

基于虚拟孪生的交流输电线路纵联保护

王少雄¹, 吕思辰², 吕飞鹏¹, 廖建权¹, 高仕林¹,
王干尧³, 王强钢⁴, 周文越⁵

- (1. 四川大学电气工程学院, 四川省 成都市 610065;
2. 阿尔伯塔大学计算机科学系, 加拿大 埃德蒙顿 T6G 2S4;
3. 上海交通大学电气工程系, 上海市 闵行区 200240;
4. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044;
5. 国网四川省电力科学研究院, 四川省 成都市 610042)

Virtual Twin Based Pilot Protection of AC Transmission Lines

WANG Shaoxiong¹, LÜ Sichen², LÜ Feipeng¹, LIAO Jianquan¹, GAO Shilin¹,
WANG Ganyao³, WANG Qianggang⁴, ZHOU Wenyue⁵

- (1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;
2. Department of Computing Science, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2S4, Canada;
3. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China;
4. National Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University),
Shapingba District, Chongqing 400044, China;
5. Sichuan Electric Power Research Institute of State Grid Corporation of China, Chengdu 610042, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The traditional pilot protection relies on the fault characteristic quantities and high-precision line model establishment and is seriously affected by integrating new energy sources and distribution parameters. To address the above issues, this paper proposes a novel approach based on the virtual twin, simplifying the physical line model within a virtual space using a digital equivalent model. Then, a virtual fault equivalent model is derived. After that, the recursive least squares method is used to generate the normal digital model of the line, and the state space equations are established for the real-time state estimation, which is combined with the change of the state quantities and the virtual fault equivalence model for the situational awareness of the physical line. The proposed protection decouples the protected line from the outside world, and adopts the digital model as the equivalent representation of different kinds of line mechanism models in the virtual space, which is not affected by the power supply characteristics at the ports, system oscillations, communication delay, etc., and does not depend on the actual line parameters, and applies to a wide range of physical scenarios. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed protection are verified in

extra-high-voltage trans-frequency line model sending system and a large-scale new energy sending system in PSCAD/EMTDC. The fault identification time was within 10 ms, with a maximum tolerance of 1000 fault resistance, an average error of 4%, a maximum error of 8.34%, and a minimum error of 0.08%.

KEY WORDS: virtual twin; data drive; dynamic estimation; pilot protection; fault location

摘要: 传统纵联保护依赖于故障特征量的选取、高精度线路模型建立, 受规模化新能源接入、分布参数的影响严重。针对上述问题, 该文结合虚拟孪生思想, 在虚拟空间抽象出物理线路的简化等效数字模型, 并进行结构性推演, 构造虚拟故障等值模型。然后, 利用递推最小二乘法在线驱动生成正常线路数字模型, 并建立状态空间方程进行实时状态估计, 结合状态量的变化以及虚拟故障等值模型对物理线路进行“间接”态势感知, 从而实现保护的启动、分相差动和测距。所提保护将被保护线路与外界解耦, 在虚拟空间采用数字模型作为不同种类线路机理模型的等效表征, 不受端口处电源特性、系统振荡、通信同步等因素的影响, 不依赖于实际线路参数, 适用于多种物理场景。最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建特高压经依频线路模型送出系统、规模化新能源经 Π 形线路模型送出系统验证了所提保护的正确性与有效性, 故障识别时间在 10ms 以内, 最高可耐受 1000 Ω 过渡电阻, 测距平均误差为 4%, 最大误差为 8.34%, 最小误差为 0.08%。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52307127); 国家自然科学基金联合基金项目(U22B6006)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52307127); Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U22B6006)。

关键词：虚拟孪生；数据驱动；状态估计；纵联保护；故障测距

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1276

0 引言

“双碳”战略目标下，构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统成为中国电力系统发展的主要方向^[1]。规模化的新能源大多经交流输电线路并入电网^[2-3]，在未来相当长时间内，交流输电技术仍为基础，高比例新能源、电力电子设备集群经高压交流输电线路接入是电网的基本特征之一^[3]。规模化新能源接入导致依赖于传统同步机故障特性的保护原理适应性问题愈发突出。例如距离保护 I 段拒动^[4]、方向元件存在误判风险^[5]、电流差动保护灵敏度大幅下降^[6]，甚至下降至正确动作极限^[7]。此外，发电中心一般远离负荷中心，通常采用高压外送输电，输电线路距离长，导致纵联保护同时受线路分布电容电流影响大。

纵联保护作为交流输电线路的主保护，对新型电力系统的安全稳定运行具有重要意义。针对纵联保护面临规模化新能源接入场景下性能下降、特高压长距离输电场景下分布参数影响严重两大问题，现有方法可分为基于端口故障特征量差异以及模型匹配的保护原理两类。

基于端口故障特征量差异的纵联保护原理早期以同步机故障特性为依据^[8]，基于故障前后双端电气量如阻抗、功率、电流等故障特征量的差异构造保护判据，其性能高度依赖于故障特征量，与电源类型呈现强耦合关系。文献[9-10]通过建立新能源电源的阻抗模型，根据故障期间两侧电源阻抗特征变化规律构造纵联保护原理，存在频率选取、阻抗模型精细化构建等难题。文献[11-12]根据故障前后线路两端电压电流满足的功率方程构造纵联保护动作判据，存在电压死区等问题。基于电流量的原理基于双端电流采样值利用相关系数法构造相似度保护判据，难以解决新能源弱出力时的数值计算失效、线路分布参数影响等问题。

基于模型匹配的保护原理从线路故障的本质出发，通过建立输电线路的机理等值模型以考虑长距离输电线路分布参数带来的影响。文献[19]提出了基于贝瑞隆模型的距离保护原理以消除分布参数的影响。文献[20]为消除分布电容电流对线路保护的影响，建立分布电容模型，根据模型误差构造保护原理。文献[21]针对(voltage source converter based high-voltage direct current transmission，

VSC-HVDC)输电系统，利用模量模型识别构造纵联保护原理。文献[22]针对风电系统，构建了基于时域模型识别的纵联保护原理。

送出线路发生短路故障时，新能源电源呈现复杂的电磁暂态特性，通过单一故障特征量构造的纵联保护方案难以适应规模化、多样化新能源接入的消纳需求、以及消除分布参数的影响。针对上述问题，文献[23-25]利用数字孪生思想在交流系统中提出了基于动态状态估计的保护，将输电线路与外界解耦，建立线路的精细化孪生模型，采用最小二乘法评估测量信号与估计信号的适配程度，从理论上隔离了电源特性的影响、消除了分布参数的影响，可视为模型匹配思想的演化。文献[25]将数字孪生思想融入直流线路保护研究，缓解了保护四性矛盾，提升了保护性能。

上述基于数字孪生的保护思想将输电线路与外界解耦，关注研究对象本身结构和参数属性的变化，从原理上避免了系统振荡、电源特性、分布参数、谐波等因素的影响，有望解决规模化新能源接入后的线路保护共性问题。但上述保护原理需准确建立孪生模型，当外界环境改变时，模型的参数将产生偏差，如何解决孪生模型误差/不确定性的累积效应是发挥孪生保护优势的关键。考虑到电力系统饱含实时量测数据，被保护对象更多地以数字化“身份”出现在电力系统中，量测信号满足的数字定律相较于机理模型中电气量满足的经验物理规律更能反映被保护对象的状态信息，因此，研究被保护对象的虚拟数字化“身份”会比纯粹的物理模型更具价值。

虚拟孪生是数字孪生的延拓。对于经典简化论难以处理的复杂对象，可先利用机理知识进行抽象建模，然后根据实际功能需求，在抽象属性的基础上进行模拟推演，基于推演模型和状态量间接感知物理实体状态^[26-27]，为新型电力系统保护提供了新的研究思路。

本文将虚拟孪生思想应用于输电线路保护，其整体思路框架如附录 A 图 A1 所示。对于线路模型，首先在虚拟空间抽象出其对应的数字模型，结合数据驱动的思想，利用递推最小二乘法在线更新数字模型参数，使得数字模型与量测值相匹配，进而消除模型的误差累积。然后，基于正常数字模型进行结构性的模拟推演，从而建立了虚拟故障等值模型。最后，结合数据融合的思想建立状态空间方程利用卡尔曼滤波进行线路数字模型的状态估计，并结合状态量的变化以及虚拟故障等值模型对输电

线路进行态势感知,从而实现保护的启动、分相差动、测距等功能性需求。

1 线路模型

1.1 物理空间中的线路模型

机理建模以物理空间中的客观定律为核心,追

求精细地描述对象的行为特征。如图1所示,通常假设线路模型由无穷 Π 形微元组成,其中 R_0 、 L_0 、 C_0 、 C_m 分别为单位长度的电阻、电感、接地电容、相间耦合电容。设 m 、 n 端的端口电压分别为 $\mathbf{v}_m=[v_A, v_B, v_C]^T$ 、 $\mathbf{v}_n=[v_a, v_b, v_c]^T$;流入电流分别为 $\mathbf{i}_m=[i_A, i_B, i_C]^T$ 、 $\mathbf{i}_n=[i_a, i_b, i_c]^T$ 。

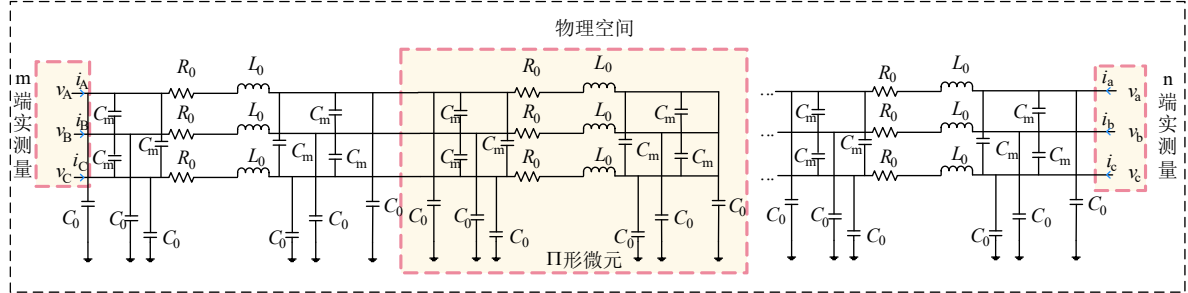


图1 线路机理模型的精细化结构

Fig. 1 Refined structure of the line mechanism model

若线路参数沿线均匀分布,端口电压、电流满足如下方程形式:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_m = \mathbf{R}\mathbf{i}_m + \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_m}{d\tau} + \mathbf{v}_n \\ \mathbf{i}_m + \mathbf{i}_n = \mathbf{C} \left(\frac{d\mathbf{v}_m}{d\tau} + \frac{d\mathbf{v}_n}{d\tau} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{L}$ 、 $\mathbf{C}$ 分别为机理模型中的电阻、电感、电容参数矩阵;为连续时间变量。

受相间耦合特性影响,在机理模型假设中,上述参数矩阵非对角元素均不为0,通常需进行相模变换^[28],其中引入的线性变换矩阵取决于对机理模型结构、参数的合理性假设。因此,基于机理模型的保护原理依赖于精细化的模型结构和准确的参数。

1.2 虚拟空间中的线路数字模型

数字模型作为物理实体的抽象演化,在数学形态上表征量测信号与物理实体结构和参数属性的映射关系,与机理模型的结构、参数以及量测特性有关,与外部系统的运行状态无关。

考虑到纵联保护更侧重于实现快速启动、灵敏识别区内、外故障等逻辑性功能,如何根据双端采样值信息感知原始物理线路结构是否被破坏是研究重点。为合理区分线路故障的本质,避免模型参数性误差累积导致保护误判,并赋予数字模型可解释性的机理含义,本文结合数据与模型混合驱动的思想实现线路数字模型驱动生成。即,线路数字模型保留与机理模型相似的结构特征,通过在线量测信息驱动模型参数生成。

其本质是将机理建模中对参数的“确定性假设”抽象演化为了数字建模的“不确定性匹配”,

通过在线驱动的方式实现物理实体在虚拟空间中的自适应映射以及量测信号与数字模型的实时匹配,消除孪生模型参数不准确导致的误差累积效应。为保证数字模型在机理层面的可解释性以及实现虚拟推演,本文假设在虚拟空间中存在一个端口特性符合式(1)方程形式的 Π 形线路数字模型如图2所示,其中数字模型的各个参数均为未知量,红色箭头部分为数字空间中的虚拟状态变量,蓝色箭头部分及端口电压为端口实测量。

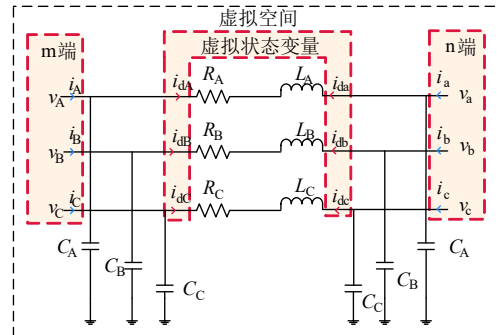


图2 虚拟空间中的线路数字模型

Fig. 2 Digital modeling of lines in virtual space

1.3 线路的虚拟故障模型

虚拟故障等值模型由正常线路数字模型推演得到,以单相接地故障为例:设输电线路全长为 L ,以 m 端测点为参考,物理空间中若 A 相输电线路的 αL ($0 < \alpha < 1$)处发生接地短路故障,相当于输电线路在 αL 处多了一个接地分支;对应的,其虚拟空间的结构属性也镜像变化,会相对于距 m 测点 αL 处多一个接地分支,如图3所示。

2 数字模型的在线驱动方法

数字模型仅保证了与机理模型结构的相似性,

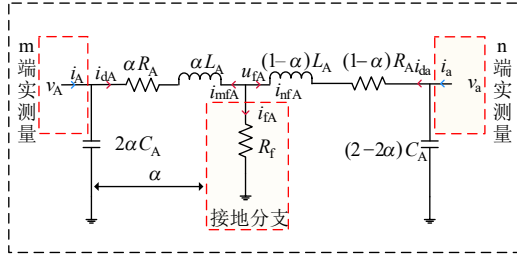


图3 A相接地故障虚拟等值模型

Fig. 3 Virtual equivalent modeling of phase A ground faults

参数的大小完全受端口输入(量测)驱动。考虑到电力系统绝大多数时候处于正常运行情况,可充分利用大量正常的量测数据在线驱动/更新数字模型,使数字模型与端口量测值保持实时匹配,从而克服机理建模误差产生的影响。

电容参数矩阵、阻感参数矩阵的在线更新方程如式(2)、(3)所示,具体推导过程见附录B(1)。

$$\begin{cases} P_t = [\lambda - \frac{P_{t-1}(\tilde{V}_{mn})^2}{\lambda + \tilde{V}_{mn} P_{t-1} \tilde{V}_{mn}}] P_{t-1} \\ C(t) = C(t-1) + P_t \cdot \tilde{V}_{mn} \cdot (\tilde{I}_{mn} - \tilde{V}_{mn} \cdot C(t-1)) \\ J_C(t) = |(C(t) - C(t-1))| \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_t = [\lambda - \frac{P_{t-1} h_{RL} h_{RL}^T}{\lambda + h_{RL}^T P_{t-1} h_{RL}}] P_{t-1} \\ \hat{\theta}_{RL}(t) = \hat{\theta}_{RL}(t-1) + P_t h_{RL} (2 \cdot V_{mn} - h_{RL}^T \hat{\theta}_{RL}(t-1)) \\ RL(t) = \text{diag}(P_t \hat{\theta}_{RL}(t)) \\ J_{RL}(t) = |RL(t) - RL(t-1)| \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tilde{V}_{mn} = \text{diag}(\frac{d\tilde{v}_{mn}}{dt})$; $\tilde{I}_{mn} = \text{diag}(\tilde{i}_{mn})$; $\lambda = \lambda I$, J_C 表示电容参数更新残差, J_{RL} 表示阻感参数更新残差。

参数更新具体过程见附录B(2),定义参数更新过程中的模型总残差 J 为各残差矩阵的迹之和

$$J(t) = \text{Tr}(J_C(t)) + \text{Tr}(J_{RL}(t)) \quad (4)$$

当 $J(t)$ 满足下式时,说明量测值与模型达到了很好的匹配程度。

$$J(t) < \varepsilon \quad (5)$$

式中: ε 可取 $1e-2$ 。

3 虚拟空间中线路数字模型的状态估计

3.1 状态空间方程的建立

根据大量正常数据驱动得到的数字模型可充分反映端口电气量满足的原始物理规律在虚拟空间下的映射关系,判断该映射关系是否被破坏是实现虚拟孪生保护的关键步骤,本文采用状态估计来实现。首先需建立能反映模型状态信息的状态空间

方程,如下式所示。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6)$$

式中: $A = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & 0 & \frac{1}{L} & \frac{-1}{L} \\ 0 & \frac{-R}{L} & \frac{-1}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{-1}{C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{C} & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix}$ 。

3.2 测量方程的建立

测量方程主要与状态空间方程配合,实现各状态变量的融合估计。建立测量方程时要明确可观测的状态变量,以及不可观测状态变量之间的约束关系。例如 v_m 、 v_n 为可测端口电压, i_{dm} 、 i_{dn} 为虚拟空间中的不可测虚拟状态量,但 i_{dm} 、 i_{dn} 满足如下约束关系:

$$\begin{cases} i_{dm} + i_{dn} = \tilde{i}_{mn} - C \frac{d\tilde{v}_{mn}}{d\tau} \\ i_{dm} - i_{dn} = i_{mn} - C \frac{dv_{mn}}{d\tau} \end{cases} \quad (7)$$

因此,可建立如下测量方程:

$$z = Hx \quad (8)$$

式中: z 为观测变量;

$$z = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{mn} - C \frac{\tilde{v}_{mn}(t) - \tilde{v}_{mn}(t-1)}{\Delta T} \\ i_{mn} - C \frac{v_{mn}(t) - v_{mn}(t-1)}{\Delta T} \\ v_m \\ v_n \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ I_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}。$$

3.3 数字模型的离散化

实际工程中,端口处测量是离散时间采样信号,因此需要对上述模型进行离散化操作。同时,数字模型由机理模型抽象得到并完全由量测量驱动,因此需考虑建模产生的过程噪声以及量测产生的噪音影响。

离散化后的两个方程将满足如下形式:

$$\begin{cases} x(t) = A'x(t-1) + B'u(t) + w(t-1) \\ z(t) = Hx(t) + v(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $A' = (I - \Delta TA)^{-1}$; $B' = A' \cdot \Delta T \cdot B$ 。 $w(t-1)$ 为模型的过程噪声,假设其服从 $P(w) \sim (0, Q)$ 分布, $Q = E(ww^T)$; $v(t)$ 为量测装置产生的测量噪声,假

设其服从 $\mathbf{P}(\mathbf{v}) \sim (0, \mathbf{R})$ 分布, $\mathbf{R} = \mathbf{E}(\mathbf{v}\mathbf{v}^T)$, $\mathbf{E}$ 表示期望。本文设置 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 满足的协方差矩阵期望为 0, 方差分别为 0.5、0.1, 以模拟满足一定概率分布的建模噪声及测量噪声影响。

3.4 数据融合

数据融合意味着将两种不同方式下的估计值进行最优组合, 实现最优状态估计, 以尽可能削弱量测谐波、噪音等干扰因素的影响。卡尔曼滤波是一种利用线性系统状态方程, 通过系统输入输出观测数据, 对系统状态进行最优估计的算法。由于观测数据中包括系统中的噪声和谐波干扰的影响, 所以本文中的最优估计也可看作是滤波过程。卡尔曼滤波分为预测和矫正, 预测是由模型得到状态变量的先验估计值, 矫正是由卡尔曼增益及测量方程对先验估计值进行矫正以得到更为精确的后验估计值。

预测首先要计算 $\hat{\mathbf{x}}^-$ 、 $\mathbf{P}^-(t)$ (先验误差协方差矩阵):

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}^-(t) = \mathbf{A}'\hat{\mathbf{x}}(t-1) + \mathbf{B}'\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{P}^-(t) = \mathbf{A}'\mathbf{P}(t-1)\mathbf{A}' + \mathbf{Q} \end{cases} \quad (10)$$

矫正主要是要计算卡尔曼增益 $\mathbf{K}(t)$ 、后验估计值 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 以及更新误差协方差矩阵 $\mathbf{P}(t)$:

$$\begin{cases} \mathbf{K}(t) = \frac{\mathbf{P}^-(t)\mathbf{H}^T}{\mathbf{H}\mathbf{P}^-(t)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}} \\ \hat{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{x}}^-(t) + \mathbf{K}(t)(z(t) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}^-(t)) \\ \mathbf{P}(t) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(t)\mathbf{H})\mathbf{P}^-(t) \end{cases} \quad (11)$$

通过式(10)、(11)可以估计数字空间中的状态变量瞬时值 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 。 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 本质上由量测信号估计得到, 输电线路内部故障时, 量测端采集到的电压、电流满足的原始规律被破坏, 导致状态变量估计值 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 发生变化。因此, 可根据状态变量 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 的变化并结合虚拟故障模型进行态势感知, 从而构造保护原理。

4 基于状态变量的态势感知

本文的线路数字模型与物理实体在结构上保留了高度的相似性, 因此, 虚拟空间中数字模型的状态变量可以间接映射物理线路的状态特征, 从而可利用状态变量的变化实现保护的启动、分相差动、测距等功能性需求。

4.1 保护启动

对于交流信号, 工频变化量能灵敏反映信号的异常程度, 若量测值的工频变化量突然增大, 意味着极有可能发生了故障。状态变量 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 由量测值估计得到, 因此状态变量的工频变化量, 后续简称为状态变化量, 也将突然增大。可根据状态变化量的

大小判断是否发生故障, 从而构造启动判据。

状态变化量表示如下

$$\Delta\hat{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{x}}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t - T / \Delta T) \quad (12)$$

式中: $T = 0.02\text{s}$, 表示一个工频周期; $T / \Delta T$ 表示一个工频周期内采样点数。

定义模型总状态变化量 $\Delta\zeta(t)$ 为各状态变量归一化之和:

$$\Delta\zeta(t) = \mathbf{w}^T \Delta\hat{\mathbf{x}}(t) \quad (13)$$

式中: $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2]^T$; $\mathbf{w}_1 = \frac{1}{I_N}[1, 1, 1, 1, 1, 1]$;

$\mathbf{w}_2 = \frac{1}{U_N}[1, 1, 1, 1, 1, 1]$; $\Delta\zeta(t)$ 表示 t 时刻瞬时虚拟电流、端口实测电压工频变化量之和的绝对值; I_N 、 U_N 分别表示额定电流、额定电压。

可将 $\Delta\zeta(t)$ 展开如下。

$$\begin{aligned} \Delta\zeta(t) = & \sum_{m=A,B,C} (i_{dm}(t) - i_{dm}(t - T / \Delta T)) + \\ & \sum_{n=a,b,c} (i_{dn}(t) - i_{dn}(t - T / \Delta T)) + \\ & \sum_{m=A,B,C} (v_m(t) - v_m(t - T / \Delta T)) + \\ & \sum_{n=a,b,c} (v_n(t) - v_n(t - T / \Delta T)) \end{aligned} \quad (14)$$

对于正常情况量测瞬时值与模型实时匹配, 三相对称, 对任意时刻 t , 如下关系始终成立:

$$\begin{cases} \sum_{m=A,B,C} i_{dm}(t) = 0 \\ \sum_{n=a,b,c} i_{dn}(t) = 0 \\ \sum_{m=A,B,C} v_m(t) = 0 \\ \sum_{n=a,b,c} v_n(t) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

结合式(14)可得, $\Delta\zeta(t) = 0$ 。

若输电线路发生短路故障, 双端量测信息服从的原始规律被破坏, 基于正常数字模型估计得到的各状态变量不再满足上式, 方程平衡条件被打破, $\Delta\zeta(t)$ 将发生变化, 因此可设置一个稍大于零的门槛值 ζ_{set} 判断原始量测信号服从的原始规律是否被破坏。

本文定义启动判据式如下:

$$|\Delta\zeta(t)| > \zeta_{\text{set}} \quad (16)$$

式中: ζ_{set} 可按照线路额定电压、电流和的 20%~50% 整定, 以防止启动元件频繁启动, 本文在新能源接入场景以及特高压接入场景下分别取为 0.2、0.5。

4.2 分相差动

$\Delta \hat{\mathbf{x}}(t)$ 包含了所有相的状态变化量信息, 以 A 相状态变化量 $\Delta \hat{\mathbf{x}}_A(t)$ 为例进行机理分析, $\Delta \hat{\mathbf{x}}_A(t)$ 表示如下:

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}_A(t) = [\Delta i_{dA}(t), \Delta i_{da}(t), \Delta v_A(t), \Delta v_a(t)]^T \quad (17)$$

对于正常、区外故障, 在任意时刻 t , 由图 3 知虚拟电流始终满足如下约束关系:

$$i_{dA}(t) + i_{da}(t) = 0 \quad (18)$$

因此,

$$\Delta i_{dA}(t) + \Delta i_{da}(t) = 0 \quad (19)$$

区内故障时, 由图 3 知, 虚拟电流将满足:

$$\Delta i_{dA}(t) + \Delta i_{da}(t) = \Delta i_{dfA}(t) \quad (20)$$

式中: Δi_{dfA} 表示虚拟故障电流工频变化量。

因此, 可通过 Δi_{dfA} 的大小判断 A 相是否发生区内、外故障。各相虚拟故障电流与 $\Delta \hat{\mathbf{x}}(t)$ 的关系如下:

$$\begin{cases} \Delta i_{dfA}(t) = \mathbf{w}_A^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \Delta i_{dfB}(t) = \mathbf{w}_B^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \Delta i_{dfC}(t) = \mathbf{w}_C^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{w}_A = [e_1^T, e_1^T, 0, 0]^T$; $\mathbf{w}_B = [e_2^T, e_2^T, 0, 0]^T$; $\mathbf{w}_C = [e_3^T, e_3^T, 0, 0]^T$ 。

假设, 启动时刻为 t_s , 设置展宽时间窗为 T_w , 对于虚拟空间中的离散状态变量, 可设置分相差动判据式如下:

$$\Delta \zeta_\varphi > \Delta \zeta_{set\varphi} \quad (22)$$

式中: $\Delta \zeta_\varphi = \frac{\Delta T \sum_{t=t_s}^{t_s+T_w} \mathbf{w}_\varphi^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t)}{T_w}$ 表示展宽时间窗期间的 φ 相的平均虚拟故障电流大小; φ 为 A、B、C; $\Delta \zeta_{set\varphi}$ 表示分相差动定值, 取值为 0~1; $\Delta \zeta_{set\varphi}$ 越小、灵敏性越强, 本文取 $\Delta \zeta_{set\varphi}$ 为 $\zeta_{set}/3$ 。

4.3 测距

以最为常见的不对称接地短路故障为例, 图 3 的 A 相故障等值模型在结构上等价于零序故障等值模型, 如图 4 所示。

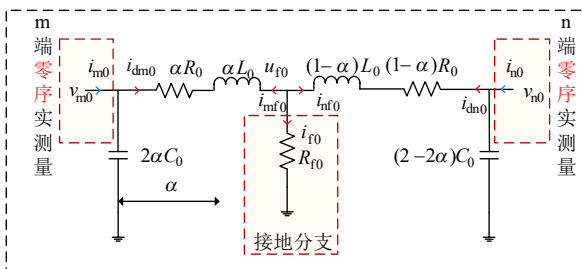


图 4 虚拟零序等值模型

Fig. 4 Virtual equivalent modeling of zero component

虚拟空间中各状态量满足的物理规律与物理模型完全相同, 可推导出如下测距方程:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\Delta \zeta_{20}}{\Delta \zeta_{10} + \Delta \zeta_{20}} \\ \Delta \zeta_{10} = i_{dm0}(2v_{n0} - v_{m0}) \\ \Delta \zeta_{20} = i_{dn0}(2v_{m0} - v_{n0}) \end{cases} \quad (23)$$

式(23)表明故障距离 α 只与零序状态变化量 $\Delta \zeta_{10}$ 、 $\Delta \zeta_{20}$ 有关, 而 $\Delta \zeta_{10}$ 、 $\Delta \zeta_{20}$ 只取决于虚拟故障电流以及双端实测电压量, 与实际物理模型参数、过渡电阻无关。因此, 可以根据式(23)间接感知故障位置。

$\Delta \zeta_{10}$ 、 $\Delta \zeta_{20}$ 可用 $\Delta \hat{\mathbf{x}}(t)$ 离散化表示如下:

$$\begin{cases} \Delta \zeta_{10}(t) = \mathbf{w}_{10}^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \mathbf{w}_{30}^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \Delta \zeta_{20}(t) = \mathbf{w}_{20}^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \mathbf{w}_{40}^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{w}_{10} = [\mathbf{w}_0, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}]^T$; $\mathbf{w}_{20} = [\mathbf{0}, \mathbf{w}_0, \mathbf{0}, \mathbf{0}]^T$; $\mathbf{w}_{30} = [\mathbf{0}, \mathbf{0}, -\mathbf{w}_0, 2\mathbf{w}_0]^T$; $\mathbf{w}_{40} = [\mathbf{0}, \mathbf{0}, 2\mathbf{w}_0, -\mathbf{w}_0]^T$; $\mathbf{w}_0 = [\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}]^T$ 。

当启动元件启动后, 实时故障测距也瞬间启动, 根据 $\Delta \hat{\mathbf{x}}(t)$ 计算 $\Delta \zeta_{10}(t)$ 、 $\Delta \zeta_{20}(t)$, 再根据式(23)计算 $\alpha(t)$, 最后统计出 t_1 至 $t_1 + T_w$ 时间内的故障距离序列 α 如下:

$$\begin{cases} \alpha = [\alpha(t_1), \alpha(t_1 + \Delta T), \dots, \alpha(t_1 + n\Delta T)] \\ 0 \leq n \leq \frac{T_w}{\Delta T} \end{cases} \quad (25)$$

为提高测距精度, 计算最终距离时将 α 中最大、最小值去掉, 再计算剩余元素的平均值 α_{avg} 。

$$0 < \alpha_{avg} < 1 \quad (26)$$

4.4 保护流程

所提保护流程如图 5 所示。

1) 模型初始化/更新阶段。

①初始化阶段, 实时采集双端电压、电流瞬时值, 根据式(2)、(3)在线计算 R 、 L 、 C , 直至模型满足式(5)收敛条件, 然后计算 A' 、 B' 。

②在装置运行过程中, 可根据式(5)实时判断数字模型的拟合程度, 动态更新线路数字模型参数, 模型更新时间段可选择运维阶段或者外界环境发生变化时(例如线路覆冰), 从而消除参数性误差累积效应。

2) 态势感知阶段。

①根据式(10)、(11)实时计算虚拟状态量 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 。

②根据 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 计算状态变化量 $\Delta \zeta(t)$, 若 $\Delta \zeta(t)$ 瞬间增大, 认为被保护线路出现异常状态, 并进行分相差动判断及故障测距。

③对于分相差动,若某一相满足 $\Delta\zeta_\varphi > \Delta\zeta_{\text{set}\varphi}$,则认为该相发生区内短路故障,发出分相跳闸信号。

④对于故障测距,启动装置启动后,提取零序状态变化量 $\zeta_{f0}(t)$ 、 $\zeta_{20}(t)$,若有零序状态变化量产生,则由式(23)开始实时计算故障距离 $\alpha(t)$,以时间窗展宽期间的平均故障距离 α_{avg} 为最终测距结果,并在发出分相跳闸信号的同时估计出故障位置。

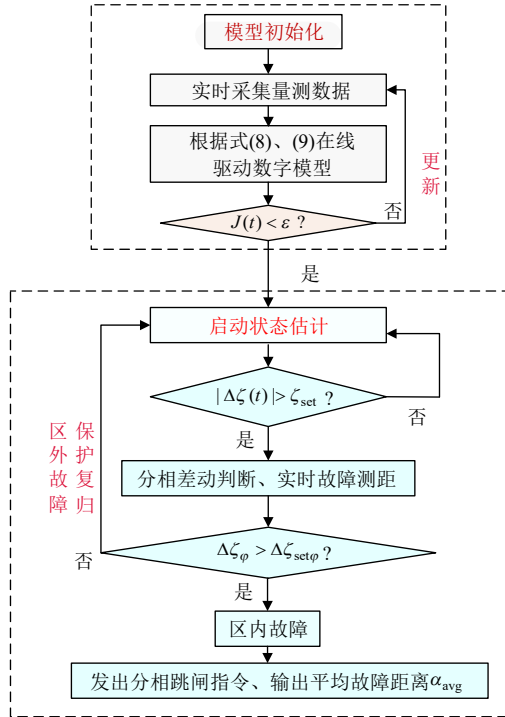


图5 保护流程

Fig. 5 Protection flowchart

5 仿真验证及分析

为验证本文所提保护方法的有效性,在PSCAD/EMTDC中分别搭建了特高压交流送出系统、新能源送出系统进行不同场景下的仿真分析,故障起始时刻均设置为1s,采样频率为10kHz,仿真参数如附录图A2、表A1、表A2所示。

5.1 特高压交流输电场景下性能验证

为说明所提数字模型与机理模型的本质区别,在PSCAD中搭建了如图6所示的1000kV特高压半波长交流输电系统,线路模型采用依频等效模型以精细化模拟实际物理线路,线路全长3000km,在线路中点处设置AG经1000Ω过渡电阻故障,展宽时间窗设置为10ms,所提保护动作情况如图7、8所示。

由图7知,在线更新过程中,数字模型参数大约在0.1s后趋于稳定,最终收敛至 $R_A=R_B=R_C=6972.25\Omega$ 、 $L_A=L_B=L_C=-10.0228\text{H}$ 、 $C_A=C_B=C_C=$

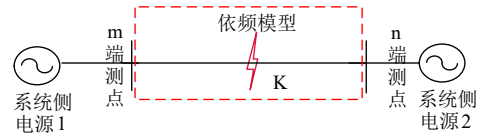


图6 1000kV 特高压半波长交流输电系统

Fig. 6 1000kV UHV semi-wavelength AC transmission system

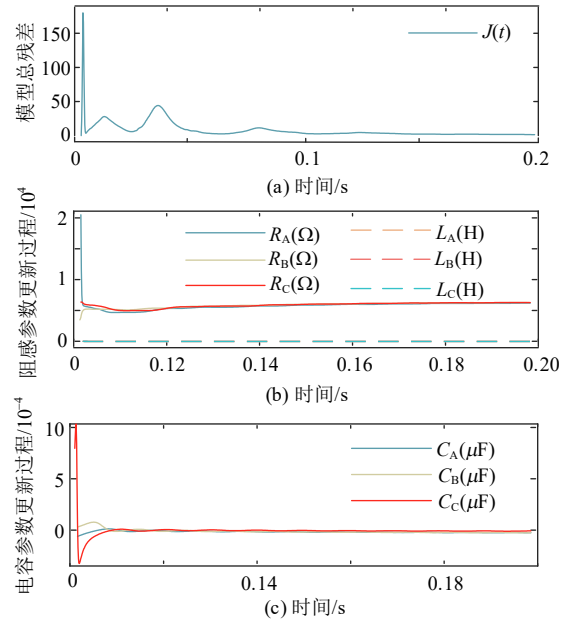


图7 数字模型参数更新过程

Fig. 7 Process of updating digital model parameters

$-2.70392\text{e}-6\text{F}$ 。显然数字模型参数已经失去了和机理模型参数的对等意义。

利用上述数字模型参数进行状态估计,所提保护动作性能如图8所示。启动时刻为故障后5ms,

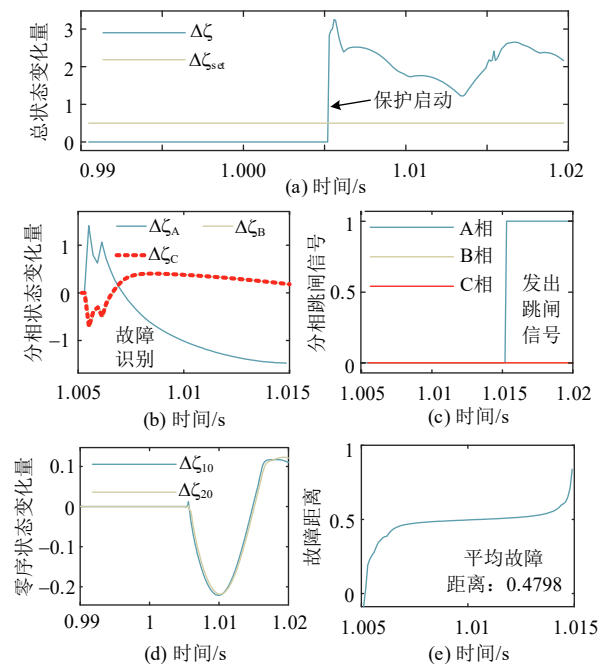


图8 特高压送出场AG经1000Ω过渡电阻短路故障

Fig. 8 Extra-high-voltage sending scenario AG short-circuit fault via 1000Ω transition resistor

时间窗展宽 10ms, 跳闸信号在故障后 15ms 准确发出, 最终以平均故障距离为故障位置估计结果, 该工况下故障位置相对于 m 测点 0.4798 处, 测距误差在 4% 以内。

综上, 虚拟空间中, 数字模型参数与机理模型完全不同并不影响最终保护的动作性能, 所提保护抽象出了物理模型故障最本质的结构属性, 参数将随量测驱动信号自适应调整, 因此不受机理模型参数的影响, 能在该场景下可靠、迅速动作、并实现故障位置的估计。

5.2 边界处短路保护动作性能验证

为验证所提保护在边界处的动作性能, 在 n 测点母线处设置金属性三相短路故障, 所提保护动作情况如附录图 A3 所示。当边界处发生严重对称短路故障时, 状态变化量突变, 保护启动, 但分相状态变化量并不会累积到所设定值, 不会发出跳闸信号, 不输出故障距离, 所提保护能可靠闭锁, 验证了所提保护的可靠性。

5.3 新能源接入场景下性能验证

在 PSCAD 中搭建了附录图 A4 所示的 500MW 光伏接入系统模型, 送出线路全长设置为 150km, 线路模型采用 PI 模型, 线路中点处设置 BCG 金属性短路故障, 故障发生时刻设置为 1s。考虑新能源对保护速动性要求高, 在该场景下设置 ζ_{set} 为 0.2, 展宽时间窗为 5ms。所提保护、传统保护动作情况如附录图 A5 所示, 该场景下动作时间在 5ms 左右, 故障相准确动作, 非故障相闭锁, 测距误差在 7% 以内。

5.4 与传统差动保护对比

附录图 A6 展示了相同场景下的传统差动保护动作性能, 定值设为 0.6, 可以直观看出传统差动保护受电源特性影响明显, 性能下降至极限, 已无法正确动作。所提保护在原理上不受新能源特性影响, 在该场景下展现出明显优势。

5.5 高阻接地场景下性能验证

在高比例新能源送出场景下, 设置 AG 短路故障类型, 过渡电阻设置为 300 Ω , 所提保护动作性能如附录图 A7 所示。在 300 Ω 过渡电阻条件下, 启动元件在 1.002s 启动, 随后展宽 5ms 时间窗, 根据 5ms 内各分相残差的累积量, 最终 A 相跳闸信号在 1.007s 时刻发出, 测距误差在该场景下仅为 1.1%, 展现出了高阻接地工况下所提保护优越的动作性能。

5.6 量测干扰下性能验证

以高比例新能源送出场景为例, 故障位置设置

在距 m 端测点 0.7 处, 故障类型为 AG 短路故障, 过渡电阻为 200 Ω , 噪声设置为 25dB。所提保护动作性能如附录图 A8 所示, 各残差变化量出现毛刺现象, 所提保护仍能在正常情况下可靠闭锁, 故障后 5ms 准确发出分相跳闸信号, 故障瞬时位置受量测噪声影响较大, 但时间窗展宽期间的平均距离受到的干扰较小, 最终测距误差在 7% 以内。

5.7 通信不同步下性能验证与分析

以特高压交流输电场景为例, 线路长度为 3000km, 在仿真中对 n 端各量测量施加 10ms 的通信时延, 数字模型参数更新过程、保护动作情况如附录图 A9、A10 所示。数字模型参数会自适应匹配量测信号, 相同的物理场景, 服从不同数字规律的采样值将导致不同的数字模型参数。只要数字模型参数与量测值匹配, 保护最终的性能几乎不受影响, 验证了所提保护融合了传感器特性, 不依赖于实际线路参数、不受量测因素影响的特点。

5.8 测距误差分析

附录 A 表 A3、A4 展示了不同故障位置、过渡电阻下的测距结果。所提保护测距平均误差为 4%, 最大误差为 8.34%, 最小误差为 0.08%。最大误差来源于 ABCG 短路故障类型, 由于该类型短路工况下采用正序量进行测距(方案见附录 B(3)), 正序分量受暂态直流分量、非周期分量等多种因素影响较大, 导致测距精度较差。最小误差来源于 AG 短路故障类型, 该类型工况下采用零序量进行故障测距, 零序分量受电源特性影响小, 更能反映线路本身结构特性的变化, 因此具有较高的测距精度。

6 结论

本文基于虚拟孪生思想, 结合数字模型的状态估计技术, 间接“感知”实际线路的状态信息, 实现了线路保护的启动、分相差动、测距。得到如下结论:

1) 基于数据、模型双驱动的虚拟孪生保护技术可有效降低电源特性、分布参数、通信等外界因素的干扰, 全面提升保护的四性。

2) 在新能源规模化送出场景下, 所提保护只需 5ms 时间窗, 动作时间为 1ms, 最高可耐受 300 Ω 过渡电阻, 测距平均误差为 3.72%, 最大误差为 8.34%, 最小误差为 0.47%。在特高压经长线路送出场景下, 只需 10ms 时间窗, 可耐受 1000 Ω 过渡电阻, 测距平均误差为 4.13%, 最大误差为 8.7%, 最小误差为 0.08%。

本文的虚拟孪生保护研究思路可为难以精确

建模、精准求取参数的“黑箱”状态估计问题提供参考。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 国家发展改革委国家能源局.《“十四五”现代能源体系规划》印发[J]. 华北电业, 2022(3): 4.
- [2] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750(in Chinese).
- [3] 孙大雁, 耿建, 杨胜春, 等. 新型电力系统环境下煤电与新能源等多元资源协调优化运行及其挑战[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3105-3113. SUN Dayan, GENG Jian, YANG Shengchun, et al. Challenges of coordinated and optimized operation of coal power and new energy and other diversified resources in new power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3105-3113(in Chinese).
- [4] LIANG Yingyu, LI Wulin, HUO Yaotong. Zone I distance relaying scheme of lines connected to MMC-HVDC stations during asymmetrical faults: problems, challenges, and solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2929-2941(in Chinese).
- [5] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 逆变型电源对故障分量方向元件的影响机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3230-3236.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Influence mechanism of inverter-interfaced renewable energy generators on fault component based directional relay[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3230-3236(in Chinese).
- [6] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 100-105.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 100-105(in Chinese).
- [7] 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(in Chinese).
- [8] 贺家李, 李永丽, 李斌, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案(二)保护配置方案[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 1-6.
HE Jiali, LI Yongli, LI Bin, et al. Relay protection for UHV transmission lines part two disposition of relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 1-6(in Chinese).
- [9] 贾科, 杨哲, 赵其娟, 等. 适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3271-3279.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHAO Qijuan, et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission line connected to renewable energy power plants[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3271-3279(in Chinese).
- [10] 晁晨树, 郑晓冬, 高飘, 等. 针对光伏场站送出线路不对称短路故障的自适应距离保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6681-6692.
CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. Adaptive distance protection for transmission line of photovoltaic station during asymmetric short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6681-6692(in Chinese).
- [11] 武奕彤, 高厚磊, 袁通, 等. 基于特勒根定理的风场送出线路新型纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 117-126.
WU Yitong, GAO Houlei, YUAN Tong, et al. Novel pilot protection for wind farm transmission lines based on Tellegen's theorem[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 117-126(in Chinese).
- [12] 徐彬, 高厚磊, 袁通, 等. 基于拟功率定理的海上风电柔直并网线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 44-54.
XU Bin, GAO Houlei, YUAN Tong, et al. Pilot protection for VSC-HVDC transmission line of grid-connected offshore wind farm based on quasi-power theorem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 44-54(in Chinese).
- [13] 王兴国, 于溯, 周泽昕, 等. 基于电流突变采样值轨迹特征的快速母线保护[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1423-1431.
WANG Xingguo, YU Su, ZHOU Zexin, et al. Bus protection based on trajectory characteristics of current sample value mutation[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1423-1431(in Chinese).
- [14] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019.
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019(in Chinese).
- [15] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6274.
- [16] JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6274(in Chinese).
- [17] 刘佳硕, 李永丽, 陈晓龙, 等. 基于暂态电流比值的多端柔性直流电网保护[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1439-1449.
LIU Jiashuo, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Novel protection based on transient current ratio for MTDC grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1439-1449(in Chinese).
- [18] YANG Zhe, LIAO Wenlong, WANG Hongyi, et al. Improved euclidean distance based pilot protection for lines with renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(12): 8551-8562.
- [19] 余越, 王聪博, 沙兆义, 等. 基于矩阵突变特征的风电经柔直送出交流线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5441-5449.
YU Yue, WANG Congbo, SHA Zhaoyi, et al. AC transmission line protection for wind farms integrated with VSC-HVDC system based on matrix mutation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5441-5449(in Chinese).
- [20] 李斌, 贺家李, 常文华, 等. 基于贝瑞隆模型的长线路距离保护[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 52-56.
LI Bin, HE Jiali, CHANG Wenhua, et al. Bergeron model based distance protection for long transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 52-56(in Chinese).
- [21] 索南加乐, 王晨清, 康小宁, 等. 基于分布参数频域模型识别的纵联保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 145-153.
SUONAN Jiale, WANG Chenqing, KANG Xiaoning, et al. Transmission line pilot protection based on frequency-domain model identification of distributed parameter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 145-153(in Chinese).
- [22] 靳幸福, 宋国兵, 徐海洋, 等. 利用模量模型识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 100-106.

- JIN Xingfu, SONG Guobing, XU Haiyang, et al. A novel pilot protection for VSC-HVDC transmission lines using modulus model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 100-106(in Chinese).
- [23] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3580-3585. SONG Guobing, WANG Chenqing, TENGIS, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585(in Chinese).
- [24] SAKIS MELIOPOULOS A P, 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.
- [25] LIU Yu, SAKIS MELIOPOULOS A P, 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.
- [26] 李猛, 聂铭, 和敬涵, 等. 基于数字孪生的柔性直流电网纵联保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1773-1782. LI Meng, NIE Ming, HE Jinghan, et al. Pilot protection of flexible DC grid based on digital twin[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1773-1782(in Chinese).
- [27] 贺兴, 陈旻昱, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙技术的能源互联网态势感知系统论方法研究(一): 概念、挑战与研究框架[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 547-560. HE Xing, CHEN Minyu, TANG Yuezhong, et al. System theory study on situation awareness of energy internet of things based on digital twins and metaverse (I): concept, challenge, and framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 547-560(in Chinese).
- [28] 贺兴, 潘美琪, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙的能源互联网认知系统论(二): 面向复杂系统涌现现象的虚拟仿真推演框架[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4311-4322. HE Xing, PAN Meiqi, TANG Yuezhong, et al. System theory on perception of energy internet of things based on digital twins and metaverse (II): virtual simulation and analytical deduction framework for emergency phenomenon in complex system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4311-4322(in Chinese).
- [29] 王安定, 葛耀中. 模量变换技术在反应故障分量的微机保护中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 1988, 12(3): 15-25. WANG Anding, GE Yaozhong. Application study of modal transformation techniques to microprocessor protection based on fault components[J]. Automation of Electric Power Systems, 1988, 12(3): 15-25(in Chinese).



王少雄

在线出版日期: 2025-05-15。

收稿日期: 2024-07-08。

作者简介:

王少雄(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: 864273603@qq.com;

吕思辰(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能应用, E-mail: sichen3@ualberta.ca;

吕飞鹏(1968), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护和人工智能应用, E-mail: fp.lu@163.com。

(编辑 李健一)

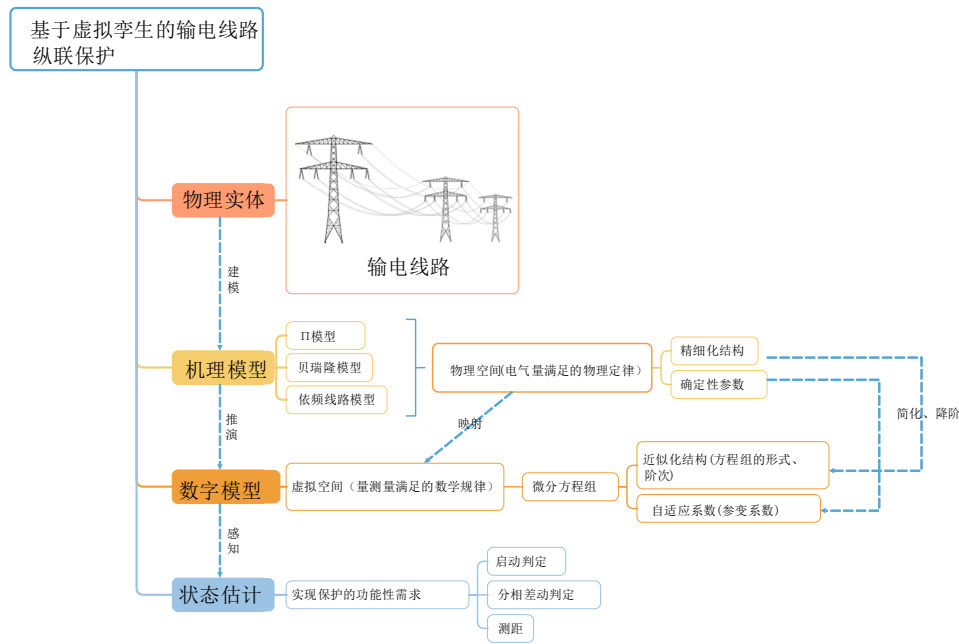


图 A1 虚拟孪生保护框架

Fig. A1 Virtual Twin Protection Framework

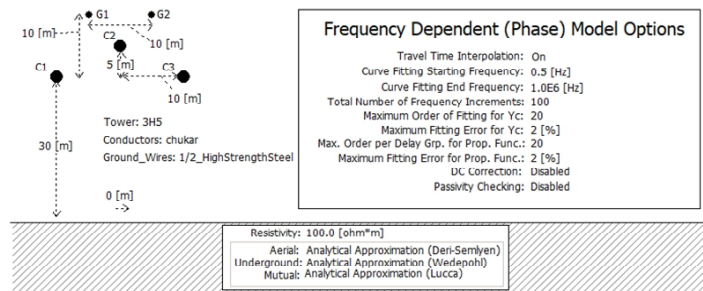


图 A2 交流输电线路频变参数模型及杆塔模型

Fig. A2 Frequency-dependent overhead line model of AC transmission lines and tower model

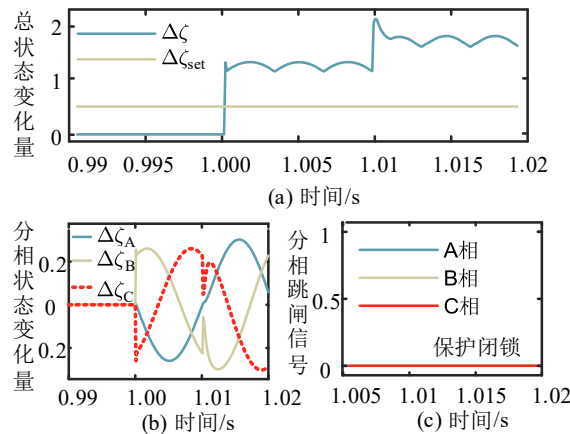


图 A3 n端测点ABC金属性短路故障

Fig. A3 Metallic short-circuit fault at n-terminal measurement point ABC

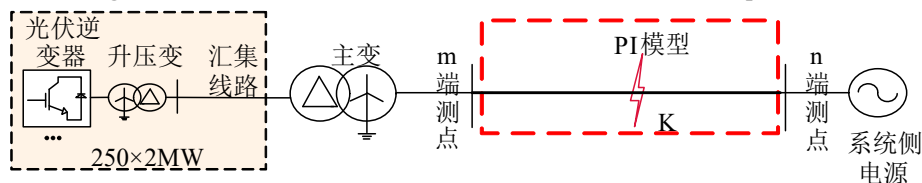


图 A4 高比例新能源接入系统

Fig. A4 High percentage of new energy access systems

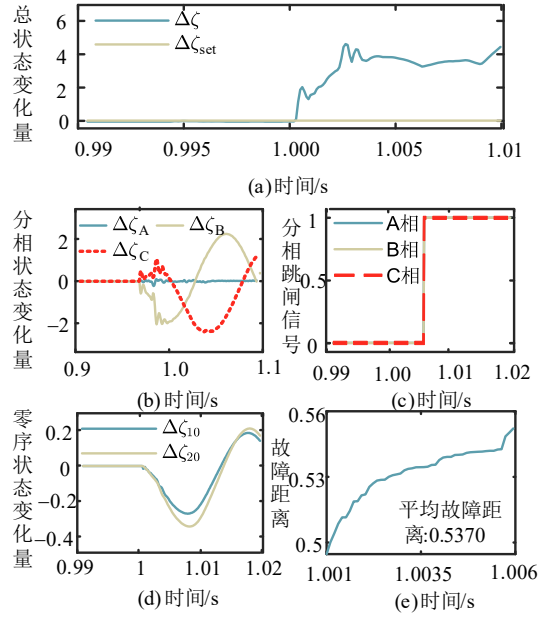


图 A5 500MW 光伏接入场景所提保护性能

Fig. A5 Performance of protection proposed for PV access scenarios

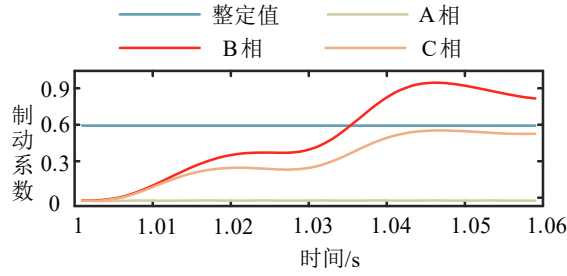


图 A6 传统差动保护动作情况

Fig. A6 Conventional differential protection operation

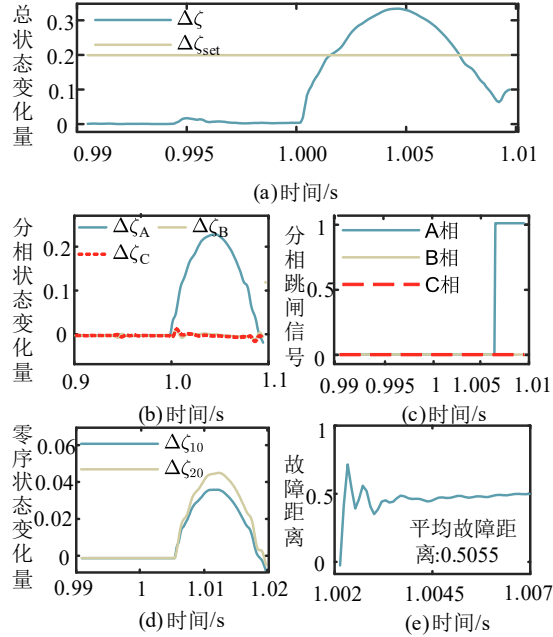


图 A7 新能源接入场景经 300Ω 过渡电阻 AG 短路故障

Fig. A7 New energy access scenario via 300Ω transition resistor AG short circuit faults

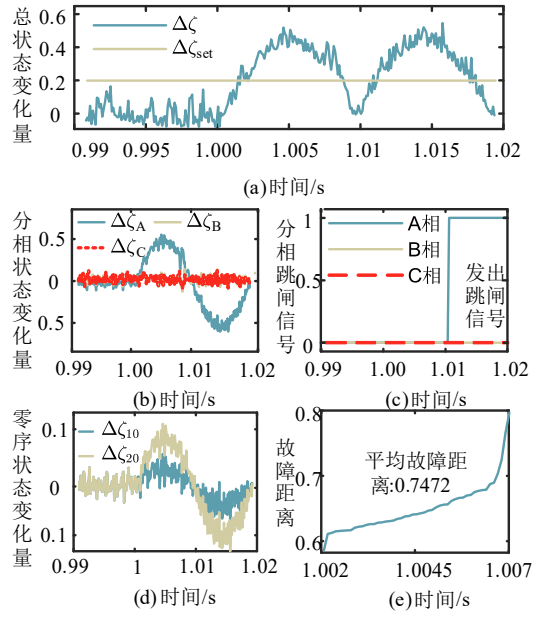


图 A8 25dB 噪音环境经 200Ω 过渡电阻 AG 短路故障所提保护性能

Fig. A8 Protection performance of 25dB noise environment via 200Ω transition resistor AG short-circuit fault mentioning

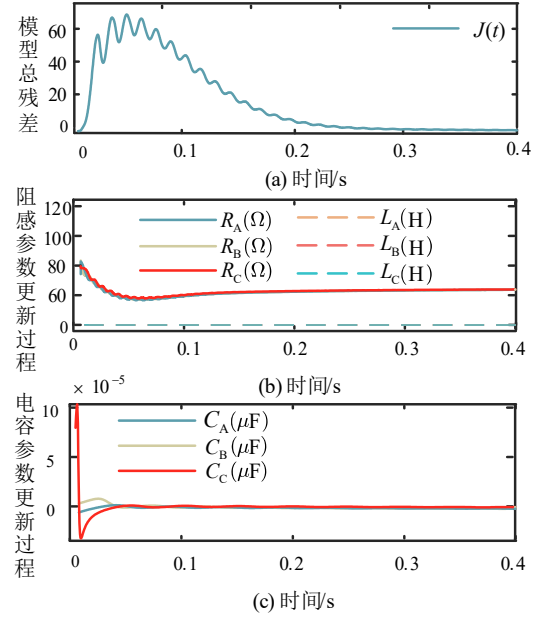


图 A9 10ms 通信时延下数字模型参数更新过程

Fig. A9 Update process of digital model parameters under 10ms communication delay

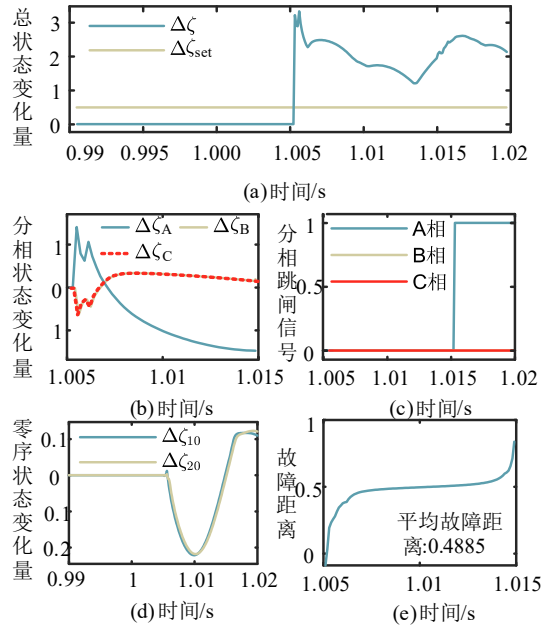


图 A10 10ms 通信时延下所提保护动作情况

Fig. A10 The proposed protection action under 10ms communication delay

表 A1 新能源送出系统仿真模型参数

Table A1 parameters of simulation model for new energy access systems

模型名称	参数名称	数值
光伏单元	额定容量	2MW
	直流电容	5000uF
	LCL 滤波器参数	0.5mH/200uF/0.25mF
	模块数	250
	电流环 PI 参数	0.15p.u/0.4p.u
升压变	额定容量	2MW
	变比	35/0.38kV
	联结方式	Dyn
	短路阻抗	6%
主变	额定容量	500MW
	变比	220/35kV
	联结方式	YNd
	短路阻抗	10%
汇集线路	等效阻抗	0.11+j0.157Ω
送出线路	正序电阻	0.000076Ω/m
	正序感抗	0.000338Ω/m
	正序容抗	370.3155MΩ*m
	零序电阻	0.000284Ω/m
	零序感抗	0.000824Ω/m
	零序容抗	522.084MΩ*m

表 A2 特高压交流输电系统仿真模型参数

Table A2 Parameters of simulation model for extra-high voltage AC transmission system

模型名称	参数名称	数值
系统侧 m	电源电动势	1000kV ∠0°
	等效电阻 R	9.186Ω
	等效电感 L	138mH
系统侧 n	电源电动势	1000kV ∠20°
	等效电阻 R	9.186Ω
	等效电感 L	138mH

表 A3 特高压长线路送出场景测距结果、保护动作情况						
Table A3 location results and protection performance in UHV semi-wavelength AC transmission system						
故障位置	过渡电阻/ Ω	测距结果				保护是否正确动作
		故障类型				
		AG	BC	BCG	ABCG	
0.25	10	0.2239	0.1838	0.2106	0.1766	√
	100	0.2491	0.3104	0.2200	0.3214	√
	500	0.2791	0.3142	0.2446	0.3020	√
	1000	0.3115	0.3245	0.2511	0.3216	√
0.5	10	0.4746	0.4850	0.4749	0.4839	√
	100	0.4755	0.4672	0.4755	0.4733	√
	500	0.4755	0.4675	0.4775	0.4469	√
	1000	0.4821	0.4802	0.4773	0.4694	√
0.75	10	0.7448	0.6993	0.7431	0.6878	√
	100	0.7167	0.7010	0.7345	0.6981	√
	500	0.6686	0.6692	0.7115	0.6628	√
	1000	0.6738	0.6620	0.7131	0.6683	√
误差分析		平均误差				4.13%
		最大误差				8.7%
		最小误差				0.08%

表 A4 新能源规模化接入场景下测距结果、保护动作情况						
Table A4 location results and protection performance in new energy access systems						
故障位置	过渡电阻/ Ω	测距结果				保护 是否 正确动作
		故障类型				
		AG	BC	BCG	ABCG	
0.25	10	0.3126	0.2763	0.3101	0.2133	√
	100	0.3200	0.3095	0.333	0.2842	√
	300	0.3313	0.3028	0.3223	0.2761	√
0.5	10	0.5105	0.5541	0.5085	0.5650	√
	100	0.5172	0.5087	0.5142	0.5679	√
	300	0.5269	0.4951	0.5180	0.5558	√
0.75	10	0.7089	0.7248	0.7104	0.8263	√
	100	0.7133	0.7738	0.7134	0.8374	√
	300	0.7207	0.7547	0.7144	0.8238	√
误差分析		平均误差				3.72%
		最大误差				8.34%
		最小误差				0.47%

附录 B

1) 各参数矩阵的在线更新公式。

根据前述数字模型的结构性假设，各端口电气量、虚拟状态量满足如下方程：

$$\left\{\begin{aligned} \boldsymbol{v}_m &= \boldsymbol{R} \boldsymbol{i}_{dm} + \boldsymbol{L} \frac{d\boldsymbol{i}_{dm}}{d\tau} + \boldsymbol{v}_n \\ \boldsymbol{v}_n &= \boldsymbol{R} \boldsymbol{i}_{dn} + \boldsymbol{L} \frac{d\boldsymbol{i}_{dn}}{d\tau} + \boldsymbol{v}_m \\ \boldsymbol{i}_m &= \boldsymbol{C} \frac{d\boldsymbol{v}_m}{d\tau} + \boldsymbol{i}_{dm} \\ \boldsymbol{i}_n &= \boldsymbol{C} \frac{d\boldsymbol{v}_n}{d\tau} + \boldsymbol{i}_{dn} \end{aligned}\right. \quad (\text{B1})$$

式中： $\boldsymbol{R} = \text{diag}(R_A, R_B, R_C)$ ； $\boldsymbol{L} = \text{diag}(L_A, L_B, L_C)$
 $\boldsymbol{C} = \text{diag}(C_A, C_B, C_C)$ ； $\boldsymbol{i}_{dm} = [i_{dA}, i_{dB}, i_{dC}]^T$ ； $\boldsymbol{i}_{dn} =$

$$[i_{da}, i_{db}, i_{dc}]^T。$$

对于正常情况下的数字模型，各虚拟状态量满足如下约束方程：

$$i_{dm} + i_{dn} = 0 \quad (B2)$$

设差动电压、电流，制动电压、电流分别为 v_{mn} 、 i_{mn} ， $\tilde{v}_{mn}$ 、 $\tilde{i}_{mn}$ ，其中， $v_{mn} = v_m - v_n$ ， $i_{mn} = i_m - i_n$ ， $\tilde{v}_{mn} = v_m + v_n$ ， $\tilde{i}_{mn} = i_m + i_n$ 。

结合式(B1)、(B2)可得：

$$\begin{cases} \tilde{i}_{mn} = C \frac{d\tilde{v}_{mn}}{d\tau} \\ LC \frac{d^2 v_{mn}}{d\tau^2} + RC \frac{dv_{mn}}{d\tau} + 2v_{mn} = L \frac{di_{mn}}{d\tau} + Ri_{mn} \end{cases} \quad (B3)$$

对于大多数机理模型，电容参数基准单位一般为 μF ，电感参数基准单位为 H ，电阻参数基准单位为 Ω ，考虑到机理模型和数字模型参数在数量级上的相似性，数字模型电容参数与电阻、电感参数通常相差 3 个数量级以上。因此，式(B3)可简化如下：

$$\begin{cases} \tilde{i}_{mn} = C \frac{d\tilde{v}_{mn}}{d\tau} \\ 2v_{mn} \approx L \frac{di_{mn}}{d\tau} + Ri_{mn} \end{cases} \quad (B4)$$

由上式可知，制动电压、电流满足电容方程；差动电压、电流近似满足阻感方程。因此，可以利用端口实测的制动电压、电流更新电容参数；利用差动电压、电流更新电阻、电感参数，从而完成正常数字模型的在线驱动。

递推最小二乘法(RLS)是一种用于在线计算线性回归的方法。该算法可以在不需要保存所有数据的情况下，在线递推计算线性回归系数，因此可以利用瞬时采样值进行模型的实时更新，而不需要重新计算历史样本。本文选取该算法在线更新模型。

设采样时间间隔为 ΔT ，对连续时间变量 τ 做离散化处理，用 t 表示当前时刻采样值， $t-1$ 表示前一个 ΔT 时间间隔下的采样值，后续 t 均表示此含义。

假设 t 时刻待更新参数为。

$$\theta(t) = [\theta_1(t), \dots, \theta_n(t)]^T \quad (B5)$$

对于一个多输入单输出系统，输入数据为。

$$h_t = [h_1, \dots, h_n]^T \quad (B6)$$

输出数据为 y_t ，其最小二乘标准形式如下。

$$y_t = h_t^T \theta(t) \quad (B7)$$

上述标准形式对应的递推最小二乘格式如下。

$$\begin{cases} \hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + P_t h_t (y_t - h_t^T \hat{\theta}(t-1)) \\ P_t = [I - \frac{P_{t-1} h_t h_t^T}{1 + h_t^T P_{t-1} h_t}] P_{t-1} \end{cases} \quad (B8)$$

式中： P_0 为对角线元素很大的对称正定矩阵 $P_0 = p_0 I$ 。 P_0 的大小决定递推收敛速度，通常情况， p_0 取为 10^6 。

结合式(B6)、(B7)、(B8)并引入遗忘因子 λ ，可推导出电容参数矩阵的在线更新方程如下

$$\begin{cases} P_t = [\lambda - \frac{P_{t-1} (\tilde{V}_{mn})^2}{\lambda + \tilde{V}_{mn} P_{t-1} \tilde{V}_{mn}}] P_{t-1} \\ C(t) = C(t-1) + P_t \cdot \tilde{V}_{mn} \cdot (\tilde{I}_{mn} - \tilde{V}_{mn} \cdot C(t-1)) \\ J_C(t) = |C(t) - C(t-1)| \end{cases} \quad (B9)$$

式中： $\tilde{V}_{mn} = \text{diag}(\frac{d\tilde{v}_{mn}}{d\tau})$ ； $\tilde{I}_{mn} = \text{diag}(\tilde{i}_{mn})$ ； $\lambda = \lambda I$ ； J_C 表示电容参数更新残差。

其中 λ 表示遗忘因子，其本质上是一种用于控制旧数据的权重，当 λ 接近于 0 时，新数据的影响越大，反之旧数据的影响越大。只要该值小于 1，随着数据的不断更新，公式不断递推，新数据总会起作用，该值越大，模型参数收敛越平滑、稳定，其取值一般为 0.96-0.99，本文取为 0.98。

2) 参数更新过程

首先设置 P_0 ，初值 $C(0)$ ， $C(0)$ 中各元素按照实际电容参数单位设置，比如对于以 μF 为基准单位的物理模型，数字模型参数只需保证一定的相似性，可在 $1e-6$ 左右进行设置，本文设置为 $1e-7$ 。然后根据 t 时刻量测值 $\tilde{V}_{mn}$ 计算 P_t ，再计算 $C(t)$ ，即可实现电容参数 $C(t)$ 的实时更新，最后根据 $C(t)$ 与 $C(t-1)$ 的绝对差值计算实时残差 $J_C(t)$ ，用于后续判断模型收敛性。

同理，可推导出阻感参数矩阵的在线更新方程。

$$\begin{cases} P_t = [\lambda - \frac{P_{t-1} h_{RL} h_{RL}^T}{\lambda + h_{RL}^T P_{t-1} h_{RL}}] P_{t-1} \\ \hat{\theta}_{RL}(t) = \hat{\theta}_{RL}(t-1) + P_t h_{RL} (2 \cdot V_{mn} - h_{RL}^T \hat{\theta}_{RL}(t-1)) \\ RL(t) = \text{diag}(P_e \hat{\theta}_{RL}(t)) \\ J_{RL}(t) = |RL(t) - RL(t-1)| \end{cases} \quad (B10)$$

式中：

$$V_{mn} = \text{diag}(v_{mn})；P_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}；$$

$$\begin{aligned}
\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{RL}}(t) &= [\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{RLA}}(t), \hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{RLB}}(t), \hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{RLC}}(t)]^T ; \quad \hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{RLA}}(t) = [R_A, \\
&L_A]^T ; \hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{RLB}}(t) = [R_B, L_B]^T ; \hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{RLC}}(t) = [R_C, L_C]^T ; \quad \mathbf{h}_{\text{RLA}} = \\
&[i_{\text{aA}}, \frac{di_{\text{aA}}}{dt}]^T ; \mathbf{h}_{\text{RLB}} = [i_{\text{aB}}, \frac{di_{\text{aB}}}{dt}]^T ; \mathbf{h}_{\text{RLC}} = [i_{\text{aC}}, \frac{di_{\text{aC}}}{dt}]^T ; \\
\mathbf{h}_{\text{RL}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{\text{RLA}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{h}_{\text{RLB}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{h}_{\text{RLC}} \end{bmatrix} ; \\
\mathbf{RL}(t) &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}(t) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}(t) \end{bmatrix} = \text{diag}(\mathbf{P}_e \hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{RL}}(t)) 。
\end{aligned}$$

式中： $\mathbf{J}_{\text{RL}}$ 表示阻感参数更新残差。

阻感参数矩阵 $\mathbf{RL}(t)$ 更新方式同电容参数矩阵一致，不再赘述。

3) 基于正序量的测距方案

对于相间、三相对称短路故障，基于正序量的测距表达式如下

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\Delta \zeta_{2p}}{\Delta \zeta_{1p} + \Delta \zeta_{2p}} \\ \Delta \zeta_{1p} = i_{\text{dmp}}(2v_{\text{np}} - v_{\text{mp}}) \\ \Delta \zeta_{2p} = i_{\text{dnp}}(2v_{\text{mp}} - v_{\text{np}}) \end{cases} \quad (\text{B11})$$

$\Delta \zeta_{1p}$ 、 $\Delta \zeta_{2p}$ 可用 $\Delta \hat{\mathbf{x}}(t)$ 离散化表示如下

$$\begin{cases} \Delta \zeta_{1p}(t) = \mathbf{w}_{1p}^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \mathbf{w}_{3p}^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \Delta \zeta_{2p}(t) = \mathbf{w}_{2p}^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \mathbf{w}_{4p}^T \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) \end{cases} \quad (\text{B12})$$

式中： $\mathbf{w}_{1p} = [\mathbf{w}_p, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}]^T$; $\mathbf{w}_{2p} = [\mathbf{0}, \mathbf{w}_p, \mathbf{0}, \mathbf{0}]^T$;

$\mathbf{w}_{3p} = [\mathbf{0}, \mathbf{0}, -\mathbf{w}_p, 2\mathbf{w}_p]^T$; $\mathbf{w}_{4p} = [\mathbf{0}, \mathbf{0}, 2\mathbf{w}_p, -\mathbf{w}_p]^T$;

$\mathbf{w}_p = [0, \frac{\sqrt{3}}{3}, -\frac{\sqrt{3}}{3}]$ 。