

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191492

# 一种改进的微机保护装置研究

金晨, 张保华

(安徽大学, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** 为了解决传统微机保护装置在电力系统断电恢复的瞬间无法快速有效地对已存在显性故障采取相应保护动作的问题, 引入一种新型微机保护装置的研究。首先在硬件上利用蓄电池在电力系统断电时给整个微机保护装置供电, 并且控制脉冲输出对跳闸电容进行充电, 配合电容电压监测电路, 时刻保证其电压值达到驱动断路器的临界电压。另外软件上设计了两种算法。一种适用于系统断电恢复时刻的“快速算法”, 以保证能快速切除断电恢复瞬间的故障。另一种适用于系统正常工作时的“精确算法”, 以保证整个装置在正常运行时的可靠性。针对不同的情况, 分别使用不同的算法, 共同构成新型微机保护装置的保护算法。仿真实验表明: 所设计的新型微机保护装置相比于传统的微机保护装置, 能在更短的时间内切除电力系统断电恢复瞬间已存在的显性故障, 并且不影响正常运行时保护动作的可靠性。

**关键词:** 微机保护; 保护算法; 故障切除; 断电恢复; 电力系统

## Study on an improved microcomputer protective device

JIN Chen, ZHANG Baohua

(Anhui University, Hefei 230000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that a traditional microcomputer protection device cannot quickly and effectively take appropriate protective action to an apparent fault when a power system is restored, this paper introduces research on a new type of microcomputer protection device. First, the battery is used on the hardware to supply power to the whole microcomputer protection device when the power system is cut off, and the pulse output is controlled to charge the tripping capacitor, and the capacitor voltage monitoring circuit is used to ensure that the voltage reaches the critical voltage of the driving circuit breaker at all times. In addition, two algorithms are designed on the software. A “fast algorithm” is suitable for the system power failure recovery time algorithm, to ensure that the power failure recovery moment fault can be quickly cut off. Another “accurate algorithm” is applied to ensure the reliability of the whole device in normal operation. According to different situations, different algorithms are used to form the protection algorithm of the new microcomputer protection device. The experimental results show that compared with a traditional microcomputer protection device, the new microcomputer protection device can cut out the apparent fault existing at the moment of power system power failure recovery in a shorter time, and does not affect the reliability of the protection action in normal operation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61505001).

**Key words:** microcomputer protection; protection algorithms; fault cleared; power failure restored; power system

## 0 引言

随着我国电力系统规模越来越大, 结构也越来越复杂, 故障的种类以及发生概率也在不断提高, 诱发电力系统发生故障的原因众多<sup>[1-2]</sup>。一旦电力系

统发生故障, 若没有及时处理, 将会对整个电力系统中的相关设备以及线路造成损坏, 破坏整个电力系统工作的稳定性, 严重的话可能使电力系统瓦解<sup>[3]</sup>。为了能够在电力系统故障时刻及时地处理并切除故障点, 保证系统的稳定运行, 微机保护装置应运而生<sup>[4]</sup>。

目前的微机保护算法以及装置的硬件集成电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61505001)

路都是在微机保护装置正常工作的时候，才能够在预定的时间内完成保护动作，但是如果整个电力系统在断电后由于人为因素或环境因素，发生了隐性故障，又或者上次的故障并未切除，这些因素导致的故障在电力系统再次上电时就会成为显性故障<sup>[5-8]</sup>。而此时微机保护装置因掉电无法运行，当电力系统断电恢复时，会因为保护装置中的微处理器重新运行初始化时间过长且对跳闸电容充电的时延，进而导致错过保护动作的最佳时机，给电力系统带来损害。

另外传统的微机保护装置都是通过数据采集模块采集电力系统实时状态数据，依据保护的原理和类型，综合考虑计算精度以及动作速度的要求，选择某一种确定的算法来判断电力系统是否发生故障，并判断故障的性质。但计算精度与动作速度之间存在矛盾，目前现有的微机保护算法种类繁多，但仍没有某种单一算法可以做到同时兼顾计算精度和动作速度这两种要求<sup>[9-11]</sup>。

本文针对上述问题，提出了一种新型微机保护装置，采用两种算法，根据特定场合发生的故障，合理地选择采用哪种保护算法，提高了微机保护装置的可靠性和安全性。针对电力系统重新来电瞬间保护的情况，本装置提供了一种在微机保护系统由电池供电转变为电力系统供电的时刻能快速采集并处理电力系统电气量的一种快速算法，另外针对微机保护装置正常运行的情况，又提供一种强调准确性的精确算法。快速算法应用于电力系统来电瞬间微机保护装置的电流速断保护，采用近处故障强调动作的快速性，这时可使用短数据窗算法，牺牲一些计算的精度来保证动作的快速性。而靠近电流速断保护范围末端的故障，则应该强调其准确性，这时使用计算精度较高的算法。再配合相应的硬件电路，可以实现在电力系统断电恢复瞬间的故障切除。

## 1 硬件电路改进设计

### 1.1 整体电路结构

本文设计的新型微机保护装置的硬件电路部分主要包括：主控电路、跳闸输出电路、自供电模块、信号调理电路、电流泄放电路、人机交互电路、通信电路、电池取电电路、电源检测电路。其中自供电模块以及电池相关电路部分是硬件电路的主要改进部分，为了保证整个微机保护装置在电力系统断电时刻仍可以运行在正常的工作状态。微机保护装置的整体电路结构如图 1 所示。

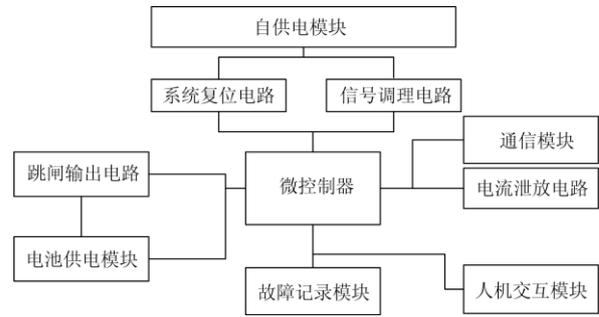


图 1 系统硬件结构图

Fig. 1 System hardware structure drawing

### 1.2 改进电路分析

电池供电模块包括两部分电路，一部分是在电力系统断电时给整个微机保护装置供电，另一部分是通过 DC-DC 升压芯片给跳闸驱动电容充电，使电容保持在能够驱动跳闸回路电压值左右。

电源监测电路是对微机保护装置+24 V 电源进行实时监测，使用两个电阻串联分压，且使用单片机内部 ADC 对分压之后的电压值进行采集。当系统+24 V 电压发生欠压、低压时，及时地对设备进行保护并使用电池供电。由软件根据电压范围的不同进行相应的操作。

电池充电电路主要包括：DC-DC 升压芯片，供电电池，跳闸电容以及电容电压检测电路。当电力系统断电时，通过该电路将电池电压升压至 24 V，给驱动跳闸电容充电，当检测到电容电压到达 24 V 后，会立即断开此升压电路，直到检测到电容电压低于 20 V 时，再次给驱动电容充电。改进电路模块如图 2 所示。

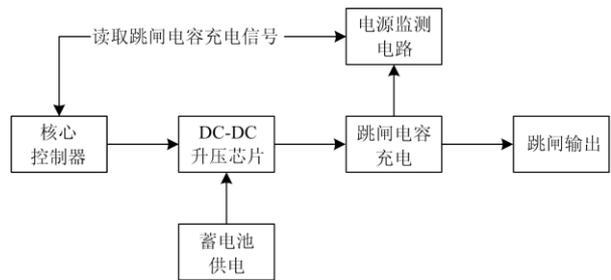


图 2 改进电路模块图

Fig. 2 Improved circuit module

该电路采用 TI 公司的 TPS43060 是低 IQ 电流模式同步升压控制器，支持 4.5~38 V(绝对最大值为 40 V)的宽输入电压范围和高达 58 V 的升压输出范围。同步整流功能可为高电流应用实现高效率，无损电感直流电阻(DCR)感测功能可进一步提升效率。该器件产生的功率损耗较低。VIN 是电池输入

口, ISNS 口要接一个电感。VOUT 这部分是给驱动电容充电的部分。升压电路模块如图 3 所示。

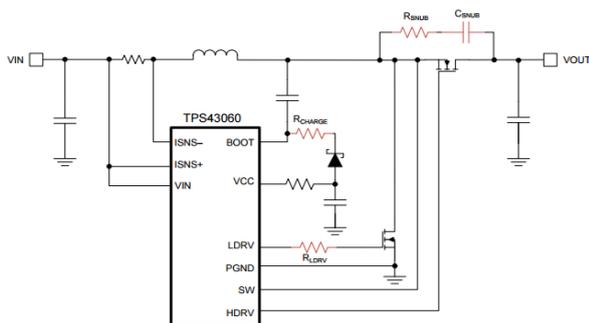


图 3 升压电路模块图

Fig. 3 Boost circuit module

整个硬件电路改进的核心就是蓄电池的升压电路以及跳闸电容的充电电路, 这部分改进设计保证了微机保护装置中的跳闸电容在电力系统断电时刻仍可以充电, 避免装置在系统断电恢复时刻的电容充电时延, 导致无法及时完成保护动作。

## 2 软件改进设计

### 2.1 程序流程改进

本微机保护装置的软件主要包括数据采集、功能保护、内外部信号的输入输出、电源管理和通信功能程序等。其中数据采集是通过外部数据采集器 AD7606 四路数据同步进行采集, 并通过微机保护算法, 计算出线路电流有效值, 进行故障保护。

利用 uc0s 操作系统的抢占先式多任务执行的实时性特点, 将全波傅氏算法的并联补偿方法分设为“主保护”任务, 并将半波傅氏算法与导数算法相结合的快速算法单独设为一个“快速保护”任务。

通过电源监测电路, 实时监测微机保护系统是处于正常运行状态还是处于电池供电状态下。若电源电压为+24 V, 则表示微机保护装置在正常运行状态下, 这时则会一直将“快速保护”任务挂起, 采用的是全波傅氏算法的并联补偿方法; 当电源电压为+12 V 则表示微机保护装置在电池供电的情况下, 则将“快速保护”任务初始化, 并解挂, 当电力系统断电恢复的瞬间, 微机保护装置由电池供电转变为正常运行状态, 这时执行一次“快速保护”任务, 若此时存在故障则可以快速地进行保护动作切除故障, 执行完之后立刻挂起该任务, 在以后的正常运行过程中, 只采用全波傅氏算法的并联补偿方法。这样即保证了电力系统来电瞬间故障切除的快速性, 也能保证正常运行状态下保护的可靠性。

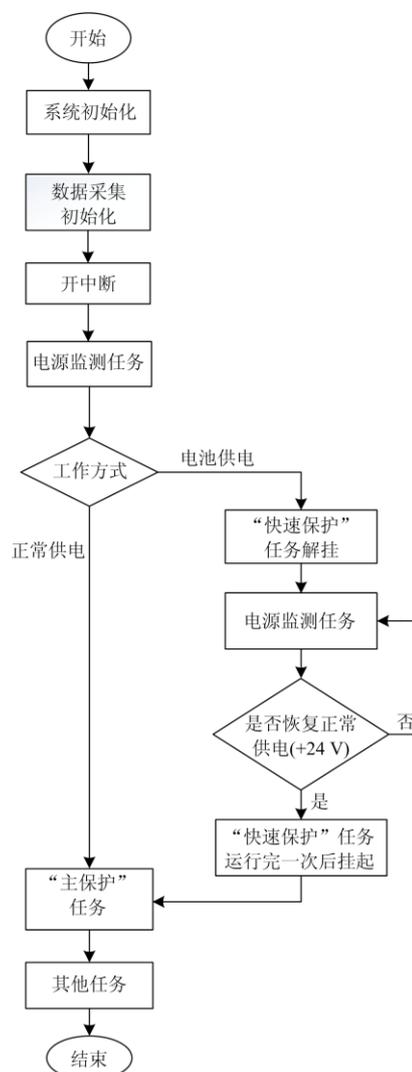


图 4 主程序流程图

Fig. 4 Main program flowchart

### 2.2 保护算法设计

保护算法是整个微机保护装置的研究核心, 针对不同的故障, 有相应的保护算法, 分析保护算法的综合性能, 在不同的实际应用场合下合理地选择更加合适的算法, 才能进一步提高微机保护装置的可靠性、选择性、速动性和灵敏性<sup>[12]</sup>。

早期的保护算法是基于输入量为理想正弦函数而提出的, 这类算法包括两点乘积算法、导数算法、半周积分算法<sup>[13]</sup>; 但是在故障时, 当实际的电气信号并不是正弦函数而是包含各种谐波分量的周期函数, 针对输入量为周期函数的情况, 最常用的就是傅里叶算法<sup>[14-15]</sup>; 另外当输入信号中含有大量的非周期信号以及随机的非整数倍频分量, 这时就引入随机模型算法, 这类算法主要包括最小二乘算法、卡尔曼滤波算法<sup>[16]</sup>。

本文综合上述算法的综合性能,在微机保护装置中采用两种算法。

当电力系统断电恢复时,采用半波傅氏算法与导数算法相结合的一种“快速算法”。该算法的数据窗为半周波加一个采样点,采样率为 20 点/半周,算法的程序和计算简单,适用于微机保护快速动作,其滤波效果大大优于半波傅氏算法。

当微机保护装置处于正常运行中,采用基于全波傅氏算法的并联补偿方法,该“精确算法”的数据窗为一个周波,算法本身可以很好地滤除整数次谐波和抑制衰减直流分量的影响,并精确地计算出线路电流有效值,进行故障保护。

两种保护算法的特点不同,应用场合也不相同。半波傅氏算法与导数算法相结合的快速算法只应用于电力系统来电瞬间的近处故障保护,强调动作的快速性;全波傅氏算法的并联补偿方法应用于整个微机保护正常运行过程中故障保护,强调动作的准确性。

### 3 保护算法性能分析

#### 3.1 “快速算法”分析

本文中介绍的“快速算法”是采用半波傅氏算法与导数算法相结合的方式,单独的半波傅氏算法并不能消除直流分量和偶次谐波,而衰减直流分量对半波傅氏算法滤波性能的影响主要表现在算法的虚部,而算法的实部能有效地抑制衰减直流分量的影响。因此只使用半波傅氏算法计算基波实部,而用导数算法计算基波幅值<sup>[17]</sup>。

设故障电流为

$$i(t) = i_0 e^{-\alpha} + \sum_{n=1}^M I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n) = \quad (1)$$

$$i_0 e^{-\alpha} + \sum_{n=1}^M [I_{Rn} \cos(n\omega t) + I_{In} \sin(n\omega t)]$$

式中:  $I_{Rn} = I_{nm} \sin \phi_n$ ;  $I_{In} = I_{nm} \cos \phi_n$ 。

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} i(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2)$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} i(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3)$$

经过采样,积分变为求离散和,如式(4)和式(5)所示。

$$a_n = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} i_k \cos nk \frac{2\pi}{N} \quad (4)$$

$$b_n = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} i_k \sin nk \frac{2\pi}{N} \quad (5)$$

式中:  $N$  为一个周期的采样点数;  $k$  为出现故障时

的采样点。

若计算基波分量令  $n=1$ ,由式(2)用半波傅氏算法求出实部  $I_{Re}(k)$ 。

另外根据导数算法,则

$$I_{Im}(k) = \frac{I_{Re}(k+1) - I_{Re}(k-1)}{2\sin(\Delta\theta)} \quad (6)$$

基波分量的幅值为

$$I_I(k) = \sqrt{I_{Re}^2(k) + I_{Im}^2(k)} \quad (7)$$

若所求分量为  $n$  次谐波,则分母为  $2\sin(n\Delta\theta)$ 。

综上所述:该算法解决了单独半波傅氏算法不能消除直流分量和偶次谐波的问题,其滤波效果远远优于半波傅氏算法,并且计算简单、采样点少,适合继电保护的快速动作。

#### 3.2 “精确算法”分析

本文中介绍的“精确算法”是采用基于全波傅里叶算法的并联补偿方式,传统的全波傅氏算法虽然能有效地滤除所有的奇偶次谐波,但是对一些非周期分量比较敏感,于是提出了很多针对傅氏算法上述问题的改进方法,其中较为典型的的就是并联补偿法<sup>[18-19]</sup>。

设输入信号为

$$i(t) = I_0 e^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^m [I_n \sin(\omega_n t + \phi_n)] \quad (8)$$

设一个周期内采样点数为  $N$ ,则第  $k$  次采样值为  $\omega_n = n\omega_1$ ,  $n$  为正整数,则

$$i_k = I_0 e^{-kT_s/\tau} + \sum_{n=1}^m \left[ I_n \sin\left(\frac{2\pi}{N} nk + \phi_n\right) \right] = \quad (9)$$

$$i_{kd} + i_{ka} = I_0 r^k + i_{ka}$$

式中:  $T_s = \frac{T}{N}$  为采样间隔时间;  $i_{kd}$  为直流衰减分量;

$i_{ka}$  为交流分量,且  $r = e^{-T_s/\tau}$ 。

通过傅氏算法求输入信号的基频正弦分量,如式(10)所示。

$$I_{S1} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_{kd} \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{N}\right) + \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_{ka} \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{N}\right) \quad (10)$$

由于交流分量作一周积分时为零,则

$$\sum_{k=1}^N i_{ka} \cdot T_s = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^N i_k \cdot T_s = \sum_{k=1}^N i_{kd} \cdot T_s = \sum_{k=1}^N I_0 r^k \cdot T_s \quad (12)$$

当  $\tau$  给定时,可以离线算出  $r$ , 则

$$I_0 = \sum_{k=1}^N i_k / \sum_{k=1}^N r^k \quad (13)$$

将式(3)写成

$$I_{s1} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N I_0 r^k \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{N}\right) + I_{s1(a)} \quad (14)$$

式中,  $I_{s1(a)}$  为  $I_{s1}$  中不含直流衰减分量的周期分量部分, 由式(11)和式(12)可得

$$I_{s1(a)} = I_{s1} - K_s \sum_{k=1}^N i_k \quad (15)$$

式中:

$$K_s = \sum_{k=1}^N r^k \cdot \sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right) / \left(\frac{N}{2} \cdot \sum_{k=1}^N r^k\right) \quad (16)$$

当  $r$  已知, 则可离线求出  $K_s$ , 当做正弦分量的补偿系数<sup>[20]</sup>。

同理可以求出余弦分量的补偿系数, 如式(17)所示。

$$K_c = \sum_{k=1}^N r^k \cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right) / \left(\frac{N}{2} \cdot \sum_{k=1}^N r^k\right) \quad (17)$$

则基频中不含直流衰减分量的余弦分量为

$$I_{c1(a)} = I_{c1} - K_c \sum_{k=1}^N i_k \quad (18)$$

综上所述: 若衰减常数  $\tau$  已知, 则此补偿后的傅氏算法基频分量的计算误差理论为零; 若衰减常数  $\tau$  未知时, 可根据电力系统的实际运行情况给出一个合理的估计值, 虽然会存在一些误差, 但是相对补偿前误差值会小很多<sup>[21-24]</sup>。

### 3.3 实验结果仿真分析

为了验证本文设计的算法相比于传统的傅氏算法, 能很好地滤除衰减直流分量的影响, 设电力系统暂态电流信号为

$$i(t) = 20e^{-t/\tau} + 20\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) + 4\sin 2\omega t + \quad (19)$$

$$10\sin 3\omega t + 2\sin 4\omega t + 6\sin 5\omega t$$

式中:  $\omega = 2\pi f = 100\pi$ ; 时间常数  $\tau = 0.03$  s; 一周内采样点  $N$  分别取 12, 20, 40。

当时间常数  $\tau = 0.03$  s 已知时, 各算法的基频分量计算结果与计算速度如表 1 所示。

表 1 时间常数为 0.03 s 时仿真结果分析

Table 1 Simulation result analysis of time constant is 0.03 s

算法	N=12		N=20		N=40	
	幅值	误差/%	幅值	误差/%	幅值	误差/%
半波傅氏	38.439	92.198	37.310	86.554	35.706	78.531
全波傅氏	21.756	8.782	21.553	7.762	21.271	6.355
并联补偿	20.000	0	20.000	0	20.000	0
最小二乘	20.293	1.468	20.285	1.429	20.276	1.384
卡尔曼	13.150	-34.249	15.551	-22.241	17.499	-12.505

在实际情况下, 若时间常数未知时, 设时间常数  $\tau = 0.05$  s 时, 各算法的基频分量计算结果与计算速度如表 2 所示。

表 2 时间常数为 0.05 s 时仿真结果分析

Table 2 Simulation result analysis of time constant is 0.05 s

算法	N=12		N=20		N=40	
	幅值	误差/%	幅值	误差/%	幅值	误差/%
半波傅氏	39.020	95.100	37.252	86.262	36.114	80.571
全波傅氏	21.283	6.415	21.162	5.812	21.065	5.325
并联补偿	20.132	0.664	20.112	0.563	20.035	0.175
最小二乘	20.932	4.665	20.723	3.663	20.346	1.732
卡尔曼	12.950	-35.249	14.765	-22.175	16.224	-18.881

设时间常数  $\tau = 0.15$  s 时, 各算法的基频分量计算结果与计算速度如表 3 所示。

表 3 时间常数为 0.15 s 时仿真结果分析

Table 3 Simulation result analysis of time constant is 0.15 s

算法	N=12		N=20		N=40	
	幅值	误差/%	幅值	误差/%	幅值	误差/%
半波傅氏	38.965	94.825	37.084	85.421	35.823	79.115
全波傅氏	21.145	5.725	21.058	5.294	20.834	4.171
并联补偿	20.112	0.563	20.065	0.325	20.013	0.065
最小二乘	20.735	3.657	20.543	2.715	20.228	1.114
卡尔曼	14.350	-28.250	15.746	-21.270	17.677	-11.615

由上述仿真结果可知, 当故障电气信号存在衰减直流分量时, 传统的傅氏算法误差很大, 不能直接使用, 而采取并联补偿方式的傅氏算法在时间常数已知的情况下, 理论误差值为零。并且当采样点  $N$  由 12 提高到 20 时, 计算误差会有一定的减小, 而从 20 提高到 40, 则误差减小并没有很明显。

另外本文还考虑到实际应用中, 时间常数未知的情况下, 分别对时间常数为 0.05 s 和 0.15 s 的情况做了仿真分析, 也可以清楚地看出, 虽然这两组仿真结果没有已知时间常数情况下的算法精确, 但误差也能控制在很小的范围内。

所以综合考虑计算精度和速度, 采样点数为 20 的并联补偿的傅氏算法为最佳选择。

## 4 结论

1) 针对传统微机保护的硬件电路在断电后无法继续执行保护动作的问题, 提出了一种电路改进设计, 增加蓄电池供电、升压充电电路以及电源监测等电路, 保证整个装置在断电时刻, 仍能保证正常的功能, 以应对在电力系统断电恢复瞬间的故障切除。

2) 针对装置在断电重启后的初始化时间较长, 导致错过了电力系统断电恢复瞬间切除故障的最佳保护动作时机的问题, 改进了软件的运行流程, 采用 ucos 多任务实时操作系统, 在重启初始化阶段只初始化保护动作相关的部分, 并将两种不同情况下的保护动作分为两个任务, 根据实际情况来选择相

应的保护动作任务。

3) 针对传统傅氏算法在计算速度和计算精度上的矛盾,以它们自身的缺陷,分别设计了两种改进算法,“快速算法”牺牲一些计算精度,保证装置能快速有效地切除电力系统断电恢复瞬间的故障;“精度算法”牺牲一些计算速度来保证系统正常运行时的可靠性和稳定性。

## 参考文献

- [1] 哈恒旭,张新慧,何柏娜. 电力系统分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2012.
- [2] 靳涛. 浅谈电力系统中继电保护隐性故障分析与改进措施[J]. 科技创新与应用,2015(20):206-207.  
JIN Tao. Analysis and improvement measures of relay protection stealth fault in power system[J]. Technology Innovation and Application, 2015(20): 206-207.
- [3] 刘伯鑫. 论述电力系统继电保护隐性故障问题[J]. 数字通信世界,2017(2):82-83.  
LIU Boxin. Discusses the hidden fault of relay protection in power system[J]. Digital Communication World, 2017(2): 82-83.
- [4] 刘畅. 电力系统继电保护故障分析与处理[J]. 通信电源技术,2019,36(10):134-135.  
LIU Chang. Treatment of relay protection fault in power system[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(10): 134-135.
- [5] 王简,王承民,朱彬若. 电力系统中的弹性、灵活性及广义柔性问题研究综述[J]. 智慧电力,2018,46(11):1-6,13.  
WANG Jian, WANG Chengmin, ZHU Binruo. Research summary on resilience, flexibility and general compliance in electric power system[J]. Smart Power, 2018, 46(11): 1-6, 13.
- [6] PAN Wulie, ZHU Bingquan, QIU Yutao. The research and application on interfacing technology between electronic current transformer and relay protection[C] // International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP 2011), October 16-20, 2011, Beijing, China: 485-489.
- [7] 李勇,梁爽,陈曦,等. 直流配电网中的线路保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(9):136-144.  
LI Yong, LIANG Shuang, CHEN Xi, et al. Line protection scheme for DC distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 136-144.
- [8] 刘勤,杨可,蒋航,等. 基于同步数据的电力系统不同保护方式下故障在线定位[J]. 电测与仪表,2019,56(6):106-110,116.  
LIU Qin, YANG Ke, JIANG Hang, et al. Real-time and online location of faults based on synchronized data of power system under different protection schemes[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6): 106-110, 116.
- [9] 刘隽楷,邹晓松,袁旭峰,等. 含功效系数法的电力系统多目标综合优化[J]. 电测与仪表,2018,55(24):59-63,71.  
LIU Junkai, ZOU Xiaosong, YUAN Xufeng, et al. Multi-objective comprehensive optimization of power system containing the efficacy coefficient method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(24): 59-63, 71.
- [10] ZHAN Rongrong, LI Yanjun, ZHANG Xiaoli, et al. Research on testing technology of relay protection for intelligent substations[J]. Electricity, 2014, 14(5): 38-43.
- [11] 李格格,李存斌. 基于扩充样本的电力系统可靠性动态与实时研究[J]. 智慧电力,2019,47(1):88-93.  
LI Gege, LI Cunbin. Dynamic and real-time research on reliability evaluation of electric power system based on extended sample[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 88-93.
- [12] 张金瑞. 微机保护算法的仿真研究文献综述[J]. 变频器世界,2016(11):89-91,94.  
ZHANG Jinrui. Review on the simulation algorithms of the digital relay protection[J]. The World of Inverters, 2016(11): 89-91, 94.
- [13] 黄家栋,陈达壮,张玲. 基于两点乘积算法的变压器励磁涌流识别新方法[J]. 电网与清洁能源,2010,26(9):4-8.  
HUANG Jiadong, CHEN Dazhuang, ZHANG Ling. New algorithm to identify inrush current based on two points product method[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(9): 4-8.
- [14] 朱桂英,龚乐年. 傅氏算法在微机保护应用中的探讨[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(4):41-43,93.  
ZHU Guiying, GONG Lenian. Discussion on application of Fourier algorithm in microcomputer protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(4): 41-43, 93.
- [15] 张磐,张愉,丁一,等. 基于微扰法的低压有源配电网故障定位方法[J]. 中国电力,2018,51(12):63-71.  
ZHANG Pan, ZHANG Yu, DING Yi, et al. Fault location for low voltage active distribution network based on perturbation method[J]. Electric Power, 2018, 51(12): 63-71.
- [16] 刘俊,王旭,孙惠文,等. 采用FJPD互信息的电力系统暂态稳定性预测特征选择分析[J]. 智慧电力,2018,46(10):78-85,95.  
LIU Jun, WANG Xu, SUN Huiwen, et al. Feature selection analysis of power system transient stability

- prediction using fjpd mutual information[J]. Smart Power, 2018, 46(10): 78-85, 95.
- [17] 罗洪广. 微机保护算法综合性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- LUO Hongguang. Study on synthetic performance of algorithms for microprocessor-based protections[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.
- [18] 高长征, 阎博, 王佳蕊, 等. 具有指数收敛速度的电力系统全分布式潮流算法[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 85-91.
- GAO Changzheng, YAN Bo, WANG Jiarui, et al. A fully distributed power flow algorithm with exponentially fast convergence[J]. Electric Power, 2019, 52(10): 85-91.
- [19] 葛志超, 黄瑞特, 胡先策, 等. 一种完全滤除衰减直流分量的全波傅氏改进算法[J]. 电气开关, 2018, 56(1): 37-39.
- GE Zhichao, HUANG Ruite, HU Xiance, et al. An improved full-wave Fourier algorithm for completely filtering decaying DC component[J]. Electric Switchgear, 2018, 56(1): 37-39.
- [20] 费殷胜男, 杨向萍. 一种降低衰减直流分量影响的全波傅氏改进算法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(12): 150-152.
- FEIYIN Shengnan, YANG Xiangping. An improved full-wave Fourier algorithm for reducing influence of decaying DC component[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(12): 150-152.
- [21] 杨正理, 黄其新, 王长鹏, 等. 采用差分滤波算法改进最大投影差值故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 158-164.
- YANG Zhengli, HUANG Qixin, WANG Changpeng, et al. A new fault line selection method of the maximizing shadow difference optimized by differential filter algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 158-164.
- [22] 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.
- QINA Kemi, LI Changqing. Synthetic performance comparison of algorithm for microprocessor-based protections[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(5): 43-45.
- [23] NAIK S G, RAVI V, ARSHIYA R. Programmable protective device for LV distribution system protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 285-290. DOI: 10.1186/s41601-018-0101-5.
- [24] 蒋红亮, 吕飞鹏. 基于改进证据理论融合的站域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 57-63.
- JIANG Hongliang, LÜ Feipeng. An algorithm of substation-area backup protection based on improved evidence theory fusion[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 57-63.

收稿日期: 2019-12-01; 修回日期: 2020-05-12

作者简介:

金 晨(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为嵌入式系统开发; E-mail: 308459811@qq.com

张保华(1962—), 女, 通信作者, 博士研究生, 教授, 研究方向为嵌入式系统开发。E-mail: 1121928497@qq.com

(编辑 周金梅)