

DOI: 10.7667/PSPC160917

## 变压器励磁涌流中的信息熵识别

张召峰, 孙庆森, 张海峰, 王猛

(国网泰安供电公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 针对励磁涌流具有间断角的尖顶波和故障电流以正弦波为主, 充分利用两种不同波形下具有不同的电流能量熵值, 提出了基于信息熵的变压器励磁涌流识别方法。该方法对变压器电流离散采样后进行差分滤波, 设置启动电流后计算电流能量熵, 通过自适应阈值有效地识别是否发生励磁涌流。仿真结果表明, 该方法不仅能有效地区分故障电流和励磁涌流, 而且可以进一步判别电流的饱和程度。

**关键词:** 变压器; 励磁涌流; 信息熵; 识别; 自适应阈值

### Identification of information entropy in transformer inrush current

ZHANG Shaofeng, SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, WANG Meng

(State Grid Tai'an Power Supply Company, Tai'an 271000, China)

**Abstract:** Since inrush current has the steep wave with intermittent angle and the faulted current is based on the sine wave, there are different values of current power entropy. To fully use this characteristic, the information entropy to identify the inrush current of transformers is proposed. Transformer current experiences discrete sampling and differential filtering successively in the method. Starting current is set to compute entropy of current power. And then the adaptive threshold is used to identify inrush current. The simulation results demonstrate the method not only effectively identifies inrush current and faulted current, but also identifies the degree of current saturation.

**Key words:** transformer; inrush current; information entropy; identification; adaptive threshold

## 0 引言

作为电力系统最重要的元件, 变压器的平稳运行直接关系到整个电力系统的稳定, 但从全国电网装置运行情况统计结果来看, 变压器在电力工业实际运行中却是最容易出现问题设备之一<sup>[1]</sup>, 其中故障率高(也包括变压器自身设备或许没问题, 变压器继电保护出现误动、拒动等二次系统的各种故障)的一个重要原因就是不同于输电线路, 大型变压器基本上都采用铁芯以增加磁感应强度, 但铁芯磁性效应造成的励磁涌流成为变压器保护和监控等应用系统的难点<sup>[2]</sup>。

目前识别励磁涌流的方法有相电流二次谐波、相电流间断角、相电流正负半波不对称、本相直流助增二次谐波、利用谐波变化趋势实时调整制动、波形综合分析、高速采样点数据直接识别等方法, 但由于电力变压器内部材料结构以及现场运行暂态过程的复杂性, 以及电力互感器饱和等因素影响, 当前研究方法在区分励磁涌流与变压器内部故障电

流方面仍然不尽如人意<sup>[3-6]</sup>。

在信息论中, 信息熵被用来衡量一个随机变量出现的期望值。由于信息熵在随机系统应用方面的有用性, 该概念很快被用于通信以外的其他领域, 包括电力系统的负荷预测、电力信号识别等领域, 都取得了较好的应用效果<sup>[7-9]</sup>, 本文将探索利用信息熵来识别变压器励磁涌流的新方法。

## 1 信息熵理论

香农最初将信息理论应用于通信网络的信道分析, 该理论的核心是针对信息的不确定性, 提出了信息熵的概念, 指出信息就是用来消除(随机)不定性的东西, 信息量的大小, 用所消除的不定性的东西来计量。其核心内容就是研究如何对信息传递过程中对于信源状态的不确定性进行描述和定量分析, 而信息熵则表征了信号传输过程中损失的信息量<sup>[10]</sup>。

由一个离散随机变量组成的特定信源, 出现的概率  $p$ , 信息熵理论应用概率论知识和逻辑方法推

导出该信源的信息熵表达式为

$$H_{n+1} = -\sum_{i=1}^{n+1} p_i \ln p_i \quad (1)$$

信息熵从平均意义上表征信源总体信息测度的一个量，同时又是信源输出信息的不确定性和事件发生的随机性的量度。如果信息熵越大，表征信息量越多，信号越不确定。

信息熵的该特性对于电力系统信号分析领域具有非常广泛的用途，可以应用信息熵来进行电流、电压等电力信号的奇异性检测，或者电气信号的不规则程度的识别。

对所需分析的电力信息进行离散化后，进行信息熵计算，进而根据运算得到的熵值进行该信号的形状分析，如果该信息的熵值越大，说明该信息的分布越均匀，该信号的不规则性越小，即该信号的奇异性越小。反之则说明奇异性成分越多(或不规则性越大)。因此，可用信号熵来表征电流等电力信号的总体特征或者不确定程度，通过建立适当的电气量信号模型，并计算得到其熵值，从而对该信号的类型进行有效的分析和识别。

### 2 识别原理

当空投变压器或外部故障切除电压恢复过程中，由于变压器导磁材料磁化曲线的非线性特点，在一定电压下，可产生与短路电流大小差不多、高达 5~10 倍额定电流的励磁涌流。变压器磁路将经历一个从不饱和到饱和的过程，由于铁心的饱和关系使励磁电流的波形畸变，励磁涌流的波形畸变程度取决于铁芯的饱和程度，铁芯的饱和程度越高，励磁涌流的畸变程度越大。

当变压器由于铁芯饱和而出现励磁涌流时，电流将呈现非常明显的非正弦特征，即励磁涌流波形包含了一个具有间断角的尖顶波<sup>[11]</sup>，如图 1 所示，这与正弦波形存在着较大的差异。

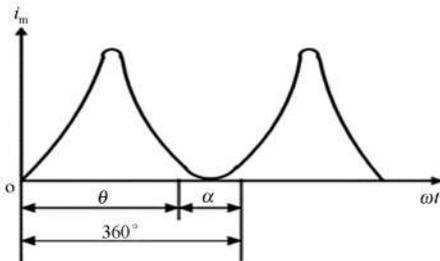


图 1 变压器励磁涌流

Fig. 1 Overall framework of hardware

故障电流基本为基频正弦波，而励磁涌流的波形会呈尖顶波等特征，即励磁涌流会产生明显的畸

变(幅值突变)情况，从信息熵的角度分析，变压器区内短路电流虽然数值很大，但其仍然保持正弦波的形状，其基本的波形没有出现励磁涌流所出现的畸变情况。

由此可见：区内短路电流对应的信息熵值，跟励磁涌流对应的信息熵值，会有明显的不同。因此，利用信息熵值能将变压器励磁涌流与内部故障电流有效地区分开来。

变压器电流对应的信息熵值越小，说明该电流信号中概率分布越不均匀、信号的奇异性越大，可以识别出该电流为励磁涌流；反之，即使变压器电流的实际数值很大，但采用信息熵方法计算得到的相应信息熵值较大的话，说明该电流信号的概率分布比较均匀、信号的奇异性较小，则可识别该电流为变压器内部故障电流，而非励磁涌流。

同时，将励磁电流进行离散量化后，采用信息熵算法后，除了可以量化励磁电流在时间坐标轴分布趋势上的全局特征以外，还可以通过励磁电流的统计情况进一步分析得知励磁电流的畸变程度。如果励磁电流的信息熵值越大，则说明该电流分布越平均、奇异性越小，励磁涌流的饱和程度越小；反之，如果励磁电流的信息熵值越小，则说明该电流分布差异越大、信号畸变程度越大，励磁涌流的饱和程度越大。

采用信息熵方法，能充分利用励磁涌流具有间断角的尖顶波这一明显特征，与以正弦波形为主的变压器区内故障电流有效地区别开来，具有很高的识别度和区分度。

### 3 具体识别方法

根据变压器励磁涌流和区内故障电流的信号波形不同，具有不同的信息熵值，通过基于变压器电流信号信息熵的方法，有助于快速、准确地判断变压器是否发生励磁涌流。该方法实现简单，只需对所采集的电流信号进行电流能量的信息熵计算，若该熵值小于所设定的阈值，则说明该电流信号畸变程度较大，判断为励磁涌流的可能性就较高。

所选取的阈值大小对采用信息熵进行励磁涌流识别具有关键意义，常用的方法是根据仿真实验结果或现场运行经验来获得，但这种针对某一类型甚至某一特定变压器所获得的具体数值，不一定适用于所有的变压器。

为了克服阈值方法存在的问题，本文采用自适应阈值，通过采用最小化方差和的方法来获得优化的全局阈值，阈值的获得方法请参考文献[12]的具体计算方法。

基于自适应阈值的变压器励磁涌流的能量信息熵识别方法, 在变压器电流离散采样基础上, 选择合适的数据窗进行能量信息熵值计算, 并与自适应阈值比较, 判断是否发生励磁涌流, 同时, 还可以借助具体的熵值大小更深入判断变压器保护程度。具体识别流程如图 2 所示, 主要步骤如下。

1) 变压器电流的采样, 按一定的采样频率对电流进行数字化采集, 由于原始电流数据包含各种噪声, 首先进行滤波处理去除电流信号中夹杂的高频噪声分量, 进而形成按序排列的离散化数据流  $\{i_k\}(k=1, 2, \dots)$ 。

2) 为了减少电力系统直流分量的影响, 按工频间隔进行差分计算, 形成差分后的电流序列  $\{id_k\}(k=1, 2, \dots)$ , 即当前电流减去前一个工频周波对应的电流。由于励磁涌流并不以工频周期性变化, 因此, 差分算法不会减少励磁电流的信号畸变程度, 即不会增大后续处理的信息熵值。

3) 设置启动电流, 用以选择合适的数据窗电流数据计算电流能量信息熵。电力二次系统以一定的采样频率不断地采集电流信息, 会产生大量离散的电流数据, 对所有的电流数据进行信息熵计算将超出一般电力智能电子设备(IED)等装置的处理能力。

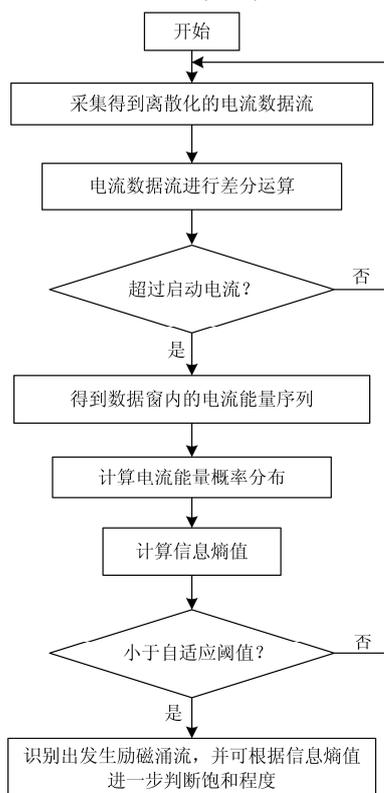


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithmic process

由于发生励磁涌流或非发展性故障时, 采样电流都会发生突变的情况, 因此可以通过简单地设置启动电流的预判方法, 只对发生突变的电流数据进行信息熵值计算, 既可以避免对所有的电流数据进行信息熵运算带来的巨大耗时; 又不会遗漏可能存在的励磁涌流情况。

预判算法同时考虑算法实现的简单性, 而且能有效避免噪声干扰导致的误启动。将步骤 2) 得到的差动电流数值  $\{id_k\}$  与事先设定的阈值(阈值可采用变压器保护的启动电流的整定值)做比较, 当连续 3 个  $\{id_k\}(k=1, 2, 3)$  大于该阈值时, 以第 1 个电流数据为数据窗的开始, 选择其后顺序的一个周波的电流数据组成所需计算信息熵的数组  $\{iw_k\}(k=1, 2, \dots, n)$ , 其中,  $n$  为该变压器电流一个周波的采样点数。

4) 根据步骤 3) 得到的  $\{iw_k\}(k=1, 2, \dots, n)$  电流数组, 计算对应的平方值, 得到的电流数值的能量  $I_k$ , 即,  $I_k = (iw_k)^2$  得到电流能量序列  $\{I_k\}(k=1, 2, \dots, n)$ 。

5) 通过电流能量序列  $\{I_k\}(k=1, 2, \dots, n)$ , 计算得到采样数据窗内变压器各个电流数据对应的概率分布, 即每个采样点对应的电流能量概率分布情况:

$$P_k = I_k^2 / \sum_{k=1}^n I_k \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

6) 根据信息熵的定义, 将步骤 5) 得到的概率分布代入到信息熵的计算公式, 得到整个数据窗内电流能量的信息熵值:

$$H(I) = -\sum_{k=1}^n P_k \ln P_k \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

7) 根据参考文献[12]的最小化方差和的方法计算得到自适应阈值, 若步骤 6) 获得的电流能量的信息熵值小于该自适应阈值, 则识别为发生励磁涌流现象。而且可以根据该信息熵值进一步分析励磁涌流的饱和程度, 若步骤 6) 获得的信息熵值越小, 则说明该电流信号畸变程度越大, 励磁涌流的饱和程度越大。

## 4 仿真与验证

在 PSCAD/EMTDC 软件, 对本文算法进行仿真计算, 建立等值电源  $E_S$  连接到变压器的模型, 如图 3 所示。其中, 变压器模型采用 PSCAD/EMTDC 软件中的 UMEC 变压器模型进行模拟。变压器 UMEC 模型充分考虑到铁芯的几何外形和相间的相互耦合因素。UMEC 模型采用 V-I 曲线对铁芯非线性特性进行模拟, 与实际变压器运行情况更为接近。

变压器具体参数包括: 绕组额定电压为 525 kV/

35 kV/230 kV, 容量为 100 MVA, 频率为 50 Hz, 短路电抗为 0.2 p.u., 空载损耗为 0.000 07 p.u., 短路损耗为 0.008 p.u.<sup>[13]</sup>。

为了与当前电力系统自动化领域最全面的 IEC 61850 协议一致, 变压器电流信号的采样频率统一为每周波 80 点。

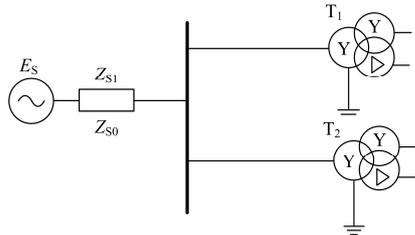


图3 变压器仿真模型

Fig. 3 Transformer simulation model

#### 4.1 励磁涌流和故障电流

经典的二次谐波和间断角等方法在区分单纯故障和励磁涌流方面准确率相对较高, 难点在于空载合闸与空载合闸于故障变压器情况。

因此, 首先分别模拟发生变压器区内故障和空投变压器产生励磁涌流的情况, 其中, 变压器故障包括相间故障、接地故障和匝间故障三种常见的变压器故障类型。在上述各种不同情况下, 分别按照每周波 80 点进行采样, 并从电流突变时刻开始, 截取对应的数据窗。注意到所采集的变压器原始故障电流采样数据中, 除了基波分量外, 还包括了衰减的直流分量、高频分量及各次谐波等, 由于本文算法在计算熵值时先采用了差分算法, 对滤除变压器故障电流的直流分量起到了一定作用。

根据本文的电流能量熵值方法计算具体的数值, 由表 1 可见, 相间故障、接地故障和匝间故障三种故障情况下, 变压器电流能量熵值比较接近, 说明波形的变化程度较为接近; 而励磁涌流时的电流波形畸变程度大, 体现在其能量熵值较小。通过与自适应阈值比较, 能有效地区分励磁涌流和区内故障电流两种不同的情况。

表 1 励磁涌流和故障电流的熵值

Table 1 Entropy value of inrush current and fault current

仿真情况	相间故障	接地故障	匝间短路	自适应阈值	励磁涌流
熵值	0.653	0.625	0.678	0.453	0.346

#### 4.2 增加直流偏磁

在能准备区分区内故障电流和励磁涌流基础上, 增加直流偏磁的仿真实验。磁化曲线采用 ODFS-250 MVA/500 kV 变压器的实测磁化曲线, 选取饱和程度较深的点进行仿真, 由于直流偏磁改变

了变压器的工作点, 使原来的磁化曲线工作区的一部分移至铁心磁饱和区, 加剧了励磁电流的畸变程度, 信号抖动更加激烈, 对应的励磁涌流的能量熵值也更小, 仿真计算结果表明饱和程度较深时变压器电流的熵值比较接近, 数值集中在 0.287 附近, 与表 1 的变压器励磁涌流时的熵值 0.346 有较好的区分。

### 5 结语

变压器励磁涌流一直是困扰电力学术研究和工程实践的关键问题之一, 准确、便捷地识别出变压器涌流具有重大意义。本文提出一种采用信息熵理论检测变压器励磁涌流的新方法。该方法可以在电力现场各种干扰下准确地区分变压器区内故障和励磁涌流, 具有原理清晰、运算量低、识别精度高等一系列优点。

### 参考文献

- [1] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.  
XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.
- [2] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.  
SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.
- [3] 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.
- [4] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [5] 张炳达, 黄杰. 基于差分双正交小波熵的变压器励磁涌流识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 9-13.  
ZHANG Bingda, HUANG Jie. Identification of transformer inrush current based on difference biorthogonal wavelet entropy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 9-13.

- [6] 孙洋, 黄家栋. 基于新型半周期波形正弦特征的励磁涌流判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 54-58, 68.  
SUN Yang, HUANG Jiadong. Novel theory of identifying inrush current based on half-cycle sine waveform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 54-58, 68.
- [7] 李志民, 李卫星, 李勃龙. 熵原理及其在电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(3): 37-39.  
LI Zhimin, LI Weixing, LI Bolong. Entropy principle and its application in power system reliability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(3): 37-39.
- [8] 张庆宝, 程浩忠, 刘青山. 基于最大熵原理的中长期负荷预测综合模型的研究[J]. 继电器, 2006, 34(3): 24-27.  
ZHANG Qingbao, CHENG Haozhong, LIU Qingshan. Comprehensive model of mid-and long-term load forecasting based on maximum entropy principle[J]. Relay, 2006, 34(3): 24-27.
- [9] 郝晓弘, 田江博, 陈伟, 等. 基于信息熵和数学形态学的电压跌落持续时间检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 30-35.  
HAO Xiaohong, TIAN Jiangbo, CHEN Wei, et al. Detection method of voltage sag duration based on information-entropy and mathematical morphology[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 30-35.
- [10] 吴大正, 杨林耀, 张永瑞, 等. 信号与线性系统分析[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [11] 和敬涵, 李静正, 姚斌, 等. 基于波形正弦度特征的变压器励磁涌流判别算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 54-59.  
HE Jinghan, LI Jingzheng, YAO Bin, et al. A new approach of transformer inrush detected based on the sine degree principle of current waveforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 54-59.
- [12] 陈伟, 张岩, 郭建鹏, 等. 基于自适应阈值信息熵的电压跌落持续时间检测方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(增刊 1): 327-332.  
CHEN Wei, ZHANG Yan, GUO Jianpeng, et al. Detection method of voltage sag duration based on information-entropy and self-adaptive threshold[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(S1): 327-332.
- [13] 焦在滨, 行武, 王钊, 等. 变压器励磁涌流负序二次谐波特征及机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 146-151.  
JIAO Zaibin, XING Wu, WANG Zhao, et al. Features and mechanism of negative-sequence second harmonics of magnetizing inrush current in transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 146-151.

收稿日期: 2016-06-21; 修回日期: 2016-08-19

作者简介:

张召峰(1972—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、继电保护;

孙庆森(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高电压与绝缘技术、继电保护; E-mail: 13953889522@163.com

张海峰(1970—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、变电运行。

(编辑 张爱琴)