

PEIDIANWANG TIECI XIEZHEN
BIANSHI YU YIZHI JISHU

配电网铁磁谐振 辨识与抑制技术

本书编委会 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

PEIDIANWANG TIECI XIEZHEN
BIANSHI YU YIZHI JISHU

配电网铁磁谐振 辨识与抑制技术

本书编委会 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

配电网铁磁谐振的辨识技术与抑制技术对提高供电可靠性意义重大。本书介绍了铁磁谐振的发生机理、特征及相关规律,以及现有铁磁谐振的信号检测与抑制方法;基于铁磁谐振信号检测与分析,提出了一种新的有效的配电网铁磁谐振的辨识与抑制方法;通过仿真分析,证实了方法的有效性。

本书适合配电网运维技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

配电网铁磁谐振辨识与抑制技术/《配电网铁磁谐振辨识与抑制技术》编委会编. —北京:中国电力出版社, 2019. 3

ISBN 978-7-5198-2946-9

I. ①配… II. ①配… III. ①配电系统-谐振过电压-研究 IV. ①TM86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 024915 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:刘 薇 (010-63412357)

责任校对:黄 蓓 常燕昆

装帧设计:左 铭

责任印制:石 雷

印 刷:三河市万龙印装有限公司

版 次:2019 年 3 月第一版

印 次:2019 年 3 月北京第一次印刷

开 本:710 毫米×1000 毫米 16 开本

印 张:4.75

字 数:68 千字

印 数:001-500 册

定 价:25.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社营销中心负责退换

本书编委会

主 编 刘 方

副主编 车晓涛 王晓辉 陈上吉 曾祥君

编 委 赵发平 刘 凯 余彦杰 喻 锟 刘 然 焦卫星

陈 帆 周 燕 李展高 崔 凯 李晨露 刘丽丽

刘卫民 李雅琳 贾梦青 袁闪闪 杨世辉 郝文怡

李 理 濮汝钦 宁 奎 张小涛 熊乐乐 皇甫武军

王 磊 叶 青 尚 德 任幼逢 卢 淼 王朝乐

王精华 韩善起 李 婷 游 丹 和小波 冯博修

陈炳杰 张 静 刘海东 江 疆 郑 雷 钟代宁



前言

为提高供电连续性,我国 35kV 及以下配电网多采用中性点非有效接地方式。这种接地方式下电压互感器铁芯饱和所引起的铁磁谐振过电压是最常见、引发事故最多的内部过电压之一。中性点直接接地系统,由于某些不适当的倒闸操作与重合闸可能会短时运行在中性点非有效接地方式下,同样也会产生铁磁谐振过电压。铁磁谐振发生时,伴随着长时间的过电压与过电流,其中低频谐振的涌流甚至可达额定励磁电流的上百倍,极大地威胁了电网的安全稳定运行。研究配电网铁磁谐振的辨识与抑制技术对提高供电可靠性意义重大。

本书介绍了铁磁谐振的谐振机理,归纳总结铁磁谐振的特征及相关规律,在此基础上分析电网谐波治理与检测的思路,提出基于小波变换与傅里叶变换的铁磁谐振信号检测新方法,实现谐振起振时刻的精确确定,并辨识出低频与高频铁磁谐振。另外,本书还分析了基频铁磁谐振和单相接地故障的电压与系统对地阻抗的特征,分析介绍基于注入电流法测量系统阻抗的基频铁磁谐振辨识新方法;并在此基础上,提出基于零序电压柔性控制的铁磁谐振抑制新方法,通过注入幅值、相位可控的零序电流,实时跟踪控制配电网中性点电压为零,吸收电网零序暂态能量,释放线路对地电容的多余电荷,抑制过电压,从根源上消除铁磁谐振。

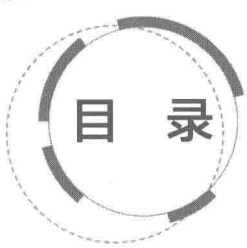
仿真结果表明，本书中所提的铁磁谐振信号检测方法能够准确确定铁磁谐振发生时刻，并实现高频与分频铁磁谐振的有效辨识；基于系统阻抗比较的基频铁磁谐振辨识方法可对基频铁磁谐振实现有效辨识；基于零序电压柔性控制的铁磁谐振抑制方法仅需短时注入零序电流，即可强迫配电网脱离铁磁谐振状态，抑制零序电压为零。

本书由国网河南省电力公司洛阳供电公司和长沙理工大学组织相关领域专家编写。由于编者知识水平有限，本书难免存在疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者
2019 年 2 月

符 号 说 明

C—电容器	ω —角频率、角速度
L—电抗器、消弧线圈	λ —系数
R—电阻器	ψ —磁链
T—变压器	μ —系数
TA—电流互感器、自耦变压器	t —时间
TN(T _n)—中性点接地变压器	Δ —判别式、算子
TV—电压互感器	A、B、C—三相高压侧
f —频率	a、b、c—三相低压侧
$G(g)$ —电导	f —故障
H —磁场强度	e—接地
I —交流电流有效值或直流电流	N—中性点
i —交流电流瞬时值	n、O—低压侧中性点
U —交流电压有效值或直流电压	r —电阻
u —交流电压瞬时值	P —有功功率
W —磁场能量	Q —无功功率
X —电抗	PWM—脉冲宽度调制
Y —导纳	DC—直流
Z —阻抗 (复数)	AC—交流
δ —初始角	n_1 、 n_2 —互感器变比
Φ —磁通	α —初始相角



目 录

前言

符号说明

第1章 概述 1

- 1.1 铁磁谐振现象 1
- 1.2 铁磁谐振现象分析 2
- 1.3 铁磁谐振辨识技术 4
- 1.4 铁磁谐振信号检测方法 6
- 1.5 铁磁谐振抑制方法 8

第2章 铁磁谐振的基本原理 10

- 2.1 单相铁磁谐振基本原理 10
- 2.2 三相铁磁谐振基本原理 15
- 2.3 新能源并网对配电网铁磁谐振影响分析 18

第3章 铁磁谐振信号检测与分析 23

- 3.1 铁磁谐振机理仿真验证分析 23
- 3.2 谐振信号的检测原理 26

3.3 仿真分析	29
----------------	----

第4章 配电网铁磁谐振辨识方法	32
------------------------------	-----------

4.1 基频铁磁谐振的电压特征	32
4.2 单相接地故障的电压特征	36
4.3 基频铁磁谐振的零序电压特征辨识方法	38
4.4 基于系统阻抗比较的基频铁磁谐振辨识方法	39
4.5 基于相模变换的铁磁谐振非线性网络的辨识	41

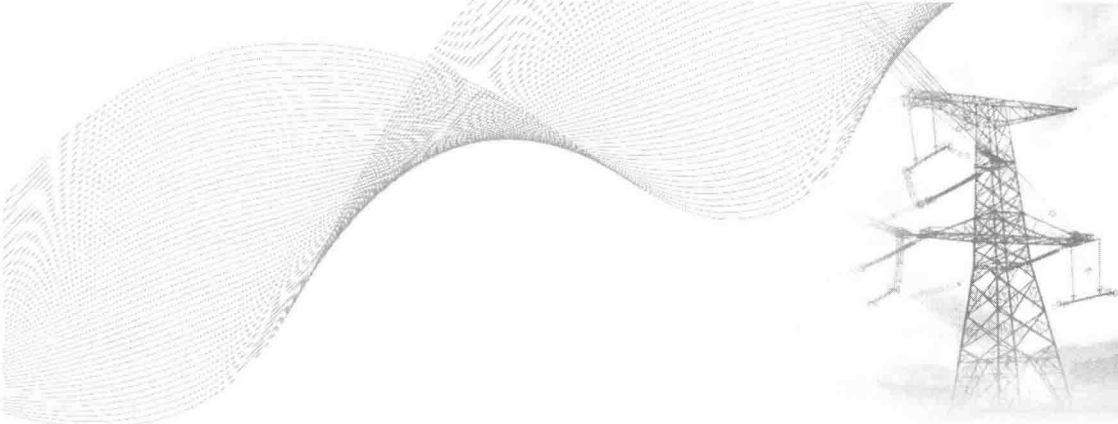
第5章 配电网铁磁谐振抑制方法与仿真分析	44
-----------------------------------	-----------

5.1 传统铁磁谐振抑制方法	44
5.2 配电网铁磁谐振过电压柔性抑制实现	47
5.3 仿真分析	51

附录A 10kV 配电网铁磁谐振检测信号特征提取 MATLAB 程序	58
---	-----------

参考文献	60
-------------------	-----------

后记	65
-----------------	-----------



第1章 概 述

1.1

铁磁谐振现象

电力系统在一些异常情况下常出现过电压现象，这些异常情况一般包括雷击、断线、短路、弧光接地以及各类操作等^[1-3]。但是仍有相当大一部分过电压由线路或其他电力元件之间参数匹配引起的谐振引起。通常电力系统的谐振分三种类型：①参数谐振，电路中电感参数周期变化（如由水轮机的交直流电感差别引起的谐振）；②线性谐振，电感参数近似为线性（通常电容参数不发生变化）；③铁磁谐振，在一定冲击条件下回路中带铁芯元件发生饱和，显现出非线性性质，并与回路电容元件匹配，产生的谐振现象。研究表明，如果电力系统中有某个扰动的能量足够使回路中的带铁芯元件达到饱和状态，并致使其等效励磁电感呈现非线性性质，那么该等效励磁电感就可能与回路中的容性设备在某一频率下匹配，并发生谐振，引起过电压。通常这类事故较为隐蔽，且容易与接地故障等混淆，难以“对症下药”；有供电企业曾发现 220kV 变电所内电压互感器引起的铁磁谐振。再者，随着电网结构日趋复杂及分布式电源的接入，未来配电网铁磁谐振的问题将会越来越突出，越来越复杂。

中性点非有效接地系统中，为了实时监测电网运行状态，实现保护控制的功能与采集相关的电气数据，电厂与变电站通常会装设电压互感器测量母线电压，互感器一般采用三相五柱式，要求较高时可采用三个单相互感器。电网正常运行电能质量满足要求时，三相电压基本平衡，电压波形不发生畸

变,此时,电网中性点位移小,零序电压很小甚至为零。当某些激励(切换操作、接地故障发生或消失)发生后,电流互感器的铁芯可能在暂态电流的冲击下饱和造成励磁电感下降,下降到一定程度后就可能与线路的对地电容形成谐振回路,从而引发铁磁谐振。由电流互感器铁芯饱和引发的铁磁谐振是中性点非有效接地电力系统最常见的、同时也是造成事故最多的内部过电压。

如果电力系统的中性点直接接地,中性点与大地保持等电位,中性点电压为零,电路中三相电源始终平衡,互感器绕组与三相电源电势相连,回路中各点的电位均被固定,因此上述的激励不会引起电流互感器的铁芯饱和,一般情况下中性点直接接地系统不易发生上述的铁磁谐振现象。这种情况也可以通过另外一种方式加以解释:铁磁谐振的实质是扰动产生的暂态能量没有有效的释放途径,导致大量电荷汇集在线路对地电容等容性设备上,从而形成过电压。因此搭建合适的电荷泄漏途径可有效抑制铁磁谐振的发生。在中性点直接接地系统中,扰动产生的电荷可快速地经过中性点注入大地,所以不会发生铁磁谐振。但实际工程中,即便是在中性点直接接地的电网中,也曾发生过铁磁谐振的现象。经分析后发现,造成中性点直接接地系统发生铁磁谐振的原因是,电网的优化运行对电网重构的倒闸操作、故障后的切除等操作将中性点直接接地电网短时运行在不接地状态下,从而出现电压互感器引起的铁磁谐振现象。

工程实践表明,铁磁谐振不仅频繁出现在中性点非有效接地的配电网中,甚至在中性点直接接地电网中也时常发生。而伴随铁磁谐振出现的长时间的过电压与过电流,极易造成电气设备绝缘击穿、损毁甚至爆炸,严重时可能引发连锁事故,引起火灾,造成人员伤亡等损失,极大地威胁了电网的安全稳定运行。因此,铁磁谐振一直以来都颇受关注,加强对铁磁谐振的抑制研究意义重大。

1.2 铁磁谐振现象分析

针对铁磁谐振现象,国内外学者进行了大量的研究分析,近年来取得了

较丰硕的成果。学者们采取了包括理论研究、实验分析与计算机仿真计算在内的多种手段,从不同的角度阐述了铁磁谐振的谐振机理与相关规律。基于这些理论成果,学者们也提出了一系列的铁磁谐振抑制方法,开发了大量的消谐装置,并在实际的运行过程中取得了较好的效果。文献[5]对铁磁谐振的谐振机理进行了数学描述,分析了铁磁谐振的发展过程与形成条件,对几种典型的铁磁谐振接线方式进行了介绍说明,比较了现有的几种铁磁谐振抑制方法,是国内最早对铁磁谐振现象进行详细说明的文献资料。文献[6]提出了两种铁磁谐振分析方法:增量描述函数法和谐波平衡法,对于非线性程度较小的情况,这两种方法均比较实用,但非线性度较大的时候就显现出了它们的局限性。铁磁谐振实验分析在实验分析方面起步较早,在20世纪40年代初就有科学家对铁磁谐振进行了全面的实验分析,并根据实验结果,分析了影响谐振的因素,并给出了铁磁谐振各频率的区域图。在同一领域内,国内学者也取得了较大进步,实验模拟了铁磁谐振的产生、发展的过程,进一步揭示了铁磁谐振的实质与内在规律,学者们在实验分析的基础上,研制出了部分消谐装置^[7-10]。

国内外关于铁磁谐振的理论研究和计算包括如下几个方面:

(1) 在早期,铁磁谐振产生机理多采用图像法和相平面分析法进行定性分析研究,这类方法实现简单、易懂,与实验分析相结合后往往能取得较好的效果,应用较广泛。然而这类方法计算过于简单粗略,依靠图解或实验手段获得的数据精度欠缺,且研究对象局限于单相RLC的非线性谐振电路,对于谐振中出现的某些现象不能提供较好的解释,随着科技的进步,电网运行要求的进一步提高,这类方法已无法满足研究的需要。

(2) 20世纪60年代,为更精确地解释铁磁谐振现象,学者们将非线性研究方法引入铁磁谐振分析中,较常见的有描述函数法、谐波平衡法等。这类方法较早期的图像法精度更高,但仍然是一种近似解法,求解的对象也仅仅局限于稳定状态的分析,不能完成暂态分析,有较大缺陷。

(3) 进入80年代后,国外学者结合混沌理论与非线性动态系统的特点,将混沌理论应用于铁磁谐振的分析计算,将电网铁磁谐振分为周期、非周期

与混沌三类响应,并指出电力系统在某些特定条件下也会存在混沌现象。国内司马文霞教授在这方面做了大量工作,首次将反馈脉冲混沌理论引用到中性点接地系统的铁磁谐振研究中来,并成功确定了驱动系统和响应系统,推进了铁磁谐振理论研究的进步,具有一定的应用前景。

(4) 近年,计算机数字仿真技术在电力系统稳暂态研究中应用越来越广泛。现有比较典型的仿真软件包括 EMTP、MATLAB、PSCAD 等,通过这类仿真软件可以方便地搭建出电网三相仿真模型,快速地进行暂稳态计算与仿真,结果精确,是目前进行研究的主要手段之一。EMTP 软件经过多年的发展,已获得国际上的认可,但其必须在 DOS 操作系统下完成,元件模块不完整,编写困难,仿真不便。为解决这一难题,出现了 ATP-EMTP 的改进版,改版软件操作简便。大型数字仿真软件 MATLAB 元件库包含大量的函数模块与元件模型,普通的仿真要求基本能够实现,也正是这些优点,目前在电力系统仿真中也应用的极为广泛。

1.3 铁磁谐振辨识技术

研究表明,多种操作和故障都可能引起工频过电压,常见的有铁磁谐振、三相不平衡、接地故障等^[20]。工频过电压有其显著特征,其次是识别难度大,工频过电压一般持续时间长,如果不采取措施加以消除极有可能引起连锁故障,引发大事故,使电网蒙受巨大经济损失,情况严重的甚至会造成人员伤亡,是危及电网安全稳定运行的主要因素之一。因此,快速、准确在线的辨识出故障类型是采取主动措施消除工频过电压的前提和基础。

对工频过电压进行准确的区分别别仍然是目前的研究难点之一,主要原因是这些不同触发因素所导致的工频过电压具有相当高的相似性。对于稳态特征,在某些参数条件下,几种过电压有可能表现出高度相似的三相电压幅值与相位特征而难以区分^[21]。对于暂态特征,考虑到谐振过电压往往由其他类型故障或操作引起,若其触发因素为一个持续时间较短的不对称短路引起,

则其暂态特征也会与不对称短路工频过电压高度相似。对于中性点不接地系统,单相接地故障与铁磁谐振故障发生后,三相稳态电流往往不会出现明显变化,而不适合作为识别判据。作为铁磁谐振的主要特征之一,非线性励磁电感在饱和时的电流波形与正常状态时有较大区别,但是考虑到在设备老化的情况下,励磁电感由于匝间短路而导致电感线性范围缩小,因而会在幅值较高的不对称短路过电压下出现饱和而未谐振的现象,因此饱和电流也不适合作为谐振过电压的识别判据。从分析可以看出,从常规的电压电流信号特征之外,寻找更有效的工频过电压识别判据,是影响该识别研究进一步深入并投入应用的主要障碍之一^[22,23]。

现有文献大多集中在对单相弧光接地故障和基频铁磁谐振的辨识上。在暂态信号处理方法上,文献[24]利用分形理论研究了单相接地、串联谐振以及铁磁谐振三类故障的零序电压电流暂态波形分维数特征,该方法对硬件要求低,能够满足电网参数变化的要求。但该方法同时也存在一定的缺陷,在条件恶劣的情况下,测得波形发生畸变后极易引起误判;另外,文中也没有给出具体的辨识判据。文献[25]利用形态滤波方法提取了零序电压标幺值的奇异信号,并通过与预设阈值进行比较,实现了对单相弧光接地故障和金属性接地故障的有效识别;文献[26]利用5层sym4小波分解得到的d5层细节系数阈值来进行铁磁谐振和单相接地故障辨识,这种方法采用了三种特征量实现铁磁谐振的辨识,结果更加可靠,但文中对三种特征量之间的权重并没有进行说明,各特征量冲突是如何处理也未进行说明;文献[27]通过S变换理论进行暂态故障特征量提取,并采用支持向量构建了模糊专家系统来进行过电压识别,针对几种过电压混合出现的情况,该文采用原子分解算法构建了混合过电压分解系统,实现了混合过电压的分解和识别;暂态信号处理方法虽然能够取得较好的故障辨识效果,但是该方法依赖于高速数据采样,采样频率达到MHz级,数据的存储和处理需要大容量的存储器,由于计算带来的延时也相对较大,因此无法应用于实时控制系统。

在稳态信号处理方法上,文献[28]提出了基于零序电压、三相电压的幅值和相位综合比较的方法进行单相接地故障和基频铁磁谐振的辨识;该方

法能够对大部分铁磁谐振和单相接地故障进行有效辨识,但是其存在较大的辨识盲区,即便是除去文中罗列的盲区外,仍有可能出现误判的情况。文献[29]提出采用等面积法则进行铁磁谐振辨识,将等面积法则引入到铁磁谐振的辨识中来,为铁磁谐振辨识提供了一个新的方法。

针对中性点非有效接地系统的故障相辨识问题,文献[30]通过构造新的相矢量来进行接地相辨识,实现了在电网电压不对称条件下接地故障相的辨识。注入电流方法在检测电网对地阻抗参数和故障选线方面也具有一定优势,文献[31]通过从消弧线圈二次绕组注入变频电流的方法进行电容电流测量和高阻接地故障识别,并对注入电流频率进行了限定,以避免与系统阻抗发生谐振;文献[32]通过二次侧注入特定频率电流信号的方法来检测系统对地阻抗,从而进行单相接地故障和基频铁磁谐振的辨识。

从现有参考文献可以看出,基于暂态信号的故障识别方法虽然可以取得较高的故障识别精度,但是采样频率高、数据处理量大的问题限制了该方法在实时控制系统中的应用;基于稳态信号的方法可以满足实时故障识别的要求,但是存在辨识准确率偏低的问题;注入电流方法可以兼顾实时性和准确率的要求,但是对于混合过电压故障以及故障相识别方面还鲜有报道。

1.4 铁磁谐振信号检测方法

铁磁谐振过电压是中性点非有效接地配电网最常见、造成事故最多的内部过电压之一。国内外学者利用多种手段和方法从不同角度阐述了铁磁谐振的起振、发展与自维持等过程,揭示出了铁磁谐振的相关规律。

根据谐振频率,铁磁谐振可分为高频铁磁谐振、基频铁磁谐振和分频铁磁谐振。通常,频率越高,过电压幅值越大,频率越低,涌流电流越大,因此高频与低频铁磁谐振带来的危害更大。铁磁谐振是由非线性电感的饱和引起,因此其电路方程是非线性的微分方程,求解困难,目前尚未有有效的解决方法^[33-35]。

铁磁谐振检测更多的是针对分频与基频的检测,而基频铁磁谐振与单相接地故障造成的电压电流特征极为相似,检测意义并不大。因此,现有的铁磁谐振检测方法与电网谐波检测方法具有相似性。

早期的铁磁谐振检测大多基于频域理论,采用的是模拟滤波原理。该方法优点比较明显,主要表现在实现简单、性价比高、输出的阻抗低,且品质因素控制方便;不足之处是对元件参数敏感,易受外界的影响,鲁棒性不强,电路的中心频率受影响后理想幅频相频特性难以满足,检测精度易受电网频率波动的影响,且检测的结果中基频分量含量高,要实现多次谐波的检测时,电路将变得极为复杂,运行损耗与参数设计的难度急剧上升^[36]。

文献[37]提出了基于瞬时无功功率理论与广义 $d-q$ 旋转坐标变换的谐波检测方法,该方法最初在三相电路的谐波检测中应用,现在则广泛地应用于有源电力滤波中。该方法的优点是电网正常运行,即三相电压对称、电压波形无畸变时,正序基波不对称分量、无功分量以及高次谐波检测实现简便,且检测延时小,实时性能好。但这种理论是基于三相电路提出的,应用于单相电路时,首先要分解三相电路成单相,然后重构,过程比较繁琐,实现过程比较复杂。

文献[38]提出了基于 FFT(快速傅里叶变换)变换的谐波检测法。FFT 作为目前应用最为普遍的谐波检测方法,诸多的学者发表了不计其数的文献。该项技术发展到现在已经比较成熟。当然,随着应用的进一步推广,该方法也逐渐暴露出了一些问题(如频谱泄漏),但仍不失为谐波检测的最普遍最有效的方法之一,在基频整数倍的谐波检测中尤为突出。

文献[39]提出基于神经网络的谐波检测方法。该方法计算量小,且具有较高的检测精度,其各次谐波的检测精度并不比 FFT 和小波变换差,因此,应用该方法进行检测通常能够取得满意的效果。相对于小波变换和 FFT 变换而言,基于神经网络的谐波检测方法对数据流长度的敏感性更低;此外该方法还具有较好的实时性,能够实时完成任一次谐波的检测,具有较强的鲁棒性和抗干扰能力,可在工作过程中借助一些随机性的信号处理方法,完成非有效信号的滤除,克服噪声污染,提高检测精度。

文献 [40] 提出小波变换的检测方法, 小波变换是 20 世纪 80 年代兴起的一种数学变换, 近些年在国内外掀起了一股小波变换的研究热潮, 该方法也已经应用于多个领域, 并取得了良好的效果。小波变换实际上类似于滤波器, 但相对于普通的滤波器, 它具有良好的时频局部特性, 能具体地分析某一频段的信号, 因此又具有“数学显微镜”的美誉。小波变换对不平稳信号的分析效果十分突出, 然而对于稳定信号, 不具备明显的优势。此外, 小波母波的选取对小波变换结果影响巨大, 如何选取合适的母波, 以及如何做好分频严格、能量集中的小波函数是目前小波变换应用中的难题。

1.5 铁磁谐振抑制方法

基于铁磁谐振的谐振机理与内在规律的研究, 国内外学者为消除铁磁谐振的危害, 提出了一系列的铁磁谐振抑制方法, 并开发了相应的配套软件。现有抑制方法根据抑制的原理可分为两类:

(1) 在铁磁谐振发生时或发生后通过消谐装置, 消耗谐振的能量使谐振不能持续而达到抑制或消除铁磁谐振的目的, 如文献 [15] 提出, 在互感器一次侧中性点或者开口三角侧安装阻尼电阻, 消耗扰动产生的暂态能量, 该方法直接有效, 早期应用广泛, 但该方法对电压互感器的容量和非线性电阻的非线性特性要求较高, 实际中易出现非线性电阻烧毁事故; 文献 [16] 提出消谐器抑制铁磁谐振的方法, 该方法对分频高频铁磁谐振抑制效果明显, 但受现有的辨识技术对单相接地故障与基频铁磁谐振辨识准确率不高的局限, 为了避免单相接地故障时误动作加剧故障, 给电网带来更大损害, 这类消谐器通常牺牲基频谐振的抑制能力来满足其选择性, 实际应用中的功能有待进一步提高。

(2) 改变电网参数, 使电网电容即便在电压互感器铁芯饱和时也远离谐振区, 从而预防铁磁谐振的发生, 典型的方法有 4TV 接线方式^[17], 该方法实际上是将零序电压一部分分担到第 4 个电压互感器, 以提高电压互感器的抗