

# 接地消弧装置导致 PT 铁磁谐振机理分析

杨文勇<sup>1</sup>, 刘丽<sup>1</sup>, 戴宇<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 王俊<sup>1</sup>, 古展基<sup>2</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司毕节供电局, 贵州 毕节 551700;

2. 广州穗华能源科技有限公司, 广东 广州 510530)

**摘要:**在配置有接地消弧装置的中性点不接地配电系统中,消弧装置动作过程能够导致线路电压骤变,从而可能引起电磁式电压互感器(PT)产生铁磁谐振,对设备和系统造成重大危害。为了避免铁磁谐振影响,需要对接地消弧装置产生谐振的机理进行研究。通过分析中性点不接地配电系统结构,并结合接地消弧装置动作过程,研究了接地消弧装置动作对配电系统运行参数的影响。研究了 PT 铁磁谐振原理,并结合接地消弧装置动作特性对消弧装置导致 PT 铁磁谐振的机理进行了理论分析。提出了一种基于谐振回路特性和铁芯励磁特性的能够表达谐振非线性过程的迭代计算方法,通过 MATLAB 对铁磁谐振进行了仿真。结果说明表明接地消弧装置能够导致 PT 铁磁谐振,谐振的类型受线路对地电容大小的影响,大多数情况下产生的是分频谐振。

**关键词:**接地消弧装置;电磁式电压互感器;铁磁谐振;中性点不接地系统;励磁特性

**文章编号:**2096-4633(2019)08-0088-05 **中图分类号:**TM45 **文献标志码:**B

我国 10 kV 以下等级配电系统普遍采用中性点不接地运行方式,在单相接地故障发生后可以维持运行 2 小时。但是随着配电网的不断发展和配电电缆的应用,配电系统对地电容电流不断增大,导致单相接地故障点的故障电流幅值不断上升<sup>[1]</sup>。因此故障点电弧难以自行熄灭,容易造成故障恶化,仅仅采用消弧线圈接地无法满足要求,需要采取额外的消弧措施。许多文献提出了相应的消弧手段,其中接地消弧装置是一种可行的方式<sup>[2-4]</sup>。

接地消弧装置动作会导致配电系统状态发生变化,可能导致母线上电磁式电压互感器(PT)发生铁磁谐振。PT 铁磁谐振是非线性过程, Peterson 提出了基于 PT 额定感抗和线路容抗的谐振判定依据<sup>[5]</sup>,文献[6-10]采用仿真软件搭建配网模型对谐振过程进行仿真分析,文献[11-14]提出了考虑 PT 铁芯饱和和非线性过程的理论分析方法。文献[15]基于仿真软件,对开关型消弧装置的动作进行仿真,验证了装置动作能够导致铁磁谐振。目前对于接地消弧装置导致 PT 铁磁谐振的研究较少,且采用的是软件仿真的方法,缺乏具体的理论分析<sup>[16]</sup>。

本文考虑 PT 铁芯励磁特性和谐振回路特性,对接地消弧装置导致 PT 铁磁谐振的原理进行理论分析,基于理论分析结果提出了一种能够表达谐振过程的方法,并在 MATLAB 平台进行验证。

## 1 PT 铁磁谐振产生原理

### 2.1 铁磁谐振回路的产生

为了对配电系统的各相电压进行测量,母线上往往会安装电磁式电压互感器(PT),并采用一次侧 Y 型连接和中性点接地的方式,对于安装有接地消弧装置的中性点不接地配电网,其结构如图 1。

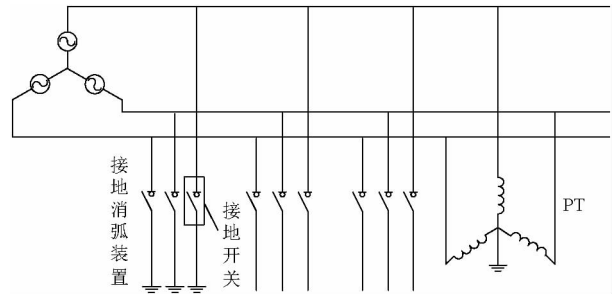


图 1 配电网结构图

Fig. 1 Structure diagram of the distribution system

单相接地故障发生后,消弧装置接地开关闭合,提供金属性接地,将故障点的电流进行转移。随后需要对故障类型进行判定,在瞬时、永久性故障判定过程中,需要断开接地开关,以检测线路电压电流是否平衡。如果单相接地故障是瞬时性故障且在接地开关断开前已经消失,则接地开关开断过程可以视为金属性接地故障的瞬间消失。

接地开关断开前,电容电流通过接地开关流入

大地,对地电容与接地开关形成回路,A 相发生故障的电容电流流向如图 2 中实线所示。接地开关断开后,由于配电网中性点不接地,对地电容只能与 PT 铁芯构成回路,通过 PT 铁芯释放电容电流,如图 2 中虚线所示。由于非故障相的电压在接地开关断开后会由线电压瞬变为相电压,线路对地电容中储存的能量只能通过 PT 铁芯进行释放,因此形成了铁磁谐振回路,电容放电等效电路如图 3。

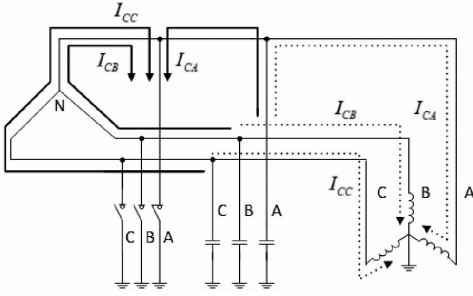


图 2 电容电流流向图

Fig. 2 Flow diagram of capacitance current

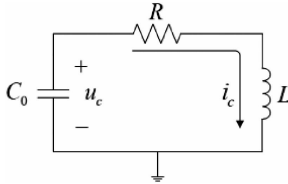


图 3 非故障相对地电容放电等效电路

Fig. 3 Equivalent releasing circuit of line-to-ground capacitance of non-fault phase

对图 3 电路运用基尔霍夫定律,可以得到:

$$LC_0 \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC_0 \frac{du_c}{dt} + u_c \quad (1)$$

$$i = -C_0 \frac{du_c}{dt} \quad (2)$$

电容放电前铁芯励磁电抗很大,流通的电流很小,忽略该电流则谐振回路电流可以表示为<sup>[19]</sup>:

$$i = \frac{U_c}{L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (3)$$

其中有:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{C_0 L} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (4)$$

$C_0$ 代表对地电容的幅值, $L$ 代表 PT 铁芯电感, $R$ 代表铁芯的等效电阻。对于一般的 PT,满足  $R < \sqrt{L/C}$ ,则电容放电产生的是震荡衰减的电流,且衰减时间较长。对于该谐振回路,电容放电电流可以等效于铁芯的励磁电流。设  $R = 2\ 000\ \Omega$ ,

$L = 7\ 353\ \text{H}$ ,  $C_0 = 0.22\ \mu\text{F}$ ,  $U_c = 6\ \text{kV}$ ,不考虑铁芯饱和的励磁电流如图 4。

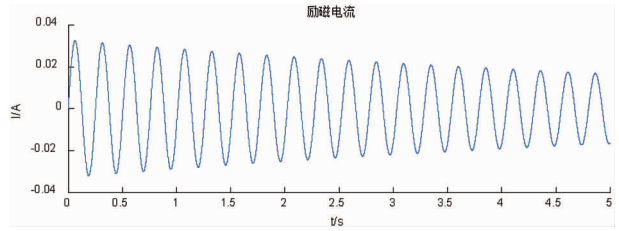


图 4 铁芯励磁电流

Fig. 4 Exciting current of iron core

### 2.3 PT 铁芯的饱和

PT 铁芯的励磁特性是非线性的,在具备铁磁谐振回路的基础上,如果铁芯上受到过电流和过电压的激励导致铁芯励磁特性进入饱和区域,则铁芯的感抗将迅速下降,从而进一步促进过电流和过电压的发展,直至谐振回路中的电感与电流参数相匹配,最终导致谐振的产生。

对于接地消弧装置导致的谐振回路,在图 4 励磁电流的第一个上升阶段内,如果励磁电流不能达到铁芯的饱和电流幅值,根据励磁电流的衰减性质,那么铁芯无法饱和,谐振无法发生。如果第一个上升阶段内电流达到饱和电流,那么铁芯电感减小从而导致励磁电流振荡幅值增大,进一步促进励磁电流的上升和铁芯电感的减小。这个过程同时会导致电流振荡频率的增大,导致电流提前进入下降阶段,此时励磁电感值逐渐增大,频率逐渐减小,直到再一次进入电流上升阶段。在谐振回路电阻较小电流衰减较慢的情况下,以上过程周期性进行,当参数匹配时就能够产生稳定的铁磁谐振。

铁芯的励磁特性可以通过实验测得,并根据实验结果画出  $I - U$  励磁特性。在励磁电流未进入饱和区域时,  $I - U$  可视为正比例函数,说明励磁感抗为常数。随着励磁电流增大进入饱和区域,  $I - U$  曲线斜率不断下降,说明励磁感抗也在不断减小。随着励磁电流进一步增大而进入深度饱和区域,此时  $I - U$  曲线斜率变化速度明显下降,说明励磁感抗下降速度明显降低。

对于未饱和区域和深度饱和区域,可以使用线性函数进行拟合,对于饱和区域,可以根据磁化特性具体情况选择三次或五次多项式进行表达:

$$U = \begin{cases} Ai + B \\ Ai^3 + Bi^2 + Ci + D \\ Ai^5 + Bi^4 + Ci^3 + Di^2 + Ei + F \end{cases} \quad (5)$$

### 3 谐振产生过程分析

#### 3.1 电容放电过程描述

将式(4)带入式(3)中,可知励磁电流由  $R, L, C_0$  和  $U_c$  决定,如果不考虑磁化过程中等效电阻的变化,那么对于给定的配电线路而言,电流只与 PT 铁芯电感有关。对于一般的电压互感器,  $\delta$  对频率的影响很小,忽略该影响则励磁电流可以表达为:

$$i = f(L) = U_c \sqrt{\frac{C_0}{L}} e^{-\frac{R^2}{4L}t} \sin\left(\sqrt{\frac{1}{C_0 L}}t\right) \quad (6)$$

#### 3.2 PT 铁芯饱和过程描述

$I-U$  励磁特性可以用式(5)进行分段表示,那么由  $X_m = U/I$  可知,励磁电流和励磁感抗关系也可以通过分段函数进行拟合。由于铁芯励磁特性曲线是在额定频率下测得的,并且反应的是铁芯的自身物理特性,所以可以由  $I-X_m$  拟合函数直接得到  $I-L$  特性的拟合函数,将铁芯的饱和过程体现为励磁电流和励磁电感之间的关系:

$$L = g(i) \quad (7)$$

$$U = \begin{cases} i - 0.0033 (0 \leq i \leq 1) \\ 0.00063i^5 - 0.015i^4 + 0.14i^3 - 0.6835i^2 \\ + 1.5i + 0.028 (1 \leq i \leq 6) \\ 0.039i + 1.5 (6 \leq i) \end{cases} \quad (9)$$

图 5 中拟合方程曲线图(a)显示的是拟合  $I-U$  曲线,圆圈为实验测量数据,拟合曲线和数据相吻合,说明拟合方程能够体现励磁特性。

#### 3.3 迭代计算

式(6)的放电过程随时间变化,而式(7)的铁芯饱和过程是铁芯的自身属性,与时间无关。因此两个式子无法直接进行比较,可以通过迭代计算进行分析。设迭代初始时刻的状态为  $(t_0, L_0, i_0)$ , 时间增量为  $\Delta t$ , 已知初始状态的情况下首先求出新的时间值,再带入新的时间值求出相应的电流值和励磁电感,如此往复迭代计算对谐振过程的电流及励磁电感随时间的变化情况进行拟合,具体公式为:

$$\begin{cases} t_n = t_{n-1} + \Delta t \\ i_n = f(L_{n-1}) \\ L_n = g(i_n) \end{cases} \quad (8)$$

通过迭代计算,可以实现在同时考虑铁芯磁化非线性过程和谐振回路特性的基础上对铁磁谐振进行分析,能够较为真实地反应谐振的具体情况。

#### 3.4 实例分析

针对某型号 6 kV 电磁式电压互感器,对其励磁特性进行分段拟合,得到拟合方程为:

$$L = \begin{cases} 7353 (i \leq 1.5) \\ -7.608 \times 10^9 i^3 + 2.228 \times 10^8 i^2 - 2.292 \times 10^6 i \\ + 1.031 \times 10^4 (1.5 \leq i \leq 12.3) \\ -73530i + 2574 (12.3 \leq i \leq 35) \\ \approx 0 (35 \leq i) \end{cases} \quad (10)$$

对  $I-U$  拟合方程进行变换,得到  $I-L$  方程,绘图结果为图 5 中拟合方程曲线图(b),拟合方程为:

针对 6 kV 等级配电系统,设置不同的对地电容参数值,进行迭代计算,得到电流波形如图 6,其中迭代计算结果图(a)为分频谐振,迭代计算结果图(b)为基频谐振。

根据迭代结果,高频谐振无法触发,当对地电容小于基频谐振范围后,铁芯将无法饱和从而产生高频振荡,如图 6 中迭代计算结果图(c)。当对地电容大于分频谐振范围后,电流将进行低频振荡,如图 6 中迭代计算结果图(d)。

分析结果可以发现,随着对地电容的增大,系统将逐步经历高频震荡至基频谐振至分频谐振最后到低频振荡的过程,符合 Peterson 曲线的特性,符合谐

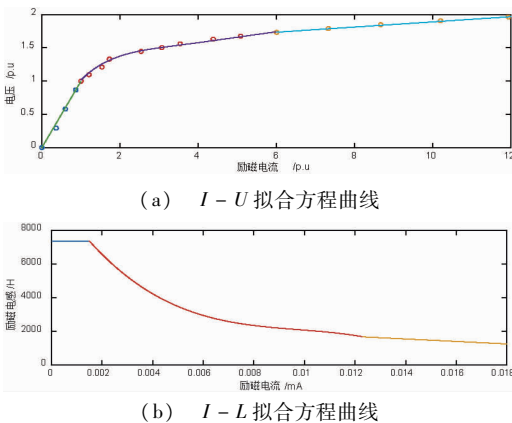


图 5 拟合方程曲线

Fig. 5 Curve of fitting equation

振的基本规律。

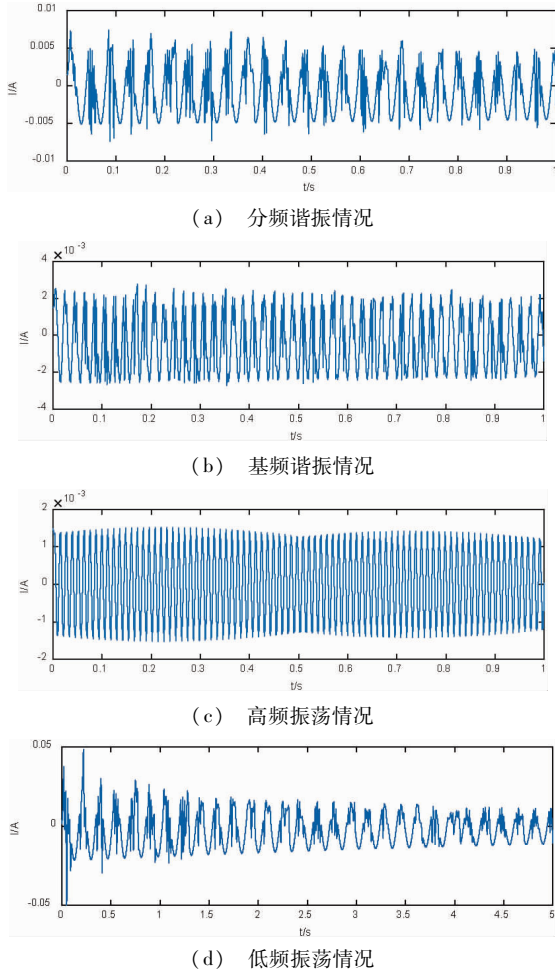


图6 迭代计算结果

Fig.6 Result of iterative computing

## 4 总结

本文针对安装有接地消弧装置的10 kV以下等级中性点不接地配电网,同时考虑PT铁芯励磁特性和谐振回路特性,对接地消弧装置动作导致PT铁磁谐振的机理进行了理论分析。通过将谐振回路特性和铁芯励磁特性用相应的数学公式进行表示,并采用迭代计算的方式将两方面的特性相结合,从而对铁磁谐振的非线性过程进行真实地表达。

通过在MATLAB平台上结合实际PT参数进行迭代计算,证明了本文中采用的理论分析方法和迭代计算方法的正确性。对迭代计算结果进行分析可以发现,接地消弧装置动作最容易引起分频谐振,当系统对地电容较小时也可能激发基频谐振,而高频谐振难以产生。

## 参考文献:

- [1] 王拓. 单端电缆供电线路故障类型判断及保护选择性的研究[J]. 电力大数据,2017,20(12):21-23.  
WANG Tuo. Study on judgment and protection selectivity of single-ended cable power line faults[J]. Power Systems and Big Data, 2017,20(12):21-23.
- [2] 艾绍贵,李秀广,黎炜,等. 配电网快速开关型消除弧光接地故障技术研究[J]. 高压电器,2017,53(03):178-184.  
AI Shaogui, LI Xiuguang, LI Wei, et al. Arc suppression technology based on fast switch for distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2017,53(03):178-184.
- [3] 赵军,阮琦,李景禄. 考虑线路压降的快速接地开关消弧性能及应用[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):1-7.  
ZHAO Jun, RUAN Qi, LI Jinglu. Arc eliminating performance and application of fast grounding switch considering line voltage drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(20):1-7.
- [4] 申文伟,何峰,鲍新,白凡,等. 中性点非有效接地系统电压互感器故障分析与治理措施研究[J]. 高压电器,2018,54(07):200-205.  
SHEN Weiwei, HE Feng, BAO Xin, et al. Study of potential transformer fault and mitigation measures in power system with non-direct grounding neutral point[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(07):200-205.
- [5] 石文江,李春平,王睿,等. 铁磁谐振在调度端的典型特征[J]. 电力系统自动化,2015,39(07):194-197.  
SHI Wenjiang, LI Chunping, WANG Rui, et al. Typical characteristics of ferroresonance in dispatching center[J]. Power System Protection and Control, 2015,39(07):194-197.
- [6] 梁志瑞,董维,刘文轩,等. 电磁式电压互感器的铁磁谐振仿真研究[J]. 高压电器,2012,48(11):18-23.  
LIANG Zhirui, DONG Wei, LIU Wenxun, et al. Simulation analysis on ferroresonance of potential transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(11):18-23.
- [7] 龚庆武,张静,雷加智,等. 基于原子分解法的中性点不接地系统铁磁谐振检测[J]. 电工技术学报,2018,33(05):1114-1124.  
GONG Qingwu, ZHANG Jing, LEI Jiazhi, et al. Detection of ferroresonance in isolated neutral system based on atomic decomposition method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(05):1114-1124.
- [8] 魏菊芳,唐庆华,王飞,等. 小电流接地系统电压互感器铁磁谐振过电压与抑制措施仿真分析[J]. 电网与清洁能源,2015,31(12):48-56.  
WEI Jufang, TANG Qinghua, WANG Fei, et al. Simulation analysis for ferromagnetic resonance of potential transformer and restraining measures in small current neutral grounding system[J]. Power System and Clean Energy, 2015,31(12):48-56.
- [9] 李雷,罗容波,王岩,等. 基于10 kV配电网PT频繁故障的仿真与改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(14):

132 - 137.

LI Lei, LUO Rongbo, WANG Yan, et al. Simulation analysis and improved measures for preventing potential transformer fault in 10 kV distribution networks [ J ]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14) : 132 - 137.

[ 10 ] 林莉, 王军兵, 唐凤英, 等. 10 kV 电压互感器损坏的仿真计算研究[ J ]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17) : 51 - 55.

LIN Li, WANG Junbing, TANG Fengying, et al. Simulation and computational analysis on potential transformer damage in 10 kV system[ J ]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17) : 51 - 55.

[ 11 ] YUNGE LI, WEI SHI, AND FURONG LI. Novel analytical solution to fundamental ferroresonance—Part I: power frequency excitation characteristic[ J ]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 4(21) : 788 - 793.

[ 12 ] 兰华, 王彬, 杨亮, 等. PT 励磁特性对铁磁谐振的影响及检测研究[ J ]. 电测与仪表, 2010, 47(10) : 10 - 14.

LAN Hua, WANG Bin, YANG Liang, et al. Influence of excitation characteristics of PT on ferroresonance and detection research [ J ]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(10) : 10 - 14.

[ 13 ] 刘玉凤, 宋成伟, 吴作元. 开磁路电压互感器防铁磁谐振性能分析[ J ]. 变压器, 2018, 55(08) : 52 - 55.

LIU YUfeng, SONG Chengwei, WU Zuoyuan. Performance analysis of preventing ferroresonance in open-circuit voltage transformer[ J ]. Transformer, 2018, 55(08) : 52 - 55.

[ 14 ] 周默, 孙岩洲. 电网中性点不同接地方式下铁磁谐振的消谐研究[ J ]. 高压电器, 2015, 51(01) : 80 - 85.

ZHOU Mo, SUN Yanzhou. Eliminating ferro-resonance for distribution network with different neutral grounding modes [ J ]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(01) : 80 - 85.

[ 15 ] 刘衍, 龙国华, 周求宽, 等. 开关型消弧激发 PT 过流的试验与仿真研究[ J ]. 高压电器, 2017, 53(02) : 87 - 94.

LIU Yan, LONG Guohua, ZHOU Qiukuan, et al. Experimental and simulation study on over-current of pt caused by switch type arc extinguishing [ J ]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(02) : 87 - 94.

[ 16 ] 吉兴全, 朱仰贺, 韩国正, 等. 中压配电网低频振荡仿真分析及消谐措施[ J ]. 电网技术, 2016, 40(08) : 2451 - 2455.

JI Xingquan, ZHU Yanghe, HAN Guozheng, et al. Simulation analysis of low frequency oscillation and study on resonance elimination measures in MV distribution network [ J ]. Power System Technology, 2016, 40(08) : 2451 - 2455.

收稿日期: 2019 - 02 - 16

作者简介:



杨文勇(1991), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力系统变电设技术研究与管理工。

(本文责任编辑: 范 斌)

## Mechanism analysis of PT ferroresonance caused by grounding-type arc-extinguishing device

YANG Wenyong<sup>1</sup>, LIU Li<sup>1</sup>, DAI Yu<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, GU Zhanji<sup>2</sup>

(1. Bijie Power Supply Corporation of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Bijie 551700 Guizhou, China;

2. Guangzhou Smart Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 510530 Guangdong, China)

**Abstract:** In neutral point ungrounded distribution system that equipped with grounding-type arc-extinguishing device, the action of grounding-type arc-extinguishing device may lead to abrupt voltage change of distribution line and cause potential transformer (PT) ferroresonance, which will make harm to the equipment and the system. In order to avoid the influence of PT ferroresonance, the mechanism of PT ferroresonance caused by grounding-type arc-extinguishing device needs to be studied. The influence on distribution network operation parameters caused by the action of grounding-type arc-extinguishing device is studied by analyzing the structure of neutral point ungrounded distribution system and the sequence of action of grounding-type arc-extinguishing device. The mechanism of PT ferroresonance caused by grounding-type arc-extinguishing device is theoretically analyzed by studying PT ferroresonance theory and the action characteristics of rounding-type arc-extinguishing device. An iterative computing method base on the excitation characteristics of iron core and the characteristics of ferroresonance circuit that can represent the non-linear process of resonance is proposed. Simulation of PT ferroresonance is made on MATLAB and the results show that grounding-type arc-extinguishing device can lead to PT ferroresonance and the type of ferroresonance is influenced by the grounding capacitance and subharmonic ferroresonance happens in most cases.

**Key words:** grounding-type arc-extinguishing device; potential transformer; ferroresonance; neutral point ungrounded system; excitation characteristics