

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201910

基于等传变思路的超高速输电线路保护研究与开发

戚宣威^{1,2}, 李宝伟^{1,3}, 董新涛³, 文明浩¹, 王松², 裘愉涛⁴

(1. 华中科技大学(强电磁工程与新技术国家重点实验室), 湖北 武汉 430074; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 3. 国网许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 4. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310008)

摘要: 提出了基于等传变思路的系列超高速线路保护新技术, 包括基于单端暂态信息的输电线路解微分方程算法距离保护以及基于双端暂态信息的采样值差动保护。通过利用等传变思路有效克服了电容式电压互感器暂态传变误差以及线路分布电容干扰噪声对保护算法精度和速度的不利影响, 同时针对性地提出了出口三相短路故障的加速动作方案。基于现有的保护软硬件平台实现了新型线路保护, 实验室检测表明单端量保护算法针对出口三相短路故障的动作时间小于 2.7 ms, 双端量差动保护算法全线动作时间小于 5.8 ms。所提保护新技术可以有效应对电力电子化电网中故障暂态特性复杂多变、对故障清除速度要求极高等线路保护面临的新挑战。

关键词: 输电线路; 暂态量; 距离保护; 采样值差动; 等传变

Research and development on the ultra-high-speed transmission line protection based on the concept of the equal transfer

QI Xuanwei^{1,2}, LI Baowei^{1,3}, DONG Xintao³, WEN Minghao¹, WANG Song², QIU Yutao⁴

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Zhejiang Electrical Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 3. State Grid XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 4. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China)

Abstract: The ultra-high-speed transmission line protection based on the concept of the equal transfer is proposed, including the distance protection based on the differential algorithm applying the local transient information and the sample value differential protection applying the two-terminal transient information. The method of the equal transfer processes is utilized to solve the impact of the CVT transient transfer error and the transmission line distributed capacitor, in order to improve the speed and the accuracy of the protection. In addition, the accelerating operation scheme for the near-zone three-phase fault is proposed. The proposed transmission line method is realized in the existing protection hardware and software platform. The laboratory test shows that the protection based on the local information can operate within 2.7 ms for the near-zone fault, and the differential protection can cut-off the full-line fault within less than 5.8 ms. This new protection technology can effectively cope with the challenges that the fault transient is complex and the protection is demanded to operate quickly in the power-electronized grid.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521104170012): Research of Relay Protection Principle based on Fault Transient Component Time-domain Characteristics and Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No. 5211DS17001F): Study of Substation Relay Protection System based on Multi-interval Information.

Key words: transmission line; transient information; distance protection; sample value differential protection; equal transfer

0 引言

我国电网已成为世界上前所未有的特高压交直

流复杂混联大电网^[1-4]。系统中单一的故障若不能及时清除, 将会在交直流系统间引起连锁演变的复杂事故过程, 故障全局化、复杂化已成为新常态。继电保护作为电力系统安全防护的第一道防线, 其迅速、可靠的动作对于遏制事故扩大发展、维护大电网的安全稳定运行至关重要^[5]。

清洁能源发电、柔性交直流输电等电力电子设备在现代电网中得到了广泛的应用, 电网电力电子

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(521104170012)“基于故障暂态分量时频特征的线路保护原理研究”; 国网浙江省电力有限公司科技项目资助(5211DS17001F)“基于多间隔信息的变电站继电保护系统研究”

化特征日益凸显^[6-16]。电力电子设备的接入改变了系统的结构与参数,其本体控制保护系统在故障期间的动态响应过程又将进一步增加故障暂态过程的复杂性,使得系统故障期间产生大量的暂态谐波分量。现有以交流同步电机供电电源为基础的短路电流分析理论和方法难以满足电力电子化电网故障特性分析的需求;传统基于工频相量、叠加定理的保护原理从理论上已不再适用。

在交直流混联、电力电子化等电网发展的新形势下,本文提出输电线路的超高速保护新技术。新型保护利用暂态采样值信息构建系列线路保护功能,包括基于单端信息的快速距离保护和采样值差动保护。保护利用暂态采样信息构成算法判据,无需利用 FFT 处理流程提取工频相量,利用等传变思路对采样数据进行补偿处理,显著提升了故障判断的速度和精度。算法根据输电线路的固有物理模型开展故障回路参数的计算,能够有效克服电力电子设备接入后故障暂态特性复杂多变的影响。新型线路保护技术已基于现有的保护装置软硬件平台完成开发与检测并投入现场试运行,实验室结果表明,单端量保护算法针对出口三相短路故障的动作时间小于 2.7 ms、双端量差动保护全线故障整组动作时间小于 5.8 ms。

1 总体技术思路

保护算法的总体技术思路如图 1 所示。基于等传变思路的线路保护利用保护采样瞬时值构建算法,功能配置主要包括基于单端信息的快速距离保护以及基于线路双端采样值的差动保护。其核心思想在于基于输电线路的固有物理模型,采用瞬时采样值对故障回路的参数进行拟合求解,从而形成保护动作决策。与传统的基于工频相量的保护技术相比,基于暂态采样值的保护算法避免了提取相量所需的 FFT 滤波算法,通过压缩数学信号的处理时延以加快保护的動作速度。此外,所提保护基于输电线路的固有物理模型构建算法,能够适用于电力电



图 1 保护总体技术架构

Fig. 1 Main scheme of the proposed protection

子化电网中故障暂态过程复杂多变的场景,满足未来电网的发展需求。

为了解决超高压输电线路电容式电压互感器(CVT)暂态干扰对线路保护算法造成的影响,应用等传变思路对保护测量得到的二次数据进行补偿和优化,从而有效改善保护的動作速度。

保护算法还针对线路出口处发生的三相短路故障创新性地提出了加速动作方案,从而进一步提升了输电线路的安全防护水平。

2 基于等传变思路的单端量保护

2.1 基于解微分方程算法的输电线路距离保护

输电线路距离保护算法基于输电线路的 R-L 模型对故障距离参数进行拟合,并在此基础上考虑采用 π 型等值模型对线路的分布电容参数进行补偿,从而进一步提升保护测距的精度。

以输电线路的单相接地故障为例,如图 2 所示,基于 R-L 模型的解微分方程算法为

$$u_{\varphi}(t) = u_f(t) + \left[L_1 \frac{d(i_{\varphi}(t) - i_0(t))}{dt} + R_1 (i_{\varphi}(t) - i_0(t)) + L_0 \frac{di_0(t)}{dt} + R_0 i_0(t) \right] \cdot l \quad (1)$$

式中: $u_{\varphi}(t)$ 和 $i_{\varphi}(t)$ 分别为保护安装点处测量得到的故障相电流和电压,下标 φ 代表单相短路的故障相别; $i_0(t)$ 为保护安装点处测量得到的零序电流; L_1 、 R_1 和 L_0 、 R_0 分别为线路单位长度的正序和零序电感、电阻; $u_f(t)$ 为单相接地故障时故障点的电压降; l 为待计算的故障距离。

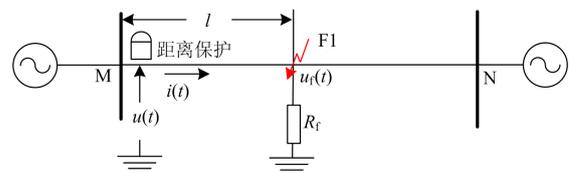


图 2 单相接地短路模型

Fig. 2 A single phase grounding short-circuit model

对于式(1)中的故障点电压降 $u_f(t)$,在故障期间可以近似认为是保护安装处测量得到的零序电流 $i_0(t)$ 与过渡电阻的乘积:

$$u_f(t) = 3i_0(t)R_f \quad (2)$$

将式(2)代入方程(1),可推得该方程共有两个待求解的未知量,即过渡电阻 R_f 和故障距离 l 。利用多点采样值可列写系列微分方程组,采用最小二乘算法即可对该两个未知量进行拟合求解。

当被保护线路距离较长时, 线路分布电容将对测距误差带来较大的影响, 为了进一步提升应用于长距离输电线路的保护算法的精度, 采用 π 模型对基于 R-L 方程求解得到的测距结果进行修正。

输电线路的 π 模型如图 3 所示, 输电线路以故障点为边界, 将保护安装处至故障回路处的输电线路采用基于集中参数的 π 型回路进行等值。在保护安装处测量得到的故障电流 $i_{\phi}(t)$ 中, 包含了线路的分布电容电流 $i_c(t)$, 在利用 R-L 微分方程求解故障距离之前, 需要将该分布电容电流在故障电流中进行剔除, 从而得到补偿后的测量电流 $i_{R-L}(t)$ 。

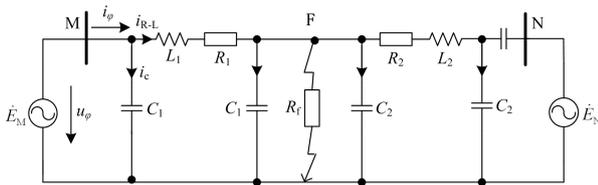


图 3 π 模型输电线路的等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of π section transmission line

以 A 相接地短路的故障电流为例, 流过保护测量处的分布电容电流为

$$i_{ca}(t) = 0.5l \cdot c_{s0} \frac{du_a(t)}{dt} + 0.5l \cdot c_0 \frac{d[u_a(t) - u_b(t)]}{dt} + 0.5l \cdot c_0 \frac{d[u_a(t) - u_c(t)]}{dt} \quad (3)$$

式中: $u_a(t)$ 、 $u_b(t)$ 和 $u_c(t)$ 为三相测量电压; c_{s0} 为单位长度的线路对地分布电容; c_0 为单位长度的线路相间耦合电容。

由此, 可以得到分布电容电流补偿后的测量电流, 如式(4)所示, 并将其代入 R-L 微分方程中进行求解。若将式(4)所示的故障电流直接代入式(1)所示的 R-L 微分方程进行求解, 则方程中含有未知量 \hat{I}^2 , 这使得方程的变为非线性, 而无法采用最小二乘算法进行拟合估计。因此, 保护算法采用迭代计算的思路对分布电容电流逼近补偿, 在下一小节中将进行详细论述。

$$i_{aR-L}(t) = i_a(t) - i_{ca}(t) \quad (4)$$

2.2 应用等传变思路提升保护算法收敛速度

解微分方程算法将受到各干扰因素的影响, 从而使得测距精度降低, 主要包括两方面的问题: 在实际串补输电工程中一般采用电容式电压互感器 (Capacitor Voltage Transformer, 简称为 CVT, 下同) 测量电压信号, CVT 由电感和电容等储能元件构成, 在故障暂态过程期间, 电感和电容的充放电过程破坏了一、二次电压的线性传变关系; 另一方面,

本文所提的解微分方程算法基于输电线路的 π 型集中参数模型, 而实际输电线路含有的分布电容在故障暂态期间的充放电过程将会产生高频信号。该高频信号的产生源自于线路的分布参数特性, 其机理与距离算法所采用的集中参数 π 模型并不完全一致, 这会导致距离保护产生故障测距误差, 特别是解微分方程算法涉及数字信号的差分计算, 易放大高频信号的干扰。这两个方面的干扰影响算法的准确性, 影响保护的動作性能。

本文将应用等传变思路克服上述问题。在线路故障期间, 保护安装处和故障点之间的一次电势差与所测得的一次电流符合输电线路分布参数模型。考虑到保护获得的二次电压经过了 CVT 传变, 对测距精度带来了干扰。如果测量电流和故障点电压也经过相同的 CVT 传变过程, 则保护所用电气信息均经过了相同的 CVT 传变过程并将继续满足原有的物理模型关系, 从而可以有效克服 CVT 暂态过程对保护算法的影响。此外, 在保护算法中引入低通滤波处理流程以滤除干扰噪声对测距精度所造成的影响。等传变思路的主要处理流程可参见文献[17-21], 主要步骤如下。

- 1) 假设故障位于线路某处, 如线路的中间位置。
- 2) 根据故障点的位置, 利用采样电压和电流信息计算故障点处的重构电压。其中故障点重构电压在时间上可以分为故障前和故障后两个相互衔接的部分: 故障前的故障点重构电压为采用保护安装处测量得到的故障前电压电流, 推导得到故障点处的正弦稳态电压; 故障后的故障点电压降为待求解的过渡电阻与保护测量得到的零序电流的乘积。
- 3) 对测量电流以及故障重构电压进行虚拟数字 CVT 传变和数字低通滤波处理, 同时将测量电压进行数字低通滤波, 使得进入微分方程算法的所有测量信息均经过了相同的处理流程。
- 4) 根据式(3)对测量得到的故障电流进行输电线路分布电容电流的补偿。
- 5) 应用经过了步骤 2)~4) 处理后的采样信息, 基于 R-L 解微分方程算法求解故障点距离, 并更新故障点的位置。

6) 重复步骤 2)~步骤 5) 的迭代计算流程, 至计算得到的结果趋于稳定, 一般来说经过 3 次迭代可以得到稳定的故障测距结果。

在 300 km 长的输电线路末端发生短路故障时, 不同算法的保护测距结果如图 4 所示, 最小二乘算法的数据窗为 5 ms。通过分析可见, 在对保护测量信息进行了等传变处理后, 基于微分方程的测距算法可以在故障后 5 ms 内迅速地收敛于实际的故障

距离。若仅仅对保护测量结果进行低通滤波而不进行等传变处理, 则测距结果在故障后 15 ms 内存在较为明显的波动。如果不对保护的测量信息进行任何处理, 则解微分方程算法的测距结果波动最为剧烈, 在故障后数个周波内都难以得到准确的求解结果。

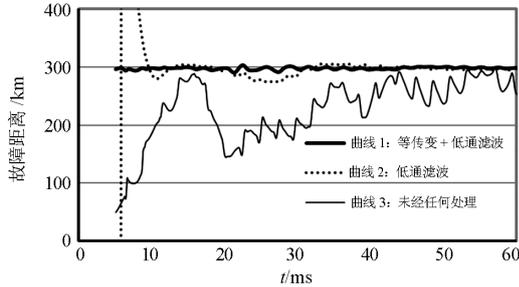


图 4 保护测距结果对比

Fig. 4 Comparison of fault distance measurement results

2.3 出口三相短路故障加速动作方案

为了进一步提升保护的動作速度, 针对出口三相短路故障这一故障特性显著的严重故障提出加速动作方案, 从而进一步提升输电线路的整体安全防护性能。出口三相短路故障的判据包括两个步骤: 步骤一为保护确定故障点位于保护安装处的附近; 步骤二为确定保护位于出口的正方向处。

2.3.1 保护近区短路故障快速判断

保护出口故障的判据借鉴工频变化量快速保护的思路, 利用保护测量得到的电压电流推导得到出口某一整定点处的电压, 并将测量电压与整定点处计算得到的补偿电压进行极性比较以判断故障点是否位于保护近区。

如图 5 所示, 假设保护安装处(母线 M)附近 l_{set} 范围内的区域为近区故障。根据保护测量得到的电压电流可以推导得到至整定点 l_{set} 处的电压降 $\Delta u(t)$ 以及整定点处的计算电压 $u_{set}(t)$, 如式(5)、式(6)所示。若故障点位于保护区范围内, 则电压降 $\Delta u(t)$ 大于保护安装处的测量电压 $u_{\phi}(t)$, 保护测量电压 $u_{\phi}(t)$ 与整定点计算得到的虚拟电压 $u_{set}(t)$ 之间的极性相反, 如图 5 所示; 反之, 若故障点位于整点范围的外部, 则电压降 $\Delta u(t)$ 小于 $u_{\phi}(t)$, 且保护测量电压 $u_{\phi}(t)$ 与整定点计算电压 $u_{set}(t)$ 之间的极性相同, 如图 6 所示。

$$\Delta u(t) = l_{set} \left[L_1 \frac{di_{\phi}(t)}{dt} + R_1 i_{\phi}(t) \right] \quad (5)$$

$$u_{set}(t) = u_{\phi}(t) - l_{set} \left[L_1 \frac{di_{\phi}(t)}{dt} + R_1 i_{\phi}(t) \right] \quad (6)$$

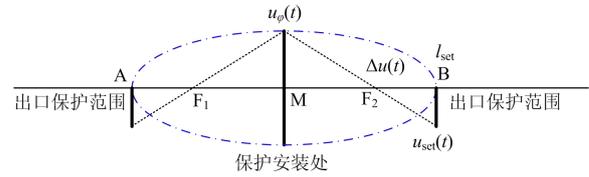


图 5 保护近区内部故障示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the near-zone inside fault

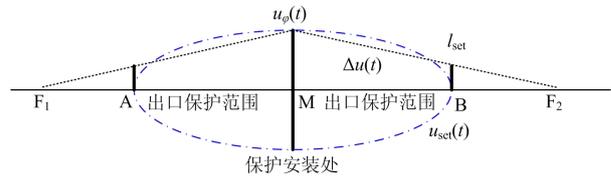


图 6 保护近区外部故障示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the near-zone outside fault

为了判断保护测量电压与补偿点计算电压之间的极性, 采用电压绝对值积分算法进行故障判断。通过比较保护安装处测量电压 $u_{\phi}(t)$ 与电压降落 $\Delta u(t)$ 绝对值积分的相对大小关系判断故障点区域。若 $u_{\phi}(t)$ 的绝对值积分大于 $\Delta u(t)$, 则判断为发生区内故障; 反之, 若 $u_{\phi}(t)$ 的绝对值积分小于 $\Delta u(t)$, 则判断为区外故障。

保护采样率设置为 4 kHz, 取故障后 3 ms 内 12 个数据点的绝对值积分进行出口故障判断, 线路近区整定点 l_{set} 设定为线路全长的 0.2 倍。其仿真结果如表 1 所示。通过分析可见, 对于保护安装处正方向的近区短路故障, $u_{\phi}(t)$ 的绝对值积分大于 $\Delta u(t)$; 反之, 对于近区外部的短路故障, $u_{\phi}(t)$ 的绝对值积分小于 $\Delta u(t)$ 。

2.3.2 出口故障方向判断

在判断出故障位于保护近区后, 进一步判断故障点是否位于保护正方向从而形成跳闸决策。保护算法通过比较记忆电压和极化电压的变化趋势以判断故障点的方向。

表 1 电压积分判据的動作结果

Table 1 Results of the voltage integral criterion

线路长度	故障位置	$u_{\phi}(t)$ 绝对值 积分/kV	$\Delta u(t)$ 绝对值 积分/kV
200 km	反向出口故障	421.4	282.2
200 km	正向出口故障	1 146.2	282.2
200 km	100 km	386.2	859.3
200 km	50 km	577.2	564.0

如图 6 所示, 应用保护测量得到的记忆电压和电流, 定义保护安装处背后的等值阻抗 Z_s 上的电压降落 $u_1(t)$ 为

$$u_1(t) = u_{\varphi_j}(t) + L_s \frac{di_{\varphi_j}(t)}{dt} + R_s i_{\varphi_j}(t) - u_{\varphi}(t) \quad (7)$$

式中： $u_{\varphi_j}(t)$ 为M侧保护安装处记忆电压； $i_{\varphi_j}(t)$ 为记忆电流； $u_{\varphi}(t)$ 为故障后实际测量电压； L_s 为背侧系统等值阻抗 Z_s 的电感； R_s 为背侧系统等值阻抗 Z_s 的电阻。

利用保护实时测量电流，定义等值阻抗 Z_s 上“实际电压降落” $u_2(t)$ 为

$$u_2(t) = L \frac{di_{\varphi}(t)}{dt} + R i_{\varphi}(t) \quad (8)$$

对于如图7所示的保护前方故障，考虑到在故障后一段时间内系统的电源存在惯性、系统功角尚未摆开，此时保护实时计算和利用记忆电压电流计算得到的背后系统等值电源相同，即存在如下关系：

$$E_m(t) = u_{\varphi_j}(t) + L_s \frac{di_{\varphi_j}(t)}{dt} + R_s i_{\varphi_j}(t) = u_{\varphi}(t) + L_s \frac{di_{\varphi}(t)}{dt} + R_s i_{\varphi}(t) \quad (9)$$

式中， $E_m(t)$ 为背后系统等值电源的电势。

将式(7)和式(8)代入式(9)中可以得到：

$$u_1(t) = u_2(t) \quad (10)$$

由此可见，在发生保护前方发生短路故障时，在故障后 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 的具有相同的变化趋势。

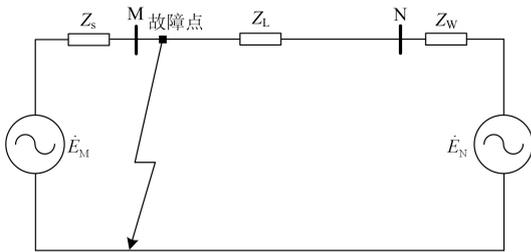


图7 正向故障示意图

Fig. 7 Diagram of forward fault

假设保护反向发生短路故障，如图8所示。假设保护安装处的实际故障电流为 $i'_{\varphi}(t)$ ，则保护安装处背侧系统等值阻抗上“实际电压降落” $u'_2(t)$ 为

$$u'_2(t) = L \frac{di'_{\varphi}(t)}{dt} + R i'_{\varphi}(t) \quad (11)$$

对于输电线路出口处的三相短路故障，可认为正向故障电流与反向故障电流近似反向，即：

$$i_{\varphi}(t) \approx -k i'_{\varphi}(t) \quad (12)$$

式中， k 为正实数。

因此，根据式(10)所述的关系，可以推导得到：

$$u_1(t) = -k u'_2(t) \quad (13)$$

根据式(10)和式(13)可以看出，正向和反向故障

时，保护安装处背侧系统等值阻抗上“记忆电压降落”和“实际电压降落”具有明显的差别，因此可以利用该特性构建出口保护判据。

上述分析是基于单相系统，针对三相系统需要根据故障类型计算对应的“记忆电压降落”和“实际电压降落”。针对单相接地故障，采用故障相电压和电流进行计算；针对相间故障，采用相间电压和电流进行计算；针对三相故障，采用相间电压和电流进行计算。

为比较“记忆电压降落”和“实际电压降落”的变化特性，定义波形相关系数为

$$r_{u_1, u_2} = \frac{\sum_{i=1}^N u_1(i) u_2(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N u_1^2(i)} \sqrt{\sum_{i=1}^N u_2^2(i)}} \quad (14)$$

式中： $u_1(i)$ 为“记忆电压降落”在 i 时刻的采样值； $u_2(i)$ 为“实际电压降落”在 i 时刻的采样值； N 为数据窗长度。

定义的波形相关系数具有以下性质：

如果 $u_1(i) = k u_2(i)$ ，其中 k 为正实数，则 $r_{u_1, u_2} = 1$ ；如果 $u_1(i) = -k u_2(i)$ ，其中 k 为正实数，则 $r_{u_1, u_2} = -1$ 。

那么可以根据“记忆电压降落”与“实际电压降落”波形相关系数判断故障方向，具体的判据为：

若 $r_{u_1, u_2} \geq r_{set}$ ，则判定为正向故障；若 $r_{u_1, u_2} \leq -r_{set}$ 则判定为反向故障。其中， r_{set} 为设定的门槛。

在正向和反向故障时，典型的电压极性仿真结果分别如图9和图10所示。仿真中，故障发生于0.3s，采样率为4kHz，数据窗的长度为2.5ms。通过分析可见，正向故障时 $u_1(t)$ 与 $u_2(t)$ 基本完全一致，反向故障时 $u_1(t)$ 与 $u_2(t)$ 变化趋势相反。利用故障后2.5ms数据，正向故障时 $u_1(t)$ 与 $u_2(t)$ 相关系数为0.999，反向故障时相关系数为-0.970，说明正反向故障时， $u_1(t)$ 与 $u_2(t)$ 存在明显差异，可以根据 $u_1(t)$ 与 $u_2(t)$ 的相关系数判别故障方向。

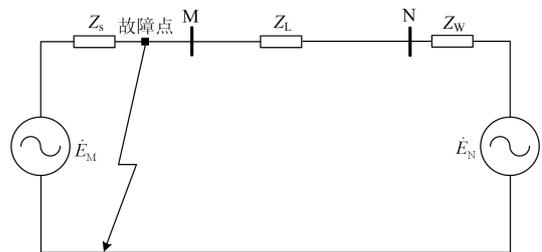


图8 反向故障示意图

Fig. 8 Diagram of backward fault

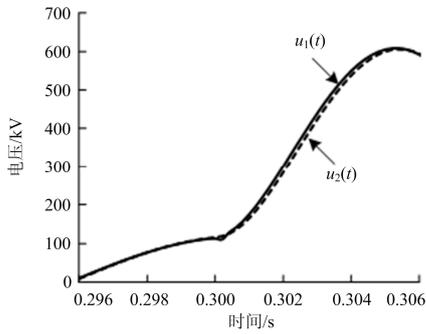


图 9 正向故障的典型仿真结果

Fig. 9 Typical simulation result of the forward fault

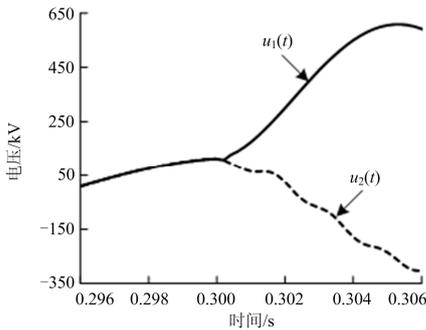


图 10 反向故障的典型仿真结果

Fig. 10 Typical simulation result of the backward fault

保护所提的等值电压算法需要应用系统的等值阻抗参数, 该参数易受系统运行方式变化的影响。为此, 还通过仿真验证了算法所采用不同系统等值阻抗情况下(分别为系统真实阻抗的 0.5 倍和 2 倍)的保护判断结果, 验证表明保护仍能正确地判断出口故障方向, 算法对于系统阻抗并不敏感, 对系统运行方式具有较高的适应性。

2.4 单端量保护的总体算法流程

通过结合基于等传变思路的单端量距离保护算法以及出口三相短路的快速算法, 形成的保护算法流程如图 11 所示。保护算法首先对测量采集到的相关电流和电压信息经过低通滤波和数字虚拟 CVT 变换处理以实现数字信号等传变的流程。图中, t_1 为判断出口故障的时间(3 ms), t_{11} 为远处故障的距离计算时间(10 ms)。

在判断为出口短路故障的情况下, 则进行出口故障方向的判断。若判断为正方向短路故障, 则加速跳闸出口, 若判断为非近区短路故障, 则进行基于等传变原理的解微分方程算法计算以获取故障点位置, 若故障点位于保护范围内则发出跳闸指令。

3 基于采样值的输电线路差动保护方案

线路差动保护利用瞬时采样值实现, 其处理流程如图 12 所示。三相电流和电压采样值先经过等

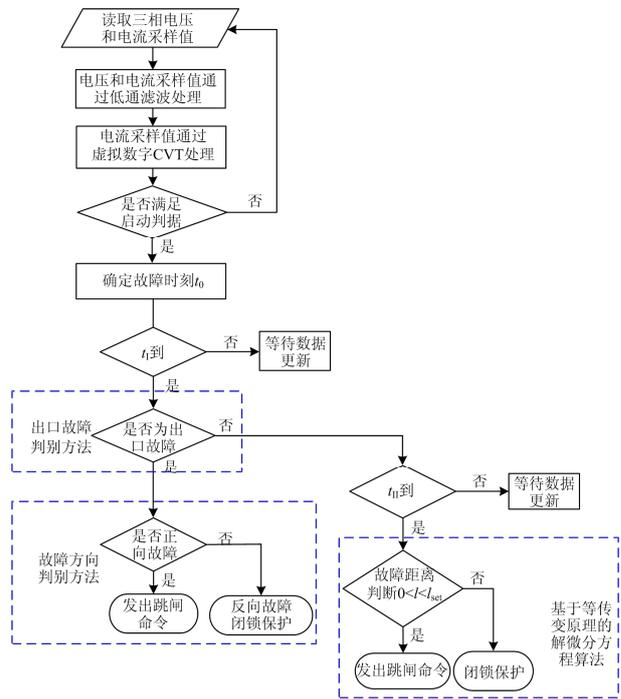


图 11 单端量保护算法流程

Fig. 11 Flow chart of single-terminal protection algorithm

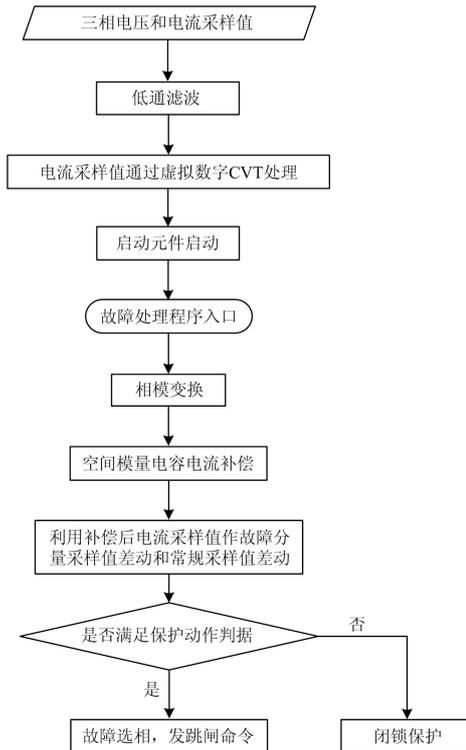


图 12 线路差动保护处理流程

Fig. 12 Procedure of the differential protection

传变流程的处理以克服 CVT 对电压采样的暂态影响。算法利用相模变换对三相系统进行解耦, 如式 (15)所示, 并基于输电线路的等值集中参数模型对

各个模量的分布电容电流进行补偿。

$$\begin{bmatrix} i_{a-b} \\ i_{b-c} \\ i_{a-c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \\ & 1 & -1 \\ 1 & & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

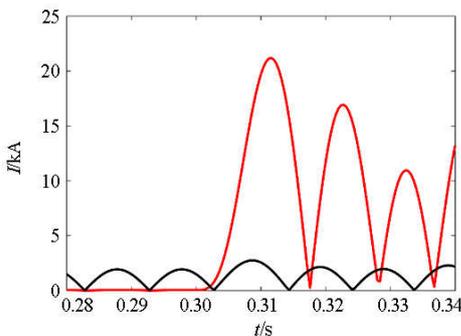
采样值保护判据采用 24 取 8 的动作判据,即根据每个采样点进行保护动作判据的计算,在 24 个采样点若有 8 个采样点满足动作判据则保护出口。其保护动作判据为

$$[i_d(k) \geq i_{d0}] \cap [i_d(k) \geq k_r i_r(k)] \quad (16)$$

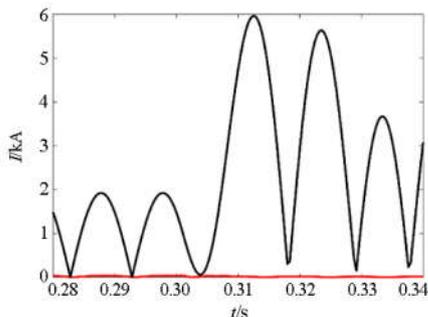
式中: $i_d(k)$ 为 k 时刻动作电流; $i_r(k)$ 为 k 时刻制动电流; i_{d0} 为动作门槛(取 0.1 倍的额定电流); k_r 为制动系数(取 0.6)。

对于不同类型的故障,保护可以根据各模量的动作情况进行选相跳闸。若仅对应一个空间模量的保护动作,保护不跳闸;若对应两个空间模量的保护动作,跳单相;若对应三个空间模量的保护动作,发三相跳闸命令。

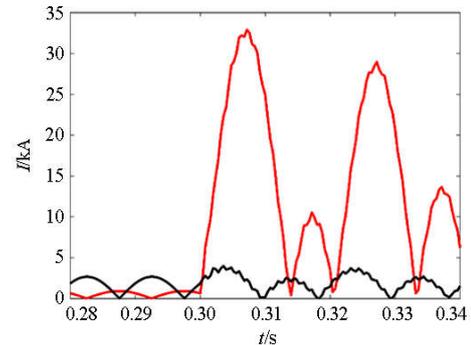
在区内外故障情况下,采样值差动和制动电流的典型仿真结果如图 13 所示。通过分析可见,在区内故障期间差动电流瞬时值远大于制动电流。在外部故障期间,经过分布电容电流补偿算法之后的差动电流近似为零,其值远小于制动电流。故保护算法可以在区内外故障情况下正确动作。



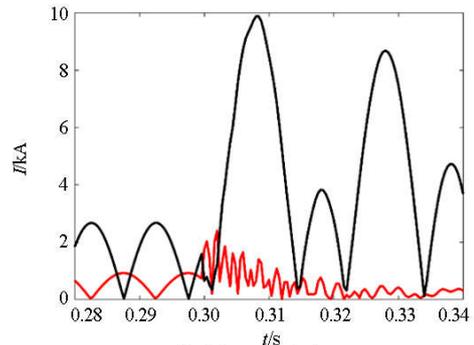
(a) 区内故障 (含电容电流补偿)



(b) 区外故障 (含电容电流补偿)



(c) 区内故障 (无电容电流补偿)



(d) 区外故障 (无电容电流补偿)

图 13 采样值差动保护的典型仿真结果

Fig. 13 Typical simulation result of the sample value differential protection

4 保护装置研发情况及应用前景

4.1 保护装置样机研发

基于现有的 WXH-803 线路保护平台研发新型的暂态量线路保护装置,装置的硬件平台如图 14 所示。装置含双 CPU, CPU1 在原九统一光纤差动保护基础上增加基于双端暂态量信息的瞬时值差动保护方案,在 CPU2 中完成暂态量距离保护功能。其中, CPU 1 中线路采样值差动保护算法的采样率为 48 点/周波, CPU 2 中单端量保护算法的采样率为 80 点/周波。

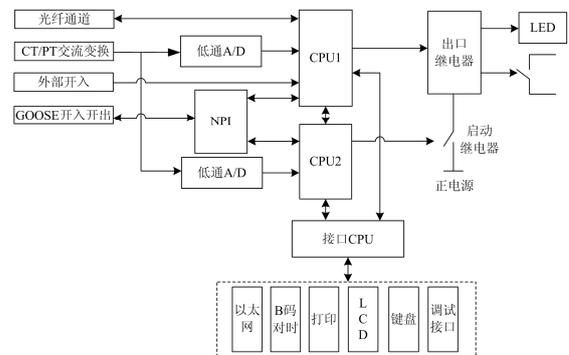
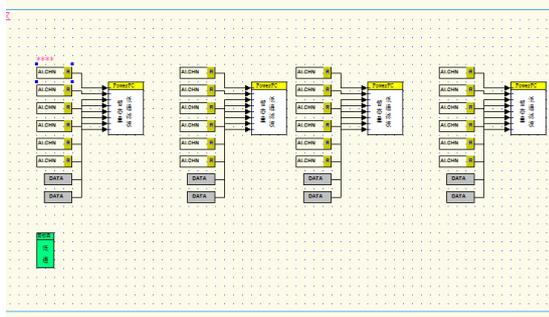


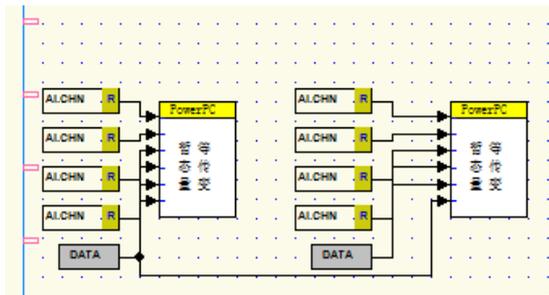
图 14 保护装置硬件结构图

Fig. 14 Structure of the protection device hardware

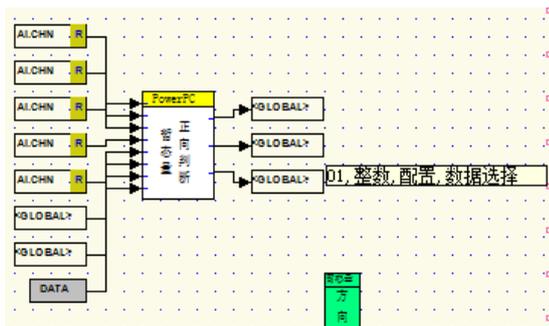
采用可视化的编程界面将所提的算法写入现有的线路保护装置, 如图 15 所示。所提的保护原理仅



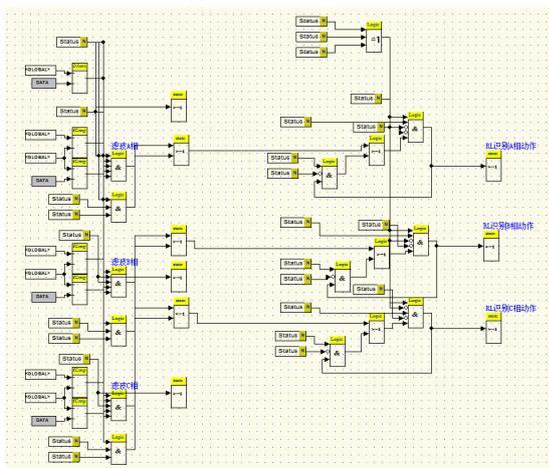
(a) 低通滤波



(b) 等传变算法流程



(c) 正向出口故障判断



(d) 距离保护算法

图 15 保护算法的编程界面

Fig. 15 Programming interface of the proposed algorithm

需对现有 WXH-803 线路保护装置的算法程序进行升级, 对于信号传感设备以及保护装置的采样、计算速率等软硬件性能均无需额外的特殊要求。

4.2 保护动作性能检测

保护装置样机通过了第三方实验室的型式试验, 具备入网运行条件。同时, 某实验室围绕装置的动作速度开展专项测试。结果表明: 对于线路出口故障单端量保护算法 2.7 ms 内动作(不含出口继电器时间), 对于全线故障双端量采样值差动保护整组 5.8 ms 内动作(不含通道时间)。对于线路出口处故障, 单端量保护的典型动作结果如图 16 所示。通过分析可见, 线路发生故障到保护装置内部 CPU 发出跳闸命令之间差为 2.4 ms。依据相关检测规程, 各保护动作时间分别检测 5 次, 取最大值作为最后的结果。线路出口故障单端量保护算法动作时间分布在 2.0~2.7 ms, 全线故障双端量采样值差动保护整组动作时间分布在 5.6~5.8 ms。

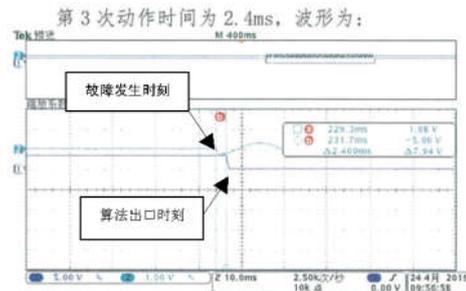


图 16 对于线路出口处故障, 单端量保护的典型动作结果(曲线 1 为保护 CPU2 动作开出光耦的电平, 曲线 2 为故障电流)

Fig. 16 Typical operation result of the single-terminal protection for the fault at the outlet of line (curve 1 is the voltage level of the output optocoupler from the protection algorithm of CPU2, and curve 2 is the fault current)

4.3 应用前景分析

新型保护装置已在浙江某 220 kV 变电站投入挂网试运行, 如图 17 所示。目前, 新型保护设备运行平稳。



图 17 保护装置试运行情况

Fig. 17 Trial operation of the protection device

本文所提的超高速线路保护技术主要有如下应用前景和优势:

- 1) 显著提升线路保护的動作速度, 压缩交直流

混联电网故障阻断的时间,降低近区直流逆变站换相失败的风险,有力保障大电网的安全稳定运行。

2) 利用暂态信息构建保护判据,克服传统基于工频量保护的原理缺陷,有效适应电力电子化电网故障暂态分量复杂多变的影响,满足 FACTS 设备、新能源接入后的线路保护需求,提升清洁能源的消纳率。

3) 所提保护算法能够在现有的微机保护软硬件平台实现,仅需要通过升级程序即可显著改善线路保护性能,易于在电网中推广应用。

5 结论

本文提出了基于等传变思路的系列单端量和双端量线路保护原理,并开展了样机研发和现场试运行工作。

单端量保护基于输电线路的固有物理模型,构建了解微分方程算法,采用等传变思路克服了 CVT 暂态传变误差以及线路分布电容干扰噪声的影响,能够在故障后迅速地计算收敛得到故障距离,同时针对性地提出了出口三相短路故障的加速动作方案。双端量保护利用瞬时采样值构建差动保护,算法基于输电线路的集中参数模型对线路分布电容参数进行补偿,有效提升了保护的灵敏度。

基于现有的 WXH-803 保护平台,通过增设软件程序,研发了新型的超高速线路保护装置。实验室检测验证了所提算法的速动性,单端量保护算法针对出口三相短路故障的动作时间小于 2.7 ms,双端量差动保护全线故障整组动作时间小于 5.8 ms。所提保护算法无需增加额外的软硬件配置,即可有效改善线路保护的動作性能。

研发的保护装置样机已成功投入现场试运行,未来该保护技术可以应用于直流逆变站近区、新能源出线等对故障切除速度要求高、故障暂态过程复杂多变的电力电子化电网中,从而有效地提升输电线路的安全防护水平。

参考文献

- [1] 陈国平,王德林,裘愉涛,等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11, 26.
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11, 26.
- [2] ZHANG B, HAO Z, BO Z. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [3] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [4] 裘愉涛,凌光,王一,等. 浙江电网220 kV及以上交流保护十年运行状况综述[J]. 浙江电力, 2017, 36(9): 1-7.
QIU Yutao, LING Guang, WANG Yi, et al. Analysis on relaying protection and its operation conditions in 220 kV and above AC system of Zhejiang Power Grid in the last ten years[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(9): 1-7.
- [5] 刘涛,贾颖涛,余开伟,等. 1000 kV特高压变电站断路器失灵保护配置方案[J]. 浙江电力, 2017, 36(10): 17-21.
LIU Tao, JIA Yingtao, YU Kaiwei, et al. Configuration plan of breaker trip failure protection in 1000 kV UHV power substation[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(10): 17-21.
- [6] YAO Z, ZHANG Q, PENG C, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC Systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [7] 蔡宜君,文明浩,陈玉,等. LCC-MMC混合直流输电系统整流侧故障穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 1-8.
CAI Yijun, WEN Minghao, CHEN Yu, et al. Control strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under rectifier side fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 1-8.
- [8] DASH P K, PATNAIK R K, MISHRA S P. Adaptive fractional integral terminal sliding mode power control of UPFC in DFIG wind farm penetrated multimachine power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 79-92. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.
- [9] 陈磊,刘永奇,戴远航,等. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 15-21.
CHEN Lei, LIU Yongqi, DAI Yuanhang, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 15-21.
- [10] 高淑萍,胡振宇,张保会,等. 一种适用于 MMC-HVDC直流输电线路的保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 13-20.
GAO Shuping, HU Zhenyu, ZHANG Baohui, et al. A new relay protection principle of MMC-HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 13-20.

- [11] 李仲青, 曹虹, 张和, 等. 500 kV UPFC对工频变化量方向保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 55-63.
LI Zhongqing, CAO Hong, ZHANG He, et al. Analysis of the impact of 500 kV UPFC on impedance directional protection based on variation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 55-63.
- [12] 谢华, 潘磊, 赵青春, 等. 统一潮流控制器与串补对线路保护影响的比较分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 137-142.
XIE Hua, PAN Lei, ZHAO Qingchun, et al. Research on the effect of UPFC and SC on line protection[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(4): 137-142.
- [13] 瞿峰, 邓凯, 张赟, 等. 500 kV苏南UPFC接入对距离保护的影响及应对策略[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 27-32, 43.
QU Feng, DENG Kai, ZHANG Yun, et al. Research on the effect of 500 kV UPFC in southern Suzhou on distance protection and the countermeasures[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2018, 37(2): 27-32, 43.
- [14] 欧阳金鑫, 唐挺, 郑迪, 等. 低电压穿越控制下双馈风电机组短路电流特性与计算方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 216-224.
OUYANG Jinxin, TANG Ting, ZHENG Di, et al. Characteristics and calculation method of short-circuit current of doubly fed wind generator under lower voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 216-224.
- [15] 邓凯, 瞿峰, 钱伟, 等. 苏南500 kV统一潮流控制器保护系统及动作结果分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 8-13, 78.
DENG Kai, QU Feng, QIAN Wei, et al. Analysis of protection system and action results of unified power flow controller in Suzhou 500 kV Southern Power Grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2018, 37(1): 8-13, 78.
- [16] 洪树斌, 范春菊, 陈实. 考虑双馈异步风机特性的自适应接地距离保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 124-133.
HONG Shubin, FAN Chunju, CHEN Shi. Adaptive ground distance protection considering doubly-fed induction generator characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 124-133.
- [17] 文明浩, 陈德树, 尹项根. 超高压线路等传变快速距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 145-150.
WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Fast distance protection of EHV transmission lines based on equal transfer processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 145-150.
- [18] 文明浩, 陈德树, 尹项根, 等. 远距离输电线路等传变瞬时值差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 59-65.
WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen, et al. Long transmission line current differential protection by using instantaneous value after equal transfer processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 59-65.
- [19] WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Instantaneous value and equal transfer processes-based current differential protection for long transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 289-299.
- [20] QI X, WEN M, YIN X, et al. A novel fast distance relay for series compensated transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 64: 1-8.
- [21] WEN M, CHEN D, YIN X. Equal transfer processes-based distance protection of EHV transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 52: 81-86.

收稿日期: 2019-03-15

作者简介:

戚宣威(1988—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 814512663@qq.com

李宝伟(1984—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事继电保护的开发工作; E-mail: baowei_li@126.com

董新涛(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: dongxintao66@126.com

(编辑 葛艳娜)