DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210232

利用双重特征量鉴别变压器励磁涌流的高阶统计原理

张员宁[1]，黄景光[1]，张艳华[1]，于 楠[2]，陈 勇[1]，翁汉琍[1]，贾永波[3]，李振兴[1]

(1. 三峡大学电气与新能源学院，湖北 宜昌 443002；2. 广西电网有限责任公司北海供电局，广西 北海 536000；
3. 国网河南省电力公司信阳供电公司，河南 信阳 464000)

摘要：励磁涌流是制约变压器差动保护成功率的主要原因之一，为此提出一种基于 Jarque-Bera 系数来识别励磁涌流的新策略。对变压器区内故障电流和励磁涌流波形的整体形态进行特征分析，利用两者波形正弦度不同所导致的正态性差异，结合 Jarque-Bera 算法在正态性检验领域中的优势，对变压器差动电流进行绝对值处理后求取杰氏系数，根据该系数大小选取合适的阈值来辨识励磁涌流和故障差流。仿真测试了变压器各种工况下的差流波形。与二次谐波制动方案进行对比分析，表明所提方法原理清晰，且具备良好的抗干扰性能，即使在电流互感器饱和的情况下，也能迅速、准确地识别出励磁涌流。最后，通过现场试验录波数据分析，进一步证明了该方法的正确性。

关键词：Jarque-Bera 系数；变压器；励磁涌流；故障差流；电流互感器饱和

High order statistical theory for identifying transformer inrush current by using dual characteristics

ZHANG Yuanning[1], HUANG Jingguang[1], ZHANG Yanhua[1], YU Nan[2], CHEN Yong[1], WENG Hanli[1], JIA Yongbo[3], LI Zhenxing[1]

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Beihai Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Beihai 536000, China;
3. Xinyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Xinyang 464000, China)

Abstract: Inrush current is one of the main factors restricting the success rate of transformer differential protection. This paper proposes a new strategy for identifying the inrush current based on the Jarque-Bera coefficient. The overall morphology of the fault current and inrush current waveforms is analyzed. The difference in normality caused by the different sine degrees of the two waveforms is used. Combined with the advantages of the Jarque-Bera algorithm in the field of a normality test, the absolute value of the transformer differential current is processed to obtain the Jarque-Bera coefficient. Depending on the size of the coefficient, the appropriate threshold is selected to identify the inrush and fault differential currents. The differential current waveform of the transformer under various working conditions is simulated and tested. The comparison with the second harmonic braking scheme shows that the proposed method offers a clear working principle and good anti-interference performance, and can quickly and accurately identify the inrush current even when the Current Transformer (CT) is saturated. Finally, the correctness of this method is further proved by the analysis of field test wave data.

This work is supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 52077120).

Key words: Jarque-Bera coefficient; transformer; magnetizing inrush current; fault current; CT saturation

0 引言

变压器在电力系统中传输大量的功率，是电力系统中最重要的组件之一[1]。据统计，电力系统故障中几乎有 10% 发生在变压器中，其中 70%是由变压器绕组短路引起的。而差动保护被广泛采用以保护变压器免受内部故障的困扰，但由于变压器铁心在空载合闸时极易达到饱和状态，将导致电流瞬间增大，可能会致使保护装置失灵，发生误动[2-5]。因此，如何正确、快速地区分励磁涌流和故障差流，成为差动保护长期以来的研究重点。

目前在工程实践中，差动保护通常采取二次谐波制动原理[6-7]。然而，大型电力变压器所采用的新型低损耗非晶合金材料可能产生较低的二次谐波含

基金项目：国家自然科学基金项目资助(52077120)

量，在励磁涌流期间最少甚至小于 7%。此外，在发生严重的内部故障时，由于受长距离输电线路无功补偿装置和分布电容的影响，可产生超过 15%的二次谐波。结果，二次谐波制动原理可能面临失效的窘境。

近年来，世界各国科研工作者为了提高变压器差动保护方案的可靠性和灵敏性，已提出许多判别励磁涌流的方法，大致可分为两大类：(1) 利用神经网络[8]、数学形态[9]、空间重构[10]等数学工具对波形特征加以提取的方法。尽管这些方法具有很高的分类精度，但是较长的计算时间和较高的采样频率降低了保护的速动性，实时性较差，不利于工程实施。(2) 磁通特性识别法[11]、回路方程法[12]、瞬时电感法[13]等基于变压器物理本质的新型原理。这些原理需要变压器某些电路参数，然而在大多数情况下，通过实验确定它们并不容易，且引入电压互感器，增加了保护系统的整体投入成本。因此，考虑研究一种简单易行且仅使用电流量的新方法，以提高变压器差动保护方案的可靠性，避免误动行为的发生。

为解决上述问题，本文引入正态性检验领域里的算法对故障差流和励磁涌流的波形特征进行量化计算，提出基于 Jarque-Bera 系数的变压器励磁涌流识别新策略。该方法借助正态检验技术分析电流波形的时域分布特征，通过对比两者系数的不同来有效区分励磁涌流和故障差流。研究结果表明，新判据整定简单，与变压器规格和参数无关，且动作迅速，具有较强的抗干扰能力，即使在 CT 饱和的情况下，也能正常工作。现场合闸的励磁涌流试验分析进一步验证了文中所提理论的可行性。

1 基本原理

1.1 Jarque-Bera

正态分布具有两个显著特征，即对称性和正态峰。在统计学中，Jarque-Bera 算法是一种拟合优度检验，综合考量样本数据是否具有与正态分布匹配的偏度和峰度[14]。其计算公式为

$$J=\frac{N}{6}\left[\left(\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i-\bar{X})^3}{\sigma^3}\right)^2+\frac{1}{4}\left(\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i-\bar{X})^4}{\sigma^4}-3\right)^2\right] \tag{1}$$

式中：J 为 Jarque-Bera(杰氏)系数；X_i 为离散型随机变量 X 可能的取值；$\bar{X}$ 为该样本的平均值；σ 为该样本的标准差；N 为该样本数据的个数。

杰氏系数通过量化数据序列的概率分布曲线相对于正态分布偏离的程度，在证券市场[15]、气象分析[16]、信号定位[17]等诸多领域得到广泛应用。在这些应用中，无一例外，都是利用 Jarque-Bera 算法对随时间变化的离散数据进行计算，根据其时域分布特征所导致的系数差异，对目标进行分类识别，从而达到预期目的。

基于上述分析，在继电保护领域中，来自 CT 的传变电流，也可以看作是以时间为自变量、以幅值大小为因变量的离散数据序列。从图 1 可以看出，任一状态变量的改变，将导致杰氏系数随之发生变化。若变量满足正态分布，杰氏系数近似为 0[18]。杰氏系数越大，则表示变量与正态分布的差异性越大，故杰氏系数可以用来检验变量的正态性[19-20]。因此，可以利用差流波形的时域分布特征关联杰氏系数的实时变化情况，来实现对励磁涌流进行识别的构想。

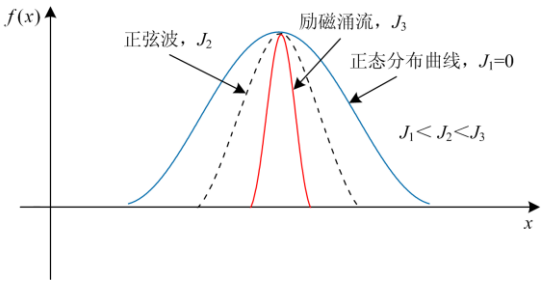


图 1 不同曲线的杰氏系数

Fig. 1 Jarque-Bera coefficients of different curves

1.2 励磁涌流识别思路

故障电流是衰减的直流分量与正弦分量的叠加，虽然存在非周期分量，但它在一个周期内衰减幅度较小，如图 2 所示，所以故障电流基本上仍然保持正弦特性[21]。取绝对值后的正弦波周期变为原来的一半，前半波和后半波基本对称，经计算发现其任意半周期和全周期杰氏系数相等且为某常数。

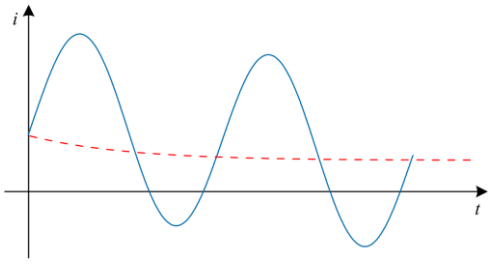


图 2 考虑非周期分量的故障电流波形

Fig. 2 Fault current waveform considering aperiodic component

变压器在空载合闸或区外故障切除重新投入时，由于变压器铁心磁化曲线的非线性特点，可能会产生数值很大的电流，严重时可超过变压器额定

电流的 6~8 倍，这就是励磁涌流[22]。在此期间，变压器磁链将经历从不饱和到饱和的阶段，致使励磁涌流波形发生严重畸变，产生大量的高次谐波分量及非平稳波峰，且相邻波形间存在明显间断，呈现出尖顶波的特点，如图 3 所示，故与正弦波形相比差异显著[23]。而励磁涌流半周期与全周期杰氏系数之间具有明显差距，且都不为常数，与正弦波杰氏系数持续稳定在某常数附近形成很大差异。

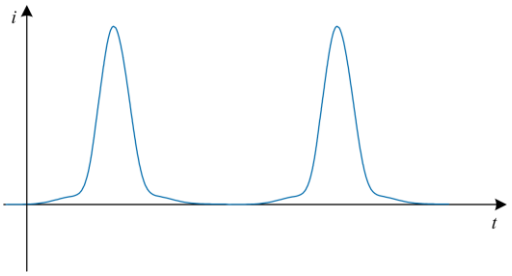


图 3 典型励磁涌流波形

Fig. 3 Typical inrush current waveform

根据以上分析可知，波形的正弦性差异对应的正态特征也不一样。因此，本文引入 Jarque-Bera 算法来量化差流波形的正态性，取差动电流在一个工频周期内的采样数据，然后对所得样本进行绝对值处理后求取杰氏系数。研究发现，变压器区内故障差流与励磁涌流所对应的杰氏系数差异显著，充裕度足，故本文利用该差异性来辨识励磁涌流与故障差流。

2　方法实现

2.1　数据窗长的选择

Jarque-Bera 算法主要基于波形的整体特征进行判断，出于去差异化的思想，对波形进行绝对值处理，使其都偏向于时间轴正方向。取绝对值以后的正弦波周期变为原来的一半，其任意半周期杰氏系数依然与全周期一样。而励磁涌流半周期与全周期杰氏系数差异显著，无法反映其尖顶波和间断角特征。考虑到波形的整体性，本文采用 20 ms 的滑动数据窗来执行 Jarque-Bera 算法，据此可对差流特征的变化进行实时判别。

2.2　区间划分个数 N 的设置

由式(1)可知，杰氏系数的大小与数据窗的区间划分个数 N 有关，并且最终会影响到 Jarque-Bera 算法的灵敏性。从理论上来讲，N 的取值越大，对波形的细微变化刻画的也就越精确，反映到杰氏系数上的差异也就越明显，相应判据的灵敏性得到提高。但是如果 N 的取值过大，则会导致波形的差异被极度放大，从而影响到保护的动作性能[24]。因此，N 值的选取应该符合实际情况的需要，根据香农采样定理，N 的取值不可超过一个数据窗的采样点数(若不遵循此定理，则必然有一些区间没有采样点落入，从而不能反映波形真实的分布特征)。在现代微机保护中，N 值的选取通常在 1/2 和 1 倍的数据窗采样点数之间。本文中数据窗为 20 ms，为了保持论文判据的统一性，仿真参数设置为跟现场试验一样的采样频率 5 kHz，即一个数据窗采样点数为 100，故设置 $N=100$。

2.3　门槛值 K_{set} 的确定

变压器励磁涌流和区内故障差流波形特征不同，具有不同的杰氏系数，设定 K 指示波形的正态性来识别励磁涌流与故障差流，可得保护判据为

$$K \geqslant K_{set} \tag{2}$$

若满足上述关系，则判定为励磁涌流；否则判定为区内故障差流。

式(2)中，考虑到衰减周期分量、噪声、CT 饱和等因素的影响，留出一定的裕度。据此，引入可靠性系数 K_{rel} 来确定门槛值，整定原则如下：

$$K_{set} = J_{theory} \times K_{rel} \tag{3}$$

由于 Jarque-Bera 算法自带归一化功能，使得故障差流的 J_{theory} 只与波形的整体形状有关，不同幅值的工频正弦波可以具有相同的杰氏系数(在 5 kHz 的采样频率下，其理论值在 9 左右)。因此，保护整定值的选取具有普遍意义，与变压器规格和参数无关。令 $J_{theory}=9$，取 $K_{rel}=1.3$，则 $K_{set}=11.7$。后续大量仿真结果表明，所设门槛值是合理的，能够准确区分励磁涌流与故障差流。

3　仿真研究

通过 Matlab/Simulink 仿真平台，建立如图 4 所示的仿真模型。主要参数如下：变压器采用 Y/d-11 接线，额定容量为 60 MVA，额定电压为 220 kV/110 kV，变压器绕组电阻为 0.02 p.u.，总漏感为 0.08 p.u.，勾选饱和铁心。设定仿真总时长为 0.4 s，采样频率为 5 kHz。仿真结果均以 A 相为例，电流波形均采用标幺值。

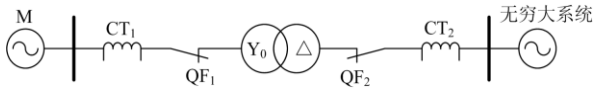


图 4 仿真模型

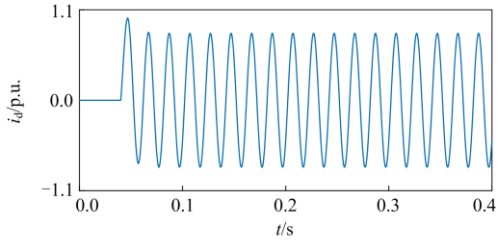
Fig. 4 Simulation model

3.1 保护区内故障

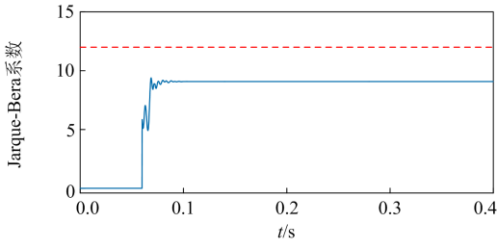
算例 1：三相接地短路

t = 0.04 s 时，变压器△侧出口处，发生三相接地故障，如图 5(a)。

算例 1 中，图 5(a)、图 5(b)分别是 0~0.4 s 时间段差流波形及其计算出的杰氏系数。以下算例图形含义相同，不再重复说明。从 J 值序列可以看出，A 相在故障后一个周波输出第一个 J 值，此值小于门槛值 K_{set} 且最终稳定在 9 左右保持不变，不满足式(2)，判别为故障差流，故此过程只耗费一个数据窗的时间，即 20 ms 后保护可正确动作。



(a) 差流波形



(b) Jarque-Bera系数变化曲线

图 5 三相接地故障差流波形及杰氏系数

Fig. 5 Differential current waveform and its Jarque-Bera coefficient of three-phase grounding fault

3.2 典型波形仿真

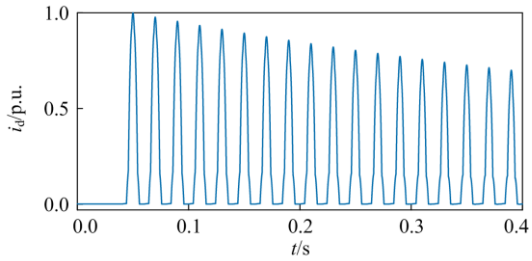
算例 2：单向励磁涌流

t = 0.04 s 时，变压器空载合闸，各相铁心剩磁均为 0，A 相初相角为 0°，如图 6(a)。

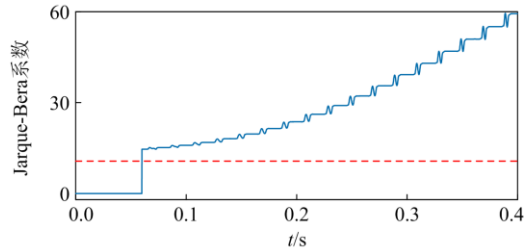
算例 3：对称性励磁涌流

t = 0.04 s 时，变压器空载合闸，各相铁心剩磁均为 0，A 相初相角为−120°，如图 7(a)。

算例 2 和算例 3 的仿真结果分别如图 6(b)和图 7(b)所示，可以看到前 20 ms 内由于数据不够一个数据窗，没有结果输出。当检测数据达到一个周波后，无论是单向还是对称性励磁涌流，J 值序列很快激增，在 0.06 s 以后均稳定于门槛值以上，即 $K \geqslant 11.7$，判别为涌流情况。因此，该过程判断时间只需要一个周期，即空载合闸后 20 ms 保护能可靠闭锁。



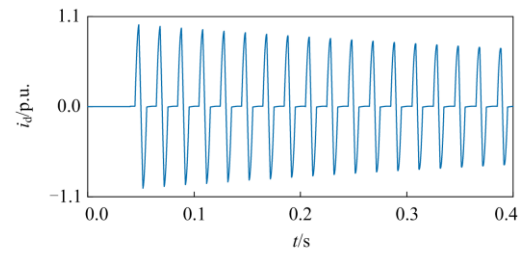
(a) 差流波形



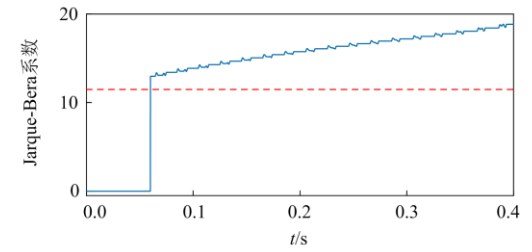
(b) Jarque-Bera系数变化曲线

图 6 单向励磁涌流波形及杰氏系数

Fig. 6 Single direction inrush current waveform and its Jarque-Bera coefficient



(a) 差流波形



(b) Jarque-Bera系数变化曲线

图 7 对称性励磁涌流波形及杰氏系数

Fig. 7 Symmetrical inrush current waveform and its Jarque-Bera coefficient

3.3 空投故障变压器

算例 4：涌流叠加轻微故障

t = 0.04 s 时，变压器△侧 A 相绕组 5%处，发生匝间故障合闸，如图 8(a)。

空投于带轻微匝间故障的变压器时，故障电流与励磁涌流同时存在，如图 8(a)所示，此时故障电流较轻微，所以电流波形前期主要表现为励磁涌流

特征，后期才转变为区内故障电流特征[25-26]。这时利用二次谐波制动原理保护极有可能出现误判，将影响保护的速动性。

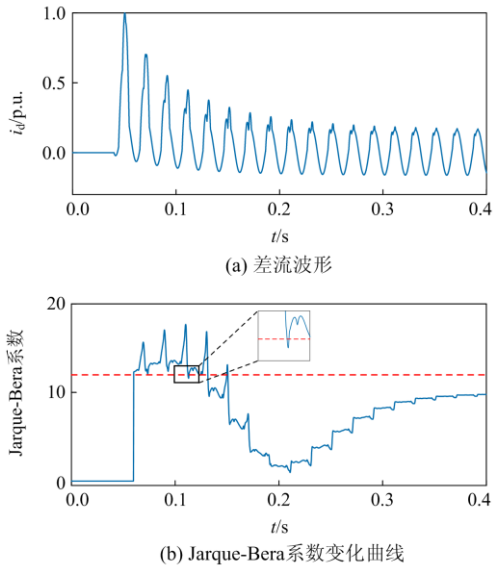


图 8　带匝间故障合闸差流波形及杰氏系数

Fig. 8 Switching differential current waveform with turn-to-turn fault and its Jarque-Bera coefficient

算例 4 中，从 J 值序列可以看出，其值在合闸后 72 ms 左右低于门槛值，保护正确动作。虽然随后有一部分 J 值高于门槛值，但可以在继电保护装置中增加自保持逻辑，使得保护接收到动作指令后继续维持原有状态不返回，以此来保证判据的可靠执行。而在此种情况下，二次谐波判据受较大涌流特征的影响，在带故障合闸后，差动电流二次谐波含量较高，如图 9 所示，大约延时 230 ms 后才开放保护[27]。因此，对于变压器带故障合闸，采用本文所提方法可在更短时间内开放保护，避免了二次谐波制动原理闭锁或延迟开放保护的情况。

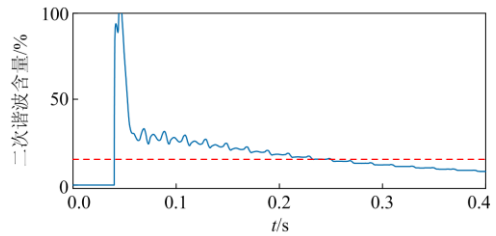


图 9　匝间故障合闸时二次谐波含量

Fig. 9 Second harmonic ratio of switching current under turn-to-turn fault

3.4　电流互感器饱和场景

电子式互感器代替传统互感器是解决 CT 饱和的有效方法，然而其在电力系统中运行时间较短，易受外界噪声干扰，故传统电磁式互感器仍然在电力系统中占据主导地位。因此，考虑到目前的实际情况，仍需要考虑 CT 饱和对判据的影响。

算例 5：区内故障伴随一侧 CT 饱和

t = 0.04 s，变压器△侧出口处，发生三相接地故障，并且伴随 Y 侧 A 相 CT 饱和，如图 10(a)。

本算法主要基于波形的整体特征进行判断，从图 10(b)可以看出，在第一个周期内波形畸变严重，J 值序列随之发生剧烈波动。当故障发生 20 ms 后，差流波形的形态趋于稳定，呈现出周期性变化，故 J 值序列也保持不变，相比于正弦波在 9 附近，虽有所上升，但依然低于门槛值，保护正确动作。

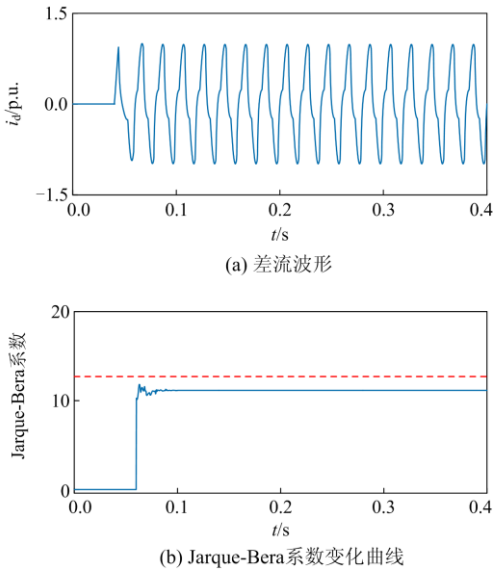


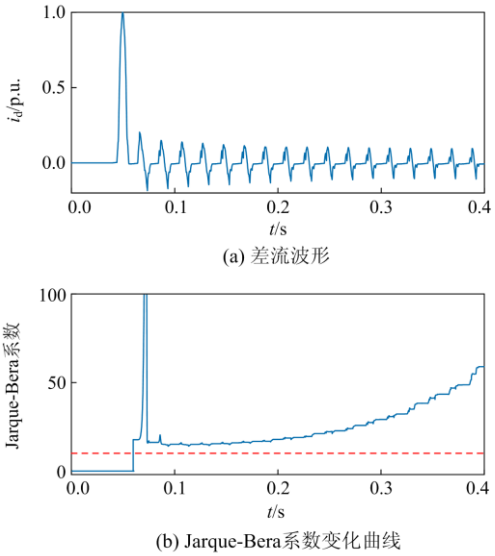
图 10　内部故障伴随 CT 饱和波形及杰氏系数

Fig. 10 Internal fault accompanied by CT saturation and its Jarque-Bera coefficient

算例 6：空载合闸伴随一侧 CT 饱和

t = 0.04 s，空投变压器，并且伴随 Y 侧 A 相 CT 饱和，如图 11(a)。

CT 正常传变时励磁涌流波形具有最普遍的特征，从图 11(a)可以看到，当 CT 饱和以后，大量涌流进入励磁支路，发生磁能储藏，使得本该处于间断区域的波形，由于励磁支路开始释放磁能，产生反向二次电流，导致间断部分连续[28]。尽管如此，其在过零处有畸变，正负半轴不对称，此时波形往往会表现出更加明显的尖顶特性，绝对值处理以后单个波形的正弦相似性依然很低。因此，可采取本文所提出的 Jarque-Bera 系数判别法，其结果如图 11(b)所示，可以看到 J 值一直稳定高于门槛值，保护被可靠闭锁。



(a) 差流波形

(b) Jarque-Bera系数变化曲线

图 11 励磁涌流伴随 CT 饱和波形及杰氏系数

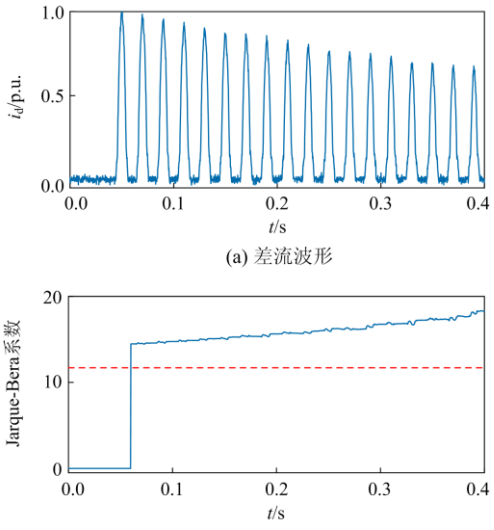
Fig. 11 Inrush current accompanied by CT saturation and its Jarque-Bera coefficient

3.5 抗噪性能分析

在算例 1 的故障差流和算例 2 的单向励磁涌流中加入 25 dB 的白噪声，以检验本方法的抗噪能力。

图 12(a)和图 13(a)分别为在图 6(a)中 A 相励磁涌流和图 5(a)中 A 相区内故障电流中加入信噪比为 25 dB 高斯噪声后的电流波形。图 12(b)和图 13(b)分别为基于以上两种带噪电流波形计算的杰氏系数。

可以看到，Jarque-Bera 算法具备非常好的抗干扰能力，在加入一定比例的环境噪声以后，依然能正确区分励磁涌流和故障差流。

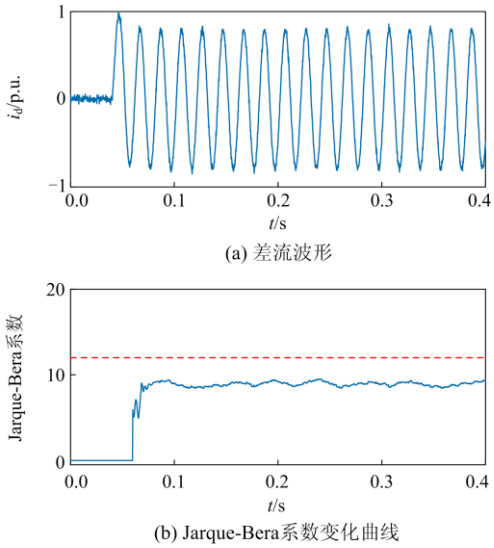


(a) 差流波形

(b) Jarque-Bera系数变化曲线

图 12 加噪声后的励磁涌流波形及杰氏系数

Fig. 12 Inrush current with noise and its Jarque-Bera coefficient



(a) 差流波形

(b) Jarque-Bera系数变化曲线

图 13 加噪声后的故障电流波形及杰氏系数

Fig. 13 Fault current with noise and its Jarque-Bera coefficient

3.6 与二次谐波法比较

在同样的仿真模型下，对变压器各种故障情形进行大量仿真，将 Jarque-Bera 算法与传统二次谐波制动原理进行对比分析。从表 1 中可以看出，传统二次谐波判据在大多数情况下能够快速做出判断，但对于匝间故障和带故障空投情况，保护闭锁时间较长，Jarque-Bera 算法将在更短时间内开放保护。例如，当空投于小匝间故障时，二次谐波制动方案需 230 ms 开放保护，而 Jarque-Bera 判据比二次谐波法提前了约 160 ms。

表 1 Jarque-Bera 算法与二次谐波法比较

Table 1 Comparison of Jarque-Bera algorithm and second harmonic criterion

类型	二次谐波制动	Jarque-Bera
单相接地	22 ms 开放	20 ms 开放
两相接地	27 ms 开放	20 ms 开放
三相短路	30 ms 开放	20 ms 开放
相间故障	32 ms 开放	20 ms 开放
匝间故障	37 ms 开放	20 ms 开放
故障差流二次谐波>15%	错误制动	20 ms 开放
变压器空投	可靠制动	可靠制动
空投于相间故障	40 ms 开放	20 ms 开放
空投于三相接地故障	45 ms 开放	20 ms 开放
空投于匝间故障	230 ms 开放	72 ms 开放

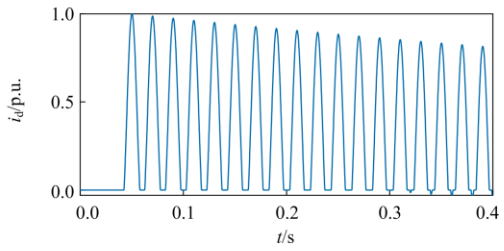
特别地，现代变压器容量越做越大，一旦发生严重的内部故障，其电流中二次谐波含量会很高，如表 1 所示，对于故障差流二次谐波＞15%，采用二次谐波法在很长一段时间内一直大于制动阈值，致使该方案失效，错误制动，而采用本文所提判据

则能够做出正确判断。

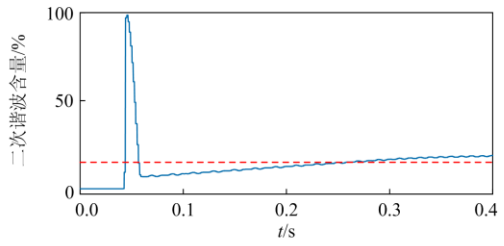
3.7 1 000 kV 特高压变压器励磁涌流误动案例

大型电力变压器所采用的新型低损耗非晶合金材料使得变压器铁心的磁饱和点逐渐降低，当铁心剩磁、合闸角等影响因素满足一定条件时，三相励磁涌流中二次谐波含量将显著减少，可能会均低于15%，其中最小一相甚至低于 7%，对应间断角小于 30°[29]。

根据文献[30]搭建 1000 kV 特高压调压变压器 Matlab/Simulink 仿真模型，励磁涌流波形和二次谐波含量分别如图 14(a)和图 14(b)所示。仿真结果与上述文献十分接近，验证了在误动场景下本节仿真模型与合闸条件的准确性。



(a) 差流波形



(b) 二次谐波含量

图 14 特高压变压器励磁涌流波形及二次谐波含量

Fig. 14 Inrush current waveform of UHV transformer and its second harmonic ratio

无论何种涌流制动方案，本质上都是利用波形特征的不同描述方式来实现涌流制动，因此都具有内在联系，也会有相似问题，Jarque-Bera 算法也不例外，故需要对本文所提判据在特殊场景下的适应性进行分析。

二次谐波制动法只考虑了波形特征差异中的某一种特征量，如图 14(b)所示，在二次谐波含量大大降低的严峻情况下，对应励磁涌流波峰尖顶特征钝化明显，如图 14(a)所示，且间断角起始角度显著收窄。此时，若采用二次谐波制动原理，即使将阈值整定为 7%，仍然无法避免变压器差动保护误动[31]。而对于采用两种特征量进行综合考量的 Jarque-Bera 算法，以此来缓冲其不利影响，增加了保护整定值在异常情况下的抗风险能力，使得保护的可靠性得到显著提升。

在误动场景下，从图 15 中的 J 值序列可知，第一个 J 值为 11.26，相对于 2.7 的保护裕度下降了 16.3%，而二次谐波含量相对于 15% 的整定值则下降约 57%。此时，K 值边界被击穿，且 J 值增长缓慢，原有整定值已无法满足该场景下对涌流制动的需要，但仍留有较大裕度。说明在该条件下，波形的畸变程度远小于先前分析的各种情况。因此，为了满足在某些复杂条件下现场的实际适用性，应具体情况具体分析，因地制宜地对整定值进行重新核算，不妨取 $K_{rel}=1.2$，则 $K_{set}=10.8$，此时离 J 值第一个点 11.26 仍有较大差距，经检验能满足该场景下对涌流制动的要求。

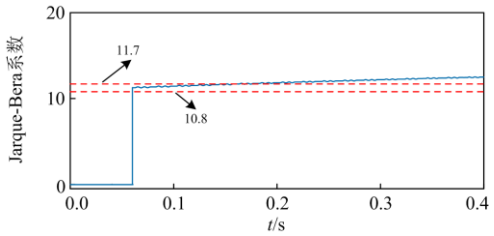


图 15 特高压变压器励磁涌流杰氏系数

Fig. 15 Jarque-Bera coefficient of inrush current in UHV transformer

3.8 现场录波数据分析

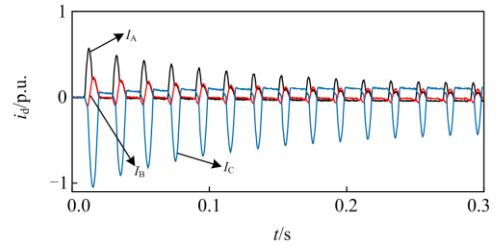
在实际工程中，大型变压器空载合闸时，励磁涌流中往往含有较大的非周期分量[32]。为了验证本文所提算法在现场运行中的有效性，下面利用实际变压器的合闸录波数据，导入 Matlab 软件中进行分析。

某地新建 220 kV 综合变电站试运营期间共进行了三次空载合闸试验。电流互感器变比为 2000/1，采样频率为 5 kHz，即每周波采样 100 点。图 16(a)为其中一次合闸时的三相电流波形，可以看到，三相差流呈典型励磁涌流形态，即波形呈尖顶状，含有很大的非周期分量，有明显间断角。

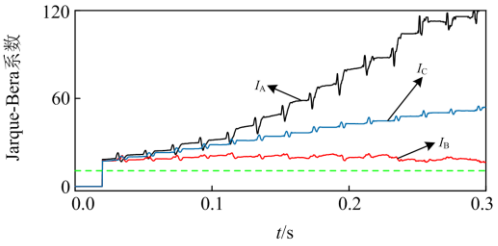
利用 Jarque-Bera 算法进行励磁涌流和区内故障差流的识别，其内含对波形峰度和偏度的双重检验，整体上可看作是对波形尖顶特征与两侧拖尾电流的综合分析。如果差流波形中含有较高的非周期分量，只是相对于纵轴平移了一段随时间衰减变化的距离而已，波形的本质依然没有改变，并不会影响到波形的整体特征。因此，差动电流中的非周期分量对本算法的影响可以忽略不计。

在单向和对称性励磁涌流的情况下，从图 16(b)

中的计算结果可以得出，J 值序列均高于门槛值，保护被可靠闭锁，不会误动。理论分析与仿真试验结果均一致，不难看出杰氏系数对非周期分量的敏感度极低。由此，验证了基于 Jarque-Bera 系数的变压器励磁涌流识别算法在工程实践当中的适用性。



(a) 现场录波的励磁涌流波形



(b) Jarque-Bera系数变化曲线

图 16 现场录波信号及杰氏系数

Fig. 16 Field recorded waveforms of transformer inrush currents and its Jarque-Bera coefficients

4 结论

本文重点分析了励磁涌流和故障差流的波形差异，在此基础上提出了基于 Jarque-Bera 系数的变压器励磁涌流识别方法。通过理论分析、仿真结果和现场数据计算，验证了该方法的正确性和可行性，形成以下研究结论：

(1) Jarque-Bera 算法原理清晰，易于实现，计算量小，是波形特征分析和正态性检验的有效工具，有很好的工程应用价值。

(2) 因杰氏系数只与波形的形状和采样频率有关，不同大小的波形可以具有相同的杰氏系数，使得保护整定值的选取具有普遍意义，与变压器规格和参数无关。

(3) 该方法拥有足够的可靠性和灵敏度，相比于传统二次谐波判据，所用识别时间更短；鲁棒性强，即使在含一定比例的噪声影响下，也能够正确区分励磁涌流和故障差流。

(4) 间断角的存在对于励磁涌流的识别是有利的，在 CT 饱和情况下，间断角完全消失，此时 Jarque-Bera 算法中计算偏度的部分，受两侧电流拖尾的影响数值略有下降，但其波峰尖顶特征依然存在，故该方法具有较强的抗 CT 饱和能力，且不受非周期分量的影响。

正态性检验算法的引入，是基于波形特征方案的一次新的尝试，为变压器励磁涌流的识别提供了新的研究思路。目前，该理论主要处于仿真验证阶段，后续将结合大量的现场数据开展算法的实用性研究，并不断对算法进行优化和完善。

参考文献

[1] 葛宝明, 王祥珩, 苏鹏声, 等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 1-5.
GE Baoming, WANG Xiangheng, SU Pengsheng, et al. Criteria and development trend to identify inrush current of power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 1-5.

[2] 胡松, 江亚群, 黄纯, 等. 基于 PWM 波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 135-140.
HU Song, JIANG Yaqun, HUANG Chun, et al. Identification of inrush current based on characteristics of PWM waveform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 135-140.

[3] 王立大, 段周朝. 变压器励磁涌流引起保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 138-140.
WANG Lida, DUAN Zhouchao. Mal-operation analysis on magnetic inrush current of power transformer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 138-140.

[4] 翁汉琍, 郭祎达, 李昊威, 等. 涌流工况下换流变压器零序差动保护误动对策[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 143-149.
WENG Hanli, GUO Yida, LI Haowei, et al. Countermeasures for mal-operation of zero-sequence differential protection of converter transformer under inrush current condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 143-149.

[5] 李梅, 唐菊生. 基于综合制动判据的变压器差动保护研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 135-141.
LI Mei, TANG Jusheng. Transformer differential protection method based on the comprehensive braking criterion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 135-141.

[6] 邱文征, 陈德树. 两种励磁涌流二次谐波制动判据的比较[J]. 电力自动化设备, 1998, 18(3): 8-9, 12.
QIU Wenzheng, CHEN Deshu. Comparison between two restraint criteria of the magnetizing inrush 2nd harmonic[J]. Electric Power Automation Equipment, 1998, 18(3): 8-9, 12.

[7] 陈德树, 尹相根, 张哲, 等. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 19-23.
CHEN Deshu, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Virtual third harmonic restrained transformer differential protection principle and practice[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 19-23.

[8] 李海锋, 王钢, 李晓华, 等. 电力变压器励磁涌流判别的自适应小波神经网络方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 144-150.
LI Haifeng, WANG Gang, LI Xiaohua, et al. Distinguish between inrush and internal fault of transformer based on adaptive wavelet neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 144-150.

[9] 曾杰, 张禄亮, 吴青华. 基于形态学骨架的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 68-76.
ZENG Jie, ZHANG Luliang, WU Qinghua. Morphological skeleton based differential protection for power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 68-76.

[10] 戎子睿, 林湘宁, 金能, 等. 基于相空间轨迹识别和多判据融合的变压器保护新策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1924-1938.
RONG Zirui, LIN Xiangning, JIN Neng, et al. A new transformer protection scheme based on the recognition of phase space trajectory and multi-criteria fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1924-1938.

[11] 赵永彬, 陆于平. 基于磁通对称特性的变压器励磁涌流判别新算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 66-71.
ZHAO Yongbin, LU Yuping. A new algorithm based on flux symmetry character for judging transformer inrush current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 66-71.

[12] 邓祥力, 王传启, 张哲. 基于回路平衡方程和励磁电感的特高压变压器保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 147-153.
DENG Xiangli, WANG Chuanqi, ZHANG Zhe. UHV transformer protection based on equivalent circuit equation and excitation inductance[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 147-153.

[13] 葛宝明, 于学海, 王祥珩, 等. 基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 44-48.
GE Baoming, YU Xuehai, WANG Xiangheng, et al. A novel equivalent instantaneous inductance based algorithm used to distinguish inrush currents for transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 44-48.

[14] JARQUE C M, BERA A K. A test for normality of observations and regression residuals[J]. International Statistical Review, 1987, 55(2): 163-172.

[15] 卢方成. H 基金公司股票投资市场风险管理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
LU Fangcheng. The research of H fund management company for risk management of stock investment market[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[16] 陈学君, 胡文超, 杨瑜峰, 等. 甘肃降水量正态性分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 107-112.
CHEN Xuejun, HU Wenchao, YANG Yufeng, et al. Normality analysis of precipitation in Gansu province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(1): 107-112.

[17] 周牧, 耿小龙, 谢良波, 等. 基于信号分布混合假设检验的 Wi-Fi 室内定位方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 2868-2873.
ZHOU Mu, GENG Xiaolong, XIE Liangbo, et al. Wi-Fi indoor localization based on hybrid hypothesis test of signal distribution[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(12): 2868-2873.

[18] 杨格. 统计金融模型及金融市场波动持续时间序列的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
YANG Ge. Statistical financial model and volatility duration financial series[D]. Beijing: Beijing Jiao Tong University, 2017.

[19] 王成, 王解先, 何丽娜. 利用码相二次差分与 Jarque-Bera 检验进行实时周跳探测[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(6): 693-696.
WANG Cheng, WANG Jiexian, HE Lina. Real time cycle slip detection based on Jarque-Bera test using bi-differences of code and phase[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(6): 693-696.

[20] 张瑛, WANG J M, 肖亮, 等. 传输线的随机建模及瞬态响应数值实验分析[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(8): 1516-1520.
ZHANG Ying, WANG J M, XIAO Liang, et al. Stochastic modeling for transmission lines and numerical experimental analysis for transient simulation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(8): 1516-1520.

[21] 翁汉琍, 陈皓, 万毅, 等. 基于巴氏系数的变压器励磁涌流和故障差流识别新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 113-122.
WENG Hanli, CHEN Hao, WAN Yi, et al. A novel criterion to distinguish inrush current from fault current based on the Bhattacharyya coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 113-122.

[22] 刘鹏辉, 黄纯, 江亚群, 等. 基于峭度系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2023-2028.
LIU Penghui, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. An approach to identify inrush current of transformer based on the kurtosis coefficient[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2023-2028.

[23] 张召峰, 孙庆森, 张海峰, 等. 变压器励磁涌流中的信息熵识别[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 107-111.
ZHANG Shaofeng, SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, et al. Identification of information entropy in transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 107-111.

[24] 李奕璋, 陈红坤, 石晶, 等. 基于三相电流平方和比值的短路故障快速检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 111-119.
LI Yizhang, CHEN Hongkun, SHI Jing, et al. A fast short-circuit fault detection method based on the ratio of three-phase currents square sum[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 111-119.

[25] 邓艳平, 杨秀, 张美霞, 等. 基于欧式距离的换流变压器短路电流和励磁涌流的辨识[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2671-2676.
DENG Yanping, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Discrimination of magnetizing inrush current and short circuit current of converter transformer based on Euclidean distance[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2671-2676.

[26] 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.

[27] 翁汉琍, 刘华, 林湘宁, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 475-483.
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff algorithm[J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(2): 475-483.

[28] 黄景光, 罗亭然, 林湘宁, 等. 励磁涌流波形密度系数鉴别算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(7): 34-40.
HUANG Jingguang, LUO Tingran, LIN Xiangning, et al. Identification algorithm for magnetizing inrush current in terms of waveform density coefficient[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(7): 34-40.

[29] 马静, 王增平, 徐岩. 用相关函数原理识别变压器励磁涌流和短路电流的新方法[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 78-81.
MA Jing, WANG Zengping, XU Yan. A new method to identify inrush current and short circuit current of transformer based on correlation function[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 78-81.

[30] 郑涛, 陆格野, 赵彦杰, 等. 基于虚拟等效电感的特高压调压变压器励磁涌流判别算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 118-125.
ZHENG Tao, LU Geye, ZHAO Yanjie, et al. A discriminating algorithm for identifying inrush of UHV voltage regulating transformer based on virtual equivalent inductance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 118-125.

[31] 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.

[32] 李振兴, 包文亮, 陈艳霞, 等. 适用于含串补设备的输电线路电流差动保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 11-19.
LI Zhenxing, BAO Wenliang, CHEN Yanxia, et al. New criterion for current differential protection used for a transmission line with series compensation equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 11-19.

收稿日期：2021-03-05； 修回日期：2021-05-06

作者简介：

张员宁(1996—)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统分析、继电保护与控制；E-mail: 498412159@qq.com

黄景光(1968—)，男，博士，教授，研究方向为电力系统分析、继电保护与控制。E-mail: hjg8008@sina.com

（编辑 魏小丽）