

基于数字孪生的柔性直流电网纵联保护原理

李猛, 聂铭, 和敬涵*, 陈可傲, 王小君, 许寅

(北京交通大学电气工程学院, 北京市 海淀区 100044)

Pilot Protection of Flexible DC Grid Based on Digital Twin

LI Meng, NIE Ming, HE Jinghan*, CHEN Ke'ao, WANG Xiaojun, XU Yin

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: With the development of flexible DC transmission technology, DC grid has attracted more and more attention. However, the rapid rise of the fault current of the DC grid has a prominent contradiction with the weak overcurrent capability of power electronics. The DC line protection needs to complete the fault recognition in a few milliseconds with selectivity, reliability, and sensitivity, which is extremely challenging. A pilot protection based on digital twins was proposed for flexible DC transmission systems. On the basis of considering the frequency variation of DC line parameters, an accurate DC line digital twin model was established. The redundancy feature of state estimation was used to improve the reliability of protection, and the fault was judged by comparing the difference between the measured value and the estimated value. The simulation shows that the proposed protection principle can quickly and reliably distinguish the internal and external faults. This principle has the advantages of high fault resistance tolerance and strong anti-interference ability.

KEY WORDS: flexible DC; digital twin (DT); pilot protection; dynamic state estimation; frequency dependent parameters

摘要: 随着柔性直流输电技术的发展, 直流电网越来越受到关注。但是, 直流电网故障电流上升速度快, 与电力电子的弱过流能力形成突出矛盾。直流线路保护需在数毫秒级完成故障判别, 同时还需兼顾选择性、可靠性、灵敏性, 极具挑战性。该文提出了基于数字孪生的柔性直流输电系统纵联保护原理, 在考虑直流线路参数频变的基础上, 建立精确的直流线路数字孪生模型, 利用状态估计的冗余特征提升了保护的可靠性, 通过比较测量值与估计值之间的差异判别故障。仿真表明, 所提保护方法可快速可靠地判别区内、外故障, 并具有较好的耐受过渡电阻和抗干扰的能力。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52007003); 国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金项目(U2066210)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52007003); National Natural Science Foundation of China-State Grid Joint Fund for Smart Grid (U2066210).

关键词: 柔性直流; 数字孪生; 纵联保护; 动态状态估计; 频变参数

0 引言

柔性直流以其控制灵活、便于组网、无换相失败等优势, 已被应用于新能源并网、海岛输电、异步联网等多个场景, 具有良好发展前景^[1]。我国目前正在建设世界首个柔性直流电网一张北示范工程。然而, 柔性直流过流能力弱与故障电流上升速度快之间的矛盾, 要求保护需在极短时间内隔离故障。张北示范工程要求6ms内隔离故障, 考虑3ms的直流断路器动作时间, 直流线路保护需在3ms内有选择地完成故障判别。因此, 柔性直流电网如何快速、可靠、有选择识别直流线路故障是亟待解决的难题。

目前, 柔性直流输电系统的保护主要借鉴常规高压直流输电系统保护, 主保护采用行波保护和突变量保护, 后备保护采用纵联差动保护^[2]。行波保护和微分欠压保护可满足速动性要求, 但耐受过渡电阻能力以及抗噪声、雷击等干扰的能力有待提升。纵联差动保护可耐受较高过渡电阻, 但受到线路分布电容的影响, 需依赖长延时躲过暂态电容电流的影响, 其速动性有待提升。

为了提升保护性能, 国内外学者进行了大量研究。文献[3]针对行波保护耐受过渡电阻能力差的问题, 利用零模电流拟合的方法实现了自适应单端行波保护法, 但是未考虑雷击干扰的影响。文献[4]提出了基于行波固有频率的保护原理, 降低了行波保护对采样率的要求, 但过渡电阻、线路频变参数以及行波在故障点的交叉渗透都会对固有频率造成影响。文献[5]利用小波变换提取暂态能量构成方

向元件, 但会受到过渡电阻和换流器闭锁的影响。文献[6]提出基于分布参数模型对线路分布电容进行补偿, 以提升差动保护的速动性, 文献[7]提出基于贝瑞隆模型的柔性直流线路动态状态估计保护, 可很好的耐受高阻故障, 但两种方法均未考虑参数的频变特性。文献[8]提出在直流线路上设置多个分布式光电流传感器, 可以削弱线路分布电容的影响, 不过增加了设备成本。文献[2]提出了行波差动保护, 考虑行波的衰减函数来解决线路分布电容的问题, 但该保护需要引入电压测量, 对电气量测量精度要求较高。

数字孪生是通过采集设备数据, 构建一个可以表征该物理对象的数学模型, 并比较工程设计和数学模型的区别, 最终加强对设备全生命周期的有效管理^[9-11]。数字孪生已陆续应用于高端制造业^[12]、航空航天^[13]、油气行业^[14]等多领域。在电力系统领域, 文献[15]探索了数字孪生的早期应用, 分析了机遇与挑战; 文献[16]设计了电力系统数字孪生的架构以及模块; 文献[9,17]介绍了数字孪生在能源互联网中的应用, 通过案例证明了数字孪生技术的作用; 文献[18]分析了数字孪生在智慧城市建设中的需求与意义, 探讨了基本技术框架及挑战。美国佐治亚理工学院在交流系统中提出了基于动态状态估计的保护^[19-20], 该保护基于保护对象的数学模型进行动态状态估计, 可以认为是数字孪生思想在保护的探索。然而, 在直流电网保护领域尚未见数字孪生的应用。不过, 数字孪生思想却为如何解决直流保护“四性”之间的尖锐矛盾提供了一种新思路。

本文提出基于数字孪生的柔性直流线路纵联保护新原理, 将数字孪生思路融入直流线路保护研究, 全面提升保护性能, 解决“四性”矛盾。根据保护对象所满足的各种物理规律建立数字孪生模型, 根据实时电气量采样与孪生模型的匹配程度, 识别区内故障。本方法理论上不受线路分布电容、参数频变以及过渡电阻的影响, 通信延时可由电气传输延时部分补偿, 并具有天然的选择性。

1 数字孪生介绍

数字孪生(digital twin, DT)于2002年被提出, 经过十余年的发展, 数字孪生的定义和应用领域也在不断的完善与扩展^[15]。美国国防大学对数字孪生的定义为: 充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据, 集成多学科、多物理量、多尺度、多

概率的仿真过程, 在虚拟空间中完成映射, 从而反映相对应的实体装备的生命周期过程^[9]。

数字孪生包括3个主要部分, 如图1(a)所示:

- 1) 现实空间的物理对象;
- 2) 虚拟空间的孪生模型;
- 3) 物理对象与孪生模型间的信息闭环交互。

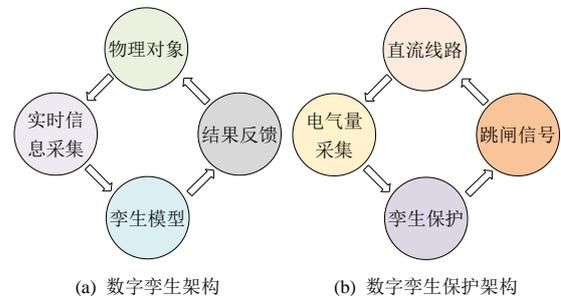


图1 数字孪生架构

Fig. 1 Digital twin architecture

数字孪生不仅仅是对现实空间物理对象的刻画, 同时也在与现实物理对象进行数据交互。一方面, 物理实体的状态和信息会传递给数字孪生, 通过数据处理以实现数字孪生的实时修正; 另一方面, 数字孪生将虚拟空间的结果反馈给物理实体, 以进行优化的决策。

数字孪生的重点和难点在于孪生模型的建立以及如何实时闭环交互。孪生模型根据建立方式可分为模型驱动型和数据驱动型。模型驱动型是通过揭示对象所遵循的物理规律而建立数学模型。数据驱动型是通过挖掘历史数据的内在规律而建立模型。

数字孪生概念的提出对于电力系统继电保护研究具有重要的指导意义。继电保护本就暗含数字孪生概念, 保护的采样和跳闸对应着数字孪生系统的信息闭环交互, 保护原理对应着虚拟空间模型。但现有保护尚难以称之为数字孪生系统, 主要在于已有保护原理多是基于对象所遵循的部分物理规律, 如差动保护基于KCL, 距离阻抗保护基于KVL, 行波保护基于行波传变规律等。换言之, 现有保护所基于的物理规律难以完整刻画所保护的物体, 因此均存在一些不足: 如差动保护受分布电容的影响, 距离保护受过渡电阻的影响, 行波保护受雷击干扰的影响等。而数字孪生思想为提升继电保护性能指明了一种方向, 即充分利用对象所遵循的各种物理规律。因此, 实现数字孪生保护的重点在于如何建立精确的孪生模型以及如何快速、可靠判别故障。数字孪生保护架构如图1(b)所示。

2 孪生模型

精确模型是数字孪生保护的重点和难点。本节

深度挖掘直流线路所遵循的各种物理规律，在频域内进行数学建模，再利用递归卷积定理得到模型的时域表达。

2.1 合理简化

首先，对柔性直流线路进行合理假设简化：

1) 地线(避雷线)全长为地电位；2) 正、负极线路参数对称。

对于假设 1)，架空线路的地线在每座杆塔处接地，而 3 座杆塔之间的跨度一般为 350m 左右，因此一般认为如果考虑的频段在 350kHz 以下，即可假设地线全长为地电位。保护的采样频率一般为 10kHz，最高不超过 50kHz，远小于 350kHz，因此第一条假设是合理的，通过这一假设可以简化阻抗矩阵的维数。

对于假设 2)，正、负极线路参数对称对于直流线路是容易满足的。在这条假设前提下，相模转换矩阵为常数矩阵，可将相互耦合的两极解耦成相互独立的 0-1 模分量，在模域内建立孪生模型。

$$T = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 依频模型

后续的分析如无特殊说明均表示模域，且不再明确指出线模或地模。由于线路参数呈现频变特性，首先在频域内进行分析，线路一端的前行波 $F(\omega)$ 、反行波 $B(\omega)$ 与端电压 $U(\omega)$ 、端电流 $I(\omega)$ 之间的关系如式(2)所示^[21]：

$$\begin{cases} F_n(\omega) = U_n(\omega) + Z_c(\omega)I_n(\omega) \\ B_n(\omega) = U_n(\omega) - Z_c(\omega)I_n(\omega) \\ Z_c(\omega) = \sqrt{[R(\omega) + j\omega L(\omega)][G(\omega) + j\omega C(\omega)]} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $n=k, m$ 为线路两端名称； $Z_c(\omega)$ 为线路特征阻抗； $R(\omega)$ 、 $L(\omega)$ 、 $G(\omega)$ 、 $C(\omega)$ 分别为线路单位长度的电阻、电感、电导、电容，均为频变参数。

线路两端前行波与反行波之间的关系为

$$\begin{cases} B_k(\omega) = A(\omega)F_m(\omega) \\ B_m(\omega) = A(\omega)F_k(\omega) \\ A(\omega) = e^{-\gamma(\omega)l_c} \\ \gamma(\omega) = \sqrt{[R(\omega) + j\omega L(\omega)][G(\omega) + j\omega C(\omega)]} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $A(\omega)$ 为衰减函数，是一个复数； $\gamma(\omega)$ 为线路传播系数； l_c 为线路长度。将式(2)和式(3)联立可得：

$$U_k(\omega) - Z_c(\omega)I_k(\omega) = A(\omega)F_m(\omega) \quad (4)$$

上述频域内公式通过递归卷积公式转换到

域，可得直流线路模域内依频模型等值电路图，如图 2 所示。等值电路图中受控电压源为本端的电压反行波：

$$E_k(t) = b_k(t) = \int_{\tau}^{\infty} f_m(t-u)a(u)du \quad (5)$$

式中 τ 为最快行波在全长输电线上的传播时间。

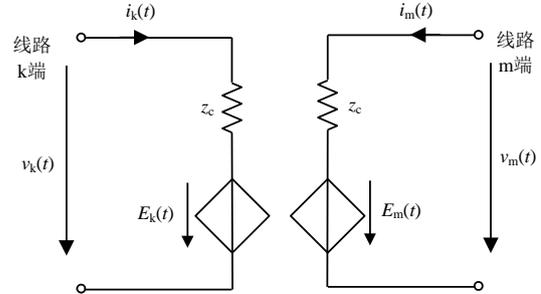


图 2 直流线路模域依频模型等值电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of DC line mode domain by frequency model

递归卷积定理可对于指数函数的卷积直接通过历史值进行计算：

$$s(t) = \int_T^{\infty} f(t-u)de^{-\alpha(u-T)}du = ms(t - \Delta t) + cf(t - T) + qf(t - T - \Delta t) \quad (6)$$

式中： d, α, T 为已知常数； Δt 为采样间隔； m, c, q 均为常数，由 $d, \alpha, \Delta t$ 计算获得。

当利用递归卷积时，被卷积的函数必须是指数函数之和的形式，因此需将频域内的特征阻抗和衰减函数拟合成为有理式的形式：

$$\begin{cases} Z_c(s) = l_0 + \frac{l_1}{s + p_1} + \frac{l_2}{s + p_2} + \dots + \frac{l_n}{s + p_n} \\ A(s) = \left(\frac{l_1}{s + p_1} + \frac{l_2}{s + p_2} + \dots + \frac{l_n}{s + p_n} \right) e^{-sr} \end{cases} \quad (7)$$

综上，根据推导的依频模型以及递归卷积定理，可获得直流线路在时域内的数字孪生模型。

3 基于数字孪生的纵联保护

在孪生模型建立后，另一重点是如何判别区内故障。本文的思路是校验线路两端电气量与所建立孪生模型是否匹配，如果匹配则说明所保护线路的物理结构是完好的，不匹配则表示线路发生了区内故障。具体校验方式是利用动态状态估计方法对孪生模型进行估计，根据估计残差的大小进行判别。

3.1 建立系统测量方程

结合孪生模型以及测量量与状态量，建立系统测量方程。以 k 端为例，测量量分为 2 类：真实测量量与虚拟测量量。真实测量量包括模域内线路端

点处的电流与电压($i_k^1(t)$ 、 $i_k^0(t)$ 、 $v_k^1(t)$ 、 $v_k^0(t)$)，可通过极电流和极电压利用相模转换矩阵得到。虚拟测量量代表孪生模型所满足的关系，例如线路上k侧电压反行波等于m侧电压前行波乘以衰减函数：

$$0 = E_k(t) - \int_{\tau}^{\infty} F_m(t-u)A(u)du = E_k(t) - m_2 E_m(t-\Delta t) - p_2 [2v_m(t-\tau) - E_m(t-\tau)] - q_2 [2v_m(t-\tau-\Delta t) - E_m(t-\tau-\Delta t)] \quad (8)$$

式中： τ 为最快行波在全长输电线上传播的时间；0为根据物理规律确定的值，因此可作为虚拟测量量。由式(8)可知，当计算k侧的电压反行波 $E_k(t)$ 时，仅需要m侧 τ 时间之前的数据，这为通信延时补偿提供了可能。

对于状态量，包含线路端点处的线模和零模电压($v_k^1(t)$ 、 $v_k^0(t)$)、受控电压源的值和端口的电压反行波值($E_k^1(t)$ 、 $E_k^0(t)$)。

根据上述测量量与状态量，建立测量方程：

$$z_k = h(x_k) + v_k = Y_k x_k + C_k + v_k \quad (9)$$

式中： k 为线路端名称； z 为测量列向量，包含真实测量值与虚拟测量值； x 为状态列向量； Y 为关系矩阵，由线路参数提前获得，为已知量； C 为测量量与状态量的历史值矩阵； v 表示测量误差列向量。

3.2 动态状态估计

由于上述测量方程的测量量个数大于状态量个数，因此需要利用状态估计方法进行估计，本文采用加权最小二乘估计法。加权最小二乘估计的目标是将残差归一化的平方和最小化，以得到最佳估计的状态量：

$$\text{Min}J(x) = [z - h(x)]^T W [z - h(x)] = r^T W r = \sum \frac{r_i^2}{\sigma_i^2} \quad (10)$$

式中： W 为权重矩阵，反应每个测量量的噪声水平。权重矩阵 W 为对角阵，对角元素为相应测量量的标准偏差平方值的倒数。标准差 σ 选取在3.3节详细给出。

当线路参数已知， $h(x)$ 为线性函数，估计的状态量为

$$\hat{x} = (H^T W H)^{-1} H^T W (z - C) \quad (11)$$

式中 H 为 $h(x)$ 的雅克比矩阵。

获得所有的最佳状态量估计值后，可计算得到测量量的估计值 \hat{z} 与归一化残差平方和 ζ ：

$$\hat{z} = h(\hat{x}) = Y\hat{x} + C \quad (12)$$

$$\zeta = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\hat{z}_i - z_i}{\sigma_i} \right]^2 \quad (13)$$

3.3 保护判据

通过残差归一化平方和可以判别是否发生区内故障，如果线路无故障(孪生模型与物理线路一致)，所有测量量的残差均符合高斯分布，则估计的残差归一化平方和 ζ 将符合卡方分布 $\chi^2(K)$ 。卡方分布的概率密度如式(14)所示，其中 K 为卡方分布的自由度， Γ 表示伽马函数，图3显示了各种自由度的概率密度曲线，对本文来说 K 为测量量大于状态量的个数。

$$f(x) = \frac{x^{(K-2)/2} e^{-x/2}}{2^{K/2} \Gamma(K/2)}, \quad x > 0 \quad (14)$$

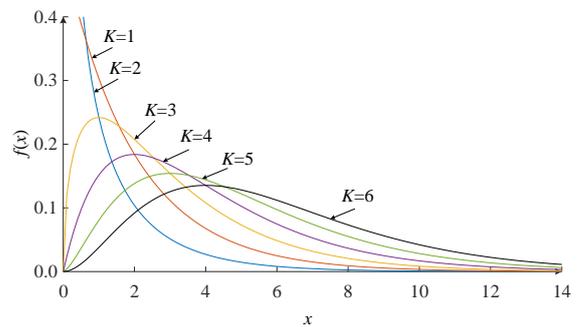


图3 卡方分布的概率密度曲线

Fig. 3 Probability density curve of chi-square distribution

当卡方分布大于某个值的概率，可由式(15)计算。由卡方分布的概率密度曲线可知，当卡方分布大于某一较大的值的概率是较小的。

$$P[\chi^2(K) \geq \chi_{\alpha}^2(K)] = \int_{\chi_{\alpha}^2}^{\infty} f(\chi^2) d\chi^2 = \alpha \quad (15)$$

因此，当 ζ 的值很大时，意味着 ζ 符合卡方分布的概率极小，反之言之是有较大的概率发生了线路内部故障。合理设置残差归一化平方和 ζ 的门槛可检测区内故障。

因此，设置如下故障判别门槛：

$$T_{rip}(t) = \begin{cases} 1, & \int_{t-T_{set}}^t P(\tau) d\tau \geq S \\ 0, & \int_{t-T_{set}}^t P(\tau) d\tau < S \end{cases} \quad (16)$$

$$P(t) = \begin{cases} 1, & \zeta \geq \zeta_{set} \\ 0, & \zeta < \zeta_{set} \end{cases}$$

式中： $T_{rip}(t)=1$ 表示继电器发出跳闸信号，被保护线路断路器应立即跳闸； T_{set} 为判据窗长，提高保护的可靠性； S 为保护动作的阈值； $P(t)=1$ 表示可能发生了区内故障，而 $P(t)=0$ 表示所保护线路是正常运行状况； ζ_{set} 为残差判别阈值。

本文的残差判别阈值 ζ_{set} 设置为5.991。根据卡方分布表可查， $\chi_{0.05}^2(2) = 5.991$ ，即当残差的归一

化平方和 $\chi^2 \geq 5.991$ 时，则认为有 95% 的概率发生了内部故障(不符合卡方分布)。但这并不意味着保护将有 5% 的概率发生误动，因为保护会多次判定后才出口。对于 4 次以上判定，误判概率已降到 0.00001 以下，如此小的概率只具有统计意义。

综合考虑可靠性与灵敏性，确保区外故障时保护可靠不会误动作，区内故障时保护灵敏动作，本文中判据窗长 T_{set} 取 1ms，保护动作阈值 S 取 5。保护原理流程图如图 4 所示。

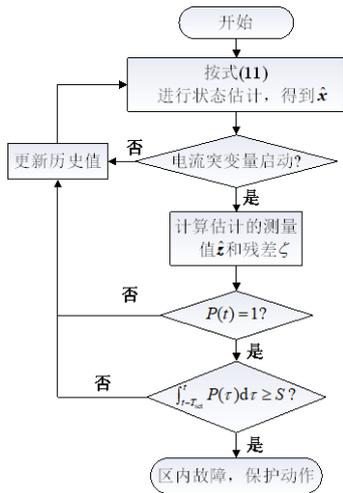


图 4 保护原理流程图

Fig. 4 Flow chart of the protection principle

3.4 标准差的选取

标准差的选取关系到保护动作的可靠性与灵敏性：当标准差过大时，会缩小残差归一化平方和，将导致区外故障时保护可靠性提升，但是区内故障时速动性降低；当标准差过小时，会扩大残差归一化平方和，将导致区外故障时保护可靠性降低，但是区内故障时速动性提升。

综合考虑标准差 σ 引起的可靠性、速动性之间的矛盾，结合实际测量元件的误差范围，对于真实测量量，本文采用 0.01pu；对于虚拟测量量，考虑物理规律严格满足，本文采用 0.001pu。电压测量量的基准值选取线路额定电压，电流测量量的基准值选取故障电流峰值。

4 影响纵联保护因素分析

本节对保护速动性、噪声干扰、测量误差、雷击干扰、同步误差和过渡电阻等各影响因素进行理论定性分析，第 5 节将对各影响因素进行定量的分析。

4.1 保护动作时间

保护的動作时间包括保护感受到故障的时间、

等待对侧数据时间和保护判别时间。以 300km 线路为例分析所提保护动作时间。

保护感受到故障的时间即为故障行波传递到保护安装处的时间。无论线路任何一点发生故障，对于最快感受到故障的一端，行波传递路径不长于 150km，因此保护感受到故障的时间小于等于 0.5ms。

保护采用光纤进行通信，假设信号在光纤中传播速度为 200km/ms，行波速度为 300km/ms。由于所提保护在状态估计时只需要对端 τ 之前的历史值 (τ 为对端行波传递到本端的最小时间)，相当于对通信延时补偿了时间 τ 。对于 300km 线路，最快行波传输时长 τ 为 1ms，通信延时为 1.5ms，考虑实际工程中光纤中继器延时 1ms，因此等待对侧数据的时间约为 1.5ms。

对于判别时间，如采用工程上常用的 10kHz 的采样频率，保护判据时间最快仅需 0.5ms。

综上所述，再考虑一定的裕度，所提保护动作时间约为 3ms。

4.2 分布电容与通信速率

对于线路分布电容，所提保护的孪生模型从机理上已经考虑分布电容的影响，因此保护性能不受线路分布电容的影响。

对于通信速率，以 10kHz 为例，所提保护需要传输两极电压和电流的瞬时值，0.1ms 的采样间隔需要传输 10 个采样点，每个采样点假设 16bit，对于 2Mbit/s 的接口速率，可用 0.078ms 传完，可以做到实时传输。

4.3 过渡电阻与测量噪声

对于过渡电阻，所提保护是基于模型一致性判别，即使高阻故障也是线路模型发生变化，因此在理论上保护可耐受较高的过渡电阻。对于测量噪声，所提保护在机理上已考虑了噪声的影响(认为测量误差符合高斯分布)，因此保护可耐受测量元件正常范围内的噪声。

4.4 同步误差

对于同步误差，所提保护需要采样同步的双端数据，目前电力系统中广泛采用的同步对时方法有 B 码对时、乒乓对时、GPS 或北斗对时，其中以 GPS 或北斗对时的精度最高，一般认为同步误差在 2 μ s 以内。同步误差对本保护近似于测量噪声，是影响保护性能的因素之一。

4.5 采样频率

所提的孪生模型利用了递归卷积定理，而递归卷积定理本质是分段线性化。因此在理论上，采样间隔越小，分段线性化的误差越小，所提孪生模型越精确。也就是说，采样频率越高，所提保护的性能越好。根据第 5 节仿真结果，工程常用的 10kHz 采样频率，已可满足本保护的精度需求。

4.6 雷击干扰

雷击干扰可以等效为在雷击点叠加 1 个电流源，由于雷击干扰未引起线路绝缘破坏，因此没有入地通道。可分为 2 个阶段来讨论雷击干扰的影响。第一阶段，在雷击干扰的等效电流源存在时(雷电存在时)，实际线路与孪生模型间出现了差异(在雷击处多 1 个电流源)，因此动态状态估计的残差结果可能不再符合卡方分布。第二阶段，在雷电消失后，虽然雷击干扰的暂态过程仍然存在，但是实际线路与孪生模型一致，所以此阶段所提保护不收雷击干扰的影响。因此，雷击干扰对所提保护的影响主要在第一阶段。而此第一阶段时间非常短，IEEE 的标准雷电波波头时间为 $1.2\mu s$ ，半波时间为 $50\mu s$ 。因此保护的判据窗长足以躲过雷击干扰的影响。

5 仿真验证

在仿真软件 PSCAD 中搭建如图 5 所示 $\pm 250kV$ 四端伪双极柔性直流输电系统，使用张北四端柔性直流输电系统实际参数。这里电压等级采用实际工程的一半，并采用伪双极(张北工程为真双极)，目的是仿真出小电流接地系统单极故障(该故障类型电流小，保护判别非常困难)。系统主要参数见表 1，直流架空线路和杆塔结构如附录 A 图 A1 所示。保护采样率设为 10kHz，以线路为保护对象验证所提保护原理。

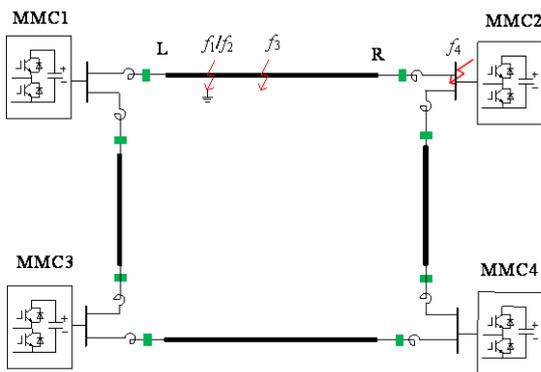


图 5 四端伪双极柔性直流输电系统仿真示意图
Fig. 5 Simulation schematic diagram of four terminal pseudo bipolar flexible HVDC transmission system

表 1 柔性直流输电系统主要参数

Table 1 Main parameters of flexible HVDC system

系统元件	参数名	参数值
换流器	MMC1 容量/MW	1500
	MMC1 额定直流电压/kV	± 250
	MMC2 容量/MW	750
	MMC2 额定直流电压/kV	± 250
换流器	MMC3 容量/MW	1500
	MMC3 额定直流电压/kV	± 250
	MMC4 容量/MW	1500
	MMC4 额定直流电压/kV	± 250
传输线路	MMC1—MMC2 长度/km	207.9
	MMC1—MMC3 长度/km	49.9
	MMC2—MMC4 长度/km	192.7
	MMC3—MMC4 长度/km	217.6

5.1 典型故障场景保护行为分析

5.1.1 区内正极金属性接地故障

区内 f_1 发生正极金属性接地故障，故障点距离 L 侧 50km，故障发生在 0ms，线路 L 侧的瞬时电流结果如图 6 所示，其中包含了实测电流与状态估计电流。可以看出，故障前实测电流与状态估计电流一致，表明实际测量值与线路模型之间未出现差异；故障后两者波形不一致，实际测量量与线路模型之间出现差异。

保护判别结果如图 6 所示，残差的归一化平方和在故障前近似为 0，故障后线路模型出现差异导致残差的归一化平方和急剧增加。根据保护逻辑，残差的归一化平方和大于门限值并满足保护判据，保护动作。图 6 中保护逻辑 0.5ms 动作代表的是保

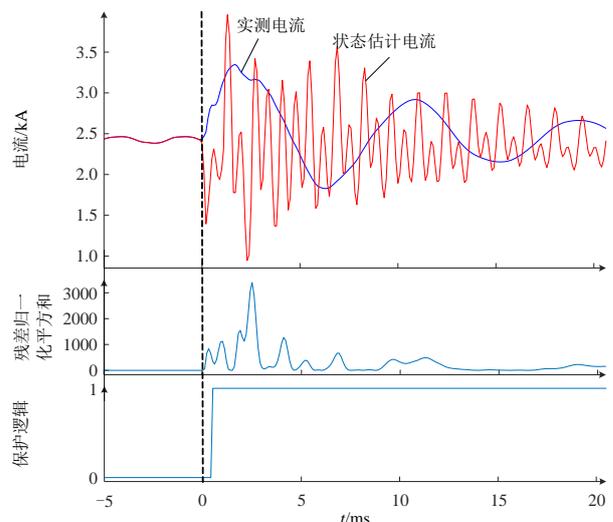


图 6 区内正极金属性接地故障 L 侧电流结果与保护判别结果

Fig. 6 L-side current result of internal positive polar grounding fault and protection result

护判别时间，并没有考虑保护等待对端数据的时间。保护等待对端数据的时间应该根据实际工程中采用的通信通道以及线路长度而定。

5.1.2 区内正极经高阻接地故障

区内 f_2 处发生正极经 300Ω 过渡电阻接地故障，故障点距离 L 侧 50km，故障发生在 0ms，线路 L 侧的瞬时电流结果如图 7 所示。可以看出，故障前实测电流与状态估计电流一致，而故障后两者出现明显差异。

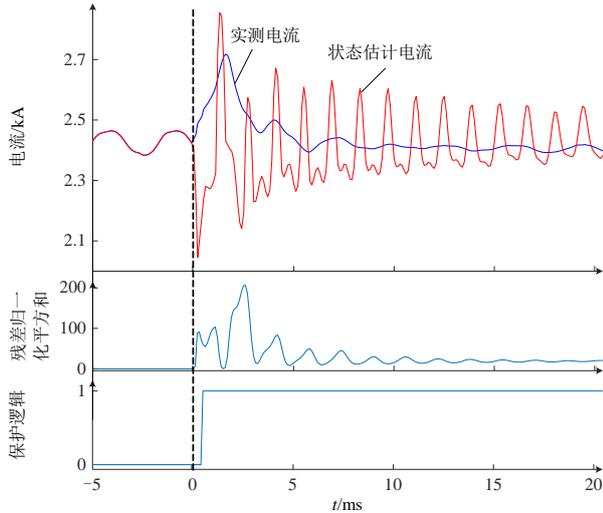


图 7 区内正极经过渡电阻接地故障 L 侧电流结果与保护判别结果

Fig.7 L-side current result of internal positive polar grounding fault with fault resistance and protection result

保护与判别结果如图 7 所示，故障前归一化残差平方和近似为零，故障后快速上升。根据保护逻辑，残差的归一化平方和大于阈值并满足保护判据，故障后 0.5ms 发出跳闸信号，保护正确动作。结果表明，所提保护对于小电流接地系统的单极接地故障仍具有较高的灵敏性。

5.1.3 区内双极短路故障

区内 f_3 发生双极短路故障，故障点距离 L 侧 50km，故障发生在 0ms，线路 L 侧的瞬时电流结果如图 8 所示。可以看出，故障前实测电流与状态估计电流一致，而故障后二者出现明显差异，说明保护线路发生区内故障。

保护与判别结果如图 8 所示，故障前归一化残差平方和近似为零，故障后快速上升。根据保护逻辑，残差的归一化平方和大于阈值并满足保护判据，故障后 0.5ms，保护正确动作。

5.1.4 区外双极短路故障

区外 f_4 发生双极短路故障，故障点位于 R 侧外部，故障发生在 0ms，线路 L 侧的瞬时电流结果

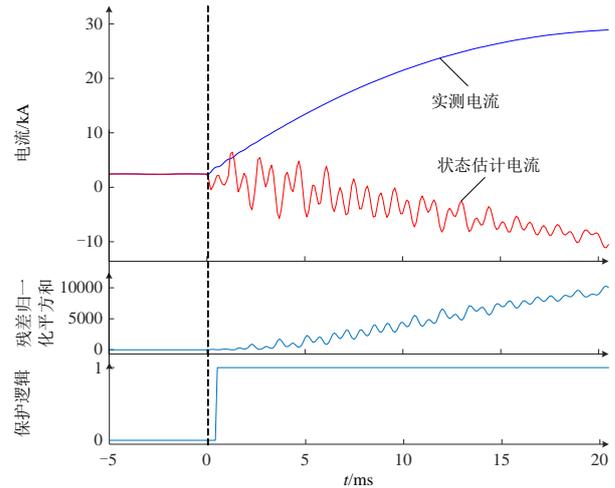


图 8 区内双极短路故障 L 侧电流结果与保护判别结果
Fig. 8 L-side current result of internal pole-pole fault and protection result

如图 9 所示。可以看出，在保护线路外发生故障，实测电流与状态估计电流始终保持一致。

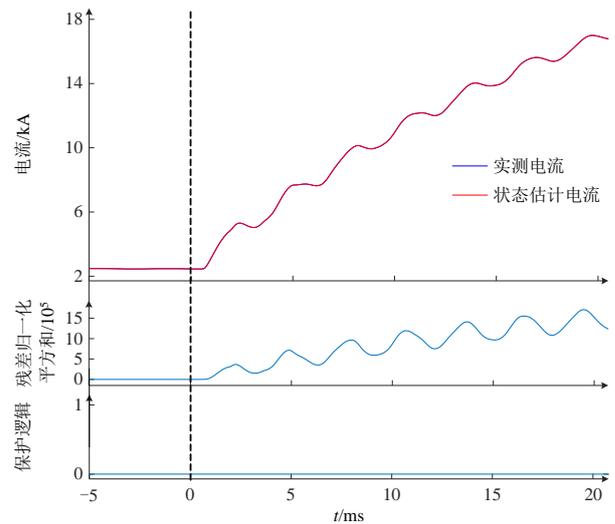


图 9 区外双极短路故障 L 侧电流结果与保护判别结果
Fig. 9 L-side current result of external pole-pole fault and protection result

保护与判别结果如图 9 所示，故障前残差归一化平方和近似为零，故障后略有波动，但远小于阈值。根据保护逻辑，残差归一化平方和未大于阈值，保护不会发生误动。

5.2 保护算法性能分析

5.2.1 过渡电阻

为验证所提保护耐受过渡电阻的能力，在不同过渡电阻下仿真各种故障，测试保护的性。表 2 为 $0.01\sim 300\Omega$ 过渡电阻下的保护判定结果：发生区内故障时，保护均可在 1ms 内动作；发生区外故障时，保护均不会误动作。仿真结果表明，所提保护耐受过渡电阻能力较强。

表 2 不同过渡电阻下的保护判定结果

Table 2 Result of protection for different fault resistance

故障位置	过渡电阻/ Ω	L 侧保护	R 侧保护
区内 f_1 正极 接地故障	0.01	0.5ms	0.9ms
	100	0.5ms	0.9ms
	300	0.5ms	0.9ms
区内 f_3 双极 短路故障	0.01	0.5ms	0.9ms
	100	0.5ms	0.9ms
	300	0.6ms	被联跳
区外 f_4 正极 接地故障	0.01	不动作	不动作
	100	不动作	不动作
	300	不动作	不动作
区外 f_4 双极 短路故障	0.01	不动作	不动作
	100	不动作	不动作
	300	不动作	不动作

5.2.2 同步误差

为验证所提保护耐受同步误差的能力,对 5.1.4 节区外金属性短路故障(f_4)的测试数据中添加 $20\mu\text{s}$ 的同步误差。线路 L 侧的瞬时电流结果如图 10 所示,从图 10 中可以看出 0ms 发生区外故障后实测电流与状态估计电流基本一致,状态估计电流波形出现一些毛刺。残差的归一化平方和因为同步误差的原因在故障后出现尖峰,但未超过阈值,保护没有误动作。结果表明,所提保护可耐受 $20\mu\text{s}$ 的同步误差。

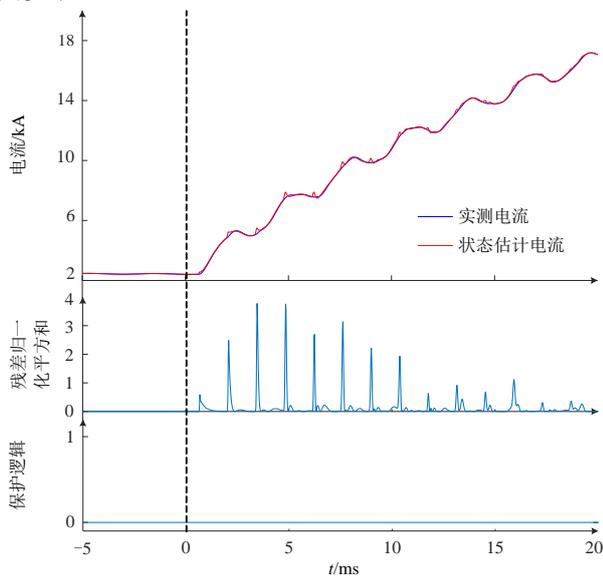


图 10 添加同步误差时 L 侧电流结果与保护判别结果

Fig. 10 L-side current result of synchronization error and protection result

5.2.3 噪声干扰

为验证所提保护耐受噪声干扰的能力,对 5.1.4 节区外金属性短路故障(f_4)的测试数据中添加 30dB 的高斯白噪声。线路 L 侧的瞬时电流结果如图 11

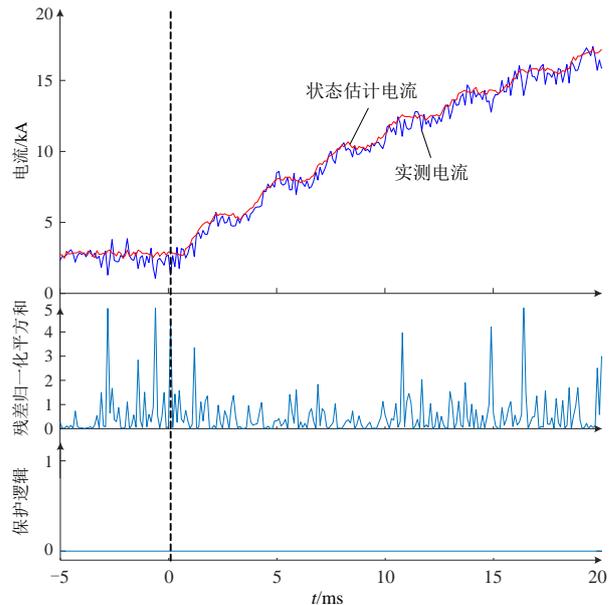


图 11 噪声干扰时 L 侧电流结果与保护判别结果

Fig. 11 L-side current result of noise jamming and protection result

所示,从图 11 中可以看出 0ms 发生区外故障后实测电流与状态估计电流波动趋势基本一致。残差的归一化平方和因为加入噪声的原因在故障后不规则波动,但均未超过阈值,保护没有误动作。结果表明,所提保护可耐受 30dB 的噪声干扰。

5.2.4 雷击干扰

为验证所提保护耐受雷击干扰的能力,采用标准雷电波(1.2/50 μs)对正常运行线路进行仿真。雷击干扰发生在 0ms,保护结果如图 12 所示。雷击干扰后实测电流与状态估计电流出现短暂的

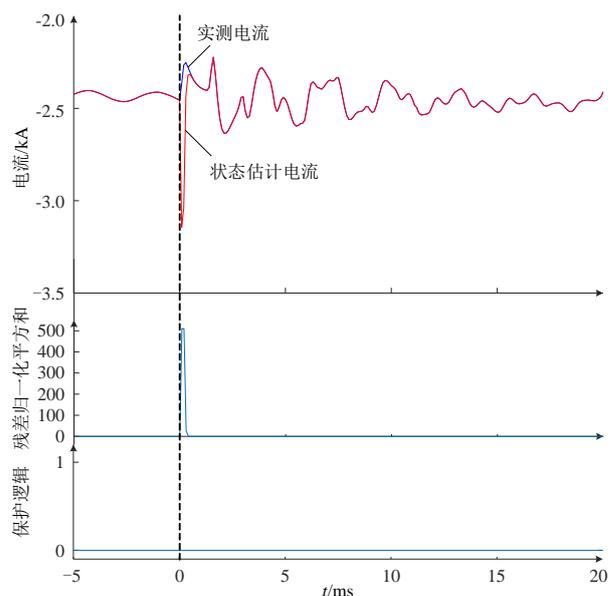


图 12 雷击干扰时 R 侧电流结果与保护判别结果

Fig. 12 R-side current result of lightning disturbance and protection result

对应了理论分析中雷电存在时实际线路与孪生模型间出现了差异,因此残差归一化平方和快速上升并超过门槛值,但残差归一化平方和在故障 0.3ms 后(雷电流消失)降低到门槛值之下。根据保护逻辑,残差归一化平方和高于门槛值的时间未超出保护判据窗长,保护不会发生误动,与理论分析一致。

6 结论

针对柔性直流系统保护四性协调困难的问题,将数字孪生思路引入到直流保护研究,提出了基于数字孪生的柔性直流输电系统纵联保护原理。该方法的优点主要包括:动作速度快,能在故障后 3ms 内快速动作;灵敏性高,对于伪双极系统单极接地故障,仍可耐受 300Ω过渡电阻;可靠性高,可耐受 30dB 测量噪声以及雷击干扰;另外,具有天然的、不依赖于限流电抗器的选择性。

参考文献

- [1] HE Jinghan, CHEN Keao, LI Meng, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 15.
- [2] 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(in Chinese).
- [3] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3548-3556.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3548-3556(in Chinese).
- [4] HE Zhengyou, LIAO Kai. Natural frequency-based protection scheme for voltage source converter-based high-voltage direct current transmission lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(13): 1519-1525.
- [5] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749(in Chinese).
- [6] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 高压直流输电线路电流差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 45-49.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 45-49(in Chinese).
- [7] WANG Binglin, LIU Yu, LU Dayou, et al. MMC-HVDC transmission line protection based on Bergeron model and state estimation[C]//8th Renewable Power Generation Conference(RPG 2019). Shanghai: IET Digital Library, 2019.
- [8] TZELEPIS D, DYSKO A, FUSIEK G, et al. Single-ended differential protection in MTDC networks using optical sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1605-1615.
- [9] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 1-13.
SHEN Chen, JIA Mengshuo, CHEN Ying, et al. Digital twin of the energy internet and its application[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1-13(in Chinese).
- [10] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2405-2418.
TAO Fei, MA Xin, HU Tianliang, et al. Research on digital twin standard system[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(10): 2405-2418(in Chinese).
- [11] TAO Fei, ZHANG He, LIU Ang, et al. Digital twin in industry : state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415.
- [12] 刘娟, 庄存波, 刘检华, 等. 基于数字孪生的生产车间运行状态在线预测[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 467-477.
LIU Juan, ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, et al. Online prediction technology of workshop operating status based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 467-477(in Chinese).
- [13] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 23615.
MENG Songhe, YE Yumei, YANG Qiang, et al. Digital twin and its aerospace applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 23615(in Chinese).
- [14] 杨剑锋, 杜金虎, 杨勇, 等. 油气行业数字化转型研究与实践[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 248-258.
YANG Jianfeng, DU Jinhu, YANG Yong, et al. Research and practice on digital transformation of the oil and gas industry[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 248-258

(in Chinese).

- [15] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009-2019, HE Xing, AI Qian, ZHU Tianyi, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009-2019(in Chinese).
- [16] 周二专, 冯东豪, 严剑峰, 等. 秒级响应电网在线分析软件平台[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3474-3480. ZHOU Erzhan, FENG Donghao, YAN Jianfeng, et al. A software platform for second-order responsiveness power grid online analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3474-3480(in Chinese).
- [17] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2028. PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2028(in Chinese).
- [18] 王成山, 董博, 于浩, 等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1597-1607. WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1607(in Chinese).
- [19] MELIPOULOS A P S, COKKINIDES G J, MYRDA P, et al. Dynamic state estimation-based protection: status and promise[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 320-330.
- [20] LIU Yu, MELIPOULOS A P S, FAN Rui, et al. Dynamic state estimation based protection on series compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power

Delivery, 2017, 32(5): 2199-2209.

- [21] MARTI J R. Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations [J]. IEEE Power Engineering Review, 1982, PER-2(1): 29-30.

附录 A 直流架空线路和杆塔结构

直流架空线路仿真模型如图 A1 所示。

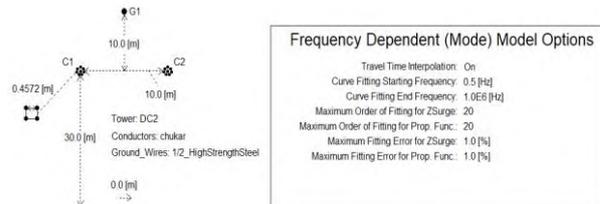


图 A1 直流架空线路的频变参数模型和杆塔结构

Fig. A1 Frequency-dependent overhead line model and tower model



李猛

在线出版日期: 2021-05-14。

收稿日期: 2020-10-29。

作者简介:

李猛(1986), 男, 博士, 副教授, 研究方向为直流电网继电保护技术, mengl@bjtu.edu.cn;

聂铭(1996), 男, 博士研究生, 研究方向为直流电网继电保护技术, mingnie@bjtu.edu.cn;

*通信作者: 和敬涵(1964), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为交直流混联输/配电网保护与控制, jhhe@bjtu.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Pilot Protection of Flexible DC Grid Based on Digital Twin

LI Meng, NIE Ming, HE Jinghan*, CHEN Ke'ao, WANG Xiaojun, XU Yin

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University)

KEY WORDS: flexible DC; digital twin (DT); pilot protection; dynamic state estimation; frequency dependent parameters

With the development of flexible DC transmission technology, DC grid has attracted more and more attention. However, the rapid rise of the fault current of the DC grid has a prominent contradiction with the weak overcurrent capability of power electronics. The DC line protection needs to complete the fault recognition in a few milliseconds with selectivity, reliability, and sensitivity, which is extremely challenging.

This paper propose a pilot protection based on digital twins(DT) for flexible DC transmission systems. The digital twin architecture is as shown in Fig. 1

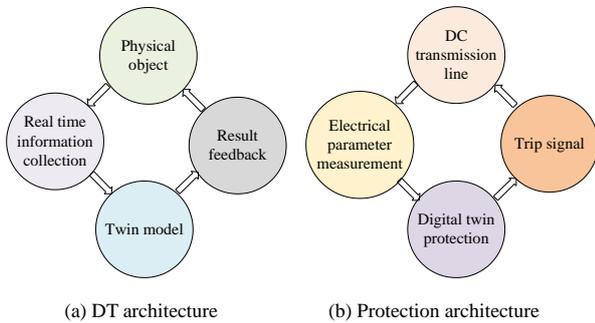


Fig. 1 Digital twin architecture

On the basis of considering the frequency variation of DC line parameters, an accurate DC line digital twin model is established. The redundancy feature of state estimation is used to improve the reliability of protection, and the fault is judged by comparing the difference between the measured value and the estimated value. Fig. 2 shows the logic flow chart of the protection principle.

Simulation on PSCAD/EMTDC and MATLAB validates that the proposed protection principle can quickly and reliably distinguish the internal and external

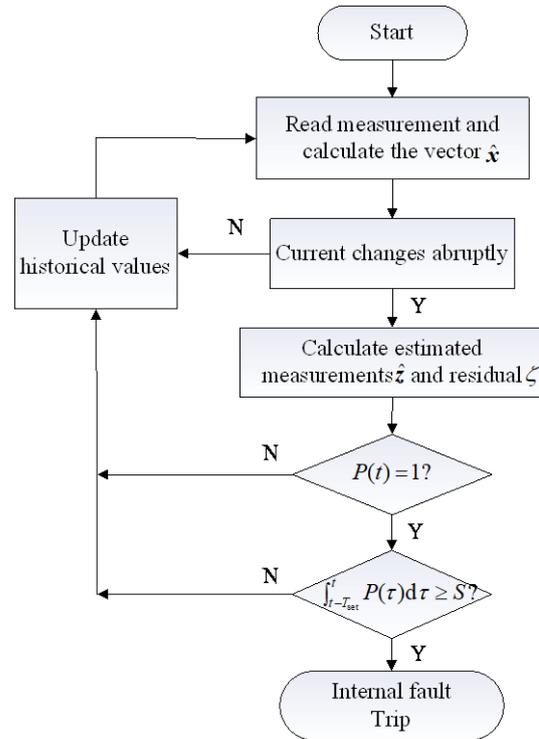


Fig. 2 Flow chart of the protection principle

faults. This principle has the advantages of high fault resistance tolerance and strong anti-interference ability. Table 1 shows the result of protection for different fault resistance.

Table 1 Result of protection for different fault resistance

Fault type	Fault resistant/ Ω	K-side protection	M-side protection
Internal positive polar grounding fault (f1)	0.01	Trip, 0.5ms	Trip, 0.9ms
	100	Trip, 0.5ms	Trip, 0.9ms
	300	Trip, 0.5ms	Trip, 0.9ms
Internal pole-pole fault (f3)	0.01	Trip, 0.5ms	Trip, 0.9ms
	100	Trip, 0.5ms	Trip, 0.9ms
	300	Trip, 0.6ms	Inter-tripping
External positive polar grounding fault (f4)	0.01	No trip	No trip
	100	No trip	No trip
	300	No trip	No trip
External pole-pole fault (f4)	0.01	No trip	No trip
	100	No trip	No trip
	300	No trip	No trip