

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.016

## 10 kV 配电网电磁式电压互感器谐振特性及识别方法的研究

李志彪<sup>1,2</sup>, 宋建成<sup>1,2</sup>, 程胤璋<sup>3</sup>, 郑俊琪<sup>4</sup>

(1. 太原理工大学矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 太原 030024; 2. 太原理工大学煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 太原 030024; 3. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001; 4. 国网山西省电力公司, 太原 030021)

**摘要:** 在小电流接地系统中, 当发生不正常运行状态时, 配电线路的分布电容会与电压互感器(potential transformer, PT)一次侧的绕组电感发生谐振, 从而产生谐振过电压, 严重时烧毁PT, 甚至发生爆炸, 严重威胁人身和设备安全。文中以山西某110 kV变电站10 kV配电网为研究对象, 在PSCAD/EMTDC中建立了仿真模型, 分析了线路分布电容(线路长度)、PT容量对谐振特性的影响规律, 对于不同类型的谐振提出了VMD-HHT-WOA-SVM识别算法。研究发现, 线路长度及PT容量的大小对配电网铁磁谐振均有影响, 在实际工况中, 由于线路参数与PT励磁特性的影响, 高频谐振基本不会发生; 基于VMD-HHT-WOA-SVM的PT谐振类别识别方法准确率可达95%, 能有效地识别谐振类型与谐振发生时刻。

**关键词:** 电压互感器; 铁磁谐振; 谐振特性; VMD-HHT-WOA-SVM谐振识别算法

### Research on Resonance Characteristics and Identification Method of Electromagnetic Potential Transformer in 10 kV Distribution Network

LI Zhibiao<sup>1,2</sup>, SONG Jiancheng<sup>1,2</sup>, CHENG Yinzhang<sup>3</sup>, ZHENG Junqi<sup>4</sup>

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Mine Intelligent Electrical Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Coal Mine Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China; 4. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030021, China)

**Abstract:** In small current grounding system, in case of abnormal operating status, the resonance can be occurred between the distributed capacitance of the distribution line and the winding inductance on the primary side of the potential transformer(PT), resulting in resonant overvoltage and, in case of serious cases, burning of PT, explosion and seriously threatening the safety of personal and equipment. In this paper the 10 kV distribution network of a 110 kV substation in Shanxi Province is taken as the research object, the simulation model is set up in PSCAD/EMTDC, and the influence of line distribution capacitance(line length) and PT capacity on the resonance characteristics is analyzed, and a VMD-HHT-WOA-SVM identification algorithm is proposed for different types of resonance. It is found by the research that both the length of the line and the maginitude of PT capacity have an impact on the ferromagnetic resonance of the distribution network. In actual operating conditions, due to the influence of line parameters and PT excitation charcateristics,high-frequency resonance rarely occurs.The accuracy rate of the PT resonance recognition method based on VMD-HHT-WOA-SVM can be up to 95%, enabling effective identification of both the resonance type and the moment of its occurrence.

**Key words:** potential transformer; ferromagnetic resonance; resonance characteristic; VMD-HHT-WOA-SVM recognition algorithm

收稿日期:2025-10-09; 修回日期:2025-12-27

## 0 引言

智能电网是现代电网发展的必然方向,它具有强大的结构体系与技术支撑,能有效抵御突发性故障甚至外部因素攻击,可自主恢复到正常状态,避免大规模事故的发生。当然,智能电网的实现少不了大量的测量与控制设备,一般采用电磁式电压互感器(PT)对电压进行监测<sup>[1-2]</sup>。但当电网出现如单相接地故障、三相非同期合闸等不正常运行状态时,可能使得PT一次侧绕组电感与对地电容发生不利匹配而产生铁磁谐振,导致系统过电压和PT过电流,甚至损坏设备,严重威胁设备安全性与系统稳定性。

为了抑制铁磁谐振,学者们对谐振机理、谐振识别方法展开了广泛的研究,认为PT损坏的主要原因是铁心饱和而引起的谐振过电压击穿了绝缘。H.A.Peterson 研究发现:随着系统参数改变,会发生不同种类的铁磁谐振,并给出了对应的参数范围。但大量研究表明,该结论只能作为参考,并不能作为严格的判据<sup>[3-5]</sup>。一些学者对实际工程的数据进行了计算与仿真,发现尽管  $X_{\omega}/X_m$  不在产生谐振的区间内,但系统依然会产生谐振。这种情况可能是试验条件及PT励磁特性差异所造成的;刘天奇<sup>[6]</sup>等人通过对110 kV变电站仿真分析,给出了铁磁谐振的影响因素;许贵民<sup>[7]</sup>等人分析了电磁式电压互感器铁磁谐振产生的根本原因;王冰冰<sup>[8]</sup>、王申华<sup>[9]</sup>等人建议:为了避免铁磁谐振的发生,最好选择励磁特性较好的PT,以免在运行过程中出现铁心饱和的情况;杨先贵<sup>[10]</sup>等人提出了一种基于小波和FFT谐振检测的算法,该方法可有效滤除激励暂态过程中的杂散信号;谢家安<sup>[11]</sup>等人提出了一种基于希尔伯特—黄变换的识别铁磁谐振过电压的新方法,但这些都时频分析工具在处理非平稳信号时精度欠缺,而且考虑到铁磁谐振非线性回路方程的特性,无法得到广义恰当的解析解,使得检测阈值设置困难<sup>[12]</sup>。

尽管大部分学者对铁磁谐振的特性及其抑制措施进行了深入研究,但鲜有关注PT容量对铁磁谐振特性的影响及其谐振非平稳信号实时识别方法的探讨。文中采用3个UMEC模型来模拟电磁式PT,研究线路长度(分布电容大小)、PT容量对配网PT铁磁谐振的影响,并提出了一种基于VMD-HHT-WOA-SVM的识别方法,可以有效识别PT谐振发生时刻与谐振类型。

## 1 10 kV 配网谐振模型的建立

### 1.1 仿真实例介绍

文中选定的变电站为山西某110 kV变电站,电压等级为110/35/10 kV,主变2台。1、2号主变均为SSZ11-50000/110型有载调压变压器,总容量为100 000 kVA。110 kV系统采用单母接线,装设有5台SF<sub>6</sub>断路器,进线3回,出线3回。35 kV采用单母分段接线方式,装设有5台SF<sub>6</sub>断路器,出线2回;10 kV采用单母分段接线方式,装设20台真空配电装置,出线12回,供全区域7个地区和33个大中型企业用电。

文中研究中,研究对象为10 kV配网中PT谐振现象,因此省略了35 kV系统,并根据实际配电网参数建立了相应的仿真模型。

### 1.2 PT原边电源

系统电源的电压高低直接影响着铁磁谐振,系统的三相电压为

$$\begin{cases} U_A = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \\ U_B = U_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \frac{2}{3}\pi) \\ U_C = U_m \sin(\omega t + \varphi_0 + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $U_m$ 为相电压峰值; $\varphi_0$ 为初相角。文中仿真系统高电压侧为110 kV,电压数值设置为110 kV,A相初相角设为 $\varphi_0=0$ 。

### 1.3 变压器模块

#### 1.3.1 主变压器

主变压器铭牌见表1。根据表1设置变压器容量为100 MVA,频率为50 Hz,变比为110/38.5/10.5,短路损耗为0.002 4 p.u.,空载损耗为0.000 35 p.u.。

表1 主变铭牌

Table 1 Nameplate of main transformer

参数	数值
主变型号	SSZ11-50000/110
额定容量/MVA	100
额定电压/kV	(110±8×1.25%)/(38.5±2×2.5%)/10.5
接线方式	YNynOd11
负载损耗/kW	243.45
空载损耗/kW	35.14
短路阻抗/%	17.02
空载电流/%	0.12

#### 1.3.2 接地变压器

目前,中国10 kV配电网普遍采用小电流接地系统,能够在单相接地故障下运行2 h。但随着中国配电网规模的不断扩大,接地电流也随之变大,接地地点的电弧可能无法自行熄灭。因此,除了防止弧

光过电压外,还必须限制其短路电流<sup>[13]</sup>。这就需要  
在主变压器低压侧的10 kV母线接入接地变压器,  
接地变压器二次侧再接入消弧线圈。文中,接地变  
压器采用Z型接线,接地变压器的接线图见图1。

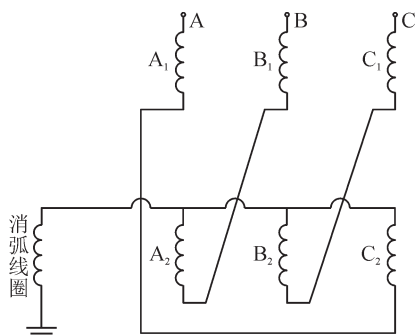


图1 接地变原理接线图

Fig. 1 Grounding transformer wiring diagram

### 1.4 PT模块

PT接在变电站母线上,将高电压按照一定的比例  
转换成低电压,以供保护、计量与仪表装置取  
用。PT的一次绕组与铁心组成了非线性电感,该元  
件具有储能和耗能特性,其电流通过线圈的物理过  
程主要受铁磁材料的非线性励磁特性影响<sup>[14]</sup>。由于  
不同型号的PT具有不同的励磁特性,谐振的表现形  
式也完全不同,因此PT的励磁特性对铁磁谐振起到  
关键作用。

该10 kV系统采用单相PT,型号为JDZXF11-  
10。因在PSCAD中没有PT模型,软件中的饱和变  
压器(unified magnetic equivalent circuit, UMEC)模型  
可以将励磁特性曲线直接建模为V-A曲线,故文中  
使用UMEC模型来模拟PT<sup>[15]</sup>。通过空载试验可以测  
出PT非线性电感的伏安特性曲线,见图2。

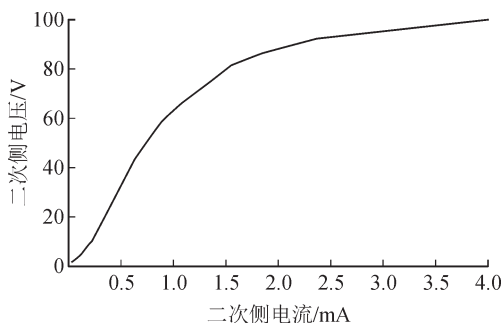


图2 电压互感器伏安特性曲线

Fig. 2 Voltage ampere characteristic curve of the voltage transformer

PT接线模型见图3。参数根据实际铭牌设置,  
容量为300 VA,接线组别为Y<sub>0</sub>/Y<sub>0</sub>/D,变比为5.773/0.057 7/0.1,漏电抗为0.1 p.u.,空载损耗、铜耗分别  
为0.001、0.002 7 p.u.。

### 1.5 10kV不接地配电网铁磁谐振模型

文中仿真中,仿真时间为0.5 s,在0.2 s发生单

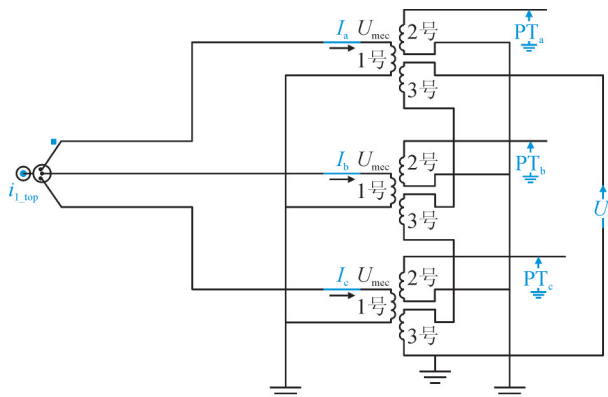


图3 电压互感器原理接线图

Fig. 3 Voltage transformer principle wiring diagram

相接地故障,故障持续时间设为0.01 s,配线路为  
分布式贝杰龙模型,参数按照LV-95设置, $R_1=0.17 \times 10^{-3} \Omega/m$ , $X_{L1}=0.38 \times 10^{-3} \Omega/m$ , $X_{C1}=305.8 \text{ M}\Omega \cdot m$ , $R_0=0.23 \times 10^{-3} \Omega/m$ , $X_{L0}=1.72 \times 10^{-3} \Omega/m$ , $X_{C0}=430.6 \text{ M}\Omega \cdot m$ ,  
仿真模型图见图4。

## 2 铁磁谐振影响因素的分析

### 2.1 线路长度(分布电容)对谐振特性的影响

铁磁谐振是线路的分布电容与电压互感器  
一次侧绕组等效的非线性电感形成的谐振而产生  
的过电压现象。线路长度不同,其分布电容不同,  
系统发生谐振的频率亦不同。国内对于基频谐振  
与高频谐振的划分存在争议,因此文中还是以高次  
谐波的含量区别二者。基频谐振中含有工频分量  
以及少量的高次谐波分量,高频谐振的高次谐波含  
量多于基频谐振<sup>[16-17]</sup>。

通过改变配电线路的长度可改变分布电容的  
大小,通过仿真分析其谐振规律。由于改变线路长  
度变化特征不太明显,文中保持配电线路长度不  
变,改变单位长度分布容抗的大小,来模拟分布电  
容的改变。首先按照实际配电网参数进行仿真,得  
到波形图5(a)。0.2 s发生单相接地故障,接地故  
障的持续时间设置为0.01 s,容抗 $X_c$ 为430.6  $\text{M}\Omega \cdot m$ ,单  
相接地故障消除时激发了铁磁谐振现象。对母线A  
相电压进行FFT分解后,除去50 Hz工频分量外,还  
有22.5 Hz谐波分量,表明发生了分频谐振。观察  
图5(a)可知,三相电压的幅值达到了17 kV,是正  
常情况下电压幅值8.16 kV的二倍左右。

继续增大线路的分布电容(增加线路长度),即  
 $X_c$ 降低到43.06  $\text{M}\Omega \cdot m$ ,同样对母线A相电压进行分  
析,见图5(b)。分频谐振的频率减小,谐振频率降低  
到7.5 Hz,三相电压幅值降低到13 kV。若在原有基

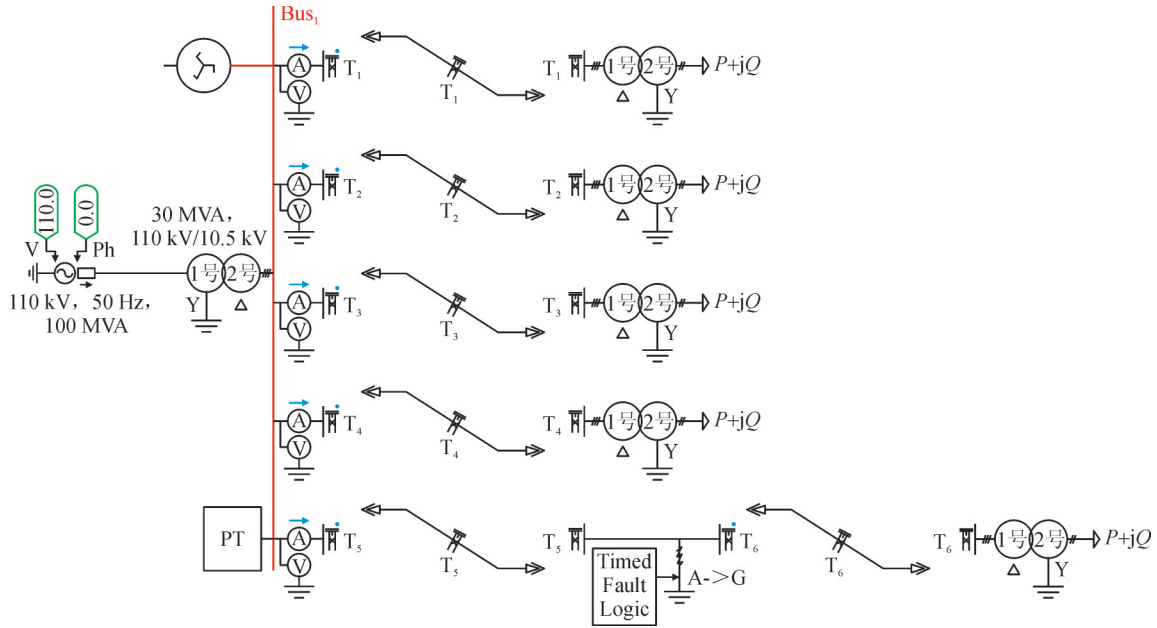


图4 10 kV 仿真系统模型接线图

Fig. 4 10 kV simulation system model wiring diagram

基础上,减小分布电容(缩短出线长度),即增加  $X_c$  到 4 306  $M\Omega \cdot m$ ,发生了谐振频率为 70 Hz 的高频谐振,见图 5(c)。电压幅值高达 29 kV,发生了严重的过电

压现象。在此谐振状态下,可能会使绝缘击穿,进而发生严重的过电流现象,但此时线路分布电容极小(线路极短),这种情况在实际工况中极少见<sup>[18]</sup>。

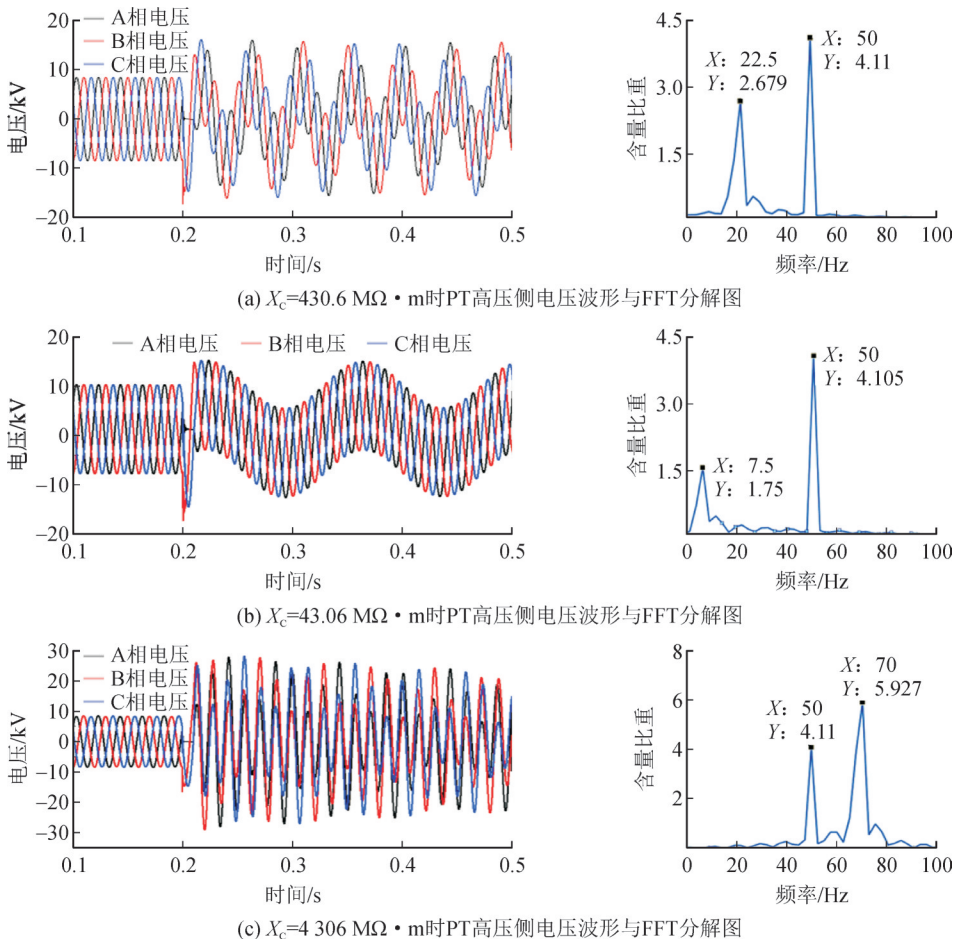


图5 不同配电线长度(分布电容)的谐振波形

Fig. 5 Resonant waveforms of different distribution line lengths(distributed capacitance)

由于实际配电网使用的PT型号与架空线参数不同,相同分布电容所激发的谐振类型也可能不同。由于以上原因,文中仅总结谐振规律,规律见图6。随着分布电容减小(线路长度缩短),谐振频率增高,谐振电压增大,谐振现象越严重。同样分布电容增大(线路长度增长),谐振频率减小,谐振电压减小,过电压现象减轻。因此在母线端接补偿电容,可降低谐振电压,甚至避免铁磁谐振。

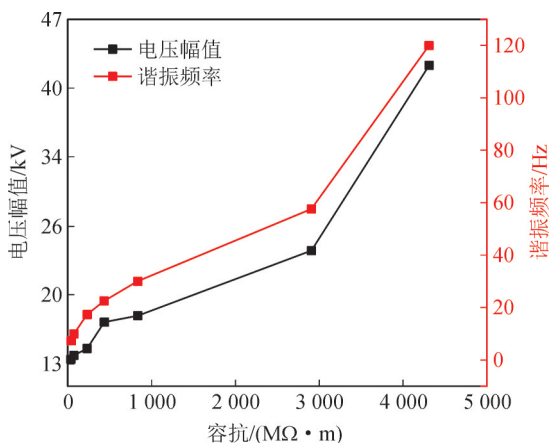


图6 不同配电网线路长度(分布电容)的谐振规律

Fig. 6 The resonant law of different distribution line lengths(distributed capacitance)

## 2.2 PT容量大小对谐振特性的影响

PT容量的大小也会影响其谐振特性。按照实际工程中容量可能取值的范围,改变其大小,发现谐振类型发生了改变。根据PT型号的不同,用途也完全不同,主要用作保护与计量,接在母线侧PT多用作电压、电能测量及继电保护,其容量从20 VA到1 kVA不等,经过分析,得到了以下结论。

在保证线路分布电容(线路长度)不变的情况下,0.2 s时发生单相接地故障,故障的持续时间为0.01 s,接地故障消失时激发铁磁谐振。只改变PT容量,观察谐振频率与电压的变化规律。发现容量为20 VA时,发生了10 Hz分频谐振,电压见图7(a)。谐振电压幅值为13.5 kV,为正常电压幅值的1.7倍左右,称为轻微铁磁谐振现象。增大容量到200 VA,发生了30 Hz的分频谐振,电压见图7(b)。电压升高到20 kV左右,为正常幅值的2倍左右,谐振现象加重。增大容量到1 kVA,谐振频率升高到70 Hz,电压见图7(c)。谐振过电压高达29 kV左右,为正常幅值的3倍左右,谐振过电压现象再次加重。

在改变PT容量的过程中,PT所承受电流发生改变,谐振类型也随之改变。当容量较大时,PT所承受电流也较大,使得PT韦安特性的工作点向后移

动,工作点斜率减小,电感数值下降,引起谐振频率的升高,谐振电压随之升高。当容量较小时,PT所承受电流也较小,PT韦安特性的工作点靠近坐标原点,斜率较大,电感数值较大,引起谐振频率降低,谐振电压随之降低。由前文研究中可知,容量越小,谐振频率越低,过电压程度越轻。为防止谐振电压过高而击穿绝缘,在满足实际测量需求的前提下,应尽量选用容量较小的PT。

## 3 铁磁谐振的识别算法

### 3.1 基于VMD-HHT-WOA-SVM的谐振识别算法

通过对谐振特性进行分析,为电网工作人员提出了减轻或者预防铁磁谐振的建议,但是随着配电网的日益发展以及铁磁谐振的复杂性,仅仅预防和减轻故障是不够的。为满足“智能电网”能抵御故障的高要求,必须在配电网中加装消谐设备。只有在分辨各种谐振类型的基础上,制定相对应的实时抑制措施,才能快速地抑制铁磁谐振故障。因此,辨别谐振发生时刻与谐振类型至关重要。

铁磁谐振发生时,会产生大量的非平稳电压信号,对非平稳信号分析并提取出这些非平稳信号中的特征值可以为监测、判断与抑制铁磁谐振提供基础。传统的傅里叶变换难以处理这类非平稳信号,而小波分析又难以选取最佳的小波基函数。因此在文中研究中,使用了可以有效处理非平稳信号的变分模态分解(variational mode decomposition, VMD),它可以很好解决经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法的模态混叠问题,在采样和噪声抑制方面,具有更好的鲁棒性。

基频谐振与单相接地故障现象相似,即基频谐振会出现“虚幻接地”的现象。为防止谐振与单相接地故障发生识别混淆,需监测电压数值,当 $U_0 > 15\%U$ 且 $U > 1$  kV时,先排除单相接地故障,再对谐振的类型进行识别。

首先对电压信号进行VMD分解<sup>[19-24]</sup>,得到若干主模态分量(intrinsic mode function, IMF),计算各IMF分量的相关系数,选出相关系数最大的IMF分量,然后对筛选出来的IMF分量进行希尔伯特—黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)。由于在不同种类谐振发生时,电压信号的频域特征差异十分明显<sup>[9]</sup>,故提取平均瞬时频率(averaged instantaneous frequency, AIF)作为特征值<sup>[25]</sup>,其计算步骤如下。

对筛选出的IMF分量进行HHT变换,可以得出IMF分量的瞬时频率为

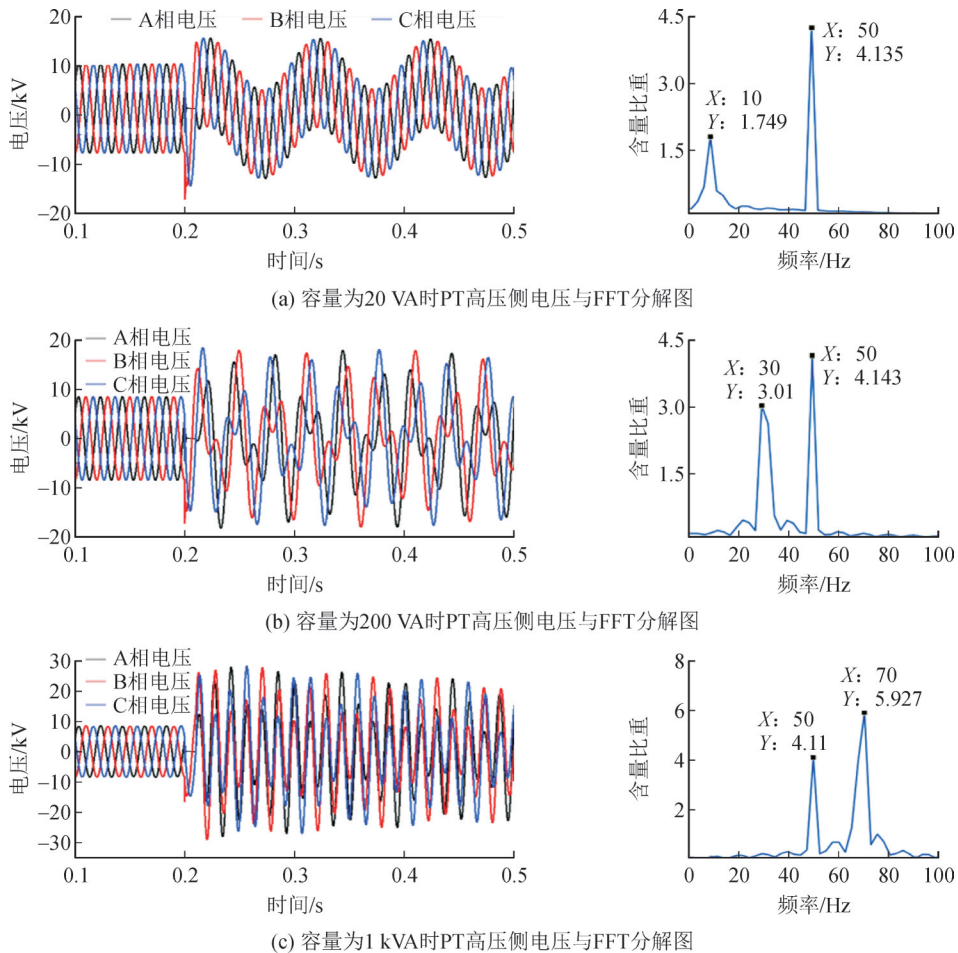


图7 电压互感器不同容量的谐振波形

Fig. 7 Resonant waveforms of different capacities of voltage transform

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2)$$

式(2)中,  $\theta(t)$ 不清晰为瞬时相位。

特征提取时间为 25 ms, 数据采样频率为 0.1 MHz, 即对每 2 500 个采样点计算 IMF 分量的 AIF, 同时监测当前电压数值, 选取电压数值最高的采样点所对应的 AIF。

然后将 AIF 作为输入量, 运用鲸鱼寻优算法 (whale optimization algorithm, WOA) 对支持向量机 (support vector machines, SVM) 的惩罚因子和高斯核函数<sup>[26]</sup>进行优化并建立不同谐振类型与 AIF 之间的关系模型, 就可以达到谐振类型识别的目的。算法流程图见图 8。

### 3.2 识别效果

获取大量铁磁谐振监测数据对分析铁磁谐振的故障特征十分重要。当监测数据不足时, 通过 PSCAD 仿真软件可以模拟各类铁磁谐振的发生, 以获得故障数据。SVM 中所用训练和测试数据均来自于前文仿真模型。由于实际工况线路长度与 PT 励磁特性的影响, 高频谐振发生几率很小, 本算法

只研究基频与分频谐振的识别效果, 每种谐振状态采集 200 组数据。将计算的特征值输入到 SVM 中, 随机 300 组作为样本, 剩余 100 组作为测试集, 由于机器学习的随机性, 识别效果在 95%~99% 之间随机变化, 以精度为 95% 为例, 预测结果见图 9。类别标签 1 代表分频谐振, 类别标签 2 代表基频谐振, 红色圆圈代表实际分类, 蓝色十字代表预测分类, 当二者重合时识别结果正确, 在识别结果中在第 5、22、47、57、93 个样本发生识别错误。

为比较所选特征值在不同谐振状态下的差异性, 对不同种类谐振的电压信号分别提取特征, 其结果见图 10。分频谐振 AIF 的取值范围位于 34~44 Hz 之间, 基频谐振 AIF 取值范围位于 45~67 Hz 左右, 特征区分明显。因此, 采用 AIF 可以有效区分谐振类型。

## 4 结论

针对配电网电压互感器铁磁谐振过电压频发的问题, 文中对 10 kV 配电网电磁式电压互感器的铁磁谐振过电压特性和识别算法进行了研究, 得到

了以下结论:

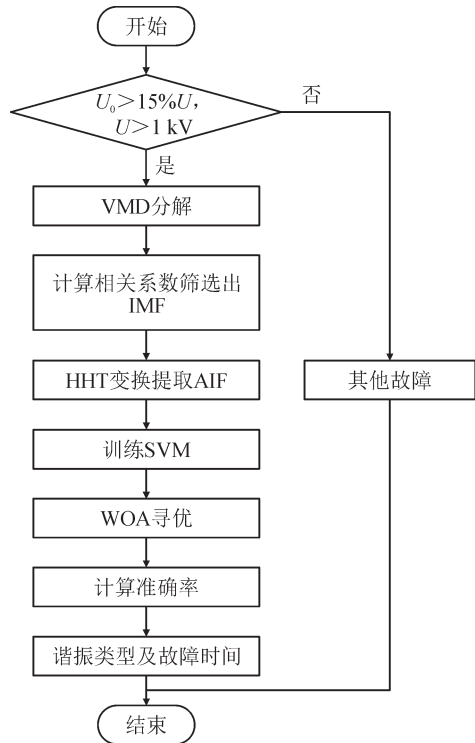


图8 识别算法流程图

Fig. 8 Flow chart of recognition algorithm

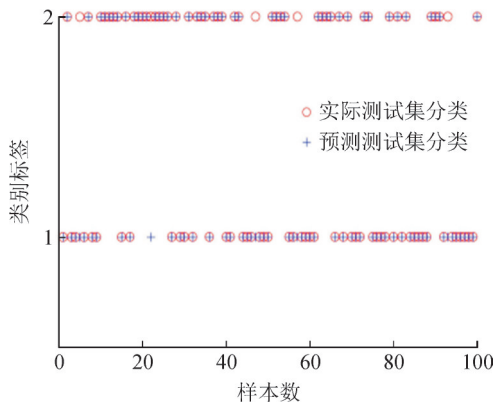


图9 测试集的实际分类和预测分类图

Fig. 9 Actual classification and predictive classification diagrams of test sets

1)分析了配电线路长度对铁磁谐振的影响规律。谐振电压会随着分布电容的增大而降低,由于实际工况中配电线路的长度可能已经固定,可在变电站母线侧接补偿电容,能有效减轻甚至避免谐振过电压。

2)研究发现PT容量的大小会影响铁磁谐振特性。容量越小,谐振频率越低,过电压现象越轻,为选取PT提供了参照依据。

3)提出了VMD-HHT-WOA-SVM的谐振类别识别方法,准确率高达95%,该算法可在25 ms内准确识别谐振类型与谐振发生时刻,为后续铁磁谐振的对症抑制提供了基础。

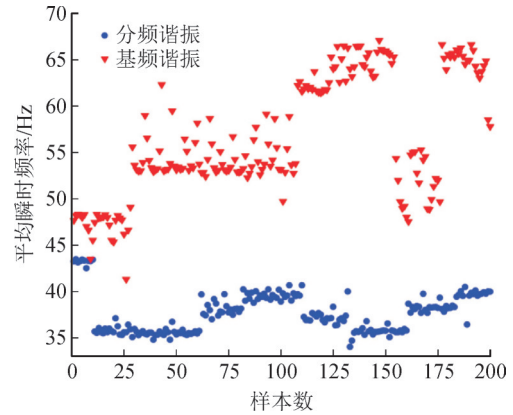


图10 不同谐振下的瞬时频率

Fig. 10 Instantaneous frequency at different resonances

参考文献:

[1] 郭全军,张翊喆,金凌峰,等. 500 kV 变电站 35 kV 电磁式电压互感器异常情况分析[J]. 变压器,2025,62 (11):61-68.  
GUO Quanjun, ZHANG Xuazhe, JIN Lingfeng, et al. Abnormal situation analysis of 35 kV electromagnetic potential transformer in 500 kV substation[J]. Transformer, 2025, 62 (11):61-68.

[2] 魏菊芳,姚 创,崔 涵,等. 配电网低频非线性振荡引发 PT 保险熔断的机理及抑制措施[J]. 电力科学与技术学报,2024, 39 (1):155-163.  
WEI Jufang, YAO Chuang, CUI Han, et al. Mechanism and suppression of PT fuse caused by low-frequency nonlinear oscillation in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1):155-163.

[3] 何 龙,朱咏明,马金财.基于改进峭度图和GoogLeNet的GIS内置互感器铁磁谐振辨识[J]. 电力电容器与无功补偿,2024, 45 (6):50-58.  
HE Long, ZHU Yongming, MA Jincan. Ferromagnetic resonance identification of built-in instrument transformer for GIS based on improved kurtosis graph and GoogLeNet[J]. Power capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(6):50-58.

[4] 郭 成,陈 波,陈 慧,等. 基于相空间重构的中性点非有效接地系统铁磁谐振故障辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15):131-141.  
GUO Cheng, CHEN Bo, CHEN Hui, et al. Identification of ferromagnetic resonance fault in non-effectively grounded neutralsystem based on phase space reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15):131-141.

[5] 王盛阳. 配电网铁磁谐振过电压的研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.  
WANG Shengyang. Research on ferroresonance overvoltage of distribution network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[6] 刘天奇,刘银彬,杨玉新,等. 35 kV 配电网电压互感器铁磁谐振影响因素及消谐措施仿真分析[J]. 内蒙古电力技术,2017, 35(4):34-39.  
LIU Tianqi, LIU Yinbin, YANG Yuxin, et al. Analysis of TV ferromagnetic resonance effect factors and harmonic elimination measures in 35 kV power distribution network[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2017, 35(4):34-39.

[7] 许贵民,姚 帅,尹红霞. 中性点非有效接地系统电磁式电压

- 互感器铁磁谐振问题研究[J]. 电气应用, 2020, 39(5): 53-60.  
XU Guimin, YAO Shuai, YIN Hongxia. Comprehensive analysis on ferroresonance of electromagnetic potential transformer for power system with invalid neutral grounding modes[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(5): 53-60.
- [8] 王冰冰, 王超, 陈嵩, 等. 电磁式电压互感器故障分析及防控措施[J]. 河南科技, 2020, 39(31): 137-140.  
WANG Bingbing, WANG Chao, CHEN Song, et al. Failure analysis and prevention and control measures of electromagnetic voltage transformer[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2020, 39(31): 137-140.
- [9] 王申华, 王旭杰, 夏圆, 等. 配网开关用PT在不停电作业工况下铁磁谐振特性与识别研究[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4534-4540.  
WANG Shenhua, WANG Xujie, XIA Yuan, et al. Research on ferromagnetic resonance characteristics and identification of PT for distribution network switch in non-power outage operation[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4534-4540.
- [10] 杨先贵, 邹伟慧, 李峰. 铁磁谐振检测方法研究[J]. 电力学报, 2014, 29(2): 124-126.  
YANG Xiangui, ZOU Weihui, LI Feng. Detection of ferromagnetic resonance[J]. Journal of Electric Power, 2014, 29(2): 124-126.
- [11] 谢家安, 李天云, 贺建伟, 等. HHT在铁磁谐振过电压辨识中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 75-78.  
XIE Jiaan, LI Tianyun, HE Jianwei, et al. Application of HHT to ferroresonance over-voltage recognition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 75-78.
- [12] 张超, 王宾, 张海, 等. 中性点直接接地电网单相串联铁磁谐振检测与类型辨识[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 172-179.  
ZHANG Chao, WANG Bin, ZHANG Hai, et al. Detection and type identification of single-phase series ferroresonance in neutral directly grounded power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 172-179.
- [13] 李蕾. 10 kV 配电网中铁磁谐振过电压及抑制措施的研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
LI Lei. Research on ferroresonance overvoltage and suppression measures in 10 kV distribution network[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [14] 王佳琪. 基于PSCAD的110 kV变电站铁磁谐振的仿真及分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.  
WANG Jiaqi. Simulation and analysis of ferroresonance in 110 kV substation based on PSCAD[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [15] 杨家硕, 胡岩, 王佳琪. 110 kV 变电站的铁磁谐振分析与抑制[J]. 变压器, 2022, 59(2): 19-23.  
YANG Jiashuo, HU Yan, WANG Jiaqi. Ferromagnetic resonance analysis and suppression of 110 kV substation[J]. Transformer, 2022, 59(2): 19-23.
- [16] 张博, 鲁铁成, 杜晓磊. 中性点接地系统铁磁谐振非线性动力学分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 31-35.  
ZHANG Bo, LU Tiecheng, DU Xiaolei. Nonlinear dynamic analysis of ferroresonance in neutral-grounded power system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 31-35.
- [17] TIAN Shijin, ZHANG Tianlong, LIU Xuezhong, et al. Numerical and experimental simulation researches on characteristics of ferroresonance based on distributed power grid parameters[C]// 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). China: IEEE, 2016: 2588-2591.
- [18] 陈锐, 曾杰, 郑雅玲, 等. 20 kV 配电网电压互感器一次侧电流的仿真与分析[J]. 广东电力, 2022, 35(2): 54-65.  
CHEN Rui, ZENG Jie, ZHENG Yaling, et al. Simulation and analysis of primary side current of PT in 20 kV distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(2): 54-65.
- [19] 柳絮, 王坚, 李文. 集成变分模态分解和希尔伯特-黄变换的结构振动时频提取模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11): 1686-1692.  
LIU Xu, WANG Jian, LI Wen. A time-frequency extraction model of structural vibration combining VMD and HHT[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11): 1686-1692.
- [20] 李天云, 高磊, 赵妍. 基于HHT的电力系统低频振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 24-30.  
LI Tianyun, GAO Lei, ZHAO Yan. Analysis of low frequency oscillations using HHT method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 24-30.
- [21] 何龙, 谭栋, 李勇, 等. 用于铁磁谐振过电压故障辨识的VMD参数优化方法研究[J]. 数学的实践与认识, 2022, 52(9): 102-114.  
HE Long, TAN Dong, LI Yong, et al. Research on data feature extraction method for ferroresonance over-voltage fault identification[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2022, 52(9): 102-114.
- [22] 杨锐, 邹晓松, 熊炜, 等. 基于VMD和PSO-SVM的非侵入式负荷识别方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5): 111-119.  
YANG Rui, ZOU Xiaosong, XIONG Wei, et al. Non-intrusive load identification method based on VMD and PSO-SVM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(5): 111-119.
- [23] 张军. VMD在信号分解中的K值确定方法[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2022, 36(4): 75-79.  
ZHANG Jun. The K value determination method of VMD in signal decomposition[J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Science(Natural Sciences Edition), 2022, 36(4): 75-79.
- [24] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [25] LU Zhiqi. Review on mechano-electronic device fault diagnosis based on Hilbert-Huang transformation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2351(1): 012033.
- [26] 李慧, 徐海亮, 王浩, 等. 基于改进鲸鱼算法优化支持向量机的故障诊断的研究与应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5284-5290.  
LI Hui, XU Hailiang, WANG Hao, et al. Research and application of a fault diagnosis based on improved whale algorithm to optimize support vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(13): 5284-5290.

李志彪(1997—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化(通信作者)(E-mail: lizhibiao@nwepdi.com)。

宋建成(1957—), 男, 教授, 主要研究方向为高压绝缘、电气传动等(E-mail: sjc6018@163.com)。