

小级差需求下基于故障首半波比较的快速电流保护

李振兴¹,朱益¹,王扬蹊¹,陈艳霞²,皮志勇³,翁汉琨¹

(1. 三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心,湖北 宜昌 443002;

2. 国家电网北京市电力公司 电力科学研究院,北京 100075;

3. 国网湖北省电力有限公司荆门供电公司,湖北 荆门 448000)

摘要:基于时间级差配合的梯级电流保护受限于出口线路保护动作时间,为缩短保护研判时间,提升配电网多级配合能力,提出一种小级差需求下基于故障首半波比较的快速电流保护方法。对传统电流保护动作时间进行分析,采用整定值构建模板曲线,与故障电流采样值进行多点动态比较,基于有效值爬坡效应及采样值越限效应构建新的保护启动判据、考虑保护算法延迟及干扰点的影响构建新的动作判据,综合加快电流保护判别速度。利用PSCAD/EMTDC软件仿真验证了所提方法在不同类型故障、不同故障时刻、负荷突增、干扰影响等工况下的有效性,结果表明所提方法的动作时间不超过10 ms,有利于小级差更加灵活和可靠的整定。

关键词:多级配电网;小级差;快速电流保护;继电保护;模板曲线;电流采样值

中图分类号:TM77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202312043

0 引言

随着城市配电网的快速发展,为提高供电可靠性,输电线路级数增加;另外由于2级间配电线路较短,线路故障后多级保护感应的短路电流相差较小,难以形成仅靠电流定值实现上下游配合的保护配置方案^[1]。例如电流保护I段与II段配合困难,甚至出现了10 kV故障越级到35 kV跳闸的情况^[2]。为了降低越级跳闸的风险,目前实践中广泛采用基于时间级差配合的梯级电流保护^[3],时间级差一般按照0.3 s整定^[4]。而受限于变压器出口保护动作时间(一般低于0.5 s)的要求,以时间级差为基础的电流保护在配电网多级趋势发展下的适应性严重下降。例如按照0.3 s的时间级差最多设置2级线路,而按某市5级配电网的发展规划,当前时间级差整定值很难满足需求,减小时间级差是扩大多级保护配置的根本,也是配电网多级发展趋势下亟待解决的问题。

目前,已有相关研究人员致力于研究时间级差配合的问题,主要从2个角度出发缩短时间级差。一是缩短一次设备动作时间,例如真空断路器、磁断路器等一次设备的技术发展缩短了断路器动作时间^[5]。当前许继公司已经研制出了10 ms稳定分闸的磁控断路器,硬件机构运行良好,为缩短时间级差创造了可能。二是通过对保护算法进行改进,达到

一次设备与二次设备整体配合,从而缩短时间级差的目的。现有的配电网电流保护利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)计算有效值判断故障,其数据窗为1个工频周期,考虑保护判断和保护出口延时后可知,保护判别时间难以突破至20 ms以内^[6]。现有保护算法已经成为小级差整定中的短板,需对其进行提升以获取更加灵活和可靠的时间级差整定。目前部分研究成果,例如基于暂态特征的故障判别方法^[7-9]致力于缩短保护的故障判别时间,但配电网的结构特点(线路短,暂态特征不明显或不同于高压电网)制约了相关快速算法在配电网中的迁移应用。文献[10]提出一种基于1/4周波的傅氏算法,有助于加快保护动作,但非全波方法受干扰影响较大,实际保护仍以全波FFT为主。文献[11]提出基于长数据窗算法动态特性的快速差动速断保护方案,能够在不使用短数据窗的前提下,保证保护的速动性,但该方法依赖差动信息的交互。文献[12-15]提出纵联类保护算法加快保护判别速度,但其对数据同步的要求高,需要依托可靠的通信进行数据传输,将导致配电网的投资成本增加、经济性降低。文献[16]提出一种针对配电网的微差动保护快速算法,该方法基于差动原理构建保护,同样依托通信,且该文献未对算法自身的故障判别时间进行详细分析。文献[17]基于5G通信技术,考虑通信中断的情况构建快速综合保护方案,但仍需采用全波傅氏算法计算电流幅值,保护判别时间未得到本质上的缩短。

为了缩短时间级差,本文从算法角度出发,在分析传统保护动作时间的基础上,提出了一种基于故障首半波比较的快速电流保护方法。该方法突破了

收稿日期:2023-01-30;修回日期:2023-09-21

在线出版日期:2024-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077120)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077120)

传统电流保护的有效值定值比较思路,基于模板曲线对电流采样值与模板曲线进行动态多点比较,从而构建 10 ms 快速保护动作判据。该方法能够在保证准确的故障识别前提下,弥补传统 FFT 算法在故障初期计算真实有效值的延迟性,缩短故障判别时间,为降低时间级差整定值带来可能,有利于可靠灵活的小级差整定,有效解决配电网多级趋势下时间级差配合困难的问题。

1 保护时间分析及总体思路

1.1 传统电流保护动作时间分析

配电网保护以电流保护为基础,现有保护装置均通过离散采样将电流转化为数字量,进一步经过数字滤波、FFT 计算电流有效值、定值比较判别故障。传统电流保护的实现过程如附录 A 图 A1 所示。在故障初始阶段,数据窗包含大量非故障阶段数据,计算的电流有效值 I_{RMS} 并不能在故障伊始就达到电流整定值 I_{set} ,需经历一定时间的爬坡过程后才能达到 I_{set} ,这限制了实际保护动作时间的缩短。保护判别的延时与电流整定值大小、故障电流大小、故障时刻、故障类型等因素有关,一般在 30 ms 左右。

1.2 时间级差分析

时间级差 Δt 的整定公式见附录 A 式(A1),目前工程中 Δt 按 200~300 ms 进行整定。按照速动性的要求,希望 Δt 越小越好,但是为了保证 2 个保护之间的选择性,其也不能过小。

按某市电力公司 5 级配电网的实际规划,目前整定的时间级差过长,难以适应 5 级配电网的配置,为此必须将时间级差缩短至 100 ms 内。取灭弧时间 $t_{\text{arc}} = 15$ ms、保护返回时间 $t_{\text{re}} = 20$ ms、可靠的时间裕度 $t_{\text{f}} = 15$ ms、弹簧机构断路器动作时间 $t_{\text{br}} = 40$ ms,则由式(A1)可得:

$$\Delta t = t_{\text{a}} + t_{\text{br}} + t_{\text{arc}} + t_{\text{re}} + t_{\text{f}} = t_{\text{a}} + 40 + 15 + 20 + 15 = 90 + t_{\text{a}} \quad (1)$$

式中: t_{a} 为保护固有动作时间。

根据式(1)可知,若采用传统保护则有两方面的缺点:一是必须要考虑算法动作时间的波动性,须留出较大的时间裕度保证可靠性;二是传统保护的 t_{a} 难以压缩至 10 ms 内,在此情况下沿用传统保护难以适应 100 ms 的时间级差设定要求。若将 t_{a} 稳定在 10 ms 内,则时间裕度将得到保证,此时基于 10 ms 的保护固有动作时间配合弹簧机构断路器就能稳定实现 100 ms 的时间级差的配置,无需更换动作速度更快的磁控机构断路器。快速保护算法配合优化后的断路器能够极大降低多级配电网的实现门槛,节省改造多级配电网的硬件投资,对于多级配电网的发展有积极作用。

1.3 快速电流保护的基本思路

通过对传统电流保护动作时间和时间级差的分

析可知,传统电流保护故障判别延时主要受限于 FFT 计算窗长。如果能够缩短保护判断窗长度,将故障电流与非定值的多点进行动态比较,则能够有效解决保护算法固有延时较长的问题,为此提出快速电流保护新思路。

1) 基于故障后首半波的数据进行比较。故障后,传统电流保护在电流有效值爬升至整定值前的等待时间过长,若选择包含大量故障信息的首半波采样数据进行比较,能够加快保护的故障判别速度。

2) 构建模板曲线作为电流采样值的比较参考。构建与保护装置同采样频率的模板曲线序列,与故障电流进行动态多点比较,提升保护的故障判别速度。

3) 将电流有效值爬升特性作为故障识别判据之一。故障后电流有效值总是呈现上升趋势,利用有效值爬坡特性构成保护判据之一。

2 快速电流保护关键技术

2.1 模板曲线的构建

故障后基于模板曲线进行故障首半波动态多点比较是本文所提快速电流保护的基本思路之一,充分利用包含大量故障信息的电流采样值可加快保护的故障判别速度。因此模板曲线应表征为正弦曲线,首先分析模板曲线的构建原则。

2.1.1 模板曲线幅值分析

短路故障和负荷突增后电流均会呈现突变特征,前者变化幅度大,后者变化幅度小,可通过突变幅度对 2 种工况进行有效区分。借鉴传统电流保护的思想,故障发生后应有某一状态量大于整定值时才判定为故障发生,因此期望短路故障发生后的电流采样值应大于模板曲线上相同时刻的值。以 $\sqrt{2} I_{\text{set}}$ 为幅值构建的模板曲线不仅能避免负荷突增场景下的误判,在短路故障场景下也能保证模板曲线绝对值小于短路电流绝对值,模板曲线与短路电流、负荷电流曲线之间的关系如图 1 所示。

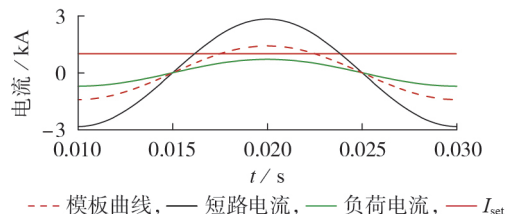


图1 模板曲线与短路电流、负荷电流曲线之间的关系

Fig.1 Relationship of template curve with fault current curve and load current curve

值得说明的是,多级配电网普遍采用带一定延时的限时电流速断保护(电流保护 II 段),依靠 I_{set} 和 Δt 共同配合保证选择性。上述 II 段定值 I_{set} 的整定

原则与工程实际保持一致,即整定值应与下级保护的 I 段或 II 段配合,且需满足灵敏度为 1.3~1.5 的要求,当整定值与下级保护 I 段配合不满足灵敏度要求时,与下级保护 II 段配合,从而实现线路全长保护。因此在本级线路出口处发生故障,也能由本级线路对应的保护装置切除,不会出现越级跳闸的情况。上述 I_{set} 的整定原则考虑的因素充分,能够应对线路雷击、临近电动机启动电流等带来的影响。

2.1.2 模板曲线相位对齐和离散化处理

受不同故障时刻的影响,短路电流的初相位呈现变化状态。若构建的模板曲线无法与短路电流曲线相位对齐,则可能影响多点动态比较的结果,从而影响保护的故障判别速度。理想情况下,模板曲线与短路电流曲线严格相位对齐,即过零点或极值点一一对应。本文基于上述观点构建与短路电流曲线相位对齐的模板曲线。

基于过零点和极值点的相位对齐法的误差分析结果如附录 B 图 B1 所示。电流采样值是一系列离散数据,受短路电流直流分量的影响,电流采样序列可能偏向时间轴的一侧,基于过零点对齐相位的误差大。相比之下,由于直流分量具有纵向叠加的特征,通过极值点确定初相位不存在相位误差。为此本文采用基于极值点的相位对齐方法,基于保护装置得到的离散序列(即数字量)进行分析,构建与电流采样序列同频率的相位对齐的模板曲线。

应用极值理论基于等间隔实时计算前、后相邻两采样点增量符号,增表示为“+”,减或不变表示为“-”,形成“+”、“-”序列,初步预判极值时刻落在变号间隔内,间隔内采样值绝对值最大者为预判极值 i_{peak} ,对应第 N_1 个采样点。受短路故障时刻的影响,短路电流首半波内的峰值可能出现在坐标轴两侧,因此以预判极值时刻的正负属性为基础,构建如式(2)所示的离散模板曲线。

$$i_s(k) = \text{sgn}(i_{peak}) \cdot \sqrt{2} I_{set} \sin \frac{2\pi f(k - N_1 + N/4)}{N}$$

$$k = N_1 - N/4, N_1 - N/4 + 1, \dots, N_1 + 7N/4 \quad (2)$$

式中: f 为系统频率; k 为整数,其取值将模板曲线长度限制在 2 个周期内; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; N 为每个周期 T 内的采样点数; $i_s(k)$ 为第 k 个采样值。

模板曲线构建示意图如附录 B 图 B2 所示,具体说明如下:

- 1) 寻找预判极值 i_{peak} (对应第 N_1 个采样点);
- 2) 将第 $N_1 - N/4$ 个采样点作为离散模板曲线的起始点,按式(2)构建离散模板曲线。

2.2 极值点确定

电流采样值受到高次谐波或噪声的影响,可能会存在零散的点出现畸变,称之为干扰点。如果应用极值理论寻找的预判极值点为干扰点,则直接构

建模板曲线将导致相位无法对齐的情况,势必影响保护的故障判别结果。为排除高次谐波或噪声的影响,本文结合欧氏距离相似度比较和短窗递推最小二乘(recursive least square, RLS)法,精准定位极值点。

2.2.1 欧氏距离相似度比较确定极值点

欧氏距离的定义见附录 B 式(B1),若极值点寻找正确,则电流采样值序列、模板曲线相似度高,否则相似度低,具体过程如下。

1) 数据标幺化。短路电流峰值受短路故障类型、线路参数等影响,无法直接比较欧氏距离,故本文首先对数据进行标幺化处理。取预判极值 i_{peak} 作为第 n 个采样点的电流采样值 $i(n)$ 的标幺化基准;同时基于幅值为 1 的工频正弦波形,建立同采样频率下的标准正弦模板 $y(n)$ 。

2) 极值点确定。将预判极值点对应的时刻前推 $T/4$ 的时刻作为 $y(n)$ 的起始时刻,取 $[N_1 - N/4, N_1 + 3]$ 作为比较区间,并应用欧氏距离,按照式(3)计算比较区间内标幺化后的采样电流 $i_{pu}(n)$ 与 $y(n)$ 的相似度 B ,相似度比较过程如附录 B 图 B3 所示。如果 B 值满足式(4)则认为当前的 i_{peak} 为真实极值,否则转步骤 3)。

$$\begin{cases} B = 1/(1+d) \\ d = \sqrt{\sum_{n=1}^k (i_{pu}(n) - y(n))^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$B > B_{set} \quad (4)$$

式中: d 为欧氏距离; k 为比较区间内的采样点数; B 为欧氏距离相似度; B_{set} 为相似度阈值,取为 0.8~0.9。

3) 基于直线拟合插值外加补偿去除干扰点。若进行步骤 2) 后不满足式(4),则应去除当前干扰点,避免其影响真实极值点的寻找。常见的插值法有直线拟合插值和直线拟合插值外加补偿法 2 种,分别如式(5)和式(6)、(7)所示。

$$F_{i1}(n) = [i(n+1) + i(n-1)]/2 \quad (5)$$

$$F_i(n) = F_{i1}(n) + c(n) \quad (6)$$

$$c(n) = [F_{i1}(n) - F_{i2}(n)]/2 \quad (7)$$

式中: $F_{i1}(n)$ 、 $F_i(n)$ 分别为相邻两点的直线拟合插值方法、直线拟合插值外加补偿法得到的插值; $c(n)$ 为补偿量; $F_{i2}(n) = [i(n+2) + i(n-2)]/2$ 。

定义拟合插值法的误差为当前采样值与计算插值的差,则直线拟合插值和直线拟合插值外加补偿法的误差分别为 $e_1 = i(n) - F_{i1}(n)$ 、 $e_2 = i(n) - F_i(n)$, 2 种拟合插值法在不同采样点的误差如附录 B 图 B4 所示。由图可见: 2 种拟合插值方法绝对误差均在 0.01 以下,而直线拟合插值外加补偿法的误差更小,进一步说明了补偿的有效性; $c(n)$ 是动态变化的,确保了直线拟合插值外加补偿法对不同幅值的短路电流采

样序列都有较小的误差;直线拟合插值外加补偿法的误差为负,说明其插值略大于实际值,有利于后续重新寻找极值点。综上所述,本文采用直线拟合插值外加补偿法,将干扰点更新为插值从而去除干扰点的影响,并调整搜索区间起点为第 N_1-2 个采样点,重新寻找极值点。

利用式(3)计算得到图B3(a)所示的理想无干扰和图B3(b)所示的存在干扰情况下的欧氏距离相似度分别为1和0.2145。采用直线拟合插值外加补偿法去除干扰点后,重新寻找极值点,计算得到存在干扰情况下的欧氏距离相似度为0.9992,满足式(4),这说明直线拟合插值外加补偿法去除干扰点是可行的。

2.2.2 短窗 RLS 快速拟合确定极值点

利用欧氏距离相似度寻找极值点具有简单、稳定的优点,是寻找极值点的首选方法,但在应对连续干扰(或噪声)时,可能存在反复插值补偿无法定位极值点的问题。针对此种情况,本文利用短窗 RLS 快速拟合确定极值点如附录B图B5所示,具体求解和分析过程^[18-19]如附录B式(B2)~(B10)所示。RLS法计算简便,数据窗的长度随着采样值的变化而变化,数据输入与拟合同步进行,利用新增的采样数据修正已有的迭代参数,收敛速度快、收敛过程稳定,且对高频分量的滤波能力强。拟合应满足如下要求:基于保护速动的要求,拟合速度要求高;拟合仅作极值点确定使用,对局部(短窗)拟合精度要求高,拟合曲线与原始采样值序列的相位误差应小。

设置拟合窗长为 $3+N/4$,拟合数据点与采样序列同频,20 dB噪声干扰和其他工况下的短窗 RLS 快速拟合结果分别如图2和附录B图B6所示。图中:电流为标幺值; X_1-X_4 为RLS拟合参数,为标幺值。

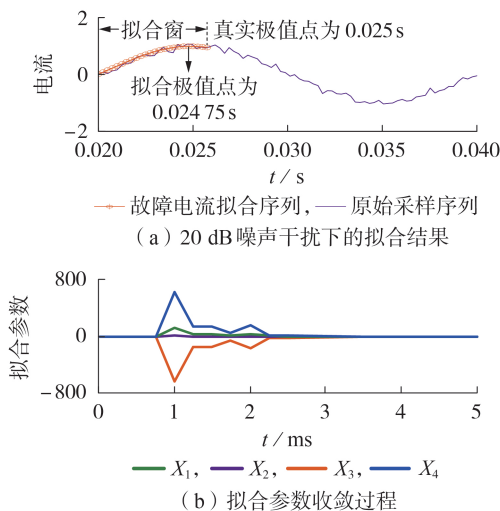


图2 20 dB噪声干扰下的短窗RLS快速拟合结果

Fig.2 Results of short window RLS fast fit under condition of 20 dB noise

短窗 RLS 快速拟合关注局部特征,直流分量的存在对极值点的寻找影响不大,但干扰强度会影响拟合效果。4 kHz 采样频率下,拟合序列的极值点与原始采样值的极值点误差在 ± 1 个采样点(对应时间为 $\pm 2.5 \times 10^{-4}$ s)之间,该误差对于保护判别而言可忽略不计(后文分析),说明短窗 RLS 快速拟合确定极值点的可行性。拟合速度与启动方面,设置 $3+N/4$ 为拟合窗长,仅在累计2次欧氏距离比较失败后进行拟合,拟合起点为当前欧氏距离寻找的极值点前推的首个过零点。由图2(b)可知,逐点获取采样数据伴随拟合同步进行的过程中,3.5 ms左右 X_1-X_4 均已收敛,即可按照拟合曲线寻找极值点实现相位对齐。最极端情况下,极值点附近存在连续干扰,短窗 RLS 快速拟合在极值点启动,可利用累积的数据进行拟合,无需等待采样点逐个获取,因此最极端情况下确定极值点的时间也不会超过 $T/4+3.5=8.5$ ms,仍满足10 ms快速保护动作判据的目标。非极端情况(极值点前启动短窗 RLS 快速拟合)下,数据获取与拟合同步进行,对10 ms快速保护动作判据的目标没有影响。

3 快速保护判据及可靠性分析

3.1 保护启动判据

保护启动判据决定了算法是否继续执行故障判别,启动判据由“与”逻辑下的有效值计算与爬坡趋势判别、采样值越限判别构成。

1)有效值计算与爬坡趋势判别。故障发生后,利用全波FFT算法计算电流有效值 I_{RMS} ,随着故障的发展,有效值将出现爬坡趋势。基于这一现象,采用多点增量比较实现有效值爬坡趋势判别,同时考虑到短时扰动以及系统负荷变化的干扰,根据电流的采样频率设置爬坡趋势判别防干扰阈值,提高判据的可靠性,如式(8)所示。

$$C_{st}(n) = \begin{cases} 1 & I_{RMS}(n+1) > I_{RMS}(n) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^{m_1} C_{st}(n) > m_2$$

式中: $I_{RMS}(n)$ 为第 n 个采样点的电流有效值; m_1 为爬坡判别数据窗长 $T/8$ 内的采样点数; m_2 为爬坡趋势判别防干扰阈值,取 $0.5m_1 \sim 0.7m_1$ 。

2)采样值越限判别。有效值爬坡趋势在系统受到扰动时也会出现,仅以此作为保护的判据难以达到保护的可靠性要求。而发生短路故障后,电流突增幅度大,电流采样值会快速上升到较大数值并持续一定时间。因此,设定采样值越限判别式如式(9)所示,当连续3个电流采样值大于启动阈值时保护方可启动,从而限制非故障或干扰下保护的频繁启动。

$$|i(n)| > I_{st} \cap |i(n+1)| > I_{st} \cap |i(n+2)| > I_{st} \quad (9)$$

式中: $|i(n)|$ 为第 n 个电流采样值的绝对值; I_{st} 为启动阈值, 为保证多级配电网保护的灵敏度, 同时达到保护快速启动的目标, I_{st} 按照最大负荷电流整定, 一般的负荷波动下保护不启动。

以故障时刻 t_0 为起点的 $T/4$ 内, 基于实时采样监测与计算, 利用 $T/8$ 数据窗长内的电流采样值判别有效值爬坡趋势, 当满足式(8)后立即启动采样值越限判别, 并持续监测有效值爬坡趋势, 当越限采样点数满足式(9)后, 保护启动, 具体如图3所示。

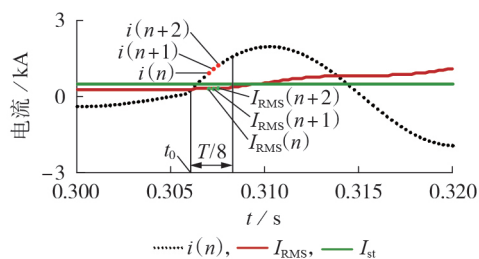


图3 保护启动判据示意图

Fig.3 Schematic diagram of protection startup criterion

3.2 保护动作判据

保护动作判据和基于故障首半波采样值比较的快速电流保护方法流程分别如图4和附录B图B7所示, 具体步骤如下。

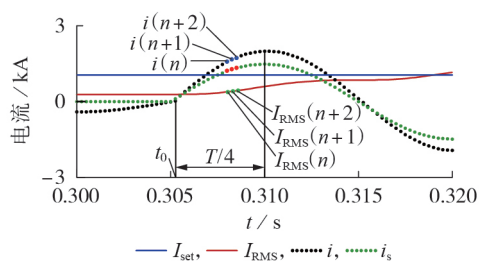


图4 保护动作判据

Fig.4 Protection action criterion

1) 在满足保护式(8)、(9)所示的保护启动判据后, 按照第2章构建正弦模板曲线并比较欧氏距离相似度, 若满足式(4), 则当前预判极值点为正确极值点, 转步骤2); 否则舍弃当前预判极值点, 继续寻找正确的极值点。

2) 以当前寻找的正确极值时刻为起点, 前推 $T/4$ 构建多点比较数据窗, 将 m_1 整定为 $T/4$ 数据窗长内的采样点数, 依据式(8)持续判别有效值爬坡趋势; 同时基于式(10)多点比较电流采样值序列与模板曲线序列, 若同时满足式(8)、(10), 则保护动作。

$$\begin{cases} C_{op}(i) = \begin{cases} 1 & |i(n)| > |i_s(n)| \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ \sum_{n=1}^{m_1} C_{op}(n) > m_3 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $i_s(n)$ 为离散模板曲线上第 n 个点的取值; m_3 为保护动作阈值, 权衡保护可靠性和保护动作速度, 经过大量的仿真验证后将 m_3 取值为 $0.8m_1 \sim 0.9m_1$ 。

综上所述, 本文所提方法在算法层面最长的数据窗是欧氏距离相似度比较窗或 RLS 拟合窗, 即窗长为 $3+N/4$ 个采样点。理想情况下, 不计干扰的影响, 考虑故障合闸角为 0° , 最长窗长即为保护出口时间; 存在连续干扰的极端情况下, 短窗 RLS 快速拟合法在故障后 8.5 ms 内识别极值点, 随后由动作判据做出故障判断。此外, 考虑到不同故障合闸角对短路电流波形的影响, 可能出现故障初期不满足保护启动判据的情况, 即使如此本文方法仍能够保证 10 ms 保护出口。考虑到保护的可靠性, 本文所提方法应与传统电流保护相互配合, 当本文所提方法退出运行或拒动时, 由传统电流保护完成故障切除任务。

3.3 可靠性分析

本文所提方法具有快速动作的特点, 但易受采样值干扰、直流分量、负荷电流突增等因素的影响, 具体分析如下。

1) 采样值干扰的影响。微机保护中, 采样值容易受到高频分量的干扰, 对本文所提方法的影响主要体现在模板曲线的构造上。本文结合欧氏距离相似度比较、直线拟合插值外加补偿法和短窗 RLS 快速拟合法确定极值点, 有效避免了干扰点对模板曲线的影响。结合滤波、多点比较判据, 本文方法能够进一步提高保护判断的可靠性。

2) 直流分量的影响。非周期直流分量的存在, 使得短路电流波形偏向时间轴的一侧。按照传统电流保护的配置方案, 在计算采样电流有效值时, 必须先采用一点差分算法。本文认为在实际运用中, 差分滤波器的相关参数设置已经完成, 实际滤波结果可靠并可直接使用, 滤波效果良好。

3) 负荷电流突增。负荷突增时也会存在有效值爬坡现象, 但在整定保护定值 I_{set} 时, 按照实际工程整定为电流保护 II 段定值, 该值考虑躲过负荷电流的影响, 因此采样电流不会越限; 同理, 在构建离散模板曲线后, 电流采样值小于离散模板曲线值, 本文方法能够避免负荷电流突增的影响。

4 算例分析

利用数字仿真软件 PSCAD / EMTDC 搭建如附录 C 图 C1 所示的配电网仿真模型对本文所提方法进行验证。图中: F_1 、 F_2 分别为本级线路、下游线路故障点; R_1 — R_3 分别为线路 L_1 — L_3 的首端保护装置。系统参数为: 高压侧额定电压为 110 kV, 系统阻抗 $Z_s=0.4 \Omega$, 变压器变比为 110 kV / 10.5 kV, 系统频率为 50 Hz, 系统采样频率为 4 kHz, 线路阻抗参数见

附录C表C1。

4.1 故障合闸角的影响

为验证不同故障合闸角对本文所提方法的影响,本节在点 F_1 设置不同故障合闸角下的三相短路接地故障,其中故障合闸角范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$,故障合闸角间隔设置为 30° 。

算例1:本级线路点 F_1 处发生故障合闸角为 0° 的三相短路接地故障。

算例1的仿真结果如图5所示。图5(b)中,动作情况为1、0分别表示动作、不动作,后同。由图可知:故障发生后,保护装置 R_2 测得的 I_{RMS} 从稳态值285.7 A上升到1410 A;传统电流保护在故障发生后16.32 ms动作;本文所提方法根据构建的模板曲线在故障首半波进行多点动态比较,在故障发生后7.62 ms动作,与传统电流保护相比,动作时间缩短了约53.21%。

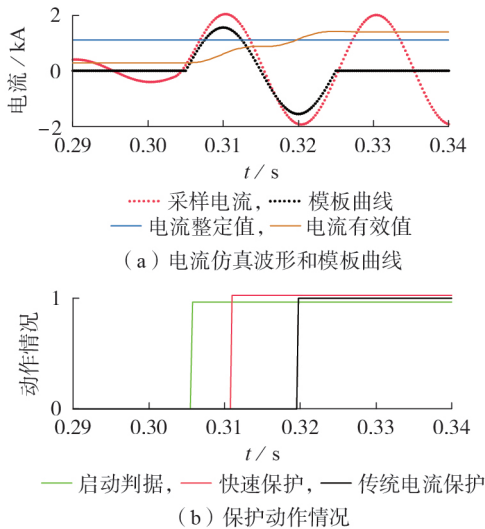


图5 算例1的仿真结果

Fig.5 Simulative results of Case 1

算例2:本级线路点 F_1 处发生故障合闸角为 30° 的三相短路接地故障(ABCg)。算例2的仿真结果见附录C图C2。

表1列出了不同故障合闸角下的保护动作时间。由表可知,传统电流保护和本文所提方法均受

表1 不同故障合闸角下的保护动作时间对比

Table 1 Comparison of protection action time under different fault closing angles

故障类型	故障合闸角/ $^\circ$	动作时间/ms		提速/%
		传统电流保护	本文方法	
ABCg	0	16.32	7.62	53.21
ABCg	30	15.25	6.25	59.02
ABCg	60	14.59	5.29	63.47
ABCg	90	17.21	9.62	44.10
ABCg	120	18.95	9.25	51.19
ABCg	150	18.28	9.58	47.59
ABCg	180	16.62	7.92	52.35

到故障合闸角的影响,但得益于模板曲线和多点动态比较,本文所提方法的动作时间更短。

4.2 故障类型的影响

设置本级线路点 F_1 处发生两相短路、两相短路接地、三相短路接地故障,每种故障设置 0° 、 30° 、 60° 3个故障合闸角,验证不同故障类型对本文所提方法的影响。

算例3:本级线路点 F_1 处发生故障合闸角为 0° 的两相短路故障。

算例4:本级线路点 F_1 处发生故障合闸角为 0° 的两相短路接地故障。

算例3、4的仿真结果分别如附录C图C3、C4所示,不同故障类型下的保护动作时间对比如附录C表C2所示。综合对比图5、C3、C4和表C2可知,由于本文所提方法采用传统电流保护整定值确定模板曲线幅值,其不受故障类型的影响。

4.3 负荷突增的影响

算例5:300 ms时负荷突增。算例5的仿真结果如附录C图C5所示。由图可见,负荷突增时, I_{RMS} 从稳态值285.7 A上升到508.3 A,式(9)、(10)均不满足,本文所提方法可靠不动作。

4.4 抗干扰能力验证

本节考虑采样序列离散干扰点、噪声、直流分量的影响,对本文所提方法的抗干扰能力进行验证。

算例6:采样值序列存在干扰点。算例6的仿真结果如附录C图C6所示。由图可知:基于直线拟合插值外加补偿方法的欧氏距离相似度比较方法能够应对零散点干扰;即使干扰点出现在极值时刻,通过插值滤除干扰点后仍可定位真实极值点;真实极值点后的干扰点不影响极值点的寻找。对于存在干扰点的采样值序列,本文方法在每个欧氏距离计算窗中通过拟合插值排除极值点的干扰,足以满足工程实际中1个周期内最多考虑1个噪声干扰点的要求^[20]。

微机保护中通常先进行滤波,考虑滤波效果不理想的情况,本节针对此类情况进行验证分析。

算例7:存在直流分量影响。算例7的仿真结果如附录C图C7所示。由图可见,采用本文所提的多点动态比较的思路,在故障首半波能够通过欧氏距离相似度比较并构建模板曲线进行保护判别。类似地,若故障合闸角不同,当短路电流首半波出现在负半轴时:叠加初值为负的直流分量的情况下,模板曲线仍大于采样电流序列(采样电流波形与算例7的采样电流波形关于 x 轴对称);叠加初值为正的直流分量的情况下,经历短时负峰值后依靠启动判据、欧氏距离相似度比较躲开该负峰值避免保护拒动,保护可靠性得以保证,分析如附录C图C8所示。保护

动作时间上,快速保护启动和动作判据正常,在故障后 9.25 ms 识别故障。综上所述,直流分量对本文方法基本无影响。

算例 8:在原始采样值序列中添加 30 dB 的噪声干扰。算例 8 的仿真结果如图 6 所示。

由图 6(a)可知,噪声干扰下,存在 2 处“变号区间”,对应 2 处错误的极值点,欧氏距离相似度计算值分别为 0.311 2、0.462 5,均不满足式(4)。累计 2 次欧氏距离相似度不满足式(4)后,利用短窗 RLS 快速拟合寻找极值点。

由图 6(b)可见,通过短窗 RLS 快速拟合得到的极值点对应的时刻为 0.31 s,与真实极值点(对应的时刻为 0.31 s)对齐,基于此构建正确的模板曲线,进行动态多点比较。

由图 6(c)可见,在噪声干扰下,保护启动判据不受影响,因为有效值在设定的阈值内总是呈现爬坡趋势;对于快速保护动作而言,因短窗 RLS 快速拟合法利用启动拟合前的累积数据进行拟合,在总窗长内即可收敛,因此不影响保护判别时间,最终本文方法在 0.311 s 识别故障(即故障后 7.62 ms 识别故障),而传统电流保护在 0.319 75 s 动作(故障后 16.37 ms 识别故障)。

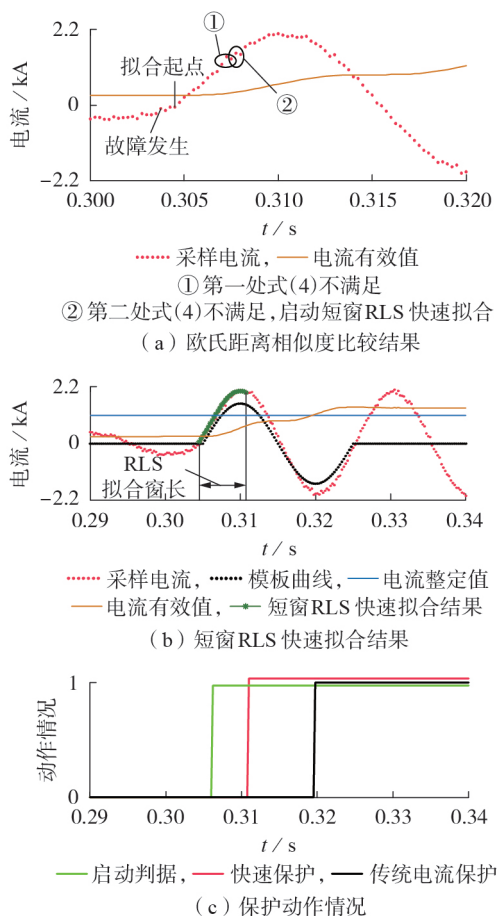


图 6 算例 8 的仿真结果

Fig.6 Simulative results of Case 8

综上所述,噪声干扰下,本文方法结合 RLS 短窗快速拟合能够精准定位极值点并构建模板曲线,拟合收敛速度快,不影响 10 ms 快速保护动作的目标。

4.5 多级配合

算例 9:线路 L_3 中点发生 AB 相短路故障,在该情况下进行多级配合。算例 9 的保护配置和仿真结果分别如附录 C 表 C3 和图 C9 所示, R_3 的故障切除时间 t_{3c} 、 R_2 的故障切除时间 t_{2c} 分别如附录 C 式 (C1)、(C2) 所示。由表 C3、式 (C1)、式 (C2) 可知:线路 L_3 中点发生 AB 相短路故障,使得上级保护启动并识别故障,但依靠可靠的时间级差 Δt 保证了选择性,故障切除时间 $t_{3c} < t_{2c}$,由 R_3 切除线路 L_3 的故障,故障切除后保护随即返回,不会出现越级跳闸的现象。上述分析说明 0.1 s 的时间级差设定合理,能够稳定实现多级配合。

线路 L_1 — L_3 的不同位置发生 AB 相短路故障时,多级配合情况如附录 C 表 C4 所示。由表可知:本文方法的故障判断时间短且较稳定;传统电流保护的故障判断时间更长,且波动大。传统电流保护在故障发生后 15.1 ms 识别故障。为了适应传统电流保护识别故障的时间波动,保证可靠性,将保护固有动作时间 t_a 设置为 30 ms,时间裕度 t_r 设置为 15 ms,按照式 (A1) 只能将级差整定为 0.2 s,实现三级级差配合。本文方法稳定地保证 10 ms 故障判断,时间级差得以缩短,能够实现 0.1 s 级差(五级级差)配合的可能。

5 结论

针对传统电流保护故障识别时间长,导致时间级差配合困难的问题,本文分析了传统保护故障识别缓慢的原因,提出一种基于故障首半波比较的快速电流保护,并进行了仿真验证。仿真结果表明本文方法能够灵敏地判别故障,在不同故障类型和故障合闸角(时刻)下,均有较快的动作速度。与传统电流保护相比,本文方法能够在不同的场景下有效地缩短电流保护在算法层面的判断时间,原理简单、判据完备、速动性好,且具有良好的抗干扰能力和防误动能力。另外,随着保护装置采样频率的不断提高,固定数据窗内的采样点增加后,本文方法能够在更短时间内完成故障判别,进一步缩短保护动作延时,为配电网级差配合难的问题带来了新的解决方法。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 张良,徐丙垠.配电网分支线保护的配置与整定[J].电网技术,2016,40(5):1589-1594.

ZHANG Liang, XU Bingyin. Configuration and tuning of sub-

- feeder protection in distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1589-1594.
- [2] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8.
- [3] 刘洪, 滑雪娇, 韩柳, 等. 配电网网架规划与多模块智能终端配置联合优化方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 41-47.
LIU Hong, HUA Xuejiao, HAN Liu, et al. Joint optimization method of distribution network grid planning and multi-module intelligent terminal configuration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 41-47.
- [4] 陈晓龙, 闫若璇, 李永丽, 等. 基于特性参数自适应修正的花瓣式配电网反时限过电流保护方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 143-151.
CHEN Xiaolong, YAN Ruoxuan, LI Yongli, et al. Parameter adaptive correction based inverse-time overcurrent protection method of petal-shaped distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 143-151.
- [5] 白云飞, 王代远, 朱庆洋, 等. 基于合闸行程曲线的12 kV真空断路器合闸速度在线监测研究[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 59-65, 76.
BAI Yunfei, WANG Daiyuan, ZHU Qingyang, et al. Study on on-line monitoring of closing speed for 12 kV vacuum circuit breaker based on closing stroke curve[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 59-65, 76.
- [6] 钱可弭, 李常青. 电力系统微机保护算法综合性能研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5): 43-45.
QIAN Kemi, LI Changqing. Synthetic performance comparison of algorithms for microprocessor-based protections[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(5): 43-45.
- [7] NAMDARI F, SALEHI M. High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 246-253.
- [8] 邓丰, 黄懿菲, 祖亚瑞, 等. 基于行波全波形主频分量衰减特性的高压输电线路快速保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 8864-8876.
DENG Feng, HUANG Yifei, ZU Yarui, et al. High-speed protection method for transmission line based on the dominant frequency component attenuation characteristics of traveling-wave full waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8864-8876.
- [9] 吕哲, 王增平. 基于暂态电流波形特征的快速差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1534-1545.
LÜ Zhe, WANG Zengping. A transient current waveform feature based novel high-speed differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1534-1545.
- [10] 陈培育, 李树青, 王瑶. 用于微机保护的1/4周波傅氏算法研究[J]. 电工技术, 2013(12): 24-25, 39.
- [11] 刘益青, 高伟聪, 王林先, 等. 长数据窗算法的动态特性及其在快速保护中的应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 193-198.
LIU Yiqing, GAO Weicong, WANG Linxian, et al. Dynamic characteristics of long data-window algorithm and its application in instantaneous trip protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 193-198.
- [12] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221.
CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221.
- [13] 张保会, 郝治国. 智能电网继电保护研究的进展(一): 故障甄别新原理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 1-6.
ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Development of relay protection for smart grid(1): new principles of fault distinction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 1-6.
- [14] 李瀚霖, 靳维, 梁睿, 等. 基于故障信息自同步的有源配电网纵联保护[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 121-126, 133.
LI Hanlin, JIN Wei, LIANG Rui, et al. The pilot protection for active distribution network based on fault information self-synchronizes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 121-126, 133.
- [15] 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.
- [16] 李新雷, 鄢杰, 张川, 等. 配电网保护快速算法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4877-4888.
LI Xinlei, YAN Jie, ZHANG Chuan, et al. Rapid algorithm of distribution network protection[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4877-4888.
- [17] 陈宏山, 徐舒, 李正红, 等. 计及5G通信异常工况的有源配电网快速综合保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 159-168.
CHEN Hongshan, XU Shu, LI Zhenghong, et al. A new fast comprehensive protection scheme of an active distribution network considering the abnormal operating conditions of 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 159-168.
- [18] 黄智慧, 段雄英, 邹积岩, 等. 基于改进RLS算法的故障电流参数估计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2460-2469.
HUANG Zhihui, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Fault current parameter estimation based on adaptive RLS algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2460-2469.
- [19] 马啸, 刘畅, 陈乐, 等. 应对不确定性短路电流超标的保护柔性跳闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5782-5792, 5906.
MA Xiao, LIU Chang, CHEN Le, et al. Flexible tripping strategy dealing with uncertain excessive short-circuit current[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5782-5792, 5906.
- [20] 翁汉翔, 刘华, 林湘宁, 等. 基于Hausdorff距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 475-483, 678.
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff distance algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 475-483, 678.

作者简介:

李振兴(1977—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: lz2007001@163.com);

朱益(1999—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: zhuyidianqi@163.com)。

(编辑 任思思)

(下转第201页 continued on page 201)

Evaluation method of unit frequency regulation ability based on dynamic energy contribution degree

LU Wenan¹, YU Yiping¹, WU Di², LIU Hui², PENG Wei², JU Ping¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China)

Abstract: Aiming at the lack of unified and effective frequency regulation capability evaluation methods for different types of synchronous generator units, the evaluation index of the unit primary frequency regulation capability is constructed from the perspective of dynamic energy during the primary frequency regulation process at different stages of the frequency regulation dynamic process, and the velocity, reliability, and importance of the unit primary frequency regulation are evaluated from multiple dimensions such as energy contribution speed, depth, and intensity. Based on the improved 10-machine 39-bus system, the reasonableness and effectiveness of this method are verified through the calculation of each index under different frequency regulation capability scenarios and the comparison with traditional evaluation indicators. On this basis, the key factors affecting the unit frequency regulation capability are quantitatively studied, and the impact of various parameters on frequency regulation dynamic indicators is explained from the perspective of energy. This method has certain reference value for discovering frequency regulation bottleneck in the power grid and improving the frequency regulation capability of the power grid.

Key words: dynamic energy; synchronous unit; energy contribution degree; primary frequency regulation; frequency regulation capability evaluation

(上接第 160 页 continued from page 160)

Fast current protection based on fault first half-wave comparison under small stage difference demand

LI Zhenxing¹, ZHU Yi¹, WANG Yangze¹, CHEN Yanxia², PI Zhiyong³, WENG Hanli¹

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid,
China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China;
3. State Grid Hubei Jingmen Electric Power Supply Company, Jingmen 448000, China)

Abstract: The step current protection based on the stage time difference coordination is limited by the output line protection action time. To shorten the protection judgment time and improve the multi-level cooperation ability of the distribution network, a fast current protection based on fault first half-wave comparison under small stage difference demand is proposed. The action time of traditional current protection is analyzed. The template curve is then constructed based on the setting value, and the multi-point dynamic comparison with the fault current sampling value is carried out. Based on the root mean square value ramping effect and the sampling value over-limit effect, a new protection startup criterion is constructed, and a new action criterion is constructed considering the protection algorithm delay and the influence of interference points, which comprehensively speeds up the current protection judgment speed. The PSCAD/EMTDC software simulation is used to verify the effectiveness of the proposed method under the working conditions of different fault types, fault times, sudden load increases and interferences. The results show that the action time of the proposed method does not exceed 10 ms, it is conducive to more flexible and reliable setting of small stage difference.

Key words: multi-level distribution network; small stage difference; fast current protection; relay protection; template curve; current sampling value

附录 A

图 A1 为传统电流保护实现过程。故障发生的时刻为 t_0 ，对应的采样点为 N_F ，在短路故障发生后，系统短路电流 i_k 迅速上升。传统电流保护采用 FFT 计算短路电流有效值，其数据窗为当前采样点往前推 1 个周期的采样数据。假设在 t_1 时刻故障电流的有效值大于保护整定值，对应的采样点为 N_{DF} ，保护装置的采样频率是 f_s ，可以计算得到识别故障的延时时间为 $\Delta t_a = t_1 - t_0 = (N_{DF} - N_F) / f_s$ ，该延时与电流整定值大小、故障电流大小、故障时刻、故障类型等因素有关，一般为 30ms 左右。

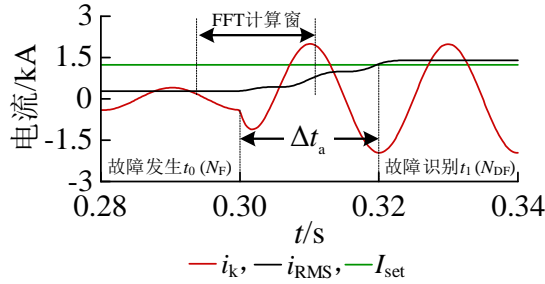


图 A1 传统电流保护实现过程

Fig.A1 Implementation process of traditional current protection

时间级差 Δt 按照式(A1)进行整定：

$$\Delta t = t_a + t_{br} + t_{arc} + t_{re} + t_f \quad (A1)$$

式中： t_a 为保护固有动作时间； t_{br} 为断路器动作时间； t_{arc} 为灭弧时间； t_{re} 为保护返回时间； t_f 为可靠的时间裕度。

目前，弹簧机构断路器动作时间在 30~40ms 之间，永磁机构断路器动作时间在 15~25ms 之间；灭弧时间为 15ms 左右；保护算法返回时间取 20ms；传统保护算法受系统运行方式和定值整定的影响较大，算法固有延时波动大，为 30ms 左右。考虑时间裕度，弹簧机构断路器的时间级差可设置为 250~300ms，实现 2 级级差配合；永磁机构断路器的时间级差可设置为 200ms，实现 3 级级差配合。

附录 B

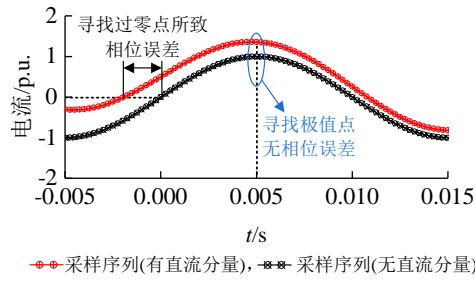


图 B1 相位对齐的误差分析

Fig.B1 Error analysis of phase alignment

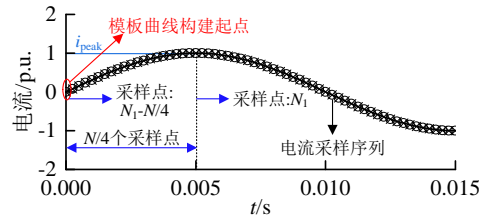
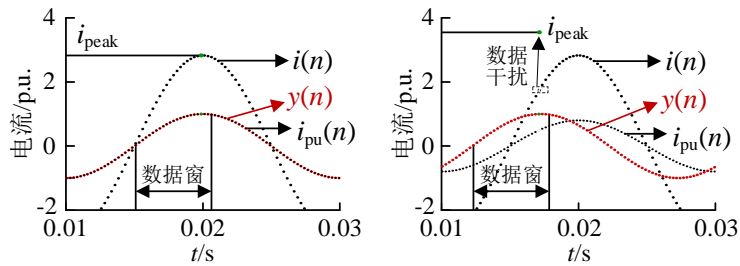


图 B2 模板曲线构建示意图

Fig.B2 Schematic diagram of template curve construction

2 个 n 维向量 $a(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$ 与 $b(x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n})$ 之间的欧氏距离表示为:

$$d_{12} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{1k} - x_{2k})^2} \tag{B1}$$



(a) 无干扰比较 (b) 有干扰比较

图 B3 欧氏距离相似度比较

Fig.B3 Comparison of Euclidean distance similarity

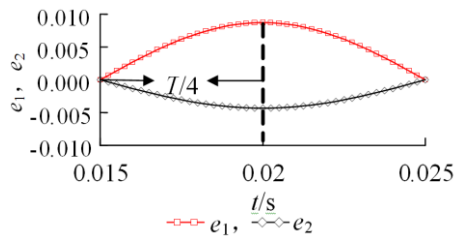


图 B4 不同插值方法的误差分析

Fig.B4 Error analysis of different interpolation methods

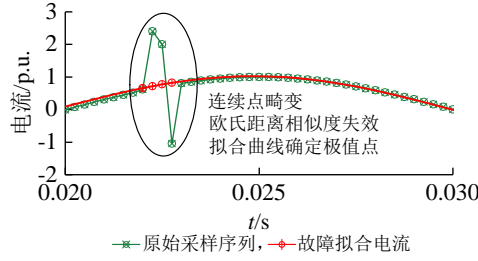


图 B5 应对连续干扰点的拟合方案

Fig.B5 Fitting scheme for continuous interference points

系统故障后，故障电流表示为：

$$I(t) = I_{pk} \sin(\omega t + \alpha - \phi) + [I(0) - I_{pk} \sin(\alpha - \phi)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (B2)$$

式中： I_{pk} 为电流峰值； ω 为系统角速度； α 为故障合闸角； ϕ 为故障后的系统阻抗角（一般可认为 $\phi \approx 90^\circ$ ）； τ 为直流分量时间常数； $I(0)$ 为故障前时刻系统电流的值； $I(0) = I_m \sin(\alpha - \phi_m)$ 非定值，受故障时刻 α 和故障前系统阻抗角 ϕ_m 以及故障前稳态电流幅值 I_m 的影响。

将式(B2)使用泰勒级数展开并进行线性化处理：

$$I(t) = X_1 \sin(\omega t) + X_2 \cos(\omega t) + X_3 + X_4 t \quad (B3)$$

$$\begin{cases} X_1 = I_{pk} \cos(\alpha - \phi) \\ X_2 = I_{pk} \sin(\alpha - \phi) \\ X_3 = I(0) - I_{pk} \sin(\alpha - \phi) \\ X_4 = -\frac{X_3}{\tau} \end{cases} \quad (B4)$$

根据式(B3)、(B4)得到故障电流方程组：

$$Y = HX \quad (B5)$$

$$Y = [I(t) \ I(t+T_s) \ \dots \ I(t+nT_s)]^T \quad (B6)$$

$$H = [H_1 \ H_2 \ H_3 \ H_4] = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 1 & t \\ \sin[\omega(t+T_s)] & \cos[\omega(t+T_s)] & 1 & t+T_s \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ \sin[\omega(t+nT_s)] & \cos[\omega(t+nT_s)] & 1 & t+nT_s \end{bmatrix} \quad (B7)$$

$$X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^T \quad (B8)$$

式中： T_s 为采样间隔，对于本文使用的 4kHz 采样率， $T_s = 2.5 \times 10^{-4}$ s。

RLS 拟合实时处理递推修正，假设新增采样数据 $y(n+1) = I(t+nT_s)$ ，参数估计相量为 $X(n+1)$ 递推公式为：

$$\begin{cases} \mathbf{K}(n+1) = \mathbf{P}(n)\mathbf{h}^T(n+1)(\mathbf{h}(n+1)\mathbf{P}(n)\mathbf{h}^T(n+1)+1)^{-1} \\ \mathbf{P}(n+1) = \mathbf{P}(n) - \mathbf{K}(n+1)\mathbf{h}(n+1)\mathbf{P}(n) \\ \mathbf{X}(n+1) = \mathbf{X}(n) + \mathbf{K}(n+1)(y(n+1) - \mathbf{h}(n+1)\mathbf{X}(n)) \end{cases} \quad (B9)$$

$$\mathbf{P}(n) = (\mathbf{H}^T(n)\mathbf{H}(n))^{-1} \quad (B10)$$

$$\mathbf{h}(n+1) = [\sin\{\omega[t+(n+1)T_s]\}, \cos\{\omega[t+(n+1)T_s]\}, 1, t+(n+1)T_s] \quad (B11)$$

$\mathbf{P}(n)$ 和 $\mathbf{X}(n)$ 初值的选取，本文先采样获取拟合窗内前 4 点数据，由前 4 点数据计算 $\mathbf{P}(n)$ 和 $\mathbf{X}(n)$ 的初值，再从 $n=5$ 开始递推。

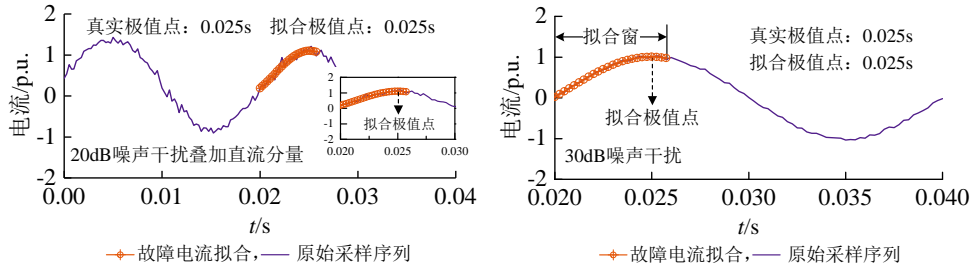


图 B6 其他工况下的短窗 RLS 快速拟合结果

Fig.B6 Results of short window RLS fast fit under other conditions

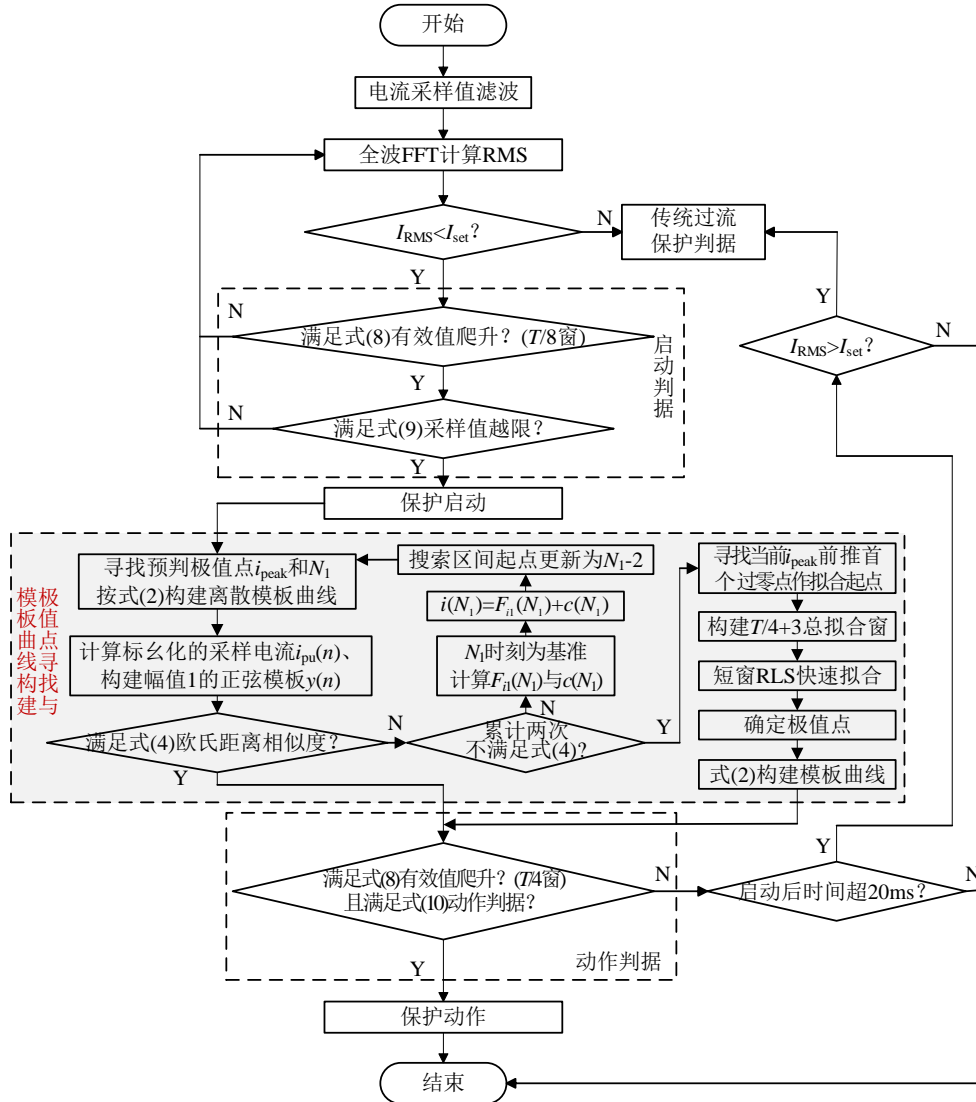


图 B7 基于故障首半波比较的快速电流保护新方法流程图

Fig.B7 Flowchart of new method of fast current protection based on first half-wave comparison of fault

附录 C

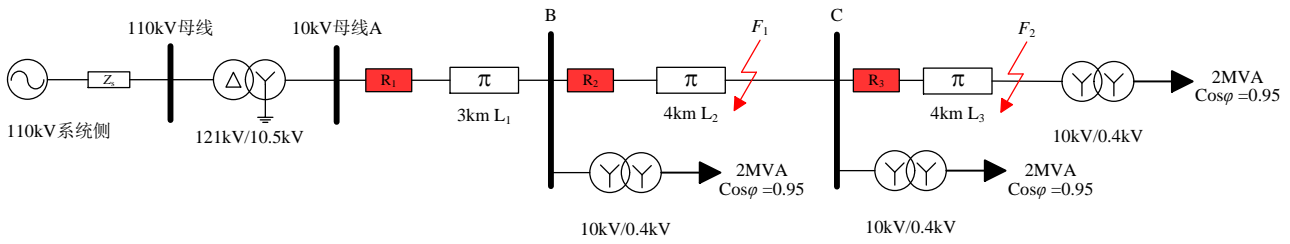


图 C1 10kV 单侧电源配电系统模型

Fig.C1 10kV single-side power distribution system model

表 C1 仿真模型线路参数

Table C1 Line parameters of simulation model					
电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)		电感/($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)		电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)	
正序	零序	正序	零序	正序	零序
0.170	0.320	1.017	3.560	0.115	0.006

算例 2 的仿真结果见附录 C 图 C2。由图可见，传统电流保护在故障发生后 15.25ms 动作，而本文所提方法在故障发生后 6.25ms 动作，与传统电流保护相比，动作时间缩短了 59.02%。

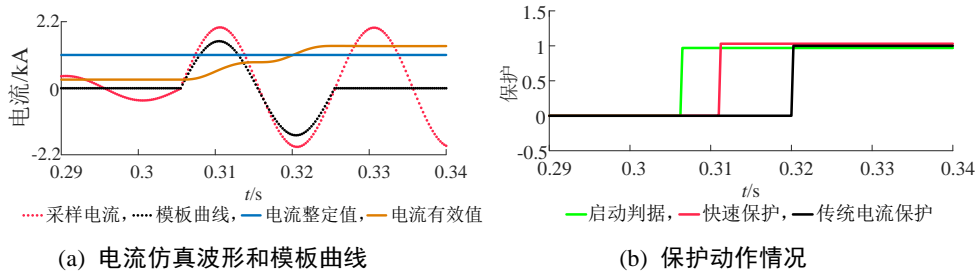


图 C2 算例 2 的仿真结果

Fig.C2 Simulative results of Case2

算例 2 的仿真结果见图 C3。由图可见，保护装置 R_2 测得的 I_{RMS} 从稳态 285.7A 上升到 1230A，传统电流保护在故障发生后 16.92ms 动作，而本文所提方法在故障发生后 6.62ms 动作，与传统电流保护相比，动作时间缩短了 60.87%。

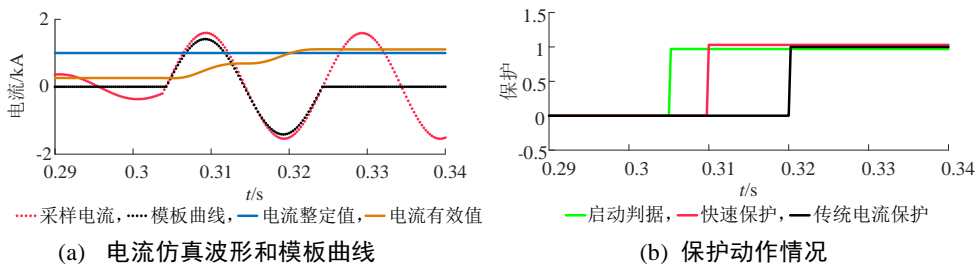
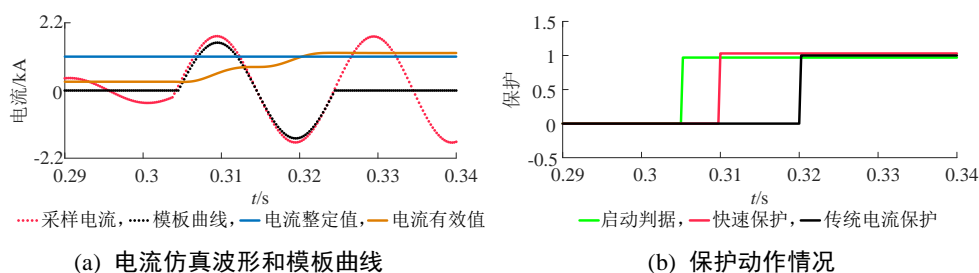


图 C3 算例 3 的仿真结果

Fig.C3 Simulative results of Case3

算例 4 的仿真结果见图 C4。由图可见，保护装置 R_2 测得的 I_{RMS} 从稳态 285.7A 上升到 1227A，传统电流保护在故障发生后 17.12ms 动作，而本文所提方法在故障发生后 6.92ms 动作，与传统电流保护相比，动作时间缩短了 43.00%。



(a) 电流仿真波形和模板曲线

(b) 保护动作情况

图 C4 算例 3 的仿真结果

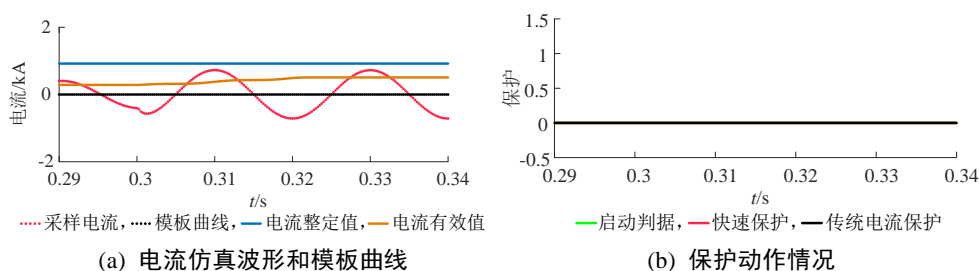
Fig.C4 Simulative results of Case3

表 C2 不同故障类型下的保护动作时间对比

Table C2 Comparison of protection action time for different fault types

故障类型	故障合闸角/ (°)	动作时间/ms		提速/%
		传统方法	新方法	
AB	0	16.92	6.62	60.87
	30	16.25	6.65	59.08
	60	20.48	10.28	49.80
ABg	0	17.12	6.92	59.58
	30	16.25	5.95	63.38
	60	20.49	10.58	48.37
ABCg	0	16.32	7.62	53.21
	30	15.25	6.25	59.02
	60	14.59	5.29	63.74

算例 5 的仿真结果见图 C5。由图可见，保护装置 R_2 测得的 I_{RMS} 从稳态 285.7A 上升到 508.3A，对于传统电流保护而言未达到整定值门槛，传统电流保护可靠不动作；对于本文所提方法而言，不满足式 (9)、(10)，保护未启动，即本文所提方法可靠不动作。



(a) 电流仿真波形和模板曲线

(b) 保护动作情况

图 C5 算例 5 的仿真结果

Fig.C5 Simulative results of Case5

算例 6 的仿真结果见图 C6。考虑极值点干扰的极端情况，真实极值对应的采样点为 N_{peak} (0.3105s)，如图 C6(a)所示，算法将最大干扰点确定为预判极值点 i_{peak} 。此时标准正弦模板与标幺化的电流采样值曲线虽然相位对齐，但干扰的存在使得两者间的相似度较低，经计算得到 $B=0.36158 < B_{set}$ 。随后进行插值计算流程，以 $N_1=N_{peak}$ 为基准，按式(6)、(7)计算插值并移除干扰点，如图 C6(b)所示，插值误差为-0.0030。调整搜索区间起点为 N_1-2 ，重新搜索预判极值时刻，完成插值去除干扰后，算法重新定位预判极值 $N_1=N_{peak}$ ，计算得 $B=0.9531 > B_{set}$ ，保护启动，保护动作情况如图 C6(c)所示。由此可知，干扰点不影响本文方法的快速判断。

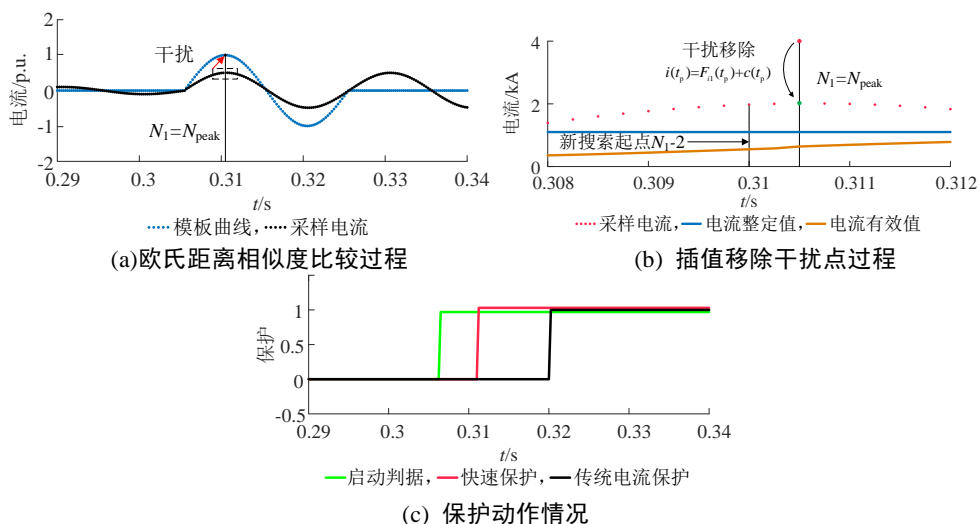


图 C6 算例 6 的仿真结果

Fig.C6 Simulative results of Case6

算例 7 的仿真结果见图 C7。由图可见，在直流分量影响下，短路电流波形纵向抬升明显，这一方面是因为短路电流过零点在抬升作用下左移；另一方面是因为短路电流在后 $T/2$ 周期，受直流分量的影响将大于模板曲线对应的值（不在本文考虑的范围）。

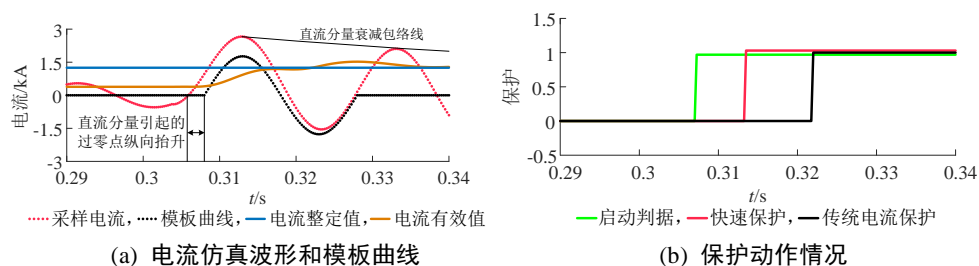


图 C7 算例 7 的仿真结果

Fig.C7 Simulative results of Case7

算例 8 的仿真结果见附录 C 图 C8。由图可见，负半轴正方向纵向抬升。可见此时故障电流首个半波出现较小负峰值波头，依靠启动判据、欧氏距离相似度共同躲避了小峰值点对于模板曲线构建的影响，寻找第 2 个峰值后构建模板曲线，快速保护故障后 9.68ms 动作，快速保护不会因故障电流首半波在负轴且叠加正值直流分量而出现拒动现象。

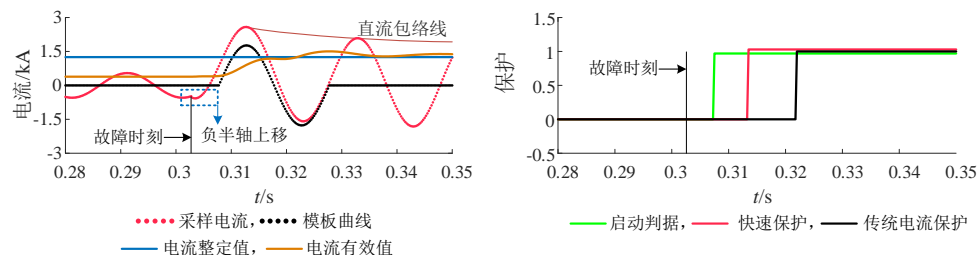


图 C8 算例 8 的仿真结果

Fig.C8 Simulative results of Case8

算例 9 的仿真结果如附录 C 图 C9 所示。单级 Δt 设置为 0.1s，故障发生时刻 $t_0 = 0.3037s$ 。线路 L_3 的时间级差 Δt 设置为 0，但故障切除时刻为 0.3465s，原因是考虑了断路器动作以及保护算法固有动作时间，本文方法的固有动作时间为 6.77ms，另考虑断路器动作时间为 36ms，最终可得故障切除时间为 0.3465s，则 R_3 故障切除时间 t_{3c} 为：

$$t_{3c} = t_0 + t_a + \Delta t + t_{br} = 0.3465s \quad (C1)$$

R_2 的定值整定为 0.92kA，经灵敏度校验满足灵敏度 1.3~1.5 的要求，能够保护 L_2 全长，保护范围延伸到下级线路。线路 L_3 中点 AB 相短路故障在 R_2 保护范围内， R_2 亦启动并识别故障。 R_2 的启动和故障

识别与图 C9 中保护 R₃ 的启动和识别完全重合。保护 R₂ 的故障切除时间 t_{2c} 为:

$$t_{2c} = t_0 + t_a + \Delta t + t_{br} \quad (C2)$$

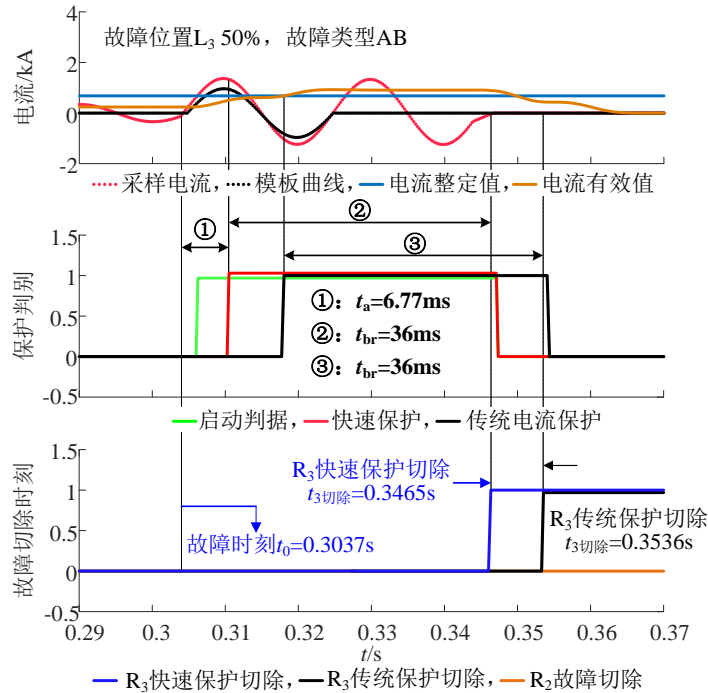


图 C9 算例 9 的仿真结果

Fig.C9 Multi-level coordination examples

表 C3 保护参数整定

Table C3 Protection parameter setting

保护位置	整定值/kA	级差 Δt /s
R ₁	1.428	0.20
R ₂	0.920	0.10
R ₃	0.640	0.00

表 C4 不同故障条件下的多级配合结果

Table C4 Multi-level coordination results under different fault conditions

故障线路	故障位置/%	故障电流/kA	动作的保护	故障切除时刻/s
L ₃	25	1.061	R ₃	0.3465
	50	0.928	R ₃	0.3465
	75	0.805	R ₃	0.3465
	100	0.778	R ₃	0.3465
L ₂	25	2.051	R ₂	0.4465
	50	1.684	R ₂	0.4465
	75	1.414	R ₂	0.4465
	100	1.217	R ₂	0.4465
L ₁	25	8.485	R ₁	0.5465
	50	4.942	R ₁	0.5465
	75	3.535	R ₁	0.5465
	100	2.687	R ₁	0.5465

需要特别说明的是，在算例中以 0.3037s 发生 AB 相短路故障为例，故障类型和故障合闸角确定，所以短路电流波形趋势相同。本文方法重点考虑的故障首半波的趋势也是一致的，不同点仅表现在短路电流幅值上。因此故障类型和故障时间确定，本文方法中的 t_a 就是一定的，反映在表 C4 中各级保护故障切除时刻是一致的（考虑断路器相同的动作时间）。而另一方面，对于传统保护而言，由短路故障位置导致短路电流有效值出现差异，不同短路位置对应的短路电流有效值爬升的趋势不同，这也正是不同的短路电流会导致传统保护动作时间波动大的原因。