

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181343

## 基于二次谐波复合闭锁的零序过流保护新方案

刘尧<sup>1</sup>, 韩伟<sup>1</sup>, 李琼林<sup>1</sup>, 周宁<sup>1</sup>, 林湘宁<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

2. 华中科技大学强电场工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 首先阐述分析了零序涌流的产生机理及特点。其次针对其会导致零序过流保护误动的问题, 提出了一种基于二次谐波复合闭锁的零序过流保护新方案。通过比较零序电流的二次谐波含量及其变化率, 即可辨识短路电流和励磁涌流, 且能够不受 CT 饱和的影响。设计采用计数装置来具体实现二次谐波变化率的监测, 并给出了相应的整定和计数原则。结合零序过流保护整定电流及动作时间, 形成了新的零序过流保护方案。所提方案原理简单清晰, 易于实现, 有一定的工程应用基础。通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建 220 kV 系统模型, 验证了新方案在不同场景下的有效性。

**关键词:** 励磁涌流; 零序过流保护; 二次谐波; 复合闭锁; 计数装置

### A new scheme of zero sequence overcurrent protection based on secondary harmonic compound blocking

LIU Yao<sup>1</sup>, HAN Wei<sup>1</sup>, LI Qionglin<sup>1</sup>, ZHOU Ning<sup>1</sup>, LIN Xiangning<sup>2</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Firstly, the generation mechanism and characteristics of zero-sequence inrush current are analyzed. Secondly, a new zero-sequence overcurrent protection scheme based on second harmonic compound blocking is proposed to solve the problem that zero sequence overcurrent protection will malfunction. By comparing the second harmonic content of zero sequence current and its change rate, the new method can identify short circuit current and inrush current, which can be unaffected by CT saturation. This paper designs a counting device to monitor the change rate of the secondary harmonic and gives the corresponding principles of setting and counting. Combined with zero sequence overcurrent protection setting current and action time, a new zero sequence overcurrent protection scheme is proposed, which is simple, clear and easy to implement. In addition, it has a certain engineering application foundation. This paper verifies the effectiveness of the new scheme in different scenarios by building a 220 kV system model in PSCAD/EMTDC.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52170218000M) "Research on Hybrid Multi-DC Transmission Line Fault and Self-adaptive Reclosing Method".

**Key words:** inrush current; zero sequence overcurrent protection; second harmonic; compound blocking; counting device

## 0 引言

零序过流保护在改善接地保护灵敏性等方面具有显著的优点, 被广泛应用于 110 kV 及以上电压等级的电网中<sup>[1]</sup>。传统变压器空载合闸时由于三相涌流不对称, 所合成的零序涌流可能由于幅值大于零序过流保护整定门槛引起保护误动。以往由于零序

网络电阻较大, 故障回路对应时间常数较小, 在保护达到动作延时之前, 零序涌流已衰减到动作门槛之下, 不会引起动作速度较慢的零序过流保护误动。然而近年来随着高压内置型高阻抗变压器的广泛投运, 其特殊的结构使得涌流幅值较常规变压器更大<sup>[2]</sup>。另外出于安全防雷考虑, 接地网络的技术水平不断提高, 故障零序网络的电阻性成分比重相较以往也更小, 衰减时间常数变大, 两方面的共同作用, 导致在零序涌流长时间维持在一个较高的水平上, 零序涌流导致保护误动的问题日益凸显。

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目资助“混合多端直流输电线路故障与自适应重合方法研究”(52170218000M)

此前针对励磁涌流的产生机理及其应对措施的研究已取得大量成果并广泛应用<sup>[3-19]</sup>，然而其主要针对差动保护，较少涉及零序过流保护。文献[20]阐述了零序涌流的产生机理，指出三相饱和的差异是产生零序分量的根本原因。建议通过提高零序过流加速段定值或增加二次谐波制动原理来提高保护的可靠性。文献[21]从和应涌流的角度分析了其对零序电流保护的影响，和应涌流产生时零序电流衰减较慢，会导致作为变压器后备保护的零序电流保护误动。文献[22]采用仿真计算与实际分析相结合的方法，研究了单台及多台变压器零序涌流的特点，并结合 220 kV 零序电流的保护配置分析了零序涌流对线路、母联及变压器零序电流保护的影响。提出通过改变中性点接线方式以及减少采用自耦式变压器的方法，降低涌流对零序电流保护的影响，但相关保护整定的配合存在较大困难。

上述零序涌流的研究主要是从产生机理及对保护的影响开展，并未从保护原理的角度做出有效应对。文献[23]将出口断路器电流的直流分量与基波分量幅值比的衰减速率引入判据，以此识别励磁涌流和短路电流。本文以其提供的思路为切入点，将差动保护中最为常用的二次谐波闭锁判据引入零序过流保护，利用零序电流的二次谐波含量及其变化率构造闭锁判据，附加原有定值形成新的零序过流保护方案。通过仿真验证所提新方案能有效识别故障电流和涌流场景，并具备一定的抗 CT 饱和能力。所提方案具备原理清晰，简单易实现的优点，给开发性能更为完备的继电保护装置提供了思路。

### 1 零序涌流的产生机理及特点分析

以 Yn/D 接线的变压器为例，在空载合闸后高压侧的 A、B、C 三相中会产生偏向时间轴一侧的相涌流，其含有大量的高次谐波(以二次谐波为主)。由于励磁回路及系统阻抗中电阻成分的存在，各相涌流呈现衰减趋势，可将其等效为衰减谐波电流源  $i_{\mu A}$ 、 $i_{\mu B}$ 、 $i_{\mu C}$ ，这些不对称涌流在零序网络通路中流经时将产生零序分量，图 1 所示为变压器空载合闸零序等效网络。

根据叠加定理及三相不对称电路的特点，考虑到合闸时各相剩磁、合闸角以及铁芯特性的差异，使变压器各相进入铁芯饱和程度不同，三相励磁涌流各自偏向于时间轴一侧不对称，导致其涌流之和不等于 0，即产生了零序涌流  $i_{\mu 0}$ 。

$$i_0(t) = i_{\mu A}(t) + i_{\mu B}(t) + i_{\mu C}(t) \quad (1)$$

零序涌流波形及谐波成分与相涌流相比有所不同，如图 2 和图 3 所示。

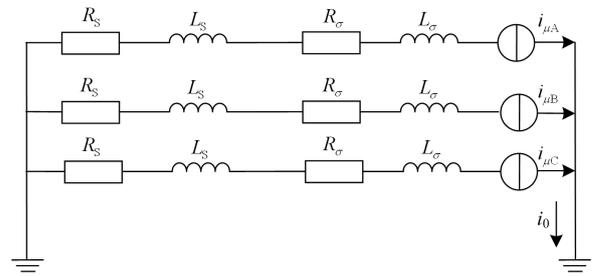
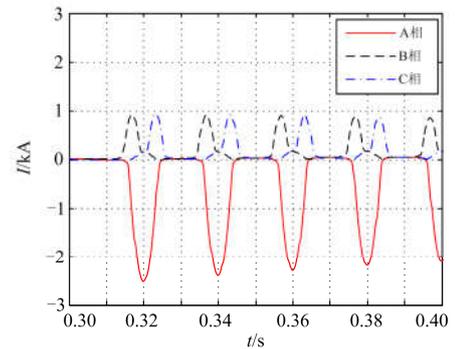
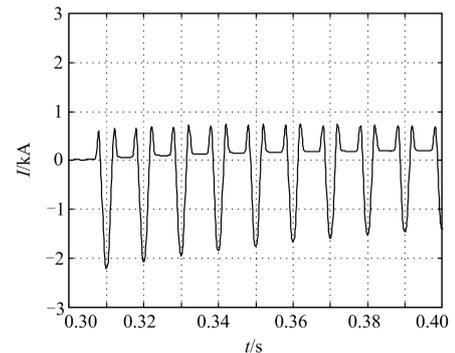


图 1 变压器励磁涌流零序等效网络  
Fig. 1 Zero sequence equivalent circuit of magnetizing inrush current

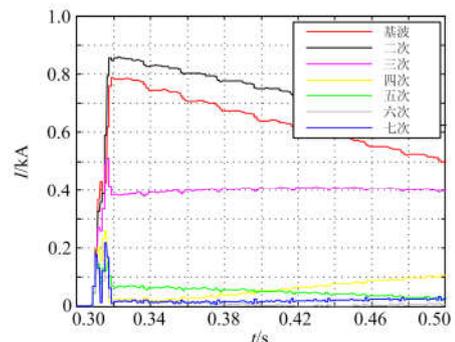


(a) 三相涌流波形



(b) 零序涌流波形

图 2 三相涌流与零序涌流波形的对比示意图  
Fig. 2 Diagram of three phase inrush current and zero sequence inrush current



(a) 各次谐波幅值

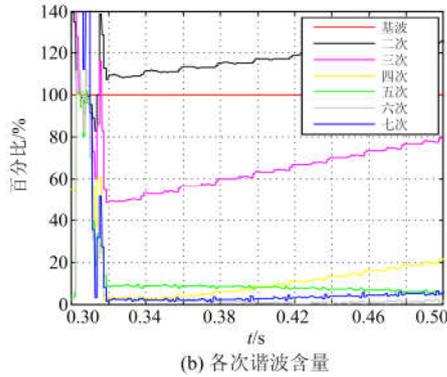


图3 零序涌流各次谐波幅值及含量示意图

Fig. 3 Diagram of amplitude and content of each harmonic of zero sequence inrush current

零序涌流具有如下特点:

(1) 零序涌流为三相涌流的叠加,其波形不再偏向于时间轴某一侧。

(2) 零序涌流的各次谐波组分与相涌流差别较大,以二次谐波以及三次谐波为主,且此两种谐波含量较高,甚至会出现大于基波分量的情况,而其他次谐波的含量较小。

## 2 零序电流二次谐波闭锁方案

有学者在研究零序涌流导致保护误动时提出引入零序电流的二次谐波进行闭锁,但是并未对其方案进行过多分析研究<sup>[16]</sup>。考虑到在工程中差动保护的二次谐波闭锁判据使用较为成熟,有一定的应用基础和实际价值。本文在零序电流的二次谐波闭锁方案的基础上对该方案进一步的分析研究,并针对其可能存在的问题提出相应的改进措施。

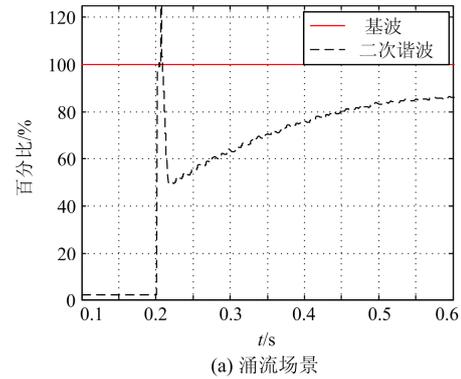
### 2.1 现有零序电流二次谐波闭锁判据

当涌流产生后,考虑到铁芯饱和的差异,三相涌流的间断情况各有不同,其无法完全补合成规则的零序电流波形,故其还有相当含量的二次谐波。而在发生不对称接地故障时(零序电流保护主要反应此类故障),故障电流的二次谐波只存在于极短的暂态过程中,其含量会迅速降低,相关对比如图4所示。利用上述特点,可构造二次谐波含量的闭锁判据,如式(2)所示。

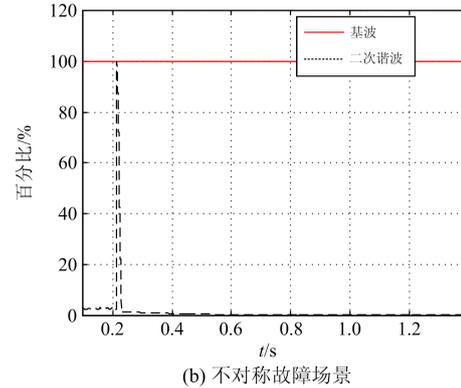
$$K_2 > K_{set} \quad (2)$$

式中:  $K_2$  为零序电流中二次谐波与基波的比值含量;  $K_{set}$  为二次谐波制动系数。

考虑到零序电流二次谐波含量闭锁判据的引入同样会遇到 CT 饱和的问题,甚至更加严重。通常系统正常运行状态时不平衡零序电流很小,为了保证测量精度,作为后备保护的零序 CT 一般选择量程高精度的型号,其抗饱和能力一般远低于三相



(a) 涌流场景



(b) 不对称故障场景

图4 涌流及故障时零序电流的基波及二次谐波变化示意图  
Fig. 4 Diagram of the fundamental wave and secondary harmonic of zero sequence current in inrush current and fault

CT<sup>[24]</sup>。常见的 CT 饱和主要有两种:暂态饱和以及稳态饱和。稳态饱和的波形与时间轴对称度较高,不含二次谐波;而暂态饱和是由于一次侧电流中非周期分量过大引起,波形与时间轴不对称,含有一定的二次谐波。仅依靠二次谐波含量闭锁的判据,可能会导致不能分辨故障导致 CT 饱和以及涌流的情况,使得零序电流保护无法正确动作,因此有必要对式(2)进行相应改进,完善保护性能。

### 2.2 基于二次谐波含量及其变化率的复合闭锁判据

由于系统电阻或者互感器二次侧电阻的存在,对于非正弦的涌流和 CT 饱和而言,其成分中的不同次谐波  $I_n$  将按照各自的时间常数衰减。

$$I_n = f(R_n, L_n, C_n, t), n=1,2,3, \dots \quad (3)$$

基波和二次谐波对应的衰减时间常数不同,二次谐波含量  $K_2$  将随时间的增加而发生变化,如式(4)所示。

$$K_2 = \frac{I_2(t)}{I_1(t)} = F(R_1, L_1, C_1, R_2, L_2, C_2, t) \quad (4)$$

由于零序电流为三相合成,其谐波的产生和衰减受多种因素影响,难以建立直观的数学表达式。根据二次谐波在涌流场景和 CT 饱和场景下不同的

变化趋势, 以此可构造补充判据解决式(2)无法辨识的问题。

对于零序涌流而言, 在达到峰值后即开始衰减。与基波相比, 二次谐波对应的感抗更大, 容抗更小, 理应二次谐波衰减得更快。若忽略涌流上升的极短暂态过程, 则随着时间的增加,  $K_2$  会逐渐增大, 其变化速率大于 0。

对于暂态饱和而言, 随着铁芯饱和的不断深入, 二次谐波会比基波增长得更快,  $K_2$  也会上升, 变化速率大于 0。在进入饱和后, 由于非周期分量和基波的共同主导作用, 波形稳定, 二次谐波便逐渐衰减,  $K_2$  下降, 变化率小于 0。对于由暂态饱和和过渡到稳态饱和的阶段, 同样地二次谐波含量将从较高值衰减,  $K_2$  变化率小于 0。在达到稳态饱和的稳定状态后, 二次谐波含量可以忽略。不同类型 CT 饱和时零序电流及二次谐波含量波形示意如图 5 和图 6 所示。

利用上述二次谐波含量及其变化率在不同场景下的特点, 构造基于零序电流二次谐波复合闭锁判据, 如式(5)所示。

$$K_2 > K_{set} \text{ and } \frac{dK_2}{dt} > V_{set} \quad (5)$$

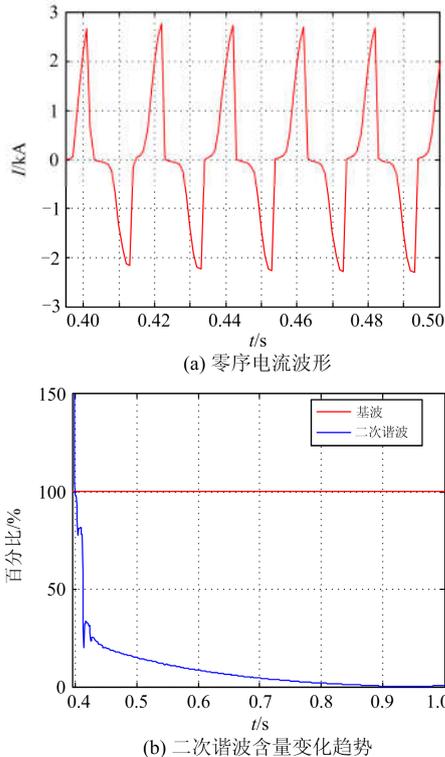


图 5 CT 稳态饱和时零序电流及其二次谐波含量示意图  
Fig. 5 Diagram of zero sequence CT steady saturation harmonic content in CT steady saturation

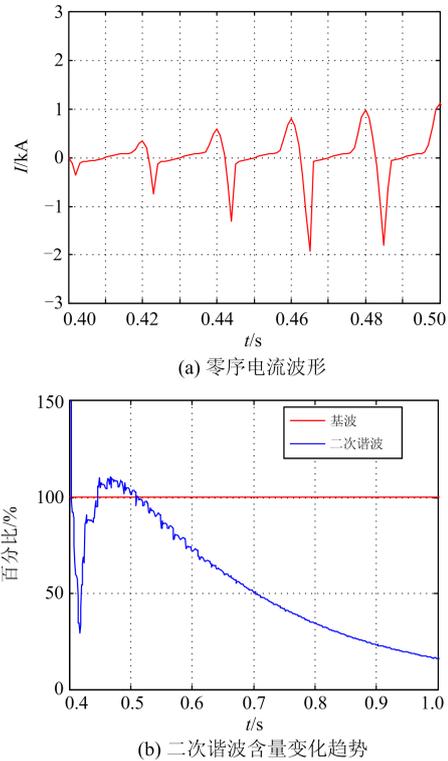


图 6 CT 暂态饱和时零序电流及其二次谐波含量示意图  
Fig. 6 Diagram of zero sequence current and its secondary harmonic content in CT transient saturation

考虑到在对二次谐波含量变化率进行数学求导计算时要求其连续数值, 而这对于间隔采样的微机保护而言难以实现。鉴于此, 可从实际应用角度出发引入计数装置, 式(5)相应修改为

$$K_2 > K_{set} \text{ and } N \geq N_{set} \quad (6)$$

式中,  $N$  为按相应统计原则得到二次谐波含量数值。

### 2.3 整定及统计原则

式(6)前半部分主要为了辨识涌流和不对称短路故障, 后半部分则是考虑 CT 饱和的影响。具体整定/统计原则如下。

#### 1) $K_2 > K_{set}$

传统差动保护二次谐波的闭锁判据为 15%~20%(经验值), 对于零序电流保护而言其可适当提高。考虑到三相涌流的间断部分可能会彼此补偿, 合成的零序涌流间断特征较弱, 波形较相涌流愈发不规则, 零序二次谐波含量将高于相涌流的二次谐波含量。另外, 零序电流保护多设置有时间级差, 在零序涌流达到其动作时间时, 由于二次谐波含量稳定保持在较高值, 故适当提高是可取的。

考虑到门槛值  $K_{set}$  整定得越大, 其抗涌流误动的能力越弱; 而其整定得越小, 其应对不平衡零序电流及泄露零序电流能力越弱, 容易造成在发生不

对称故障时的误闭锁。具体如何选取需根据工程实际由专家定夺,本文保守建议选择25%。

2)  $N \geq N_{set}$

二次谐波含量计数值  $N$  的统计原则如下。

(1)  $N$  初始值为0。

(2) 将第  $M$  次采样计算所得的二次谐波含量  $K_{2,M}$  与第  $M+1$  次的  $K_{2,M+1}$  作比,当出现第一次  $K_{2,M+1} \geq K_{2,M}$  时开始计数。

(3) 在开始计数过程中,每当出现一次  $K_{2,M+1} \geq K_{2,M}$ , 则  $N=N+1$ 。若出现一次  $K_{2,M+1} < K_{2,M}$ , 则  $N=N-1$ 。

$N_{set}$  的选取可根据工程实际情况由专家定夺,其主要衡量 CT 饱和时间  $t_{tran}$ (单位为毫秒)及零序电流保护的整定时间,按式(7)选取。

$$N_{set} = \frac{kf}{50} \quad (7)$$

式中:  $f$  为采样频率;计数时间系数  $k=[t_{tran}/20]$ ( $[x]$  为不小于  $x$  的最小整数)。如考虑 CT 的暂态饱和和过程不超过一个周波,采样频率为 1 000 Hz,则计数门槛最小设置为  $N_{set}=20$ 。为保留一定的裕度,对于整定时间为 0.2~0.5 s 的零序电流保护而言,计数门槛可相应放宽至 40。若整定时间更长,计数门槛也可相应增大,但不宜过长否则会影响到保护时间上的逻辑配合不利于保护动作速度,具体如何选择请技术人员和专家根据实际情况定夺。

#### 2.4 零序过流保护新方案

原有零序过流保护附加零序电流二次谐波的复合闭锁判据共同构成新的零序过流保护方案,相应流程如图 7 所示。新方案中零序电流判据部分仍沿用原有的整定电流及动作时间,而启动元件及零序电流二次谐波含量的获取均可以保护中直接沿用或进行相应修改得到。

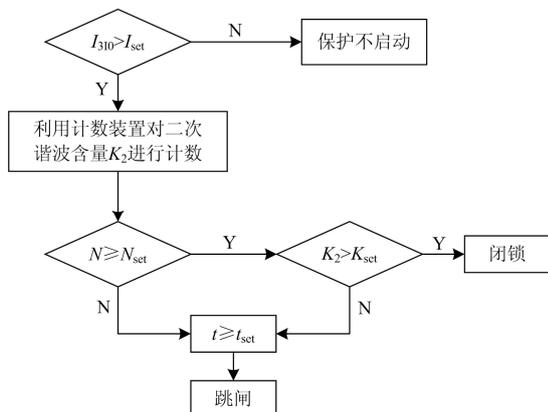


图 7 零序过流保护新方案流程图

Fig. 7 Flow chart of zero sequence overcurrent protection new scheme

具体步骤为:

1) 保护系统利用检测提取出的零序电流基波分量,将其与整定门槛作对比(整个判断流程中,保护的启动门槛仍延续传统零序电流保护整定  $I_{set}$  不变),在其达到整定门槛后,进入监测二次谐波含量的计数流程 2);反之,则零序电流保护不启动。

2) 当计数达到整定值  $N_{set}$  时,则可能是发生励磁涌流或者仅发生故障但 CT 不饱和,需要对其进一步地判别,进入流程 3);反之则可能是发生故障且 CT 饱和,此时保护不应该闭锁,在满足动作条件后零序电流保护即可动作跳闸。

3) 将二次谐波含量与整定值  $K_{set}$  对比,当其大于整定门槛时,表明发生励磁涌流,对相应段零序电流保护闭锁。若不满足  $K_2 > K_{set}$ , 则表明是仅仅发生故障保护开放,在达到整定时间后满足动作条件零序电流保护即可动作跳闸。

### 3 仿真模拟

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 8 所示的 220 kV 系统模型,采样频率设置为 1 000 Hz。等值电源电压为  $E_s = 230$  kV,等值系统阻抗  $Z_{s1} = (0.26 + j3.64) \Omega$ ,  $Z_{s0} = (0.79 + j5.85) \Omega$ ,主变采用高压内置变压器。变压器与母线连接参数  $Z_1 = (0.027 + j0.28) \Omega/\text{km}$ ,  $Z_0 = (0.195 + j0.69) \Omega/\text{km}$ ,  $l = 10$  km。鉴于发生多起零序涌流导致母联零序 II 段过流保护动作,本仿真即针对这种保护采用二次谐波复合闭锁的零序电流保护新方案在不同场景下的响应能力进行验证。其中,母联零序 II 段电流保护的整定电流整定为 0.24 kA,整定时间为 0.5 s,根据第 2 节分析设定,  $K_{set}=25\%$ ,  $N_{set}=40$ 。

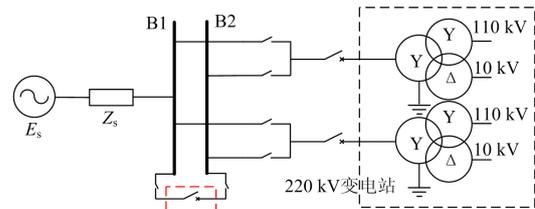


图 8 220 kV 等值系统模型

Fig. 8 220 kV equivalent system model

#### 场景 1: 变压器空投涌流

设置变压器在  $t=0.4$  s 时空载合闸,合闸角  $0^\circ$ ,考虑最严重的情况,将剩磁调整为  $(0.8, -0.4, -0.4)$  p.u.,系统空载,模拟仿真变压器空投产生励磁涌流场景 1。图 9 所示为场景 1 下的零序电流、基波分量幅值以及二次谐波含量波形。由图 9 可以看到,在  $t=0.422$  s 时二次谐波含量出现最小值开始

计数, 在 49 ms 之后  $N=40$ ,  $t=0.9$  s 时,  $K_2=111.4\%$ ,  $N=162$ 。虽然此时监测到零序电流仅为 0.292 kA, 大于整定值 0.24 kA, 但由于满足闭锁判据保护将不会因为涌流过大而动作。

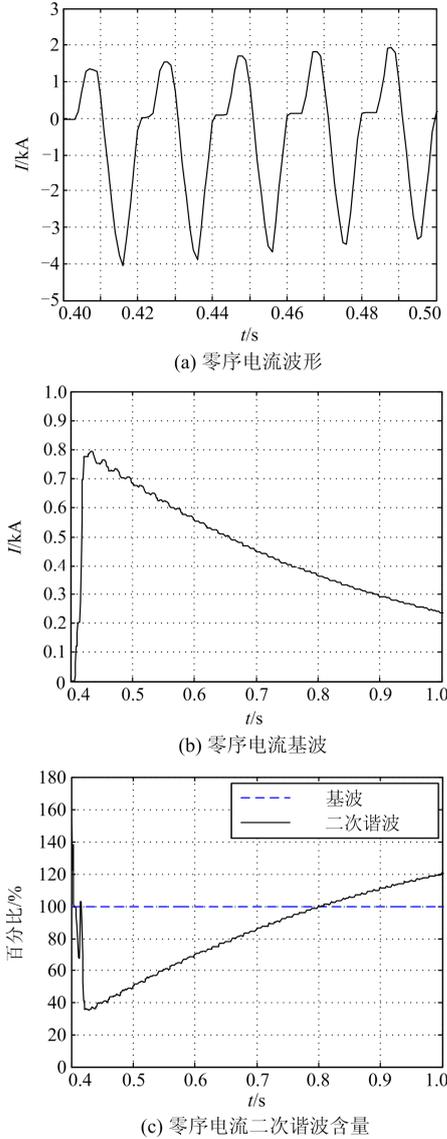


图 9 场景 1 下零序电流、基波以及二次谐波含量波形

Fig. 9 Zero sequence current, fundamental wave and secondary harmonic content waveform in scenario# 1

若更严重的极端情况——涌流导致 CT 饱和, 在涌流产生初期, 更大的涌流将占主导作用, 二次谐波仍呈现上升趋势, 在满足式(6)后保护即闭锁。CT 饱和滞后于涌流出现, 在其出现后, 二者叠加使得互感器二次侧的传变电流更加畸变, 不对称度更高, 更有利于保护判据。

场景 2: 区内故障 CT 不饱和

设置在  $t=0.4$  s 时母线发生单相接地故障(金属

性短路), 模拟仿真系统发生区内单相接地故障且发生 CT 饱和的场景 2。图 10 所示为场景 2 下的零序电流、基波分量幅值以及二次谐波含量波形。可以看到在发生单相短路接地故障稳定后, 检测到的零序电流基波稳定值为 6.7 kA 大于整定门槛 0.24 kA, 在达到整定时间时保护不会闭锁而直接跳闸。零序电流保护新方案可以继承原有零序电流保护, 能有效反映单相接地故障的能力。

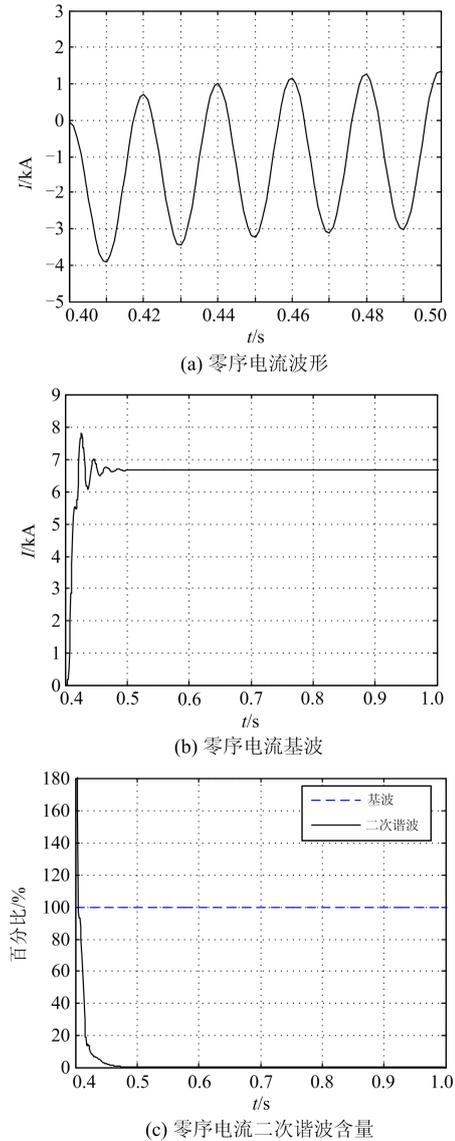


图 10 场景 2 下零序电流、基波以及二次谐波含量波形

Fig. 10 Zero sequence current, fundamental wave and secondary harmonic content waveform in scenario# 2

对于其他不对称接地故障, 新的零序过流保护方案也不会改变原有零序过流保护反映故障能力。

场景 3: 区内故障且 CT 暂态饱和

设置在电压过零时发生区内短路, 考虑到系统

主要呈感性,短路电流中将会出现最大非周期分量,将会引起互感器的暂态饱和,此暂态饱和一般在短路后几个周波开始(场景3)。图11所示为场景3下的零序电流、基波分量幅值以及二次谐波含量波形。

可以看到,在 $t=0.425\text{ s}$ 时开始计数,在 $t=0.591\text{ s}$ 时二次谐波含量达到最大值92.98%,其计数也达到最大值36,而后呈现衰减趋势,在 $t=0.9\text{ s}$ 时,二次谐波含量达到57%,计数达到25。若仅采用二次谐波含量的方案,则会出现误闭锁,在将二次谐波含量变化率加入之后,由于不满足式(6)的复合闭锁判据,保护不会误闭锁,体现了新方案的抗CT饱和的优越性。

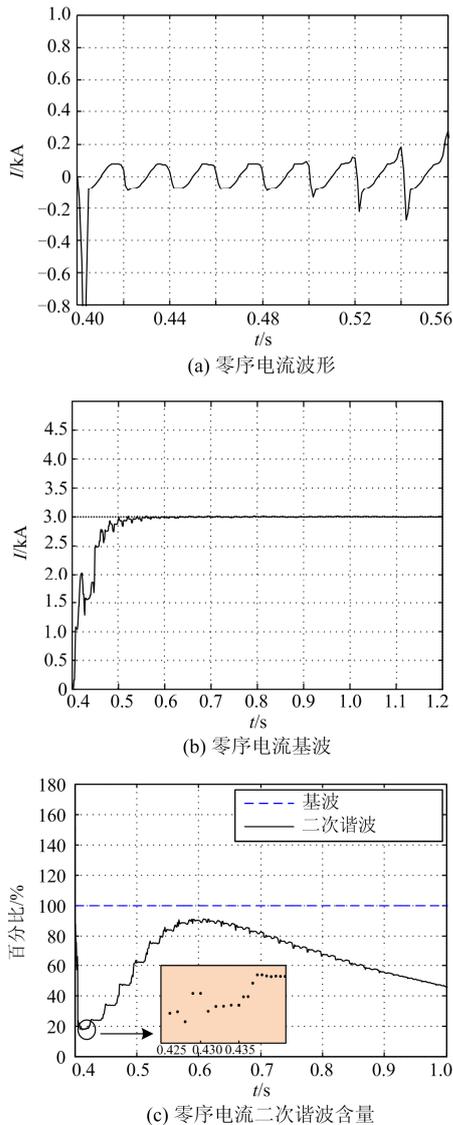


图11 场景3下零序电流、基波以及二次谐波含量波形  
Fig. 11 Zero sequence current, fundamental wave and secondary harmonic content waveform in scenario# 3

场景4: 区内故障且CT稳态饱和  
稳态饱和主要是由于一次侧产生较大的短路电流引起,调整二次侧负载特性使其进入稳态饱和(场景4)。图12所示为场景4下的零序电流、基波分量幅值以及二次谐波含量波形。

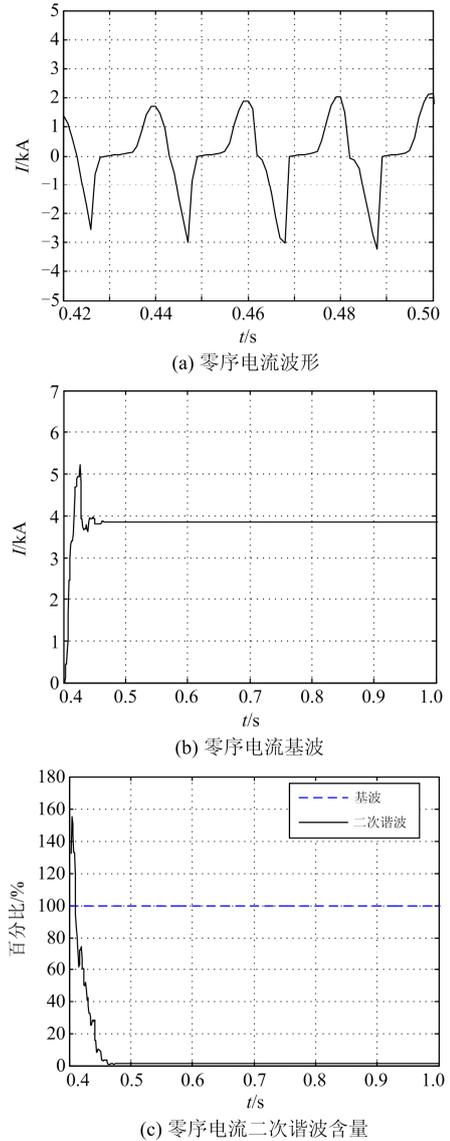


图12 场景4下零序电流、基波以及二次谐波含量波形  
Fig. 12 Zero sequence current, fundamental wave and secondary harmonic content waveform in scenario# 4

发生稳态饱和时合成的零序电流同样具有较高的对称性,其二次谐波含量迅速衰减至0,计数装置基本不启动仍为设定的初始值0,即使启动,也可能是由于在进入稳态饱和的极其短暂的复杂暂态过程所致,零序电流保护不会闭锁。在保护启动0.5s后,监测到零序电流大于整定门槛,保护动作。

另外还存在区外故障导致 CT 饱和的场景, 此时故障电流势必比同等条件下的区内故障小, 若原有的零序过流保护能躲过, 则本文所提出的方案由于不改变原有保护的整定判据, 新方案同样能躲过。若区外故障严重电流过大导致 CT 饱和, 新方案也能够通过设定合理的闭锁门槛值躲过, 不会造成误闭锁。相比于区内故障, 由于区外故障时零序过流保护作为远后备本身提供的保护能力也较弱, 其闭锁与否的影响并不是很大。

#### 4 结论

1) 分析了变压器空投零序涌流的产生机理, 由于各相饱和差异导致三相不能完全补合, 与相涌流相比, 零序涌流具备二次谐波及三次谐波含量更高的特点。

2) 将传统差动保护中常用二次谐波闭锁方案引入零序电流保护, 并分析得出此种方案面临更易发生 CT 饱和时出现误闭锁的情况。通过对比分析不同场景下二次谐波含量及其变化率的趋势, 提出了一种基于二次谐波复合闭锁的判据, 为了更易在微机保护中实现, 本文引入计数装置来实现变化率的监测。

3) 将二次谐波复合闭锁判据与原有零序过流保护相结合形成了新的保护方案, 并给出了具体的整定原则。通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型对所提方案进行性能验证, 仿真结果表明该方法能够区分零序涌流和故障电流, 且具备一定的抗 CT 饱和能力。

本文中整定原则仅是初步设计, 具体如何选取还需现场专家结合实际情况抉择。此外, 对零序电流保护施加闭锁方案会对保护间的配合产生怎样的影响也需进一步探究。

#### 参考文献

- [1] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 李晓华, 罗龙波, 谢金泉, 等. 高压内置型高阻抗变压器涌流特性对保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 108-114.  
LI Xiaohua, LUO Longbo, XIE Jinquan, et al. Impact of inrush current characteristics of high-voltage built-in high-impedance transformer on relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 108-114.
- [3] 李晓华, 张冬怡, 吴立珠, 等. 换流变压器励磁涌流的特殊性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3869-3875.  
LI Xiaohua, ZHANG Dongyi, WU Lizhu, et al. Particularity analysis of converter transformer inrush current[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3869-3875.
- [4] 闫富平, 段建东, 李笑, 等. 利用动态四边形分析的配电网励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2017-2022.  
YAN Fuping, DUAN Jiandong, LI Xiao, et al. Identification method of inrush current in distribution network based on analysis of dynamic quadrilateral[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2017-2022.
- [5] 徐岩, 周霏霏. 基于幅值特征的变压器励磁涌流和故障电流的识别[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 205-209.  
XU Yan, ZHOU Feifei. A method to distinguish inrush current of power transformer from fault current based on amplitude characteristics[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 205-209.
- [6] 王业, 陆于平, 蔡超, 等. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 702-711.  
WANG Ye, LU Yuping, CAI Chao, et al. A magnetizing inrush identification method applying adaptive data-window currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 702-711.
- [7] 王业, 袁宇波, 高磊, 等. 基于 FSAD 及非周期分量的励磁涌流鉴别算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 127-135.  
WANG Ye, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. A algorithm to identify magnetizing inrush current based on FSAD and aperiodic components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 127-135.
- [8] NAGHIZADEH R A, VAHIDI B, HOSSEINIAN S H. Modelling of inrush current in transformers using inverse Jiles-Atherton hysteresis model with a Neuro-shuffled frog-leaping algorithm approach[J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(9): 727-734.
- [9] 孙庆森, 张海峰, 王猛, 等. 小波算法在变压器励磁涌流中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 121-125.  
SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, WANG Meng, et al. Application of wavelet algorithm in the transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 121-125.
- [10] DOU N K, TOYAMA A, SATOH K, et al. Identification of magnetizing inrush current phenomena in a distribution system[J]. Electrical Engineering in Japan, 2012, 181(1): 1-10.
- [11] 姚东晓, 张凯, 贺要锋, 等. 变压器多特征励磁涌流识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 149-154.  
YAO Dongxiao, ZHANG Kai, HE Yaofeng, et al. Research on multi feature recognition scheme of transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017,

- 45(13): 149-154.
- [12] 凌光, 苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.  
LING Guang, SU Bin. A method to identify inrush current based on waveform characteristics of differential current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 19-24.
- [13] 胡松, 江亚群, 黄纯. 基于偏度系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1954-1959.  
HU Song, JIANG Yaqun, HUANG Chun. Identification method of transformer inrush current based on skewness coefficient[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1954-1959.
- [14] 黄少锋, 李姗姗, 肖远清. 基于非周期分量衰减速率的变压器励磁涌流鉴别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 9-15.  
HUANG Shaofeng, LI Shanshan, XIAO Yuanqing. A novel identification criterion for transformer inrush current based on decay rate of aperiodic component[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 9-15.
- [15] 许家源, 华争祥, 朱苛娄, 等. 选相关合技术抑制空载变压器励磁涌流的实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 135-141.  
XU Jiayuan, HUA Zhengxiang, ZHU Kelou, et al. Experimental research on inrush current suppression of unloaded transformers based on the controlled switching[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 135-141.
- [16] 孙洋, 刘翔, 黄家栋. 应用等效瞬时电感对称特征判别变压器励磁涌流新方法[J]. 中国电力, 2010, 23(11): 26-30.  
SUN Yang, LIU Xiang, HUANG Jiadong. Discrimination of transformer inrush current based on symmetry character of equivalent instantaneous inductance[J]. Electric Power, 2010, 23(11): 26-30.
- [17] 王虹富, 穆世霞, 王兰香, 等. 考虑励磁非线性的通用变压器及其故障电磁暂态模型[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 60-67.  
WANG Hongfu, MU Shixia, WANG Lanxiang, et al. Electromagnetic transient model of transformer and its fault state considering nonlinear exciting branch[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 60-67.
- [18] 郑彬, 杨鹏, 滕文涛, 等. 换流站联络变充电励磁涌流对哈郑特高压直流运行影响分析[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 130-135.  
ZHENG Bin, YANG Peng, TENG Wentao, et al. Study on influence of coupling transformer charging inrush current to Hami-Zhengzhou UHV DC project[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 130-135.
- [19] 夏经德, 王波, 路亮, 等. 能抗励磁涌流干扰的变压器差动保护改进算法[J]. 陕西电力, 2016, 44(1): 5-10.  
XIA Jingde, WANG Bo, LU Liang, et al. Improved algorithm for transformer differential protection with ability to resist inrush current interference[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(1): 5-10.
- [20] 谭靖, 肖浩, 李艳, 等. 基于暂态仿真的主变涌流对线路零序过流保护的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 149-153.  
TAN Jing, XIAO Hao, LI Yan, et al. Study on the influence of the main transformer flow on the zero sequence overcurrent protection based on transient simulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 149-153.
- [21] 张雪松, 何奔腾. 变压器和应涌流对继电保护影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 12-17.  
ZHANG Xuesong, HE Benteng. Influence of sympathetic interaction between transformers on relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 12-17.
- [22] 方愉冬, 徐习东, 朱炳铨. 变压器涌流对零序电流保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 115-118.  
FANG Yudong, XU Xidong, ZHU Bingquan. Influence of transformer inrush on zero-sequence current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 115-118.
- [23] 郑彬, 滕文涛, 项祖涛, 等. 基于变压器电流直流分量衰减特性的励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2020-2026.  
ZHENG Bin, TENG Wentao, XIANG Zutao, et al. A novel inrush current distinguishing scheme based on DC component decaying characteristics of transformer current[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2020-2026.
- [24] 丁苏阳, 林湘宁, 翁汉珺, 等. 换流变零差保护在故障切除恢复性涌流期间的误动风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊 1): 12-20.  
DING Suyang, LIN Xiangning, WENG Hanli, et al. Mal-operation risk analysis on zero-sequence differential protection of converter substation during existence of recovery inrush due to fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 12-20.

收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2018-12-10

作者简介:

刘尧(1992—), 男, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 540327446@qq.com

韩伟(1975—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护技术、智能电网技术等。

(编辑 周金梅)