC接入线路的 φ 相电流瞬时值; t_s 为注 入特征电压的起始时刻;T为积分时长,注入的特征 电压频率为50 Hz,故T取为20 ms。

将 UPFC 接入线路发生瞬时性故障时 A 相的特征电流积分乘以大小为2的可靠系数后作为故障选相阈值 S_{set}。若某相线路的 S_φ≥S_{set},则将该相判别为故障相。值得注意的是,对于瞬时性故障,接入线路的三相特征电流积分均小于故障选相阈值,因此无需再进行后续的故障测距流程。

3.2 故障测距方程

本节以单相接地故障与相间短路故障为例,介 绍不同故障类型下的故障测距方程。

单相接地故障测距示意图如图4所示。假设 UPFC接入线路发生A相接地故障,注入特征电压



图4 单相接地故障测距示意图

Fig.4 Schematic diagram of single-phase grounding fault locating

后,故障相电压、电流满足:

$$u_{\rm A} = Lr_1(i_{\rm A} + K_{\rm r} \times 3i_0) + Ll_1 \frac{\mathrm{d}(i_{\rm A} + K_1 \times 3i_0)}{\mathrm{d}t} + 3R_{\rm f}i_0 \quad (6)$$

式中: u_A 、 i_A 分别为UPFC接入线路测得故障相A相的电压和电流; i_0 为接入线路测得的零序电流; K_r 、 K_l 分别为接入线路电阻、电感的零序电流补偿系数, $K_r = (r_1 - r_0)/(3r_1), K_1 = (l_1 - l_0)/(3l_1), r_1$ 、 l_1 和 r_0 、 l_0 分别为 接入线路单位长度的正序和零序电阻、电感值;L为故障点到UPFC线路出口的距离。

相间短路故障测距示意图如图5所示。假设 UPFC接入线路发生AB相间短路,注入特征电压后, 故障相电压、故障相电流满足:

$$\iota_{AB} = Lr_1 i_{AB} + Ll_1 \frac{di_{AB}}{dt} + R_f i_{AB}/2$$
(7)

式中: u_{AB}、 i_{AB}分别为 UPFC 接入线路测得的 AB 相线 电压和线电流。



图 5 相间短路故障测距示意图



文献[24]指出,时域线性方程能否求解与电气 量频率含量相关,利用同一种频率的电压、电流量最 多可求解2个未知数。由式(6)、(7)可知,主动注入 式故障测距方程中,只含有故障距离L与过渡电阻 *R*_r这2个未知数,因此,利用2个不同时刻的测量电 压与电流组成方程组进行联立求解,便可得到故障 距离L与过渡电阻*R*_r。

其他故障类型下的故障测距方程算法与单相接 地故障和相间短路故障类似,在此不再赘述。

3.3 数据处理

为减小高频分量对微分方程的干扰,首先需要 对采样获得的特征电压、电流数据进行滤波处理。 与FIR滤波器相比,IIR滤波器具有存储单元少、运 算次数少等特点^[25];巴特沃斯低通滤波器具有最大 平坦响应、良好的线性相位特性和便于设计等优点。 因此,本文采用截止频率为150 Hz的4阶巴特沃斯 低通滤波器对注入的特征电压、电流进行提取^[26-27]。

在处理微分方程中的离散化数据时,利用差分 计算特征电流的导数,特征电压、电流则取采样的平 均值,如式(8)所示。

$$\begin{cases} D = \frac{i_{m+1} - i_m}{T_s} \\ u_{avg} = \frac{u_m + u_{m+1}}{2} \\ i_{avg} = \frac{i_m + i_{m+1}}{2} \end{cases}$$
(8)

式中: T_s 为采样间隔; u_m 、 i_m 分别为第m个采样点对应的电压、电流值;D为电流差分; u_{avg} 、 i_{avg} 分别为电压、电流平均值。

进行主动注入式故障测距时,接入线路产生的 特征电流可近似表达为设定频率下的正弦信号,因 此,利用误差补偿后的差分与采样值可进一步提高 故障测距的准确性,其表达式为:

$$\begin{cases} di/dt = D/\frac{2\sin\frac{\omega T_s}{2}}{\omega T_s} \\ i = i_{avg}/\cos\frac{\omega T_s}{2} \end{cases}$$
(9)

式中:i为特征电流。

3.4 主动注入式故障测距方法流程

本文所提适用于 UPFC 接入线路的主动注入式 故障测距方法的具体动作时序如附录 A 图 A4 所示, 其可分为以下 3 个阶段。

1)第一阶段:故障隔离,线路去游离。

2)第二阶段:主动注入特征电压后,首先计算各 相特征电流积分,选出故障相,然后选择对应的测距 方程计算故障距离。

3)第三阶段:根据故障测距结果执行线路重合 闸或停运检修。

4 仿真验证

为验证本文所提适用于 UPFC 接入线路的主动 注入式故障测距方法的有效性,参照国内某 500 kV UPFC 示范工程参数,在 PSCAD / EMTDC 软件中搭 建如图 1 所示的 UPFC 接入线路仿真模型。UPFC 模 型仿真参数如附录 A 表 A1 所示。UPFC 接入线路MN的长度为 40 km,线路参数为: r_1 =0.0196 Ω / km, l_1 = 0.9119 mH / km, c_1 =0.0129 µF / km; r_0 =0.1828 Ω / km, l_0 =2.700 mH / km, c_0 =0.005 2 µF / km。采样频率为 5 kHz。

4.1 特征电压输出特性验证

为验证本文所提主动注入式特征电压的输出特性,在UPFC接入线路两端的交流断路器跳开后,闭

合串联变压器网侧三相接地开关,串联侧 MMC 解锁,向接入线路主动注入特征电压,注入开始后40 ms内的特征电压输出波形如附录 A 图 A5 所示。 由图可见,由于 MMC 的响应速度为毫秒级,串联侧 MMC 解锁后经过短暂的响应延时,接入线路便可 注入幅值为 0.2 p.u.、频率为 50 Hz 的交流三相特征 电压。

4.2 故障测距方法验证

在 UPFC 接入线路 10、20、40 km 处分别设置不 同类型的金属性短路故障,对本文方法在不同故障 位置下的准确性进行验证。以UPFC 接入线路40 km 处发生 AB 相间短路故障为例,接入线路各相电流波 形和电流积分分别如附录 A 图 A6、A7 所示。由图可 见,对于 AB 相间短路故障,故障相线路将产生明显 的特征电流,非故障相电流为0,故障相电流积分远 大于非故障相电流积分,因此通过判断各相电流积 分值的大小便可实现故障选相。

采用式(10)计算故障测距方法的误差率,则当 UPFC 接入线路 10、20、40 km 处发生 AB 相间短路故 障时,本文方法的误差率如图 6 所示。

$$\delta = \frac{l_{\text{mea}} - l_{\text{fau}}}{l_{\text{fau}}} \times 100 \% \tag{10}$$

式中: δ 为误差率; l_{mea} 和 l_{fau} 分别为测量距离和实际故障距离。





由图6可以看出,不同故障位置发生AB相间短路故障时,本文方法的误差率均落在0附近。若将40ms处的误差率作为最终的结果,不同故障位置发生不同类型的故障时,本文方法的故障测距结果和误差率如表1所示。表中,AG、ABG、AB、ABC分别表示A相接地、AB相间接地、AB相间短路、三相短路故障。由表可见,在不同故障位置下测距结果均满足±1%的精度要求,具有较高准确性。

4.3 过渡电阻的影响

为验证过渡电阻对故障测距的影响,在UPFC 接入线路10、20、40 km处分别设置过渡电阻为50、 100、300 Ω的接地故障和过渡电阻为10、25、50 Ω的 相间故障。UPFC 接入线路40 km处发生过渡电阻 为10、25、50 Ω的AB相间接地故障时,本文方法的

表1 不同故障位置发生不同类型的故障时, 本文方法的故障测距结果和误差率

 Table 1
 Fault locating results and error rate of proposed method under different faults

in different fault locations

故障类型	$l_{\rm fau}$ / km	$l_{\rm mea}$ / km	δ / %
	10	9.97	-0.300
AG	20	19.95	-0.250
	40	39.95	-0.125
	10	10.03	0.300
ABG	20	19.92	-0.400
	40	39.86	-0.350
	10	10.02	0.200
AB	20	20.06	0.300
	40	39.88	-0.300
	10	9.98	-0.200
ABC	20	19.94	-0.300
	40	40.08	0.200

误差率如附录A图A8所示。由图可见,在特征电压 注入期间,不同过渡电阻下本文方法的误差率均稳 定在0附近。线路40、10、20km处发生不同过渡电 阻的故障时,本文方法的故障测距结果分别如表2、 附录A表A2和表A3所示。由表中数据可知,在不 同的过渡电阻场景下,本文方法的故障测距误差率 均小于±1%,故障测距结果几乎不受过渡电阻的 影响。

表2 线路40 km 处发生不同过渡电阻的故障时, 本文方法的故障测距结果

Table 2 Fault locating results of proposed methodunder faults with different transition

resistances at 40 km of line

故障类型(l _{fau} /km)	$R_{ m f}$ / Ω	$l_{\rm mea}/{\rm km}$	δ/%
	50	40.05	0.125
AG(40)	100	40.21	0.525
	300	39.70	-0.750
	50	39.92	-0.200
ABG(40)	100	39.85	-0.375
	300	40.32	0.800
	10	40.08	0.200
AB(40)	25	40.12	0.300
	50	40.15	0.375
	10	39.94	-0.150
ABC(40)	25	39.90	-0.250
	50	40.16	0.400

4.4 噪声的影响

为分析噪声干扰对故障测距的影响,以UPFC 接入线路20km处发生AB相间经50Ω过渡电阻短 路故障为例,在电压信号中分别加入信噪比为10dB 和20dB的高斯白噪声,对应的故障相特征电压波 形图和本文方法的故障测距误差率分别如附录A图 A9、A10所示。由图A9可见,相比于原始电压波形, 加入噪声干扰后的电压波形出现明显的毛刺。由图 A10可见,由于本文方法采用了巴特沃斯低通滤波器,以40ms处的故障测距误差率作为最终结果,故 障测距精度几乎不受噪声的干扰。

4.5 与典型故障测距方法的比较

本文所提方法与被动式故障测距方法在 UPFC 接入线路场景下的性能比较如表 3 所示。由表可见,本文所提主动注入式故障测距优势如下:

1)本文方法充分利用 UPFC 的高可控性特点, 无需附加设备便可注入特征信号进行故障测距,与 被动式故障测距方法相比,其可进行多次测量,故障 测距可靠性更高;

2)与行波测距法相比,本文方法对采样频率要 求低,且不受故障初始角的影响;

3)本文所提方法可避免传统被动式故障测距方 法在UPFC接入线路场景下易受UPFC运行方式及 故障暂态调控的问题;

4)故障线路仅 UPFC 侧接入电气量, 可避免对 端电源的影响,具有较高的抗过渡电阻能力;

5)本文所提方法将UPFC的功能从原有潮流控制扩展到线路保护方面,有利于提升UPFC的利用率,并且可以进一步保障UPFC接入电网的安全运行。

表3 UPFC 接入线路故障测距方法性能比较

 Table 3
 Performance comparison among fault

locating methods for transmission line

equipped with UPFC

评价指标	故障分析 测距法	行波 测距法	本文方法
电气量	单端/双端	单端 / 双端	主动注入
双端数据 同步性要求	—/高	—/高	—
采样频率要求	低/低	高/高	低
抗过渡电阻能力	弱/强	弱/弱	强
是否受故障初始角影响	否/否	是/是	否
是否受UPFC运行方式和 故障暂态调控影响	是/是	是/是	否
是否可以多次量测	否/否	否 / 否	是

5 结论

本文针对UPFC接入线路发生故障的场景,提 出了一种基于UPFC的主动注入式故障测距方法。 该方法采用控保协同思想,充分利用UPFC高度的 可控性,无需额外增加设备便可向接入线路主动注 入特征电压信号,进而利用单端量电气量实现故障 测距,可解决传统被动式故障测距方法在UPFC接 入线路场景下易受UPFC运行方式及对侧电源电流 影响的问题,具有较强的抗过渡电阻能力与抗噪声 干扰能力,可提高UPFC接入线路的故障测距精度 与故障恢复速度,保障UPFC接入电网的安全稳定 运行。 附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]杨健,宋鹏程,徐政,等.特高压直流接入背景下的UPFC系统 级控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(10):109-117.
 YANG Jian, SONG Pengcheng, XU Zheng, et al. System-level control strategy for UPFC power grids integrated with UHVDC
 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(10):109-117.
- [2] 柯永超,廖凯,李波,等.基于双层优化规划的线路过载控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(12):158-165.
 KE Yongchao, LIAO Kai, LI Bo, et al. Line overload control strategy based on bi-level optimization programming[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(12):158-165.
- [3] 刘津濂,徐政,杨健,等.关于多特征自变量调节的含UPFC电 力系统的潮流变化率特性[J].电力自动化设备,2021,41(1): 186-191,210.

LIU Jinlian, XU Zheng, YANG Jian, et al. Regulation principle of power flow gradient to multiple characteristic independent variables in UPFC embedded power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1):186-191, 210.

[4] 郑涛,王赟鹏,马家璇,等. 基于模糊逻辑的 UPFC 线路新型 正序故障分量方向元件[J]. 电力系统自动化,2020,44(17): 145-152.

ZHENG Tao, WANG Yunpeng, MA Jiaxuan, et al. Fuzzy logic based novel directional relay using positive-sequence fault component for line equipped with unified power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 145-152.

- [5] KONG Xiangping, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. A three-zone distance protection scheme capable to cope with the impact of UPFC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (2):949-959.
- [6] 郑涛,王赟鹏,李厚源,等. 基于混合型Chopper电路的MMC-UPFC故障渡越方案[J]. 电力自动化设备,2021,41(2):97-103,117.

ZHENG Tao, WANG Yunpeng, LI Houyuan, et al. Fault ride through scheme of MMC-UPFC based on hybrid Chopper circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 97-103, 117.

- [7] 赵静波,卫志农,朱梓荣,等. 计及设备动作次数约束与 UPFC 的无功优化算法[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):179-187.
 ZHAO Jingbo, WEI Zhinong, ZHU Zirong, et al. Reactive power optimization algorithm considering device action times and UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(12): 179-187.
- [8]杨健,蔡晖,宋鹏程,等.采用直接电流控制策略的MMC-UPFC 小信号模型[J].电力自动化设备,2019,39(10):123-129.
 YANG Jian, CAI Hui, SONG Pengcheng, et al. Small-signal model of MMC-UPFC with direct current control strategy[J].
 Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):123-129.
- [9] 胡婷,游大海,金明亮. 输电线路故障测距研究现状及其发展
 [J]. 电网技术,2006(S1):146-150.
 HU Ting, YOU Dahai, JIN Mingliang. Present situation and development of fault location for transmission lines[J]. Power System Technology,2006(S1):146-150.
- [10] 邢志杰,田行军,刘宇晰,等. 电缆-架空线混合线路行波故障 测距算法研究[J]. 电网技术,2020,44(9):3540-3546.
 XING Zhijie,TIAN Xingjun,LIU Yuxi, et al. Research of traveling wave fault location algorithm for the overhead line-cable hybrid line[J]. Power System Technology, 2020,44(9): 3540-3546.
- [11] 张韵琦,丛伟,张玉玺. 基于初始电压行波频域衰减速率的

MMC-HVDC线路保护方案[J]. 电力自动化设备,2020,40(12): 143-152.

ZHANG Yunqi, CONG Wei, ZHANG Yuxi. MMC-HVDC line protection scheme based on frequency-domain attenuation rate of initial voltage traveling wave [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 143-152.

- [12] ABD EL-GHANY H A, AZMY A M, ABEID A M. A general travelling-wave-based scheme for locating simultaneous faults in transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1):130-139.
- [13] 李跃,郑涛,文安. 基于单端量的超高压交流输电线路单相接
 地故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(6):
 27-33.
 LI Yue, ZHENG Tao, WEN An. A new location method for
 - UHV AC transmission lines with high resistance faults based on single terminal volume[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6):27-33.
- [14] 郑涛,汤哲,张滋行,等.统一潮流控制器对继电保护的影响及 对策研究综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(15):171-178.
 ZHENG Tao,TANG Zhe,ZHANG Zihang, et al. Review of the influence of unified power flow controller on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(15):171-178.
- [15] 吕哲,王增平,许琬昱,等.基于母线关联出线暂态频谱信息的 UPFC线路纵联保护[J].电力系统自动化,2020,44(2):139-146. LÜ Zhe,WANG Zengping,XU Wanyu, et al. Pilot protection of UPFC line based on transient spectrum information of busbar-connected outgoing lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(2):139-146.
- [16] 宋国兵,陶然,李斌,等. 含大规模电力电子装备的电力系统故 障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):2-12. SONG Guobing,TAO Ran,LI Bin,et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(12):2-12.
- [17] 宋国兵,侯俊杰,郭冰. 基于主动探测式的混合 MMC 直流输电系统单端量故障定位[J]. 电网技术,2021,45(2):730-740.
 SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing. Single-ended fault location of hybrid MMC-HVDC system based on active detection[J]. Power System Technology,2021,45(2):730-740.
- [18] 王帅,毕天姝,贾科. 基于主动脉冲的 MMC-HVDC 单极接地故障测距[J]. 电工技术学报,2017,32(1):12-19.
 WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Single terminal fault location for MMC-HVDC transmission line using active pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 12-19.
- [19] 杨赛昭,向往,杨睿璋,等.基于半桥型MMC和混合式DCCB的柔直系统直流故障自适应重合闸技术[J].中国电机工程学报,2020,40(14):4440-4451,4724. YANG Saizhao,XIANG Wang,YANG Ruizhang, et al. Research on adaptive reclosing technology for the half-bridge MMC and hybrid DC circuit breaker based on HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(14):4440-4451,4724.
- [20] 李斌,孙强,何佳伟,等.基于谐波注入的柔性直流系统接地极 线路故障测距方法[J].电网技术,2020,44(12):4773-4782.
 LI Bin,SUN Qiang,HE Jiawei,et al. Fault location for grounding electrode line of MMC DC system based on harmonic injection[J]. Power System Technology,2020,44(12):4773-4782.
- [21] 索南加乐,刘文涛,陈勇,等. 基于 R-L模型误差的自适应距离 保护[J]. 电力系统自动化,2006,30(22):66-72.
 SUONAN Jiale,LIU Wentao,CHEN Yong, et al. Adaptive dis-

tance protection based on R-L model $\operatorname{error}[J]$. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22):66-72.

- [22] 杨奇逊. 微型机继电保护基础[M]. 北京:中国电力出版社, 2005:95-101.
- [23] LI Houyuan, ZHENG Tao, HUANG Shaofeng, et al. UPFC fault ride-through strategy based on virtual impedance and current limiting reactor [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125:106491.
- [24] 索南加乐,王增超,康小宁,等.基于线性微分方程参数识别的单端准确故障测距算法[J].电力自动化设备,2011,31(12): 9-14,20.
 SUONAN Jiale,WANG Zengchao,KANG Xiaoning, et al. Accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation with single end data[J].
- Electric Power Automation Equipment,2011,31(12):9-14,20. [25] 宋国兵,侯俊杰,郭冰,等. 计及主动故障限流策略的柔性直流
- 电网纵联保护[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):123-131,138. SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of flexible DC grid considering active fault current limiting strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):123-131,138.
- [26] 张振华,牛志雷,陈干杰,等. 引入 IIR 滤波器对换流变增量差

动暂态性能的影响分析[J]. 电测与仪表,2018,55(2):129-136. ZHANG Zhenhua, NIU Zhilei, CHEN Ganjie, et al. Analysis of the impact of using IIR filter in incremental differential protection of converter transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(2):129-136.

[27] 裘愉涛,潘武略,倪传坤,等.风电场送出线等传变距离保护
 [J].电力系统保护与控制,2015,43(12):61-66.
 QIU Yutao, PAN Wulüe, NI Chuankun, et al. Equal transfer process-based distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12):61-66.

作者简介:



郑 涛(1975—),男,教授,博士,主要 研究方向为新能源电力系统保护与控制 (**E-mail**:zhengtao_sf@126.com);

王赟鹏(1996—),男,硕士研究生,主 要研究方向为新能源电力系统保护与控制 (E-mail:wangyunpeng_1996@foxmail.com)。 (编辑 任思思)

Fault locating method based on active injection for transmission lines equipped with UPFC

ZHENG Tao, WANG Yunpeng, MA Jiaxuan, SONG Xiangyan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the problem that the locating accuracy of the traditional passive fault locating methods is difficult to guarantee in scenario of lines equipped with UPFC (Unified Power Flow Controller), an active injection fault locating method for transmission lines equipped with UPFC based on the idea of coordinated control and protection is proposed. After isolating the fault, the proposed method makes full use of the high controllability of MMC-UPFC (Modular Multilevel Converter based UPFC), switches the MMC (Modular Multilevel Converter) at the series side to the additional control mode, actively injects the characteristic voltage into the transmission line, and then realizes fault locating through the differential equation algorithm based on single-end parameters. The proposed method uses UPFC as the signal source and injects electrical signals into the access line to construct the fault locating equation, which can solve the problem that the passive fault locating method is susceptible to the operation characteristics of UPFC and transmission line equipped with UPFC is built in PSCAD / EMTDC simulation platform and the simulative results verify the feasibility and effectiveness of the proposed fault locating method.

Key words: unified power flow controller; power transmission line; fault locating; active injection

附录 A



图 A1 MMC-UPFC 基本结构

Fig.A1 Basic structure of MMC-UPFC



图 A2 UPFC 接入线路等效电路

Fig.A2 Equivalent circuit of transmission line equipped with UPFC

图 2 中, E_M 和 E_N 为两端系统等效电源; U_{se} 为线路 MN 接入的 UPFC 串联电压; I_{sh} 为 UPFC 注入的并联电流; Z_{sm} 和 Z_{sn} 分别为 M、N 端系统阻抗; Z_{mn} 表示线路 MN 的等值阻抗。



图 A3 MMC 拓扑结构 Fig.A3 Topology of MMC



图 A4 主动注入式故障测距方法动作时序图

Fig.A4 Operation time sequence diagram of fault location method based on active injection



Fig.A5 Waveform of active injection characteristic voltage

(图中, *u* 为特征电压标幺值, 后同)



Fig.A6 Waveform of characteristic current under phase AB short circuit fault



Fig.A7 Integral value of characteristic current under phase AB short circuit fault



图 A8 发生 AB 相间接地故障测距误差率

Fig.A8 Fault location error rate of AB phase grounding fault in different transition resistances



图 A9 不同噪声干扰下故障相特征电压波形

Fig.A9 Fault phase characteristic voltage waveform in different noise interferences



图 A10 不同噪声干扰下 AB 相间短路故障测距误差率

Fig.A10 Location error rate of AB phase short circuit fault in different noise interferences

表 A1 UPFC 仿真参数

Table A1 Simulation parameters of UPFC

参数	参数值
系统电压/kV	500
直流电压/kV	180
串、并联側 MMC 容量/(MV・A)	250
并联变漏抗/%	10
串联变漏抗/%	20
并联变绕组变比/kV(Y₀/△/Y)	505/36/94
串联变绕组变比/kV	12 5/26/105
(Ⅲ(开口Y)/△/Y)	43.3/30/103
串并联变压器阀侧中性点	2000
接地电阻/Ω	2000

表 A2 线路 10km 处发生不同过渡电阻的故障时,本文方法的故障测距结果

Table A2 Fault location results of proposed method under faults with

故障类型	故障距离/km	过渡电阻/Ω	测量距离/km	误差率/%
		50	9.98	-0.2
AG	10	100	10.05	0.5
		300	10.08	0.8
		50	9.96	-0.4
ABG	10	100	9.94	-0.6
		300	10.06	0.6
		10	10.01	0.1
AB	10	25	10.02	0.2
		50	9.97	-0.3
		10	9.98	-0.2
ABC	10	25	10.02	0.2
		50	9.97	-0.3

different transition resistances at 10km of line

表 A3 线路 20km 处发生不同过渡电阻的故障时,本文方法的故障测距结果

Table A3 Fault location results of proposed method under faults with

	different trans	nion resistances	at 20km of mic	
故障类型	故障距离/km	过渡电阻/Ω	测量距离/km	误差率/%
		50	19.94	-0.30
AG	20	100	19.88	-0.60
		300	20.16	0.80
		50	19.92	-0.40
ABG	20	100	20.09	0.45
		300	19.88	-0.60
		10	20.02	0.10
AB	20	25	20.05	0.25
		50	20.08	0.40
		10	20.02	0.10
ABC	20	25	20.04	0.20
		50	19.94	-0.30

different transition resistances at 20km of line