

引用格式:陈彬,朱盛开,唐玮,等.考虑电流瞬时频率特性的水上浮吊供电系统定时限过流保护方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):144-154.
Citation: CHEN Bin, ZHU Shengkai, TANG Wei, et al. Definite-time overcurrent protection scheme for floating crane supply system based on the instantaneous frequency characteristics of currents[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 144-154.

考虑电流瞬时频率特性的水上浮吊供电系统定时限过流保护方法

陈彬¹, 朱盛开¹, 唐玮¹, 肖建平¹, 王炜宇²

(1. 国网湖南电动汽车服务有限公司, 湖南长沙 410082; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要:水上浮吊供电系统中,通常含有多台大功率异步电动机,多个电动机在并网启动时会产生较大的启动电流,当各电机启动电流叠加,可能导致变压器电流激增,触发过电流保护误动,给工业生产带来巨大损失。本文首先基于异步电动机等效模型,揭示了冲击电流的产生机理和箱式变压器保护误动原因;接着针对水上浮吊电机断续周期工作场景,提出了随机运行场景生成方法,基于希尔伯特黄变换技术,对系统的故障短路和电机启动状态下变压器的电流信号进行瞬时频率特性分析,揭示不同状态下箱式变压器电流的瞬时频率特性差异,在此基础上构建定时限过电流主动闭锁模块,确保浮吊供电系统正常工作时的可靠供电;最后通过湖南省某水上浮吊系统的仿真模型对所提出的保护方案进行了验证。

关键词:定时限过电流保护;希尔伯特黄变换;电流瞬时频率特性;异步电动机启动;断续周期工作制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.014 **中图分类号:** TM863 **文章编号:** 1673-9140(2024)01-0144-11

Definite-time overcurrent protection scheme for floating crane supply system based on the instantaneous frequency characteristics of currents

CHEN Bin¹, ZHU Shengkai¹, TANG Wei¹, XIAO Jianping¹, WANG Weiyu²

(1. State Grid Electric Vehicle Service Hunan Company, Changsha 410082, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The floating crane supply system usually incorporates large-capacity multiple asynchronous motors. During the starting process of these motors, simultaneous activation can result in substantial current surges. Consequently, the transformer bears a heavy current burden, potentially triggering the false overcurrent protection and leading to further industrial production losses. This paper investigates a protection scheme for transformers supplying multiple high-capacity motors. Firstly, the mechanism of the overcurrent during motor starting is analyzed by an equivalent model. Subsequently, a random scenario generating algorithm is proposed to generate a large number of scenarios for analysis. Furthermore, the Hilbert-Huang transform technique is employed to examine the time-frequency domain characteristics of both fault current and normal current, leading to improvements in the conventional overcurrent protection scheme. Finally, The effectiveness of the proposed protection scheme is validated through a realistic floating crane supply project in Hunan province.

Key words: definite-time overcurrent protection; Hilbert-Huang transform; current instantaneous frequency characteristics; asynchronous motor starting; intermittent periodic duty

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-09-20

基金项目: 湖南省自然科学基金(2021JJ40598); 湖南省教育厅科研项目(21B0325)

通信作者: 王炜宇(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力系统稳定与控制、继电保护研究; E-mail: WY Wang@csust.edu.cn

港口货运在中国经济活动中扮演着至关重要的角色,港口供电系统的稳定可靠运行是确保货运效率的基础。为保证大型货船进港装卸货物时用电的可靠性,常常采用柴油发电机进行供电^[1]。然而,柴油发电系统效率较低,需要通过柴油发动机带动同步发电机旋转发电,有效率低、噪声大、污染环境等缺点^[2]。近年来中国提出了“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”这一绿色能源发展目标,促使电力系统向着更高效、节能环保的方向发展^[3]。为解决传统柴油发电系统的低效率、高污染问题,港口供电系统向着新一代供电技术进行转变,即建设港口船舶岸电系统^[4]。船舶岸电技术是指允许装有特殊设备的船舶在泊位期间接入码头陆地侧的电网,从岸上电源获得其吊机、通风、照明和其他设施所需的电力,从而关闭自身的柴油发电机,减少废气的排放,消除自备发电机组运行产生的噪声污染^[5]。

水上浮吊系统可使船舶在水上完成货物转运和装卸,浮吊系统是由异步电动机组成的起重系统。通常而言,一套起重系统需要配备起重电机、旋转电机和变幅电机等多台电动机,各电机在一个工作周期内不会同时启动运行。然而,由于多个起重系统会由同一个变压器进行供电,电机在启动时会产生较大的启动冲击电流^[6],当多个浮吊同时处于工作状态时,会出现启动电流叠加,进而造成箱式变压器电流过大,触发过电流保护误动作,导致浮吊系统断电,造成货物损坏等经济损失。因此,如何辨识浮吊正常工作电流与故障短路电流,对箱式变压器保护精确动作和岸电系统的可靠工作至关重要。

针对这一问题,工业和学术界已经开展了一定研究。文献[7]对调相机变压器过流保护误动作进行了研究,发现变压器铁芯饱和会引发较大的励磁涌流,进而引起保护动作;文献[8]针对220 kV变压器励磁涌流引起保护误动进行了研究,指出导致保护误动的原因是变压器主一保护和主二保护励磁涌流判别结果不同导致保护误动。文献[9]详细分析了变压器励磁涌流引起过电流保护误动的原因,并从变压器设计、保护整定值等方面制定了预防措施。文献[10]进一步研究了励磁涌流序分量谐波系数表达式,提出了变压器涌流序分量的特征。文献[11]针对抽水蓄能电站内的主变压器过流误动进行了分析,通过配置冗余保护装置以提高保护动作正确率。文献[12]研究了变压器空载合闸导致

上游线路零序过流保护误动问题,提出了基于双衰减时间常数的分析模型和误动风险评估方法。此外,文献[13-15]对变压器的不同保护配合问题、零序电流保护误动进行了研究。以上研究从物理机理方面揭示了导致变压器保护误动作的原因和机理,但是通常建模复杂,且难以应用于解决浮吊系统中多个异步电动机启动导致的保护误动作问题。

近年来,基于数据的分析方法在电力系统保护方面得到了较多关注,其中小波变换是较为常见的一种方法。文献[16]提出了基于小波变换的配电变压器差动保护相位补偿方法,通过小波变换对反向行波差动电流进行计算,构建差动保护相位补偿。虽然小波变换在故障波形识别方面已经有一定应用,但其精确度取决于小波基的选择,这是该类方法普遍存在的困难。近年来,希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)分析方法得到较为广泛的关注,该方法以经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)为基础,将复杂信号分解为不同频率的一组模态函数,再通过希尔伯特变换(Hilbert transform, HT),得到各模态函数的瞬时频率特性。HHT具有自适应特性,对于故障电流这样的非平稳、非线性信号具有较强的处理能力,在电力系统振荡辨识和输电线路距离保护等方面得到了广泛的应用^[17-20]。

如图1所示,对于水上浮吊供电系统而言,当浮吊系统正常工作时,虽然变压器电流的瞬时频率会由于电机的启停发生一定变化,但是其数值通常较低。然而,系统内出现短路故障时,由于短路故障的强烈冲击,变压器电流会出现倍频分量、非周期分量和直流分量等,导致电流出现较大畸变,瞬时频率发生较大变化。本文针对水上浮吊供电系统中箱式变压器过电流保护误动作问题,首先根据异步电动机的等效模型,分析电动机启动冲击电流的产生机理和箱式变压器保护误动原因;接着分析浮吊电机的周期断续工作模式,提出浮吊供电系统随机运行场景生成方法,从而对浮吊供电系统的工作特性进行详细分析;然后提出基于HHT的定时限过电流主动闭锁模块,通过计算随机运行场景下故障扰动与正常工作时箱式变压器电流的瞬时频率特性,设计定时限过电流保护的启动阈值,确保浮吊供电系统正常工作时定时限过电流保护装置不会误动作;最后通过湖南省某水上浮吊系统对所提出的保护方案进行验证。

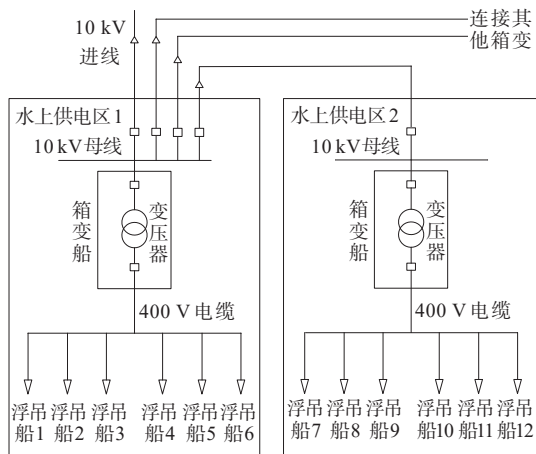


图1 水上浮吊供电系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of the floating crane supply system

1 浮吊供电系统过电流保护问题

1.1 浮吊供电系统简介

水上浮吊供电系统如图1所示,浮吊供电系统由10 kV电源经船岸连接设备、电缆收放设备等送至箱变趸船上的10 kV/0.4 kV箱式变压器,由箱式变压器送电至浮吊船上的低压屏,低压屏再对各浮吊进行供电,供电制式为0.4 kV/50 Hz,低压母线采用单母线接线方式,低压供电方式采用放射式。

由图1可见,每台箱式变压器要供应多艘浮吊船,浮吊船上的主要负荷为多台异步电机构成的浮吊系统,此外还有照明、通信等负荷。浮吊系统工作方式多为断续周期工作制,其中多个异步电动机频繁启停以搬运货物。异步电动机在启动瞬间会产生较大的冲击电流,当多台浮吊同时启动时,可能会造成箱变过流,具体机理介绍如下。

1.2 浮吊电机启动冲击电流机理

异步电动机的等效电路模型如图2所示。

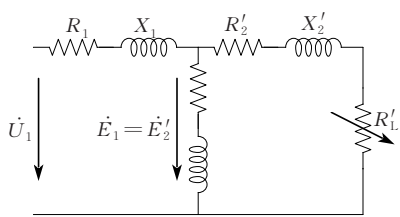


图2 异步电动机等效模型

Figure 2 Equivalent model of the asynchronous motor

异步电动机通常可由T型等效电路描述,图2中 R_1 、 X_1 为异步电动机的定子绕组电阻和漏电抗;

R_2' 、 X_2' 为折算至定子侧的转子绕组电阻和漏电抗;
 R_L' 为折算至定子侧的等效负载电阻,代表了电动机转轴输出的总机械功率,具体定义为

$$R_L' = \frac{1-s}{s} R_2' \tag{1}$$

式中, s 为转差率,定义为

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{2}$$

式中, n_1 为同步转速; n 为转子转速。

当异步电动机正常运行时,通常转子转速 n 接近于同步转速,由式(1)、(2)可知,转差率 $s \approx 0$,等效负载电阻 R_L' 极大,因此电动机定子端口等效电阻较大,电网注入电机的电流较小;当电动机启动时,转子转速 $n=0$,因此转差率 $s=1$,转子回路电阻仅为绕组电阻 R_2' ,整个电机定子端口等效电阻亦很小,导致电动机启动时的电流较大,可达额定电流的4~10倍。图3所示为一台额定容量为132 kW的异步电动机启动电流曲线,其稳态运行时线电流为0.2 kA左右,其最大瞬时启动电流可达2 kA,增幅达10倍,持续时间较短。

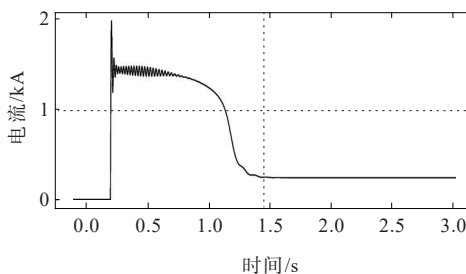


图3 异步电动机启动电流

Figure 3 Starting current of the asynchronous motor

1.3 浮吊供电系统过电流保护误动作原因

对湖南省某水上浮吊供电区进行实地监测,截取14:30—16:30的结果如图4所示。

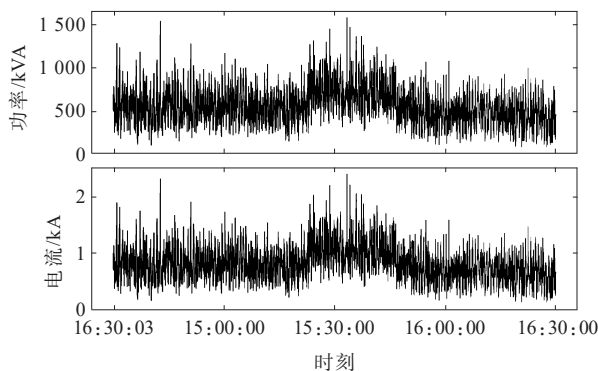


图4 某浮吊箱变实测结果

Figure 4 Measured results of a floating crane transformer

由图4可见,箱式变压器的电流和功率呈现明显的波动性,电流幅值在0~2.4 kA波动,且峰值持续时间可长达1 s。这种情况下,箱式变压器的定时限过电流保护误动原因主要是整定值设定过小和时限较短。例如,当保护整定值未充分考虑电动机启动电流的冲击特性,则可能造成变压器定时限过电流保护误动作,导致浮吊船失电。

因此,如何从原始电流、功率数据中提取动态特征,准确辨识过电流类型,合理设定过流保护整定值,是确保水上浮吊供电系统正常工作的基础。

2 浮吊供电系统随机运行场景生成

多台浮吊电机同时处于工作状态时,运行特性相互叠加,场景复杂多变,为了研究多台浮吊同时工作时的电动机启动电流和短路电流的动态特性差异,首先分析单台浮吊的运行工作特性,接着提出浮吊供电系统随机运行场景生成方法。

2.1 单台浮吊工作模式分析

浮吊系统需要用3台电机进行货物搬运,起重电机用于抓斗的下放和回收,旋转电机用于浮吊旋转,变幅电机用于改变抓斗中心至浮吊回转中心轴线的水平距离。其中,旋转电机和起重电机容量较大,启动时容易引发较大的启动电流,因此在分析时主要关注这2种电机的组合叠加特性。浮吊搬运货物的整体工作流程为抓取—移动—卸货—复位这4个步骤,工作时状态具有明显的周期性,如图5所示。

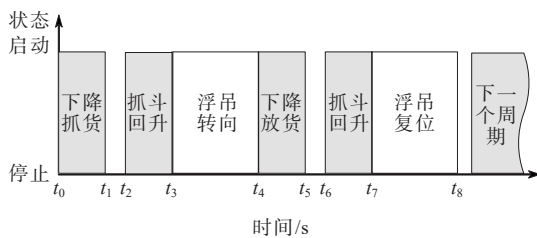


图5 浮吊工作周期示意

Figure 5 Diagram of floating crane working cycle

单台浮吊的一个工作周期时长为 $t_0 \sim t_8$,其中, $t_0 \sim t_1$ 为抓斗下降抓取货物, $t_2 \sim t_3$ 为抓斗回升, $t_3 \sim t_4$ 为浮吊平台旋转阶段, $t_4 \sim t_5$ 为抓斗下降卸货, $t_6 \sim t_7$ 为抓斗回升, $t_7 \sim t_8$ 为浮吊平台复位旋转。整个周期内起重电机启动4次,停机4次,旋转电机启动2次,停机2次。通过实际实验测试,可确定单台浮吊额定运行状态下的时间点 $t_0 \sim t_8$ 。

由于浮吊在每个周期抓取的货物重量有些许

差异,实际运行时各时间点存在一定的随机时间偏差,可用期望为0、标准差为 t_e 的正态分布进行描述:

$$f(x_i; \sigma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} e^{-\frac{x_i^2}{2\sigma_i^2}} \quad (3)$$

式中, x_i 为浮吊电机运行状态的随机时间偏差; σ_i 为浮吊电机随机事件偏差范围。

按照式(3)所示的正态分布生成随机事件偏差 x_i ,则 $t_0 \sim t_8$ 可设定为

$$t_i = t_{in} + x_i \quad (4)$$

式中, t_i, t_{in} 分别为浮吊实际运行状态的第 i 个随机时间节点及其对应的额定时间节点。

2.2 多台浮吊随机组合场景生成

在单台浮吊运行模式的基础上,构建多台浮吊随机组合运行场景,具体步骤如下:

1) 确定需要生成的总随机组合场景数量 n_s 和水上供电区浮吊总数量 n ,按照均匀分布 $U(0 \sim n)$ 生成每个场景投入运行的浮吊数量数 n_o ,构成 $n_s \times n_o$ 的数量矩阵;

2) 确定每个场景的仿真时长,由于单台浮吊的工作周期时长为 t_8 ,为保证仿真场景尽量包含可能的情况,仿真时长 t_s 应大于等于 $3t_8$ (确保仿真过程中各浮吊至少完成3个工作周期);

3) 生成每个场景中的电动机启动和停机事件,按照均匀分布 $U(0 \sim t_8)$ 生成每个浮吊的首次启动时间 t_{0j} (j 代表第 j 台浮吊),在 t_{0j} 的基础上,根据式(4)和图5依次确定 $t_{1j} \sim t_{8j}$,生成第 j 台浮吊的随机工作序列;

4) 对每个浮吊重复步骤3),得到完整的浮吊系统随机工作场景库;

5) 根据浮吊供电系统母线数量 n_b ,按照均匀分布 $U(0 \sim n_b)$ 生成每个场景的故障母线,并按照均匀分布 $U(0 \sim 3t_8)$ 生成各故障的随机发生时间。

3 基于HHT的箱式变压器定时限过电流保护方法

根据文2提出的多台浮吊随机运行场景生成方法,可仿真得到多台浮吊工作时的电流波形。进而采用HHT,对浮吊系统正常运行和短路故障扰动下的变压器电流进行时频域分析,对定时限过电流保护进行改进。

3.1 HHT算法简介

无论是异步电动机启动冲击电流还是短路故障电流,它们都属于非平稳信号,HHT算法非常适

用于对非平稳信号进行分析。HHT算法主要由2部分分析算法构成:EMD算法和HT算法。其中,EMD算法先将原始信号分解为一系列本征模态函数(intrinsic mode function, IMF);接着,对每个IMF进行HT,得到各个IMF的瞬时幅频特性。

IMF具有以下特征:极值点数量与信号的过零点次数相差小于等于1;通过信号极大值的上包络线与通过极小值的下包络线均值为0。通常而言非平稳信号不直接满足IMF的特征,则进行EMD处理,具体步骤如下:

1) 确定原始信号 $x(t)$ 的所有极大值和极小值,通过3次样条拟合连接所有极值点,得到 $x(t)$ 的上包络线 $x_{\max}(t)$ 和下包络线 $x_{\min}(t)$,确保所有数据都在上、下包络线之间。

2) 根据步骤1)中得到的上包络线 $x_{\max}(t)$ 和下包络线 $x_{\min}(t)$,计算上、下包络线各时间点 t 处的均值,用 $m_1(t)$ 表示均值曲线,即

$$m_1(t) = \frac{1}{2} [x_{\max}(t) + x_{\min}(t)] \quad (5)$$

3) 计算 $x(t)$ 与 $m_1(t)$ 的差值 $h_{1,1}(t)$,即

$$h_{1,1}(t) = x(t) - m_1(t) \quad (6)$$

若 $h_{1,1}(t)$ 满足IMF特征,则 $h_{1,1}(t)$ 为原始信号 $x(t)$ 的第一个IMF;若不满足IMF特征,则用 $h_{1,1}(t)$ 代替 $x(t)$,重复步骤1)~3) k 次:

$$h_{1,k}(t) = h_{1,(k-1)}(t) - m_1(t) \quad (7)$$

4) 当 $h_{1,k}(t)$ 满足IMF特征,将 $h_{1,k}(t)$ 作为原始信号 $x(t)$ 的第一个IMF,即为 $i_{\text{imf}1}(t)$ 。

5) 将 $i_{\text{imf}1}(t)$ 从 $x(t)$ 中抽取出来,得到第一个残差序列 $r_1(t)$,即

$$r_1(t) = x(t) - i_{\text{imf}1}(t) \quad (8)$$

用 $r_1(t)$ 代替 $x(t)$,重复步骤1)~5),得到 $i_{\text{imf}2}(t)$ 和 $r_2(t)$;再对 $r_2(t)$ 重复步骤1)~5),依此类推执行 n 次,直到 $r_n(t)$ 为单调函数或小于预设值的常数。此时,EMD算法执行结束,原始信号 $x(t)$ 可表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n i_{\text{imf}i}(t) + r_n(t) \quad (9)$$

在经过 n 次EMD分解后,式(9)中的残余信号 $r_n(t)$ 对信号提取没有实质影响,因此可以舍去。

得到所有IMF后,接着进行HT,以获取各IMF的瞬时幅频信息。令 $c_i(t) = i_{\text{imf}i}(t)$,对频率不同的IMF进行HT:

$$\hat{c}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (10)$$

在此基础上构建解析信号为

$$z_i(t) = c_i(t) + j\hat{c}_i(t) = a_i(t)e^{j\theta_i(t)} \quad (11)$$

式中, $a_i(t)$ 为幅值信号; $\theta_i(t)$ 为相位信号,具体计算方法为

$$a_i(t) = \sqrt{c(t)_i^2 + \hat{c}(t)_i^2} \quad (12)$$

$$\theta_i(t) = \arctan \frac{\hat{c}_i(t)}{c_i(t)} \quad (13)$$

根据相位信号 $\theta_i(t)$,可进一步计算信号的瞬时频率为

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (14)$$

至此可以得到信号的瞬时幅值和瞬时频率。式(9)表示的原始信号 $x(t)$ 可由式(14)的实部进行表示:

$$x(t) = \text{Re} \left(\sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\theta_i(t)} \right) \quad (15)$$

式中, $\text{Re}()$ 为求取实部。

3.2 计及电流频域特性的过电流保护方法

根据《工业与民用配电设计手册》和《3 kV~110 kV电网继电保护装置运行整定规程》,10 kV线路过电流保护整定原则为:如果已获得实测负荷数据,则根据实测数据进行整定计算,若无实测数据,则按照变压器的额定电流进行整定。

当有实测数据时,过电流保护整定值计算为

$$I_{\text{set}} = \frac{K_{\text{rel}} K_{\text{jx}}}{K_{\text{r}}} I_{\text{gh}} \quad (16)$$

式中, K_{rel} 为可靠系数,一般取值为1.3~1.5; K_{jx} 为接线系数,取决于箱式变压器二次侧具体接线方法; K_{r} 为继电器返回系数,取值为0.85或0.95; I_{gh} 为变压器一次测量测得到的最大负荷电流。

当无实测数据时,过电流保护整定值计算为

$$I_{\text{set}} = \frac{K_{\text{rel}} K_{\text{jx}} K_{\text{gh}}}{K_{\text{r}}} I_{\text{n}} \quad (17)$$

式中, K_{gh} 为过负荷系数,一般取值为1.5~2.0; I_{n} 为变压器一次侧额定电流;时限一般设定为0.5~0.7 s。

然而式(16)或式(17)所计算的整定值,可能导致多台电动机同时启动时因负荷电流过大而出现保护误动作。

本文根据文2随机运行场景生成方法,产生大量随机运行样本,进而对各样本进行HHT分析,得到电动机启动电流与短路电流的时频差异,改进进时限过电流保护。其基本思想是:当系统内没有任

何扰动或负荷变化时,变压器电流的有效值瞬时频率应为 0;当系统内负荷发生变化时,虽然变压器电流的瞬时频率会发生一定变化,但是其数值通常较低。然而,系统内出现短路故障时,由于短路故障的强烈冲击,变压器电流会出现倍频分量、非周期分量和直流分量等,导致电流有效值出现较大的畸变。通过 HHT 技术可计算正常和故障状态下箱式变压器电流瞬时频率的差异,进而构建定时限过电流保护启动判据,具体步骤如下:

- 1) 构建目标区域的电磁暂态仿真模型;
- 2) 根据浮吊电机的工作周期和模式,基于文 2 方法生成浮吊系统运行组合场景;
- 3) 在组合场景的基础上,进一步设置随机故障事件,随机变量包括故障发生位置、故障类型;
- 4) 进行场景扫描仿真,获得不同运行组合模式和不同故障叠加下的变压器电流波形;
- 5) 对故障和无故障情况下的变压器一次侧电流波形进行 HHT 分析,提取短路故障和系统正常运行时的瞬时频率,分析不同状态下的瞬时频率概率分布情况,根据正常和故障情况下的电流瞬时频率差异,设定定时限过电流保护启动判据;
- 6) 设定过电流保护启动判据,当判断过电流为系统正常运行时的负荷电流时,闭锁定时限过电流保护功能;否则,定时限过电流保护投入;
- 7) 为确保变压器不会因长时间过负荷工作而出现绝缘老化、损坏甚至其他故障,需再添加后备保护,整定值可由式(16)或式(17)确定,时限设定为 3~5 s。

完整的定时限过电流保护逻辑如图 6 所示。

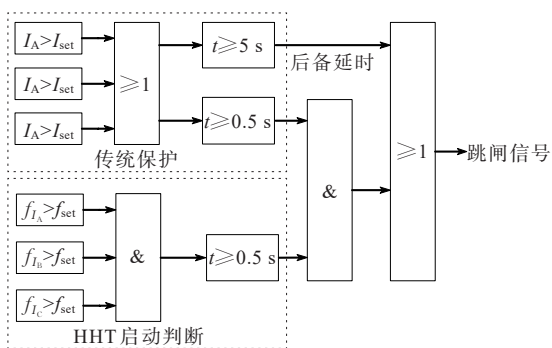


图 6 改进的定时限过电流保护逻辑框图

Figure 6 The improved-definite time overcurrent protection

根据图 6 所示的保护逻辑,当箱式变压器电流的量测值超过整定值 I_{set} 并持续 0.5 s,且电流信号经

过 HHT 分析后,瞬时频率超过频率整定值 f_{set} 并持续 0.5 s 时,则引起箱式变压器保护动作。若仅电流超过整定值而瞬时频率未超过整定值,则闭锁定时限过电流保护功能。

4 算例分析

本文针对湖南省某流域水上供电系统存在的过电流保护误动问题开展研究,选定的水上供电系统拓扑如图 7 所示。

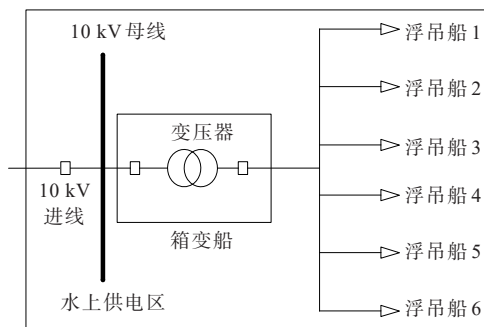


图 7 水上供电系统

Figure 7 Topology of the test waterborne power supply system

该区域共有 6 台浮吊,各浮吊配置 2 台异步电动机。箱式变压器和浮吊电机的铭牌参数如表 1 所示。箱式变压器配置了过流速断保护和定时限过流保护,具体配置如表 2 所示。电流互感器的变比为 300/5。

表 1 变压器和电动机参数

Table 1 Parameters of the test system

设备	额定容量/ (kV · A)	额定电压/ kV	额定阻抗	接线方式
起重电机	132	0.38		Y/Y
旋转电机	110	0.38		Y/Y
变压器	1 250	10/0.4	6%	Δ/Y

表 2 已有保护配置

Table 2 Existing protection scheme

保护	整定值/A	时限/s
过流速断保护	7.22	0
定时限过流保护	1.56	0.4

当仅有一台浮吊进行作业时,对该区域箱式变压器进行实测,对应的电流波形如图 8 所示。

由图 8 可见,单台浮吊的工作周期约为 $t_s=45$ s。为保证各随机仿真场景中,多个浮吊工作的叠加特

性能能够得到充分体现,设定各场景的仿真时长为 $t_s=180$ s,根据文2所提方法,生成100个随机运行场景作为正常场景,在此基础上生成包括三相短路、相间短路和单相短路各100个随机运行场景,每个场景中投入工作的浮吊至少有2台。本文在DIgSILENT/PowerFactory中构建仿真系统,采用同容量的标准电动机模型,以Python作为开发语言编写程序,生成所需的400个随机运行场景。

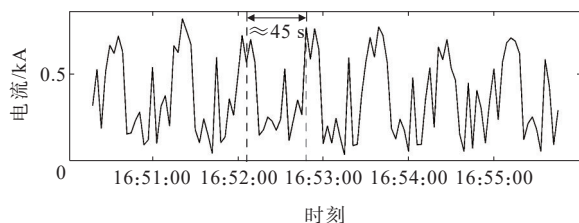


图8 单台浮吊作业时箱变电流波形

Figure 8 The current waveform of the transformer with single working floating crane

4.1 电动机启动电流与短路电流时频特性分析

由于生成的运行场景较多,选取三相短路、相间短路和单相短路各一例来展示,随后给出400个仿真场景的统计结果。

4.1.1 三相短路故障场景和正常运行场景对比

三相短路故障场景样例中,6台浮吊中有4台浮吊投入运行,编号为1号、3号、4号和6号,分别在0.02、0.45、9.91、18.94 s时投入运行,该样例场景的仿真结果如图9所示。

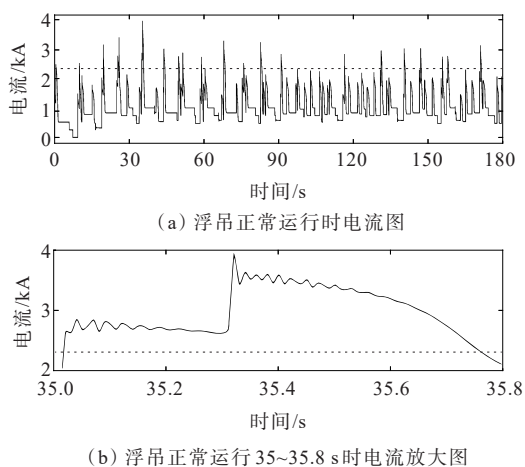


图9 正常运行场景仿真结果

Figure 9 Simulation results of the normal scenario example

如图9(a)可见,箱变流过的最大二次侧电流超过3 kA,而箱变过定时限过电流保护整定值折算至二次侧为2.34 kA(如虚线所示),且持续时间超过了

0.5 s(如图9(b)所示),可见正常的负荷电流会触发定时限过电流保护动作,导致整个供电区域停运。在该样例的基础上,叠加随机发生的短路事件, $t=20.35$ s时2号浮吊400 V母线出现三相短路故障,仿真结果如图10所示。当发生三相短路故障时,变压器负荷电流急剧上升,超过了电流速断保护的整定值10.83 kA(折算至二次侧,如图10中虚线所示)。

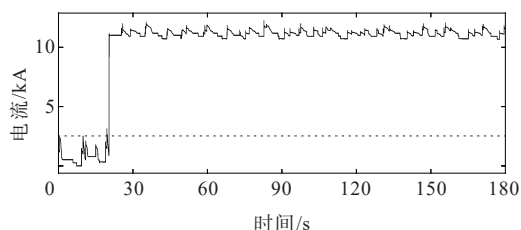


图10 三相短路故障时仿真结果

Figure 10 Simulation results of the scenario example under three phase short circuit fault

正常和三相短路场景所对应的HHT分析结果如图11、12所示。

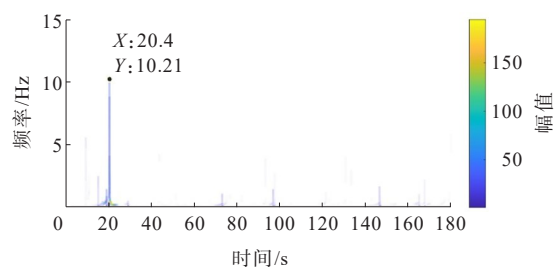


图11 三相短路故障时响应曲线的HHT时频

Figure 11 HHT plot of the three phase fault current

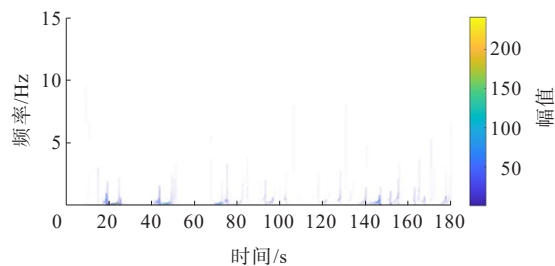


图12 正常状态下变压器电流瞬时频率

Figure 12 HHT plot of the normal current

由图11、12可知,当浮吊供电系统中无故障时,负荷电流的瞬时频率主要集中于5 Hz以下,而当三相短路故障发生时,在故障后0.1 ms内通过HHT算法识别出变压器电流的瞬时频率超过了10 Hz。因此,在故障发生时,三相短路故障会造成变压器

电流瞬时频率大幅增加,远超系统正常运行时电流瞬时频率。

4.1.2 两相短路故障场景和正常运行场景对比

两相短路故障场景样例中,6 台浮吊全部投入运行,分别在 0.02、2.78、3.14、3.41、4.35、17.69 s 投入运行,该样例场景的仿真结果如图 13 所示。

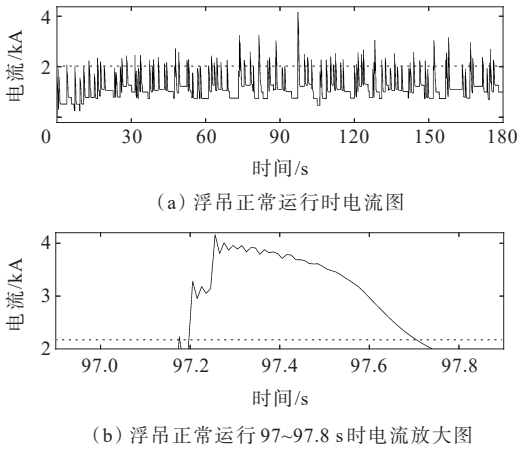


图 13 正常运行场景仿真结果

Figure 13 Simulation results of the normal scenario example

由图 13 可见,变压器流过的二次侧最大电流超过定时限过电流保护整定值,且持续时间超过了 0.5 s,会触发定时限过电流保护动作,导致整个供电区域停运。在该样例的基础上,叠加随机发生的短路事件, $t=42.36$ s 时 3 号浮吊 400 V 母线出现两相短路故障,仿真结果如图 14 所示。当发生三相短路故障时,变压器二次侧电流超过了定时限过电流保护整定值,且持续时间超过了 0.5 s,保护能够可靠动作。

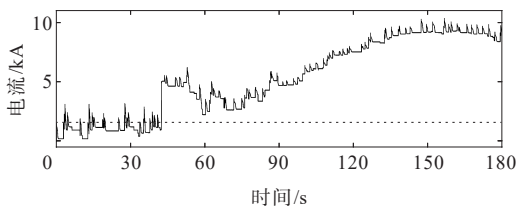


图 14 两相短路故障时仿真结果

Figure 14 Simulation results of the scenario example under two phase short circuit fault

正常和两相短路场景对应的 HHT 分析结果如图 15、16 所示。

由图 15、16 可知,当浮吊供电系统中无故障时,负荷电流的瞬时频率主要集中于 5 Hz 以下,而当两相短路故障发生时,HHT 算法识别出变压器电流的瞬时频率达到了 13.71 Hz。因此在故障发生时,两

相短路故障会造成变压器电流瞬时频率大幅增加,远超系统正常运行时电流瞬时频率。

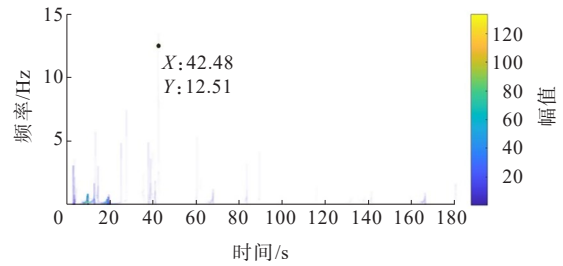


图 15 两相短路故障时响应曲线的 HHT 时频

Figure 15 HHT plot of the two phase short circuit fault

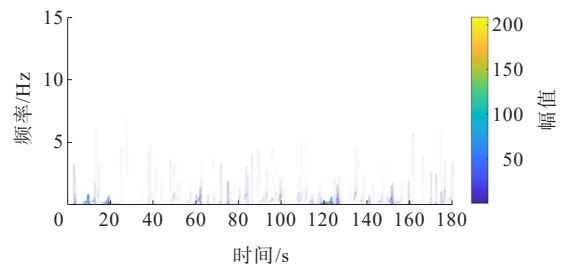


图 16 正常时响应曲线的 HHT 时频

Figure 16 HHT plot of the normal current

4.1.3 单相短路故障场景和正常运行场景对比

单相短路故障场景样例中,3 台浮吊投入运行,编号为 1 号、2 号和 5 号,分别在 0.02、0.57、1.27 s 投入运行,该样例场景仿真结果如图 17 所示。

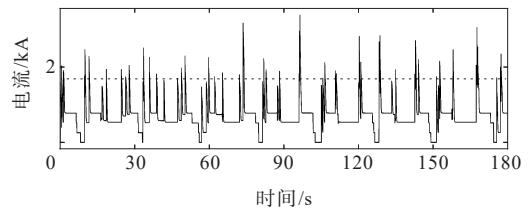


图 17 正常运行场景仿真结果

Figure 17 Simulation results of the normal scenario example

由图 17 可见,变压器流过的二次侧最大电流虽然超过定时限过电流保护整定值,但是持续时间未超过 0.5 s,不会触发定时限过电流保护动作。在该样例的基础上,叠加随机发生的短路事件, $t=32.56$ s 时 5 号浮吊 400 V 母线出现单相短路故障,仿真结果如图 18 所示。变压器二次侧电流虽未超过电流速断保护的整定值,但是超过了定时限过电流保护整定值,且持续时间超过了 0.5 s,保护能够可靠动作。

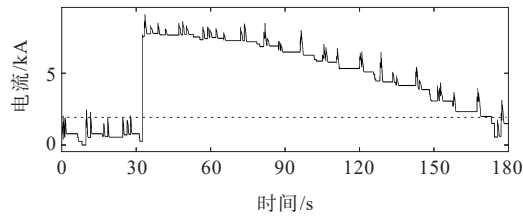


图 18 单相故障时仿真结果

Figure 18 Simulation results of the scenario example under single phase short circuit fault

图 17、18 所对应的 HHT 分析结果如图 19、20 所示。

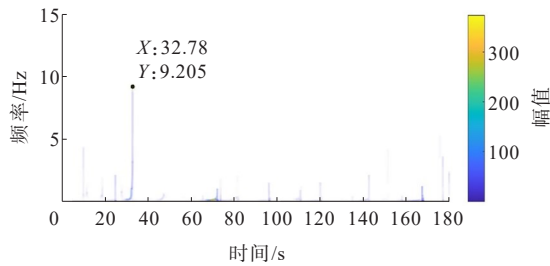


图 19 单相故障时响应曲线的 HHT 时频

Figure 19 HHT plot of the single phase fault current

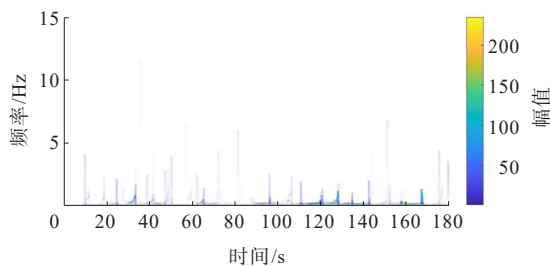


图 20 正常时响应曲线的 HHT 时频

Figure 20 HHT plot of the normal current

由图 19、20 可知,当浮吊供电系统中无故障时,负荷电流的瞬时频率主要集中于 7 Hz 以下,而当单相短路故障发生时,HHT 算法识别出变压器电流的瞬时频率达到了 9.205 Hz。因此在故障发生时,单相短路故障会造成变压器电流瞬时频率大幅增加,远超系统正常运行时电流瞬时频率。

4.1.4 所有随机运行场景统计指标

对所有 400 个随机场景进行扫描,分析正常运行和故障状态下箱式变压器二次侧电流的瞬时频率,统计结果如表 3 和图 21 所示。

如表 3 和图 21 所示,故障状态与正常状态下的瞬时频率分布皆趋近于正态分布。正常状态下,箱式变压器电流能量的频率最大值为 7.18 Hz,而故障情况下的电流变化频率最小值至少为 7.70 Hz。故

障情况下的频率均值为 10.32 Hz,而正常运行状态下电流频率均值为 4.18 Hz。由于故障状态与正常状态下箱式变压器电流的瞬时频率分布有着较为明显的差距,因此选择瞬时频率 7.70 Hz 作为过电流保护的启动阈值,当变压器电流有效值的瞬时频率超过 7.70 Hz 时,则定时限过电流保护投入,电流超过整定值 0.5 s 后,保护将动作。

表 3 已有保护配置

Table 3 Statistics of HHT results of the fault and normal currents

系统状态	正常状态/Hz	故障状态/Hz
最高频率	7.18	12.79
频率均值	4.18	10.32
最低频率	1.80	7.70

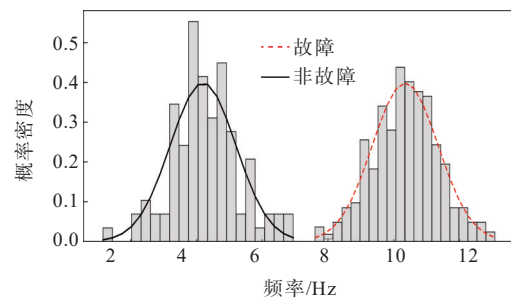


图 21 故障与非故障时信号能量频率概率分布

Figure 21 Probability distribution of signal energy frequency during fault and normal scenarios

4.2 计及电流时频特性的定时限过电流保护

为验证本文所提保护方法的有效性,随机生成运行场景以进行验证。该场景下所有浮吊都将运行,启动时间分别为:1号浮吊 0.02 s 启动,5号浮吊 2.95 s 启动,6号浮吊 2.99 s 启动,2号浮吊 3.84 s 启动,3号浮吊 5.75 s 启动,4号浮吊 6.13 s 启动。在 $t=15$ s 时,2号浮吊 400 V 母线发生三相短路故障。箱式变压器时域电流如图 22、23 所示。

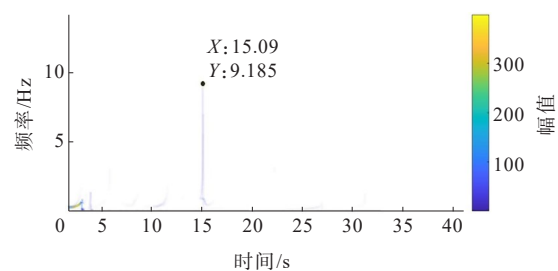


图 22 故障时响应曲线的 HHT 瞬时频率

Figure 22 HHT plot of the fault current

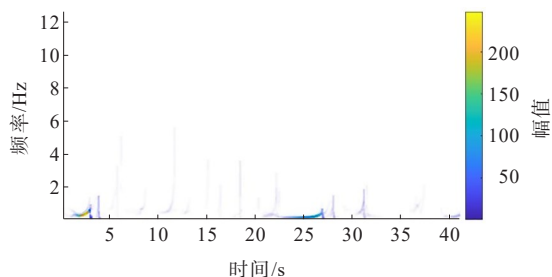


图23 正常运行时HHT瞬时频率

Figure 23 HHT plot of the normal current

由图22可见,在 $t=15.09$ s后,通过HHT技术可分析出箱式变压器出现了9.185 Hz的电流能量,因此可投入定时限过电流保护模块,随后保护动作,故障被切除;由图23可见,浮吊供电系统正常运行时,电流的瞬时频率没有超过8.7 Hz,定时限过流保护装置闭锁。不同状态下定时限过电流保护启动信号如图24所示。

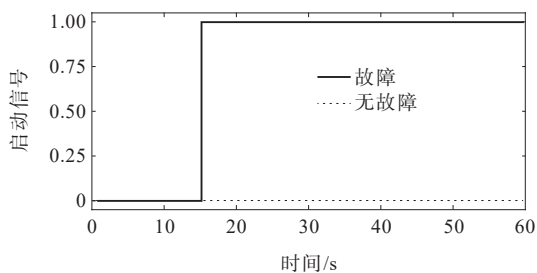


图24 过电流保护启动信号

Figure 24 Starting signal of the overcurrent protection

5 结语

本文针对水上浮吊供电系统中大功率异步电动机负荷断续周期性工作的特殊场景,分析了箱式变压器定时限过电流保护误动的原因,发现多个异步电动机无序启动时,可能由于启动冲击电流叠加达到保护整定值且持续时间较长,触发保护动作;接着,在浮吊电机断续周期性工作制的基础上,提出了浮吊系统随机运行场景生成方法,为浮吊供电系统的特性研究提供支撑;最后引入HHT技术,对故障短路时以及浮吊电机正常工作时的箱式变压器电流信号进行了瞬时频率分析,发现虽然多个异步电动机无序启动可能导致较大的启动电流,但是电流能量的分布频率较低,而故障情况下箱式变压器电流能量的频率显著增加,在此基础上构建了定时限过电流主动闭锁模块,当箱式变压器电流瞬时频率较低时,则闭锁定时限过电流保护模块,确保

浮吊系统正常工作时可靠供电。

参考文献:

- [1] 武猛,林博.港口供电系统的主要特点[J].科技创新与应用,2015(32):183-184.
WU Meng, LIN Bo. Main characteristics of port power supply system[J]. Technology Innovation and Application, 2015(32):183-184.
- [2] 周荔丹,许健,姚钢,等.船舶综合能源管理系统研究综述[J].电力系统保护与控制,2022,50(13):171-186.
ZHOU Lidan, XU Jian, YAO Gang, et al. Review of integrated energy management systems for a marine microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13):171-186.
- [3] 孔令国,史立昊,石振宇,等.基于交替方向乘子法的园区电-氢-热系统低碳优化调度[J].电工技术学报,2023,38(11):2932-2944.
KONG Lingguo, SHI Lihao, SHI Zhenyu, et al. Low-carbon optimal dispatch of electric-hydrogen-heat system in park based on alternating direction method of multipliers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11):2932-2944.
- [4] 邱银锋,李国香,田浩,等.基于ADMM的海上多平台一岸电供电系统能量一备用协同分布式优化调度[J].电力建设,2023,44(1):21-29.
QIU Yinfeng, LI Guoxiang, TIAN Hao, et al. Energy-reserve cooperative distributed optimal scheduling for offshore multi-platform and onshore power supply system based on ADMM[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1):21-29.
- [5] 刘慧文,邢宏伟,房鑫炎,等.适用于岸电系统的逆功率及故障控制策略[J].电测与仪表,2023,60(12):159-164.
LIU Huiwen, XING Hongwei, FANG Xinyan, et al. Reverse power and fault control strategy for shore power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12):159-164.
- [6] 贺岩松,杜钦君,赵正阳,等.三角形连接异步电动机分相投入策略研究[J].电网技术,2022,46(1):320-327.
HE Yansong, DU Qinjun, ZHAO Zhengyang, et al. Research on phase separation input strategy of triangle connection asynchronous motor[J]. Power System Technology, 2022, 46(1):320-327.
- [7] 郑玉平,潘书燕,柴济民,等.新一代调相机变压器组机过流保护误动作原因及对策[J].电力系统自动化,2022,46(5):105-111.
ZHENG Yuping, PAN Shuyan, CHAI Jimin, et al. Causes and countermeasures of misoperation for start-up overcurrent protection of new-generation condenser and transformer unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5):105-111.

- [8] 刘仲钦.一起220 kV变电站主变励磁涌流引起的保护动作分析[J].机电信息,2021(23):32-34.
LIU Zhongqin. Analysis of protection action caused by inrush current of main transformer in 220 kV substation [J]. Mechanical and Electrical Information, 2021(23): 32-34.
- [9] 栗磊,赫嘉楠,熊军辉,等.基于波形分区重构的变压器励磁涌流与故障电流识别方法[J].电网与清洁能源,2023,39(2):16-23+32.
LI Lei, HE Jianan, XIONG Junhui, et al. An identification method of inrush current and fault current based on waveform partition and reconstruction[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 16-23+32.
- [10] 杜继伟.变压器励磁涌流序分量特征分析[J].电力科学与工程,2022,38(4):63-70.
DU Jiwei. Study on the characteristics of transformer inrush current sequence component[J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(4): 63-70.
- [11] 宋泽超,张浩,刘勇,等.某抽水蓄能电站主变压器低压闭锁过流保护动作原因分析及改造方案[J].水电与抽水蓄能,2021,7(1):49-52.
SONG Zechao, ZHANG Hao, LIU Yong, et al. Analysis on the cause of overcurrent protection action of low-voltage lockout in a main transformer of pumped-storage hydroelectricity and its improvement scheme[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(1): 49-52.
- [12] 董新涛,李文伟,李宝伟,等.基于补偿零序压差原理的110 kV线路纵向故障保护方案[J].智慧电力,2022,50(9):110-117.
DONG Xintao, LI Wenwei, LI Baowei, et al. 110 kV line longitudinal fault protection scheme based on compensated zero sequence voltage differential principle [J]. Smart Power, 2022, 50(9): 110-117.
- [13] 李道胜.35 kV变压器空载充电时零序过流保护误动作分析[J].冶金动力,2019,38(11):20-24.
LI Daosheng. Analysis of zero sequence overcurrent protection misoperation during No-load charging of 35 kV transformer[J]. Metallurgical Power, 2019, 38(11): 20-24.
- [14] 刘林,王洪涛,鲁月娥.主变压器零序过流保护和间隙过流保护配合分析[J].东北电力技术,2020,41(8):37-40.
LIU Lin, WANG Hongtao, LU Yuee. Analysis of coordination between zero-sequence over-current protection and gap protection of main transformer[J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(8): 37-40.
- [15] 赵黎丽,高昌培.500 kV自耦变压器零序过流保护的整定配合[J].电力系统自动化,2010,34(7):112-115.
ZHAO Lili, GAO Changpei. Settings coordination of zero-sequence over-current relay for 500 kV autotransformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 112-115.
- [16] 吴昊天,赵阳,刘子卓,等.基于小波变换的配电变压器差动保护相位补偿方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(10):76-83.
WU Haotian, ZHAO Yang, LIU Zizhuo, et al. Phase compensation method of distribution transformer differential protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 76-83.
- [17] 杨德昌, C. Rehtanz, 李勇, 等.基于改进希尔伯特—黄变换算法的电力系统低频振荡分析[J].中国电机工程学报,2011,31(10):102-108.
YANG Dechang, C. REHTANZ, LI Yong, et al. Researching on low frequency oscillation in power system based on improved HHT algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 102-108.
- [18] 李谦,江宇栋,刘尧,等.配电网低频涌流对电磁式电压互感器影响和抑制方法的分析[J].高压电器,2022,58(2):142-148+157.
LI Qian, JIANG Yudong, LIU Yao, et al. Analysis of influence of low frequency inrush current of distribution network on electromagnetic potential transformer and its suppression method[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 142-148+157.
- [19] 樊昂,李录平,张世海,等.大型风电机组塔筒动力学特性与寿命损耗研究进展[J].发电技术,2022,43(3):421-430.
FAN Ang, LI Luping, ZHANG Shihai, et al. A review on dynamic characteristics and life loss of large wind turbine towers[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 421-430.
- [20] 刘兴茂,何正友.基于希尔伯特—黄变换的输电线路距离保护方案[J].电力系统自动化,2013,37(2):108-112.
LIU Xingmao, HE Zhengyou. Distance protection scheme for transmission lines based on Hilbert-Huang transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 108-112.