

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.236119

## 海上风电交流送出线路继电保护优化设计

薛明军<sup>1,2</sup>, 陈福锋<sup>1,3</sup>, 杨林刚<sup>4</sup>, 裘愉涛<sup>5</sup>, 杨黎明<sup>1,2</sup>, 俞春林<sup>1,2</sup>, 行武<sup>1,2</sup>

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153;  
3. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210003; 4. 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310000;  
5. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 针对海上风电运行环境恶劣、平台面积资源有限以及电缆线路电容电流显著等问题, 提出一种适用于海上风电送出线路的高压线路保护与电抗器保护一体化设计的新方案。首先, 将输电线路和电抗器视为一个电气设备, 设计了集成优化整体方案, 避免了传统的电抗器支路电流的迭代计算。然后, 对比研究了传统差动和行波差动对电缆线路电容电流的补偿效果, 提出了线路保护优化处理技术。通过引入更为适合的线路零序电流作为电抗器零序差动的制动电流, 提出了电抗器保护功能优化策略。最后, 仿真实验验证了所提的优化处理技术能够提高海缆线路差动保护和电抗器零序差动保护的灵敏性和可靠性。

**关键词:** 海上风电; 送出线路; 继电保护; 线路保护; 电抗器保护

### Optimized design of relay protection for an offshore wind power outgoing transmission line

XUE Mingjun<sup>1,2</sup>, CHEN Fufeng<sup>1,3</sup>, YANG Lingang<sup>4</sup>, QIU Yutao<sup>5</sup>, YANG Liming<sup>1,2</sup>, YU Chunlin<sup>1,2</sup>, XING Wu<sup>1,2</sup>

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. Nanjing SAC Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China; 3. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210003, China;  
4. Hydrochina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 5. State Grid Zhejiang Electric Power Company Ltd., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** A new integrated design scheme for high-voltage line and reactor protection suitable for offshore wind power transmission lines is proposed to address issues such as harsh operating environment, limited platform area resources, and significant capacitive current in cable lines. First, considering the transmission line and reactor as a piece of electrical equipment, an integrated optimization scheme is designed to avoid the traditional iterative calculation of reactor branch current. Then, a comparative study is conducted on the compensation effect of traditional and traveling wave differentials on the capacitance current of cable lines, and an optimized processing technology for line protection is proposed. By introducing a more suitable line zero sequence current as the braking current for the zero sequence differential of the reactor, an optimization strategy for the reactor protection function is proposed. Finally, simulation experiments have verified that the proposed optimization processing technology can improve the sensitivity and reliability of differential protection for submarine cable lines and zero sequence differential protection for reactors.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2401100).

**Key words:** offshore wind; outgoing transmission line; relay protection; line protection; reactor protection

## 0 引言

力争 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和, 是我国提出的新发展目标<sup>[1-5]</sup>。“双碳”目标在电力行业中的实践就是构建以风力发电为代表的

新能源为主体的新型电力系统<sup>[6-10]</sup>。我国海上风能资源丰富, 近海风能可供开发的资源达到 5 亿 kW, 海上风场距离负荷中心较近, 消纳能力强, 风电发展正逐渐向海上转移<sup>[11-13]</sup>。海上风电场主要包括风力发电机、汇流线路、海上升压变电站及送出线路, 海上升压变电站通过海底电缆跟陆上变电站相连实现所发电能送出<sup>[14-17]</sup>。从建设成本、技术成熟度及

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401100)

运行维护的便捷性各方面考虑, 当前海上风电的送出方案, 尤其是近海风电, 大多采用高压交流输电技术<sup>[18-20]</sup>。海上升压变电站受海上平台面积的限制, 要求所有设备要尽量紧凑化、集成化, 而作为海上升压变电站重要组成部分的二次系统基本都是沿用陆上变电站设计方案, 未有具体优化措施。海底电缆, 尤其是高压电缆, 其单位长度的电容电流为同等级架空线路的十几、二十倍<sup>[21-22]</sup>, 很多时候线路虽不长但电容电流已不能被忽略, 这种线路短但电容电流大的特征与陆上架空输电有明显的区别, 而架空线路差动保护采用的常规电容电流处理方案在海底电缆上是否仍适用也有必要进一步研究<sup>[23-25]</sup>, 目前国内外鲜有针对海上风电送出交流线路保护开展的研究。

本文首先针对海上风电建设相关的特殊问题分别进行了讨论, 提出了线路保护与电抗器保护一体化装置设计的技术思路, 并在此基础上研究了海上风电送出线路新型电容电流处理技术和新型电抗器接地故障零序差动保护技术。该技术思路一方面减少了保护装置的数量, 能够降低海上平台的二次设备的占用面积, 另一方面一体化设计优化了保护之间的二次回路, 在实现信息共享的基础上极大地提升了相应保护的性能。

## 1 集成优化设计整体方案

实际系统中电抗器和线路是同时投运或停运的, 电抗器是线路的重要组成部分, 因此可以将输电线路和电抗器看作成套的电气设备来配置一体化的集成保护装置<sup>[26-27]</sup>。为实现海上风电送出线路的线路保护与电抗器保护的功能集成与性能优化, 集成优化装置采用物理集成合一、功能分层分区、性能优化提升的总体思路, 该方案在常规变电站或智能变电站都能应用, 下面以智能站为例, 介绍集成优化装置的设计方案。

集成优化装置的二次回路如图 1 所示, 线路间隔合并单元完成母线电压和线路电流的采集, 电抗器间隔合并单元完成电抗器高压侧电流、低压侧电流和线路电压的采集。集成优化保护装置接收线路间隔合并单元与电抗器间隔合并单元的采样数据, 并通过插值算法来完成两个间隔数据的同步, 完成本侧模拟量数据采集后, 装置通过光纤通道与对端装置进行采样数据和重要信息的交互, 并使用乒乓原理来实现两端系统的数据同步<sup>[28-30]</sup>, 从而实现送出线路和电抗器的故障判断, 集成优化装置的跳合闸命令通过 GOOSE 信号发送给间隔智能终端, 由间隔智能终端来完成断路器的分合操作, 实现对故障的隔离。

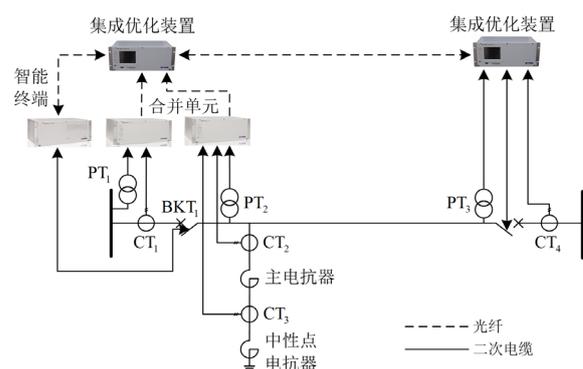


图 1 集成优化装置的二次回路图

Fig. 1 Secondary circuit diagram of integrated optimization device

智能站集成优化装置的硬件设计在现有高压输电线路保护装置的基础之上不用做任何改动, 只需接入电抗器间隔的合并单元。集成化装置的软件架构采用功能分层分区的设计原则, 采样功能为保护最前端的公共环节, 从两个合并单元获取采样数据后交由前置数据模块统一处理, 完成本侧线路及电抗器间隔与对侧数据的同步及计算。线路保护功能和电抗器保护功能采用分区设计的原则, 分为线路保护区域和电抗器保护区域, 两者的算法和逻辑相互独立, 通过内部总线来交互信息; 两个保护区域共用后端的跳闸功能, 线路保护动作信息和电抗器保护动作信号映射到同一组 GOOSE 虚端子, 最终输出到间隔智能终端实现跳合闸。

海上风电送出线路的高压线路保护与电抗器保护一体化设计的新方案, 在优化提升保护整体性能的同时, 减少了海上升压站二次设备的平台占用面积, 降低了海上风电建设中的二次设备投资, 另外装置应能适应其所处环境的温度、湿度, 防止空气中的水分及腐蚀性介质侵入造成的损坏, 在装置产品设计时, 集成优化装置考虑了沿海的盐潮因素, 选用合适的材料与元器件, 并通过软硬件的冗余设计来抵御外部复杂气候的破坏, 从而提高装置的整体可靠性。

## 2 一体化保护功能优化设计

### 2.1 线路差动保护电容电流影响的处理技术优化

差动保护原理简单可靠, 动作快速, 是输电线路的主保护。海上风电送出线路一般并不长, 但是单位长度海底电缆的电容电流数值上大约是传统架空线路的十几倍, 因此需要考虑海缆的分布电容电流对差动保护的影响。

#### 1) 电容电流补偿

三相系统可以通过解耦变换转化为单相系统

进行分析,因此考虑如图2所示的单相输电系统电容电流补偿原理图。正常运行时,线路的等效电容给电流提供了额外的支路,导致两侧差动电流存在不平衡电流,降低了差动保护的灵敏度和可靠性。为了消除电容电流对差动保护的不利影响,需要在保护计算中进行电容电流补偿,目前常用的电容电流补偿方法有稳态法、时域法和行波法3种。

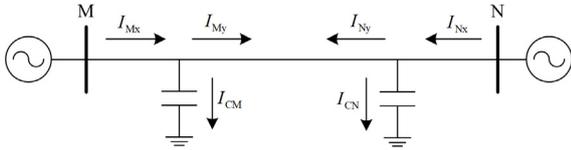


图2 电容电流补偿原理图

Fig. 2 Schematic diagram of capacitance current compensation

稳态法基于工频量,一般采用Π模型等效电路,将线路电容平均等效至线路两端,分别计算电容电流,如式(1)所示。

$$\begin{cases} I_{CM} = j\omega C_e U_M \\ I_{CN} = j\omega C_e U_N \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C_e$  为等效电容;  $U_M$ 、 $U_N$  分别为线路 M、N 两侧端电压;  $I_{CM}$ 、 $I_{CN}$  分别为流过线路 M、N 两侧等效电容的电流;  $\omega$  为角频率。

两侧原始电流减去电容电流即可得到补偿电流,使用补偿电流代替原始电流构造差动保护。当线路正常运行时,补偿电流的差动电流理论上为零,保护不会误动。而在故障暂态,如发生区外扰动时,仍可能导致电流差动保护误动。

时域法基于瞬时值,对于图2所示的电路,分别计算电容电流,如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_{CM} = C_e \frac{du_M}{dt} \\ i_{CN} = C_e \frac{du_N}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

时域法考虑了线路电容的故障暂态特性,计及了高频分量的影响,但其仍是基于集中参数线路模型,难以反映电容电流的分布特性。

行波法建立在更为精细的分布参数模型上,从行波传播的角度考虑线路上电压电流的关系,有

$$i_{Mx}(t) - \frac{u_M(t)}{Z_C} = i_{Nx}(t - \tau) - \frac{u_N(t - \tau)}{Z_C} \quad (3)$$

式中:  $Z_C$  为波阻抗;  $\tau$  为传输时延;  $i_{Mx}$ 、 $i_{Nx}$  分别为流过线路 M、N 两侧的电流,方向由母线指向线路。

式(3)为利用前行波构造的电压电流关系,利用反行波也可构造相似的关系式,都可以作为差动保护构造的依据。行波法考虑了电容电流的分布特性

和传输时延,理论上完全补偿了电容电流的影响,但实际应用会受到插值截断误差等因素的影响。

### 2) 误差对比分析

实际的输电线路具有大范围的空间分布,按照电压电流行波的传播特性进行分析,对于图2中的线路,其首末端的电流有

$$\begin{bmatrix} U_N \\ I_{Nx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma l) & Z_C \text{sh}(\gamma l) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l)}{Z_C} & \text{ch}(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_M \\ I_{Mx} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $l$  为线路长度;  $\text{sh}()$ 和  $\text{ch}()$  分别为双曲正弦和双曲余弦函数;传播系数  $\gamma$  和波阻抗  $Z_C$  的表达式为

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \\ Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $R$ 、 $L$ 、 $G$ 、 $C$  分别为线路单位长度的电阻、电感、电导和电容;  $Z$ 、 $Y$  分别为线路单位长度阻抗和导纳。

根据是否考虑线路电阻、是否考虑频变参数等因素,式(4)的线路模型也可以细分为基于无损线的模型和有损线的 Bergeron 模型、Marti 模型等,其对实际线路的逼近程度不同,相应的时域表达式的计算复杂度也不同。式(3)为对应于无损传输线的一种时域表达式,在原理上就考虑了分布电容电流,不存在理论误差。

式(4)是分布参数线路模型,相对于常用的集中参数线路模型,更为接近实际的线路模型。本文以式(4)为基准,分析集中参数模型的模型误差。稳态法采用Π模型等效电路,是对分布参数模型的简化。将式(4)对应的电路等效到Π模型中,如图3所示。

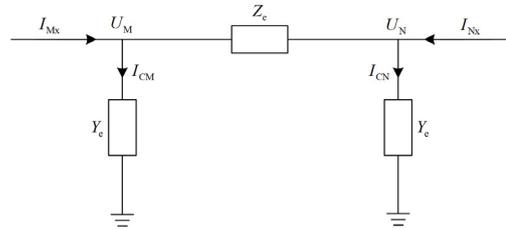


图3 Π模型电路图

Fig. 3 Π model circuit diagram

根据图3所示的Π模型,列写电路方程如式(16)所示。

$$\begin{cases} I_{CM} = Y_e U_M \\ I_{CN} = Y_e U_N \\ U_M - U_N = (I_{Mx} - I_{CM})Z_C \\ (I_{Mx} - I_{CM}) = -(I_{Nx} - I_{CN}) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Y_e$  为线路等效总导纳的一半;  $Z_e$  为线路等效总阻抗。

$\Pi$  模型是分布参数模型的简化, 核心的电路方程是相同的, 因此模型参数  $Y_e$  和  $Z_e$  应使式(6)的电压电流关系符合式(4)的电压电流关系。联立式(4)和式(6)可以求得模型参数, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} Y_e = \frac{\text{ch}(\gamma l) - 1}{Z_c \text{sh}(\gamma l)} \\ Z_e = Z_c \text{sh}(\gamma l) \end{cases} \quad (7)$$

因此, 图 3 中  $\Pi$  模型的电容支路的电流计算表达式应为

$$I_{CM} = \frac{\text{ch}(\gamma l) - 1}{Z_c \text{sh}(\gamma l)} U_M \quad (8)$$

上述模型中, 电容支路的表达式仍然较为复杂, 传统的稳态法和时域法将其进一步简化, 将其等效为一个电容元件, 使其在电容电流计算时可以使用较为简单的式(1)和式(2)。简化的原则为保证工频量下的电路等效, 因此有

$$\frac{\text{ch}(\gamma_0 l) - 1}{Z_{c0} \text{sh}(\gamma_0 l)} = j\omega_0 C_e \quad (9)$$

式中:  $\omega_0$  为工频角频率;  $\gamma_0$ 、 $Z_{c0}$  分别为工频下的传播系数和波阻抗。

式(1)和式(2)的简化计算只保证工频量下的等效, 而在其他频率下, 引入如式(10)所示的模型误差  $\Delta I_{CM}$ 。

$$\begin{aligned} \Delta I_{CM} = U_M \left( \frac{\text{ch}(\gamma l) - 1}{Z_c \text{sh}(\gamma l)} - j\omega C_e \right) = \\ U_M \left( \frac{\text{ch}(\gamma l) - 1}{Z_c \text{sh}(\gamma l)} - \frac{\omega \text{ch}(\gamma_0 l) - 1}{\omega_0 Z_{c0} \text{sh}(\gamma_0 l)} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知, 频率偏离工频越远, 误差将会越大, 即高频信号的误差会更大。

取典型的电缆线路参数代入式(10), 可以得到稳态法和时域法在各个频率下由数学模型引起的误差电流表达式, 再与实际电流相比较, 得到相对误差随频率变化的规律, 如图 4 所示。

由图 4 可以看到, 稳态法和时域法的模型误差随着频率增大而增大, 在高频的时候误差非常大。

行波法相对于稳态法和时域法, 虽然数学模型上更为精确, 但是实际应用中会受插值截断、地模线模波速度不一致、同步精度等因素的影响引起误差, 其中插值截断为行波法特有的问题。

在式(3)的表达式中, 传输时延  $\tau$  通常不是采样间隔  $T_s$  的整数倍, 因此需要进行插值计算, 此时就会产生数值计算截断误差。利用拉格朗日插值余项公式进行分析, 插值算法的截断误差的上限  $\Delta I$  为

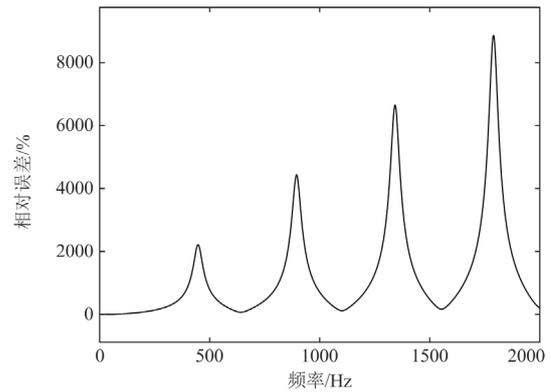


图 4 模型误差随频率变化曲线

Fig. 4 Model error curve with frequency variation

$$\Delta I = \frac{1}{8} \omega^2 T_s^2 I_m \quad (11)$$

式中:  $T_s$  为采样间隔;  $I_m$  为线路电流最大值。由此可见, 信号频率越高, 采样间隔越大, 插值截断误差越大, 在实际应用中, 通过提高采样频率来降低采样间隔, 降低截断误差的影响。

差动保护原理基于基尔霍夫电流定律, 在无误差的理想情况下, 当系统无故障或者区外故障时, 差动电流应为零, 当系统区内故障时差动电流较大, 具有绝对的选择性。上文所述的误差在一定程度上影响了差动保护原理的应用, 即在无故障或区外故障时仍然存在差动电流, 差动电流越大, 差动保护灵敏度越低, 越难以整定。

稳态法和时域法的误差为理论固有误差, 无法消除。行波法的误差为计算误差, 可以通过提高采样频率的方式来抑制。海上风电投资巨大, 线路保护不正确动作带来的影响恶劣, 因此可以考虑采用性能更为优良的行波法, 当前的微机保护装置具备实现行波法的条件。

### 3) 差动保护方案

为了补偿海缆运行中的容性电流、吸收无功功率、控制无功潮流和稳定电网运行电压, 海缆线路两端一般会安装并联电抗器, 如图 5 所示。

并联电抗器上的电流也会影响差动保护。传统电抗器电流补偿是利用端电压迭代计算电抗器电流。迭代算法需要处理初值问题, 初值的选择与实

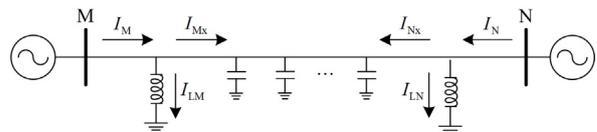


图 5 带并联电抗器的输电系统

Fig. 5 Transmission system with shunt reactor

际是否相符将影响迭代算法正确性，直接影响保护的可靠性。

而海上风电送出线保护采用融合设计，可以将电抗器支路电流直接引入保护装置，无需迭代计算，简单可靠。此时将电抗器支路电流减去即可完成行波差动计算，即

$$\begin{cases} I_{Mx} = I_M - I_{LM} \\ I_{Nx} = I_N - I_{LN} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $I_M$  和  $I_N$  分别为线路 M、N 两侧电抗器前的电流； $I_{LM}$  和  $I_{LN}$  分别为线路 M、N 两侧电抗器电流，电流方向和具体位置如图 5 所示。该方法降低了迭代算法的计算复杂度，保证了电抗器支路电流补偿的准确性。

利用式(12)补偿掉电抗器分流，再利用式(3)根据对侧电压电流数据计算本侧电流数据，结合相模变换，得到各相电流的计算值  $i'_{Mxj}$ ，其中  $j = a、b、c$ ，与测量值  $i_{Mxj}$  作比较即可构造行波差动保护方案。保护判据为

$$\begin{cases} |i'_{Mxj} - i_{Mxj}| > I_{set} \\ |i'_{Mxj} - i_{Mxj}| > K |i'_{Mxj} - i_{Mxj}| \end{cases} \quad (13)$$

式中： $I_{set}$  为差动阈值； $K$  为比例制动系数。

式(13)分别为基本判据和比例制动判据。由于海底电缆本身的电容电流十分显著，因此采用固定投入电容电流补偿技术的方式。

### 2.2 电抗器保护功能优化策略

线路保护与电抗器保护一体化设计后，不仅减少了设备占用空间，同时保护定值也可进一步优化，线路保护与电抗器保护中存在部分定值重叠，例如电抗器阻抗、电抗器额定电压等定值，通过一体化设计可以取消两者重复的定值，减少定值数量，降低运维工作人员定值整定工作量。

电抗器零序差动保护作为电抗器主保护之一，对接地故障有较高的灵敏性，但较高的灵敏性也带来了可靠性问题，由于线路保护与电抗器保护的一体化设计，在定值优化的同时，可以利用线路保护的相关信息对电抗器零序差动保护进行优化，电抗器零序差动保护是利用电抗器绕组首端 CT 及末端 CT 构成的具有比率特性的零序差动保护，其差流及制动电流的计算方式如式(14)所示。

$$\begin{cases} I_{d0} = |\dot{I}_{h0} + \dot{I}_{l0}| \\ I_{r0} = \max(|\dot{I}_{h0}|, |\dot{I}_{l0}|) \end{cases} \quad (14)$$

式中： $I_{d0}$  为零序差流； $\dot{I}_{h0}$  为电抗器首端零序电流向量； $\dot{I}_{l0}$  为电抗器末端零序电流向量； $I_{r0}$  为零序差

动保护制动电流。

零序差动保护动作特性曲线如图 6 所示，其中  $K$  一般在 0.5~0.7 之间。当区外故障、电抗器某一 CT 采样异常时，此时零序差流等于制动电流，二者比率为 1，大于 0.7，零序差动保护存在误动风险。

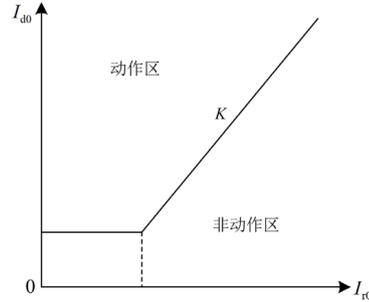


图 6 零序差动保护动作特性曲线图

Fig. 6 Characteristic curve of zero-sequence differential protection action

一体化设计后，可以利用线路两端较大的零序电流作为电抗器零序差动保护的制动电流，即优化后的零序差动保护制动电流计算方法如式(15)所示。为了防止电抗器首末端 CT 异常导致零序差动保护误动，增加制动电流小于精工电流闭锁零序差动保护判据，因此在电抗器首末端 CT 异常时，虽然存在零序差流，但此时线路两端无零序电流，满足闭锁条件，可以有效地避免零序差动保护误动，同时当发生区内故障时，线路两端存在零序电流，不满足闭锁条件，不会导致零序差动保护拒动。

$$I_{r0} = \max(|\dot{I}_{m0}|, |\dot{I}_{n0}|) \quad (15)$$

式中： $\dot{I}_{m0}$  为线路 M 端零序电流向量； $\dot{I}_{n0}$  为线路 N 端零序电流向量。

当发生区外故障时零序电流回路如图 7 所示，由图 7 可知优化前的制动电流如式(16)所示。

$$I_{r0} = I_{R0} = I_{m0} \frac{Z_{n0}}{Z_{r0} + Z_{n0}} \quad (16)$$

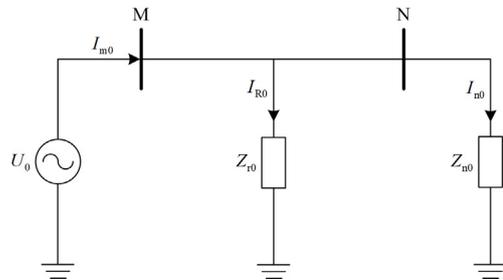


图 7 区外故障零序电流回路

Fig. 7 Zero-sequence current loop of out-of-area fault

优化后的制动电流如式(17)所示。

$$I_{r0} = I_{m0} \quad (17)$$

由于电抗器零序阻抗远大于系统及线路零序阻抗, 即  $Z_{r0} \gg Z_{n0}$ , 因此  $Z_{n0}/(Z_{r0} + Z_{m0}) \ll 1$ , 因此优化后的零序差动制动电流远大于优化前的制动电流, 所以优化后电抗器零序差动保护在区外故障时具有更强的制动性, 提高了零序差动保护的可靠性。

当电抗器发生区内故障时, 零序电流回路如图 8 所示, 可知优化前的制动电流如式(18)所示。

$$I_{r0} = I_{R0} \quad (18)$$

优化后的制动电流如式(19)所示。

$$I_{r0} = \max(I_{m0}, I_{n0}) = I_{R0} \max\left(\frac{Z_{n0}}{Z_{m0} + Z_{n0}}, \frac{Z_{m0}}{Z_{m0} + Z_{n0}}\right) \quad (19)$$

由于  $Z_{m0}/(Z_{n0} + Z_{m0}) < 1$  且  $Z_{n0}/(Z_{n0} + Z_{m0}) < 1$ , 因此优化后的制动电流小于优化前的制动电流, 所以优化后电抗器零序差动保护在区内故障时具有更小的制动量, 提高了零序差动保护的灵敏性。

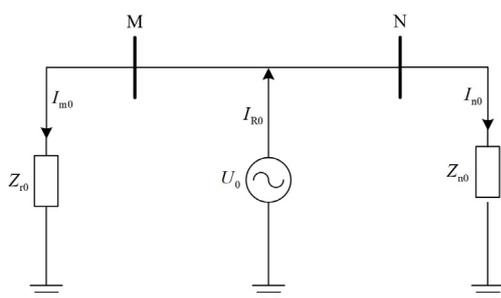


图 8 电抗器故障零序电流回路

Fig. 8 Zero-sequence current loop of reactor fault

因此在一体化设计情况下, 通过采用优化后的电抗器零序差动保护制动电流计算方式, 即利用线路两端较大的零序电流作为电抗器零序差动保护的制动电流, 可以显著提高电抗器零序差动保护可靠性及灵敏性。

### 3 仿真验证

#### 3.1 模型搭建

理论分析部分给出了海上风电送出线路继电保护优化设计方案, 本节利用电磁暂态仿真软件 PSCAD 建立如图 9 所示的 220 kV 海底电缆的交流输电系统模型。仿真模型以我国典型海上风电工程为原型, 详细模拟了电缆线路和电抗器的工程实际情况, 简化了其他部分。其中海上风电的各个机组、集电线路和海上升压站总体等效为图 9 中的海上风场。线路电抗器一体化保护安装在高压海底电缆线

路两端。仿真试验各种类型的故障, 验证上述设计方案的性能。

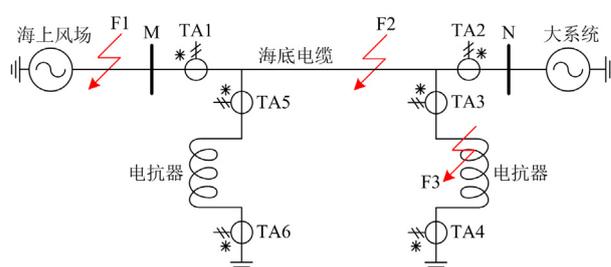


图 9 仿真系统模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of simulation system model

海底电缆线路长度 50 km, 线路模型采用三相同轴电缆, 排布如图 10 所示。

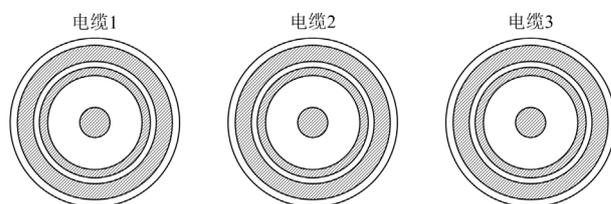


图 10 三相同轴电缆的排布

Fig. 10 Arrangement of three-phase coaxial cable

根据电缆结构可以计算电缆的电气参数, 如表 1 所示。

表 1 电缆电气参数表

Table 1 Cable electrical parameters sheet

序分量	电阻/(Ω/km)	电感/(H/km)	电容/(F/km)
正序	1.1	$4.137 \times 10^{-3}$	$4.829 \times 10^{-7}$
零序	0.1337	$1.895 \times 10^{-4}$	$4.829 \times 10^{-7}$

由表 1 可以看到, 海底电缆的电容数值很大, 比一般架空线的电容要大一、两个数量级, 相同电压等级下产生的电容电流也将比一般架空线大一、两个数量级。

电缆线路两侧都有并联电抗器, 总补偿度约为 80%, 单侧电抗器等效电抗为 329 Ω。

#### 3.2 电容电流补偿算法验证

首先考察在线路正常运行时两侧电流的情况, 如图 11 所示。

由图 11 可以看到, 即使是线路无故障正常运行时, 两侧的电流大小也有差异, 方向也不是严格相反(约 150°)。因此, 在两侧电抗器和线路分布电容的影响下, 当系统正常运行时, 线路两侧电流就有差流。

由于采用融合设计, 在计算差动电流时, 电抗器支路电流可以直接获得, 在两侧电流中都减去对应的电抗器电流即可消除其影响。

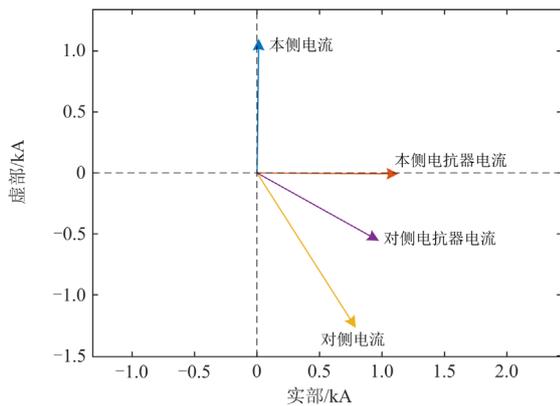


图 11 正常运行时电缆线路两侧电流情况

Fig. 11 Current at both sides of cable line during normal operation

对于电容电流的影响,利用行波差动算法消除。以图 9 所示的仿真模型为例,在 0.2 s 时设置区外故障(F1 处),利用行波法计算得到差动电流如图 12 所示。

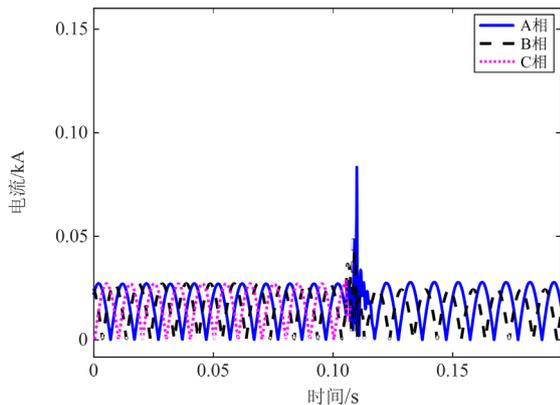


图 12 行波法计算差动电流

Fig. 12 Calculation of differential current using traveling wave method

由图 12 可以看到,当系统正常运行时,差动电流不到 0.02 kA。在发生区外故障后,只在故障初始的很短时间内,差动电流有了暂态变化,最大只有 0.15 kA,然后迅速降低至较低水平。行波法的误差来源于插值截断和参数频变特性等因素引入的误差。

在图 9 中的 F2 处设置单相接地故障实验,考察区内故障时差动算法的表现。起始时刻系统正常运行,在 0.1 s 时系统发生故障,故障位置为线路中点,故障相为 A 相,过渡电阻为 100 Ω,考察传统算法和本文算法下故障相差动电流的情况,如图 13 所示。

由图 13 可以看出,在传统算法下,两侧电流在正常运行时(0.1 s 前)就有较大的差流,在故障后差

流有增大。与前文的理论分析相符,传统算法的误差使得线路正常运行时就有较大的差动电流,导致整定困难,灵敏度降低。在本文算法下,正常运行时的差流基本为 0,而区内故障后差流显著增大,故障前后的差流对比十分显著。传统算法和本文算法下非故障相(B 相)差动电流的情况如图 14 所示。

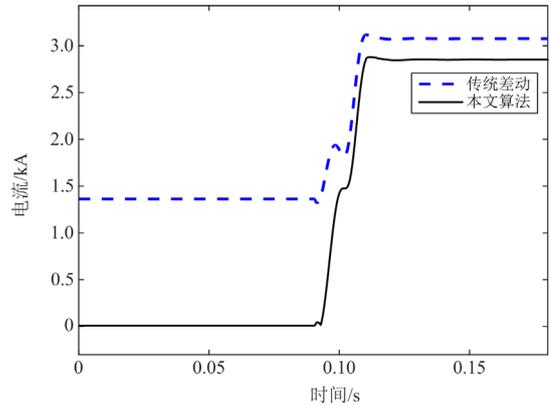


图 13 故障相差动电流

Fig. 13 Differential current of fault phase

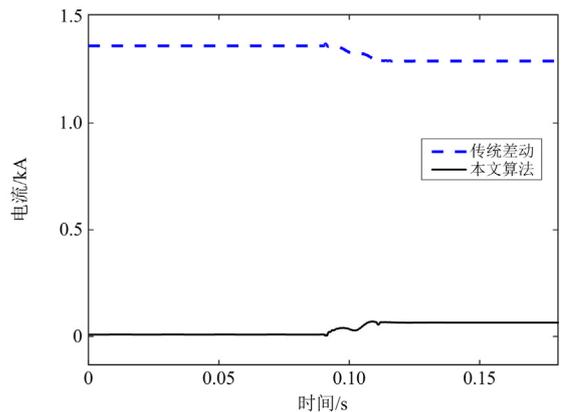


图 14 非故障相差动电流

Fig. 14 Differential current of non-fault phase

由图 14 可以看出,非故障相的差动电流在故障前后基本不变。

在图 9 中的 F1 处设置单相接地故障实验,考察区外故障时差动算法的性能。任意一相(A 相)的差动电流的情况如图 15 所示。

由图 15 可以看出,当区外故障时,线路差动电流基本没有变化。

以上仅分析了采用传统算法和本文算法时差动电流的情况。下面通过引入制动电流来分析传统算法和本文算法下的差动电流保护性能,如图 16 所示。

由图 16 可以看出,相对于传统算法,本文算法的线路故障相制动电流与差动电流区分更为明显。

本文算法在无故障时线路的制动电流远远大于差动电流, 在故障时差动电流大约是制动电流的 2 倍。由此可见, 本文算法的比率制动方案更为灵敏可靠。

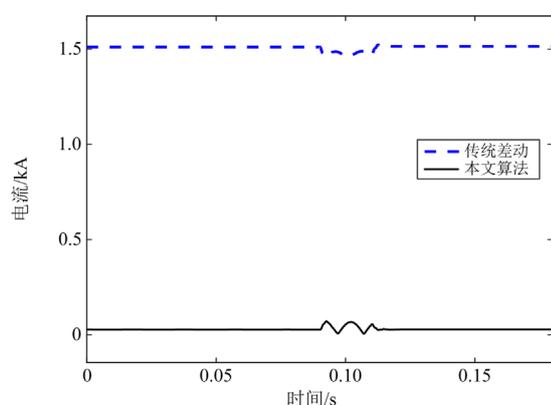


图 15 区外故障的差动电流

Fig. 15 Differential current during external fault

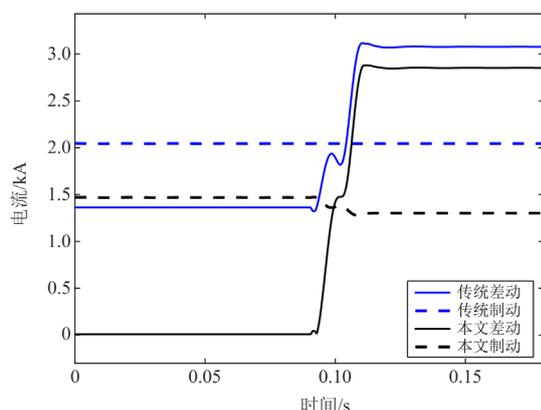


图 16 故障相差动和制动电流

Fig. 16 Differential current and braking current of fault phase

在不同的故障位置下, 改变过渡电阻、故障类型、故障相角, 本文算法在故障时的制动电流都远大于差动电流, 相较于传统算法也更为灵敏可靠。

### 3.3 电抗器零序差动保护逻辑验证

仿真中分别设置了两个区外故障点 F1、F2 和一个区内故障点 F3, 在不同故障点进行单相接地故障仿真, 并记录电抗器零序差流及优化前后的制动电流(一次值), 仿真结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 在区外故障时采用优化后的制动电流计算方式, 可以显著提高电抗器零序差动保护的制动特性, 优化后的制动性能提高了几十倍, 同时区内故障时采用优化后的制动电流计算方式, 电抗器零序差动保护的灵敏性也提高了约 2 倍, 因此优化后电抗器零序差动保护的可靠性及灵敏性都得到了较大的提升, 对电抗器可以进行更加可靠的保护。

表 2 故障仿真结果

Table 2 Simulation results of fault			
故障点	F1	F2	F3
零序差流/A	4	5	2565
优化前制动电流/A	35	36	133
优化后制动电流/A	1975	1946	71
优化前制动系数( $I_0/I_f$ )	0.114	0.139	19.29
优化后制动系数( $I_0/I_f$ )	0.002	0.003	36.13

## 4 结论

本文提出了将线路保护与电抗器保护一体化装置设计的技术思路, 并在此基础上改进了线路和电抗器保护技术, 能够减少保护屏柜数量, 降低平台占用面积, 提升保护性能。新方案主要包括以下 3 个创新点。

1) 采用了一体化融合的设计, 直接将电抗器电流信息引入保护装置, 避免了传统的迭代计算, 更为简单可靠。

2) 针对海底电缆线路分布电容电流显著的特性, 采用行波差动算法, 从原理上消除了电容电流对差动保护的影响, 使得海底电缆线路差动保护更为灵敏可靠。

3) 利用一体化设计的优势, 引入了更为合适的线路零序电流作为电抗器零序差动保护的制动电流, 显著提高了电抗器零序差动保护的可靠性及灵敏性。

## 参考文献

- [1] 阮前途, 陈贇, 潘智俊. 新型电力系统对实现沿海城市双碳目标贡献的探讨[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 11-18.  
RUAN Qiantu, CHEN Yun, PAN Zhijun. Discussion on contributions of novel power system to achieving carbon emission peak and carbon neutrality of coastal city[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 11-18.
- [2] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1671.  
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1671.
- [3] 曹钰, 房磊. “双碳”背景下热发电机组-储热联合运行消纳弃风策略[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 142-149, 160.  
CAO Yu, FANG Lei. Combined operation strategy of CHP unit and heat accumulator for eliminate abandoned wind under “double carbon” background[J]. Electric

- Power, 2022, 55(10): 142-149, 160.
- [4] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.  
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [5] 时维帅, 孙欣, 谢敬东, 等. “双碳”目标下风氢联合系统参与现货市场的优化运行与效益分析[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 1-12.  
SHI Weishuai, SUN Xin, XIE Jingdong, et al. Optimal operation and benefit analysis of wind-hydrogen combined system in spot market with the double carbon goal[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 1-12.
- [6] 彭静, 王军, 亓富军, 等. “双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 153-161.  
PENG Jing, WANG Jun, QI Fujun, et al. Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 153-161.
- [7] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.  
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [8] 谈竹奎, 文贤旭, 杨涛, 等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 181-187.  
TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, et al. A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 181-187.
- [9] 魏泓屹, 卓振宇, 张宁, 等. 中国电力系统碳达峰·碳中和转型路径优化与影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 1-12.  
WEI Hongyi, ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, et al. Transition path optimization and influencing factor analysis of carbon emission peak and carbon neutrality for power system of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 1-12.
- [10] 苏鹏, 陈璐, 吴坚, 等. 新型电力系统多能源能量惯性动态优化控制模型[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 87-93.  
SU Peng, CHEN Lu, WU Jian, et al. Dynamic optimal control model of multi-energy inertia in new power system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 87-93.
- [11] 姚钢, 杨浩猛, 周荔丹, 等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 33-47.  
YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidan, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 33-47.
- [12] 李岩, 冯俊杰, 卢毓欣, 等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术与展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3384-3393.  
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.
- [13] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3691-3703.  
LUO Kui, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of key technologies of reliability analysis and improvement for offshore wind power grid integration[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3691-3703.
- [14] 刘刚, 江晓锋, 郭亚勋, 等. 海上风电场中压电缆集电系统暂态过电压仿真[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(10): 46-52, 61.  
LIU Gang, JIANG Xiaofeng, GUO Yaxun, et al. Transient overvoltage simulation of medium-voltage cable collector system in offshore wind farm[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(10): 46-52, 61.
- [15] 宋冬然, 晏嘉琪, 夏鄂, 等. 基于改进麻雀搜索算法的大型海上风电场电缆布置优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 134-143.  
SONG Dongran, YAN Jiaqi, XIA E, et al. Optimization of cable layout for large-scale offshore wind farms based on an improved sparrow search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 134-143.
- [16] 叶婧, 周广浩, 张磊, 等. 考虑馈线交叉规避的海上风电场海缆路径优化[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 167-175.  
YE Jing, ZHOU Guanghao, ZHANG Lei, et al. Path optimization of submarine cables for offshore wind farm considering feeder crossing avoidance[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 167-175.
- [17] 唐文虎, 梁启恒, 赵柏宁, 等. 基于改进稀疏表示的海上风电场交流海底电缆短路故障分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2212-2221.  
TANG Wenhua, LIANG Qiheng, ZHAO Baining, et al. Short-circuit fault classification method for AC submarine cables in offshore wind farms based on improved sparse

- representation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2212-2221.
- [18] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.  
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [19] 杜杰, 李子润, 李国杰. 海上风电直流汇集 DC/DC 系统实时仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 170-177.  
DU Jie, LI Zirun, LI Guojie. Real-time simulation method for a DC/DC collection system in an offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 170-177.
- [20] 蔡旭, 杨仁焯, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22.  
CAI Xu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22.
- [21] 徐政, 李斯迅, 金砚秋. 海底电缆谐波频段电气参数计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 76-84.  
XU Zheng, LI Sixun, JIN Yanqiu. Calculation of electrical parameters of submarine cable in harmonic frequency range[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 76-84.
- [22] 边晓燕, 周歧斌, 符杨. 有限长同轴电缆电容的数值计算方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1920-1926.  
BIAN Xiaoyan, ZHOU Qibin, FU Yang. Numerical method for capacitance matrix of coaxial cables of finite length[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1920-1926.
- [23] 宋璇坤, 申洪明, 黄少锋, 等. 特高压分布电容对电流差动保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 169-172, 192.  
SONG Xuankun, SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, et al. Effect of distributed capacitance on differential current protection and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 169-172, 192.
- [24] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西. 电力线路行波差动保护与电流差动保护的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 1-8.  
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi. Comparative study of traveling wave differential protection and current differential protection for power lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 1-8.
- [25] 梁振锋, 李天婷, 张怿宁. 高压架空-电缆混合线路电容电流补偿方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6): 16-21.  
LIANG Zhenfeng, LI Tianting, ZHANG Yining. Research on capacitive current compensation method for high voltage overhead-cable hybrid line[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2022, 43(6): 16-21.
- [26] 蔡勇. 智能变电站二次系统优化集成配置研究[J]. 湖北电力, 2011, 35(S1): 134-135.  
CAI Yong. Research on optimization and integration configuration of intelligent substation secondary system[J]. Hubei Electric Power, 2011, 35(增刊 1): 134-135.
- [27] 姚蓉. 智能变电站二次设备集成优化设计[J]. 通讯世界, 2018(2): 275-276.  
YAO Rong. Integrated and optimized design of secondary equipment in intelligent substations[J]. Communication World, 2018(2): 275-276.
- [28] 郝全柱. 光纤差动保护同步采样方案简析[J]. 机电信息, 2017(33): 24-25.  
HAO Quanzhu. Analysis of synchronous sampling scheme for optical fiber differential protection[J]. Electromechanical Information, 2017(33): 24-25.
- [29] 姜雷, 郑玉平, 艾淑云, 等. 基于合并单元装置的高精度时间同步技术方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 90-94.  
JIANG Lei, ZHENG Yuping, AI Shuyun, et al. A highly accurate time synchronization technology scheme based on merging unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 90-94.
- [30] 潘济猛, 孙永先, 申狄秋, 等. 智能变电站光纤纵差保护装置同步方案比较[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 101-104.  
PAN Jimeng, SUN Yongxian, SHEN Diqu, et al. Comparison of fiber current differential protection synchronization schemes for smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 101-104.

收稿日期: 2023-03-28; 修回日期: 2023-07-14

作者简介:

薛明军(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护控制技术; E-mail: mingjun-xue@sac-china.com

陈福锋(1979—), 男, 博士研究生, 教授级高工, 主要研究方向为电力系统继电保护控制技术。E-mail: fufeng-chen@sac-china.com

(编辑 张颖)